

Teknisk notat:

Vurdering af kystbeskyttelsesalternativer og estimering af materialetransport for løsning

Projekt navn **Vurdering af Kyst- og Miljøforhold ved Sikring af Skagerrak 1-4**
 Projektnr. **1100062831**
 Kunde **Energinet**
 Notatnr.
 Version **1.2**
 Til **FLPN**
 Fra **JEPK**
 Kopi til

Udarbejdet af **JEPK**
 Kontrolleret af **AVP**
 Godkendt af **FLPN**

Dato 19.01.2025

Contents

1	Indledning	2
2	Vurdering af de forskellige kystbeskyttelsestiltag	2
2.1	Hydrauliske forhold i området	4
2.2	Kystens naturlige dynamik og frie udvikling	4
2.2.1	Løsning 1 – Høfde:	4
2.2.2	Løsning 2 – Tildækning af kabler med sten:	5
2.2.3	Løsning 3 – Sandpude og stenkastning:	5
2.2.4	Løsning 4 – Ralpude:	5
2.3	Samfundsøkonomiske hensyn	6
3	Estimering af sedimenttransport for løsning	6
3.1	Beskrivelse af fremgangsmåde for bølgeanalyse og sedimenttransportberegninger	6
3.1.1	Estimering af bølgeforhold på lokationen	6
3.1.2	Estimering af kystparallel transport af udlagt materiale	7
3.2	Forhold på lokaliteten	8
3.2.1	Vandstand	8
3.2.2	Bølgehøjder	9
3.2.3	Bølgeperioder	10
3.2.4	Bølgeretninger	10
3.3	Kystparallel transport af udlagt materiale	13
4	Referencer	16

Rambøll
 Prinsensgade 11
 DK-9000 Aalborg

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

1 Indledning

Energinet Eltransmission A/S har fire højspændingssøkabler benævnt Skagerrak 1-4, som alle går i land på Ellidsbøl Strand øst for Bulbjerg i Jammerbugt. Kablerne udgør en direkte forbindelse imellem det danske og det norske elmarked, og er en brik i den grønne omstilling og opretholdelse af forsyningssikkerhed. Kablerne er et vigtigt element i det europæiske elmarked, og et nedbrud kan have konsekvenser for hele markedet.

Stranden ved Bulbjerg er meget dynamisk, og især i forbindelse med efterårs- og vinterstorme oplever Energinet, at kablerne bliver fritlagt på stranden. Hver gang kablerne er fritlagt er der en øget risiko for, at der opstår personfarlige situationer, og samtidig er de fritlagte kabler mere sårbare og har øget risiko for brud.

Nærværende notat omhandler vurdering af kystbeskyttelsesalternativer, samt estimering af materialetransport for valgte kystbeskyttelses løsninger, og dette anvendes som grundlag for udarbejdelse af screeningsansøgning. Notatet er udarbejdet som en del af projektet Vurdering af Kyst- og Miljøforhold ved Sikring af Skagerrak 1-4, som udføres for Energinet Eltransmission A/S. Projektet bygger på tidligere projekt Mitigerende tiltag for Skagerrak kabler ved Ellidsbøl Strand” udarbejdet april 2025 af Rambøll [1].

Aktuelle projekt involverer udarbejdelse af materiale til screeningsansøgning for kystsikringsanlæg, herunder vurdering jf. Vandrammedirektivet og havstrategi og vurdering af alternative kystbeskyttelsesløsninger, mv., samt bistand i sagsbehandlingsprocessen med KDI. Projektet indsendes som en screeningsansøgning, jf. Miljøvurderingslovens Bilag 2.

2 Vurdering af de forskellige kystbeskyttelsestiltag

Det skal indledningsvist understreges, at det pga. beskaffenheden af kablerne SK 1 og 2 ikke ses som en mulighed at løse problematikken ved at grave disse dybere ned, da disse har en konstruktion, som gør at flytning med stor sandsynlighed vil resultere i beskadigelse. En yderligere nedgravning af alle fire kabler vil desuden medføre betydeligt gravearbejde i den fredede klit, idet nedbringning af kablerne til en lavere kote må ske gradvist, og således ikke kun kan ske på selve strandarealet.

SK 1 og 2 har en teknisk levetid, der formelt udløber i 2026, men det er Energinets intention, om muligt, fortsat at bruge disse i mindst de næste 10 år, hvorfor beskyttelsen af kablerne ønskes gjort på en måde der minimerer risikoen for skader på kablerne mest muligt.

Som det fremgår af de indledende undersøgelser i [1] (figur 9) er kyststrækningen meget dynamisk, hvor der historisk har været perioder med kraftig opbygning af stranden, og andre perioder med erosion. Undersøgelserne viser, at kystlinjen pt. er trukket tilbage til et niveau, som også er set i tilbage i 1990’erne og i starten af 1970’erne. I perioderne imellem disse og nu har sandbølger passeret fra vest mod øst, hvilket har betydet at kystlinjen set fra projektets placering, søværts, har bevæget sig ud og ind med 100-150 m med 25-30 års mellemrum. Det er således muligt, at en sådan søværts bevægelse kan udvikle sig igen, uden det dog er muligt at sige, om det vil ske. Det vurderes derfor, at være nødvendigt at lave tiltag til sikring mod blotlægning af kablerne pga. erosion, som ikke involverer yderligere nedgravning af disse.

Dette forudsætter, at der søges om tilladelse til at etablere en sådan lokal kystsikring, samt at denne vedligeholdes, for at sikre kablerne over de kommende 10 år mod blotlægning.

I [1] er der listet 4 forskellige tiltag (illustreret i **Figur 1**):

1. Ca. 80 m lang hofde (stenkastning med filter/kerne og armeringslag), samt ca. 1250 m³ sandopfyldning (udlagt i 1 m's højde i en trekant på den vestlige side af hofden, startende i hjørne mod klit, og 50 m ud langs hofde, og 50 m langs klitter, mod vest). Med tiden forventes denne sandmængde at blive spredt og udjævnet i området skitseret herunder, med en gennemsnitlig tykkelse på ca. 0,5 m. Dette er dog ikke baseret på detaljerede analyser, og vælges denne løsning må blandt andet vedligeholdelsesbehov analyseres nærmere.
2. Ca. 140 m tildækning af kabler med sten (filter/kerne og armeringslag, længde baseret på kablernes tracé) individuelt udlagt oven på de fire kabler i området imellem eksisterende sandklit og en linje ca. 25 m parallelt hermed, søværts. Herudover en sandopfyldning på ca. 750 m³, i 0,5 m tykkelse i området imellem de udlagte sten, af hensyn til at sikre en grad af robusthed mod erosion i området. Det er forventningen, at de udlagte sten vil hjælpe med lokalt at holde på sandet.
3. Sandpude med ca. 130 m stenkastning (filter/kerne og armeringslag) omkring. Sandpuden strækker sig fra vest for SK4 til øst for SK3 og breder sig 25 m fra klitlinjen, søværts. Sandpuden består af ca. 2000 m³ sandopfyldning svarende til 1 m's tykkelse. Opfyldningens øverste lag kan med fordel udføres med grovere materiale for at undgå sandflugt.
4. (Alternativ 4 også kaldet 3B i [1]) En terrænhævning på omkring 1 m foreslås, med en udstrækning nogenlunde som i løsning 3, Pudens udlægges med en skråningshældning på 1:10 mod øst, nord og vest, og afsluttes op mod klitten mod syd. Afgrænsningen mod øst og vest udføres med en stump vinkel, så sedimentaflejring og erosion ved terrænhævningen mindskes mest muligt, da der ellers kan dannes læside erosion/scour omkring strukturen. Pudens foreslås udført af ral/sten, så den vil fremstå i harmoni med den omgivende strand nær klitrækken. Der vil ved denne løsning være behov for tilførsel af ca. 2.000 m³ ral/sten.

