

Koncepter for optimering af bølge/højvandsbeskyttelse

Projekt navn **E6 – Hellstranda**
Projektnr. **1350057430**
Version **1.0**

Udarbejdet af **THBU**
Kontrolleret af **JQHN**
Godkendt af **EOH**

Dato 12.09.2024

1 Baggrund

Projektområdet ligger i Trondheimfjorden øst for Trondheim, nær byen Hell. E6-motorvejen kræver en udvidelse for at imødekomme det stigende trafikpres på strækningen. Udvidelsen af motorvejen medfører, at dele vil ligge særlig udsat for bølger og højvandstand og en del af den nye vejstrækning må bygges ud i vandet. I figur 1-1 ses en del af tracéet for den nye motorvejsudvidelse hvor der etableres bølgeafskærmning mod havet.

Nærværende notat har til formål at evaluere forskellige koncepter for sikring af vejen mod belastning fra havet samt overskyl af bølger ind over motorvejen. Vejen er som udgangspunkt meget overfølsom overfor overskyl af bølger.

Rambøll
Prinsensgade 11
DK-9000 Aalborg

T +45 5161 1000
<https://dk.ramboll.com>



Figur 1-1: Illustration af projektområdet. Den røde markering viser den del af vejtracéet, som ligger mest kystnært, og som medfører et behov for bølge- og højvandsbeskyttelse (Rambøll, 2024). Baggrundskort fra (Google LLC, 2023).

2 Eksisterende forhold

Eksisterende kystlinje består af stenskråningsbeskyttelse hvor hældningen vurderes at være ca. 1:3 jf. (Rambøll, 2024).

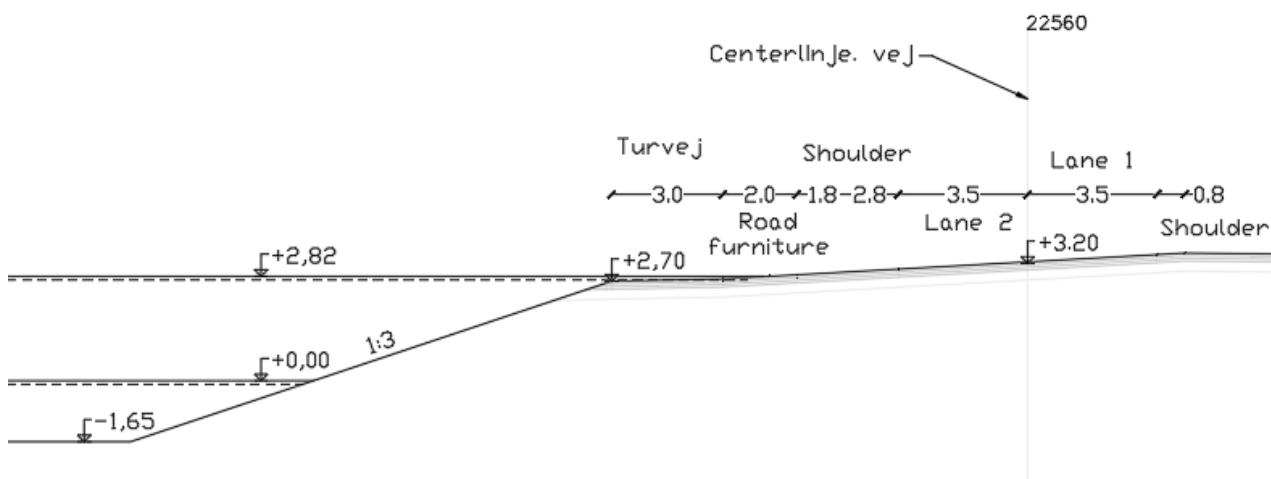
Idét området ønskes påvirket så lidt som muligt af hensyn til den lokale fauna, lægges i vurderingen af forskellige løsningsmuligheder stor vægt på hvor stor forandring løsningerne betyder for områdets hydrauliske- og kystmorfologiske forhold (herunder strøm og bølgeforhold). Der opereres her med et koncept om fysisk fodaftryk og faktisk fodaftryk. Det fysiske fodaftryk dækker over, hvor stort et område til søs der vil blive optaget af fremtidig kystbeskyttelse. Det faktiske fodaftryk inkluderer den zone ud for fremtidig kystbeskyttelse hvor morfologiske forhold påvirkes.

3 Geometriske bindinger og kritisk snit

Overskyl af en konstruktion afhænger selvsagt meget af konstruktionens topkote ift. vandstand samt bølgehøjde. Vandstand og bølgehøjde i området er nærmere beskrevet i (Rambøll, 2024), men da der ikke kan varieres på dem, behandles de ikke videre i dette notat. Herudover betragtes vejens kote og sideværts hældning også som fastlagt.

