

THYBORØN KANAL OG VESTLIGE LIMFJORD

DEL 2: UDVIDET ANALYSE AF STORME



FORORD

Der sker løbende en naturlig udvidelse af tværsnittet af Thyborøn Kanal, der sammen med stigninger i havets vandstand betyder, at fremtidige storme vil medføre højere vandstande og større oversvømmelser i Limfjorden end i dag.

Kystdirektoratet har i perioden 2009 til 2012 undersøgt syv forskellige løsningsmodeller, der tager hånd om udfordringerne. Fordele og ulemper er belyst i forhold til 0-alternativet, hvor Thyborøn Kanal fortsætter sin udvikling. Af Kystdirektoratets rapport fremgår det, at løsningen, hvor hofde 58/59 forlænges og dermed en indsnævring af Thyborøn Kanal, er den mest fordelagtige.

De fremtidige klimaudfordringer i den Vestlige Limfjord undersøges i et af delprojekterne i Coast to Coast Climate Challenge projektet, der er støttet af EU LIFE-programmet. I delprojektet "C9 - Thyborøn Kanal og Vestlige Limfjord" er det undersøgt, om en indsnævring af Thyborøn Kanal kan resultere i færre og mindre omfattende skader i den vestlige Limfjord i forbindelse med oversvømmelser som følge af kraftige storme. Arbejdet er en opfølgning på Kystdirektoratets undersøgelse fra 2012.

Resultaterne af de nye undersøgelser i forbindelse med delprojekt 'C9 - Thyborøn Kanal og Vestlige Limfjord' foreligger i form af 3 rapporter samt et teknisk resumé:

- VVM-lignende redegørelse og interessentanalyse – stormen 2005 (Hovedrapport)
- Udvidet analyse af yderligere 10 storme
- Socioøkonomisk screening
- Teknisk resumé

Den udvidede analyse af yderligere 10 storme præsenteres i nærværende rapport.

Partnerskabet bag delprojektet er de 7 kommuner - Thisted, Morsø, Vesthimmerland, Skive, Holstebro, Struer og Lemvig kommuner - og de 7 forsyningsselskaber - Vestforsyning, Morsø Forsyning, Skive Vand, Struer Forsyning, Thisted Spildevand, Vesthimmerland Vand samt Lemvig Vand & Spildevand. Lemvig Kommune fungerer som projektleder for delprojektet. Kommunerne og forsyningsselskaberne i partnerskabet er alle beliggende i den vestlige del af Limfjorden og har derfor store interesser i, at risikoen for alvorlige oversvømmelser omkring fjorden mindskes.

En indsnævring af Thyborøn Kanal vil kræve, at der udarbejdes en egentlig miljøkonsekvensrapport. Det foreliggende materiale i form af de 3 rapporter samt teknisk resumé udgør en del af grundlaget for partnerskabets beslutning om, hvorvidt projektet med en indsnævring af Thyborøn Kanal ved en udbygning af hofde 58/59 skal fremmes.

De 3 rapporter samt teknisk resumé er udarbejdet af Rambøll.

INDHOLD

FORORD	0
1. OPSUMMERING AF OVERORDNEDE KONKLUSIONER	3
2. METODE	4
3. UDVÆLGELSE AF STORMFLODER OG DATAGRUNDLAG	6
3.1 Datagrundlag for evaluerede stormflodshændelser	7
4. SPECIFIKKE FORUDSÆTNINGER FOR MODELLERINGEN	10
4.1 Specifikke forudsætninger for den statistiske analyse	11
5. VALIDERING AF MODEL	12
6. RESULTATER FRA ANALYSEN	16
6.1 Stormflodsvandstande i dag og i fremtiden	16
6.2 Højvandstatistik for eksisterende og fremtidige forhold	16
6.3 Indflydelse på 100-års højvandstande i Limfjorden	21
6.4 Udbredelse af 100-års højvandstande i Limfjorden	22
6.5 Varighed for overskridelse af maksimale vandstande	24
REFERENCER	27

1. INDLEDNING

I den følgende delrapport beskrives simuleringen af et antal stormflodshændelser som et tillæg til den hidtil evaluerede stormflodshændelse (stormen i januar 2005 jf. bilag 1 i hovedrapporten 'Thyborøn Kanal og Vestlige Limfjord – VVM-lignende redegørelse og interesseanalyse'), hvor der var særligt fokus på indflydelsen fra den foreslåede høfdeudvidelse på stormflodsvandstanden i Løgstør. Delrapporten behandler følgende lokaliteter: Thyborøn, Lemvig, Thisted, Amtoft, Nykøbing Mors, Hvalpsund, Løgstør, Skive, Rønbjerg, samt Struer.

Motivationen for gennemførelsen af den udvidede analyse er, at lokal vindstuvning i Limfjorden har en betydelig indflydelse på vandstanden på de specifikke lokaliteter i fjorden, hvormed effekten fra høfdeudvidelsen er afhængig af stormforløbet (varighed, vindretning/styrke, vandstande ved Thyborøn og Hals). Eksempelvis kan nævnes, at stormen Bodil d. 6. december 2013, medførte en højvandssituation på 183 cm ved Lemvig, hvilket er den 2. højeste registrerede højvandshændelse i Lemvig. Ved Thyborøn Havn var vandstanden under stormen Bodil dog ikke engang blandt de højeste 25 registrerede hændelser, jf. (Kystdirektoratet, 2018).

Ift. at tage højde for den lokale højvandstandssituations afhængighed af de enkelte stormforløb, og dermed opnå en mere robust vurdering for effekten af projektforslaget med en høfdeudvidelse i Thyborøn Kanal, vurderes der således i nærværende tillægsanalyse på effekten fra høfdeudvidelsen på den statistiske 100-års vandstand for hver af de udvalgte 10 vurderede lokaliteter. Den statistiske 100-års vandstand for hver lokalitet er estimeret ved simuleringer af minimum de fem storme, der har givet anledning til den højeste målte vandstand på den pågældende lokalitet. Denne fremgangsmåde tager således højde for den potentielle varierende effekt fra høfdeudvidelsen under forskellige stormforløb for forskellige lokaliteter.

100-års vandstanden er et statistisk mål for den vandstand, som i gennemsnit (med ca. 63 % sandsynlighed) vil forekomme én gang pr. 100 år. Indenfor perioden frem til år 2060 vil der med ca. 34 % sandsynlighed forekomme én hændelse med som medfører en 100-års vandstand.

1. OPSUMMERING AF OVERORDNEDE KONKLUSIONER

De 5 højeste vandstande på de 10 lokaliteter i den vestlige del af Limfjorden, hvortil der foreligger en højvandstatistik, er defineret ved i alt 11 stormflodshændelser, som således er modelleret og analyseret i nærværende delrapport. De 11 stormhændelser forekommer indenfor en 36 års periode og der er modelleret henholdsvis eksisterende forhold (referenceforhold), fremtidige forhold uden høfdeudvidelse (0-alternativ), samt fremtidige forhold inkl. høfdeudvidelse (under hensyntagen til den morfologiske udvikling af Thyborøn kanal samt fremtidige forventede klimaændringer).

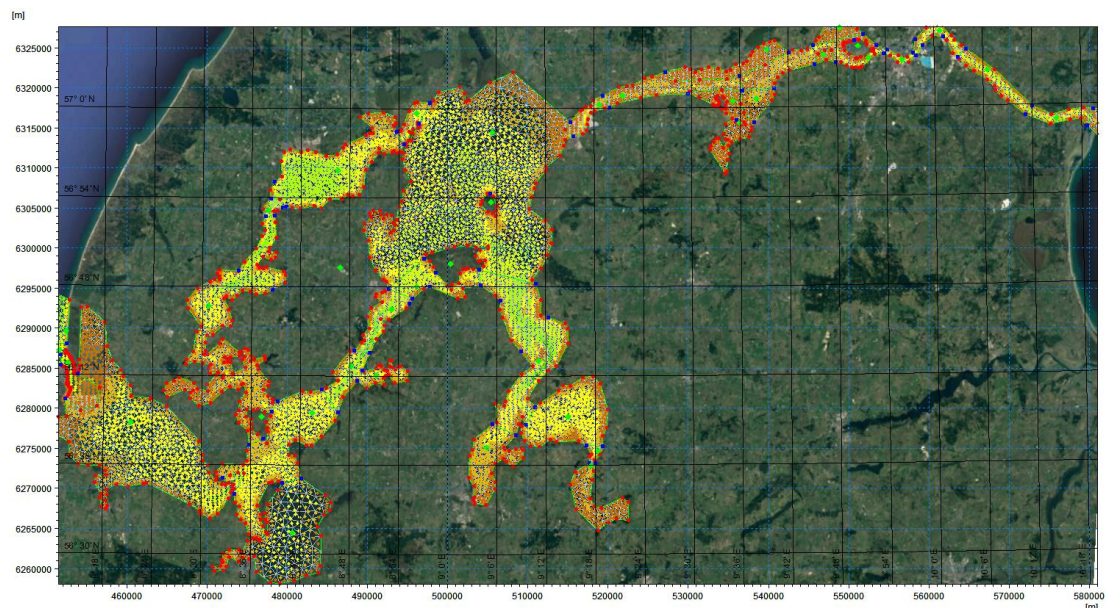
Fremgangsmåde og konklusioner fra analysen er i hovedtræk:

- For hver af de 10 lokaliteter i Limfjorden er der gennemført en statistisk analyse af de simulerede fem højeste stormflodsvandstande inkl. indflydelsen fra høfdeudvidelsen. Dette har således for hver lokalitet udmundet i såkaldte højvandstatistikker som er vurderet til at give en kvalificeret indsigt i effekten af høfdeudvidelsen. Højvandstatistikkerne er dog behæftet med en vis usikkerhed i forhold til at kunne give et statistisk kvantitativt estimat (på grund af det relativt begrænsede antal storme i analysen). I forhold til at tage højde for den relativt begrænsede datapopulation er der dog foretaget en normalisering af de beregnede 100-års vandstande således at de stemmer overens med Kystdirektoratets højvandstatistik (Kystdirektoratet, 2018). Desuden er konklusionerne fra analyserne baseret på relative betragtninger med udgangspunkt i de modellerede referenceforhold.
- Baseret på 100-års vandstande for eksisterende og fremtidige forhold er det konkluderet, at høfdeudvidelsen ved Thyborøn kanal kan medføre en reduktion af 100-års vandstanden ved Thyborøn Havn (-4 %) samt ved Lemvig (-14 %), og ved Thisted medfører høfdeudvidelsen ca. status-quo for 100-års vandstanden. Ved de resterende undersøgte lokaliteter må der forventes en forøgelse af 100-års vandstanden på mellem ca. 1 % ved Skive og op til ca. 8 % ved Rønbjerg. Ved Struer, Nykøbing Mors, Amtoft, Hvalpsund, samt Løgstør kan der forventes en forøgelse af 100-års vandstanden på imellem ca. 3 – 5 %. I 0-alternativet (dvs. fremtidige forhold uden høfdeudvidelse) er forøgelsen af 100-års vandstanden generelt ca. 15 % (og op til ca. 19 % ved Lemvig) sammenlignet med eksisterende forhold. Den overordnede konklusion er således, at en høfdeudvidelse generelt vil have en positiv effekt på 100 års vandstanden i alle de undersøgte lokaliteter, men at den ikke for alle lokaliteter kan sikre at nuværende 100 års vandstandsforhold bibeholdes.
- Udover indflydelsen fra høfdeudvidelsen på 100-års vandstandene i Limfjorden er der desuden undersøgt indflydelsen på varigheden af fremtidige stormflodsvandstande sammenlignet med det nuværende maksniveau af vandstanden. Hertil er det konkluderet, at der ved 0-alternativet (dvs. fremtidige forhold i tilfældet uden høfdeudvidelse) forekommer en signifikant forøgelse af varigheden for maks. vandstanden af stormfloden sammenlignet med det nuværende niveau, hvorimod varigheden, til sammenligning i tilfældet med høfdeudvidelsen, vil være forholdsvis begrænset.

2. METODE

De beregnede stormflodsvandstande i den statistiske analyse baseres på numerisk simulering i samme model som tidligere beskrevet og anvendt i bilag 1 i hovedrapporten dvs. MIKE3 FM-model for Limfjorden bestående af 23.776 beregningslementer i 10 vertikale såkaldte sigma-lag. Anvendte beregningsdomæne er illustreret i Figur 2-1.

De udvalgte stormflodshændelser, som simuleres i den numeriske model, er videre beskrevet i afsnit 3.



