



A1 Consult A/S
Stieg Larssons Alle 11
8920 Randers NV

Tel 8641 8410
E-mail info@a1consult.dk
Web www.a1consult.dk
CVR 30495918

Tuborg Syd

Notat vedrørende bølgebryder ved Kysthus 3

Indholdsfortegnelse

0.	Indledning.....	2
1.	Projektforudsætninger	4
2.	Farer og sårbarhed.....	5
2.1.	Input ifm. beregning af over skyl ved kysthus 3	5
2.2.	Krav til overskyl	6
2.3.	Vurdering af resultaternes validitet	6
3.	Detaildimensionering af hofde (Oprindelig forudsætning)	7
3.1.	Design af hofde i kote +0,5 m.....	7
3.1.1.	Hydrauliske beregninger	7
3.1.2.	Geotekniske stabilitetsberegninger af bølgebryder	8
3.1.3.	Stedlige forhold	9
3.2.	Middelvandstand.....	9
3.2.1.	Konklusion	9
4.	Detaildimensionering af offshore bølgebryder inkl. placering ...	10
4.1.	Dimensionering af bølgebryder	10
4.2.	Placering af bølgebryder	10
4.2.1.	Diffraktion	10
4.2.2.	Diffraktion gennem åbning	10
4.2.3.	Diffraktion forbi mole-ende	11
4.2.4.	Frit stræk	12
4.3.	Afslutning af kystindfatning ved kysthus 3	13
5.	Påvirkning af nabostrækninger.....	13

Dato	2024.09.23
Udarb.	JJ
KS	UJ/EMTJ/CWMO
Dato	-
Rev.	-
Projekt nr.	17.034

Tegningsfortegnelse og tegninger, Bølgebryder ved Kysthus 3

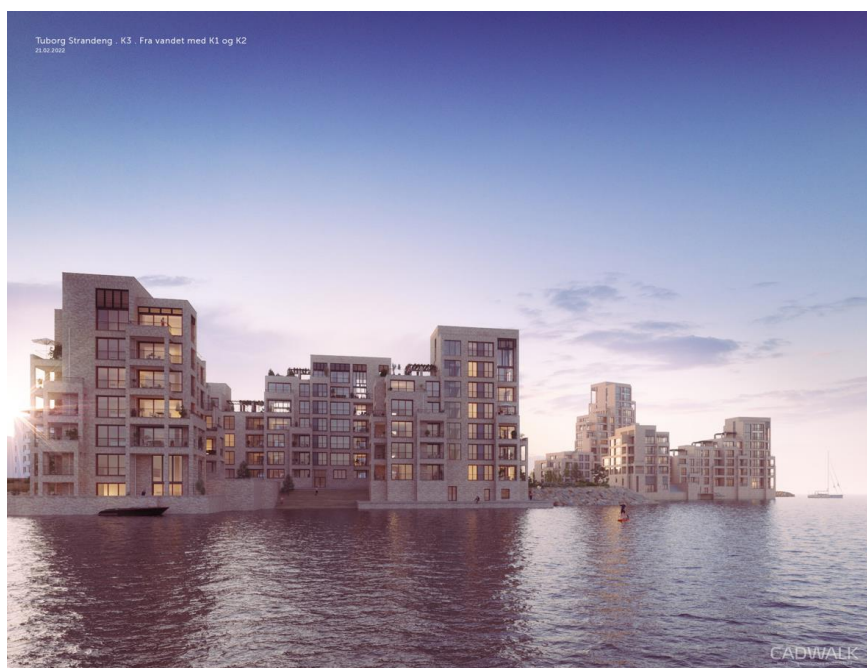
0. Indledning

I nærværende notat behandles bølgeforholdene på kyststrækningen fra Tuborg Havn og mod sydvest, herunder vurdering af overskyl på de mest udsatte østvendte områder.

Bygningerne Kysthus 1, 2 og 3 er en integreret del af kyststrækningen, og dette notat gennemgår hvordan denne kyststrækning beskyttes mod ekstreme bølgeforhold. Ligeledes gennemgås dimensioneringsforudsætninger og den forventede levetid.

Som det fremgår af de efterfølgende afsnit, er der valgt at beskytte kyststrækningen gennem etablering af en bølgebryder placeret sydøst for Kysthus 3.

Løsningen med en bølgebryder er bl.a. valgt for at opretholde det samlede visuelle udtryk af kystlinjen, som kendes fra Kysthus 1 og 2, dvs. variationen af bygninger, der ligger ved og i vandet, og stensætninger, der binder bygningskroppene sammen, sådan som det ses på Figur 1. Kysthus 1 og 2 ses til højre (tilbagetrukket) i visualiseringen og Kysthus 3 i forgrunden.



