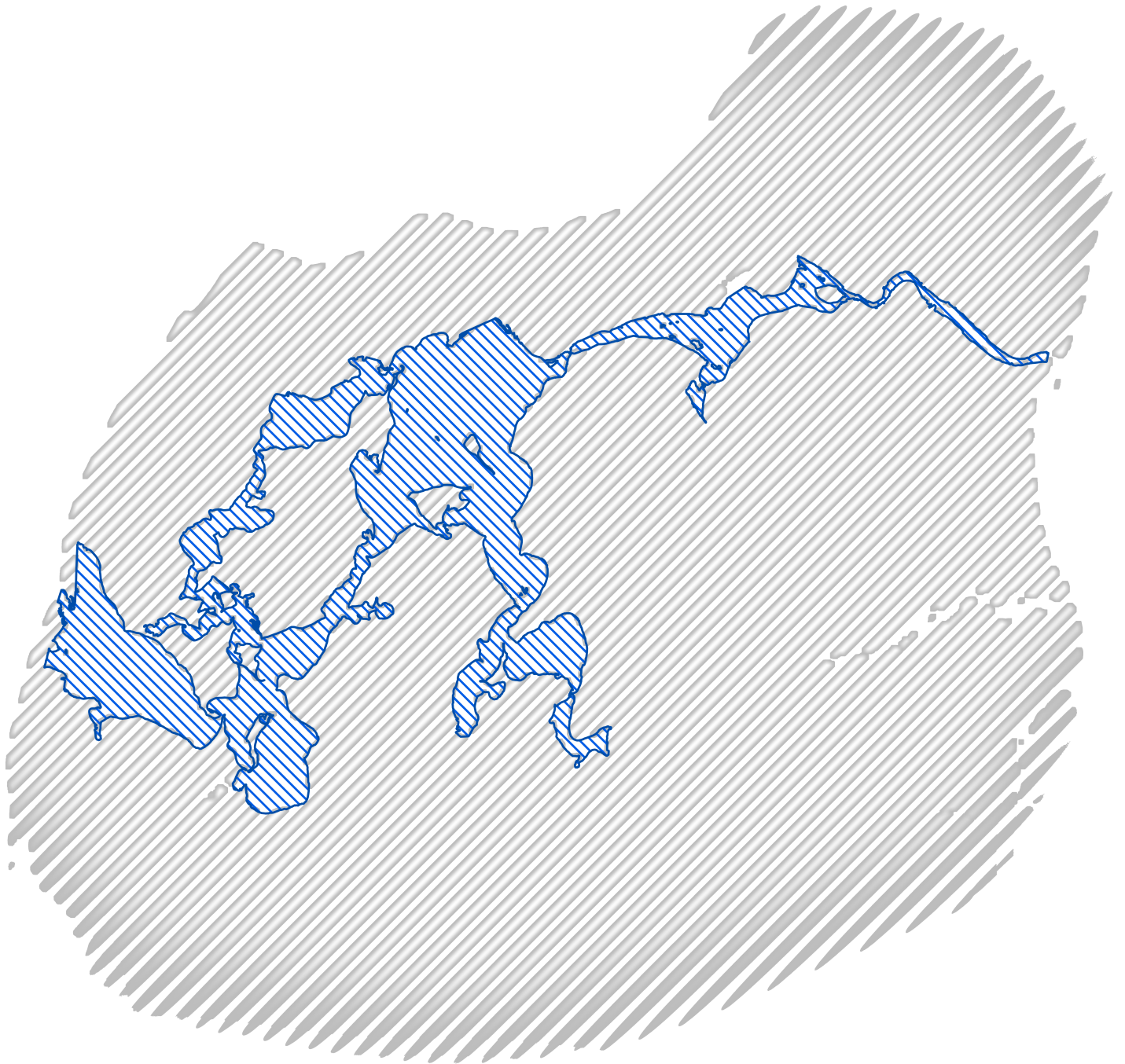


STORMFLODSSIKRING AF LIMFJORDEN

ved Lukning af Thyborøn Kanal

Kandidatspeciale 2016



Byggeri & Anlæg - Vand & Miljø - Aalborg Universitet

af: Kåre Bjerre, Johny D. Antony & Max J. Friis



AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

Det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet

Institut for Byggeri og Anlæg
Sofiendalsvej 9-11
9200 Aalborg SV
Telefon: 99 40 84 84
<http://www.byggeri.aau.dk/>

Titel: Stormflodssikring af Limfjorden
Tema: Lukning af Thyborøn Kanal
Projekt periode: Speciale 2016
Projekt gruppe: VM5
Gruppemedlemmer:

Johny Dilan Antony

Kåre Bjerre

Max Jacob Friis

Vejledere:

Thomas Ruby Bentzen & Torben Larsen

Printede versioner: 4

Antal sider: 138

Siders Bilag: 101 + Bilags CD

Afsluttet den: 09-06-2016

Synopsis:

Projektet omhandler Limfjorden, beliggende i den nordlige del af Jylland. Det er undersøgt, om en stormflodssikring opført ved Thyborøn kan mindske ekstrem vandstande inde i Limfjorden under storme, baseret på Kystdirektoratets Løsningsforslag. I projektet har især områderne ved Løgstør og Skive været i fokus, da disse bliver udsat for oversvømmelser ofte. Udvalgte løsningsforslag er simuleret i en simpel boksmodel opbygget af projektgruppen og en kommerciel model opbygget i Mike Zero. Begge modeller returnerer sænkninger af ekstrem vandstanden ved løsningsforslagene. Derudover er ekstremvandstandene også undersøgt ved en klimafremskrivning. Ud over dette er også vandkvaliteten blevet simuleret i to modeller, som er bygget oven på de to hydrodynamiske modeller. På den simple model er der påbygget en simpel empirisk model, med udgangspunkt i tidligere studier, som viste, at denne type model er bedre til at gengive næringsstoffkoncentrationen end semideterministiske modeller. På den mere avancerede model er der påsat en ECO-lab model, som gengiver næringsstofferne samt iltkoncentrationer i systemet. Modellerne viste at der ville komme en lille forskel i næringsstoffkoncentrationen ved opførelse af en ny stormflodsbarriere, mens den ved mindsket udledninger af næringsstoffer ville blive bedre, med hensyn til ålegræsdybden.

Rapportens indhold er frit tilgængeligt, men offentliggørelse (med kildeangivelse) må kun ske efter aftale med forfatterne.

Forord

Denne rapport er udviklet som speciale i Det Naturvidenskabelige Fakultet for Aalborg Universitet, inden for byggeri og anlægs Vand og miljø linje. Projektet er skrevet af projektgruppe VM5 med aflevering sommeren 2016, under vejledning af Associate Professor Thomas Ruby Bentzen og Professor Torben Larsen.

Specialet er valgt til at omhandle stormfloder i Limfjorden, og hvordan det kan forhindres at disse oversvømmer store bebyggede områder langs Limfjordens kyster. Endvidere er også vandkvaliteten undersøgt, ud fra gældende lovgivning og planer, i Limfjorden. Alt dette er modelleret med henblik på eksisterende løsningsforslag for at undersøge sammenhængen imellem de forskellige fokus områder.

Rapporten består af tre hoveddele; en rapport, en bilagsrapport og en bilags CD. Når der henvises imellem delene, er det skrevet i teksten og henvist til med f.eks. (*Bilag A.1 side 1*). Bliver der refereret til bilags CD'en, er det opstillet på samme måde, dog benævnt med (*Bilag E.1.1*).

Kilder anvendt i rapporten er opstillet efter Harvard metoden, med efternavn og år for udgivelsen, hvor der i teksten vil være henvist som [Efternavn,År]. Alle kilderne er oplistet bagerst i rapporten med andre detaljer.

Endvidere er billeder, tabeller og formler opstillet nummeret efter kapitlet og antallet af foregående elementer i kapitlet. Er elementet langt fra referencen, er der opstillet et sidenummer, hvor elementet er.

English summary

This project is based on the storm surges in the Limfjord in Denmark. It has been found that the water level within the fjord can cause floods of the lower regions of the coastal areas. The majority of these areas are of agricultural nature, wherefore the focus areas of this report is the cities where floods often occur. The cities that have been chosen are Løgstør og Skive.

The first part of the report describes where the location of the project is, and the problems that have been in the past. Furthermore this part describes the solutions, which the Danish Coastal Authority has found to lower the water level during future storm surges.

This introduction leads up to the first part of the report, where the water level is described with two different models. These models are afterwards used to simulate different solutions from the introduction, where three solutions have been chosen; expansion of groyne 59, just outside Thyborøn Kanal in the western part of the Limfjord, expansion of groyne 63 within Thyborøn Kanal and a dam with a water gate. The best solution is then used to estimate its effects on water levels in the future with climate changes. It is found that the dam with a water gate is the best solution, and that it will reduce the extreme water levels during storm surges, even in the future with climate changes.

The second part of the report focuses on the water quality in the Limfjord, since the ecological water quality is found to be poor in a majority of the fjord. This part simulates the solutions found in the previous part in order to estimate their impact on the water quality, and the solution from the environmental plan for the Limfjord. The solution recommended in the environmental plan for the Limfjord is a reduction of the nutrient input. The simple model returned a slightly worse water quality, but the more advanced model returned a better quality. The solution from the environmental plan could potentially change the water quality to a higher EQR than it is now. Additionally a simple model for the sediment in the fjord is built in order to estimate the changes of the seabed, with the habitat depth of eelgrass as the focus area, however this is found to not change considerably with any of the solutions from the Danish Coastal Authority in question.

The conclusion of the report is that the solutions for lowering the extreme water level all will have a positive impact on the water level, and that they could have a positive impact on the water quality in the waterbody. Therefore it is found that a combination of suggested solutions for the Limfjord is the best solution. For the water level a dam with a water gate is the best solution, even when taking the future water rise into the equation, while the best solution for the water quality is to reduce the discharge of nutrients into the fjord.

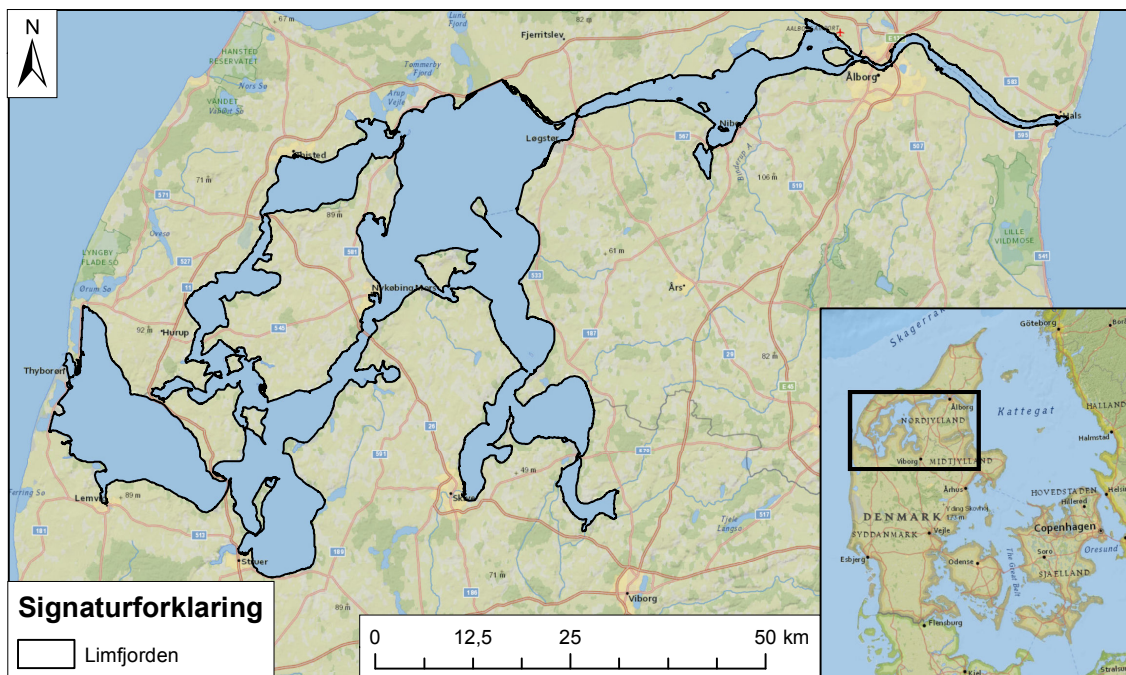
Indhold

| | Side |
|---|---------------|
| 1 Indledning | 1 |
| 1.1 Aktuelle konsekvenser af stormfloder i Limfjorden | 3 |
| 2 Løsningsforslag | 5 |
| 2.1 Problemformulering | 8 |
| Del I Vandstandsmodellering | 9 |
| 3 1D-vandstandsmodel | 11 |
| 3.1 Opbygning af 1D-vandstandsmodel | 14 |
| 3.2 Anvendte parametre | 19 |
| 3.3 Kalibrering af 1D-vandstandsmodellen | 26 |
| 3.4 Validering af 1D-vandstandsmodellen | 30 |
| 3.5 Implementering af løsningsforslag | 34 |
| 3.6 Resultat af 1D-vandstandsmodellen | 37 |
| 3.7 Konklusion på 1D-vandstandsmodel | 42 |
| 4 2D-vandstandsmodel | 45 |
| 4.1 Opbygning af 2D-vandstandsmodel | 46 |
| 4.2 Kalibrering af 2D-vandstandsmodel | 55 |
| 4.3 Validering af 2D-Vandstandsmodel | 58 |
| 4.4 Implementering af løsningsforslag | 58 |
| 4.5 Resultat af 2D-vandstandsmodel | 60 |
| 4.6 Konklusion på 2D-vandstandsmodel | 65 |
| 5 Klimaændringer | 67 |
| 5.1 Resultater af modellerne med klimaændringer | 70 |
| 5.2 Konklusion af klimaændringer | 76 |
| 6 Konklusion på vandstandsmodellering | 77 |
| Del II Vandkvalitet i Limfjorden | 79 |
| 7 1D-vandkvalitetsmodel | 87 |
| 7.1 Anvendte parametre | 91 |
| 7.2 Kalibrering af 1D-Vandkvalitetsmodel | 93 |
| 7.3 Validering af 1D-Vandkvalitetsmodellen | 95 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 7.4 | Løsningsforslag til vandkvalitet | 96 |
| 7.5 | Implementering af Løsningsforslag | 97 |
| 7.6 | Resultat af 1D-vandkvalitetsmodel | 98 |
| 7.7 | Sedimentanalyse | 103 |
| 7.8 | Konklusion af 1D-vandkvalitetsmodel | 110 |
| 8 | 3D-vandkvalitetsmodel | 113 |
| 8.1 | Valg af beregningsgeometri | 113 |
| 8.2 | Opbygning af 3D-vandkvalitetsmodel | 119 |
| 8.3 | Kalibrering af 3D-vandkvalitetsmodel | 121 |
| 8.4 | Validering af 3D-vandkvalitetsmodel | 124 |
| 8.5 | Implementering af løsningsforslag | 126 |
| 8.6 | Resultat af 3D-vandkvalitetsmodel | 127 |
| 8.7 | Konklusion af 3D-vandkvalitetsmodel | 130 |
| 8.8 | Vurdering og konklusion af vandkvalitet | 131 |
| 9 | Afrunding af Stormflodssikring af Limfjorden | 133 |
| 9.1 | Diskussion | 133 |
| 9.2 | Konklusion | 134 |
| 9.3 | Perspektivering | 135 |
| | Litteraturliste: | 137 |

1. Indledning

Limfjorden er det eneste sund igennem Jylland, som forbinder Nordsøen i vest med Kattegat i øst. Sundet skærer igennem landet og består af flere dele, der kan opdeles som store bredninger, smalle sund og bugter. Limfjordens placering er vist på figur 1.1.



Figur 1.1. Limfjordens placering i Danmark

Limfjorden, vist på figur 1.1 er den største recipient i Danmark, hvor oplandet dækker over 7,500 km². Limfjorden strækker sig på tværs af Jylland, fra Thyborøn i Vest til Hals i øst og går igennem i alt 10 kommuner. Ud over de 10 kommuner som Limfjorden løber igennem er der yderligere 8 kommuner der bidrager med vand til fjorden. Dette betyder, at omtrent en sjettedel af Danmarks areal er beliggende i Limfjordens hovedopland hvorfra Limfjorden får bidrag af næringsstoffer og ferskvand. Mange af disse kommuner er dækket af store landbrugsområder, som bidrager med næringsstoffer i højere koncentrationer til Limfjorden. [Naturstyrelsen, 2013]

Limfjordens generelle nettostrøm går fra vest mod øst, med mellem 8-12 km³/år. [Skaldyrcenter, 2016] Denne nettostrøm styres af vinden, som hovedsageligt kommer fra vest. Den generelle strømning af vand gennem Limfjorden styres også af tidevandet, som periodisk skifter retning og derved ikke bidrager til nettostrømmen.

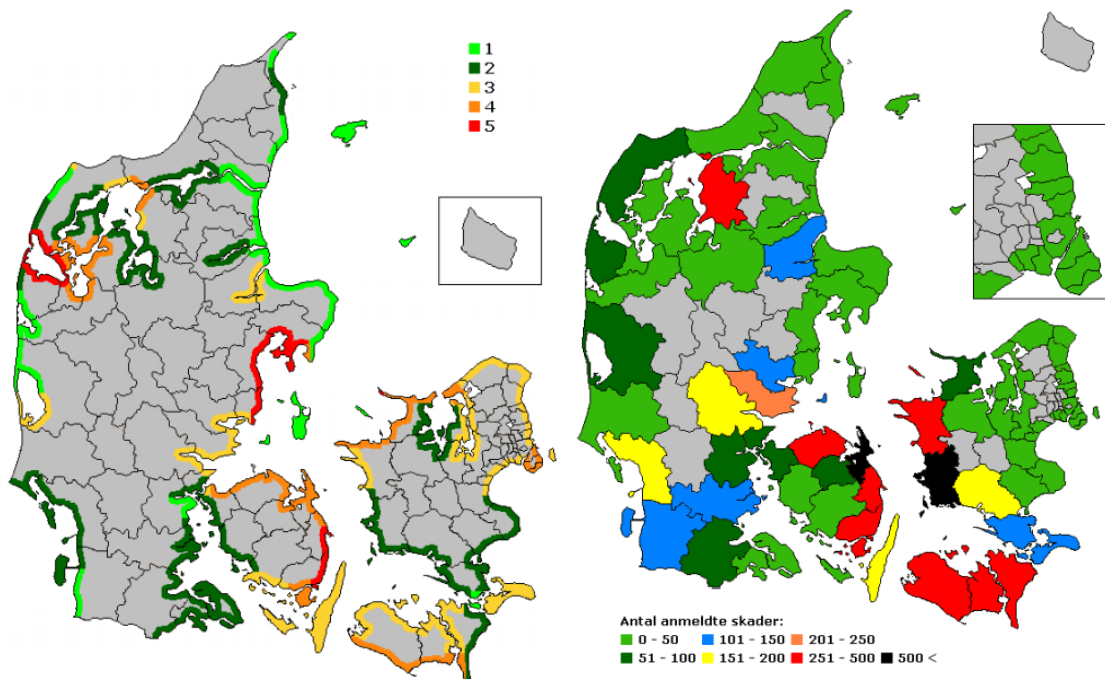
Limfjorden, som et sund, opstod i 1862, da en stormflod oversvømmede Agger-tange ved Thyborøn og efterlod to kanaler. En stormflod er en forhøjet vandstand, som forekommer ved kraftig vind. Den ene kanal, den nordligste, blev fyldt igen, mens den sydligste kanal forblev åben. Denne kanal kaldes i dag Thyborøn Kanal. Thyborøn Kanal blev allerede i 1868 anvendt til sejlads af over 200 skibe, og den nye åbning til Limfjorden viste sig at være en ny mulighed som handelsrute. Siden begyndte man at udgrave en sejlrende igennem de lave revler og igennem kanalen. Åbningen i den vestlige ende gjorde, at Limfjorden blev til et sund, dog omtales den stadig som en fjord. [(H. W.). M. S., 1930] [Hansen, 2011]

Limfjorden er blevet oversvømmet adskillige gange siden 1862 Sørensen et al. [2013a]. På grund af stormfloderne vedtog den daværende rigsdag i 1946 Thyborønloven, som omhandler en lukning af Thyborøn Kanal med en sluse til at regulere vandstanden i Limfjorden. Loven blev ophævet i 1970 på grund af, at planlægningen af byggeriet blev standset i 1954 som følge af besparelser, før byggeprocessen begyndte. I dag er Thyborøn Kanal stadig åben, men der er diskussioner, om kanalen bør lukkes delvist, lukkes helt eller forblive åben. [Retsinformation, 1946] [Retsinformation, 1970]

Denne rapport tager udgangspunkt i stormfloder i Limfjorden.

1.1 Aktuelle konsekvenser af stormfloder i Limfjorden

Danmark er et fladt land, og dette er også tilfældet ved området omkring Limfjorden. Derfor er området omkring Limfjorden et af de områder, hvor der ofte forekommer oversvømmelser som følge af stormfloder. Oversvømmelserne ved Limfjorden er især koncentreret omkring den vestlige del, ud mod Nordsøen og naturlige flaskehalse så som ved Løgstør, illustreret på figur 1.2.



Figur 1.2. Antal stormfloder fra 1991 til 2008. Stormrådet [2009]

Figur 1.3. Stormflodskonsekvenser i form af antal anmeldte skader. Stormrådet [2009]

Det kan ses på figur 1.2, at hele Limfjorden har været udsat for stormfloder i perioden 1991-2008. Det kan også ses, at den østlige del af limfjorden kun har været udsat for en enkelt stormflod. Derimod har den vestlige del været udsat for fem, hvilket toppet skalaen i figuren. Disse stormfloder kan forårsage mange skader, hvis de rammer beboelsesområder, hvilket kan ses på figur 1.3, hvor antallet af anmeldte skader er vist. Stormrådet [2009]

Figur 1.3 viser, at selvom de fleste stormfloder forekommer i den vestlige del af Limfjorden, er det i området omkring Løgstør, der er anmeldt flest skader som følge af stormflod. Dette skyldes, at der bor flere mennesker i området nær indsnævringen af Limfjorden ved Løgstør end ved de andre indsnævninger, samt at området er lavt beliggende. Dette forøger yderligere omkostningerne ved en stormflod for dette område. Stormrådet [2009]

En løsning, der bliver implementeret mod stormfloder, skal ikke kun virke nu, men skal kunne sikre de udsatte områder i fremtiden. For at fremtidssikre er det nødvendigt at

foretage en undersøgelse af, hvorledes forholdene, der har en indflydelse på vandstanden, udvikler sig.

Undersøges vandstanden i Thyborøn havn kan det ses, at middelvandstanden er stigende. Endvidere kan det ses, at vandstanden for perioden 1975-2008 steg med over 20 cm i gennemsnit, ved en lineær tendens. Derudover kan det ses, at middelvandstanden stiger endnu mere i perioden 1993-2008. Det samme er gældende for tidevandsamplituden, som ligeledes er stigende med over 10 cm, målt over den samme periode. Undersøges ekstremvandstande i perioden, kan det ses, at antal dage med en vandstand over 110 cm er stigende med gennemsnitligt over tre dage hvert femte år. Ved ekstremvandstande over 125 cm er stigningen gennemsnitlig halvanden dag per femte år. Dette giver udtryk for, at vandstanden er stigende, sammen med tidevandsamplituden, alt imens at ekstremvandstanden forekommer oftere end før. Dog synes dette ikke at være tilfældet ved Løgstør, hvor ekstremvandstande ikke er steget med over 20 cm. Knudsen et al. [2011]

Foretages samme undersøgelse af vinden i området, kan det også ses, at middelvinden over Nordsøen er steget over perioden 1958 - 1997. Knudsen et al. [2011]

2. Løsningsforslag

Hovedformålet med løsningsforslagene er at mindske ekstremvandstandene ved stormfloder således, at de lavtliggende beboede områder langs Limfjorden ikke oversvømmes så ofte, som det forekommer nu. Det er derfor valgt at undersøge, hvilke løsninger der er foreslået til at opnå en reduktion af ekstremvandstandene i Limfjorden.

Den mest effektive måde at reducere ekstremvandstandene på er at forbinde Agger Tange i nord og Harboøre Tange i syd ved en konstruktion, der forhindrer vandet fra Nordsøen i at trænge ind i Limfjorden igennem Thyborøn Kanal. Dog synes det ikke at være fordelagtigt at blokere passagen gennem kanalen, da den vil umuliggøre indsejling. Kystdirektoratet her imidlertid fundet en løsning i form af en højvandsbarriere, der kun lukker ved ekstremvandstande. Ingvarsdén et al. [2012]

Foreslået højvandsbarriere. Ingvarsdén et al. [2012]

Kystdirektoratet foreslår en højvandsbarriere, der skal forhindre ekstremvandstande uden at påvirke vandføringen ind og ud af Limfjorden ved normale vandstande. Barrieren skal udelukkende aktiveres, når der er optræk til stormfloder og skal resten af tiden ikke have indflydelse på kanalen. Denne løsning fungerer ved, at barrieren løftes fra fjordbunden ved stormflod og sænkes igen, når vandstanden er faldet. Barrierens foreslåede beliggenhed er imellem Nordsøen og havnen således, at den også forhindrer forhøjede vandstande i Thyborøn Havn. Løsningsforslaget med højvandsbarrieren er illustreret på figur 2.1. Kystdirektoratet vurderer dog denne løsning til at være en meget dyr løsning, og derfor er det valgt at undersøge andre forslag fra Kystdirektoratet. Ingvarsdén et al. [2012]



Figur 2.1. Højvandsbarriere Ingvarsdén et al. [2012]



Figur 2.2. Dæmning med gennemstrømningskluse. Ingvarsdén et al. [2012]

Dæmning med sluse.

En anden løsning blev foreslået allerede i 1946 i loven ”Lov om Foranstaltninger til Sikring af Limfjordstangerne, Thyborøn Havn og Thyborøn Kanal” som blev ophævet på grund af økonomiske foranstaltninger. Denne løsning indebærer en gennemstrømningskluse, der ligesom højvandsbarrieren skal kunne afskære Limjorden fra Nordsøen ved stormfloder. Denne kluse skal vurderes til at have dimensionerne 740 x 6 m. Ud over gennemstrømningsklusen skal der være en gennemsejlingskluse som skal sikre passagen imellem de to farvande. Denne kluse vil kunne holde vandet ude i situationer med ekstremvandstand, men samtidig kunne føre en normal vandføring igennem Limfjorden ved normale forhold. Skibstrafikken vil kunne opretholdes ved en skibssluse. Udover dette kan en sådan kluse også anvendes som en forbindelse imellem de to tanger og skabe en hurtigere forbindelse imellem de to regioner adskilt af Thyborøn Kanal. Ingvarsdén et al. [2012]

De næste løsninger der er foreslået i kystdirektoratets løsningsforslag er opbygget ud fra en indsnævring af tværsnittet i Thyborøn Kanal således, at arealet ikke forøges i fremtiden. Endvidere er de fleste af disse løsningsforslag lavet således, at bredden af kanalen mindskes i forhold til de nuværende forhold.

Udbygning af hofde 59

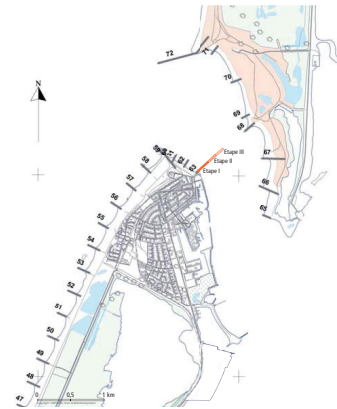
Den første løsning, som indsnævrer tværsnitsarealet er opstillet i kystdirektoratets løsningsforslag [Ingvarsdén et al., 2012], er at udbygge hofde 59, således at den, sammen med hofde 72, indsnævrer tværsnitsarealet af kanalen. Bredden af denne indsnævring er opstillet til 600 m. Dette kræver dog også en omlægning af eksisterende sejltreder og fyrlinjer. Kystdirektoratet foreslår at denne løsning udføres i tre etaper, og at der udføres en bundsikring imellem de to hofder således, at kanalens tværsnitsareal forbliver det samme. Det nye tværsnitsareal skal svare til det nuværende mindste tværsnit af kanalen. Kanalen skal videre indsnævres, hvis der tages højde for havspejlsstigninger, således at tværsnittet forbliver konstant. En anden effekt af denne løsning er ifølge Kystdirektoratet at sandfordringen af Limfjordstangerne reduceres. Ingvarsdén et al. [2012]



Figur 2.3. Udbygning af hofde 59. Ingvarsdén et al. [2012]

Udbygning af hofde 63

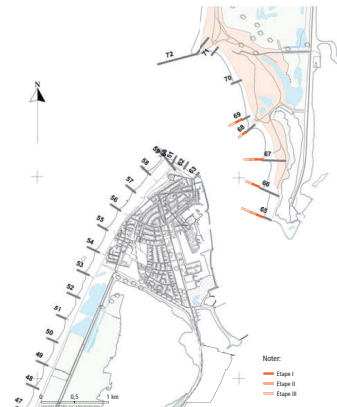
Den næste løsning er at indsnævre Thyborøn Kanal ved udbygning af hofde 63, således at den sammen med hofde 68 indsnævrer bredden af kanalen til 500 m. Denne løsning skal ligeledes bygges i tre etaper, og skal også indsnævres yderligere ved antagelse af klimaændringer. Denne løsning kræver ligeledes også bundsikring for at sikre, at kanalen ikke blot uddybes af bunderosion. Kystdirektoratet mener dog, at denne løsning ikke kan nedsætte behovet for sandfodring af tangerne. Denne placering er valgt, da der er en sandpude beliggende ved hofde 63, hvor hofden skal udvides, hvorved konstruktionsudgifterne kan nedsættes. Ingvarsdén et al. [2012]



Figur 2.4. Udbygning af hofde 63. Ingvarsdén et al. [2012]

Udbygning af hofde 65 til 69

Kystdirektoratet har endvidere opstillet et løsningsforslag, hvor hofderne på Agger Tanges sydlige ende forlænges med op til 190 meter. Denne løsning er opstillet på baggrund af, at hofderne her allerede viser tegn på manglende vedligeholdelse, og de 25 yderste meter af hofde 65 er i sådan en stand, at den kræver en reparation eller afkortelse. Dette forslag er som de andre opstillet i tre etaper. I alt skal der her udbygges fem hofder. Ingvarsdén et al. [2012]



Figur 2.5. Udbygning af hofde 65 til 69. Ingvarsdén et al. [2012]



Figur 2.6. Stenrev på fjordgrund. Ingvarsdén et al. [2012]

Stenrev på fjordgrund

En alternativ måde at indsnævre kanalen på er ved at opføre et såkaldt rev, umildbart efter Thyborøn Kanal. Revets krone skal anlægges i kote 2m og have en bredde på 5m, mens siderne skal have en hældning på 1:2. Revet skal bygges over tre etaper og strække sig over en distance på 3200m. Indføres denne løsning, forslår Kystdirektoratet, at der anlægges en sikring af selve Thyborøn, da vandstanden kan stige på den vestlige del af revet. Ingvarsdén et al. [2012]

I alle disse løsninger har Kystdirektoratet ikke medtaget, juridiske-, tekniske- eller miljømæssige forhold, der kan forhindre opførelsen af disse løsninger. Men de har medtaget en fremskrivning af forholdene i over 50 år og lavet økonomiske overslag over alle de ovenstående løsningsforslag. Det kan i det økonomiske overslag ses, at den dyreste løsning er en højvandsbarriere, der er over tre gange dyrere end løsningen med en dæmning, der er den anden dyreste løsning. Herefter kommer stenrevet på fjordgrund som den tredje dyreste løsning. Ud fra de præsenterede løsningsforslag er det valgt at foretage en undersøgelse af to af løsningerne med tværsnitsindsnævninger samt løsningen med en dæmning med gennemstrømningssluse. De to udvalgte løsninger er udvidelse af hofde 59 og 63. Disse løsninger undersøges med henblik på hhv. stormflodsvandstande, vandkvalitet og sedimenttransport. Ingvarsdén et al. [2012]

2.1 Problemformulering

Det kan ses, at Limfjorden er ramt af ekstremvandstande ofte i forhold til resten af de danske kyster. Derfor er det valgt at have problematikken med ekstremvandstande som fokuspunkt igennem denne rapport. Det er valgt at finde en løsning til reduktion af vandstanden, ud fra eksisterende løsningsforslag. Ud over vandstanden er det også valgt at foretage en analyse af, hvilken indflydelse de valgte løsningsforslag vil have på andre fokusområder i Limfjorden end vandstanden. Et af fokuspunkterne er vandkvaliteten i forskellige dele af Limfjorden. Ud fra dette er det valgt at opstille en problemformulering.

”Hvordan kan Limfjorden sikres mod nuværende og fremtidige ekstremvandstande, ved implementering af et løsningsforslag ved Thyborøn Kanal, alt imens vandkvaliteten i Limfjorden ikke må forringes?”

Del I

Vandstandsmodellering

Formålet med denne del er at udvælge den bedste model til at beskrive Limfjordens vandstandsændringer og dermed udføre en konsekvensvurdering ved en forebyggende handling mod fremtidige oversvømmelser. Hvorefter den bedste løsning udvælges til videre analyse med klimaændringer.

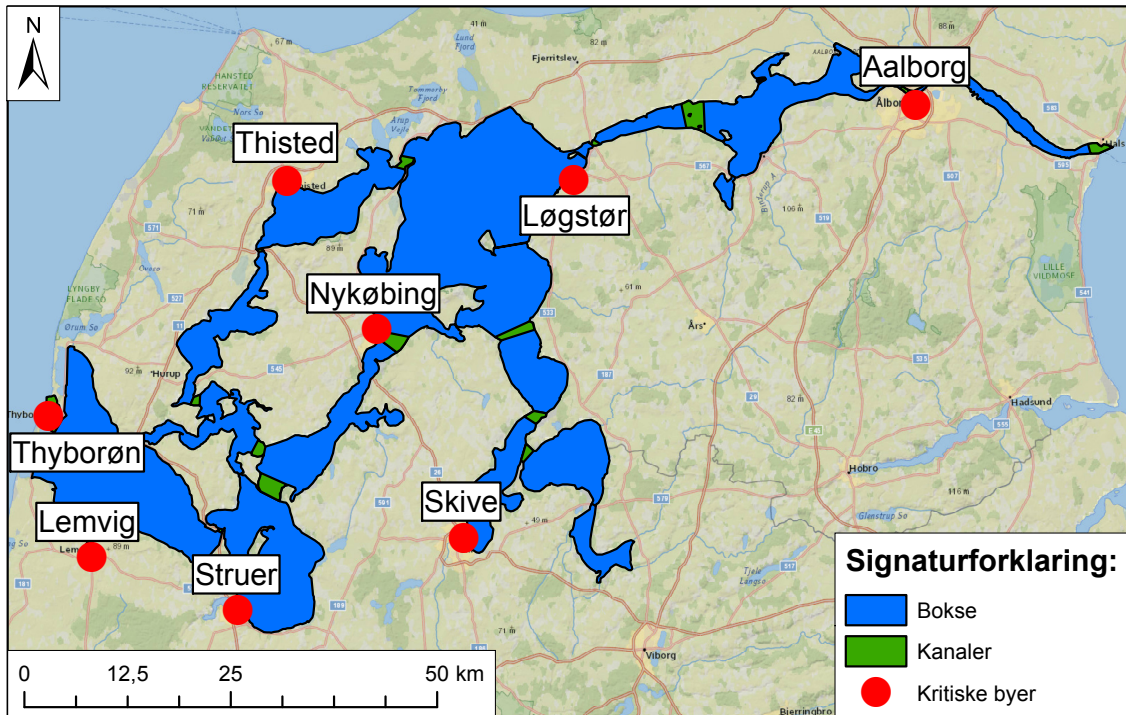
3. 1D-vandstandsmodel

Det største problem i Limfjorden er anset for at være ekstremvandstandene, som resulterer i oversvømmelser i de omkringliggende områder, så som Løgstør. Derfor er det valgt at opbygge en model til at gengive de nuværende forhold, samt de ændringer, der formodes at ville forekomme i fremtiden, som følge af klimaændringer. Ud over at kunne gengive de nuværende og fremtidige forhold, skal modellen også kunne bestemme vandstandsændringerne ved implementeringen af de forskellige løsningsforslag.

Det er valgt at opbygge en simpel model til at foretage en udvælgelse af løsningsforslag. De udvalgte løsningsforslag skal derefter undersøges nærmere. For at holde modellen simpel og begrænse beregningstiden er det valgt at opbygge den som en ét-dimensionel diffusiv bølgemodel opstillet som en boksmodel.

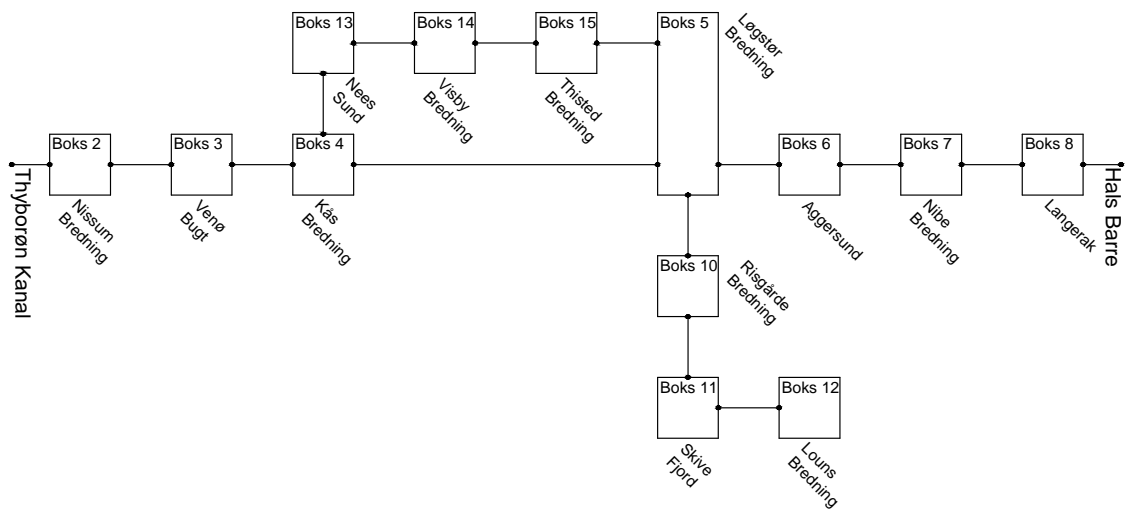
Det forventes, at en simpel model vil returnere nogle vandstande, som følger de målte vandstande, da modellen skal afhænge af vandstandene i Nordsøen og Kattegat, samt vinden til at bestemme vandstanden inde i systemet. Dog forventes det, at modellen ikke vil opnå de samme maksimalværdier, da modellen ønskes opstillet med en grov inddeling, hvorved vandstanden vil være gengivet i et større område. Dette kan betyde, at vindstuvningen ikke medtages korrekt. Ved ændringer af systemet, forventes det endvidere, at modellen overestimerer effekten af ændringen, da modellen vil blive grov og derved foretage ændringen over et større område, end den vil forekomme i virkeligheden.

Modellens geometri er blevet fastsat ud fra Limfjordens naturlige forløb. Der er derfor valgt at opdele Limfjorden ved naturlige indsnævring. Disse punkter er eksempelvis Oddesund, der adskiller Nissum Bredning og Venø Bugt. Disse naturlige indsnævring adskiller i alt 13 afgrænsede vandområder valgt som bokse, der er illustreret på figur 3.1 sammen med de adskillende kanaler.



Figur 3.1. Limfjordens inddeling i bokse og kanaler.

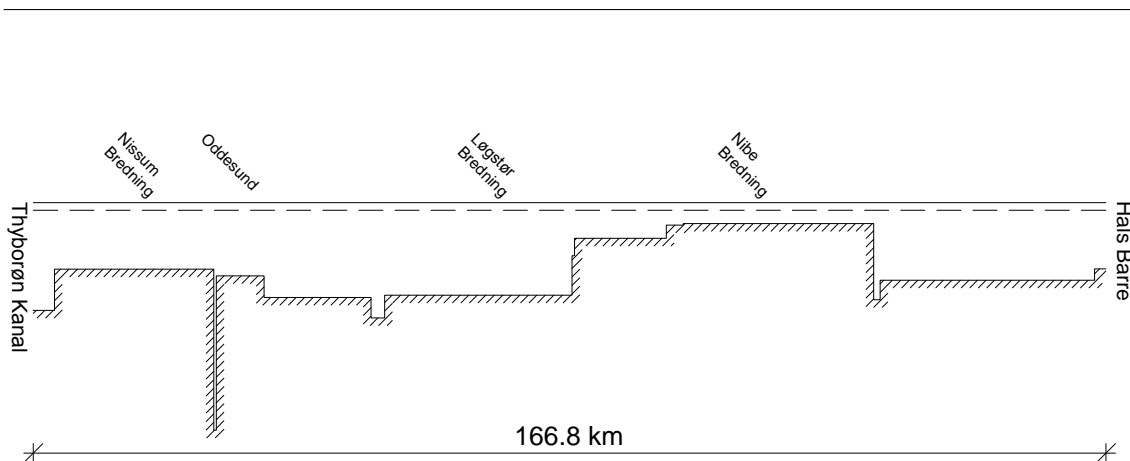
På figur 3.1 kan det ligeledes ses, at nogle byer er markeret med rødt, som kritiske byer. Disse byer er kendt for at være udsat for oversvømmelser af forskellig grad i Limfjorden. Det kan på figuren ses, at de kritiske byer ligger spredt over hele Limfjorden. Det kan også ses, at de 13 områder, der er opdelt, har varierende størrelser og former. Dog er det valgt at opbygge en simple model med rektangulære bokse, med én gennemsnitsdybde, bredde og længde for hver enkel boks, som illustreret på figur 3.2, hvor de 13 bokse er opstillet i en konceptuel model af Limfjorden omdannet til en boksmode.



Figur 3.2. Konceptuel model af boksmodellen af Limfjorden set i fugleperspektiv, hvor boks 1 er Nord søen og boks 9 er Kattegat.

Ud fra figur 3.1 og figur 3.2 kan det ses, at selve fjorden er opdelt i 13 områder, men at modellen er opdelt i 15 bokse, da det er valgt at indføre bokse, som repræsenterer de to bokse på randene ved hhv. Nord søen ved Thyborøn og Kattegat ved Hals. Dette er gjort for at kunne påsætte randbetingelserne kendt fra disse målepunkter. Ud over dette kan det også ses, at Kås Bredning og Løgstør Bredning er anderledes i forhold til de andre bokse ved at have mere end to forbindelser. Endvidere kan det ses ud fra nummereringen af boksene, at det er valgt at beregne den formodede hovedvandføring, før der beregnes for den indre fjord og forbindelsen nord om Mors.

De 13 bokse, der er opstillet i modellen, har forskellige fysiske parametre, så som overfladeareal, bredde, længde og dybde. Da boks 1 og 9 repræsenterer randene, er der ikke angivet fysiske parametre for disse. Parametrene er opstillet i tabel A 1.1 og tabel A 1.2 i bilag. Limfjorden er meget lang og forholdsvis lavvandet, dette er illustreret på figur 3.3. På figur 3.3 er tværsnittet af den konceptuelle model vist, hvor kun hovedvandføringen fra boks 1 til boks 9 er illustreret.

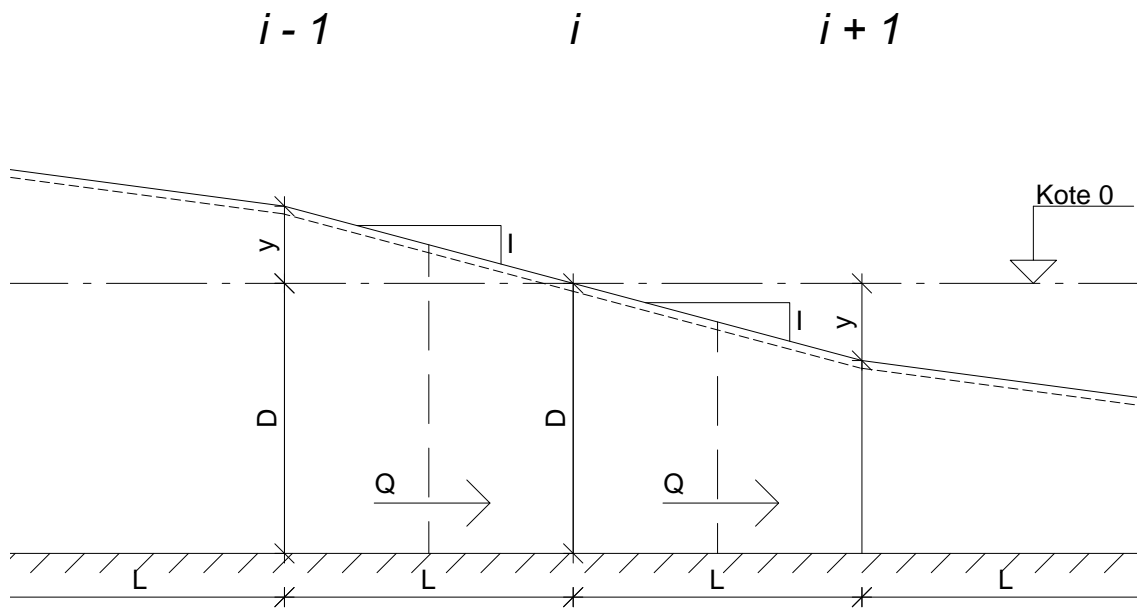


Figur 3.3. Længdesnit af Limfjordens boksmode, hvor den største gennemsnitsdybde er i Oddesund med 14,5 m.

Det kan ud fra figur 3.3 ses at kanalerne der forbinder boksene er dybere end boksene selv. Derudover kan det ses at området øst for Løgstør har de mindste dybder. Med disse parametre er geometrien af den simple boksmode opstillet, hvorved der nu kan opstilles et ligningssystem til at bestemme vandstanden i Limfjorden.

3.1 Opbygning af 1D-vandstandsmodel

Formålet med modellen er at bestemme vandstanden i boksene. Dette er gjort ved at opstille en diffusiv bølgemodel, som anvender kontinuitetsligningen til at bestemme vandstandsændringen ud fra vandføringer og Manningformlen til at bestemme vandføringerne ud fra vandstandene. På grund af modellens opbygning skal vandføringerne fra det forrige tidsskridt anvendes til at beregne vandstandene i det nuværende tidsskridt. Herefter kan de beregnede vandstande anvendes til at beregne nye vandføringer for det samme tidsskridt. På denne måde fortsættes modelleringen videre i de efterfølgende tidsskridt. Dette system er illustreret for en enkelt boks på figur 3.4, hvor boksene er navngivet med i .



Figur 3.4. Illustration af boksmodellen for en vandstand.

