

BILAG 1

HYDRAULIK OG SEDIMENTATION



1. EKSISTERENDE FORHOLD

I bilaget beskrives de eksisterende og fremtidige forhold ift. hydraulik og kystmorfologi langs strækningen Lodbjerg – Nymindegab, hvilket bl.a. udgør en vigtig del af grundlaget for vurderingen af miljøpåvirkningerne fra gennemførelsen af projektet for især kapitel 10 *Landskab*, kapitel 16 *Vand* kapitel 18-21 om *Marin bundfauna*, *Fisk*, *Havpattedyr* og *Havfugle*.

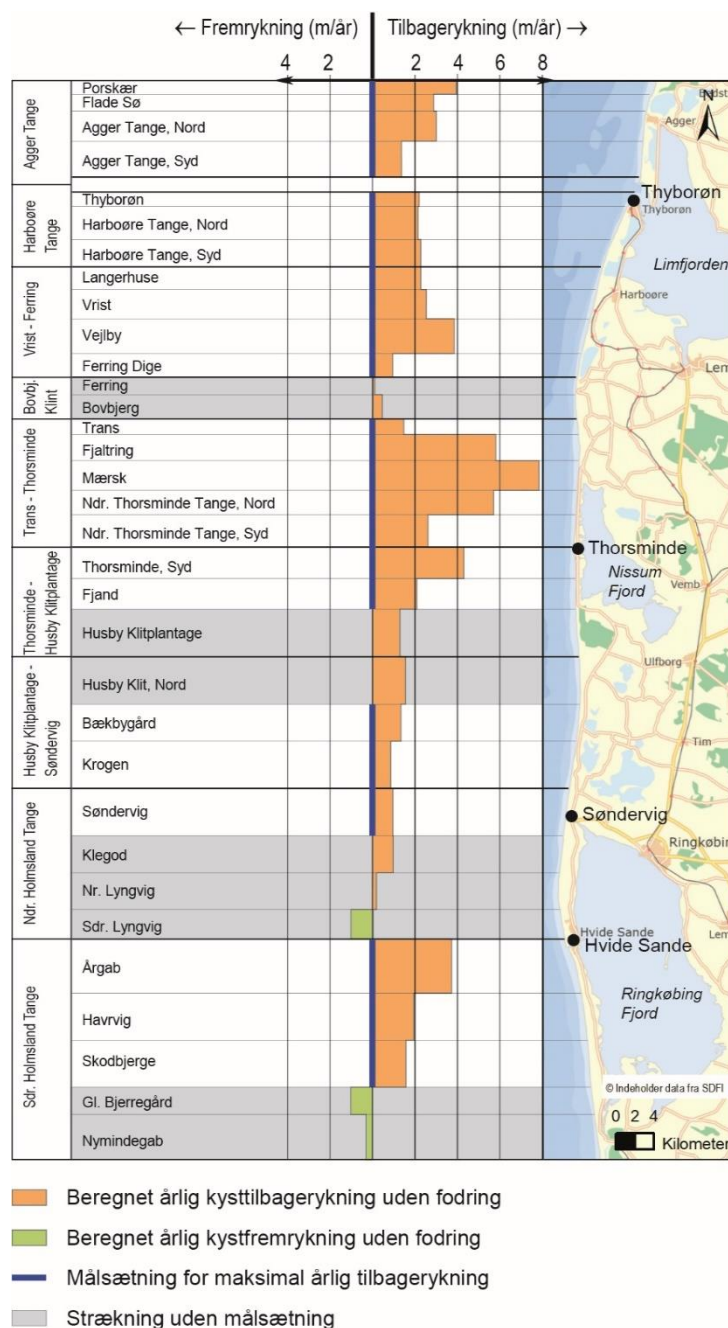
1.1 Eksisterende forhold

Beskrivelsen af de eksisterende forhold gives i relation til følgende relevante fysiske forhold:

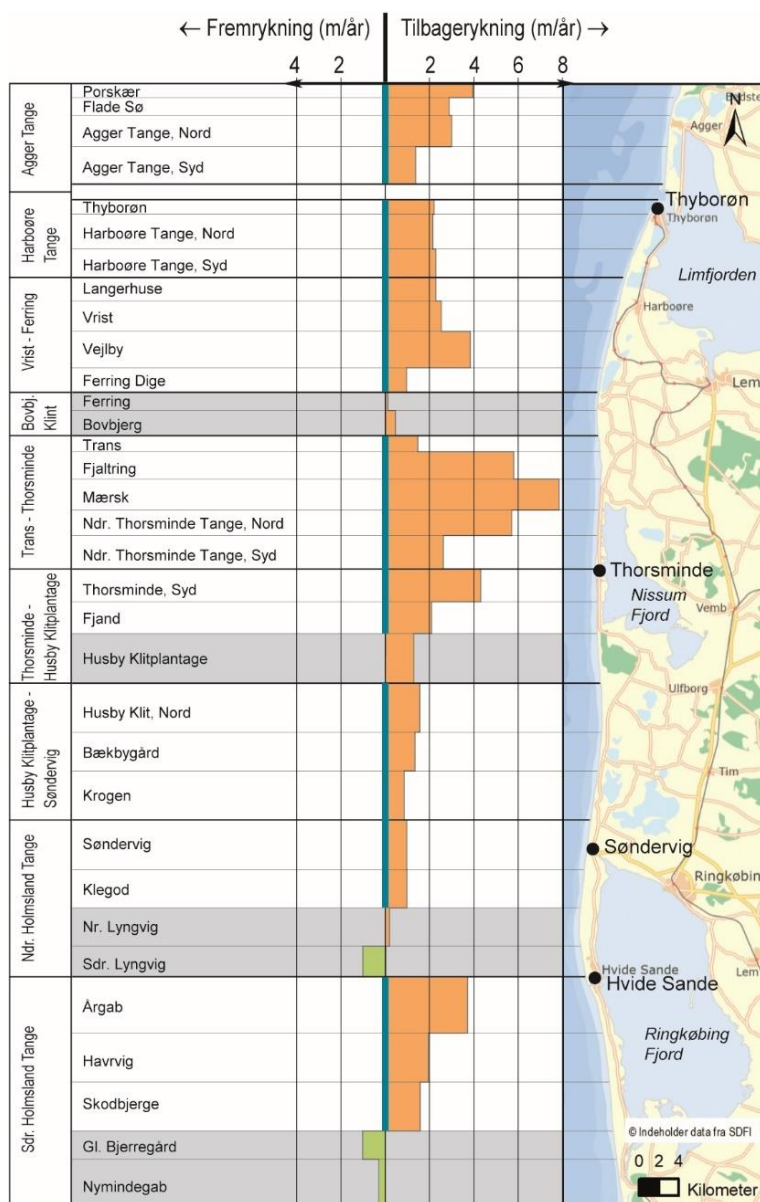
1. Indledende beskrivelse af strækningen
2. Vind/bølgeforhold
3. Vandstandsforhold
4. Strømforhold
5. Sedimentforhold
6. Sedimenttransport og kystmorfologi
7. Sedimentation/bypass
8. Naturlig koncentration af suspenderet sediment

1.2 Indledende beskrivelse af strækningen Lodbjerg - Nymindegab

Den 116 km lange kyststrækning mellem Lodbjerg og Nymindegab er på næsten hele strækningen en tilbagerykningsskyst. Uden kystbeskyttelse vil den gennemsnitlige årlige tilbagerykning på størstedelen af strækningen ligge på 1-4 meter om året og helt op til 6-8 meter om året på nogle strækninger nord for Thorsminde. Den estimerede årlige erosionsrate langs strækningen Lodbjerg – Nymindegab, uden sandfodring, og inklusive effekten fra den hårde kystbeskyttelse på strækningen, er illustreret i hhv. figur 1-1 og figur 1-2 for perioderne 2025 – 29 samt 2030 – 2039.



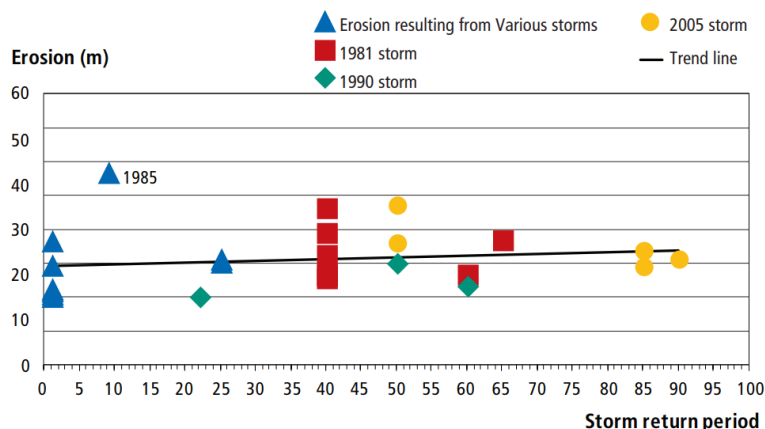
Figur 1-1. Målsætning for fællesaftalen 2025-29 (dvs. den første af de tre aftaleperioder i den 15-årige periode). Hovedstrækninger er angivet længst til venstre med lodret tekst, mens delstrækninger er angivet ud for hovedstrækninger med vandret tekst.



- Beregnet årlig kysttilbagerykning uden fodring
- Beregnet årlig kystfremrykning uden fodring
- Målsætning for maksimal årlig tilbagerykning
- Strækning uden målsætning

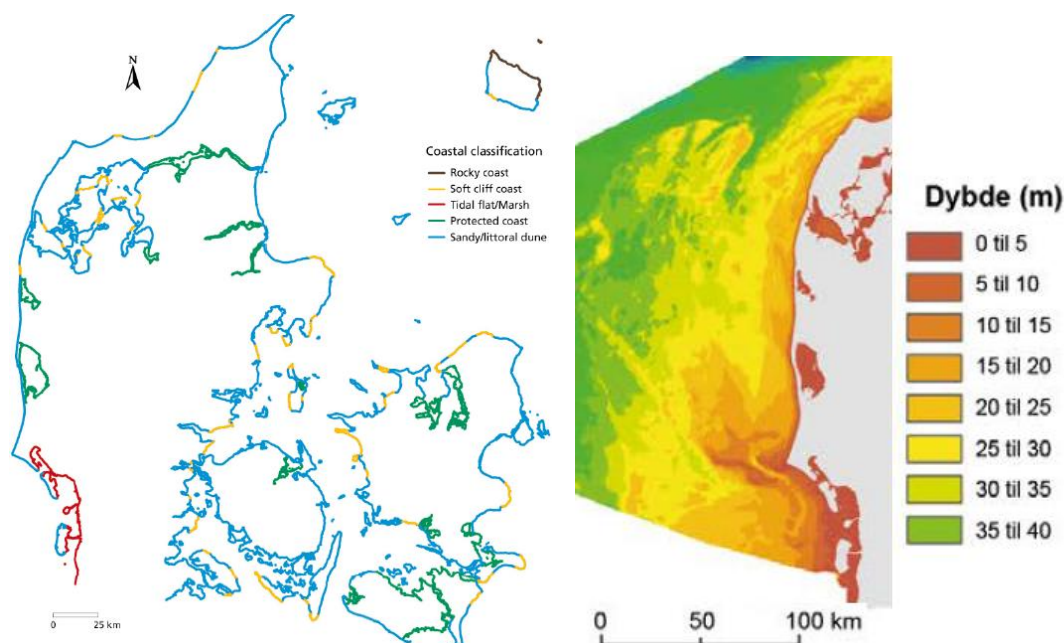
Figur 1-2. Målsætning for fællesaftalerne 2030-39 (dvs. de to sidste af de tre aftaleperioder i den 15-årige periode). Hovedstrækninger er angivet længst til venstre med lodret tekst, mens delstrækninger er angivet ud for hovedstrækninger med vandret tekst.

Den gennemsnitlige tilbagerykning på strækningen er forholdsvis varierende og afhænger i høj grad af den akutte tilbagerykning, som forekommer under storm. Figur 1-3 viser den akutte kliterosion som funktion af returperioden for historiske storme langs strækningen Lodbjerg – Nymindegab i perioden 1977-2012. Ud fra aflæsning af historiske kliterosionshændelser i figuren kan 95%-fraktilen for den akutte erosion estimeres til ca. 40 meter for den pågældende periode med en maks. erosion på ca. 42 meter i 1985. Det forventes, at denne akutte erosion vil være forholdsvis lokal – og dermed ikke forekomme på hele strækningen samtidigt.



Figur 1-3. Akut kliterosion på strækningen Lodbjerg – Nymindegab i perioden 1977-2012 (Kystdirektoratet, 2013).

Kysten langs strækningen Lodbjerg – Nymindegab kan jf. figur 1-4 (venstre) generelt klassificeres som en sandet litoral kyst. Vanddybden i Nordsøen er jævnt aftagende fra ca. 100 meter vanddybde i den nordlige del mod ca. 40 meter vanddybde i syd. Herudover findes der langs Vestkysten et stort lavvandet område med aftagende bredde mod nord. Et dybdekort af bl.a. Nordsøen samt Skagerrak er vist i figur 1-4 (højre).

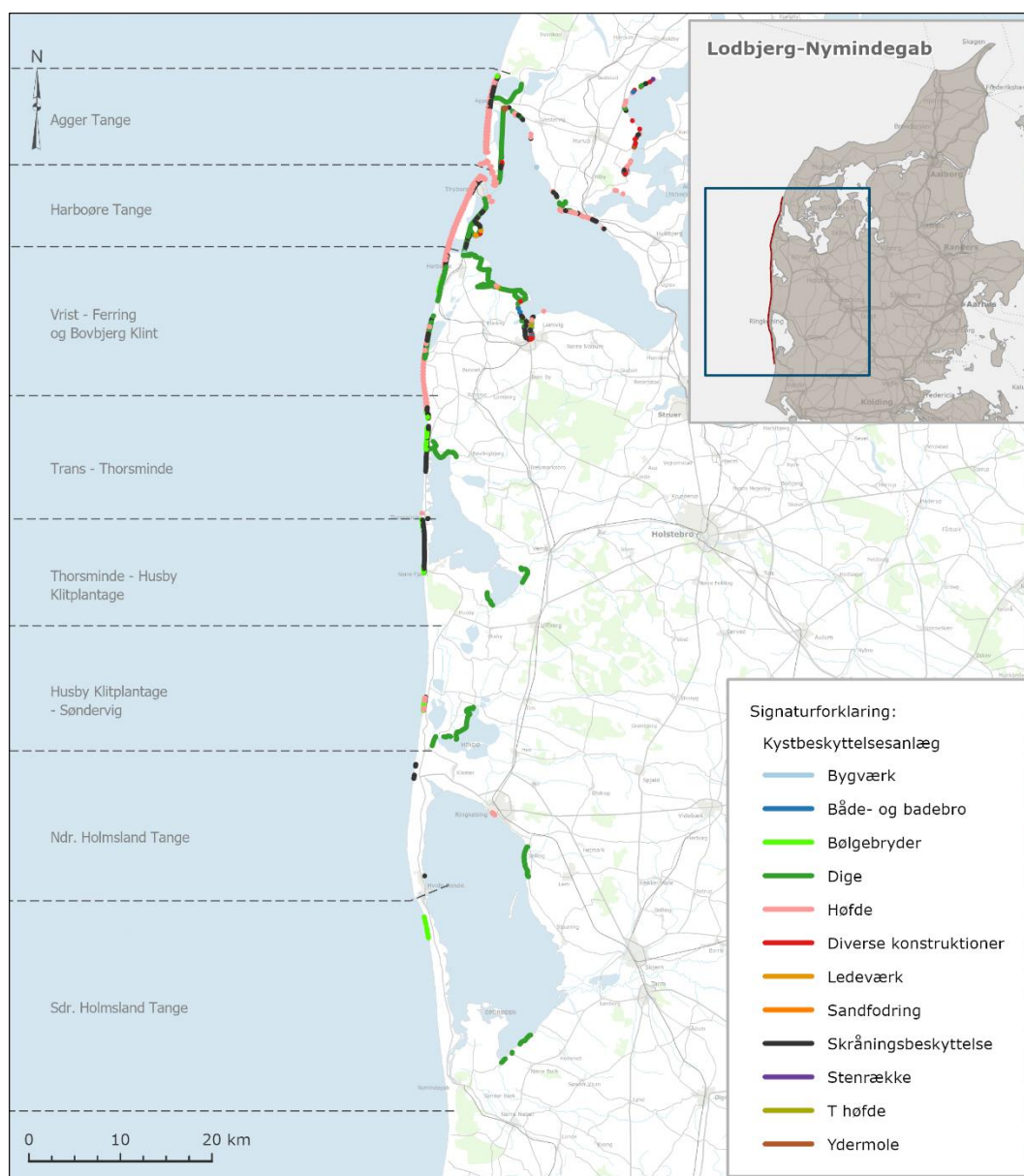


Figur 1-4. (venstre) Klassificering af de danske kyststrækninger (Kystdirektoratet, 2008). (højre) Dybdekort over bl.a. Nordsøen samt Skagerrak (GEUS, 2017).

1.2.1 Eksisterende kystbeskyttelse på strækningen Lodbjerg – Nymindegab

Pga. relativt høje vandstande under storm samt en smal klitzone og et lavt bagland forefindes der forskellige former for kystbeskyttelse langs strækningen. Kystbeskyttelsen for de ni hovedstrækninger er bestående af sandfodring, skråningsbeskyttelse, hølfer, bølgebrydere, klitforstærkning, sanddiger samt klitstabilisering eller en kombination heraf.

Eksisterende kystbeskyttelse på strækningen Lodbjerg – Nymindegab er illustreret i figur 1-5. Som det fremgår af figuren, forekommer den hårde kystbeskyttelse primært i den nordlige halvdel af fællesaftalestrækningen, i form af hovedsageligt hølfer. Det skal nævnes, at figur 1-5 ikke inkluderer sandfodring på strækningen, men viser øvrige typer kystbeskyttelses anlæg som diger mv.



Figur 1-5. Eksisterende kystbeskyttelse på strækningen Lodbjerg – Nymindegab. Figuren inkluderer ikke den kystnære sandfodring på strækningen.

1.3 Vind-/bølgeforhold

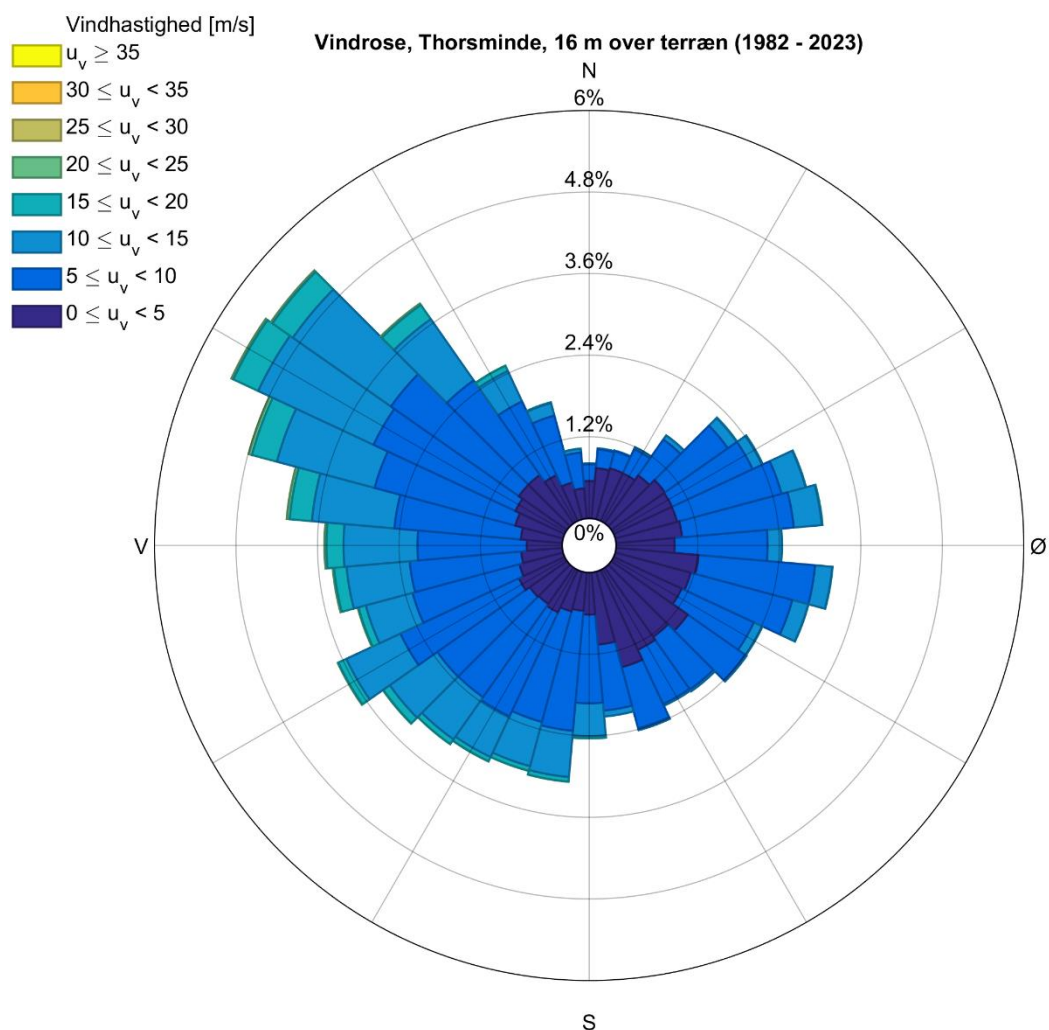
Følgende data haves for bølger og vind på strækningen:

- Bølgemålinger fra Fjaltring (Øst: 441893 m, Nord: 6259258 m), placeret på ca. 17.5 meter vanddybde for perioden 1991-2018
- Bølgemålinger fra Hvide Sande havn (Øst: 444178 m, Nord: 6205525 m) placeret på ca. 7 meter vanddybde, ca. 1.000 meter fra kysten, for perioden 2018 – 2023
- Vindmålinger fra Thorsminde (Øst: 445682 m, Nord: 6247792 m) i 16 meter højde over terræn DVR90 for perioden 1982-2023

Der forekommer variationer i vind- og bølgeforholdene langs strækningen Lodbjerg – Nymindégab, men data fra ovenfor nævnte lokaliteter (Fjaltring, Hvide Sande og Thorsminde) vurderes for værende repræsentative for de overordnede bølgeforhold langs strækningen. Dette er yderligere underbygget ved figur 1-7 (venstre) som beskrives nærmere i et senere afsnit.

1.3.1 Vindforhold

Figur 1-6 viser en vindrose over vindmålinger fra Thorsminde-måleren for perioden 1982-2023. Som det fremgår af vindrosen, er den fremherskende vindretning ved Thorsminde (dvs. umiddelbart midt på strækningen Lodbjerg – Nymindégab) fra vestnordvest, hvor også de højeste vindhastigheder kommer fra.

