

Til  
**Hirtshals Havn**

Dokumenttype  
**Rapport**

Dato:  
**Januar 2024**

# **HIRTSHALS HAVN – UDVIDELSE MOD NORD INDVIRKNING PÅ KYSTUDVIKLING**



# **HIRTSHALS HAVN INDVIRKNING PÅ KYSTUDVIKLING**

Projektnavn **Hirtshals Havn – Udvidelse mod nord**  
Projektnr. **1100047990**  
Modtager **Hirtshals Havn**  
Dokumenttype **Rapport**  
Version **3.0**  
Dato **Januar 2024**  
Udarbejdet af **JQHN**  
Kontrolleret af **JAK**  
Godkendt at **PBF**

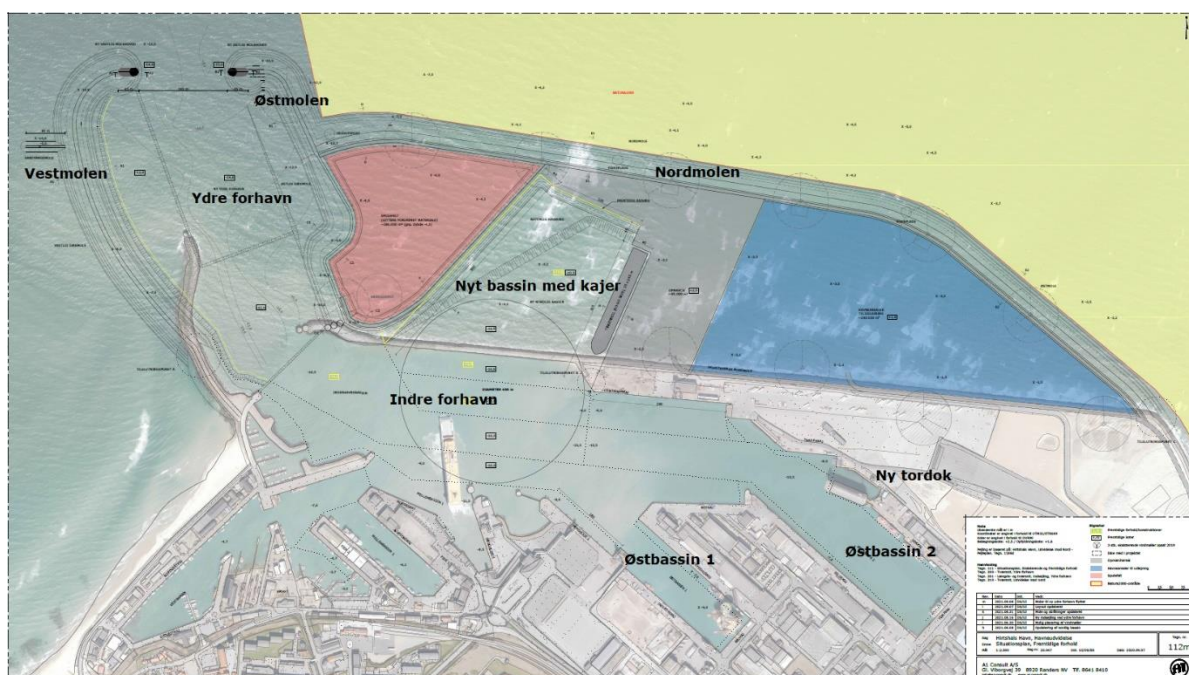
## INDHOLD

<b>1.</b>	<b>Indledning og metode</b>	<b>2</b>
1.1	Indhold i nærværende rapport	3
<b>2.</b>	<b>Opsummering af væsentlige konklusioner</b>	<b>4</b>
<b>3.</b>	<b>Bølgeforhold, sedimenttransport og sedimentforhold ved Hirtshals Havn</b>	<b>6</b>
3.1	Bølgeforhold ved Hirtshals Havn	6
3.2	Sedimenttransport og kystmorfologi ved Hirtshals Havn	7
3.2.1	Tværgående sandtransport	8
3.2.2	Langsgående sandtransport	8
3.2.3	Kombineret langsgående- og tværgående sandtransport	8
3.2.4	Akut- og kronisk erosion	8
3.3	Sedimentforhold på strækningen nordøst for Hirtshals havn	9
<b>4.</b>	<b>Sedimentbudget og bypass for nuværende forhold ved Hirtshals havn</b>	<b>12</b>
4.1	Regionalt sedimenttransportbudget for den nordlige del af vestkysten	12
4.2	Lokal sandbypass ved Hirtshals Havn	15
4.2.1	Lokalt sedimentbudget ved Hirtshals Havn baseret på tidligere analyser	16
4.2.2	Lokalt sedimentbudget ved Hirtshals Havn baseret nye analyser i (DHI, 2023)	18
4.3	Opsummering – sedimentbudget for nuværende forhold	19
<b>5.</b>	<b>Naturlig kystdynamik omkring Hirtshals Havn</b>	<b>21</b>
5.1	Beskrivelse af regionale kystforhold ved Hirtshals Havn baseret på Kystatlas	21
5.2	Historisk kystudvikling	22
5.2.1	Historisk kystudvikling – baseret på opsummering af tidligere analyser i området	22
5.2.2	Historisk kystudvikling – baseret på satellitfotos	25
5.3	Indflydelse fra klimaændringer på fremtidig kystudvikling	28
5.4	Opsummering – kystudvikling for nuværende forhold	31
<b>6.</b>	<b>Vurdering af indflydelse fra udvidelse af Hirtshals Havn på sedimentbypass og kystudvikling</b>	<b>34</b>
6.1	Analyse af indvirkning fra fremtidige planlagte havneudvidelse på det naturlige bypass baseret på modelsimulering	34
6.1.1	Potentielle indvirkninger fra havneudvidelse på lokale vanddybder omkring Hirtshals Havn	36
6.2	Analyse af læ-sidevirkning fra fremtidige planlagte havneudvidelse	37
6.3	Opsummering – kystudvikling for fremtidige situation	39
	<b>Referencer</b>	<b>41</b>

## 1. INDLEDNING OG METODE

Hirtshals Havn planlægger en omfattende havneudvidelse der skal sikre forbedrede besejlingsforhold og give yderligere baglandsarealer. Havneudvidelsen medfører bl.a. en øget vanddybde i indsejlingskorridoren samt en forlængelse af den eksisterende Vestmole, og etablering af en ny Østmole. Herudover "flyttes" Nordmolen søværts for at skabe et større baglandsareal. Den planlagte havneudvidelse er skitseret i figur 1-1.

Eksisterende havnelayout ved Hirtshals Havn har en nordværts udstrækning fra kysten på ca. 400 m ved Vestmolen, hvortil det fremtidige planlagte havnelayout vil medføre en yderligere udstrækning på ekstra ca. 600 m.



**Figur 1-1. Illustration af den planlagte havneudvidelse. Gul markering søværts er et Natura2000 område. (A1, 2021)**

Formålet med nærværende rapport er dels at skabe et overblik over den historiske kystudvikling ved Hirtshals Havn, samt at skabe et overblik over de faktorer der har haft en afgørende betydning herfor.

Der foretages indledningsvist en gennemgang af den naturlige kystdynamik samt den historiske udvikling af kysten ved Hirtshals Havn. Gennemgangen baseres på tilgængelig litteratur samt sammenligninger af historiske overflyvningsbilleder/satellitfotos. Herudover beskrives omfanget af naturlige variationer af kysten øst for havnen og herunder eventuelle naturlige kyst-forstejlinger samt revlevandringer- /kystudbugtninger.

Efterfølgende opsummeres konklusioner fra seneste analyser vedr. effekten fra den planlagte havneudvidelse ift. den fremadrettede kystudvikling.

## **1.1 Indhold i nærværende rapport**

Mere specifikt er følgende indeholdt i nærværende rapport:

### Afsnit 2: Opsummering af væsentlige konklusioner

- Indeholder en opsummering af væsentlige konklusioner fra tidligere gennemførte analyser suppleret med en opsummering af konklusioner fra analyser i nærværende rapport.

### Afsnit 3: Bølgeforhold, sedimenttransport og sedimentforhold ved Hirtshals Havn

- Indeholder en beskrivelse af bølge- og sedimenttransportforhold ved Hirtshals Havn. Formålet er at skabe et overblik over de styrende processer for bl.a. bypassforhold samt kystudvikling.

### Afsnit 4: Sedimentbudget og bypass for nuværende forhold ved Hirtshals havn

- Indeholder en beskrivelse af sedimentbudget og bypassforhold ved Hirtshals Havn. Beskrivelsen baseres på konklusioner fra tidligere analyser og danner grundlag for den efterfølgende beskrivelse af den historiske- og fremtidige forventede kystudvikling ved Hirtshals Havn.

### Afsnit 5: Naturlig kystdynamik omkring Hirtshals Havn

- Den historiske kystudvikling ved Hirtshals Havn opsummeres baseret på konklusioner fra tidligere analyser. Hertil suppleres med analyse af kyst tilbage-/fremrykning baseret på satellitfotos.

### Afsnit 6: Vurdering af indflydelse fra udvidelse af Hirtshals Havn på sedimentbypass og kystudvikling

- Med udgangspunkt i viden om de nuværende forhold ift. sedimentbudget og kystudvikling analyseres og vurderes på påvirkningen, som følge af den planlagte havneudvidelse af Hirtshals Havn.

## 2. OPSUMMERING AF VÆSENTLIGE KONKLUSIONER

Der er gennemført en analyse af hhv. den naturlige kystdynamik og den historiske udvikling af kysten ved Hirtshals Havn baseret på tilgængelig litteratur. Efterfølgende er effekten på kystudviklingen nedstrøms (øst for havnen) fra den planlagte havneudvidelse vurderet.

Umiddelbart øst for Hirtshals Havn er kystudviklingen domineret af stor dynamik i form af vekslende tilbage- og fremrykning. Dette skyldes bl.a. at bølgerne (der primært kommer fra vestlig retning) angriber kysten næsten parallelt, hvilket medfører dannelsen af såkaldte kystudbugtninger. Kystudbugtninger har på samme vis som havbølger en bølgelængde samt en vandringshastighed, hvormed der i en periode (en vis årrække) kan opleves mere eller mindre kontinuert tilbagerykning af en kyststrækning, som efterfølgende afløses af en periode med fremrykning.

I fremtiden kan den forventede vandstandsstigning som følge af klimaændringer medføre, at der sker en øget kronisk tilbagerykning af kysten øst for Hirtshals Havn på op til ca. 400 m i år 2120 (forudsat at der ikke etableres en form for kystbeskyttelse). Denne tilbagerykning er at betragte som et tillæg til nuværende kystudvikling.

Tidligere analyser vedr. sedimentbudget omkring Hirtshals Havn har antydnet et stort tab i den kystnære littorale sandtransport ved Hirtshals Havn pga. sedimentation på dybt vand som følge af naturlige processer samt som følge af nyttiggørelse af sedimenter eller klappning af oprensede sandmængder på en offshore klappads. Den tidligere antagelse har derfor været, at sandet der kommer til Hirtshals Havn fra vest er tabt ift. den fortsatte kystnære transport. I kystdirektoratets regionale sandtransportbudget på Vestkysten (Kystdirektoratet, 2000) er det dog nævnt, at der er særlig uvished omkring offshore-processerne samt de detaljerede forhold omkring bl.a. Hirtshals Havn. Med henblik på at opnå mere detaljeret viden omkring de lokale sedimenttransportforhold ved Hirtshals Havn er der således i (DHI, 2023) gennemført nye supplerende analyser baseret på gennemgang af data som kystprofiler og satellitfotos samt modellering.

Tidligere sedimentbudgetter i (DHI, 1994) og (DHI, 2000b) konkluderede, at indflydelsen fra tilstedeværelsen af Hirtshals Havn medfører et samlet tab på ca. 275.000 m<sup>3</sup>/år fra den littorale sandtransport øst for havnen.

Nye analyser fra (DHI, 2023) viser, at det samlede tab på kysten øst for Hirtshals Havn, under eksisterende forhold, er gennemsnitligt ca. 350.000 m<sup>3</sup>/år (under forudsætning af at nuværende nyttiggørelses- og bypass forhold videreføres). Hertil er det vurderet, at den planlagte udvidelse af havnen vil bevirke et yderligere tab på gennemsnitligt ca. 200.000 m<sup>3</sup>/år i en midlertidig periode indtil vanddybderne har indstillet sig omkring den nye havneudvidelse. Dette er såfremt der ikke gennemføres kompenserende foranstaltninger i den midlertidige periode. Ligevægtsforholdene (dvs. bypass) er vurderet genoprettet ca. 30 år efter udvidelsen er gennemført, forudsat at der ikke indvindes/oprenses sand langs den nye vest og/eller nordmole i perioden. Det skal hertil understreges, at der er tale om en skønnet mængde og periode, som er behæftet med usikkerhed.

Tidligere praksis ifm. delvis nyttiggørelse af oprenset sediment i indsejlingen, samt klappning på stor vanddybde, har medført erosion umiddelbart øst for Hirtshals Havn. Hvis denne praksis videreføres til perioden efter etablering af havneudvidelsen, vurderes det, at erosionen vil fortsætte. I overgangsperioden, indtil vanddybden omkring havnen har indstillet sig ift. den nye havneudvidelse, er det vurderet at erosionen øst for havnen vil fordobles sammenlignet med eksisterende situation såfremt bypass-mængderne forbliver uændret sammenlignet med

nuværende praksis. Hertil skal det nævnes, at til trods for at vanddybder har indstillet sig, kan der fortsat forventes en signifikant dynamik. Såfremt der fremover bypasses en større mængde sediment, forventes det at erosionen (grundet tab af sand ifm. oprensningsaktiviteter) øst for Hirtshals havn under både nuværende- og fremtidige situation vil reduceres, eller helt vil ophøre hvis bypass-mængderne modsvarer den manglende sedimentmængde øst for havnen og såfremt det bypassede sand føres ind på kysten umiddelbart øst for havnen. Kysten vil dog stadig være meget dynamisk på strækningen øst for Hirtshals Havn, med periodevise store frem- og tilbagetrækninger samt grundet påvirkningen som følge af den fremtidige vandstandsstigning.

### 3. BØLGEFORHOLD, SEDIMENTTRANSPORT OG SEDIMENTFORHOLD VED HIRTSHALS HAVN

Den Jyske Vestkyst er generelt under konstant forandring, primært grundet de naturlige påvirkninger, hvor især bølgeforholdene har en afgørende betydning. Når bølger rammer kysten, sker der, afhængig af den aktuelle bølgeenergi samt sedimentforhold, en op-hvirvling af sedimenter som efterfølgende føres med strømmen. Lokale kyst-, bund-, strøm- og bølgeforhold har derfor afgørende betydning for den resulterende transport af de op-hvirvlede sedimenter.

I det følgende gives en overordnet beskrivelse af kystmorfologien lokalt ved Hirtshals Havn. Formålet er at give en baggrund for forståelsen af den historiske- og også den forventede fremtidige- overordnede kystudvikling nord for Hirtshals Havn.

Indledningsvist gives en kort beskrivelse af bølgeforhold ved Hirtshals Havn, som er én af de primære drivende processer for sedimenttransporten – og dermed styrende for kystmorfologien.

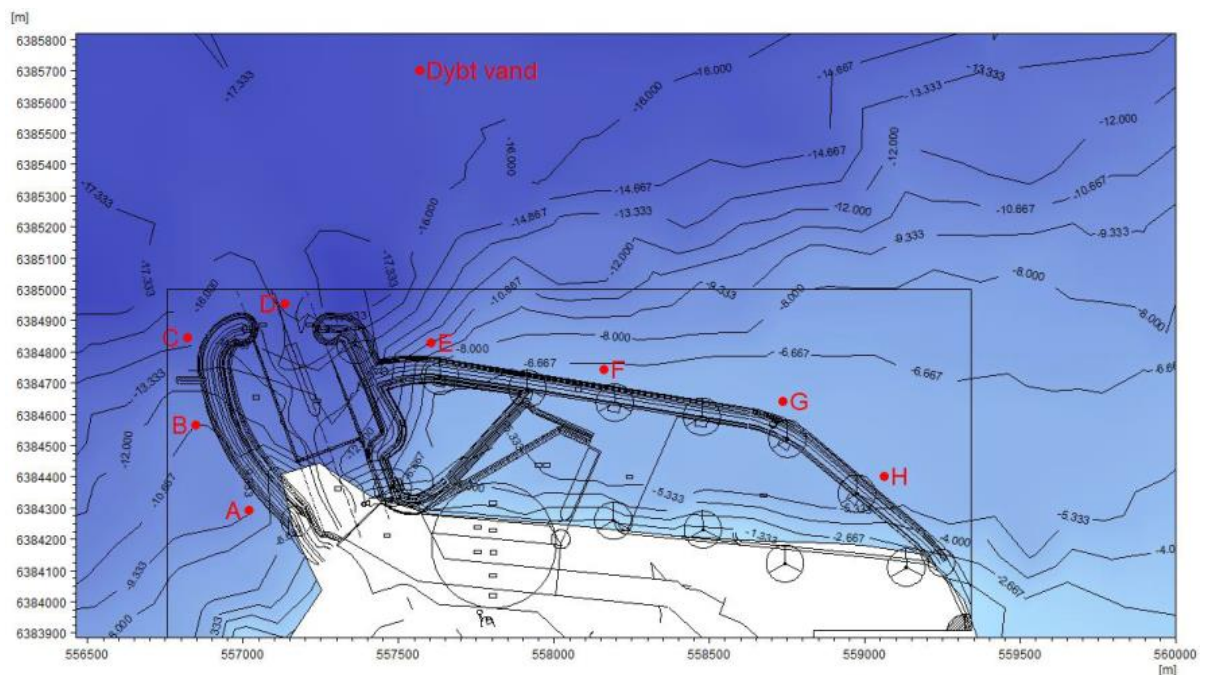
#### 3.1 Bølgeforhold ved Hirtshals Havn

Variation i bølgeforhold langs Vestkysten er analyseret i (DHI, 2000a) baseret på modellering.