Figur 2-1: Illustration af det anvendte beregningsdomæne i limfjordsmodellen til simulering af vandstande i Limfjorden.

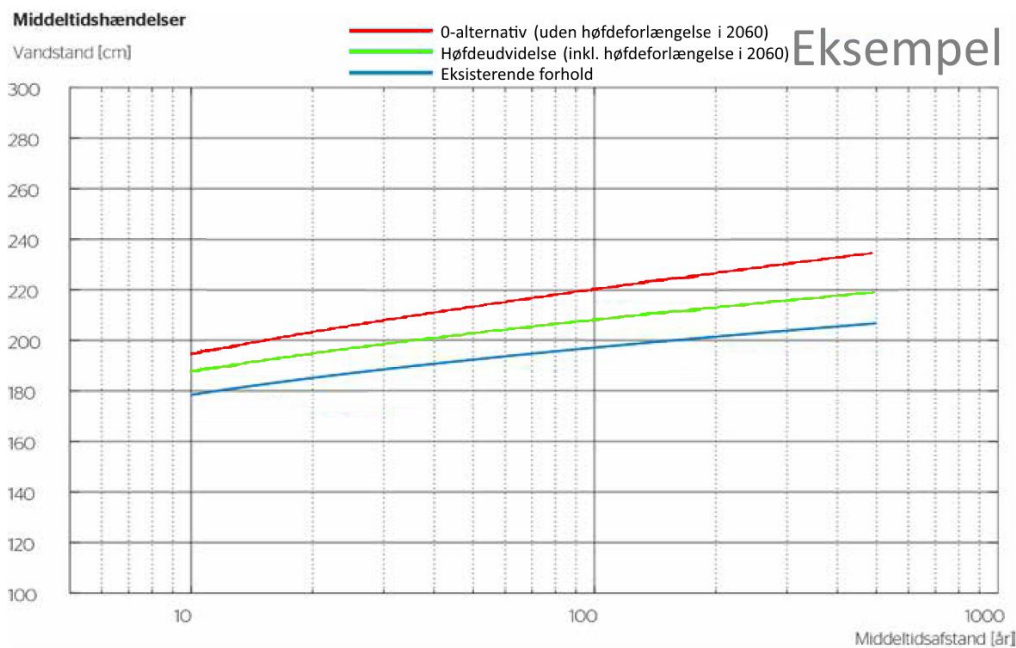
På grund af indflydelsen fra den geografiske placering i Limfjorden på stormflodsvandstanden (bl.a. på grund af vindstuvning) evalueres effekten fra hofdeudvidelsen ved flere specifikke lokaliteter. Partnerskabet har således til nærværende analyse udvalgt lokaliteterne i Tabel 2-1. Fælles for de evaluerede lokaliteter er, at de alle er beliggende vest for Aggersund i den vestlige del af Limfjorden, hvor hofdeudvidelsen formodes at have den største effekt på stormflodsvandstanden.

Lokalitet	Kommune	Inkluderet i den officielle højvandsstatistik (Kystdirektoratet, 2018)
Thyborøn	Lemvig Kommune	Ja
Lemvig	Lemvig Kommune	Ja
Thisted	Thisted Kommune	Ja
Amtoft	Thisted Kommune	Nej
Nykøbing Mors	Morsø Kommune	Nej
Hvalpsund	Vesthimmerlands Kommune	Ja
Løgstør	Vesthimmerlands Kommune	Ja
Skive	Skive Kommune	Ja
Rønbjerg	Skive Kommune	Nej

Struer	Struer Kommune	Nej
--------	----------------	-----

Tabel 2-1. Evaluerede lokaliteter i forhold til den fremtidige vandstandsstatistik i Limfjorden.

For hver af de ti lokaliteter i Tabel 2-1 udarbejdes en vandstandsstatistik for hvert af tilfældene; eksisterende situation (referenceforhold) samt fremtidige situation (2060) med/uden høfdeudvidelse, se eksempel i Figur 2-2.



Figur 2-2. Eksempel på opdateret højvandstatistik som inkluderer 0-alternativet samt høfdeforlængelsen (dvs. vandstandsstatistikken for 2060-forhold med/uden høfdeforlængelse).

Ved at basere vurderingerne og konklusionerne på en udarbejdet vandstandsstatistik, i stedet for blot at vurdere på effekten fra høfdeudvidelsen under enkelthændelser, tages der højde for den potentielle varierende effekt fra høfdeudvidelsen på den statistiske 100-års stormflodvandstand, som ofte anvendes til f.eks. designvandstand eller til vurdering af potentielle skadesomkostninger. Der vurderes i nærværende analyse således udelukkende på 100-års vandstande, og dermed ikke på statistiske højvandstande med andre returperioder.

3. UDVÆLGELSE AF STORMFLODER OG DATAGRUNDLAG

Der er til den nærværende analyse, i samarbejde med Partnerskabet, udvalgt et antal storme baseret på historiske registreringer i (Kystdirektoratet, 2018). I forhold til den Vestlige Limfjord findes der hertil måledata fra seks ud af de 10 lokaliteter; Thyborøn, Hvalpsund, Lemvig, Løgstør, Skive og Thisted.

Det statistiske grundlag for beregning af en højvandsstatistik vil øges med antallet af storme. Til nærværende analyse er det af Partnerskabet besluttet, at evalueringen skal baseres på de fem højeste højvandshændelser ved hver lokalitet, hvilket vurderes at give en relativt kvalificeret indsigt i effekten af høfdeudvidelsen. Resultatet vil kunne give en kvalitativ beskrivelse af effekten fra høfdeudvidelsen, men vil dog stadig være behæftet med statistisk usikkerhed i forhold til at kunne give et kvantitativt estimat. Det bør dog bemærkes, at effekten af høfdeudvidelsen baseres på en relativ sammenligning af eksisterende forhold og fremtidige forhold (med/uden høfdeudvidelsen), hvormed det statistiske grundlag for beregning af eksisterende forhold er det samme som for beregning af fremtidige forhold. Usikkerheden vurderes derfor primært at være relateret til den beregnede 100 års vandstand og i mindre grad relateret til vurderingen af selve effekten modellerne imellem.

I Tabel 3-1 er med markering vist de højeste stormflodsvandstande for hver af de seks lokaliteter i den vestlige Limfjord baseret på (Kystdirektoratet, 2018), og som det fremgår af tabellen, vil der til analysen af de fem højeste højvandshændelser for hver af de 10 lokaliteter kræves en simulering af ekstra 10 storme (udover den allerede simulerede 2005-storm). Af tabellen fremgår det yderligere, som tidligere nævnt, at der forekommer en vis variation i rangeringen af højvandshændelserne ved de specifikke lokaliteter, hvilket yderligere understreger nødvendigheden for at inkludere et større antal geografiske beliggenheder i Limfjorden i analysen af effekten fra høfdeudvidelsen.

Den anvendte betegnelse i det følgende for de simulerede storme fremgår af Tabel 3-1.

Storm (dato)	Navn	Ref. i rapport	Hvalpsund	Lemvig	Løgstør	Skive	Thisted	Thyborøn Havn
24. nov. 1981 -> 25. nov. 1981	-	"Storm 1"		X (#6, 174 cm)	X (#2, 191 cm)			X (#1, 187 cm)
18. jan. 1983	-			X (#9, 165 cm)				
1. jan. 1984 -> 3. jan. 1984	-				X (#9, 168 cm)			
27. feb. 1990 -> 28. feb. 1990	-	"Storm 2"			X (#4, 178 cm)			X (#4, 177 cm)
28. okt. 1998 -> 29. okt. 1998	-		X (#10, 137 cm)					
30. jan. 2000	-		X (#7, 146 cm)			X (#9, 160 cm)		
8. jan. 2005 -> 10. jan. 2005	-	"Storm 2005"	X (#1, 172 cm)	X (#4, 181 cm)	X (#1, 205 cm)	X (#3, 176 cm)	X (#1, 166 cm)	X (#3, 185 cm)
2. jan. 2007	-						X (#10, 124 cm)	
12. jan. 2007 -> 13. jan. 2007	-	"Storm 3"	X (#3, 165 cm)	X (#7, 167 cm)	X (#7, 173 cm)	X (#7, 167 cm)	X (#4, 151 cm)	X (#5, 174 cm)
19. mar. 2007	-		X (#8, 139 cm)	X (#8, 167 cm)			X (#9, 133 cm)	
27. nov. 2011 -> 28. nov. 2011	-	"Storm 4"	X (#4, 158 cm)		X (#5, 177 cm)	X (#6, 170 cm)	X (#8, 140 cm)	

Storm (dato)	Navn	Ref. i rapport	Hvalpsund	Lemvig	Løgstør	Skive	Thisted	Thyborøn Havn
9. dec. 2011 -> 10. dec. 2011	-	"Storm 5"	X (#5, 157 cm)	X (#3, 182 cm)	X (#8, 170 cm)	X (#8, 166 cm)	X (#3, 153 cm)	X (#2, 186 cm)
4. jan. 2012 -> 5. jan. 2012	-	"Storm 6"	X (#9, 138 cm)				X (#5, 150 cm)	
6. dec. 2013	"Bodil"	"Storm 7"		X (#2, 183 cm)		X (#4, 175 cm)		
10. jan. 2015 -> 11. jan. 2015	"Egon"	"Storm 8"	X (#2, 171 cm)	X (#1, 195 cm)	X (#3, 179 cm)	X (#1, 188 cm)	X (#2, 164 cm)	
29. nov. 2015 -> 30. nov. 2015	"Gorm"			X (#10, 163 cm)				
6. dec. 2015	"Helga"	"Storm 9"	X (#6, 148 cm)		X (#10, 168 cm)	X (#5, 174 cm)	X (#6, 146 cm)	
29. jan. 2016 -> 3. feb. 2016	-					X (#10, 159 cm)	X (#7, 146 cm)	
24. dec. 2016 -> 27. dec. 2016	"Urd"	"Storm 10"		X (#5, 177 cm)		X (#2, 177 cm)		
12. jan. 2017	-				X (#6, 176 cm)			

Tabel 3-1. De 10 højeste højvandshændelser på de seks lokaliteter, hvortil der foreligger måledata (Kystdirektoratet, 2018). Rangering af vandstande samt peak-vandstanden fra de forskellige storme og for de pågældende lokaliteter er angivet i (). Top 1 storm for hver lokalitet er angivet med "X", top 5 storme for hver lokalitet er angivet med "X", top 10 storme for hver lokalitet er angivet med "X", allerede simulerede storme farves med og simulerede storme i den udvidede analyse farves med .

Det antages, at de fem højeste vandstande for de fem lokaliteter, hvor der ikke foreligger måledata for er indeholdt i de 11 modellerede storme.

3.1 Datagrundlag for evaluerede stormflodshændelser

Kystdirektoratet har til nærværende analyse stillet målte vandstandstidsserier til rådighed. Hertil har det desuden været nødvendigt at digitalisere simulerede vandstande fra (DHI, 2011) til anvendelse ved simulering af Storm 1, da de målte tidsserier ikke i tilstrækkelig grad dækker denne.

Ift. randbetingelser i modellen er anvendt følgende data:

- **Hals Barre:** Målt tidsserie tilgængelig i perioden 10-09-1992 – 07-03-2019. Tidsserien er anvendt som den østlige vandstandsrandbetingelse i simuleringerne for Storm 3 – 10.
- **Attrup:** Målt tidsserie tilgængelig i perioden 30-12-1985 – 31-12-2016. Tidsserien er anvendt som den østlige vandstandsrandbetingelse i simuleringerne for Storm 2.
- **Aalborg:** Simuleret tidsserie tilgængelig i perioden 23-11-1981 – 27-11-1981. Tidsserien er anvendt som den østlige vandstandsrandbetingelse i simuleringerne for Storm 1.
- **Thyborøn Havn:** Målt tidsserie tilgængelig i perioden 30-12-1975 – 23-02-2019. Tidsserien er anvendt som den vestlige randbetingelse i simuleringerne for Storm 1 – 10.

