

# STORMFLODSBESKYTTELSE I TAARBÆK

## INDHOLD

1	Introduktion	2
2	Eksisterende forhold	2
3	Risikoniveau og designforhold	4
4	Mobile løsninger	5
4.1	Mobile løsninger for eksisterende kystmure	5
4.2	Svinerygsplanker	7
4.3	Ny kystmur med svinerygsplanker	9
5	Forhøj de eksisterende kystmure	10
6	Bred stenkastning foran kystmur	11
7	Offshore bølgebrydere	12
7.1	Anlægsovervejelser	15
7.2	Mængder og prisoverslag	15
8	Sammenfatning	16
8.1	Mobile løsninger	16
8.2	Bred stenkastning foran kystmur	16
8.3	Offshore bølgebrydere	17
8.4	Sammenligning	17
9	Referencer	18

PROJEKTNR.

A273244

DOKUMENTNR.

001

VERSION

2.0

UDGIVELSESDATO

16 feb 2024

BESKRIVELSE

Notat

UDARBEJDET

JJU/OJJ

KONTROLLERET

OJJ/JJU

GODKENDT

JJU

## BILAG

- Bilag A Diskussion af acceptabelt bølgeoverskyl
- Bilag B Kronik om Kystbeskyttelse med stenrev på Nordkysten af Sjælland
- Bilag C Bølgetransmission for offshore bølgebrydere

### 1 Introduktion

Formålet med dette notat er at vurdere muligheder for at bruge de eksisterende kystmure og mobile løsninger i en fremtidig stormflodsbeskyttelse, der kan sikre strækningen fra Nordlyvej lige nord for havnen til Bellevue i syd. Endvidere er en etapevis tilgang for mobil løsning ovenpå kystmur belyst, samt, som et alternativ til undersøiske rev, et koncept bestående af en serie af synlige offshore bølgebrydere.

Indledningsvis vil vi beskrive de eksisterende forhold på den betragtede strækning med fokus på eksisterende kystmure og stenkastninger. Efterfølgende følger en vurdering af acceptabelt risikoniveau for en stormflodsbeskyttelse baseret på eksisterende data for vandstande og bølger kombineret med fremtidige vandspejlsstigninger.

De mest anvendte mobile løsninger for sikring mod stormfloder er kort beskrevet efterfulgt af en mere detaljeret gennemgang af svinerygsplanker. Beskrivelsen omhandler både krav og udfordringer ved etablering af svinerygsplanker på de eksisterende kystmure og på en ny gennemgående kystmur.

Efterfølgende har vi beskrevet forslag med en bred stenkastning foran de eksisterende kystmure samt et koncept for et system af offshore bølgebrydere, der vil gøre det muligt at bevare særpræget med de eksisterende kystmure og stadig gøre det muligt at se ud over vandet.

### 2 Eksisterende forhold

Strækningen er ca. 1000 m lang, og der er beboelse helt ud til Øresund, dog med et par kommunale matrikler. Der er tale om en kompleks kyststrækning med væsentligt forskellige stormflodsbeskyttelser mht. type af konstruktion, udseende og tilstand. Nogle grunde er allerede godt beskyttet mod stormflod også med fremtidig stigende vandstand mens andre grunde ikke er tilstrækkelig beskyttet mod stormfloder.

Kyststrækningen er dokumenteret i "Skitseprojekt (2023)" og kystbeskyttelsen består primært af betonmure med varierende størrelse af stenkastning lige foran muren. Murens topkote varierer en del og er fra ca. +1,5 m til ca. +2.8 m, det meste af strækningen har mure fra +2.0 m til +2.3 m.

Derudover er der på strækningerne ved Rosenhaven og området ved Taarbæk vandskikklub, og Bombegrunden hvor den nuværende beskyttelse er lavere end hos de fleste grundejere.

Problemet for strækning ved Taarbæk er, at der ikke er tilstrækkelig beskyttelse mod oversvømmelse under stormflod med samtidigt højvande og bølgepåvirkning. Dette har tidligere givet problemer især under stormfloden Bodil d. 6. dec. 2013, i den forbindelse forekom bølgeoverskyl på mure med en topkote på +2.2 m, endvidere opstod der skader på nordre mole.

Grundejerne har et ønske om, at eksisterende konstruktioner så vidt muligt skal indgå i fremtidige løsninger og det varierende udtryk langs strækningen bevares i så stort et omfang det er muligt. Endvidere er der et ønske om at kunne vedblive med at have udsigt over Øresund.

Et kort fra "Stormflodsberedskab i Taarbæk (2021)" er vist nedenfor. Kortet viser, hvor eksisterende mure og huse over 2 m DVR90 er placeret og derved højene nok (grøn/blå linje) til at udgøre en vis højvandsbeskyttelse.



### 3 Risikoniveau og designforhold

Øresundskysten er især udsat for to typer ekstreme stormfloder:

**Stormflod fra nord** med meget kraftig vind fra NV til N tilsvarende stormene Bodil og Pia. Disse storme giver det højeste højvande, men begrænsede bølger, da vinden kommer skråt ind som fralandsvind eller stort set parallel med kysten. DHIs undersøgelser viser at den signifikante bølgehøjde kan opnå en størrelse på ca. 1,0 m med en peak bølgeperiode på 6 til 8 s. Vandstanden i Københavns Havn under Bodil var ca. +1,7 m, og ifølge vandstandsstatistikken fra Kystdirektoratet er vandstanden for en 50 års hændelse +1.5 m og for en 100 års hændelse +1.6 m. I den forbindelse skal det noteres, at en vandstand på +1.7 m, svarende til Bodil, er rapporteret for 1921/22 af DMI i rapport af 1949. Der kan således være tale om, at en storm som Bodil kan have et gentagelsesinterval på 100 år. Dette skal afklares i forbindelse med fremtidige analyser i forbindelse med projektering af en kystbeskyttelse.

**Stormflod fra øst** med meget kraftig vind fra NNØ til Ø. Den værste veldokumenterede storm af denne type er 13-14 nov. 1872, som forårsagede meget stor stormflod i den vestlige del af Østersøen og med storm i Øresund med en vind på ca. 27 m/s med et maksimalt højvande på +0,5 m, hvilket med vandstandsstigningen de sidste 150 år svarer til ca. +0,65 m ved Taarbæk. Dette regnes konservativt som en 100 års storm i dag. Denne situation er medtaget for at sikre, at fremtidig kystbeskyttelse er undersøgt også for ekstreme bølger fra østlig retning.

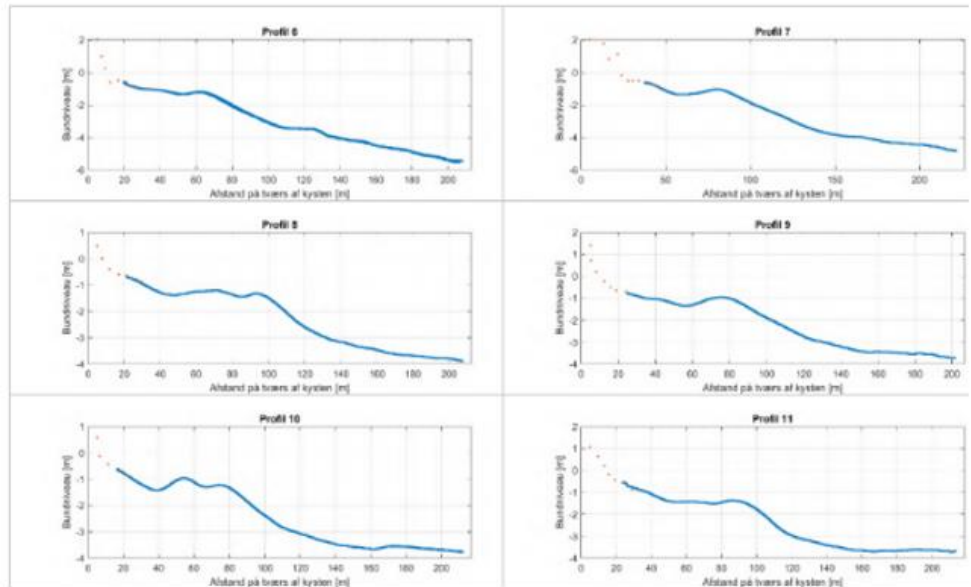
Vandstande i år 2050, dvs. om ca. 25 år, er for en 50 og 100 års situation estimeret i Tabel 1. Dette betyder, at de angivne design data indeholder 25 års vandspejlstigning. Kystkonstruktioner dimensioneres normalt for bølger svarende til 50 eller 100 års situationer. Tilhørende bølgedata gældende for en vanddybde på ca. 6 m ud for kysten er også angivet.