Alternativ 1 – Høfde



Alternativ 2 – Tildækning af kabler med sten



Alternativ 3 – Sandpude og stenkastning



Alternativ 4 – Ralpude



Figur 1. De 4 forskellige tiltag, som præsenteret i [1].

I det følgende kommenteres på de enkelte alternativer i forhold til kystens udvikling, samt samfundsøkonomiske hensyn.

2.1 Hydrauliske forhold i området

De hydrauliske forhold i området er domineret af bølger fra en vestlig retning, med efterårs- og vinterstorm, som resulterer i offshore signifikante bølgehøjder på 4.0-5.5 m og middelperioder på 8.0-10.5 s. Strømningsmønsteret er generelt kystparallel i en østgående retning. Der er et behersket tidevand (forskellen mellem middelhøjvande og middellavvande i Hanstholm Havn er ifølge [2] 0,3 m), men vindstuvning mv. betyder at ekstreme vandstand på over +1.5 m forventes at kunne optræde (baseret på en antagelse af sammenlignelige forhold mellem projektlokalitet og Hanstholm Havn).

Nærmere detaljer er i øvrigt givet i 3.2.

2.2 Kystens naturlige dynamik og frie udvikling

Herunder vurderes om løsningen påvirker sedimenttransport, erosion/akkumulation, strandprofil m.m.

2.2.1 Løsning 1 – Høfde:

Denne løsning vil have kraftig indvirkning på specielt den kystparallelle sedimenttransport i området. Høfden vil forårsage akkumulation af materiale på luvsiden (vest), hvilket netop er den virkning, der er tiltænkt for beskyttelse af kablerne. Dette vil så samtidig betyde, at det akkumulerede sediment vil

mangle på læsiden (øst), og erosion og forstyrrelser af strandprofiler længere nedstrøms, må forventes. Erosionen kan med tiden medføre at klitten også kan blive truet på denne side af hofden.

2.2.2 Løsning 2 – Tildækning af kabler med sten:

Denne løsning vurderes også at have en vis indvirkning på den kystparallelle sedimenttransport i området, dog i mindre grad end løsning 1. Der må forventes en vis akkumulering af materiale på luvsiden af den vestligste stenkastning, og tilsvarende forventes erosion på læsiden af den østligste kabelbeskyttelse, da konstruktionen i nogen udstrækning vil have funktion som en række små høfder. Dette kan med tiden medføre at klitten også kan blive truet på den østlige side af strukturen, om end risikoen for dette her er mindre end for løsning 1. Denne løsning vil også fremstå opragende i landskabet.

2.2.3 Løsning 3 – Sandpude og stenkastning:

Denne løsning vil også have en vis indvirkning på specielt den kystparallelle sedimenttransport i området, dog i mindre grad end løsning 1, men mere end løsning 2, da stenkastningen er højere. Der må forventes en vis akkumulering af materiale på luvsiden af den vestligste stenkastning, og tilsvarende må der forventes erosion på læsiden, i lighed med hvad man ser i forbindelse med andre hårde strukturer i områder med markant kystparallel sedimenttransport i en dominerende retning. Dette kan med tiden medføre at klitten også kan blive truet på den østlige side af udlægningen, om end risikoen for dette her er mindre end for løsning 1, men større end løsning 2.

2.2.4 Løsning 4 – Ralpude:

Denne løsning vurderes at have væsentlig mindre indvirkning på den kystparallelle sedimenttransport i området end nogen af de andre skitserede løsninger, af de grunde der allerede er nævnt i beskrivelsen ovenfor. Som nævnt etableres skråningen med en hældning på ca. 1:10 ved indbygning af materialet. Det forventes at der vil ske en indledningsvis udjævning af skråningen ved bølgenes omfordeling af materiale. Det forventes at en langtidssituation kan indfinde sig med en hældning på ca. 1:40 (lidt stejlere end havbundens hældning på 1:50-100, umiddelbart ud for ralpuden). I en sådan situation forventes puden stadig at have en tykkelse på ca. 1 m inde ved klitten, ca. 0,5 m ved kanten af udlægningen, og så strække sig yderligere 20-30 m søværts. Denne udjævning vil også betyde en stor grad af integration af materialet, uden markante overgange mellem indbygget materiale og den eksisterende strand, hvorved luvside akkumulering og læside erosion forventes at være yderst begrænset.



Figur 2. Løsning 4 – Ralpude. Principsnit i udlagt ralpude på strand over kabler. Stiplet linie indikerer forventet udjævning af ralpuden i langtidssituationen.

Den udlagte ralfraktion vil være mere modstandsdygtig overfor erosion end stranden i øvrigt (større sten/partikelstørrelser er ensbetydende med mindre erosion), hvilket vil betyde at raludlægningen kan forventes lokalt at "holde" på stranden hvor materialet lægges ud. Dette betyder dermed også, at hvis kystlinjen i øvrigt bevæger sig landværts (på grund af generel erosion i området), vil det udlagte materiale komme til at stikke ud fra kystlinjen. Dette er for så vidt den tilsigtede virkning med tiltaget. Effekten af ralpuden vurderes dog overordnet set at være mindre indgribende end de statisk stabile alternativer, da raludlægningen kan omfordeles og transporteres langs kysten (eroderer), så det ikke optræder som et lige så markant fremmedelement i kysten som de øvrige alternativer. Vedligehold af raludlægningen med nyt tilført materiale, er derfor påkrævet for at sikre vedvarende tildækning af kablerne.

2.3 Samfundsøkonomiske hensyn

Herunder vurderes forholdet mellem omkostninger og nytte, herunder beskyttelseseffekt, drift/vedligehold og alternativer.

Overordnet skal effekter af, og omkostninger til, valgte løsninger ses i relation til flg. udsagn fra Energinet Eltransmission A/S:

"Pga. kablernes store kapacitet er både planlagte og akutte nedlukninger af strømmen forbundet med store samfundsmæssige omkostninger og kan medføre ustabilitet i elnettet. På dagsbasis løber den tabte samfundsøkonomiske værdi op i over én million kroner."