Figur 1 – Illustration af Kysthus 1, 2 og 3. Kysthus 3 er placeret i forgrunden af billedet.

Disse bølgeforhold er blevet vurderet ved benyttelse af tre forskellige metoder: Fritstræk, JONSAWP-spektrum og analyse fra DHI for en nærliggende havn. De hydrauliske beregninger er sammenfattet i notatet udarbejdet af A1 Consult; Laster fra is og bølger, samt skibsstød, MOE, Tuborg Syd, november 2017.

Ved benyttelse af de ovenstående bølgeforhold, blev det vurderet, at overskylsniveauet ved Kysthus 3 var over acceptabelt niveau. Derfor

var der behov for at iværksætte en konkret reduktion, hvilket udføres ved at indføre en bølgebryder øst for Kysthus 3.

Det er vurderet, at uden etablering af en bølgebryder, vil der være risiko for personskade såvel som skader på bygninger ifm. overskyl ved ekstreme hændelser.

De væsentligste dimensioneringsforudsætninger, som er uddybet i de følgende afsnit, er:

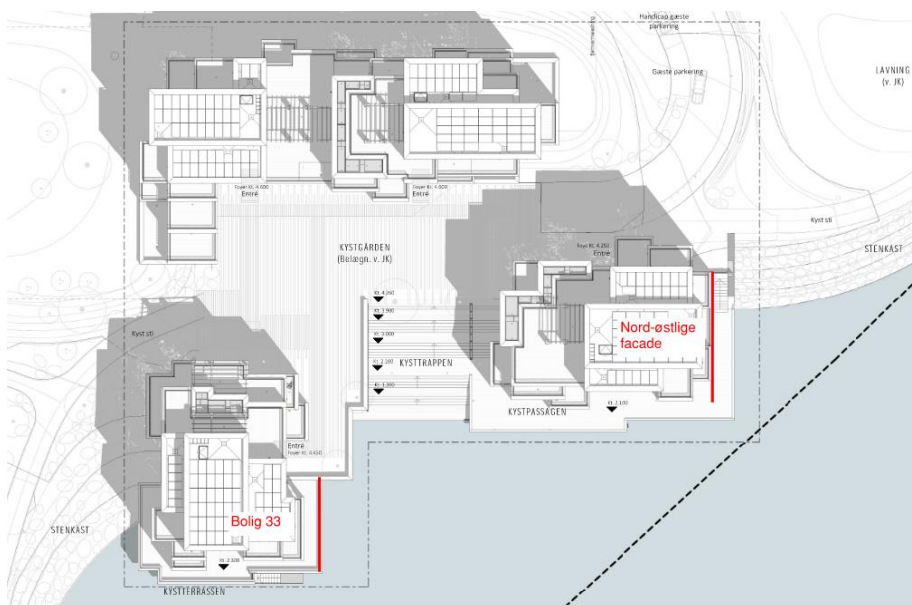
- Bølgehøjde, $H_{m0} = 1,4$ m
- Vandstand i kombination med bølger, +0,4 m
- Hyppighed, 50 års hændelse fastsat ved en ekstremværdisanalyse

Det præciseres, at ekstremt højvande og ekstreme bølger ikke optræder samtidigt ifm. en 50 års hændelse. Dette er baggrunden for, at der ifm. design af bølgebryderen, alene antages et højvande i +0,4 m.

Bølgebryderens "levetid" er vurderet til at være 50 år ud fra antagelsen om design ift. en 50 års hændelse.

1. Projektforudsætninger

Der er to metoder til at reducere mængden af overskyl; direkte og indirekte. Den *direkte* afhjælpning er ved at øge topkoten på brystningerne på de udsatte strækninger. Hvis koten er tilstrækkeligt høj, vil mængden af overskyl reduceres til et acceptabelt niveau. Den *indirekte* metode er at reducere bølgehøjden, hvilket vil resultere i en mindre mængde overskyl, der kan nå over brystningen. Da brystningskoten ved Kysthuset allerede er ret høje, og en forhøjelse vil reducere udsynet fra lejlighederne, er der arbejdet videre på en løsning, hvor der etableres en bølgebryder, der kan reducere bølgehøjden.



Figur 2 - Oversigtsbillede med angivelse af de kritisk påvirkede strækninger, hvor overskyl ikke er acceptabelt. Den Nordøstlige facade har ingen specifikke krav, men det sikres, at løsningskonceptet minimerer overskyl i begge anførte områder.