Figur 3-1 viser tværsnittets overordnede sektioner til opfyldelse af vejens formål. Tværsnittet opdeles i:

- Tættest på kystlinjen etableres en 3m bred turvej (sti) til fodgængere.
- Landværts fra turvejen etableres kombineret støjværn og bølgeskærm i bredde antageligt omkring 0,7 m over jorden (ikke vist på figuren).
- Vejrelaterede konstruktioner (skilte m.m.), etableres på de næste 2 m.
- Nødspor i bredden 1,75-2,75 m alt efter tilgængelig plads.



Figur 3-1: Kritisk snit i vejen ved station 22560. Justeret baseret på estimeret vanddybde og kysthældning fra (Rambøll, 2024). Kystlinjen er til venstre i illustrationen.

3.1 Kritisk tværsnit (design tværsnit)

Kystprofilen og tværsnittet for vejen ændrer sig langs kyststrækningen. Således vil også behovet for bølge- /højvandsbeskyttelsen (bl.a. topkote) ændre sig.

Det såkaldte kritiske tværsnit (som medfører behovet for den højeste bølge/højvandsmur) er kendetegnet ved stor vanddybde foran kysten, samt lav kote på kysten. Herudover er kort afstand fra bølge- /højvandsbeskyttelsen kritisk ift. bølgeoverskyl til vejbanen.

I nærværende vurderinger tages udgangspunkt i et design tværsnit (vist på Figur 3-1) ved stationering 22560 til med en nuværende maks. kote +2,7 NN2000 ved skråningsbeskyttelsens top. Tværsnittet befinder sig på en strækning med lav vanddybde, men den estimerede vanddybde på 1,65 m benyttes konservativt alligevel.

4 Tidligere indledende vurderinger af koncepter for bølge-/højvandsbeskyttelse

Indledende vurderinger af overordnede koncepter for bølge-/højvandsbeskyttelse ved Hellstranda er behandlet i *Modellering af bølgeforhold ved Hellstranda* (Rambøll, 2024). Her er der vurderet på fordele og ulemper, samt givet estimater for forventet overskyl.

(Rambøll, 2024) dokumenterer ligeledes indledende skitseberegning på en bølgevæg over en stenskråning samt indledende vurderinger af bølgeoverskyl. Til vurdering af bølgeoverskyl er anvendt foreliggende designværktøjer. Hertil er det pointeret, at Molehåndbogen foreskriver, at det kan være nødvendigt at gennemføre fysiske modelforsøg hvor der måles bølgeoverskyl, belastning, erosion mv. i de tilfælde, hvor det er vigtigt at overskylskriteriet overholdes (Kystverket, 2018). Anbefalingen er også gengivet i EurOtop, som foreskriver, at når offentlig sikkerhed er en bekymring, eller når konsekvenserne af overskyl er vigtige, er fysiske modeltests den eneste pålidelige mulighed for at vurdere overskyllet (EurOtop et al., 2018).

Følgende gengiver visse relevante værdier fastlagt i (Rambøll, 2024):

- Acceptabelt overskyl defineres vha. gældende standarder til 0,05 l/s/m.
- Vanddybden i området ud for vejen estimeres til 1,65 m.
- Vandstand i området defineres ved anvendelse af TEK2 F2 definitionen til +2,82 m i en designsituation.
- Signifikant bølgehøjde estimeres til 3,6 m med peak bølgeperiode 8,8 s.

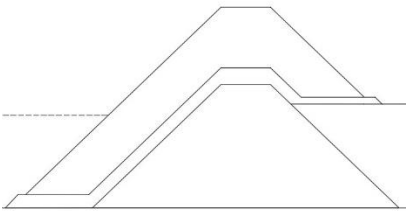
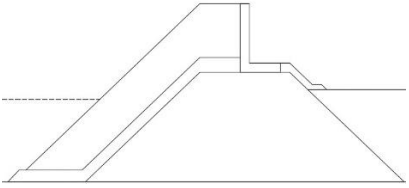
Nærværende notat søger at afdække yderligere tiltag til at optimere på tværsnit for bølge- /højvandsbeskyttelsen. Formålet er at danne et mere detaljeret grundlag for valg af koncept. Hertil tages der udgangspunkt i overordnede koncepter fra (Rambøll, 2024).

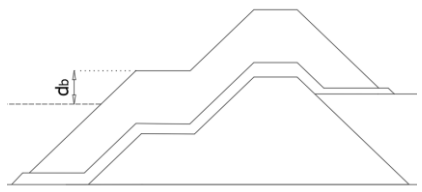
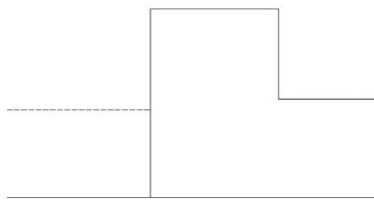
4.1 Opsummering af generelle koncepter fra indledende screening

Tabel 4-1 indeholder en opsummering af fordele og ulemper ved de generelle tværsnit behandlet i (Rambøll, 2024).

Tabel 4-1. Fordeler og ulemper ved forskellige koncepter for bølge-/højvandsbeskyttelser.