Tabel 1 *Design vandstande og bølger ved Taarbæk i år 2050 for en vanddybde på ca. 6 m ud for kysten (vurderet på basis af en vandstand på +1,7 m for en 100 års hændelse)*

	Indfaldsvinkel af bølger (grader)	50 års hændelse		100 års hændelse	
		Vandstand (m)	Hs (m)	Vandstand (m)	Hs (m)
Stormflod fra Nord	30 - 45	1,8	0,85	1,9	1,0
Stormflod fra Øst	90	0,5	2,0	0,65	2,5

Ved Taarbæk er bølgerne dydbegrænsede, da de bryder inden de rammer kystsikringen. Med den relativt stejle kyst på i middel 1:30, se profiler nedenfor,

kan der regnes med at bølgehøjden,  $H_s$ , ikke overstiger ca. 65% af den aktuelle vanddybde målt ca. en halv bølgelængde foran konstruktionen (ca. 10 m). Hvis vi ser på en 100 års situation, betyder dette, at bølgen ikke reduceres for NV-N ( $H_s=1,0$  m), mens bølgen for Østlige retninger reduceres til en lokal designbølge på  $H_s=1,4$  m (vanddybden regnes til 1,5 m som sammen med et højvande på +0,65 giver en samlet vanddybde på 2,15 m).



Det er vigtigt at alle grunde har et ensartet risikoniveau ifm. stormfloder, da der ellers opstår svage punkter hvor vandet kan komme ind bag kystbeskyttelsen (kystmuren) og oversvømme større områder.

Bilag A indeholder en diskussion af acceptable bølgeoverskyl for både en lodret kystmur og en stenkastning.

## 4 Mobile løsninger

Dette afsnit beskriver hvilke typer af mobile løsninger, der normalt anvendes ved beskyttelse mod stormfloder langs de danske kyster, og hvilke muligheder og begrænsninger disse har ifm. etablering af en sammenhængende sikring ved Taarbæk.

I forbindelse med mobile løsninger skal der etableres en beredskabsplan for at sikre en funktionel mobil løsning. Det firma eller organisation, der skal implementere beredskabsplanen, skal løbende sørge for vedligeholdelse og gennemføre øvelser af at beredskabet virker. Dette betyder, at der altid skal være adgang til alle ejendomme langs strækningen.

### 4.1 Mobile løsninger for eksisterende kystmure

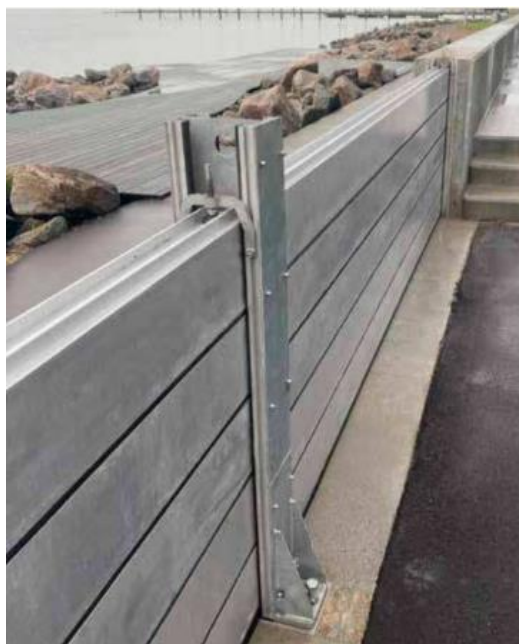
Kort beskrivelse af hvilke mobile løsninger, der vil kunne komme på tale for strækningen ved Taarbæk.

- > **Sandsække**

Dette er en løsning, der ofte anvendes af enkelte grundejere for at beskytte deres hus mod stormflod og oversvømmelse. Den lange strækning og de meget varierende forhold vil kombineret med dårlige adgangsforhold gøre det til en kæmpeopgave at etablere en samlet beskyttelse med sandsække og fjerne denne igen efter en storm. Sandsække vil typisk skulle lægges bagved eksisterende kystmure og det er meget vanskeligt at gøre beskyttelsen vandtæt. En beskyttelse med sandsække langs strækningen i Taarbæk anses ikke for at være en gennemførlig løsning.
- > **WaterTubes**

Dette er en løsning, der anvendes til beskyttelse af større sammenhængende og jævne områder, f.eks. havnearealer og andre lavtliggende arealer. De meget varierende og ujævne forhold langs strækningen vil kombineret med dårlige adgangsforhold gøre det umuligt eller til en kæmpeopgave at etablere en beskyttelse med WaterTubes. WaterTubes vil typisk skulle lægges bagved eksisterende kystmure og det er svært at sikre, at der ikke sker læk. En beskyttelse med WaterTubes langs strækningen i Taarbæk anses ikke for at være en gennemførlig løsning.
- > **Svinerygsplanker**

Dette er i princippet en midlertidig lodret mur, der etableres ifm. stormflod og efterfølgende oplagres til næste gang der er stormflod, se nedenstående foto. En sådan løsning anvendes til beskyttelse af sammenhængende områder, f.eks. på havnearealer. Svinerygsplanker skal etableres på et solidt fundament for at optage kræfterne på beskyttelsen, dette kan enten være ovenpå eksisterende tilstrækkeligt solide kystmure eller gennem etablering af nye solide kystmure. Muligheder og udfordringer ved anvendelse af svinerygsplanker som beskyttelse er beskrevet i det følgende.



## 4.2 Svinerygsplanker

### 4.2.1 Tekniske udfordringer

Svinerygsplanker er installeret nogle steder langs indre danske kyster, hvor der har været behov for forøget beskyttelse og som er udsat for mindre bølger. Et eksempel på dette er beskyttelse af havnen i Lemvig ved stormfloder. Basis for stabilitet af svinerygsplanker er især de fundamenter, hvortil stolperne skal fastgøres, da alle kræfter der påvirker plankerne skal overføres til stolperne og dernæst føres videre ned i fundamenterne (f.eks. kystmure). Endvidere skal det undersøges om standard svinerygsplanker kan modstå de forholdsvis store bølgekræfter de vil blive udsat for i Taarbæk.

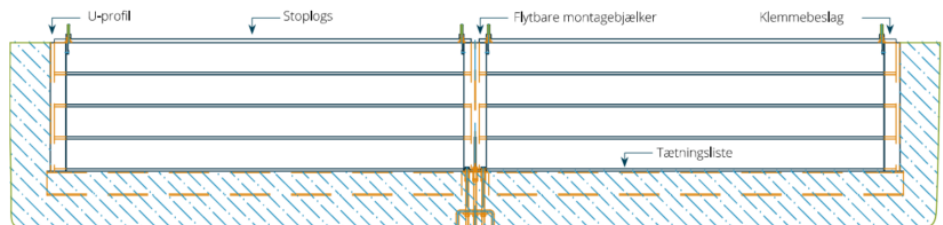
Strækningen ved Taarbæk er en kompleks strækning med mange forskellige løsninger af stormflodsbeskyttelse, hvilket vil give udfordringer ved etablering af svinerygsplanker:

- > overgang mellem forskellige eksisterende beskyttelser
- > varierende tilstand af eksisterende beskyttelser
- > forskellige topkoter af eksisterende kystmure (forskelligt sikringsniveau)
- > mange retningsændringer af den eksisterende beskyttelse

Kompleksiteten af strækningen medfører, at der skal udarbejdes en meget detaljeret plan for, hvordan der kan udarbejdes en sammenhængende beskyttelse af svinerygsplanker. Et væsentligt problem er at vurdere om de eksisterende kystmure kan anvendes som fundament for svinerygsplanker, dette er beskrevet nærmere nedenfor.

### 4.2.2 Krav til eksisterende kystmure

Ved nyetablering af stormflodsbeskyttelser med svinerygsplanker vil der blive projekteret og bygget tilstrækkeligt solide fundamenter støbt i beton således at stabiliteten af svinerygsplankerne opnås. Et eksempel på beslag støbt ned i beton er vist i nedenstående figur.



På grund af de store kræfter, der virker på en svinerygsplanke under stormfloder, er det ikke tilstrækkeligt kun at fastgøre beslaget til stolperne ovenpå murene. Det vil være nødvendigt at støbe beslagene til stolperne ned i kystmurene, hvilket først vil kræve omfattende nedbrydningsarbejder på de eksisterende kystmure.

Ved anvendelse af eksisterende kystmure skal det undersøges og vurderes om disse kan modstå kræfterne, der virker på svinerygsplankerne ifm. stormfloder herunder også kræfterne fra bølger der bryder ind på konstruktionen. Alle konstruktioner langs strækningen skal være i stand til at modstå kræfterne fra stormfloder, da der ellers ikke opnås en samlet beskyttelse.

#### 4.2.3 Vurdering af de eksisterende mure i Taarbæk

Erfaringsmæssigt findes der ikke dokumentation for hvordan eksisterende kystmure er opbygget, dvs. det er ikke muligt at vurdere stabiliteten af disse uden at foretage inspektioner af konstruktionerne. En indledende visuel inspektion kan give et indtryk af hvilke eksisterende kystmure, der ikke kan anvendes som fundament for svinerygsplanker og hvilke der vil skulle undersøges mere detaljeret.