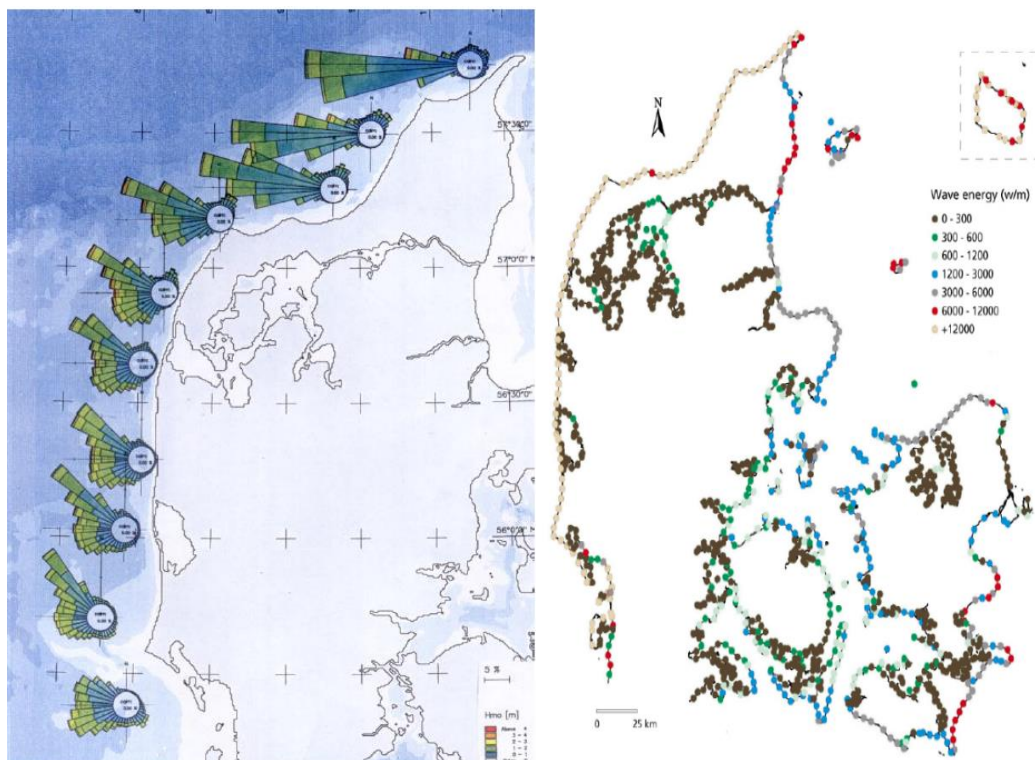


Figur 1-6. Vindrose fra Thorsminde baseret på vindmålinger i 16 meter højde for perioden 1982-2023.

1.3.2

Bølgeforhold

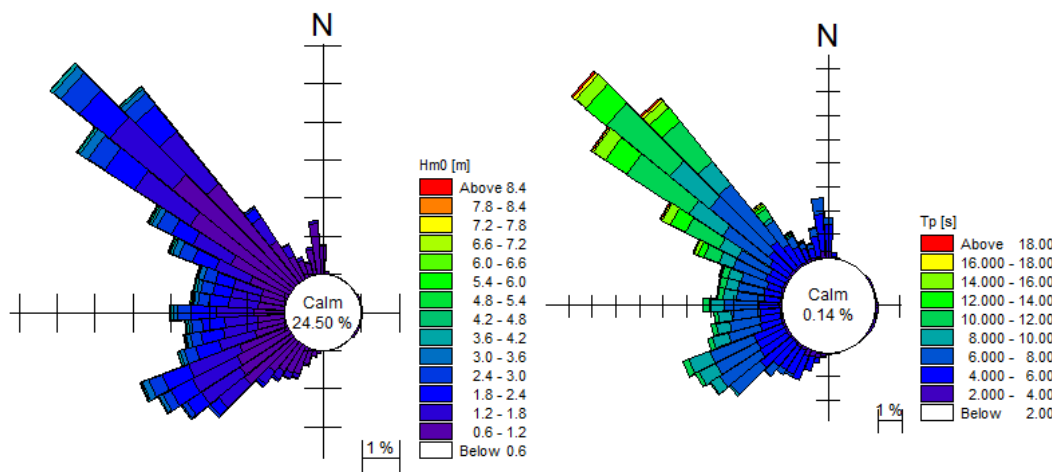
Figur 1-7 (venstre) viser bølgeroser for udvalgte positioner langs Vestkysten. Som det fremgår af bølgeroserne, som er baseret på et hindcast-studie (Kystdirektoratet, 2000), er der på strækningen Lodbjerg - Nymindegab fremherskende bølger fra nordvest. Desuden kan det ses, at bølgerosen ved Fjaltring er repræsentativ for bølgerne langs strækningen Lodbjerg - Nymindegab. Figur 1-7 (højre) indikerer, at bølgeenergien langs Vestkysten generelt er forholdsvis høj og signifikant højere sammenlignet med de indre kyststrækninger.



Figur 1-7. (venstre) Bølgeroser for Vestkysten baseret på hindcast bølgedata i perioden 1992 – 1996 (Kystdirektoratet, 2000) (højre) Bølgeenergi langs de danske kyster – bestemt for hver fem kilometer kyst (Kystdirektoratet, 2008).

Bølger ved Fjaltring

Figur 1-8 viser bølgeroser for henholdsvis den signifikante bølgehøjde, H_{m0} , og peak-bølgeperioden, T_p , baseret på data fra Fjaltringmåleren, for perioden 1991-2018 (dvs. for en længere periode sammenlignet med bølgeroserne i figur 1-7 (venstre)). Som det fremgår af figur 1-8 er der en forekomst af både de højeste signifikante bølger H_{m0} samt de længste peak-bølgeperioder T_p fra nordvestlig retning.



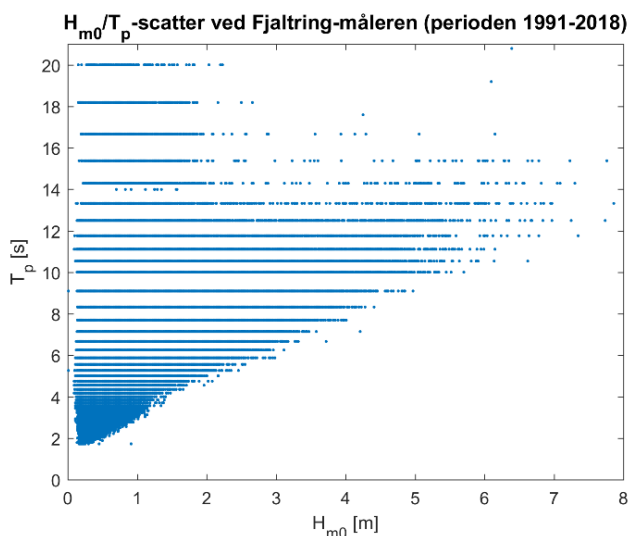
Figur 1-8. (venstre) Bølgeroser for H_{m0} fra Fjaltringmålaren baseret på bølgedata i perioden 1991-2018. (højre) Bølgerose for T_p baseret på bølgedata i perioden 1991-2018.

Tabel 1-1 viser en opgørelse over forekomsten af signifikante bølgehøjder, H_{m0} , og peak bølgeperioder, T_p , ved Fjaltring-målaren i perioden 1991-2018. Tabellen er blot en anden måde at vise de samme data som i bølgerosen. Som det fremgår af tabellen, er de hyppigst-forekommende signifikante bølgehøjder imellem nul og tre meter, hvilket ligeledes ses af bølgerose-plottet i figur 1-8.

Hs/ T_p	0-2s	2-4s	4-6s	6-8s	8-10s	10-12s	12-14s	14-16s	16-18s	18-20s	sum [%]
0-1m	0.2	5.5	18.6	8.5	5.1	6.4	3.4	1.9	0.4	0.3	50.2
1-2m	0.0	0.1	8.1	18.5	5.5	1.5	0.6	0.3	0.1	0.1	34.2
2-3m	0.0	0.0	0.2	5.5	5.2	0.7	0.1	0.0	0.0	0.0	11.7
3-4m	0.0	0.0	0.0	0.3	1.7	0.6	0.1	0.0	0.0	0.0	2.7
4-5m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.5
5-6m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
6-7m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7-8m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8-9m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
sum [%]	0.2	5.6	26.9	32.7	17.7	9.6	4.3	2.3	0.5	0.3	100

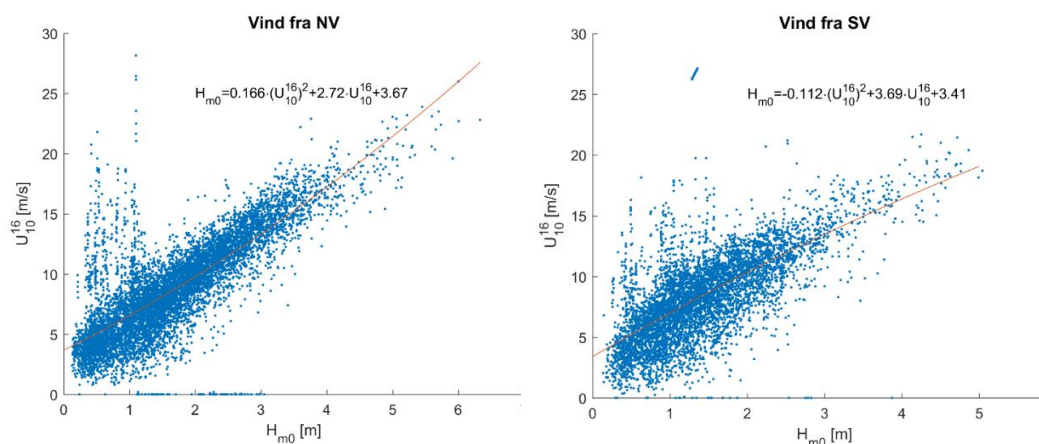
Tabel 1-1. Sandsynlighed for forekomst af H_{m0} og T_p ved Fjaltring (omni-retning i perioden 1991-2018).

Korrelationen imellem H_{m0} og T_p er yderligere illustreret i scatter-plottet i figur 1-9, hvoraf det ses, at der for lave H_{m0} er sandsynlighed for underliggende lange swell-bølger (dvs. høje T_p). Kombinationen af lange og lave swell bølger opstår ofte efter en periode med kraftig vind eller storm.



Figur 1-9. H_{m0}/T_p -scatterplot for bølgemålinger ved Fjaltring i perioden 1991-2018.

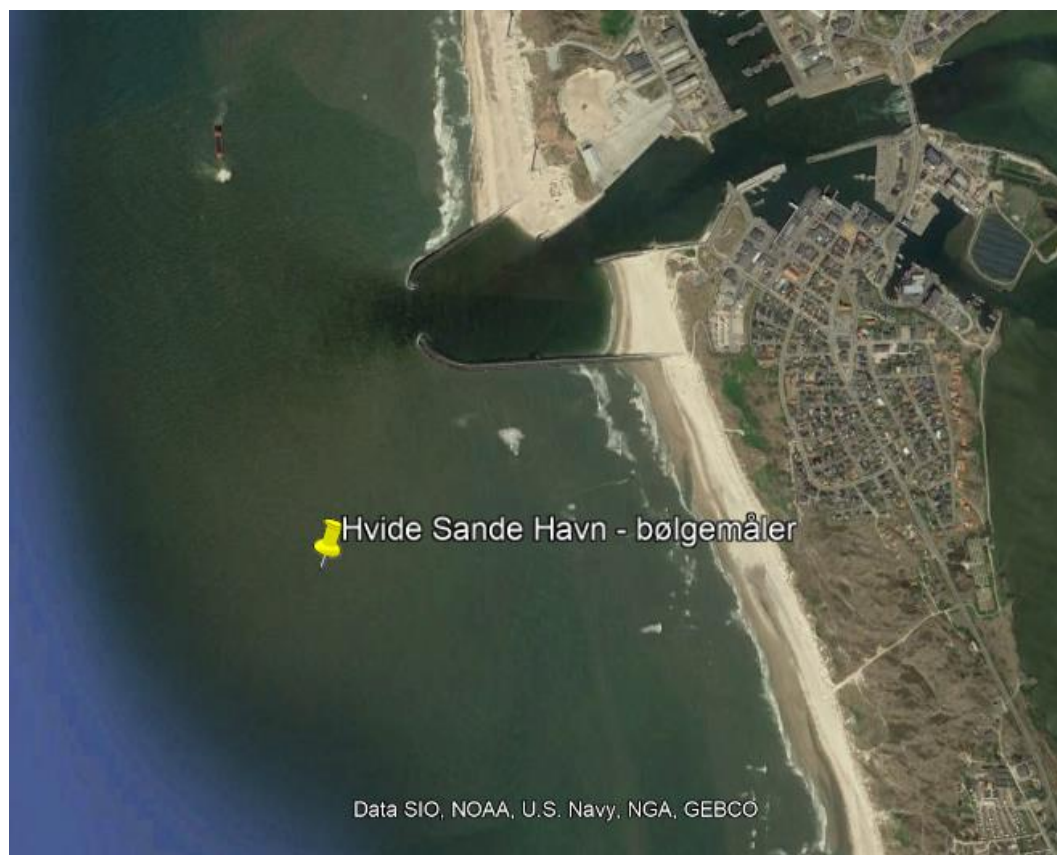
Figur 1-10 viser en god korrelationen imellem vindhastighed og bølgehøjde ved vind fra henholdsvis nordvest, NV, (venstre) og sydvest, SV, (højre) hvilket indikerer, at bølgerne i høj grad er vindgenererede (specielt ved 1,5 meter < H_{m0}).



Figur 1-10. H_{m0}/U -scatterplot for bølgemålinger ved Fjaltring i perioden 1991-2018.

Bølger ved Hvide Sande

Udover bølgemålinger ved Fjaltring haves der desuden målinger ved Hvide Sande fra en bøjle placeret på ca. 7 m vanddybde. Placeringen af bølgemåleren er vist i figur 1-11. Data fra måleren er stillet til rådighed af Hvide Sande Havn.F



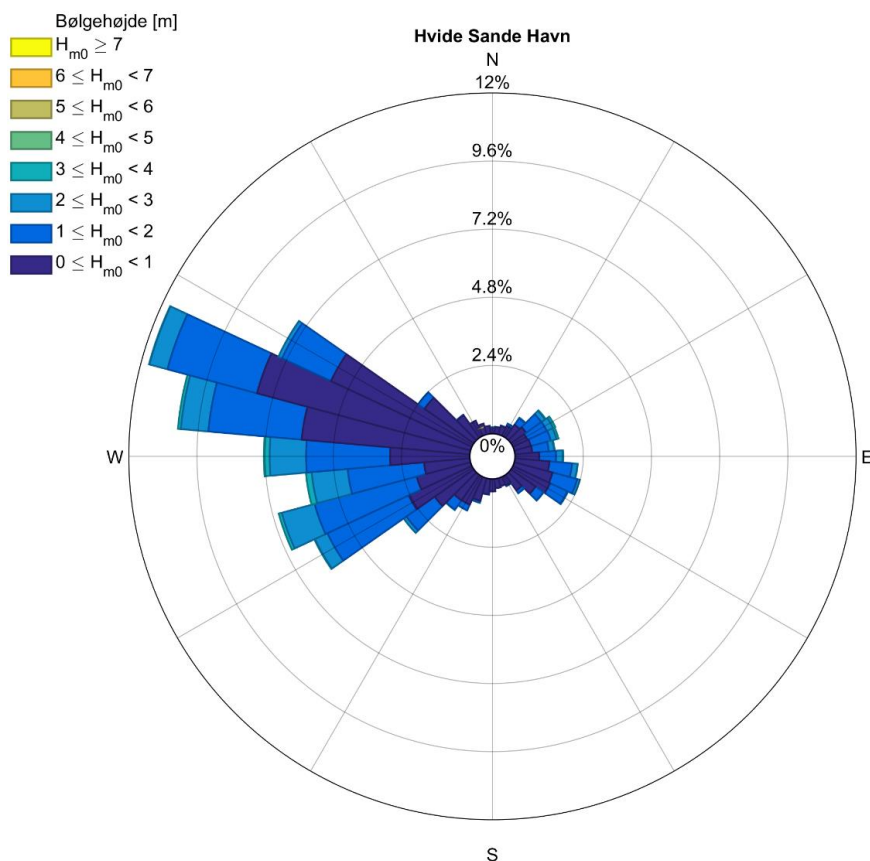
Figur 1-11. Placering af bølgemåler ved Hvide Sande Havn. (Google Earth, 2023)

Tabel 1-2 viser en opgørelse over forekomsten af signifikante bølgehøjder, H_{m0} , og peak bølgeperioder, T_p , ved Hvide Sande-måleren for perioden 2018-2023. Som det fremgår af tabellen, er bølgerne lokalt ved Hvide Sande lidt lavere sammenlignet med ved Fjaltring, hvilket formentlig skyldes placeringen af måleren på lavere vanddybde.

H_s/T_p	0-2s	2-4s	4-6s	6-8s	8-10s	10-12s	12-14s	14-16s	16-18s	18-20s	sum [%]
0-1m	5.6	8.8	18.6	12.3	5.0	4.4	3.7	1.8	0.9	0.4	61.5
1-2m	0.0	0.2	8.5	16.7	4.1	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	29.9
2-3m	0.0	0.0	0.2	3.2	3.6	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	7.6
3-4m	0.0	0.0	0.0	0.1	0.5	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9
4-5m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5-6m	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
6-7m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7-8m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8-9m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
sum [%]	5.6	9.1	27.2	32.4	13.3	5.5	3.9	1.8	0.9	0.5	100.0

Tabel 1-2. Sandsynlighed for forekomst af H_{m0} og T_p ved Hvide Sande (omni-retning i perioden 2018-2023) på ca. 7 m vanddybde.

Figur 1-12 viser en bølgerose for den signifikante bølgehøjde, H_{m0} fra Hvide Sande-måleren, i perioden 2018-2023. Som det fremgår af figur 1-12, er der en forekomst af både de højeste signifikante bølger H_{m0} samt de længste peak-bølgeperioder T_p fra vestnordvestlig retning, hvilket er samme tendens som ved Fjaltring.



Figur 1-12. Bølgerose for H_{m0} fra Hvide Sande baseret på bølgedata i perioden 2018-2023.

1.4

Vandstandsforhold

Vandstandsniveauet langs Vestkysten er påvirket af vind, atmosfærisk tryk, tidevand samt (lokal) bølger. Højvandstandsstatistikker (Kystdirektoratet, 2017) for Hvide Sande, Thorsminde, Thyborøn er givet i tabel 1-3 - tabel 1-5, og som det fremgår af tabellerne, forekommer der en smule variation i ekstrem vandstandene langs kysten, idet der ved Hvide Sande opnås op imod tre meter for en 100-års stormhændelse, mens 100-års stormhændelsen ved Thyborøn medfører en vandstand på 2,5 m. Dertil kommer, at vandstanden som følge af vindstuvning i nogle tilfælde kan øges yderligere som følge af bølge-setup på kysten. Dette bidrag kan medføre en lokal forøgelse af vandstanden på 0,25 – 0,75 meter afhængig af bølgehøjden og bølgeperioden (DHI, 2001).

Returperiode [år]	20	50	100
Vandstand [cm]	279	290	297

Tabel 1-3. Vandstandsstatistik for Hvide Sande (havet) (Kystdirektoratet, 2017).

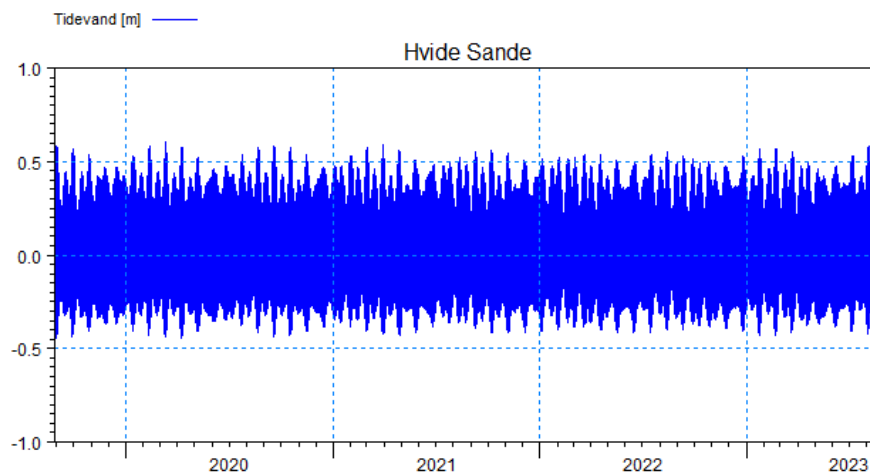
Returperiode [år]	20	50	100
Vandstand [cm]	257	267	274

Tabel 1-4. Vandstandsstatistik for Thorsminde (havet) (Kystdirektoratet, 2017).

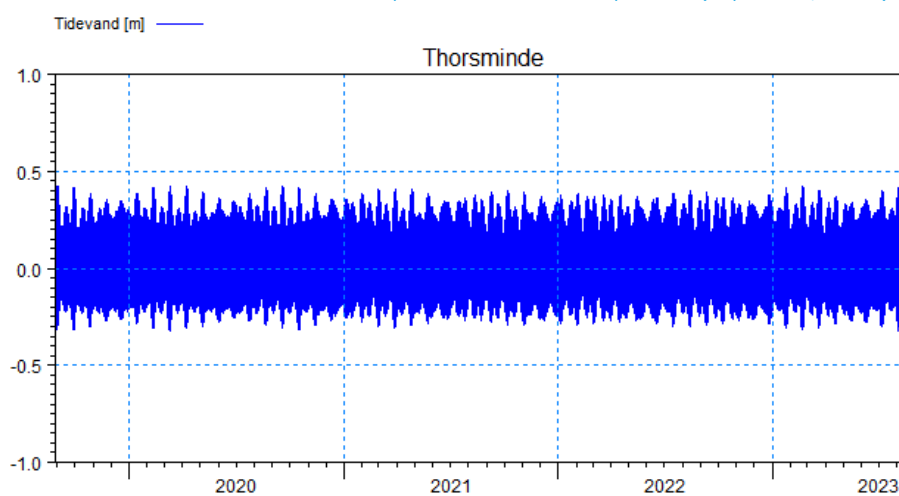
Returperiode [år]	20	50	100
Vandstand [cm]	235	243	250

Tabel 1-5. Vandstandsstatistik for Thyborøn (havet) (Kystdirektoratet, 2017).

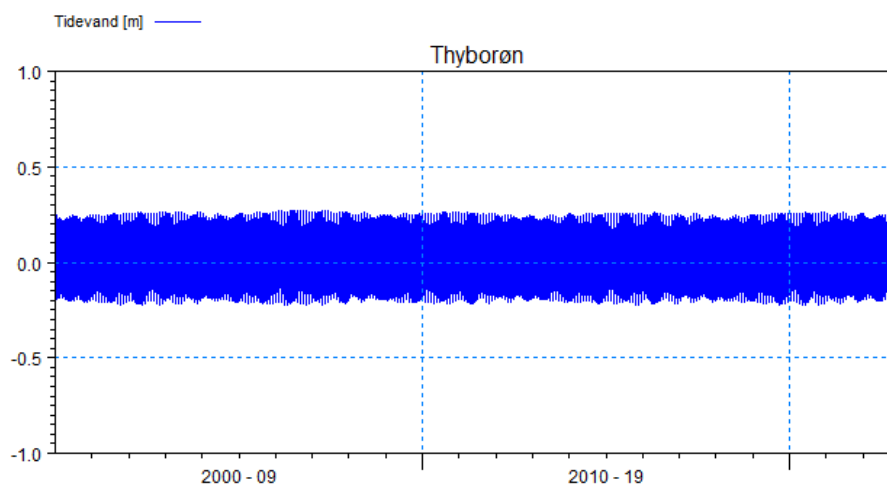
Tidevandsamplituder for vandstand ved Hvide Sande havn, Thorsminde Havn samt udfor Thyborøn kanal er estimeret via såkaldt FFT-analyse af vandstandstidsserier baseret på såkaldte hindcast-data fra Copernicus (Copernicus, 2023b), (Copernicus, 2023c). Tidsserier er vist i figur 1-13 - figur 1-15. Vær opmærksom på at dataperioden ikke er ens i de tre tidsserier pga. forskelle i tilgængelighed i de forskellige hindcastmodeller. Tidsserierne er dog anvendt til at estimere tidevandsforhold, hvormed forskellene i dataperioder ikke har nogen betydning.



Figur 1-13. Tidevand ved Hvide Sande baseret på hindcast-data fra Copernicus (Copernicus, 2023c).



Figur 1-14. Tidevand ved Thorsminde baseret på hindcast-data fra Copernicus (Copernicus, 2023c).



Figur 1-15. Tidevand ved Thyborøn baseret på hindcast-data fra Copernicus (Copernicus, 2023b).

