

# INDLEDENDE LINJEFØRINGSOVERVEJELSER FOR EN KATTEGATFORBINDELSE

KUNSTIGE ØER OG REV

FAGNOTAT

## INDHOLD

1	Indledning	1
2	Met-ocean Design Basis	1
2.1	Vind	2
2.2	Bølger	2
2.3	Vandstand	2
2.4	Vandstandsstigning (SLR) i havet	4
3	Udformning af øer	6
4	Omkostningsoverslag	10
5	Kunstigt rev	10
6	Referencer	12

### 1 Indledning

Dette korte notat beskriver overslagsmæssigt met-ocean design basis for Kattegatforbindelsen og skitserer udformning og snit i kunstige øer mellem sænketunneller og lavbroer. Disse løsninger kan komme på tale på to lokaliteter, enten lidt syd for Thunø eller midt imellem Samsø og Asnæs.

### 2 Met-ocean Design Basis

Dette afsnit gengiver overslagsmæssigt antagelser og foreløbige estimater vedr. vind, vandstand og bølger. Disse data for vind, vandstand og bølge-forhold er vurderet ud fra eksisterende data og erfaring og skal i senere projektfaser erstattes af mere detaljerede studier som også inkluderer numerisk modellering.

Der er i det følgende fokuseret på en ca. 100 års bølgesituation og samtidig vandstand inkl. Sea Level Rise (SLR) til år 2150. Det er vigtigt her at anføre, at ø-konstruktionerne er meget robuste, og at den ydre stenbeskyttelse bør designes så den kun får meget begrænset beskadigelse for en 100 års bølgesituation,

så den også kan modstå væsentligt mere sjældne hændelser. Man bør endvidere designe for en meget sjælden vandstand, f.eks. 10.000 år vandstand. Hvis der fra starten designes for SLR til år 2150 vil der være indbygget en meget stor sikkerhed med hensyn til designvandstand, og man bør om mange år genbesøge designet af konstruktionerne når SLR har opnået en støjelse på mere end 0,5 m. Konstruktionerne er udformet således, at kronekoten eventuelt senere kan forhøjes, og stenbeskyttelsen forstærkes.

## 2.1 Vind

Der antages på baggrund af Ref. (COWI A/S, 2015) & (Egedal, 1949) i denne foreløbige vurdering, at vindhastigheden med ca. 100 års returperiode for de fleste retninger er ca. 35 m/s (standard: 10 min middelvind i 10m højde over terræn) . For østlige retninger regnes med 30 m/s.

## 2.2 Bølger

For de to lokaliteter hvor en kunstig ø kan komme på tale er der tale om følgende frie stræk for bølgegenerering:

### 2.2.1 Ø syd for Thunø

Frie stræk er ca. 10 km mod Ø og V, og 15 km mod S.

Vanddybden er 10 til 15 m, og med en varighed af vinden til fuldt udviklet sø mere end 3 timer estimeres følgende bølgeforhold for en 100-års hændelse:

Hs=3,1 m, Tp=5,5s for 10 km frit stræk mod vest (U=35m/s)

Hs=3,2 m, Tp=5,8s for 15 km frit stræk mod syd (U=30m/s).

### 2.2.2 Ø mellem Samsø og Asnæs

Frie stræk er ca. 10 km mod N, SV og Ø, og 35 km mod V, SØ og NØ

Vanddybden er 10 til 15 m, og med en varighed af vinden til fuldt udviklet sø mere end 3 timer estimeres følgende bølgeforhold for en 100-års hændelse:

Hs=3,1 m, Tp=5,5s for 10 km frit stræk mod SV (U=35m/s)

Hs=4,9 m, Tp=8,0s for 35 km frit stræk mod V (U=35m/s).

## 2.3 Vandstand

### 2.3.1 Ekstreme vandstande

Det astronomiske tidevand er meget begrænset i Indre Danske Farvande.

De største variationer i vandstanden skyldes vejret, herunder vinden og det barometriske tryk. De største højvande skyldes således vindstuvning og lavtryk. Middeltrykket er 1013 MB (svarende til ca. 10 m vandsøjle). Så et lavtryk på f.eks. 963 MB forårsager ca. 0,5 m højvande.