For at vurdere stabiliteten af de eksisterende kystmure skal der være kendskab til konstruktionernes opbygning, herunder især dimensionerne og hvor langt de går ned i havbunden, samt jordbundsforholdene. Detaljerede undersøgelser kunne være frigravning af konstruktioner, men dette er meget besværligt og kompliceret grundet de vanskelige adgangsforhold og at konstruktionerne står i vand. Information om jordbundsforhold kan opnås ved geotekniske borer, men disse besværliggøres også af de vanskelige adgangsforhold.

Eksisterende mure skal have en forholdsvis stor bredde for at der kan etableres et fundament for stolperne til svinerygsplanker i kystmurene. De fleste kystmure på strækningen i Taarbæk er forholdsvis smalle, og for indstøbning af hver eneste beslag til stolper vil der skulle foretages en nedbrydning af væggen, og måske vil det også kræves at muren gøres bredere.

Det kan være en mulighed at bruge mobile løsninger til at lukke nuværende gennemgange i kystmure, f.eks. med skot der tilpasses i kystmurene. Åbninger til vandet fra offentlige arealer kan evt. sikres med svinerygsplanker eller fløj-mure. Dette medfører også krav om et beredskab, der kan sørge for at alle huller og adgange lukkes af med skot/svinerygsplanker ved varsel af stormflod. Endvidere skal der foretages løbende vedligeholdelse og gennemføres øvelser af beredskabet.

#### 4.2.4 Økonomi og risici

Den komplekse strækning med mange forskellige eksisterende typer og udformninger af kystbeskyttelse muliggør ikke at komme med et overslag over udgifterne til at lave en samlet stormflodsbeskyttelse baseret på eksisterende kystmure. Omkostningerne ved det omfattende arbejde med at tilpasse eksisterende konstruktioner til en løsning med svinerygsplanker, der kræver et rimeligt ensartet og solidt fundament langs hele strækningen, vil være meget store.

Som beskrevet ovenfor vil det i praksis være umuligt eller meget dyrt at få undersøgt tilstanden af de eksisterende kystmure med henblik på at vurdere om de kan bruges som fundament for svinerygsplanker. Dette betyder også, at det ikke er muligt at udarbejde tekniske løsninger, der sikrer at der opnås en ensartet



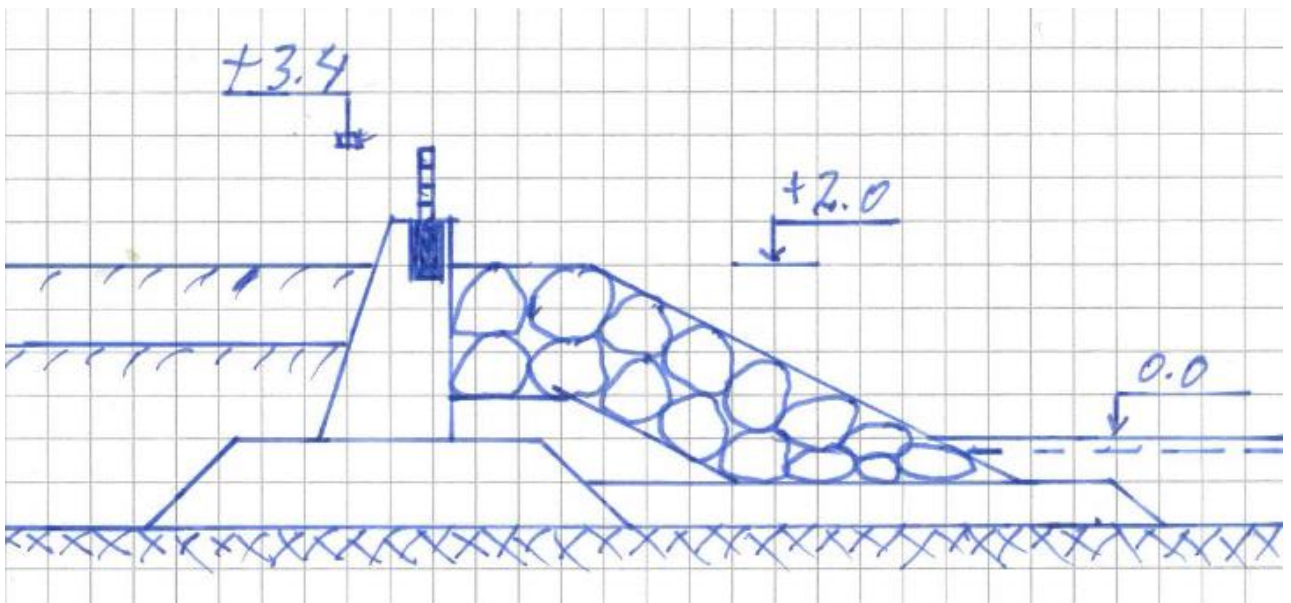
sikring af hele strækningen. Hvis beskyttelsen bryder sammen på en delstrækning ifm. stormflod, kan det have konsekvenser for en langt større strækning.

I forbindelse med etablering af nye konstruktioner funderet på eksisterende konstruktioner vil både rådgivere og entreprenører tage forbehold vedr. stabiliteten af de eksisterende kystmure og deres mulighed for at optage forøgede kræfter ifm. stormfloder. Dette betyder, at ansvaret vil ligge hos grundejerne.

### 4.3 Ny kystmur med svinerygsplanker med etapevis forhøjelse

Hvis der etableres en ny kystmur langs hele strækningen, kan denne udføres således, at der kan etableres svinerygsplanker ovenpå denne. Det skal dog indledningsvis undersøges om standard svinerygsplanker og tilhørende stolper kan modstå de store bølgekræfter de vil blive udsat for i Taarbæk. Kronekoten af en mulig svinerygsplanke skal være den samme som for en lodret kystmur, dvs. ca. +3.4 m til +3.8 m afhængig af om der er stenkastning foran muren i år 2050, se afsnit 5. En skitse med et tværsnit for en lodret kystmur med stenkastning foran er vist i Figur 1. Efterfølgende kan højden af svinerygsplankerne forhøjes for at tage hensyn til en fortsat stigning i vandstanden, dette kræver at svinerygsplankerne og stolper samt fundamentet for svinerygsplankerne er projekteret til at kunne modstå kræfterne forbundet med f.eks. en vandstand om 50 år dvs. i 2075.

Etablering af en ny gennemgående kystmur forberedt til svinerygsplanker vil være en udfordrende og omkostningstung opgave pga. de mange forskelligartede eksisterende kystmure og stenkastninger, badebroer, dårlige adgangsforhold til de enkelte kystbeskyttelser og den lave vanddybde som gør marint arbejde meget vanskeligt.



Figur 1 *Konceptuel skitse af et tværsnit med svinerygsplanker ovenpå en nyetableret kystmur*

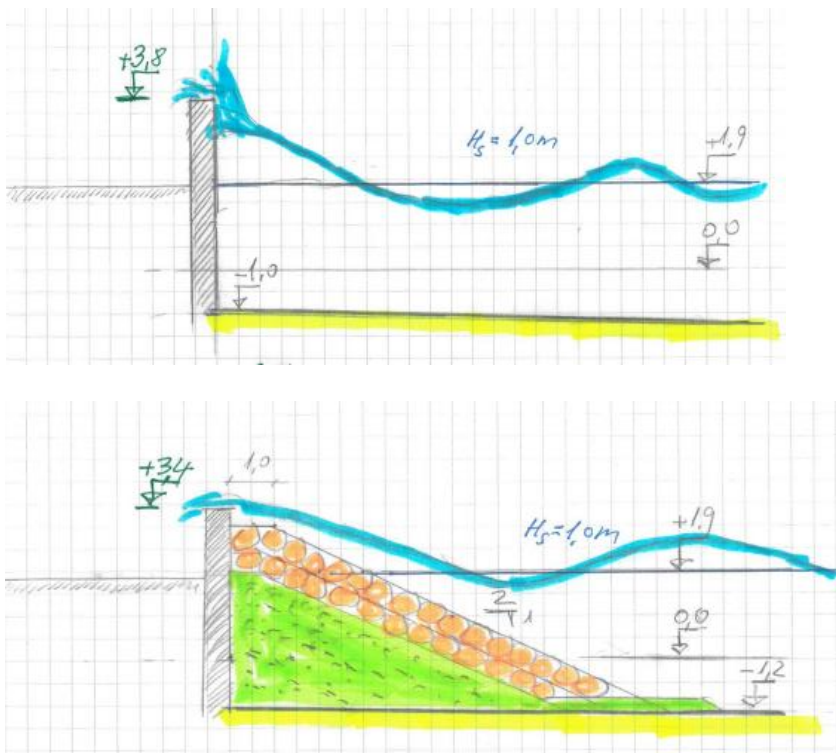
## 5 Forhøj de eksisterende kystmure

Hvis man ikke laver nogle tiltag langs strækningen, vil de eksisterende problemer med bølgeoverskyl forekomme hyppigere, når vandstanden i havet stiger. Det er en mulighed at forhøje de eksisterende mure, men meget kompliceret at få det til at virke i praksis med udførelse af en samlet mur på de i alt 1 km kyststrækning. Dertil kommer, at med de ovennævnte vurderede bølger fra N og Ø vil en sådan mur skulle være meget høj.

