

FEBRUAR 2022
SUND & BÆLT HOLDING A/S

ADRESSE COWI A/S
Parallelvej 2
2800 Kongens Lyngby

TLF +45 56 40 00 00
FAX +45 56 40 99 99
WWW cowi.dk

KATTEGATFORBINDELSE - KYST-KYST ANLÆGSTEKNISKE FORUNDERSØGELSER

MARINE KONSTRUKTIONER

FAGNOTAT

INDHOLD

1	Indledning	2
2	Hydraulisk projekteringsgrundlag	5
2.1	Bølger	5
2.2	Vandstandsforhold	6
3	Kunstige øer til overgang mellem bro og tunnel	6
3.1	Generelt	6
3.2	Øer mellem Samsø og Asnæs (Lokalitet 1 og 2)	7
3.3	Ø syd for Thunø (Lokalitet 3)	10
3.4	Øer mellem Sjælland Odde og Aarhus/Djursland (Lokalitet 4 og 5)	12
3.5	Bemærkninger	15
4	Kunstige rev til skibsstødsbeskyttelse	15
5	Undersøisk dæmning til sænketunnel	17
6	Sænketunnelbeskyttelse ved kunstige øer	17
7	Beskyttelse af boret tunnel ved kunstige øer	19
8	Omkostningsoverslag	20
9	References	21

PROJEKTNR.

A134385

DOKUMENTNR.

A134385-D-NOT-001

VERSION

2.0

UDGIVELSES DATO

1. februar 2022

BESKRIVELSE

UDARBEJDET

OJJ, ADKE, TSH

KONTROLLERET

HSV, PTR

GODKENDT

PTR

1 Indledning

På baggrund af det hydrauliske projekteringsgrundlag præsenteret i Design basis, ref. [1], beskriver nærværende notat den overordnede skitseprojektering af de marine konstruktioner omfattende: perimeteren af de kunstige øer til overgang mellem bro og tunnel, skibsstødsrev, undersøisk dæmning til sænketunnelen og sænketunnelbeskyttelse ved de kunstige øer, der potentielt vil være en del af en kommende Kattegatforbindelse.

De kunstige øer mellem bro og tunnel (sænketunnel eller boret tunnel) er foreløbig placeret på 5 lokaliteter: Enten lidt syd for Thunø, midt imellem Samsø og Asnæs eller mellem Sjællands Odde og Aarhus hhv. Djursland (mellem Glatved og Grenå), se Figur 1-1 til Figur 1-4. I det følgende er angivet en oversigt, for lokaliteterne og de tilhørende korridorer:

> Midt mellem Samsø og Asnæs (2 lokaliteter):

- > **Lokalitet 1:** Beliggende ved Falske Bolsaks, Korridorer: KKØ-3.1, KKØ-3.2, KKØ-3.3 og KKØ-3.4 – se Figur 1-1
- > **Lokalitet 2:** Beliggende nord for Falske Bolsaks, Korridorer: KKØ-2.5, KKØ-4.1, KKØ-4.2 og KKØ-4.3 – se Figur 1-1

> Syd for Thunø (1 lokalitet):

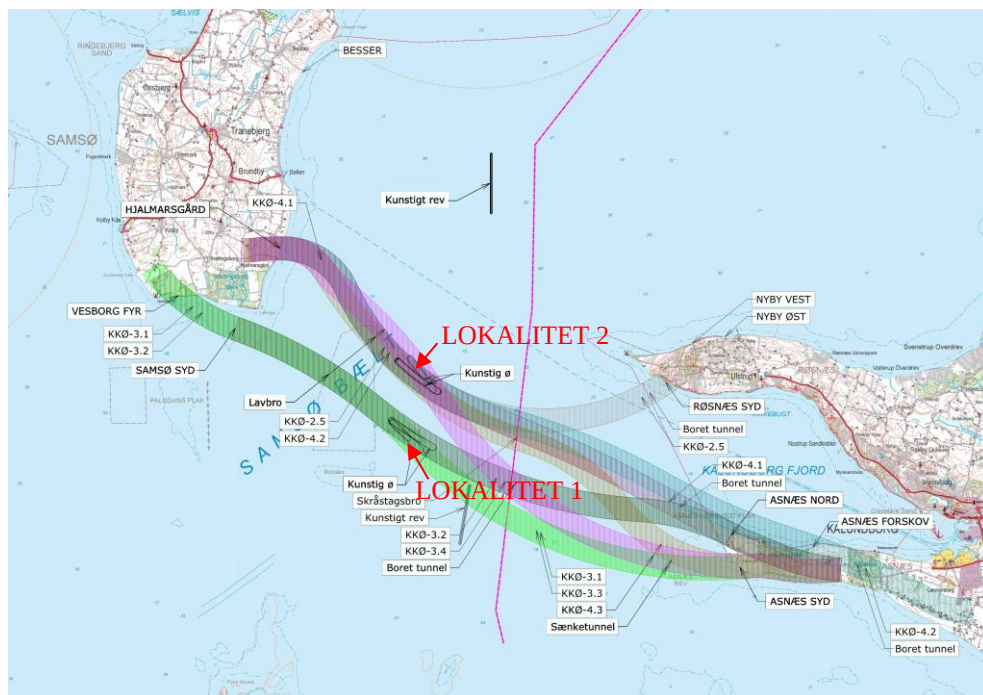
- > **Lokalitet 3:** Beliggende ved Kirkegrund, Korridorer: KKV-1.1 og KKV-1.2 – se Figur 1-2

> Mellem Sjællands Odde og Aarhus hhv. Djursland (2 lokaliteter):

- > **Lokalitet 4:** Beliggende ved Marthe Flak, Korridorer: KKN-2.1 og KKN-2.2 – se Figur 1-3
- > **Lokalitet 5:** Beliggende vest for Yderflak, Korridorer: KKN-1.2, KKN-1.3, KKN-1.4 og KKN-1.5 – se Figur 1-4

I nærværende notat beskrives også de kunstige rev til skibsstødsbeskyttelse (skibsstødsrev) til fartøjer der har bevæget sig uden for den normale vandvej/sejlrute, samt beskyttelsen af en undersøisk dæmning til sænketunnel, alle placeret mellem Samsø og Sjælland. Placering af disse rev og dæmning er vist på henholdsvis Figur 1-5 og Figur 1-6. Desuden er der for sænketunnelløsnin-gerne foretaget vurdering af bygning af beskyttelse til afvisning af skibe der er kommet uden for den normale vandvej/sejlrute og dermed risikerer at påsejle sænketunnel, hvor denne føres iland på de kunstige øer. Denne beskyttelse er relevant ved de kunstige øer ved Lokalitet 1 og 2, se Figur 1-1, og Lokalitet 3, se Figur 1-2.

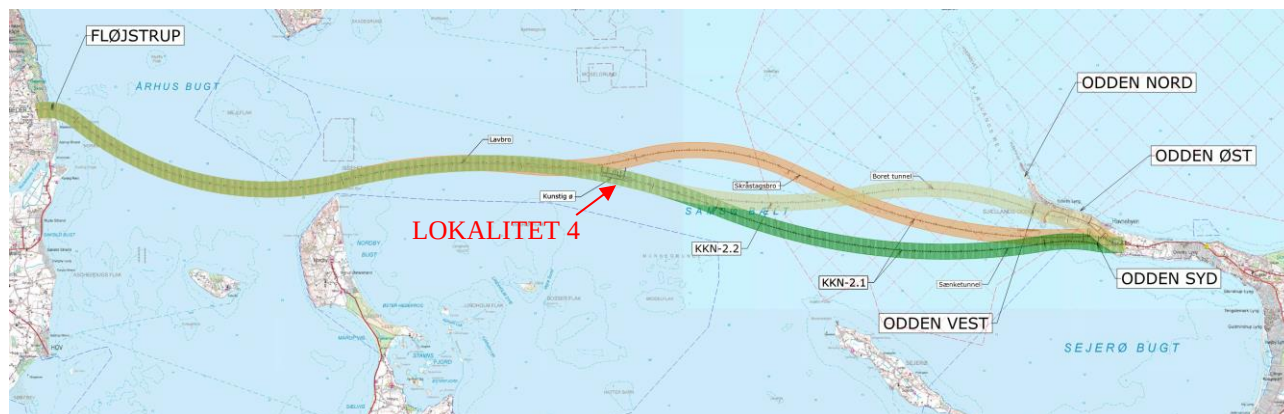
I det efterfølgende er alle koter og vandstande refereret til DVR90, medmindre andet er angivet.