Ekstreme højvandshændelser i projektområderne skyldes typisk storm/orkan fra retninger V til N, som forårsager at vand fra Nordsøen presses ind i Kattegat.

Storm fra N-NNØ kan ligeledes forårsage forsage høj vandstand. Gode eksempler er den meget langvarige storm Bodil d. 6/12 2013 og stormene d.14. okt. 1921 og 1. jan. 1922.

Den 24. okt. 1921 målttes en vandstand på +1,73 m i Hou på Samsø.  
Den 1. jan. 1922 målttes henholdsvis +1,52 m i Juelsminde og +1,67 m i Kolby Kaas på sydspidsen af Samsø. Data fra: Ref. (Egedal, 1949).

Til sammenligning opgiver Kystdirektoratets Højvandsstatistikker, Ref. (Kystdirektoratet, 2019) følgende 100 års vandstande:

- > Kalundborg: +1,58 m DVR90
- > Juelsminde: +1,62 m DVR90
- > Ballen Havn (Samsø): +1,65 m DVR90.

En anden kendt stormflod i Danmark er stormen fra øst i november 1872, som gav anledning til mange dødsfald rundt langs Østersøen, og værst på Falster og Lolland. I projektområderne var vandstanden mindre og ca. +1 til 1,2 m under samtidig vind fra Ø, Ref. (Colding, 1881).

Det konkluderes derfor, at de største vandstande i projektområdet forekommer under storme fra V til NNØ-lige retninger. En 100 års vandstand i 2019 antages herefter at være +1,7m.

### 2.3.2 Vandstandens afhængighed af vindretning

På grund af øens position er den i princippet udsat for bølger fra alle retninger. Men udover bølgerne er den aktuelle vindretning af stor betydning for vandstanden. Som nævnt ovenfor forekommer de største vandstande for vind fra NV-NNØ.

Ved vind fra vest er der tale om en mindre stigning i vandstanden. Der regnes i det følgende med +1,0 m for en 100 års storm.

Ved vind fra sydvest er der tale om en tendens til mindre stigning i vandstanden. Der regnes med en vandstand på +0,50 m.

Ved vind fra syd er der tale om en tendens til lavvande. Der regnes i det følgende med en vandstand på 0,0 m.

Ved vind fra sydøst er der tale om en tendens til højvande. Der regnes i det følgende med en vandstand på +0,50 m.

Vurderingen er foretaget fra data fra Ref. (Egedal, 1949).

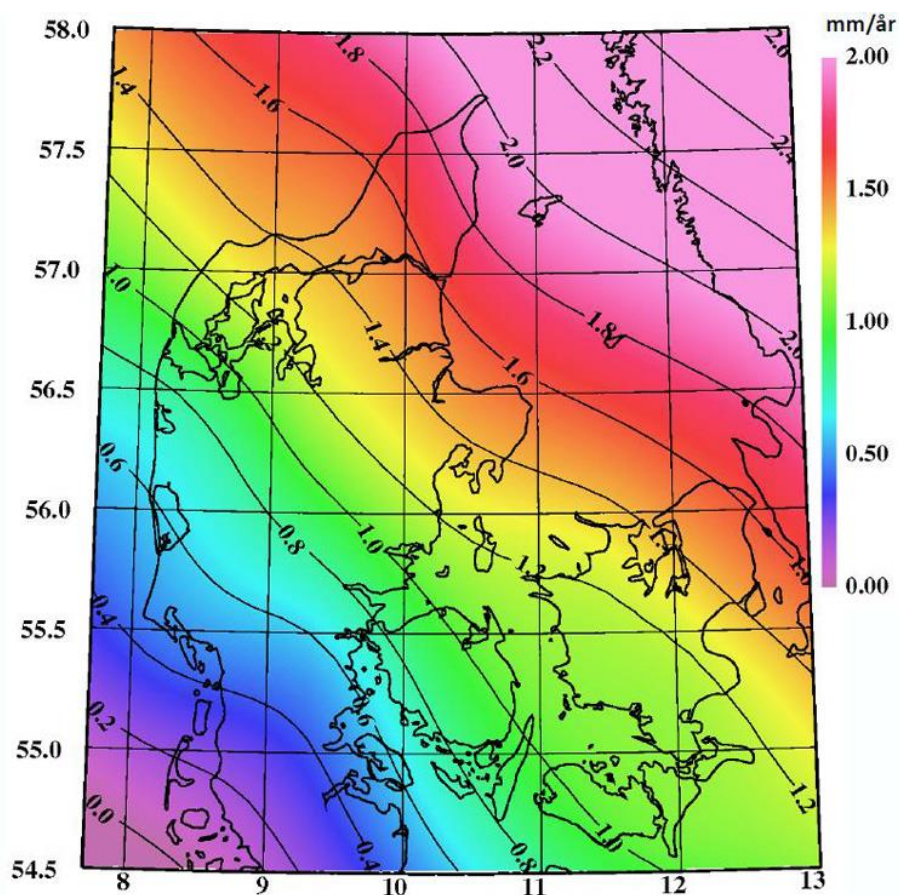
Disse værdier og interpolationer derimellem er benyttet i det følgende.