Hvis der ikke er en stenkastning foran kystmuren, bør muren være ca. 1,85 gange bølgehøjden plus vandstanden for at sikre et rimeligt og acceptabelt bølgeoverskyl, dvs. kronokote i +3,8 m for bølger fra N og +3,3 m for bølger fra Øst. Bølger fra NV-N er derfor dimensionsgivende for kronokoten af kystmuren.

Hvis der er tale om en stenkastning op til muren med en hældning på 1:1,5 – 1:2 kan man regne med at kronokoten skal være ca. 1,55 gange bølgehøjden, dvs. en kronokote på +3,4 m.

Dette viser, at man skal have en meget høj mur til en kote på + 3,4 eller +3,8 m for en mur med stenkastning foran eller for en lodret mur, hvis man vil fremtidssikre kystsikringen til år 2050 for en 100 års storm, se figurer i Figur 2. Da murene i området typisk er i kote omkring +2,0 m (DVR90) er der tale om en forhøjelse på typisk halvanden meter. Dette vil mange steder hindre frit udsyn over Øresund, som beboerne finder meget vigtigt og attraktivt. Det er endvidere meget usikkert, om de eksisterende kystmure er funderet så de kan tage den ekstra bølgekraft der rammer den forhøjede mur.



Figur 2 Skitse af typiske tværsnit med forhøjelse af de eksisterende kystmure med og uden stenkastning

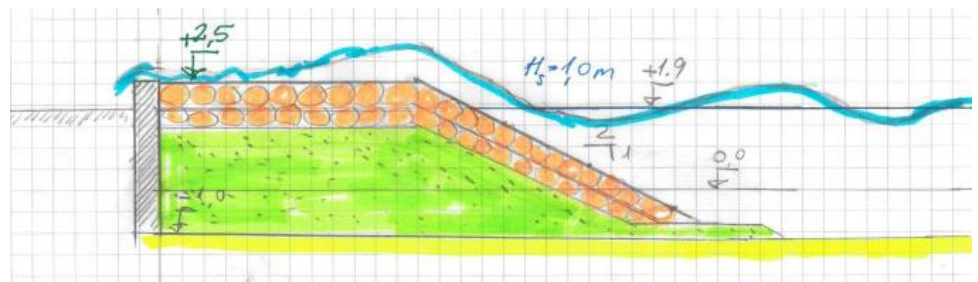
## 6 Bred stenkastning foran kystmur

Et alternativ til en stor forøgelse af koten på kystmurene kunne være at lave en meget bred stenkastning foran disse. Et eksempel på et COWI projekt med en meget bred stenkastning til reduktion af bølgeoverskyl fra Hundested havn er vist i nedenstående foto.



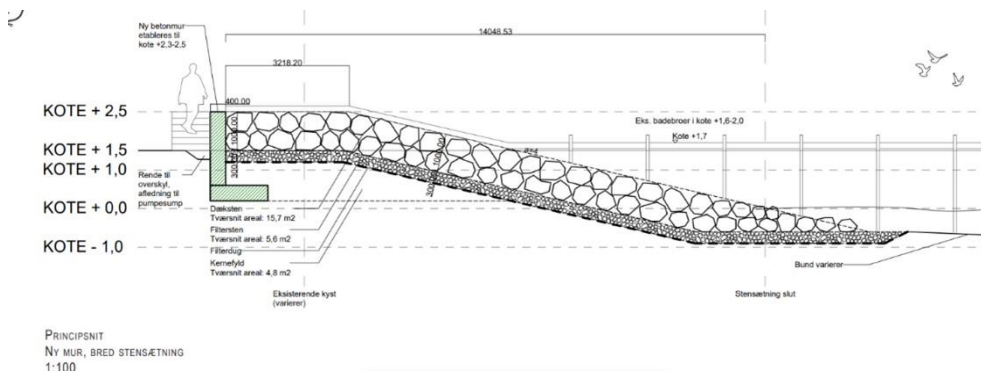
En bred stenkastning med en kronetekote på +2,5 m og en kronebredde på 5,0 m foran en mur også med kote +2,5 m vurderes at medføre et acceptabelt bølgeoverskyl for  $H_s=1,0$  m og en vandstand på +1,9 m, dvs. en 100 års storm i år 2050, se Figur 3. Dette er et estimat baseret på erfaring og skal verificeres med modelforsøg, hvis man vælger en sådan løsning.

Med en bred stenkastning vil de eksisterende kystmure i stor udstrækning kunne indgå i konstruktionerne, da bølgekræfterne vil være væsentligt mindre ift. en lodret kystmur uden stenkastning, men kystmurene skal stadig være i stand til at modstå vandtrykket ved stormflod. Anlægsfasen vil blive vil blive kompliceret af de mange badebroer, der skal tages ned og efterfølgende reetableres med en længde så de går ud over stenkastningen.



Figur 3 Skitse af typisk tværsnit med bred stenkastning foran kystmur

I skitseprojektet er et af løsningsforslagene en flad stenkastning med et anlæg på 1:4, som vist nedenfor. Denne vil have samme funktion som den ovenfor beskrevne bredde stenkastning med et anlæg på 1:2 men til gengæld en bredere krone. En flad skråning med et anlæg på 1:4 vil vanskeliggøre eventuelle fremtidige vedligeholdelsesarbejder og forhøjelser ved stigende vandstand.

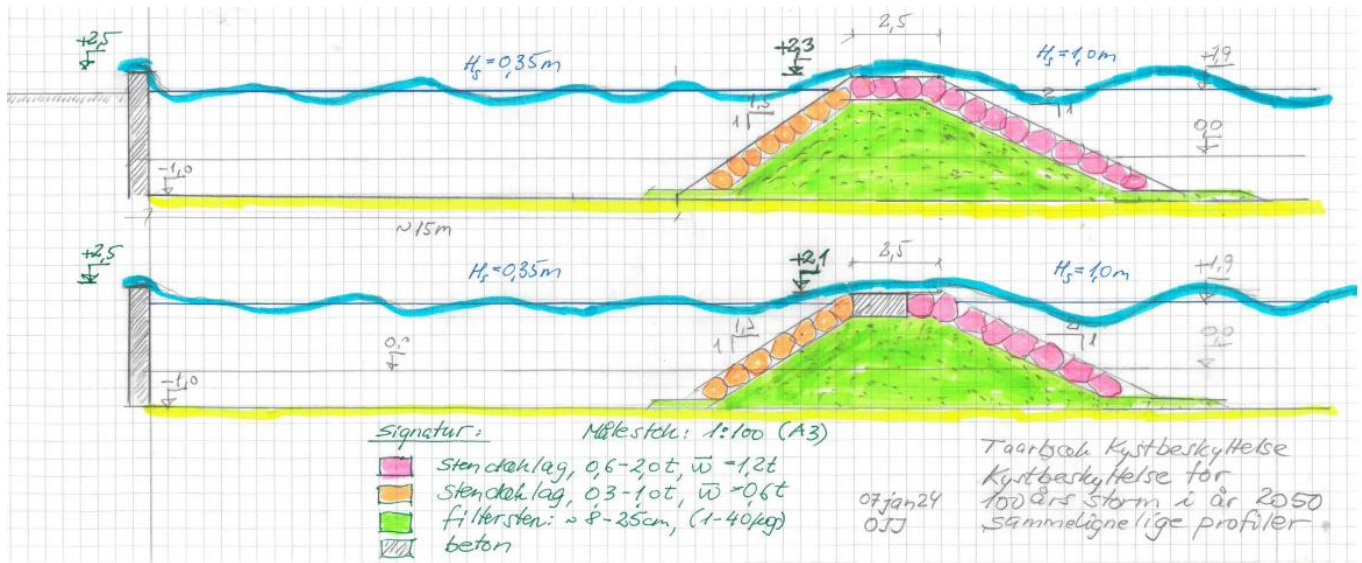


## 7 Offshore bølgebrydere

En anden mulig løsning er at anlægge offshore bølgebrydere. Dette kunne i princippet være en lang bølgebryder med en længde på 800 m. Men da der vil være krav om at kunne sejle ud fra kysten uden at skulle op til 400 m til nord eller syd, kan man forestille sig et system af bølgebrydere, som anlægges etapevis, og startende hvor problemet med bølgeoverskyl er størst.

Offshore bølgebrydere, der har en kronekote, så de ved normalvandstand er over roligt vandspejl, vil dæmpe bølgerne, der rammer ind på den eksisterende kystsikring. Derved vil kravet til kronekoten på beskyttelsen lige foran matriklerne reduceres væsentlig og de eksisterende kystmure kan genanvendes. DHIS rapport nævner muligheden for undersøiske rev, disse vil ikke virke som det fremgår af den i Bilag B inkluderede kronik.