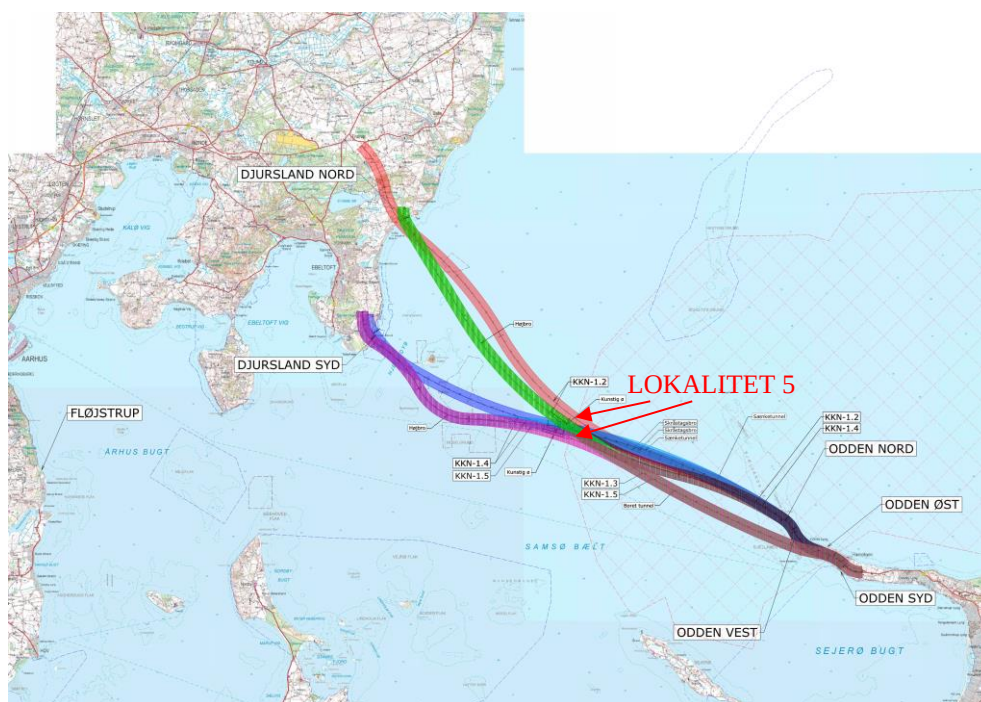
Figur 1-1 Oversigt over Lokaltitet 1 og 2 for mulige kunstige øer, samt linjeføringer for tilhørende korridorerne.



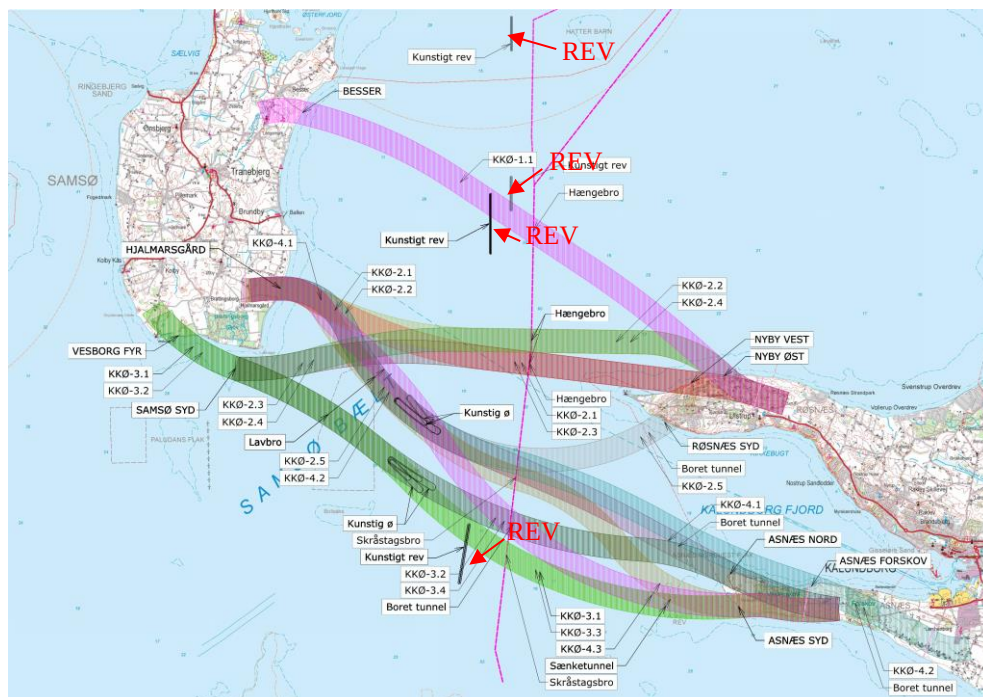
Figur 1-2 Oversigt over Lokaltitet 3 for mulig kunstig ø, samt linjeføringer for tilhørende korridorerne.



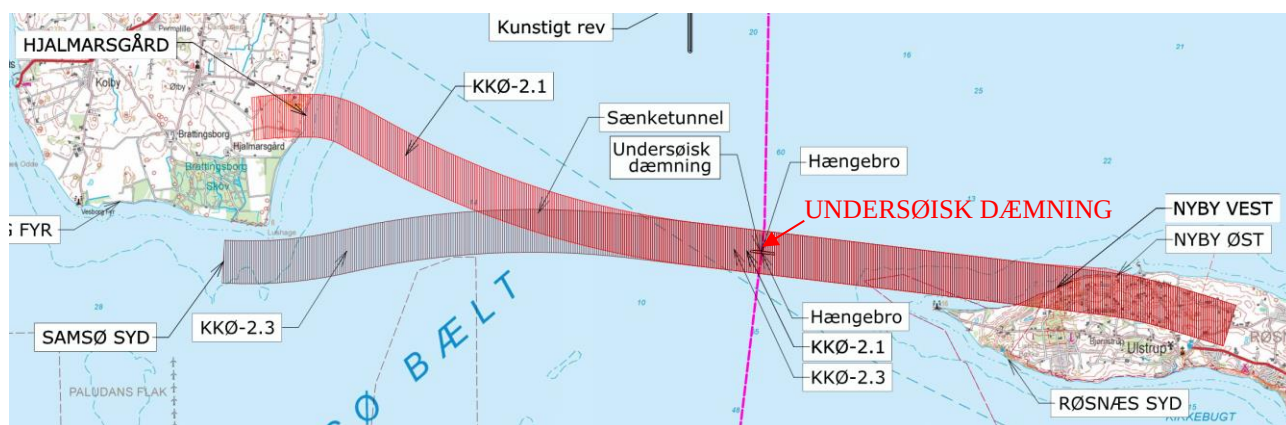
Figur 1-3 Oversigt over Lokaltet 4 for mulig kunstig ø, samt linjeføringer for tilhørende korridorene.



Figur 1-4 Oversigt over Lokaltet 5 for mulig kunstig ø, samt linjeføringer for tilhørende korridorene.



Figur 1-5 Oversigt over lokaliteter med kunstige rev (skibsstødsrev).



Figur 1-6 Oversigt over lokalitet med undersøisk dæmning.

2 Hydraulisk projekteringsgrundlag

Det hydrauliske projekteringsgrundlag for projektering i nærværende notat er præsenteret i Design basis rapporten, ref. /1/. I det følgende er principperne kort resumeret.

2.1 Bølger

Bølger til design er bestemt ved at vurdere de frie stræk, vinden og vanddybderne ved de forskellige lokaliteter for ekstreme storme med en **gentagelsesperiode på 1.000 år** eller mere. Bølger ved de 4 rev til skibsstødsbeskyttelse (skibsstødsrev) er sammenlignelige med bølgerne på Lokalitet 1 og 2. Den

undersøiske dæmning er placeret på 55 m vanddybde og bølger er derfor ikke relevant for design for denne.

Der vil være en del usikkerhed om designbølgerne, da der er usikkerhed om detaljer af vindfeltet og vindhastigheden og varighed for de mest ekstreme storme, der skal til for at genere de ekstreme bølgeforhold. Derfor, vil det efterfølgende foreløbige design af perimeterkonstruktionerne blive foretaget konservativt med ekstra sikkerhed indbygget mod uacceptabel beskadigelse/dæmningsbrud.

2.2 Vandstandsforhold

De kunstige øer og rev er beliggende ude i Kattegat og langt fra land. De er derfor udsat for bølgepåvirkning for alle vindretninger. Grundet det frie stræk i forskellige retninger, designvindhastigheder for de forskellige vindretninger, og det faktum at den samtidige designvandstand er meget forskellig afhængig af typen af storm og vindretningen, er det komplekst at bestemme en designvandstand for de marine konstruktioner. Det er derfor vigtigt for alle retninger at vurdere samhørende værdier af designvind, -bølger og -vandstand. Denne vurdering er beskrevet i detaljer i det hydrauliske projekteringsgrundlag præsenteret i Design basis, ref. [1].

Der skal i projekteringen desuden tages hensyn til en potentiel havspejlsstigning (Sea Level Rise, SLR) i forbindelsens levetid (120 år), som beskrevet i det hydrauliske projekteringsgrundlag, ref. [1]. 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 der kan udbygges etapevis og på konstruktioner, som vil være overordentligt problematisk og kostbart, hvis man fra starten vælger en for lav kote. Perimeter/digekonstruktionerne på øerne kan eventuelt udføres, så man senere kan foretage en forhøjelse af kronekoten, hvis det tænkes ind allerede ved projekteringen. Dette bør undersøges nærmere i en senere fase af projektet.

3 Kunstige øer til overgang mellem bro og tunnel

3.1 Generelt

Designvandstanden vil, som forklaret ovenfor og i detaljer i ref. [1], være ens på de forskellige lokaliteter (kunstige øer, skibsstødsrev, undersøisk dæmning). Designvandstanden er afhængig af vindretningen for projektet for de marine konstruktioner, der er baseret på en 10.000 års hændelse i år 2150.

Højvandstande skal ses i sammenhæng med estimaterne for den forventede resulterende globale havspejlsstigning, som for tidshorisonten frem til år 2150 svarer til ca. +1,30 m, se ref. [1]. SLR giver således det største bidrag til vurderingen af fremtidige designvandstande i projektets levetid; men det er samtidigt det bidrag der er forbundet med den største usikkerhed. Det er derfor vigtigt, at der for ø-, rev- og dæmningskonstruktionernes design tages hensyn hertil, således at designet er meget robust for de valgte designværdier af vandstand og bølger, men samtidigt at konstruktionerne udformes således at de kan

forstærkes og eller forhøjes så designet altid vil have den fornødne sikkerhed på 10 i minus 4 (gentagelsesperiode, $R=10.000$ år) i fremtiden selv hvis det skulle vise sig at SLR bliver væsentligt større end forudsat/estimeret i designfasen.