## 2.4 Vandstandsstigning (SLR) i havet

### 2.4.1 Landhævning

Landhævnningen (Eustakisk landhævning) efter istiden foregår stadigvæk i hele Danmark. Denne skal fraregnes de fremtidige vandstandsstigning som følge af havspejlsstigninger.

Figur 2-1 viser at for projektområdet er der tale om ca. 1,1 mm per år eller 11 cm på 100 år. Tidligere var vandstandsstigningen i havet ca. af samme størrelsesorden som landhævnningen, men det er ikke tilfældet mere.



Figur 2-1 landhævning i Danmark

### 2.4.2 Vandstandsstigning i havet (Sea Level Rise, SLR)

Ved fastlæggelse af dimensionsgivende vandstand, skal der tages højde for den forventede havspejlsstigning som følge af global opvarmning inden for projektets levetid.

På baggrund af IPCC's seneste anbefalinger fra 2019, Ref. (IPCC, September 2019), har DMI præsenteret deres anbefalinger for global havspejlsstigning i Danmark i et opdateret Klimaatlas udgivet i oktober 2019 (se Ref. (DMI, Oktober 2019) og Ref. (DMI, October 2019)). Den nye anbefaling er vist i Tabel 2-1.

Tabel 2-1 DMI's opdaterede centralestimer og sandsynlige spænd for havspejlsstigninger, Tabel 5 fra Ref. (DMI, October 2019).

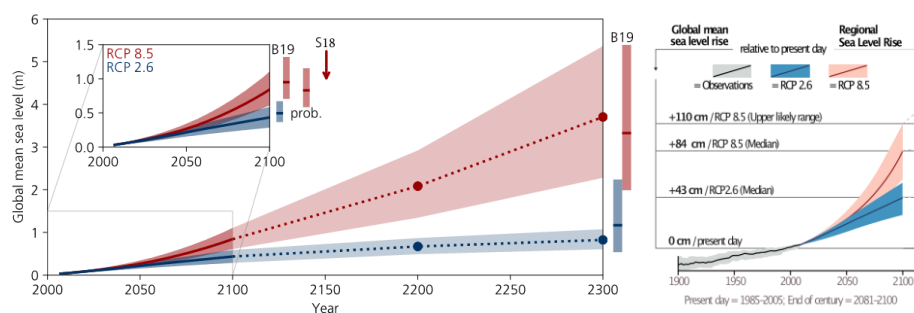
**Table 5:** Absolute mean sea level for Denmark [cm]. The values with brackets denote best estimate and 10 to 90 percentile ranges, while the values for 2300 give the likely range.

	Present day 1981-2010	Mid century 2041-2070	End century 2071-2100	2300 likely range
RCP4.5		26 [7-45]	42 [10-74]	
RCP8.5	0	32 [8-57]	63 [19-108] 95-percentile 240	230 - 540

De forskellige scenarier refererer til forskellige forudsætninger vedrørende fremtidig udledning af CO<sub>2</sub> og temperaturstigning.

Jf. Tabel 2-1 forventer DMI at 90%-percentilen for havspejlsstigningen er ca. +1,1 m frem mod år 2100 for RCP8.5 scenariet (centralestimatet er ca. 0,6m).

Men med projektet som formentlig kan udføres 2030 til 2040, og have en levetid på 100 til 120 år, er det en tidshorisont til år 2150 der bør fokuseres på.