1.5

Strømforhold

Følgende strømmålinger haves fra strækningen:

- Fjaltring, station 2034, (Øst: 441565 m, Nord: 6258010 m) placeret på ca. 16,8 meter vanddybde, ca. 4.500 meter fra kysten, for perioden 1999 – 2001.
- Hvide Sande Havn (Øst: 444178 m, Nord: 6205525 m) placeret på ca. 7 meter vanddybde, ca. 1.000 meter fra kysten, for perioden 2018 – 2023.

Ligesom med bølger og vind kan der forekomme variationer i strømforholdene langs kysten, men strømmålingerne fra Fjaltring vurderes dog for værende repræsentative for den overordnede tendens langs strækningen Lodbjerg – Nymindegab.

Udenfor littoralzonen (indtil ca. 12 meter vanddybde, hvilket er nærmere beskrevet senere i afsnit 1.7) er strømmen langs strækningen Lodbjerg – Nymindegab drevet af tidevand samt vind (jyske kyststrøm). Indenfor littoralzonen er strømmen hovedsageligt drevet af bølger. Bidrag til strømmen beskrives nærmere i det følgende afsnit.

1.5.1 Bølgegenereret strøm

Bølgehøjden tæt ved kysten er begrænset af vanddybden, h , idet der vil forekomme bølgebrydning af de højeste bølger i bølge-spektret, når $H_{m0}/h \approx 0,6$. Bølgebrydningen bevirker, at der opstår en reaktionskraft i samme retning som bølgeudbredelsen, og såfremt bølgen angriber kysten med en vinkel, kan reaktionskraften opdeles i to komponenter (på langs med- og på tværs af kystlinjen). Den vinkelrette kraftkomponent på kysten medfører, som tidligere nævnt, at der opstår såkaldt bølgesetup (dvs. en lokal forøgelse af vandspejlet tæt ved kysten) og den langsgående komponent genererer en strøm langs kysten.

Det vinkelrette bølge-setup samt den langsgående strøm, som begge øges proportionelt med bølgehøjden, kan desuden give anledning til, at der genereres henholdsvis en søvæerts sedimenttransport samt en langsgående sedimenttransport. Begge transportere er dog udelukkende forekommende indenfor brydningszonen.

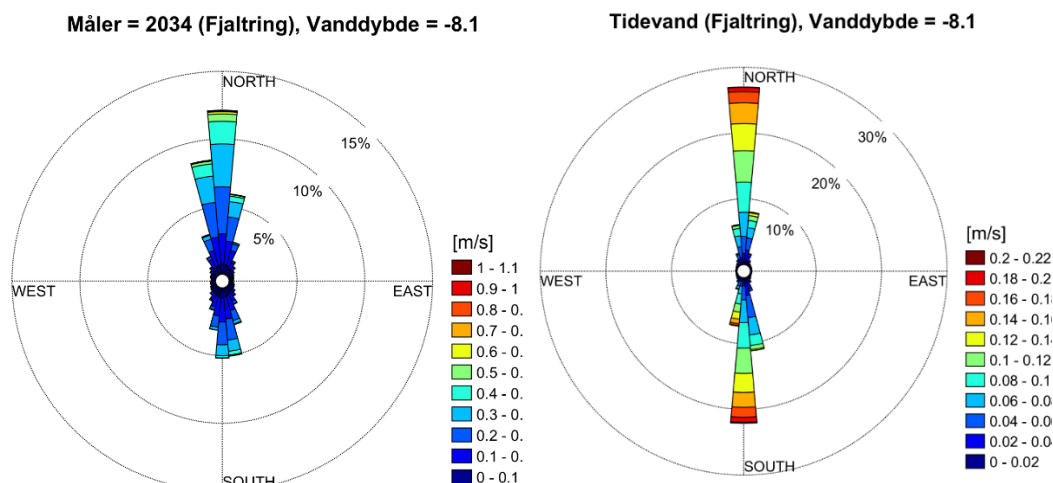
1.5.2 Vind og tidevandsgenereret kyststrøm

Havstrømme opstår i forbindelse med vindstuvning og tidevandsudveksling, og langs Vestkysten betegnes denne havstrøm ofte som "Den Jyske Kyststrøm". Den Jyske Kyststrøm er regionalt forekommende, og bevirker at vandet i Nordsøen cirkulerer imod urets retning, hvilket medfører en netto-dominerende nordgående strøm, hvis styrke er styret af vindforhold.

Strøm ved Fjaltring

Figur 1-16 (venstre) viser en såkaldt strømrose baseret på data fra Fjaltringmåleren (station 2034) for perioden 1999 – 2001. Som det fremgår af figuren, forekommer der strømhastigheder på op til ca. 1 m/s (nordgående) og lidt lavere maksimumstrømhastighed ved sydgående strøm. Figur 1-16 (højre) viser en strømrose for den tidevandsgenererede strøm, hvoraf det fremgår, at der forekommer strømhastigheder på op til ca. 0,2 m/s både nord- og sydgående.

Fjaltringmåleren er beliggende på ca. 16 meter vanddybde, og de viste strømroser i figur 1-16 angiver strømhastigheden ca. midt i vandsøjlen (8,1 meter vanddybde). Ved sammenligning med strømroser for andre dybder er det konkluderet, at strømhastigheden i midten af vandsøjlen er repræsentativ for den dybde-midlede strømhastighed på den pågældende lokalitet.

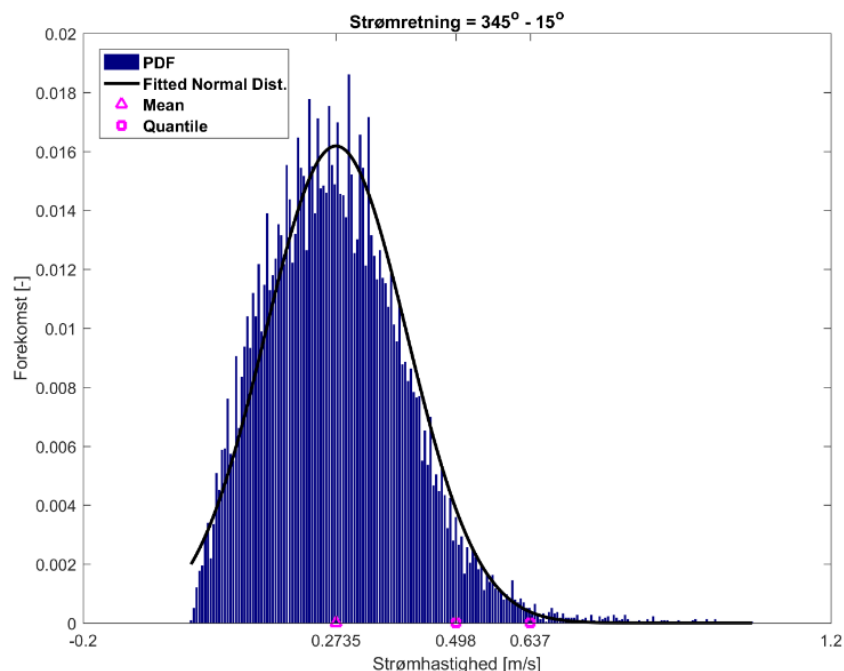


Figur 1-16. Strømrøse for Fjaltringmåleren (station 2034) for perioden 1999 – 2001 på 8.1 meter vanddybde.

Tabel 1-6 viser statistik for nord- og sydgående strømhastigheder ved målestation 2034. Som det fremgår af tabellen, er der en forholdsvis stor spredning på strømhastighederne og dermed stor forskel imellem 99%-fraktilen og maks.-strømhastigheder. Som et eksempel viser figur 1-17 normalfordelingen for strømhastigheder for nordgående strøm.

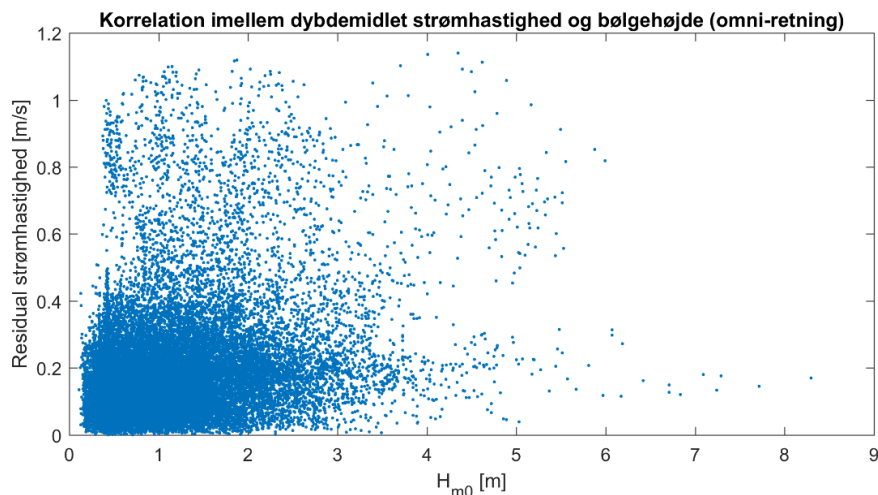
	Middel [m/s]	Spredning [-]	95% fraktil [m/s]	99% fraktil [m/s]	Maks. [m/s]
Strømrøtning S (165° - 195°)	0,21	0,10	0,39	0,49	0,67
Strømrøtning N (345° - 15°)	0,27	0,13	0,50	0,64	1,05

Tabel 1-6. Statistik for strømhastigheder fra station 2034 ved Fjaltring.



Figur 1-17. Normalfordeling for nordgående strøm på ca. 8 meter vanddybde.

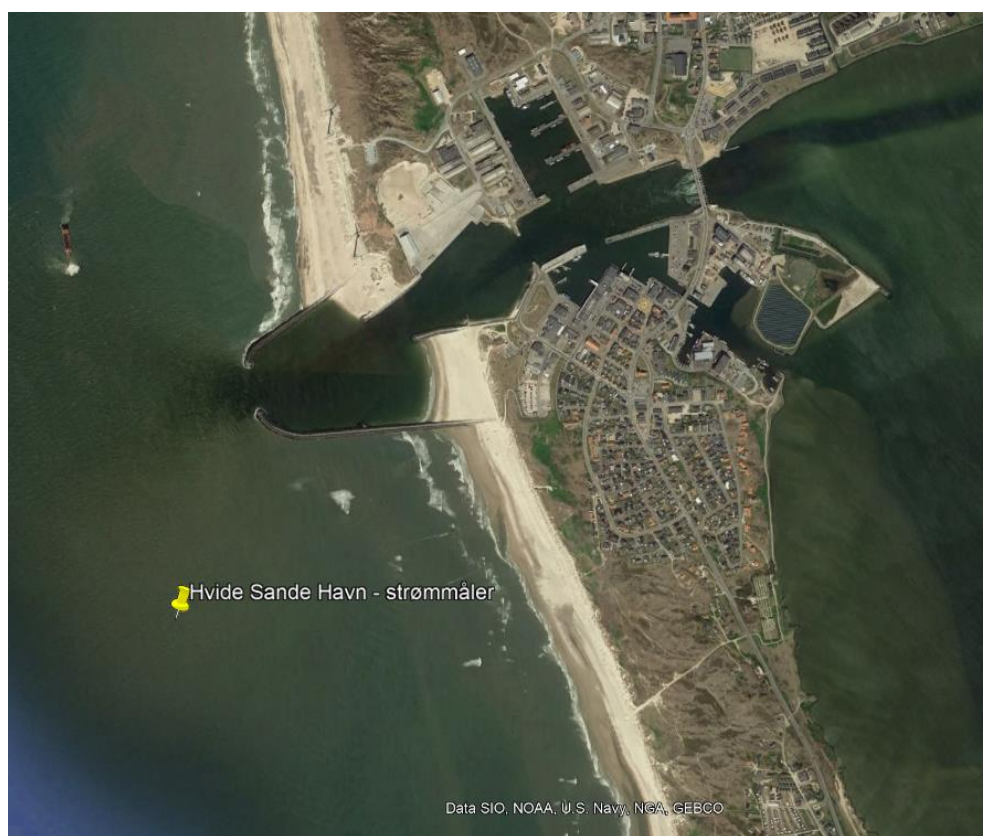
Figur 1-18 viser korrelationen imellem den dybdemidlede residuale kyststrøm (fratrasket effekten fra tidevand) og bølgehøjden. Som det fremgår af figuren, er der en ringe korrelation imellem bølgehøjde og strømhastighed.



Figur 1-18. Korrelation imellem bølgehøjde og den residuale strømhastighed på ca. 8 meter vanddybde.

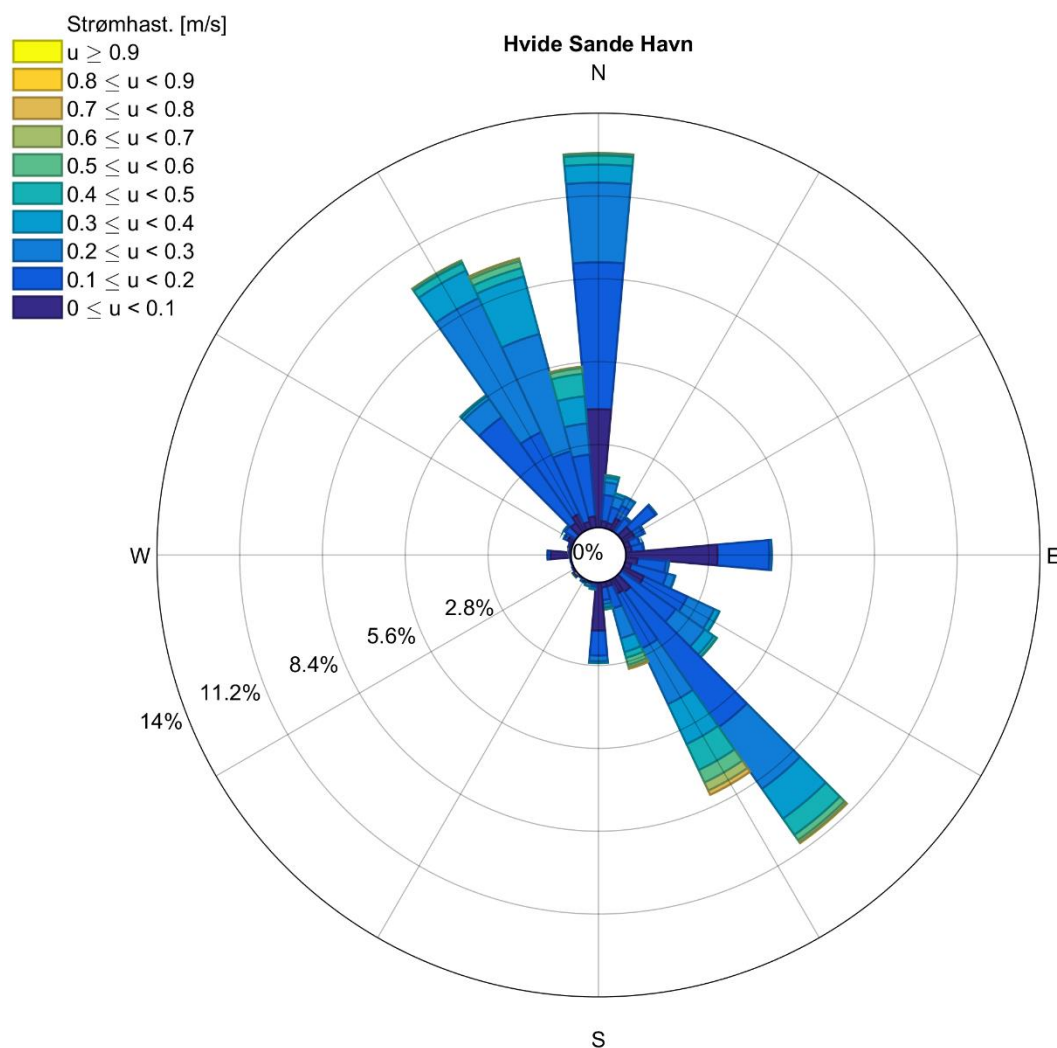
Strøm ved Hvide Sande

Ved Hvide Sande haves strømmålinger fra en såkaldt ADCP-bøje placeret på ca. 7 m vanddybde. Placeringen af strømmåleren er vist i figur 1-19. Data fra måleren er stillet til rådighed af Hvide Sande Havn og dækker en periode på 2018 – 2023 (dog med større udfald i perioden).



Figur 1-19. Placering af strømmåler ved Hvide Sande Havn (Google Earth, 2023).

En strømrose fra Hvide Sande måleren er vist i figur 1-20 og statistik for strømhastigheder i hhv. nord- og sydgående retning er givet i tabel 1-7. Ved sammenligning med tabel 1-6 ved Fjaltring kan det konstateres, at statistiske strømhastigheder ved Hvide Sande og Fjaltring ikke varierer meget.



Figur 1-20. Strømrøse fra strømmåleren ved Hvide Sande Havn baseret på måledata i perioden 2018 - 2023.

	Middel [m/s]	99% fraktil [m/s]	95% fraktil [m/s]	90% fraktil [m/s]	85% fraktil [m/s]
Omni retning	0,18	0,60	0,42	0,34	0,30
Nordgående	0,20	0.54	0.40	0.33	0.31
Sydgående	0,22	0.67	0.49	0.40	0.35

Tabel 1-7. Statistik for strømhastigheder ved Hvide Sande havn baseret på måledata for perioden 2018 - 2023.

Udover strømmålinger haves såkaldte hindcast-data fra Copernicus (Copernicus, 2023b) for perioden 2000 - 2023, hvilket gør det muligt at separere residual strømmen fra den totale tidsserie, dvs. separere strømmen genereret af vind og bølger fra tidsserien, så der ikke haves påvirkninger fra tidevand.

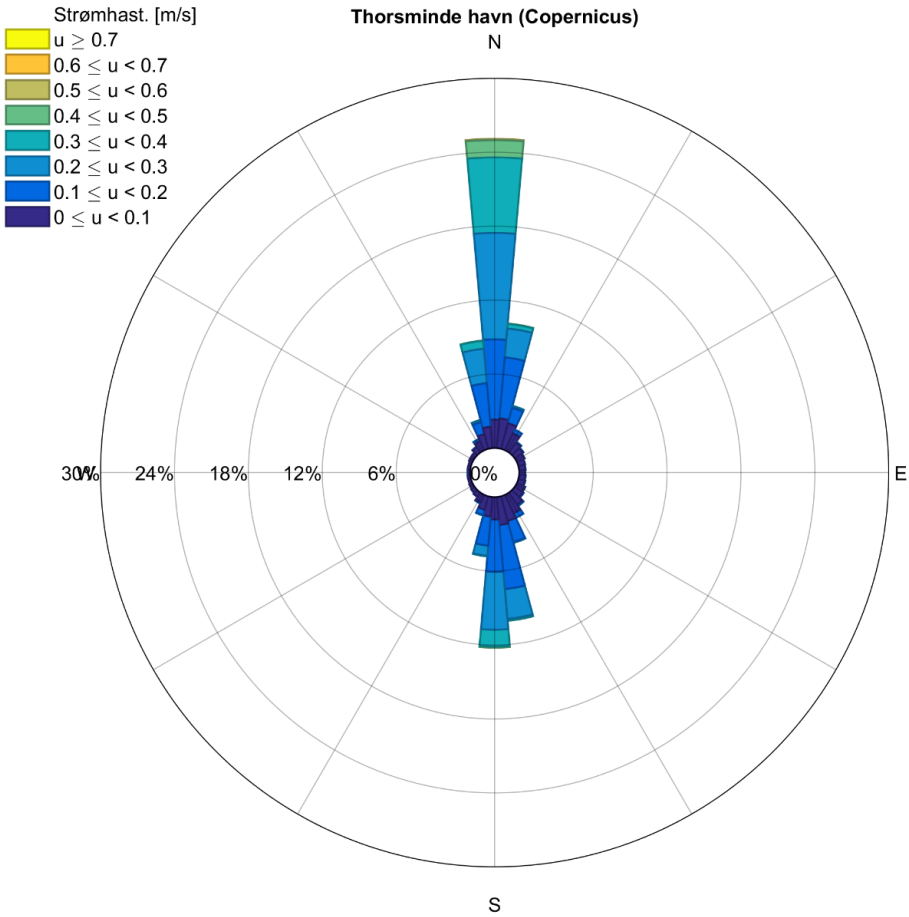
Statistik for strømhastigheder i hhv. omni-retning (alle retninger) samt nord- og sydgående retning for hindcast-dataene er givet i tabel 1-8. Ved sammenligning med statistik for måledata i tabel 1-7 ses mindre forskelle, hvilket delvist kan skyldes forskelle i varigheder for tilgængelige data, samt indflydelse fra modeldiskretiseringen i hindcastdataene som er $0.111^\circ \times 0.067^\circ$.

	Middel [m/s]	99% fraktil [m/s]	95% fraktil [m/s]	90% fraktil [m/s]	85% fraktil [m/s]
Omni retning (total)	0,22	0,53	0,45	0,40	0,37
Omni retning (residual)	0,13	0,39	0,29	0,24	0,22
Nordgående (total)	0,26	0,56	0,48	0,44	0,41
Nordgående (residual)	0,16	0,44	0,33	0,29	0,26
Sydgående (total)	0,21	0,53	0,45	0,40	0,37
Sydgående (residual)	0,11	0,32	0,25	0,21	0,19

Tabel 1-8. Statistik for strømshastigheder ved Hvide Sande havn baseret på hindcast data fra Copernicus for perioden 2000 – 2023.

Strøm ved Thorsminde

Der haves ikke strømmålinger ved Thorsminde, hvilket medfører, at strømmosen ved Thorsminde (se figur 1-20) udelukkende er baseret på Copernicus-data for perioden 2000 – 2023 (Copernicus, 2023b). Statistiske strømshastigheder i hhv. omni-retning samt opdelt på nord- og sydgående retning er givet i tabel 1-9.



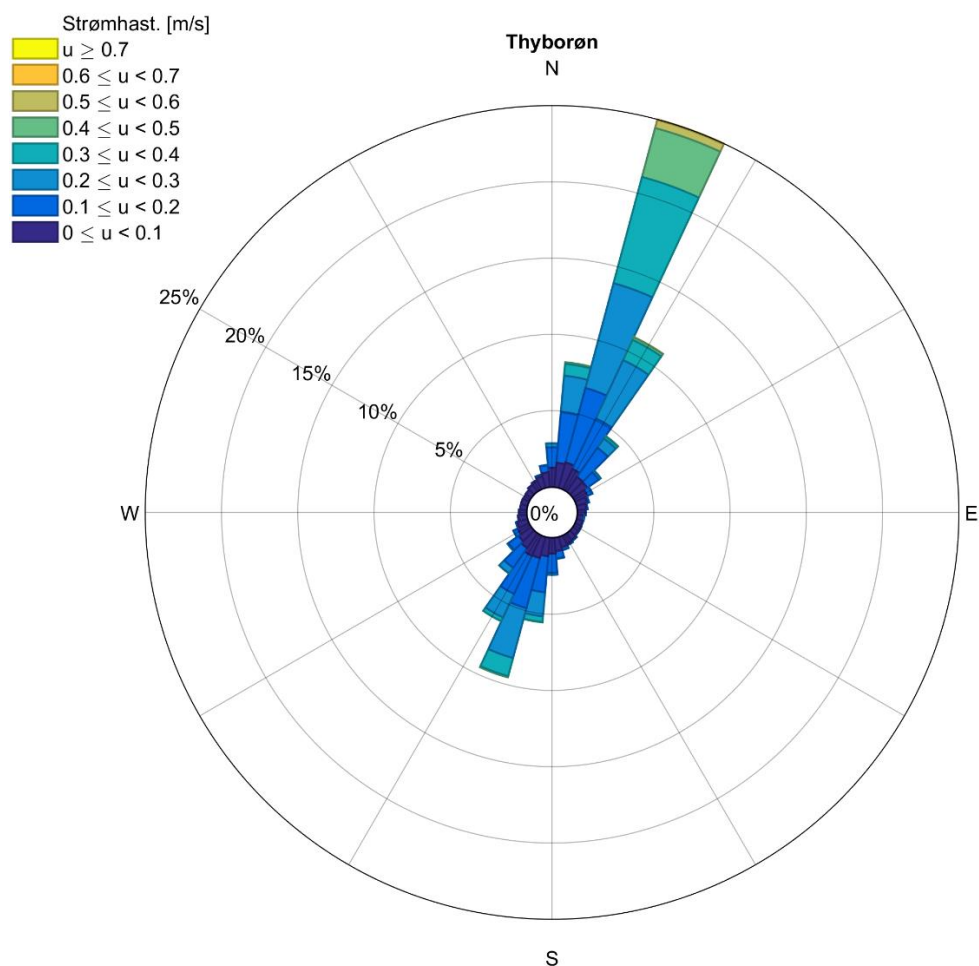
Figur 1-21. Strømrose baseret på hindcast-data fra Thorsminde for perioden 2000 – 2023. Data er fra (Copernicus, 2023b).