Ved dimensionering af konstruktionstyper, hvor det ikke er muligt eller omkostningstungt at etablere konstruktionen med mulighed for forhøjelse i fremtiden, anbefales det at der i stedet for det centrale estimat for SLR på 1,3 m, benyttes en SLR svarende til den øvre værdi for udledningsscenarioet RCP8.5 svarende til 2,0 m. I nærværende design benyttes det centrale estimat, da konstruktionerne vurderes at kunne forhøjes på et senere tidspunkt, hvis der skulle vise sig behov herfor.

I det følgende er topkoten for servicevejen og toppen af dæmningen på de kunstige øer bestemt på baggrund af: $R_c = DWL + H_s \cdot \alpha$, altså designvandstanden tillagt den signifikante bølgehøjde multipliceret med en faktor, α . For servicevejen er $\alpha = 1,0$ benyttet, da overskyl i forholdsvis store mængder accepteres under ekstremhændelser, da vejen i dette tilfælde alligevel ikke benyttes. For topkoten af dæmningen er $\alpha = 1,8$ benyttet, da der accepteres minimalt (eller intet) overskyl i forbindelse med ekstremhændelser. α er baseret på baggrund af erfaringstal fra tidligere projekter samt tidligere udførte modelforsøg.

De kunstige øers funktionalitet er at fungerer som overgang mellem bro og tunnel (sænke- eller boret tunnel), de kunstige øer har uanset funktionalitet den samme udformning i terræn, men er forskellig i vertikal opbygning afhængig af vanddybde. Længden af øerne er bestemt ud fra den maksimale stigning af vejen, den minimale vertikale radius af jernbanen samt koter ved landføring af tunnel og bro, og er ca. 500 m længere for en boret tunnel end for en sænke-tunnel.

3.2 Øer mellem Samsø og Asnæs (Lokalitet 1 og 2)

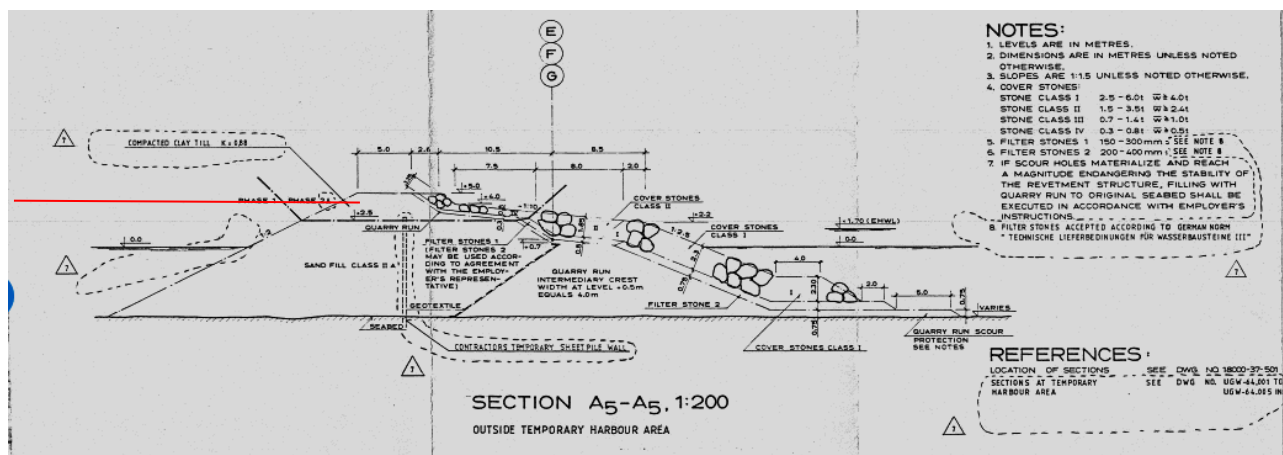
I dette afsnit behandles design af øen for **Lokalitet 1 og 2**. Placeringen af Lokalitet 1 og 2 fremgår af Figur 1-1.

Øerne har i princippet den samme udformning uanset disses placering, samtidig er designforholdene også ens for de to øer ved Lokalitet 1 og 2. Designforholdene er angivet i Tabel 3-1. Designgrundlaget for øens tværsnit er en 10.000 års vandstand med det forventede SLR i år 2150 og med bølgeforhold svarende ca. til en 1.000 års storm. Det noteres at tværsnittet for **Lokalitet 1** vurderes at have samme tværsnit som øen ved **Lokalitet 2**, hvorfor de på nuværende stade antages for ens. Et typisk tværsnit for øens perimeter ved **Lokalitet 1 og 2** fremgår af Figur 3-2.

Følgende anvendes vedr. øerne (baseret på funktions- og udførelseskrav fra henholdsvis vej, bane, bro og tunnel):

- > Længden bliver ca.:
 - > **Lokalitet 1:** 1200 m - 1700 m (for hhv. sænketunnel og boret tunnel)
 - > **Lokalitet 2:** 1200 m - 1700 m (for hhv. sænketunnel og boret tunnel)

- > Bredde af begge øer bliver ca.:
 - > 200 m mellem de to modstående dæmnings skæring med vandlinjen
- > I denne analyse er der antaget en gennemsnitsdybde for alle steder hvor perimeterkonstruktionen rundt om øerne skal udføres, i følgende koter:
 - > **Lokalitet 1: -20 m**
 - > **Lokalitet 2: -20 m**
- > Det er her antaget at havbunden alle steder består af jordarter som har en tilstrækkelig bæreevne til dæmningen. Hvis det viser sig ikke at være tilfældet kan bundudskiftning eller anden forstærkning af havbunden komme på tale, alternativt opbygges med en overhøjde på konstruktionerne således at eventuelle sætninger "modregnes".
- > Det er antaget, at der benyttes sandfyld som kerne- og tunnelmateriale bagved perimeteren som vist på Figur 3-2.
- > Det er endnu ikke fastlagt, hvordan perimeterkonstruktionen sikres en tilstrækkelig permeabilitet mod vandindtrængning til øen. Med inspiration fra perimeteren på Sprogø er der derfor i nuværende fase forudsat en spuns-væg hele vejen rundt i øens kerne til sikring af lav vandgennemstrømning, hvis en sådan er nødvendig af hensyn til f.eks. at undgå gennemstrømning/udvaskning i anlægsperioden. Sikring mod vandindtrængning ved udgravning af cut & cover tunnel er en del af tunneldesignet.
- > Som inspiration til perimetrene er perimeteren på Sprogø benyttet, se Figur 3-1. På Sprogø er konstruktionen 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 Kattegatforbindelsen øer. Det skal nævnes, at konstruktionerne på Sprogø netop er blevet forstærket og forhøjet i forbindelse med klimasikring. Bl.a. er kronekoten 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 vist beregnede foreløbige designdata for de to øer og med en opdeling på orienteringen af øen i 8 retninger, jf. ref. [1].

*Tabel 3-1 Design data for øer mellem Samsø og Asnæs, **Lokalitet 1 og 2**. SLR svarer her til den resulterende globale havspejlsstigning, dvs. inklusive landhævninger.*

Vindretning	Vandstand (2020)	Vandstand (2020)	SLR (2150)	Vandstand + SLR (2150)	Bølger, H_s	Kronekote, servicevej	Kronekote, top af dæmning
	R=100 år (m)	R=10.000 år, design (m)	(m)	design (m)	(m)	(m)	(m)
N	1,7	2,1	1,3	3,4	4	7,4	10,6
NØ	1,6	2,00	1,3	3,3	4,7	8,0	11,8
Ø	1,0	1,40	1,3	2,7	3,3	6,0	8,6
SØ	0,5	0,90	1,3	2,2	4,7	6,9	10,7
S	0,0	0,40	1,3	1,7	4,1	5,8	9,1
SV	0,6	1,00	1,3	2,3	5,2	7,5	11,7
V	0,75	1,15	1,3	2,5	4,7	7,2	10,9
NV	1,5	1,90	1,3	3,2	2,3	5,5	7,3

Der er på dette grundlag udarbejdet et typisk profil for perimeterkonstruktionen, som vist på Figur 3-2. Der er til dette profil valgt at projektere for NØ vindretning som giver en dimensionsgivende bølgehøjde på, $H_s=4,7$ m og en tilhørende designvandstand på +3,3 m. For vind i SV retning er bølgehøjden højere, men vandstanden er lavere og derfor ikke dimensgivende. Dette medfører at topkoten på beton-servicevejen, med en bredde på 5,0 m og en lagtykkelse på 1,2 m, bliver kote +8,0. Forsiden består af 2 lag dæksten over 2 lag filtersten. Hældningen af dæklaget varierer fra 1:2 i kote -13,0 til 1:3 i kote -8,0 og op til kote +8,0 m. Kernen består af ral/sprængstensfyld ud mod filtersten for at undgå udvaskning, samt sand i midten af hensyn til ramning af spuns. Der udlægges geotekstil mellem sand og ral/sprængstensfyld i kernen.