Det kan ud fra figur 3.4 ses, at vandstanden bestemmes som vandstandskoten, som er defineret som afstanden fra kote 0 DVR90 til vandspejlet. Dybden af boksene i modellen er angivet med D , som er afstanden fra kote 0 DVR90 til bunden. Den totale vanddybde kan derefter findes som $\eta = D + y$. Derudover er det vist, at energigradienten uden vindpåvirkning følger vandspejlet. Ud over dette kan det ses, at vandføringen Q beregnes imellem boksene. For at opstille den diffusive bølgemodel er det valgt at anvende en kombination af kontinuitetsligningen og Manningformlen for de enkelte bokse. De to formler er opstillet til modellen ved formel 3.1 og formel 3.2.

$$y_{(t,i)} = y_{(t-1,i)} + \frac{\Delta t}{F_{(i)}} \left(Q_{(ind,t)} + Q_{(fersk,t)} - Q_{(ud,t)} \right) \quad (3.1)$$

$$Q_{(t,i)} = M \cdot A_{(t,i)} \cdot R_{(t,i)}^{2/3} \cdot (I + I_{vind})^{1/2} \quad (3.2)$$

Hvor:

| | | |
|-----|----------------------|-----------------------------------|
| y | er vandstandskote | [m] |
| F | er overfladeareal | [m ²] |
| Q | er vandføring | [m ³ s ⁻¹] |
| M | er Manningtal | [m ^{1/3} /s] |
| A | er tværsnitareal | [m ²] |
| R | er Hydraulisk radius | [m] |
| I | er energigradient | [-] |

De to formler er udledt i bilag A 2.1 og A 2.2, hvor det også kan ses, at energigradienten I er bestemt til at være vandspejlshældningen. I formelen 3.2 er tværsnitsarealet antaget at kunne udregnes som middeldybden multipliceret med bredden af kanalen givet ved formelen $A_{(t,i)} = (D_{(i)} + y_{(t-1,i)}) \cdot B_{(i)}$ derudover udregnes den hydrauliske radius som $R_{(t,i)} = \frac{A_{(t,i)}}{2 \cdot (D_{(i)} + y_{(t-1,i)}) + B_{(i)}}$. I formlerne er der diskretiseret i tid t og sted i , hvor i angiver hver af boksene. I figur A. 2.5, i bilag A 2.3 er det udledt, at energigradienten fra hastighedsændringen er negligerbar i forhold til energigradienten fra vandspejlshældningen. Derfor kan energigradienten findes ved formel 3.3.

$$I_{(t,i)} = \frac{y_{(t-1,i-1)} - y_{(t-1,i)}}{L_{(i)}} \quad (3.3)$$

Hvor:

L | er længde af boks [m]

I formel 3.3 kan det ses, at vandstanden er fundet i tidsskridtet før. Dette er gjort, da de to formler i modellen afhænger af hinanden. Ud over bidraget fra dette led kan det ses, at Manningformlen indeholder en energigradient fra vinden navngivet som I_{vind} , som er bestemt ud fra forskydningsspændingen imellem luften og vandet ved formel 3.4 Larsen [2015]. Teori bag vindstuvning er præsenteret i bilag A 2.4, med udledninger af formler fra [Larsen, 2015].

$$I_{vind(t,i)} = \frac{\tau_{vind,(t)}}{\gamma \cdot (D_{(i)} + y_{(t,i)})} \quad (3.4)$$

Hvor:

$\tau_{vind,(t)}$ | er forskydningsspænding [Pa]
 γ | er specifik tyngde [N m⁻³]

Det kan ses, at energien fra vinden er styret af vanddybden samt forskydningsspændingen mellem luften og vandet. Denne forskydningsspænding kan findes ud fra middelvindshastigheden U_{10} , som er middelvindhastigheden målt over 10 minutter i 10 meters højde over jordoverfladen. Vinden er i denne højde kraftigere, end den er ved vandoverfladen, da vinden, ligesom vandet, følger et logaritmisk hastighedsprofil. Forskydningsspændingen mellem luften og vandet kan bestemmes ved formel 3.5. Larsen [2015]

$$\tau_{vind,(t)} = c_D(t) \cdot \rho_{luft} \cdot U_{10(t)}^2 \quad (3.5)$$

Hvor:

| | | |
|----------|-------------------------------------|-----------------------|
| c_D | er vind/vand-friktionskoefficienten | [-] |
| ρ | er densitet | [kg m ⁻³] |
| U_{10} | er middelhastigheden | [m s ⁻¹] |

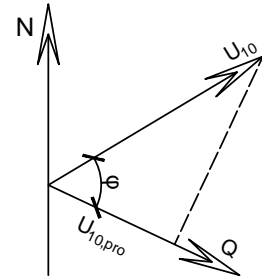
Det kan i formlen ses, at forskydningsspændingen stiger eksponentielt med middelvindhastigheden. Endvidere er dette forstærket, da den dimensionsløse friktionskoefficient imellem vind og vand c_D er valgt udregnet med den empiriske formel $C_D = (0,6 + 0,066 \cdot U_{10}) \cdot 10^{-3}$, hvorved forskydningsspændingen afhænger af middelvindhastigheden i anden potens Larsen [2015]. Det er i denne model valgt at holde luftens densitet konstant, således at forskydningsspændingen udelukkende er afhængig af middelvindhastigheden. Middelvindhastigheden er givet ved en retning og en styrke, som modellen skal omformulere således, at den passer til de éndimensionelle vandføringer illustreret på figur 3.5. Dette er gjort ved at projicere vinden ind i retningen af de enkelte vandføringer i kanalerne ved formel 3.6.

$$U_{10,pro(t,i)} = U_{10(t)} \cdot \cos(\phi_{(i)}) \quad (3.6)$$

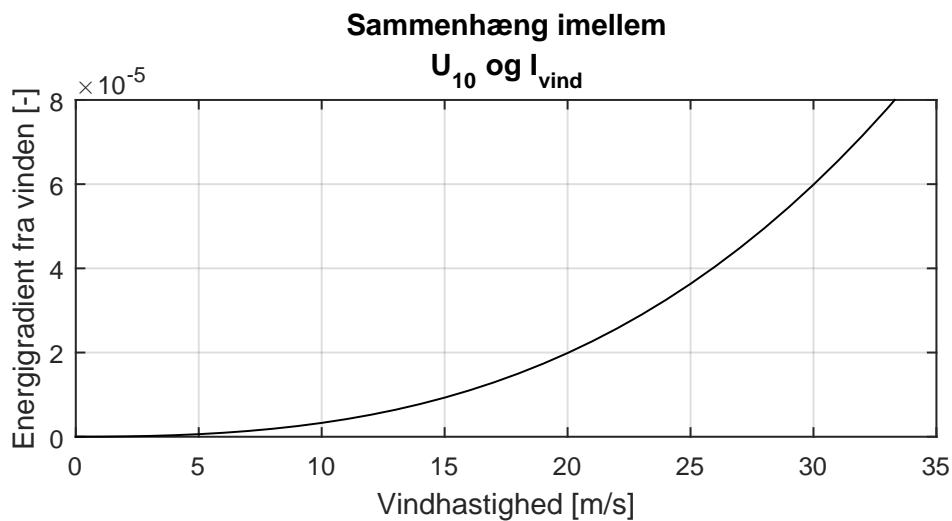
Hvor:

| | | |
|--------|---|-----|
| ϕ | er vinklen mellem vindretning og vandføring | [°] |
|--------|---|-----|

På figur 3.5 kan det ses, at middelvinden skal projekteres ind i forhold til retningen af vandføringen. Da det er valgt at sætte middeldybden for hele Limfjorden til 4,8 m kan energigradienten, som opstår på grund af vindens forskydningsspænding på vandoverfladen, findes for forskellige middelvinde illustreret på figur 3.6. Det kan ses, at energigradienten er eksponentielt stigende med middelvindhastigheden.



Figur 3.5. Projektering af middelvindhastigheden.



Figur 3.6. Sammenhæng mellem vindhastighed og energigradienten fra vindens forskydnings-spænding på vandoverfladen.

På figur 3.6 kan sammenhængen imellem middelvindhastigheden og energien fra vinden ses.

De to formler er derefter opsat således, at der først udregnes samtlige vandføringer i systemet, baseret på et initialgæt på vandstandskoten i samtlige bokse og randbetingelse på vandstanden i hhv. boks 1 (Nordsøen ved Thyborøn) og boks 9 (Kattegat ved Hals). Efter at samtlige vandføringer er fundet, findes vandstanden i samtlige bokse. De nye vandstande anvendes herefter til at finde vandføringerne i næste skridt og modellen kører således videre, med vandstandene på randene, ferskvandstilførsler og vindstyrker og -retninger som data input. Opbygningen af modellen er testet for simple systemer, hvor resultatet af modellen er forventet opstillet i bilag A 3.

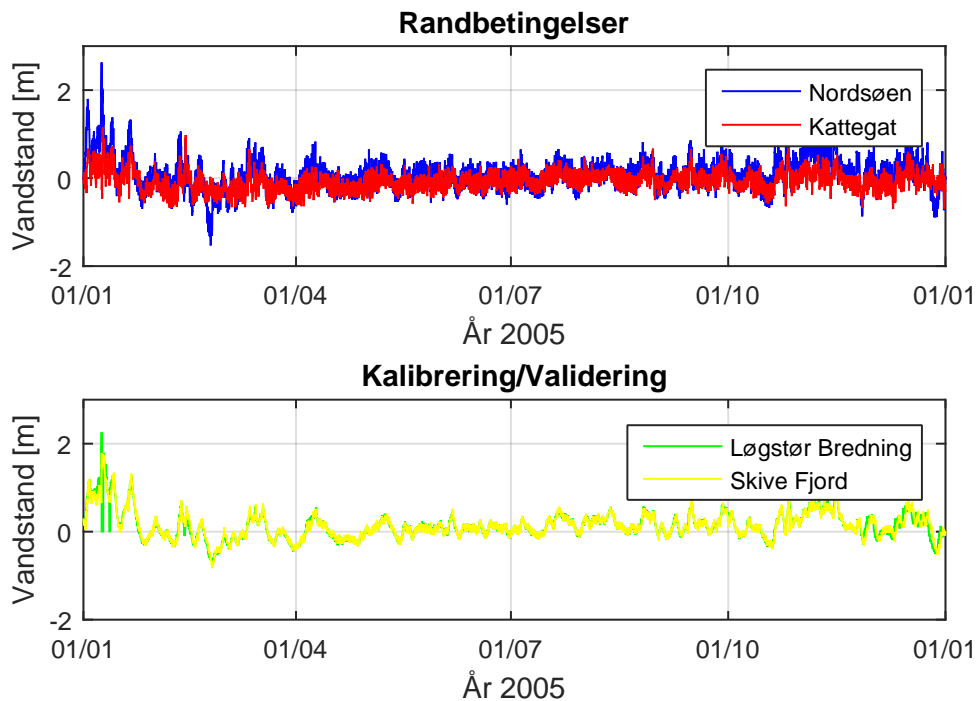
3.2 Anvendte parametre

I modellen anvendes der dataserier for de forskellige input, fra forskellige steder i Limfjorden. De forskellige anvendte dataserier, som alle er målt hvert 10. minut i år 2005, er opstillet i tabel 3.1.

| Dataserie | Data | Anvendelse | Bilags nr. |
|-----------|-------------------------------------|------------------------|------------|
| hTH05 | Vandstande for Thyborøn Hav | Randbetingelse boks 1 | E 3.1 |
| hHB05 | Vandstande for Hals Barre | Randbetingelse boks 9 | E 3.2 |
| hLB05 | Vandstande for Løgstør Bredning | Kalibrering/Validering | E 3.3 |
| hSF05 | Vandstande for Skive | Kalibrering/Validering | E 3.4 |
| wTH05 | Vindretning og -styrke for Thyborøn | Randbetingelse | E 3.5 |
| wHB05 | Vindretning og -styrke for hals | Randbetingelse | E 3.6 |
| QFR05 | Ferskvandstilførsler | Randbetingelse | E 3.7 |

Tabel 3.1. Anvendte parametre til den diffusive bølgemodel.

Det kan ses i tabel 3.1, at nogle dataserier for vandstandene er anvendt som randbetingelser, mens andre er anvendt til kalibrering. Herudover er der også anvendt dataserier for middelvindhastigheden og vindretningen, som modellen anvender. Alle dataserierne er givet for året 2005. Vandstandene, der er sat som randbetingelser, er illustreret på figur 3.7



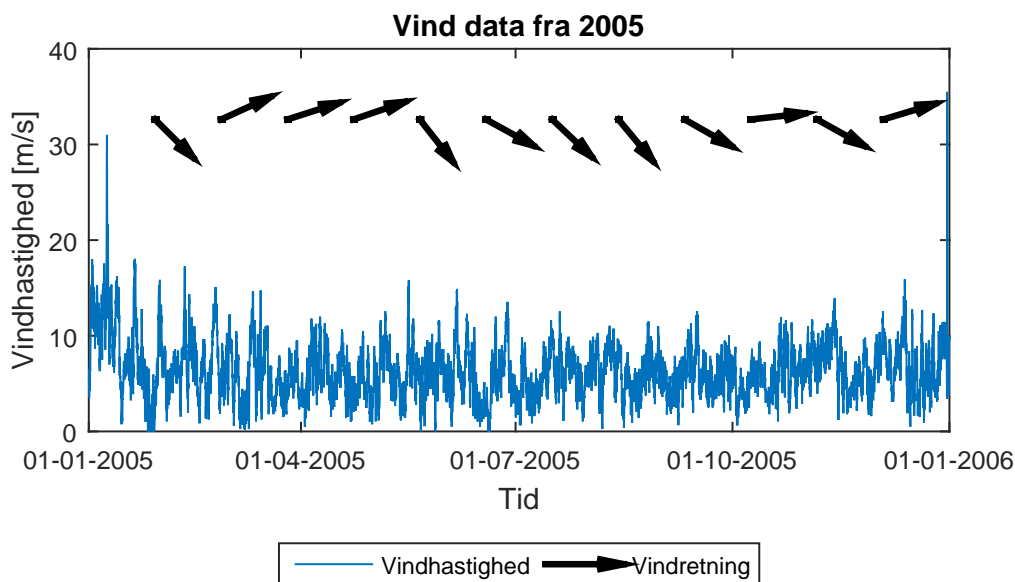
Figur 3.7. Målte vandstande ved Thyborøn og Hals for 2005

Det kan i figur 3.7 ses, at vandstanden i Thyborøn generelt er højere end vandstanden ved Hals, og at vandstanden ved Thyborøn har de største svingninger. Det kan ses, at de største vandstande i Løgstør Bredning og Skive Fjord er målt i starten af året, hvilket stemmer overens med den største storm, der fandt sted i januar 2005, den såkaldte januarstorm. Sammenlignes vandstanden målt i dataserierne med de gengivne vandstande i tabel 3.2 kan det ses, at vandstanden målt i 2005 er højere end vandstanden ved en 100 år hændelse for Thyborøn og Løgstør.

| | Thyborøn Kanal | Hals Barre | Løgstør B. | Skive F. |
|--------|----------------|------------|------------|----------|
| Målt | 2,63 | 1,15 | 2,26 | 1,79 |
| 20 år | 2,37 | 1,40 | 1,76 | 1,79 |
| 50 år | 2,52 | 1,50 | 1,91 | 1,88 |
| 100 år | 2,62 | 1,58 | 2,01 | 1,95 |

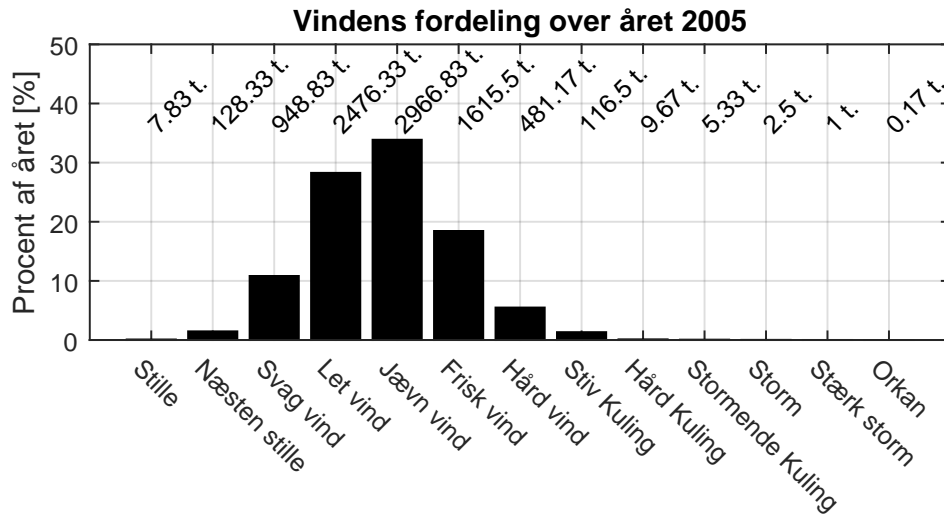
Tabel 3.2. Sammenligning af målte maksimalvandstande i meter fra år 2005 og ekstremvandstande for tre gentagelsesperioder, ligeledes i meter.

Det kan ud fra tabel 3.2 ses, at Nordsøen og Løgstør Bredning havde de største vandstande, og at disse vandstande overskred vandstandene forventet for en 100 års gentagelsesperiode. Ud over for vandstandene er der også anvendt dataserier for vind. Det er valgt at tage middelværdien af vindretningen og vindstyrken fra Thyborøn og Hals til at repræsentere vinden over hele fjorden. Vindretningen er illustreret med sorte pile på figur 3.8, mens middelvindhastigheden er illustreret som en kurve på figur 3.8.



Figur 3.8. Gennemsnitlig vindhastighed mellem Thyborøn og Hals med gennemsnitlig vindretning pr. måned for 2005.

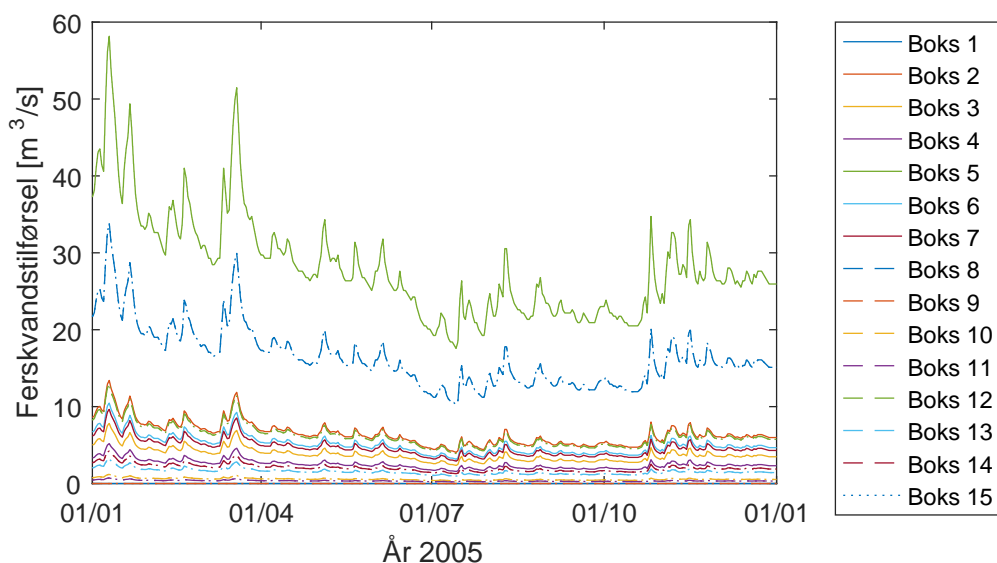
På figur 3.8 kan det ses, at den største vindstyrke er målt i starten af året, hvilket stemmer overens med januarstormen, der den 8. januar 2005 ramte Europa, og som i Hanstholm nåede op på vindstyrker svarende til en middelvind af orkanstyrke Dansk meteorologisk institut [2005]. I Thyborøn blev der målt en ti minutters middelvind på 33 m s^{-1} , og vindstød på helt op til 43 m s^{-1} Dansk meteorologisk institut [2005]. De samme tal gælder ligeledes for Hals Dansk meteorologisk institut [2005]. Dog kan vindstyrkerne over Limfjorden ikke nå helt op på dette niveau, da disse områder ligger inde i landet Dansk meteorologisk institut [2005]. For hele året 2005 kan vindfordeling ses på figur 3.9.



Figur 3.9. Fordeling af vindstyrker for året 2005. Skala fra [Dansk meteorologisk institut, 2005]

Det kan ses fra figur 3.9, at middelvinden, over Limfjorden svarer til jævn vind. Der er kun målt én ti-minutters middelvind hvor vindstyrken når op på orkanstyrke.

Ud over vindpåvirkningen på systemet er der også bidrag fra vandløbene langs Limfjorden. Vandføringerne fra vandløbene til de enkelte bokse er illustreret på figur 3.10.



Figur 3.10. Vandføringer fra de bidragende vandløb til de enkelte bokse.

Ud over de anvendte dataserier er der også anvendt nogle konstanter i modellen. Disse konstanter er opstillet i tabel 3.3.

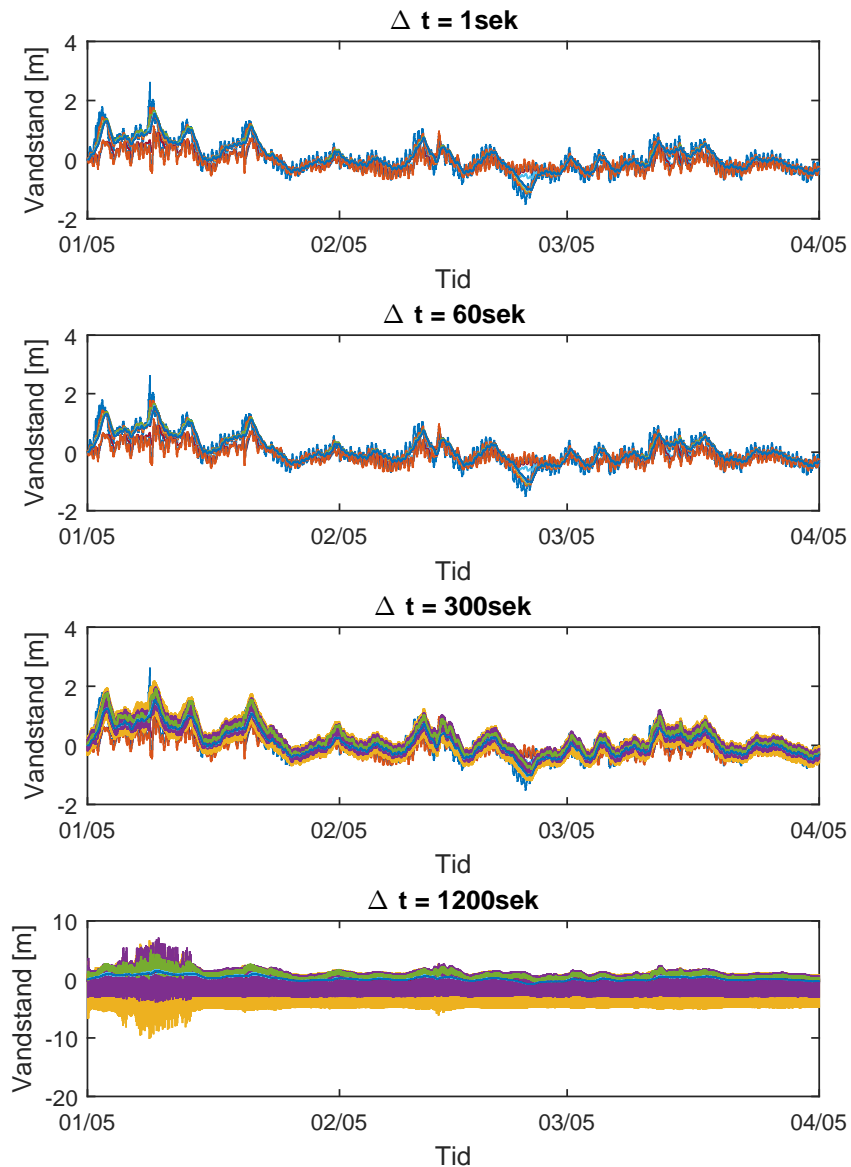
| Parametre | Spænd | ukalibreret værdi | Enhed | Kilde |
|---------------|--------|-------------------|-------------------------|---------------------------|
| M | 8-173 | 50 | $m^{\frac{1}{3}}s^{-1}$ | Brorsen and Larsen [2009] |
| Parametre | Værdi | | Enhed | Kilde |
| ρ_{luft} | 1,20 | | $kg\ m^{-3}$ | Brorsen and Larsen [2009] |
| ρ_{vand} | 998,20 | | $kg\ m^{-3}$ | Brorsen and Larsen [2009] |
| g | 9,82 | | $m\ s^{-2}$ | Brorsen and Larsen [2009] |

Tabel 3.3. Anvendte konstanter i den simple vandstandsmodel.

I tabel 3.3 kan det ses, at kun Manningtallet er opstillet med et spænd, hvilket er gjort da Manningtallet vil blive anvendt som kalibreringsfaktor for vandstandsmodellen. Dog er det antaget, at Manningtallet kan opnå værdier uden for dette spænd, da denne parametre ikke blot angiver ruheden, men også den manglende forståelse af systemt i modellen, såsom geometrien. Men inden modellen kan kalibreres, er det nødvendigt at opstille en initialperiode for at sikre, at initialgættet på vandstanden ikke har indflydelse på resultatet. Herudover er det valgt at lave en analyse af tidsskridtet i modellen for at reducere beregningstiden, uden at ændre resultatet.

Tidsskridtsanalyse

Det er valgt at foretage en analyse af tidsskridtets størrelse i modellen, for at se, hvornår tidsskridtet får en indflydelse på resultaterne og samtidig begrænse beregningstiden. Dette er gjort ved at køre modellen i 3 døgn med forskellige tidsskridt startende fra 1 s og derefter gradvist voksende. Udvalgte resultaterne fra disse simuleringer er sammenlignet i figur 3.11 med henblik på at studere afvigelse.



Figur 3.11. Simuleringer kørt med forskellige Δt 'er.

Det er vist i figur 3.11, at med større tidsskridt opstår der større afvigelser på vandstandssvingningerne. Det er i figuren vist tidsskridt med 1 sekund, som anvendes til sammenligning, 60 sekund, som er den sidste, der returnerer alle bokse med en korrelation på 1, 300 sekunder, der returnerer de første korrelationer under 0,9 og til sidst 1200 sekunder, som er det sidste tidsskridt, hvor modellen stadig returnerer gyldige resultater. Alle korrelationer er opstillet i bilag A 3.4, og det er fundet, at Δt skal være 60 eller under. Det skal endvidere påpeges, at tidsskridtene over 1200 s ikke giver nogen gyldige resultater, da hydraulisk radius bliver negativ grundet store spring i vandstanden mellem nogle bokse.

Figur 3.11 er understøttet af en korrelationsundersøgelse ved hjælp af formel 3.7, hvor det er muligt at se, at med større tidsskridt reduceres den procentmæssige R værdi.

$$R = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A}) (B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{\left(\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})^2\right) \left(\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2\right)}} \quad (3.7)$$

Reduktionen bliver markant fra og med 600 s, hvor der forekommer værdier under 30%. Det er ud fra disse undersøgelser valgt et tidsskridt på 60 s, som ud fra denne tabel er det største undersøgte tidsskridt, der angiver en R værdi på 100% (når alle tallene er afrundet på den fjerde decimal). De beregnede R værdier er opstillet i tabel A 3.2 i bilag 3.4.

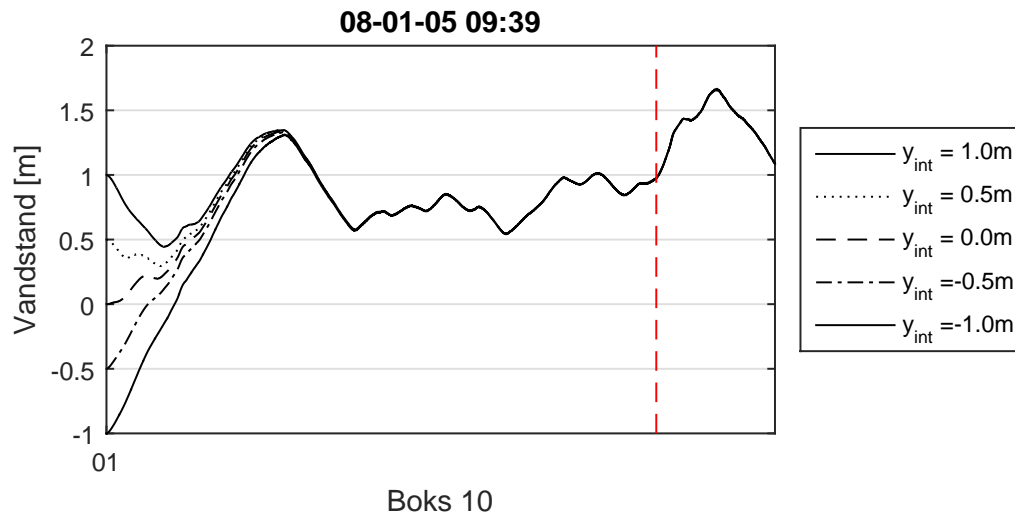
Initialperiode analyse

Det er valgt at lave en analyse af den periode, der går inden initialgættet for vandstanden ikke længere har indflydelse på resultatet af modellen. Det er her valgt at anvende fem forskellige initialgæt opstillet i tabel 3.4. Det er valgt at anvende et maksimalt initialgæt på én meter, idet at der forekommer vandstande over denne værdi inden for den første uge, men at vandstanden ikke opnår værdier over halvanden meter i denne periode. Modellen bliver herefter kørt for 10 dage for at se, hvornår modellen returnerer det samme resultat som de andre gæt.

| Scenarie nr | Initialgæt |
|-------------|------------|
| 1 | + 1,0 m |
| 2 | + 0,5 m |
| 3 | + 0,0 m |
| 4 | - 0,5 m |
| 5 | - 1,0 m |

Tabel 3.4. Scenarier til initialgætsanalysen.

I tabel 3.4 kan det ses, at der er udvalgt 5 scenarier med lige store spring imellem og med både negative og positive værdier. Resultatet af modellen med de forskellige initialgæt er illustreret i *figur A 3.24* bilag A 3.5 mens figur 3.12 viser hvor længe, den boks der er længst tid om at blive uafhængig af randen, er om at opnå en entydig værdi.



Figur 3.12. Initialperiode af den kritiske boks, hvor vandstandene er præcis den samme, med programmets præcision, gengivet til lidt over otte dage.

Det kan ses på figur 3.12, at initialperioden er lidt over otte dage. For at være sikker er det valgt at anvende en hel måned, idet modellens beregningstid ikke ændres betydeligt. De fleste bokse bliver allerede stabile indenfor de første fire dage. Det er valgt at anvende Januar fra 2005 som initialperiode, og spejlvende dataserierne.

Parameteranalyse

For at kalibrere modellen er det valgt at undersøge hvilken parameter der er den mest følsomme. Dette er gjort ved at tjekke resultater med de ændrede parametre illustreret i formel 3.8. Det er valgt at anvende Manningtallet og en korrigeringsfaktor på C_D , kaldet C_{DCorr} .

$$F(x) = \frac{(R_2 - R_1) / R_1}{(P_2 - P_1) / P_1} \quad (3.8)$$

Hvor:

| | | | |
|-----|--|--------------------------------|-----|
| F | | er følsomheden for parameteren | [-] |
| R | | er resultatet | [-] |
| P | | er parameteren | [-] |

Parametrene er ændret med 10%, for at have samme ændring af begge parametre, og resultatet er givet som korrelationen med de målte data for hhv. Løgstør Bredning og Skive Fjord opstillet i tabel 3.2.

| Manning | C_{DCorr} | R(Løgstør)[%] | R(Skive)[%] | F(Løgstør) | F(Skive) |
|---------|-------------|---------------|-------------|------------|----------|
| 100 | 1,0 | 90,81 | 94,63 | 1,000 | 1,000 |
| 110 | 1,0 | 90,23 | 93,86 | -0,064 | -0,081 |
| 90 | 1,0 | 91,37 | 95,23 | -0,062 | -0,064 |
| 100 | 1,1 | 90,81 | 94,66 | 0,001 | 0,003 |
| 100 | 0,9 | 90,80 | 94,53 | 0,001 | 0,010 |

Tabel 3.5. Parameter analyse for vandstandsmodel

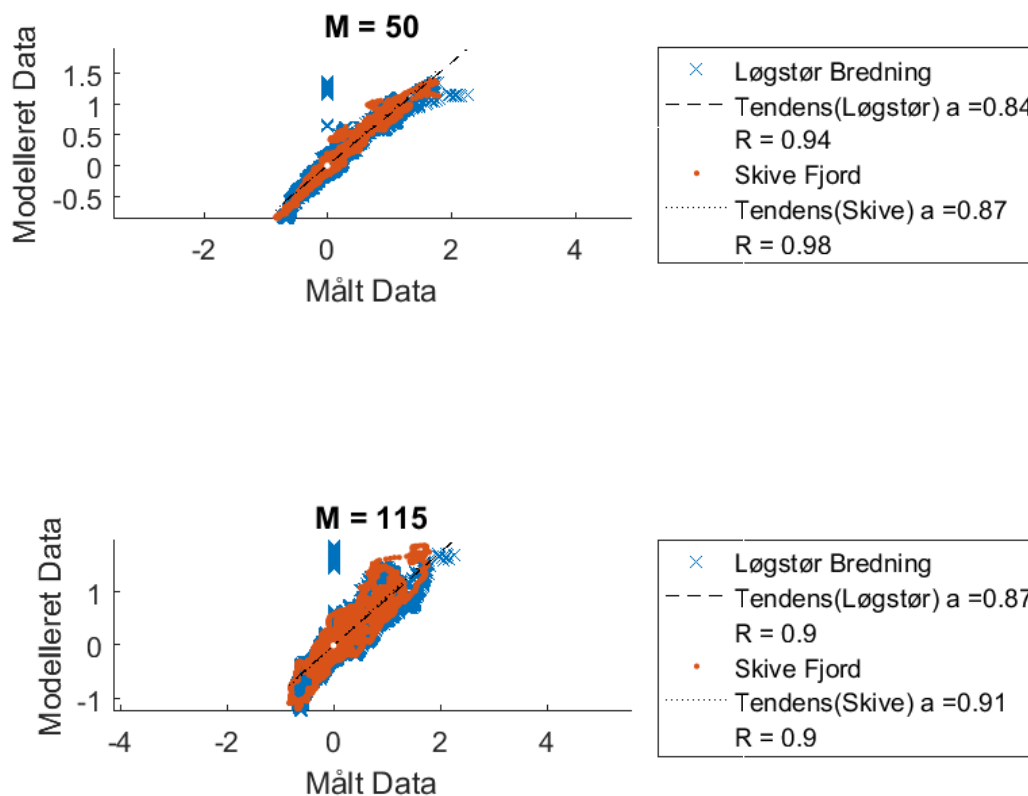
I tabel 3.2 kan det ses, at Manningtallet er den mest sensitive parameter. Derudover kan det ses, at sensitivitetsanalysen giver større udsving i Løgstør Bredning end i Skive Fjord.

3.3 Kalibrering af 1D-vandstandsmodellen

For at kalibrere modellen er det valgt at variere Manningtallet M , da dette blev fundet til at være den mest sensitive parameter under parameteranalysen. Da der kun er to måleserier tilgængelige, er det valgt at kalibrere for det første halvdel af året 2005, fra 01/01/05 til 31/06/05 i begge serier. Kalibreringen foregår ved at manuelt ændre Manningtallet og sammenligne modellens resultat med de målte data. Det er valgt at plote data op imod hinanden, således at hvis de to dataserier er ens, vil det svare til en ret linje med ligningen $f(x) = x$. Da det ikke forventes, at modellen returnerer et resultat, der er helt identisk med de målte data, vil ligningen blive ændret således, at den tager højde for ændringen ved $f(x) = ax$. Derved kalibreres modellen således, at hældningen a

opnår en værdi som er så tæt på én som muligt. Det er desuden valgt at føre tendenslinjen igennem koordinatsystemets nulpunkt for at kunne regne med en 0 % afvigelse ved en hældning af tendenslinjen lig med én.

Udover at bestemme hældningen sammenlignes også korrelationen for modellen og de målte data via formel 3.7 på side 24 for at sikre, at modellen og de målte data gengiver de samme udsving. Initialgættet er sat til $M = 50m^{1/3}/s$, og den kalibreret værdi blev fundet til $M = 115m^{1/3}/s$, hvilket er udenfor et realistisk spænd for et naturligt vandløb. Endvidere gør dette Manningtal, at modellen regner udenfor gyldighedsområdet for Manningtallet, opstillet i bilag A 3.7. Dette betyder, at modellens fejl ikke kan estimeres. Tendenslinjerne for de målte data i forhold til de simulerede data for de to Manningtal er illustreret på figur 3.13.



Figur 3.13. Målte- og modellerede data plottet op imod hinanden med hældningen a og korrelationen r .

Det kan ud fra figur 3.13 ses, at der i Skive Fjord generelt er en højere korrelation end i Løgstør Bredning, samt at der er en hældning tættere på 1. Derudover kan det ses, at modellen har en korrelation lig med, eller over 0,9 i alle tilfælde der er afprøvet. Manningtallet der giver den højeste korrelation er fundet til at være $115m^{1/3}/s$, hvilket giver graferne vist på figur 3.14. Ud fra figuren kan det ses, at korrelationen er blevet

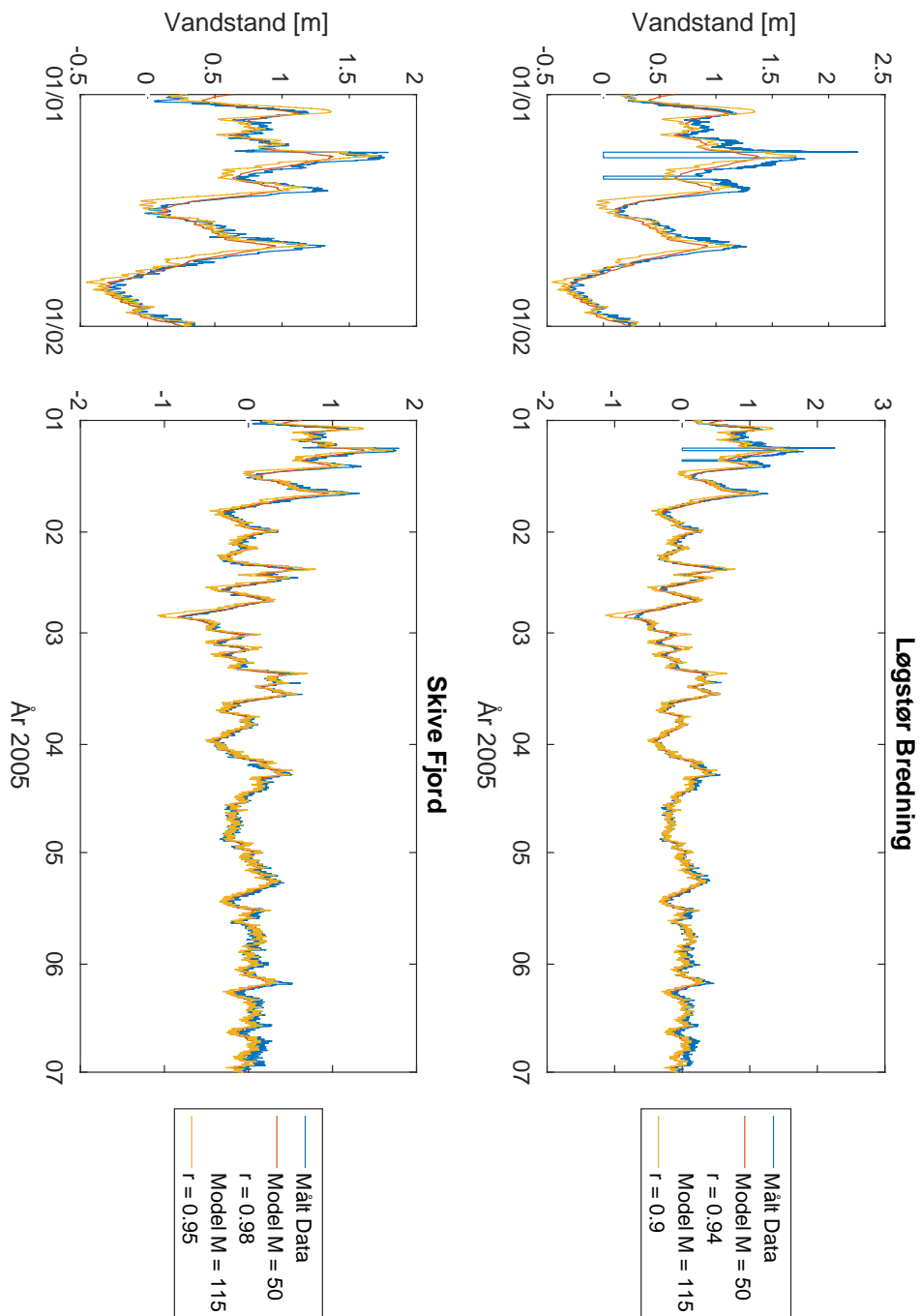
højere og giver korrelationskoefficienterne som vist i tabel 3.6. Det kan endvidere ses, at spredningen bliver større ved kalibreringen, hvilket er grundet at kalibreringen er foretaget for hældningen af de to dataseriers tendenslinje.

| Fjord | Hældning | | Korrelation | |
|------------------|----------|-------|-------------|-------|
| | Før | Efter | Før | Efter |
| Løgstør Bredning | 0,84 | 0,87 | 0,94 | 0,90 |
| Skive Fjord | 0,87 | 0,91 | 0,98 | 0,90 |

Tabel 3.6. Hældning og korrelationskoefficienter på vandstandsmodellen for Løgstør Bredning og Skive Fjord

Det kan ses ud fra figur 3.14 og tabel 3.6, at de målte data og de modellerede værdier efter kalibreringen giver en hældning tættere på én, men at korrelationen imellem de to serier er blevet forringet, dette betyder, at modellen ikke følger de samme udsving som de målte data.

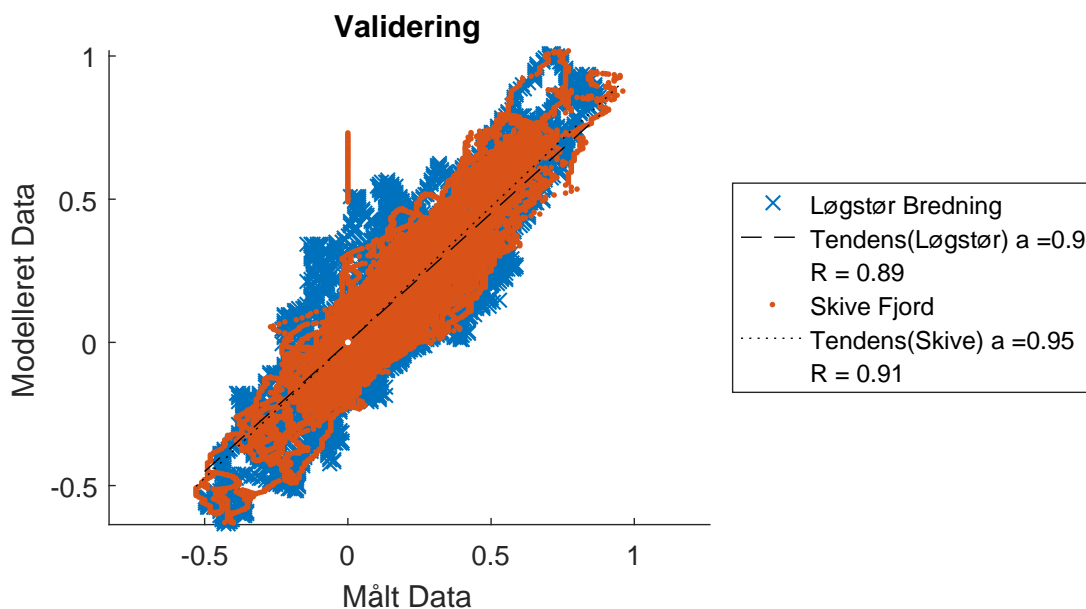
Det er vurderet at gengivelsen af middelvandstande vægter mere end udsvingene mellem vandstandene, samt at selvom korrelationskoefficienterne blev relativt lavere efter kalibreringen, har de høje absolutte værdier. Derfor er disse resultater accepteret, og modellen er anvendt med dette Manningtal til videre simulering af vandstande i Limfjorden. Der anvendes det samme Manningtal i hele Limfjorden for at simplificere kalibreringsprocessen, samt holde modellen simpel.



Figur 3.14. Kalibrering af modellen for perioden 01/01/2005 til 30/06/2005 hvor der er plottet, målte værdier, model med $M = 50$ og den kalibrerede model med $M = 115$.

3.4 Validering af 1D-vandstandsmodellen

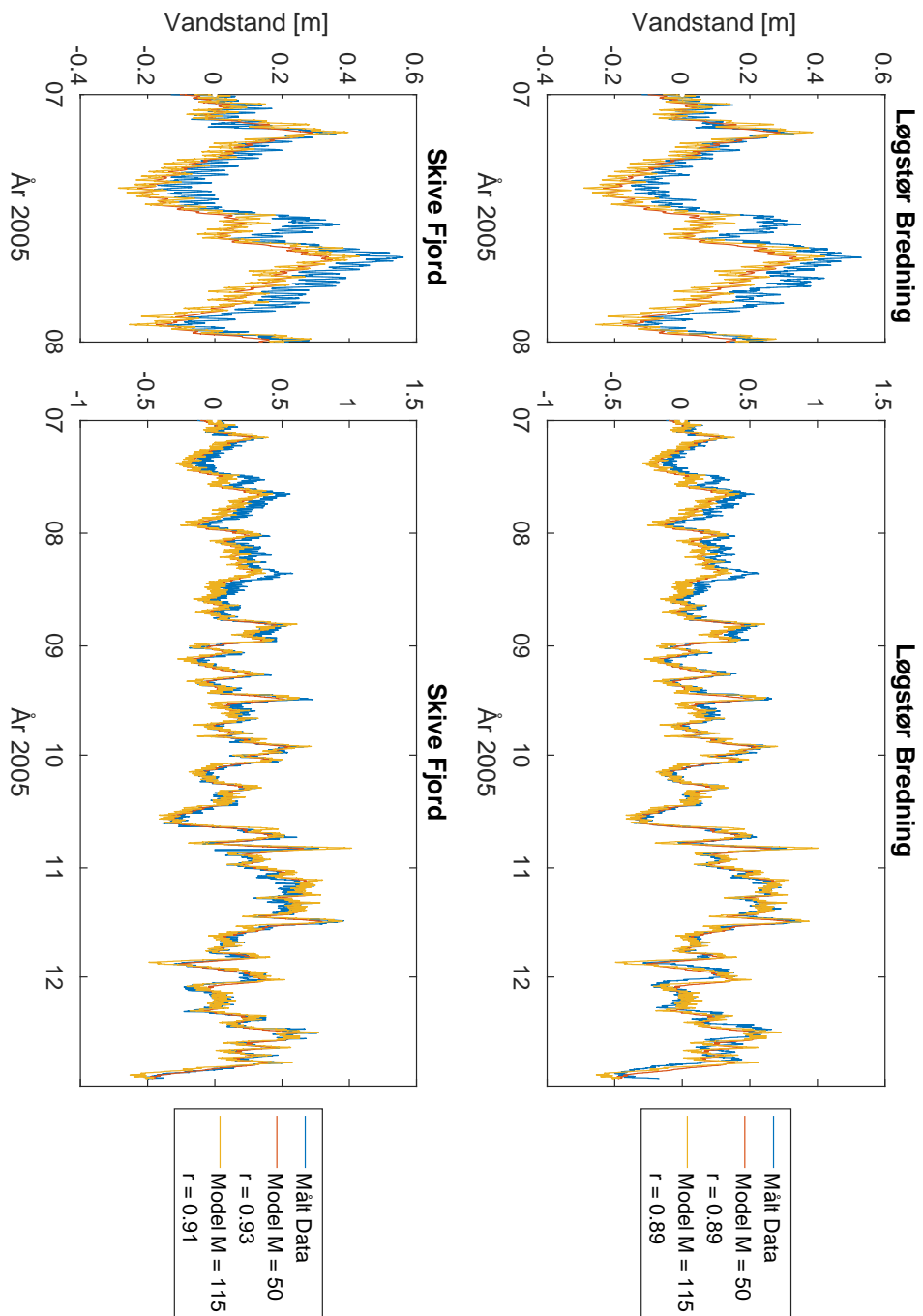
Validering af modellen er udført for de to dataserier for den resterende del af datasierne, altså perioden 01/07/05 til 31/12/05, med Manningtallet fundet under kalibreringen til $115 \text{ m}^{\frac{1}{3}}/\text{s}$. Korrelationen mellem de målte serier og modellen med et Manningtal på 115 er illustreret på figur 3.15.



Figur 3.15. Validering af modellen for perioden 01/07/2005 - 31/12/2005 med hældning og korrelation for Løgstør Bredning og Skive Fjord.

Det kan ses ud fra figur 3.15, at begge hældninger er blevet bedre, hvilket betyder, at modellen kan gengive denne periodes middelværdi bedre end for det første halvår. Korrelationen er faldet for Løgstør Bredning, dog er denne ændring så lav, at det ikke forventes at have større indflydelse på modellens resultater. De målte data er sammenholdt med de modellerede data i figur 3.16.

Det kan ud fra figur 3.16 ses, at korrelationen for modellen i Løgstør Bredning forbliver næsten den samme, mens den bliver bedre i Skive Fjord. For hele året er hældningerne og korrelationsværdierne opstillet i tabel 3.7, hvor de er opstillet for den ukalibrerede model og den kalibrerede model, for hhv. Løgstør Bredning og Skive Fjord. Korrelationsværdierne er opdelt i 1. halvår, 2. halvår og hele året.



Figur 3.16. Validering af modellen for perioden 01/07/2005 til 30/12/2005 hvor der er plottet, Målte værdier, model med $M = 50$ og den kalibrerede model med $M = 115$.

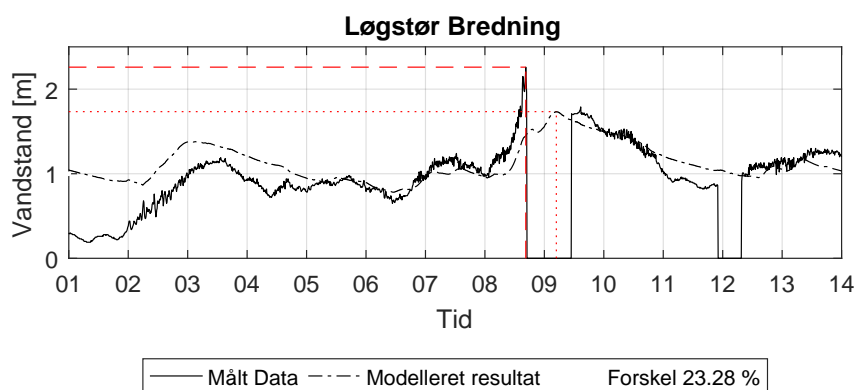
| Model | 1. halvår | | 2. halvår | | År 2005 | |
|-------------------|-----------|--------|-----------|--------|---------|--------|
| | Løgstør | Skive | Løgstør | Skive | Løgstør | Skive |
| Hældning a | | | | | | |
| Ukalibreret model | 0,8372 | 0,8727 | 0,8409 | 0,8898 | 0,8386 | 0,8793 |
| Kalibreret model | 0,8692 | 0,9135 | 0,9017 | 0,9476 | 0,8822 | 0,9273 |
| Korrelation r | | | | | | |
| Ukalibreret model | 0,9375 | 0,9771 | 0,9802 | 0,9337 | 0,9246 | 0,9637 |
| Kalibreret model | 0,9035 | 0,9481 | 0,8882 | 0,9119 | 0,9002 | 0,9365 |

Tabel 3.7. Hældninger og korrelationskoefficienter for den ukalibrerede- og kalibrerede vandstandsmodel, for første halvår, andet halvår og hele året for hhv. Løgstør Bredning og Skive Fjord.

Det kan ses i tabel 3.7, at alle hældningerne bliver bedre efter kalibreringen, dog bliver korrelationerne dårligere. Ud over dette kan det ses, at modellen giver de bedste hældninger ved det andet halvår af 2005, hvilket formodes at være på grund af, at der i denne del af simuleringsperioden ikke forekom så mange storme, hvilket kan ses på figur 3.8 på side 20. I samme periode kan det dog ses, at korrelationen imellem de målte data og de modellerede værdier forringes for det anden halvår, og i det hele taget forringes ved kalibrering. Dette antages at være grundet modellen har større udsving end de målte data. Det er dog valgt at forsætte med denne model, idet at både hældningen og korrelationen synes at være så tætte på én, at modellen antages at kunne gengive forholdene i Limfjorden.

Kalibrering af maksimalvandstand

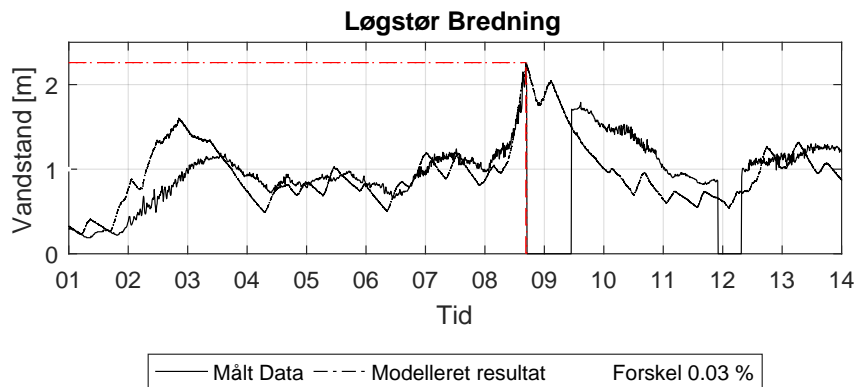
En anden ting, der ønskes af modellen, er, at den gengiver de korrekte ekstremvandstande, derfor er det undersøgt, hvor tæt på den største målte maksimalvandstand, modellen kan beregne illustreret på figur 3.17.