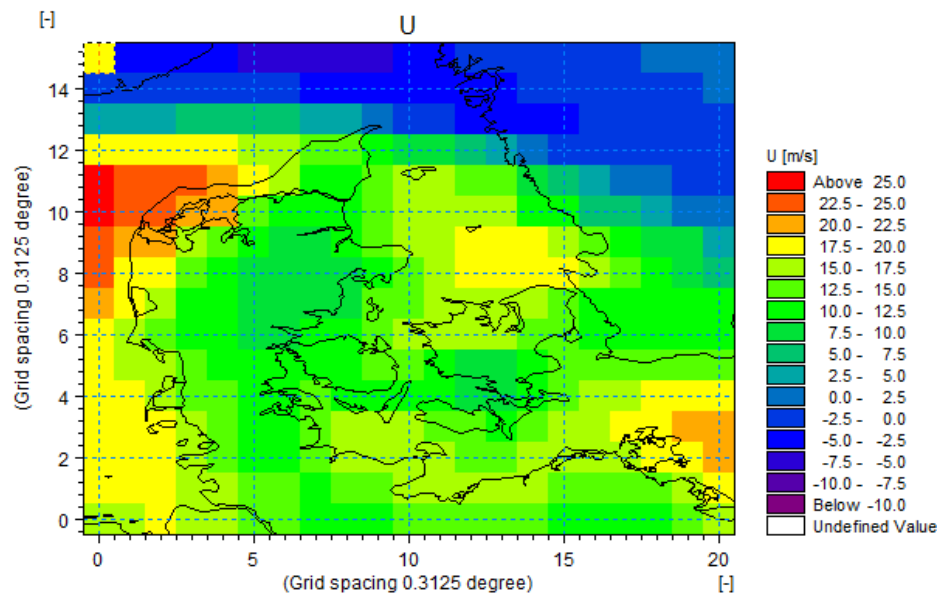
Ift. validering af eksisterende forhold er anvendt følgende data:

- **Thyborøn:** Målt tidsserie tilgængelig i perioden 28-08-1974 – 23-02-2019. Tidsserien er anvendt til validering af simuleringer for den eksisterende situation (referenceforhold).

- **Lemvig:** Målt tidsserie tilgængelig i perioden 15-10-2001 – 01-01-2017. Tidsserien er anvendt til validering af simuleringer for den eksisterende situation (referenceforhold).
- **Thisted:** Målt tidsserie tilgængelig i perioden 26-10-2001 – 01-03-2017. Tidsserien er anvendt til validering af simuleringer for den eksisterende situation (referenceforhold).
- **Nykøbing Mors:** Målt tidsserie tilgængelig i perioden 18-08-2005 – 01-03-2017. Tidsserien er anvendt til validering af simuleringer for den eksisterende situation (referenceforhold).
- **Hvalpsund:** Målt tidsserie tilgængelig i perioden 01-08-1995 – 13-05-2016. Tidsserien er anvendt til validering af simuleringer for den eksisterende situation (referenceforhold).
- **Løgstør:** Målt tidsserie tilgængelig i perioden 20-11-1985 – 01-03-2017. Tidsserien er anvendt til validering af simuleringer for den eksisterende situation (referenceforhold).
- **Skive:** Målt tidsserie tilgængelig i perioden 24-07-2000 – 01-03-2017. Tidsserien er anvendt til validering af simuleringer for den eksisterende situation (referenceforhold).
- **Rønbjerg:** Målt tidsserie tilgængelig i perioden 30-10-2001 – 27-12-2016. Tidsserien er anvendt til validering af simuleringer for den eksisterende situation (referenceforhold).
- **Struer:** Målt tidsserie tilgængelig i perioden 21-01-2015 – 14-03-2019. Tidsserien er anvendt til validering af simuleringer for den eksisterende situation (referenceforhold).

På samme vis som i bilag 1 i hovedrapporten er der til den vestlige randbetingelse anvendt et tillæg på 5 cm på vandstanden for at tage højde for effekten fra bølger (bølgerreaktionskræfternes effekt på vandstanden) under stormhændelsen. Dette er gjort for alle de evaluerede stormhændelser i nærværende analyse.

For at inkludere vindens forcering af modellen er anvendt såkaldte CFSR-data fra NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) til alle evaluerede stormhændelser. Et eksempel på vindforceringsdata for Storm 8 (stormen Egon) er vist i Figur 3-1. Figuren viser stormpeaket.

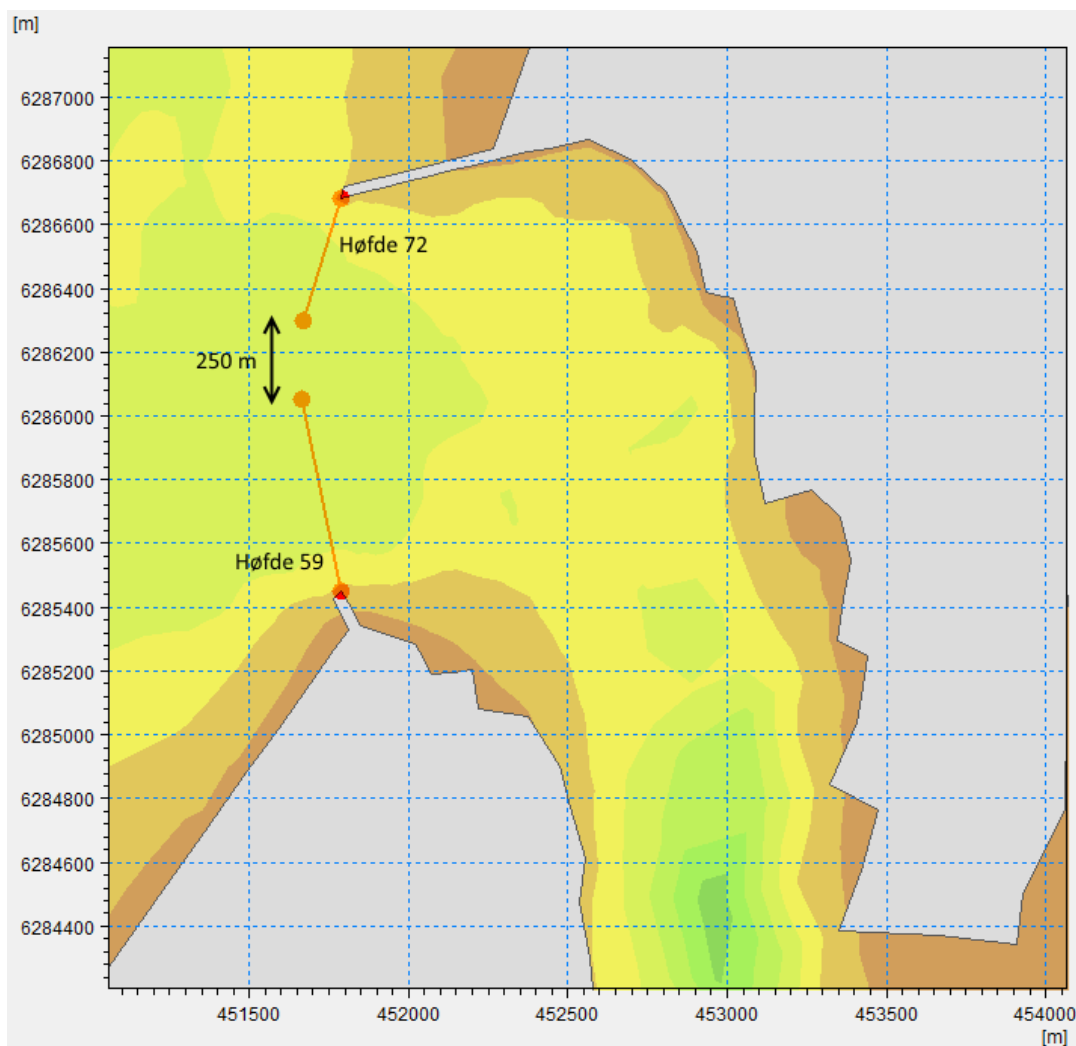


Figur 3-1: Eksempel på anvendte CFSR-data til forcering af model for Storm 8. Figuren viser den vandrette vindhastighedskomponent (fra vest mod øst) under stormpeaket.

4. SPECIFIKKE FORUDSÆTNINGER FOR MODELLERINGEN

Der anvendes til nærværende analyse samme modelopsætning som beskrevet i bilag 1 i hovedrapporten og for modelleringen antages det således, at alle storme i den eksisterende situation forekommer for et tværsnit i Thyborøn kanal som svarer til tværsnittet i år 2005.

I forhold til simuleringen af den fremtidige situation anvendes det forudsatte 2060-tværsnit i Thyborøn kanal med/uden en indsnævring af kanalen til en bredde på 250 m og med en maksimal vanddybde på 13 m, dvs. samme modelopsætning som blev anvendt under modelleringen af den fremtidige situation i simuleringerne for 2005-stormen. Indsnævringen af Thyborøn kanal antages i modellen udført ved at forlænge både højde 59 samt højde 72, som vist på **Figur 4-1**, hvormed der opretholdes en besejlingsrute umiddelbart i midten af kanalen. Vanddybden på 13 m antages fastholdt ved etablering af bundsikring.



Figur 4-1: Illustration af den implementerede højdeudvidelse i modellen.

Vedr. indflydelse fra klimaændringer antages desuden samme forudsætninger som tidligere beskrevet og anvendt i bilag 1 i hovedrapporten. Dette medfører således, at der anvendes en vandstandsforøgelse på 0,24 m ved Thyborøn samt Hals ift. at tage højde for indflydelsen fra klimaændringer i år 2060.

Der gennemføres for hver stormhændelse en simulering af både eksisterende og fremtidige forhold (med/uden høfdeudvidelsen), hvilket er den samme fremgangsmåde, som blev anvendt til de allerede gennemførte simuleringer af stormen i 2005. Desuden baseres evalueringen af effekten fra høfdeudvidelsen, som i de tidligere analyser, hovedsageligt på en relativ sammenligning af stormflodsvandstandene under den eksisterende og den fremtidige situation, hvormed eventuelle unøjagtigheder i forbindelse med modelkalibreringen forventes udlignet.

Hver stormflodshændelse simuleres med en opvarmningsperiode før stormflodspeaket på min. en uge.

4.1 Specifikke forudsætninger for den statistiske analyse

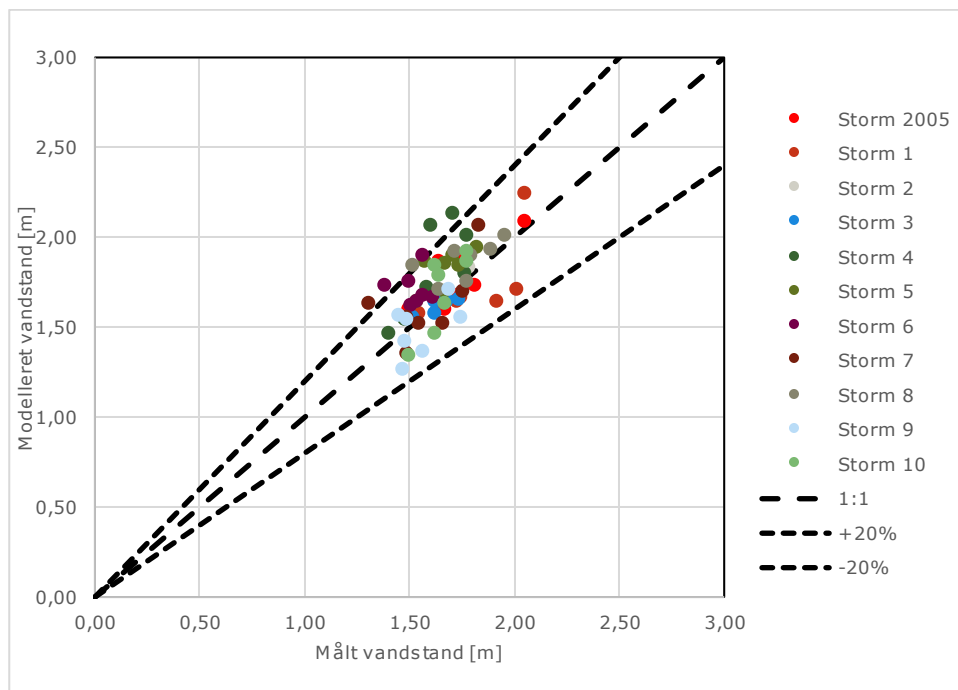
Til den statistiske analyse kræves en rangering af højvandshændelserne. Dog foreligger der, jf. Tabel 2-1 ikke en højvandstatistik for lokaliteterne; Struer, Nykøbing Mors, Amtoft, samt Rønbjerg, og det er derfor for disse lokaliteter antaget, at de i alt 11 simulerede stormhændelser, som har medført de fem højeste observerede stormflodsvandstande ved Thyborøn, Lemvig, Thisted, Skive, Hvalpsund, Løgstør, indenfor perioden af de 11 evaluerede storme (36 år), også medfører de fem højeste stormflodsvandstande her.