DHI har udarbejdet en MIKE model, for at simulere situationen og vurdere hvor meget bølgehøjden skal reduceres for at overskyllet ved Kysthus 3 når et acceptabelt niveau. Vurderinger og resultater er givet i dokument; *Tuborg Syd – Bølgeforhold og bølgeoverskyl for kysthus 3-5, februar 2022*, udarbejdet af DHI.

I nærværende notat gennemgås processen med at projektere en konstruktion (høfde eller offshore bølgebryder), der kan reducere bølgehøjden. Indledningsvis var det tanken, at der skulle etableres en høfde, men gennem projektforløbet blev det et ønske fra bygherren, at høfden blev flyttet fri fra land, for i stedet at fungere som en offshore bølgebryder. Formålet var dels at sikre en fri passage af vandet langs kysten samt af sikkerhedsmæssige årsager.

- Evt. havspejlsstigninger som følge af klimaændringer er ikke medtaget, men behandlet i det senere afsnit 2.3.
- Lokale effekter ved trappen er ikke vurderet.
- Det er forstået, at topkoten (TK) omkring kysthusene ikke bliver lavere end +2,1 m, hvorfor der er gennemført beregninger for $TK \geq 2,1$ m.
- Der er benyttet $H_{m0} = 1,4$ m og $T_p = 5,5$ s svarende til en 50 års hændelse. Bølgeforhold er fastsat ud fra en ekstremværdisanalyse.
- Ekstreme bølger og ekstremt højvande er ikke korreleret. En 50 års bølgehændelse er sammenfaldende med et højvande i kote +0,4 m. Modelleringen er udført i 2022 hvor der var adgang til kystdirektoratets højvandsstatistik fra 2017.

2.2. Krav til overskyl

EurOTop 2018 angiver grænser for bølgeoverskyl i forskellige situationer, og følgende anbefalinger foreligger for Kysthus 3, se Figur 4.

Faretype	q (l/s/m)	Bemærkning
Skader på bygninger bag beskyttelse/facade	≤ 1 l/s/m for $H_{m0}=1-3$ m	Tabel 3.2 i /5/
Personer på terrasserne	≤ 1 l/s/m for $H_{m0}=2$ m $\leq 10-20$ l/s/m for $H_{m0}=1$ m	Tabel 3.3 i /5/

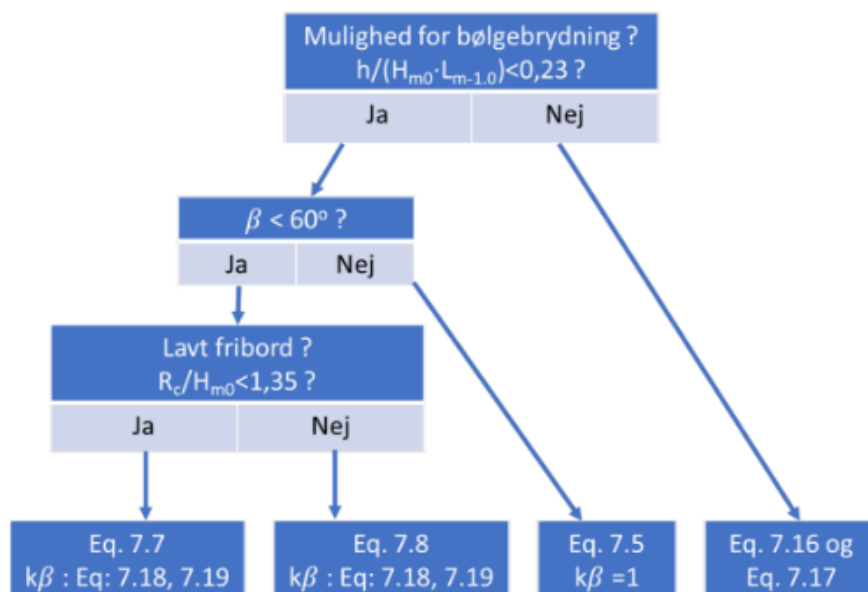
Figur 4 - Anbefalinger ift. bølgeroverskyl, EurOTop 2018.

2.3. Vurdering af resultaternes validitet

DHI skriver "Evt. havspejlsstigninger som følge af klimaændringer er ikke medtaget", hvilket kan underestimere beregnet bølgeoverskyl. Klimaatlas estimerer ændringen i vandstanden i Danmark, baseret på en referenceperiode fra 1981-2010. Ved Tuborg Syd vil fremtidig middelvandstand øges med ca. 23-50 cm, afhængig af om man ser på midt århundrede (2041 -2071) eller slut århundrede (2071-2100). Dette er en forøgelse af middelvandstand, hvor forøget vandstand på grund af stormflod ikke er inkluderet.