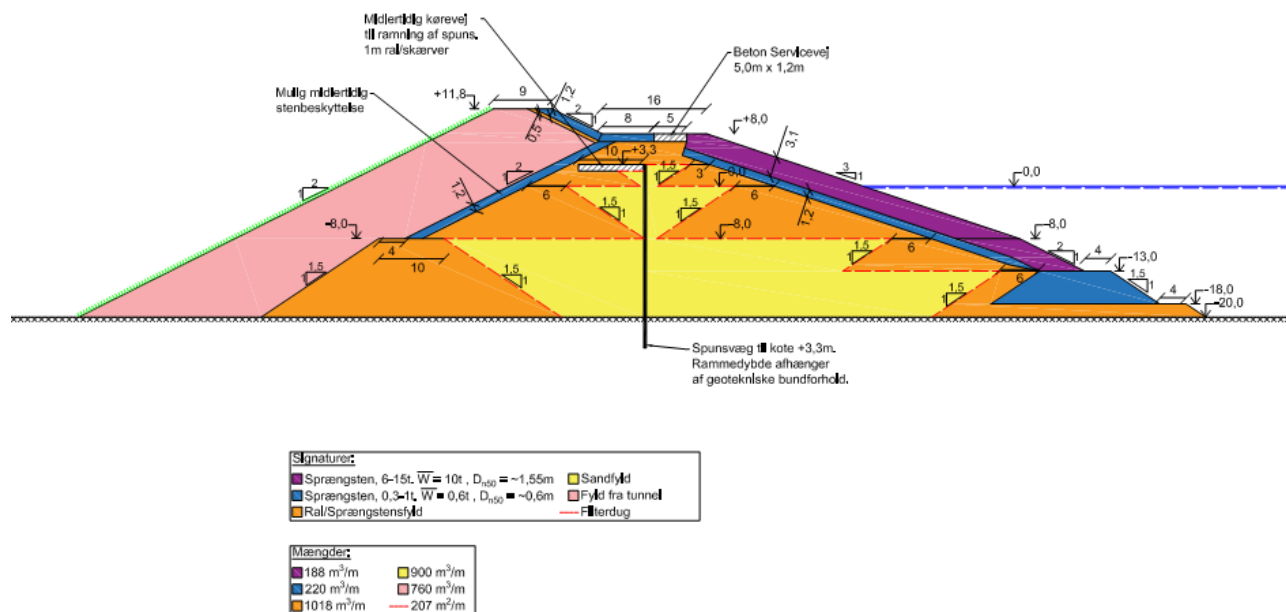
Bagved servicevejen er der opbygget et jorddige op til kote +11,8 m med fyld fra udgravningen til tunnelen. Bag servicevejen og på forsiden af jorddiget lægges dæksten for at beskytte jorddiget mod erosion under designhændelsen. Der lægges dæksten på bagsiden af dæmningen, da bagsiden under anlægsfasen vil være eksponeret mod bølger indtil at hele øen er opbygget (jordfyldet lægges først på efter hele øens perimeter er anlagt).

I midten af dæmningen etableres for nu en spunsvæg med topkote i +4,0 for at undgå gennemstrømning/udvaskning i dæmningen som beskrevet ovenfor. I forbindelse med ramning af spuns etableres der en midlertidig kørevej i kote +3,3.

Det viste profil er foreløbigt og udarbejdet for at kunne udtage mængder til anlægsoverslaget og foreløbig miljøvurdering. Det vil være nødvendigt for

verifikation at der udføres modelforsøg med typiske profiler. Det kan ikke udelukkes at fordelingen af stengraderinger eller topkoterne bliver ændret.

Der vil være begrænset/acceptabel beskadigelse på dæklag af sten, mens bølgeoverskyl vil være begrænset til noget "spray". Ved endelige fastlæggelse af kronen 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 afvanding.



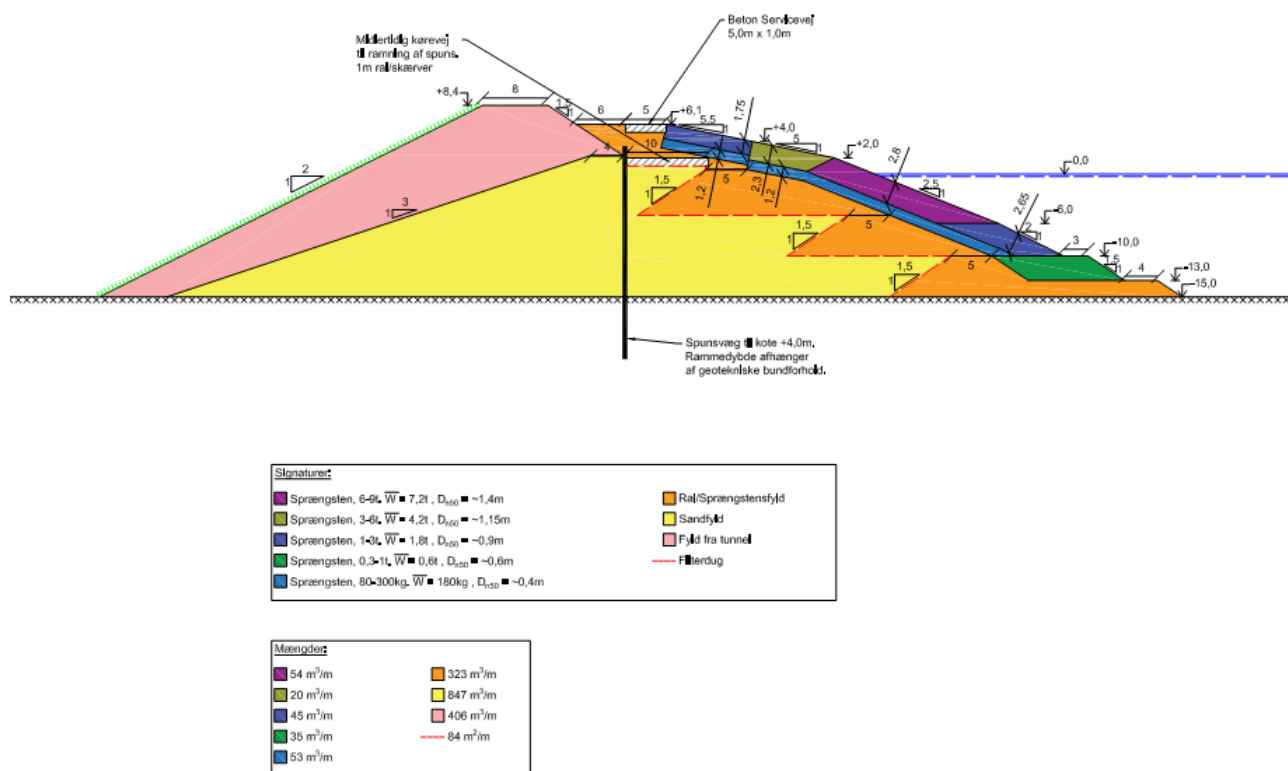
Figur 3-2 Tværsnit af perimeterkonstruktion ved Lokalitet 1 og 2.

3.3 Ø syd for Thunø (Lokalitet 3)

Placeringen af **Lokalitet 3** fremgår af Figur 1-2. Designforholdene for Lokalitet 3 fremgår af Tabel 3-2. Det fremgår at kronen på servicevejen er øget til +6,1 m og at kronen for toppen af dæmningen er øget til +8,4 m i forhold til det tidligere beskrevet i ref. [2]. Designgrundlaget for øens tværsnit er en 10.000 års vandstand med det forventede SLR i år 2150 og med bølgeforhold svarende ca. til en 1.000 års storm. Havbunden er beliggende i ca. kote -15 m og længden af øen er ca. 1200 m – 1700 m for hhv. sænketunnel og boret tunnel. Der er på dette grundlag udarbejdet et typisk profil for perimeterkonstruktionen, som vist på Figur 3-3. Det bemærkes at det på indersiden af perimeterkonstruktionen ikke forventes at være nødvendigt med en opbygning med ral som for de øvrige øer, da øen på denne lokalitet ligger i læ af Thunø for de værste bølger fra nordlige retninger.

Tabel 3-2 Design data for ø syd for Thunø, **Lokalitet 3**. SLR svarer her til den resulterende globale havspejlsstigning, dvs. inklusive landhævninger.

Vindretning	Vandstand (2020)	Vandstand (2020)	SLR (2150)	Vandstand + SLR (2150)	Bølger, H_s	Kronekote, servicevej	Kronekote, top af dæmning
	R=100 år (m)	R=10.000 år, design (m)	(m)	design (m)	(m)	(m)	(m)
N	1,7	2,1	1,3	3,4	1,5	4,9	6,1
NØ	1,6	2,00	1,3	3,3	1,2	4,5	5,5
Ø	1,0	1,40	1,3	2,7	2,7	5,4	7,6
SØ	0,5	0,90	1,3	2,2	2,7	4,9	7,1
S	0,0	0,40	1,3	1,7	2,7	4,4	6,6
SV	0,6	1,00	1,3	2,3	3,4	5,7	8,4
V	0,75	1,15	1,3	2,5	3,1	5,6	8,0
NV	1,5	1,90	1,3	3,2	2,9	6,1	8,4



Figur 3-3 Tværsnit af perimeterkonstruktion ved Lokalitet 3.

3.4 Øer mellem Sjælland Odde og Aarhus/Djursland (Lokalitet 4 og 5)

I dette afsnit behandles design af øen for **Lokalitet 4 og 5**. Placeringen af Lokalitet 4 og 5 fremgår af Figur 1-3 og Figur 1-4.