De evaluerede stormhændelser i nærværende analyse er udvalgt ud fra historiske målte vandstande i Limfjorden, baseret på (Kystdirektoratet, 2018), velvidende at varigheden for de målte tidsserier på lokaliteterne er relativt kort. Derfor er det sandsynligt, at der tidligere har indtruffet højvandstande under stormhændelser, som er mere ekstreme end de evaluerede stormhændelser i denne analyse. Ift. at reducere effekten fra de begrænsede varigheder for tidsserierne på f.eks. 100-års vandstanden er der i den statistiske analyse i nærværende studie inkluderet såkaldt Monte Carlo simulering.

Ift. at opnå det bedste fit i den statistiske analyse er der undersøgt en række forskellige fordelingsfunktioner; *Weibull*, *Log-Normal*, *Gumbel*, samt evalueret forskellige fittingmetoder; "*Method of Moments*" og "*Maximum Likelihood*" og bedste fit er evalueret via bl.a. såkaldt "*Kolmogorov-Smirnov*"-test.

5. VALIDERING AF MODEL

Sammenfald imellem målte og modellerede vandstande ved Hvalpsund, Thyborøn, Lemvig, Løgstør, Skive, Thisted, samt Thyborøn Havn, og for de 11 evaluerede stormhændelser, er vist i Figur 5-1. Som det fremgår af figuren, er der en relativ god overensstemmelse imellem målte og modellerede vandstande for størstedelen af hændelserne.

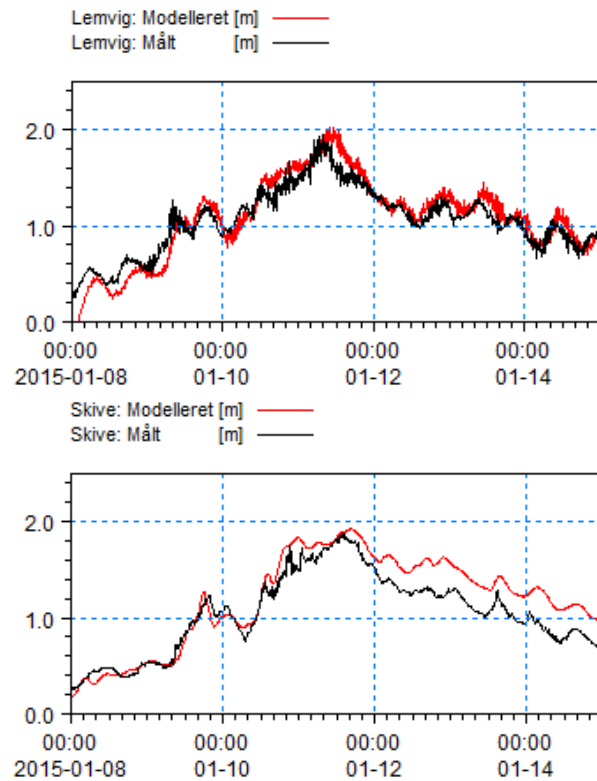


Figur 5-1: Sammenfald imellem målte og modellerede vandstande.

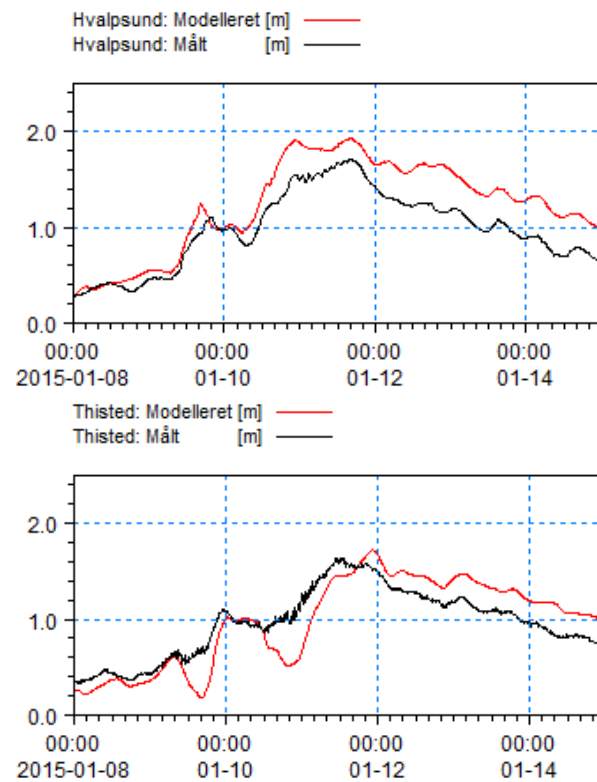
Som det fremgår af Figur 5-1, forekommer der i enkelte tilfælde en vis forskel imellem målte og modellerede vandstande, hvilket bl.a. kan skyldes;

- lokalt ændrede dybdeforhold i bl.a. Thyborøn kanal og/eller ved andre snævre passager i Limfjorden ved den pågældende hændelse, som der i nærværende model ikke er taget højde for. Som nævnt i afsnit 4 er der i modellen til nærværende analyser forudsat dybdeforhold svarende år 2005 til alle stormhændelser
- fejlmålinger, som kan opstå under ekstremhændelserne
- effekter fra naturlige variationer fra storm til storm, som modellen kun til en vis udstrækning tager højde for.

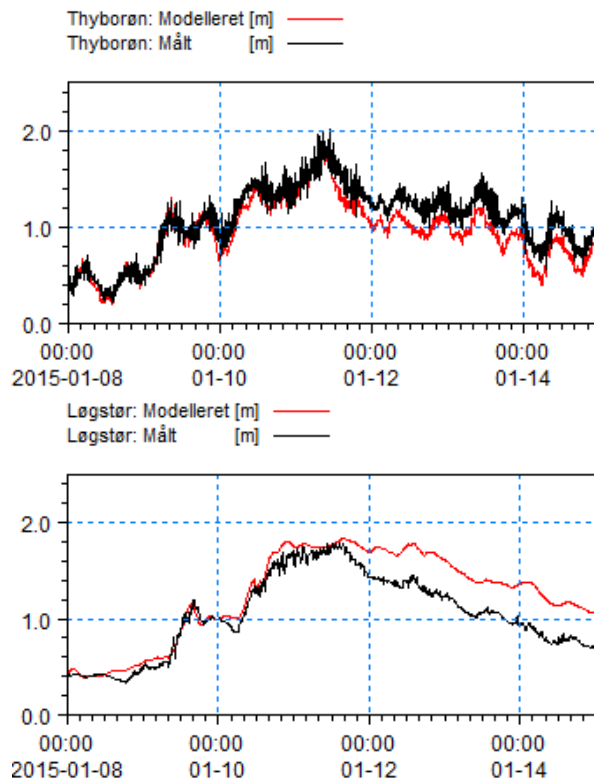
Eksempler på sammenligninger imellem målte og simulerede tidsserier for storm 8 (stormen *Egon*) er vist i Figur 5-2 - Figur 5-4 for forskellige lokaliteter. Igen fremgår det, at der er forholdsvis god overensstemmelse imellem målte og simulerede stormflodsforløb.



Figur 5-2: Målt og simulerede tidsserie for Lemvig (venstre) og Skive (højre) under stormen "Egon" (Storm 8).

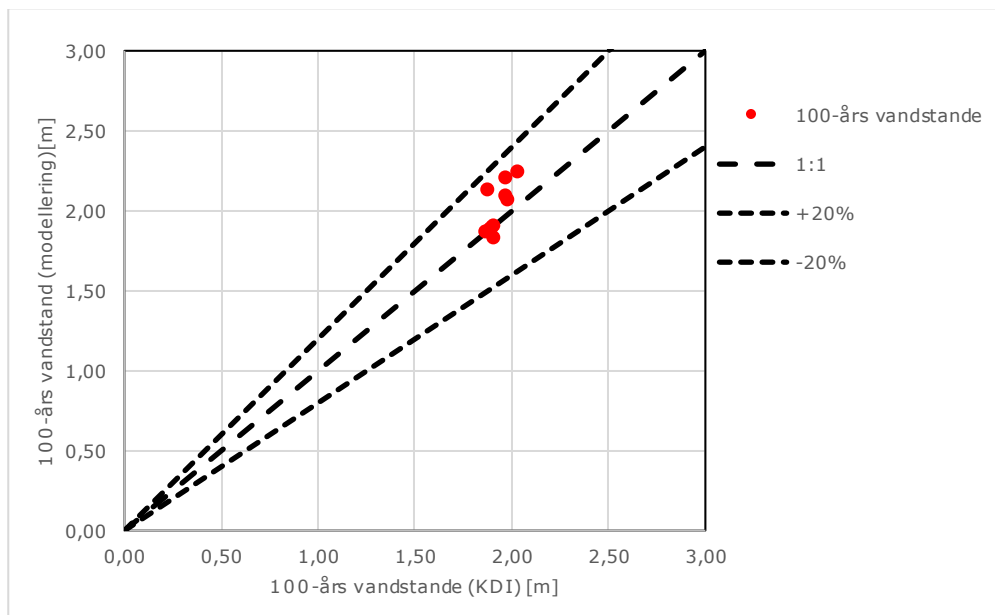


Figur 5-3: Målt og simulerede tidsserie for Hvalpsund (venstre) og Thisted (højre) under stormen "Egon" (Storm 8).



Figur 5-4: Målt og simulerede tidsserie for Thyborøn Havn (venstre) og Løgstør (højre) under stormen "Egon" (Storm 8).

Sammenfald imellem 100-års vandstande baseret på modellerede stormflodshændelser i nærværende analyse samt 100-års vandstande fra (Kystdirektoratet, 2018) er vist i Figur 5-5. 100-års vandstandene er ikke baseret på samme statistiske grundlag, men som det fremgår af Figur 5-5 er der dog stadig forholdsvis god overensstemmelse.



Figur 5-5: Sammenfald imellem 100-års vandstande baseret på modellering samt 100-års vandstande fra Kystdirektoratets højvandstatistik (Kystdirektoratet, 2018).

De mindre uoverensstemmelser imellem målte og modellerede vandstande vurderes ikke at påvirke konklusionerne fra analyserne i væsentlig grad, da resultaterne fra analysen hovedsageligt skal betragtes som relative sammenligninger, og ikke som eksakte 100-års vandstandsstande for de enkelte lokaliteter. Det gælder både ved sammenligning imellem vandstande i den eksisterende situation (referenceforhold) og den fremtidige situation med og uden høfdeudvidelse. Det skal desuden nævnes, at de modellerede, statistiske vandstande, som tidligere nævnt i afsnit 3, er baseret på et begrænset antal stormflodshændelser, hvilket har betydning for usikkerheden for de beregnede 100-års vandstandene.

6. RESULTATER FRA ANALYSEN

I det følgende præsenteres modelresultater for indflydelse fra kanalindsnævring for de angivne scenarier ved henholdsvis:

1. Statistiske 100-års stormflodsvandstande ved eksisterende og fremtidige forhold (i situationen med/uden høfdeudvidelse)
2. Varigheder af fremtidige maks. stormflodsvandstande sammenlignet med nutidige forhold

6.1 Stormflodsvandstande i dag og i fremtiden

På grund af det relativt begrænsede antal stormflodsvandstande som indgår i vandstandsstatistikken i nærværende analyse, er 100-års vandstandene fra analysen normaliseret, således at 100-års vandstanden for eksisterende forhold svarer til 100-års vandstanden i (Kystdirektoratet, 2018), som er baseret på en statistisk analyse af et større antal stormflodshændelser. Dette er dog udelukkende gennemført for de lokaliteter hvortil der forekommer en højvandstatistik i (Kystdirektoratet, 2018). For de lokaliteter, som derimod ikke indgår i (Kystdirektoratet, 2018), er der anvendt 100-års vandstanden som er direkte fremkommet ved statistisk analyse baseret på modelresultater. Anvendte skaleringsfaktorer til normalisering af 100-års vandstande ift. (Kystdirektoratet, 2018) er givet i Tabel 6-1.

Lokalitet	Normaliseringsfaktor [-]
Thyborøn*	0.94
Lemvig*	0.90
Struer	1.00
Thisted*	1.04
Nykøbing Mors	1.00
Amtøft	1.00
Skive*	0.91
Rønbjerg	1.00
Hvalpsund*	0.88
Løgstør*	0.96

Tabel 6-1. Anvendte skaleringsfaktorer til normalisering af modellerede 100-års vandstande ift. (Kystdirektoratet, 2018). * angiver de lokaliteter hvortil der forekommer en vandstandsstatistik.