Figur 3.17. Målt maksimalvandstand i Løgstør Bredning sammenlignet med det modelleret maksimalvandstand over perioden 01/01 - 14/01 i år 2005.

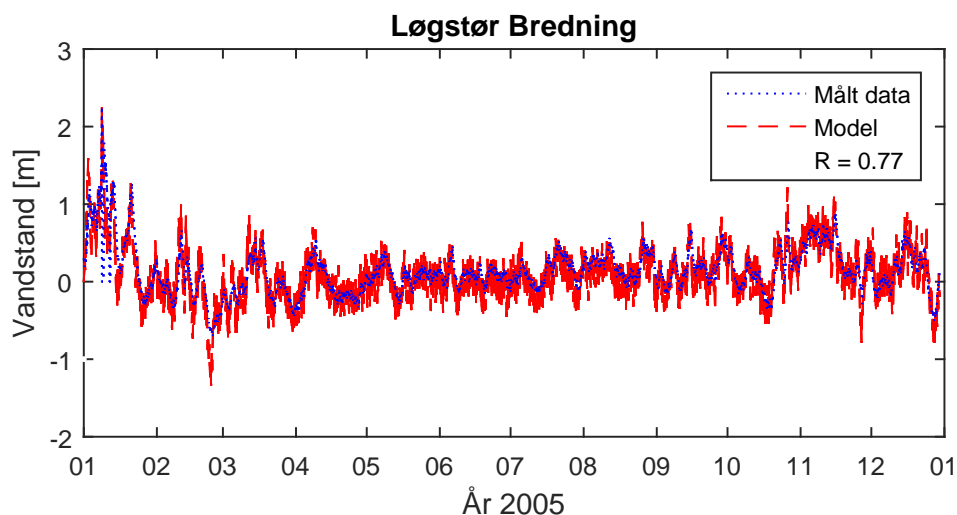
Det kan i figur 3.17 ses, at modellen gengiver den målte maksimalvandstand med en afvigelse på omkring 24 %. Derudover kan det ses, at den maksimale vandstand, der er modelleret forekommer senere end den målte, dog er der i denne periode målt vandstande på kote 0, som er fejlmålinger fordi måleren gik i stykker. Dette betyder, at den faktiske maksimalvandstand sandsynligvis forekommer senere, end målingerne tilkendegiver og formodes at have en højere værdi end den målte maksimalværdi.

Derfor er det valgt, at foretage en sekundær kalibrering for at se, om modellen kan gengive ekstremvandstanden, mens korrelationen imellem de målte data og modellen ikke forringes betydeligt fra den nuværende model. Den kalibrerede model er illustreret på figur 3.18, hvor forskellen på den målte og den modellerede ekstremvandstand er på under 0,05 %.



Figur 3.18. Model der er kalibreret til at ramme maksimalvandstanden.

For at opnå modellen illustreret på figur 3.18, er Manningtallet indstillet til $500 \text{ m}^{\frac{1}{3}} \text{ s}^{-1}$. Det kan ses, at modellen ikke rammer andet end ekstremvandstanden, og falder hurtigere der fra end de målte data gør. Sammenlignes denne model med de målte data for Løgstør Bredning, fås en korrelation på under 0,8, hvilket ikke er accepteret til at gengive forholdene i Limfjorden. De to dataserier er illustreret på figur 3.19.



Figur 3.19. Model med Manningtal, som giver korrekt maksimalvandstand, for hele året 2005.

På figur 3.19 kan det ses, at modellen har en stor amplitude, som de målte data ikke har, hvilket betyder, at korrelationen er reduceret til 0,77.

Derved antages det dog, at vandstandmodellen, der ikke er kalibreret til at gengive ekstremvandstanden, kan beregne forholdene i Limfjorden, og den anvendes derfor til udregning af vandstande ved de fysiske ændringer ved implementeringen af løsningsforslagene.

3.5 Implementering af løsningsforslag

For at kunne anvende de forskellige løsningsforslag præsenteret i kapitel 2 på side 5, er det nødvendigt at indstille modellen til at medtage de fysiske ændringer, der vil blive foretaget ved de forskellige løsningsforslag. Resultaterne af disse ændringer er præsenteret i afsnit 3.6.

Forlængelse af Høfde 59

Denne løsning omhandler en indsnævring af kanalen, således at tværsnittet og den hydrauliske radius ændres for Thyborøn Kanal. Dette betyder, at vandføringen ind i Limfjorden vil blive begrænset ved en reduktion af bredden fra 1100 m til 600 m.

I modellen er der indsat en ny bredde i Thyborøn Kanal, men alle andre forhold er holdt konstante. Ændringen af kanalen er indført over hele kanalens længde.

Forlængelse af Høfde 63

Denne løsning indsnævrer tværsnittet inde i Thyborøn Kanal, ved at ændre bredden af kanalen. Dette betyder, at vandføringen ind i Limfjorden vil blive begrænset ved en ændring i bredden fra 1100 m til 500 m.

Bredden af Thyborøn Kanal er på samme måde som ved forlængelse af høfde 59 ændret uden at påvirke resten af systemet.

Dæmning med gennemstrømningssluse

Den sidste løsningsforslag, der er valgt at undersøge, er en sluseløsning, hvor der vil blive opført en stormflodsbarriere, der lukker ved høje vandstande, dog fremgår det ikke af Kystdirektoratets løsningsforslag Ingvarlsen et al. [2012], ved hvilken vandstand, gennemstrømningsslusen skal lukkes.

Denne løsning ændrer mængden af vand, der kommer ind i Limfjorden, hvor dette er medtaget i modellen ved at indstille vandføringen gennem Thyborøn Kanal til at være nul. Dette repræsenterer en lukning af sluseportene.

Tværsnitsarealet af sluseåbningerne er en reduktion af gennemstrømningsarealet i forhold til den nuværende situation. Det vurderes ud fra Kystdirektoratets løsningsforslag, at bredden af gennemstrømningsslusen er 740 m. Dybden af gennemstrømningsslusen sættes til 6 m.

Det er valgt at opstille 17 forskellige scenarier for lukning af gennemstrømningsslusen, som testes igennem modellen. Lukningskoten er indstillet til mellem 0,00 m til 1,50 m, med spring på 10 cm. De forskellige scenarier er opstillet i tabel 3.8.

| Scenario | Luknings kote [+m] |
|----------|--------------------|
| Standard | Ingen lukning |
| 1 | 0,0 |
| 2 | 0,1 |
| 3 | 0,2 |
| 4 | 0,3 |
| 5 | 0,4 |
| 6 | 0,5 |
| 7 | 0,6 |
| 8 | 0,7 |
| 9 | 0,8 |
| 10 | 0,9 |
| 11 | 1,0 |
| 12 | 1,1 |
| 13 | 1,2 |
| 14 | 1,3 |
| 15 | 1,4 |
| 16 | 1,5 |

Tabel 3.8. Scenarier simuleret med en sluseløsning

For at simulere scenarierne præsenteret i tabel 3.8, er det valgt at indføre et momentant lukningskriterie, på de angivne lukningskoter. Dette betyder, at modellen vurderer, om vandstanden i Nordsøen overstiger lukningskoten for hvert enkelt tidsskridt. Hvis lukningskoten overstiges, sættes vandføringen fra Nordsøen til nul, indtil det næste tidsskridt, hvor randebetingelsen igen er under lukningskriteriet.

Herudover er der indført et lukningskriterie til ensretning af vandføringen igennem gennemstrømningsslusen, da der kan forekomme en negativ vandføring, altså mod vest. Derfor skal slusen lukkes, hvis vandstanden er højere i Nissum Bredning end i Nordsøen, men også hvis der forekommer negativ vandføring ved vindstuvning.

Løsningsforslagene, der er udvalgte, har tilfælles at de indskrænker tværsnitsarealet ved Thyborøn Kanal, hvorved det forventes, at vandstanden inden i fjorden sænkes, da vandet fra Nordsøen får sværere ved at komme ind i systemet. Den største sænkning forventes ved de løsningsforslag der begrænses tværsnittet mest muligt. Ud over dette vil en dæmning med gennemstrømningssluse kunne lukke af for vandet ved ekstremvandstande, hvorved der ikke kommer mere vand ind i Limfjorden ved Thyborøn Kanal. Derved forventes det, at vandstanden er afhængig af vandstanden inden lukningen, samt vandstanden og vinden ved Hals Barre. Da vandet fra Hals skal igennem et langt stykke med et forholdsvis lille tværsnit, for at komme ind i den centrale del af Limfjorden, forventes det, at vandstanden i de kritiske områder, ved Løgstør og Skive, ikke påvirkes i samme grad, som hvis vandet kom fra vest eller begge sider.

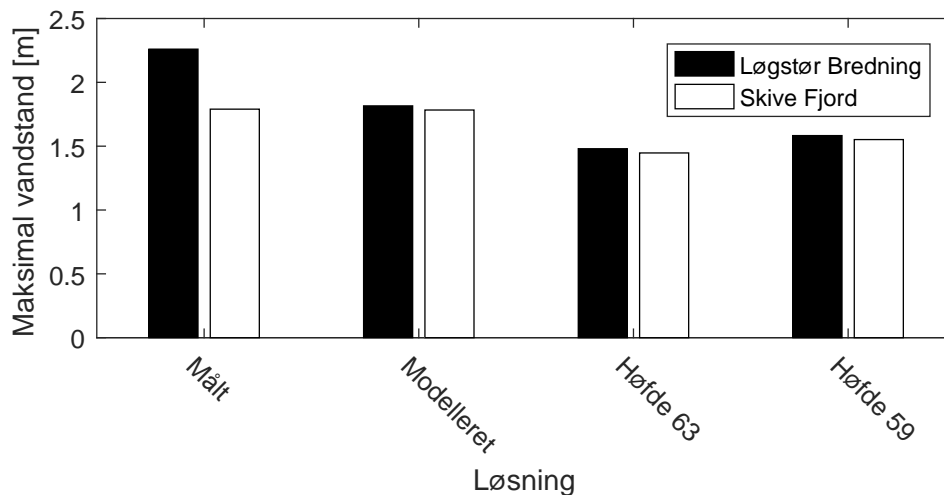
3.6 Resultat af 1D-vandstandsmodellen

Vandstandsmodellen er kørt for de tre forskellige løsningsscenarier, som er beskrevet i kapitel 2 på side 5. Disse løsninger er delt op i to kategorier, som er en delvis lukning eller en komplet lukning.

Delvis lukning af Thyborøn Kanal

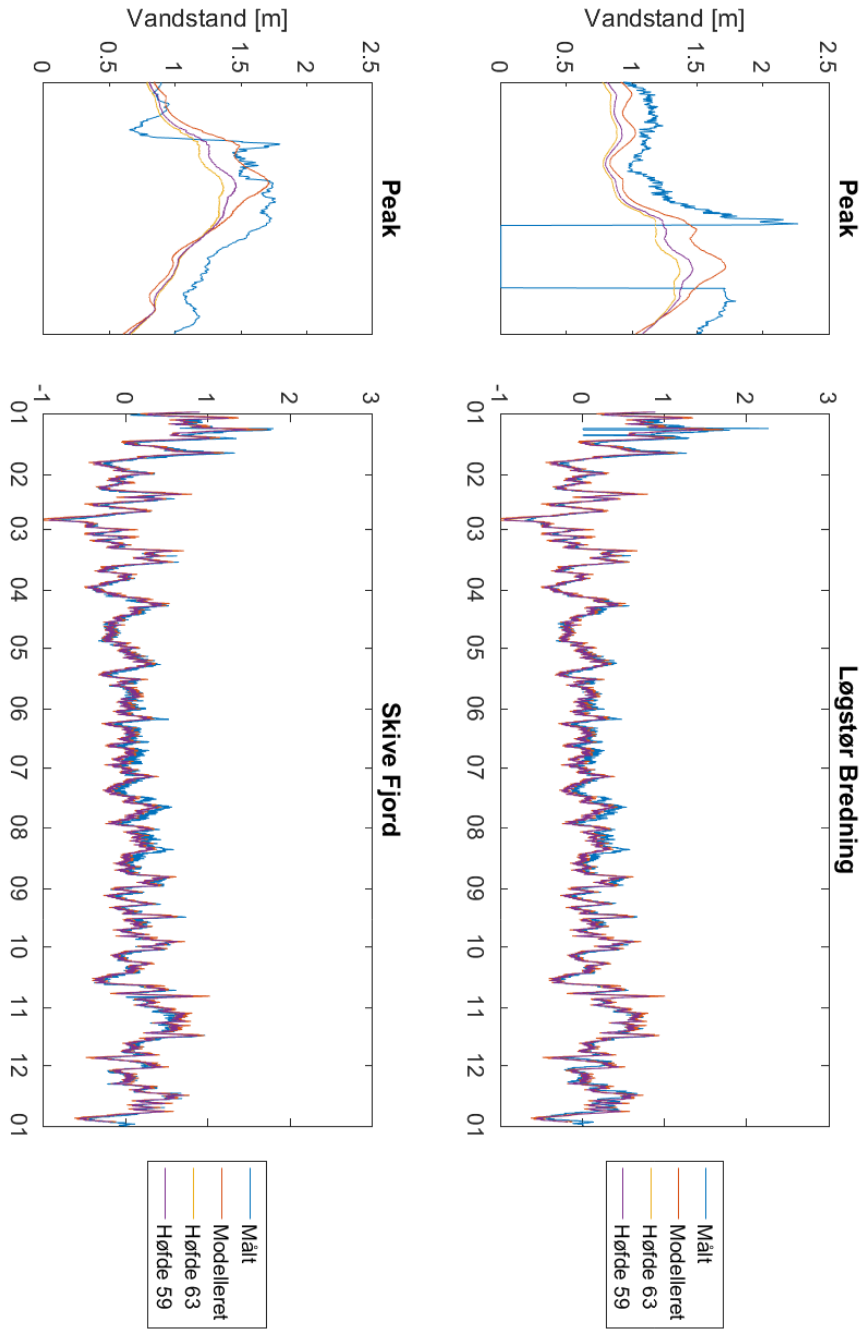
De delvise lukninger dækker over løsninger, hvor kun dele af tværsnittet i Thyborøn Kanal bliver blokeret. Der er her valgt to forskellige løsninger, som er en udbygning af forskellige høfder, hhv. 59 og 63, ved Thyborøn Kanal. Løsningerne påvirker modellen ved at ændre tværsnitsarealet og den hydrauliske radius for Thyborøn Kanal. De ændrede parametre ved en vandstand i kote 0 er præsenteret i tabel A 4.1 i bilag A 4. Scenarierne er kørt for hele perioden, som er år 2005, samt en forperiode på en måned, hvilket resulterer i vandstandene illustreret i figur 3.20.

På figur 3.20 kan det ses, at løsningerne vil give et mindre udsving i vandstanden i Løgstør Bredning og Skive Fjord. Den maksimale vandstand vil højst falde med 78 cm i forhold til de målte data, og 34 cm i forhold til de modellerede vandstande. Det kan også ses, at løsningen med udbygning af høfde 59 har mindre udsving end løsningen med udbygning af høfde 63, hvilket stemmer overens med forskellen i tværsnitsændringerne. Det kan også ses, at maksimalvandstanden vil falde ved udbygning af høfderne, hvilket er illustreret på figur 3.21.



Figur 3.21. Maksimalvandstande ved høfdeudvidelse i Thyborøn Kanal.

På figur 3.21 er det tydeligt, at vandstanden formindskes for de to løsningsforslag, og at den største reduktion er ved udvidelsen af høfde 63. Udregnes den procentvise afvigelse af ekstremvandstanden i forhold til referencen, fås en reduktion i Løgstør Bredning og Skive



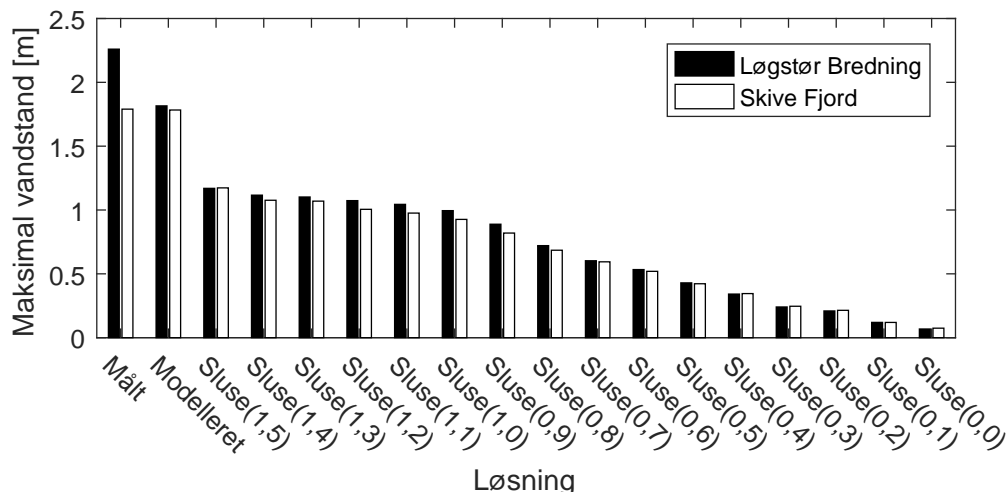
Figur 3.20. Resultater af høfteudvidelsesløsninger ved Thyborøn Kanal.

Fjord med hhv. 30,0 % og 13,3 % ved indførslen af hofde 59, hvor der ved udbygning af hofde 63 fås en afvigelse på hhv. 34,5 % og 19,2 %.

Resultatet af simuleringen er også opstillet i tabelform i appendix tabel A 4.2 i bilag A 4, hvor resultaterne for de andre bokse ligeledes er opstillet. Det kan ud fra tabellen også ses, at vandstandene ændres mest i den vestlige del af Limfjorden.

Dæmning med gennemstrømningsluse

Denne løsning blokerer hele tværsnittet af Thyborøn Kanal, ved ekstreme vandstande i Nordsøen og forbinder de to landtanger. Løsningen påvirker ikke kun tværsnittet, men kan også blokere vandføringen ved høje vandstande. Her er forskellige løsninger opstillet på samme måde, således at den maksimale vandstand i Thyborøn Kanal ikke overskrider en fastlagt design-lukningskote. Den maksimale vandstand ved de 17 forskellige scenarier er opstillet i figur 3.22.



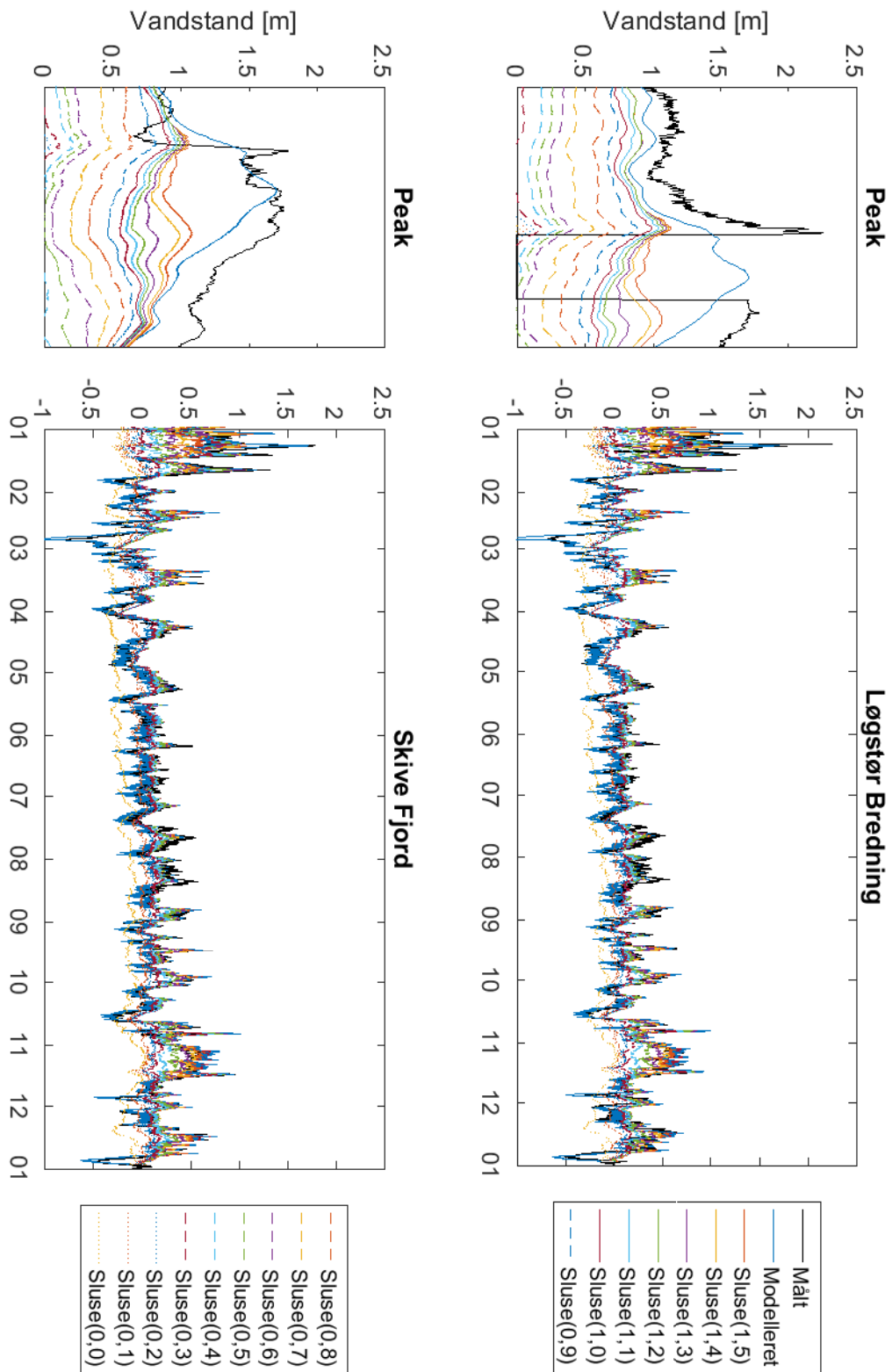
Figur 3.22. Maksimalvandstandene ved de forskellige sluseløsninger ved hhv. Løgstør Bredning og Skive Fjord, sammenlignet med de målte maksimalvandstande og de modellerede uden dæmning.

I figur 3.22 kan det ses, at de største forskelle i vandstande sker ved de mindste lukningskoter. Disse scenarier er også dem, hvor der er lukket i længst tid, hvilket er opstillet i tabel A 4.3 i bilag A 4. Derudover kan det ses, at alle løsningsforslagene mindsker de ekstreme vandstande. Vandstande i Løgstør Bredning og Skive Fjord er vist i figur 3.23, for alle de forskellige scenarier.

Ud fra figur 3.23 kan det ses, at lukningen ved de mindste vandstande giver den største effekt, som forventet. Derudover kan det ses, at alle sluseløsningerne har en stor indflydelse på ekstremvandstanden for både Løgstør Bredning og Skive Fjord, ved stormen den 8. januar ved denne simple model.

Samlet vurdering

De tre løsningsforslag er alle fundet til at mindske ekstremvandstanden. Den bedste løsning, til reduktion af ekstremvandstandene, er fundet til at være en dæmning med en gennemstrømningsluse, hvor slusen lukkes ved en vandstandskote på +0,0 m. Dog synes dette ikke at være en reel løsning idet at tidevandet i Thyborøn ofte når over kote + 0,2 m. Derfor er det valgt at kigge på Løgstørs laveste punkt, idet at der er flest skadesanmeldelser



Figur 3.23. Resultater af sluseløsningen ved Thyborøn Kanal.

i denne del af Limfjorden fundet i kapitel 1.1 side 3. Dette punkt er angivet til at ligge i kote +1,0 m Jensen [2009]. Herudover er det valgt også at fokusere på Skive, da der her også ofte er problemer med oversvømmelser og skader. Ekstremvandstandene simuleret for de to byer er opstillet i tabel 3.9. For resten af boksene er resultaterne vedlagt på bilags CD E. 3.8 og E. 3.9.

| Løsningsforslag | Ekstremvandstand Løgstør Bredning [m] | Ekstremvandstand Skive Fjord [m] |
|---------------------------|--|-------------------------------------|
| Målt vandstand | 2,26 | 1,79 |
| Modelleret | 1,82 | 1,78 |
| Udbygning af hofde 59 | 1,58 | 1,55 |
| Udbygning af hofde 63 | 1,48 | 1,45 |
| Dæmning med sluse (1,5 m) | 1,67 | 1,17 |
| Dæmning med sluse (1,0 m) | 1,00 | 0,93 |

Tabel 3.9. Modellerede ekstremvandstande ved de forskellige løsninger.

Det kan ud fra tabel 3.9, ses at alle løsninger, der er simuleret, kan reducere ekstremvandstanden. Derudover kan det ses, at modellen er bedst til at gengive ekstremvandstandene i Skive Fjord, hvilket formodes at være på grund af modellens opbygning, hvor der findes en middelvandstand for boksen, og ikke opstuvning i boksen selv. Den bedre gengivelse af ekstremvandstande i Skive Fjord skyldes, at denne boks er mindre, og dermed at der skal ændres et mindre volumen pr. vandstandsændring i forhold til Løgstør Bredning. Det kan ydermere ses, at den eneste løsning, der opnår en ekstremvandstand på under 1 m i Løgstør, er Dæmning med gennemstrømningsluse, hvor der lukkes ved vandstande over kote +1 m i Nordsøen. Tages der højde for modellens underestimering af maksimalvandstanden, formodes det dog, at denne løsning i virkeligheden vil have en mindre reduktion end den modellerede.

3.7 Konklusion på 1D-vandstandsmodel

1D-vandstandsmodellen kan gengive vandstande for Limfjorden på tilfredsstillende vis, under normale forhold, holdt op mod de to kendte dataserier fra Løgstør Bredning og Skive Fjord med et acceptabelt sammenfald af data og høje korrelationskoefficienterne. Dog synes ekstremvandstandene underestimerede, hvilket formodes at være, fordi der regnes en middelvandstand for hele boksen. Derved er det konkluderet, at denne model kan anvendes til at modellere de generelle nuværende forhold for Limfjorden. Da Limfjorden er alsidig i størrelse og geometri, antages det, at denne model ligeledes kan gengive samtlige bokse i Limfjorden, og samtidig er i stand til at beregne vandstanden korrekt, ved indførsel af ændrede forhold i forsøget på at mindske ekstremvandstandene. Det forventes ikke, at resultatet gengiver den korrekte sænkning, men at den gengiver den korrekte tendens.

Med modellen kan det ses, at de løsningsforslag, der er foreslået af Kystdirektoratet, vil have en indflydelse på ekstremvandstandene igennem Limfjorden. Især ved indførelse af en dæmning med en sluseløsningen kan oversvømmelser af de lavtliggende områder omkring Limfjorden mindskes. Det forventes at modellen overestimerer sænkningerne, da modellen ændrer tværsnittet af hele Thyborøn Kanal, samt i forvejen underestimerer ekstremvandstandene. Dette er blandt andet tydeliggjort ved højdeudvidelserne, hvor det var forventet, at modellen returnerede en lav sænkning ud fra Kystdirektoratets rapport Ingvarsen et al. [2012], hvorfra løsningsforslagene er fundet.

Det er valgt at foretage en videre analyse af løsningsforslagene, med en mere avanceret model. Den avancerede model anvendes idet, at den én-dimensionelle vandstandsmodel udregner en middelvandstand for boksen og derved ikke opnår de målte ekstremvandstande. De påsatte løsningsforslag ændrer ydermere hele tværsnittet og ikke kun ændres lokalt i modellen. Derfor er geometrien forsøgt forbedret i den mere avancerede model, for at kunne diskretisere vandspejlskoten med en finere opløsning.

4. 2D-vandstandsmodel

Der anvendes en to-dimensionel vandstandsmodel til at beregne reduktionen af vandstandene i hhv. Løgstør Bredning og Skive Fjord ved implementering af løsningsforslagene, der ligeledes blev anvendt i 1D-vandstandsmodellen. 2D-vandstandsmodellen er en mere avanceret model end 1D-vandstandsmodellen til at undersøge disse løsningsforslag. I den nye model er det valgt at forbedre både den fysiske forståelse af problemet, og den matematiske formulering, der anvendes til at beskrive vandstanden. Modellen skal derfor kunne give en bedre fysisk beskrivelse af nærområdet, hvor løsningerne implementeres således, at den er mere overensstemmende med forholdene, som vil forekomme i virkeligheden ved udførelsen af løsningsforslagene. Denne model udemærker sig også ved, at den, modsat 1D-vandstandsmodellen, kan anvendes ved ændret geometri lokalt i systemet, som f.eks. ved indførelse af forskellige løsningsforslag.

Det forventes, at en mere avanceret model kan returnere vandstande, der følger de målte vandstande, bedre end den simple model opstillet i 1D-vandstandsmodellen. Denne mere avancerede model vil blive opstillet med en finere stedsdiskretisering, samt anvende en mere avanceret matematisk model, hvorved modellen forventes at kunne gengive ekstremvandstandene mere præcist, samt illustrere, hvor i systemet de vil forekomme. Dog forventes beregningstiden også at blive øget, da denne model skal foretage flere beregninger stedsligt og tidsligt, end den simple model skal. Da denne model ønskes opstillet med en finere diskretisering, forventes det også, at modellen er bedre til at beskrive ændringerne, og derved resultatet for resten af systemet.

Udover dette ønskes det også af modellen, at den skal kunne give en bedre diskretisering af de geografiske forhold således, at hver af bredningerne ikke længere er gengivet af en enkelt boks, men derimod opdeles de tidligere bokse i flere beregningsceller, så det også kan undersøges, hvor de ekstreme vandstande vil opstå mere præcist end i 1D-vandstandsmodellen. Dette vil også medføre, at der vil forekomme flere indsnævring end dem, der er medtaget i 1D-vandstandsmodellen, som kan øge vandstanden i andre punkter end dem, der er fundet i 1D-vandstandsmodellen. Endvidere kan en bedre stedslig opdeling medføre en bedre model til gengivelse af bundforholdene, som igen kan medføre en bedre forståelse af de hydrauliske forhold i Limfjorden. Derved kan modellen give en bedre stedslig opdeling af vandstanden, især ved de større bokse. Dette gør også, at det er muligt at indføre flere øer end Mors, og at der i modellen vil komme flere mindre fjorde så som Halkjær Bredning.

Udover en bedre beskrivelse af bathymetrien er det også valgt at anvende en mere avanceret matematisk model til at beskrive vandføringerne i Limfjorden, hvor en af de største forskelle er, at der i denne model vil forekomme vandføringer i 2 dimensioner. Modellen inkluderer endvidere turbulens og moment, hvilket 1D-modellen ikke gør. Det er valgt først at opstille en model, der tilnærmelsesvis gengiver virkeligheden og sammenligne denne model med simplificerede modeller, således at beregningstiden nedsættes, uden at resultatet forringes.

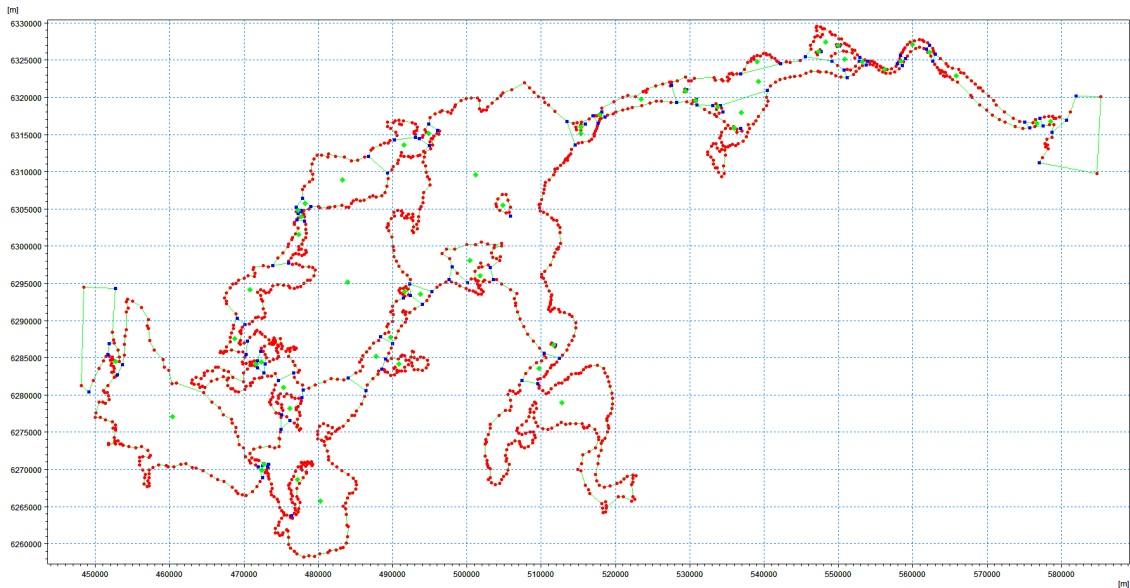
4.1 Opbygning af 2D-vandstandsmodel

Denne model er opbygget med en ny geometrisk beregningsmodel, som opdeler Limfjorden i et beregningsnet bestående af beregningsceller. Dette net er afgrænset af rande, som er opstillet manuelt, hvor der ude i Nordsøen og Kattegat, bliver påsat en randbetingelse, på samme måde som ved boksmodellen. I modsætning til den tidligere model bliver bathymetrien dog indlæst af målte punkter og interpoleret således, at der er en variabel flade som nedre rand på modellen. Den sidste rand, der indføres er en afgrænsning imellem vand og land, hvor det i denne model er valgt ikke at medtage topografien, og i stedet lade denne afgrænsning fortsætte lodret op. Ved at interpolere bathymetrien opnås der også et mere realistisk tværsnitsprofil, i forhold til boksmodellen.

Beregningsnettet, der anvendes er opdelt i mange små beregningsceller, hvor størrelsen af felterne er afgjort af, hvor i systemet, der forventes de største ændringer. Disse områder er ofte tæt ved indsnævringerne i Limfjorden, da vandet her accelererer igennem indsnævringerne, og decelererer i det større volumen umiddelbart efter indsnævringerne. Udover dette er det valgt, at modellen ikke må have under tre celler i et tværsnit, da modellen ellers ikke vil kunne diskretisere vanddybderne på tværs af tværsnittet.

Den matematiske formulering bag denne model er bygget på Navier-Stokes ligning samt Smagorinskys turbulens model, beskrevet i bilag A 5, idet at beregningsnettet ikke er opstillet med så små beregningsceller at de mindste turbulenshvirveler kan simuleres. 2D-vandstandsmodellen er opstillet i programmet MIKE-zero. Teori, om hvorledes MIKE's hydrodynamiske modul regner, er opstillet i bilag A 5.

Inddelingen af beregningsnettet er opbygget uden at medtage beregningstiden som en begrænsning. Modellen anvender derfor en fin inddeling af afgrænsningen mellem land og vand, hvilket betyder, at punkterne, der afgiver kystlinjen, er angivet tæt på hinanden. Afgrænsningen af Limfjorden for modellen er illustreret på figur 4.1.



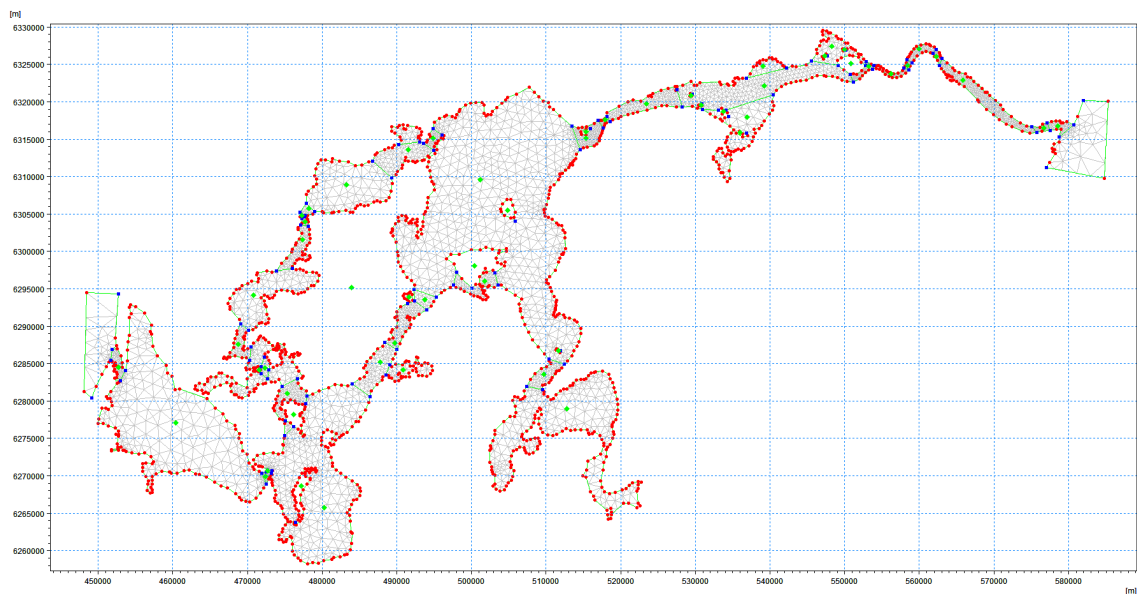
Figur 4.1. Afgrænsningen af Limfjorden til anvendelse i modellen.

Med denne kystlinjeafgrænsning kan det blandt andet ses, at alle betydelige øer i Limfjorden er medtaget for at beskrive fjordens geometri så præcist som muligt.

Ud fra Limfjordens afgrænsning, kan de enkelte beregningsceller, som videre anvendes til beregning i modellen, genereres. For at gøre modellen tilstrækkelig præcis, skal de enkelte beregningsceller være små. Beregningscellerne størrelse langs kysten er til dels styret af længden på kystlinjens inddeling, da der ellers vil opstå beregningsceller, som overlapper kystlinjen. Dette betyder også, at cellerne langs kysten vil blive større, hvis afgrænsningen af kysten bliver grovere.

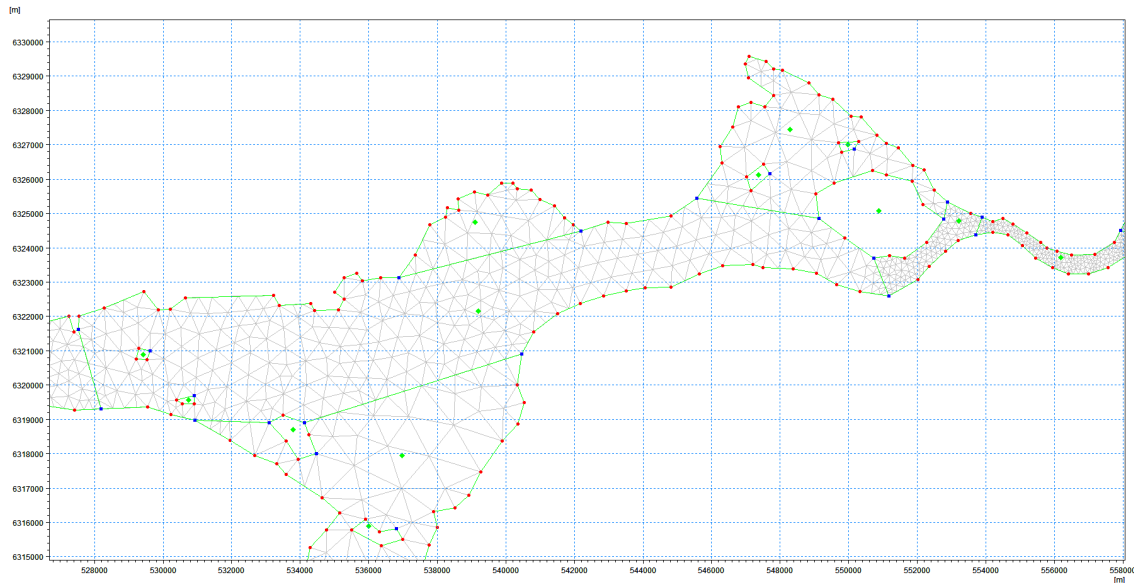
Størrelsen af beregningscellerne styrer også, hvor store tidsskridtene kan blive. Dette bliver styret af Couranttallet, som beskriver forholdet mellem vandhastigheden og beregningshastigheden, hvilket ikke må blive for højt. Som udgangspunkt skal Couranttallet holdes under én, men modellen kan dog i visse tilfælde fungere ved højere værdier. En værdi over én vil betyde, at vandet ville kunne nå længere end længden af boksen på et enkelt tidsskridt, hvilket kan gøre modellen ustabil. Dette betyder samlet set at en model med små celler skal foretage flere beregninger for at simulere vandstanden end modeller med et grovere beregningsnet. Dette er nødvendigt på grund af, at modellen med små beregningsceller både har flere celler og kortere tidsinddelinger.

Til generering af beregningscellerne anvendes et maksimalt overfladeareal af hvert enkelt af beregningscelle på $2\,000\,000\text{ m}^2$. Dette maksimalareal er dog reduceret i visse dele af fjorden, da der kan være brug for større præcision. På randene af modellen, vest for Thyborøn og øst for Hals, anvendes der større maksimalarealer, da det her ikke er nødvendigt med de små beregningsceller. Inddelingen af beregningsnettet resulterer i 8886 trekantede beregningsceller og 5537 vandstandspunkter, hvilket er illustreret på figur 4.2.



Figur 4.2. Beregningscellerne som anvendes i modellen.

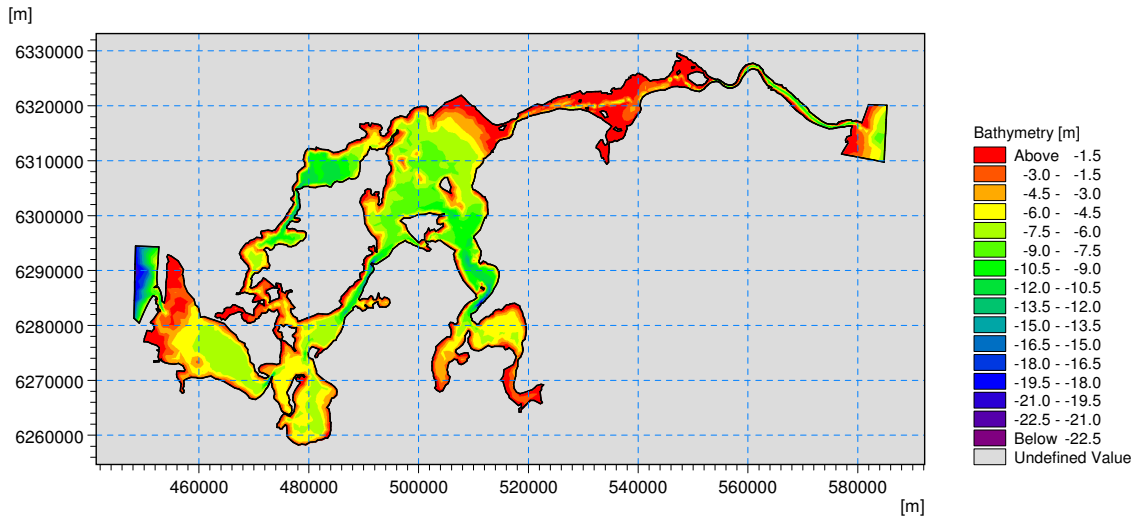
På figur 4.2 ses det, at beregningscellerne har forskellige størrelse ud fra, hvor i fjorden de er placeret. I de større åbne områder, hvor der er langt til kysten af fjorden, er beregningscellerne større, end de er tæt på kysten og i indsnævringerne. Det er valgt at foretage denne differentiering af cellestørrelsen idet der forekommer større ændringer visse steder i Limfjorden end andre, eksempelvis vil hastigheden af vandet ved Oddesund ændres mere over en given afstand end hastigheden i Løgstør Bredning over samme afstand. Beregningsnettet forfines ligeledes, hvor der forekommer større vanddybder, hvilket betyder, at der nogle steder i fjorden er mere end én størrelse af beregningsceller parallelt i en kanal. Eksempler på forskellige størrelser på beregningsceller parallelt med hinanden er vist på figur 4.3, som illustrerer strækningen af Limfjorden fra Nibe Bredning til Aalborg.



Figur 4.3. Beregningscellerne mellem Løgstør og Aalborg.

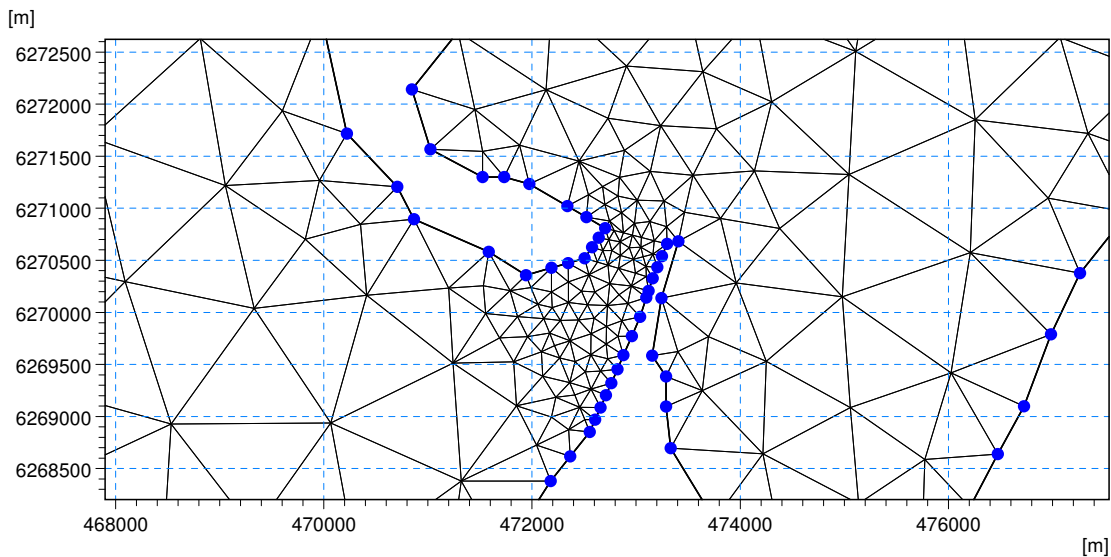
På figur 4.3 ses det, at den del af Nibe Bredning, hvor den er dybest og derved der, hvor den største vandføring finder sted, har en finere inddeling af beregningsceller. De ydre dele af fjorden, som ligger både nord og syd for hovedstrømmen, har en grovere inddeling af beregningscellerne. Både i den østlige- og vestlige del i figur 4.3 ses ligeledes forfinede inddelinger af beregningscellerne, også afgrænset af grønne linjer. Disse områder er ikke forfinede på grund af dybden af fjorden men derimod ud fra en antagelse om, at der skal være mindst tre beregningsceller i bredden af fjorden. Dette antages for at sikre, at vanddybden kan diskretiseres, selvom den er ulige fordelt over fjordens tværsnit. Den ulige fordeling af vanddybden i fjorden er specielt udtalt i de smalle områder af fjorden, hvor der tæt ved kysten kan være meget lavvandet, men længere ude er dybere på grund af kraftigere strøm og udgravet sejlrende. Den ulige fordeling af dybderne ved smalle tværsnit i fjorden fører til, at der ved Aalborg anvendes et maksimalt overfladeareal af beregningscellerne på $10\,000\text{ m}^2$, hvilket er det mindste maksimale areal, som er anvendt i modellen.

Når beregningscellerne er genereret, anvendes de til at interpolere dybdemålingerne så Limfjorden får en "bund", hvis kompleksitet afhænger af både beregningscellernes størrelse, men også hvor tæt dybdemålingerne ligger. Med den avancerede inddeling af beregningsnettet opnås vanddybderne i Limfjorden ved interpolering, som er vist på figur 4.4.

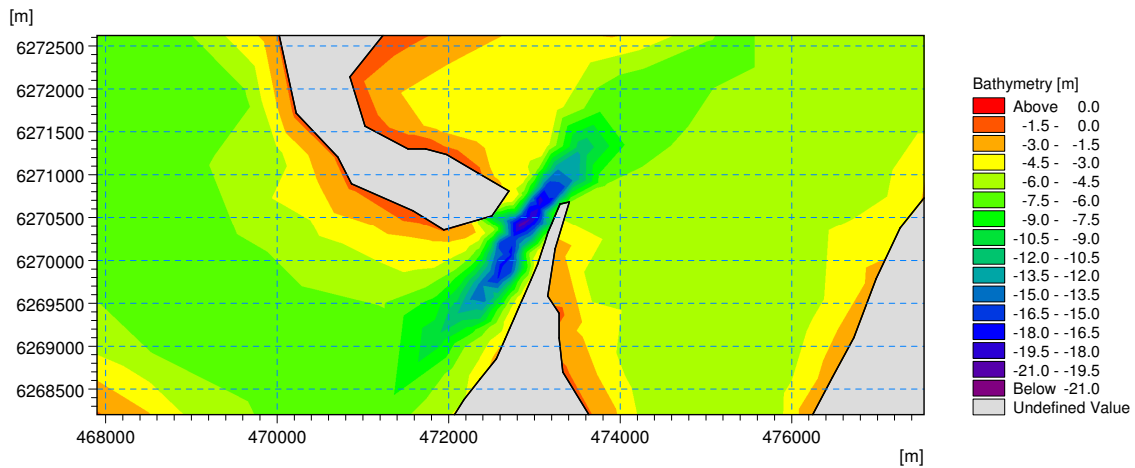


Figur 4.4. De interpolerede vanddybder af Limfjorden i modellen.