Beregninger foretaget i Bilag C giver, at kronekoten for en permeabel offshore bølgebryder skal være i kote +2,3 m. Hvis man laver bølgebryderen delvis impermeabel ved en betonplade på toppen fås, at kronekoten skal være +2,1 m. Dette vurderes at medføre et acceptabelt bølgeoverskyl for  $H_s=1,0$  m og en vandstand på +1,9 m, dvs. en 100 års storm i år 2050, se de to tværsnit i Figur 4.



Figur 4 Skitse af typisk tværsnit med offshore bølgebryder og bagvedliggende eksisterende kystmur

Hvis denne løsning vælges, vil den signifikante bølgehøjde,  $H_s$ , der rammer kystsikringen inde ved kysten være reduceret til  $H_s = 0,35m$  for en 100 års storm. Det vil medføre, at der for en lodret mur kræves en kronenote på  $1,85 \cdot 0,35 + 1,9 = +2,5m$ , eller 1,3 m lavere end for en mur uden offshore bølgebryder.

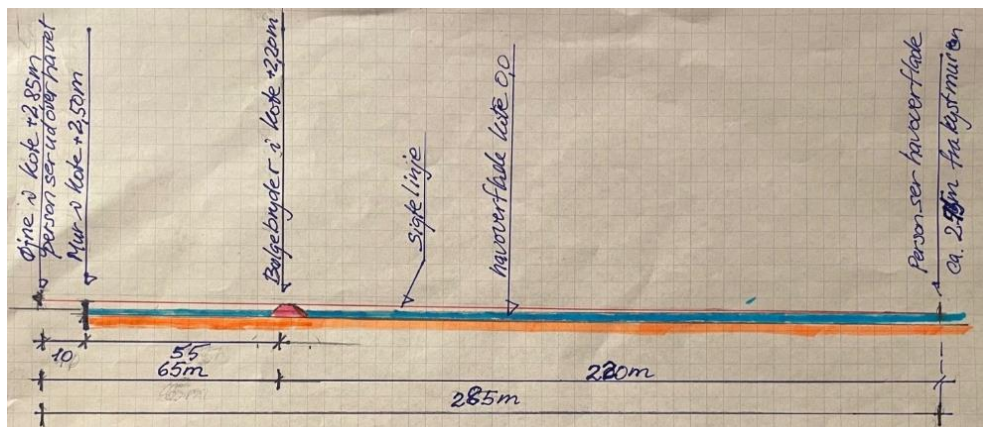
Det vil medføre at der for en lodret mur med stenkastning foran kræves en kronenote på  $1,55 \cdot 0,35 + 1,9 = +2,4m$ , eller 1,0 m lavere end for en mur uden offshore bølgebryder. Det er samtidigt 0,1 m lavere end løsningen med en stenkastning med en 5 m bred krone lige foran en mur med kote +2,5 m.

En visualisering af en konceptuel udformning af et system med offshore bølgebrydere langs strækningen er vist i Figur 5. Den består af 4 offshore bølgebrydere placeret på en vanddybde på ca. 1,5 m og i en afstand på ca. 50 m fra kysten. Afstanden mellem bølgebryderne vil give en indsejlingsbredde på ca. 15 m. Ved at placere bølgebryderne i en relativ stor afstand fra kysten, vil badebroerne ikke blive berørt og der vil være mulighed for badning bag bølgebryderne.



Figur 5 Konceptuel udformning af løsning med offshore bølgebrydere, placeret i en afstand på ca. 50 m fra kysten

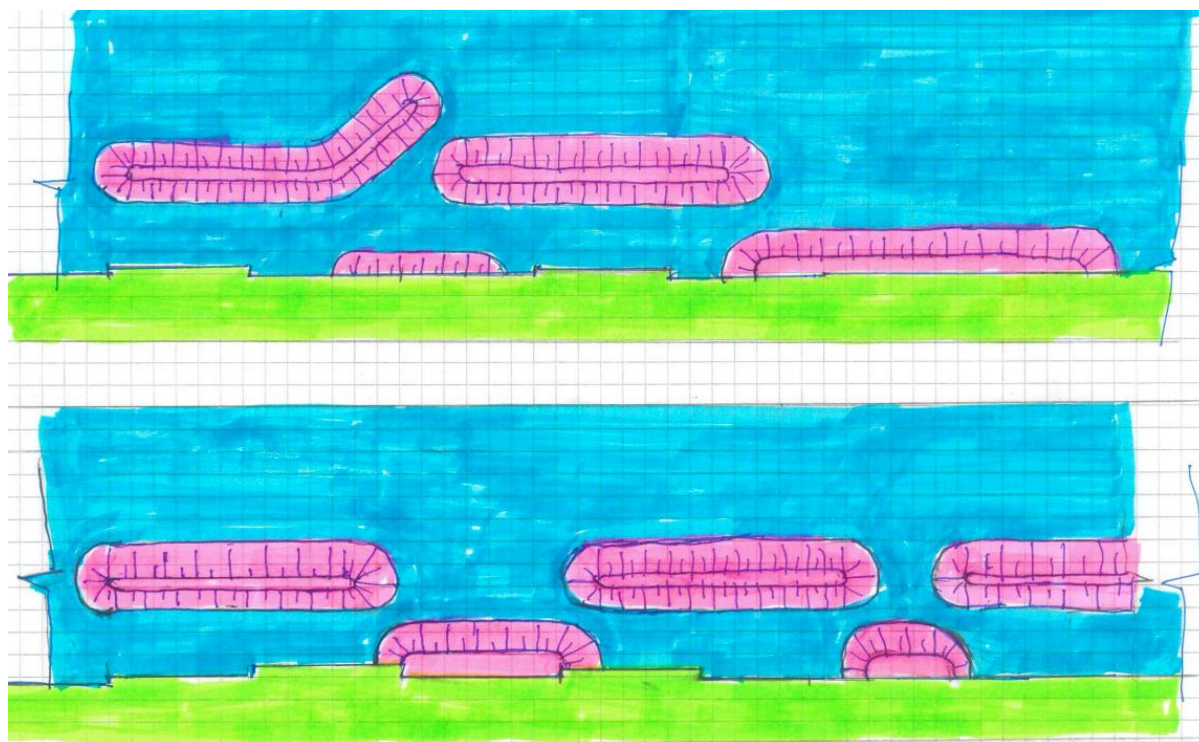
En stående person med øjenhøjde i kote +3,5 m, det er 1,3 m over kronkoten på bølgebryderen, vil se havet hen over bølgebryderen i en afstand på ca. 140 m. En siddende person med øjenhøjde i kote +2,85 m, det er 0,65 m over kronkoten på bølgebryderen, vil se havet hen over bølgebryderen i en afstand på ca. 285 m som vist i Figur 6.



Figur 6 Sigtelinje fra kysten og ud over offshore bølgebryder

Hvis offshore bølgebrydere anlægges tættere på kysten, vil disse karambolere med de mange badebroer, som typisk er 15 til 20 m lange. Det er muligt at forlænge badebroer så de går igennem eller hen over bølgebryderne. Vanddybden er kun lidt større hvis man rykker bølgebryderne længere ud fra kysten, så bølgebryderne bliver kun lidt dyrere i anlægspris end ved at bygge dem tættere på kysten og man undgår at skulle tilpasse badebroer.

En løsning med offshore bølgebrydere kan kombineres med eksisterende og nye kystbeskyttelser med kystmure og stenkastninger hvor dette vurderes at være en bedre løsning, se Figur 7.



Figur 7 Løsninger der kombinerer offshore bølgebrydere med eksisterende og nye kystbeskyttelser

I forbindelse med evt. fremtidige undersøgelser af en løsning med offshore bølgebrydere skal udformningen optimeres med hensyn til længde og retning af bølgebrydere, afstand mellem disse og afstand til kysten samt tages hensyn til jordbundsforholdene. Endvidere skal der også ses på påvirkninger af bade-/bådebroer, sejls, badesikkerhed, vandudskiftning, bevarelse af eksisterende strandgrunde (Søvej Strandlaug), landskabeligt udtryk og myndighedsgodkendelser. Det vil også være påkrævet at se yderligere på hvordan offshore bølgebrydere kan bygges, da den forholdsvis lave vanddybde betyder, at det ikke vil være muligt at bruge det entreprenørudstyr, der normalt anvendes til bygning af bølgebrydere, se nedenfor.

## 7.1 Anlægsovervejelser

Der er en række aspekter, der vanskeliggør anlæg af kystkonstruktioner i Taarbæk:

- > Den begrænsede vanddybde stiller store krav til hvilket entreprenørgrej der kan anvendes.
- > Bebyggelsen af hele strækningen på nær ved Bombegrunden gør det stort set umuligt at anlægge stenkonstruktionerne fra landsiden af matriklerne.
- > Det vurderes derfor som det mest sandsynlige, at en entreprenør vil vælge at benytte Bombegrunden som omladningsplads for en mindre mængde sten (brudsten) som køres til fra Sverige, eller fra en havn i Danmark hvortil de kommer med skib fra Sverige. Det vil dog kræve en dispensation fra fredningen.
- > På Bombegrunden omlades stenene til en mindre pram, en "stenfisker" som sejler dem ud og udlægger dem i de forskellige typer af konstruktioner.