I relation hertil vil udgifterne til de opstillede alternativer være yderst begrænsede, idet de alle vurderes at være i størrelsesordenen af encifrede millionbeløb. Dog er løsning 1 og 2 ikke forsøgt prissat, men vurderes begge at være dyrere end løsning 3 og 4. Anlægsudgifterne til løsning 3 og 4 er i [1] estimeret til hhv. 1,6 og 1,1 mio. DKK. Således vurderes løsning 4 at være den foretrukne løsning, også fra et samfundsøkonomisk synspunkt.

I de videre overvejelser i dette notat, arbejdes der derfor videre med løsning 4, da det overordnet vurderes at være den mest fordelagtige løsning.

3 Estimering af sedimenttransport for løsning

Af hensyn til vurdering af det foreslåede beskyttelsestiltags levetid og vedligeholdelsesbehov, er der foretaget en analyse af dens kystparallelle transport af det udlagte materiale.

I [1] er der for løsning 4 foreslået udlagt ral/sten i størrelse 32-120 mm, og materialet udlægges på stranden, dvs. fra kote 0 og op mod klitten, i en tykkelse på 1 m. Dette betyder at materialet kun vil være påvirket af bølger i væsentlig grad, når der optræder forhøjede vandstande (forskellen mellem middelhøjvande og middellavvande i Hanstholm er ifølge [2] 0,3 m). Dette medfører også, at størrelsen af bølgerne, som kan bidrage til transport af det udlagte materiale, vil være begrænset af vanddybden d på stedet, hvilket således vil være lig den aktuelle vandstand.

3.1 Beskrivelse af fremgangsmåde for bølgeanalyse og sedimenttransportberegninger

3.1.1 Estimering af bølgeforhold på lokationen

Der er indhentet vandstandsdata fra Hanstholm Havn [3], samt offshore bølgedata fra [4] i nærmest tilgængelige punkt, hvorfra følgende parametre er hentet for perioden 1980 til 2024:

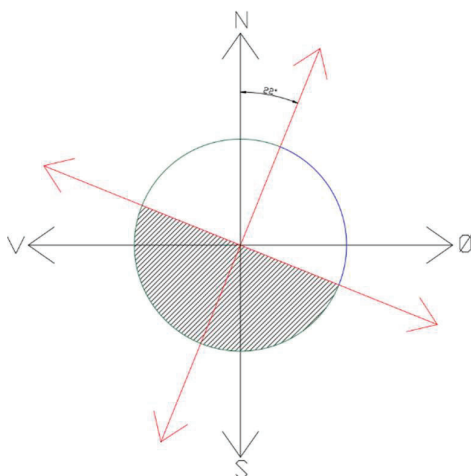
- Signifikant bølgehøjde H_{m0}
- Middelbølgeperiode T_{m02}
- Middelbølgeretning Θ

Det skal bemærkes, at vandstandsdata fra Hanstholm Havn ikke nødvendigvis er helt retvisende for forholdende på projektlokaliteten, idet denne er beliggende 28 km øst for Hanstholm Havn, og er en åben kyststrækning orienteret mod nord, mens Hanstholm Havn er mere eksponeret for vestlige (dominerende) vindretninger, og er en lukket havn med et eget vandstandssystem. Det vurderes derfor at antagelsen om vandstandsforhold lig Hanstholm Havn, vil være konservativ. Dette er også bekræftet

ved sammenligning med vandstandsdata fra [4], som udviser væsentlig lavere variation en data fra Hanstholm Havn. Dette kan dog til dels tilskrives, at Copernicus model data ikke inkluderer near shore effekter så som vindstuvning.

For at få et realistisk estimat af den lokale bølgeretning ved den udlagte ral/sten-pude, er de offshore-bestemte bølgeretninger modificeret på følgende vis:

- Retninger (givet som "kommer fra", nord som nulpunkt) er transformeret så 0° svarer til vinkelret på kysten (kystlinjens ortogonal er fastlagt til $+22^\circ$ i forhold til nord, illustreret i Figur 3, fra sort til rødt system), samt ændret til $\pm 180^\circ$.
- Offshore bølgeretninger, der er numerisk større end 90° (det vil sige bevæger sig i en retning væk fra kysten, det skraverede område i illustrationen i Figur 3) ændres til 90° (fortegn bevares), svarende til at alle bølger, som har en komponent kommende fra kysten, ændres så den har en retning parallel hermed.
- Baseret på et simplificeret kystprofil, aktuelle vanddybder og bølgelængder, svarende til den lokale T_{m02} , indskrives bølgenes retninger til lokaliteten, herefter kaldet θ_b , ved hjælp af ækvivalenten til Snell's lov ($\frac{\sin \theta}{C} = \frac{\sin \theta_0}{C_0}$, hvor C er bølgehastighed og "0" indikerer offshore værdier), som angivet i [5] eq. II-3-9.



Figur 3. Illustration af modifikation af bølgeretning.

Idet der sædvanligvis er stor korrelation imellem bølger og vandstand (forhøjet vandstand optræder typisk i stormssituationer), vurderes det at langt de fleste bølger vil bryde inden eller på lokaliteten. Således kan den lokale signifikante bølgehøjde for irregulære bølger, med rimelighed forventes at være minimum af hhv. H_{m0} og $0,6 \cdot d$, i henhold til [6] eq. II-4-10 (gældende for brydningszonen hvor stort set alle bølger bryder). Denne lokale bølgehøjde betegnes i det følgende H_{sb} .

Da den forventede levetid for udlægningen er relativt begrænset (forventeligt maksimalt 10 år), er effekter af klimarelaterede havspejlsstigninger ikke medtaget.

3.1.2 Estimering af kystparallel transport af udlagt materiale

Den kystparallelle sedimenttransport Q_{ls} [m^3/s] bestemmes ved brug af flg. udtryk fra [7], der er udviklet på baggrund af et numerisk simuleringsværktøj kalibreret til feltmålinger:

$$Q_{ls} = 1,34 \cdot \frac{1+e}{\rho_s - \rho_w} \cdot H_{sb}^{2,49} \cdot T_z^{1,29} \cdot \tan(\beta)^{0,88} \cdot D_{50}^{-0,62} \cdot \sin(2 \cdot \theta_b)^{1,81}$$

hvor

- e er poretallet.
- ρ_s er densiteten af materialet (her sat til 2650 kg/m^3).
- ρ_w er densiteten af havvand (her sat til 1025 kg/m^3).
- H_{sb} er den lokale signifikante bølgehøjde (efter brydningskriterie).
- T_z er den lokale middelbølgeperiode (her sat lig T_{m02}).
- $\tan \beta$ er skråningshældningen (her sat til 1:40).
- D_{50} er median-kornstørrelsen.
- θ_b er den lokale bølgeretning ifht. kysten (0° defineret som vinkelret på kysten)

Herudfra beregnes tidsserier for Q_{ls} for variationer af e , og D_{50} , og årlig summer af transporteret materiale, og variationen heraf.