De to øer har forskellige designforhold samt dybde og dermed størrelse. Designforholdene er angivet i Tabel 3-3 og Tabel 3-4 for henholdsvis Lokalitet 4 og 5. Designgrundlaget for øernes tværsnit er en 10.000 års vandstand med det forventede SLR i år 2150 og med bølgeforhold svarende ca. til en 1.000 års designhændelse. Et typisk tværsnit for øen ved **Lokalitet 4 og 5** er vist på Figur 3-4 hhv. Figur 3-5. For antagelse vedrørende de to øer henvises til afsnit 3.2, dog med undtagelse af længden og havbundens bundkote, hvor følgende er anvendt:

- > Længden ca.:
 - > **Lokalitet 4:** 1200 m - 1700 m (for hhv. sænketunnel og boret tunnel)
 - > **Lokalitet 5:** 1400 m - 1900 m (for hhv. sænketunnel og boret tunnel)
- > I denne analyse er der antaget en gennemsnitsdybde for alle steder hvor perimeterkonstruktionen rundt om øerne skal udføres, i følgende koter:
 - > **Lokalitet 4:** -15 m
 - > **Lokalitet 5:** -23 m

Tabel 3-3 Design data for én af mulige øer mellem Sjællands Odde og Aarhus, **Lokalitet 4**. SLR svarer her til den resulterende globale havspejlsstigning, dvs. inklusive landhævninger.

Vindretning	Vandstand (2020)	Vandstand (2020)	SLR (2150)	Vandstand + SLR (2150)	Bølger, H_s	Kronekote, servicevej	Kronekote, top af dæmning
	R=100 år (m)	R=10.000 år, design (m)	(m)	design (m)	(m)	(m)	(m)
N	1,7	2,1	1,3	3,4	3,8	7,2	10,2
NØ	1,6	2,00	1,3	3,3	5,8	9,1	13,7
Ø	1,0	1,40	1,3	2,7	4,1	6,8	10,1
SØ	0,5	0,90	1,3	2,2	4,7	6,9	10,7
S	0,0	0,40	1,3	1,7	3,3	5,0	7,6
SV	0,6	1,00	1,3	2,3	3,8	6,1	9,1
V	0,75	1,15	1,3	2,5	4,9	7,4	11,3
NV	1,5	1,90	1,3	3,2	4,9	8,1	12,0

Tabel 3-4 Design data for én af mulige øer mellem Sjællands Odde og Djursland, **Lokalitet 5**. SLR svarer her til den resulterende globale havspejlsstigning, dvs. inklusive landhævninger.

Vindretning	Vandstand (2020)	Vandstand (2020)	SLR (2150)	Vandstand + SLR (2150)	Bølger, H _s	Kronekote, servicevej	Kronekote, top af dæmning
	R=100 år (m)	R=10.000 år, design (m)	(m)	design (m)	(m)	(m)	(m)
N	1,7	2,1	1,3	3,4	5,1	8,5	12,6
NØ	1,6	2,00	1,3	3,3	6,6	9,5	15,2
Ø	1,0	1,40	1,3	2,7	3,3	6,0	8,6
SØ	0,5	0,90	1,3	2,2	4,7	6,9	10,7
S	0,0	0,40	1,3	1,7	4,1	5,8	9,1
SV	0,6	1,00	1,3	2,3	4,5	6,8	10,4
V	0,75	1,15	1,3	2,5	5,5	8,0	12,4
NV	1,5	1,90	1,3	3,2	4,5	7,7	11,3

Der er på de ovennævnte grundlag udarbejdet et typisk profil for perimeterkonstruktionen, som vist på Figur 3-4 og Figur 3-5 for Lokalitet 4 hhv. 5.

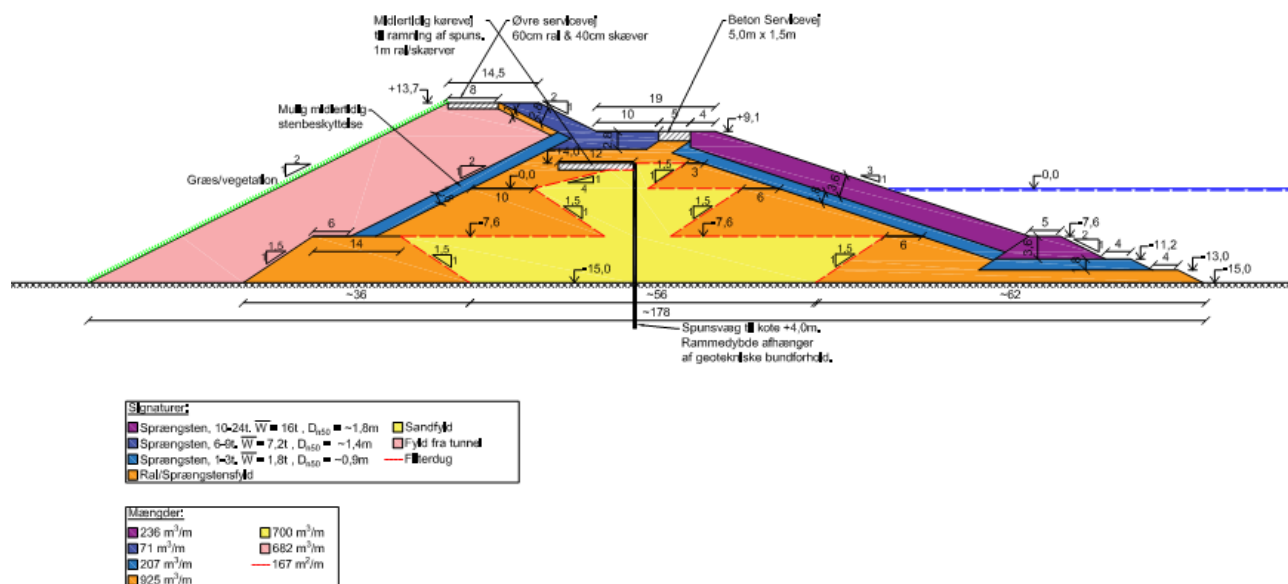
Der er til dette profil valgt at anlægge en beton-servicevej med en bredde på 5,0 m og en lagtykkelse på 1,5 m i kote +9,1 m hhv. +9,5 m (Lokalitet 4 hhv. 5). Forsiden består af 2 lag dæksten over 2 lag filtersten. Hældningen af dæklaget er 1:3 fra kote -7,6 op til kote +9,1 m hhv. +9,5 m. Kernen består af ral/sprængstensfyld ud mod filtersten for at undgå udvaskning, samt sand i midten af hensyn til ramning af spuns. Der udlægges geotekstil mellem sand og ral/sprængstensfyld i kernen.

Bagved servicevejen er der opbygget et jorddige op til kote +13,7 m hhv. +15,0 m med fyld fra udgravningen til tunnelen. Bag servicevejen og på forsiden af jorddiget lægges dæksten for at beskytte jorddiget mod erosion under designhændelsen. Der lægges dæksten på bagsiden af dæmningen, da bagsiden under anlægsfasen vil være eksponeret mod bølger indtil at hele øen er opbygget (jordfyldet lægges først på efter hele øens perimeter er anlagt).

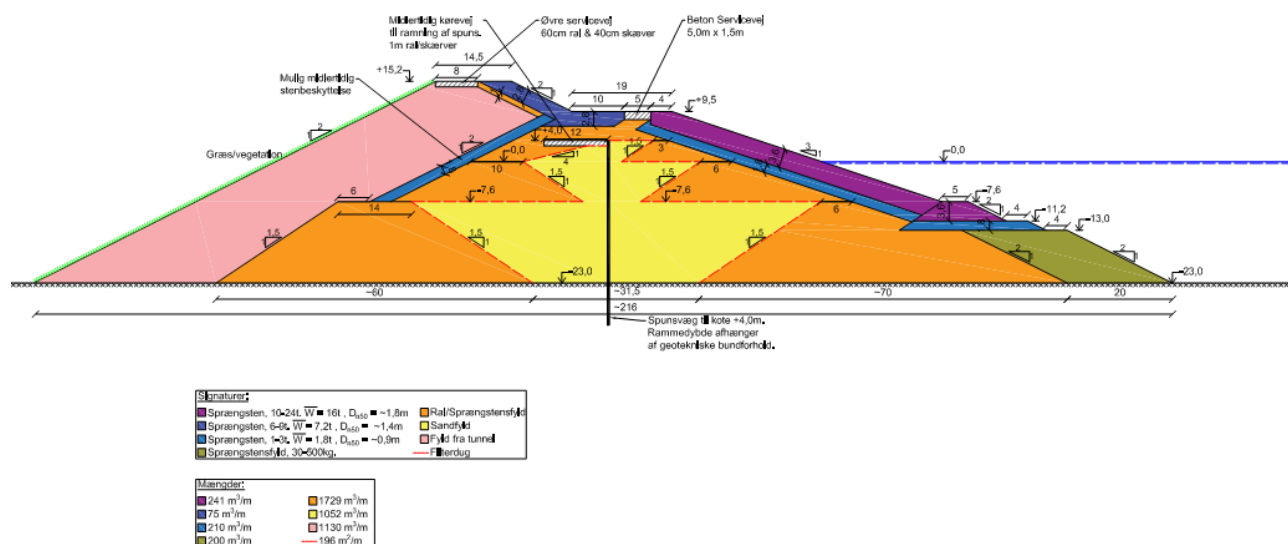
I midten af dæmningen etableres en spunsvæg med topkote i +4,0 for at undgå gennemstrømning/udvaskning i dæmningen. I forbindelse med ramning af spuns etableres der en midlertidig kørevej i kote +4,0.

De viste profiler er foreløbige og udarbejdet for at kunne udtage mængder. Det vil være nødvendigt for verifikation at der udføres modelforsøg med typiske profiler. Det kan ikke udelukkes at fordelingen af stengraderinger eller topkoterne bliver ændret.