Koncept	Fordele	Ulemper
Konventionel bølge- /højvandsbeskyttelse <u>uden</u> kronevæg	Hvis der er store mængder stenmateriale til rådighed kan den	Bølge- /højvandsbeskyttelse vil have et forholdsvis stort

	konstrueres forholdsvis billigt. • Molen kræver stort set ingen vedligehold. • Relativt hurtig at konstruere. • Kan anlægges med hældning på 1:3 (svarende til nuværende kystbeskyttelse), så kystprofilet ændres mindst muligt.	fodaftrek ud på havbunden. • Bølge-/højvandsbeskyttelse tillader ikke tæt adgang til vandet.
Konventionel bølge-/højvandsbeskyttelse <u>med</u> kronevæg 	• Kan reducere fodaftrykket på havbunden. • Reducerer mængden af anvendte dæksten på bagsiden af molen. • Kan give tættere adgang til vandet. • Hurtig at konstruere, men en smule langsommere end uden kronevæg, da der skal støbes. • Bølge-/højvandsbeskyttelse kræver stort set ingen vedligehold. • Kan anlægges med hældning 1:3, så kystprofilet ændres mindst muligt. • Kronevæg kan kombineres med støjskærm.	• Kronevæggen vil være dyrere at konstruere og anlægge (sammenholdt med uden kronevæg). • Etablering af kronevæg kan medføre behov for øget stenstørrelse i dækstenslag.

Etablering af "skulder" på skråning 	• Kan reducere R_c, da bølgerne vil bryde på skulderen. • Der kan anvendes sten med en mindre nominel diameter. • Hurtig at konstruere • Bølge-/højvandsbeskyttelse kræver stort set ingen vedligehold • Kan anlægges med hældning på 1:3, så kystprofilen ændres mindst muligt.	• Grundet kravet fra (Kystverket, 2018) om at $d_b \geq 0,6H_{m0,dim}$ samt den forholdsvis lange designbølge vil denne type af mole få et meget stort fodaftryk, da man er tvunget til at bygge den høj. • Bølge-/højvandsbeskyttelse tillader ikke tæt adgang til vandet.
Vertikal væg 	• Kan etableres med et relativt lille fodaftryk på havbunden. • Kan etableres på stor dybde. • Kan give adgang tættere på vandet.	• Denne type bølge-/højvandsbeskyttelse vil medføre stor bølgereflektion og derfor forårsage en markant ændring af kystprofilen på havbunden. • Dyrere at konstruere. • Kan tage længere tid at konstruere. • Kan kræve mere vedligehold efterfølgende.

5 Potentielle koncepter til optimering af tværsnitsopbygning

I det følgende præsenteres potentielle yderligere tiltag for optimering af bølge-/ højvandsbeskyttelse langs E6-strækningen ved Hellstranda. Herudover udbygges fordele og ulemper for hvert koncept. Formålet er at etablere et tilstrækkeligt grundlag for valg af koncept til videre bearbejdning ifm. skitseprojektering. Det pointeres, at de viste snit er teoretiske og ikke afspejler hvordan endelig tværsnit vil se ud.

For alle stenkonstruktioner gælder, at der anlægges en kerne af friktionsfyld, herover lægges et filterlag og endelig et dæklag. Dæklaget beskytter konstruktionen fra bølger og skal derfor være af store sten. Kernematerialet er billigere fint materiale. Filterlaget er af en mellemstørrelse og sikre, at kernematerialet ikke udvaskes igennem dæklaget.

Stenkonstruktionerne har ligeledes en "tå" ud mod havet, hvor dæklaget fortsættes 3 stenstørrelser til søs ved havbunden. Dette sikrer mod underminering af skråningen grundet erosion.

5.1 Konventionel bølge-/højvandsbeskyttelse

Figur 5-1 viser koncept med en konventionel bølge-/højvandsbeskyttelse. Bag beskyttelsen anlægges turstien og herefter vejbanen.

I modsætning til den konventionelle bølge-/højvandsbeskyttelse vist i Tabel 4-1, indarbejdes en såkaldt "tå" langs forkanten af skråningen. Denne tå sikrer mod erosion/underminering af skråningens forside. Tåen skal være 3 stendiameter lang og 1 diameter høj. Aftrykket af tåen er derfor større for en stejl skråning, da dette medfører større sten.