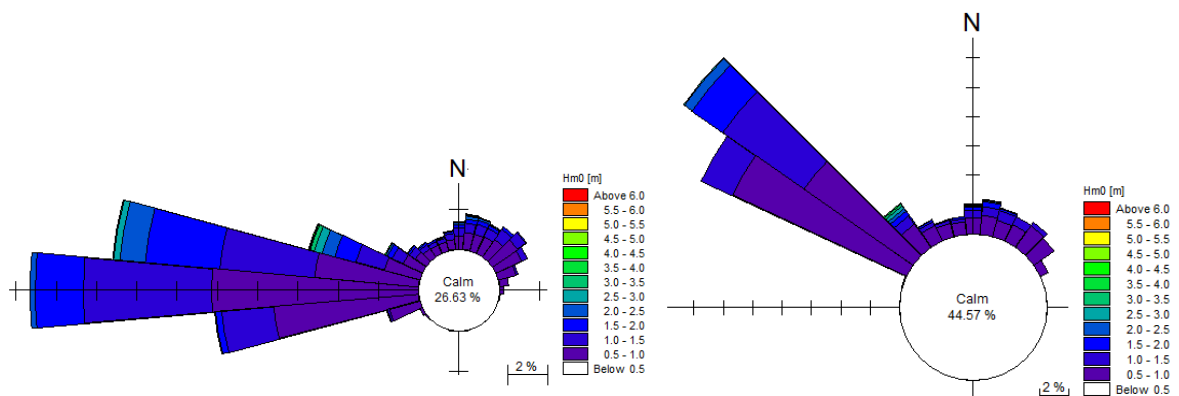
Af analyserne i (DHI, 2000a) fremgår det, at bølgeforholdene langs Vestkysten syd for Hanstholm primært er domineret af bølger fra nordvest, hvorimod den dominerende bølgeretning er fra vest-sydvest på strækningen imellem Hanstholm og Skagen. Denne ændring i dominerende bølgeretning skyldes læ-virkningen fra Norge.

Tilstedeværelsen af Hirtshals Havn medfører, at der lokalt forekommer relativt store forskelle i bølgeforholdene. De lokale forskelle skyldes hovedsageligt bølgediffraktion ved Hirtshals Havns ydermoler samt refraktion pga. dybdekonturer. Dette er bl.a. analyseret i (Rambøll, 2024a), hvor der er gennemført modellering af bølgeforholdene for perioden 1992 – 2020 tæt ved de nye planlagte ydermoler ifm. havneudvidelsen, se udtrækspunkter i figur 3-1. Eksempler på bølgeroser i udtrækspunkterne "Dybt vand" samt "H", jf. figur 3-1, er vist i figur 3-2. Heraf fremgår det, at den dominerende bølgeretning ændres tæt ved Nordmolen vest til nordvest.





Figur 3-1. Udtrækspunkter for statistiske bølgeforhold langs de nye planlagte ydermoler ved Hirtshals Havn. Vanddybder er angivet i DVR90. (Rambøll, 2024a)



Figur 3-2. Bølgeroser i pkt. Dybt vand (venstre) og pkt. H (højre) baseret på hindcast-modellering i perioden 1992 –2020. (Rambøll, 2024a)

Bølge- og vandstandsstatistik ved Hirtshals Havn er mere detaljeret beskrevet i (Rambøll, 2024a).

### 3.2 Sedimenttransport og kystmorfologi ved Hirtshals Havn

Sedimenttransporten drives af den bølgeinducerede strøm samt den Jyske Kyststrøm. Nærmest kysten (indenfor den aktive zone af kystprofilen) er sedimenttransporten domineret af den bølgeinducerede transport (DHI, 2001), hvilket medfører, at det er den bølgeinducerede transport der er dominerende for kystudviklingen i området.

Indenfor brydningszonen er kystprofilen meget dynamisk, og der forekommer signifikante årlige omløjninger af sedimentet, afhængig af bølgeforholdene. Kystprofilen bliver dog mere stabilt på større vanddybde, da det her er mindre påvirket af bølgerne.

Såfremt bølgerne løber skråt ind på kysten, opstår der to strøm-komponenter, og der vil således også opstå to komponenter af sedimenttransporten, hvis den kritiske forskydningsspænding for

sedimentet overskrides (dvs. ved tilstrækkelig strømhastighed ift. det forekommende sediment i området). Omfanget af sedimenttransporten afhænger således af bl.a. bølgeforholdene, tværprofilet samt sedimentkarakteristikken.

Den ene komponent af sedimenttransporten er vinkelret på kysten og benævnes "*tværgående sedimenttransport*" og den anden komponent er parallel med kysten og benævnes "*langsgående sedimenttransport*". Tværgående- og langsgående sedimenttransport beskrives nærmere i det følgende.

### **3.2.1 Tværgående sandtransport**

Strækningen nordøst for Hirtshals Havn påvirkes af forskellige bølgeforhold med forskellige typer af brydende bølger (normalt karakteriseret som topbrydende eller styrtbrydende).

Topbrydende bølger, som forekommer under storm, bevirker normalt til revledannelse. Revledannelsen under disse forhold skyldes, at der søvæerts for brydningspunktet (dvs. i brydnings-zonen) forekommer en mindre sandtransport ind mod kysten, og at der landvæerts for brydningspunktet (i surf-zonen og swash-zonen) forekommer en udadrettet transport. Brydningspunktet på strækningen varierer pga. vekslende bølge- og vandstandsforhold, og revlen vil desuden med tiden langsomt bevæge sig søvæerts, hvilket medfører en såkaldt "forstejling" af kystprofilet.

Styrtbrydende bølger er i stand til op-hvirvle sandet til vandsøjlen, hvilket bevirker til, at sandet transporteres ind imod kysten. Denne effekt er mest dominerende under forhold med lange dønninger (dvs. lange bølger med høj bølgeperiode). Igennem et længere tidsrum er kysten påvirket af både top- og styrtbrydende bølger, og der er således tale om en konstant omfordeling af sediment samt en konstant dynamik af strandprofilet.

### **3.2.2 Langsgående sandtransport**

Den langsgående sandtransport på Vestkysten er bl.a. undersøgt i rapporten "*Sedimentbudget Vestkysten*" (Kystdirektoratet, 2000). Heraf fremgår det, at netto-transportretningen for den langsgående sandtransport er mod nord på strækningen nord for Thyborøn. Dette skyldes kombinationen af kystens orientering (som på denne strækning er orienteret mod nordvest-nord) og den dominerende bølgeretning fra vestlige retninger.

### **3.2.3 Kombineret langsgående- og tværgående sandtransport**

Tidligere studier af sedimenttransporten langs Vestkysten har vist, at signifikante bølgehøjder over ca. tre meter, målt på knap 20 meter vanddybde, er årsag til hovedparten af sedimenttransporten på Vestkysten (DHI, 2001).

Kombination af langsgående- og tværgående transport kan medføre, at revlerne langs kysten gennembrydes pga. u-ensformige transportmønstre og/eller u-ensformige bundkonturer, hvilket danner såkaldte revlehuller – også kendt som "hestehuller". Disse huller påvirker desuden beliggenheden af kystlinjen, idet der skabes udbugtninger, som bevæger sig i netto-transportretningen for den langsgående transport. Dannelsen af revlehullerne, og dermed kystudbugtningerne, er påvirket af bl.a. indfaldsvinklen for bølgen. Kystudbugtningerne bidrager væsentligt til sedimenttransporten langs Vestkysten.

### **3.2.4 Akut- og kronisk erosion**

Når strømmen og/eller bølgerne medfører, at der fjernes mere materiale/sand fra et område end der tilføres, opstår der erosion. Erosion opdeles i hhv. kronisk erosion og akut erosion.

Kronisk erosion skyldes, at der ikke er ligevægt mellem kystprofilet samt vandstands- og bølgeforholdene. Der kan være variationer fra år til år som følge af vekslende vandstands- og bølgeforhold, men tendensen er, at netto-transportretningen er den samme, og at der er et nettotab af sediment i området.

Akut erosion forekommer bl.a. i forbindelse med stormflodshændelser, hvor en kombination af vandstands- og bølgeforhold kan give anledning til en pludselig og signifikant erosion af kysten. Her vil transport-retningen være på tværs af kysten og den op-hvirvlede sediment aflejres typisk længere ude i kystprofilet.

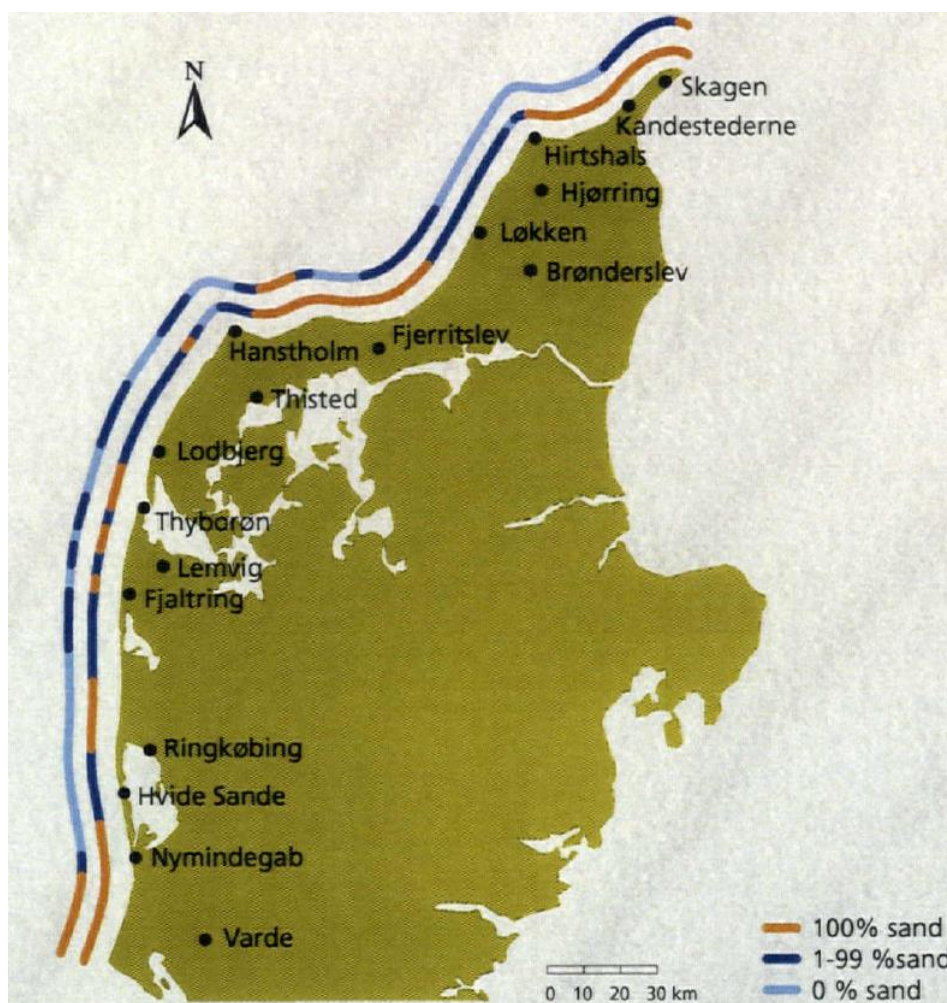
Den akutte erosion er meget synlig umiddelbart efter en stormflodshændelse, hvorimod den kroniske erosion er mindre synlig på kort sigt.

Den signifikante langsgående sandtransport "forstyrres" omkring Hirtshals, da strømforholdene og dermed sedimenttransporten bl.a. påvirkes af ændringer i vanddybde (f.eks. uddybet sejlgrende) samt molerne. Der opstår dermed områder, hvor der aflejres sedimenter, hvilket medfører et behov for løbende oprensning. Dette er nærmere beskrevet i (Rambøll, 2024b) og i (DHI, 2023). Udover lokal sedimentation, kan påvirkningen af den langsgående sandtransport give anledning til påvirkning af kysten nedstrøms for havnen (dvs. kyststrækningen øst for Hirtshals Havn).

### **3.3 Sedimentforhold på strækningen nordøst for Hirtshals havn**

En vigtig parameter ift. sedimenttransport og transportmængder er sedimentkarakteristikken, specificeret ved middeldkornstørrelsen,  $d_{50}$ , graderingen, samt tykkelsen af det mobile sandlag. I området syd for Hirtshals findes der ældre aflejringer af ler, finsand og silt. Nord for Hirtshals består kysten af marine aflejring af sand og ler, som er tilført fra kysterne syd for Hirtshals gennem tusinder af år. (Kystdirektoratet, 2018)

Sandprocenter (som er den andel af havbunden, der består af ikke-kohæsivt materiale) langs Den Jyske Vestkyst, er vist i figur 3-3. Heraf fremgår det, at der på strækningen omkring Hirtshals kan forventes en høj grad af sand indtil otte meters vanddybde (inderste streg), mens sandprocenten udenfor otte meters vanddybde (yderste streg) er mere varierende.



Figur 3-3. Sandprocenter langs vestkysten. (Kystdirektoratet, 2000)

Der er i forbindelse med tidligere analyser af sedimentbudgettet på vestkysten gennemført en omfattende analyse af kornstørrelsesfordelingen, præsenteret i (DHI, 2000b). I forbindelse med analysen blev der indsamlet sandprøver til bestemmelse af middeldkornstørrelsen,  $d_{50}$ , langs hele vestkysten.

En konklusion fra analyserne i (DHI, 2000b) er bl.a., at der fra Hirtshals til Tversted forekommer en middeldkornstørrelse,  $d_{50}$ , på ca. 0,17-0,28 mm (vandybde 1 m) og tendens til reduktion af kornstørrelsen, som vandybden stiger. Dette stemmer overens med, at bølgerne dominerer sandtransporten og dermed bevirker til en sortering af sandet (dvs. grovere kornstørrelser på lavere vandybde).

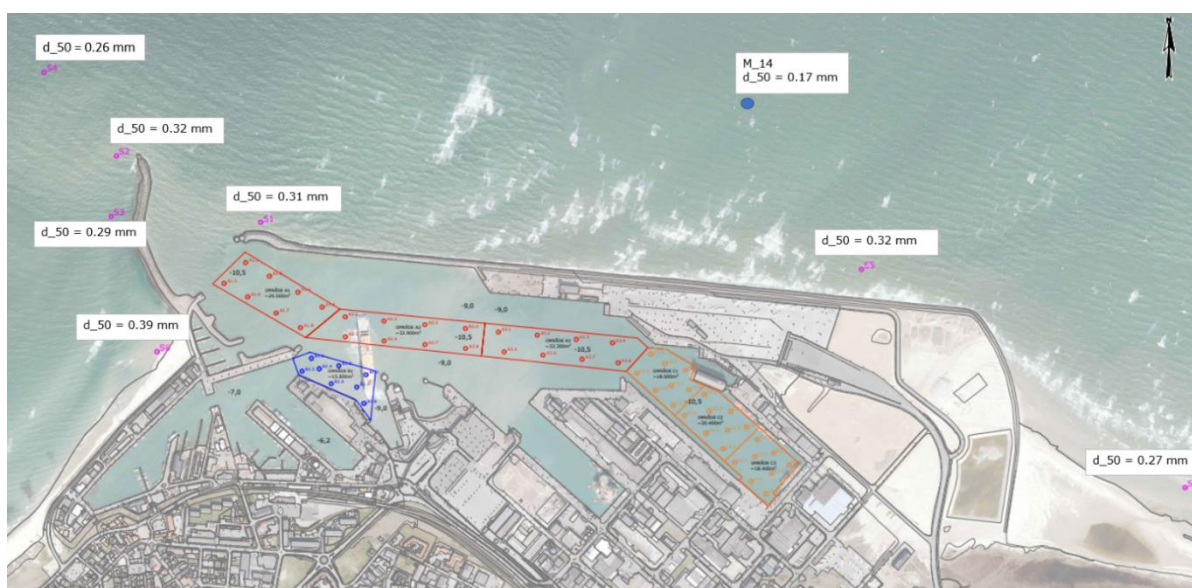
Udover varierende middeldkornstørrelse langs kysten og på tværs af kystprofilen viste analysen i (DHI, 2000b) også, at der forekommer en vis årstidsvariation. Middeldkornstørrelsen,  $d_{50}$ , for kystprofiler umiddelbart øst og vest for Hirtshals Havn er givet i tabel 3-1. Af tabellen fremgår det, at der generelt forekommer en højere  $d_{50}$  i om vinteren og foråret, som følge af vinterstormene, sammenlignet med  $d_{50}$  om sommeren og efteråret.

Profil	Årsmiddel	Forår	Sommer	Efterår	Vinter
<b>1370 (øst for Hirtshals Havn)</b>	0,18	0,18	0,18	0,18	0,21
<b>1490 (øst for Hirtshals Havn)</b>	0,18	0,18	0,18	0,19	0,21
<b>1520 (vest for Hirtshals Havn)</b>	0,24	0,25	0,23	0,21	0,24

**Tabel 3-1: Opgørelse af  $d_{50}$  umiddelbart øst- og vest for Hirtshals Havn. Baseret på data fra (DHI, 2000b).**

I forbindelse med havneudvidelsesprojektet er der indhentet enkelte sandprøver og gennemført sigteanalyser ift. at bestemme kornstørrelsesfordelinger for overfladesedimentet lokalt omkring Hirtshals Havn. Sandprøverne er indhentet primo marts 2022 på viste positioner i figur 3-4.