I figurteksten til figur 5.5 i DHI-rapport fremgår det, at der benyttes en periode $T_p=4,5$ s. I tabel C-5 i rapporten, er der fastsat en bølgehøjde og periode for en returperiode på 50 år på $H_{m0}=1,4$ m og $T_p=5,5$ s. Der fremkommer således 2 forskellige perioder for samme hændelse i DHI-rapporten. Det er derfor muligt, at simuleringsmodellen fra DHI overestimerer reduktionsfaktorerne. I praksis vil dette opleves som et større overskyl end det estimerede.

For fastsættelse af krav til overskyl, har DHI benyttet EurOTop 2018. Der er henvist til et beslutningsdiagram for at bestemme det estimerede overskyl, se Figur 5. De anvendte ligninger fra EurOTop 2018 er ligninger for at bestemme mean value overtopping (gennemsnit overskyl), men EurOTop angiver, at det er stærkt anbefalelsesværdigt at benytte andre ligninger ved design/ sikkerhedsvurdering af overskyl. Dette gøres ved at inkludere en standard afvigelse for koefficienterne hvilket giver større sikkerhed.



Figur 4.6 Beslutningsdiagram til estimering af bølgeoverskyl. 'Eq. X.X' refererer til formler i /5/.

Figur 5 - Beslutningsdiagram for overskyl, DHI.

3. Detaildimensionering af hofde (Oprindelig forudsætning)

Den oprindelige forudsætning var, at der blev etableret en hofde for at reducere bølgehøjden og overskyl ved Kysthus 3 østvendte facader. Modelleringen fra DHI omhandler hofdens placering og overskyl, mens nærværende afsnit omhandler projektering af hofden.

3.1. Design af hofde i kote +0,5 m

3.1.1. Hydrauliske beregninger

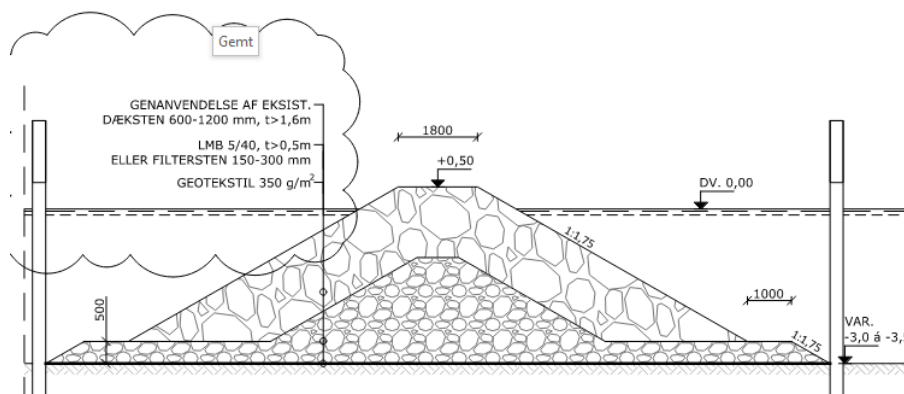
Baseret på projektforsudsætninger og hydrauliske input fra DHI-rapport, er detailprojektering af hofden udarbejdet. Hofden designs for en 50 års hændelse, som angivet i afsnit. 2.1. Hofden er en tolags hofde med en topkote i +0,5 m, og har til hensigt at reducere den indkommende bølgehøjde for at reducere overskyl på Kysthus 3.

Følgende parametre er grundlag for projekteringen.

Tabel 1 Parametre benyttet ved dimensionering af hofde

Permeabilitetsfaktor, P	0,5
Skadesniveau, S _d	2,0
Hældning, a	1,75
Topkote	+0,5 m
Bølgehøjre, H _s (50-års hændelse)	+1,4 m
Bølgeperiode, T _p (50-års hændelse)	5,5 s
Vandstand, SWL (ekskl. fremtidig vandstandsstigning)	0,4 m
Fremtidige vandstandsstigninger	0,5 m
Vanddybde	-2,75 m

De hydrauliske beregninger, som er baseret på Van der Meer, giver en udnyttelse af høfdens stabilitet på ca. 30 %, og det projekterede snit er vist i Figur 6.



Figur 6 - Snit i høfde.

3.1.2. Geotekniske stabilitetsberegninger af bølgebryder

Underbunden for placering af høfderne er enten bestående af senglacialt/glacialt sand eller moræneler. Begge aflejringer er bæredygtige, og giver ikke anledning til at foretage yderligere sætningsvurderinger.