	Middel [m/s]	99% fraktil [m/s]	95% fraktil [m/s]	90% fraktil [m/s]	85% fraktil [m/s]
Omni retning (total)	0,16	0,42	0,35	0,30	0,27
Omni retning (residual)	0,07	0,25	0,17	0,14	0,12
Nordgående (total)	0,19	0,44	0,37	0,34	0,31
Nordgående (residual)	0,08	0,28	0,19	0,16	0,14
Sydgående (total)	0,14	0,36	0,29	0,26	0,24
Sydgående (residual)	0,06	0,20	0,14	0,12	0,10

Tabel 1-9. Statistik for strømshastigheder ved Thorsminde havn baseret på hindcast data fra Copernicus for perioden 2000 – 2023. Data er fra (Copernicus, 2023b).

Strøm ved Thyborøn

Der haves ikke strømmålinger ved Thyborøn, hvilket medfører, at strømmosen i figur 1-22 er baseret på hindcast-data fra Copernicus (Copernicus, 2023b) dækkende perioden 2000 – 2023. Statistiske strømshastigheder i hhv. omni-retning samt nord- og sydgående retning baseret på hindcast-data er givet i tabel 1-10.



Figur 1-22. Strømrose baseret på hindcast-data fra Thyborøn for perioden 2000 – 2023 (Copernicus, 2023b).

	Middel [m/s]	99% fraktil [m/s]	95% fraktil [m/s]	90% fraktil [m/s]	85% fraktil [m/s]
Omni retning (total)	0,18	0,48	0,39	0,34	0,31
Omni retning (residual)	0,10	0,37	0,26	0,21	0,18
Nordgående (total)	0,19	0,45	0,39	0,35	0,32
Nordgående (residual)	0,11	0,41	0,29	0,23	0,20
Sydgående (total)	0,14	0,35	0,30	0,27	0,25
Sydgående (residual)	0,07	0,23	0,17	0,14	0,12

Tabel 1-10. Statistik for strømshastigheder ved Thyborøn baseret på hindcast-data fra Copernicus (Copernicus, 2023b) for perioden 2000 – 2023.

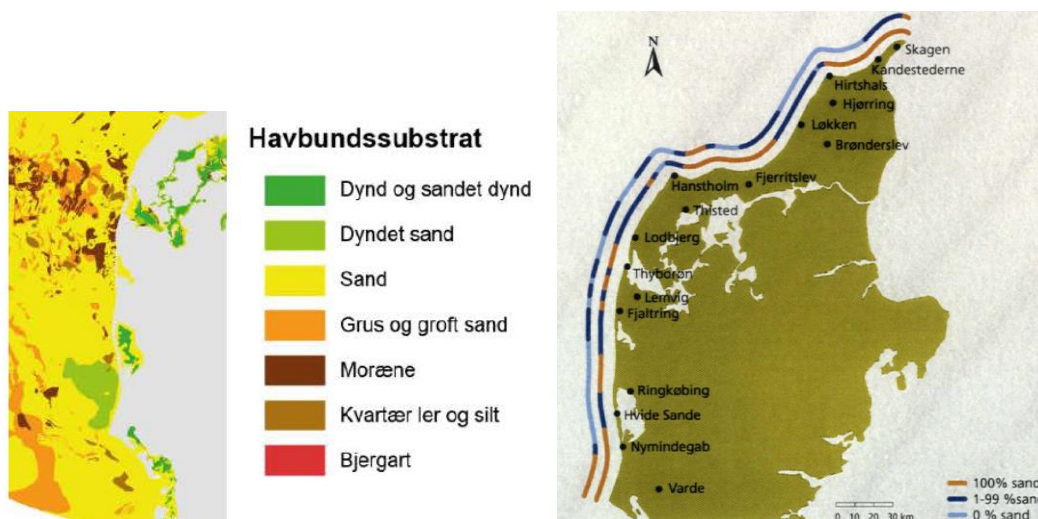
Dataperioder

Det skal nævnes, at forskelle i dataperioder kan påvirke de relative forskelle imellem strøm ved Fjaltring, Hvide Sande, Thorsminde og Thyborøn. Ved Hvide Sande ses det dog, at strømstatistikken baseret på hhv. måledata (i perioden 2018 – 2023) og hindcast-data fra (Copernicus, 2023b) (i perioden 2000 – 2023) medfører forholdsvis sammenlignelig statistik. Derved vurderes det, at den relative indflydelse fra forskelle i dataperioder er relativt begrænset. Forskellene haves dog in-mente ifm. videre brug af statistikker.

1.6

Sedimentforhold

Nordsøen er generelt præget af store områder med sandbund, men dog med lokale variationer. F.eks. er der umiddelbart vest for Fjaltring et større område med stenet moræne, grus og groft sand, se figur 1-23 (venstre). Sandprocenter langs Vestkysten, som er den andel af havbunden som består af ikke-kohæsivt materiale, er vist i figur 1-23 (højre), hvor den inderste streg er indtil 8 meter vanddybde og den yderste streg er udenfor 8 m-vanddybden. Som det fremgår af figuren, er der generelt en relativ høj sandprocent ud til 8 meter dybde på strækningen Lodbjerg – Nymindégab. Udenfor 8 meters dybden er sandprocenten langs kysten dog mere varierende.



Figur 1-23. (venstre) Havbundssubstrater (GEUS, 2017). (højre) Sandprocenter langs vestkysten (Kystdirektoratet, 2000).

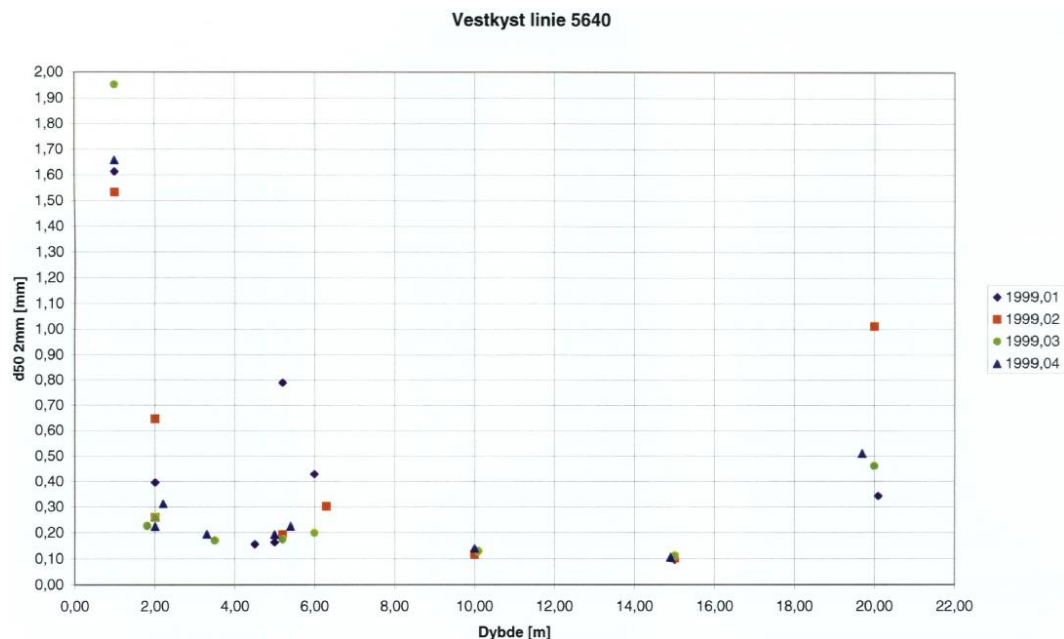
Tabel 1-11 viser middeldornstørrelser, d_{50} , som er baseret på sigteanalyser udført på fire lokaliteter langs strækningen Lodbjerg – Nymindégab. Der er udført 21 sigteanalyser på stranden for hver af de fire lokaliteter, og som det fremgår af tabellen, er der generelt en forholdsvis stor

spredning i d_{50} indenfor samme lokalitet. Variationen i middeldornstørrelserne imellem de fire lokaliteter er begrænset, men den umiddelbare tendens er dog, at d_{50} er faldende ned imod den sydlige del af strækningen.

Harbøre Tange		Agger Tange		Thorsminde		Hvide Sande	
Ref.	d_{50} [mm]	Ref.	d_{50} [mm]	Ref.	d_{50} [mm]	Ref.	d_{50} [mm]
HT 1	0.18	AT 1	0.43	TT 1	0.19	HS 1	0.18
HT 2	0.2	AT 2	0.25	TT 2	0.21	HS 2	0.18
HT 3	3.67	AT 3	0.4	TT 3	0.21	HS 3	0.45
HT 4	0.21	AT 4	0.19	TT 4	0.2	HS 4	0.19
HT 5	0.23	AT 5	0.34	TT 5	0.2	HS 5	0.2
HT 6	0.73	AT 6	1.54	TT 6	0.21	HS 6	0.23
HT 7	0.2	AT 7	0.2	TT 7	0.21	HS 7	0.19
HT 8	0.49	AT 8	0.32	TT 8	0.3	HS 8	0.2
HT 9	0.43	AT 9	0.79	TT 9	0.33	HS 9	0.29
HT 10	0.19	AT 10	0.22	TT 10	0.51	HS 10	0.2
HT 11	0.21	AT 11	0.28	TT 11	0.2	HS 11	0.19
HT 12	0.21	AT 12	0.73	TT 12	0.19	HS 12	0.2
HT 13	0.2	AT 13	0.21	TT 13	0.19	HS 13	0.19
HT 14	0.25	AT 14	0.28	TT 14	0.2	HS 14	0.33
HT 15	0.35	AT 15	0.42	TT 15	0.36	HS 15	0.21
HT 16	0.2	AT 16	0.21	TT 16	0.71	HS 16	0.16
HT 17	0.25	AT 17	0.34	TT 17	0.36	HS 17	0.25
HT 18	0.22	AT 18	0.69	TT 18	0.35	HS 18	0.24
HT 19	0.23	AT 19	0.19	TT 19	0.21	HS 19	0.17
HT 20	0.23	AT 20	0.38	TT 20	0.22	HS 20	0.2
HT 21	0.41	AT 21	1.53	TT 21	0.36	HS 21	0.42
Middel	0.44	Middel	0.47	Middel	0.28	Middel	0.23
Spredning	0.75	Spredning	0.39	Spredning	0.13	Spredning	0.08

Tabel 1-11. d_{50} baseret på sigteanalyser af prøver udtaget i perioden 31.10.2018 – 08.11.2018.

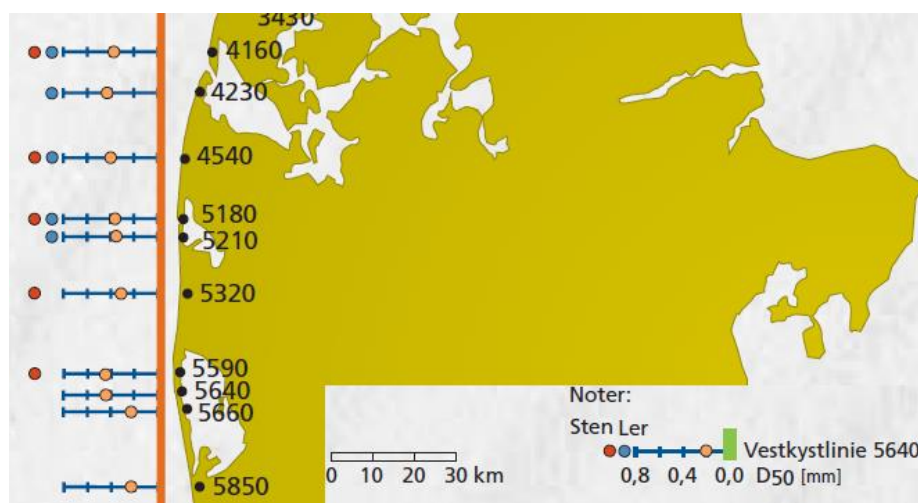
Sigteanalyser for de fire lokaliteter i tabel 1-11 er udført i perioden 31.10.2018 – 08.11.2018. I en tidligere sedimentanalyse fra 1999 (Kystinspektoratet, 1999), baseret på ca. 2000 sandprøver langs strækningen fra Blåvands Huk til Skagen fra stranden og ud til ca. 5 kilometer fra kysten, blev det konkluderet, at middeldornstørrelsen langs strækningen Lodbjerg – Nymindegab generelt er varierende over både tid og sted. Et eksempel herfor er vist i figur 1-24 for et vestkystprofil beliggende ved Hvide Sande.



Figur 1-24. Variation i d_{50} for henholdsvis forår 1999 (1999,01), sommer 1999 (1999,02), efterår 1999 (1999,03) og vinter 1999 (1999,04) (Kystinspektoret, 1999).

Som det fremgår af figur 1-24, varierer d_{50} imellem ca. 0,15 mm og 0,79 mm på fire til seks meter vanddybde ved det pågældende kystprofil (spredningen varierer dog også fra profil til profil). Den forholdsvis store spredning i d_{50} på disse vanddybder skyldes de sæsonvarierende bølgeforhold, som konstant sørger for omlejring af sedimentet. Generelt set afspejles variationen i middelkornstørrelse langs kystprofilen i bølgedissipationen, hvilket betyder, at ændringer i bølgeforhold medfører ændringer i d_{50} .

Kystdirektoratet opmåler løbende kystprofiler langs Vestkysten. I figur 1-25 er middelkornstørrelser for udvalgte vestkystprofiler opgjort for år 1999. Den generelle tendens er, at $d_{50} \approx 0,4$ mm på strækningen fra Agger Tange til Hvide Sande og $d_{50} \approx 0,2$ mm syd for Hvide Sande. Samme tendens blev fundet i sigteanalyserne fra 2018.



Figur 1-25. Gennemsnitlig d_{50} for år 1999 langs strækningen Lodbjerg – Nymindegab (Kystdirektoratet, 2000).

Hvorvidt tendensen ift. den stigende middelkornstørrelse i den nordlige del af strækningen skyldes tilstedeværelsen af den hårde kystbeskyttelse, vides ikke med sikkerhed, da der grundet alderen på kystbeskyttelsen ikke umiddelbart foreligger empiri for basisscenariet før den hårde kystbeskyttelse blev etableret.

1.7 Sedimenttransport og kystmorfologi

Sedimenttransporten indenfor littoralzonen drives primært af den bølgeinducerede strøm, mens sedimenttransporten udenfor littoralzonen primært drives af Den Jyske Kyststrøm, beskrevet i afsnit 1.5.

Ift. den bølgeinducerede strøm vil der, såfremt bølgerne angriber kysten med en vinkel, som tidligere nævnt opstå to strømkomponenter, og således vil der desuden opstå to komponenter af sedimenttransporten. Det skal dog hertil nævnes, at sedimenttransporten udelukkende opstår i tilfældet, hvor den kritiske forskydningsspænding for sedimentet overskrides (dvs. bl.a. ved tilstrækkelig strømhastighed).

Den ene komponent af sedimenttransporten er således 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.

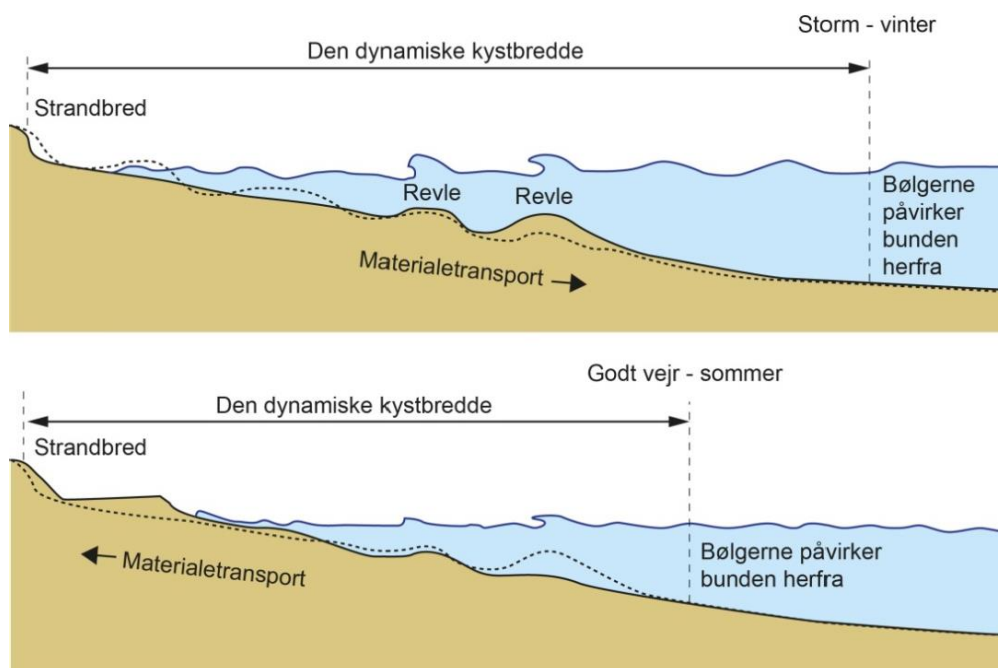
1.7.1 Tværgående sedimenttransport

Den overordnede karakteristik af kystprofillet på strækningen mellem Lodbjerg og Nymindegab er overordnet en svag hældning, revledannelse og sandbund. Kystprofillet er bl.a. styret af middelskornstørrelsen (Bruun, 1954) samt f.eks. tilstedeværelsen af hård kystbeskyttelse, og derfor må det jf. figur 1-25 forventes, at hældningen på ligevægtsprofillet er en smule stejlere i den nordlige del af strækningen Lodbjerg – Nymindegab sammenlignet med den sydlige. Teorien understøttes desuden af tendensen i hældningen af opmålte kystprofiler på strækningen.

Den tværgående sedimenttransport på strækningen Lodbjerg – Nymindegab afhænger bl.a. af bølgeforholdene, kystprofillet samt sedimentkarakteristikken. Indenfor brydningszonen, som på strækningen Lodbjerg – Nymindegab er beliggende indenfor ca. seks meter vanddybden DVR90, er kystprofillet meget dynamisk, og der forekommer en mere eller mindre en konstant signifikant omlejring af sediment afhængig af bølgeforholdene. Kystprofillet bliver dog mere stabilt på større vanddybde, da det her er mindre påvirket af bølgerne.

Strækningen Lodbjerg – Nymindegab påvirkes af forskellige bølgeforhold med forskellige typer af brydende bølger (normalt karakteriseret som topbrydende og styrtbrydende). Topbrydende bølger, som forekommer under storm, kan medføre revledannelse. Revledannelsen under disse forhold skyldes, at der søværts for brydningspunktet (dvs. i brydnings-zonen) forekommer en mindre sandtransport ind mod kysten, og at der landværts 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 søværts, hvilket medfører en såkaldt "forstøjning" af kystprofillet.

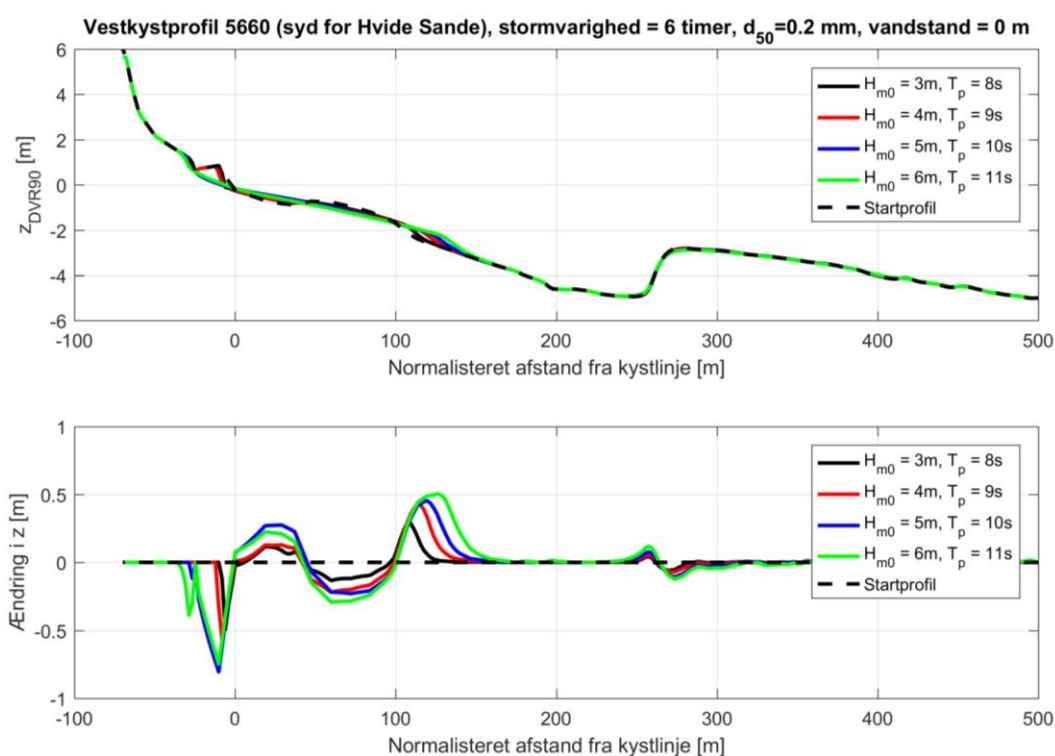
Såkaldte styrtbrydende bølger er i stand til at opslemme sand i vandsøjlen, hvilket bevirker at sandet transporteres ind imod kysten. Denne effekt er mest dominerende under forhold med dønninger (dvs. lange bølger med høj bølgeperiode). Igennem et længere tidsrum er kysten påvirket af både top- og styrtbrydende bølger, og der er således tale om en løbende omfordeling af sediment, samt en konstant dynamik af strandprofillet. Et eksempel på materialetransporten under storm og under tilfælde med "godt vejr" kan ses i figur 1-26.



Figur 1-26. Tværtransport giver erosion under storm og opbygning under roligt vejr (Kystdirektoratet, 2018).

Et eksempel på omfanget af dynamikken i kystprofilen ved Hvide Sande pga. den tværgående bølgeinducerede sedimenttransport kan ses i figur 1-27, baseret på simuleringer i en såkaldt XBeach-model. Modellen er i stand til at simulere hydrauliske og morfologiske processer på sandkyster og inkluderer vigtige hydrodynamiske processer som f.eks. bølgetransformation (refraktion, shoaling, brydning), lange bølger, transformation (generering, udbredelse, dissipation), bølgeinduceret-setup af vandstanden, samt indflydelse fra strøm. De morfologiske processer inkluderer bl.a. effekterne fra bundforskydning og suspenderet sediment. Modellen er valideret baseret på analytiske sammenligninger, laboratorieforsøg, samt feltmålinger (Deltares, 2015). Dog er modellen ikke valideret for brug i nærværende sammenhæng, men det forventes dog, at modellen er tilstrækkelig i stand til at simulere korrekte tendenser.