6.2 Højvandstatistik for eksisterende og fremtidige forhold

Højvandstatistikker for eksisterende og fremtidige forhold i tilfældene med og uden høfdeudvidelse i Thyborøn kanal er vist i Figur 6-1 - Figur 6-10 for de 10 lokaliteter i Tabel 2-1. Maksimale vandstande for 0-alternativet og fremtidige forhold for de 11 evaluerede storme, der er anvendt i vandstandsstatistikkerne, er angivet i henholdsvis Tabel 6-2 og Tabel 5. I tabellerne er anvendt skaleringsfaktorerne i Tabel 6-1, og derfor er vandstandene for 2005-stormen ikke identiske med de tidligere præsenterede vandstande for 2005-stormen i bilag 1 i hovedrapporten. Det relative forhold imellem 0-alternativet og den fremtidige situation er dog uændret.

Højvandstatistikkerne er normaliseret ved anvendelse af normaliseringsfaktorerne i Tabel 6-1, således at 100-års vandstandene er i overensstemmelse med (Kystdirektoratet,

2018), hvilket i princippet svarer til en parallelforskydning af kurverne i Figur 6-1 - Figur 6-10. Det skal dog hertil nævnes, at da normaliseringen udelukkende er foretaget på 100-års vandstanden, vil dette ikke nødvendigvis medføre en overensstemmelse ift. stormflodsvandstande med andre returperioder i (Kystdirektoratet, 2018). I nærværende analyse er effekten fra høfdeudvidelsen dog, som tidligere nævnt, udelukkende baseret på indflydelsen på 100-års vandstanden, samt på relative betragtninger, og dermed vil den potentielle uoverensstemmelse med andre returperioder ikke påvirke konklusionerne. Grundet det relativt begrænsede datagrundlag til den statistiske analyse er det dog vigtigt, at de viste statistikker i Figur 6-1 - Figur 6-10 ikke anvendes til design, men udelukkende anvendes til relative sammenligninger imellem eksisterende forhold samt fremtidige forhold.

Fremtidige forhold - år 2060 (0-alternativ): Vandstande [m]											
	Storm 1	Storm 2	Storm 3	Storm 4	Storm 5	Storm 6	Storm 7	Storm 8	Storm 9	Storm 10	2005-storm
Thyborøn	2.09	2.19	2.01	1.74	2.21	2.09	1.94	2.21	1.68	1.71	2.15
Lemvig	2.43	2.12	1.77	1.97	2.10	1.93	2.16	2.11	1.58	2.05	1.96
Struer	2.06	2.20	1.83	1.99	2.02	2.10	2.14	2.17	1.74	2.09	1.97
Thisted	1.96	2.27	1.90	1.80	1.99	2.01	1.72	2.06	1.61	1.68	1.94
Mors	1.93	2.16	1.87	1.86	2.00	1.96	1.81	2.06	1.69	1.74	1.89
Amtøft	1.90	2.16	1.87	1.79	2.05	1.96	1.70	2.00	1.82	1.66	1.86
Skive	1.80	2.00	1.76	2.21	1.94	1.89	1.83	2.03	1.70	1.97	1.81
Rønbjerg	1.95	2.17	1.93	2.10	2.14	2.00	1.84	2.16	1.89	1.88	2.14
Hvalpsund	1.73	1.92	1.70	2.07	1.89	1.81	1.69	1.96	1.63	1.83	1.96
Løgstør	1.85	2.03	1.86	2.19	2.10	1.91	1.74	2.10	1.94	1.99	2.24

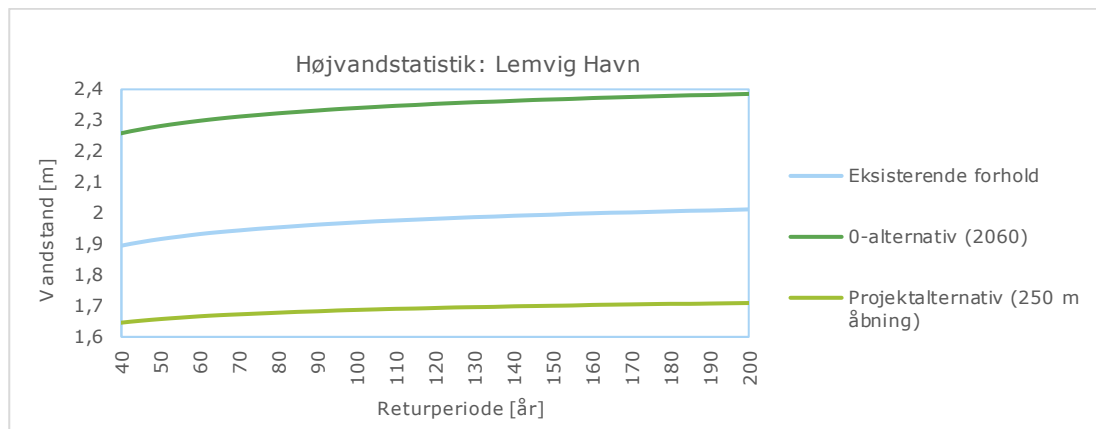
Tabel 6-2. Vandstande for de 11 evaluerede storme under tilfældet med fremtidige forhold i år 2060 uden høfdeudvidelse (0-alternativ).

Fremtidige forhold - år 2060 (inkl. 250 m høfdeudvidelse): Vandstande [m]											
	Storm 1	Storm 2	Storm 3	Storm 4	Storm 5	Storm 6	Storm 7	Storm 8	Storm 9	Storm 10	2005-storm
Thyborøn	1.38	1.88	1.64	1.57	1.65	1.77	1.40	1.65	1.23	1.45	1.46
Lemvig	1.56	1.81	1.47	1.47	1.60	1.77	1.66	1.69	1.19	1.51	1.40
Struer	1.73	1.96	1.63	1.59	1.74	1.91	1.73	1.79	1.39	1.79	1.97
Thisted	1.64	2.02	1.70	1.56	1.74	1.71	1.36	1.80	1.39	1.45	1.68
Mors	1.60	1.93	1.66	1.52	1.73	1.67	1.47	1.71	1.38	1.51	1.61
Amtøft	1.61	1.94	1.66	1.55	1.72	1.64	1.36	1.81	1.50	1.43	1.86
Skive	1.51	1.77	1.57	1.97	1.72	1.58	1.57	1.69	1.40	1.86	1.67
Rønbjerg	1.64	1.94	1.72	1.84	1.85	1.68	1.50	1.83	1.56	1.77	2.14
Hvalpsund	1.45	1.71	1.52	1.84	1.66	1.51	1.39	1.69	1.36	1.73	1.87
Løgstør	1.56	1.82	1.67	1.96	1.91	1.64	1.42	1.86	1.64	1.90	2.16

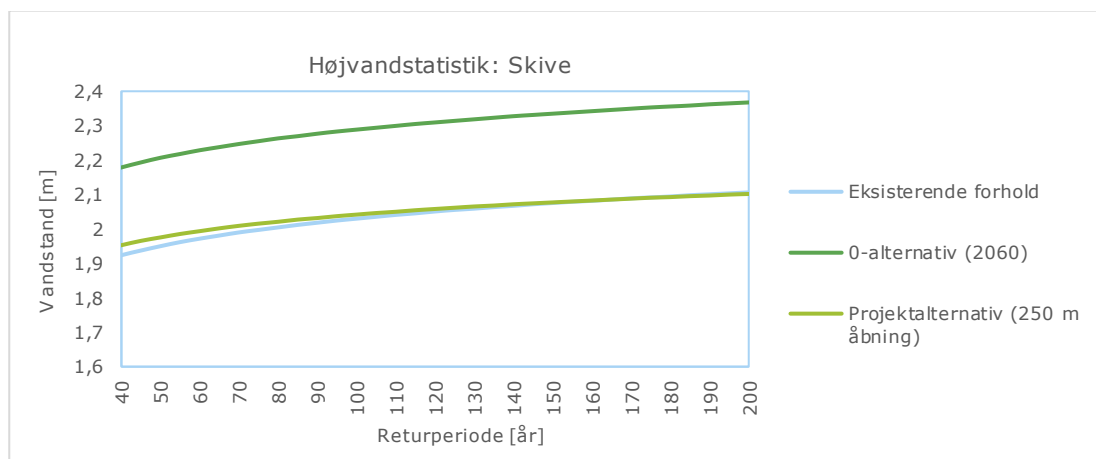
Tabel 6-3. Vandstande for de 11 evaluerede storme under tilfældet med fremtidige forhold i år 2060 inkl. høfdeudvidelse (fremtidige situation).

Til udarbejdelse af 100-års vandstanden er anvendt samme fordelingsfunktion samt fittingmetode til både eksisterende forhold samt fremtidige forhold. Den bedste fordelingsfunktion for hver lokalitet er baseret på højvandstatistikken for eksisterende forhold, og

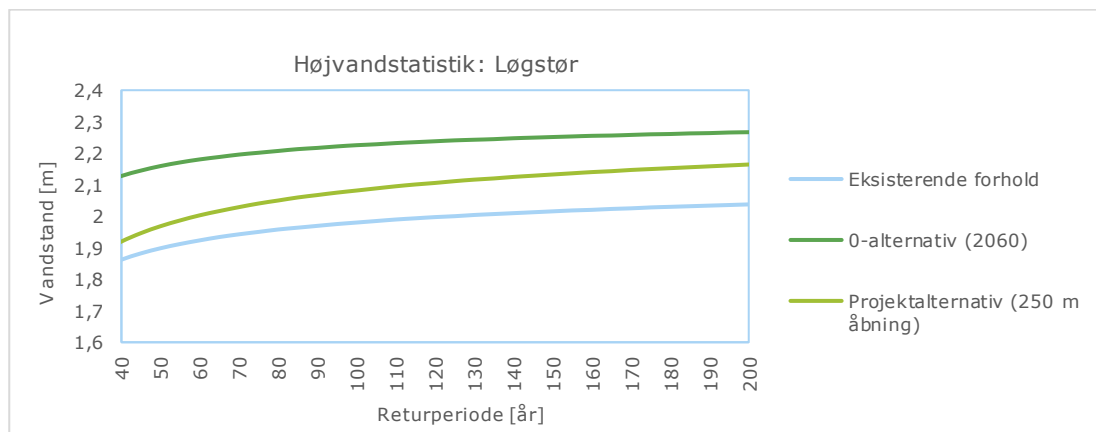
således videre anvendt for de fremtidige forhold. Dog er det sikret, at fordelingsfunktionen medfører et godt fit til de fremtidige forhold også.



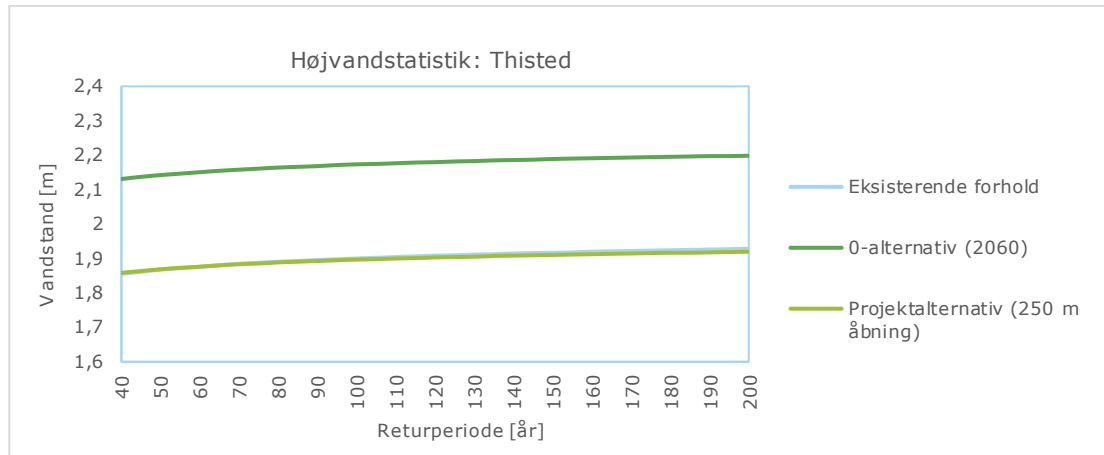
Figur 6-1: Højvandstatistik for Lemvig Havn for henholdsvis eksisterende forhold samt fremtidige forhold i tilfældene med/uden højdeudvidelse. Statistikken er normaliseret ved anvendelse af skaleringsfaktorerne i Tabel 6-1.