Der er i projekteringsforudsætningerne opstillet to designprofiler; et med sandbund (senglacialt/glacialt smeltevandssand) og et med lerbund (moræneler). Jordens karakteristiske styrke og rumvægt ses i projekteringsforudsætningerne.

Høfdernes stabilitet eftervises i middel konsekvensklasse CC2 jævnfør DS/EN 1997-1 NA 2021.

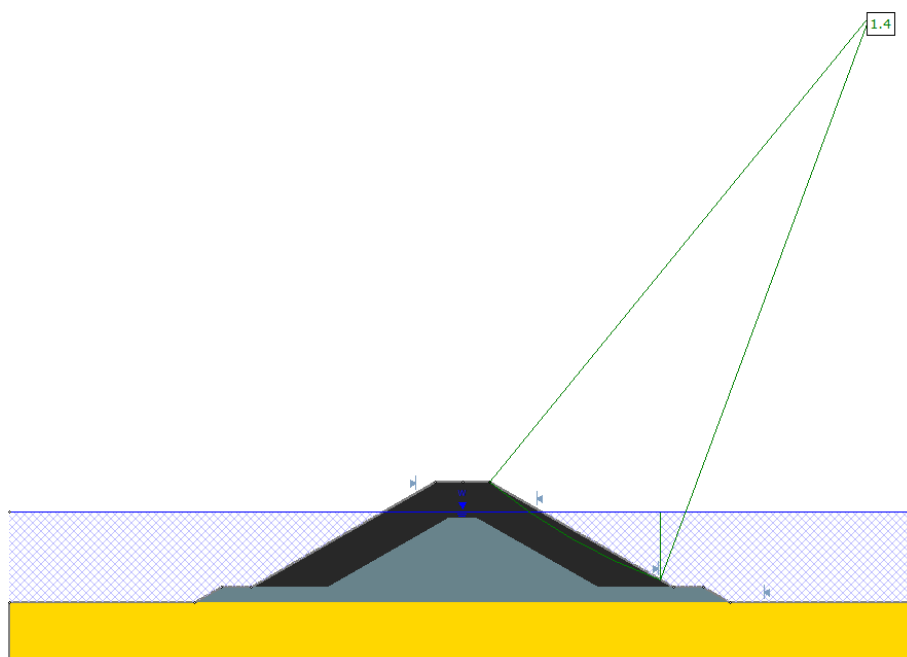
Stabilitetsforholdet mellem de drivende og stabiliserende kræfter er analyseret ved hjælp af beregningsprogrammet Slide2, udgivet af Rocscience.

Stabilitetsberegningerne er udført efter Morgenstern and Price's metode. Metoden omfatter stabilitetsberegninger af cirkulære brudlinier, hvor både kraft og momentligevægt er opfyldt. Der anvendes Mohr – Coulomb's brudbetingelse.

Ved beregningerne anvendes regningsmæssige værdier af jordens styrke. Stabilitetsindekset F , angiver den regningsmæssige ligevægt mellem stabiliserende og drivende kræfter. For et stabilitetsindeks på $F \geq 1$ er stabiliteten tilfredsstillende i henhold til DS/EN 1997-1 NA 2021.

Der tages udgangspunkt i den højeste bølgebryder, da det er denne, der er dimensionsgivende for resultatet af stabilitetsberegningen. Stabilitetsberegningen er udført med et vandspejl på 0,5 m under daglig vande, hvilket er ugunstigt for stabiliteten.

Nedenstående ses stabilitetsberegningen for bølgebryderen placeret på sandbund.



Figur 7 - Illustration af stabilitetsberegninger.

Som det ses, er stabilitetsindekset på $F=1,4$, hvilket vil sige, at den opfylder kravene i DS/EN 1997-1 NA 2021. Ligeledes kan det ses, at et potentielt brud vil forløbe i stenkastningen (tynd, grøn linje der forløber igennem det mørke område).

Der er udført tilsvarende stabilitetsberegninger med "lerbund". Stabilitetsberegningerne er udført med udrænedes og drænedes betingelser. Disse beregninger viser ligeledes et stabilitetsindeks på $F=1,4$ og tilsvarende brudforløb.

Ud fra ovenstående er det eftervist, at bølgebryderen ved Kysthus 3 har en tilstrækkelig regningsmæssig stabilitet, der opfylder kravene til DS/EN 1997-1 NA 2021.

3.1.3. Stedlige forhold

3.2. Middelvandstand

Ændringen i middelvandstand pga. klimaet, er som tidligere nævnt i afsnit 2.3, estimeret til 23-50 cm afhængig af tidsperspektivet. Der er valgt 50 cm (slut århundrede) i beregningerne for en konservativ betragtning.