Under modelsimuleringerne er der forudsat en middelvandstand på nul meter (dog er effekten fra bølge-setup inkluderet). Herudover er der antaget en stormvarighed på seks timer. Bølger er genereret baseret på antagelse om et JONSWAP-spektra med $\gamma=3.3$ og er antaget at være vinkelrette på kysten. Der er dog inkluderet en retningsspredning på ca. otte grader. H_{m0} angiver den signifikante bølgehøjde (defineret ved frekvensdomænet) og T_p angiver peak-bølgeperioden.



Figur 1-27. Eksempel på ændringer i et kystprofil beliggende ved Hvide Sande efter forskellige storme med en varighed på seks timer (bølgerne er antaget at være vinkelrette på kysten).

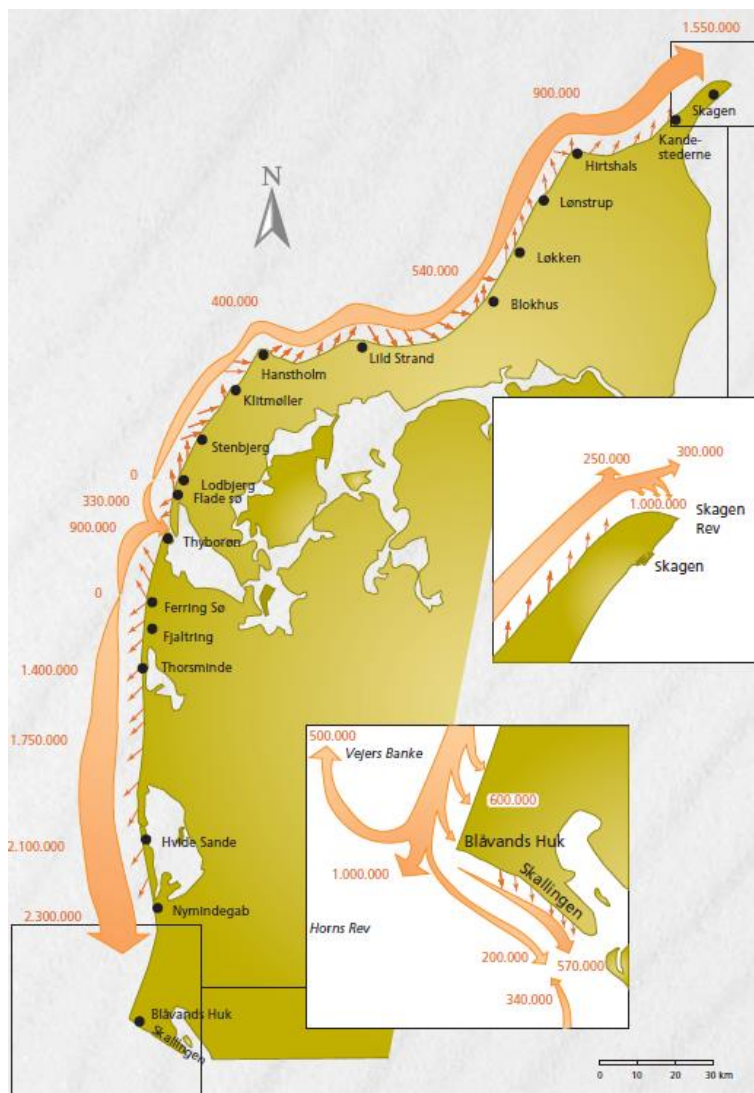
Som det fremgår af figur 1-27, kan det ses, at der forekommer bundændringer på op til ca. én meter i surf- og swash-zonen. Herudover forekommer der bundændringer, som dog er af mindre omfang omkring brydningspunktet på revlen (ca. på 4 til 5 meter vanddybde).

1.7.2

Langsgående sedimenttransport

Sedimentbudgettet for den langsgående sandtransport på Vestkysten er bl.a. undersøgt i rapporten "Sedimentbudget Vestkysten" (Kystdirektoratet, 2000). Se opgørelse i figur 1-28. Som det ses, er der tale om en umiddelbar god overensstemmelse imellem sedimentbudgettet og bølgerosen i figur 1-8, da de dele af Vestkysten, som er orienteret med en større vinkel ift. den dominerende bølgeretning fra ca. vestnordvest, er udsat for en større langsgående sandtransport. Generelt forekommer der en signifikant langsgående nettotransport (op imod 2 mio. $m^3/år$) langs

hele strækningen, og den akkumulerede transport (uafhængig af retningen) er forventelig endnu større.



Figur 1-28. Sedimentbudget for Vestkysten, tal er i $m^3/\text{år}$ (Kystdirektoratet, 2000).

Som det fremgår af sedimentbudgettet i figur 1-28, forekommer der såkaldte nulpunkter ved Ferring Sø samt ved Lodbjerg, hvilket betyder at den langsgående sandtransport nord- og syd for Ferring er henholdsvis syd- og nordgående. Den sydgående transport ender hovedsageligt ved Horns Rev, hvor en stor del af sandet sedimenterer, og den nordgående transport (nord for Ferring) ender til dels i Thyborøn Kanal og senere i Nissum Bredning. Der er således overordnet set tale om syd- og nord-liggende sedimentceller på Vestkysten.

1.7.3

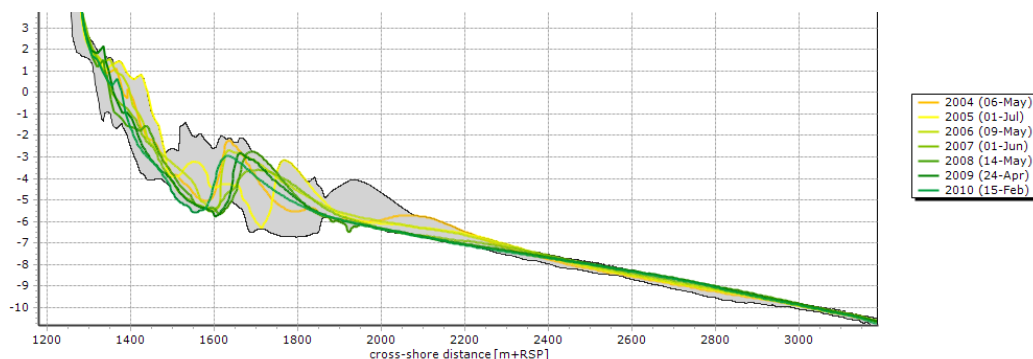
Kombineret langs- og tværgående sedimenttransport

Tidligere studier af sedimenttransporten langs Vestkysten har vist, at signifikante bølgehøjder på omkring 3 meter, målt på knap 20 meter vanddybde, er årsag til hovedparten af sedimenttransporten på Vestkysten (DHI, 2001). Bølger over 3 meter forekommer gennemsnitligt set i ca. 300 timer/år, og der er således tale om en relativ dynamisk kyststrækning.

Den bølgeinducerede langs- og tværgående sedimenttransport forekommer hovedsageligt indenfor den såkaldte aktive dybde, som er dybden hvor ud til bølgerne er i stand til at transportere sediment i en størrelsesorden, som er af betydning for morfologien indenfor en kortere årrække.

Ved gennemgang af morfologiske ændringer ud fra opmålte kystprofiler fra år til år er den aktive dybde ved Fjaltring tidligere vurderet til ca. 12 meter vanddybde. (DHI, 2001)

Et eksempel på ændringer i et kystprofil beliggende umiddelbart syd for Hvide Sande fremgår af figur 1-29. Som det fremgår af eksemplet, er dybdevariationerne størst omkring 2 til 7 meter dybden (ca. 4 meter), hvilket til dels skyldes den naturlige variation i beliggenheden af revlen.



Figur 1-29. Dybdeændringer i vestkystprofil 5730, beliggende ved Hvide Sande (Kystdirektoratet, 2018).

Kombination af langsgående og tværgående transport kan medføre, at revlen langs kysten genbrydes pga. uensformige transportmønstre og/eller uensformige bundkonturer, hvilket danner såkaldte revlehuller – også kendt som "hestehuller". Disse huller påvirker desuden beliggenheden af kystlinjen, hvor der skabes udbugtninger, som ofte vil bevæge sig i netto transportretningen for den langsgående transport. Dannelsen af revlehullerne og kystudbugtningerne (sandbølger) er påvirket af bl.a. indfaldsvinklen for bølgen. Sandbølgerne bidrager desuden væsentligt til sedimenttransporten langs Vestkysten.

1.8 Sedimentation/bypass ved havne

Den signifikante langsgående sandtransport langs strækningen medfører et behov for oprensninger ved havnene samt i Thyborøn Kanal. Behovet for "kunstigt" bypass samt oprensning udspringer af lokale strømpåvirkninger fra havnenes samt kanalens tilstedeværelse og udformning, som over årene kan være ændret.

I det følgende gives en kort beskrivelse af sedimentationen samt oprensningsbehovet ved henholdsvis Thyborøn, Thorsminde, samt Hvide Sande på strækningen.

1.8.1 Sedimentation ved Thyborøn Kanal og i Nissum Bredning

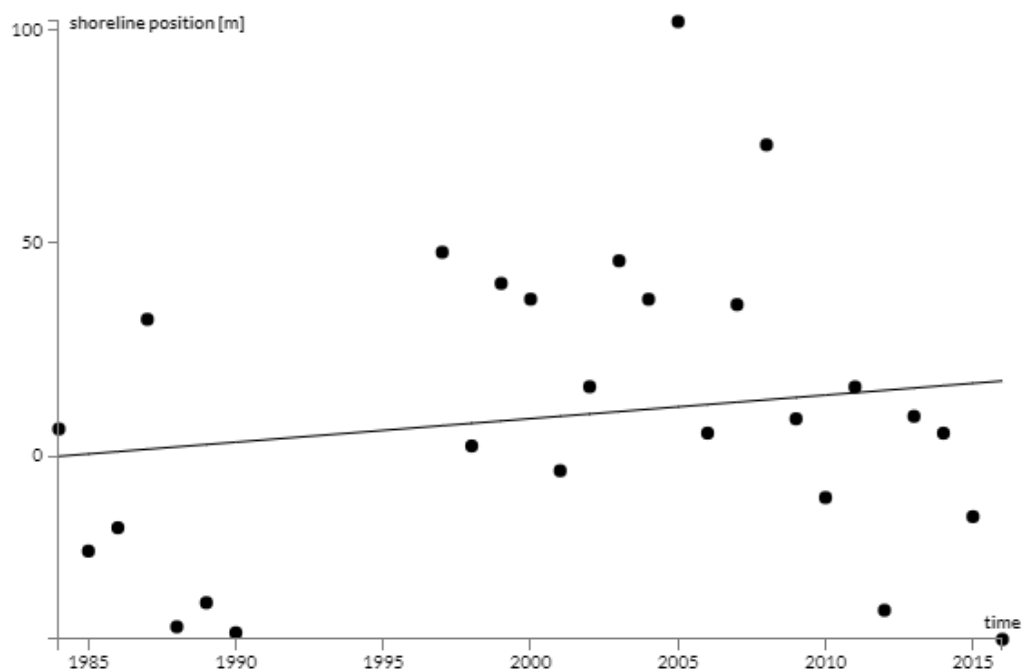
Jf. figur 1-28 forekommer der en naturlig netto sandtransport ind i Thyborøn Kanal fra strækningerne nord og syd for kanalen. Sandet sedimenteres hovedsageligt i fyrlinjen til Thyborøn Kanal (110.000 m³/år), på en sandpude beliggende umiddelbart vest for indsejlingen til Thyborøn Havn samt i selve indsejlingen til Thyborøn Havn (110.000 m³/år) (Kystdirektoratet, 2016). Der forekommer desuden en signifikant sedimentation i Nissum Bredning, se figur 1-30.



Figur 1-30. Thyborøn Kanal. Baggrundsfoto er fra (Google Earth, 2023).

Sedimentationen i hhv. Thyborøn kanal og i Nisum Bredning vil naturligt variere, afhængig af bølge- og strømforhold samt afhængig af de såkaldte sandbølger som løber langs kysten som følge af den langsgående transport, jf. afsnit 1.7.3.

Figur 1-31 viser variation af kystlinjens position umiddelbart syd for Thyborøn kanal, imellem høfderne på Harboøre Tange. Som det fremgår af figuren, forekommer der på strækningen en forholdsvis stor variation, som delvist skyldes sandbølger samt delvist tidligere sandfodringer på strækningen. Variationen af kystlinjens position vil videre medføre, at der desuden forekommer en årlig variation i sedimentation i Thyborøn Kanal.

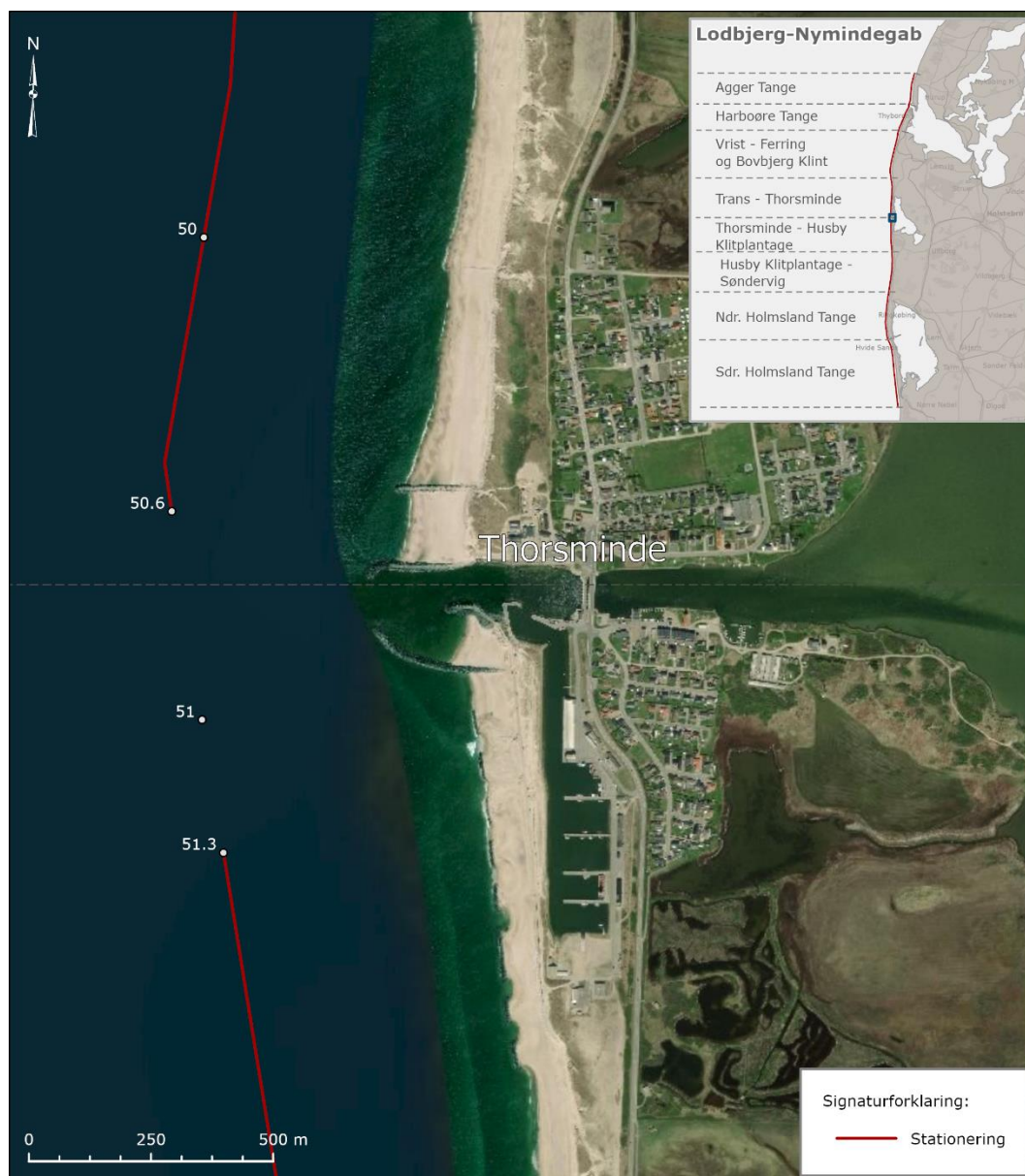


Figur 1-31. Variation i kystlinjepositionen umiddelbart syd for Thybørn kanal baseret på satellitfotos (TUDelft, 2022).

1.8.2

Sedimentation ved Thorsminde Havn og Nisum Fjord

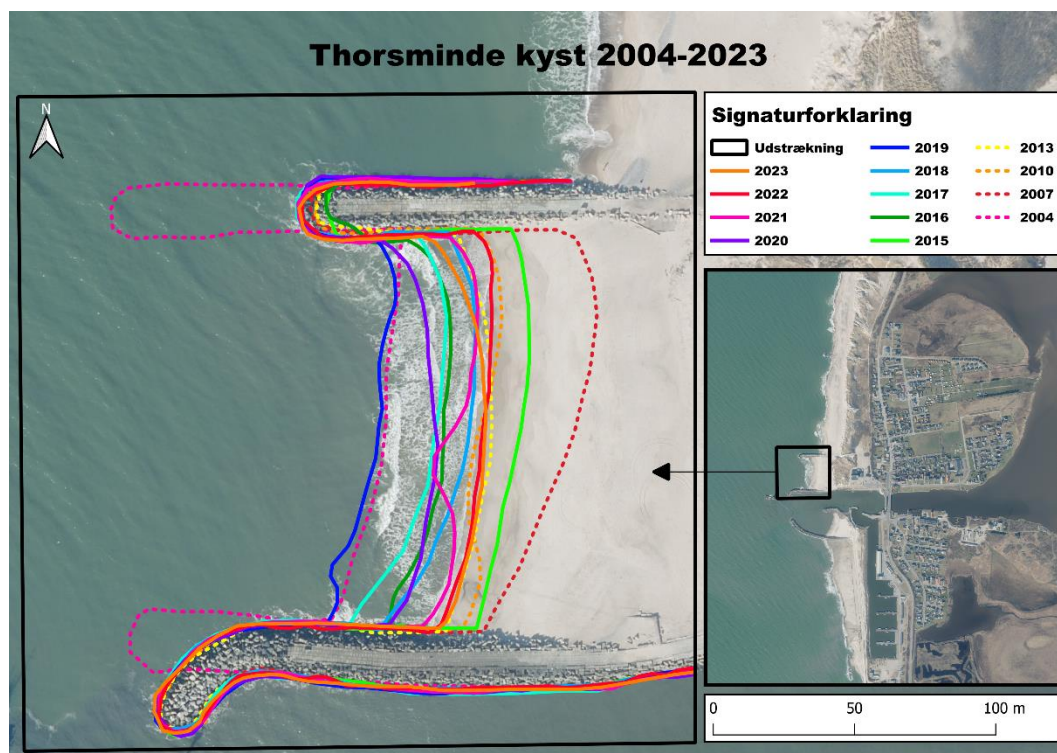
Jf. figur 1-28 forekommer der ved Thorsminde Havn en netto-sydgående sandtransport, hvilket medfører sedimentation på nordsiden af havnen samt erosion på sydsiden, se figur 1-32. Udover sedimentationen opstrøms for havnen forekommer der sedimentation i bl.a. indsejlingen og havnebassinerne. Den del, der havner i indsejlingen, bypasses. Den årlige oprensning i havnebassinerne er ca. 2.500 – 5.000 m³ (Miljø- og Fødevareministeriet, 2022). Derudover vil der, dog i mindre omfang sammenlignet med ved Nisum Bredning, forekomme sedimentation i Nisum Fjord pga. potentiel sedimentation af suspenderet sediment i det vand, der bliver lukket ind i fjorden under den almindelige slusedrift.



Figur 1-32. Thorsminde Havn.

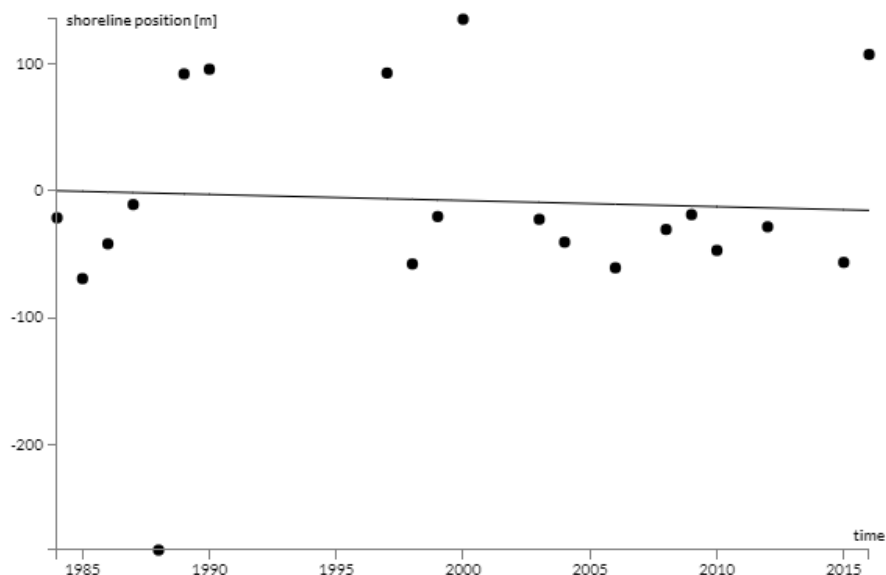
Sedimentation ved Thorsminde Havn afhænger delvist af kystlinjens position, da området nord for nordmolen til Thorsminde Havn vil fungere som en sandbuffer, der forsinker sandet før det aflejres i indsejlingen. Således vil det naturlige sandbypass, forbi nordmolen, og dermed sedimentation i indsejlingen, øges, når kystlinjens beliggenhed nærmer sig molehovedet ved nordmolen.

Figur 1-33 viser kystlinjens skønnede variation umiddelbart nord for Thorsminde Havn i perioden 2004 – 2023, baseret på satellitfotos. Desværre haves ikke information om dato for satellitfotos, så det skal nævnes, at der kan forekomme sæsonvariationer. Som det fremgår af figuren, har der i perioden forekommet en relativt signifikant variation, hvilket delvist kan skyldes naturlige variationer pga. såkaldte sandbølger jf. afsnit 1.7.3 samt delvist såkaldte præventive oprensninger, hvor sandet fjernes opstrøms for Thorsminde Havn for at øge bufferen ift. sedimentation i indsejlingen. Bl.a. har der i september 2022 forekommet afgravning af sand fra stranden for at flytte den tilbage.



Figur 1-33. Variation i kystlinjepositionen ved Thorsminde Havn i perioden 2004 – 2023. Baggrundsfoto er fra (Google Earth, 2023).

Figur 1-34 viser samme tendens som i figur 1-33, dvs. at kystlinjens position nord for Thorsminde viser forholdsvis stor variation. Variationen i kystlinjen vil naturligt medføre, at der også forekommer en årlig variation i sedimentationen ved Thorsminde havn, og dermed en årlig variation i oprensningsbehovet.



Figur 1-34. Variation i kystlinjepositionen umiddelbart nord for Thorsminde Havn baseret på satellitfotos (TUDelft, 2022).