Indhentede lokale kornstørrelsesfordelinger viser generelt en middelnørrelse  $d_{50} \sim 0,3$  mm, bortset fra i M14, hvor  $d_{50} = 0,17$  (denne prøve er indhentet og analyseret uafhængig af de andre prøver).



**Figur 3-4: Middelnørrelser,  $d_{50}$ , baseret på sandprøver primært indhentet primo marts 2022 på lokaliteter, der i forbindelse med tidligere sedimenttransportsimuleringer viser tendens til aflejring samt fra miljøprøve M14 (blå markering). Tegning er fremsendt af A1.**

Som nævnt er prøverne til analyse af kornstørrelserne præsenteret i figur 3-4 indhentet i starten af marts 2022 (efter eksempelvis stormen Malik i februar 2022) og de er således at betragte som repræsentative for foråret. Derfor er middelnørrelser i figur 3-4 forventeligt lidt grovere sammenlignet med f.eks. årsmiddel i tabel 3-1. Jf. sedimentanalysen i (Kystdirektoratet, 1999) er sandet desuden lidt grovere vest for havnen og grovest nærmest kysten.

Middelnørrelsen,  $d_{50}$ , i pkt. S4 (jf. figur 3-4) er særligt relevant, da sandet i dette område kan blive transporteret ind mod indsejlingen ifm. storm. Baseret på årstidsvariationen fra (Kystdirektoratet, 1999) er den målte forårs-kornstørrelse,  $d_{50}$ , for S4 omregnet til en estimeret kornstørrelse repræsentativt for sommer/efterår,  $d_{50} \sim 0,22$  mm, via forholdet imellem forår ( $d_{50} = 0,25$  mm) og efterår ( $d_{50} = 0,21$  mm) for profil 1520 vest for Hirtshals Havn, jf. tabel 3-1.



## 4. SEDIMENTBUDGET OG BYPASS FOR NUVÆRENDE FORHOLD VED HIRTSHALS HAVN

I det følgende beskrives sedimentbudgettet (regionalt) omkring Hirtshals Havn samt lokalt ved havnen (bypass). Denne beskrivelse danner baggrund for forståelsen af kystudviklingen for de nuværende forhold (afsnit 5) samt den forventede fremtidige kystudvikling, herunder påvirkningen fra den planlagte havneudvidelse (afsnit 6). Sandbudgettet er beskrevet på baggrund af litteraturstudier og dermed foreliggende gennemførte analyser.

### 4.1 Regionalt sedimenttransportbudget for den nordlige del af vestkysten

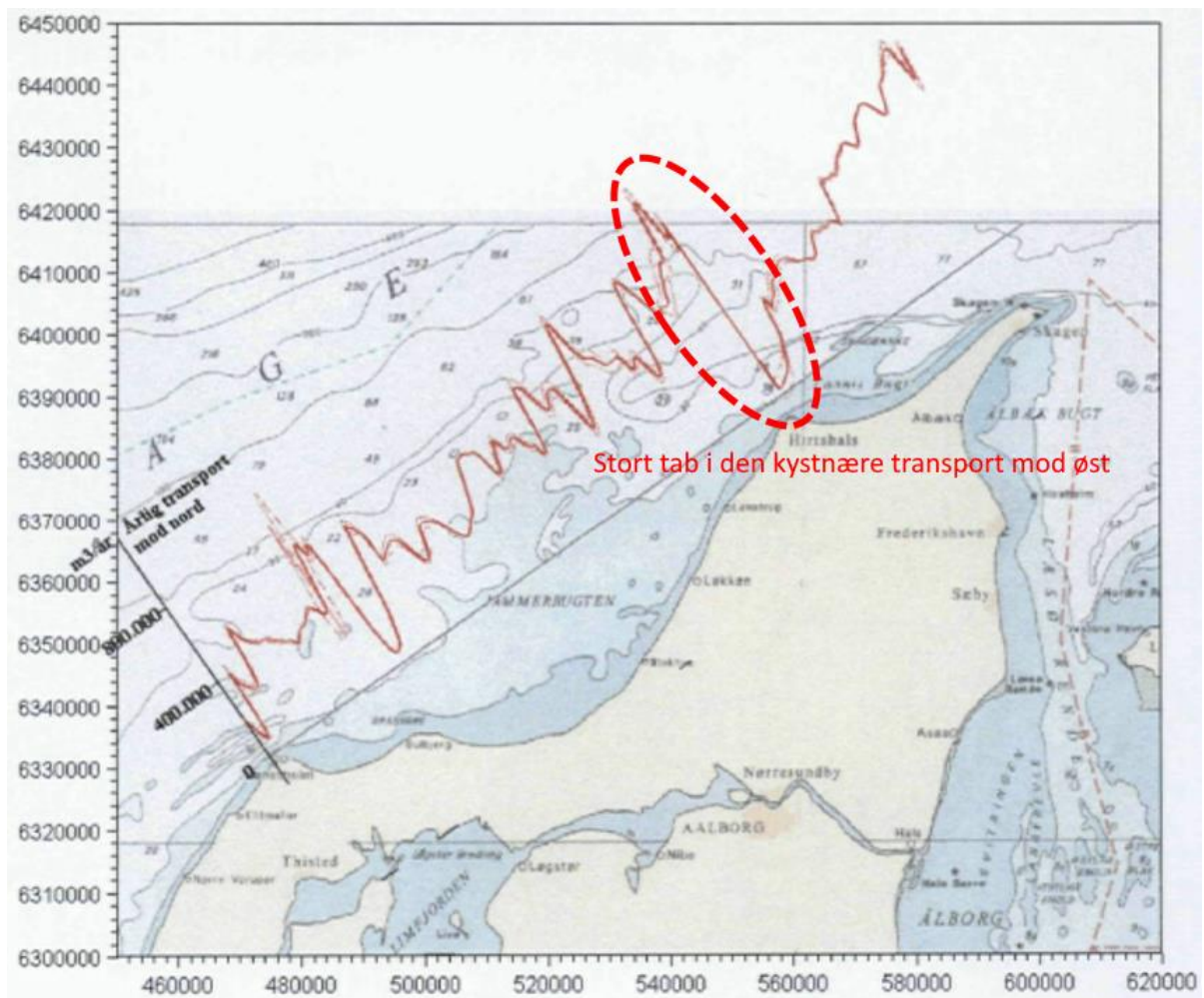
I (DHI, 1994) er der opstillet et regionalt sedimentbudget for strækningen imellem Hirtshals Havn og Gammel Skagen, hvoraf det fremgår, at der er en sandtransport fra sydvest op mod Hirtshals Havn på ca. 900.000 m<sup>3</sup>/år og at denne sandmængde "går tabt" idet der umiddelbart øst for Hirtshals forekommer en netto-vestgående transport på ca. 100.000 m<sup>3</sup>/år. Den vestgående transport skyldes læ-effekten fra Hirtshals Havn.

Det regionale sedimentbudget for den nordlige del af vestkysten, se figur 4-1, er baseret på målte profildata ud til 10 m vanddybde samt modellering (DHI, 1994).



Figur 4-1: Regionalt sedimentbudget i (DHI, 1994) baseret på profilopmåling ud til 10 m vanddybde. Positivt fortegn indikerer netto-nordøstgående transport. Tal er i 1.000 m<sup>3</sup>/år. (DHI, 2000b)

Sedimentbudgettet i (DHI, 1994) er efterfølgende opdateret i (DHI, 2000b) baseret på yderligere analyse af kystprofiler samt baseret på en kalibreret opdateret LITPACK-model, se figur 4-2. Heraf fremgår det, at også det opdaterede sedimenttransportbudget viser et signifikant tab i det kystnære littorale sedimentbudget ved Hirtshals Havn. Ifm. analyserne i (DHI, 2000b) er det konkluderet, at skillelinjen imellem den strøm- og bølgedominerede regionale netto-sandtransport langs vestkysten er ca. 10 m vanddybde, dvs. at den såkaldte aktive dybde er ca. 10 m.



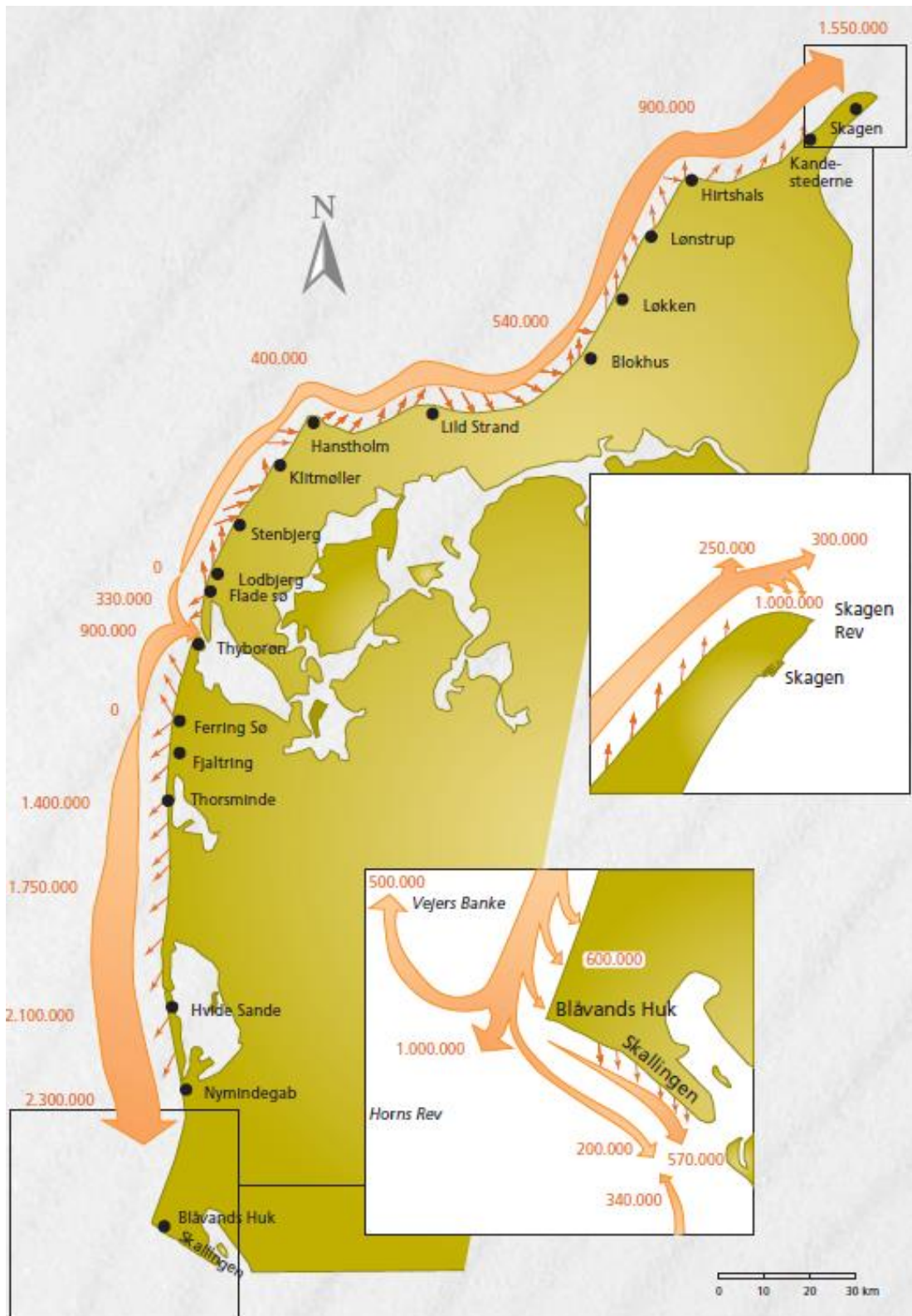
Figur 4-2: Årlig regional nettotransport ud til 10 m vanddybde baseret på bølgeklimate i 1992 til 1995. Positivt fortegn indikerer netto-nordøstgående transport. (DHI, 2000b)

Den kalibrerede LITPACK-model, der er opstillet ifm. analyserne præsenteret i (DHI, 2000b) er desuden anvendt i forbindelse med et sensitivitetsstudie, som konkluderer, at sedimenttransportraten samt transportnulpunkter på Vestkysten er meget sensitive overfor bølgeretning samt kyst-orientering, idet få graders ændring af enten bølgeretningen eller kystorienteringen medfører stor påvirkning af transportkapaciteten. Derfor er det i (DHI, 2000b) konkluderet, at man ift. sedimenttransport samt kystmorfologien på Vestkysten primært skal hæfte sig ved overordnede tendenser.

Som tidligere nævnt er kyststrækningen nordøst for Hirtshals Havn præget af stor dynamik, hvilket jf. (DHI, 2000b) primært skyldes kyst-udbuktninger, der opstår som følge af at de dominerende bølger fra vest, angriber kysten næsten parallelt. Kyst-udbuktningerne vandrer mod øst samtidig med at de vokser (pga. en indfaldsvinkel som nærmer sig  $45^\circ$ ), jf. afsnit 3.2.2.

Baseret på konklusioner fra bl.a. LITPACK-analysen i (DHI, 2000b), er der i (Kystdirektoratet, 2000) opstillet et sedimentbudget for vestkysten, som inkluderer både den kystnære bølgeinducerede sandtransport samt indflydelsen fra den tidevandsinducerede kyststrøm, se figur 4-3. Ift. sandtransporten i kyststrømmen er der analyseret på såkaldte seismiske linjer, som når ind til 10-20 m dybde udfør Hirtshals. Baseret herpå er det vurderet, at kyststrømmens betydning for de regionale sediment-transportprocesser potentielt er større end tidligere antaget. Således

fremgår der af det regionale sedimentbudget i (Kystdirektoratet, 2000) et større sedimentbypass ved Hirtshals sammenlignet med sedimentbudgetterne i (DHI, 1994) og (DHI, 2000b).



Figur 4-3. Regionalt sedimentbudget for Vestkysten, tal er i  $m^3/år$ . (Kystdirektoratet, 2000)



Ift. sedimentbudgettet i figur 4-3 er det dog i (Kystdirektoratet, 2000) nævnt at der forekommer følgende usikkerheder:

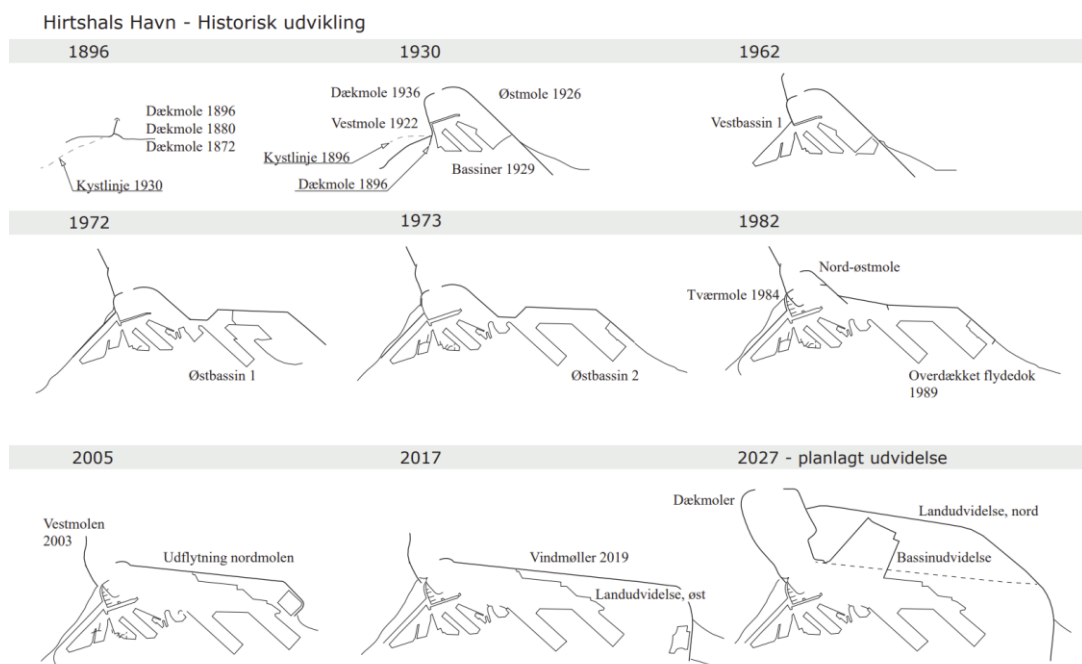
- Manglende detaljeret viden om offshore processerne.
- Bundens sandindhold er ikke tilstrækkeligt kendt.
- Manglende detaljeret kendskab til forholdene omkring bl.a. Hirtshals.

Således er det baseret på sedimentbudgettet i (Kystdirektoratet, 2000) uvist hvorvidt et evt. bypass forbi Hirtshals Havn på dybt vand vil tilbageføre sandet til lavere vanddybde øst for havnen og hvorvidt det herefter vil indgå i den kystnære littorale sandtransport øst for havnen, hvilket er afgørende for kystudviklingen på strækningen. Som tidligere nævnt er den såkaldte aktive dybde jf. (DHI, 2000b) indenfor ca. 10 m vanddybde.