Disse forhold gør, at det vil være forholdsmæssigt dyrt at anlægge stenkonstruktioner i Taarbæk.

## 7.2 Mængder og prisoverslag

En bred stenkastning som vist i Figur 3 indeholder: ca. 23 m<sup>3</sup> kernesten og 15 m<sup>3</sup> dæksten, i alt 38 m<sup>3</sup>/m (65 tons sten/m). En m<sup>3</sup> sten vejer ca. 1,72 tons/m<sup>3</sup>.

En offshore bølgebryder som vist på Figur 4 indeholder: ca. 23 m<sup>3</sup> kernesten og 10 m<sup>3</sup> dæksten, i alt 33 m<sup>3</sup>/m (57 tons sten/m)

Uden at have en færdig planløsning er det ikke muligt at vurdere en anlægspris, men hvis man normalt ville regne alt inklusive ca. 600 DKK/tons sten, vurderes det, at det grundet problemerne nævnt ovenfor vil blive ca. 30-50 % dyrere.

Hvis vi således overslagsmæssigt antager, at der skal anlægges i alt ca. 800 m kystkonstruktioner, og at der kræves 60 tons/m af sten til en enhedspris på 1,5\*600=900 DKK/tons fås et samlet overslag over anlægsprisen på ca.

800\*57\*900 = 40 mill. DKK (ekskl. moms). Hvilket svarer til en pris på ca. 50.000 DKK/m (ekskl. moms).

Vedligeholdelsesomkostningerne for denne type konstruktioner er typisk omkring 2-3% per år, det vil ofte være efter ekstreme hændelser, at det kan være nødvendigt med vedligeholdelse af stenkastninger.

## 8 Sammenfatning

### 8.1 Mobile løsninger

Hverken en løsning baseret på sandsække eller en løsning baseret på WaterTubes langs strækningen i Taarbæk anses for at være gennemførlige løsninger.

Den komplekse strækning med mange forskellige beskyttelser vil kræve mange detaljerede tilpasninger af en mobil løsning med svinerygsplanker. Udformningen og stabiliteten af de eksisterende mure er ukendte, og det er derfor umuligt eller forbundet med meget store omkostninger at undersøge om disse kan bruges som fundament for svinerygsplanker. Endvidere er de fleste kystmure på strækningen i Taarbæk forholdsvis smalle og indstøbning af beslag til stolper for svinerygsplanker vil være et meget stort projekt.

Etablering af en ny gennemgående kystmur forberedt til svinerygsplanker vil være en udfordrende og omkostningstung opgave pga. de mange forskelligartede eksisterende kystmure og stenkastninger, badebroer, dårlige adgangsforhold til de enkelte kystbeskyttelser og den lave vanddybde som gør marint arbejde meget vanskeligt.

En permanent løsning er at foretrække frem for mobile løsninger, og der er set på forskellige løsninger med og uden stenkastninger og bølgebrydere foran de eksisterende kystmure.

### 8.2 Bred stenkastning foran lystmur

Stenkastninger foran kystmure er gode, da de giver mindre bølgeoverskyl end lodrette mure. Stenkastninger kan også lettere skræddersyes, så de er tilpasset de enkelte grunde og deres eksisterende beskyttelse, f.eks. er der grunde der allerede har forholdsvis store og velfungerende stenkastninger. Det vil også være muligt at bygge stenkastninger i etaper, der tilpasses behovet langs strækningen. Der vil skulle laves tilpasninger ifm. de eksisterende badebroer i området.

Beskyttelse vil kunne opnås med en bred stenkastning med en kroneskote på +2,5 m placeret foran en kystmur også med kote +2,5 m. De eksisterende kystmure vil i stor udstrækning kunne indgå i konstruktionerne, da bølgekræfterne vil være væsentligt mindre ift. en lodret kystmur uden stenkastning. Kystmurene skal stadig være i stand til at modstå vandtrykket ved stormflod.



### 8.3 Offshore bølgebrydere

Offshore bølgebrydere, der har en kroneskote, så de ved normalvandstand er over roligt vandspejl, vil dæmpe bølgerne, der rammer ind på den eksisterende kystsikring. Derved vil kravet til kroneskoten på beskyttelsen lige foran matriklerne reduceres væsentlig og de eksisterende kystmure kan i stor udstrækning genanvendes.

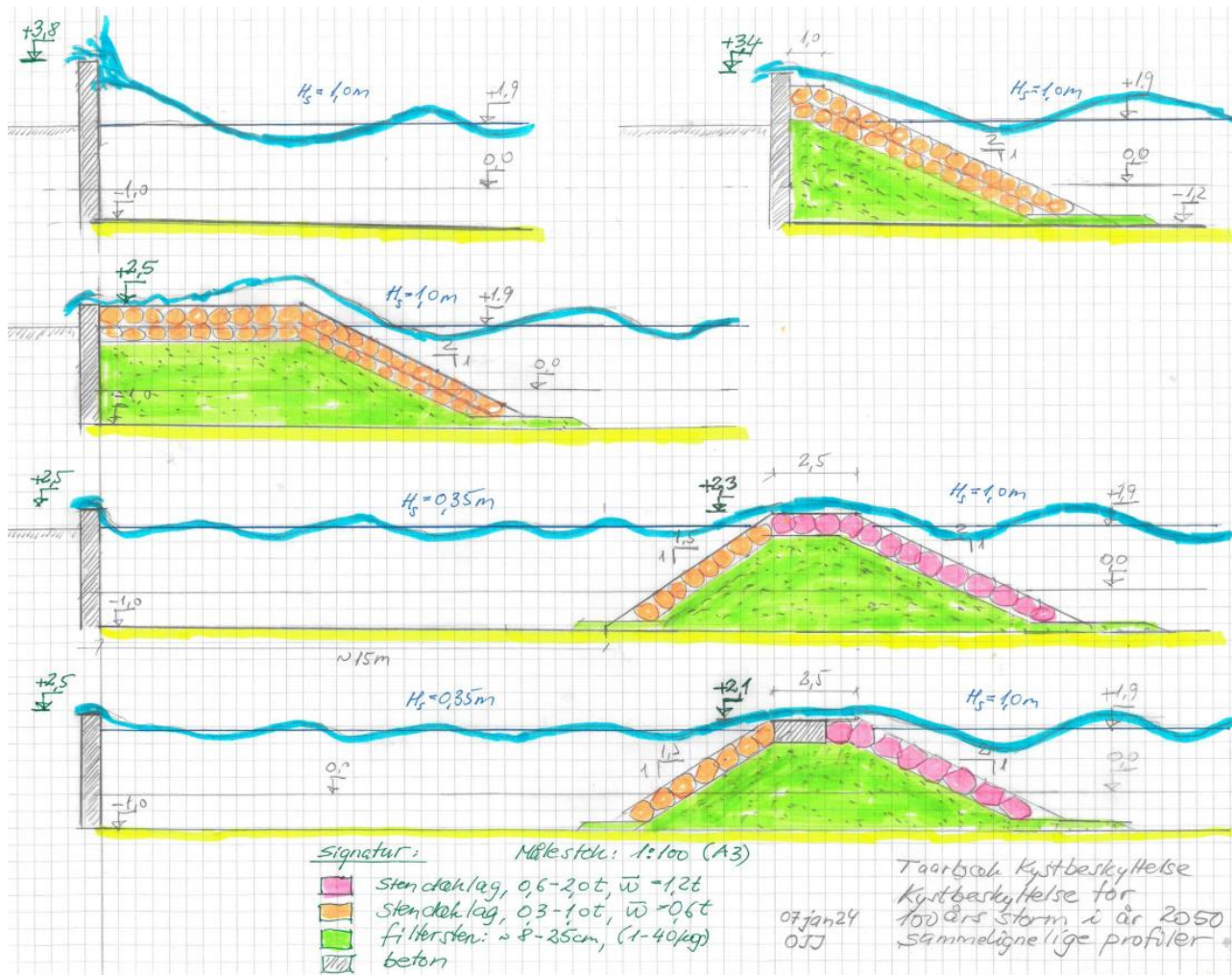
En visualisering af en konceptuel udformning af et system af offshore bølgebrydere langs strækningen er vist i Figur 8. Den består af 4 offshore bølgebrydere placeret på en vanddybde på ca. 1,5 m og i en afstand på ca. 50 m fra kysten. Afstanden mellem bølgebryderne vil give en indsejlingsbredde på ca. 15 m. Ved at placere bølgebryderne i en relativ stor afstand fra kysten, vil badebroerne ikke blive berørt og der vil være mulighed for badning bag bølgebryderne.