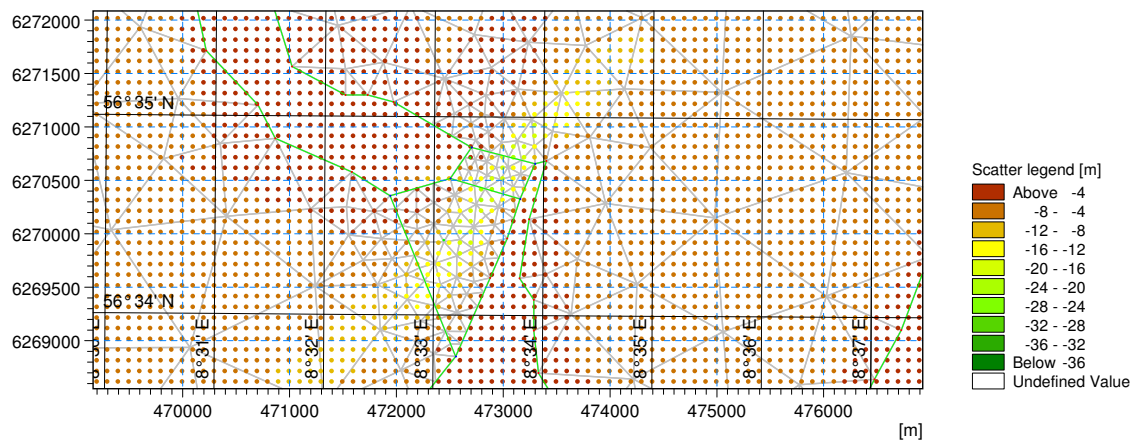
På figur 4.4 ses det, at interpoleringen af dybder i fjorden har resulteret i en relativ præcis inddeling af dybder, hvilket giver et godt udgangspunkt for at beregne vandføringer og opstuvninger. Endvidere kan det ses, at modellen er så præcis, at den medtager sejlrenderne ved de lavvandede dele af fjorden. Et eksempel på, hvordan den avancerede geometri giver et realistisk billede af de virkelige forhold i Limfjorden, kan ses på figur 4.5. De interpolerede vanddybder til modellen er vist på figur 4.6. Til sammenligning er der på figur 4.7 vist, hvorledes dybdemålingerne for det samme område er placeret.



Figur 4.5. Området af Limfjorden omkring Odde Sund vist med opløsningen af beregningsceller.



Figur 4.6. Området af Limfjorden omkring Oddesund vist med de interpolerede vanddybder.



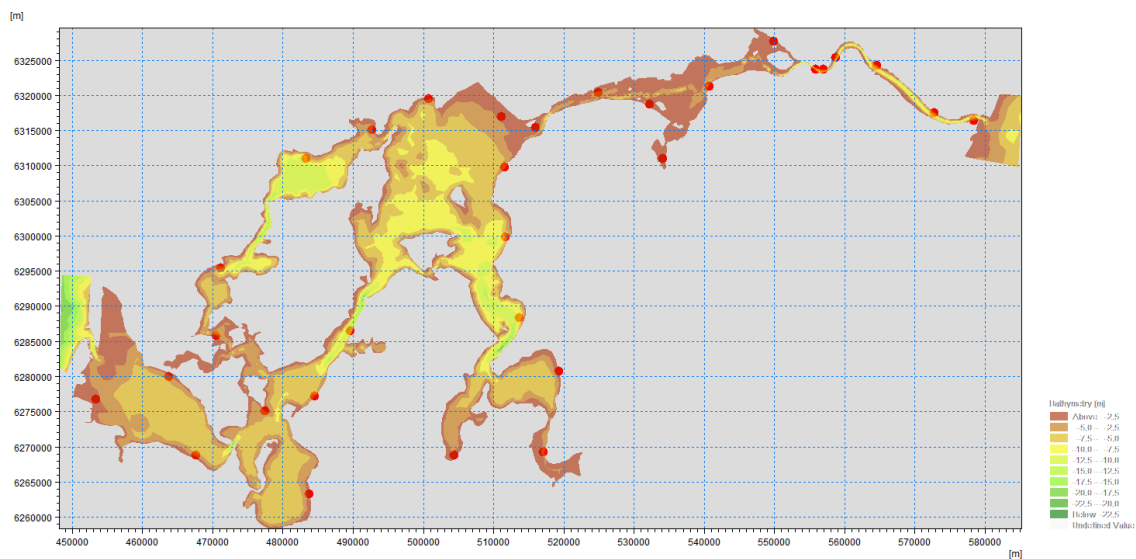
Figur 4.7. Målepunkterne som bliver anvendt til at interpolere vanddybderne.

På figur 4.5 ses det, at den finere inddeling af beregningscellerne i Oddesund resulterer i en relativt præcis fordeling af vanddybderne, hvor den største dybde forekommer ved den smalleste del af sundet, hvor vandet har den højeste hastighed. Der ud over kan det ved sammenligning af figur 4.5 og figur 4.7 ses, at ved de fineste beregningsceller er der ca. lige så mange beregningsceller som der er målepunkter af dybden, hvorved det antages, at de interpolerede dybder kan beskrive hele dybden i sundet.

Med de interpolerede vanddybder til modellens beregningsceller er Limfjordens geometri klar til at sætte ind i selve simuleringmodellen, hvor alle de fysiske parametre, som påvirker systemet, tilføjes. Disse parametre, samt forklaringer heraf er præsenteret i afsnit A 5.3 i bilag.

Modellen køres med et konstant Manningtal gennem hele Limfjorden på 42, hvilket svarer til et grødefrit vandløb Brorsen and Larsen [2009]. Det er her antaget, at dette Manningtal skal gengive ruheden og ikke på samme måde som i 1D-vandstandsmodellen skal gengive modellens manglende forståelse af systemet.

For at kunne beregne de opstuvninger, som forekommer i Limfjorden ved stormfloder skal modellen tage højde for vindens påvirkning af systemet. Modellen benytter sig, som 1D-vandstandsmodellen, også af en middelvind, som er et gennemsnit af vindforholdene målt i Thyborøn og Hals, og antages at repræsentere hele Limfjorden. Der tilføjes ferskvandsbidrag fra 31 vandløb langs Limfjorden, hvor placeringen af vandløbene er illustreret på figur 4.8.



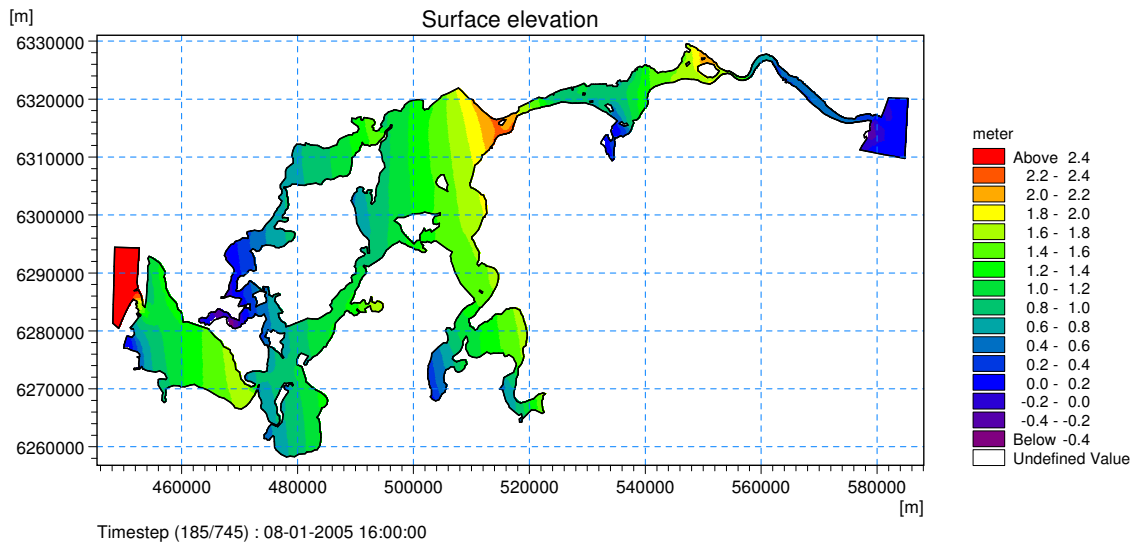
Figur 4.8. Bidragende vandløb til Limfjorden.

På figur 4.8 kan det ses, at vandløbene markeret med rødt, er spredt ud over hele Limfjorden, og alle udløbene er placeret inden for modellens afgrænsning.

Det er forsøgt at køre modellen for en periode på 1 år med en forperiode på 10 døgn, for at sikre, at resultatet af 2D-vandstandsmodellen ikke er styret af initialbetingelserne. Det findes dog, at denne forperiode blot returnerer støj, og at den derved ikke er stabiliserende for modellen, hvorved det er valgt at starte modellen den 1. januar 2005. Det findes, at modellen stabiliserer sig indenfor ét døgn.

Modellen returnerer en tidsserie i tre dimensioner, hvor z-dimensionen, angivet i kote, er illustreret i farver. Både x- og y-dimensionen er angivet i længde- og breddegrader. Ud over dette resultat er også to tidsserier for et punkt i hhv. Løgstør Bredning og Skive Fjord anvendt, for at kunne sammenligne modellen med de målte vandstande i Limfjorden for perioden 2005. Disse punkter er anvendt til kalibrering og validering af modellen.

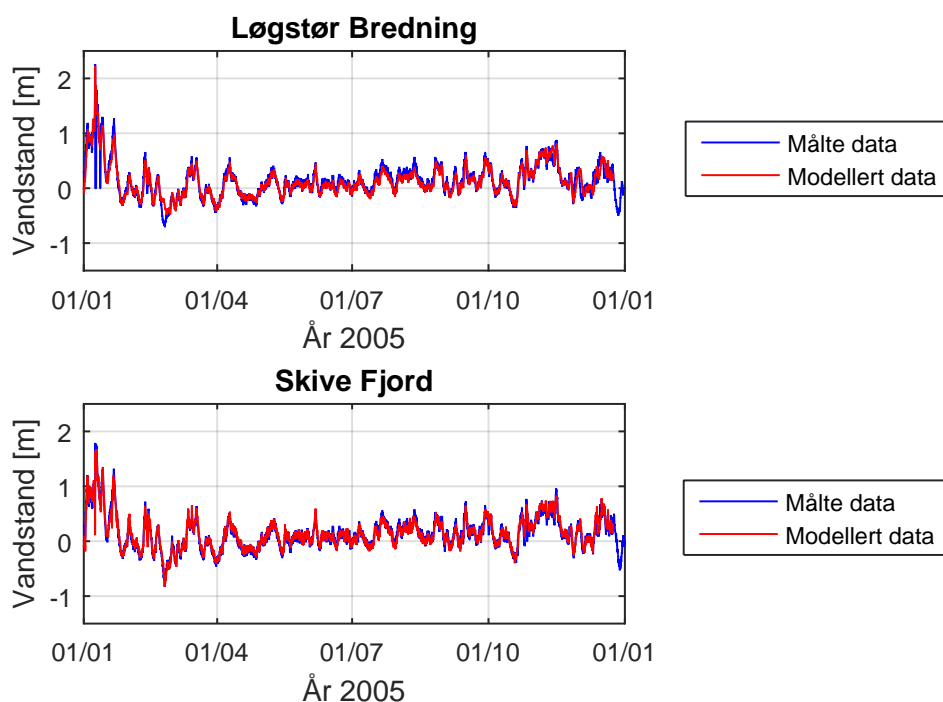
For at vurdere modellen, er det valgt først at undersøge, om modellen returnerer ekstremvandstande i samme periode som de målte data, og 1D-vandstandsmodel. Ved dette tjekkes, at der forekommer et maksimum ved stormen den 8. januar 2005. På figur 4.9 ses den simulerede vandstand for den 08-01-2005 kl. 16, hvor de højeste vandstande forekommer.



Figur 4.9. Den modellerede vandstand i Limfjorden den 8. januar.

På figur 4.9 ses det, at den simulerede vandstand i Limfjorden er højest ved Løgstør by og ved Egholm vest for Aalborg. Den simulerede vandstand ved Løgstør findes til at ligge mellem kote 2,2 m og 2,4 m. Ud fra de målte vandstande fra Løgstør, som er illustreret i kapitel 3.2 på side 19, ses det, at den maksimale vandstand, som blev målt under stormen den 9. januar 2005 er 2,26 m. Da måleren gik itu under den pågældende storm, formodes det, at der har forekommet højere vandstande ved Løgstør. Ud fra denne formodning ses det, at den maksimale modellerede vandstand stemmer overens med den målte maksimal vandstand i Løgstør. Figur 4.9 viser ligeledes, at opstuvning af vandstanden ved Aalborg er op til kote 2,2 meter, og at den i den østlige ende af Louns Bredning er op til 1,8 m over kote nul.

De modellerede tidsserier sammenlignes med de målte tidsserier for vandstand i Løgstør Bredning og Skive Fjord, hvilket er vist på figur 4.10 for simuleringsåret 2005.



Figur 4.10. Den modellerede vandstand for 2005 i Løgstør sammenlignet med den målte tidsserie.

Ud fra figur 4.10 ses det, at den simulerede vandstand tilnærmelsesvist rammer de målte vandstande i både Løgstør Bredning og Skive Fjord. Simuleringsresultatet i Skive Fjord synes visuelt tættere på målingerne end resultatet for Løgstør Bredning.

Modelresultater undersøges ud fra afvigelsen mellem de målte vandstande og de simulerede vandstande både i form af størrelse og variation. Afvigelsen af værdierne findes ved at plote de målte og de simulerede dataserier mod hinanden og finde, hvorvidt hældningen nærmer sig 1, på samme måde som gjort for 1D-vandstandmodellen. Afvigelsen af variationen findes ved at beregne korrelationen mellem de målte og de simulerede dataserier. Det er valgt at fjerne de fejlmålinger, som forekommer i dataserien for Løgstør, da de ellers vil påvirke tendenslinjen og korrelationen.

For at undersøge, hvor godt modellen kan simulere de målte vandstande, udregnes hældningen af tendenslinjen for det plottede data og korrelationerne mellem dem for både Løgstør Bredning og Skive Fjord. Hældninger af tendenslinjerne og korrelationerne er fundet på samme måde som for 1D-vandstandsmodellen i kapitel 3.3 på side 26. De to hældninger og korrelationer for den ukalibrerede model er opstillet i tabel 4.1 for den første måned. Denne model er bedst til at repræsentere den gennemsnitlige vandstand i systemet.

| Område | Hældning af tendenslinje | Korrelationskoefficient |
|------------------|--------------------------|-------------------------|
| Løgstør Bredning | 0,912 | 0,981 |
| Skive Fjord | 0,952 | 0,983 |

Tabel 4.1. Korrelationskoefficienter for målte serie og resultatet af den virkelighedsnære model.

Det kan ses i tabel 4.1 at korrelationen og hældning er forholdsvis høje, hvilket betyder, at modellen returnerer vandstande, der er tæt på de målte, samtidig med, at modellen følger de naturlige udsving i vandstande i systemet. Dette betyder at 2D-vandstandsmodellen forventes at returnere mere virkelighedsnære vandstande både ved ekstreme forhold og normale forhold.

Ud fra dette kan det konkluderes, at modellen kan simulere de virkelige vandstande på tilfredsstillende vis da hældningerne er tætte på 1. Derudover forekommer opstuvningerne de forventede steder og tider, og at modellen har en korrelation på over 0,9. Modellen er dog kalibreret i et forsøg på at forbedre resultatet.

4.2 Kalibrering af 2D-vandstandsmodel

For at få de modellerede værdier til at passe bedre med de målte værdier skal modellen kalibreres. Modellen er blevet indirekte kalibreret ved at justere bathymetrien af fjorden for at gengive sejlrenderne, hvilket er tilfældet i Hals Barre og Nissum Bredning.

Det ses, at modellen underestimerer vandstanden i både Løgstør Bredning og i Skive Fjord på figur 4.10 ved anvendelse af en konstant Manningtal på $42 \frac{m^{1/3}}{s}$. Manningtallet er omvendt proportionalt med ruheden, og beskriver hvor stor den fysiske modstand er, som forekommer på bunden af Limfjorden.

Det ses ligeledes, at den simulerede vandstand i Skive Fjord er tættere på den målte vandstand end den er i Løgstør Bredning. Dette betyder, at vandstanden i modellen skal hæves mere i Løgstør Bredning, end den skal i Skive Fjord ved kalibreringen.

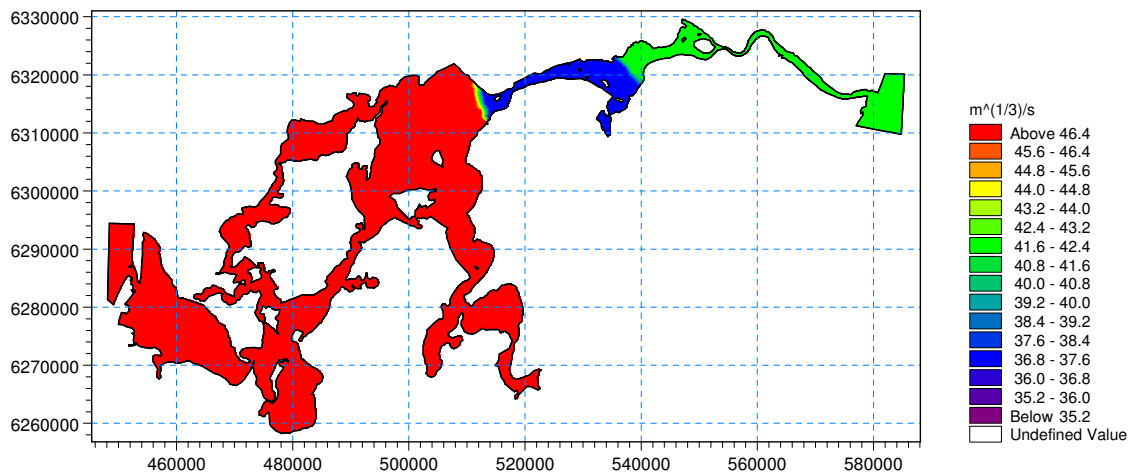
Det kan dog ses på figur 4.10, at denne model følger de målte vandstande samt deres variation for både Løgstør Bredning og Skive Fjord. Det kan ses, at modellen følger vandstandene både ved de normale variationer, men også ved de ekstreme vandstande.

For at kalibrere modellen, hvor vandstanden skal stige mere ét sted end et andet, er det nødvendigt at anvende varierende ruhed igennem Limfjorden. Da vandstanden skal stige mest ved Løgstør, skal der skabes en opstuvning af vandstanden i Limfjorden ved byen. For at få denne vandstand til at stige er det valgt at ændre ruheden, således at der vil forekomme en større opstuvning ved flaskehalsen ved Aggersund. En sådan opstuvning skabes ved at sænke Manningtallet i området, så vandføringen igennem området bliver bremset. For at forstærke opstuvningen anvendes der en højere Manningtal i Limfjorden

vest for Løgstør. Da området øst for Løgstør har adskillige indsnævring af fjordens tværsnit, hæves Manningtallet igen øst for Nibe. Så den varierende ruhed, som er anvendt til at kalibrere modellen, ender derved med at repræsentere fjordbunden som værende relativt glat i den vestlige del af Limfjorden, relativt ru i den centrale del af Limfjorden og igen relativt glat i den østlige del af fjorden.

Kalibreringen er foretaget til gengivelse af ekstremvandstande. For at repræsentere ekstremvandstandene kalibreres modellen kun for den første måned af år 2005. Dette gøres, da der inden for den første måned er fem vandstande, som er væsentligt højere end én meter ved både Løgstør og Skive. På grund af dette antages det, at den første måned hovedsageligt er styret af disse høje vandstande, og at modellen efter denne kalibrering derfor kan beregne andre ekstremvandstande.

For at styre, hvor der skal være større og mindre opstuvninger varieres Manningtallet som vist på figur 4.11.



Figur 4.11. Varierende ruhed i Limfjorden.

Figur 4.11 viser fordelingen af Manningtal ved den første kalibrering, hvor Manningtallet er sat højt (47) i den vestlige del af Limfjorden og lavt (37) i den midterste del fra Løgstør til Nibe, og igen højt (42) fra Nibe til Hals. I forhold til det konstante Manningtal er det forøget i den vestlige del, reduceret i den midterste del og bibeholdt på 42 i den østlige del af Limfjorden.

Med denne kalibrering opnås en ny og forbedret korrelation mellem den målte vandstand og den simulerede vandstand i både Løgstør og Skive, opstillet i tabel 4.2.

| Område | Hældning af tendenslinje | Korrelationskoefficient |
|------------------|--------------------------|-------------------------|
| Løgstør Bredning | 0,930 | 0,983 |
| Skive Fjord | 0,982 | 0,985 |

Tabel 4.2. Hældninger af tendenslinjer og korrelationskoefficienter for den kalibrerede model.

Disse hældninger af tendenslinjen mellem de målte og simulerede vandstandsværdier er begge forbedringer i forhold til dem fundet ved modellen med en konstant Manningtal på $42\frac{m^{1/3}}{s}$, på hhv. 0,912 og 0,952. Ligeledes er korrelationerne blevet forbedret. Det antages, at hældningerne kan forbedres yderligere ved at gøre forskellen endnu større på Manningtallene.

Der foretages yderligere to kalibreringer som foregår på samme måde som den første, med inddeling af Limfjorden i de samme områder med varierende Manningtal. Hældningerne mellem de målte og simulerede vandstande sammen med korrelationerne for de tre kalibrerede modeller samt modellen med det konstante Manningtal gennem hele fjorden, er sammenlignet i tabel 4.3. Fordelingen af Manningtal i tabel 4.3 er de tre værdier for henholdsvis den vestlige del, den centrale del og den østlige del af Limfjorden, beskrevet ved (vest-central-øst).

| Manningtalsfordeling | Hældning | | Korrelation | |
|----------------------|----------|--------|-------------|--------|
| | Løgstør | Skive | Løgstør | Skive |
| (42-42-42) | 0,9120 | 0,9515 | 0,9812 | 0,9834 |
| (47-37-42) | 0,9298 | 0,9818 | 0,9831 | 0,9846 |
| (55-33-42) | 0,9514 | 1,0135 | 0,9845 | 0,9845 |
| (46-35-80) | 0,8747 | 0,9661 | 0,9820 | 0,9844 |

Tabel 4.3. Hældningerne af tendenslinjerne og korrelationerne for de fire forskellige fordelinger af Manningtal i Løgstør og Skive.

Ud fra tabel 4.3 kan det ses, at de hældninger, som er tættest på 1 for både ved Løgstør og Skive, fås ved kalibreringen med Manningtallene på 55, 33 og 42 for henholdsvis den vestlige del, den centrale del og den østlige del af Limfjorden. Ligeledes kan det ses, at der ved denne kalibrering opnås den højeste korrelation ved Løgstør og den anden højeste korrelation ved Skive. Det ses også i tabel 4.3, at der ved en større forskel på Manningtallene i den vestlige del og den østlige del af fjorden ikke opnås bedre resultater, da både hældningen og korrelationen er lavere end ved den udvalgte model. På grund af dette vælges det at anvende fordelingen af kalibrerede Manningtal, (55-33-42), til at validere modellen.

4.3 Validering af 2D-Vandstandsmodel

Modellen valideres ved, at hældningen af tendenslinjerne for de målte data i forhold til de simulerede data samt korrelationen mellem de simulerede vandstande og de målte vandstande for resten af året er tilstrækkelig høj, og om de er forbedrede ved den kalibrerede model. For de ukalibrerede og kalibrerede modeller er hældningerne samt korrelationerne vist i tabel 4.4.

| Model | 1. måned | | År 2005 | |
|----------------------------------|----------|--------|---------|--------|
| | Løgstør | Skive | Løgstør | Skive |
| Hældning af ukalibreret model | 0,9120 | 0,9515 | 0,8691 | 0,9518 |
| Hældning af kalibreret model | 0,9514 | 1,0135 | 0,9003 | 1,0130 |
| Korrelation af ukalibreret model | 0,9812 | 0,9834 | 0,9512 | 0,9741 |
| Korrelation af kalibreret model | 0,9845 | 0,9845 | 0,9538 | 0,9765 |

Tabel 4.4. Hældninger og korrelationer for den ukalibrerede- og kalibrerede model, for første måned og hele året for punkterne i hhv. Løgstør Bredning og Skive Fjord.

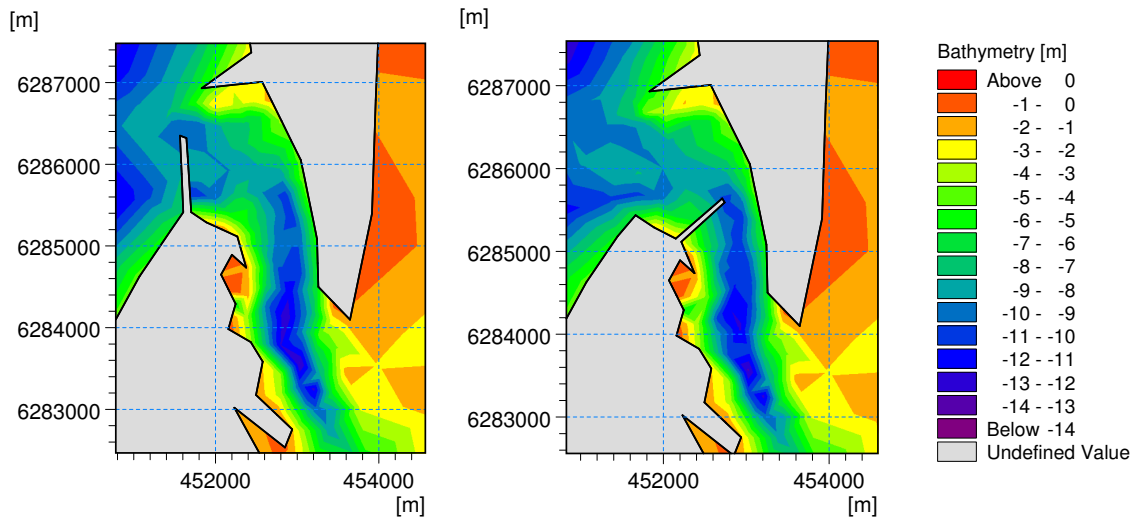
Det kan i tabel 4.4 ses, at både hældningerne af tendenslinjerne og korrelationerne bliver lavere ved simulering af hele året, men at de absolutte værdier stadig er acceptable. Herved kan det konkluderes, at modellen kan anvendes til både at simulere stormflodsvandstande og gennemsnitsvandstande. Modellen er herved valideret og kan anvendes til at undersøge, hvilken indflydelse de foreslåede løsningsforslag har på vandstanden i Limfjorden.

4.4 Implementering af løsningsforslag

Den validerede model kan herefter anvendes til at undersøge konsekvenserne af implementering af de udvalgte løsningsforslag. Der vil blive undersøgt de samme tre løsningsforslag med den to-dimensionelle model, som der blev i den ét-dimensionelle model. Disse tre løsningsforslag er forlængelse af hofde 59, forlængelse af hofde 63 og en dæmning med en gennemstrømningssluse.

Forlængelse af hofde 59 og 63

De to løsningsforslag, som involverer indsnævring af tværsnitsarealet af Thyborøn Kanal ved forlængelse af hofde 59 og 63, er illustreret på henholdsvis figur 4.12 og figur 4.13.



Figur 4.12. Forlængelse af høfde 59.

Figur 4.13. Forlængelse af høfde 63.

På figur 4.12 og figur 4.13 kan det ses, at bredden af Thyborøn Kanal bliver kraftigt indsnævret. Derudover kan det ses, at bathymetrien forbliver uændret.

Modellen køres først med forlængelsen af sluse 59, hvor det forventes at gennemstrømningen af Thyborøn Kanal bliver reduceret hvorved de maksimale vandstande ligeledes bliver reduceret i forhold til de nuværende forhold. Reduceringen af vandstanden i Løgstør og Skive forventes dog at være relativt lille. Dette skyldes, at indsnævringen af Thyborøn Kanals tværsnit ved begge høfdeforlængelser kun foregår i et lille område i denne model. Indsnævringen af kanalens tværsnit i 1D-vandstandsmodellen foregår i modsætningen til denne model i hele kanalens længde, hvilket derved giver en større tilbageholdelse af vand fra Nordsøen. Den mindste bredde af Thyborøn Kanal er sat til 600 m og 500 m for henholdsvis forlængelse af høfde 59 og høfde 63, på samme måde som ved kørsel af 1D-vandstandsmodellen. Implementeringerne af høfderne er de eneste ændringer af geometrien, der er foretaget, hvorved resultaterne af modelkørslerne kan sammenlignes direkte.

Dæmning med gennemstrømningsluse

Dette løsningsforslag implementeres på samme måde som i 1D-vandstandsmodellen ved at lukke Thyborøn Kanal med en dæmning, med en gennemstrømningsluse til styring af, hvornår der skal strømme vand mellem Nordsøen og Nissum Bredning. Da arealet af gennemstrømningslusen er større end tværsnitsarealerne af Thyborøn Kanal ved høfdeforlængelserne, antages det, at styringen af slusen er den afgørende faktor til at reducere stormflodsvandstande i Limfjorden. Det er valgt at styre lukningen af gennemstrømningslusen ved tre scenarier for at undersøge, hvilken effekt de vil have på stormflodsvandstandene ved Løgstør og Skive.

Det første lukningsscenario er styret af vandstanden i Nordsøen, hvor gennemstrømningssslusen lukkes, hvis vandstanden vest for Thyborøn overstiger kote 1 som i 1D-vandstandsmodellen.

I det andet lukningsscenario stoppes vandføringen gennem Thyborøn Kanal ligeledes ved kote 1, men herudover anvendes der ligeledes en ensretning af strømmen igennem kanalen.

I det tredje lukningsscenario lukkes gennemstrømningssslusen ved kote 1 og ensretter strømmen gennem Thyborøn Kanal på samme måde som i scenarie nr. to. Herudover lukkes gennemstrømningssslusen også, hvis der forekommer vindstyrker over stormstyrke et døgn forud, svarende til DMI's vejrvarsel. Dette begrænser mængden af vand, som kommer ind i Limfjorden forud for en storm, for at reducere stormflodernes omfang.

4.5 Resultat af 2D-vandstandsmodel

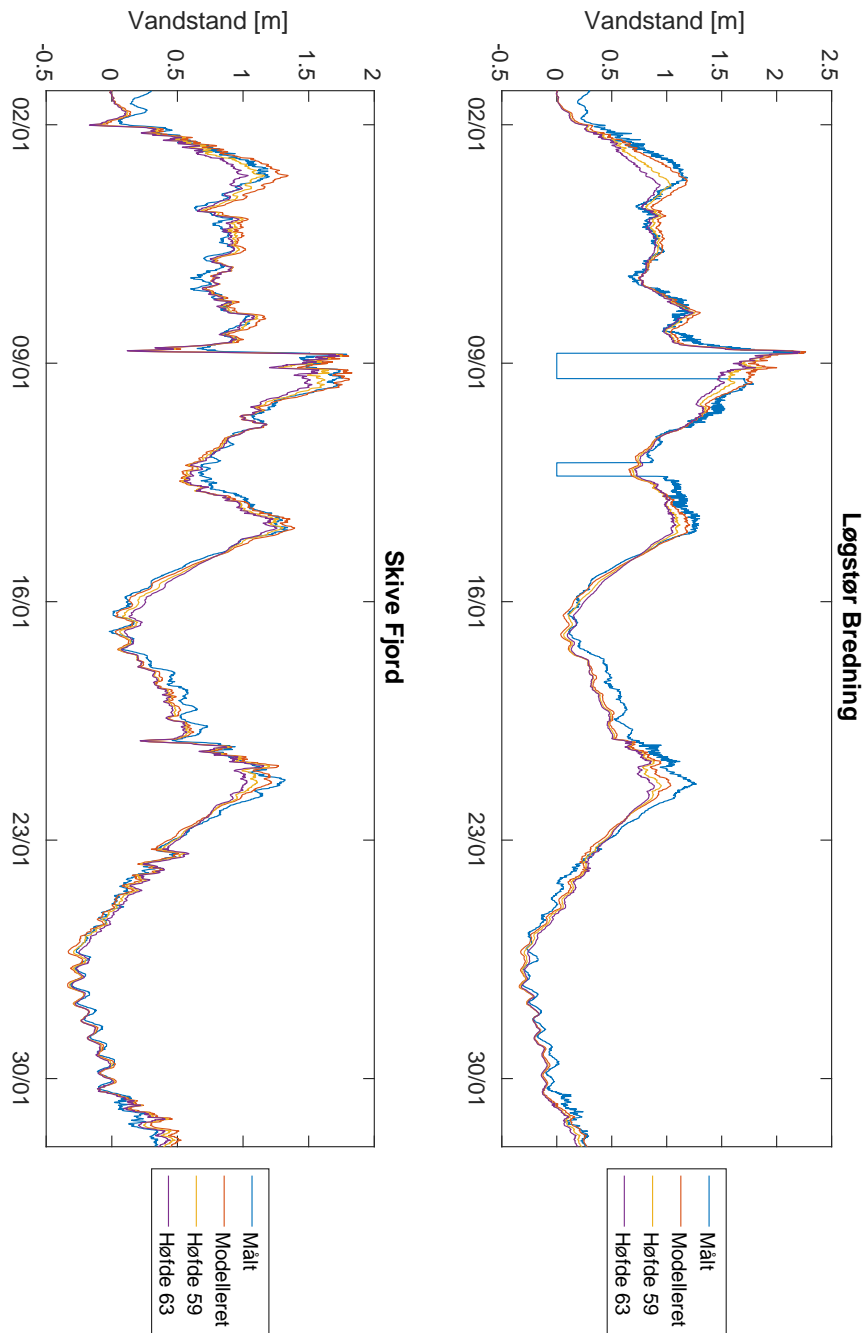
Løsningsforslagene er delt op i de delvise lukninger af Thyborøn Kanal ved forlængelse af høfderne 59 og 63, og hellukningen af kanalen ved opførelse af en dæmning med gennemstrømningsssluse.

Forlængelse af høfde 59 og høfde 63

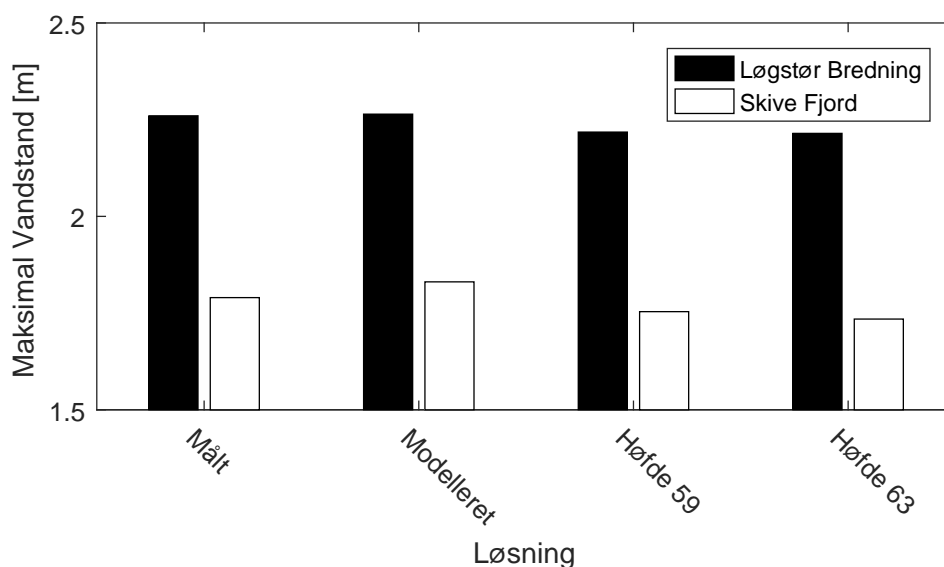
På figur 4.14, ses den modellerede vandstand i henholdsvis Løgstør Bredning og Skive Fjord for den første måned af år 2005, hvor høfde 59 og høfde 63 er forlængede, sammen med den modellerede vandstand ved de nuværende forhold.

Det ses, at både forlængelsen af høfde 59 og forlængelsen af høfde 63 giver en reduktion af stormflodsvandstandene. Den største reduktion af vandstanden ved både Løgstør og Skive opnås ved forlængelsen af høfde 63, hvilket var forventet, da dette løsningsforslag havde det mindste tværsnit af de to delvise lukninger af Thyborøn Kanal. Da reduktionen af vandstanden ved Løgstør og Skive ved forlængelse af høfderne ikke er større end nogle få centimeter, er det fordi, at selvom tværsnitsarealet af Thyborøn Kanal er blevet indsnævret, kan vandet stadig opnå næsten den samme vandføring som før. Den forholdsvis lille reduktion af stormflodsvandstandene stemmer overens med Kystdirektoratets plan om at forlængelsen af høfderne 59 og 63 skal holde ekstremvandstande på samme niveau i år 2060, med inkludering af klimaforandringer Ingvarsdén et al. [2012]. Reduktionen af stormflodsvandstanden er mindst ved den højeste vandstand den 8. januar 2005, hvilket kan skyldes den forstærkede vindstuvning, da også den kraftigste vindstyrke forekom på denne dag. Udover maksimalvandstandene, er den gennemsnitlige vandstand også blevet reduceret, hvilket skyldes, at der også ved normale vandstande kræves mere energi til at presse vandet igennem det mindre tværsnit af Thyborøn Kanal.

De modellerede maksimalvandstande med de to høfdeforlængelser sammen med den målte vandstand og referencevandstanden ved Løgstør og Skive er illustreret på figur 4.15.



Figur 4.14. Vandstanden den første måned af 2005 i Løgstør Bredning og Skive Fjord ved udbygning af højde 59 og højde 63.



Figur 4.15. Vandstanden den første måned af 2005 i Skive ved udbygning af højde 59 og højde 63.

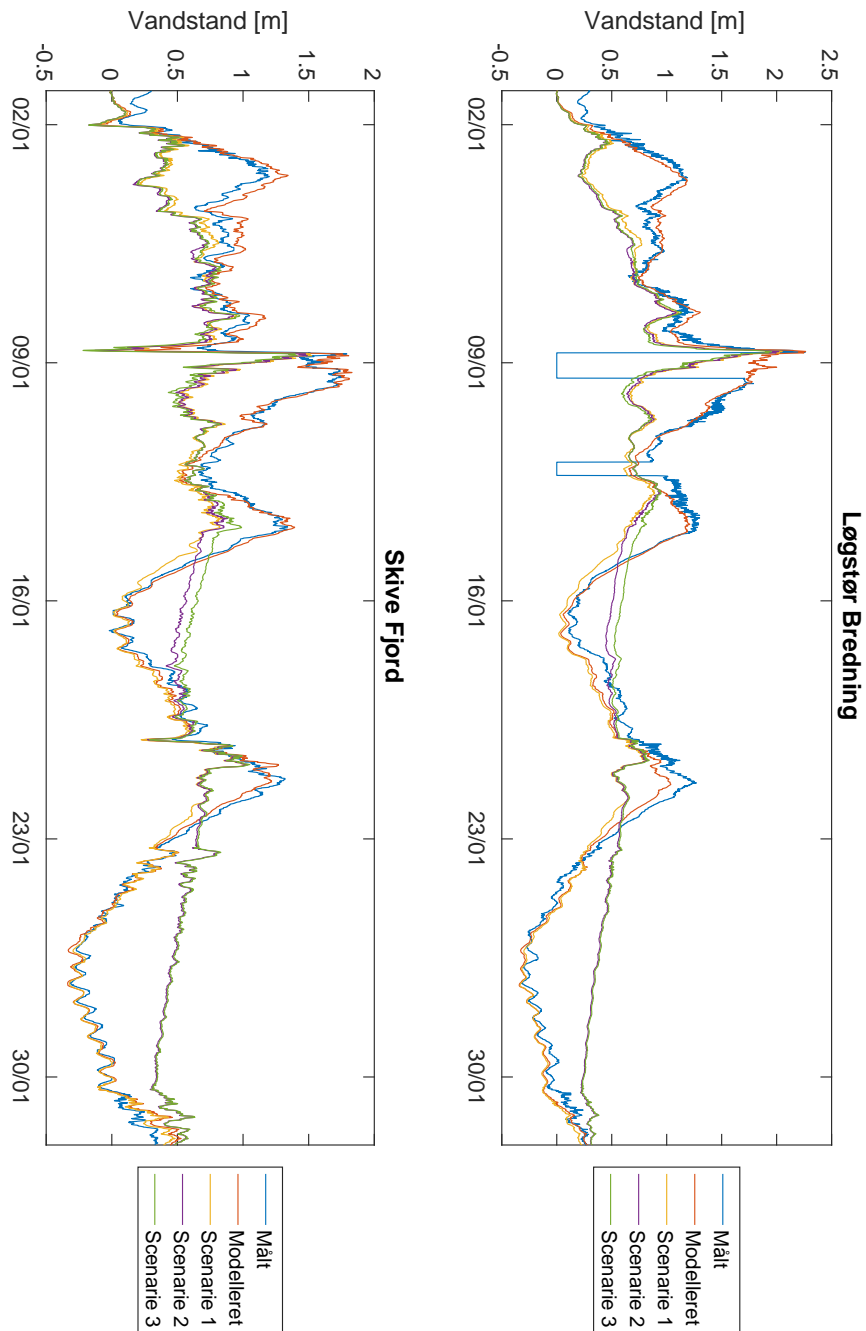
På figur 4.15 kan det ses, at reduktionen af maksimalvandstandene ved forlængelse af højderne er relativt lille skyldes, som før beskrevet, at det reducerede tværsnit ikke er nok til at mindske vandføringen betydeligt gennem Thyborøn Kanal.

Dæmning med gennemstrømningsluse

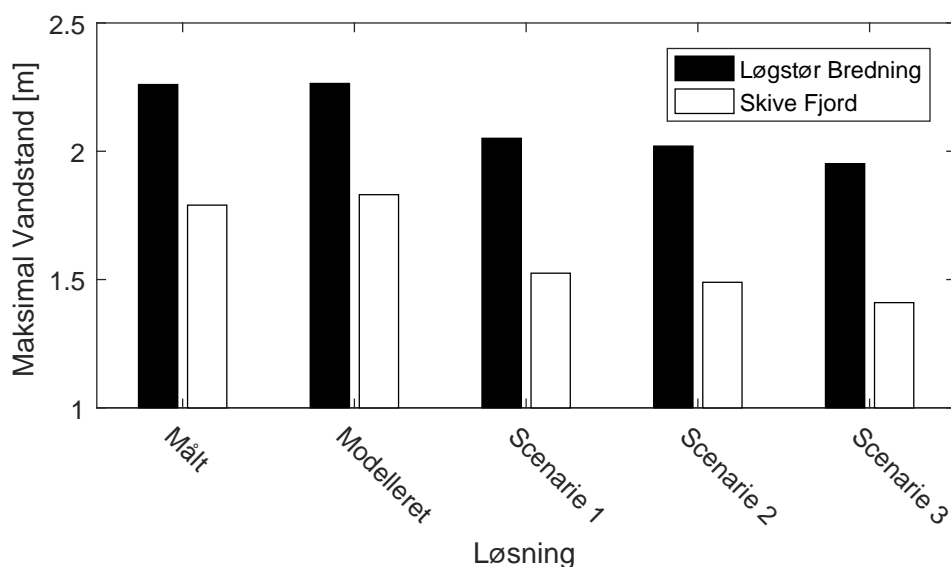
Modellen køres med lukningen af Thyborøn Kanal med en dæmning med gennemstrømningsluse, for at sammenligne vandstandene ved de tre forskellige lukningsscenerier. Vandstandene ved de tre lukningsscenerier af gennemstrømningslusen sammen med den modelerede referencevandstand og den målte vandstand er illustreret i figur 4.16 for henholdsvis Løgstør Bredning og Skive Fjord.

På figur 4.16 ses det, at stormflodsvandstandene bliver reduceret ved alle tre scenarier. Forskellen på scenarie ét og to er, at maksimalvandstanden er reduceret en smule i scenarie 2. Derudover kan det ses, at der i den sidste halvdel af januar måned er en højere middelvandstand i både Løgstør og Skive ved scenarie to, på grund ensretningen af strømmingen mod øst. Vandstanden i scenarie 3 giver ligeledes en lavere maksimalvandstand, men en højere middelvandstand, da der ved dette scenarie bliver lukket oftere for gennemstrømningslusen.

Maksimalvandstandene for de tre lukningsscenerier er illustreret på figur 4.17 sammen med de målte og reference-maksimalvandstandene.



Figur 4.16. Vandstanden den første måned af 2005 i Løgstør Bredning og Skive Fjord ved forskellige slusescenarier.



Figur 4.17. Vandstanden den første måned af 2005 i Skive ved de forskellige sluseløsninger.

Det ses på figur 4.17, at den største reduktion af maksimalvandstanden ved Løgstør og Skive opnås ved lukningskriterie tre, hvor gennemstrømningsslusen lukkes ved vandstande i Nordsøen på over kote 1, samtidig med at vandføringen gennem slusen ensrettes, og at slusen lukkes et døgn, før der kommer blæst af stormstyrke.

Herudover er maksimalvandstandene illustreret for den 8. januar 2005 kl. 16, for de tre scenarier sammen med referencevandstanden i bilag A 5.4.

Samlet vurdering

Alle tre løsningsforslag reducerer maksimalvandsstanden ved Løgstør og Skive. Det er dog løsningen med dæmningen med gennemstrømningssluse, som har den største effekt på maksimalvandstandene i Limfjorden. Maksimalvandstandene er sammenlignet i tabel 4.5.

| Løsningsforslag | Ekstremvandstand Løgstør Bredning [m] | Ekstremvandstand Skive Fjord [m] |
|-----------------------|--|-------------------------------------|
| Målt vandstand | 2,260 | 1,790 |
| Modelleret | 2,264 | 1,831 |
| Udbygning af hofde 59 | 2,218 | 1,754 |
| Udbygning af hofde 63 | 2,215 | 1,735 |
| Scenarie 1 | 2,051 | 1,525 |
| Scenarie 2 | 2,020 | 1,489 |
| Scenarie 3 | 1,951 | 1,410 |

Tabel 4.5. Modellerede ekstremvandstande ved de forskellige løsninger.

I tabel 4.5 kan det ses, at af de to hofdeforlængelser, er det forlængelsen af hofde 63, som giver den største reduktion af vandstanden ved Løgstør og Skive. Derudover ses det, at det tredje scenarie for sluselukning giver den største reduktion af alle løsningsforslagene.

4.6 Konklusion på 2D-vandstandsmodel

Den ukalibrerede to-dimensionelle vandstandsmodel med et konstant Manningtal på 42 viste sig at være bedst til at simulere vandstande i perioder uden storme. Den kalibrerede model med et varierende Manningtal gennem Limfjorden gav en større opstuvning af vand ved Løgstør og Skive, hvilket gjorde den i stand til at beskrive ekstremvandstande bedre, mens den stadig kunne beregne vandstanden resten af året. Den to-dimensionelle vandstandsmodel viste sig at være bedre til at gengive vandstandene ved Skive end ved Løgstør. Den validerede model blev anvendt til at finde vandstandsændringerne ved implementering af de udvalgte løsningsforslag. Forlængelserne af hofderne giver kun mindre reduktioner af vandstanden inde i Limfjorden på højest omkring 10 cm, hvilket stemmer overens med Kystdirektoratets vurdering om, at med hofdeforlængelse skal ekstremvandstanden være uændret i 2060, hvor klimaforandringer er medtaget. Sluseløsningen med vindstyret regulering giver de største sænkninger af ekstremvandstandene ved både Løgstør og Skive, hvilket er på grund af redueringen af vandstanden før en aktuel storm.

5. Klimaændringer

Det er valgt at foretage en simpel analyse af klimaændringerne for at sikre, at løsningen, der anvendes til reduktion af stormflodsvandstande, vil kunne virke ved de fremtidige storme. Det er valgt at lave en fremskrivning af vandstanden i Thyborøn og vindstyrken, og sammenligne denne med FN's klimafremskrivning A1B. Analysen er foretaget ved at opstille en lineær tendenslinje for de kendte dataserier for hhv. ekstremvandstandene i Nordsøen ved Thyborøn og vindstyrker for storme i Danmark. Disse dataserier er valgt, da der er data for en længere tidsserie.

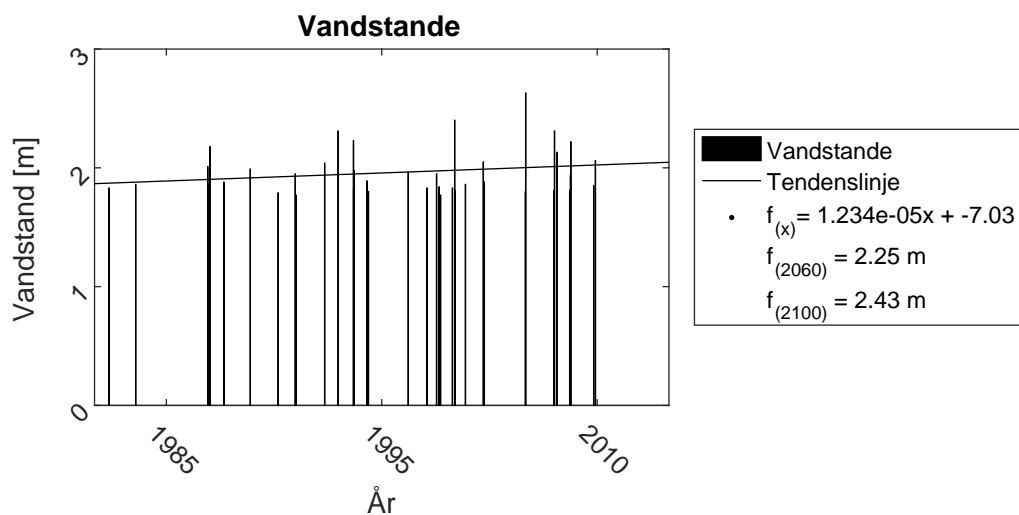
For vandstanden i Thyborøn er de 40 største storme anvendt, som er fordelt over de 33 år, hvor der foreligger data Sørensen et al. [2013b]. For storme er der medtaget Danmarks største storme over de sidste 124 år, hvor der i alt er 125 storme målt DMI [2015]. Stormene er imidlertid opdelt i fire klasser, som er opstillet i tabel 5.1.

| Klasse | Klasse 1 | Klasse 2 | Klasse 3 | Klasse 4 |
|---------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| Stormklasse | Stormlignende | Storm | Stærk storm til orkanlignende | Stærk storm til orkan |
| Vindstyrke | $21,0 \text{ m s}^{-1}$ | $24,5 \text{ m s}^{-1}$ | $26,5 \text{ m s}^{-1}$ | $28,5 \text{ m s}^{-1}$ |

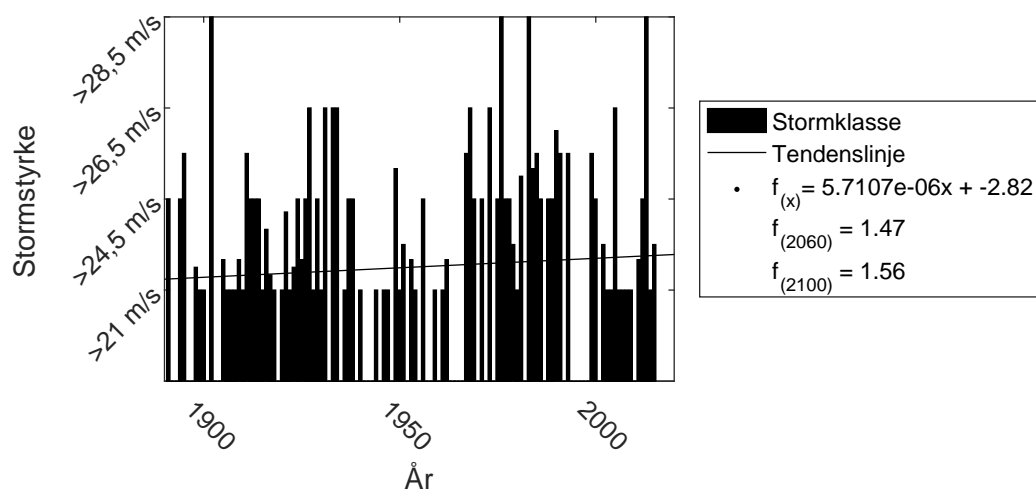
Tabel 5.1. Stormklasser med middelvindstyrker DMI [2015].