#### 4.2 Lokal sandbypass ved Hirtshals Havn

Konstruktioner, herunder moler, kan have en signifikant betydning for kystudviklingen, da disse kan påvirke/blokere især den langsgående sedimenttransport. Udbygninger på kysten vil typisk medføre, at der opstrøms for udbygningen etableres et aflejningsområde og nedstrøms et erosionsområde (læside-erosion).

Hirtshals Havn er udbygget ad flere omgange (etaper). Udbygningerne i perioden 1896 – 2017 (inkl. den planlagte udvidelse i 2027) er illustreret i figur 4-4.



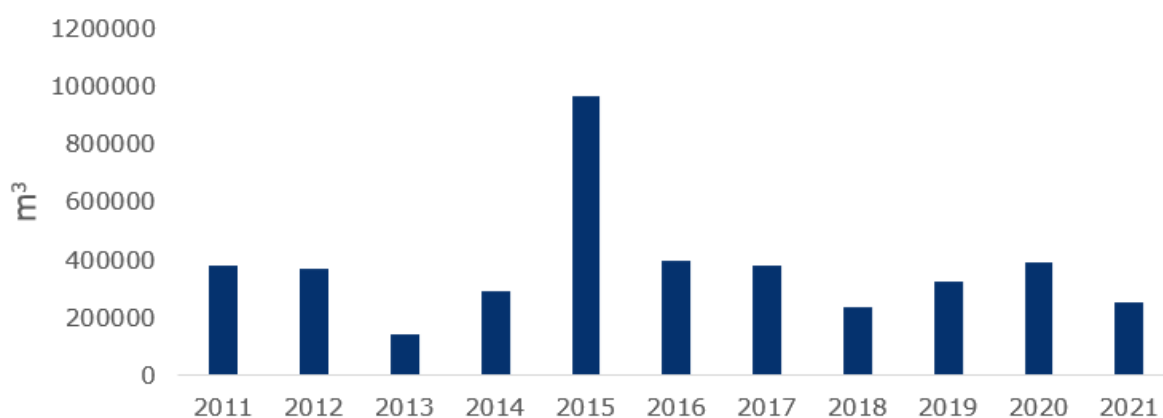
Figur 4-4: Ændringer af Hirtshals havns moler 1896-2027. Figur er fremsendt af Hirtshals Havn.

Jf. (DHI, 1994) resulterede forlængelsen af Vestmolen i 1973 i, at der kortvarigt opstod en reduceret aflejningsmængde i indsejlingen. Der forekom dog relativt hurtigt aflejring og frembygning af revlerne på havnens vestside, og samtidigt øgedes vanddybderne i det ellers lavvandede område øst for havnen med op til 1,5 m pga. den midlertidige reduktion af sandtransporten. Hertil fremgår det af (DHI, 1994) ikke specifikt i hvilket område den midlertidige

vanddybdeforøgelse forekom. Efterfølgende blev vanddybderne ved Vestmolen dog genoprettet, hvorefter vanddybden øst for havnen blev reduceret.

I (DHI, 2013) er indflydelse fra etableringen af udvidelsen mod øst i 2015 vurderet med følgende konklusion; *"(...) kysttekniske basisundersøgelser har ikke vist nogen sammenhæng mellem kystudviklingen og den hidtidige etapevise udbygning af Hirtshals Havn. Det er således sandsynligt, at den planlagte landudvidelse ikke vil give nogen indvirkning på kysten, idet landudvidelsen kan betragtes som en relativt lille tilføjelse til Hirtshals Havn i forhold til tidligere udbygninger."*

En opgørelse over Hirtshals Havns oprensningsmængder i perioden 1999 – 2023 viser jf. (DHI, 2023) en gennemsnitlig oprensningsmængde på ca. 380.000 m<sup>3</sup>/år. Dette dækker dog over store variationer, jf. opgørelsen i perioden 2011 - 2021 i figur 4-5, som følge af årlige variationer i storme samt variationer i eventuelle præventive oprensninger. Den meget høje "oprensningsmængde" i 2015 skyldes tilladelse til indvinding af sand til opfyld af landindvinding.



Figur 4-5: Oprensningsmængder for Hirtshals Havn i perioden 2011 - 2021. Data er fremsendt af Hirtshals Havn.

En opgørelse i (DHI, 2023) viser, at der i perioden 1999 – 2023 er oprenset i alt 8.930.000 m<sup>3</sup> sand i indsejlingskorridoren. Heraf er der klappet ca. 4.680.000 m<sup>3</sup> offshore, bypasset ca. 1.320.000 m<sup>3</sup> og nyttiggjort ca. 2.920.000 m<sup>3</sup>. Dvs. at kun en relativt lille del (ca. 15%) af det oprensede sand er aktivt bypasset og dermed direkte tilført det kystnære sedimentbudget nedstrøms Hirtshals Havn i perioden.

En opgørelse modtaget på mail fra Hirtshals Havn viser hvorledes de oprensede sandmængder i perioden 2011-2021 er anvendt. Heraf fremgår det, at der i perioden 2011-2015 ikke er et aktivt bypass af oprenset sand til strækningen umiddelbart øst for havnen, mens der i perioden 2016-2021 er bypasset mellem 90.000-375.000 m<sup>3</sup>/år på strækningen øst for havnen (gnms. 205.000 m<sup>3</sup>/år i perioden 2016-2021). Der er dermed også store årlige variationer i den direkte tilførsel af sand via bypass.

#### 4.2.1 Lokalt sedimentbudget ved Hirtshals Havn baseret på tidligere analyser

I (DHI, 1994) er det konkluderet at den del af nettosandtransporten fra syd op mod Hirtshals (ca. 900.000 m<sup>3</sup>/år), der ikke oprenses i indsejlingskorridoren, aflejres- eller flyttes mod dybt vand, hvorefter det går tabt for den kystnære littorale transport på østsiden af havnen. Med en gennemsnitlig oprensningsmængde på ca. 380.000 m<sup>3</sup>/år betyder dette, at der jf. tidligere analyser naturligt "tabes" ca. 520.000 m<sup>3</sup>/år fra sandbudgettet til dybt vand. Herudover tabes den del af det oprensede materiale, som ikke er aktivt bypasset. En illustration af det lokale sandbudget, baseret på tidligere analyser, er illustreret i figur 4-1.

I (DHI, 1994) er det yderligere konkluderet, at den langsgående sandtransport umiddelbart øst for Hirtshals Havn er vestgående. Dvs. at der umiddelbart øst for havnen forekommer et lokalt sediment nulpunkt. Den vestgående sandtransport er i (DHI, 1994) vurderet til ca. 100.000 m<sup>3</sup>/år og skyldes læ-virkningen fra havnen. Denne læ-virkning medfører, at der opstår en skyggeeffekt for bølger fra vest, hvormed der lokalt udelukkende vil forekomme bølger fra nord og øst, hvilket jf. (DHI, 1994) generer en vestgående sedimenttransport.



Figur 4-6: Sedimentbudget ved Hirtshals Havn baseret på tidligere foreliggende analyser. Stiplede linjer angiver fordelingen af de 380.000 m<sup>3</sup>/år der oprenses. Baggrundsfoto er fra (Google Earth, 2022)

Jf. (DHI, 1994) er udstrækningen af påvirkningsområdet nedstrøms-kysten (kyststrækningen nordøst for havnen) ca. 10 km mod nordøst. I (DHI, 2013) er det dog konkluderet, at havnens indflydelsesområde på kysten begrænser sig til ca. 4 - 5 km øst for havnen. Dette er yderligere diskuteret i afsnit 5.

Det re-kalibrerede opdaterede sedimenttransportbudget i (DHI, 2000b), som bl.a. blev lagt til grund for det etablerede kystnære bølgeinducerede sedimenttransportbudget i (Kystdirektoratet, 2000), se figur 4-2, viser samme tendens som i (DHI, 1994). Dvs. at det i begge analyser er konkluderet, at den kystnære sandtransport (ud til 10 m dybde) tabes umiddelbart omkring Hirtshals Havn.

I (Niras, 2019) er det ligeledes konkluderet, at der i dag stort set ikke forekommer et naturligt bypass forbi havnen, og at alt sediment siden etableringen af Hirtshals Havn enten aflejres på dybt vand eller i sejltredden. Det eneste bypass der jf. (Niras, 2019) forekommer til kyststrækningen øst for havnen, er det sand der tilføres kysten ved aktivt bypass af oprenset sand fra indsejlingen.

Baseret på optegning af historiske kystskræntplaceringer er det i (Kystdirektoratet, 2018) konkluderet, at etableringen af Hirtshals Havn og de senere udvidelser sammen med den hidtidige

praksis ift. oprensning og bypass generelt har forårsaget fremrykning af kystskrænten øst for havnen. I perioden hvor de mest markante udvidelser af Hirtshals Havn ift. en eventuel påvirkning på sedimenttransporten øst for havnen er forekommet, er det jf. (Kystdirektoratet, 2018) konkluderet, at kysten øst for havnen er rykket frem. Således er det jf. (Kystdirektoratet, 2018) konkluderet, at Hirtshals Havn har en beskyttende effekt på kysten øst for havnen. Baseret på analyserne i (Kystdirektoratet, 2018) er det anbefalet, at der gives mulighed for nyttiggørelse af det oprensede sediment og luvside aflejring i form af backpassing på op til 100%. Baseret herpå kan det umiddelbart uddrages, at der jf. (Kystdirektoratet, 2018) ikke er sammenhæng imellem sedimentbudgettet vest og øst for Hirtshals Havn (dvs. hele den langsgående littorale sandtransport vest for havnen går tabt ift. sandtransporten øst for Hirtshals Havn). Baggrunden for denne tolkning er, at luvsideaflejringer og sediment i indsejlingen ellers ville understøtte det naturlige bypass, men da disse jf. (Kystdirektoratet, 2018) kan oprenses og nyttiggøres, tolkes det at hypotesen må have været at der i forvejen ikke forekommer noget naturligt bypass. Dette stemmer i øvrigt overens med konklusioner i tidligere analyser.

Ved nærmere analyse af de historiske kystskræntbeliggenheder i (Kystdirektoratet, 2018) kan det dog jf. (DHI, 2023) konstateres, at der siden 1960 potentielt har forekommet en tilbagerykning af kysten øst for Hirtshals Havn, hvilket desuden stemmer bedre overens med den historiske kystudvikling præsenteret i afsnit 5.2.

#### **4.2.2 Lokalt sedimentbudget ved Hirtshals Havn baseret på nye analyser i (DHI, 2023)**

Jf. afsnit 4.1 er det ifm. det tidligere etablerede regionale sedimenttransportbudget i (Kystdirektoratet, 2000) udtrykt, at der er en vis uvished om offshore processernes betydning for sedimenttransporten lokalt omkring Hirtshals. Således er det usikkert hvorvidt sedimenttransporten på dybt vand (>10 m) rundt om Hirtshals Havn, drevet af kyststrømmen, potentielt indgår i den kystnære bølgedrevne sandtransport øst for havnen og dermed medfører et naturligt bypass (hvilket er i modsætning til tidligere forventninger).

Med henblik på at afklare disse usikkerheder vedr. det lokale sedimentbudget omkring Hirtshals Havn er der i (DHI, 2023) gennemført nye analyser. Konklusioner herfra vedr. det lokale sedimentbudget omkring eksisterende havn er opsummeret i det følgende.

##### Sandbølgebevægelser omkring Hirtshals Havn

Baseret på analyse af tilgængelige kystprofil-opmålinger og nye dybdeopmålinger samt satellitmålinger er det i (DHI, 2023) konstateret, at der via sandbølgebevægelser forekommer en østgående sandtransport forbi Hirtshals Havn på mindst 80.000 m<sup>3</sup>/år. Sedimenterne der indgår i sandbølgerne vurderes enten at stamme fra erosion ud for den østlige bølgebryder, transport forbi havnen (hen over indsejlingskorridoren), eller sediment der transporteres ind fra større vanddybde (offshore).

##### Sandtransport omkring Hirtshals Havn baseret på modellering i (DHI, 2023)

Baseret på modellering er det i (DHI, 2023) konkluderet, at sandtransporten ved Vestmolen umiddelbart er nordgående, dvs. rettet ud mod dybt vand. I modsætning til tidligere analyser, hvor det blev konkluderet at sandtransporten fra vest tabes på dybt vand, er det i (DHI, 2023) konkluderet at sandet transporteres videre fra dybt vand mod øst, hvorefter der umiddelbart øst for indsejlingskorridoren forekommer en sydgående transport, som fører sandet tilbage mod kysten øst for havnen. Hvorvidt sandet midlertidigt sedimenteres nord for Hirtshals havn er umiddelbart ikke helt klart af simuleringerne.

En anden vigtig konklusion i (DHI, 2023) er, at sand fra klapplassen, beliggende ca. 6,5 – 8,5 km mod nord fra havnen, delvist føres tilbage på kysten øst for Hirtshals Havn. Tidligere har vurderingen været, at sandet på klapplassen udgår af det kystnære sedimentbudget øst for havnen. Dog kan det via modellerne konstateres, at de første 6 – 8 km øst for havnen ikke modtager sand fra klapplassen.

Nye analyser fra (DHI, 2023) viser, at det samlede sedimenttab på kysten øst for Hirtshals Havn, under eksisterende situation, er ca. 350.000 m<sup>3</sup>/år (under forudsætning af nuværende nyttiggørelses- og bypassforhold). Hvis det opgravede sand i indsejlingen dog i stedet klappes på bypass pladsen, og ikke på den hidtil anvendte klappads på relativt dybt vand, er det jf. (DHI, 2023) forventningen at erosionen i området op til 5 km øst for havnen reduceres væsentligt.

#### 4.3 Opsummering – sedimentbudget for nuværende forhold

Baseret på de gennemgåede tidligere analyser, vedr. det regionale- og lokale sedimentbudget ved Hirtshals Havn, er følgende konkluderet:

- Netto-sandtransporten sydvest for Hirtshals Havn er jf. (Kystdirektoratet, 2000) nordgående (ca. 900.000 m<sup>3</sup>/år). Hertil forekommer der dog en vis usikkerhed, og sandtransporten fra vest er ikke yderligere kvantificeret i senere analyser.
- Foreliggende analyser (tidligere end 2022) baseres på, at størstedelen af den kystnære sedimenttransport fra sydvest (netto) til Hirtshals umiddelbart tabes for den kystnære sedimentbalance nordøst for havnen. Den eneste mængde som, baseret på tidligere foreliggende analyser, indgår i det kystnære sandbudget nordøst for havnen, er den del som aktivt bypasses. Dette er konkluderet i (DHI, 1994) samt i (DHI, 2000b) baseret på dataanalyse af kystprofiler samt modellering. Analyserne i (DHI, 2000b) blev lavet som en del af baggrundsanalyserne til Kystdirektoratets regionale sedimentbudget i (Kystdirektoratet, 2000).
- Der er i (Kystdirektoratet, 2000) opstillet et sedimentbudget langs vestkysten som inkluderer både den kystnære bølgeinducerede sandtransport samt indflydelsen fra den tidevandsinducerede kyststrøm. Ift. sandtransporten i kyststrømmen er der anvendt såkaldte seismiske linjer, som når ind til 10-20 m dybde ud for Hirtshals. Baseret herpå er det vurderet, at kyststrømmens betydning for de regionale sediment-transportprocesser potentielt er større end konkluderet i (DHI, 1994) og (DHI, 2000b). Således fremgår der af det regionale sedimentbudget i (Kystdirektoratet, 2000) et større sedimentbypass ved Hirtshals Havn sammenlignet med sedimentbudgetterne i (DHI, 1994) og (DHI, 2000b). Hertil er det dog i (Kystdirektoratet, 2000) nævnt, at der er usikkerheder forbundet med Kystdirektoratets sedimentbudget ifm. offshore-processerne, samt de detaljerede forhold omkring bl.a. Hirtshals Havn. Således vides det bl.a. ikke med sikkerhed hvorvidt sandet der potentielt bypasser Hirtshals Havn indgår i det aktive kystprofil øst for havnen.
- Baseret på optegning af historiske kystskræntplaceringer er det i (Kystdirektoratet, 2018) konkluderet, at etableringen af Hirtshals Havn og den hidtidige oprensning generelt har forårsaget fremrykning af kystskrænten øst for havnen siden havnens anlæggelse. Baseret herpå kan det umiddelbart uddrages, at enten forekommer der for det eksisterende havnelayout fuld naturligt bypass af sand, eller også er der ikke sammenhæng imellem sedimentbudgettet vest- og øst for Hirtshals Havn (dvs. hele den langsgående sandtransport vest for havnen går tabt ved Hirtshals Havn). I (DHI, 2023) er det dog konstateret, at der siden 1960 potentielt har forekommet en tilbagerykning af

kysten øst for Hirtshals Havn, hvilket stemmer mere overens med den historiske kystudvikling i afsnit 5.2.

- I (DHI, 2023) er der gennemført supplerende analyser baseret på gennemgang af kystprofiler og satellitfotos samt modellering med det formål at opnå øget viden omkring eventuelle naturlige bypass forhold ved Hirtshals Havn. I modsætning til tidligere studier viser analyserne i (DHI, 2023), at der delvist forekommer et naturligt bypass hen over indsejlingskorridoren.
- Tidligere sedimentbudgetter i (DHI, 1994) og (DHI, 2000b) viser at indflydelsen fra tilstedeværelsen af Hirtshals Havn medfører et samlet tab på ca. 275.000 m<sup>3</sup>/år fra den littorale sandtransport øst for havnen.
- Nye analyser fra (DHI, 2023) viser, at det samlede sedimenttab på kysten øst for Hirtshals Havn er ca. 350.000 m<sup>3</sup>/år (under forudsætning af nuværende nyttiggørelses- og bypassforhold). Hvis det opgravede sand i indsejlingen dog i stedet klappes på bypass pladsen, og ikke på den hidtil anvendte klappads på relativt dybt vand, er det jf. (DHI, 2023) forventningen, at erosionen i området op til 5 km på kysten øst for havnen reduceres væsentligt.
- I (DHI, 1994) er det vurderet, at tabet i den littorale sandtransport øst for havnen medfører en påvirkning på kysten ca. 10 km mod nordøst. I (DHI, 2013) og (DHI, 2023) er det konkluderet, at havnens indflydelsesområde på kystenerosionen begrænser sig til ca. 4 – 5 km øst for havnen.