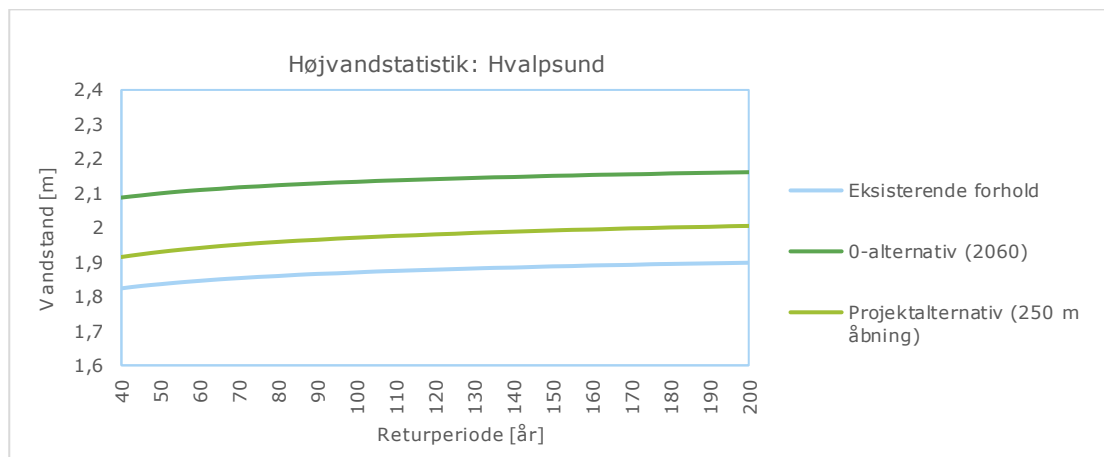
Figur 6-2: Højvandstatistik for Skive for henholdsvis eksisterende forhold samt fremtidige forhold i tilfældene med/uden højdeudvidelse. Statistikken er normaliseret ved anvendelse af skaleringsfaktorerne i Tabel 6-1.



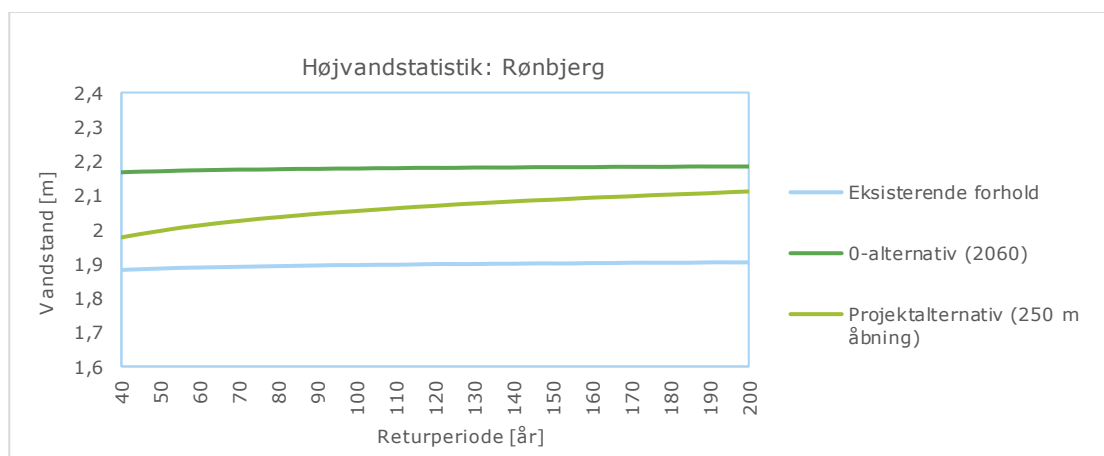
Figur 6-3: Højvandstatistik for Løgstør for henholdsvis eksisterende forhold samt fremtidige forhold i tilfældene med/uden højdeudvidelse. Statistikken er normaliseret ved anvendelse af skaleringsfaktorerne i Tabel 6-1.



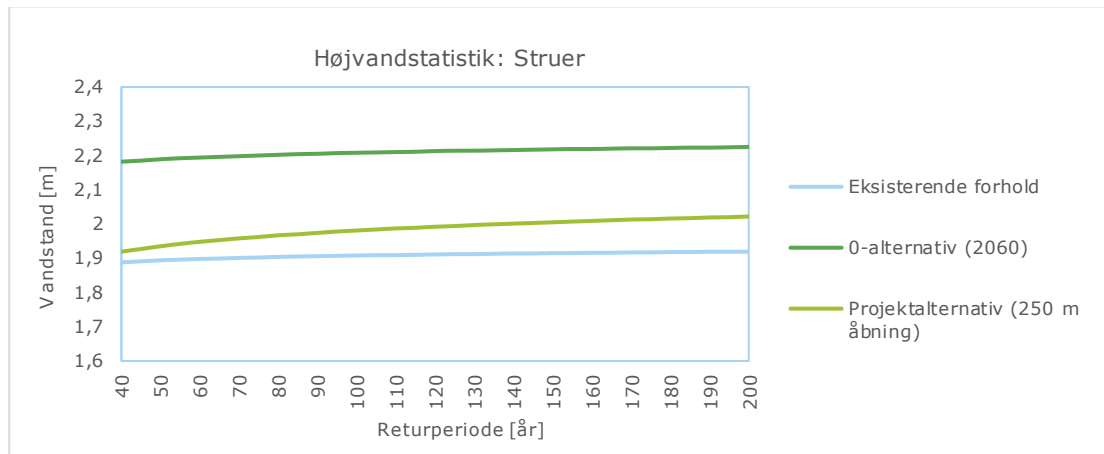
Figur 6-4: Højvandstatistik for Thisted for henholdsvis eksisterende forhold samt fremtidige forhold i tilfældene med/uden højdeudvidelse. Statistikken er normaliseret ved anvendelse af skaleringsfaktorerne i Tabel 6-1.



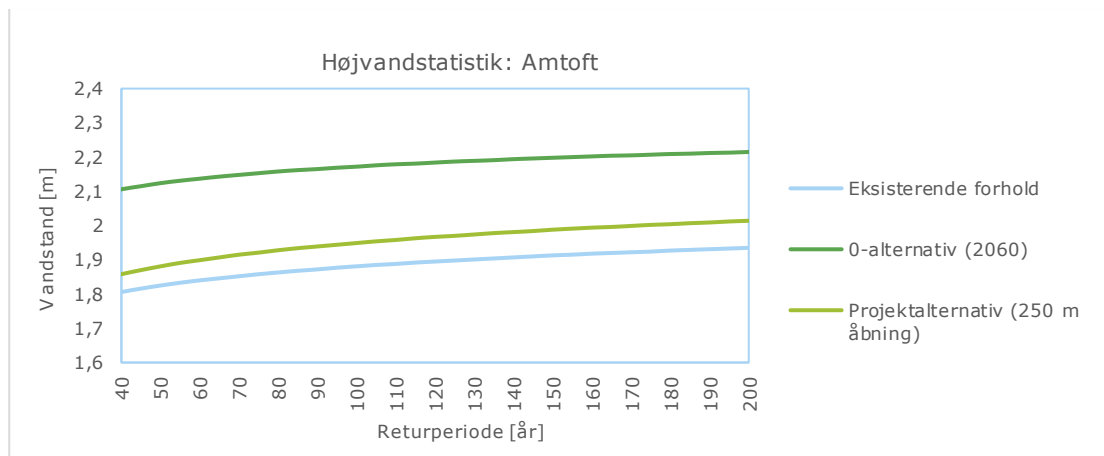
Figur 6-5: Højvandstatistik for Hvalpsund for henholdsvis eksisterende forhold samt fremtidige forhold i tilfældene med/uden højdeudvidelse. Statistikken er normaliseret ved anvendelse af skaleringsfaktorerne i Tabel 6-1.



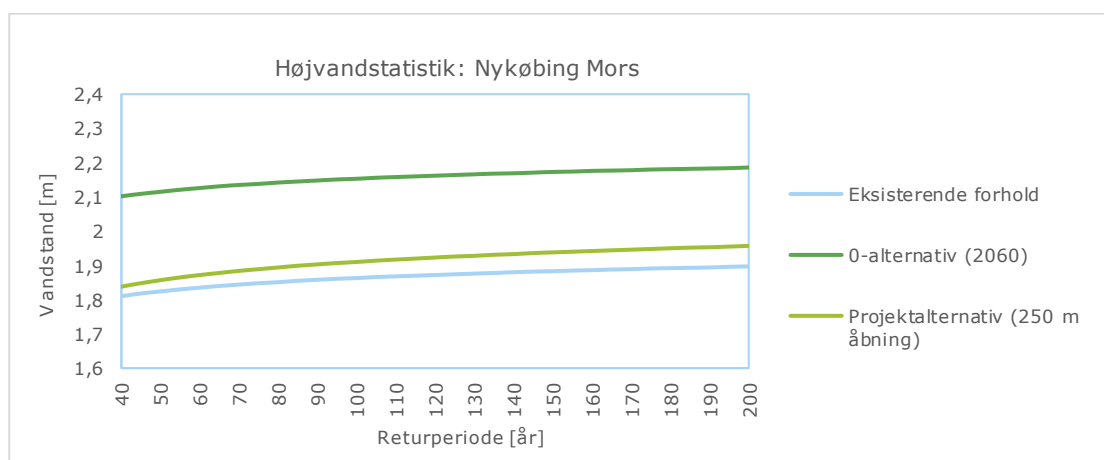
Figur 6-6: Højvandstatistik for Rønbjerg for henholdsvis eksisterende forhold samt fremtidige forhold i tilfældene med/uden højdeudvidelse. Statistikken er normaliseret ved anvendelse af skaleringsfaktorerne i Tabel 6-1.



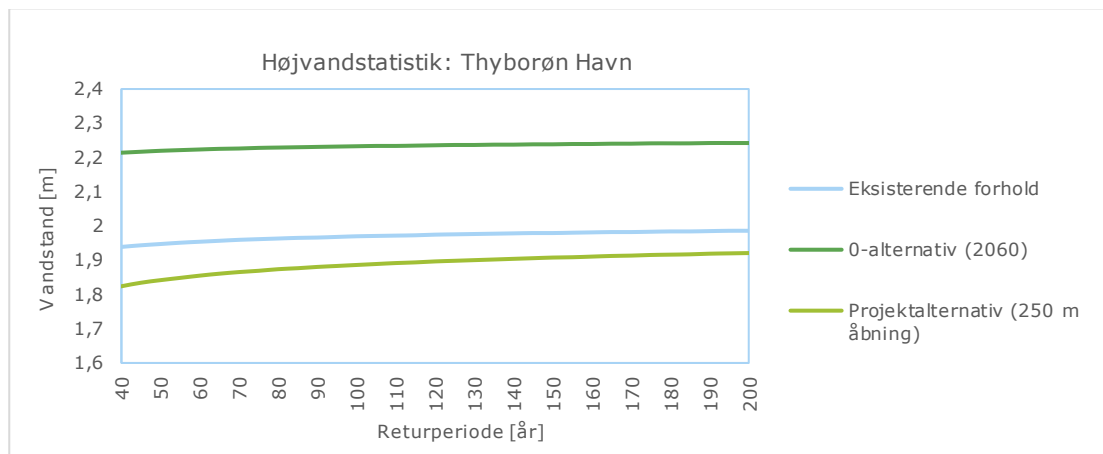
Figur 6-7: Højvandstatistik for Struer for henholdsvis eksisterende forhold samt fremtidige forhold i tilfældene med/uden høfdeudvidelse. Statistikken er normaliseret ved anvendelse af skaleringsfaktorerne i Tabel 6-1.



Figur 6-8: Højvandstatistik for Amtoft for henholdsvis eksisterende forhold samt fremtidige forhold i tilfældene med/uden høfdeudvidelse. Statistikken er normaliseret ved anvendelse af skaleringsfaktorerne i Tabel 6-1.



Figur 6-9: Højvandstatistik for Nykøbing Mors for henholdsvis eksisterende forhold samt fremtidige forhold i tilfældene med/uden høfdeudvidelse. Statistikken er normaliseret ved anvendelse af skaleringsfaktorerne i Tabel 6-1.