Det kan i tabel 5.1 ses, at de fire klasser er fordelt for en 10 minutters middelvind, samt en betegnelse. Stormen, der opstod den 8. januar 2005, er den sidste storm, der har opnået en klasse 3 i Danmark, og den sidste klasse 4 storm, der blev målt, var i år 1999.

De lineære tendenslinjer er opstillet på baggrund af de målte vandstande, illustreret på figur 5.1 og de målte storme illustreret på figur 5.2.



Figur 5.1. Tendenslinje opstillet for ekstremvandstande i Nordsøen ved Thyborøn.



Figur 5.2. Tendenslinje opstillet for stormklasser i Danmark.

Ud fra disse tendenslinjer kan det ses, at der opnås en stigende tendens for vandstand og vind, som er givet ved hhv. formel 5.1 og formel 5.2. Hældningen er angivet per dag, da tidsserierne anvender disse diskretiseringer.

$$y(t) = 1,234 \cdot 10^{(-5)} \cdot t - 7,03 \quad (5.1)$$

$$U_{10,(t)} = 5,711 \cdot 10^{(-6)} \cdot t - 2,82 \quad (5.2)$$

Hvor:

| | | |
|----------|--------------------------|----------------------|
| y | er vandstanden | [m] |
| U_{10} | er middelvindhastigheden | [m s ⁻¹] |
| t | er tiden | [døgn] |

Herefter er det valgt at parallelforskyde begge linjer igennem ekstremeerne kendt fra stormen d. 8 januar 2005, hvor vandstanden uden for Thyborøn blev målt til 263 cm over kote 0. Den højeste middelvindstyrke fundet, der er anvendt i modellerne, er på 35,5 m/s. De parallelforskudte tidslinjer anvendes herefter til fremskrivning af de to dataserier, hvor det er valgt at fremskrive til 2060 for at kunne sammenligne med kystdirektoratets løsningsforslags antagelse om, at vandstandene inde i Limfjorden forbliver på samme niveau. Det er også valgt at fremskrive for år 2100 for at undersøge, hvordan løsningerne formodentligt vil håndtere ekstremeer i fremtiden. De stigende værdier er opstillet i tabel 5.2.

| Ekstrem | 2005 | 2060 | 2100 |
|---------------------------------|------|------|------|
| Vandstand [m] | 2,63 | 2,88 | 3,06 |
| Vindstyrke [m s ⁻¹] | 35,5 | 35,6 | 35,7 |

Tabel 5.2. Fremskrevne ekstremeer.

I tabel 5.2 kan det ses, at den parameter, der ændres mest, er vandstanden, mens vindstyrkerne dog også stiger hen over perioderne. Disse nye ekstremeer er herefter anvendt til at bestemme klimafaktorer for de valgte fremtidsscenarioer. De anvendte klimafaktorerne, er opstillet i tabel 5.3.

| Klima faktor | 2060 | 2100 |
|----------------|-------|-------|
| Vandstand [m] | +0,15 | +0,43 |
| Vindstyrke [-] | 1,003 | 1,006 |

Tabel 5.3. Klimafaktorer for vandstandmodellen.

Disse klimafaktore er meget lavere end de faktorer, der er bestemt ud fra FN' klimaråd. Ud fra klimascenariet A1B, har DMI fundet, at vandstaden og vinden vil stige mere end det, opstillet i tabel 5.3. Klimafaktorerne for vinden og middelvandsstigningen fra DMI er opstillet i tabel 5.4 for år 2060 og år 2100.

| Klima faktor | 2060 | 2100 |
|----------------|-------|-------|
| Vandstand [m] | +0,50 | +1,40 |
| Vindstyrke [-] | 1,03 | 1,04 |

Tabel 5.4. Klimafaktorer for vandstandmodellen fundet fra DMI.

Grøndahl and Poulsen [2014]Larsen and W.Ø.Larsen [2013]

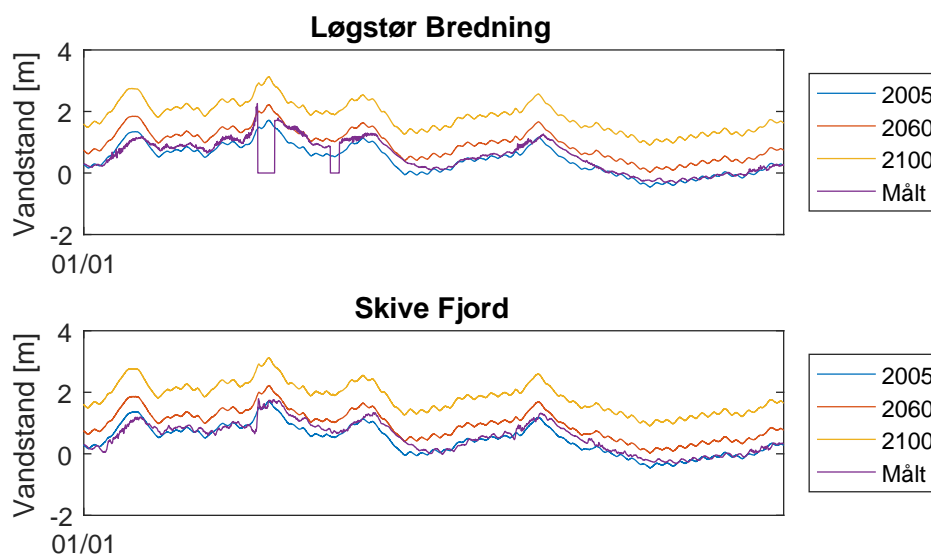
Det kan ses ved sammenligning af tabel 5.3 og tabel 5.4, at DMI's faktorer er højere end de fundne værdier, da det er fundet for større dataserier. Det er valgt videre at anvende DMI's tal, da disse skaber det værste scenarie.

5.1 Resultater af modellerne med klimaændringer

Modellen er herefter kørt for de to modeller, hvor løsningen med en dæmning med sluse er kørt for hhv. 2005, 2060 og 2100.

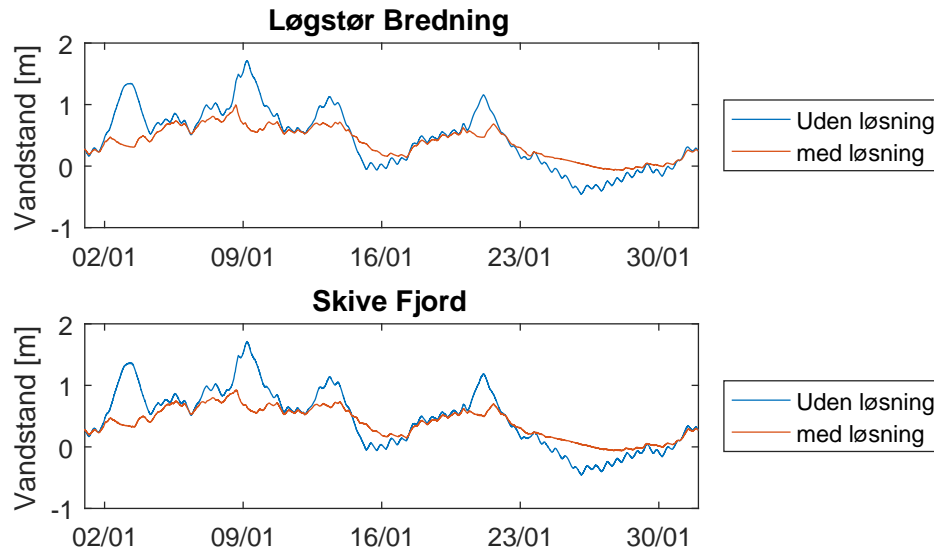
Resultat af klimaændringer i 1D-modellen

Det er valgt at køre 1D-vandstandmodellen for den første måned, da det er her stormen forekommer. Modellen er herudover opsat med en initialperiode på 1 måned. Forskellen imellem de tre tidsserier er illustreret i figur 5.3.



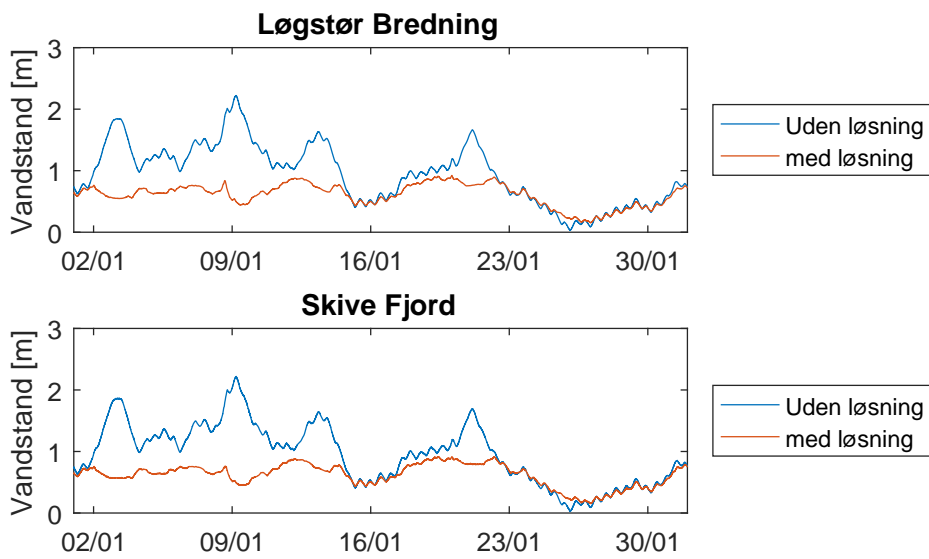
Figur 5.3. De to fremskrivninger sammenholdt med de modellerede data fra 2005 og de målte data fra 1D-vandstandsmodellen, vist over den første måned.

Det kan i figur 5.3 kan det ses, at vandstanden stiger op over 3m ved denne fremskrivning i 2100. Herefter er alle tre vandstande blevet kørt med dæmningen med en gennemstrømningsssluse, for at undersøge, om denne løsning kan håndtere ekstremvandstande i fremtiden. For at kunne sammenligne scenarierne er det valgt først at køre modellen for 2005, hvilket er illustreret på figur 5.4.

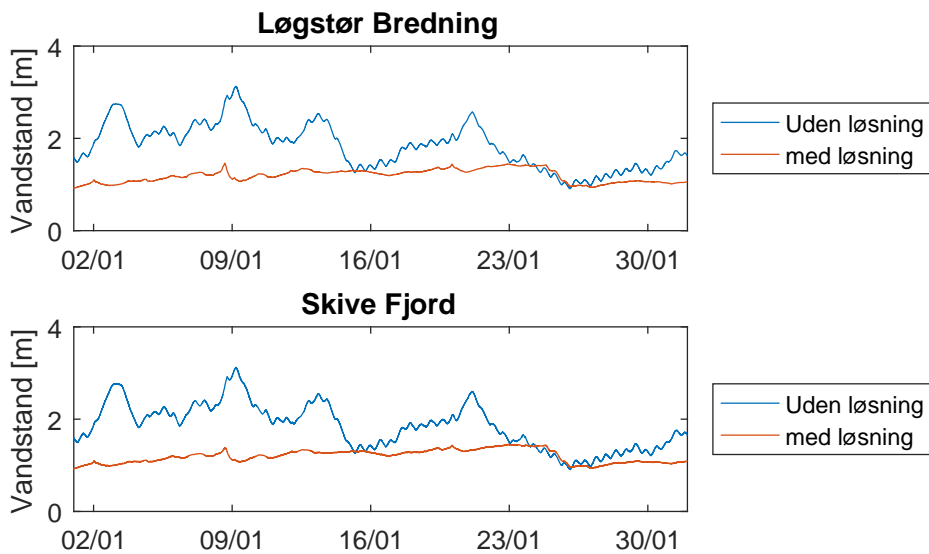


Figur 5.4. Vandstanden for første måned af 2005 med og uden dæmning med gennemstrømningsssluse.

På figur 5.4 kan det ses, at en sluse nedsætter maksimalvandstanden samt holder vandstanden mere konstant. Herefter er modellen kørt for de to fremskrevne scenarier for hhv. 2060 og 2100 illustreret i figur 5.5 og figur 5.6.



Figur 5.5. Vandstanden for første måned af 2060 med og uden dæmning med gennemstrømningsssluse.

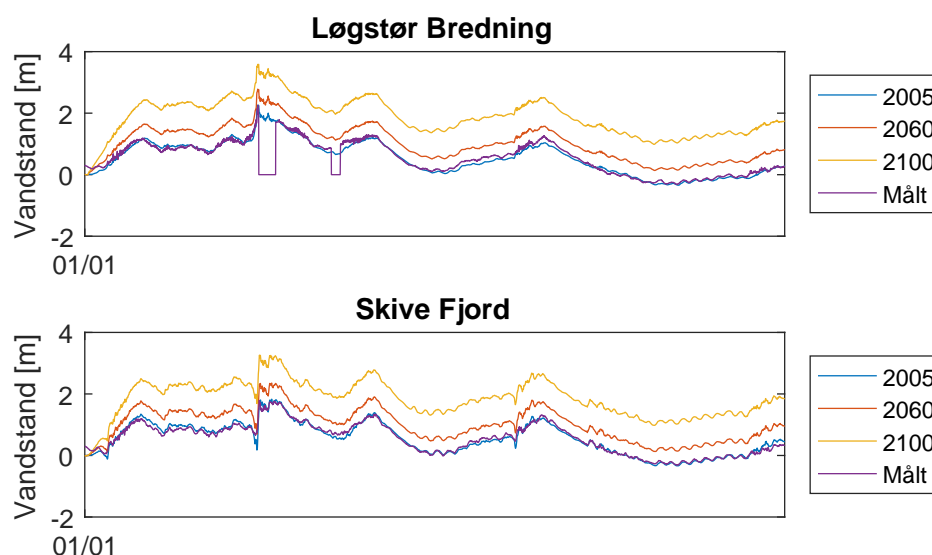


Figur 5.6. Vandstanden for første måned af 2100 med og uden dæmning med gennemstrømningsssluse.

Det kan i figur 5.5 og 5.6 ses, at maksimal vandstanden i begge tilfælde bliver mindsket ved opførelsen af en dæmning med en sluse. Endvidere kan det ses, at den største sænkning sker i 2100, da det er her slusen oftest lukkes. Resultaterne er simuleringerne med slusen er i bilags E. 5.1 og E 5.2

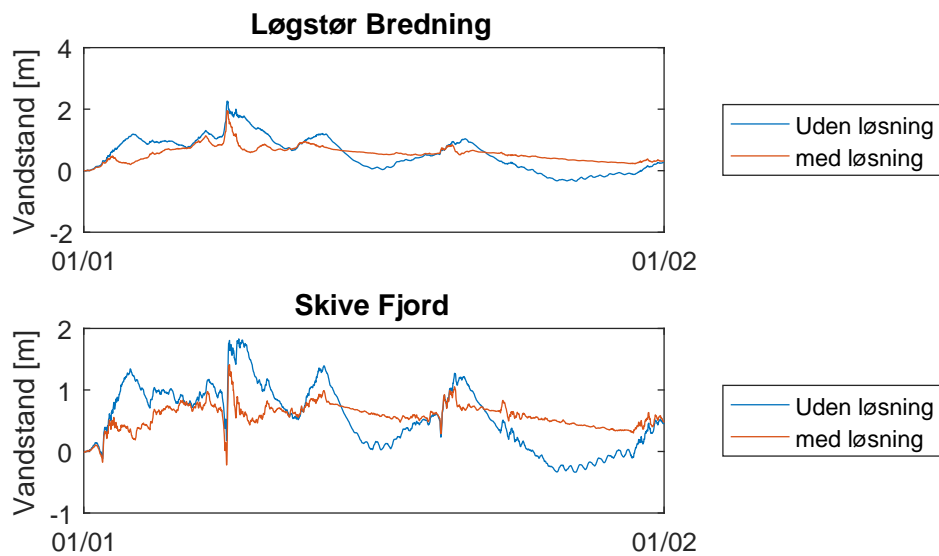
Resultat af klimaændringer i 2D-modellen

Det er ligeledes valgt at køre klimascenarierne i 2D-vandstandsmodellen, med samme opsætning som i 1D-modellen, da der under udvælgelsen af løsningsforslag er fundet en afvigelse imellem de to modeller. Fremskrivningen af tidsserierne er foretaget på samme måde, og modellen returnerer vandstanden for de 3 scenarier som illustreret på figur 5.7, som viser den første måned af de respektive år.



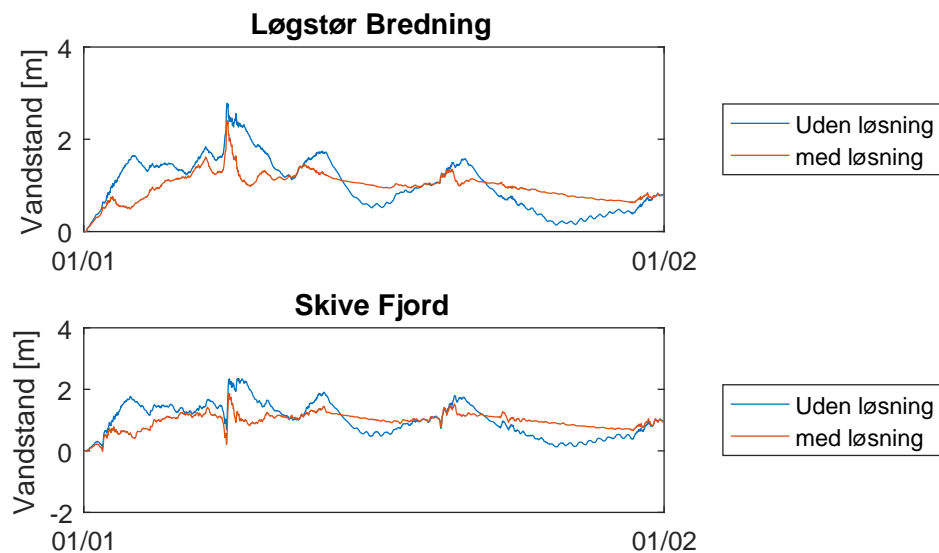
Figur 5.7. De to fremskrivninger sammenholdt med de modellerede data fra 2005 og de målte data fra 2D-vandstandsmodellen, vist over den første måned.

Det kan ses på figur 5.7, at modellen, ligesom 1D-vandstandsmodellen, returnerer den højeste vandstand ved 2100, som det var forventet. Endvidere kan det ses, at denne vandstand opnår værdier på over 3 meter for både Løgstør Bredning og Skive Fjord. Det er ønsket at reducere denne ekstreme vandstand, hvilket er forsøgt med en simulering med en dæmning med sluse, da det var fundet til at være den mest effektive løsning i 2005, illustreret på figur 5.8.



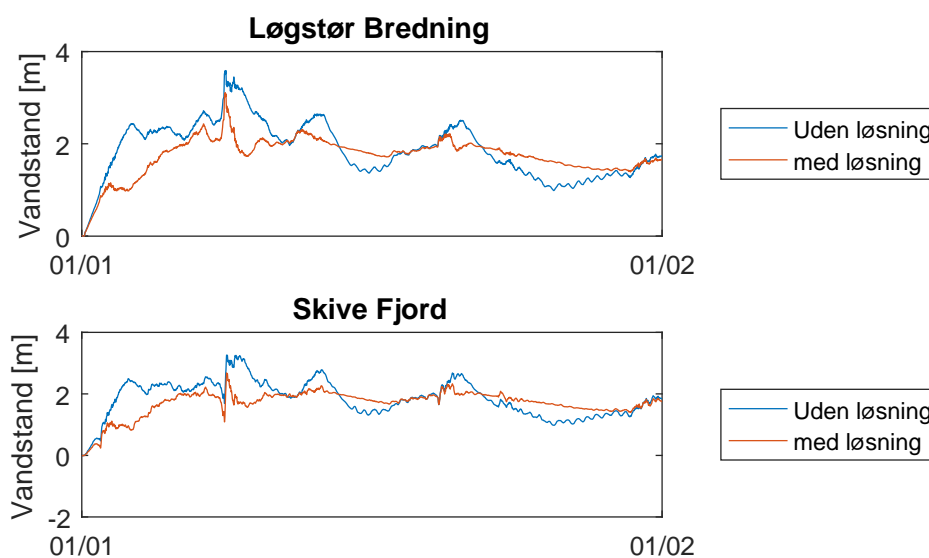
Figur 5.8. Vandstanden for første måned af 2005 med og uden dæmning med en gennemstrømnings-sluse ved 2D-vandstandsmodel

Det kan ses på figur 5.8, at slusen reducerer ekstremvandstanden, samt udfligner vandstanden. Herefter er det valgt at foretage samme simulering for 2060, hvor et scenarie med og uden sluse sammenlignes, for at se, om løsningen kan anvendes i fremtiden, illustreret på figur 5.9.



Figur 5.9. Vandstanden i første måned af 2060 med og uden dæmning med en gennemstrømnings-sluse ved 2D-vandstandsmodel

På figur 5.9 kan det ses, at der er lidt flere udsving i forhold til 2005, men at dæmning med gennemstrømningssluse stadig reducerer ekstremvandstanden. Dog kan det ses, at modellen er længere tid om at sænke vandstanden, hvilket er antaget at være, fordi vandet ikke kan løbe tilbage til Nordsøen. Dette gør, at ekstremvandstanden sænkes, men middelvandstanden vil være forhøjet. Vandstanden formodes dog stadig at stige fra 2060 til 2100, hvorfor det er valgt at simulere vandstanden i 2100 med 2D-vandstandsmodellen illustreret på figur 5.10.



Figur 5.10. Vandstanden for den første måned af 2100 med og uden dæmning med gennemstrømningsluse ved 2D-vandstandsmodel

Det kan på figur 5.10 ses, at vandstanden uden en sluse vil nå op på ca. 3,5 m, hvilket en sluse kan mindske til omtrent 3 m i Løgstør Bredning. Udover dette kan de samme tendenser ses som for de andre år, hvor ekstremvandstanden mindskes, men middelvandstanden stiger ved en lukning.

5.2 Konklusion af klimaændringer

Det er fundet, at vandstanden vil stige i fremtiden, dog er det usikkert, hvor meget denne stigning vil være. Da denne stigning er usikker er det valgt at sammenligne med klimascenarie A1B, som ofte anvendes i Danmark, med de klimafaktorer, der bestemmes ud fra det målte data. Det er her fundet at klimascenarie A1B, har de største stigninger med hensyn til vandstand. Det samme er fundet ved vinden. 1D-vandføringsmodellen gengiver en stigning, som er forventet, og ved indførelse af dæmningen med en gennemstrømningsssluse, reduceres også vandstanden i de to undersøgte fjorde. Anvendes 2D-modellen, bliver sænkningerne mindre, hvilket er antaget at være, fordi 2D-modellen bedre kan gengive vindstuvning, idet denne model har mindre diskretiseringer. Endvidere kan det ses, at 2D-modellens løsninger har flere udsving, hvilket igen skyldes forskellen i kompleksitet af modellerne. Det er dog fundet i begge modeller, at en dæmning med gennemstrømningsssluse vil kunne mindske ekstremvandstanden ved stormflod, men hvorvidt en sådan løsning vil hæve middelvandstanden er usikkert ved sammenligning af modellerne.

6. Konklusion på vandstandsmodellering

Der er opstillet to forskellige modeller til at gengive vandstanden, hvor den første er en simpel model, der udelukkende anvender vandføringer i én dimension imellem boksene. Den anden model er opstillet til beregning af to-dimensionelle vandføringer og har endvidere fået en mere avanceret geometri. Dette resulterer i, at modellen med de to-dimensionelle vandføringer er bedre til at gengive vandstanden end den med én-dimensionelle vandføringer. Endvidere kan det ses, at den første model ikke kan anvendes til at gengive ekstremvandstande og vandstande ved normale vejrforhold på samme tid. Modellen er også for simpel til at være sikker på resultatet ved implementering af løsningsforslag, da bl.a. en høfdeudvidelse antages at indsnævre hele tværsnittet igennem hele Thyborøn Kanal. Derudover antager 1D-vandstandsmodellen, at den beregnede vandstand er den samme i hele beregningscellen, hvilket gør den ude af stand til at beregne lokale ændringer, såsom i punkterne ved Løgstør og Skive. Den anden model synes at være bedre til at gengive både ekstreme og normale vandstande, samt at denne model kan indføre ændringen af geometrien lokalt i Thyborøn Kanal, hvorved hele kanalen ikke ændres. Sammenligningen af ekstremvandstande, beregnet ved de to modeller kan ses i tabel 6.1.

| Kritiske byer | Målt Vandstand | Naturlig | | Høfde 63 | | Dæmning | |
|---------------|----------------|----------|------|----------|------|---------|------|
| | | 1D | 2D | 1D | 2D | 1D | 2D |
| Thyborøn | 2,63 | 2,63 | 2,71 | 2,63 | 2,72 | 2,63 | 2,73 |
| Lemvig | 1,81 | 1,91 | 1,65 | 1,37 | 1,32 | 0,80 | 0,77 |
| Struer | - | 1,69 | 1,67 | 1,33 | 1,45 | 0,80 | 0,83 |
| Thisted | - | 1,63 | 1,71 | 1,33 | 1,49 | 0,81 | 0,82 |
| Nykøbing | - | 1,68 | 1,81 | 1,33 | 1,48 | 0,81 | 0,92 |
| Skive | 1,76 | 1,78 | 1,86 | 1,45 | 1,74 | 0,83 | 1,41 |
| Løgstør | 2,05 | 1,82 | 2,38 | 1,48 | 2,22 | 1,00 | 1,95 |
| Aalborg | 1,05 | 1,07 | 1,27 | 1,05 | 1,34 | 1,02 | 1,22 |

Tabel 6.1. Vandstande ved de kritiske byer ved forskellige løsninger i begge modeller Sørensen et al. [2013a]

Målingerne i tabellen er angivet i Sørensen et al. [2013a] for andre målepunkter end de givne dataserier, hvorved der er en afvigelse af de maksimale vandstande der er målt. Eksempelvis er måleren for Løgstør placeret inde i havnen.

I tabel 6.1 kan det ses, at modellen med én-dimensionelle vandføringen giver større reduktionerne end modellen med to-dimensionelle vandføringer. Dette antages at være på grund af måden, hvorved en løsning implementeres i de to modeller, hvor den første model ændrer tværsnittet af hele Thyborøn Kanal. Endvidere kan det ses, at modellen med de to-dimensionelle vandføringer ikke er i stand til at gengive vandstanden i Aalborg, hvilket er et bevidst valg ved kalibreringen, hvor Manningtallet i denne del af modellen er indstillet til at hjælpe med at give opstuvning i den centrale del af Limfjorden, hvilket er modellens egentlige formål, da det er her ekstremvandstande ønskes sænket grundet tidligere analyse i kapitel 1.1 på side 3.

Sammenlignes de forskellige løsningsforslag anvendt i de to modeller, kan det ses, at en dæmning med gennemstrømningsssluse er bedst til at forhindre stormflodsvandstande i forhold til højdeudvidelserne, der er blevet testet. Dette er tilfældet i begge modeller i den centrale del af Limfjorden.

Ud over dette er stormfloden den 8. januar 2005 fremskrevet til 2060 og til 2100 med henhold til klimaændringer for at undersøge, om løsningerne vil kunne anvendes ved stormfloder i fremtiden. Ud fra resultatet af simuleringerne ses det, at løsningen med en dæmning med gennemstrømningsssluse kan mindske vandstandene for den fremskrevne storm, hvorved at en løsning, der opføres i dag, også vil kunne fungere i fremtiden.

Udvalgte simuleringresultater fra 2D-vandstandsmodellen er vedlagt i bilag E. 5.3.

Del II

Vandkvalitet i Limfjorden

Formålet med denne del af rapporten er at undersøge om vandkvalitet kan forbedres ved indførelse af en af de fundne løsningsforslag enten direkte eller indirekte. Det er valgt at undersøge vandkvaliteten ud fra de nuværende planer for vandkvaliteten i Limfjorden opstillet i Vandplan 1.2, som Miljøministeriet har udarbejdet efter Miljømålsloven, der er opstillet på baggrund af EU's vandrammedirektiv. Derudfra er det valgt at opbygge en model, der gengiver de opstillede parametre, som ligger til grund for vandkvaliteten.

Vandkvalitet i Limfjorden

Limfjorden er, ud over ekstremvandstande, også kendt for at have et dårligt vandmiljø. Vandmiljøet er i Europa opdelt i to grupper, hvor den ene er kemisk vandmiljø, mens den anden er økologisk vandmiljø. EU kommissionen har fastsat overordnede love omkring miljø kvaliteten, som den danske Miljømålslov er baseret på, hvilket er forklaret i bilag A 6. Det kemiske vandmiljø er i hele Danmarks marine område beskrevet som værende "*ikke god*", hvilket i Limfjorden skyldes mængden af kviksølv i østers. Det økologiske miljø er derimod opdelt i tre områder for Limfjorden og har fem underordnet klassificeringer kaldet det økologiske kvalitets forhold EQR, som er et udtryk for, hvor meget den biologiske tilstand har ændret sig, og udregnes som $EQR = \frac{\text{Observeret tilstand}}{\text{Reference tilstand}}$. EQR er derfor et tal imellem 0 og 1, hvor værdier tæt på 1, beskriver en observeret tilstand, der er lig med eller tæt på de opstillede referencetilstande. Modsat er en værdi af EQR tæt på 0 et udtryk for en observeret tilstand, der er væsentligt forringet i forhold til referencetilstanden. Naturstyrelsen [2013]

I Limfjorden er den økologiske tilstand bestemt ud fra dybdeudbredelsen af ålegræs, hvor hele Limfjorden er sat til at have en referencedybde på 5,5 m, fastsat af Naturstyrelsen [2013]. Dermed er grænserne imellem de forskellige tilstande ligeledes udregnet til at være ens i hele fjorden, hvilke er opstillet i tabel 6.2.

| Klassifikationer | Reference | Tilstand | | | |
|------------------|-----------|-------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| | | Høj/ God | God/ Moderat | Moderat/ Ringe | Ringe/ Dårlige |
| EQR | 1,00 | 0,90 | 0,74 | 0,50 | 0,25 |
| Ålegræsdybde | 5,50 | 5,00 | 4,10 | 2,80 | 1,40 |

Tabel 6.2. Tilstandsgrænser for Limfjorden via EQR og ålegræsdybde.

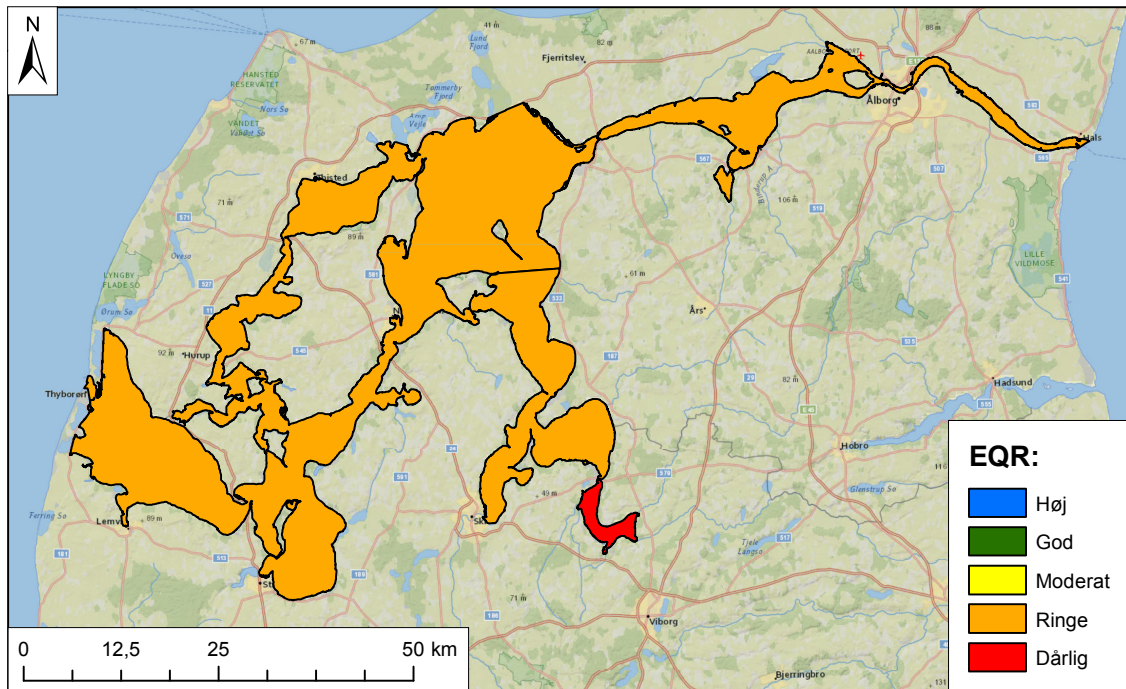
Det kan ses, at de forskellige klassifikationer har en direkte sammenhæng mellem EQR og ålegræsdybden. Sammenlignes dette med de målte data, som er tilgængelige for Limfjorden, opstillet i tabel 6.3, kan de forskellige fjordes klassifikationer opstilles.

| Fjord | Ålegræsdybde | EQR | Økologisk tilstand |
|---------------------|--------------|------|--------------------|
| Hjarbæk Fjord | 0,20 | 0,05 | Dårlig |
| Indre fjord | 1,60 | 0,30 | Ringe |
| Resterende Limfjord | 2,10 | 0,39 | Ringe |

Tabel 6.3. Nuværende tilstand i Limfjorden.

I tabel 6.3 kan det ses, at Hjarbæk fjord er klassificeret som dårlig, mens resten af Limfjorden er klassificeret som ringe. Det kan ses, at dybden af ålegræsudbredelsen i Limfjorden strækker sig mellem 0,20 m til 2,10 m. Hjarbæk Fjord har den lavest klassificerede ålegræsdybde, og der blev ikke fundet ålegræs ved den seneste vegetationsundersøgelser.

De tre delområder af Limfjorden, præsenteret i tabel 6.3, samt deres økologiske tilstand er illustreret på figur 6.1.



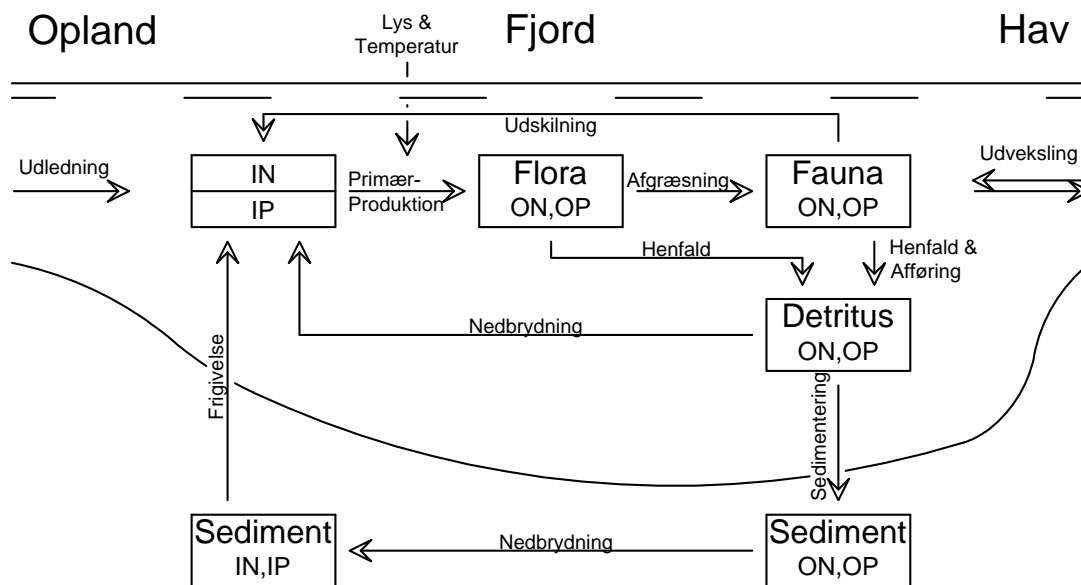
Figur 6.1. Vandkvalitet i de tre områder af Limfjorden samt skalaen for den økologiske tilstand i kystnære områder.

På grund af det begrænsede vandskifte og det forholdsvist store bidrag af næringsstoffer fra vandløb, har Hjarbæk Fjord en stor population af alger og ofte forekommende iltsvind. Udover at være indikator for vandkvaliteten, har ålegræsset også en beskyttende funktion for bundlevende dyr og fiskeyngel. Ålegræs er afhængigt af sollyset, hvilket betyder, at vandet skal være relativt klart, for at de kan udbrede sig i dybden. Angivelsen af, hvor klart vandet er, kaldes secchidybden, som beskriver, hvor langt ned solens stråler når i vandet. Secchidybden kan findes som en funktion af mængden af fytoplankton. Ålegræssets afhængighed af andre parametre end secchidybde er beskrevet i afsnit A 6.2 i bilag A 6.

Fytoplanktonets tilstedeværelse i vandsøjlen, nedsætter secchidyben, hvilket medfører, at dybdegrænsen for ålegræs mindskes. Fytoplanktonet tiltrækker også zooplankton, som lever af fytoplanktonet, der ligeledes mindsker secchidybden. Mængden af fytoplankton er styret af sollys og mængden af næringsstoffer i fjorden, især næringsstofferne nitrogen og fosfor er de begrænsende næringsstoffer for væksten af planktonet. Dette medfører en omvendt proportionalitet mellem næringsstofkoncentrationerne og dybdeudbredelsen af ålegræs. Forhøjede koncentrationer af næringsstoffer er specielt et problem i områder af fjorden med lavt vandskifte.

Dette er specielt et problem i den indre Limfjord, hvilket medfører en lavere secchidybde, som igen medfører lavere ålegræsdybdegrænser. Mængden af næringsstoffer i Limfjorden er styret af udledningen af næringsstof samt vandskiftet i de forskellige dele af fjorden og de biologiske processer i Limfjorden. Beskrevet nærmere i afsnit A 6.3 i bilag A 6.

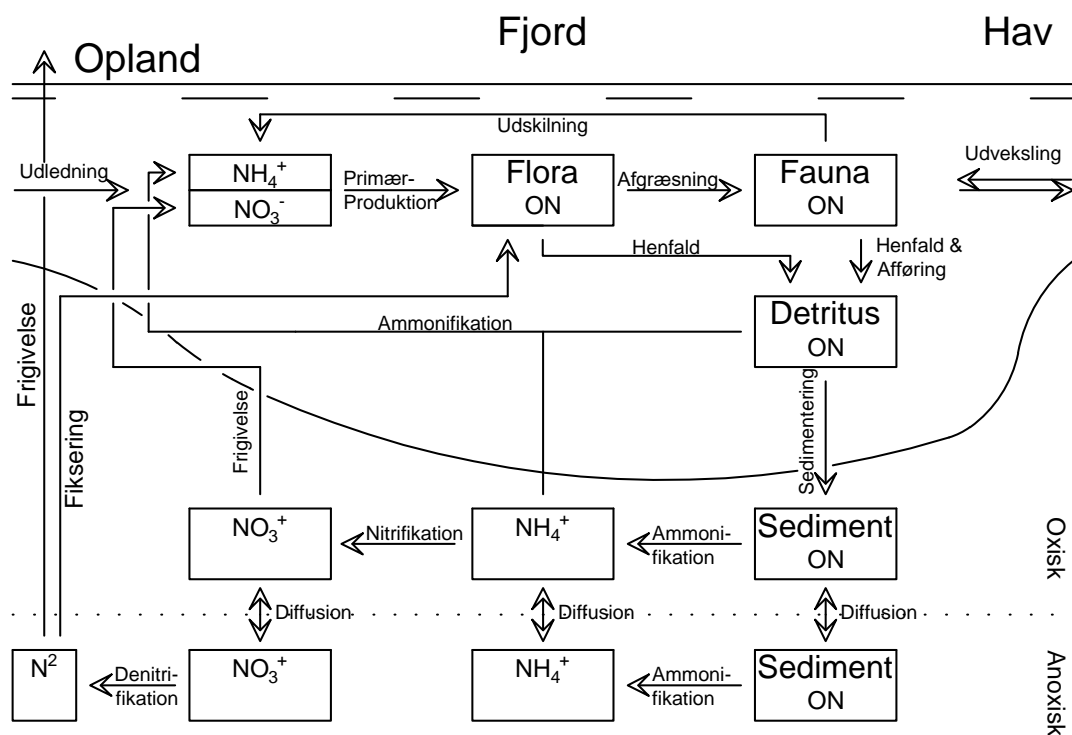
Udledningen af næringsstoffer har stor betydning for økosystemet i vandet. Denne udledning af næringsstoffer antages at være uorganisk, da opholdstiden i vandløbene er korte i forhold til i fjorden, hvorfor det antages, at det er her hele primæreproduktionen af plankton vil foregå. De uorganiske næringsstoffer optages i planktonet, som anvender dem til vækst. Noget af planktonet vil efterfølgende dø og blive til detritus, mens en anden del af planktonet vil blive optaget af faunaen. Næringsstofferne følger herefter de trofiske niveauer igennem økosystemet, hvor denne fauna i disse niveauer også vil dø, hvilket også vil indgå i detritus. Endvidere tilføjer de levende dyr detritus via ekskrementer. Detritus vil enten sedimentere til bunden, hvor de organiske forbindelser vil blive nedbrudt eller mineraliseret, således at næringsstofferne igen bliver uorganiske. I sedimentet vil næringsstofferne blive nedbrudt til uorganiske stoffer, som kan blive frigjort fra sedimentet, for igen at blive en del af primærproduktionen af plankton og starte cyklussen forfra. Nogle af næringsstofferne vil blive ført med vandet, ud af fjorden, både i organisk og uorganisk form, hvorved det ikke længere vil være en del af denne cyklus. Cyklussen er illustreret på figur 6.2. Beskrevet nærmere i afsnit A 6.3 i bilag A 6.



Figur 6.2. Økosystemet for en dansk fjord. Modifieret ud fra Hansen [1997]

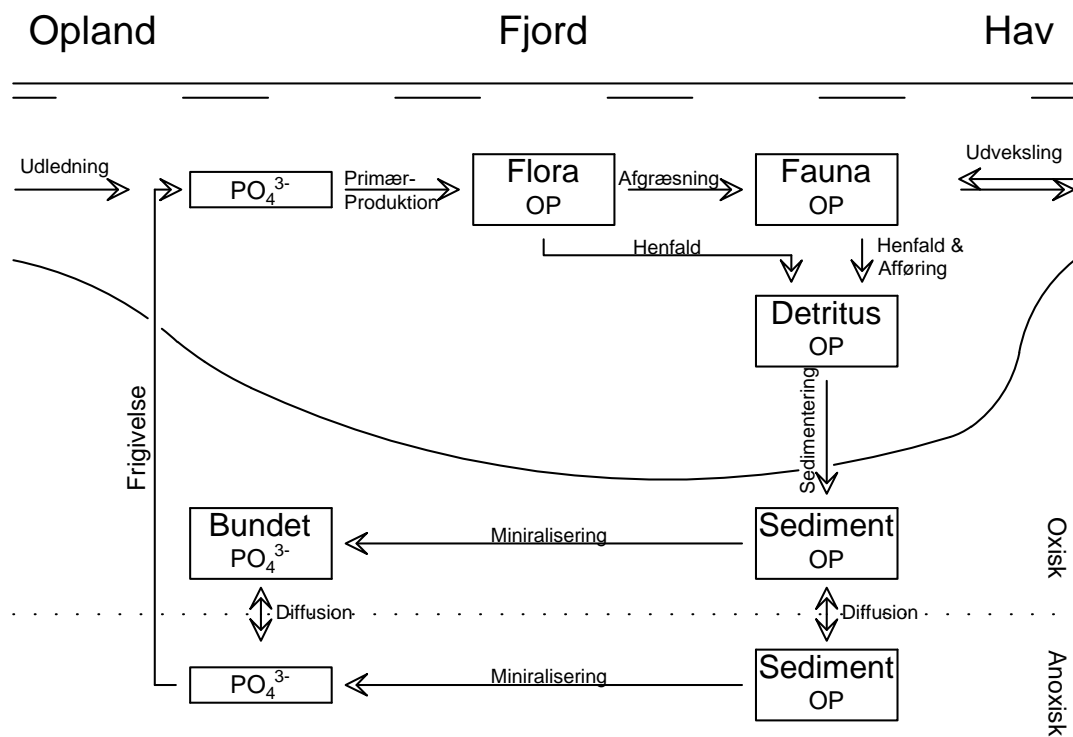
Det kan ses på figur 6.2, at næringsstofferne, der er medtaget i dette forsimplede økosystem, er nitrogen og fosfor på organisk og uorganisk form. Endvidere er det udelukkende de vigtigste processer, der er medtaget, samt de processer, som begge næringsstoffer undergår. Den uorganiske del af stofferne kan opdeles i næringssalte på

ionform, hvor nitrogen består af ammonium, ammoniak, nitrit og nitrat, mens fosfor består af orthofosfat. Hvilket stadie næringssaltene er på, er afgjort af deres respektive cyklusser, som forgår inde i den overordnede cyklus, vist på figur 6.2. For nitrogen er systemet illustreret på figur 6.3.



Figur 6.3. Nitrogens cyklussen for en dansk fjord. Modificeret ud fra Hansen [1997]

På figur 6.3 kan det ses, at nitrogen i systemet eksisterer i to overordnede stadier, hvilket er fordi, det er antaget, at nitrit omdannes så hurtigt, at den ikke har indflydelse på miljøet. Endvidere kan det ses, at sedimentet nu er opdelt i en iltrig og iltfattig zone, da ammoniak vil nitrificere i iltrige omgivelser, mens nitrat vil denitrificere i områder uden ilt. Under denitrificeringen vil nitrat omdannes til nitrogen, som vil stige op gennem systemet og op i atmosfæren, hvis ikke den fikses af floraen, inden den når overfladen. Fosfor har ikke nogen proces, hvorved den kan forlade systemet på samme måde. Fosforkredsløbet er illustreret på figur 6.4.



Figur 6.4. Fosfor cyklussen for en dansk fjord. Modificeret ud fra Hansen [1997]

Det kan på figur 6.4 ses, at den eneste måde fosfor kan forlade systemet på, er med udveksling med havet. Endvidere kan det ses, at der er noget orthofosfat, der er bundet i sedimentets iltrige del. Dette fosfor er kemisk bundet til oxiderede metaller og kan derfor kun være bundet under forhold, hvor der er ilt til stede. Mindskes koncentrationen af ilt, vil disse bindinger brydes, og det bundne fosfor kan blive resuspenderet, hvorved floraen kan anvende den. Den bundne mængde fosfor i sedimentet er ofte kendt som fosforpuljen.

Det er for det meste fosfor, der er det begrænsende næringsstof for algevæksten, men nogle gange kan det hænde, at det er koncentrationen af nitrogen, der er afgørende for algevæksten, hvorfor det er nødvendigt at fokusere på dem begge. Det er dog påvist at planterne ikke behøver den samme mængde af både nitrogen og fosfor til at foretage primærproduktionen. Forholdet imellem de to næringsstoffer, som planten skal anvende, er konstant og kaldes Redfield-forholdet. ifølge Redfield-forholdet er der behov for 16 gange så meget nitrogen, som der skal fosfor til for primærproduktion, afgjort af antallet af mol, der forekommer naturligt i processen. Molforholdet ganges med molærvægten af nitrogen og fosfor, som er henholdsvis 14,01 og 30,97 [g mol^{-1}]. Herved opnås et Redfield-forhold mellem vægten af nitrogen og fosfor på 224,16g/30,97g, hvilket er lig med 7,24. Med dette forhold kan det begrænsende næringsstof findes. Hvis N:F-forholdet er over 7,24, er fosfor det begrænsende næringsstof, og hvis forholdet er under, er det nitrogen, som er begrænsende [Nutrient and Eutrophication in Danish Marine Waters, 2016].

Er udledningen af de to næringsstoffer imidlertid så stor, at algeopblomstringen ikke er begrænset, vil algemængden stige, og vandet vil blive uklart og blokere for sollyset. Når algerne dør, vil bakterier i vandsøjlen og på bunden begynde at nedbryde det organiske materiale, og denne proces kræver ilt. Er mængden af døde alger stor nok, kan der forekomme iltsvind ved bunden. Iltsvind er dog også styret af, hvor meget ilt der kommer ned i vandsøjlen fra overfladen og opstår derfor oftest ved lagdelt vand, hvor ilten skal diffundere igennem disse lag. Derfor forsvinder iltsvind ofte, når det begynder at blæse, og vinden tilføjer nok energi til at bryde disse lagdelinger. Kommer der imidlertid ikke energi nok i systemet til at bryde denne lagdeling, kan iltsvindet medføre en såkaldt bundvending, hvor svovlbrinte og metan frigives til vandsøjlen. Sker dette, er faunaen, der er tilbage i området, i fare for at dø af den giftige svovlbrinte. Dette sker dog yderst sjældent. Iltsvind sker hovedsagligt om sommeren, da det er her, at der forekommer en øget algeopblomstring, og temperaturen i vandet er højest, hvilket bakterier, der nedbryder det organiske materiale, anvender til energi.