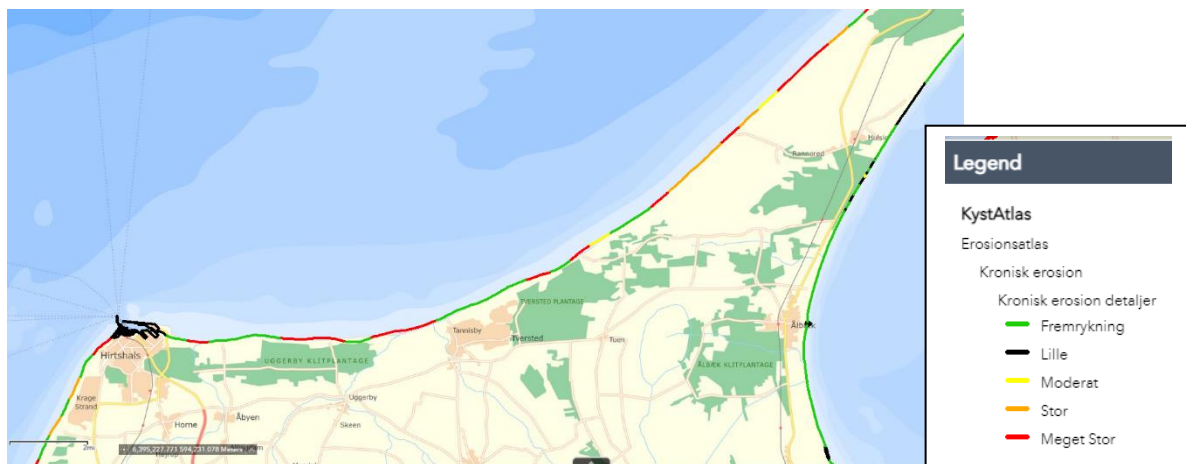
## 5. NATURLIG KYSTDYNAMIK OMKRING HIRTSHALS HAVN

I det følgende beskrives den naturlige kystudvikling og dynamik primært øst for Hirtshals Havn idet denne, som udgangspunkt, også vil fortsætte fremadrettet. Desuden vurderes på klimaændringernes forventede påvirkning af den fremtidige kystudvikling.

Formålet er at kortlægge den udvikling og variation, der skyldes de naturlige processer (overordnet beskrevet i afsnit 3). Efterfølgende, i afsnit 6, gives en vurdering af påvirkningen af kystudviklingen, som følge af udvidelsen af Hirtshals Havn.

### 5.1 Beskrivelse af regionale kystforhold ved Hirtshals Havn baseret på Kystatlas

Kystdirektoratet har udarbejdet GIS-værktøjet "Kystatlas" (Kystdirektoratet, 2022b), hvor de danske kyster er karakteriseret i forhold til erosionsniveauet baseret på den historiske udvikling. Et udtræk af den kroniske erosion for den nordvestjyske kyst er vist i figur 5-1.



Figur 5-1: Oversigt over kronisk erosion på strækningen nordøst for Hirtshals Havn. (Kystdirektoratet, 2022b)

Af figur 5-1 fremgår det, at der, som forventet, forekommer vekslende kronisk tilbagerykning og fremrykning af kysten umiddelbart øst for Hirtshals Havn. Dette er pga. kombinationen af kystudbugtninger (beskrevet i afsnit 3) samt de dominerende bølge- og kystforhold.

Tilstedeværelsen af kystudbugtningerne, der på samme vis som havbølger har en bølgelængde samt en vandringshastighed, medfører at de specifikke strækninger med hhv. tilbagerykning og fremrykning er vekslende. Således kan der i en periode (en vis årrække) opleves tilbagerykning på en strækning efterfulgt af en periode med fremrykning. Længere mod nord, tættere ved Grenen, forekommer der generelt en kronisk tilbagerykning, men også her kan der forventes årlige variationer i tilbagerykningen.

Af figur 5-2 fremgår det, at der generelt på kysten ved Hirtshals kan forventes en "meget stor" akut erosion ifm. stormhændelser. På Vestkysten kan den akutte erosion være adskillige meter som typisk vil forekomme i vinterperioden og vil være synlig efter storm.



Figur 5-2: Oversigt over akut erosion på strækningen nordøst for Hirtshals Havn. (Kystdirektoratet, 2022b)

## 5.2 Historisk kystudvikling

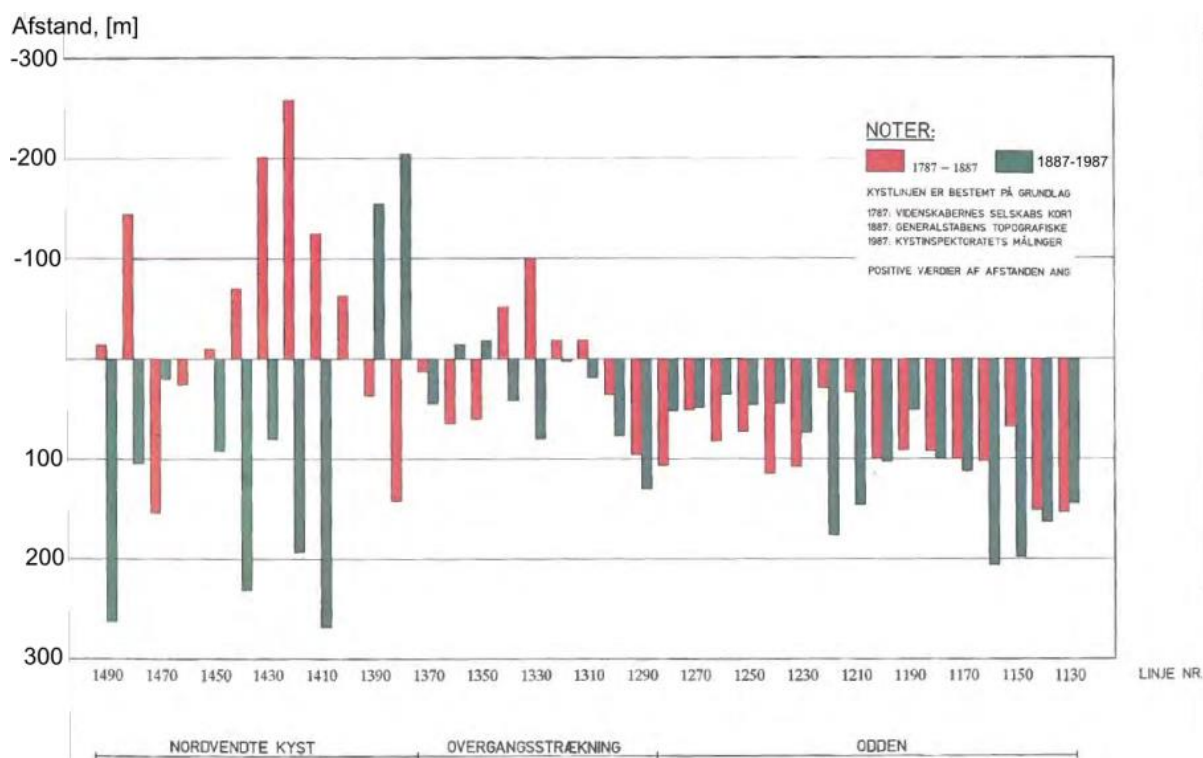
Den historiske kystudvikling ved Hirtshals Havn beskrives i det følgende baseret på hhv. en opsummering af konklusioner fra tidligere analyser samt en ny analyse baseret på gennemgang af satellit-fotos.

### 5.2.1 Historisk kystudvikling – baseret på opsummering af tidligere analyser i området

Kystudviklingen øst for Hirtshals Havn i perioden 1787 – 1987 er tidligere analyseret og dokumenteret i (Kystinspektoratet, 1993). Frem-/tilbagerykningen baseret på analysen er gengivet i figur 5-3, hvoraf det fremgår, at der har der været tendens til kystfremrykning på den nordvendte kyst, umiddelbart øst for Hirtshals Havn i den første del af perioden 1787 – 1887, hvorimod der i den efterfølgende del af perioden (1887 – 1987) er tendens til tilbagerykning.

I (Kystinspektoratet, 1993) er det konkluderet, at ændringen i kystudvikling (fra fremrykning til tilbagerykning) på den nordvendte kyst umiddelbart øst for Hirtshals Havn må skyldes etableringen af dækmolen i 1896 (jf. figur 4-4).





**Figur 5-3: Frem-/tilbagerykning af kysten øst for Hirtshals Havn. Positive fortegn indikerer erosion. Linjenumre refererer til Kystdirektoratets nummerering af kystprofiler (Kystinspektoret, 1993). Figur er fra (DHI, 2013).**

Beliggenheden af udvalgte kystprofiler, som der refereres til i figur 5-3, er vist i figur 5-4.



**Figur 5-4: Illustration af beliggenhed af Kystdirektoratets kystprofiler. (Google Earth, 2022)**

I (DHI, 2013) er det konstateret, at forskelle i frem-/tilbagerykninger for kystprofil 1450 og længere mod øst i de to perioder i figur 5-3 skyldes tilfældigheder i kystondulationer pga. kystudbugtninger. Hermed er det i (DHI, 2013) konkluderet, at havnens indflydelsesområde på kystudviklingen begrænser sig til området fra havnen og frem til linje 1450 (ca. 4 – 5 km fra havnen). I (DHI, 2013) er det vurderet, at kystudbugtningernes udstrækning (amplitude) på tværs kysten umiddelbart øst for havnen er ca. 100 – 250 m. Amplituden reduceres i takt med at kysten orienteres mere mod nordvest fremfor nord.

I (DHI, 1994) er det konstateret, at der har været erosion af kystlinjen på gennemsnitlig 4,4 m/år i perioden 1977 – 1991 og en gennemsnitlig erosion på 2,4 m/år på klitskrænten på strækningen umiddelbart øst for Hirtshals Havn. De gennemsnitlige erosionsrater dækker dog over store variationer. I perioden 1977 – 1991, blev der gennemsnitligt oprenset ca. 250.000 m<sup>3</sup> sand per år i indsejlingen til Hirtshals Havn, det oprensede materiale blev klappet på relativt dybt vand og som derfor, jf. (DHI, 1994), blev vurderet tabt i sandbudgettet øst for havnen.

Baseret på analyserne af luftfotos, kystprofilmålinger og kystinspektionen er det i (DHI, 2013) konkluderet at kystlinjeerosionen umiddelbart øst for Hirtshals Havn ved Kjul strand er ca. 1 – 2 m/år.

I (Niras, 2019) er det, baseret på kystlinjeanalyse, konkluderet, at kysten øst for Hirtshals Havn generelt er ustabil og nogle steder rykker frem og nogle steder tilbage med en hastighed på helt op til ca. 10 m/år. Ved Kjul strand er der i (Niras, 2019) konstateret en erosion på ca. 5 – 6 m/år i perioden 1999 – 2018.

I (Kystdirektoratet, 2018) er der gennemført en detaljeret analyse af historiske kystlinjers placering for strækningen umiddelbart øst for Hirtshals Havn (ca. imellem profil nr. 1500 og 1430). Analysen er baseret på skræntens beliggenhed bestemt ud fra ortho-fotos. Konklusionen er, at den største variation i skræntens beliggenhed sker i den vestlige- og den østlige del af den betragtede strækning, mens variationerne i midten er mindre. I den vestlige del (umiddelbart øst for havnen) er der generelt sket en tilbagerykning i perioden 1899-1995, hvorefter der er sket fremrykning. I den østlige del er der i perioden 1899-2012 sket en tilbagerykning på ca. 125 m, men fremrykning fra 1995-2012.

I (Kystdirektoratet, 2018) er det overordnet set konkluderet, at der er sket en generel fremrykning af kystskrænten umiddelbart øst for havnen, hvormed det er vurderet at etableringen af Hirtshals Havn og den hidtidige gennemførte oprensning ikke har medført kysttilbagerykning. I analysen er det yderligere estimeret (via Bruuns regel), at tilbagerykningen af kystskrænten pga. klimaændringer i perioden siden etableringen af den første læmole i Hirtshals Havn (1896) har været ca. 20 m. Såfremt denne naturlige tilbagetrækning tages i regning, er det i (Kystdirektoratet, 2018) konkluderet at den gunstige effekt er endnu større. Ud fra disse betragtninger er det i (Kystdirektoratet, 2018) anbefalet, at der på daværende tidspunkt, i 2018, blev givet mulighed for nyttiggørelse af oprenset sediment fra havnen samt luvside aflejringer, i form at backpassing på op til 100%.

#### Historisk kystudvikling baseret på (DHI, 2023)

Baseret på kystprofilanalyser dokumenteret i (DHI, 2023) for perioden 1960 - 2023 er det på samme vis som i tidligere analyser konkluderet, at der generelt forekommer store udsving på positionen af kystlinjen.

I perioden 1954 – 2023 er det i (DHI, 2023) konstateret, at der langs strækningen ved Kjul strand (ved kystprofil 1490 – 1460) haves en erosion af kystlinjen på op til ca. 1,2 m/år + (en

standardafvigelse på 0,3 – 0,7 m/år). 95%-fraktilen for usikkerhedstillægget kan beregnes som 2 x standardafvigelsen, hvormed den samlede kystlinjeerosion i perioden kan estimeres til ca. 1,8 m/år – 2,6 m/år på strækningen (inkl. usikkerhedstillæg).

Erosionen af vegetationslinjen på strækningen er jf. (DHI, 2023) lidt mindre sammenlignet med kystlinjeerosionen (op til ca. 0,9 m/år + ca. 0,4 m/år i usikkerhedstillæg) – dvs. op til ca. 1,3 m/år inkl. usikkerhedstillæg.

### 5.2.2 Historisk kystudvikling – baseret på satellitfotos

Delft University of Technologies har udviklet et værktøj til visulaisering af kystlinjens historiske udvikling (fremrykning/tilbagerykning) i perioden 1984 – 2016, baseret på satellit-fotos (TUDelft, 2023a). Værktøjet er anvendt til at analysere på kystudviklingen vest- og øst for Hirtshals havn (hhv. opstrøms- og nedstrøms for havnen), se figur 5-5.



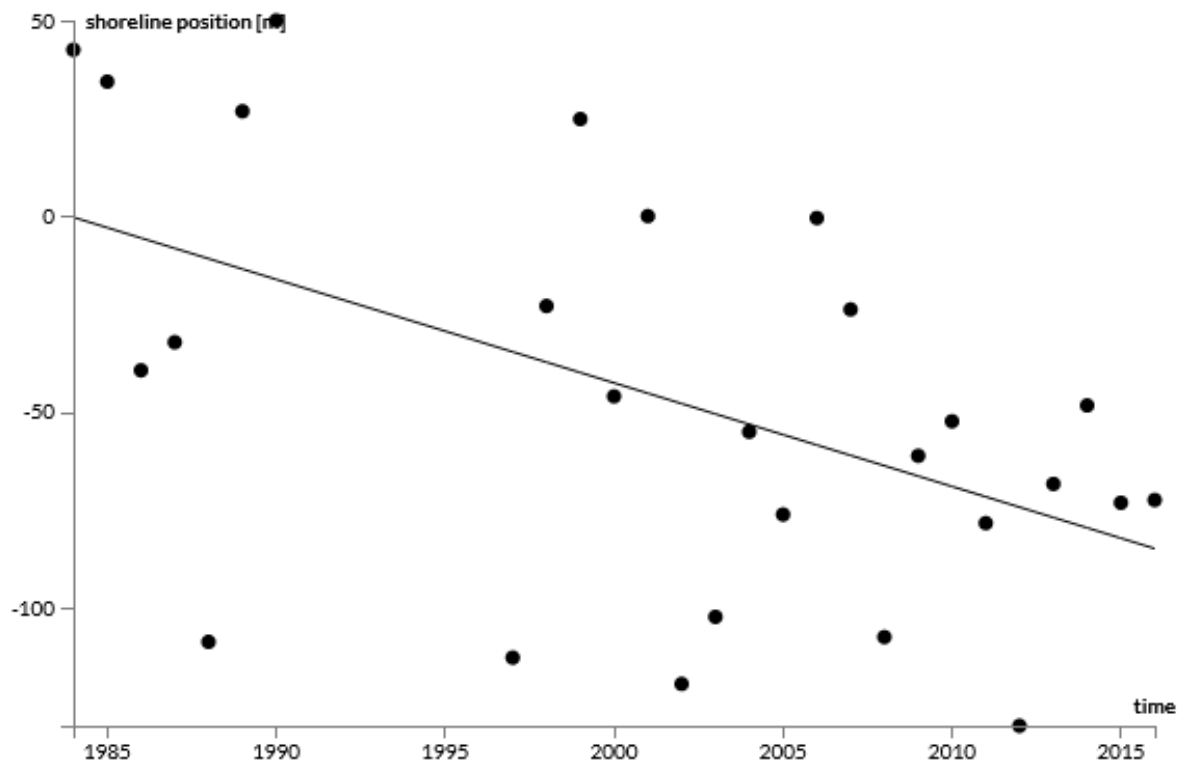
**Figur 5-5: Kystudvikling ved Hirtshals Havn i perioden 1984-2016. Røde linjer markerer tilbagerykning og de grønne linjer markerer fremrykning. Pkt. A -E angiver evaluerede lokaliteter ift. fremrykning/tilbagerykning i perioden 1984 – 2016 via (TUDelft, 2023a).**

Af (TUDelft, 2023a) fremgår det, at der i perioden 1984-2016 er sket fremrykning vest for Hirtshals Havn (opstrøms). Herudover har der været en generel fremrykning af kystlinjen umiddelbart øst for havnen, forventelig pga. den lokalt vestgående netto-transport (nærmere beskrevet i afsnit 4.2).