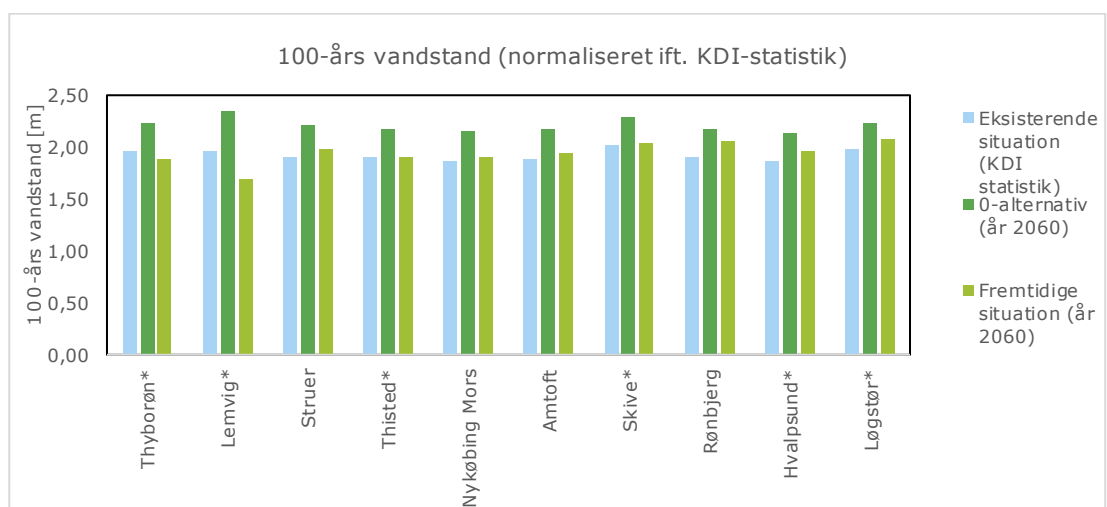
Figur 6-10: Højvandstatistik for Thyborøn Havn for henholdsvis eksisterende forhold samt fremtidige forhold i tilfældene med/uden høfdeudvidelse. Statistikken er normaliseret ved anvendelse af skaleringsfaktorerne i Tabel 6-1.

6.3 Indflydelse på 100-års højvandstande i Limfjorden

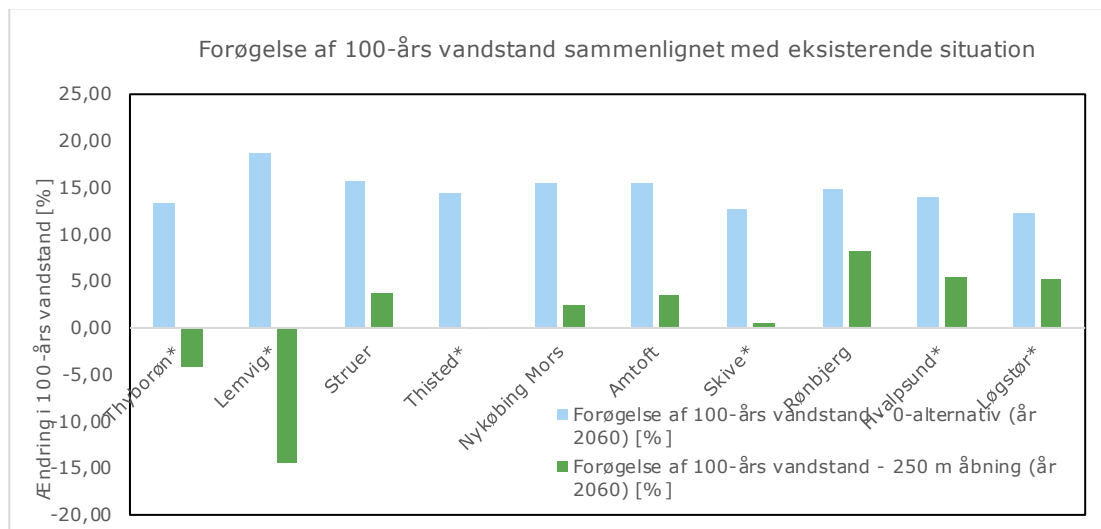
100-års vandstande for eksisterende- og fremtidige forhold med/uden høfdeudvidelsen er præsenteret i Figur 6-11 og relative forskelle er vist i Figur 6-12. 100-års vandstande er desuden angivet på tabelform i Tabel 6-4.

I forhold til den fremtidige situation fremgår det af Figur 6-11 og Figur 6-12, at en høfdeudvidelse medfører en ændring af 100-års vandstanden ved Thyborøn Havn på ca. -4 % (dvs. reduktion) samt en ændring ved Lemvig på ca. -14 % (reduktion), og ved Thisted medfører høfdeudvidelsen status-quo. Ved de resterende evaluerede lokaliteter kan der derimod forventes en forøgelse af 100-års vandstanden på mellem ca. 1 % ved Skive og op til ca. 8 % ved Rønbjerg. Ved Struer, Nykøbing Mors, Amtoft, Hvalpsund, samt Løgstør kan der forventes en forøgelse af 100-vandstanden på imellem ca. 3 – 5 %.

I 0-alternativet er forøgelsen af 100-års vandstanden generelt ca. 15 % (og op til ca. 19 % ved Lemvig).



Figur 6-11: 100-års vandstande under den eksisterende og fremtidige situation. Vandstandene er normaliseret ved anvendelse af skaleringsfaktorerne i Tabel 6-1 og * angiver de lokaliteter hvortil der forekommer en vandstandsstatistik i (Kystdirektoratet, 2018).



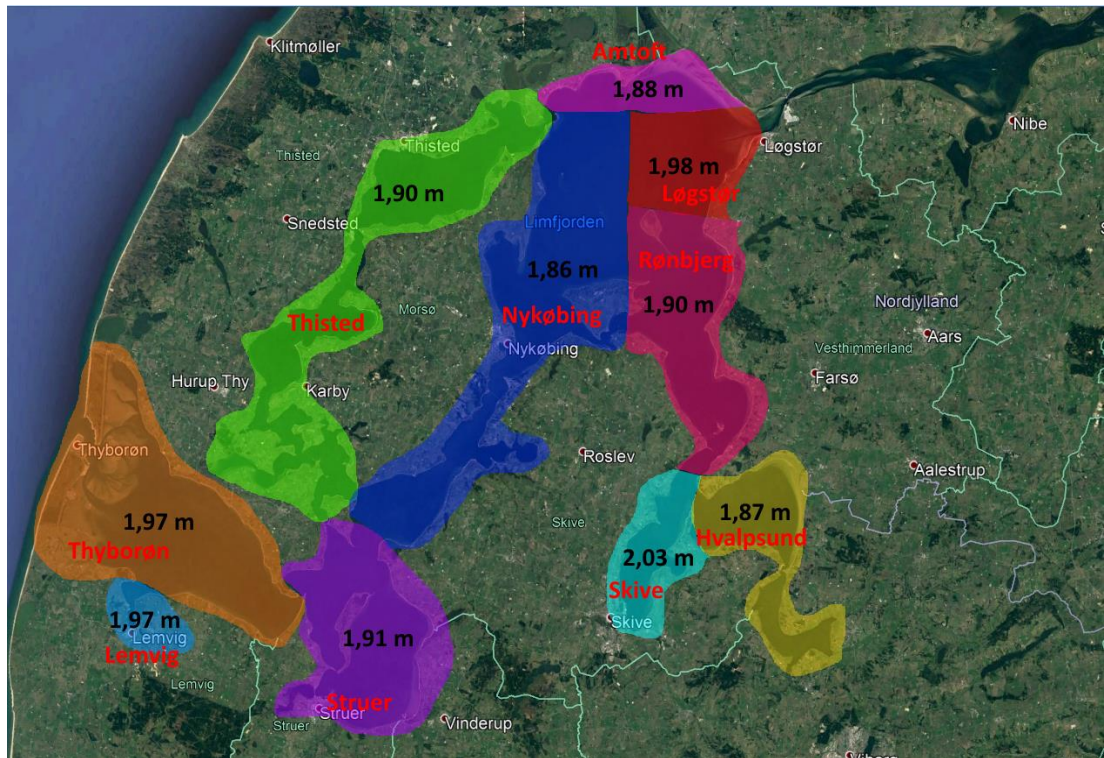
Figur 6-12: Forskel i 100-års vandstand sammenlignet med eksisterende forhold [%].

Lokalitet	100-års vandstand		
	Eksisterende forhold [m]	0-alternativ (år 2060) [m]	Fremtidige situation (år 2060) [m]
Thyborøn*	1,97	2,23	1,89
Lemvig*	1,97	2,34	1,69
Struer	1,91	2,21	1,98
Thisted*	1,90	2,17	1,90
Nykøbing Mors	1,86	2,15	1,91
Amtoft	1,88	2,17	1,95
Skive*	2,03	2,29	2,04
Rønbjerg	1,90	2,18	2,05
Hvalpsund*	1,87	2,13	1,97
Løgstør*	1,98	2,23	2,08

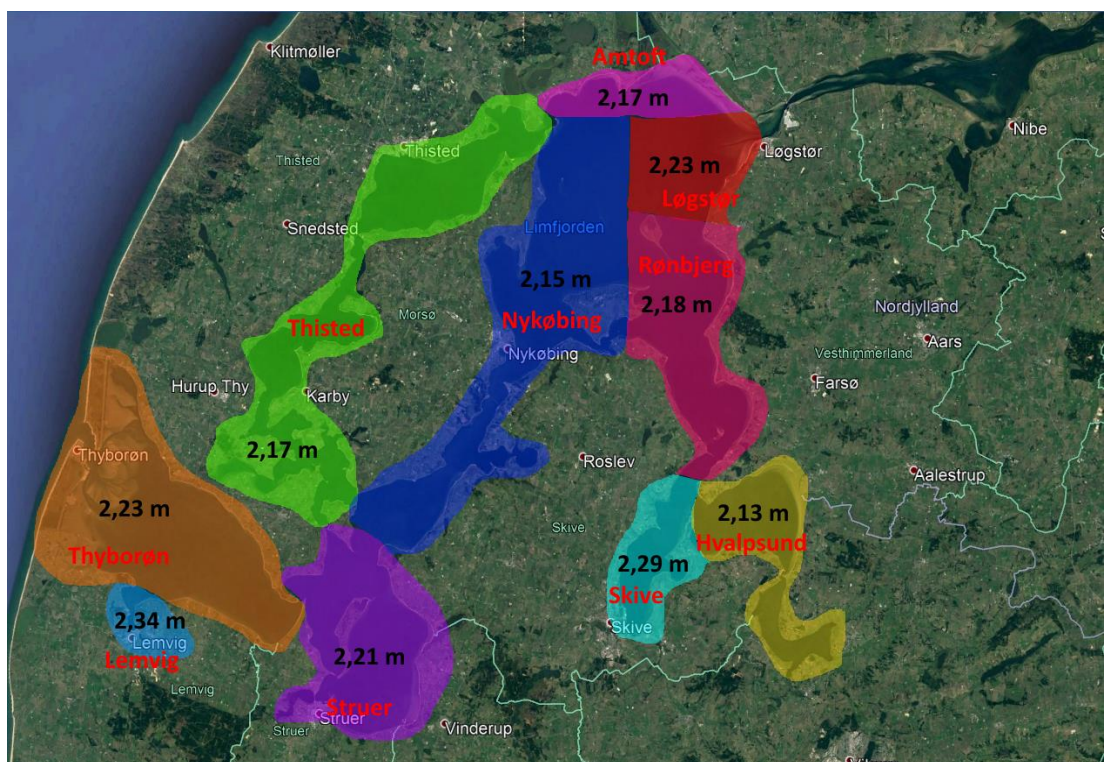
Tabel 6-4. 100-års vandstande for eksisterende forhold og fremtidige forhold (2060) i tilfældene med/uden hofdeudvidelse. Vandstandene er normaliseret ved anvendelse af skaleringsfaktorerne i Tabel 6-1 og * angiver de lokaliteter, hvortil der forekommer en vandstandsstatistik i (Kystdirektoratet, 2018).