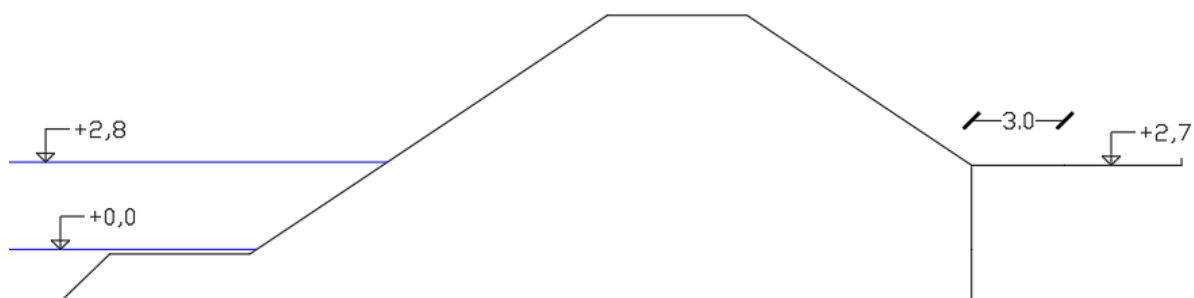
Ved normalt lavvande vil tåen være synlig, da den dimensioneres efter den betydeligt større højvandssituation.

Fordele ved en konventionel molekonstruktion:

- Hurtig og forholdsvis billigt at anlægge.
- Vedligehold er minimalt.

Ulemper:

- Transmission gennem dæklag leder til ekstra høj topkote. Blokerer udsyn fra turvejen.
- Medfører relativt stort fodaftryk ud i vandet selv hvis stejl hældning implementeres.
- Medfører relativt stort fodaftryk landværts.
- Støjskærm må etableres separat.



Figur 5-1: Bølgesikring ved ren molekonstruktion uden bølgeskærm.

5.2 Stejl og blid skråning med bølgeskærm

Figur 5-2 viser koncept med stejl skråningssikring og bølgeskærm med turvej på ydersiden.

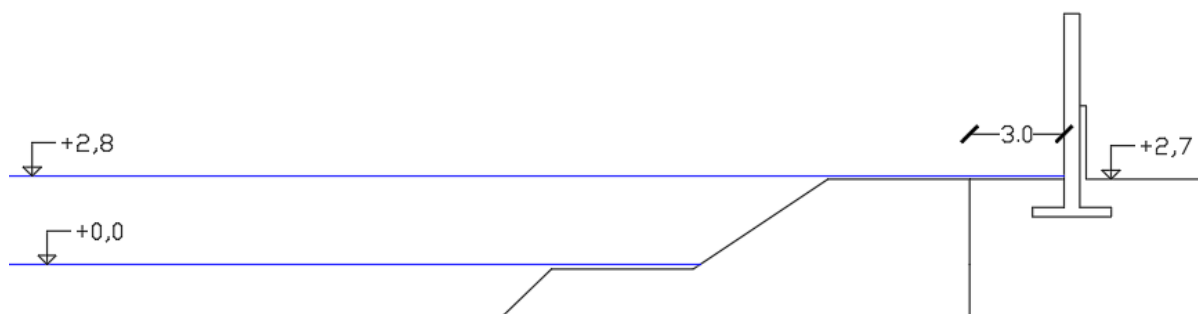
Fordele ved konceptet:

- Godt udsyn fra turvej.
- Relativt billig og hurtig at anlægge
- Små fysisk fodaftryk, se dog ulemper forbundet med fodaftryk

Ulemper:

- Oversvømmelse af turstien under højvandshændelser.
- Høj bølgeskærm nødvendig grundet ringe beskyttelse søværts for væggen.
- Stor belastning af bølgeskærm, da denne er ubeskyttet i stor højde.
- Ca. 50 % større sten i dæklaget som leder til større længder af tå og krone. Dette opvejes dog af den stejlere hældning hvorfor det fysiske fodaftryk er sammenligneligt med den blødere hældning.

- Effekten af reflekterede bølger på morfologien betragtes som en påvirkning af bundforholdene til havs. En stejlere hældning af skråningen leder til mere bølgererefleksion. Dette sammenholdt med førnævnte ulemper betyder at den forventede påvirkede zone fra den stejle skråning er større end den blidere hældning.



Figur 5-2: Bølgesikring ved stejl (1:1,5) stenskråning med bølgeskærm.

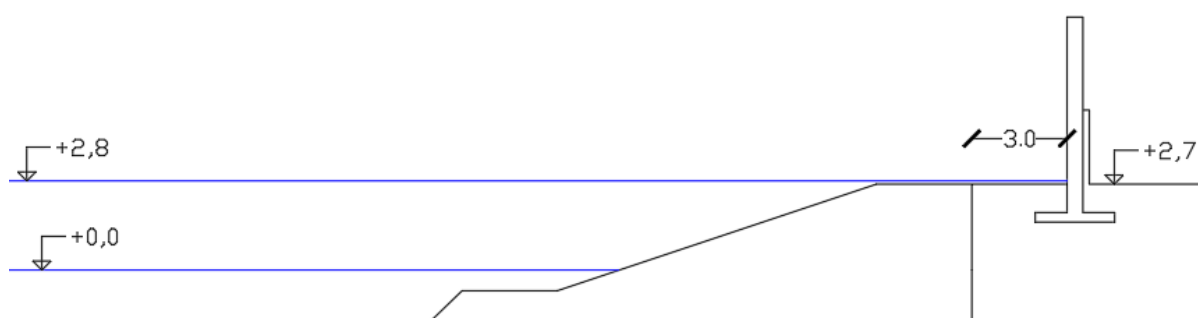
Figur 5-3 viser koncept med blid skråningssikring som eksisterende hældning af 1:3 og bølgeskærm med turvej søværts. Som vist i Figur 5-2 blot med blid hældning af skråning.