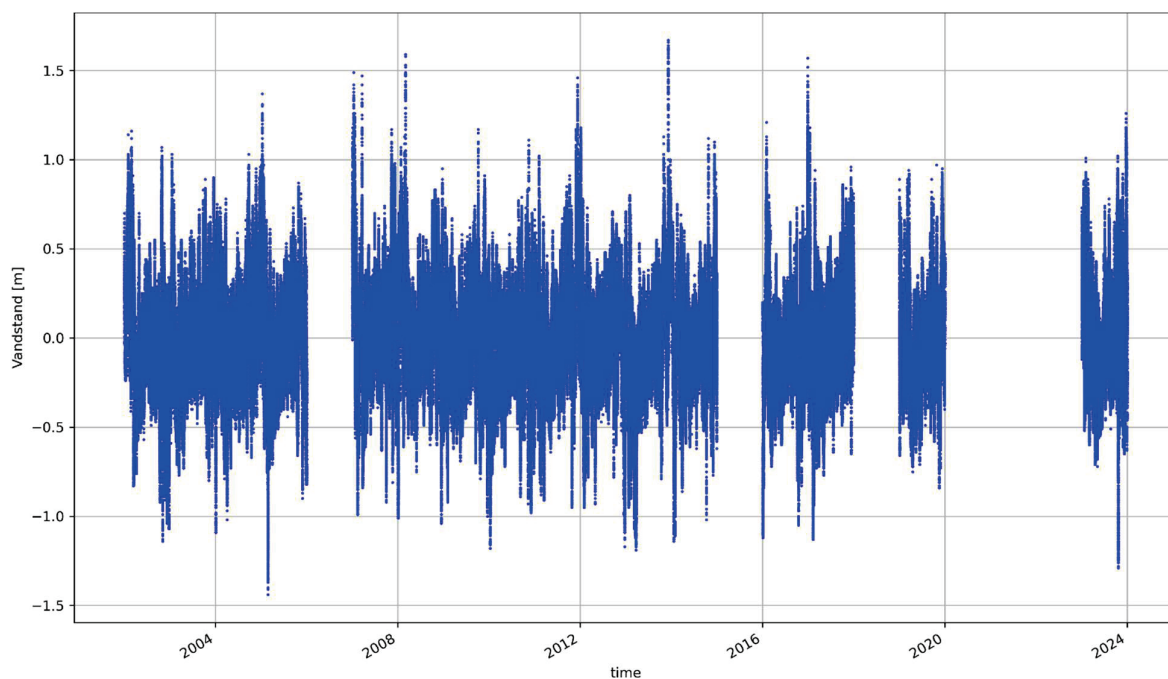
Poretallet e kendes ikke på forhånd, og må forventes at udvikle sig med tiden, idet materialet vil sætte sig, og vil blive infiltreret med finere materiale fra stranden. Der er derfor kørt analyser med forskellige poretal for at vurdere følsomheden heraf. Det forventes at poretallet vil falde over tid grundet naturlig kompaktering fra bølgepåvirkningen og et mindre poretal vil samlet set reducere transporten.

I det indledende notat [1] er materialet foreslået til at være med kornstørrelse 32-120 mm. Der antages en jævn gradering, således D_{50} er omkring 76 mm. For at undersøge følsomheden af denne parameter der er også lavet kørsler med et antal andre værdier. Ydermere er dette den primære parameter, der kan anvendes til regulering af den materiale-mængde der forventes flyttes på årsbasis.

3.2 Forhold på lokaliteten

3.2.1 Vandstand

Vandstandsdata fra DMI for målestationen i Hanstholm Havn [3] indeholdt en del fejlmålinger. Datasættet er rensat med Rambølls in-house-datarensningssprocedure, som håndterer outliers, manglende tidssteps, duplikerede tidssteps, stagnerende forløb og pludselige/bratte skift. Der er ikke foretaget efterfølgende interpolation for at udfylde huller. For at undgå at indbygge bias pga. årstidsvariation, er det valgt at ekskludere data fra år hvor data-rensningssproceduren frasorterede mere end 2 % dette års data. Den resulterende vandstandstidsserie er vist i Figur 4.



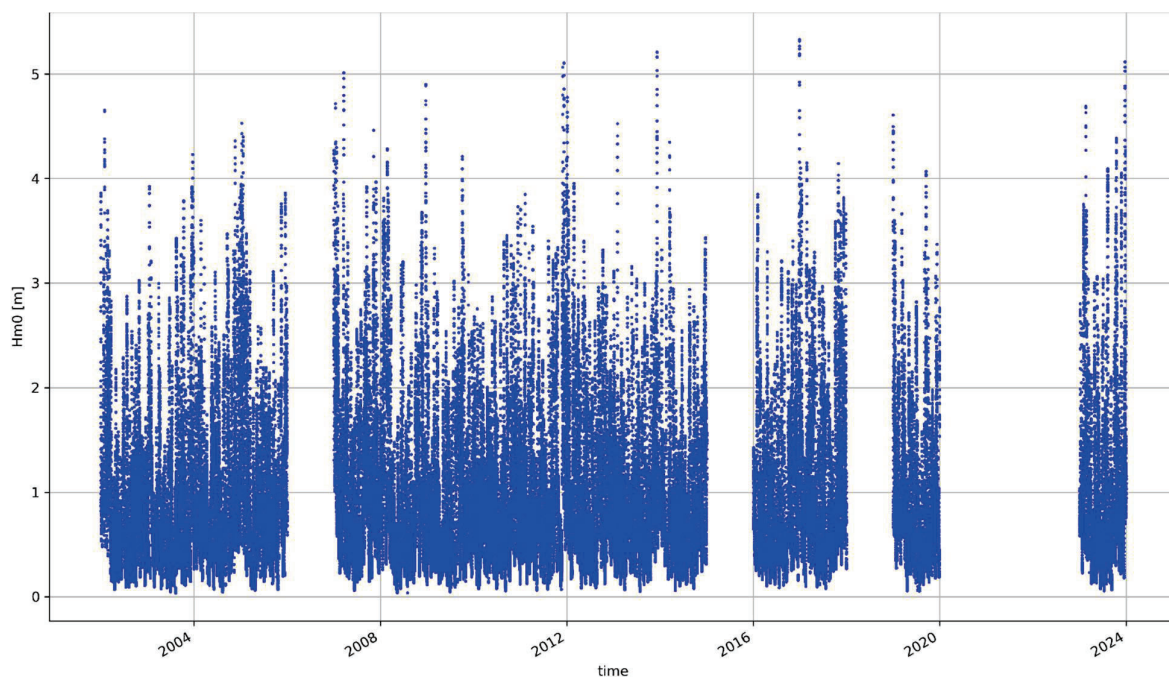
Figur 4. Vandstandstidsserie fra Hanstholm Havn, efter ekskludering af år med over 2 % datafejl.