Figur 8 Konceptuel udformning af løsning med offshore bølgebrydere, placeret i en afstand på ca. 50 m fra kysten

### 8.4 Sammenligning

En sammenligning af krav til kroneskoten for forskellige kystbeskyttelseskonstruktioner med samme acceptable bølgeoverskyl for en 100 års stormflod i år 2050 er vist i Figur 9. Permanente løsninger med enten en bred stankastning eller offshore bølgebrydere giver de bedste muligheder for at grundejerne kan bevare deres eksisterende kystmure og stadig gøre det muligt at se ud over vandet. Det vil stadig være krævet, at visse kystmure forhøjes og forstærkes og at de forbindes til en sammenhængende beskyttelse mod stormfloder. Begge løsninger vil kunne tilpasses de allerede eksisterende konstruktioner og bygges i faser efter behovet langs strækningen. Sådanne løsninger vil også nemmere kunne modificeres i fremtiden, når der er krav om yderligere beskyttelse pga. stigende vandstand.



Figur 9 Skitser af løsninger med forskellige kystbeskyttelseskonstruktioner med samme acceptable bølgeoverskyl for en 100 års stormflod i år 2050

## 9 Referencer

Taarbæk kystsikring – Skitseprojekt, rapport og tilhørende tegningshæfte. Udarbejdet af EKJ, Hasløv & Kærsgaard og DHI (April 2023)

Stormflodsberedskab i Taarbæk. Udarbejdet af COWI A/S (December 2021)

## Bilag A Diskussion af acceptabelt bølgeoverskyl

Hvis man har en situation, hvor kystmuren ikke er høj nok til at forhindre direkte indløb og oversvømmelse af havvand, er man ofte i den situation, at bølgerne skyller over muren. Og derved kommer man til at skulle vurdere hvad der kan være et acceptabelt niveau af bølgeoverskyl målt som l/s/m (liter per sekund per meter af muren mod havet). Lad os i den forbindelse prøve at se på hvor meget vand der ellers kan falde på en parcelhusgrund i et ekstremt regnvejr. Hvis man forestiller sig en 1000 m<sup>2</sup> grund (ca. 30 m langs kysten og dybde 33m) og et meget ekstremt regnskyl med en intensitet på 50 mm på 3 timer, svarer dette til i alt 50 m<sup>3</sup> vand på matriklen. Hvis man tentativt accepterer den samme mængde vand som bølgeoverskyl i en stormflod på 3 timer får man at 17 m<sup>3</sup> per time som et acceptabelt niveau.

Dette svarer til en intensitet på  $q = (17 \cdot 10^3 \text{ l}) / (3600 \text{ s} \cdot 30 \text{ m}) = 0,2 \text{ l/s/m}$ . Dette er en relativ begrænset intensitet af et bølgeoverskyl og vil kræve en relativ høj kronekote.

I en videnskabelig artikel af målinger af bølgeoverskyl i naturen fra Hundested havn er disse sammenlignet med modelforsøgsresultater i nedenstående figur.

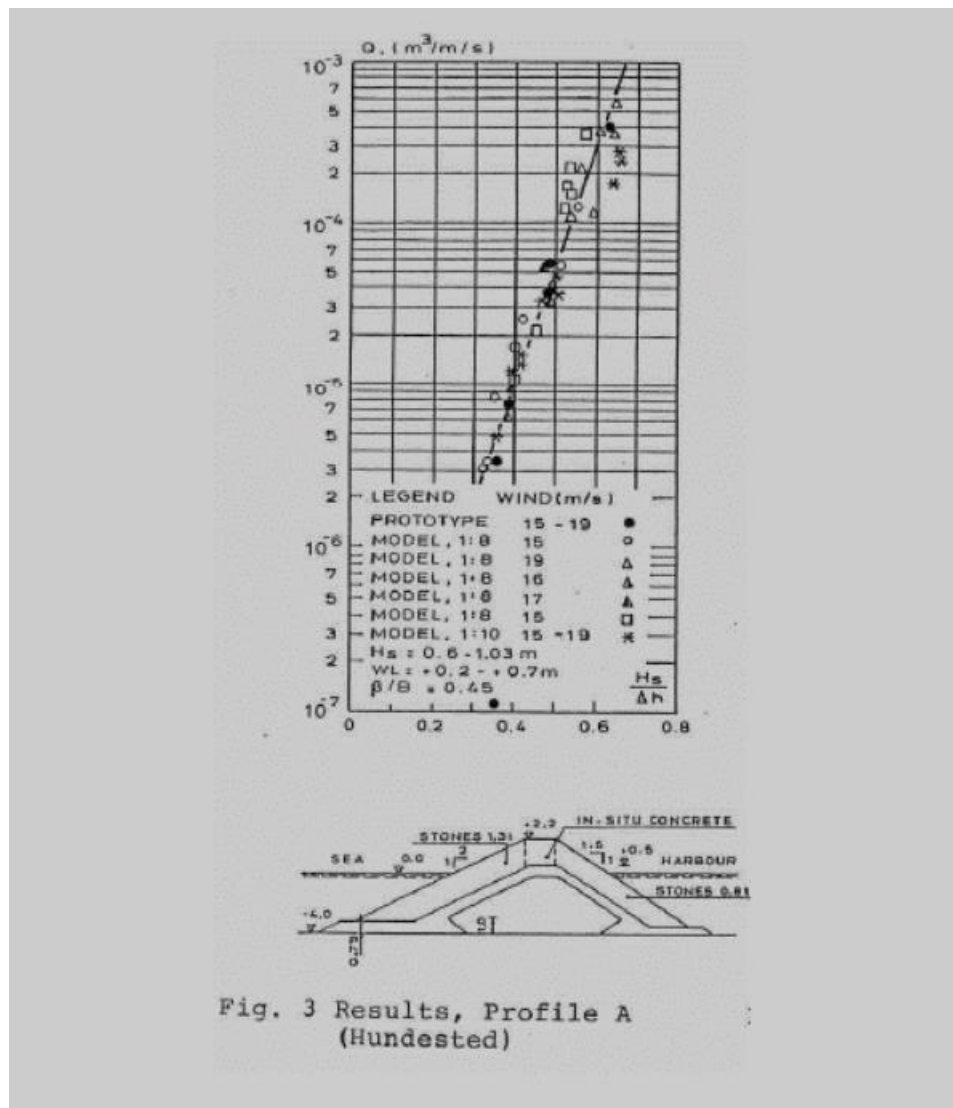


Fig. 3 Results, Profile A (Hundested)

Det fremgår af figuren at 0,2 l/m/s svarer til et forhold for  $H_s/FB=0,58$ , hvor FB er fribordet (den vertikale afstand fra vandspejlet til kronen). Dette betyder, at Fribordet skal være ca.  $1/0,58=1,72$  gange bølgehøjden. Resultaterne er for vin-  
kelret indfaldende bølger, og i praksis i Taarbæk vil bølgerne komme fra N dre-  
jende om i NØ når de rammer kysten, så overskyllet vurderes at blive reduceret  
med skønsmæssigt 10% til en faktor 1,55.

For en lodret mur er bølgeoverskyllet større end for en stenkastning, og det esti-  
meres at koefficienten er ca. 1,85.

Bilag B   Kronik om Kystbeskyttelse med stenrev på  
Nordkysten af Sjælland

## Kystbeskyttelse med stenrev på Nordkysten af Sjælland

Af Ole Juul Jensen, Sen. Teknisk Dir. COWI A/S

I fortsættelse af min kronik d. 16/8 og artiklerne i avisen d. 28/8 hvor der argumenteres for stenrev som løsning til kystbeskyttelse af Nordkysten, har jeg fundet det nødvendigt at skrive dette indlæg, som baseres på evidens og hvad der i dag er kystteknisk videnskabeligt belæg for.

Først vedr. havbiologi og sandbund kontra stenrev. Jeg vil henvise til artikel af Troels Aagaard, to havbiologer samt teknisk chef for kystdirektoratet. Artiklen giver detaljer vedr. forholdene for de forskellige bundformer med hensyn til fiskeyngel mm og ender med at konkludere, at sand/strand-fodring er den bedste løsning.

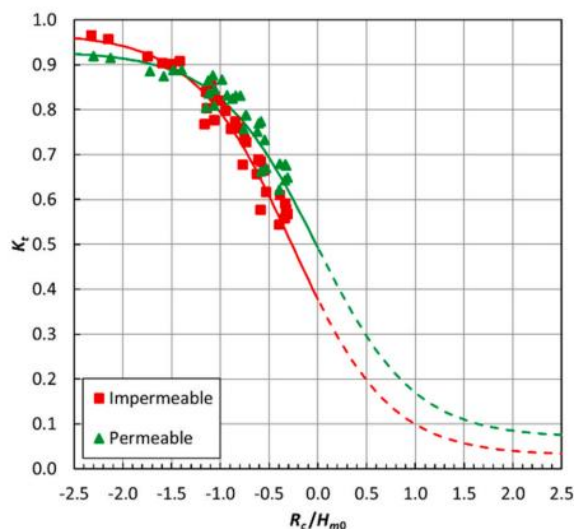
I artiklerne d 28/8 skrives der fejlagtigt at Nordkysten er speciel og at man ikke kan benytte de gode erfaringer fra bl.a. Vestkysten af Jylland. Dette er ikke korrekt, og som skrevet i min kronik vil jeg også henvise til de meget gode erfaringer med sandfodring på Nordkysten af Fyn.