Fordele ved konceptet:

- Små fysisk fodaftryk i vandet.
- Godt udsyn fra turvej.
- Reduceret stenstørrelse sammenlignet med stejle skråning, men øget stenmængde.

Ulemper:

- Oversvømmelse af turstien under højvandshændelser.
- Stor belastning af bølgeskærm, da denne er ubeskyttet i stor højde. Dog lavere end med stejl skråning.
- Høj bølgeskærm nødvendig grundet ringe beskyttelse.



Figur 5-3: Bølgesikring ved eksisterende skråningshældning (1:3) samt bølgeskærm.

5.3 Lavmur langs tursti

Figur 5-4 viser koncept med skråningssikring og bølgeskærm samt tilføjelse af lavmur foran turvejen.

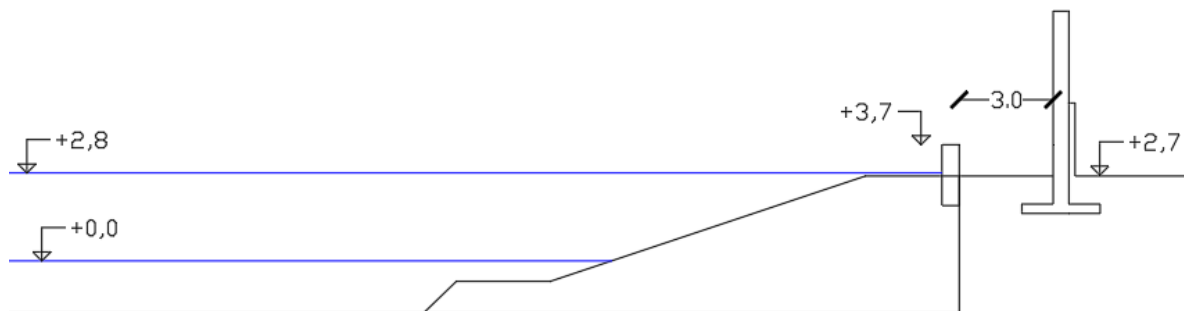
Fordele at have lavmuren foran bølgeskærmen:

- Mindsker bølgelaster og overskyl på bølgevæggen hvilket leder til lavere og smallere bølgeskærm.
- Godt udsyn fra turvej.

- Naturlig afgrænsning mellem turvej og skråningssikring.

Ulemper:

- Oversvømmelse af turstien under højvandshændelser.
- Der skal sikres tilstrækkeligt dræn af turstien da der ellers vil opstå badekareffekt.
- Overskyllet skal estimeres ved modelforsøg eller modellering idét tværsnittet er for kompliceret til standardformler fra empiri i f.eks. (Van der Meer, et al., 2018).



Figur 5-4: Bølgesikring ved stenskråning samt bølgeskærm og lavmur langs turvej.

5.4 Lavmur langs kørevej

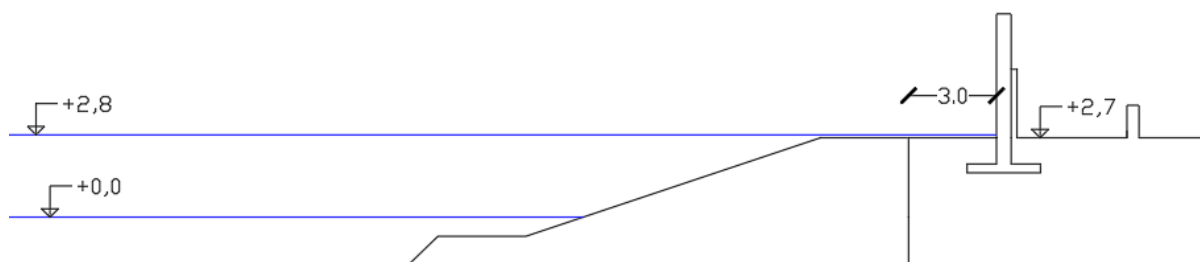
Figur 5-5 viser koncept med skråningssikring og bølgeskærm samt tilføjelse af lavmur foran turvejen.

Fordele ved at have lavmuren bag bølgeskærmen:

- Effektiv hindring af overskyl til kørevejen.
- Dræn af tursti ikke nødvendigt.
- Autoværn kan indtænkes i lavmurens design.

Ulemper:

- Øgede laster på bølgeskærmen.
- Overskyllet skal estimeres ved modelforsøg eller modellering idét tværsnittet er for kompliceret til standardformler fra empiri i f.eks. (Van der Meer, et al., 2018).



Figur 5-5: Bølgesikring ved bølgeskærm samt lavmur langs kørevej.