I de følgende udtræk af parametre for beskrivelse af bølgeforhold, er også kun medtaget de perioder (år) hvor der er valide vandstandsdata tilgængelige (som vist i Figur 4).

3.2.2 Bølgehøjder

Offshore spektrale signifikante bølgehøjde H_{m0} fra [4] for samme år som for vandstande er vist i Figur 5.

Den lokale bølgehøjde ved lokaliteten, bestemt som beskrevet i 3.1.1, for brydningskriteriet $0,6 \cdot d$ er vist i Figur 6.



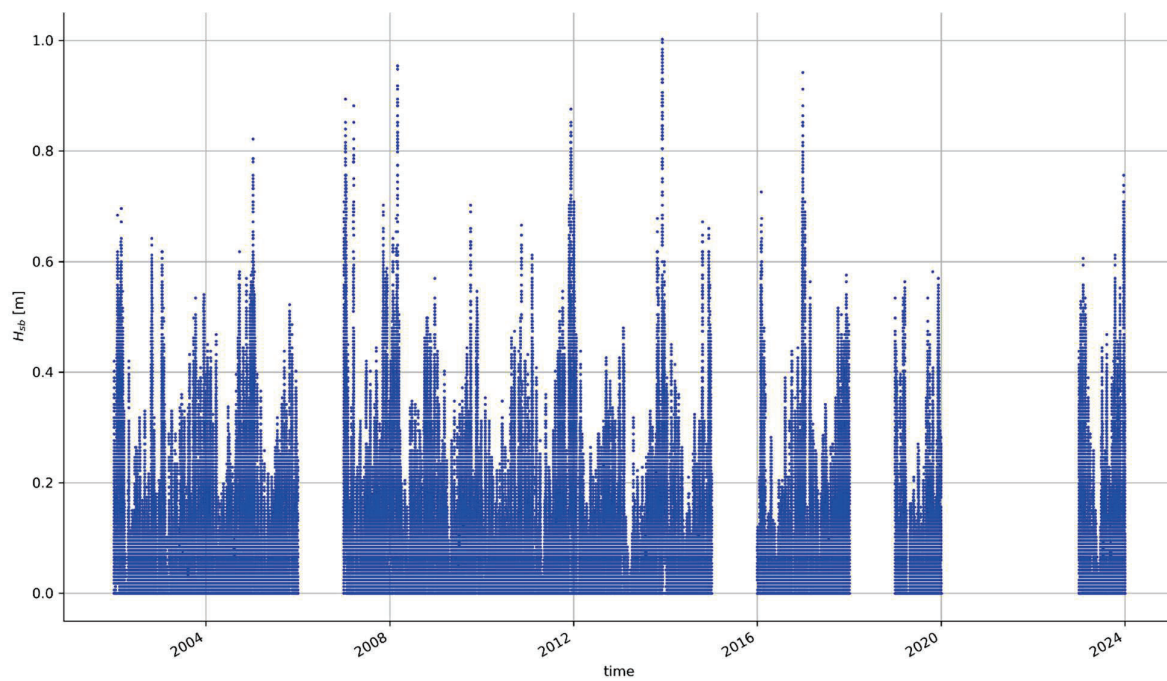
Figur 5. Offshore signifikant bølgehøjde H_{m0} .

3.2.3 Bølgeperioder

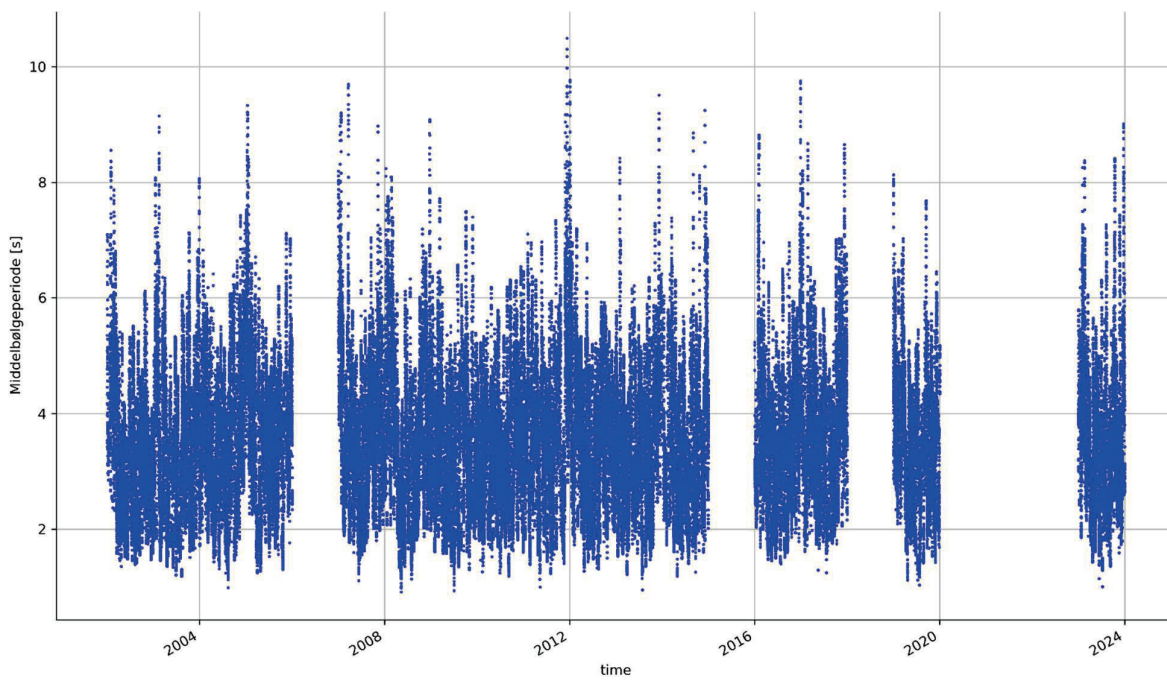
Offshore middelbølgeperioden T_{02} , vist i Figur 7, anvendes fremadrettet også ved lokaliteten. Denne tilgang vil være konservativ, eftersom bølgebrydning under transformationen reducerer bølgeperioden, og en kortere bølgeperiode medfører mindre materialetransport.