Figur 2-2 Fremskreven global havspejlsstigning frem til år 2300 jf. seneste IPCC-rapport, (IPCC, 2019). Havspejlsstigninger efter år 2100 er forbundet med høje usikkerheder. Emissionsscenarioer angivet for blå kurve: RCP2.6, rød kurve: RCP8.5. Reference niveau er 1985-2005 (1995).

På baggrund af IPCC's 2019 rapport (Ref. (IPCC, September 2019)) vælges en SLR på ca. +1,5 m for år ca. 2150 (centralestimat for RCP8.5) for vurderinger i denne foreløbige projektfase.

### 2.4.3 Resulterende vandstandsstigning

Der benyttes i det følgende en relativ konservativ værdi for SLR (RCP8.5) for de valgte vurderede år, 2020, 2050, 2100, 2150 og 2200 fra DMI's og IPCC's seneste anbefalinger, Ref. (DMI, October 2019) og (IPCC, September 2019)). Værdien af SLR svarer til centralestimat for det konservative CO<sub>2</sub> scenarie RCP8.5.

Tabel 2-2 viser centrale estimer for vandstandsstigningen frem til år 2200. Der er regnet vandstandsstigninger fra år 1990 og frem til år 2020, 2050, 2100,

2150, 2200 og fortsat konstant landhævningsrate (1,1 mm/år), som giver en resulterende vandstandsstigning ift. mDVR90.

Tabel 2-2 Centrale estimater for vandstandsstigning (Sea Level Rise, SLR) frem til år 2200 jf. seneste DMI anbefalinger fra 2019, Ref. (DMI, October 2019), se Tabel 2-1.

År	SLR (m DVR90)	Landhævning (m)	Vandstandsstigning (m DVR90)
2050	0,32	0,07	0,25
2100	0,63	0,12	0,5
2150	1,4	0,18	<b>1,2</b>
2200	2,1	0,23	1,9

Det er vigtigt at fremføre, at SLR vil foregå langsomt, og man vil være i stand til i god tid at tage hensyn til det, hvis det i praksis skulle vise sig, at stigningen bliver mindre eller større end forudsat. Det er vigtigt, at der skelnes mellem kystbeskyttelseskonstruktioner som kan udbygges etapevis og så konstruktioner, som det vil være overordentligt problematisk og kostbart, hvis man fra starten vælger en for lav kote. Perimeter/dige-konstruktionerne på øen kan eventuelt udføres, så man senere kan foretage en forhøjelse af kronekoten, hvis det tænkes ind allerede ved projekteringen.

### 3 Udformning af øer

Der er som nævnt ovenfor tale om to forskellige lokaliteter til placeringen af øen afhængig af linjeføringen af forbindelsen over Samsø.

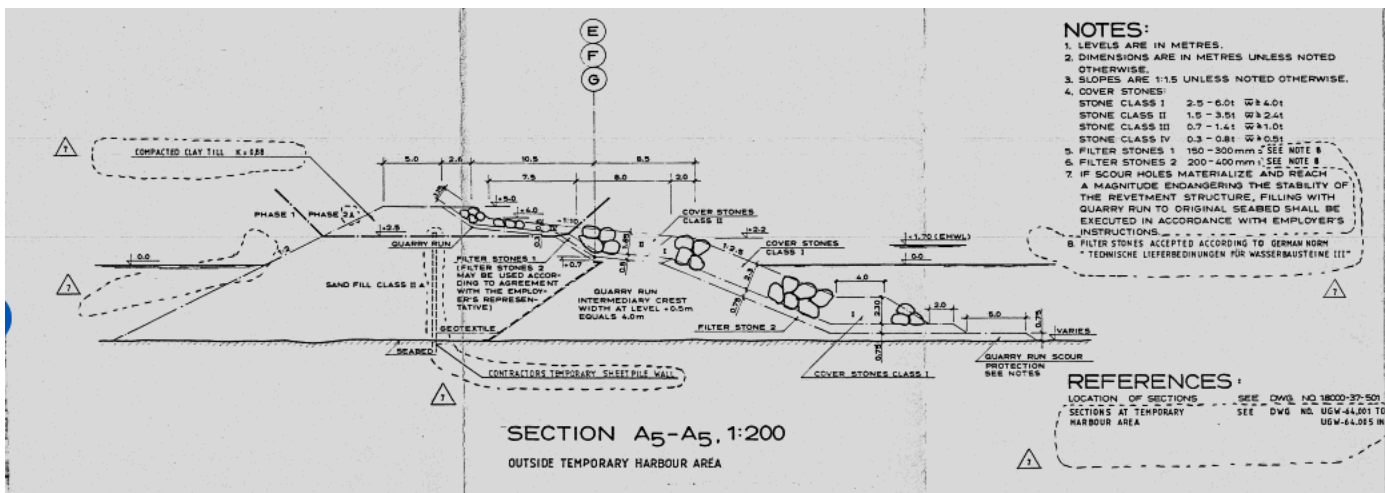
Øerne har ca. den samme udformning uanset dennes placering, mens der på grund af lidt forskellig udsathed for bølgepåvirkning er tale om forskellige krav til stenstørrelse og kronekote på øen.