Topkote på brystningsmur (for beregning af overskyl)

Det er vigtigt at bemærke sig, at topkoten på brystmuren er ændret, efter modelleringen er udført. Den eksisterende kote var +2,7 m, mens den nye kote er +3,2 m. Forhøjelsen tilsvarende antagelsen om fremtidig vandstandsstigning ved udgangen af dette år hundrede.

3.2.1. Konklusion

Modellen i DHI-rapporten har en topkote i +0,5 m og giver et overskylsniveau tæt på 1 l/m/s, som er kravet givet i EurOtop 2018. Som diskuteret i afsnit 2.3, er det muligt at rapporten underestimerer overskylsniveauet i modellen, og det anbefales derfor at topkoten ikke udføres lavere end kote +0,5 m.

En reduktion i topkoten øger risikoen for skader på kysthuset i fremtiden (+50 år), men denne risiko kan minimeres ved løbende at øge bølgebryderens topkote med et ekstra stenlag hver 25-50 år, afhængig af de konkrete havspejlsstigninger.

4. Detaildimensionering af offshore bølgebryder inkl. placering

Efter detaildimensionering af hølften, var det et ønske fra bygherren at ændre konstruktionen fra en hølft til en offshore bølgebryder, så der ikke var en direkte forbindelse fra land og ud på den bølgebrydende konstruktion. Ved at fjerne tilgangen til hølften, reduceres risikoen for at personer kan komme til skade og samtidig giver det også en bedre arkitektonisk indpasning i kystlandskabet.

4.1. Dimensionering af bølgebryder

Den offshore bølgebryder er detailprojekteret efter samme grundlag som hølften, se designparametre i Tabel 1. Den indkommende bølgehøjde og bølgeperiode forventes at være den samme, selv om den offshore bølgebryder bliver flyttet ud fra land.

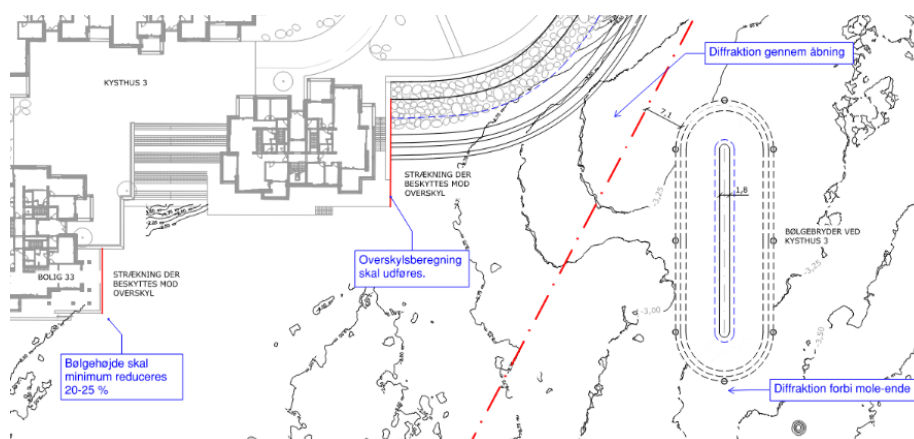
Bølgebryderen vil have samme geometri og samme laginddeling som hølften modelleret i DHI rapporten, og der antages, at transmission gennem og over bølgebryderen forbliver den samme.

4.2. Placering af bølgebryder

I forbindelse med placering af bølgebryderen, er der to vigtige forhold at tage højde for: diffraktion og frit stræk.

4.2.1. Diffraktion

Der vil forekomme *diffraktion* mellem bølgebryderen og landsiden, når den flyttes ud fra land. Der vil også forekomme diffraktion ved enden af molen, men det er samme situation som ved en hølft. Begge diffraktioner giver en reduktion af bølgehøjden. Bølgebryderen skal placeres så den indkommende bølge får en reduktion på ca. 20-25% som oplyst i DHI rapporten afsnit 5.2, for at opfylde overskylskravet på 1 l/m/s. Overskylsniveauet ved den Nordøstlige facade skal beregnes jf. Figur 8.