3.2.4 Bølgeretninger

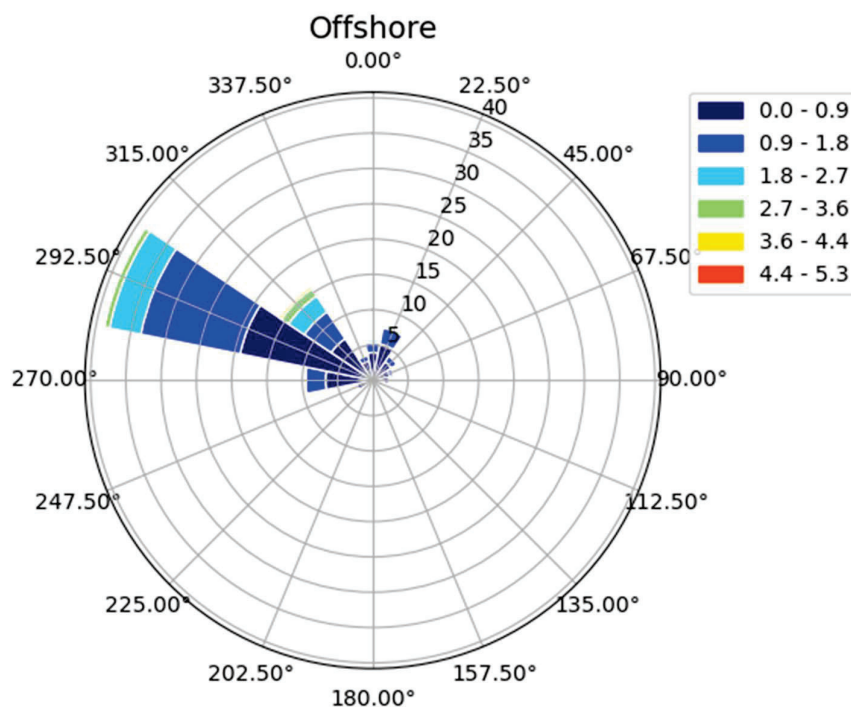
Offshore middelbølgeretninger givet i form af bølgerose for anvendte data, er vist i Figur 8. Disse er transformeret iht. ovennævnte procedure (3.1.1), hvorved middelbølgeretninger ved lokaliteten er opnået, se tilsvarende bølgerose i Figur 9.



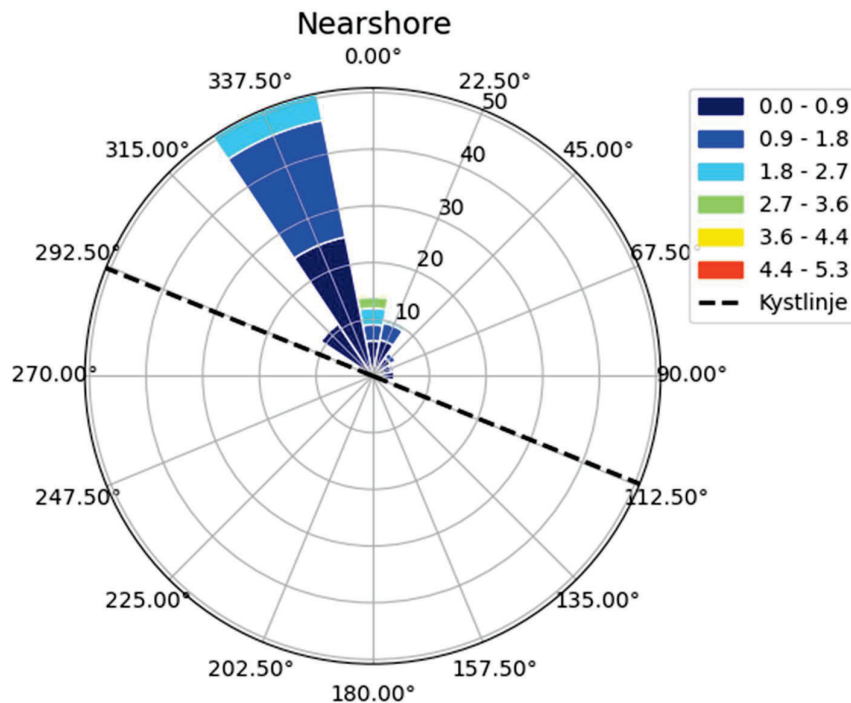
Figur 6. Lokal H_{sb} bestemt ved brydningskriterie $0,6 \cdot d$.



Figur 7. Offshore $Tm02$ som også anvendes som middelbølgeperiode ved lokaliteten.



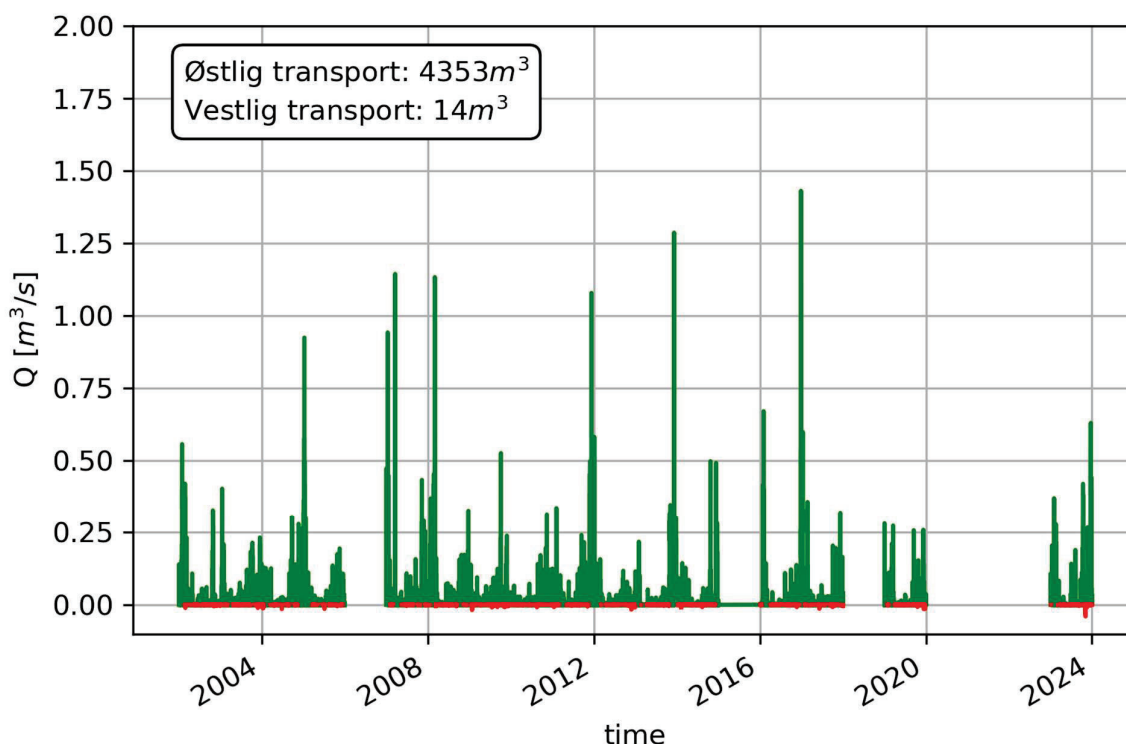
Figur 8. Offshore bølgerose, baseret på [4].



Figur 9. Bølgerose efter transformation fra offshore til projektløkalitet. Kystens orientering er markeret på bølgerosen med en stiple linje. Normalen til kysten peger i retning +22° relativt til nord.