5.5 Forhøjet kote foran bølgeskærm

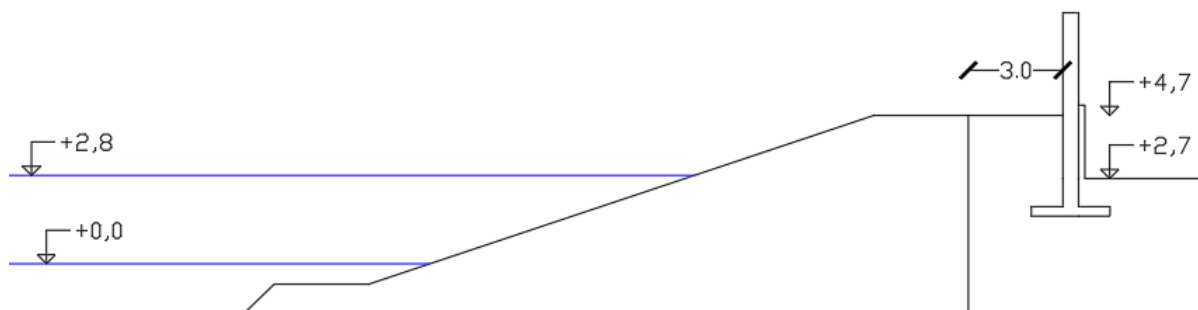
Figur 5-6 viser koncept med skråningssikring og bølgeskærm hvor turvejskoten er hævet ift. kørevejen.

Fordele ved at hæve koten foran bølgeskærmen:

- Bølgeskærmen beskyttes delvist mod laster og ser mindre ud for de gående.
- Godt udsyn fra turvej.
- Ingen oversvømmelse af turvejen under højvandshændelser.

Ulemper:

- Øget fodaftryk søværts.



Figur 5-6: Bølgesikring ved skråning med bølgeskærm og forhøjet stiforløb.

5.6 Skråningssikring med skulder

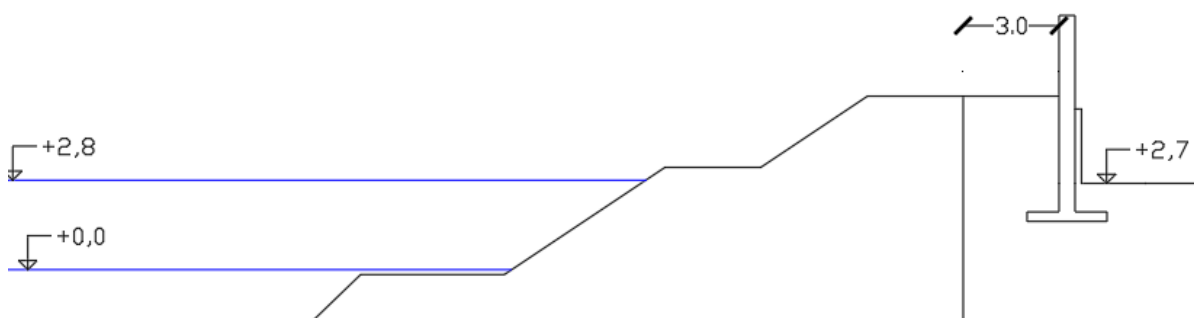
Figur 5-7 viser koncept med skråningssikring hvor en skulder er implementeret. Da skulderen skal placeres en stenstørrelse over højeste tidevand, tvinges turstien med op.

Fordele ved at tilføje en skulder i skråningssikringen:

- Bølger bryder ind over skulder hvilket sænker overskyllet betragteligt.
- Billig måde at sænke topkoten af bølgeskærmen.

Ulemper:

- Stort fodaftryk søværts, idét 3 stenstørrelser må tilføjes horisontalt som krone af skulderen.
- Turvej tvinges opad. Kan dog være en fordel på mange punkter ud over mængdeforøgelse.
- Overskyllet skal estimeres ved modelforsøg eller modellering idét tværsnittet er for kompliceret til standardformler fra empiri i f.eks. (Van der Meer, et al., 2018).



Figur 5-7: Bølgesikring ved skråning med skulder, samt bølgeskærm.