1.8.3 Sedimentation ved Hvide Sande Havn og Ringkøbing Fjord

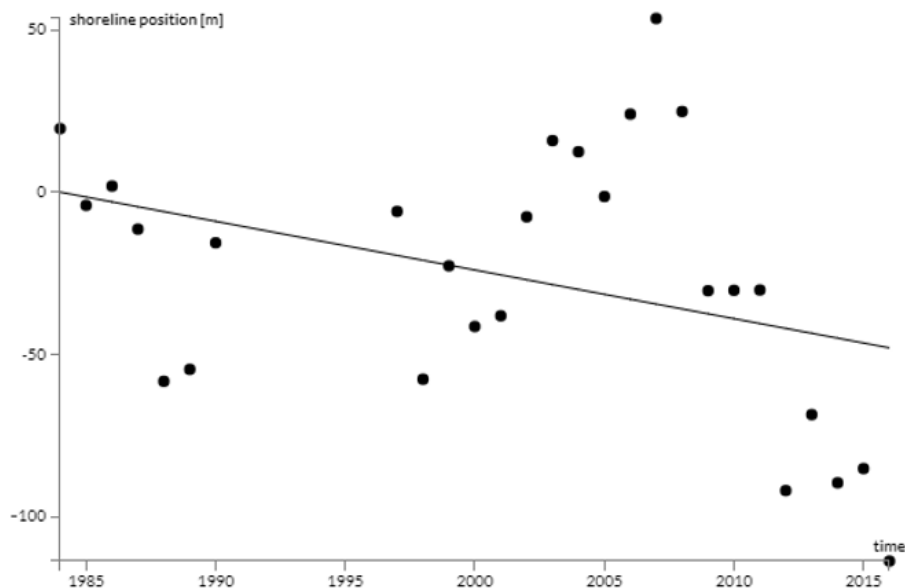
Jf. figur 1-28 forekommer der ved Hvide Sande Havn en netto-sydgående sandtransport som bevirker sedimentation på nordsiden samt erosion på sydsiden af havnen, se figur 1-35. Udover sedimentation ved ydermolerne (indsejlingen) forekommer der sedimentation i for-havnen samt i havnebassinerne. Der kan desuden gennemføres en præventiv oprensning fra nordsiden af havnen (300.000 m³) (Miljø- og Fødevareministeriet, 2017). Denne præventive oprensning forekommer dog ikke hvert år.

På samme vis som for Limfjorden og Nisum Fjord kan der også potentielt forekomme sedimentation af suspenderet sediment i det vand som bliver lukket ind i Ringkøbing Fjord under den normale slusedrift. Sedimentationen vurderes dog at være af relativt begrænset omfang. Fra Ringkøbing Fjord er der desuden forbindelse til Stadil Fjord, men denne forbindelse fører dog ikke til, at der forekommer sedimentation af suspenderet sediment fra Nordsøen i Stadil Fjord.



Figur 1-35. Hvide Sande Havn. Baggrundsfoto er fra (Google Earth, 2023).

Figur 1-36 viser variation af kystlinjens position umiddelbart nord for Hvide Sande Havn. Som det fremgår af figuren, forekommer der på strækningen en forholdsvis stor variation, som delvist kan skyldes sandbølger, samt delvist tidligere sandfodringer på strækningen. Bl.a. blev der i 2011 afgravet ca. 1,2 mio. m³ på denne strækning. Variationen af kystlinjepositionen vil videre medføre, at der desuden forekommer en årlig variation i sedimentationen i Hvide Sande Havn.



Figur 1-36. Variation i kystlinjepositionen umiddelbart nord for Hvide Sande Havn baseret på satellitfotos (TUDelft, 2022).

1.9 Naturlig koncentration af suspenderet sediment (SSC)

Den signifikante sedimenttransport langs Vestkysten, beskrevet i afsnit 1.7 medfører, at der er en naturlig koncentration af suspenderet sediment (SSC), som bl.a. påvirker vandets farve og gennemsigtighed (sigtdybde). Den naturlige sedimentkoncentration benævnes også *baggrundskoncentrationen*.

Der er ifm. den tidligere udarbejdede miljøkonsekvensrapport (VVM) (Rambøll, 2020) for sandfodring på Lodbjerg – Nymindegab-strækningen gennemført modellering af SSC ved udvalgte kystprofiler ved Hvide Sande havn, Thorsminde havn, samt Thyborøn. De tre lokaliteter udgør eksempler på forskellige dybde/kystprofiler, og dermed eksempler på variationer i det naturlige SSC-forhold langs Lodbjerg – Nymindegab-strækningen. Baseret på modelleringen er det bl.a. konkluderet, at den bølgeinducerede SSC er afhængig af lokale dybdeforhold, dvs. kystprofilens udformning. Grunden hertil er, at bølgerne hvirvler sedimentet (sandet) op, når den bølgeinducerede bundforskydning er tilstrækkelig hertil, hvilket er tilfældet ved høje bølger og lav vanddybde.

Modellerede SSC er suppleret med viden baseret på målte SSC-niveauer langs Lodbjerg – Nymindegab-strækningen. Målingerne er foretaget i forbindelse med to måleprogrammer gennemført i hhv. 2020 (Rambøll, 2021) samt 2022 (Rambøll, 2023a). Hovedresultater fra de to måleprogrammer præsenteres i det følgende, og fremgår desuden af rapporten; (Rambøll, DTU Aqua, & KDI, 2023). For yderligere beskrivelse af målingerne henvises der til de respektive rapporter.

Måleprogrammerne i 2020 og 2022 er gennemført med følgende formål:

- **Måleprogram 2020**, gennemført i perioden 25/08/2020 – 31/10/2020 (Rambøll, 2021):
 - o Måling af SSC-niveau ved Hvide Sande, Thorsminde, samt Thyborøn

- Måling af sigtdybder, samt vurdering af anvendelighed ift. omsætning fra sigtdybde til SSC
 - Måling af kornstørrelsesfordeling samt faldhastighed af suspenderet sediment
 - Måling af kornstørrelsesfordeling i skibslaster
 - Opnå viden om naturlig SSC-niveau
- **Måleprogram 2022**, gennemført i perioden 12/04/2022 – 23/05/2022 (Rambøll, 2023a):
- Måling af SSC-niveau ved- og i Hvide Sande havn samt i Ringkøbing Fjord
 - Samtidig registrering af smoltadfærd
 - Måling af suspenderet sedimentkoncentration ifm. kunstige SSC-kampagner
 - Måling af kornstørrelsesfordeling samt faldhastighed af suspenderet sediment
 - Måling af kornstørrelsesfordeling i skibslaster

1.9.1

Faktorer, der påvirker SSC-niveauet ved Vestkystthavnene

SSC langs Vestkysten og mere specifikt ved de tre lokaliteter; Hvide Sande, Thorsminde samt Thyborøn, påvirkes eller genereres af forskellige faktorer. Disse er opdelt i tre overordnede kategorier, som kategoriseres via farver visualiseret i figur 1-37.

1. Naturligt SSC-niveau:
 - Bidrag fra bølgeinduceret SSC
 - Bidrag fra strøminduceret SSC (kyst-/tidevandsstrøm)
2. Menneskeskabt SSC, som ikke er en direkte effekt af sandfodringsaktiviteterne:
 - Påvirkning af SSC som følge af slusedrift ved Thorsminde og Hvide Sande (dvs. slusegenereret strøm samt udløb af fjordvand med højere SSC-niveau)
 - Påvirkning af SSC som følge af skibstrafik
 - Påvirkning af SSC som følge af oprensninger/bypass i havne og indsejlinger
3. Menneskeskabt SSC, som er en direkte konsekvens af sandfodringsaktiviteter:
 - Sandfodring (kystnær sandfodring ved rainbowing eller klapning/splitning samt strandfodring)



Figur 1-37. Illustration af kilder til påvirkning af baggrunds-SSC. Angivelse af placeringer af bølge- og strømmåler samt turbiditetsmåler i figuren er fra Måleprogram 2020. Baggrundsfoto fra (Google Earth, 2023) [Data: SIO, NOAA U.S. Navy, NGA, GEBCO].

Naturligt SSC og menneskabt SSC, som ikke skyldes sandfodringsaktiviteterne, er ifm. miljøkonsekvensvurderingerne betragtet som baggrundskoncentrationen.

Påvirkning af SSC ifm. sandfodringsaktiviteter er vurderet i afsnit 2.6. Hertil er der i forbindelse med måleprogrammer gennemført kunstige SSC-kampagner, hvilket er beskrevet i afsnit 2.6.1.

1.9.2 Naturligt SSC-niveau omkring vestkysthavnene

Der forekommer naturligt en forholdsvis høj kystparallel sedimenttransport langs Vestkysten, herunder langs fællesafalestrækningen Lodbjerg – Nymindegab. Jf. (Kystdirektoratet, 2000) er netto-sandtransporten f.eks. ved Hvide Sande ca. 2.100.000 m³/år (sydgående). Sandtransporten er primært bølgedrevet. Processerne til generering af denne langsgående sedimenttransport er nærmere beskrevet i bl.a. (Rambøll, 2020).

Estimer for SSC-niveau fra litteraturen samt satellit-målinger

En opsummering af estimer vedr. baggrunds SSC-niveauer fra litteraturen er givet i tabel 1-12.

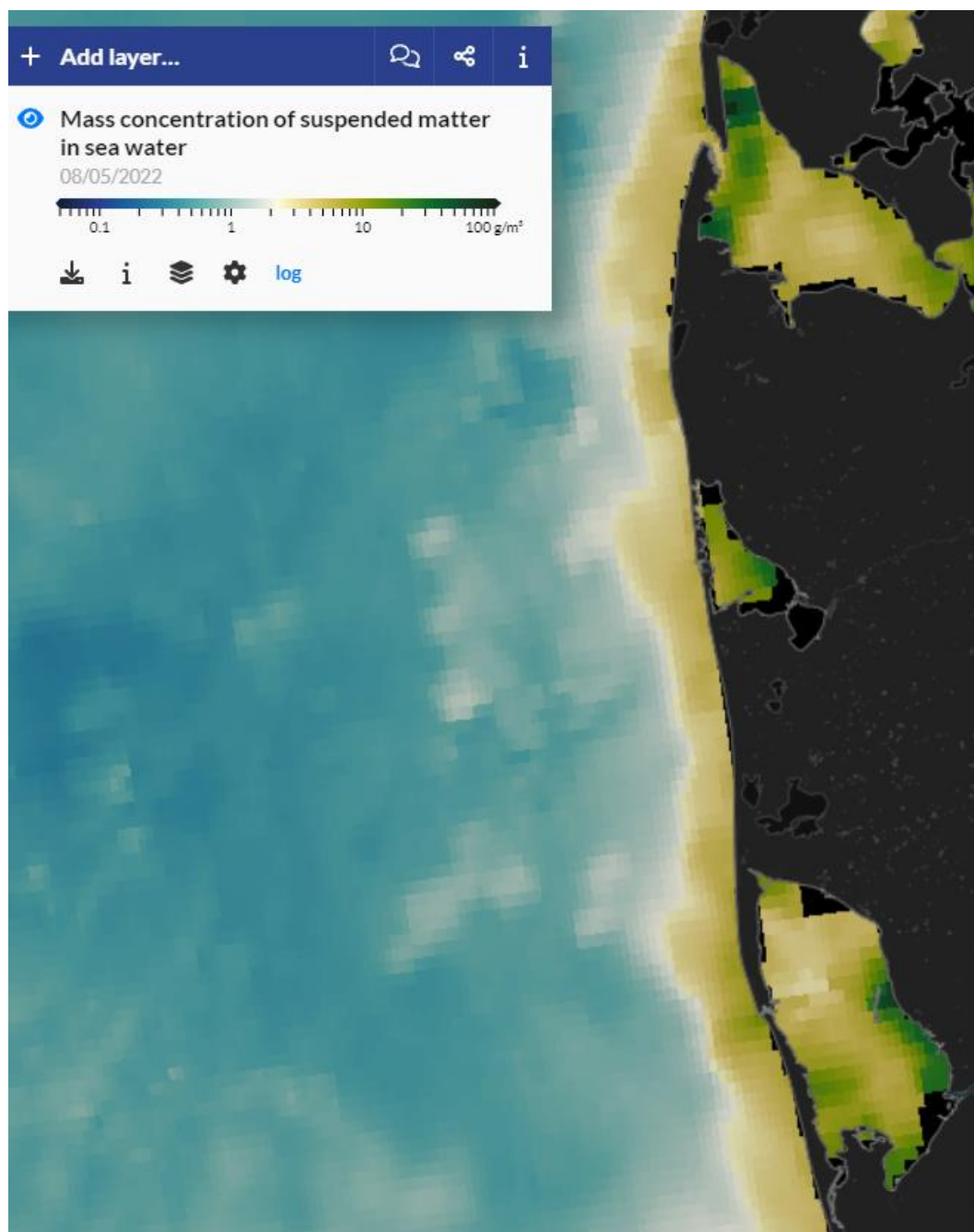
Lokalitet	Baggrundskoncentration	Reference	Note
Vestkysten	5 - 10 mg/l i april – juni	(CEFAS, 2016)	Baseret på estimer fra satellit-fotos
Limfjorden	2 - 10 mg/l	(Hansen, 2019)	Baseret på estimer fra undervandsfotos ved Limfjordsbroen i Aalborg
Ringkøbing Fjord	36 mg/l	(Kogsgaard Miljø, 2014)	Baseret på amtskommunens målinger siden 1981 – placering uvis.

Tabel 1-12. Opsummering af referencer i litteraturen vedr. baggrundskoncentration af SSC (Rambøll, 2021).

Figur 1-38 viser et eksempel på variation af SSC langs Vestkysten samt i fjordene (Ringkøbing Fjord og Nisum Fjord) d. 8. maj 2022 (hvilket er perioden for gennemførelse af Måleprogram 2022). SSC-niveauer i figur 1-38 er baseret på satellitfotos fra Copernicus og angiver dermed SSC i overfladen (ekskl. biologisk suspenderet materiale). SSC-data fra Copernicus er valideret imod in-situ målinger.

Nærmere beskrivelse af datavalidering er givet i (Copernicus, 2023a). Desuden har Rambøll lavet en sammenligning af data fra Copernicus med data opnået ifm. måleprogram 2020 og 2022 i (Rambøll, DTU Aqua, & KDI, 2023).

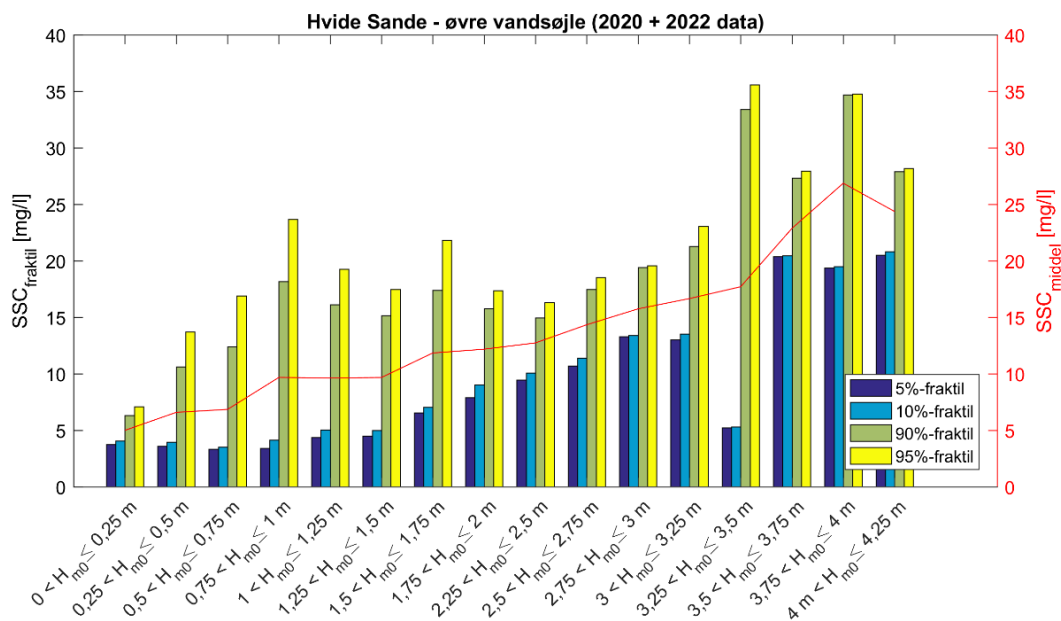
Som det fremgår af figur 1-38, haves naturligt relativt høje SSC-niveauer langs Vestkysten. D. 8. maj forekom der f.eks. et SSC-niveau på ca. 10 mg/l ved Hvide Sande og ca. 25 mg/l ved udløbet fra Skjern Å.



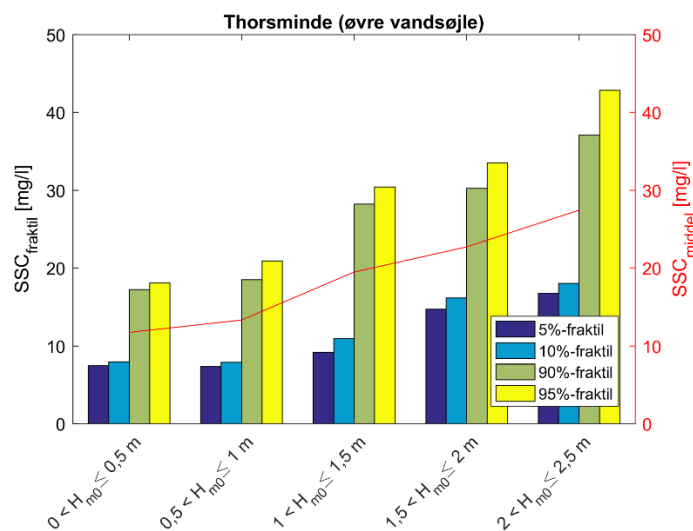
Figur 1-38. Eksempel på SSC-niveau langs Lodbjerg – Nymindegab-strækningen d. 8. maj 2022 (hvilket er i perioden for gennemførelsen af Måleprogram 2022) (Copernicus, 2023a).

Målt baggrunds-SSC-niveau ved Vestkysthavnene ifm. måleprogrammer

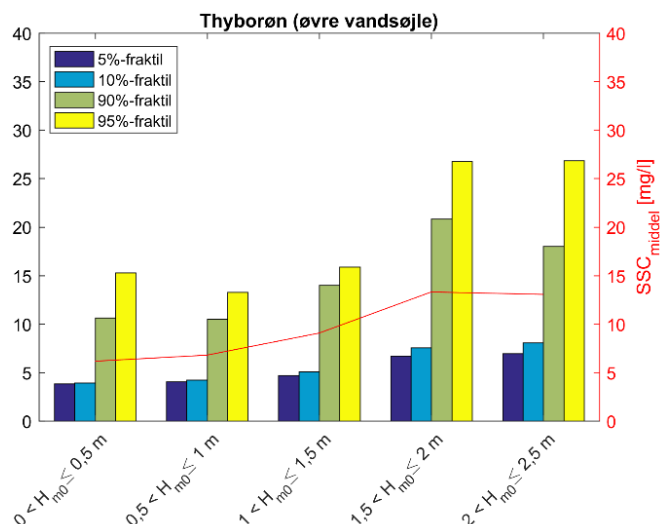
Pga. den signifikante bølgedrevne sandtransport på Vestkysten haves en relativt klar sammenhæng imellem bølgehøjde og SSC-niveau. Disse sammenhænge er analyseret både ifm. Måleprogram 2020 og Måleprogram 2022. Sammenhængen imellem SSC og den såkaldte signifikante bølgehøjde, H_{m0} , umiddelbart ud for Hvide Sande Havn, Thorsminde Havn, samt Thyborøn Kanal er vist i figur 1-39 - figur 1-41. Figurerne viser SSC-niveauet i toppen af vandsøjlen. Måleprogrammerne har vist, at det naturlige SSC-niveau er markant højere i bunden af vandsøjlen sammenlignet med toppen, som følge af den signifikante bølgedrevne bundtransport.



Figur 1-39. Histogram for sammenhæng mellem bølgehøjde og SSC ved Hvide Sande i den øvre del af vandsøjlen. Målinger stammer fra Måleprogram 2020 samt 2022. Rød streg angiver middel-SSC.



Figur 1-40. Histogram for sammenhæng imellem bølgehøjde samt SSC ved Thorsminde i den øvre del af vandsøjlen. Målinger stammer fra Måleprogram 2020. Rød streg angiver middel-SSC.



Figur 1-41. Histogram for sammenhæng imellem bølgehøjde samt SSC ved Thyborøn Kanal i den øvre del af vandsøjlen. Målinger stammer fra Måleprogram 2020. Rød streg angiver middel-SSC.

Figur 1-39 - figur 1-41 er gengivet i tabel 1-13 som viser sammenhæng imellem middel SSC-niveau og bølgehøjder.

Bølgeforhold	Hvide Sande		Thorsminde		Thyborøn	
	[%]	Middel SSC [mg/l]	[%]	Middel SSC [mg/l]	[%]	Middel SSC [mg/l]
$0 < H_{m0} \leq 0,5 \text{ m}$	29	6	21	12	29	6
$0,5 < H_{m0} \leq 1 \text{ m}$	35	8	34	13	35	7
$1 < H_{m0} \leq 1,5 \text{ m}$	20	10	21	19	20	9
$1,5 < H_{m0} \leq 2 \text{ m}$	10	12	13	22	11	13
$2 < H_{m0} \leq 2,5 \text{ m}$	4	13	6	27	4	13
$2,5 < H_{m0} \leq 3 \text{ m}$	1	16	3	31	1	-

Tabel 1-13. Sammenhæng imellem middel SSC-niveau og bølgehøjder (Rambøll, 2021).

Udover den bølgegenererede SSC på Vestkysten kan SSC-niveauet desuden potentielt påvirkes af den tidevandsgenererede kyststrøm. Dette kan specielt forekomme ved kraftige udledninger fra Elben til Vadehavet, i tilfældet hvor der forekommer kraftige nedbørshændelser i det nordlige Tyskland.

1.9.3

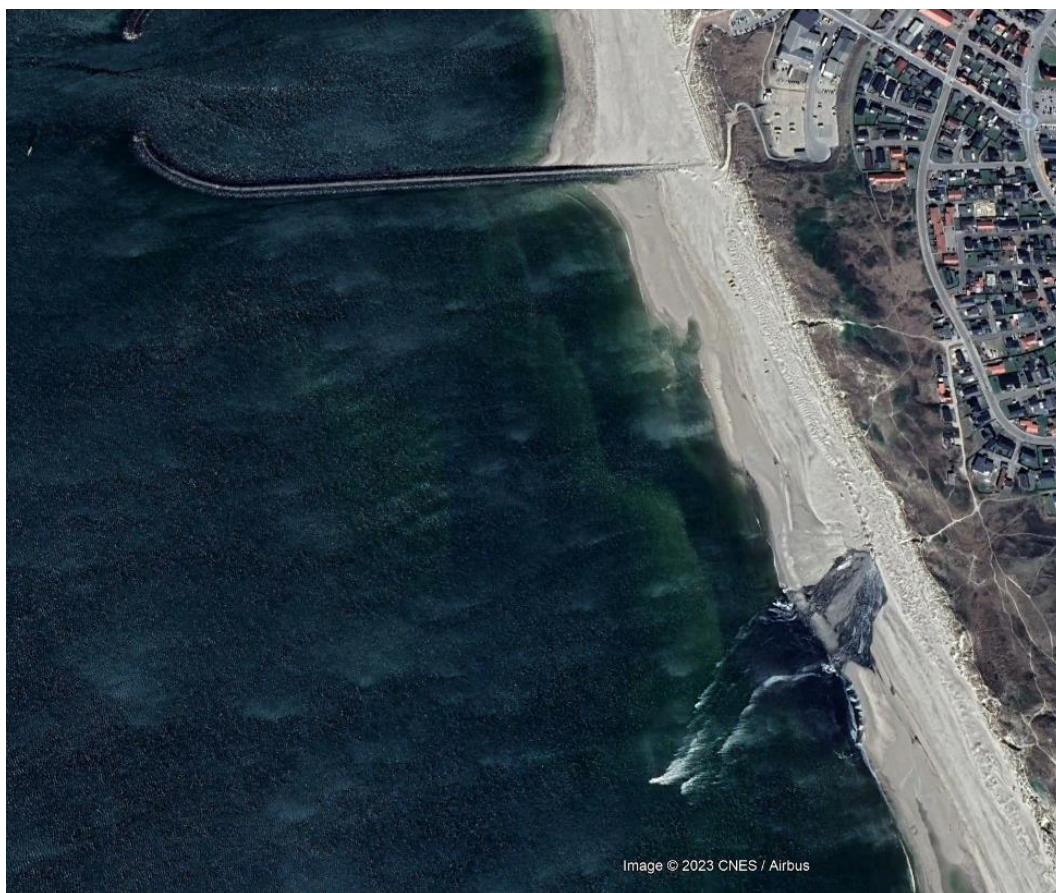
Menneskeskabt SSC, som ikke er en direkte effekt af sandfodring

Driften af Vestkysthavnene medfører en menneskeskabt påvirkning af SSC-niveauet, der beskrives i det følgende. Desuden medfører afvandingssluserne fra Nissum Fjord og Ringkøbing Fjord, at SSC-niveauet påvirkes i perioder.