På side 3 i avisen fra i mandags vises et foto af en høj bølgebryder, med teksten "Hunderevet i Halsnæs er et af de steder, hvor man forsøger sig med stenrev som kystsikring". Mig bekendt er Hunderevet en undersøisk stenkonstruktion.

Vi mangler stadig et svar fra Miljøstyrelsen på hvilke videnskabeligt grundlag de har benyttet til at nå frem til konklusionen om, at ekstra stenrev er nødvendige.

### **Bølgebrydere og undersøiske rev**

De seneste år og i FAA d. 28/8 er der personer som argumenterer for, at sandfodring kan erstattes af anlæg af undersøiske stenrev udfor kysten, og at disse skulle have kystbeskyttende virkning. Dette er ikke korrekt. Lad os se på resultater af forsøg med bølger der forplanter sig hen over en bølgebryder. Det må beklageligvis blive meget teknisk, men nødvendigt for at holde debatten på sporet. Det ansete hydrauliske institut Deltares i Holland her netop præsenteret et studie skrevet af Marcel van Gent m.fl. Figuren viser resultater af modelforsøg med permeable og impermeable moler. Et undersøisk rev kan betragtes som en permeabel bølgebryder.



Den vandrette akse er  $R_c/H_{m0}$ . Her er  $R_c$  den lodrette afstand fra kronen af molen til roligt vandspejl. Denne kan være både positiv for en bølgebryder der stikker op gennem roligt vandspejl, eller negativ hvis den er undersøisk, og endelig nul hvis kronen ligger lige i vandspejlet.  $H_{m0}$  er et mål for den signifikante bølgehøjde der rammer bølgebryderen. Den lodrette akse viser transmissions-koefficienten, dvs. forholdet mellem bølgerne bagved og foran konstruktionen.

Som eksempel antages, at der på Nordkysten anlægges et rev på 3 m vanddybde med top i kote -1,0 m under havoverfladen. Med et højvande på +1,5 m bliver  $R_c = -2,5$  m. Den samlede vanddybde under storm er så 4,5 m. Her kan maksimalt på grund af bølgebrydning forekomme en bølgehøjde  $H_{m0}$  på ca. 2,5 m. Forholdet  $R_c/H_{m0}$  er dermed -1,0, og ud fra den grønne kurve fås en transmission på 85%. Det vil sige, at bølgebryderen reducerer bølgerne fra 2,5m til 2,1 m. **Derfor vil en sådan undersøisk bølgebryder ikke virke, da bølgerne passerer henover kun udsat for en mindre reduktion i bølgehøjde.**

Lad os se på en illustration. Fotoet viser en bølgebryder ved Hyllingbjerg vest for Gilleleje før og under stormen Bodil. Bølgebryderen kan skimtes ca. 2/3 oppe i billedet. Ved dagligt vande er bølgebryderens krone 1 - 1,5 m over vandspejlet, som det fremgår af foto før stormen Bodil.



Fra Hyllingbjerg før og under stormen Bodil, 1. dec. og 6 dec. 2013, kl. 13. (foto Jens Kirkegaard)

Så er det her igen nødvendigt at fremføre, at nye stenkonstruktioner, rev eller bølgebrydere på Nordkysten ikke vil medføre at der kommer et kilo mere sand, de omfordeler blot sandet langs kysten, så sandfodring vil under alle omstændigheder være nødvendig.

Der anføres at man skulle kunne anlægge stenrev som kystbeskyttelse langs hele nordkysten for 210 mill.

Hvis vi ser på oversøiske bølgebrydere, tilsvarende de tre der er anlagt ved Heatherhill/Vincentstien:

Disse har en længde på 45 m med 70 m mellem dem, alt 115 m. Kronekoten er ca. + 1,8 m.

Lad os antage at der på 2/3 af Nordkysten anlægges sådanne bølgebrydere, dvs. 350 stk. på i alt 40 kilometer kyst. Med dagens priser estimeres den samlede pris til ca. 500 millioner kroner.

Hvis man flytter disse ud fra kysten på ca. 3 m vand vil de blive undersøiske, og stadig kræve ca. den samme mængde sten, og prisen bliver ca. den samme, men som vist ovenfor vil bølgedæmpningen kun være marginal.

### **Konklusion**

Undersøiske stenrev kan etableres, hvis man ønsker flere levesteder for visse slags marint liv, men ikke som kystbeskyttelse der kan erstatte sandfodring. Det er stadig mit håb, at myndighedernes vurdering og afgørelser i denne sag vil blive baseret på saglighed, evidens og et kystteknisk videnskabeligt grundlag.

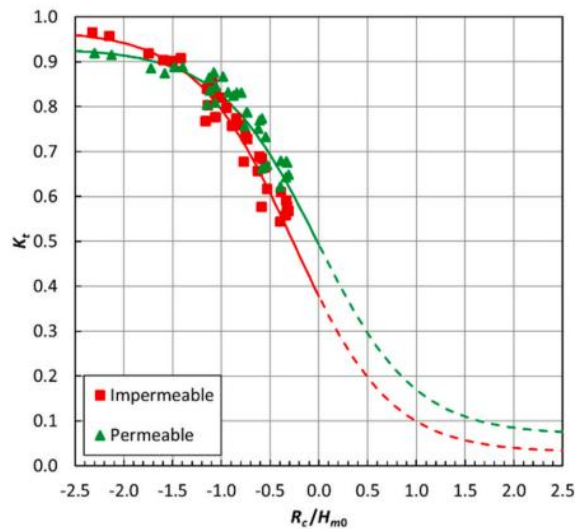
Endvidere, at det samme vil blive tilfældet for tilhængerne af stenrev, og at de vil forstå hvorfor undersøiske stenrev ikke virker som kystsikring. Der er efter min mening ikke behov for nye forskningsprojekter for at bekræfte hvad der allerede er kendt viden hos kyst-hydraulikere.



## Bilag C Bølgetransmission for offshore bølgebrydere

Det ansete hydrauliske institut Deltares i Holland har netop præsenteret et studie af Marcel van Gent m.fl. vedr. transmission af bølgebrydere. Nedenstående figur viser resultater af modellforsøg med permeable og impermeable lave bølgebrydere.

*M.R.A. van Gent et al.*



Den vandrette akse er  $R_c/H_{m0}$ . Her er  $R_c$  den lodrette afstand fra kronen af bølgebryderen til roligt vandspejl. Denne kan være både positiv for en bølgebryder der stikker op gennem roligt vandspejl, eller negativ hvis den er undersøisk, og endelig nul hvis kronen ligger lige i vandspejlet.  $H_{m0}$  er et mål for den signifikante bølgehøjde,  $H_s$ , der rammer bølgebryderen. Den lodrette akse viser transmissions-koefficienten, dvs. forholdet mellem bølgerne bagved og foran konstruktionen.

Man kan se, at for en permeabel bølgebryder vil transmissionen (bølgerne bag bølgebryderen) være 50% af de indkommende bølger når  $R_c/H_{m0}=0,0$ , dvs. at toppen af bølgebryderen ligger lige i roligt vandspejl.

Lad os i det følgende antage at man tilstræber en reduktion af bølgerne bag bølgebryderen til 1/3 af de indkommende bølger foran bølgebryderen.

### Eksempel 1

En 50 års storm i dag.

Her er  $H_s=0,85$  m og vandstanden,  $VS=1,6$  m.

Ud fra figuren fås for  $K_t=0,35$  at  $R_c/H_{m0} = 0,4$  for en permeabel bølgebryder og 0,1 for en impermeabel (men på grund af usikkerhed antages en faktor 0,2 for en impermeable bølgebryder).

$$R_c = 0,4 * 0,85 \text{ m} = 0,35 \text{ m}$$

Derfor skal kronekoten til bølgebryderen være lig med:  
 $KK=VS+Rc=1,6+0,35=+1,95$  m.

### **Eksempel 2**

En 100 års storm i dag.

Her er  $H_s=1,0$  m og vandstanden,  $VS=1,7$  m.

Ud fra figuren fås for  $K_t=0,35$  at  $R_c/H_{mo} = 0,4$ .

$$R_c=0,4*1,0 \text{ m} = 0,4 \text{ m}$$

Derfor skal kronekoten til bølgebryderen være lig med:  
 $KK=VS+Rc=1,7+0,4=+2,1$  m.

### **Eksempel 3**

En 100 års storm i år 2050.

Dette er et rimeligt design grundlag hvis man vælger at gå videre med en løsning med offshore bølgebrydere.

Ud fra figuren fås for  $K_t=0,35$  at  $R_c/H_{mo} = 0,4$ .

$$R_c=0,4*1,0 = 0,4 \text{ m}$$

Derfor skal kronekoten til bølgebryderen være lig med:  
 $KK=VS+Rc=1,9+0,4=+2,3$  m.