Længere mod øst haves en vekslende tilbage- og fremrykning, og på den nordvestvendte kystlinje øst for profil nr. 1250 haves generelt en tendens til tilbagerykning. Ved sammenligning imellem figur 5-5 og figur 5-1 ses umiddelbart en forholdsvis god overensstemmelse.

Figur 5-6 viser et eksempel på kystudviklingen i pkt. C jf. markering på figur 5-5. Som det fremgår af figuren, forekommer der generelt store årlige fluktuationer. Bl.a. kan der i pkt. C (figur 5-6) observeres en veksling imellem ca. 50 m fremrykning og 110 m tilbagerykning over relativt korte perioder (få år), hvilket vurderes at skyldes de omtalte kystudbugtninger samt akut erosion. I det pågældende profil er der via satellitfotos (TUDelft, 2023a) estimeret en kysttilbagetrækningsrate på ca. 2,6 m/år med et usikkerhedsinterval på  $\pm 0,9$  m/år.

Det skal nævnes, at kystudviklingen jf. figur 5-6 er et resultat af både kronisk- og akut erosion. Dermed kan variationer i kystbeliggenheden i figurerne delvist skyldes midlertidig akut erosion, som følge af en forudgående stormhændelse.



Figur 5-6: Kystudvikling i perioden 1984-2016 for profil C markeret i figur 5-5. (TUDelft, 2023a)

Fotos fra udvalgte positioner langs strækningen øst for Hirtshals Havn er vist i figur 5-7, figur 5-8 og figur 5-9.



Figur 5-7: Foto taget ved kyststrækning ved stranden i Tversted hvor de stejle skrænter uden bevoksning indikerer, at der har været en signifikant erosion indenfor en kortere tidsperiode.





**Figur 5-8: Foto taget ved kyststrækning ved Kjul strand (ca. svarende til pkt. C i figur 5-5).**



**Figur 5-9: Foto taget umiddelbart øst for Hirtshals Havn (ca. svarende til pkt. D i figur 5-5), hvor bl.a. bevoksning på strandplanet indikerer, at der ikke forekommer kronisk erosion på strækningen.**

#### Vurdering af sedimentation umiddelbart øst for Østmolen baseret på satellitfotos

Efter etableringen af udvidelsen mod øst i 2015 er der observeret tilsanding umiddelbart øst for Østmolen ved Hirtshals Havn. Dette ses bl.a. af sammenligninger af satellitfotos fra hhv. 2015 og 2023 i figur 5-10. Det grønne område tættest ved havnen illustrerer selve depotet mens det grønne område umiddelbart øst herfor (markeret med rød stiplede linje) illustrerer området med kystfremrykning.

Umiddelbart øst for fremrykningsområdet ses en strækning præget af erosion (illustreret med blå). Det er uvist hvorvidt erosionen skyldes en omfordeling af sandet i den umiddelbare nærhed af havnen, eller hvorvidt der er tale om en kyst-tilbagerykning som følge af de naturlige kyst-udbygninger jf. afsnit 5.2. Potentielt kan det også være en kombination heraf.



**Figur 5-10: Illustration af kystfremrykning (grønne områder) og kysterosion (blå områder) umiddelbart øst for Hirtshals Havn. Den røde skravering illustrerer sedimentationen på kysten umiddelbart øst for havnen. (TUDelft, 2023a)**

Sandtransporten ved Hirtshals er, som tidligere nævnt, nettoset-østgående (afsnit 4). Periodevist vil der dog, som følge af vind og bølger fra nord- og østlige -retninger, også forekomme vestgående sandtransport. Tilstedeværelsen af Hirtshals Havn medfører desuden, at området umiddelbart øst for havnen afskærmes mod bølger fra vest, hvorimod kysten stadig er eksponeret for bølger fra nordøstlig retning. Dette kan således betyde, at der indenfor bølge læ-området øst for havnen potentielt skabes en lokal vestgående sandtransport og dermed potentielt en sedimentation umiddelbart øst for havnen. Denne effekt er som nævnt også beskrevet i (DHI, 1994). Hertil vil der dog være et samspil med de lokale østgående sandbølger jf. afsnit 4.2.2, og således er det uvist hvorvidt netto-transporten er vestgående, eller om der lokalt blot er tale om en reduceret netto-østgående transport.

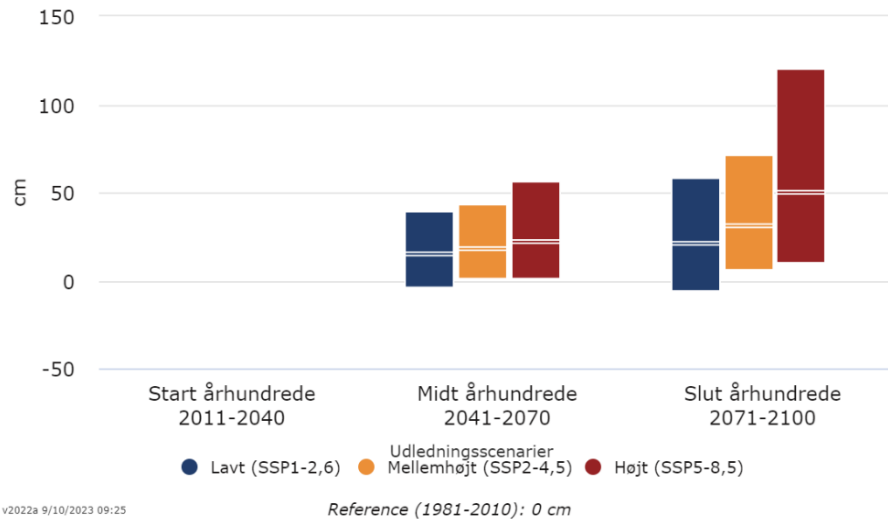
### **5.3 Indflydelse fra klimaændringer på fremtidig kystudvikling**

Øget vandstand som følge af klimaændringer vil medføre, at kysten skal indstille sig i en ny ligevægt, hvilket sker ved en transport af sediment på tværs af kysten, dvs. erosion af strand og klit til aflejring på havbunden.

DMI står bag Klimaatlas (DMI, 2023), som opsummerer prognoser for påvirkningen/ændringerne i det danske klima frem mod midten og slutningen af dette århundrede som følge af klimaændringerne. Prognosen for ændringen af middelvandstanden i området "Skagerraks nordkyst" jf. Klimaatlas (DMI, 2023) er vist i figur 5-11 og i tabel 5-1.

## Ændring i middelvandstand

Skagerrakkyst nordlig, hele året



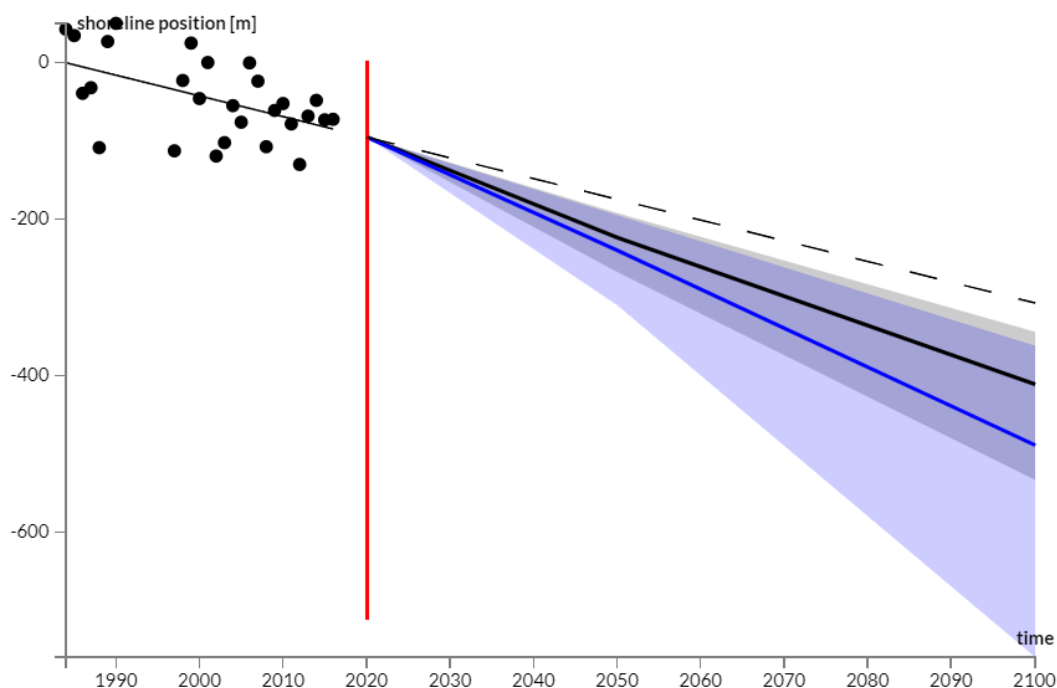
Figur 5-11: Ændring af middelvandstanden for Skagerraks nordkyst baseret på klimascenarie SSP1-2,6, SSP2-4,5, SSP5-8,5. DMI klimaatlas oktober 2023. Niveauerne er inklusive hensynet til landhævninger. (DMI, 2023)

Tablet 5-1: Oversigt over prognoser for regionale ændringer af middelvandstanden inkl. landhævninger, som følge af klimaændringer. Data er for Skagerrakkyst nordlig. Referencevandstanden er middelvandstanden i 1981-2010. (DMI, 2023)

Scenarie	Midt århundrede 2041-2070		Slut århundrede 2071-2100	
	Ændring i middelvandstand	Usikkerhed	Ændring i middelvandstand	Usikkerhed
Klimascenarie SSP1-2,6	+15 cm	-4 cm -> 39 cm	+21 cm	-6 cm -> 58 cm
Klimascenarie SSP2-4,5	+18 cm	1 cm -> 43 cm	+31 cm	+6 cm -> 71 cm
Klimascenarie SSP5-8,5	+22 cm	1 cm -> 56 cm	+51 cm	+14 cm -> 117 cm

Klimascenarie SSP2-4,5 anvendes ofte, hvis planlægningshorisonten er kort eller hvis der kun er begrænsede krav til robustheden, mens SSP5-8,5 anvendes ved en lang planlægningshorisont kombineret med høje krav til robustheden.

Et estimat af den fremtidige kystlinjeerosion fra (TUDelft, 2023b) er vist i figur 5-12. Stiplet sort linje i figuren viser ekstrapolation af den historiske udvikling. Sort linje viser estimeret fremtidig kystlinjeerosion for RCP4.5 og blå linje viser estimeret fremtidig kystlinjeudvikling for klimascenarie RCP 8.5. Klimascenarierne RCP 4.5 og RCP 8.5 er tidligere udgaver af klimascenarier jf. IPCC – som umiddelbart er svarende til klimascenarie SSP2-4,5 og SSP5-8,5. Som det fremgår af figuren, er den fremtidige estimerede kystlinjeerosion i stor grad afhængig af klimascenariet.



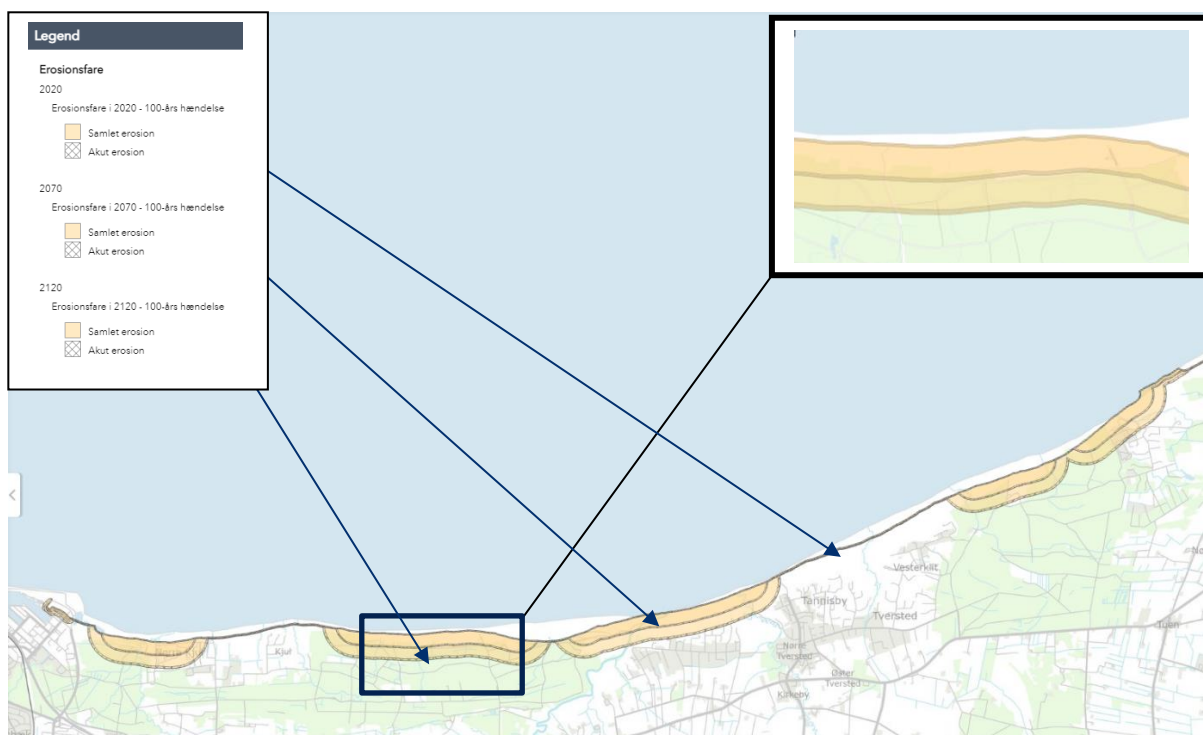
**Figur 5-12: Historisk og estimeret fremtidig kystudvikling for profil C markeret i figur 5-5. Stiplet sort linje viser ekstrapolering af den historiske udvikling. Sort linje viser estimeret fremtidig kystlinjeerosion for RCP4.5 og blå linje viser estimeret fremtidig kystlinjeudvikling for klimascenarie RCP 8.5, (TUDelft, 2023b)**

Kystdirektoratet står bag værktøjet Kystplanlægger (Kystdirektoratet, 2022a), som er et værktøj udarbejdet til at give en grov vurdering af erosionsforholdene for tre tidsperspektiver i år 2020, 2070 og 2120 under hensyntagen til påvirkningen fra klimaændringerne. Vurderingerne tager udgangspunkt i klimascenarie RCP8.5 (som er en tidligere version af det opdaterede klimascenarie SSP5-8,5).

For strækningen øst for Hirtshals Havn er prognoserne for kystudviklingen skitseret i figur 5-13. Heraf fremgår det, at niveauet for akut erosion stort set er uændret til trods for klimaændringer, hvilket skyldes, at det generelt ikke vurderes, at klimaændringerne medfører en signifikant ændring af vind- og stormforhold.

Den estimerede øgede kysttilbagerykning som følge af kronisk erosion pga. klimaændringer (dvs. tillæg til nuværende kroniske erosion) er jf. figur 5-13 ca. 200 m i 2070 og ca. 400 m i år 2120, hvilket svarer nogenlunde til estimaterne for kystlinjeerosion i figur 5-12 fra (TUDelft, 2023b). Områderne markeret som udsat for kronisk erosion i fremtiden grundet ændringer i vandstandsforholdene er ca. de samme som er markeret som erosionsstrækninger i figur 5-1.





**Figur 5-13: Kystudvikling som følge af prognoserne for klimaændringernes påvirkning af middelvandstanden for en 100-års hændelse i hhv. 2020, 2070 og 2120. Kortet er baseret på Kystplanlægger version 2022. Data i Kystplanlægger opdateres dog løbende. (Kystdirektoratet, 2022a)**

Indflydelse på kysterosion fra klimaændringer er i (DMI, 2023) vurderet til ca. 0,3 m/år – dvs. væsentligt mindre end estimeret baseret på Kystplanlægger i (Kystdirektoratet, 2022a). Forskellen kan formentlig skyldes forskelle i klimascenarier – og derved forskelle i forventet vandstandsstigninger. Desuden er estimerer for erosion som følge af klimaændringer behæftet med væsentlige usikkerheder, pga. usikkerheder knyttet til vandstandsstigningen, samt usikkerheder ift. kystprofilet.