3.3 Kystparallel transport af udlagt materiale

Tidsserier af materialetransport er beregnet for en række forskellige stenstørrelser, og poretal. I Figur 10 vises en sådan for stenstørrelse $D_{50} = 0.095$ m og poretal $e = 0.6$, for de udvalgte år.

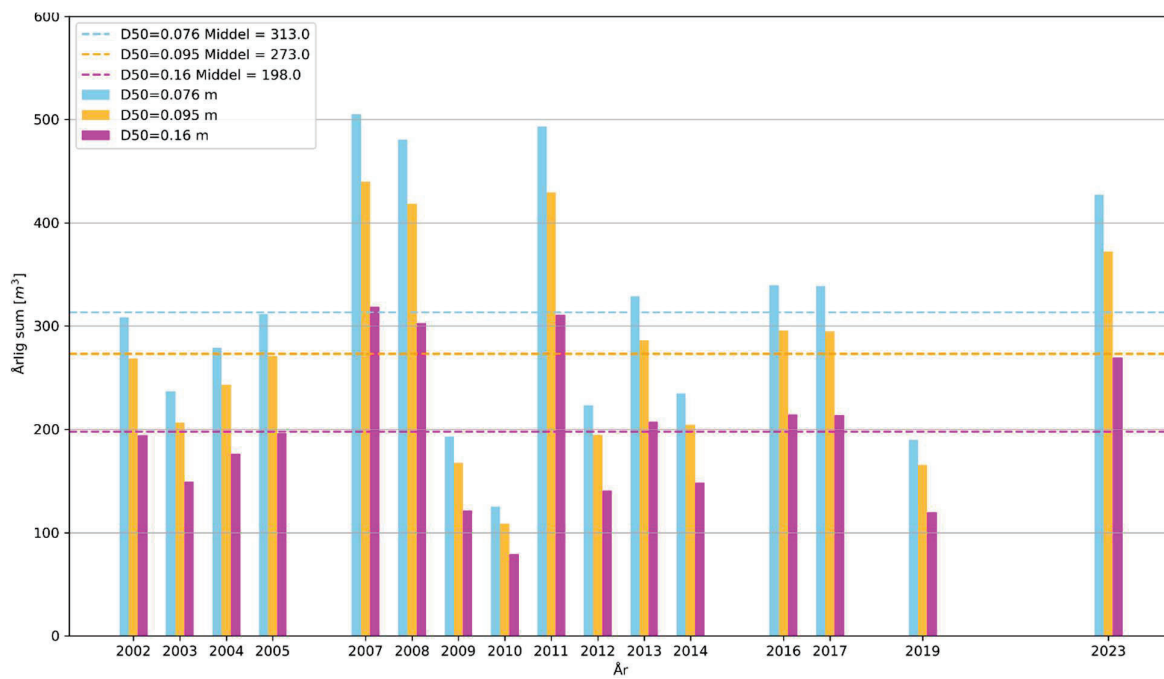


Figur 10. Variation af eroderede mængder, for stenstørrelse $D_{50} = 0.095$ m og poretal $e = 0.6$. Grøn: Gående fra vest mod øst (østlig transport). Rød: Gående fra øst mod vest (vestlig transport).

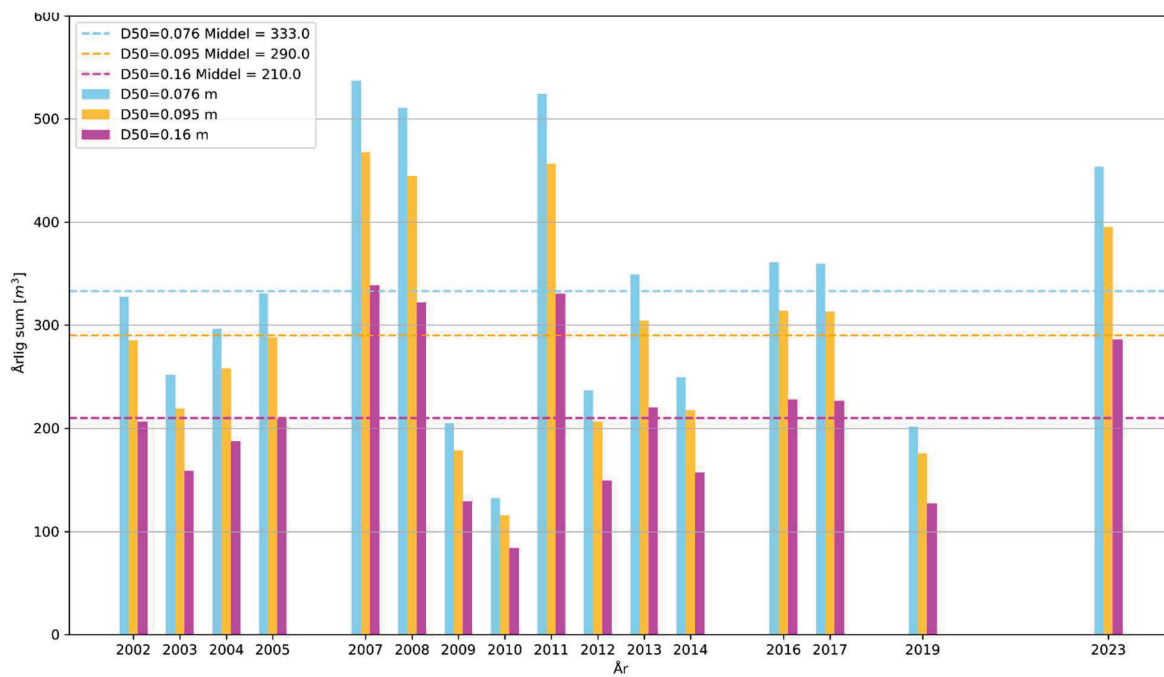
Dette giver et indtryk af den variation der må forventes i materialetransporten, og det fremgår at denne vil være domineret af enkelte markante hændelser, 1-2 gange om året. Det ses desuden, at transporten hovedsageligt sker i østgående retning.

I det følgende er der opgjort årlige summer af de transporterede mængder, og her er summerne baseret på absolutte værdier af transportraterne, da materiale regnes som mistet uanset retning, idet ralpudens bredde er relativt begrænset, og der således kan mistes materiale til begge sider.