5.7 Vertikal væg eller returløbsvæg

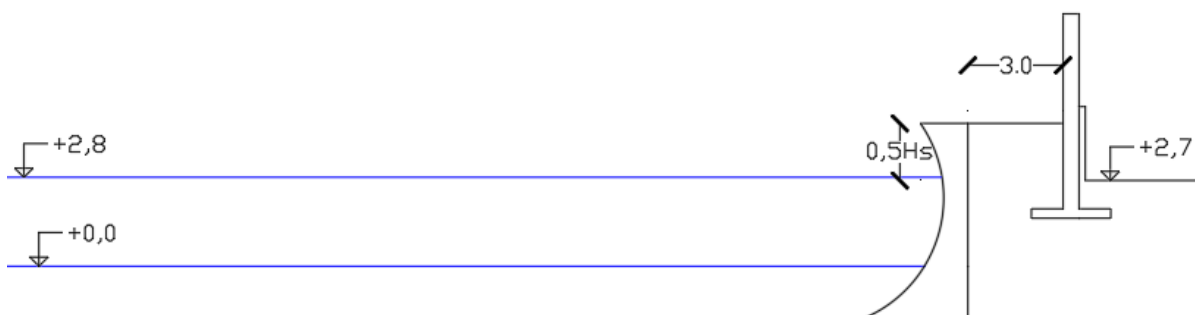
Figur 5-8 viser koncept med vertikal væg eller buet væg der forårsager returløb af bølgen og mindsker overskyl grundet forstyrrelse af bølgens passage over væggen.

Fordele ved vertikal væg:

- Minimalt fysisk fodaftryk. Faktisk fodaftryk grundet påvirkning fra reflekterede bølger bør undersøges nærmere hvis løsningen implementeres.
- Godt udsyn fra turvej

Ulemper:

- Dyr og tidkrævende at anlægge, specielt hvis buet tværsnit vælges.
- Turvej tvinges opad. Kan dog være en fordel på mange punkter ud over mængdeforøgelse.
- Overskyllet skal estimeres ved modelforsøg eller modellering idét tværsnittet er for kompliceret til standardformler fra empiri i f.eks. (Van der Meer, et al., 2018).
- Større vedligehold end med en stenskråning.
- Faldsikring
- Bredere turvej
- Bølgerefleksionsforhold er ikke sammenlignelige med nuværende forhold, hvilket kan medføre et betragteligt fodaftryk søværts som følge af morfologisk påvirkning.



Figur 5-8: Bølgesikring ved returløbsbølgevæg med bølgeskærm.

5.8 Implementering af "næse" på bølgeskærm

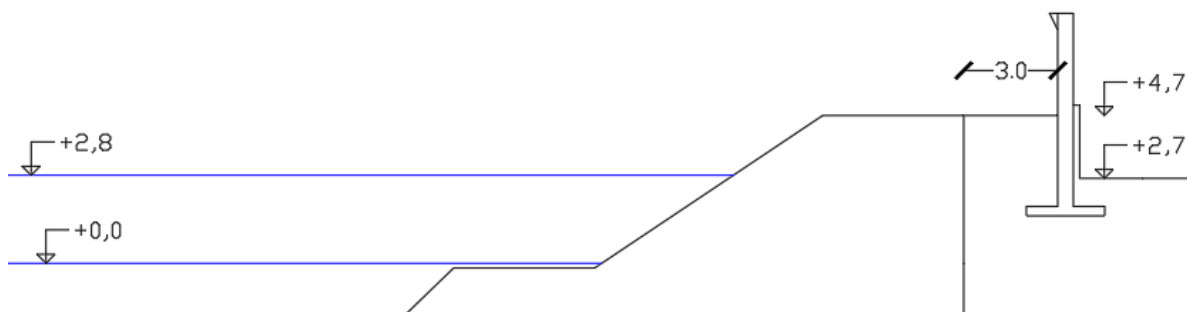
Figur 5-9 viser koncept med næse på bølgevæg der ligesom den buede vertikale væg forårsager returløb af bølgen og mindsker overskyl grundet forstyrrelse af bølgens passage over væggen.

Fordele ved vertikal implementering af næse:

- Forholdsvist lille tiltag for at mindske topkoten af bølgeskærmen. Det bør dog undersøges hvorvidt højere væg eller næse er billigst.
- Effekten på overskyl kan estimeres uden forsøg eller modellering såfremt det resterende tværsnit tillader det.

Ulemper:

- Komplicerer designet af bølgevæggen, da laster i denne forandres ift. en vertikal væg. Modelforsøg er nødvendige ift. at fastsætte laster.



Figur 5-9: Næse på bølgeskærm.

6 Tværsnit til videre bearbejdning

Baseret på fordele og ulemper beskrevet for de forskellige tværsnitsalternativer i de forrige afsnit, anbefales det at arbejde videre med de to nedenfor nævnte koncepter opremset nedenfor. I de følgende paragraffer uddybes valget og fravalget af de forskellige koncepter.

Anbefalede koncepter for tværsnit til videre bearbejdning ifm. skitseprojektering:

1. Blid hældning af skråning med hævet turvej og bølgeskærm bagved.
2. Skulderkonstruktion med bølgeskærm bag turvej.

Det anbefales at etablere stenskråning med en hældning svarende til eksisterende hældning på kyst da denne medfører sammenlignelige påvirkninger bølgerrefleksionsforhold, og dermed sammenlignelige påvirkninger af den lokale kystmorfologi.

Hævet turvejsskote anbefales for at sikre korrekt funktion af skråningen som ellers ville overskylls kraftigt med stor belastning af bølgeskærmen til følge.