Oprensninger og bypass

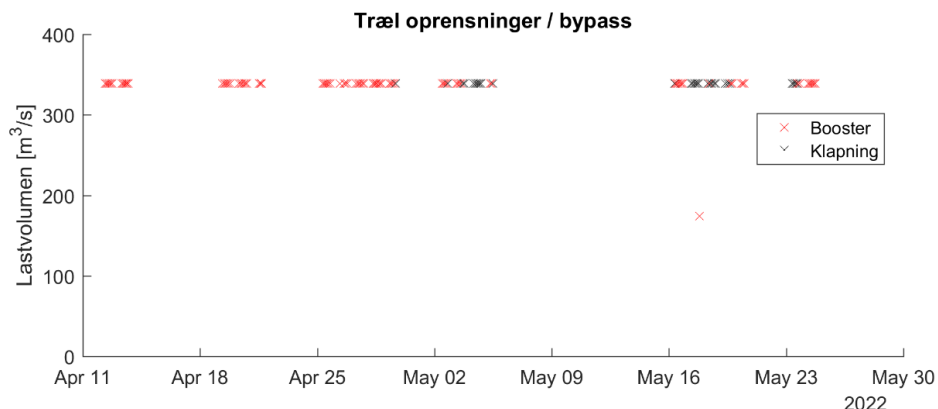
Som nævnt i miljøkonsekvensvurderingen (Rambøll, 2020) forekommer der jævnlige oprensninger i og ved havnene i Hvide Sande og Thorsminde samt i Thyborøn Kanal for at sikre tilstrækkelig vanddybde til besejling af havnene. Havnene står selv for oprensningerne, der både sker i indsejlingerne samt i havnebassinene, hvor det oprensede sand fra indsejlingerne efterfølgende bypasses kystnært (klapning/splitning) eller pumpes gennem rør ind på stranden. Figur 1-42 viser et eksempel, hvor returvand løber tilbage til havet fra boosterrøret ifm. bypass. Fotoet er fra d. 21. april 2022 (samme periode, hvor Måleprogram 2022 blev gennemført).

Både oprensningsaktiviteten samt det efterfølgende bypass kan give anledning til et lokalt forøget SSC-niveau, da de fineste sandfraktioner med lavere faldhastighed vil forblive et stykke tid i vandsøjlen.



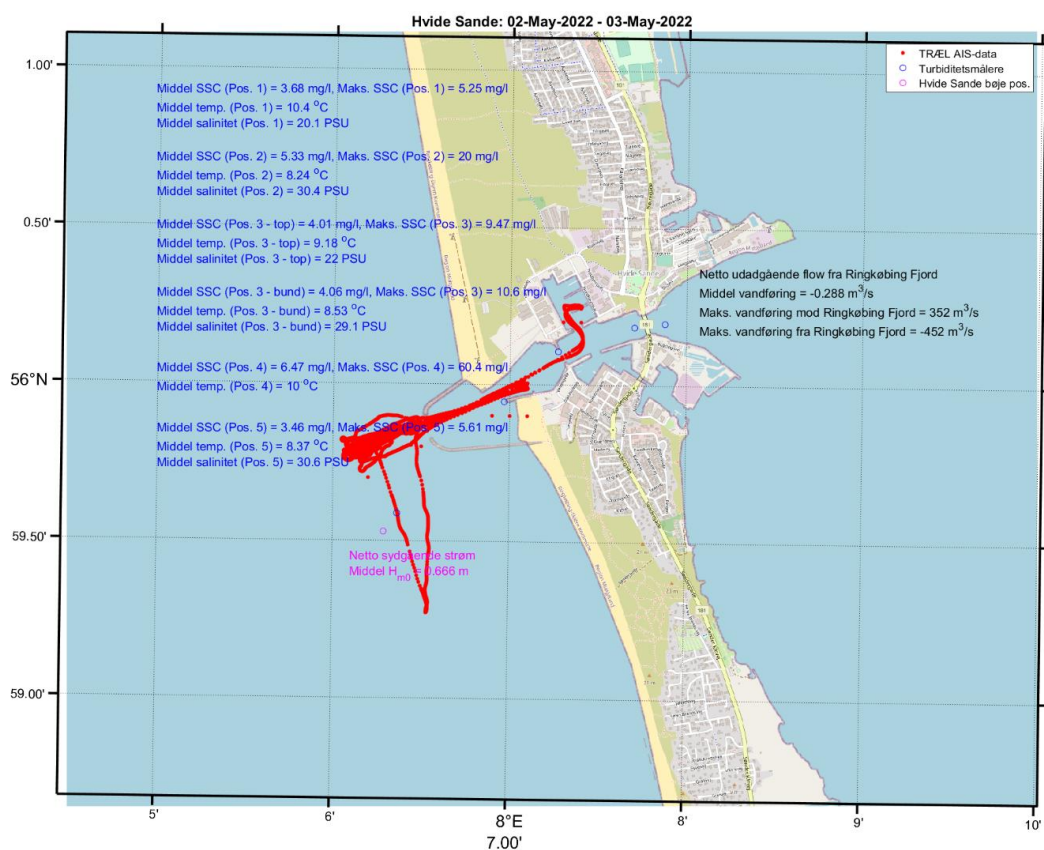
Figur 1-42. Oversigtsbillede af bypass via rør på stranden syd for Hvide Sande (Google Earth, 2023) [DataCNES / Airbus].

Log for oprensningsaktiviteter samt lastvolumener fra sandsugeren Træl i Hvide Sande under perioden for Måleprogram 2022 er vist i figur 1-43. Som det fremgår af figuren, har der forekommet relativt hyppige oprensninger i måleperioden, hvilket er typisk for forårsperioden pga. behov for oprensning efter sedimentation i indsejlingen i løbet af vinterperioden. Bypass af det oprensede sediment er i perioden primært foregået via booster, dvs. at sandet er udledt på stranden syd for Hvide Sande. Herudover er der dog også foretaget klapning/splitning af sedimentet kystnært, som bypass.



Figur 1-43. Tids-log samt lastvolumener for Hvide Sandes oprensningsskib Træl fra oprensninger i Hvide Sande Havn i perioden for gennemførelse af Måleprogram 2022.

Et eksempel for Træls skibspositioner d. 2. – 3. maj 2022 (24 timer) er vist i figur 1-44. AIS-track for Træl i den resterende del af Måleprogram 2022 er vist i (Rambøll, 2023a).



Figur 1-44. Eksempel på skibspositionerne for Hvide Sandes oprensningsskib Træl i perioden d. 2. – 3. maj, 2022, samt middel- og maks. SSC ved turbiditetsmålerne, slusedata samt bølge-/strømdata. Baggrundskort er fra (OpenStreetMap, 2023) (Rambøll, 2023a).

Baseret på SSC-målinger under Måleprogram 2022 har det ikke været muligt at isolere påvirkningen af SSC-niveauet som følge af oprensningsaktiviteterne samt anvendelse af rør fra de øvrige påvirkninger, hvilket skyldes, at der generelt er stor variation i SSC-niveauet, som ikke er direkte korreleret med Træls aktiviteter. Således kan det baseret på målinger ikke med sikkerhed bestemmes, i hvilket omfang/niveau oprensninger påvirker SSC-niveauet i havnebassinerne, men blot at der højst sandsynligt har forekommet en påvirkning.

Vandgennemstrømning i afvandingssluserne

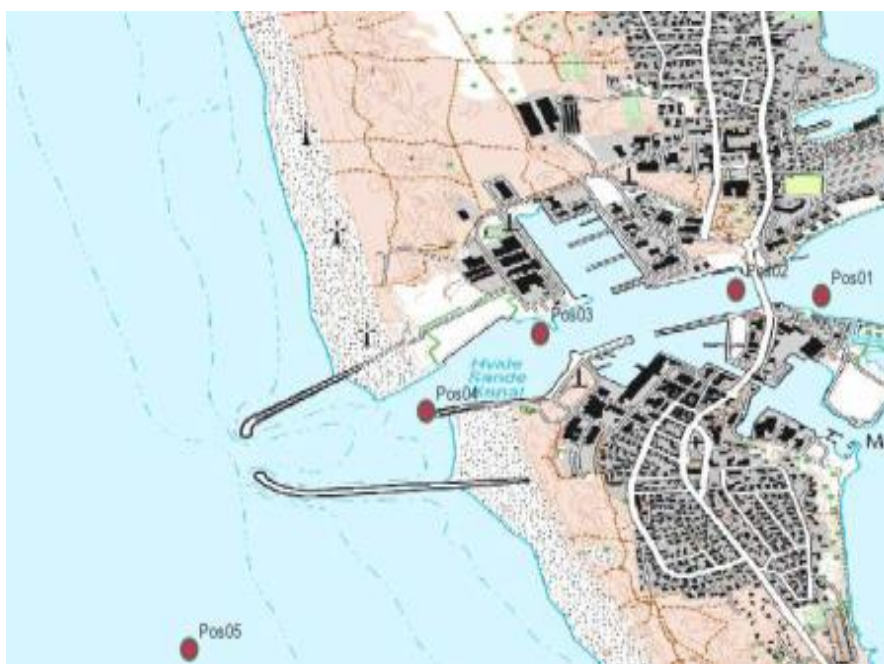
En anden påvirkning af SSC-niveauet, der delvist er menneskeskabt, er udvekslingen af vand mellem fjordene og Nordsøen via afvandingssluserne i Hvide Sande og Thorsminde. Her transporteres suspenderet materiale fra fjordene ud gennem indsejlingerne.

Et eksempel på forøget turbiditet (og dermed påvirkning af SSC-niveauet) som følge af udveksling af vand mellem Nissum Fjord og Nordsøen gennem slusen ved Thorsminde, fremgår af figur 1-45. Heraf kan den forøgede turbiditet ses af den ændrede farve i vandet i indsejlingen til Thorsminde Havn.



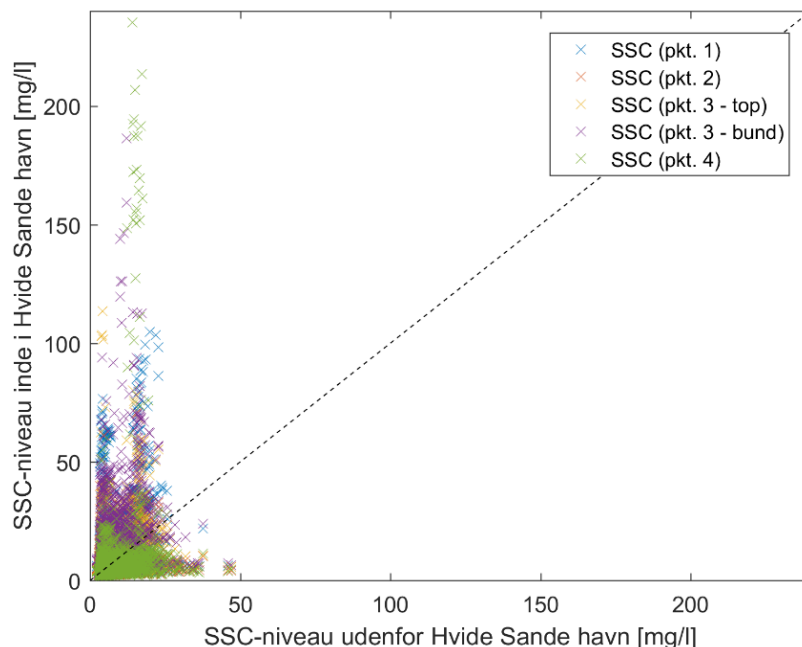
Figur 1-45. Påvirkning af turbiditet (SSC) som følge af udløb fra Nissum Fjord (illustreret via rød stiple linje). Data: SIO, NOAA U.S. Navy, NGA, GEBCO]. Baggrundsfoto er fra (Google Earth, 2023).

Sammenhængen mellem vandføringen i afvandingsslusen fra Ringkøbing Fjord og SSC-niveauet i Hvide Sande Havn er nærmere belyst i (Rambøll, 2023a). Her blev der målt SSC-niveau på en position ved slusen samt ved målepositioner i de indre havnebassiner, se placeringer af målepositioner ifm. Måleprogram 2022 i figur 1-46.



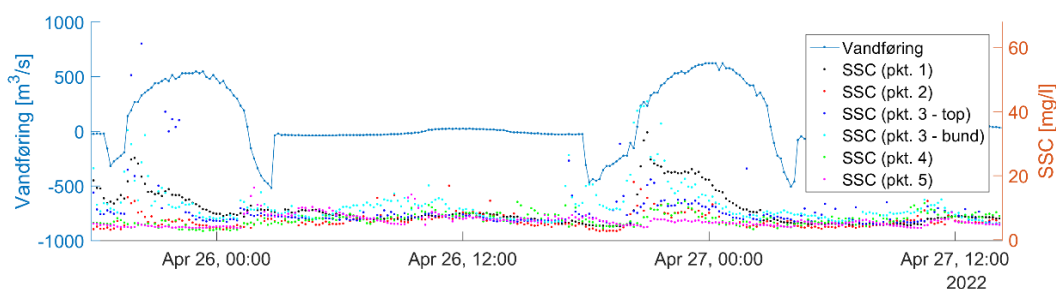
Figur 1-46. Placering af turbiditetsmålere ved Hvide Sande havn, samt navngivelse af positioner (DHI, 2022).

Baseret på en sammenligning af samtidige turbiditetsmålinger ved målepositionen udenfor Hvide Sande havn og i inderbassinene er det konstateret, at SSC-niveauet inde i havnen (tættere på slusen) oftest er højere sammenlignet med SSC-niveauet uden for havnen. Dette fremgår af figur 1-47, som viser samtidige målte SSC-niveauer uden for havnen (pos. 5) sammenlignet med SSC målt inde i havnen (Pos. 1 – 4).



Figur 1-47. Samtidige målinger af SSC udenfor Hvide Sande havn sammenlignet med Pos. 1, 2, 3 (top/bund) og 4, som er placeret inde i havnen, tættere på afvandingslusen til Ringkøbing Fjord. Hvis punkterne ligger på den sorte stiplede linje er SSC-niveauet ens i havnebassinene og udenfor. Når punkterne ligger under den stiplede linje, er der målt højere SSC-niveau udenfor Hvide Sande Havn og når punkterne ligger over den stiplede linje, er der målt højere SSC-niveau inde i havnebassinene.

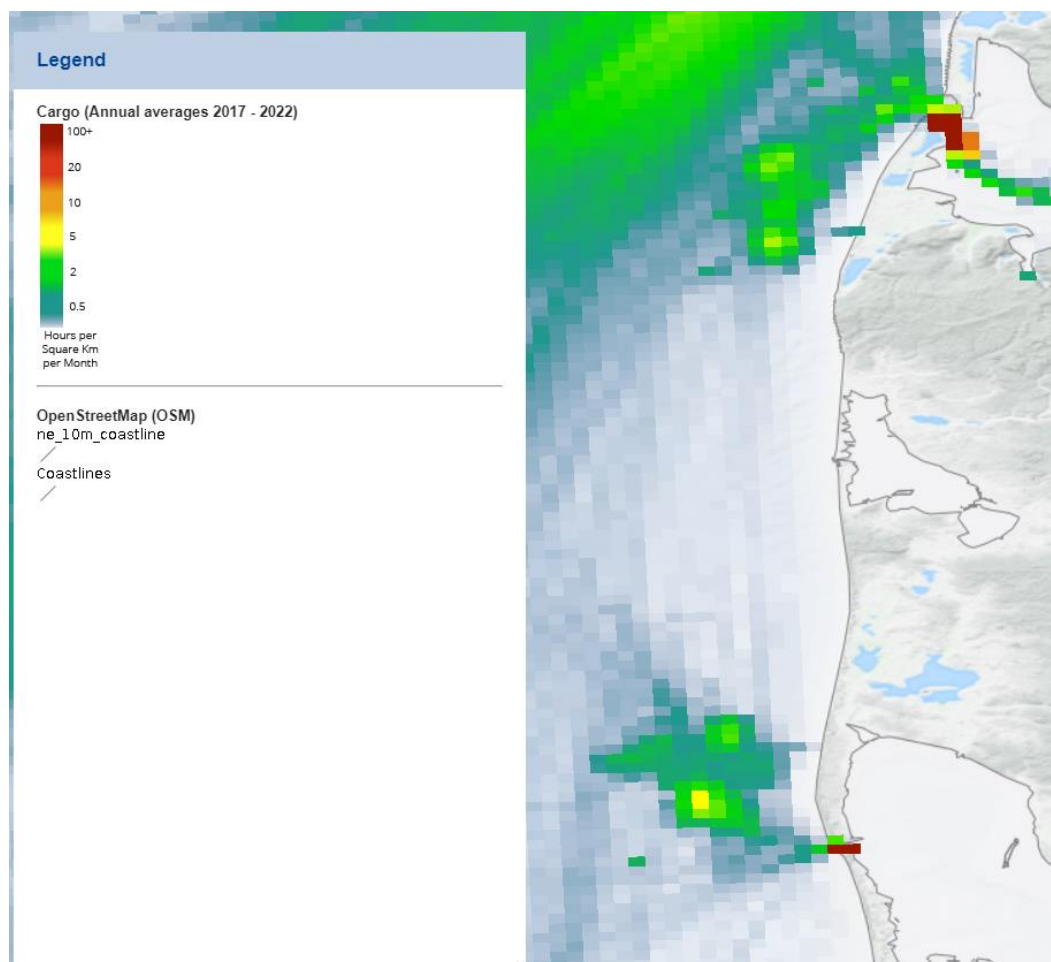
Forklaringen til den højere turbiditet (SSC-niveau) inde i Hvide Sande Havn sammenlignet med i havet er den markante vandgennemstrømning igennem havnebassinene grundet afvandingsslusen. Dette fremgår yderligere af figur 1-48, som viser sammenhængen imellem vandføringen ved afvandingsslusen og målte turbiditeter (omsat til SSC) ved de fem målepositioner i figur 1-46.



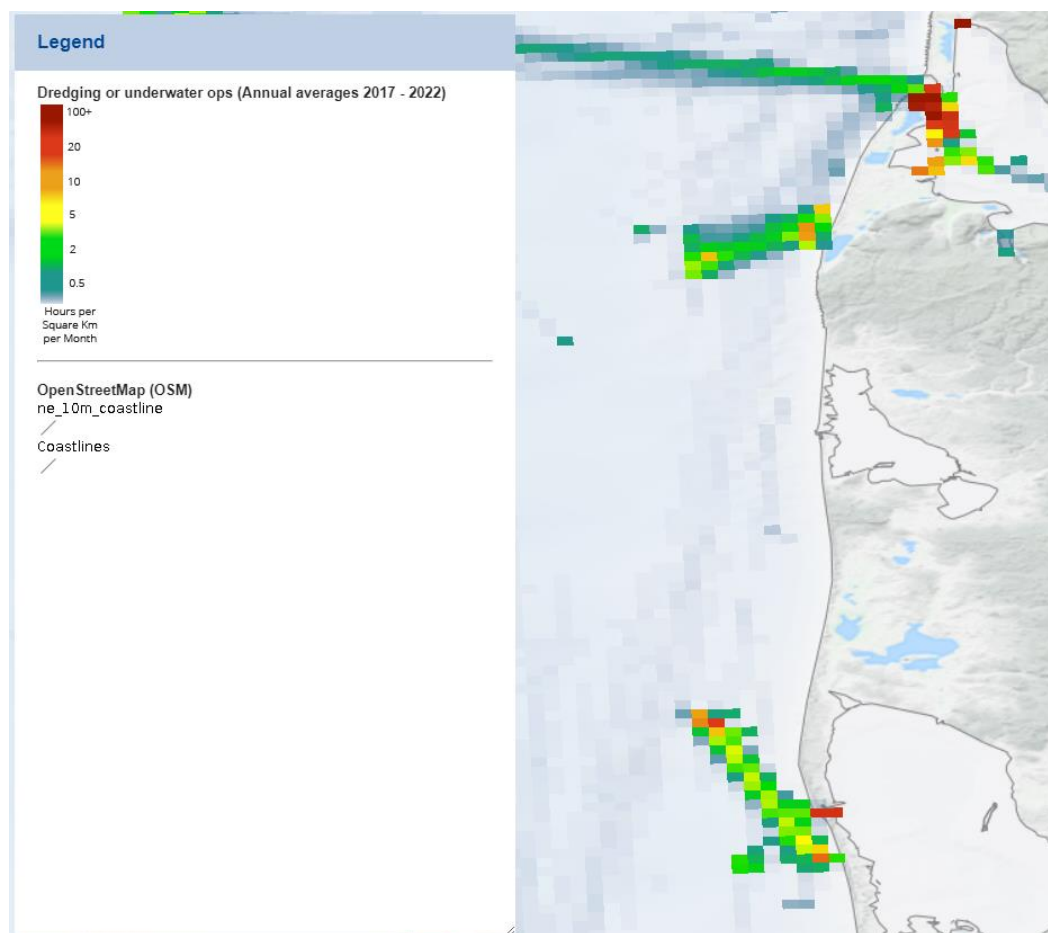
Figur 1-48. Udsnit af tidserie af målt SSC ved Pos. 1 – 5 samt samhörørende vandføring gennem Hvide Sande slusen. Positivt fortegn for vandføring angiver indgående strøm til Ringkøbing Fjord.

Skrueinduceret strøm

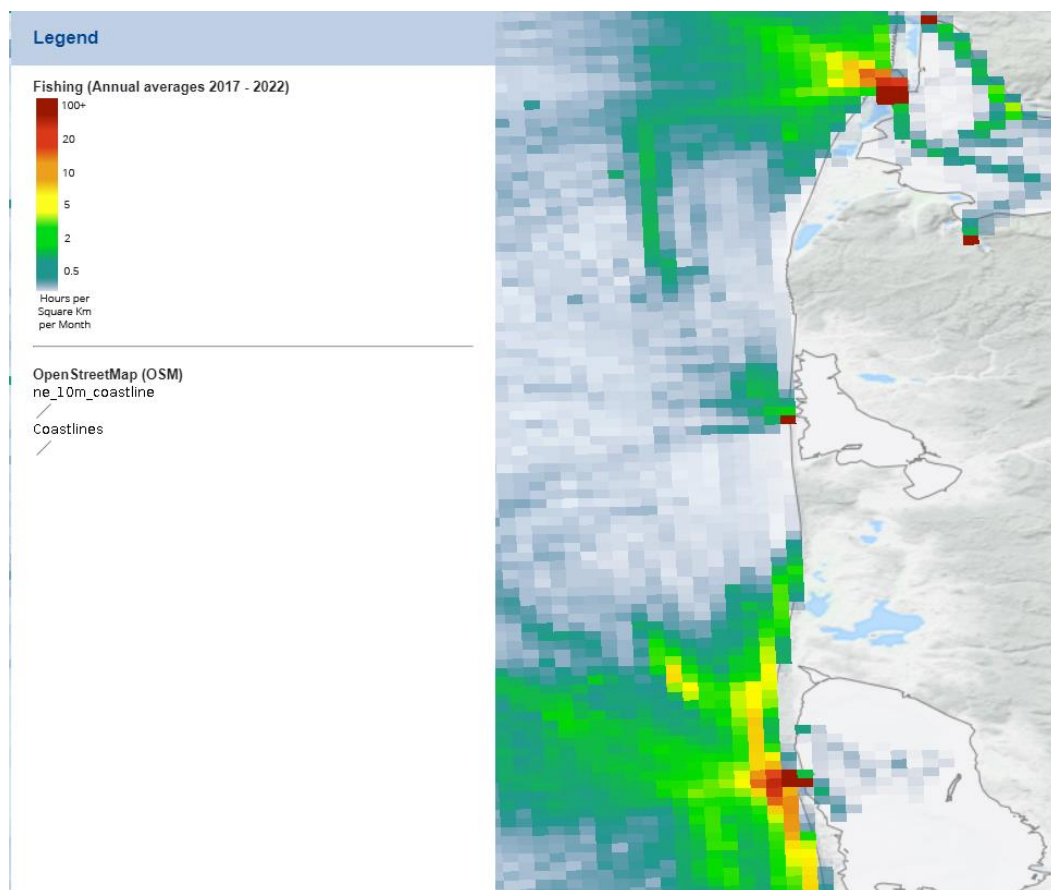
Driften af havnene i form af skibstrafik og heraf skrueinduceret strøm i forbindelse med anløb kan også medføre til en påvirkning af SSC-niveauet. Der forekommer generelt en forholdsvis signifikant skibstrafik til/fra Hvide Sande Havn, Thorsminde Havn samt Thyborøn Kanal, se densitetsplot af årlig skibstrafik til de tre havne i figur 1-49 - figur 1-51. Påvirkning af SSC som følge af den skibsinducerede strøm kan derfor være betydelig.