Der vil være begrænset/acceptabel beskadigelse på dæklag af sten, mens bølge-overskyl vil være begrænset til noget "spray". Ved endelige fastlæggelse af kro-nekoten og det tilhørende kriterium for acceptabelt bølgeoverskyl bør den sam-lede mængde overskyllende vand sammenlignes med et design-regnskyl, da det indre af øen og tunnelen vil blive forsynet med dræning.



Figur 3-4 Tværsnit af perimeterkonstruktion ved Lokalitet 4.



Figur 3-5 Tværsnit af perimeterkonstruktion ved Lokalitet 5.

3.5 Bemærkninger

De udarbejdede tværsnit for **Lokalitet 1-5** er foreløbige og baseret på et meget sjældent designscenarie: en samtidig 10.000 års vandstand og 1.000 års bølge. Tværsnittene kan generelt ses som det konservative bud på hvordan tværsnittet kan se ud, pga. følgende:

- > For individuelle lokaliteter er der benyttet de største vanddybder, som er antaget konstante over hele tværsnittet og langs hele øens perimeter, hvor havbunden i virkeligheden vil have varierende dybder både på tværs af profilet og langs øens perimeter.
- > Der er estimeret en topkote for både beton-servicevej og dæmningerne langs hele øernes perimeter, baseret på den værste designhændelse fra én retning. Dækstenene er antaget ens hele vejen rundt om øen og er bestemt på baggrund af den aktuelle designbølgehøjde fra én retning.
- > Designbølgerne er baseret på en simpel "hindcast-metode", jf. afsnit 2.1, hvorfor bølgerne ikke er endeligt fastlagte og der er foretaget konservative antagelser under beregningen af designbølgerne.

I en senere fase bør muligheden for at variere topkoterne og dækstenenes størrelse langs øernes perimetere undersøges for eventuelt at reducere de nødvendige mængder i tværsnittene.

Desuden bør der også i en senere fase udarbejdes en hydrodynamisk model som dækker Kattegat og relevante farvande omkring og syd for lokaliteterne. Den hydrodynamiske model har til formål at give et bedre estimat af bølgerne ved lokaliteterne, hvor der tages bedre højde for de meget varierende vandstande i farvandet.

4 Kunstige rev til skibsstødsbeskyttelse

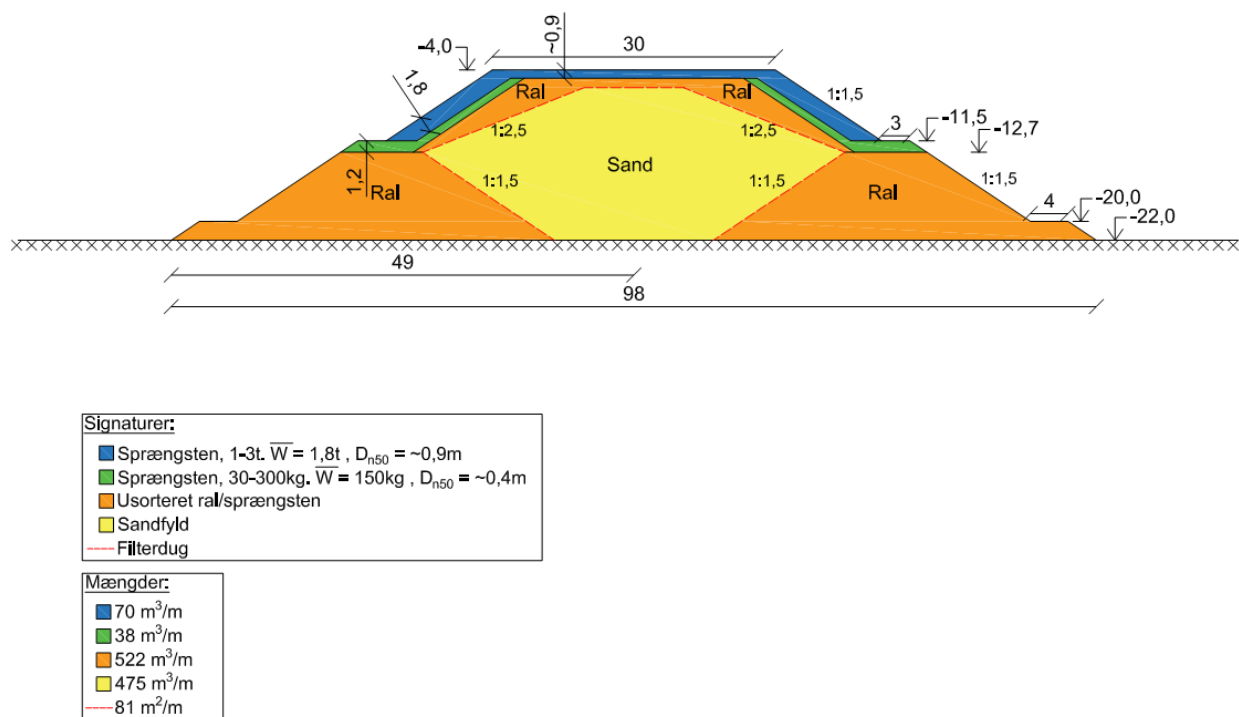
Udover de kunstige øer er der for broløsningerne foretaget vurdering af bygning af undersøiske kunstige rev (skibsstødsrev) til afvisning af skibe der er kommet uden for den normale vandvej/sejlrute, som tidligere beskrevet i ref. [2].

Disse rev er nu opdateret i henhold til opdaterede vanddybder og hydraulisk projekteringsgrundlag, som er sammenlignelige med forholdene for de kunstige øer på Lokalitet 1 og 2, se Tabel 3-1. Det er antaget en vanddybde på ca. 22 m hhv. 30 m, og at revene skal have en bredde på 30 m i kote -4,0 m.

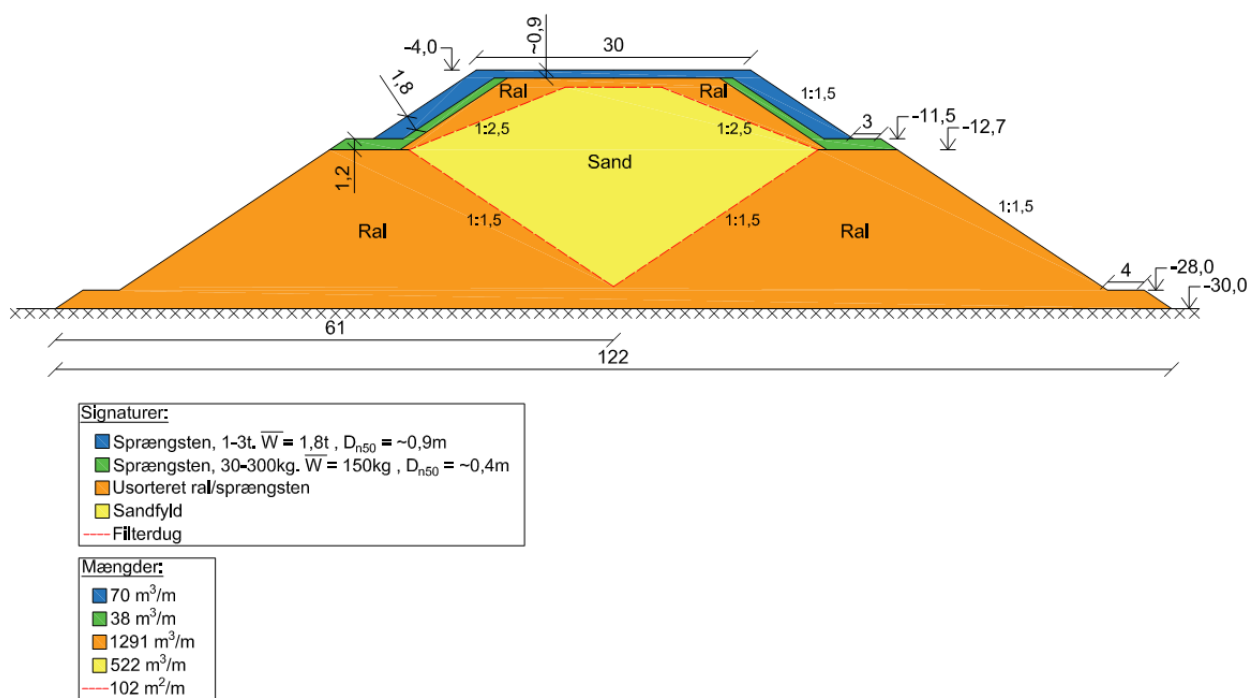
Det er her antaget at havbunden alle steder består af jordarter som har en tilstrækkelig bæreevne til revet. Hvis det viser sig ikke at være tilfældet kan bundudskiftning eller anden forstærkning af havbunden komme på tale, alternativt opbygges med en overhøjde på konstruktionerne således at eventuelle sætninger "modregnes".

Materialerne er primært sand og ral med en ydre beskyttelse over kote ca. -12,7 m med dæksten og filterlag. Der er benyttet to lag dæksten på siderne og et lag på toppen.

De foreløbige tværsnit af skibsstødsrevene er vist på Figur 4-1 hhv. Figur 4-2.