Følgende antages vedr. øen:

- > Længden af øen er bestemt ud fra den maksimale stigning af jernbanen, se Delrapporten.
- > Længden er forskellig for de to øer og fremgår af Delrapporten.
- > For en foreløbig vurdering antages det, at dybden er 15 m alle steder hvor dæmningen/perimeterkonstruktionen rundt om øerne skal udføres. Da øen er beliggende på relativt højtliggende havbund, vil dybden i de fleste sektioner være bygget på ud af hældende havbund. I denne foreløbige analyse er der antaget flad bund i kote -15 m.
- > Det er antaget, at havbunden alle steder består af jordarter som har en tilstrækkelig bæreevne til dæmningen. Hvis det viser sig ikke at være

tilfældet kan bundeudskiftning eller anden geoteknisk forstærkning af havbunden komme på tale.

- > Det vides ikke p.t. i hvilket omfang materiale fra tunnelen kan benyttes som fyld i dæmningerne. Derfor er det antaget, at der benyttes sandfyld som kerne og tunnelmateriale bagved som vist nedenfor i Figur 3-2.
- > Det vides ikke, om tunnelfyldet vil have en tilstrækkelig permeabilitet til at det kan undgås at sikre med en spunsvæg hele vejen rundt i øernes kerne. Der er derfor forudsat en spuns til sikring af lav vandgennemstrømning
- > Som inspiration til dæmningerne kan perimeteren på Sprogø benyttes, se Figur 3-1. Der er her tale om en konstruktion, der er tilsvarende udsat med en designbølgehøjde på ca.  $H_s=4,1$  m og et designhøjvande på ca. 3,0 m. Men dybden udfor Sprogø er mindre end for Kattegatforbindelsens øer. Det skal nævnes, at konstruktionerne på Sprogø netop i 2018/19 er blevet forstærket og forhøjet i forbindelse med klimasikring for de næste ca. 50 år. Bl.a. er kronkoten blevet forhøjet med 1,5 m til nu +6,5 m.



Figur 3-1 Typisk profil (ca. 1990) for Sprogø Nordkyst. For de to Ø lokaliteter er der i Tabel 3-1 og Tabel 3-2 vist beregnede foreløbige designdata for de to øer og med en opdeling på orienteringen af øen i ca. 8 retninger.

I Tabel 3-1 & Tabel 3-2 er der for de to øer og opdelt på 8 vind/bølge-retninger vist overslagsmæssige samhoørende værdier af design vandstand og bølger, samt overslagsmæssig kronkote for stenkonstruktion/dæmning.



Tabel 3-1 Design data for Ø syd for Thunø.