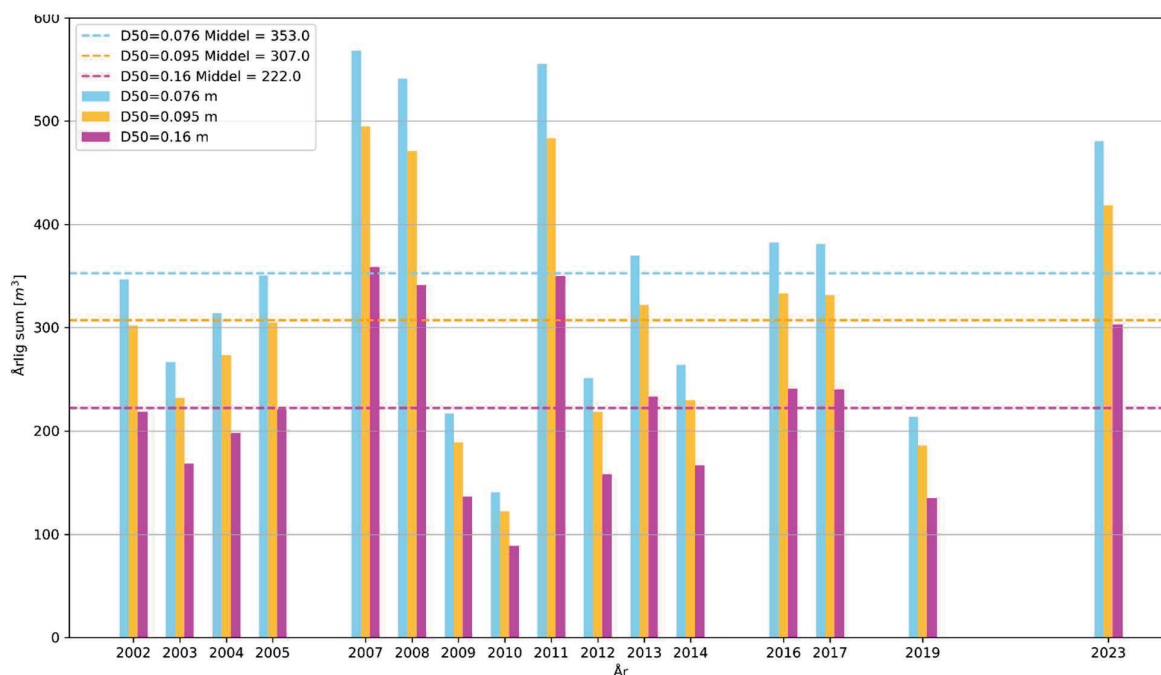
I Figur 11 - Figur 13 vises de årlige transportmængder, som forventes mistet fra den udlagte pude, beregnet de år, hvor data er tilgængelige (samlet 16-årig periode). Der vises resultater for 3 forskellige poretalsværdier, og 3 forskellige stenstørrelser, for hvert poretal.



Figur 11. Forventede eroderede materialemængder på årsbasis, for poretal $e = 0.6$.



Figur 12. Forventede eroderede materialemængder på årsbasis, for poretal $e = 0.7$.



Figur 13. Forventede eroderede materialemængder på årsbasis, for poretal $e = 0.8$.

Poretal $e = 0.8$ vurderes konservativt at repræsentere situationen umiddelbart efter udlægning af puden, mens $e = 0.6$ antages at repræsenterer langtidstilstanden, efter materialet har gennemgået en kompaktering igennem bølgenes påvirkning hen over den første vintersæson. Variationen med poretallet er dog behersket ($\sim 12\%$ større erosion ved $e = 0,8$ ifht. $0,6$).

Beregningerne er gennemført for flg. stenstørrelser:

- $D_{50} = 76$ mm (svarende til midt af specificerede stenstørrelsesfraktion, i den indledende undersøgelse, 32-120 mm).
- $D_{50} = 95$ mm (svarende til midt af stenstørrelsesfraktion som vurderes nemt tilgængelig i form af søsten, 40-150 mm).
- $D_{50} = 160$ mm (svarende til midt af stenstørrelsesfraktion 120-200 mm, her valgt for at belyse udsathed).

Med udgangspunkt i langtidstilstanden, samt de årlige middelværdier af mistede mængder, opnås en ca. 13 % reduktion i den mistede mængde ved at gå fra $D_{50} = 76$ mm til 95 mm, og 37 % til 160 mm.

Idet fraktionen 40-150 mm ser ud til at være umiddelbart tilgængelig fra lokal leverandør, og det stadig er i en størrelse som umiddelbart vil kunne blande sig godt ind i de fraktioner der allerede er til stede på stranden, vurderes denne umiddelbart at være det foretrukne valg. Med denne stenstørrelse forventes der i gennemsnit et årligt materialetab på $273 \text{ m}^3/\text{år}$ (i langtidssituationen). Tabet kan dog vise sig at være større grundet randeffekter hvor det udlagte materiale udjævnes til de omkringliggende strækninger hvor der ikke udlægges ralmateriale. På den måde vil det lokalt udlagte ral forsvinde hurtigere end den bagvedliggende erosion tilsiger. Dette kan evt. imødekommes af en større initial udlægning af materiale.

Med tanke på at den udlagte stenmængde udgør ca. 2.000 m³, er det tydeligt at en vis vedligeholdelse af puden må påregnes. Det foreslås at planlægge vedligeholdelseskampagner hver 3. år efter opbygning, hvor der suppleres op en til pudehøjde på 1 m. Der forventes at være et materiale behov på 500-1000 m³ for at opnå dette. Da der kan forekomme væsentlige sæsonmæssige og årlige variationer i kystens udvikling, bør vedligeholdelsesindsatsen justeres løbende på baggrund af opmåling og monitorering af den lokale udlægning. En væsentlig del af materialetabet vil i øvrigt ske i forbindelse med enkeltstående stormhændelser, som forventes at kunne fjerne op mod 400-500 m³. Det anbefales derfor at den udlagte ralpude inspiceres, og eventuelt vedligeholdes, umiddelbart efter sådanne hændelser.

4 Referencer

- [1] Rambøll, »Teknisk notat: Forslag til mitigerende tiltag for Skagerrak kabler ved Ellidsbøl Strand. For Energinet Eltransmission A/S,« Rambøll, Aalborg, 2025.
- [2] D. D. Havnelods, »Den Danske Havnelods - Hanstholm,« [Online]. Available: <https://www.danskehavnelods.dk/#HID=b7668f81-5ee4-4330-b665-0fb8aef87415>. [Senest hentet eller vist den 08 12 2025].
- [3] DMI, »Vandstandsmåling,« September 2025. [Online]. Available: <https://www.dmi.dk/dmis-vejrprodukter/om-vandstand>.
- [4] Copernicus, »Copernicus Marine Data Store,« September 2025. [Online]. Available: https://data.marine.copernicus.eu/product/BALTICSEA_MULTIYEAR_WAV_003_015/description.
- [5] Coastal Engineering Manual, »Part II Chap. 3 ESTIMATION OF NEARSHORE WAVES,« US Army Corps of Engineers, 2002.
- [6] Coastal Engineering Manual, »Part II Chap. 4 SURF ZONE HYDRODYNAMICS,« US Army Corps of Engineers, 2003.
- [7] E. Van Wallen, A. J. Chadwick og T. Mason, »A review and assessment of longshore sediment transport equations for coarse-grained beaches,« *Coastal Engineering*, pp. 243-275, 2000.