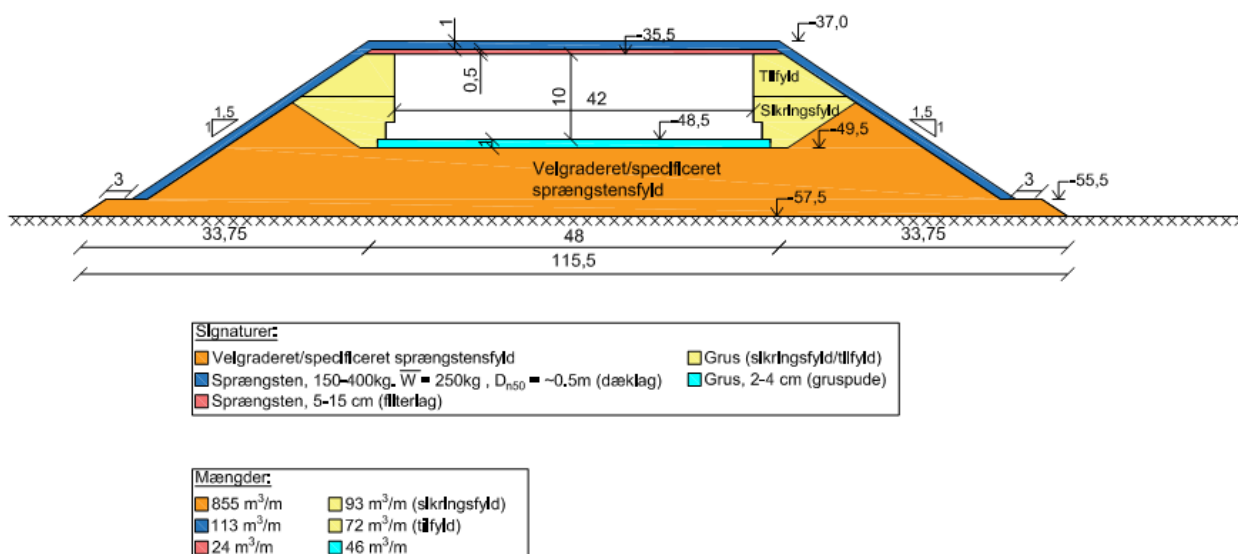
Figur 4-1 Tværsnit af skibsstødsrev på 22 m vanddybde.



Figur 4-2 Tværsnit af skibsstødsrev på 30 m vanddybde.

5 Undersøisk dæmning til sænketunnel

Udover de kunstige øer og rev er der foretaget en vurdering af bygning af en undersøisk dæmning til at understøtte og beskytte sænketunnel i bunden af Storbæltrends i Samsø Bælt på tværs af T-ruten. Da denne ligger på dybt vand er påvirkning fra ekstreme bølger og vandstande ikke relevante. Strømmen i bunden af renden skal der dog dimensioneres for. Desuden skal opbygningen af denne undersøiske dæmning også kunne bygges på disse dybder. Jf. det hydrauliske projekteringsgrundlag, se ref. /1/, vurderes strømmen ved dæmningen at kunne blive omkring 2 m/s. De typisk tværsnit af den undersøiske dæmning er vist på Figur 5-1.



Figur 5-1 Tværsnit af undersøisk dæmning til sænketunnel.

6 Sænketunnelbeskyttelse ved kunstige øer

Udover den undersøiske dæmning er der for sænketunnelløsningerne foretaget vurdering af bygning af beskyttelse til afvisning af skibe der er kommet uden for den normale vandvej/sejlrute og dermed risikerer at påsejle sænketunnel, hvor denne føres iland på de kunstige øer.

Da det er mest sandsynligt at der vil være behov for beskyttelse ved øerne ved Lokalitet 1 og 2 og da disse øer og designforhold er sammenlignelige er der udarbejdet længde- og tværsnit for den i Figur 3-2 viste ø-perimeter. Designforholdene for beskyttelsen er de samme som for øen ved Lokalitet 1 og 2, se Tabel 3-1. Antagelserne mht. vanddybder mv. er tilsvarende Lokalitet 1 og 2 øerne.

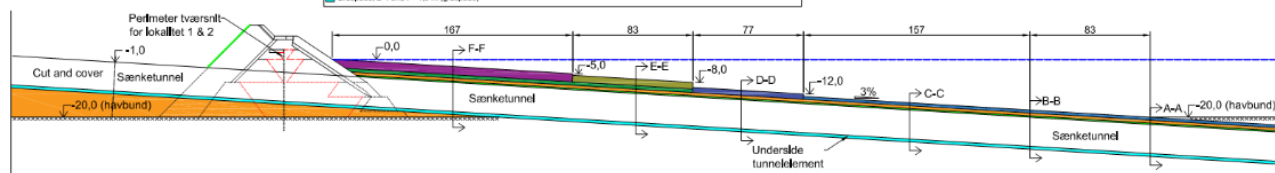
Det vurderes at der vil være behov for særlig beskyttelse på ca. 600 m fra ø-perimeteren. Foreslået længdesnit af sænketunnelbeskyttelsen ved de kunstige øer er vist på Figur 6-1, og udvalgte tværsnit er vist på Figur 6-2, Figur 6-3 og Figur 6-4.

Der vil også være behov for skibsstødsbeskyttelse for KKV-øen, og denne estimeres i nuværende fase konservativt at være tilsvarende for KKØ-øerne, men

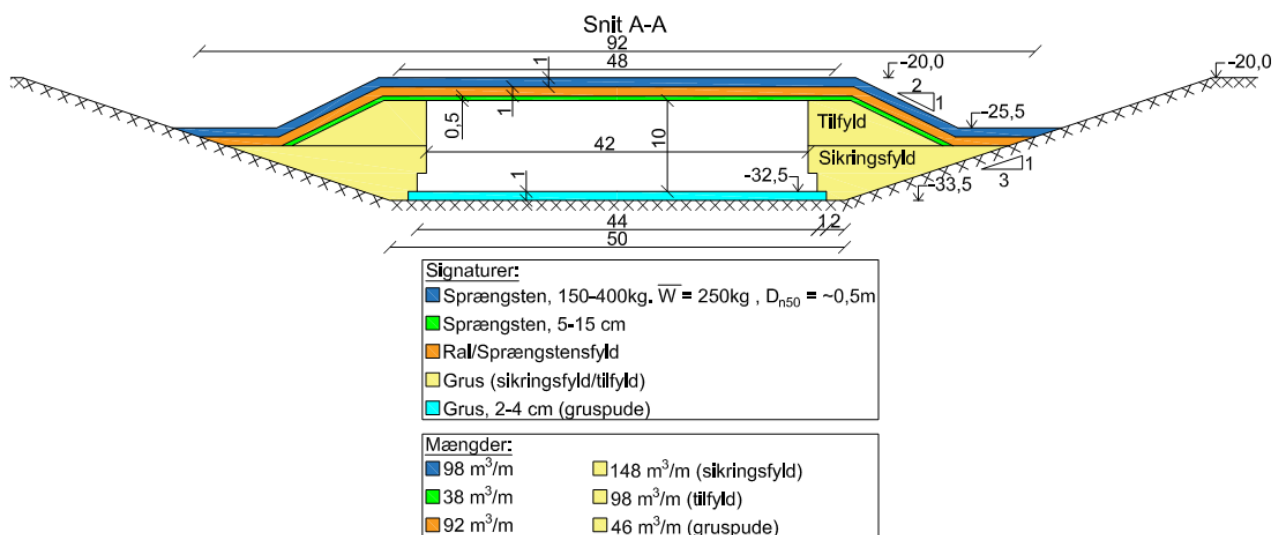
Noter:
Føringsret horisontal med faktor 21 forhold til boret.
 dvs. 1 stakel for hældning 5%, så er der tegnet med hældning 6%.

Størrelser:

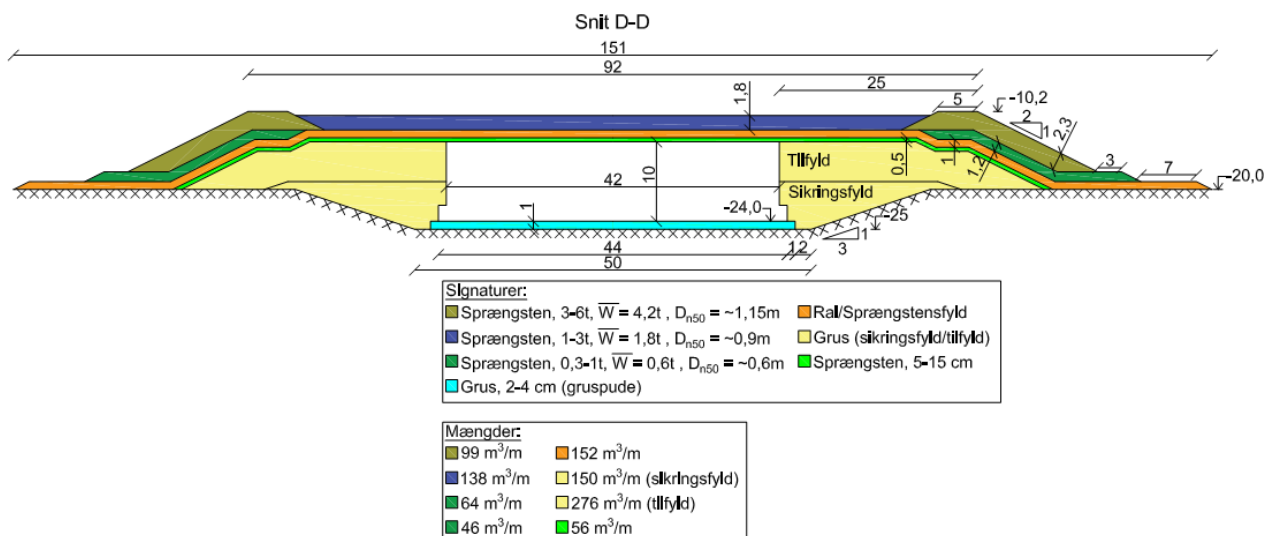
■ Sprængsten, 6-14, $Q_{100} = -1,55m$, $\sigma = 3,10 m$ ■ Sprængsten, 6-65, $Q_{100} = -2,21$, $Q_{500} = -1,4m$, $\sigma = 2,8 m$ ■ Sprængsten, 3-65, $Q_{100} = -2,21$, $Q_{500} = -1,15m$, $\sigma = 2,3 m$ ■ Sprængsten, 1-35, $Q_{100} = -0,8m$, $\sigma = 1,8 m$ ■ Grusopde, 2-4, $\sigma = 1,0 m$ (grusopde)	■ Sprængsten, 0,3-16, $Q_{100} = 0,61$, $Q_{500} = -0,6m$, $\sigma = 1,2 m$ ■ Sprængsten, 150-400kg, $Q_{100} = 250kg$, $Q_{500} = -0,5m$, $\sigma = 1,0 m$ ■ Sprængsten, 5-45 cm, $\sigma = 0,5 m$ ■ Rull Sprængstenefyld, $\sigma = 1,0 m$
--	---