Ø syd for Thunø					
Vindretning, vandstand og bølgeforhold			overskylsfaktor		
Estimat for 100 års vind/vandstand			1,0		
Vindretning	vandstand (2020) design (m)	SLR (m)	vandstand (2150) design (m)	Bølger, Hs (m)	Kronekote, stenkastning (m)
N	1,75	1,2	2,95	3,1	6,1
NØ	+1,5	1,2	2,7	3,1	5,8
Ø	+1,0	1,2	2,2	3,1	5,3
SØ	+0,5	1,2	1,7	3,1	4,8
S	0,0	1,2	1,2	3,2	4,4
SV	+0,5	1,2	1,7	3,2	4,9
V	0,75	1,2	1,95	3,1	5,1
NV	+1,50	1,2	2,7	3,1	5,8

Tabel 3-2 Design data for Ø mellem Samsø og Asnæs

Ø mellem Samsø og Asnæs					
Vindretning, vandstand og bølgeforhold					
Estimat for 100 års vind/vandstand					
Vindretning	vandstand (2020) design (m)	SLR (m)	vandstand (2150) design (m)	Bølger, Hs (m)	Kronekote, stenkastning (m)
N	+1,75	1,2	2,95	3,1	6,1
NØ	+1,5	1,2	2,7	4,9	7,6
Ø	+1,0	1,2	2,2	4,9	7,1
SØ	+0,5	1,2	1,7	4,9	6,6
S	0,0	1,2	1,2	3,5	4,7
SV	+0,5	1,2	1,7	4,2	5,9
V	0,75	1,2	1,95	4,9	6,9
NV	+1,50	1,2	2,7	4	6,7

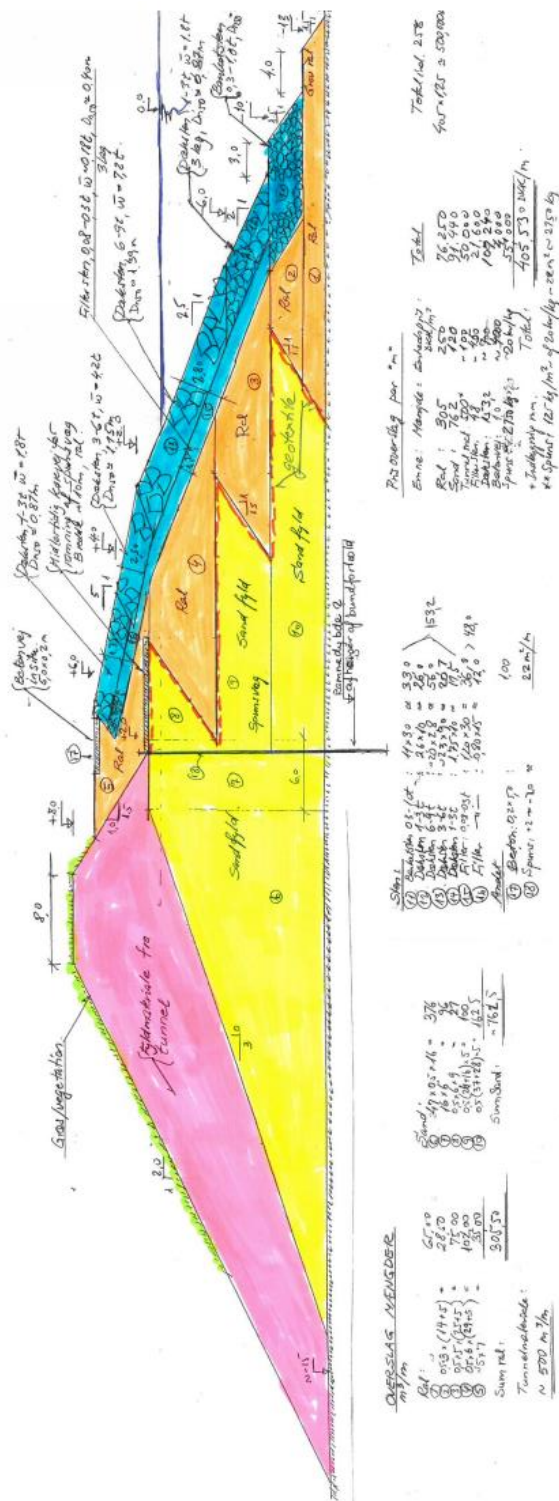
Der er på dette grundlag udarbejdet et typisk middel-profil for dæmningen/perimeterkonstruktionen, som vist i Figur 3-2. Der er til dette profil valgt en design bølgehøjde på, Hs=4,3 m og en kronekote for stenkonstruktionen på +6,0 m, hvor der er en beton-servicevej med en bredde på 5,0 m og en lagtykkelse på 0,2 m. Denne er tilsvarende en servicevej netop anlagt på Sprogø. Hældningen af dæklaget varierer fra 1:2 til 1:2,5 op til kote +2,0 m, og 1:5 mellem kote +2,0 og kote +6,0m. I praksis betyder dette "middelprofil", at der er nogle sektioner der er mere udsatte og nogle der er mindre. Profilet tjener derfor til at vise typen af konstruktionen, og benyttes til et første middel-overslag over materiale-mængder og dermed prisoverslag.