6.4 Udbredelse af 100-års højvandstande i Limfjorden

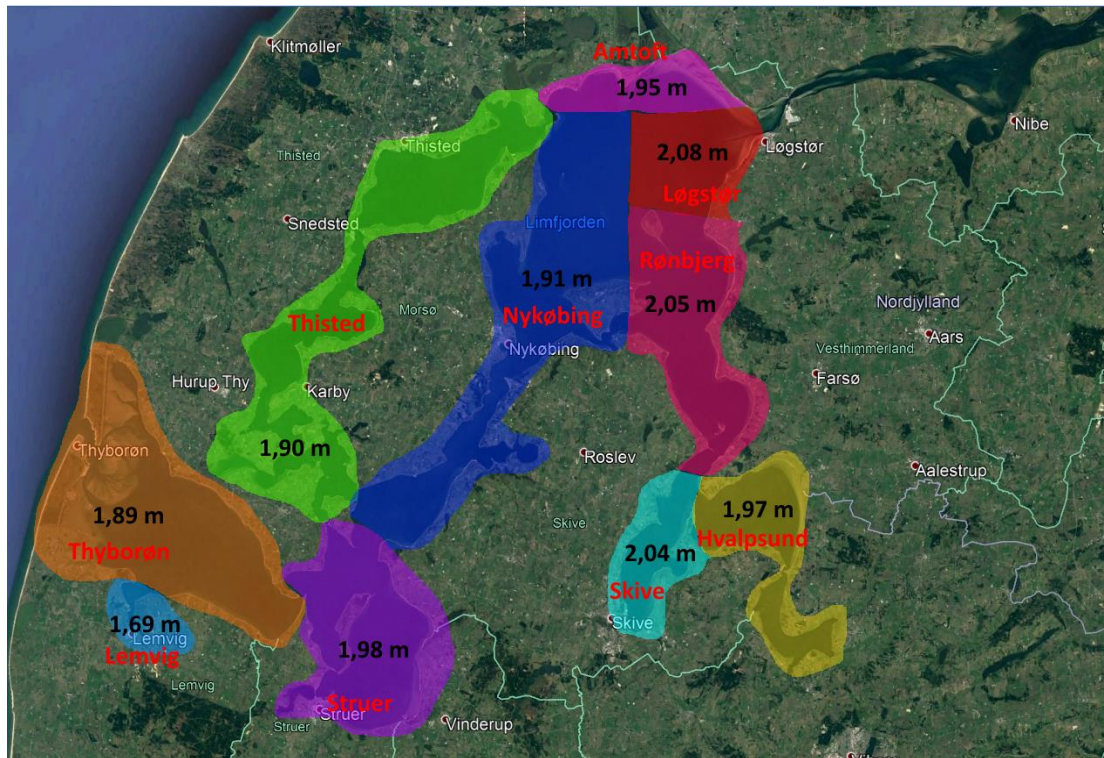
En grafisk gengivelse af 100-års vandstandene i Figur 6-11 er vist i Figur 6-13, Figur 6-14, og Figur 6-15 for situationerne med henholdsvis eksisterende forhold, fremtidige forhold uden hofdeudvidelse (0-alternativ), samt fremtidige forhold inkl. hofdeudvidelse. De skraverede felter angiver skønnede områder, hvor de estimerede 100-års vandstande er gældende. Udbredelsen er omtrentlig, og er baseret på overordnede vurderinger ud fra betragtninger ift. lokal vindstuvning, og der vil derfor indenfor områderne naturligt forekomme variationer. De angivne 100-års vandstande i figurene er kun 100 % gældende (ud fra de tidligere nævnte forudsætninger som er gjort i forbindelse med analysen) på de specifikke 10 lokaliteter i Tabel 2-1. Udbredelserne af 100-års vandstandene anvendes bl.a. videre i den socioøkonomiske analyse, som dog ikke er behandlet nærmere.



Figur 6-13: Grafisk gengivelse af 100-års vandstand ved eksisterende forhold.



Figur 6-14: Grafisk gengivelse af 100-års vandstand ved fremtidige forhold i år 2060 i tilfældet uden høfdeudvidelse (0-alternativ).



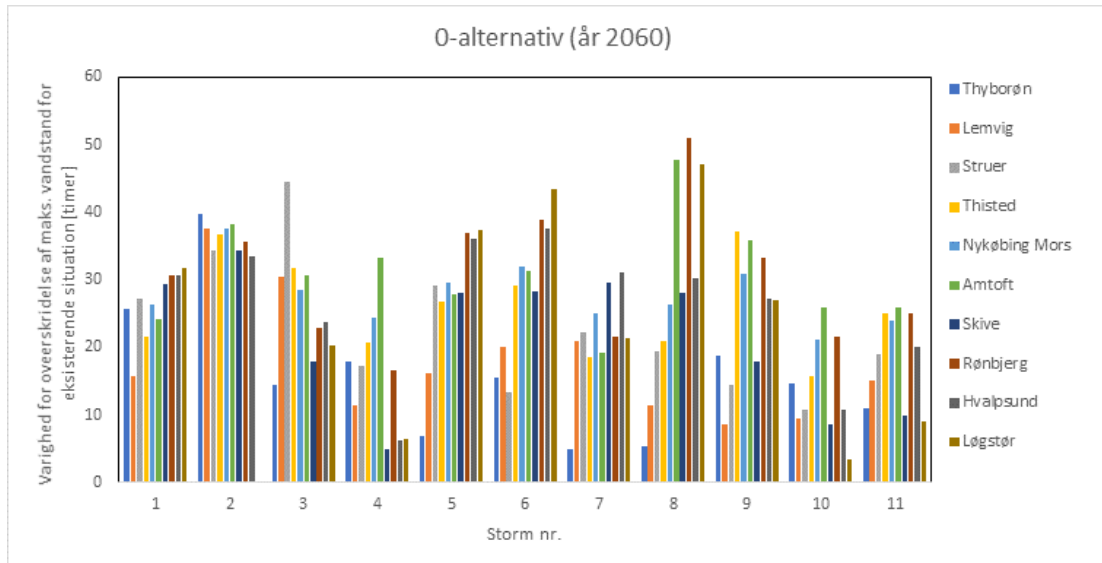
Figur 6-15: Grafisk gengivelse af 100-års vandstand ved fremtidige forhold i år 2060 i tilfældet inkl. højdeudvidelse.

6.5 Varighed for overskridelse af maksimale vandstande

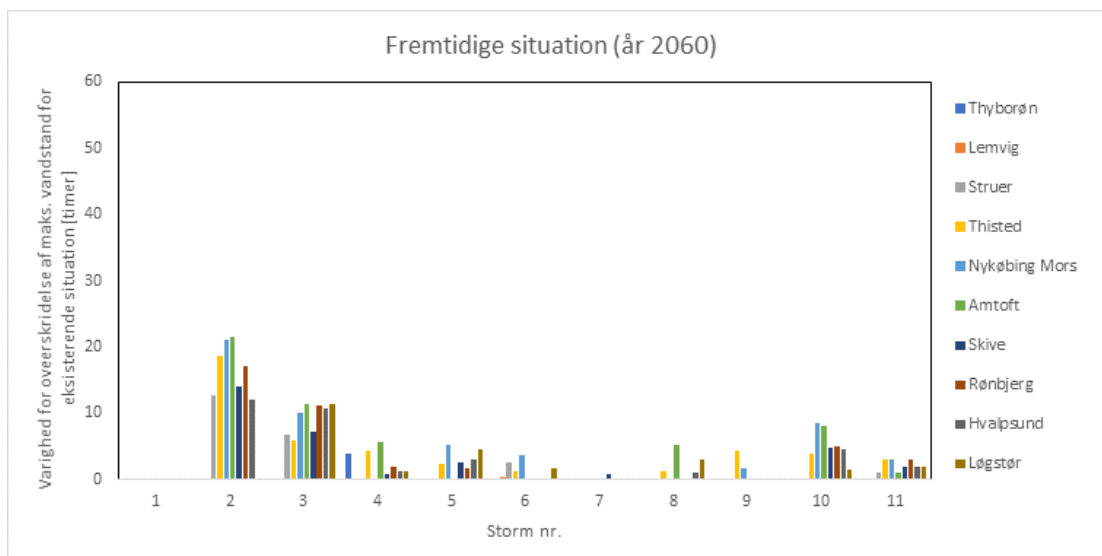
Udover forskelle mellem den nutidige og fremtidige maksimal-vandstand under stormflod er også varigheden for overskridelsen af den nutidige maksimal-vandstand af interesse. Varigheden er bl.a. sammen med maksimalvandstanden afgørende for de skader, som kan opstå under stormflod. En lang varighed af den pågældende maksimal stormflodsvandstand kan give anledning til signifikante oversvømmelser i baglandet samt medføre øgede skader på højvandsbeskyttelse og de bagvedliggende bygninger/infrastruktur.

Varigheder for overskridelse af vandstands-niveauet for nutidige maksimale stormflodsvandstande på de 10 udvalgte lokaliteter i Limfjorden og for de 10 ekstra evaluerede stormflodshændelser er angivet i Figur 6-16 og i Figur 6-17 for fremtidige forhold i tilfældene uden/med højdeudvidelse. Varighederne er desuden angivet på tabelform i henholdsvis Tabel 6-5 og Tabel 6-6. Varighederne for 2005-stormen er angivet i bilag 1 i hovedrapporten.

Som det fremgår af Figur 6-16, Figur 6-17, Tabel 6-5 samt Tabel 6-6, forekommer der i 0-alternativet en signifikant overskridelse af niveauet for den maksimale vandstand under eksisterende forhold, på op til ca. 50 timer ved f.eks. Amtøft, Løgstør, samt Rønbjerg, i tilfælde af Storm 8 (stormen *Egon*). Denne varighed er dog i tilfældet af højdeudvidelsen reduceret til en maksimal varighed for overskridelsen på 5 timer, hvilket desuden er den generelle tendens (dvs. at højdeudvidelsen generelt for alle undersøgte lokaliteter samt alle evaluerede stormflodshændelser medfører en signifikant reduktion i varigheden for stormflodspeaket over nutidigt niveau).



Figur 6-16: Varigheder for overskridelse af maks. vandstand for eksisterende forhold under tilfældet med forholdene i år 2060 uden høfdeudvidelse (0-alternativ). 2005-stormen er defineret som "Storm 11" i figuren.



Figur 6-17: Varigheder for overskridelse af maks. vandstand for eksisterende forhold under tilfældet med forholdene i år 2060 inkl. høfdeudvidelse. For flere lokaliteter er den fremtidige vandstand med høfdeudvidelsen lavere end for eksisterende forhold, hvormed den eksisterende vandstand ikke overskrides og søjlerne udgår. 2005-stormen er defineret som "Storm 11" i figuren.

Fremtidige forhold - år 2060 (0-alternativ): Varighed for overskridelse af højvandstand ved eksisterende forhold [timer]											
	Storm 1	Storm 2	Storm 3	Storm 4	Storm 5	Storm 6	Storm 7	Storm 8	Storm 9	Storm 10	2005 storm
Thyborøn	26	40	15	18	7	16	5	5	19	15	11
Lemvig	16	38	31	12	16	20	21	11	9	10	15
Struer	27	34	45	17	29	13	22	19	15	11	19
Thisted	22	37	32	21	27	29	19	21	37	16	25
Nykøbing Mors	26	38	29	24	30	32	25	26	31	21	24
Amtøft	24	38	31	33	28	31	19	48	36	26	26
Skive	29	34	18	5	28	28	30	28	18	9	10
Rønbjerg	31	36	23	17	37	39	22	51	33	22	25
Hvalpsund	31	34	24	6	36	38	31	30	27	11	20
Løgstør	32	0	20	7	37	44	21	47	27	4	9

Tabel 6-5. Varigheder for overskridelse af maks. vandstand for eksisterende forhold under tilfældet med fremtidige forhold i år 2060 uden høfdeudvidelse (0-alternativ).

Fremtidige forhold - år 2060 (inkl. 250 m høfdeudvidelse): Varighed for overskridelse af højvandstand ved eksisterende forhold [timer]											
	Storm 1	Storm 2	Storm 3	Storm 4	Storm 5	Storm 6	Storm 7	Storm 8	Storm 9	Storm 10	2005 storm
Thyborøn	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0
Lemvig	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Struer	0	13	7	0	0	3	0	0	0	0	1
Thisted	0	19	6	4	2	1	0	1	4	4	3
Nykøbing Mors	0	21	10	0	5	4	0	0	2	9	3
Amtøft	0	22	11	6	0	0	0	5	0	8	1
Skive	0	14	7	1	3	0	1	0	0	5	2
Rønbjerg	0	17	11	2	2	0	0	0	0	5	3
Hvalpsund	0	12	11	1	3	0	0	1	0	5	2
Løgstør	0	0	11	1	5	2	0	3	0	2	2

Tabel 6-6. Varigheder for overskridelse af maks. vandstand for eksisterende forhold under tilfældet med fremtidige forhold i år 2060 inkl. høfdeudvidelse.

REFERENCER

DHI. (2011). Stormflodsmodellering - vestlig Limfjord. Kystdirektoratet. (2018). Højvandsstatistikker 2017.