#### 5.4 Opsummering – kystudvikling for nuværende forhold

Til opsummering er følgende konkluderet vedr. kystudvikling ved Hirtshals Havn for den nuværende udformning af havnen:

- Jf. (Kystdirektoratet, 2022b) forekommer der vekslende kronisk tilbagerykning og fremrykning på kysten umiddelbart øst for Hirtshals Havn. Dette vurderes delvist at skyldes fænomenet "kystudbugtninger", som beskrevet i afsnit 4. Pga. tilstedeværelsen af kystudbugtningerne, der på samme vis som havbølger har en bølgelængde samt en vandringshastighed, kan de specifikke strækninger med hhv. tilbagerykning og fremrykning være vekslende. Således kan der i en periode (en vis årrække) opleves tilbagerykning på en strækning, hvorefter der kommer en periode med fremrykning. Fænomenet skyldes kombinationen af kyststrækningens orientering og den dominerende bølgeretning.
- Jf. (Kystdirektoratet, 2022b) kan der generelt på kysten ved Hirtshals forventes en "meget stor" akut erosion ifm. storm. Den akutte erosion vil hovedsageligt forekomme i vinterperioden og vil være særdeles synlig efter storm.

- I (DHI, 1994) er det konstateret, at der forekom erosion af kystlinjen på gennemsnitlig 4,4 m/år i perioden 1977 – 1991 og gennemsnitlig erosion på 2,4 m/år på klitskrænten på strækningen umiddelbart øst for Hirtshals Havn.
- Baseret på analyserne af luftfotos, kystprofilmålinger og kystinspektionen er det i (DHI, 2013) konkluderet at kystlinjeerosionen umiddelbart øst for Hirtshals Havn ved Kjul strand er ca. 1 – 2 m/år.
- I (Niras, 2019) er det, baseret på kystlinjeanalyse, konkluderet, at kysten øst for Hirtshals Havn generelt er ustabil og nogle steder rykker frem og nogle steder tilbage med en hastighed på helt op til ca. 10 m/år. Ved Kjul strand er der i (Niras, 2019) konstateret en erosion på ca. 5 – 6 m/år i perioden 1999 – 2018.
- I (Kystdirektoratet, 2018) er det konkluderet, at etableringen af Hirtshals Havn har været årsag til en fremrykning af kystskrænten umiddelbart øst for havnen. På strækningen ved Kjul forekommer der store variationer af skræntens beliggenhed, men set over en lang periode er der ikke sket en ændring af kystlinjen. Ud fra disse betragtninger er det i (Kystdirektoratet, 2018) anbefalet, at der på daværende tidspunkt, i år 2018, blev givet mulighed for nyttiggørelse af oprenset sediment fra havnen samt luvside aflejringer, i form af "backpassing" på op til 100%.
- I (DHI, 2013) er det konkluderet, at havnens indflydelsesområde på kystudviklingen begrænser sig til indtil linje 1450 (svarende til ca. 4 – 5 km fra havnen).
- Analyse af kystudvikling baseret på satellitfotos viser generelt store årlige fluktuationer i kystudviklingen. Bl.a. kan der på den nordvendte kyst umiddelbart øst for Hirtshals Havn observeres vekslende imellem stor fremrykning og tilbagerykning over relativt korte perioder, hvilket forventes at skyldes kystudbugtninger. I (DHI, 2013) er det konkluderet, at kystudbugtningernes udstrækning (amplitude) på tværs kysten umiddelbart øst for havnen er ca. 100 – 250 m. Amplituden reduceres i større afstand til havnen, hvor kysten er orienteret mere mod nordvest.
- I perioden 1954 – 2023 er det i (DHI, 2023) konstateret, at der langs strækningen ved Kjul strand haves en erosion af kystlinjen på op til ca. 1,2 m/år, med en usikkerhed (95%-fraktil) på ca. 0,6 – 1,4 m, dvs. potentielt op til ca. 1,8 – 2,6 m/år for de evaluerede kystprofiler. Dette stemmer relativt godt overens med vurderingerne i (DHI, 1994) og (DHI, 2013), men er mindre end den vurderede kystlinjetilbagegykning i (Niras, 2019).
- Erosionen af vegetationslinjen er jf. (DHI, 2023) lidt mindre sammenlignet med kystlinjen (op til ca. 0,9 m/år + ca. 0,4 m/år i usikkerhedstillæg) – dvs. op til ca. 1,3 m/år inkl. usikkerhedstillæg (95%-fraktil) – for de evaluerede kystprofiler.
- Analyser via satellitfotos fra (TUDelft, 2023a) viser generelt fluktuerende frem- og tilbagerykning på kystlinjen øst for Hirtshals Havn. I et område ca. 2 km øst for havnen viser tendensen en tilbagetrækningsrate på 2,6 m/år ±0,9 m/år.
- Som følge af klimaændringer kan der generelt forventes en øget kysttilbagegykning på kysten øst for Hirtshals Havn, som følge af kronisk erosion (dvs. tillæg til nuværende kroniske erosion), på op til ca. 350-400 m i år 2120. Indflydelse på kysterrosion fra

klimaændringer er derimod i (DMI, 2023) vurderet til ca. 0,3 m/år – dvs. væsentligt mindre end estimeret baseret på Kystplanlægger i (Kystdirektoratet, 2022a).

## 6. VURDERING AF INDFLYDELSE FRA UDVIDELSE AF HIRTSHALS HAVN PÅ SEDIMENTBYPASS OG KYSTUDVIKLING

I det følgende analyseres på havneudvidelsens forventede indflydelse på sedimentbypass samt kystudvikling. Analysen baseres på den opnåede viden om de naturlige bidrag til kystudviklingen samt på modelberegninger af påvirkningen fra havneudvidelsen gennemført i (Rambøll, 2024b) samt (DHI, 2023).

Under nuværende forhold forekommer der (jf. afsnit 4) et tab på ca. 350.000 m<sup>3</sup>/år øst for Hirtshals Havn (under forudsætning af nuværende nyttiggørelses- og bypassforhold). Udstrækningen af påvirkningen fra Hirtshals Havn på kysten mod øst er i (DHI, 2023) vurderet til ca. 0 – 5 km. Dog løber sandet fra den anvendte klappblads først ind på kysten igen efter 6 – 8 km.

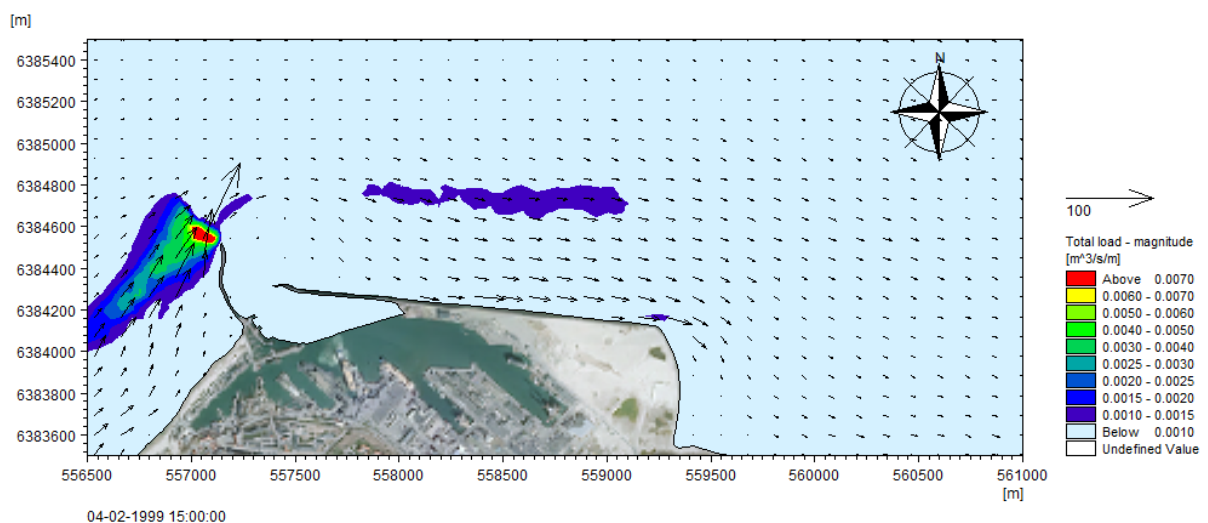
Såfremt det naturlige bypass forbedres fremover sammenlignet med nuværende forhold, eller hvis der fremover gennemføres øget aktiv bypass af oprenset sediment i stedet for nyttiggørelse eller klappning offshore, kan der opnås en reduceret påvirkning på kysten øst for Hirtshals Havn.

Estimeret sandbypass forbi havnen under fremtidige forhold beskrives videre i afsnit 6.1.

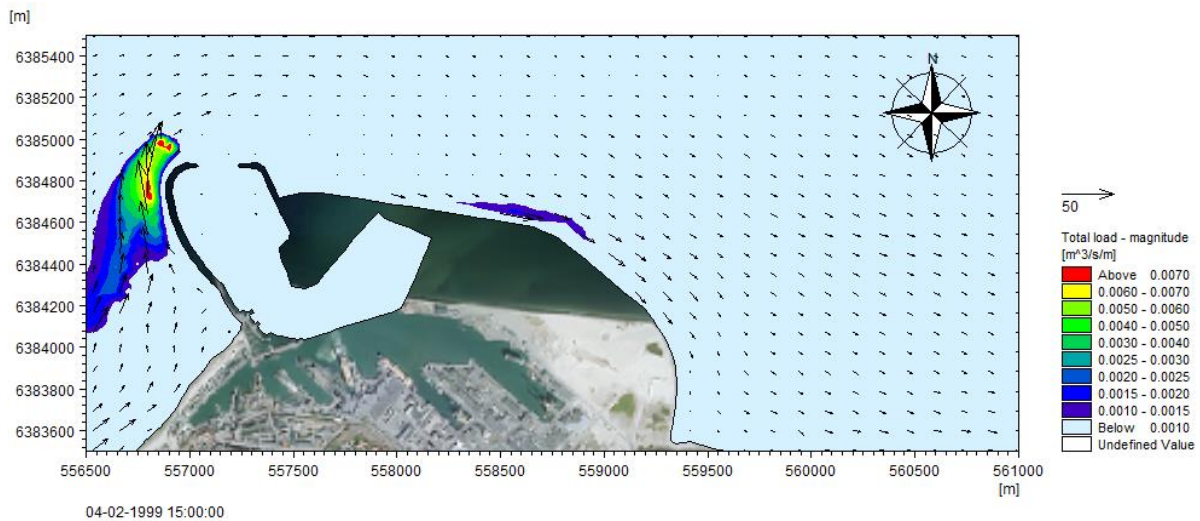
Den potentielt øgede lokale læ-effekt fra det fremtidige havnelayout (jf. afsnit 5.2.2) vurderes nærmere i afsnit 6.2.

### 6.1 Analyse af indvirkning fra fremtidige planlagte havneudvidelse på det naturlige bypass baseret på modelsimulering

Den nuværende udformning af Hirtshals Havn medfører, at sedimenttransportkapaciteten øges op langs Vestmolen og op mod indsejlingen, hvorefter der sker et signifikant fald i transportkapaciteten hen over indsejlingen og umiddelbart øst for indsejlingen, se figur 6-1. Dette ændres jf. figur 6-2 ikke betydeligt ved en udvidelse og det vurderes dermed, at en udvidelse af Hirtshals Havn ikke påvirker det naturlige bypass signifikant.

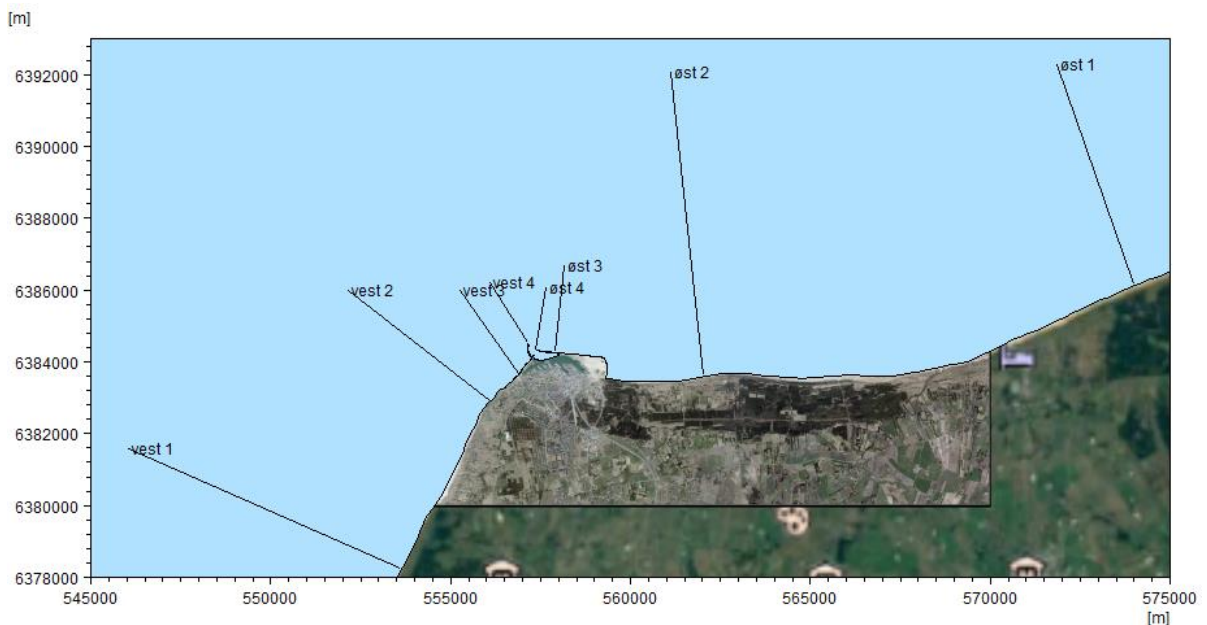


Figur 6-1: Transportkapacitet under peak for en storm med bølger fra vestlig retning for nuværende forhold. Baggrundsfoto er fra (Google Earth, 2022)



**Figur 6-2: Transportkapacitet under peak for en storm med bølger fra vestlig retning for den udvidede Hirtshals Havn. Baggrundsfoto er fra (Google Earth, 2022)**

Transportkapaciteterne er ligeledes sammenlignet i udvalgte snit for hhv. den nuværende og den fremtidige udformning af Hirtshals Havn ift. at vurdere om en udvidelse af Hirtshals Havn vil påvirke hhv. den lokale- og/eller regionale sedimenttransport. Placeringen af snittene er vist i figur 6-3 og ændringen i transportkapacitet er vist i tabel 6-1. Ændringerne er baseret på sammenligning af transportkapaciteten gennem snittene for udvalgte perioder.



**Figur 6-3: Markering af snit hhv. vest og øst for indsejlingen til Hirtshals Havn, hvor transportkapaciteten er sammenlignet for hhv. den nuværende og den udvidede Hirtshals Havn. Placeringen og den søværts udstrækning for snittene er ens for hhv. nuværende og fremtidige forhold. Snit øst 4 og vest 4 slutter ved molehovederne. Baggrundsfoto er fra (Google Earth, 2022).**

**Tabel 6-1: Ændring af transportkapacitet i udvalgte snit for udvalgte vejrscenarier op- og nedstrøms Hirtshals Havn, som følge af en udvidelse.**

	Vest 1	Vest 2	Vest 3	Vest 4	Øst 4	Øst 3	Øst 2	Øst 1
<b>Ændring</b>	0 %	-7 %	-16 %	-36 %	-23 %	-52 %	-8 %	0 %

Som det fremgår af figur 6-2, er transportkapaciteten generelt lav i f.eks. snit Øst 4 og Øst 3, og dermed vil små ændringer i transportkapaciteten medføre en høj procentvis ændring.

Reduktionen i sedimenttransportkapaciteten hhv. vest og øst for indsejlingen til Hirtshals Havn som følge af den planlagte udvidelse kan medføre lokal sedimentation. I perioden hvor sedimentationen forekommer ved Vestmolen kan det forventes, at aflejringerne i indsejlingen reduceres sammenlignet med nuværende forhold. Når vanddybden er reduceret til en ny ligevægtstilstand, vil sedimenttransport-kapaciteten dog formentligt konvergere mod nuværende forhold, hvormed indflydelsen fra havneudvidelsen vurderes at være midlertidig. Det samme blev jf. (DHI, 1994) konstateret ifm. udbygningen af Vestmolen i 1973 og samme konklusioner er draget i (DHI, 2023). I (DHI, 2023) er det desuden yderligere estimeret, at reduktionen i det naturlige bypass i den midlertidige periode, hvor vanddybderne skal indstille sig, er omkring 200.000 m<sup>3</sup>/år og at perioden kan forventes at vare ca. omkring 30 år. Herefter vil den naturlige sedimenttransport være i samme størrelsesorden som i dag.

Reduceret transportkapacitet forbi Hirtshals Havn kan medføre, at der tilføres en reduceret mængde sand til strækningen øst for havnen, hvilket potentielt kan medføre en øget kysttilbagetrækning. Det samme er konkluderet i (DHI, 2023), hvor det er vurderet, at erosionen af kyst-/vegetationslinjen øges til det dobbelte i overgangsfasen indtil vanddybderne har nået den nye ligevægt, hvorefter det naturlige bypass genoprettes. Dette vil således betyde erosion af hhv. kystlinjen og vegetationslinjen på op til hhv. ca. 5,2 m/år og 2,6 m/år, svarende til et sedimentunderskud på i alt ca. 550.000 m<sup>3</sup>/år øst for Hirtshals Havn (dvs. ca. 350.000 m<sup>3</sup>/år for eksisterende situation + ekstra underskud på ca. 200.000 m<sup>3</sup>/år for den fremtidige situation). Dette er med forudsætning om at eksisterende bypasspraksis videreføres.