I Limfjorden er det ofte de samme områder, der har problemer med iltsvind i sensommeren. Disse er ofte områderne, der ikke er beliggende i hovedvandføringen, så som Thisted Bredning, Skive Fjord, Louns Bredning og Hjarbæk Fjord. Dette er fordi der i disse områder opstår stratificering, som er en lagdeling af vandsøjlen, styret af densitetsforskellen, hvor saliniteten har den største effekt. Hjarbæk Fjord er i imidlertid opdæmnet, men har en åben gennemstrømningsluse det meste af året. Dog forstærker slusen lagdelingen i fjorden, hvilket gør, at der netop her ofte forekommer iltsvind ved bunden. Disse fjordområder er alle omgivet af store landbrugsområder, hvilket forklarer problematikken med iltsvind.

Hvilket næringsstof, der er det styrende, varierer hen over året, ligesom koncentrationen af de to næringsstoffer. Udledningen af næringsstoffer varierer ligeledes hen over året, hvor for eksempel landbrugets udledning af Nitrogen hovedsagligt forekommer i de perioder, hvor markerne gødes.

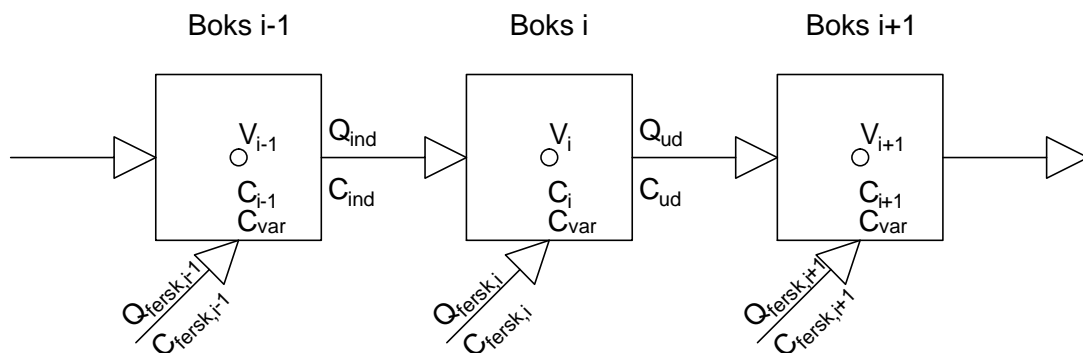
Udover variationen i udledningen, har også de biologiske processer i vandmiljøet en stor indflydelse på koncentrationen af næringsstofferne. Eksempelvis vil koncentration naturligt falde, når algerne begynder at vokse og anvende næringsstoffet til vækst. Denne vækst er kendt som primærproduktionen, og er et udtryk for, hvor meget organisk stof der bliver produceret. Sæsonvariationen af primærproduktionen opstår, da produktionen af organisk stof kræver sollys ved fotosyntese. Da der er mere lys tilgængeligt til fotosyntese om sommeren, vil det dermed give en større produktion af organisk stof, og koncentrationen af næringsstoffer vil falde.

7. 1D-vandkvalitetsmodel

Det er valgt at opbygge en model af vandkvaliteten ud fra en empirisk forståelse af vandmiljøet. Modellens formål er at gengive næringsstofskoncentrationer til beskrivelsen af vandkvaliteten. Det er her antaget, at vandmiljøet afhænger af næringsstofskoncentrationer i fjorden, da disse danner grundlaget for væksten af fytoplankton, som igen er grundlaget for vandmiljøet.

1D-vandkvalitetsmodellen er bygget videre ud fra 1D-vandstandsmodellen, hvorved denne model også er simpel i geometrien. Dette betyder endvidere, at modellen stadig er simpel, og da modellen ønskes opstillet som en empirisk model, med få uafhængige variabler, er den matematiske model ligeledes holdt simpel. Dette betyder, at denne model har en lav beregningstid. Idet at modellen opstilles empirisk, forventes det, at dens resultater kan komme til at følge de målte værdier godt, men at modellen vil have svært ved at regne på ændringer i systemet. Dette skyldes, at den hydrodynamiske del af modellen allerede indeholder usikkerheder ved ændringer i systemet. Herudover gør den empiriske del, at modellen kan have svært ved at regne med ændringer, da den opbygges med en uafhængig sæsonvariation, som ikke afhænger af udledningen.

Modellen, der er valgt, er sammensat af tre dele. Den første del er den modellerede koncentration i det foregående tidsskridt, det næste er en årsvariation af koncentrationen, og det sidste er transport af næringsstoffet. Denne model er opstillet for de enkelte bokse, hvor inputtet af næringsstoffet kommer fra Limfjordens opland, gennem vandløbene. Koncentrationen afhænger her foruden, af koncentrationen i de tilstødende bokse, og vandføringerne mellem dem, illustreret som en konceptuel model på figur 7.1.



Figur 7.1. Konceptuel model af 1D-vandkvalitetsmodellen for boks i .

Det kan ses på figur 7.1, at koncentrationen af næringsstoffet C er afhængig af de omkringliggende bokse, samt en fælles variation i koncentrationen. Ud over disse ydre parametre skal modellen også anvende koncentrationen i det foregående tidsskridt, på samme måde som i vandstandsmodellen. Endvidere kan det ses, at tilførslen af næringsstoffer sker gennem randene og ferskvandskilderne. Randene er i denne simple model antaget at have en koncentration på 0, hvorved modellen afhænger af inputtet af næringsstof. Dette kan gøres, da koncentrationerne af næringsstoffer i havet er væsentligt lavere, end de er i Limfjorden. Den empiriske model er opstillet ved formel 7.1. Modellen er udledt i bilag A 6, med de enkelte dele udledt hver for sig.

$$C_{(i,t)} = \kappa_1 \cdot C_{(i,t-1)} + \kappa_2 \cdot C_{kons,(t,i)} + \kappa_3 \cdot C_{var}(t) \quad (7.1)$$

Hvor:

| | | |
|------------------|---|------------------------|
| C | er koncentrationen af næringsstofferne i boks i til tiden t | $[\mu\text{g l}^{-1}]$ |
| κ | er vægtningsfaktorer | $[-]$ |
| $C_{kons,(t,i)}$ | er de konservative koncentrationer | $[\mu\text{g l}^{-1}]$ |
| $C_{var,(t)}$ | er årsvariationen af koncentrationen | $[\mu\text{g l}^{-1}]$ |

I formel 7.1, er det opstillet to uafhængige dele, som er opdelt i en konservativ del, og en varierende del. Den konservative del antager, at næringsstoffet bevæger sig med strømmen rundt i systemt, uden at diffusere, hvorved den er opstillet i formel 7.2.

$$C_{kons,(t,i)} = \frac{\Delta t}{V_{(t,i)}} \left(Q_{ind,(t,i)} \cdot C_{ind,(t,i)} + Q_{fersk,(t,i)} \cdot C_{fersk,(t,i)} - Q_{ud,(t,i)} \cdot C_{ud,(t,i)} \right) \quad (7.2)$$

Hvor:

| | | |
|------------|-----------------------------------|------------------------------|
| C | er koncentrationen af næringsstof | $[\mu\text{g l}^{-1}]$ |
| Δt | er tidsskridtet | $[\text{s}]$ |
| V | er volumen af boksen | $[\text{m}^3]$ |
| Q | er vandføringen imellem boksene | $[\text{m}^3 \text{s}^{-1}]$ |

I formel 7.2, kan det ses, at modellen afhænger af tilførslen og fjernelsen af næringsstoffet for den enkelt boks, styret af de omkringliggende bokse, samt tilførslen fra ferskvandskilderne.

Den anden del af modellen, opstillet i formel 7.1, er årsvariationen, som er antaget at følge en sinuskurve, som tager højde for de processer, der foregår i vandet og sedimentet. Det er valgt at opstille en enkelt variation, som dækker hele Limfjorden, denne variation er opstillet i formel 7.3, og dækker endvidere over processer så som degradering og sedimentering af de enkelte næringsstoffer.

$$C_{var}(t) = \beta + \chi \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T}(t - \varphi)\right) \quad (7.3)$$

Hvor:

| | | |
|-----------|---|-----|
| C_{var} | er variationen af koncentrationen af næringsstoffet | [-] |
| β | er middelværdien af koncentrationen | [-] |
| χ | er amplituden af kurven | [-] |
| T | er perioden af cosinuskurven | [-] |
| t | er den varierende tid | [-] |
| φ | er faseforskydningen | [-] |

Det kan i formel 7.3 ses, at dette led ikke afhænger af koncentrationen i boksen, eller de omkringliggende bokse, men udelukkende af tidspunktet på året. Leddet er styret af nogle konstanter, som styrer kurvers middelværdi, amplitude, og hvornår maksimalværdien forekommer.

Det kan ses, at formel 7.2, som gengiver ændringen af koncentrationen, er opbygget på samme måde som formel 3.1 på side 15. Det er valgt udelukkende at regne på de konvektive vandføringer, idet at boksene er store og beregningskridtene er relativt små, hvilket giver en høj numerisk dispersion. Derfor er det antaget, at den numeriske dispersion kan gengive spredningen af næringsstofferne, som naturligt ville forekomme ved en diffusion, der er hurtigere end den konvektive vandføring.

Dette beskriver koncentrationen af nitrogen i systemet, som herefter er opstillet som en sammenhæng med ålegræssets dybdeudbredelse, ved den empiriske formel opstillet i Laurantius type I formel 7.4. Carstensen and Krause-Jensen [2009] Denne model er udvalgt i bilag A. 8.

$$\ln(y_{(\text{\AA}legræs)}) = 5,934 - 0,755 \cdot \ln(TN_{(i)}) \quad (7.4)$$

Hvor:

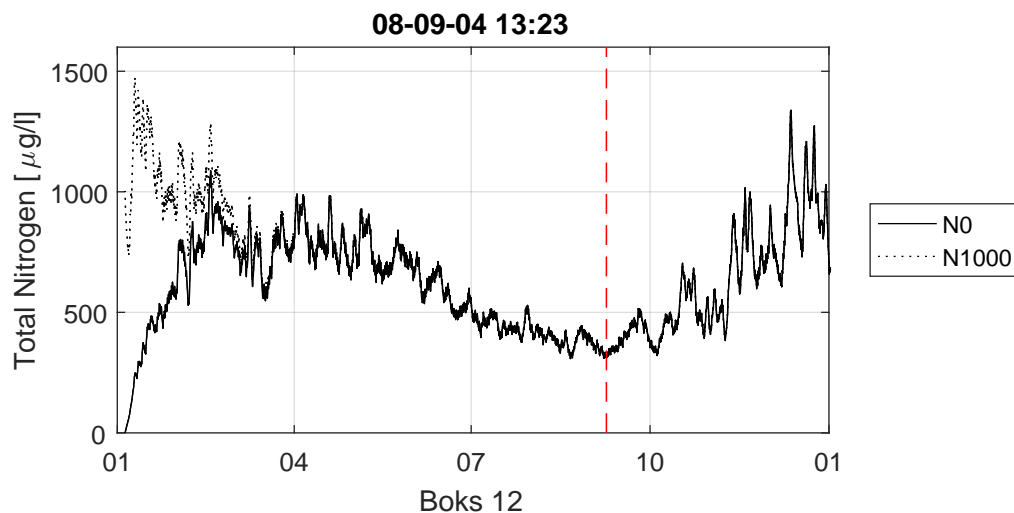
| | | |
|--------------------------|--------------------------------|------------------------|
| $y_{(\text{\AA}legræs)}$ | er dybdeudbredelsen af ålegræs | [m] |
| TN | er Total Nitrogen | $[\mu\text{g l}^{-1}]$ |

Det kan ses, at modellen opstillet i tabel 7.4, udelukkende afhænger af Total Nitrogen til at bestemme dybdegrænsen for ålegræsset. Denne empiriske model vil blive anvendt på middelværdien af total nitrogen over sommeren til at bestemme dybdeudbredelsen af ålegræsset.

Modellen med næringsstofferne kan tage lang tid om at stabilisere værdierne i de enkelte bokse, hvorfor det er valgt at foretage en simpel initialperiodeanalyse.

Initialperiode

For at finde hvor lang en initialperiode som modellen skal køres for, så næringsstofkoncentrationerne kan nå at stabilisere sig, anvendes der to forskellige startkoncentrationer på hhv. $0 \mu\text{g l}^{-1}$ og $1000 \mu\text{g l}^{-1}$. På figur 7.2 kan det ses, at 1D-vandkvalitetsmodellen stabiliserer sig efter lidt over 9 måneder i boks 12, hvilket er den kritiske boks, som har den længste stabiliseringsperiode, da de to modellerede koncentrationer her har stabiliseret sig fra deres startkoncentrationer.

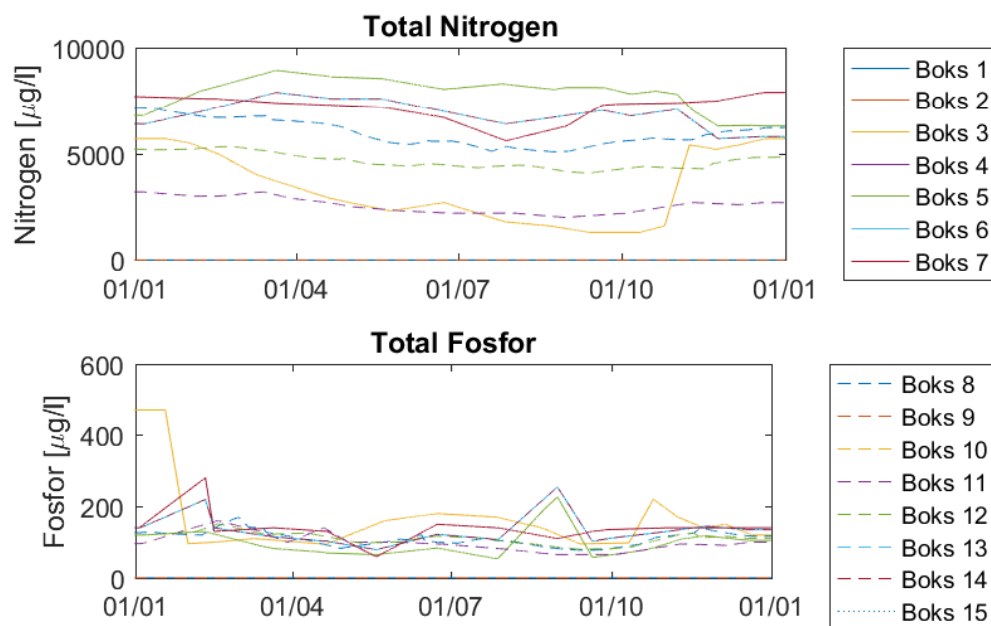


Figur 7.2. Nitrogenkoncentrationerne i boks 12 med de to forskellige startkoncentrationer over et enkelt år.

Det kan i figur 7.2 ses, at det for boks 12 tager modellen ca. 251 døgn at få de samme koncentrationer indenfor to decimaler. Det tager dog kortere tid for modellen at stabilisere sig til at vise de samme variationer. Derfor er det valgt at have en initialperiode på et år, før modellen anvendes til at beskrive ændringer i systemet. Denne initialperiode er sat til at være året 2005 spejlvendt.

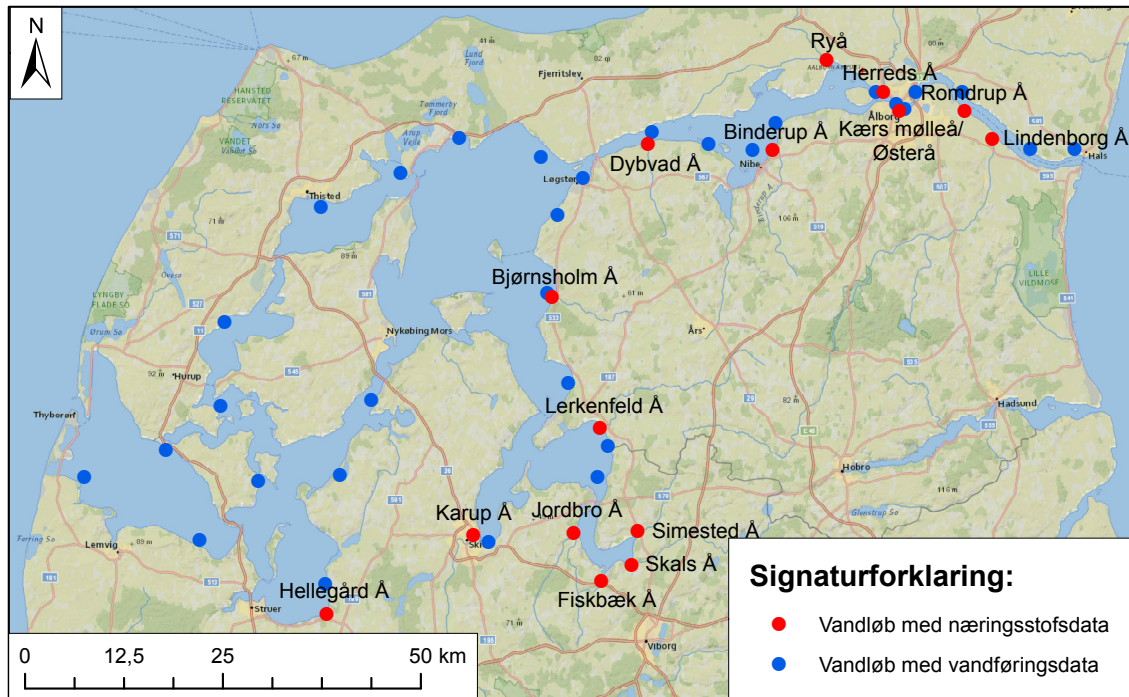
7.1 Anvendte parametre

I denne model er de fleste parametre anvendt direkte fra den endimensionelle vandstandsmodel, med undtagelse af tilførslen af næringsstoffer. Disse næringsstoffer bliver tilført fra ferskvandskilderne og samlet for hver af boksene illustreret i vandstandsmodellen. Koncentrationerne af de tilførte næringsstoffer er illustreret for de enkelte bokse i figur 7.3. Det er antaget, at disse punktudledninger er de eneste udledninger af næringsstoffer til systemet, og der derfor ikke forekommer nogen diffuse udledninger af næringsstoffer.



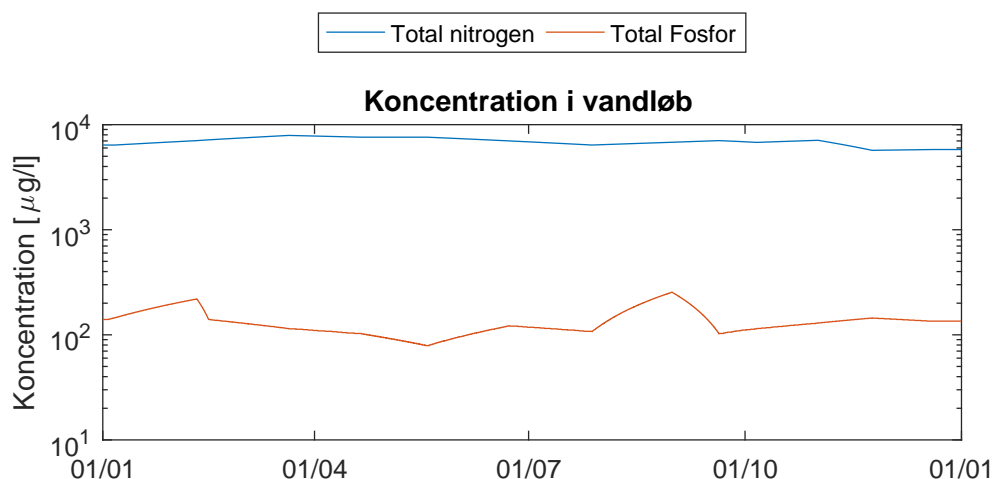
Figur 7.3. Målte næringsstofkoncentrationer fra vandløbene til de enkelte bokse.

Ud fra figur 7.3 kan det ses, at den største tilførsel af nitrogen er i boks 5. I boksene med mere end ét bidragende vandløb, anvendes en middelfkoncentration med den samlede vandføring. Det kan også ses, at nogle af boksene ikke har en udledning. Dette er fordi, det anvendte data er fundet for i alt 15 år, og at der ikke er år placeret i alle boksene. Placeringen af åerne med kendte data er illustreret på figur 7.4.



Figur 7.4. Placering af de 15 vandløb med næringsstofs-koncentrationsmålinger.

På figur 7.4 kan det ses, at de fleste af de kendte åer, er placeret ved Hjarbæk Fjord og i området omkring Aalborg. Hjarbæk fjord har høje næringsstofs-koncentrationer på grund af de fire bidragende vandløb, hvilket ledes videre til Louns Bredning. Det antages, at der er konstant forbindelse mellem Hjarbæk Fjord og Louns Bredning, da slusen sjældent er lukket. Endvidere kan det ses, at der i den vestlige del er mange åer med ukendte næringsstofs-koncentrationer. Da der mangler næringsstofs-koncentrationsdata for de fleste vandløb i den vestlige del af Limfjorden, er det valgt at finde middelkoncentrationer fra to udvalgte vandløb fra landbrugsområder, som ligeledes antages at svare til koncentrationerne i denne del af fjorden. De resulterende koncentrationer af nitrogen og fosfor, som anvendes til vandløbene i den vestlige del af Limfjorden er illustreret på figur 7.5.



Figur 7.5. Koncentrationer af nitrogen og fosfor som anvendes i den vestlige del af Limfjorden.

Det kan ses på figur 7.5, at de to kurver har en stor forskel i koncentrationerne, og at begge kurver har forholdsvis små udsving i forhold til de andre. Dog er disse udsving forventet, med en høj koncentration af nitrogen i den førstedel af året, mens fosfor har en høj koncentration på den sidste del af året. Med de anvendte parametre kan modellen kalibreres.

7.2 Kalibrering af 1D-Vandkvalitetsmodel

For at kalibrere modellen er det valgt at foretage en visuel vurdering af, hvornår kurven følger de målte værdier. Det er forsøgt at få kurven til at følge året 2005, med amplituden af målingerne, og hvornår på året der forekommer høje og lave koncentrationer af de forskellige næringsstoffer. I modellen er der ændret på de tre vægtningsfaktorer, samt cosinusbølgens middelværdi, amplitude og faseforskydningskoefficient for både nitrogen og fosfor, opstillet i tabel 7.1.

| Næringsstof | κ_1 | κ_2 | κ_3 |
|-------------|------------|------------|------------|
| Nitrogen | 1,0 | 2,5 | 0,010 |
| Fosfor | 1,0 | 5,0 | 0,001 |

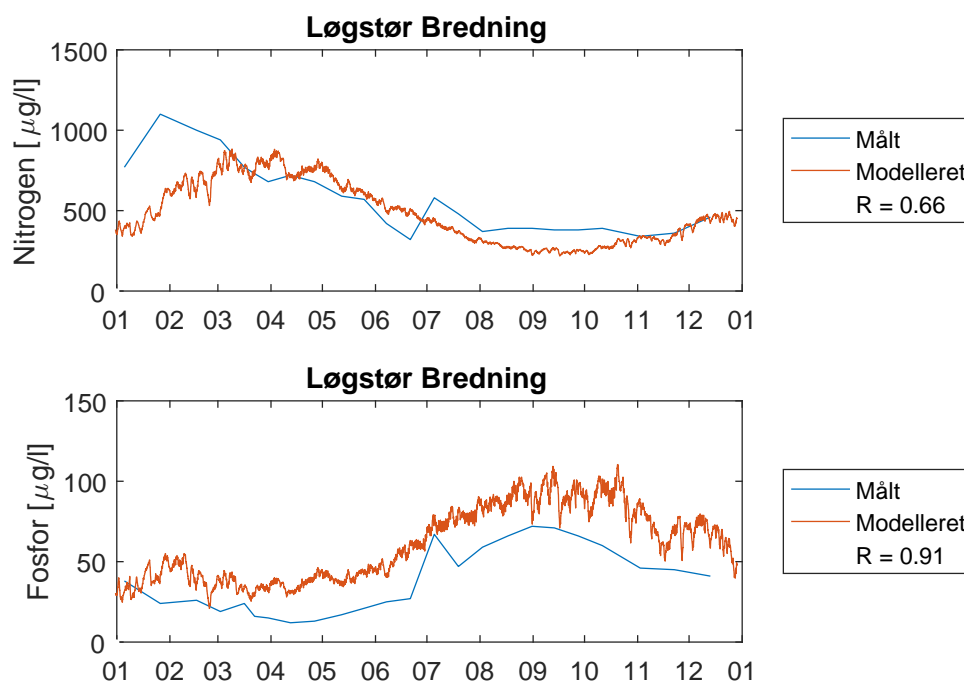
Tabel 7.1. Vægtfaktorer for vandkvalitetsmodellen

I tabel 7.1 kan det ses, at den eneste vægtningsfaktor, der er sat til én, er vægtningsfaktoren for modellens resultat i det foregående tidsskridt. Ud over vægtningsfaktorerne er cosinusledet indstillet med konstanterne opstillet i tabel 7.2.

| Næringsstof | χ | β | φ |
|-------------|--------|---------|-----------|
| Nitrogen | 0,4 | 0,4 | 7,5 mdr |
| Fosfor | 2,0 | 1 | 3 mdr |

Tabel 7.2. Konstanter for cosinusled

Det kan ses i tabel 7.2, at nitrogenforbruget er størst om sommeren, mens forbruget af fosfor er størst om foråret. Indsættes disse konstanter i modellen, opnås et resultat, der er vist i figur 7.7, hvor de er sammenlignet med de målte værdier for hhv. nitrogen og fosfor. Plottes de to dataserier op imod hinanden, fås en tendenslinje, mellem målte og simulerede vandstande, med hældninger for nitrogen og fosfor på hhv. 0,82 og 1,45 for Løgstør Bredning. Modellen er kalibreret visuelt for middelværdien, og sammenlignet med en korrelationskoefficient, for at se, om variationen forekommer på de rigtige tidspunkter i modellen.

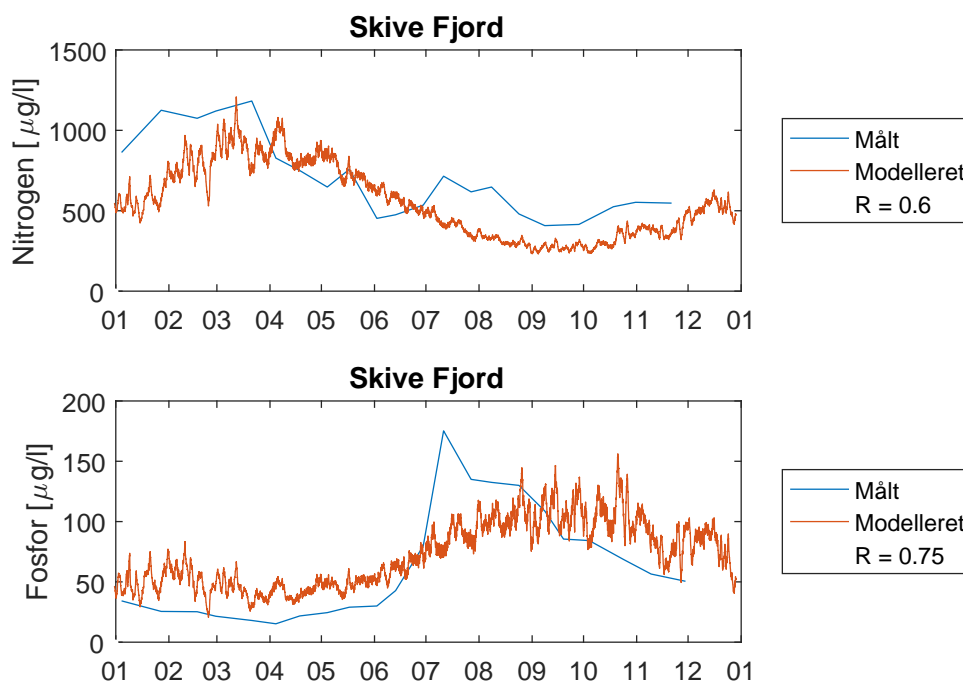


Figur 7.6. Kalibreret vandkvalitetsmodel for Løgstør Bredning, for året 2005

Det kan på figur 7.6 ses, at modellen gengiver variationen i Løgstør Bredning, og følger middelværdien. Denne model synes at kunne gengive årsvariationen af nitrogen og fosfor for Løgstør Bredning. Herefter er det valgt at validere modellen.

7.3 Validering af 1D-Vandkvalitetsmodellen

For at se om modellen virker i andre områder end kalibreringsområdet, er det valgt at foretage en validering af modellen for Skive Fjord med de samme konstanter, som blev fundet i kalibreringen. De modellerede koncentrationer af næringsstofferne er illustreret på figur 7.7. Opstilles en tendenslinje mellem målte og simulerede vandstande for Skive Fjord, opnås hældninger for nitrogen og fosfor på hhv. 0,76 og 0,90.



Figur 7.7. Valideret vandkvalitetsmodel for Skive Fjord

Det kan ud fra figur 7.7 ses, at modellen gengiver nitrogenkoncentrationen med en korrelation, der er 0,60, hvilket sammenholdt med hældningen på 0,76 gør, at det antages, at modellen kan gengive nitrogenkoncentrationerne i Limfjorden. Det samme kan ses for fosforet, da denne ligeledes følger den målte koncentration.

Hældningen for tendenslinjen i Skive Fjord for fosforkoncentrationerne er den, der er tættest på én med en værdi på 0,90, hvilket gør, at det antages, at denne model er i stand til at gengive udsvinget i fosforkoncentrationen i Limfjorden. Udover at dette passer, er det valgt at forsætte med reduktioner af nitrogen, idet denne er det eneste næringsstof, der er omtalt i [Naturstyrelsen, 2013], hvori det er konkluderet, at der mangler data for deponeret fosfor i sedimentet, som kan frigives. Resultatet af en simulering uden ændringer er vedlagt i bilag E 7.1.

7.4 Løsningsforslag til vandkvalitet

For at løse problemerne med vandkvaliteten er det i Vandplan 1.2 vedtaget at nedsætte udledningen af næringsstoffer opstillet i tabel 7.3. Dog er det i Vandplan 1.2 fundet, at den nuværende viden om eksisterende fosfor i systemet er utilstrækkelig til at fastsætte en nødvendig reduktion. Det er dog efterstræbt at forsætte det nuværende fald af fosfor således, at fosfor stadig bliver videre begrænsende for udviklingen af alger i systemet.

| Fjord | Nitrogen | Fosfor |
|---------------------|-------------------------|--------|
| Hjarbæk Fjord | 263 t år ⁻¹ | - |
| Indre Fjord | 320 t år ⁻¹ | - |
| Resterende Limfjord | 1328 t år ⁻¹ | - |

Tabel 7.3. Planlagt nedsættelse af udledning af næringsstoffer til Limfjorden i Vandplan 1.2.

I tabel 7.3 kan det ses, at de forskellige områder skal reduceres med flere hundrede tons kvælstof. Det er i Vandplan 1.2 fundet, at den største kilde til udledningen af kvælstof er landbruget i alle tre områder. Det er dog fundet, at mængden af udledte næringsstoffer for den vestlige del af Limfjorden, ikke er gengivet med vandløbene fundet til modellen illustreret i figur 7.5 på side 93. Derfor er det valgt at anvende fiktive reduktioner i stedet for de forslåede, for at undersøge effekten af en reduktion.

En anden løsning kunne være at mindske opholdstiden af næringsstofferne i Limfjorden således, at næringsstofferne ikke når at blive optaget i floraen men bliver ført ud i havene omkring Limfjorden. Dog er mængden af næringsstoffer i sedimentet stadig ukendt. Denne løsning er mulig ved indførsel af en gennemstrømningsssluse, da denne ville kunne ensrette hovedstrømmen igennem Limfjorden. Dette vil dog ikke nødvendigvis resultere i en større udveksling i den indre Limfjord.

Det er valgt at opbygge en model, der udelukkende regner på koncentrationerne af nitrogen, for at kunne sammenligne outputtet med Vandplanens krav. Herudover kan der tages brug af den empiriske funktion, der tilnærmelsesvis beskriver korrelation mellem den totale nitrogen og ålegræsdybden. Denne funktion kan derved omformulere mængden af nitrogen direkte til en ålegræsdybde, som kan relatere sig til EQR og derigennem til vandkvalitet.

7.5 Implementering af Løsningsforslag

Det er valgt at opdele løsningsforslagene i to hovedgrupper, hvor den ene er reducere af næringsstofudledning i de kendte punktkilder, svarende til de reduktioner, som er foreslået i vandplan 1.2 Naturstyrelsen [2013]. Den anden gruppe er, hvor det undersøges, hvilken effekt opførelsen af løsningsforslagene til reduktion af ekstremvandstanden vil have på vandkvaliteten.

Der er i vandplan 1.2 opstillet direkte krav til udledningen, men idet at modellen ikke indeholder alle udledninger af næringsstoffer, er det valgt ikke at følge disse værdier. Det er derfor valgt at undersøge, hvilken effekt det vil have for vandkvaliteten, hvis udledningen reduceres med en fast procentdel. Dette betyder også, at der ikke udelukkende fokuseres på landbruget, som gøder mest om foråret, men også på den generelle udledning fra eksempelvis rensningsanlæg. Det er valgt at opstille tre scenarier, hvor næringsstofudledningen begrænses med hhv. 10%, 25 % og 50 %. Dette er gjort ved at reducere udledningen, inden modellen starter, ved at foretage en reduktion til alle målinger i alle tidsskridt af dataene.

Den anden metode anvendt er opstilling af bygværker i Thyborøn Kanal, hvor både høfdeløsningen og sluseløsningen er modelleret. Det er her valgt at foretage flere forskellige modelleringer af slusen alt efter, hvornår den lukkes. Det første scenarie, der er kørt, er hvor modellen sætter vandføringen i Thyborøn Kanal til 0, ved vandstande over 1 m, fundet i vandstandsmodellen. Denne løsning er den eneste af sluseløsningerne, der ikke forsøger at skabe en ensretning af strømmingen og er derfor navngivet ”*Sluse ved højvand*”. Ved undersøgelse af tidsserien med vandstande for Nordsøen ved Thyborøn findes det at slusen vil være lukket i ca. 1,5 % af tiden, dog er den medtaget, da indsnævringen af kanalen potentielt kan ændre vandkvaliteten. Derudover anvendes de samme løsningsforslag som ved vandstandsmodellering, for at kunne sammenligne de forskellige scenarier.

De to andre scenarier, som simuleres med slusen, er begge med ensretninger af strømmingen. Det andet scenarie, som simuleres med en sluse, er hvor slusen lukkes ved vandstanden i Nordsøen på over 1 m, og når vandstanden i Nordsøen er mindre end vandstanden i Nissum Bredning. Dette betyder, at slusen nu styres af de to kriterier, som begge er styret af vandstande, hvorfor dette scenarie er navngivet ”*Sluse ved vandstand*”.

Det sidste scenarie, som simuleres med en sluseløsning, lukker stadig ved ekstremvandstande, men lukkes også, når vandføringen i Thyborøn Kanal går fra Nissum Bredning til Nordsøen, hvorved der udelukkende kommer vand ind i Limfjordens vesttlige ende ved Thyborøn Kanal. Dette scenarie er navngivet til ”*Sluse ved vandføring*”.

Løsningsforslagene, der er opstillet i Vandplan 1.2, omhandler en sænkning af næringsstoffer i forhold til de nuværende udledninger, hvilket forventes at give en større ålegræsdybde, da dens forhold forventes forbedret i forhold til både lys og ilt. Udover denne løsning, vil også løsningsforslagene fra vandstandsmodelleringen blive simuleret, hvor det forventes, at vandkvaliteten ved indsnævringen af Thyborøn Kanal forringes, da mængden af vand,

der kommer igennem systemet, nedsættes ved en indsnævring. For at modvirke denne begrænsning af vandføringen, forventes det, at en gennemstrømningssluse kan ensrette vandføringen, som vil give en nettostrøm igennem Limfjorden. Hvis denne nettostrøm er tilstrækkelig stor kan vandkvaliteten forbedres. Ydermere kan en konstruktion hæmme udvekslingen af både salt og næringsstoffer imellem fjorden og havet, hvorved det kan forringe vandkvaliteten i fjorden. Dog er det vurderet, at disse løsninger vil være styret af mængden af vand, der kan komme igennem fjorden, og derved mængden af havvand, som kommer igennem Thyborøn Kanal.

7.6 Resultat af 1D-vandkvalitetsmodel

Da det under valideringen kan ses, at modellen ikke kan simulere koncentrationen af fosfor, er det valgt udelukkende at fokusere på resultatet af nitrogen. Ydermere er dette også valgt da der ikke forligger en reduktion i vandplanen 1.2. Endvidere er det valgt at sammenligne med de to områder, hvor der er fundet målinger for, til at vurdere resultaterne af modellen.

Den første løsning er en reduktion af næringsstofudledningen, som er foreslået i vandplan 1.2 [Naturstyrelsen, 2013]. Dog er det valgt at foretage teoretiske ændringer af koncentrationen, idet at inputtet til modellen ikke indeholder den korrekte mængde næringsstof. Det er valgt at simulere tre scenarier foruden standardscenariet, hvor der ikke er foretaget nogen ændring af tilførslen af næringsstoffer. De tre scenarier er med reduktioner på hhv. 10% 25% og 50%, og resultaterne herfra er illustreret på figur 7.8.

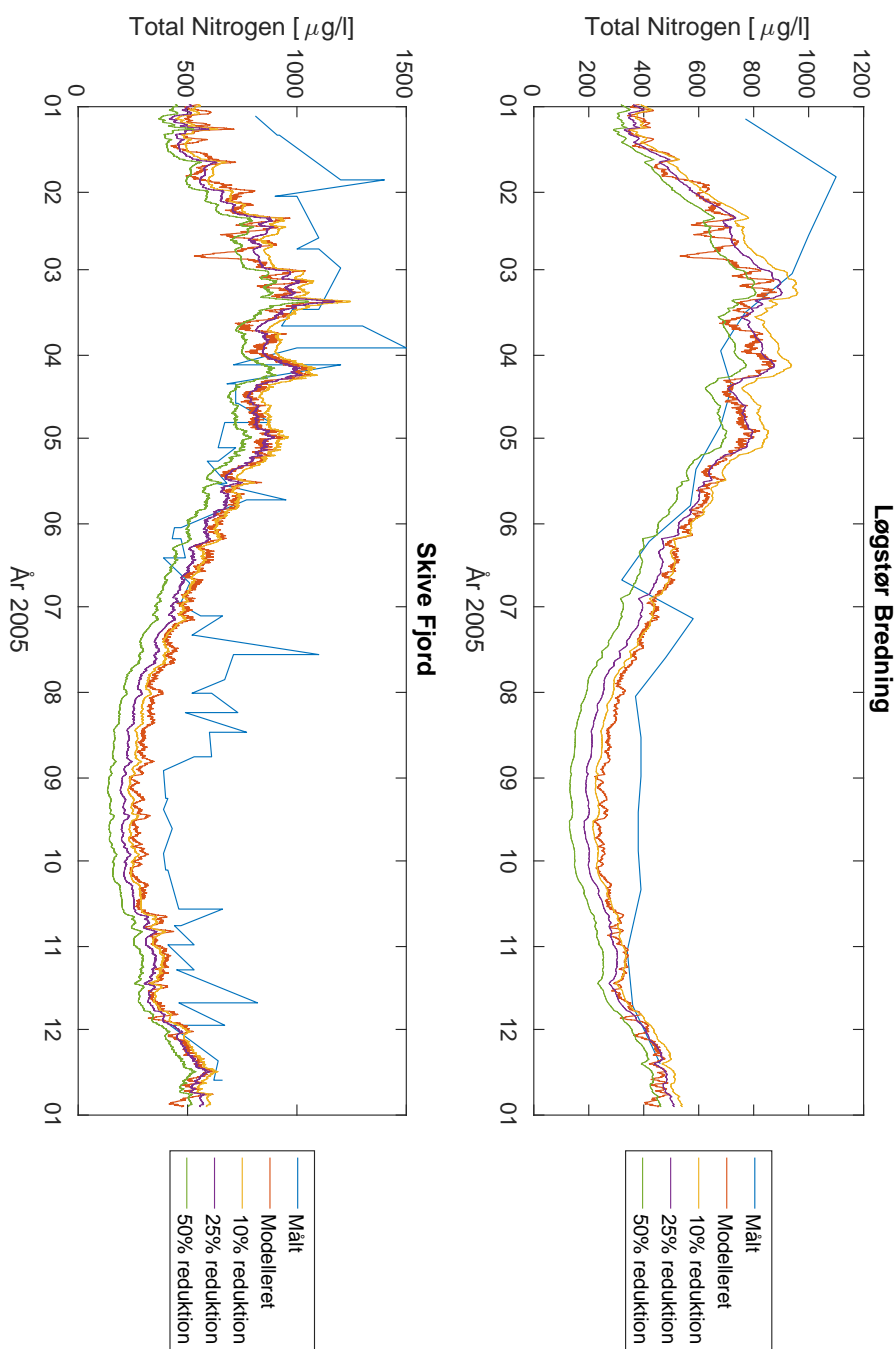
Det kan ud fra figur 7.8 ses, at det vil forekomme en svag reduktion af koncentrationen af nitrogen, i både Løgstør Bredning og Skive Fjord. Trods denne reduktion synes resultaterne at have den samme tendens, og løsningen synes ikke at sænke koncentrationen betydeligt.

Ud over denne reduktion er det også undersøgt, hvilken indflydelse de to løsningsforslag fra vandstandsmodellen ville have på miljøet i Limfjorden, baseret på koncentrationen af nitrogen. Den første model, der er kørt, er med forlængelse af hofde 63, og er illustreret på figur 7.9.

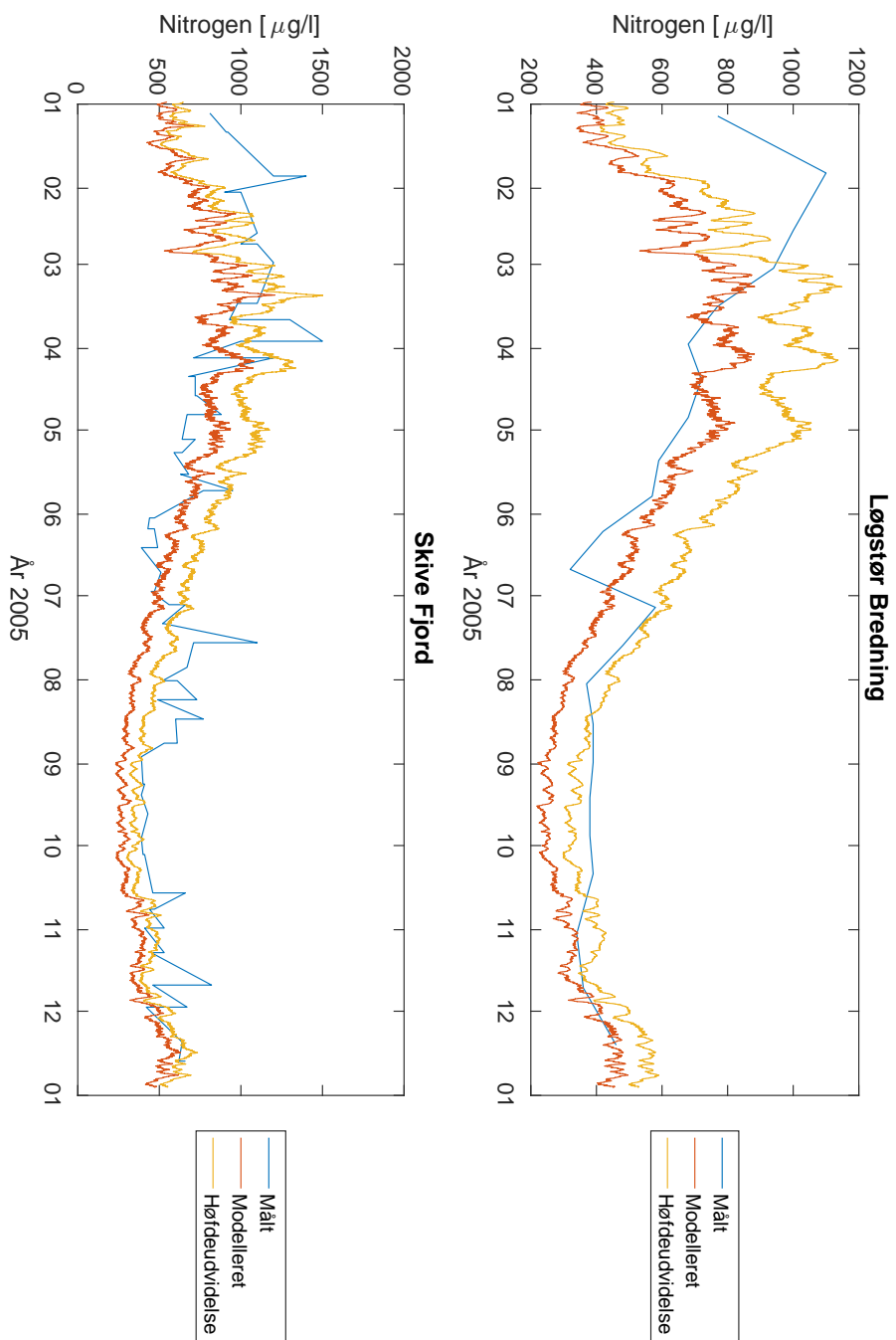
På figur 7.9 kan det ses, at opførslen af hofden vil forringe vandkvaliteten i Limfjorden. Dette er fordi, den vil mindske de naturlige vandføringer i systemet, men ikke vil forhindre vandet i at fluktuere frem og tilbage i Limfjorden, og dermed give en langsommere fortynding af det næringsrige fjordvand.

Indføres en dæmning med gennemstrømningssluse, kan denne anvendes til at ensrette vandføringen i Limfjorden, således at de naturlige fluktuationer begrænses. Derfor er det valgt at køre tre scenarier for modellen opdelt i "*Sluse ved højvand*", "*Sluse ved vandstande*" og "*Sluse ved vandføring*". Resultaterne af disse tre scenarier sammenholdt med modellen uden løsninger og de målte data er illustreret på figur 7.10.

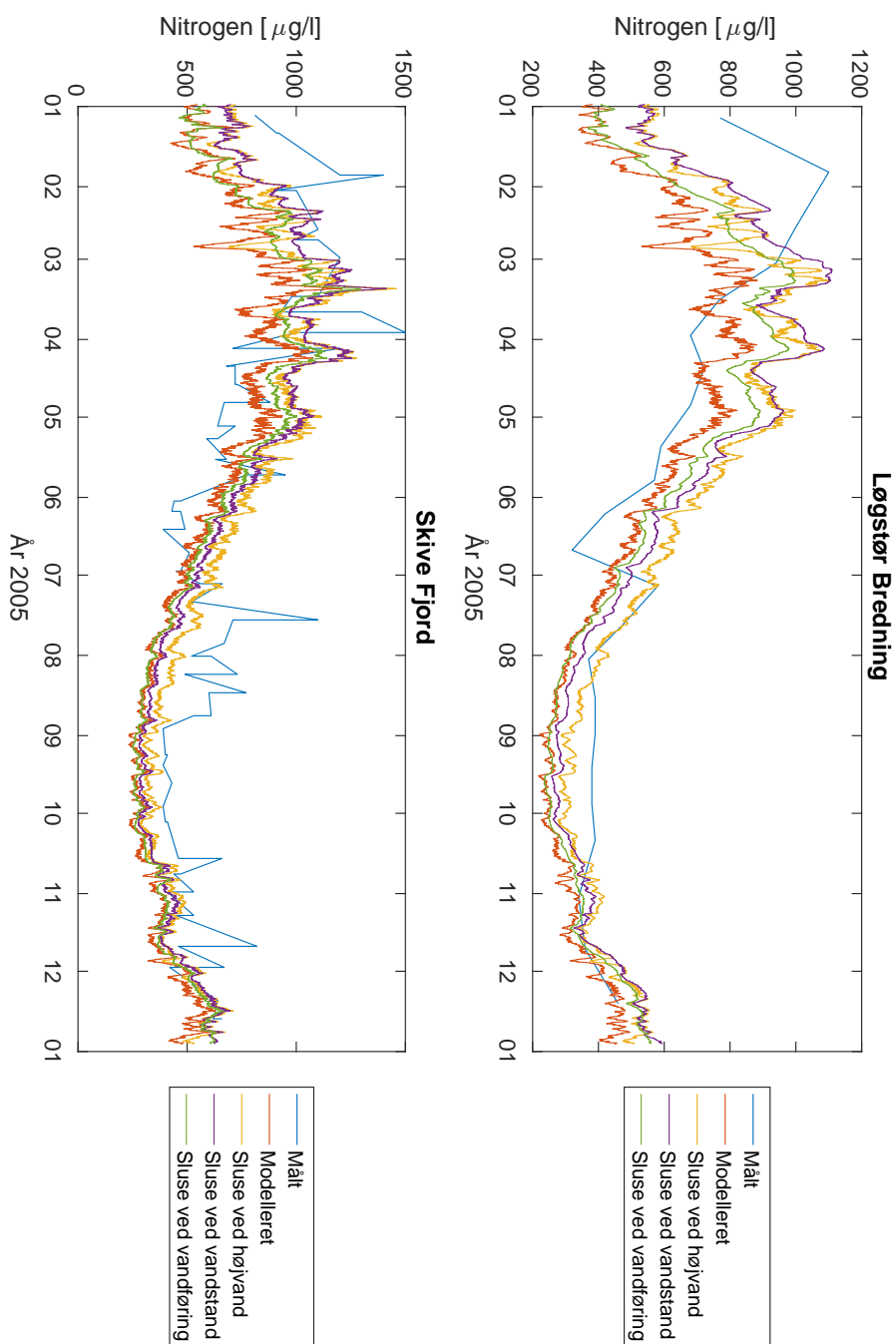
Det kan ud fra figur 7.10 ses, at alle løsningerne vil forringe den nuværende vandkvalitet.