Bagved servicevejen er der opbygget et jorddige med græs/vegetation op til kote +8,0m. Det viste profil er foreløbigt og udarbejdet for at kunne udtage mængder. Det vil være nødvendigt i senere projektfaser at foretage en detaljeret bestemmelse af metocean designforhold og gennemføre fysiske modellforsøg med typiske profiler af kystindfatningen. Det må forventes, at fordelingen af stengraderinger bliver ændret på baggrund af disse detaljerede designstudier, og måske det på nogle strækninger bliver nødvendigt med stenbeskyttelse bag servicevejen og op ad jorddiget.

Designgrundlaget er en 100 års storm med hensyn til vandstand og bølgeforhold og med det forventede SLR i år 2150, som redegjort for ovenfor.



Der vil være begrænset/acceptabel beskadigelse på dæklag af sten, mens bølgeoverskyl vil være begrænset til noget sprøjt ("spray"). Ved fastlæggelsen af kronekoten og det tilhørende kriterium for acceptabelt bølgeoverskyl bør den samlede mængde overskyllende vand sammenlignes med et design-regnskyl, da det indre af øen og tunnelen vil blive forsynet med afvandringsdræn.



Figur 3-2 Typisk profil for udsat perimeter, Ø mellem Samsø og Asnæs, strækning mod SØ. Hs=4,3 m, og designvandstand +1,7 m.

## 4 Omkostningsoverslag

Det fremgår af designtabellerne ovenfor at den sydlige Ø er mere udsat end den nordlige. Der er p.t. kun udført ovenfor viste snit i øen, og på dette grundlag, og under benyttelse af estimerede enhedspriser udregnet et overslag over materialeprisen inkl. udførelse. Det fremgår, at en sådan ø's perimeter estimeres til at koste ca. 500.000 DKK/m. Her er her regnet med 100 DKK/m<sup>3</sup> for indbygning af tunnelmateriale, men ikke for udgravning mm. inde på øen eller for det nødvendige drænsystem på øen. Der er endvidere ikke regnet med entreprenørens omkostninger til mobilisering og demobilisering mm.