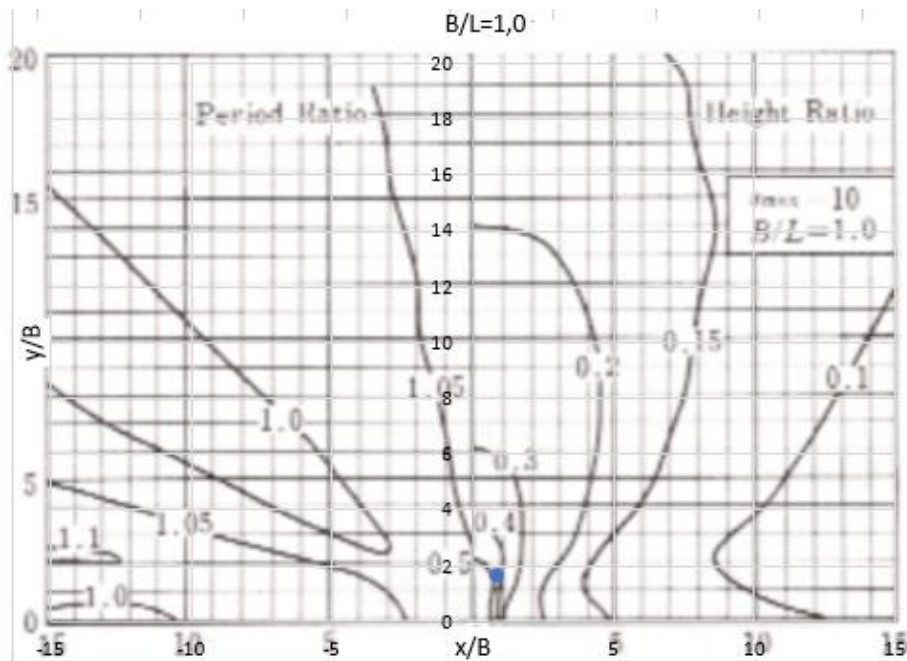


Figur 8 - Diffraktion og bølgereduktion for offshore bølgebryder.

4.2.2. Diffraktion gennem åbning

Ved benyttelse af diffraktionsdiagrammer beregnes en diffraktionskoefficient på $K_d=0,5$ ved placering af hølften maks. 30 m fra land og min.

50 m fra kysthus 3, se Figur 9. Diffraktionsdiagrammet afhænger af åbningens bredde B , bølgens længde L og afstanden fra åbning til aktuel bølgelokalitet (x,y) . Diffraktionsdiagrammet er hentet fra Goda (2000) *Random seas and design of maritime structures*.

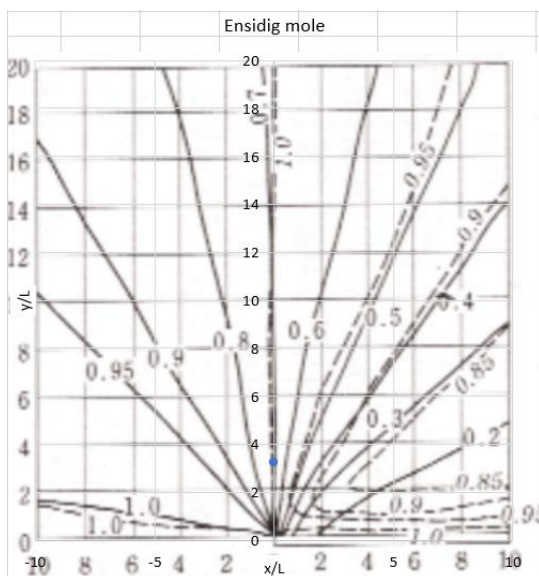


Figur 9 - Diffraktionsdiagram for åbning.

Ved benyttelse af beregningsmetoder fra EurOtop 2018, kan overskylsniveauet ved den nordøstlige facade bestemmes. Beregninger viser, at bølgehøjden reduceres med en faktor 0,5 på grund af diffraktion, og dermed er overskyllet på et acceptabelt niveau.