Tværsnittet med skulder implementeret skal overvejes udført i stejlere skråning idét den øgede højde ift. uden skulder antageligt medfører stor arealpåvirkning til havs.

En lavmur foran turstien anbefales som adskillelse mellem krone på skråningen og turvej. Ønskes effekten af væggen medtaget i overskylsestimater må der dog modellering eller forsøg til.

Vertikal væg fravælges dels idét det påvirkede areal forventes betragteligt om end det er svært at forudse, dels fordi vægløsningen er dyr i etablering og vedligehold og stadig kræver etablering af bølgeskærm og dels fordi effekten af tværsnittet vil skulle undersøges ved modellering eller forsøg for at estimere overskyl. Desuden vil en vertikal væg medføre øget bølgerrefleksion og dermed øget påvirkning af lokale morfologiske forhold.

En næse kan implementeres efter endt design af tværsnittet hvis topkoten af bølgevæggen ønskes sænket yderligere. Beslutningen skal dog tages under hensyn til de øgede kræfter på bølgevæggen.

7 Diskussion vedr. skitseberegninger

I det følgende gengives nogle betænkninger vedrørende overskyl fra (Rambøll, 2024). Diskussionerne bør tages i betragtning under design af tværsnittet og passende sikkerhed implementeres.

Diskussion vedr. anvendte metode samt resultater fra skitsevurderingerne af bølge-/højvandsbeskyttelsen opsummeres i det følgende:

- Effekt af gangsti på bølge-/højvandsbeskyttelsen: Hvis en gangsti etableres på toppen af bølge-/højvandsbeskyttelsen, vil permeabiliteten af bølge-/højvandsbeskyttelsen reduceres. Dette kan resultere i en forøgelse af bølgeoverskyllet, da mere vand kan overskylle bølge-/højvandsbeskyttelsen.
- Kronebredde af bølge-/højvandsbeskyttelsen: På det kritiske snit i figur 5.1 er kronebredden angivet til 3 m, hvilket er mindre end den typiske kronebredde på 3·Dn50 (hvor Dn50 er estimeret til 1,45 m). Den mindre kronebredde kan yderligere forøge bølgeoverskyllet ifølge (EurOtop et al., 2018).
- Usikkerheder i bølgeparametre: Bølgeparametrene, der anvendes til at estimere kronekoten og 2% bølgeopskyl, er estimeret ved hjælp af den reviderede SPM-metode. Sammenlignet med modellerede resultater for en 200-års hændelse, er der en lille forskel i den modellerede peak periode, som kan påvirke dybdebegrænset bølgehøjde. En længere peak periode kan øge dybdebegrænset bølgehøjde og dermed forøge kronekoten. Hvis bølgeforhold med lavere returperiode end 200 år anvendes i en designsituation, bør disse således eftervises via modelsimulering.
- Fordeelingen af overskyl bag ved bølge-/højvandsbeskyttelsen: Estimeringen af effekten fra den vandrette afstand for vejen til bølge-/højvandsbeskyttelsen på overskylsraten inkluderer ikke vindens effekt på overskyllets bevægelse. Vinden vil dog sandsynligvis medføre, at overskyllet føres med vinden længere landværts og dermed øge den del af overskyllet, der rammer vejbanen. Således forventes det, at anvendte metode til at undersøge denne effekt underestimerer bølgeoverskyl til vejbanen.
- Middeloverskylsraten vs. største bølge: De anvendte formler estimerer middeloverskylsraten, men den største bølge i den dimensionerende storm kan give betydeligt mere overskyl end middeloverskylsraten angiver. Dette er vigtigt at overveje i forhold til potentiel skade på både bølge-/højvandsbeskyttelsen og vejbanen.

Samlet set indikerer de nævnte usikkerheder et behov for forsigtighed. Hertil anbefales det at der ifm. detailprojekteringen gennemføres yderligere undersøgelser for at sikre, at kronekoten og andre sikkerhedsmæssige foranstaltninger er tilstrækkelige til at beskytte både bølge-/højvandsbeskyttelsen og den tilstødende vejbane under forskellige vejrforhold og returperioder. Brug af de nævnte metoder indebærer en vis grad af forenkling af den reelle situation. Jo mere konstruktionen eller designbetingelserne afviger fra de idealiserede konfigurationer, der blev testet for at udvikle metoderne og værktøjerne, desto større vil usikkerhederne være.

Det anbefales at der ifm. detailprojekteringen gennemføres validering af tværsnittet ved anvendelse af stedsspecifikke fysiske modeltests, hvilket er samme anbefaling som i (EurOtop et al., 2018). Ifm. modeltests bør der inkluderes eventuelle effekter fra indhak, hjørner mv. langs vejtracéet, hvilket potentielt kan øge bølgeoverskyl sammenlignet med 2D-situationen.

8 Referencer

Rambøll. (2024). *Modellering af bølgeforhold ved Hellstranda*.

Van der Meer, J., Allsop, N. W., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., . . .

Zanuttigh, B. (2018). *EurOtop*.