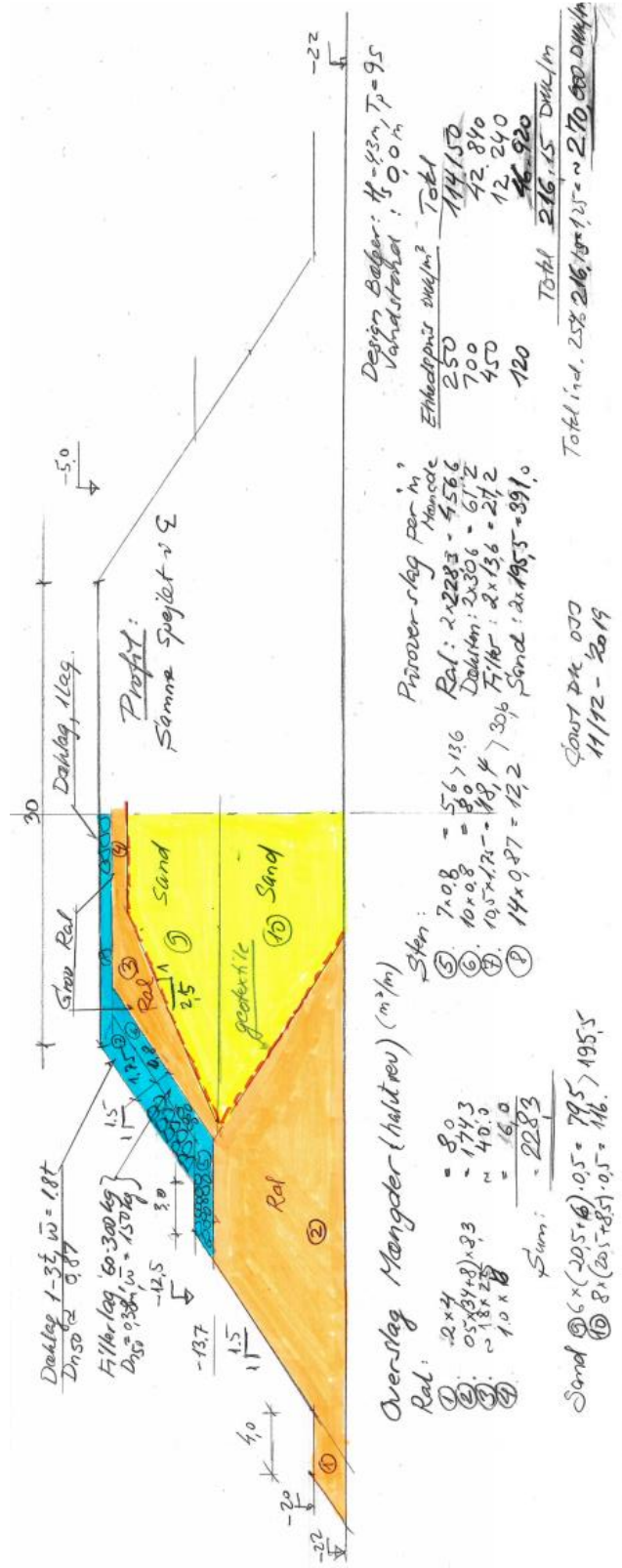
## 5 Kunstigt rev

Udover øen er der foretaget vurdering af bygning af undersøisk rev til afvisning af skibe der er kommet uden for den normale vandvej/sejlrute, se Figur 5-1.

Revets position og længde er vist i Delrapporten.

Følgende er antaget:

- > Antaget vanddybde er i middel 22 m
- > Antaget bredde af revet er 30 m i kote -5,0 m
- > Materialerne er primært sand og ral med en ydre beskyttelse over kote ca. -13,7 m med dæksten og filterlag. Dækstene er vist for en designbølge på  $H_s=4,3$  m,  $T_p=9$  s and en vandstand med lavvande på 0,0 m. Der er benyttet to lag dæksten på siderne og et lag på toppen. De største dæksten er vurderet til 1-3 t for de givne bølgeforhold og en undersøisk konstruktion.
- > Det er antaget at konstruktionen kan bygges direkte på den eksisterende havbund. Hvis de geotekniske forhold ikke tillader dette, vil det komme på tale at foretage en udskiftning af havbunds sediment eller på anden vis lave en geoteknisk forstærkning af havbunden.
- > Der er foretaget en vurdering af materialemængder, og med de samme enhedspriser som for kystindfatningen findes et omkostningsoverslag på ca. 270.000 DKK/m. Dertil kommer at der i enderne af revet skal udføres hoveder med samme profil som den lige strækning.



Figur 5-1 Foreløbigt profil af undersøisk rev.

## 6 Referencer

- Colding, P. D. (1881). Stormen over Nord- og Mellem-Europa af 12th -14th November 1872. *Videnskabelig Selskab Skr, 6. række.*
- COWI A/S. (2015). *Sejerø Bugt Offshore Windfarm, Metocean Report.* Rapport for Energinet.dk.
- DMI. (October 2019). *Methods used in the Danish Climate Atlas.* DMI Report 19-17.
- DMI. (Oktober 2019). *Klimaatlas-rapport, Danmark.*
- Egedal, J. (1949). *Abnorme Vandstandforhold i de Danske Farvande. II af J. Egedal.* DMI publikation Nr. 11.
- IPCC. (24th. 24th September 2019). IPCC , The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, Summary for Policymakers.
- IPCC. (September 2019). *IPCC SR Ocean and Cryosphere. Chapter 4: Sea Level Rise and Implications for Low Lying Islands, Coasts and Communities.* Final draft.
- Kystdirektoratet. (2019). *Højvandsstatistikker 2017.* Kystdirektoratet.
- COWI A/S (marts 2020) for Vejdirektoratet, Sund & Bælt, Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen. Indledende linjeføringsovervejelser for en Kattegatforbindelse - Delrapport