Figur 7.8. Resultater af vandkvalitetsmodellen med reducerede tilførsel af næringsstoffer, ved hhv. 10%, 25% og 50%.



Figur 7.9. Resultater af vandkvalitetsmodellen med forlængelse af hofde 63.



Figur 7.10. Resultater af vandkvalitetsmodellen med indførelse af en dæmning med gennemstrømningssluse.

Endvidere kan det ses, at alle resultaterne følger de samme variationer, og at disse ikke synes påvirket af slusen.

Ålegræsdybderne som er blevet beregnet ved formel 7.4 for de enkelte bokse er præsenteret i tabel 7.4.

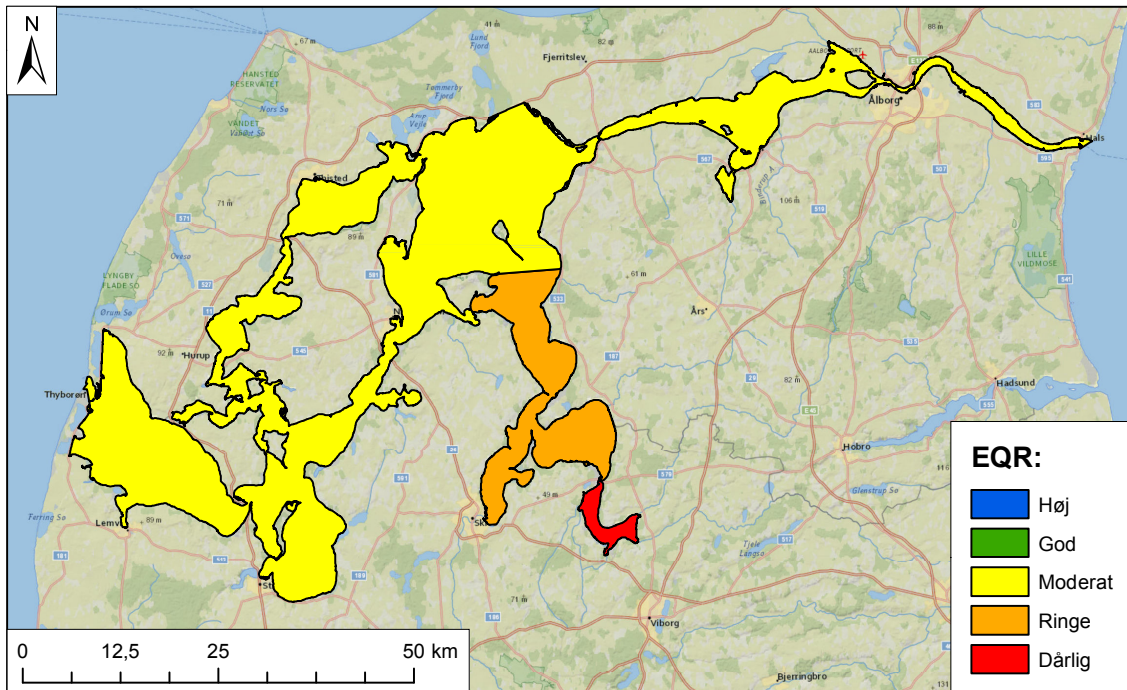
| Boks | Målt | Reference | Sluse 1 | Sluse 2 | Sluse 3 | 10 % | 25 % | 50 % |
|------|------|-----------|---------|---------|---------|-------|-------|-------|
| 2 | 2,10 | 17,08 | 15,70 | 22,81 | 22,81 | 17,99 | 19,59 | 23,16 |
| 3 | 2,10 | 9,44 | 8,62 | 14,62 | 14,62 | 9,94 | 10,81 | 12,75 |
| 4 | 2,10 | 6,23 | 5,50 | 8,33 | 8,33 | 6,56 | 7,15 | 8,45 |
| 5 | 2,10 | 4,22 | 3,52 | 3,86 | 3,86 | 4,44 | 4,85 | 5,75 |
| 6 | 2,10 | 3,85 | 3,25 | 3,63 | 3,63 | 4,07 | 4,46 | 5,34 |
| 7 | 2,10 | 3,90 | 3,35 | 3,52 | 3,52 | 4,13 | 4,54 | 5,48 |
| 8 | 2,10 | 4,55 | 4,01 | 3,92 | 3,92 | 4,83 | 5,34 | 6,53 |
| 10 | 1,60 | 3,99 | 3,36 | 3,68 | 3,68 | 4,20 | 4,58 | 5,41 |
| 11 | 1,60 | 3,88 | 3,29 | 3,60 | 3,60 | 4,09 | 4,45 | 5,25 |
| 12 | 1,60 | 3,44 | 2,95 | 3,21 | 3,21 | 3,62 | 3,94 | 4,66 |
| 13 | 2,10 | 5,48 | 4,93 | 7,07 | 7,07 | 5,78 | 6,29 | 7,46 |
| 14 | 2,10 | 4,53 | 4,10 | 5,51 | 5,51 | 4,76 | 5,18 | 6,09 |
| 15 | 2,10 | 3,49 | 3,12 | 3,86 | 3,86 | 3,67 | 3,97 | 4,64 |

Tabel 7.4. Målte og beregnede ålegræsdybder ved de forskellige løsningsscenarier.

Det findes, at den pågældende korrelationsfunktionens gyldighedsområde ligger mellem $200 \mu\text{g l}^{-1}$ og $3000 \mu\text{g l}^{-1}$ hvilket svarer til en ålegræsdybde mellem 10,69 m og 0,57 m. Carstensen and Krause-Jensen [2009] Herved kan boksene; 2(Nissum Bredning), 3(Venø Bugt), 4(Kås Bredning) og 13(Nees Sund) ikke anvendes til at bestemme ålegræsdybden.

Det ses i tabel 7.4, at modellen overvurderer ålegræsdybden uden tilføjelse af løsningsforslag, og det antages derfor, at dybderne ved implementering af løsningsforslagene også er overvurderede.

Korrigeres de fundne ålegræsdybder med forholdet mellem de målte og beregnede uden en løsning, findes nogle mere plausible dybder. Anvendes dette på resultatet, der gav det bedste udfald, (*Reducering af udledningen med 50%*), fås det, at dybderne nu varierer imellem 3,80 m og 2,63 m. Udregnes dette til EQR, kan den opstilles som figur 7.11.



Figur 7.11. EQR for Limfjorden ved ændring af udledningen med 50 %.

Det kan ses på figur 7.11 at den største del af Limfjorden nu opnår en tilstand svarende til en moderat økologisk tilstand, altså er målet for vandmiljøet ikke opfyldt. Grunden til at den målte ålegræsdybde er lavere end den simulerede, kan være at der er andre parametre som påvirker ålegræsdybden, så som sedimenttyper, lysintensitet, temperatur og algerkoncentration. Det er derfor valgt at lave en analyse af sedimentet i Limfjorden.

7.7 Sedimentanalyse

Sedimentet i Limfjorden undersøges, da ålegræsset er afhængig af et vandområdes bundforhold. Bunden skal helst have tilstrækkelig fint sediment til, at ålegræsset kan gro der. Ved grovere sediment har ålegræs svært ved at slå rødder, hvilket hovedsageligt skyldes, at det finere sediment er skyllet væk af en høj vandhastighed. Bund sedimentet må ligeledes ikke have et for stort organisk indhold, som det for eksempelvis er tilfældet i dynd. Dette skyldes, at der i dynd opbruges ilt til nedbrydning af organisk materiale, som ålegræsset ellers skulle bruge til at overleve. Det forventes derfor, at ålegræsset har den største udbredelse i områder med sandbund. Formålet med dette afsnit er at undersøge, om en implementering af de udvalgte løsningsforslag vil ændre på bundforholdene, således, at dette resulterer i afgang af dybdeudbredelse af ålegræsset sammenlignet med de nuværende forhold. Det forventes at sedimentet i størstedelen af Limfjorden er styret af vandføringen igennem systemet, og har konsekvenser for både transport af næringsstoffer bundet i sedimentet og for kysttilbagerykning, samt ålegræssets dybdeudbredelse. De nuværende sedimentforhold er illustreret i figur 7.12.

| Sediment type | Sediment diameter [mm] | Forskydningsspænding [N m ⁻²] |
|------------------|---------------------------|--|
| Grove blokke | 128 - 256 | 112 - 223 |
| Fine blokke | 64 - 128 | 53,8 - 112 |
| Meget grovt grus | 32 - 64 | 25,9 - 53,8 |
| Grovt grus | 16 - 32 | 12,2 - 25,9 |
| Medium grus | 8 - 16 | 5,7 - 12,2 |
| Fint grus | 4 - 8 | 2,7 - 5,7 |
| Meget fint grus | 2 - 4 | 1,3 - 2,7 |
| Meget grovt sand | 1 - 2 | 0,47 - 1,3 |
| Grovt sand | 0,5 - 1 | 0,27 - 0,47 |
| Medium sand | 0,25 - 0,5 | 0,194 - 0,27 |
| Fint sand | 0,125 - 0,25 | 0,145 - 0,194 |
| Meget fint sand | 0,0625 - 0,125 | 0,110 - 0,145 |
| Grovt silt | 0,0310 - 0,0625 | 0,0826 - 0,110 |
| Medium silt | 0,0156 - 0,0310 | 0,0630 - 0,0826 |
| Fint silt | 0,0078 - 0,0156 | 0,0378 - 0,0630 |

Tabel 7.5. Forskydningsspændinger krævet til at flytte forskellige sedimenttyper USGS.gov [2013]

I tabel 7.5 kan det ses, at forskydningsspændingen, der er krævet til at erodere sedimentet, skal være højere, des større sedimentet er. Det forventes dog, at der i Limfjorden ikke forekommer erosion af partikler større end sandfraktionen. Forskydningsspænding ved bunden er beregnet ved formel 7.5 Brorsen and Larsen [2009].

$$\tau_{0(t,i)} = \gamma \cdot R_{(t,i)} \cdot I_{(t,i)} \quad (7.5)$$

Hvor:

| | | |
|----------|-------------------------------|----------------------|
| τ_0 | er bundforskydningsspændingen | [N m ⁻²] |
| γ | er den specifikke tyngde | [N m ⁻³] |
| R | er den hydrauliske radius | [m] |
| I | er energigradienten af boksen | [-] |

For at bestemme energigradienten i boksen, er det valgt at udregne vandføringen, der forekommer igennem boksen, ud fra middelværdien af vandføringen fra kanalerne til de enkelte bokse. Derudover er tværsnitsarealet og den hydrauliske radius bestemt ud fra dybden og bredden af boksene, mens Manningtallet er fastholdt som ved vandstandsmodellen. Energigradienten er fundet ud fra formel 7.6.

$$I = \left(\frac{Q_{(t,i)}}{M \cdot A_{(t,i)} \cdot R_{(t,i)}^{2/3}} \right)^2 \quad (7.6)$$

Hvor:

| | | |
|-----|--|----------------------------------|
| Q | er vandføringen i boksen, midlet af de forbundne kanaler | $[\text{m}^3 \text{s}^{-1}]$ |
| M | er Manningtallet for boksen | $[\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}]$ |
| I | er energigradienten af boksen | $[-]$ |
| R | er den hydrauliske radius | $[\text{m}]$ |

Formel 7.6 er udledt af Manningformlen, hvor energien bliver udregnet for hver boks til hvert tidsskridt. Anvendes den maksimale forskydningsspænding fås sedimentet for hver boks til at være som opstillet i tabel 7.6.

| Boks nr | Sediment |
|---------|------------------|
| Boks 1 | - |
| Boks 2 | Fint sand |
| Boks 3 | <Fint silt |
| Boks 4 | Meget fint sand |
| Boks 5 | <Fint silt |
| Boks 6 | Meget fint grus |
| Boks 7 | Meget grovt sand |
| Boks 8 | Meget fint grus |
| Boks 9 | - |
| Boks 10 | <Fint silt |
| Boks 11 | Fint sand |
| Boks 12 | <Fint silt |
| Boks 13 | Medium sand |
| Boks 14 | Meget fint sand |
| Boks 15 | <Fint silt |

Tabel 7.6. Sediment for de maksimale forskydningsspændinger.

Dog synes dette ikke at være tilfældet i Limfjorden idet, at dette kun er tilfældet under stormfloden, da erosionen herved vil blive overestimeret. Det er derfor valgt at finde 95 % konfidensintervallet for forskydningsspændinger og finde sedimenten ved dette. For at bestemme konfidensintervallet er det nødvendigt at bestemme fordelingen af forskydningsspændingerne. Dette er gjort i bilag A. 9, hvor det er fundet frem til en eksponentialfordeling og normal fordeling. Derfor kan den kumulerede frekvens for forskydningsspændingerne findes ved formel 7.7 og formel 7.8.

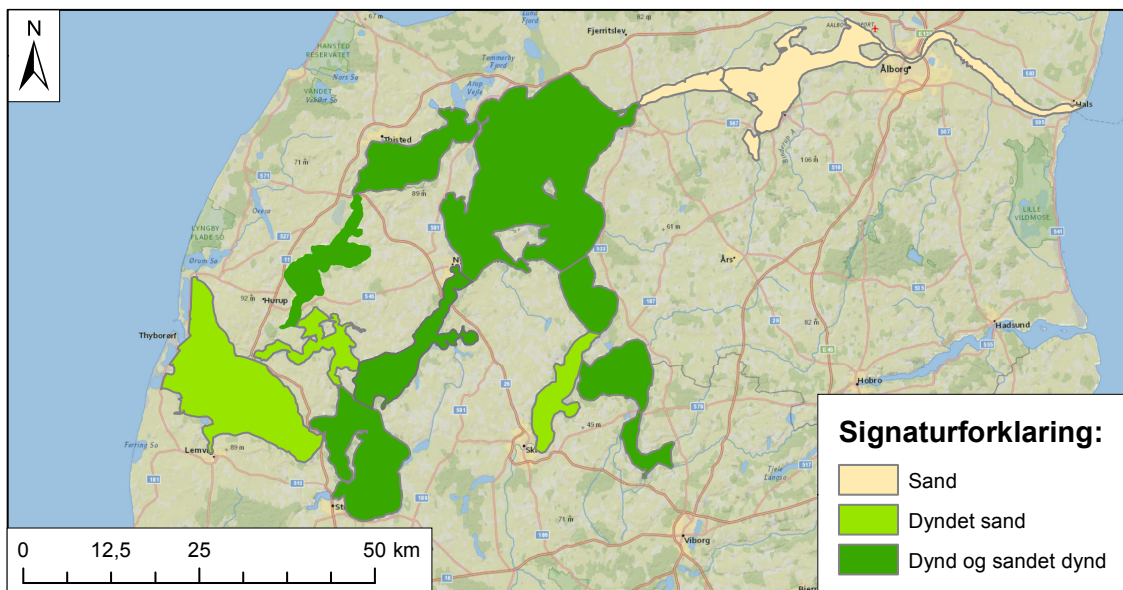
$$F_T(\tau) = 1 - e^{(-\lambda \cdot \tau)} \quad (7.7)$$

$$F_T(\tau) = \frac{\sigma \cdot \sqrt{\frac{1}{\sigma^2}} \cdot \left(\operatorname{erf} \left(\mu \cdot \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \sigma^2}} \right) - \operatorname{erf} \left(\mu \cdot \sqrt{\frac{1}{\sigma^2}} - \tau \cdot \sqrt{\frac{1}{\sigma^2}} \right) \right)}{2} \quad (7.8)$$

Hvor:

| | | |
|-----------|---|-----|
| F | er den kumuleret frekvens | [-] |
| λ | er fordelingskonstanten $\lambda = \frac{1}{\mu}$ | [-] |
| σ | er spredningen | [-] |
| μ | er middelværdien | [-] |

Forskydningsspændingerne skal i dette tilfælde være sorteret med de mindste værdier først. Ud fra dette kan det ses, at der i 95 % af tiden er forskydningsspændinger, der kan erodere bunden som vist i figur 7.13 eller mindre. I figuren er det antaget, at silt er det samme som dynd, samt at dynd og sandet dynd er beliggende de steder, hvor forskydningsspændingen er mindre end den mindste kritiske.



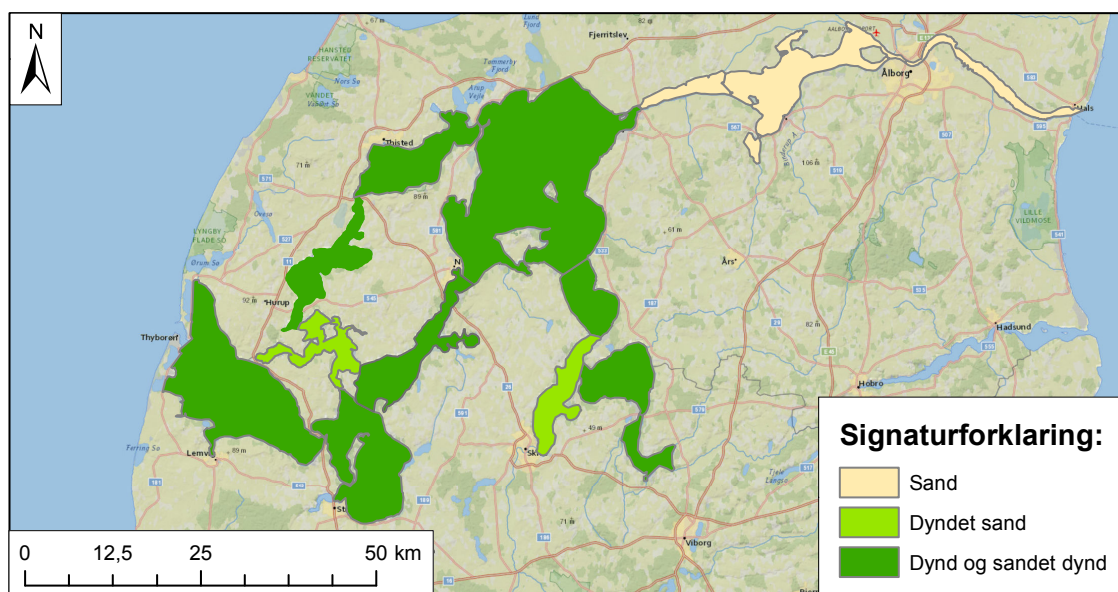
Figur 7.13. Udregnet sedimenttyper for de enkelte bokse under ændring i Thyborøn Kanal

På figur 7.13 kan det ses, at det meste af Limfjorden, er udsat for en forskydningsspænding der er mindre end den forskydningsspænding der vil bevæge det mindste sediment. Det er antaget, at disse områder har dynd og sandet dynd. Endvidere kan det ses, at der er sand, fra Løgstør by og hele vejen ud til Hals, dog er sandet i Nibe Bredning klassificeret som "Meget fint sand", mens de omkringliggende bokse blot har "Fint sand".

Det kan desuden ses, at modellen gengiver sedimenttyper tilsvarende til de målte sedimenttyper illustreret på figur 7.12, hvorfor det er valgt ikke at kalibrere modellen, men køre modellen med højde udvidelsen af højde 63 og dæmning med gennemstrømningsluse.

Resultater

Ændringerne i modellen er givet allerede i ændringerne ved vandstandsmodellen hvor vandstanden og vandføringerne ændres. Disse ændringer anvendes til at udregne de nye forskydningsspændinger, hvoraf der findes 95 % konfidensintervallet som kan sammenlignes. Resultatet af begge simuleringen er illustreret på figur 7.14, idet at begge løsningen gav samme resultat.



Figur 7.14. Længdesnit af Limfjordens boksmodel, hvor den største gennemsnitsdybde er i Oddesund med 14,5 m.

Det kan ses på figur 7.14, at ændringen i sediment fra den nuværende situation er at Nissum Bredning ændres fra "dyndet sand" til "dynd og sandet dynd", Udover denne visuelle ændringen er sandtyperne fra Løgstør og ud af ændret som opstillet i tabel 7.7.

| Boks Nummer | Standard | Højde 59 | Dæmning |
|-------------|-----------------|-----------------|-------------|
| Boks 6 | Fint sand | Meget fint sand | Fint sand |
| Boks 7 | Meget fint sand | Meget fint sand | Fint sand |
| Boks 8 | Fint sand | Fint sand | Medium sand |

Tabel 7.7. Sedimenttyper for boksene imellem Løgstør Bredning og Hals Barre.

Det kan ud fra tabel 7.7 ses at, alle scenarierne er inden for den samme fine fraktion af sandspektret. Ud over dette kan det ved sammenligning med standard modellen ses at der ikke er de store ændringer af bundsedimentet ved implementeringen af løsningsforslagene.

Konklusion af sedimentanalyse

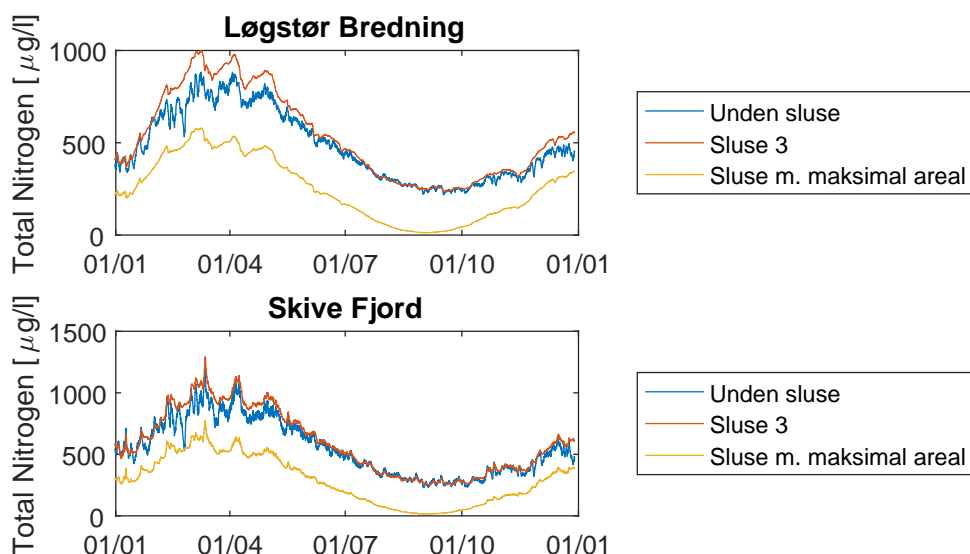
Det er vurderet, at sedimentforholdene ikke ændres betydeligt ved ændringer lavet i Thyborøn Kanal. Modellen der er valgt, er endvidere for grov til præcist at angive, hvor ændringerne vil forekomme lokalt, men overordnet giver modellen de samme sedimenttyper med og uden en konstruktion. Det er herfor antaget, at sedimentforholdene for ålegræs ikke ændres ved en konstruktion, hvorved vandkvaliteten i Limfjorden ikke synes at skulle forringes ud fra denne faktor. Desuden bygger modellen på Shields-teori, hvorfor den ikke er opbygget til sedimenttransport af kohæsive sedimenttyper.

Da bundforholdene ikke ændres, forventes det ikke at være sedimentet, der begrænser dybdeudbredelsen af Ålegræs, men derimod at vandkvalitets modellen, der er anvendt, ikke tilstrækkeligt kan beskrive de fysiske og biologiske processer for nitrogenet.

Da modellen, der er anvendt, har returneret meget små ændringer, er det valgt ikke at anvende en mere kompliceret model til at gengive dette aspekt af vandkvaliteten.

7.8 Konklusion af 1D-vandkvalitetsmodel

De én-dimensionelle modelsimuleringer af nitrogenkoncentrationer har vist, at løsningsforslagene med høfdeforlængelse og styring af gennemstrømningsluse har en negativ effekt på vandkvaliteten i Limfjorden. Det viser sig umiddelbart, at selv med ensretning af strømmen bliver nitrogenkoncentrationerne højere. Gennemstrømningslusens tværsnitsareal er stort, 4440 m^2 , også sammenlignet med de to høfdeudvidelsers gennemstrømningsarealer vist i bilag A. 4. Dette kan skyldes, at modellen er styret for meget af cosinus-leddet, som indgår i variation af koncentrationen, således at det resulterer i højere koncentrationer, selv med en lille vægtningsfaktor. Det kan også skyldes, at arealet af gennemstrømningslusens tværsnitsareal er for småt til at kunne få ensretningen af Limfjordens vandføring til at forbedre vandkvaliteten. Tværsnitsarealet af slusen forøges derfor til at være lige så stort som den nuværende Thyborøn Kanal. Herved bliver gennemstrømningslusens tværsnitsareal fordoblet. Total nitrogen koncentrationerne beregnet ved det nye tværsnitsareal er illustreret på figur 7.15 sammen med koncentrationerne ved gennemstrømningslusens tredje lukningsscenarie.



Figur 7.15. TN-koncentrationer ved en større gennemstrømningsluse.

Det kan ses på figur 7.15, at koncentrationen af total nitrogen er beregnet med den nye større gennemstrømningsluse bliver mindre, end den var før implementeringen af slusen. Dette betyder, at tværsnitsarealet af gennemstrømningslusen er begrænsende for, hvor effektiv ensretningen af Limfjordens nettovandføring er, til at forbedre vandkvaliteten.

Ved reduktion af nitrogentilførslen fra vandløb ses der dog en svag reduktion af nitrogenkoncentrationerne i Løgstør bredning og Skive Fjord. Modellen er kalibreret til at kunne gengive nitrogen-variationen på tilfredsstillende vis inden resultat-simuleringer, dog med en afvigende amplitude på koncentrationer. Det rejser derfor tvivl om, hvorvidt de foreslåede løsninger er til gavn eller skade for vandkvaliteten, da modellen er empirisk og ændringer af geometrien derfor giver usikkerheder i resultatet. Derfor er det er valgt at foretage en konsekvensvurdering af dem vha. en avanceret vandkvalitetsmodel.

8. 3D-vandkvalitetsmodel

Det er fundet i kapitel 7, at den ét-dimensionelle vandkvalitetsmodel er i stand til at gengive de nuværende nitrogenkoncentrationer i Limfjorden, men er uegnet til at vurdere konsekvenserne af indførsel af løsningsforslag. Det er derfor valgt at opbygge en model med en mere avanceret geometri i forhold til den ét-dimensionelle vandkvalitetsmodel, som kan benyttes til konsekvensvurdering. Ud over den mere avancerede geometri anvendes også en deterministisk beregning af nitrogen koncentrationer med MIKE 3 modulet ECO Lab.

Det er forventet af 3D-vandkvalitetsmodellen, at den er bedre til at gengive forholdene i Limfjorden, både nu og ved ændringer, da denne model er mere avanceret, sammenholdt med 1D-vandkvalitetsmodellen. Endvidere bygger denne model på en deterministisk model, som medtager flere parametre, der alle afhænger af den faktiske koncentration i systemet, i modsætning til den empiriske. Modellen forventes at gengive problematikken med lagdelingen, som 1D-vandkvalitetsmodellen er for simpel til at medtage. Da disse er medtaget, forventes det også, at modellen kan simulere forskellige koncentrationer af næringsstoffer ved vandoverfladen og på bunden i dele af fjorden.

8.1 Valg af beregningsgeometri

På baggrund af 2D-vandstandsmodellen udvikles der forsimplede geometrier med grovere inddelinger af Limfjorden i beregningsceller, som har til formål at beregne koncentrationer af nitrogen i 3 dimensioner. Modellen skal beregne vandstanden og derved de konvektive vandføringer som anvendes videre til beregning af vandkvalitet. Der tilføjes flere lag i dybden, således at vandkvaliteten kan beregnes i 3 dimensioner, med forskellige koncentrationer i dybden. Derfor er flere lag nødvendigt for at kunne beskrive de fysiske lagdelinger, som er forårsaget af salinitetsforskelle. Ved at tilføje ekstra beregningslag i modellen ender modellen med at tage længere tid at simulere på grund af de ekstra beregningsceller, hvilket gør det nødvendigt at forsimple geometrien af modellen. Der opstilles forskellige forsimplede geometrier for at finde den simpleste geometri, hvor modellen er operativ. Modellen til beregning af næringsstofkoncentrationer findes ud fra simulering af vandstande da disse er nødvendig for at videre udregne koncentrationerne. Herefter tjekkes det, om den udvalgte model ligeledes kan beregne næringsstofkoncentrationer, og hvis den kan det, kan modellen bruges videre til kalibrering og validering.

De forsimplede geometriers opbygning er gennemgået i det følgende afsnit. Modellerne med forsimplede geometrier opbygges med større maksimalarealer af beregningsfelterne for at reducere antallet af dem. Derudover anvendes rektangulære beregningsceller i de smalle sund og kanaler, da disse både reducerer antallet af beregningsceller og samtidig

er optimerede i forhold til vandføringsretningen og fordelingen af dybderne i fjorden. Modellerne køres med de samme indstillinger og inputs, så det kun er geometrien der ændrer sig, hvilket gør det muligt at sammenligne modellerne direkte.

Det er valgt at opbygge tre simplificerede modeller, hvor det maksimale overfladeareal af de enkelte beregningsceller er varieret. Disse er opstillet for at reducere beregningstiden da tilføjelsen af af ekstra beregningslag tager længere tid at simulere.

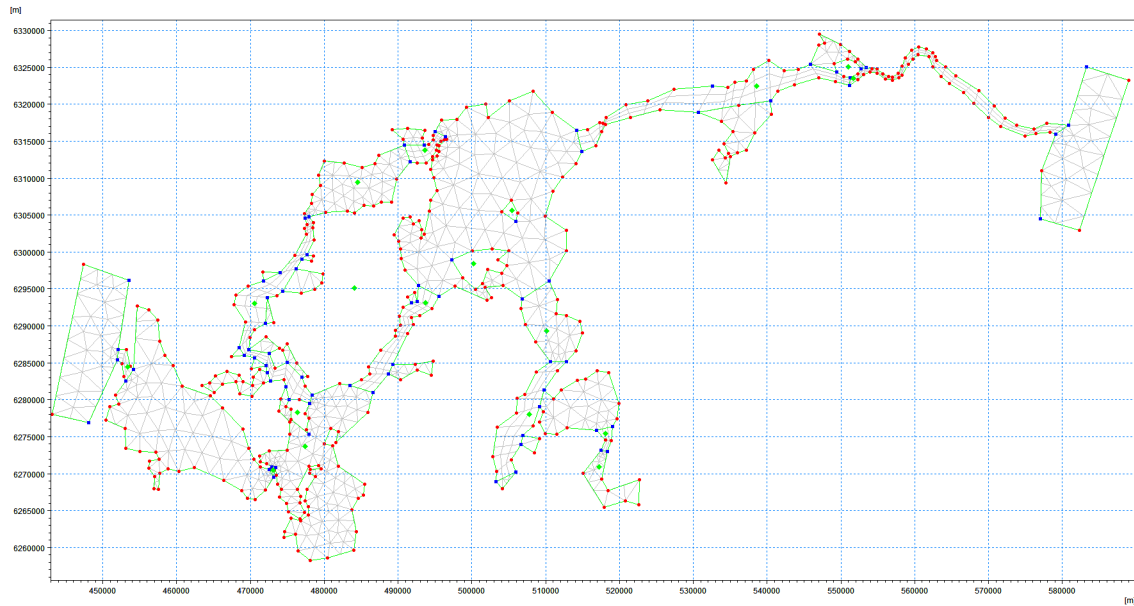
| Model nr. | Maksimalt overfladeareal | Beregnings-felter |
|--------------------------|----------------------------|-------------------|
| Højopløst geometri model | 2 000 000 m ² | 8886 |
| Simplificeret 1 | 5 000 000 m ² | 1295 |
| Simplificeret 2 | 20 000 000 m ² | 403 |
| Simplificeret 3 | 100 000 000 m ² | 145 |

Tabel 8.1. Forskellen på de simplificerede modeller.

Det kan i tabel 8.1 ses at de simplificerede modeller er opstillet således at der forekommer en stor formindelse i antallet af beregningsceller, hvilket også giver mulighed for at anvende større tidsskridt. Dog er der flere forskelle på de simplificerede modeller hvilket er opstillet i de følge afsnit.

Simplificeret model 1

Den første simplificerede model anvender et maksimal areal på 5 000 000 m², hvilket giver mere end dobbelt så store beregningsceller i de store sund som eksempelvis Løgstør Bredning. Dette resulterer i, at der bliver næsten 7 gange færre bokse i denne model, sammenlignet med 2D-vandstandsmodellen, der har 8886 beregningsceller. Ligesom 2D-vandstandsmodellen er der opstillet et kriterie om, at der skal være minimum tre beregningsceller på tværs af fjorden. I modellen er det valgt at manuelt ændre de interpolerede værdier, da de ellers underestimerer dybderne. Det undlades at medtage adskillige mindre øer fra især den østlige del af Limfjorden i denne model for at simplificere geometrien og afgrænsningen imellem land og vand. Geometrien af Limfjorden i den simplificerede model 1 er illustreret på figur 8.1.

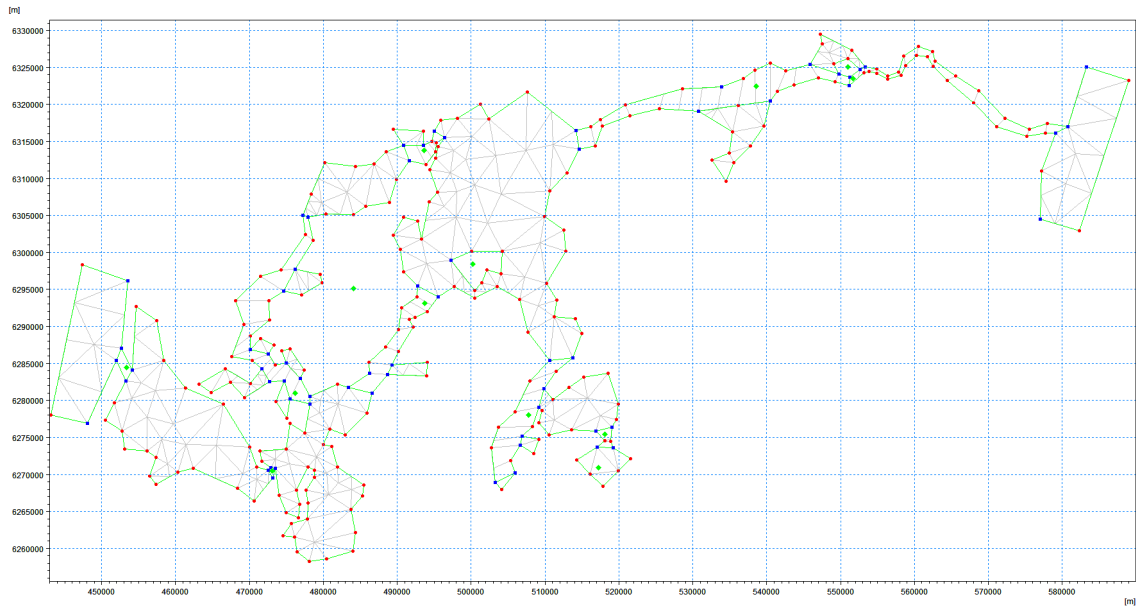


Figur 8.1. Inddelingen af beregningsceller i Simplificeret model 1.

På figur 8.1 kan det ses, at Limfjorden stadig er beskrevet på en måde, hvorved modellen forekommer tæt på de virkelige forhold. Samtidig kan det ses, at de større områder i fjorden har fået færre punkter til at afgrænse beregningsområderne.

Simplificeret model 2

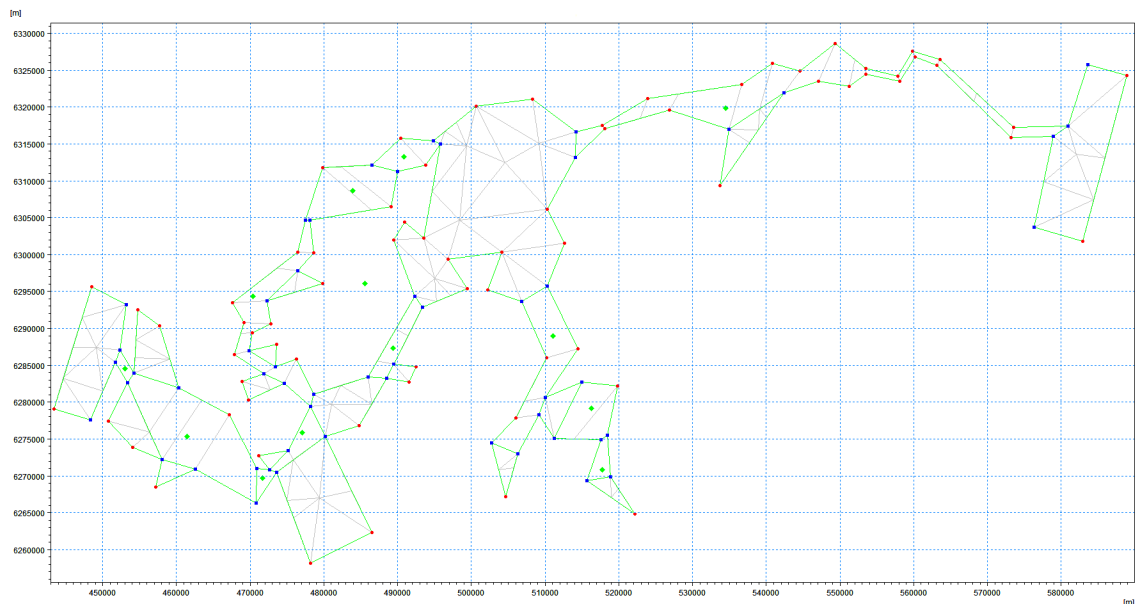
Den anden simplificeret model anvender et maksimalt areal på 20 000 000 m², hvilket resulterer i 403 beregningsceller. I de smalle passager i Limfjorden anvendes der kun ét enkelt beregningscelle i bredden i denne model. Øerne Livø, Agerø og Jegindø er ikke medtaget i denne simplificerede model på grund af den simplificerede geometri, hvilket gør at kun Mors, Fur og Egholm ikke er landfaste i modellen. Limfjordens geometri for den simplificerede model 2 er illustreret på figur 8.2.



Figur 8.2. Inddelingen af beregningsceller i Simplificeret model 2.

Simplificeret model 3

Den sidste simplificeret model anvender et maksimal areal på $100\,000\,000\text{ m}^2$, hvilket resulterer i 145 beregningsceller. Denne model anvender ligesom *Simplificeret model 2* kun én beregningscelle i bredden i de smalle passager i fjorden. På grund af de yderligere simplificeringer i modellens geometri er Mors den eneste ø som ikke er landfast i modellen. Geometrien af Limfjorden i den simplicifere model 3 er illustreret på figur 8.3.

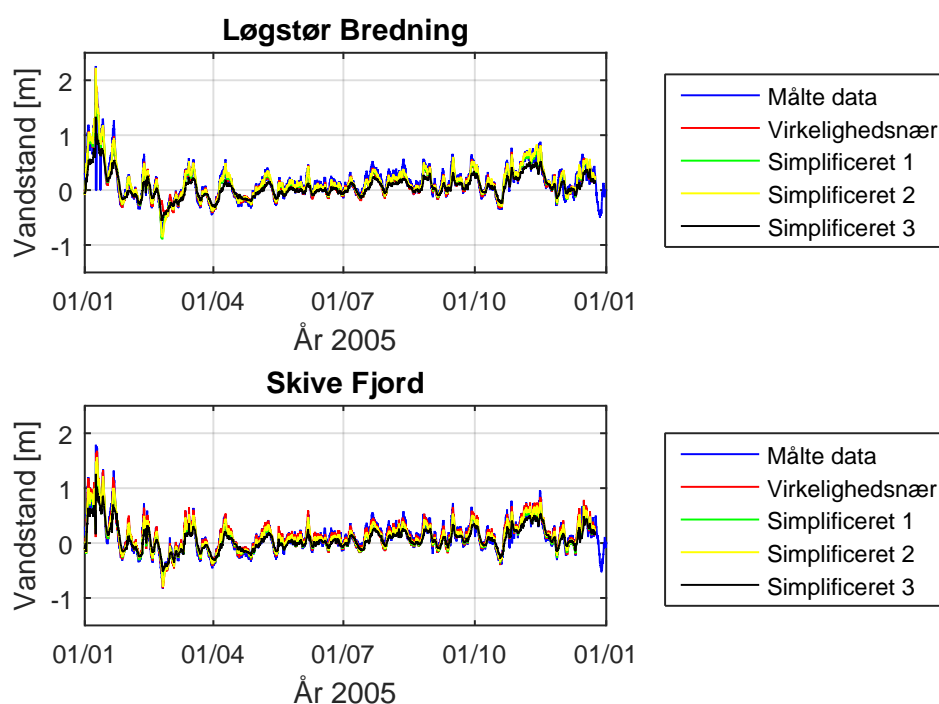


Figur 8.3. Inddelingen af beregningsceller i simplificeret model 3.

På figur 8.3 kan det ses, at denne model er stærkt simplificeret i forhold til de andre modeller. Det kan ses, at der her er meget store afstande imellem de enkelte røde punkter der anvendes til at afgrænse kystlinjen. Det kan også ses, at kystlinjen selv er ændret til at være meget kantet og ikke længere følger den naturlige udformning.

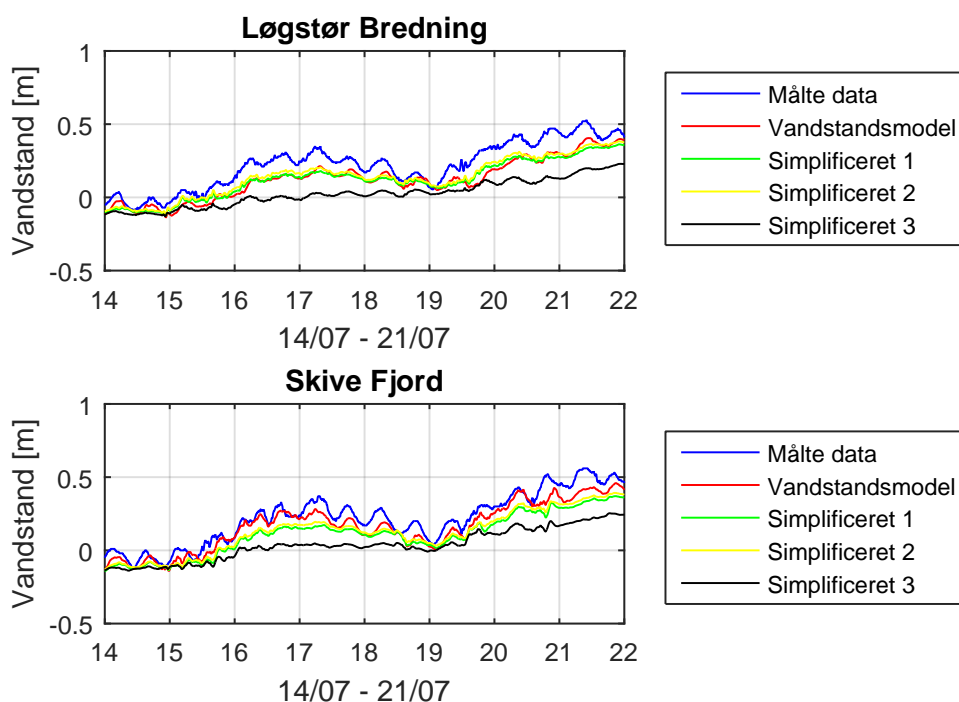
Valg af simplificeret model

Modelresultaterne fra de fire modeller sammenlignes med de målte vandstande på figur 8.4 og figur 8.5 for hhv. Løgstør Bredning og Skive Fjord. Tidsserierne er på figur 8.4 er vist over hele året 2005, hvor modeller har været kørt over en periode på 2 år.



Figur 8.4. Sammenligning af de målte vandstande og de simulerede vandstande fra de fire modeller for Løgstør Bredning og Skive Fjord for år 2005.

Det kan i figur 8.4 ses at alle modellerne ligger tæt og at des mere simple modellen er, des mindre udsving får den. For at se nærmere på de forskellige modeller, er det dog valgt at fokusere på en midre tidsserie, som er illustreret i figur 8.5.



Figur 8.5. Sammenligning af de målte vandstande og de simulerede vandstande fra de fire modeller for Løgstør Bredning og Skive Fjord for en uge i midsommeren i 2005.

På figur 8.5 kan det ses, at modellerne i Løgstør Bredning ligger meget tæt på de målte værdier. Derudover kan det ses, at den simplificeret model 3 giver meget lavere værdier end de resterende modeller og har mindre udsving end de andre. Dette skyldes, at model 3 har en overforsimplet geometri, hvorved de enkelte beregningsceller bliver for store til at kunne gengive vandstanden i et lille område som f.eks. ved Løgstør og Skive. I sidste ende udvælges den model, som på kortest tid kan simulere vandstanden i Limfjorden med en acceptabel hældning a og korrelationskoefficient R i forhold til de målte data for Løgstør og Skive. Hældningerne og korrelationerne er vist i tabel 8.2.

| Model | 2D-Vandstand | Simplificeret 1 | Simplificeret 2 | Simplificeret 3 |
|---------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Antal felter | 8886 | 1295 | 403 | 145 |
| Antal punkter | 5537 | 1133 | 418 | 180 |
| Beregningstid | 49 t. | 2 t. og 35 min | 29 min | 12 min |
| a Løgstør | 0,838 | 0,901 | 0,838 | 0,567 |
| a Skive | 0,973 | 0,904 | 0,840 | 0,622 |
| R Løgstør | 0,852 | 0,859 | 0,859 | 0,831 |
| R Skive | 0,973 | 0,960 | 0,960 | 0,927 |

Tabel 8.2. Sammenligning af de forskellige modeller opbygget i MIKE.

Alle beregningstider i tabel 8.2 er foretaget på samme computer for at kunne sammenligne modellerne. Det vurderes ud fra sammenligningen af modellerne, at den simplificeret model 2 er den mest operative model som samtidig kan beregne vandstandene i Limfjorden med en tilstrækkelig præcision. Dette betyder at resultaterne ikke bliver mindre præcise, selvom modellen tager kortere tid at simulere.

Udvidet gennemgang af opbygning af de simplificerede modeller er i bilag A 5.

Da det er fundet, at den anden simplificerede model er den mest operative til beregning af vandstande, anvendes den videre til beregning af næringsstofkoncentrationer.

8.2 Opbygning af 3D-vandkvalitetsmodel

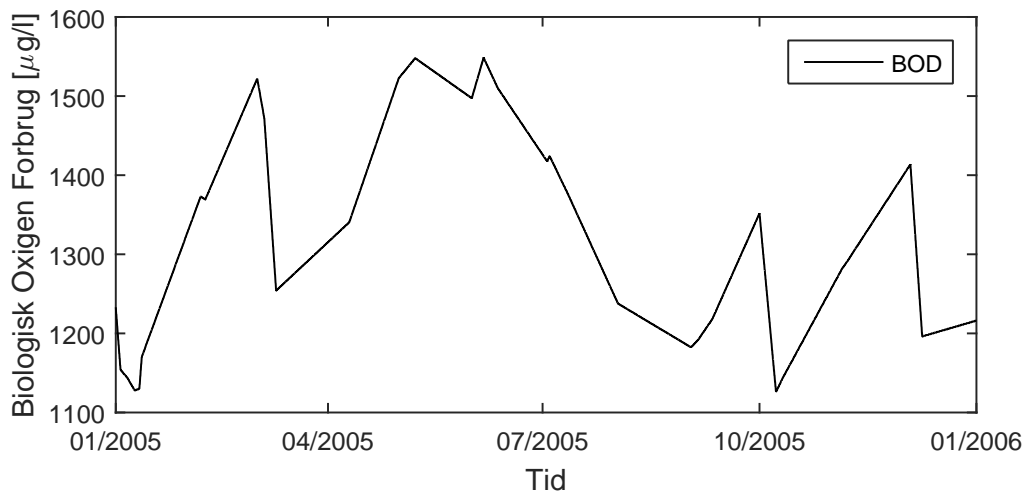
Der opstilles en vandkvalitetsmodel, som anvender den udvalgte simplificerede geometri. Modellen anvendes til at beregne koncentrationer af nitrogen. Disse koncentrationer beregnes ud fra de konvektive vandføringer beregnet ud fra vandstandsmodellen, men også ud fra diffusive vandføringer.

Den horisontale geometri fra 2D-vandstandsmodellen anvendes til at generere forskellige lag i dybden. Disse inddelinger af vandsøjlen anvendes til at vurdere udveksling af salt- og næringsstofkoncentrationer i Limfjorden i tre dimensioner. Ved denne vertikale inddeling af fjorden kan lagdelingen i dele af Limfjorden beskrives. Lagdelingen af vandsøjlen kan både skyldes at der er salinitetsforskelle, men også temperaturforskelle mellem top- og bundlagene. Sådanne lagdelinger kan hæmme den vertikale udvekslingen af næringsstoffer og ilt, hvilket kan forstærke effekterne af eutrofiering og iltvind. For at beskrive disse vandmiljømæssige problemstillinger er det vigtigt at kunne beskrive lagdelingen i modellen, derfor anvendes en inddeling af modellen i seks lag, hvilket er valgt ud fra tidligere analyser af Limfjorden. Lagenes tykkelse afgøres af en procentdel af den samlede dybde i et givent punkt. Det er valgt at de fire midterste lag hver er 20 % af dybden, og at det øverste og nederste lag hver er 10 % af dybden. Højen et al. [2015] Dette gøres for at gengive de større hastighedsforskelle der antages at forekomme ved bunden og vandoverfladen, hvilket har betydning for den konvektive vandføring i lagene. Det smalle lag ved vandoverfladen har også til formål at forhindre ferskvandet fra de bidragende vandløb i at blande sig for hurtigt med de nedenstående lag. Derudover foregår der også udveksling af ilt mellem sediment og vandfase, samt vandfase og luften, hvilket her indflydelse på iltkoncentrationen i lagene.

Modellen køres med tilførsler med varierende koncentrationer af nitrogen fra de forskellige bidragende vandløb på samme måde som i 1D-vandkvalitetsmodellen beskrevet i kapitel 7.1.

Saliniteten og temperaturen sættes til at variere på randene af modellen i Thyborøn og Hals. Salt- og næringsstofkoncentrationerne sættes til en startkoncentration inde i Limfjorden, som herefter styres af randbetingelserne i havet og ferskvandstilførslen af næringsstoffer.