#### **6.1.1 Potentielle indvirkninger fra havneudvidelse på lokale vanddybder omkring Hirtshals Havn**

Jf. (DHI, 2023) opstår det øgede sedimentunderskud øst for havnen som følge af sedimentation ved hhv. Vestmolen samt Nordmolen. Således forventes det jf. (DHI, 2023), at der efter en midlertidig periode vil forekomme reduceret vanddybde ved Vestmolen og Nordmolen. Potentielt kan der dog i overgangsfasen, indtil sedimentbypassen omkring havnen har indstillet sig, opstå en midlertidig forøgelse af vanddybden i det lavvandede område ud for Nordmolen (jf. afsnit 4.2). Hertil skal det nævnes, at den aktuelle naturlige udvikling af vanddybder ud for Nordmolen, specielt i overgangsperioden, er behæftet med stor usikkerhed (dvs. omfang og varighed af den potentielle midlertidige dybdeforøgelse – samt hvorvidt en potentiel forøgelse af vanddybden forekommer ud for Nordmolen eller umiddelbart øst for havnen eller i andre områder).

Det er nødvendigt at Hirtshals Havn, ifm. detailprojektering af moler eller specificering i udbud, tager stilling til strategien for hvordan denne potentielle vanddybdeforøgelse, som potentielt i en midlertidig periode kan bevirke til øget bølgehøjde pga. dybdebegrænsning ved bl.a. Nordmolen, specifikt håndteres. Dette er nærmere beskrevet i (Rambøll, 2024a) og (Rambøll, 2024c).

En potentiel strategi ifm. detailprojektering af moler / udbud kan være at acceptere øget bølgebelastning på molerne i en periode indtil vanddybden indstiller sig, hvilket kan medføre øget beskadigelse/overskyl sammenlignet med det forudsatte/ønskede, eller alternativt kan havnen vælge at øge robustheden af molerne (bygge dem kraftigere ift. at tage højde for usikkerheder i den midlertidige periode), så der i den midlertidige periode med en potentiel vanddybdeforøgelse omkring havnen ikke opstår øget beskadigelse på molerne og/eller øget bølgeoverskyl. En anden strategi kan være at der foretages løbende monitorering af vanddybder omkring molerne, specielt i perioden umiddelbart efter etablering af havneudvidelsen, og at der hertil gennemføres en aktiv regulering af vanddybder, ved udlægning af sand, hvis dette viser sig nødvendigt, med henblik på

at undgå øget bølgelastning i perioden. Den sidstnævnte strategi, monitorering af vanddybder og potentiel aktiv regulering af vanddybder ved udlægning af sand, hvis dette viser sig nødvendigt, er forudsat/antaget ifm. skitseprojekteringen i (Rambøll, 2024c) samt ifm. estimering af statistiske bølgeforhold i (Rambøll, 2024a) som et eksempel på hvordan den potentielle dybdeforøgelse kan håndteres. Dermed er der i skitseprojekteringen i (Rambøll, 2024c) ikke kompenseret for potentielle øgede bølgehøjder, samt taget højde for alle usikkerheder relateret hertil, men dette bør genovervejes af Hirtshals Havn ifm. den videre proces. Som nævnt er det op til Hirtshals Havn at afgøre hvordan usikkerheder og risici ift. vanddybder håndteres ifm. detailprojektering af moler (samt udbud), dvs. valg af strategi, da dette i sidste ende er et spørgsmål om økonomi/risici. Dermed anbefales det, at antagede forhold og strategier i skitseprojektet ikke overføres direkte til den videre proces (detailprojekt/udbud) uden at Hirtshals Havn genovervejer risici som følge af usikkerheder.

Således kan valg af strategi ift. at undgå øget bølgebelastning på moler, dvs. hvorvidt der foretages aktiv dybderegulering eller ej, være afgørende for udviklingen af lokale vanddybder omkring havnen i overgangsperioden.

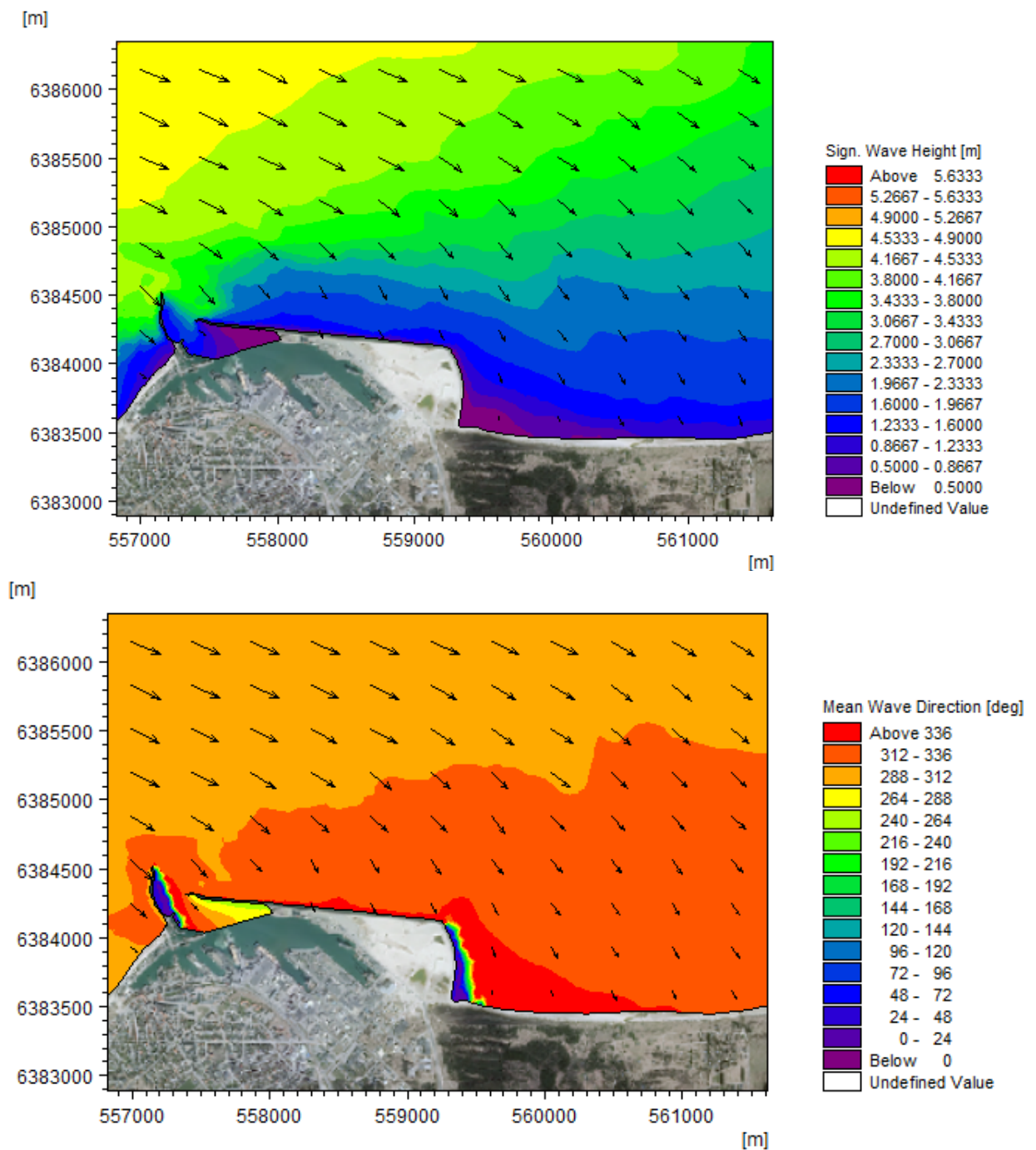
## **6.2 Analyse af læ-sidevirkning fra fremtidige planlagte havneudvidelse**

Som nævnt i afsnit 5.2.2 kan sedimentationen umiddelbart øst for Hirtshals Havn skyldes den lokale læ-virkning fra Hirtshals Havn ift. bølger fra vestlige retninger. Ved en forlængelse af Vestmolen, som det fremtidige havnelayout medfører, vurderes at læ-virkningen at øges, hvilket potentielt kan medføre at sedimentationen forøges lokalt. Dette vurderes nærmere i det følgende.

Figur 6-4 og figur 6-5 viser bølgeforhold ( $H_{m0}$  og retning) i umiddelbar nærhed af Hirtshals Havn for tilfælde med hhv. nuværende - og fremtidige havnelayout. Bølgeretningen offshore er ca.  $290^\circ N$ , men som det fremgår af figurerne, ændrer bølgerne retning tæt ved havnen, hvilket skyldes bølgerrefraktion på lavt vand. På østsiden af havnen ændrer bølgerne retning til stort set vinkelret på kysten, hvilket skyldes en kombination af refraktion pga. reduceret vanddybde (og forholdsvis kystparallelle dybdekanturer) samt diffraktion pga. tilstedeværelsen af moler.

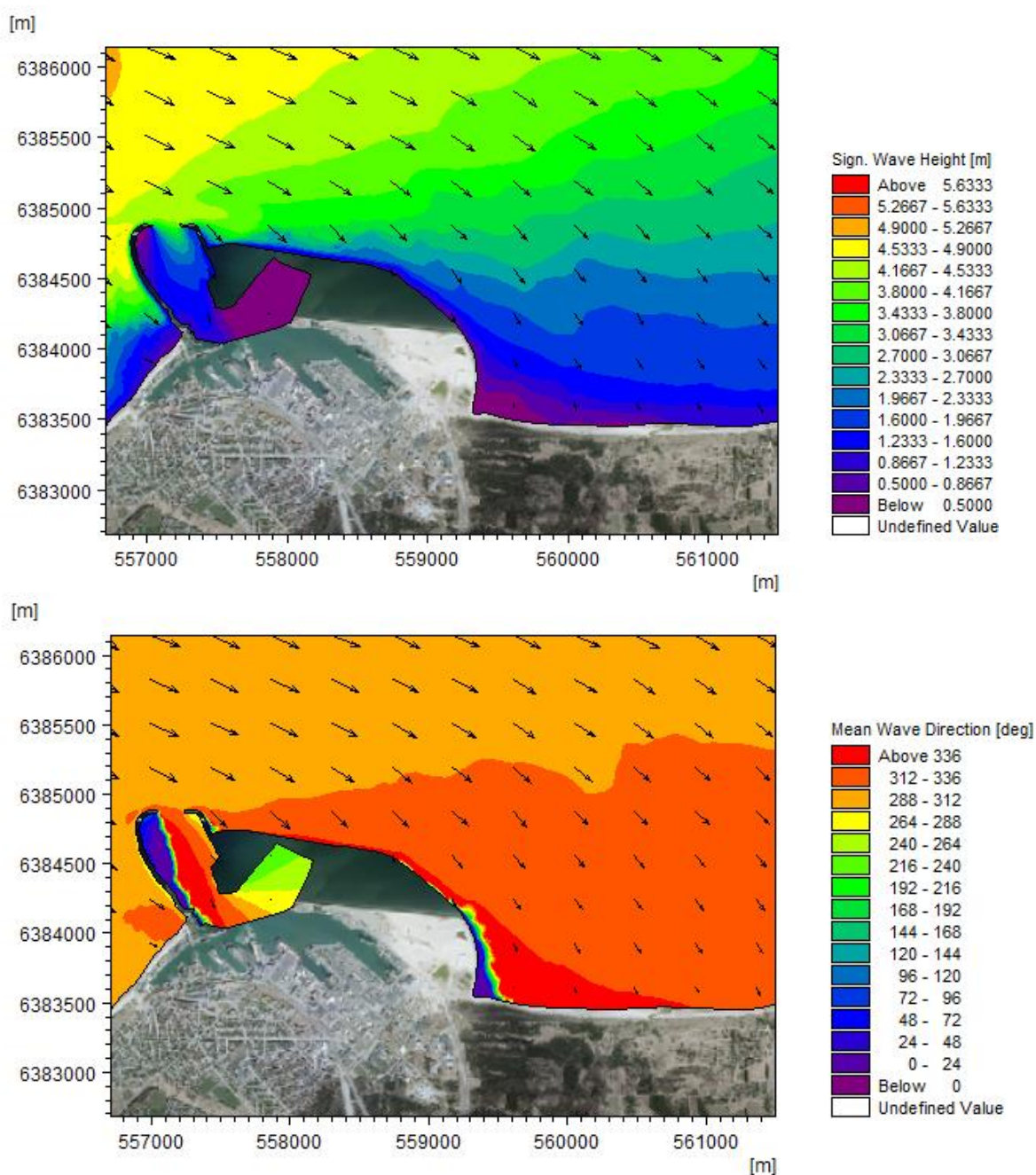
Ved sammenligning af figur 6-4 og figur 6-5 ses der umiddelbart kun relativt små forskelle i bølgehøjde-/retning samt udstrækningen af læ-området på østsiden af havnen for eksisterende- og fremtidige havnelayout. Således vil sedimenttransportkapaciteten for den givne situation forventeligt også være relativt sammenlignelig for hhv. eksisterende- og fremtidige forhold. Det kan dog ikke udelukkes, at der helt lokalt øst for havnen kan opstå en yderligere kystfremrykning som følge af en havneudvidelse.





Figur 6-4: Bølgeførhold  $H_{m0}$  (øverst) og retning (nederst) under en typisk storm fra vestnordvest for eksisterende havnelayout. Baggrundsfoto er fra (Google Earth, 2022).





Figur 6-5: Bølgeførhold  $H_{m0}$  (øverst) og retning (nederst) under en typisk storm fra vestnordvest for fremtidige planlagte havnelayout. Baggrundsfoto er fra (Google Earth, 2022).

### 6.3 Opsummering – kystudvikling for fremtidige situation

Konklusioner ift. vurdering af indflydelse fra udvidelsen af Hirtshals havn på sedimentbypass og kystudvikling opsummeres i det følgende:

- Reduktionen i sedimenttransportkapaciteten hhv. vest og øst for indsejlingen til Hirtshals Havn som følge af den planlagte udvidelse kan medføre lokal sedimentation. I perioden hvor sedimentationen forekommer ved Vestmolen kan det forventes, at aflejringerne i indsejlingen reduceres sammenlignet med nuværende forhold. Når vanddybden er reduceret til en ny ligevægtstilstand, vil sedimenttransport-kapaciteten dog formentligt konvergere mod nuværende forhold, hvormed indflydelsen fra havneudvidelsen vurderes at være midlertidig.

- I (DHI, 2023), hvor det er vurderet, at erosionen af kyst-/vegetationslinjen øges til det dobbelte i overgangsfasen indtil vanddybderne har nået den nye ligevægt, hvorefter det naturlige bypass genoprettes. Dette vil således betyde erosion af hhv. kystlinjen og vegetationslinjen på op til hhv. ca. 5,2 m/år og 2,6 m/år, svarende til et sedimentunderskud på i alt ca. 550.000 m<sup>3</sup>/år øst for Hirtshals Havn (dvs. ca. 350.000 m<sup>3</sup>/år for eksisterende situation + ekstra underskud på ca. 200.000 m<sup>3</sup>/år for den fremtidige situation). Dette er med udgangspunkt i eksisterende bypasspraksis.
- Sedimentationen umiddelbart øst for Hirtshals Havn kan skyldes den lokale læ-virkning fra Hirtshals Havn ift. bølger fra vestlige retninger. Ved en forlængelse af Vestmolen, som det fremtidige havnelayout medfører, vurderes det at læ-virkningen øges, hvilket potentielt kan medføre at sedimentationen forøges lokalt.

## REFERENCER

- A1. (2021). *Tegning af havneudvidelse*.
- DHI. (1994). *Kysten nordøst for Hirtshals, kystudvikling, sedimenttransport og strandfodring*.
- DHI. (2000a). *Bølgestatistikker for Vestkysten*.
- DHI. (2000b). *Sedimentbudget Vestkysten*.
- DHI. (2001). *Redegørelse for planlagte kystfodringsprojekter udfør Fjaltring i 2002 og ved Årgab i 2003*.
- DHI. (2013). *Hirtshals Havn, virkning på kysten af inddæmning*.
- DHI. (2023). *Sediment budget omkring Hirtshals Havn og effekten af havneudvidelsen (foreløbig udgave 13-12-2023)*.
- DMI. (2023). Hentet fra <https://www.dmi.dk/klima-atlas/data-i-klima-atlas/>
- Google Earth. (2022).
- Kystdirektoratet. (1999). *Sedimentanalyse Vestkysten*.
- Kystdirektoratet. (2000). *Sedimentbudget Vestkysten*.
- Kystdirektoratet. (2018). *Analyse af sedimenttransport ved Hirtshals havn*.
- Kystdirektoratet. (2022a). Hentet fra <https://gis.nst.dk/portal/apps/webappviewer/index.html?id=7d399b34b9ef42d7895569d0ccc0046b>
- Kystdirektoratet. (2022b). *Kystatlas*. Hentet fra [www.kystatlas.dk](http://www.kystatlas.dk)
- Kystinspektoret. (1993). *Hirtshals – Gl. Skagen, Kystteknisk undersøgelse delrapport*.
- Niras. (2019). *Kystplan for Hjørring Kommune - Kystteknisk rapport*.
- Rambøll. (2024a). *Hirtshals Havn - Udvidelse mod nord. Statistiske Bølgeforhold*.
- Rambøll. (2024b). *Hirtshals Havn - Udvidelse mod Nord. Modelling af sedimenttransport*.
- Rambøll. (2024c). *Hirtshals Havn - Udvidelse mod nord. Skitsedesign - nye dækværker*.
- TU Delft. (2023a). Hentet fra <https://aqua-monitor.appspot.com/?datasets=shoreline>
- TU Delft. (2023b). Hentet fra <https://aqua-monitor.appspot.com/?datasets=shoreline,future-shoreline>