4.2.3. Diffraktion forbi mole-ende

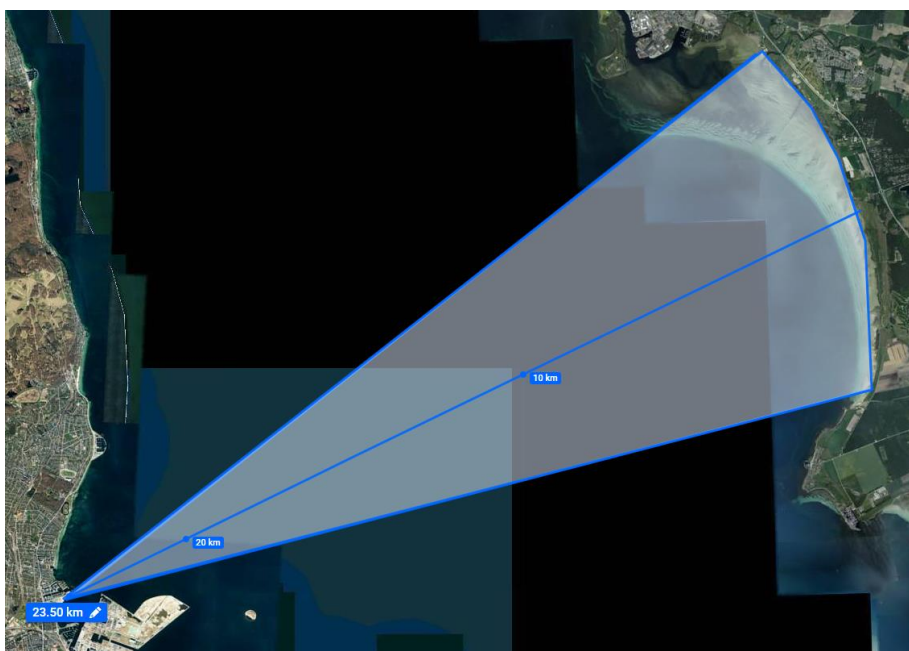
Ved benyttelse af diffraktionsdiagrammer beregnes en diffraktionskoefficient på $K_d=0,7$ for bolig 33, se Figur 10. Da kravet er, at bølgehøjden skal reduceres med ca. 20-25 %, vurderes det, at overskyllet er på et acceptabelt niveau.



Figur 10 - Diffraktions diagram for mole-ende.

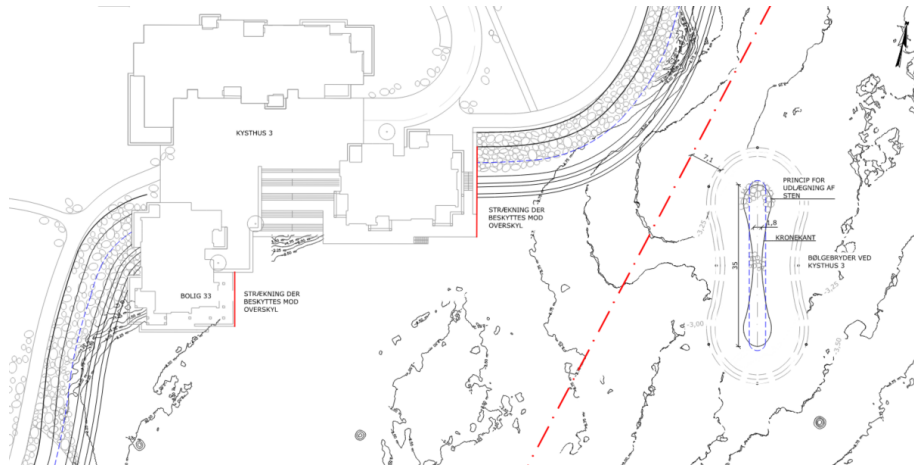
4.2.4. Frit stræk

Bølgebryderen skal skærme for bølger der får et langt *frit stræk*, se Figur 11. Når bølgen har tilgang til et langt frit stræk, i dette tilfælde ca. 24 km, får bølgen mulighed til at oparbejde en relativt stor bølgehøjde. Højden kan reduceres ved, at den brydes ved lavvande eller ved en bølgebryder. Da området ikke er tilstrækkeligt lavvandet foran Kysthus 3 til at bølgen brydes til det ønskede niveau, skal bølgebryderen etableres for at bølgehøjden reduceres. Derfor ønskes det, at bølgebryderen placeres, så den kan bryde bølger fra retninger jf. den viste figur herunder.



Figur 11 - Oversigtsbillede, frit stræk (krak.dk).

Baseret på de ovenstående betragtninger vil bølgebryderen give størst effekt ved at placere den som anført på figuren herunder.



Figur 12 - Placering af offshore bølgebryder ved Kysthus 3.

4.3. Afslutning af kystindfatning ved kysthus 3

Da beregninger af overskyl ved den Nordøstlige facade er inden for et acceptabelt niveau, vurderes det, at der ikke er behov for yderligere tiltag foran spunsvæggen i form af sten. Derfor fastholdes den allerede projekterede kystindfatning.

5. Påvirkning af nabostrækninger

Etableringen af bølgebryderen vil ikke have en negativ påvirkning på nabokonstruktionerne. Alle omkringliggende kystsikringskonstruktioner er udført som hård kystsikring, og derfor egnede til bølgepåvirkninger, og etablering af bølgebryderen medfører i bedste fald blot, at udvalgte læside strækningers stabilitet øges betragteligt.

Etablering af bølgebryderen vil således – på udvalgte strækninger – være til gunst ift. de nuværende forhold.