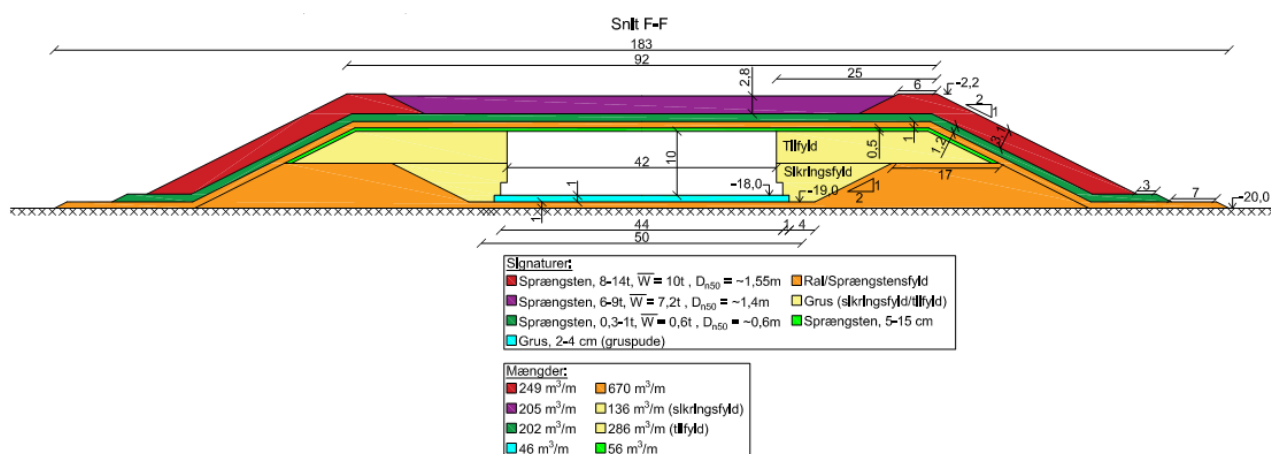
Figur 6-1 Længdesnit af sænketunnelbeskyttelsen ved kunstig ø, Lokalitet 1 og 2. I det følgende er udvalgte tværsnit af beskyttelsen vist.



Figur 6-2 Tværsnit A-A af sænketunnelbeskyttelsen ved kunstig ø, Lokalitet 1 og 2.



Figur 6-3 Tværsnit D-D af sænketunnelbeskyttelsen ved kunstig ø, Lokalitet 1 og 2.



Figur 6-4 Tværsnit F-F af sænketunnelbeskyttelsen ved kunstig ø, Lokalitet 1 og 2.

7 Beskyttelse af boret tunnel ved kunstige øer

Egenvægten alene kan ikke sikre den borede tunnel imod opdrift, hvorfor der skal være ca. en tunneldiameters jorddække over tunnelen. Ved overgangen til kunstige øer er der derfor behov for at udføre en ekstra jorddækning over en vis længde.

Beskyttelsen er vurderet for en kunstig ø beliggende på 20 m vanddybde. Jorddækket inkl. sikring skal være 15 m tykt svarende til diameteren af den borede tunnel. Inde på øen, hvor boret tunnel går over i cut & cover tunnel, er terrænkoten +4,0 m og overside af boret tunnel er i kote -11,0 m. I snittet hvor vandlinjen skærer perimeterdæmningen skal oversiden af tunnel være i kote -15,0 m og dækket udgøres af perimeterdæmningen. Hvor perimeterdæmningen ender, anlægges således et jorddække ved at der udlægges et tykt lag af fyldmateriale, som den borede tunnel går igennem. Længden af dette dække er

bestemt af vanddybden og maksimum længdegradient af tunnelen til 20m/0,03=667 m.

Til sikring af jorddækket, ved spidsen af den kunstige ø, hvor strømforhold kan gøre at havbunden vil kunne erodere, anlægges der et område med større sten til at beskytte imod erosion.

Stenstørrelser og tykkelse af stenbeskyttelse over tunnel og på skråninger er den samme for boret tunnel, som for sænketunnel og udgør det største bidrag til pris.

Bredden af beskyttelsen er vurderet til 130 m og samlet skal der 0,5 millioner m³ fyld til beskyttelse af boret tunnel.

Baseret på mængder og enhedspriser for fyld, er det vurderet at prisen for beskyttelse af boret tunnel i gennemsnit over strækningen på 667 m er 15% højere end for sænketunnel svarende til en enhedspris på $1,15 * 700.000 = 805.000$ kr./m.

8 Omkostningsoverslag

På baggrund af bemærkningerne i afsnit 3.5 vil de følgende omkostningsoverslag være konservative, da tværsnittene på de kunstige øer og rev samt undersøiske dæmning anses for at være robuste design. Med udgangspunkt i disse tværsnit og under benyttelse af estimerede enhedspriser er der udregnet et overslag over materialeprisen inkl. udførelsen for perimeterkonstruktionerne på de kunstige øer og rev samt undersøiske dæmning. Følgende enhedspriser er estimeret:

> Kunstige øer - Lokalitet 1 og 2:	~1.000.000 DKK/m ø-perimeter
> Kunstig ø - Lokalitet 3:	~500.000 DKK/m ø-perimeter
> Kunstig ø - Lokalitet 4:	~1.000.000 DKK/m ø-perimeter
> Kunstig ø - Lokalitet 5:	~1.350.000 DKK/m ø-perimeter
> Skibsstødsrev – -30 m:	~600.000 DKK/m rev
> Skibsstødsrev – -22 m:	~325.000 DKK/m rev
> Undersøiske dæmning:	~500.000 DKK/m dæmning
> Sænketunnelbeskyttelse ved øer:	~700.000 DKK/m beskyttelse
> Sænketunnelbeskyttelse generelt:	~280.000 DKK/m beskyttelse
> Beskyttelse af boret tunnel ved øer:	~805.000 DKK/m beskyttelse

Følgende enhedspriser for både materiale inkl. indbygning men uden mobilisering og demobilisering mv. er anvendt:

> Indbygning af tunnelmateriale:	100 DKK/m ³
> Filterdug:	50 DKK/m ²
> Ral/usorteret sprængsten:	250 DKK/m ³
> Sand:	120 DKK/m ³
> Gruspude:	550 DKK/m ³
> Sikrings/tilfyld:	400 DKK/m ³
> Filterlag og sprængsten (30-300 kg):	450 DKK/m ³
> Dæksten, str. 150-400 kg:	600 DKK/m ³
> Dæksten, str. 0,3-1 ton:	700 DKK/m ³
> Dæksten, str. 1-3 ton:	700 DKK/m ³
> Dæksten, str. 3-6 ton:	700 DKK/m ³
> Dæksten, str. 6-9 ton:	700 DKK/m ³
> Dæksten, str. 8-14 ton:	900 DKK/m ³

9 References

- [1] COWI, »Kattegatforbindelse - Kyst-kyst - Anlægstekniske forundersøgelser, Design basis,« 2020.
- [2] COWI, »Indledende linjeføringsovervejelser for en kattegatforbindelse - Kunstige øer og rev,« Doc. 126115-2-03, 2020.
- [3] Kystdirektoratet, »Højvandsstatistikker 2017,« 2019.
- [4] COWI, »Byernes udfordringer med havvandsstigning og stormflod,« For Realdania, 2017.
- [5] IPCC, »IPCC SR Ocean and Cryosphere. Chapter 4: Sea Level Rise and Implications for Low Lying Islands, Coasts and Communities,« 24th 24th September 2019.
- [6] J. Egedal, »Abnorme Vandstandsforhold i de Danske Farvande II,« DMI publikation Nr. 11, 1949.
- [7] D. L. Cour, »Abnorme Vandstandsforhold i de Danske Farvande I,« DMI publikation nr. 4, 1916.
- [8] P. A. K. S. E. K. a. S. C. Knudsen, »An uplift model for Denmark - and work ahead,« 2016.
- [9] DMI, »Klimaatlas-rapport, Danmark,« Oktober 2019.

- [10] DMI, »Methods used in the Danish Climate Atlas,« DMI Report 19-17, October 2019.
- [11] DMI, »Vejledning i anvendelse af udledningsscenarier,« 2018.
- [12] A. Colding, »Nogle Undersøgelser over Stormen over Nord- og Mellem-Europa af 12. - 14. Nov. 1872 og over den derved fremkaldte Vandflod i Østersøen. Med 23 planer og Kort.,« 1881.