Koncentrationerne af nitrogen afhænger også af BOD, som er det biologiske iltforbrug i en liter vand i løbet af fem dage. Iltforbruget kan anvendes som et indirekte mål for, hvor meget organisk materiale der er i vandet. Der foreligger data for det gennemsnitlige BOD for den indre fjord i Limfjorden, hvor det i modellen er valgt at medtage den gennemsnitlige værdi af de målte data, $10\ 350\ \mu\text{g l}^{-1}$ som initialkoncentrationen. Sanders et al. [2983] Derudover er BOD fra ferskvandsbidrag sat til at variere over året med en gennemsnitlig koncentration af seks af de anvendte vandløbs variationer, da der mangler data fra resten af vandløbene. Den årlige variation af BOD, som anvendes for de bidragende vandløb, er præsenteret på figur 8.6.



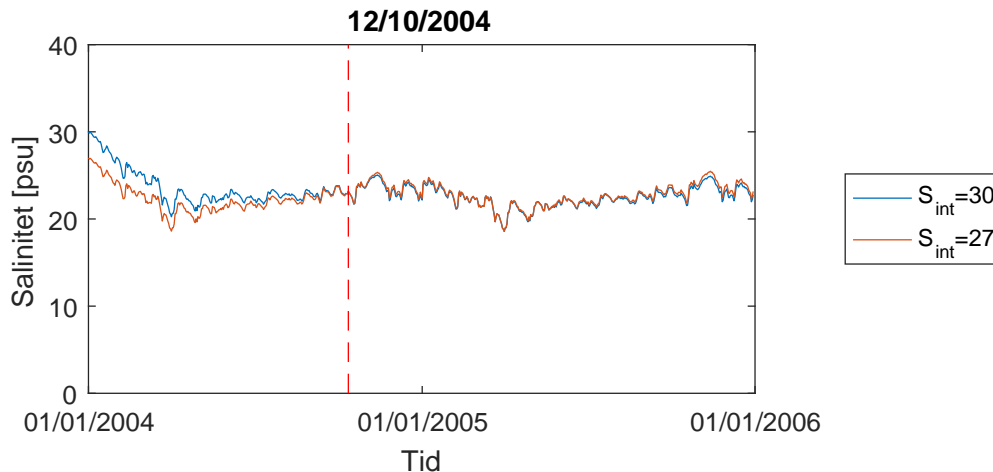
Figur 8.6. BOD-koncentration som anvendes for de bidragende vandløb.

På figur 8.6 ses det, at det højeste biologiske iltforbrug er om sommeren, hvilket skydes opblomstringen af biomasse, som efterfølgende henfalder og skal nedbrydes.

Vandkvalitetsmodellen anvender ligeledes iltkoncentrationer fra de bidragende vandløb og som randbetingelse i Thyborøn og Hals. Det antages, at i både vandløbene og havet på begge sider af Limfjorden er iltmættede, på grund af vandets hurtige bevægelse, hvilket øger iltkoncentrationen ved opblanding med luft. Denne mætningskoncentration af ilt i vand er sat til $9\ \text{mg l}^{-1}$ [Janning et al., 2011]. De resterende inputparametre er gennemgået i bilag A 10

Initialperiode

3D-vandkvalitetsmodellen køres med to forskellige startkoncentrationer på 27 og 30 for at undersøge, hvornår saliniteterne stabiliserer sig, på samme måde som det blev gjort for 1D-vandkvalitetsmodellen i kapitel 7. Initialperioden undersøges for Løgstør Bredning, da denne anvendes til kalibrering, og da området er centralt beliggende i Limfjorden. På figur 8.7 ses de beregnede saliniteter med de to startkoncentrationer.



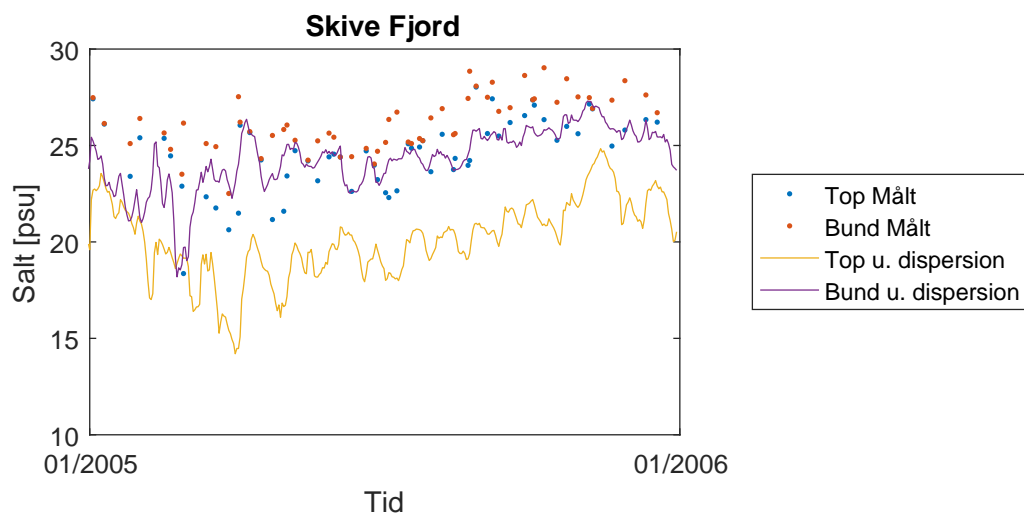
Figur 8.7. Initialperiode for salinitet for Løgstør Bredning.

Det ses på figur 8.7, at det tager 285 dage, før modellen har stabiliseret sig. Det er derfor valgt at anvende ét års initialperiode forud for modelleringsåret. Initialperioden er antaget til at være input data gentaget fra år 2005.

8.3 Kalibrering af 3D-vandkvalitetsmodel

Modellen kalibreres ved først at få de simulerede top- og bundsaliniteter til at passe med de målte. Dette gøres ved at sammenligne de målte top- og bundkoncentrationer i bestemte dybder, med de simulerede koncentrationer i de samme dybder. Det vælges at kalibrere saliniteten i Skive Fjord og validere den i Løgstør Bredning. Dette gøres, da de to vandområder har forskellig bathymetri og overfladeareal. Løgstør Bredning er væsentligt større end Skive Fjord, og der forekommer en større vandføring gennem bredningen, da den ligger i Limfjordens hovedstrøm. Da Løgstør Bredning ligger i hovedstrømmen, bliver der mere udveksling af vand end i Skive Fjord. Forskellene mellem Løgstør Bredning og Skive Fjord gør dem ideelle til at vurdere modellens evne til at alsidigt gengive forholdene i hele Limfjorden.

Den ukalibrerede salinitet i 1 og 4 meters dybde er illustreret på figur 8.8, sammenlignet med de målte saliniteter.



Figur 8.8. Målte og simulerede saliniteter ved bunden og vandoverfladen i Skive Fjord.

Det kan ses på figur 8.8, at modellen underestimerer saliniteten med mellem 2 og 5 PSU i forhold til de målte saliniteter. Det er derfor valgt at kalibrere saliniteterne, så de når op på niveau med de målte værdier. For at kalibrere saltkoncentrationerne kan der tilføjes en dispersion til modellen som den uafhængige variabel. Dette gøres for at få spredt mere af den højere saltkoncentration fra Nordsøen ind i fjorden, for at hæve den overordnede salinitet i systemet. Denne dispersion repræsenterer både diffusion og den mekaniske spredning af stoffer Schulze-Makuch [2004]. Det antages, at denne dispersion er den samme for salt som for næringsstoffer, på trods af at næringsstoffer ikke er konservative som salt. Dispersionen tilføjes kun horisontalt, da modellen ellers vil have svært ved at gengive lagdelingen af saltkoncentrationen, hvor koncentrationen er højest på bunden. Dispersion styres af en dispersionskoefficient (D), som sættes til forskellige værdier for at finde den, som giver de bedste resultater i modellen. Størrelsen af dispersionskoefficienten afhænger af afstanden fra havet, samt vandføringerne til fjorden, hvilket i princippet varierer fra sted til sted. Shaha et al. [2011] Det er i denne kalibrering valgt at tilføje en konstant værdi, som repræsenterer hele fjorden.

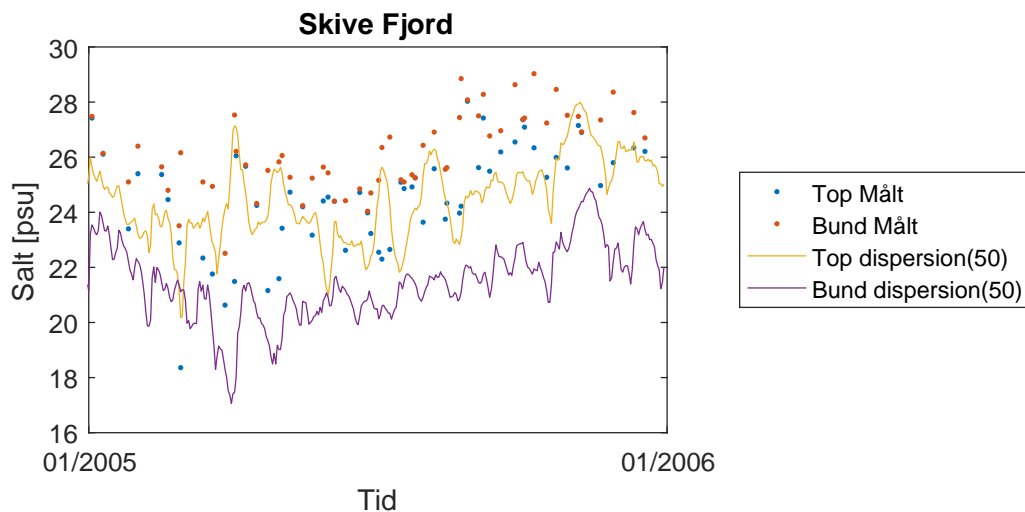
De udvalgte dispersionskoefficienter er opstillet i tabel 8.3 med de tilhørende korrelationer og hældninger af tendenslinjerne mellem de simulerede og målte saliniteter. Saliniteterne sammenlignes ud fra hældningerne af tendenslinjerne mellem de simulerede og de målte værdier på samme måde, som det blev gjort ved sammenligning af vandstandene i kapitel 3. Hældningerne og korrelationerne i tabel 8.3 er lavet ud fra det andet simuleringsår, da koncentrationerne her antages at være stabiliserede og derved ikke afhængige af startkoncentrationen.

| Dispersionskoeff. | Hældning top | Hældning bund | Korrelation top | Korrelation bund |
|-------------------------------------|-----------------|------------------|--------------------|---------------------|
| Uden dispersion | 0,8173 | 0,9848 | 0,6159 | 0,6322 |
| D: $10 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ | 0,8340 | 0,9238 | 0,6017 | 0,6696 |
| D: $50 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ | 0,9135 | 0,9325 | 0,6312 | 0,6061 |
| D: $100 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ | 0,9219 | 1,0687 | 0,4826 | 0,1170 |
| D: $150 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ | 0,9641 | 0,927 | 0,3818 | 0,2229 |

Tabel 8.3. Korrelation og hældning af tendenslinje for de forskellige horisontale dispersioner i Skive Fjord.

Ud fra hældningerne af tendenslinjerne for målte og simulerede saliniteter samt korrelationen mellem dem ved vandoverfladen og bunden findes det, at de bedste resultater opnås ved en horisontal dispersionskoefficient på $50 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, da hældninger og korrelationer overordnet set er tættest på én.

De kalibrerede saliniteter, som beregnes for top- og bundlaget i Skive Fjord, er illustreret på figur 8.9.



Figur 8.9. Målte og kalibrerede saliniteter ved bunden og vandoverfladen i Løgstør Bredning.

Det kan ses på figur 8.9, at de nye saliniteter er tættere på de målte værdier. Derudover kan det ses, at den horisontale dispersion får top- og bundkoncentrationerne af salt til at nærme hinanden. Dette skyldes, at der tilføjes en større udveksling af salt gennem Limfjorden mellem områder med mere eller mindre forskel på top og bundsalinitet. Det kan ligeledes ses, at dispersionskoefficienten giver et større udsving af saliniteten, hvilket skyldes, at saliniteten i Limfjorden er styret af randbetingelserne i Thyborøn og Hals. Den tilføjede dispersion forstærker effekten af vindretningens indflydelse på salinitetsbidraget fra enten Thyborøn eller Hals. Da Limfjordens salinitet i gennemsnit ligger mellem saliniteterne

i Nordsøen og Kattegat, vil en øget dispersion med vind fra øst derfor give et fald i saliniteten, og en øget dispersion med vind fra vest vil give en øget salinitet. 3D-vandkvalitetsmodellen kan herefter valideres.

8.4 Validering af 3D-vandkvalitetsmodel

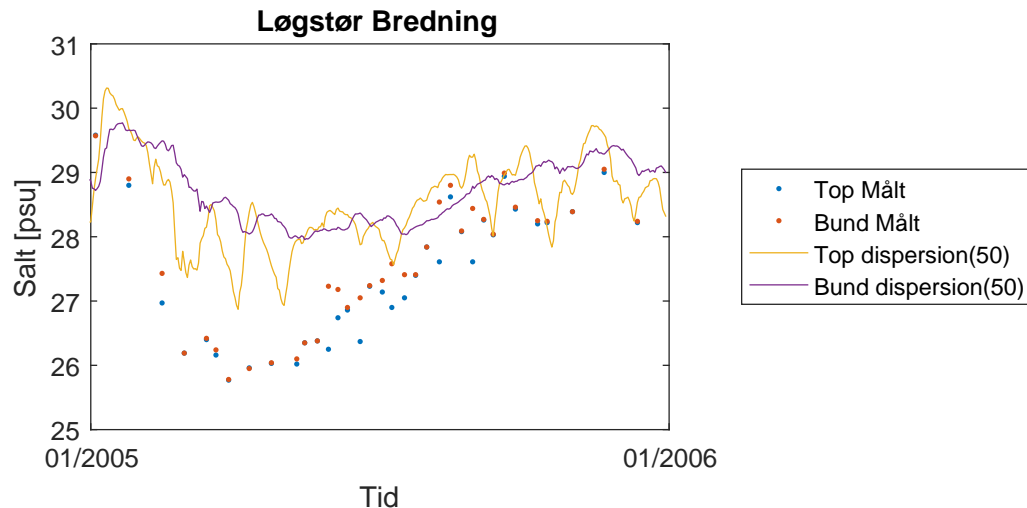
Det er valgt at validere modellen for Løgstør Bredning, da modellen herved antages at kunne repræsentere hele Limfjorden.

3D-vandkvalitetsmodellen køres med en horisontal dispersionskoefficient på $50 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ for at undersøge, hvordan saliniteten bliver ved vandoverfladen og på bunden i Løgstør Bredning. Resultaterne for Løgstør Bredning er vist i tabel 8.4.

| Dispersionskoeff. | Hældning top | Hældning bund | Korrelation top | Korrelation bund |
|------------------------------------|-----------------|------------------|--------------------|---------------------|
| D: $50 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ | 1,0365 | 1,0376 | 0,6881 | 0,5335 |

Tabel 8.4. Korrelation og hældning af tendenslinje for en horisontal dispersion på $50 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ i Løgstør Bredning.

Det ses i tabel 8.4, at den kalibrerede dispersionskoefficient giver acceptable hældninger af tendenslinjerne mellem simulerede saliniteter og målte saliniteter. Saliniteterne simuleret med den kalibrerede dispersionskoefficient, er sammen med de målte saliniteter i vandoverfladen og på bunden, illustreret på figur 8.10.



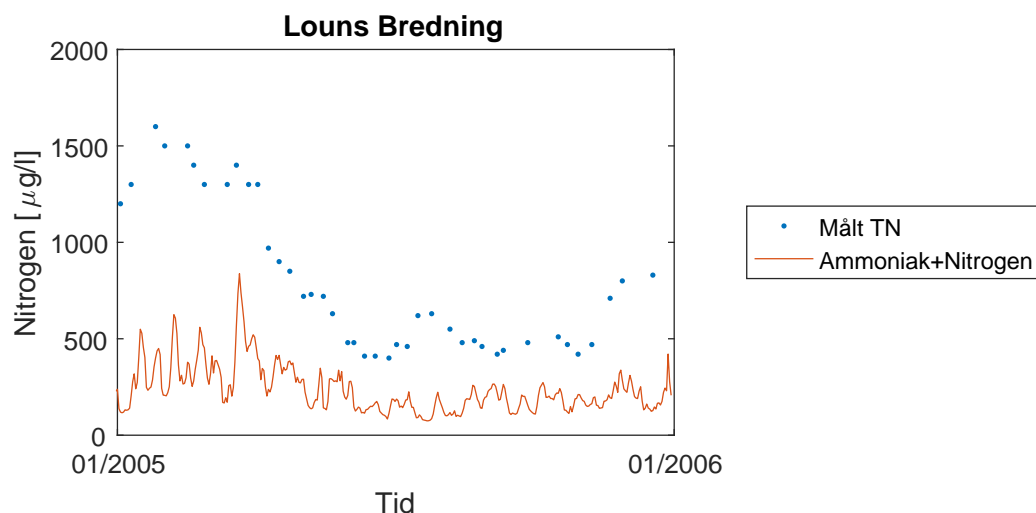
Figur 8.10. Målte og kalibrerede saliniteter ved bunden og vandoverfladen i Løgstør Bredning.

Det kan ses på figur 8.10, at de simulerede saliniteter i vandoverfladen og på bunden varierer mere end de målte saliniteter, men at de følger den samme årlige variation.

Endvidere kan det ses at de to modellerede serier ligger tæt på hinanden, hvorved det ikke forventes at der er lagdeling her, hvilket også kan observeres ved sammenligning af de målte værdier for samme område.

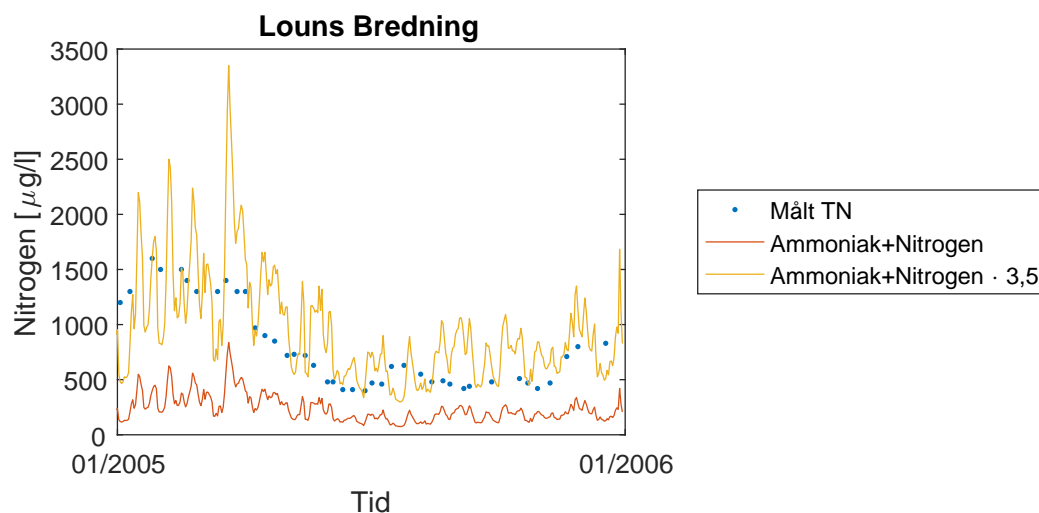
Vurdering af nitrogenkoncentrationer

Da det antages, at dispersionen af salt og nitrogen er den samme, er koncentrationen af nitrogen herved også valideret. For at kunne korrelere nitrogen koncentrationen med ålegræsdybden, som det blev gjort i kapitel 7 om 1D-vandkvalitetsmodellen, skal 3D-vandkvalitetsmodellen ligeledes returnere Total nitrogen. TN består af både en organisk og en uorganisk del, som beskrevet i kapitel 7. Den uorganiske del i outputtet fra ECO-Lab består af ammoniak og nitratkoncentrationer, hvilket antages at indeholde koncentrationerne af hhv. ammonium og nitrit, da de har forholdsvis lave koncentrationer. Den organiske nitrogen er optaget i flora og fauna, hvilket er den resterende del af TN ud over den uorganiske del. Den målte TN for Louns Bredning i 1 meters dybde er illustreret på figur 8.11 sammen med den simulerede uorganiske nitrogen.



Figur 8.11. Den målte TN sammen med den inorganiske nitrogen for Louns Bredning.

Det kan ses på figur 8.11, at den simulerede uorganiske nitrogen følger variationen af den målte TN i Louns Bredning. Det ses dog, at TN er gennemsnitligt ca. 3,5 gange større end den uorganiske nitrogen. Det konkluderes, at forskellen mellem disse kurver er den organiske nitrogen. Derfor vælges der en faktor på 3,5, som ganges på den simulerede uorganiske nitrogen, hvilket kaldes den organiske nitrogen faktor (ON-faktor). På figur 8.12 er der illustreret en sammenligning af den målte TN og den simulerede uorganiske nitrogen ganget med ON-faktoren.



Figur 8.12. Den målte TN sammen med den simulerede uorganiske nitrogenkoncentration med ON-faktoren for Louns Bredning.

På figur 8.12 ses det, at den gennemsnitlige værdi af den simulerede uorganiske nitrogenkoncentration med ON-faktoren følger den målte TN. Denne simulerede uorganiske nitrogenkoncentration ganget med ON-faktoren kaldes den antagede totalnitrogen.

Den validerede model, som kan gengive total-nitrogenkoncentrationer og derved anvendes til at vurdere vandkvaliteten i Limfjorden ud fra korrelationen med ålegræsdybden, kan herefter anvendes til at konsekvensvurdere implementering af løsningsforslagene.

8.5 Implementering af løsningsforslag

Efter at 3D-vandkvalitetsmodellen er blevet valideret, kan den anvendes til at undersøge konsekvenserne af løsningsforslagsimplementeringerne. Det er valgt at undersøge koncentrationen af nitrogen ved implementering af dæmningen med gennemstrømningsssluse og ved reduktion af nitrogenkoncentrationerne i de bidragende vandløb. Forlængelse af høfderne 59 og 63 antages at have en negativ indflydelse på vandkvaliteten i Limfjorden, da de begrænser gennemstrømningen uden at ensrette strømningen gennem fjorden, hvilket forringer vandskiftet. Disse negative effekter kunne ligeledes observeres i 1D-vandkvalitetsmodellen, hvorfor høfdeforlængelserne ikke undersøges som løsningsforslag i den tredimensionelle vandkvalitetsmodel.

Reduktion af input koncentrationer

Der er her undersøgt for effekterne ved reduktioner af nitrogenudledning til Limfjorden. Effekten er undersøgt ved de samme tre reduktioner, som blev undersøgt i 1D-vandkvalitetsmodellen i kapitel 7, på hhv. 10-, 25- og 50%, uden at foretage andre ændringer i modellen.

Dæmning med gennemstrømningsssluse

Implementering af en gennemstrømningsssluse ensretter nettvandføringen gennem Limfjorden, det er dog uklart, om dette vil forbedre vandkvaliteten, da 1D-vandkvalitetsmodellens resultater var usikre. Det er derfor i 3D-vandkvalitetsmodellen valgt at undersøge for effekterne ved dæmningen med gennemstrømningsssluse. Der undersøges for scenarie 3, hvor gennemstrømningssslusen lukker ved en vandstand på over én meter ved Thyborøn, ensretter strømmen mod øst og lukker slusen ét døgn, før der forekommer vindstyrker af stormstyrke.

8.6 Resultat af 3D-vandkvalitetsmodel

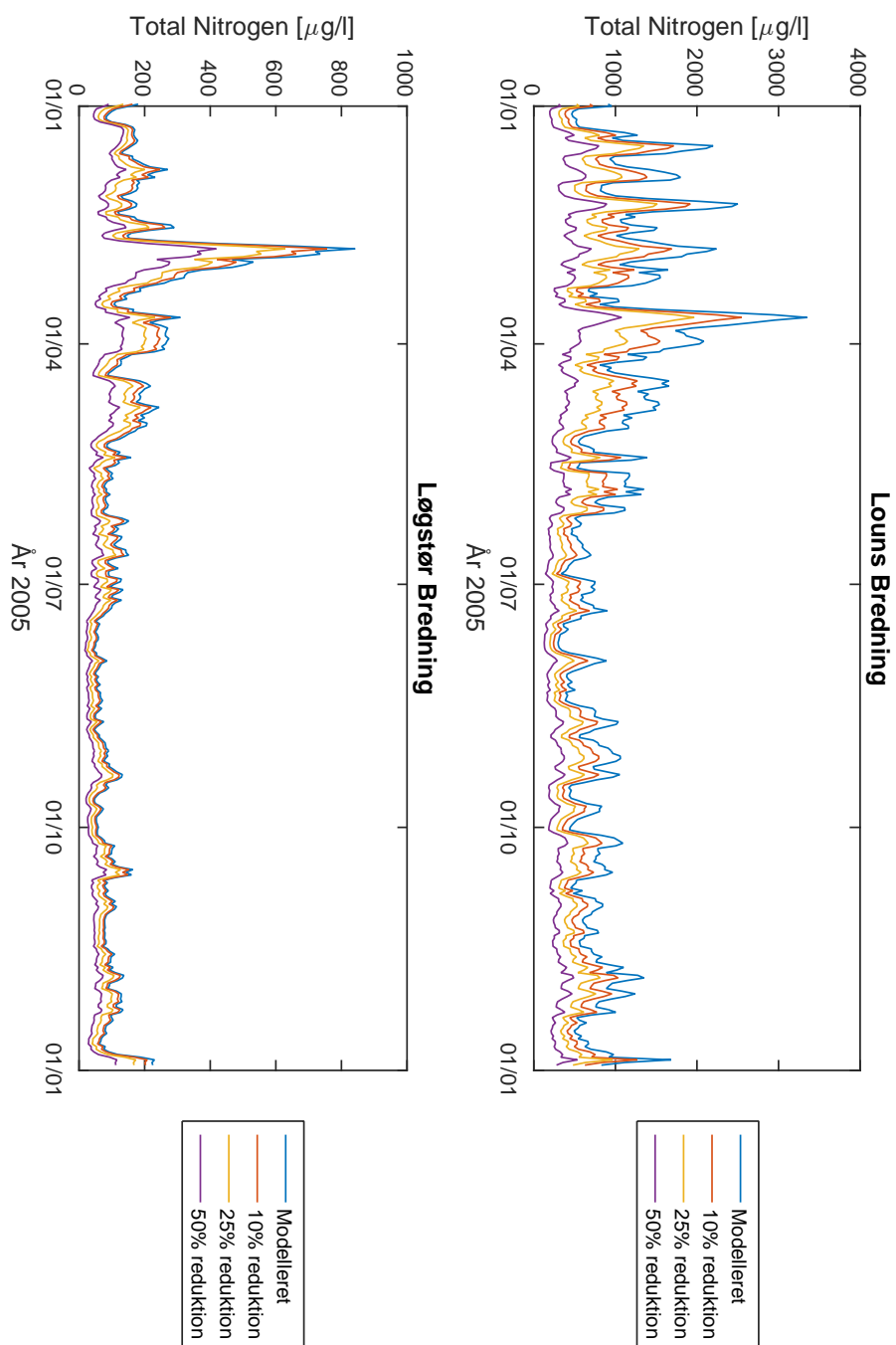
I dette afsnit præsenteres løsningerne for de forskellige scenarier. Hver koncentrationsværdi omregnes til ålegræsdybe, som bruges til at vurdere, om EQR er hævet, og dermed om vandkvaliteten er forbedret.

Først sammenlignes nitrogenkoncentrationen i Louns Bredning og Løgstør Bredning ved de tre forskellige reduktioner i vandløbskoncentrationerne. De simulerede antagede TN koncentrationer for de tre scenarier med reduktion af ammoniak- og nitratkoncentrationer i vandløbsinput er illustreret på figur 8.13 for Louns Bredning og Løgstør Bredning i én meters dybde, sammen med koncentrationen uden implementering af løsningsforslag.

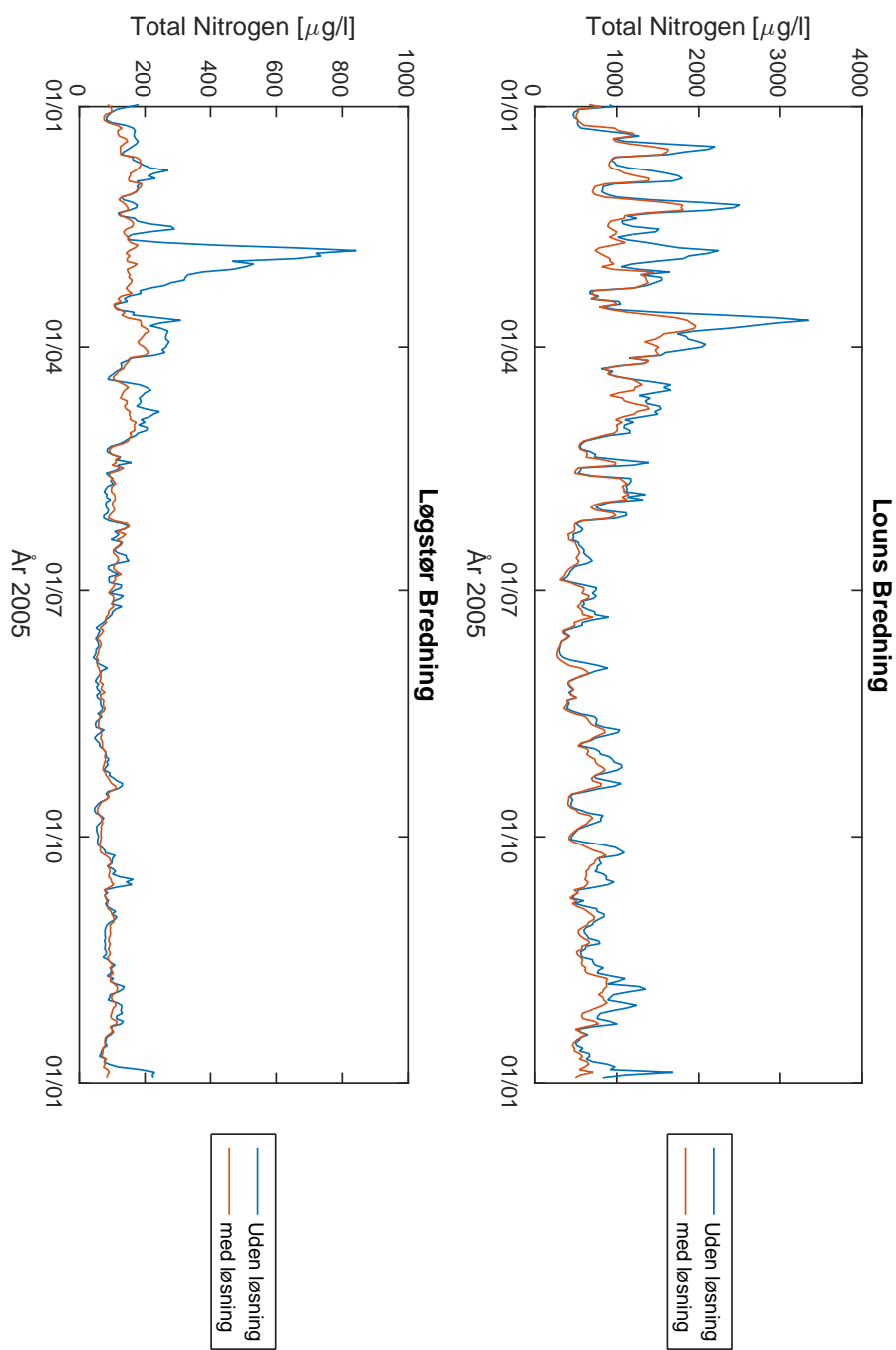
Det kan ses på figur 8.13 ses det, at alle tre scenarier med reduktioner af inorganisk nitrogen fra vandløbene, giver lavere simulerede antagede TN-koncentrationer. De simulerede koncentrationer har den samme variation ved de tre simuleringer, og jo større reduktionen er i vandløbene, des større er reduktionerne også i både Louns Bredning og Løgstør Bredning. Den gennemsnitlige koncentration af TN er i gennemsnit væsentligt højere i Louns Bredning end i Løgstør Bredning. Dette stemmer overens med, at der udledes store mængder næringsstoffer til Louns Bredning fra vandløb og fra Hjarbæk Fjord. TN koncentrationen i Løgstør Bredning er ligeledes lavere, da den ligger i Limfjordens hovedstrøm, som tilfører mere vand med lavere TN koncentrationer.

Herefter undersøges konsekvensen af dæmningen med gennemstrømningssslusen på den antagede total nitrogen koncentration, hvilket er illustreret på figur 8.14 sammen med koncentrationen uden implementering af løsningsforslag for Louns Bredning og Løgstør Bredning.

Det kan ses på figur 8.14, at dæmningen med gennemstrømningsssluse giver en betydelig reduktion af den antagede TN-koncentrations maksimumværdier. Det ses også, at de lave koncentrationer forbliver næsten uændrede, hvilket skyldes, at koncentrationen ikke bliver påvirket ret meget, når gennemstrømningssslusen er åben.



Figur 8.13. Resultater af vandkvalitetsmodellen med reducerede tilførsel af næringsstoffer, ved hhv. 10%, 25% og 50%.



Figur 8.14. Resultater af vandkvalitetsmodellen ved dæmningen med gennemstrømningsluse.

De beregnede TN-koncentrationer for løsningsscenarierne med gennemstrømningslusen og 50 % reduktionen af nitrogen i vandløbene, omregnes til ålegræsdybder ud fra formel 7.4 på side 89, hvilket derefter omregnes til en økologisk tilstand. Disse ålegræsdybder er vist sammen med dybderne fundet uden implementering af løsningsforslag i tabel 8.5.

| EQR reference | | |
|--------------------------|-------------|------------------|
| Hjarbæk Fjord | Indre fjord | Resterende fjord |
| Dårlig | Ringe | God |
| EQR Sluse | | |
| Hjarbæk Fjord | Indre fjord | Resterende fjord |
| Dårlig | Ringe | God |
| EQR 50% reduktion | | |
| Hjarbæk Fjord | Indre fjord | Resterende fjord |
| Dårlig | Moderat | Høj |

Tabel 8.5. Beregnet økologisk tilstand for de tre opdelinger af Limfjorden ved reference og de to udvalgte løsningsforslag.

Det kan ses i tabel 8.5 at sluseløsningen ikke forbedrer den økologiske tilstand, men at løsningen med en 50% reduktion af inputkoncentrationen forbedrer tilstanden i både den indre fjord og den resterende fjord.

Herudover er iltkoncentrationerne ved vandoverfladen og ved bunden illustreret i bilag A 10.2 for sommerperioden af det andet simuleringsår.

8.7 Konklusion af 3D-vandkvalitetsmodel

Da den tre-dimensionelle vandkvalitetsmodel er opbygget deterministisk, er det antaget, at dens resultater stadig er præcise ved indførsel af løsningsforslag. Modellen viser, at koncentrationen af TN kan reduceres ved både at reducere koncentrationen i de bidragende vandløb og ved indførsel af en dæmning med gennemstrømningsluse. De simulerede koncentrationer har de værdier og variationer, som blev forventet.

Udvalgte simuleringsresultater fra 3D-vandkvalitetsmodellen er vedlagt i bilag E. 8.1.

8.8 Vurdering og konklusion af vandkvalitet

Det er fundet, at begge modeller er i stand til at gengive den nuværende tilstand, men at den empiriske model ikke er i stand til på tilfredsstillende vis at gengive ændringerne, da denne model returnerer en koncentrationen, selv ved en 100% reduktion af næringsstof udledningen, samt med nulværdier på randende. Derved burde modellen returnere nulværdier i alle bokse, idet der ikke er introduceret en koncentration, men variationsledet i den empiriske model kan ikke gengive dette scenarie. Det er derfor antaget, at den ét-dimensionale model kun kan præcist gengive de nuværende forhold, som den er kalibreret og valideret til. EcoLab modellen derimod kan gengive en udledning på 0, idet at den er opbygget deterministisk. Denne model er derfor bedre til at gengive ændringerne i systemet. Endvidere kan det ses, at modellen gengiver de påsatte reduktioner, med et næsten lineært forhold, som forventet.

Den bedste løsning er fundet til at være en kombination af reducere og indførelse af en gennemstrømningsssluse. Det er endvidere fundet, at en gennemstrømningsssluse, som ensretter strømmingen i Thyborøn Kanal, vil reducere maksimal koncentrationerne, men at dette ikke vil mindske antallet af udsving i koncentrationerne.

9. Afrunding af Stormflodssikring af Limfjorden

9.1 Diskussion

Det er igennem projektet fundet, at der er forskellige løsninger, der kan anvendes til at sikre de lavtliggende bebyggede områder, langs Limfjordens kyster. Der er i denne rapport ikke fokuseret på de økonomiske omkostninger af en løsning, men blot undersøgt, hvilken der bedst opfylder kravet for sænkning af vandstanden. Havde dette været holdt op mod økonomi, kunne andre løsninger have været optimale. Endvidere er der ikke fokuseret på en økonomisk gevinst ved nogle af løsningerne, hverken ved landbrugsområder eller byområder, der kan anvendes ved en sænkning af oversvømmelserne. Det synes dog, at en dæmning er den der bedst sikrer landområderne langs selve fjorden samt giver flere fordele end de andre løsninger, da denne blandt andet skaber en ny forbindelse over Limfjorden. Opstilles der ydermere en mere avanceret model for slusestyring, end der er gjort i denne rapport, kan ekstremvandstanden muligvis sænkes yderligere, eller middelvandstanden kan muligvis sænkes således, at de lavtliggende områder, der ofte oversvømmes, kan anvendes.

Det er fundet, at vandkvaliteten i Limfjorden hovedsagligt er afhængig af nitrogen og fosfor, hvor det er vanskeligt at beskrive fosforet, da der er store fosforpuljer i sedimentet i fjordbunden. Dette sediment er ingen af løsninger i stand til at erodere væk, ifølge den simple sedimentmodel. Da disse puljer er vanskelige at beregne, og da Vandplan 1.2 udelukkende arbejder med en sænkning af nitrogen, er det valgt at fokusere på en model, der udregner koncentrationen af nitrogen. Den første model, som anvendes, er opstillet ud fra empiri, da tidligere studier har vist, at disse modeller ofte giver en større korrelation end deterministiske, ved simple modeller. Endvidere er en simpel empirisk model valgt på baggrund af [Hansen, 1997], hvor en simpel model synes at kunne gengive nitrogen koncentrationer. Yderligere er der i [Carstensen and Krause-Jensen, 2009] fundet en sammenhæng imellem koncentrationen af total nitrogen og ålegræsset dybdeudbredelse. Den empiriske model synes at give en god korrelation med de målte værdier, men modellen er ikke i stand til at gengive ændringer i systemet. Dette er løst ved at opbygge en model som anvender Mike3 EcoLab, hvilket også er anvendt til at belyse EQR for Limfjorden, hvor den største del af fjorden ikke gengiver de nuværende forhold. Modellen kunne dog alligevel anvendes til at beskrive de ændringer, der vil forekomme ved nogle af løsningerne. Løsningerne, som er valgt at simulere, er udvalgt som værende de stormflodsbarrierer, der synes at have en større indflydelse på vandstanden, og som muligvis endda kan anvendes til at forbedre EQR'et i Limfjorden, samt de forslag, der er opstillet i Vandplan 1.2 selv. Det er fundet ved modellering af systemet, at den bedste løsning er en begrænsning af

udledningen af næringsstoffer. Denne løsning kan forbedre den økologiske tilstand, hvis den implementeres med en sluse, som kan ensrette hovedstrømmen igennem Limfjorden.

9.2 Konklusion

I rapporten er det fundet, at ekstremvandstanden i Limfjorden under januarstormen 2005 kan begrænses. Dette er fundet ved en simple model, der anvender éndimensionale vandføringer, hvor den bedste løsning næsten kunne mindske vandstanden med 2 m. Dog synes denne løsning ikke at være mulig, idet at den kræver en lukning af slusen ved alle vandstande over kote 0. Anvendes en lukningskote på 1 m, kan vandstanden imidlertid reduceres med lidt over 1 m, ved den simple model. Denne models resultat er vurderet til at undervurdere ekstremvandstandene, idet at den arbejder med middelvandstanden i en boks, hvorved effekten af vindstuvning over de store bokse negligeres. Endvidere kræver ændringer af modellen, at hele boksen, hvori der forekommer en ændring, ændres, således at en "højdeudvidelse" i modellen effektivt betyder, at modellen indsnævrer hele Thyborøn Kanal til det mindste tværsnitsareal, der er fundet. Ud over dette regner modellen vandføringer med ruheder, der er beliggende udenfor modellens gyldighedsområder, hvorved det ikke er muligt at forudsige fejlen af modellen.

Anvendes den mere avancerede model, der er opstillet i Mike21, fås det, at sænkninger, der opstår i systemet, ikke opnår de samme størrelser som i den simple model. Dette er forventet, da denne model anvender en finere diskretisering, som muliggør vindstuvning i de større bokse. Dette gør, at denne model maksimalt finder en sænkning på omkring 0,3 m. Denne værdi synes mere troværdigt ved sammenligning med tidlige modeller samt Kystdirektoratets resultat Ingvarsen et al. [2012]. Denne model er endvidere indstillet til at begrænse mængden af vand, der kommer ind i Limfjorden, i 24 timer før en storm. Dette er fundet til at sænke ekstremvandstanden mere end ved en lukning ved en given vandstandskote. Denne løsning er ydermere testet for fremskrevne værdier for 2060 og 2100, hvor det også bliver fundet, at ekstremvandstandene bliver mindsket. Dog viser det sig, at denne løsning fastholder en højere vandstand i perioden efter ekstrema. Denne løsning er endvidere tiltænkt at kunne forbedre vandkvaliteten ved en ensretning af strømmen.

Det er fundet, at den økologiske tilstand i Limfjorden, gennemgående er ringe, hvilket en stormflodsbarriere ikke må forværre. Derfor er det undersøgt, hvordan en stormflodsbarriere kan være med til at forbedre kvaliteten, og derved om der kan opnås en synergieffekt. Den første model, der bliver anvendt, er fundet til ikke at kunne beskrive ændringer i systemt, men udelukkende beskriver det nuværende system. En tilføjelse til denne model beskriver ændringen i bundforhold, hvor der ikke bliver fundet nogen betydelig ændring ved opførsel af en dæmning med en gennemstrømnings-sluse. Derfor er det modellen, der er anvendt som udvidelse på modellen med todimensionale vandføringer, der er valgt at basere den bedste løsning ud fra. Denne model, opsat i EcoLab, finder, at den bedste løsning er at begrænse udledningen af nitrogen.

Denne løsning kan yderligere forbedres ved implementering af en sluse, der kan ensrette gennemstrømningen i Thyborøn Kanal, da dette kan hjælpe med at nedsætte opholdstiden for næringsstoffer i Limfjorden.

9.3 Perspektivering

Den ét-dimensionale vandkvalitetsmodel er baseret på empiriske variationer af biologiske processer. Modellen kan også sættes op som en deterministisk model, hvor fysiske konstanter beskriver de biologiske processer. En sådan model vil gøre det muligt at foretage ændringer i de enkelte fysiske parametre, mens det stadig er muligt at kunne beskrive konsekvensen ud fra virkeligheden.

Sedimenttransport i Limfjorden kan beskrives mere præcist ved opstilling af en bølgemodel. En sådan model kan beregne de faktiske strømninger, som forekommer i fjorden og på kysten ved udmundingen til havet. Herved kan problematikken med sandpuden i Nissum Bredning beskrives.

For at opnå en bedre forståelse af vandkvaliteten i Limfjorden kan der undersøges andre løsningsscenerier, hvor udledningen af næringsstoffer formindskes i forskellig grad igennem fjorden. Det forventes at lovgivningen ændres således, at udledningen fra landbruget skal reduceres med mindre i visse områder, mens udledningen skal reduceres med mere i andre områder. Den samlede vandkvalitet kan herved forbedres, da nogle dele af Limfjorden er mere følsomme over for udledning af næringsstoffer end andre. Sådanne områder er for eksempel Hjarbæk Fjord og Skive Fjord da disse har et mindre vandskifte og at næringsstoffkoncentrationen derfor bliver højere her. Knudsen [2014]

Den akkumulerede fosforpulje i visse dele af Limfjorden kan undersøges nærmere ved at foretage længere simuleringer. Herudover er det muligt at foretage målinger af sedimentet i områder, hvor det forventes, at der er fosforpuljer, for at få en bedre forståelse af, hvor meget fosfor der er tilstede i Limfjorden.

1D-vandkvalitetsmodellen kan med fordel simuleres for længere perioder for at beskrive vandkvaliteten, hvor næringsstofpuljerne i sedimentet er medtaget, da denne model hurtigt beregner vandkvaliteten i systemet i forhold til mere avancerede modeller.

Litteraturliste

Litteraturliste:

- Brorsen, M. and Larsen, T. (2009). *Lærebog i hydraulik*. Aalborg Universitetsforlag.
- Carstensen, J. and Krause-Jensen, D. (2009). *Fastlæggelse af miljømål og indsatsbehov ud fra ålegræs i de indre danske farvande*. Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet.
- Dansk meteorologisk institut (2005). *Nyheder 2005*. <http://www.dmi.dk/nyheder/arkiv/nyheder-2005/danmark-ramt-af-landsdaekkende-storm/>.
- DMI (2015). *Storms in Denmark since 1991*. DMI.
- GEUS (2014). *Danmarks digitale havbundssedimentkort 1:250.000*. DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER FOR DANMARK OG GRØNLAND, <http://www.geus.dk/DK/data-maps/Sider/havbundstyper-dk.aspx>.
- Grøndahl, L. and Poulsen, N. (2014). *Analyse af IPCC delrapport 2*. Naturstyrelsen.
- (H. W.). M. S. (1930). *Thyborøn Kanal*. <http://runeberg.org/salmosen/2/23/0428.html>.
- Hansen, K. (2011). *Trods vrede fiskeres protestsejls til hovedstaden blev der bygget dæmning op over Harboøre Tange*. www.dettabteland.dk/midtjylland/harboore.pdf.
- Hansen, T. B. (1997). *Empirisk modellering af vandkvalitet i fjorde*. AAU, studierapport.
- Højen, J. C., Andersen, J. E., Thomsen, K. S., Schneidelbach, K. S., Rasmussen, M. M., and Nielsen, T. S. F. (2015). *Flooding and water quality in the Limfjord*. AAU Studierapport.
- Ingvarsdén, S. M., Knudsen, S. B., Toxvig, H., Sørensen, C. S., and Bisgaard, C. (2012). *Thyborøn Kanal og Vestlige Limfjord*. Kystdirektoratet.
- Janning, K., Petersen, P. B., Michelsen, K., and Olsen, B. H. (2011). *Optimeret nitrifikation i biofiltre på modeldambrug, type 3*. DHI.
- Jensen, J. (2009). *Pilotstrækning Løgstør*.
- Knudsen, L. (2014). *Krav til reduktion af kvælstofudledning 2015-2021 - Hvad betyder det?* Landbrugsinfo.dk, https://www.landbrugsinfo.dk/planteavl/goedskning/naeringsstoffer/kvaelstof-n/kvaelstofudvaskning/sider/krav-reduktion-kvaelstofudledning-2015-2021_pl_po_14_235.aspx.

-
- Knudsen, S. B., Sørensen, C., Toxvig, H., and Ingvarlsen, S. M. (2011). *Thyborøn Kanal 2009*. Kystdirektoratet.
- Larsen, S. L. and W.Ø.Larsen, M. (2013). *Klimatilpasning*. Banedanmark.
- Larsen, T. (2015). *Note on wind effects in estuaries and lakes*. Aalborg Universitet.
- Naturstyrelsen (2013). *1.2 Limfjorden*.
<http://naturstyrelsen.dk/vandmiljoe/vandplaner/vandplaner-2009-2015/underkendte-vandplaner-2011/12-limfjorden/>.
- Nutrient and Eutrophication in Danish Marine Waters (2016). *Nutrient concentrations, nutrient ratios and nutrient limitations*. http://www2.dmu.dk/1_viden/2_miljoe-tilstand/3_vand/4_eutrophication/nutrient.asp.
- Retsinformation (1946). *Lov om Foranstaltninger til Sikring af Limfjordstangerne, Thyborøn Havn og Thyborøn Kanal*.
<https://www.retsinformation.dk/Forms/R0710.aspx?id=51379>.
- Retsinformation (1970). *Lov om ophævelse af lov om foranstaltninger til sikring af Limfjordstangerne, Thyborøn havn og Thyborøn kanal*.
<https://www.retsinformation.dk/Forms/R0710.aspx?id=21996>.
- Sanders, T. G., Ward, R. C., Loftis, J. C., Steele, T. D., Adrian, D. D., and Yevjevich, V. (1983). *Design of Networks for Monitoring Water Quality*. Water Resources Publications, LLC.
- Schulze-Makuch, D. (2004). *Advection, Dispersion, Sorption, Degradation, Attenuation*. University of Texas.
- Shaha, D. C., Cho, Y.-K., Kwak, M.-T., Kundu, S. R., , and Jung, K. T. (2011). *Spatial variation of the longitudinal dispersion coefficient in an estuary*. Hydrology and Earth System Sciences.
- Skaldyrcenter, D. (2016). *Hydrodynamik*.
<http://e-learning.skaldyrcenter.dk/vandmiljoe/limfjordens-hydrodynamik/>.
- Sørensen, C., Madsen, H. T., and Knudsen, S. B. (2013a). *2012 højvandsstatistikker*. Kystdirektoratet.
- Sørensen, C., Madsen, H. T., and Knudsen, S. B. (2013b). *Højvandsstatistikker 2012*. Kystdirektoratet.
- Stormrådet (2009). *Stormflods skadestatistik - maj 2009*. www.stormraadet.dk/~media/Storm/Rapporter/Stormflod%20skadesstatistik%201991%202008.pdf.
- USGS.gov (2013). *U.S. GEOLOGICAL SURVEY Scientific Investigations Report 2008-5093*. U.S. Geological Survey,
<http://pubs.usgs.gov/sir/2008/5093/table7.html>.