Figur 1-49. Densitetsplot for årlig fragtskibstrafik til/fra Hvide Sande Havn, Thorsminde Havn samt Thyborøn kanal 2017 - 2022 (EMODNet, 2023).

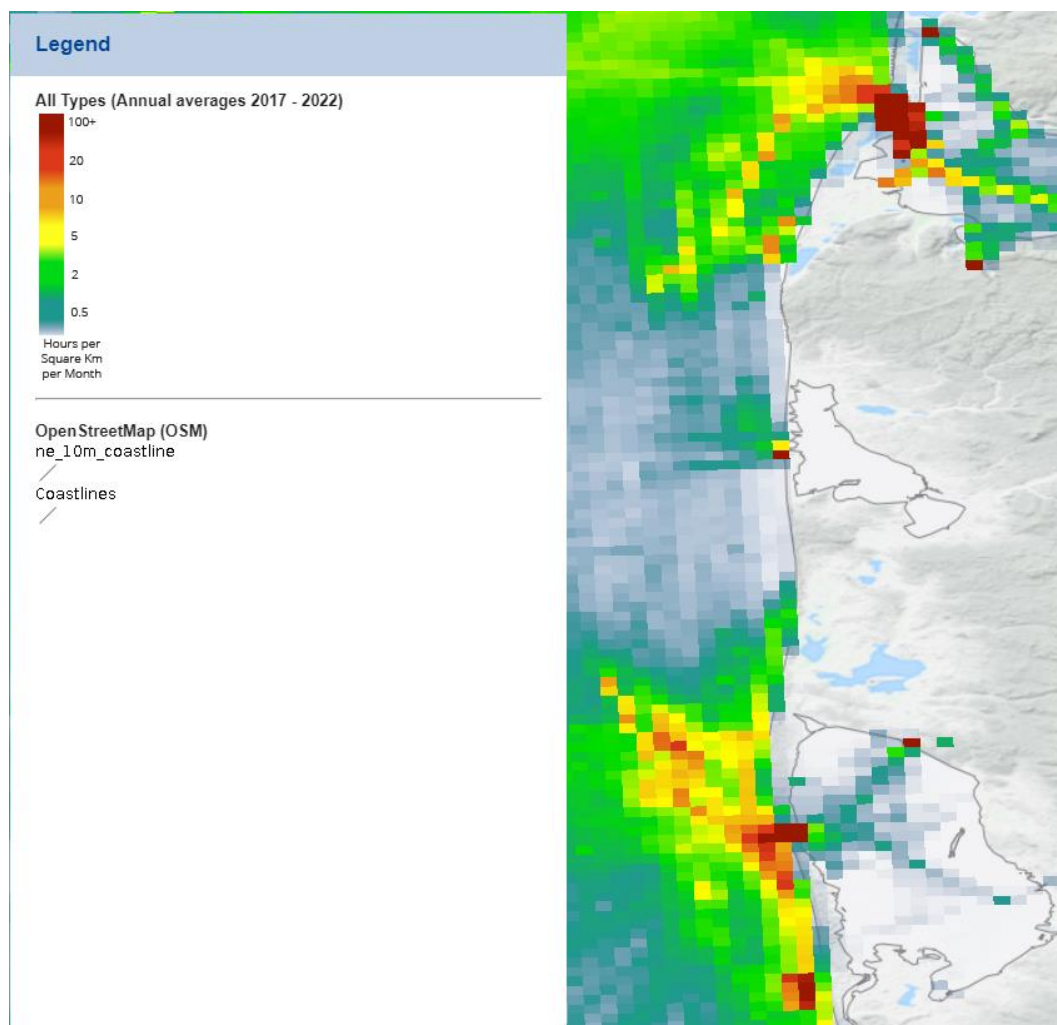


Figur 1-50. Densitetsplot for årlig skibstrafik (oprensning/sandfodring/kabelnedlægning) til/fra Hvide Sande Havn, Thorsminde Havn samt Thyborøn kanal 2017 - 2022 (EMODNet, 2023).



Figur 1-51. Densitetsplot for årlig skibstrafik (fiskeri) til/fra Hvide Sande Havn, Thorsminde Havn samt Thyborøn kanal 2017 - 2022 (EMODNet, 2023).

Densitetsplot i figur 1-49 - figur 1-51 viser ikke nødvendigvis det fulde billede af skibstrafikken i området, men er derimod et udtryk for tilgængelige AIS-registreringer. Bl.a. fremgår der af figurerne ikke den løbende oprensning i Thorsminde Havn, hvilket ikke er retvisende. Figur 1-52 viser AIS-densitetsplot for den samlede skibstrafik på Vestkysten i perioden 2017 – 2022. Heraf fremgår det, at der også ved Thorsminde Havn har forekommet signifikant trafik.



Figur 1-52. Densitetsplot for årlig skibstrafik (samlet) på Vestkysten i perioden 2017 - 2022 (EMODNet, 2023).

2. FREMTIDIGE FORHOLD

I dette afsnit beskrives de fremtidige forhold ift. hydraulik og sedimentforhold langs strækningen Lodbjerg – Nymindegab for gennemførelsen af kystbeskyttelsesprojektet, hvilket bl.a. udgør grundlaget for den efterfølgende vurdering af miljøpåvirkningerne.

Beskrivelsen af de fremtidige forhold gives i relation til de beskrevne eksisterende forhold i afsnit 1 for strækningen Lodbjerg - Nymindegab. Dvs. at der i det følgende vurderes på følgende:

1. Ændring i sedimentkarakteristik
2. Ændring i kystmorfologi og sedimenttransport
3. Ændring i bølgeforskydning samt strømforhold
4. Ændring i sedimentationsforhold ved havnene
5. Ændring i koncentration af suspenderet sediment (inkl. Thyborøn Kanal samt Limfjorden) ved henholdsvis kystnær fodring og strandfodring

De beskrevne eksisterende forhold vedr. vandstandsforhold behandles ikke videre i dette afsnit, da disse forhold som udgangspunkt ikke vurderes at blive påvirket af projektets gennemførelse.

2.1 Indledende beskrivelse af projektets gennemførelse

I det følgende opsummeres relevante input fra Projektbeskrivelsen til anvendelse ved beskrivelse af påvirkningen af fremtidige forhold.

Kystbeskyttelsen gennemføres primært som sandfodring på strækningen Lodbjerg - Nymindegab, ved hhv. strandfodring samt kystnær fodring, hvor Kystdirektoratet har det som en overordnet målsætning, at ca. 40 % udføres som strandfodring og 60 % som kystnær fodring. Fordelingen imellem strandfodring og kystnær fodring er et estimat og kan variere fra år til år. Samtidig kan der være variationer i sandfodringsmængder fra år til år. Dog vil de samlede mængder over en femårig periode være fastlagt til maksimalt 22 mio. m³, og den maksimale årlige sandfodringsmængde vil være 5,5 mio. m³.

De planlagte sandfodringsmængder i den 15-årige periode svarer til det estimerede fodringsbehov, herunder et behov for at indhente et efterslæb fra tidligere aftaleperioder. Desuden sker der en klimatilpasning, hvor der sandfodres, så der kompenseres for det stigende havspejlsniveau i den samlede periode.

Periode	Gennemsnitlige årlige fodringsmængder (m ³ /år)		Mængde per periode (m ³)
	Strandfodring	Kystnær fodring	I alt
2025-2029	1.600.000	2.400.000	4.000.000
2030-2034	1.760.000	2.640.000	4.400.000
2035-2039	1.600.000	2.400.000	4.000.000
Samlet for perioden 2025-39			62.000.000

Tabel 2-1. Estimerede sandfodringsmængder frem til år 2039 (volumen er i fast mål).

Sandfodring gennemføres i såkaldte kampagner. En kampagne er en gennemførelse af en specifik sandfodring på en specifik sammenhængende afgrænset strækning.

Den kystnære fodring sker indenfor en påvirkningszone, der strækker sig fra otte meter dybdekurven og indtil ca. 150 meter landværts for fem meter dybdekurven. Det betyder erfaringsmæssigt, at påvirkningszonens bredde gennemsnitligt er på omkring 450 meter. Ved strandfodring

kan stranden blive op til ca. 100 meter bred i områder med intensiv strandfodring. Det betyder, at stranden kan komme til at omslutte dele af de eksisterende hårde konstruktioner.

Den maksimale sandfodringsrate er 300 m³/m for både kystnær fodring og strandfodring. Erfaringsmæssigt vil den længdemæssige udstrækning af de kystnære fodringer blive ca. 1,0-8,0 km og for strandfodringer 0,5-5,0 km. Nøgletal for sandfodringen er opsummeret i tabel 2-2.

Parameter	Kystnær fodring	Strandfodring
Sandmængder	250.000 – 1.500.000 m ³ /kampagne	200.000 – 1.000.000 m ³ /kampagne
Sandfodringsrate	op til 300 m ³ /m	op til 300 m ³ /m
Sandfodringsintensitet	Op til 100.000 m ³ per døgn i fastmål	
Strækning	1,0 – 8,0 km	0,5 – 5,0 km
Påvirkningszone	300-450 m bredde fra 150 m fra land til 8 meter dybdekurven	Fra klitfod og 50-100 m udefter
Skibsstørrelser	Maks. 2-4 skibe med samlet last på 16.400 m ³ og min. ét lille skib	Maks. 2-4 skibe med samlet last på 16.400 m ³ og min. ét lille skib
Entreprenørmaskiner	Ingen	1-2 gravemaskiner og 1-2 gummigeder
Varighed pr. km	Typisk 14 døgn, men kan variere fra 2-45 døgn	Typisk 14 døgn, men kan variere fra 5-48 døgn
Samlet varighed	Maksimalt 70 døgn	
Bølgehøjder	Op til 3 m	
Periode	April-september (og evt. også vinterhalvåret, hvis vejret tillader det)	
Arbejdstid	Døgndrift	Døgndrift,
Afstand til samtidig kampagne	5 km	

Tabel 2-2. Nøgletal for sandfodring.

Sandmængderne i tabel 2-3 er specificeret af Kystdirektoratet i forhold til målsætningen.

Tabel 2-3. Teoretiske sandmængder svarende til behovet indenfor en femårig aftaleperiode - fordelt på hovedstrækninger mellem Lodbjerg og Nymindegab.

Hovedstrækning	Metode	År 1	År 2	År 3	År 4	År 5
Agger Tange	Kystnær	800.000 m ³				250.000 m ³
	Strand	500.000 m ³			200.000 m ³	
Harbøre Tange	Kystnær		400.000 m ³			500.000 m ³
	Strand	550.000 m ³				
Vrist-Ferring	Kystnær	900.000 m ³		600.000 m ³		
	Strand		600.000 m ³		600.000 m ³	
Trans-Thorsminde	Kystnær		850.000 m ³		1.050.000 m ³	300.000 m ³
	Strand		300.000 m ³	650.000 m ³		500.000 m ³
Thorsminde-Husby Klitplantage	Kystnær		600.000 m ³			250.000 m ³

	Strand	300.000 m ³	250.000 m ³	
Husby Klitplan- tage- Søndervig	Kystnær	800.000 m ³		
	Strand		500.000 m ³	
Ndr. Holmsland Tange	Kystnær		400.000 m ³	
	Strand	300.000 m ³		
Sdr. Holms- land Tange	Kystnær	1.500.000 m ³	1.000.000 m ³	600.000 m ³
	Strand	900.000 m ³	700.000 m ³	800.000 m ³

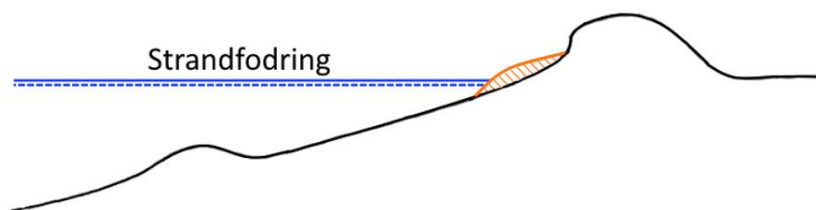
2.1.1

Overordnet beskrivelse af virkningen fra de forskellige sandfodringsmetoder

En overordnet beskrivelse af virkningen fra de forskellige sandfodringsmetoder anvendt på strækningen Lodbjerg – Nymindegab gives i det følgende.

Strandfodring

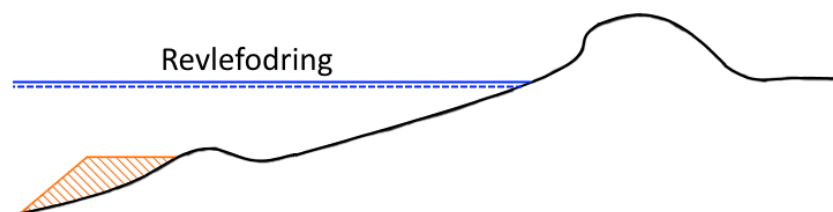
Strandfodring anvendes på specielt udsatte strækninger langs strækningen Lodbjerg – Nymindegab, eller på strækninger hvor der har forekommet en væsentlig akut erosion, som har skabt et akut behov for at reetablere et vist sikkerhedsniveau. Strandfodringen yder en akut forstærkning af strandprofilen og etablerer hurtigt et bredere strandplan, hvilket reducerer risikoen for klit- og skrænterosion.



Figur 2-1. Skitse af princip for strandfodring.

Kystnær fodring

Kystnær fodring på strækningen gennemføres reelt på to forskellige måder indenfor den aktive del af kystprofilen (evt. i kombination). Den ene metode (som sker ved klapning/splitning) etablerer en forstærkning af revlen (lokal intensiv tilførsel af sand ved revlen som gør den højere og bredere), hvilket bevirker at bølgebrydningen sker længere ude i kystprofilen, da revlen virker som undersøisk bølgebryder. Den anden metode (rainbowing) kan give en mere jævn tilførsel af sand over en bredere strækning indenfor revlen. Kystnær fodring modvirker dog ikke akut erosion umiddelbart efter en fodring. Fodringssandet kan over tid bevæge sig ind mod stranden, hvor det dermed kan –medvirke til at et bredere strandplan etableres.



Figur 2-2. Skitse af princip for revlefodring (kystnær fodring).

2.2 Ændring i sedimentkarakteristik

Som nævnt i afsnit 1.6 er der generelt en forholdsvis stor spredning i d_{50} i både tid og sted i det aktive kystprofil på strækningen. Dette skyldes bl.a. de sæsonvarierende bølge-/strømforhold og den signifikante naturlige dynamik i kystprofilerne pga. den bølgeinducerede langs- og tværgående sedimenttransport.

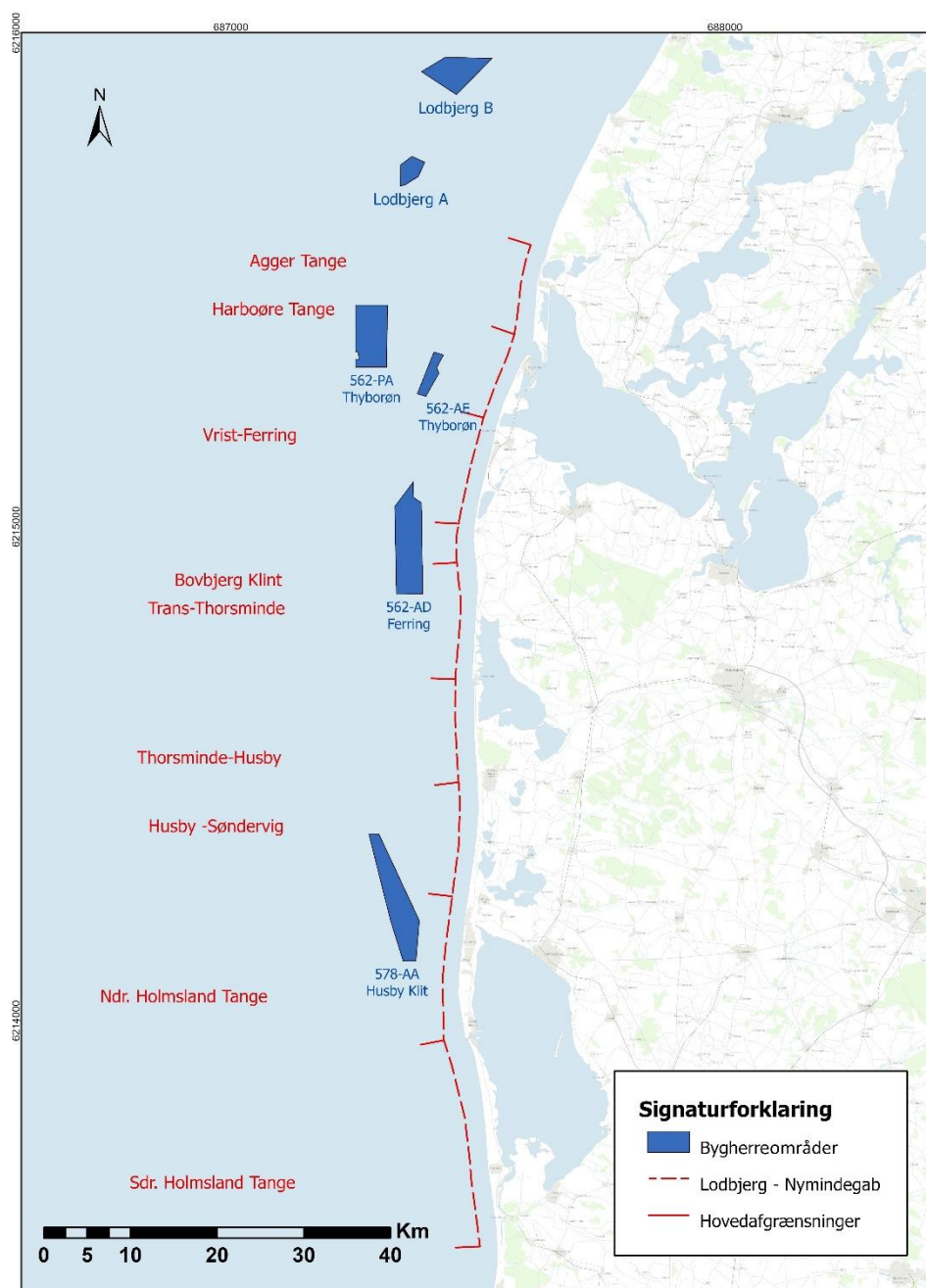
I det følgende vurderes der på, hvorvidt sedimentkarakteristikken påvirkes langs strækningen, som følge af gennemførelse af sandfodringsaktiviteter.

2.2.1 Sedimentkarakteristik for indvindingsområder

Jf. Projektbeskrivelsen vil sandfodringen blive gennemført med sand fra seks forskellige bygher-reområder (indvindingsområder). Navngivningen af indvindingsområderne samt beliggenheden af disse er vist i figur 2-3.

Generelt sker sandfodring med ensartet sand med et lavt indhold af sten. Sandet sorteres ikke over sold i skibet, og det kan derfor indeholde varierende kornstørrelser og indhold af sten. Sandets karakter varierer i indvindingsområderne og kan derfor ændre sig fra år til år.

Ved selve indvindingen sker der et spild af især finere materialer. Det sker både, når sandsugere sugesod løser sandet på havbunden og suger det op i lastrummet sammen med havvand, og når sandet i lastrummet bundfældes, og de fineste partikler løber tilbage i havet sammen med det indpumpe havvand via et særligt overløb i lastrummet.



Figur 2-3. Områder, hvor Kystdirektoratet har tilladelser til indvinding af sand til kystbeskyttelse.

Sedimentkarakteristikken for sandet fra de specifikke indvindingsområder er givet i tabel 2-4. Data er baseret på sigteanalyser udført i forbindelse med indvindingstilladelserne. Der er foretaget en filtrering af kornkurverne ud fra den forudsætning, at der ikke ønskes anvendt sand, hvor indholdet af hhv. grus eller silt overstiger 10% (oplyst af Kystdirektoratet).

Sigteanalyser er baseret på sandprøver fordelt udover indvindingsområderne og viser en vis spredning i både d_{50} samt indhold af fint sediment. I tabel 2-4 fremgår 75%-fraktilen af finstof-indhold ($d < 0,125$ mm samt $d < 0,063$ mm).

	578-AA Husby Klit	562-AD Ferring	562-AE Thyborøn	562-PA Thyborøn	Lodbjerg A	Lodbjerg B
Middelkornstørrelse, d_{50}	0,42mm	0,47 mm	0,42 mm	0,54 mm	0,46 mm	0,50 mm

Andel, $d_{75\%} < 0,125$ mm	1,3 %	0,8 %	1,3 %	1,6 %	3,7 %	2,5 %
Andel, $d_{75\%} < 0,063$ mm	0,2 %	0,1 %	0,1 %	1,1 %	2,3 %	1,3 %
Antal kornkurver	429	396	64	148	28	37

Tabel 2-4. Sedimentkarakteristik for sand fra indvindingsområder. Procentvise andele af $d < 0,125$ mm samt $d < 0,063$ mm er baseret på 75%-fraktilen.

Som det fremgår af tabel 2-4, er d_{50} ved indvindingsområderne lidt højere sammenlignet med d_{50} for sandet på kysten (jf. afsnit 1.6), hvilket er hensigten, da det grovere sand er gunstigt ifm. kystbeskyttelse.

	Agger Tange	Harboør Tange	Vrist-Ferring og Bovbjerg Klint	Trans-Thorsminde	Thorsminde-Husby Klint-plantage	Husby Klintplantage-Søndervig	Ndr. Holmsland Tange	Sdr. Holmsland Tange
Lodbjerg A	25 %	10 %						
Lodbjerg B*	25 %	10 %						
Thyborøn (nr. 562-PA)	30 %	27 %						
Thyborøn A (nr. 562-AE)	7 %	1 %						
Ferring (nr. 562-AD)		26 %	100 %	100 %	88 %			
Husby Klint (nr. 578-AA)						100 %	100 %	87 %

Tabel 2-5 viser, hvorledes Kystdirektoratet forventer at fordele sandet fra de forskellige indvindingsområder til sandfodring på de specifikke hovedstrækninger.

	Agger Tange	Harboør Tange	Vrist-Ferring og Bovbjerg Klint	Trans-Thorsminde	Thorsminde-Husby Klint-plantage	Husby Klintplantage-Søndervig	Ndr. Holmsland Tange	Sdr. Holmsland Tange
Lodbjerg A	25 %	10 %						
Lodbjerg B*	25 %	10 %						
Thyborøn (nr. 562-PA)	30 %	27 %						
Thyborøn A (nr. 562-AE)	7 %	1 %						
Ferring (nr. 562-AD)		26 %	100 %	100 %	88 %			
Husby Klint (nr. 578-AA)						100 %	100 %	87 %

Tabel 2-5. Omtrentlig fordeling af sand fra indvindingsområderne til fodring af hovedstrækningerne.

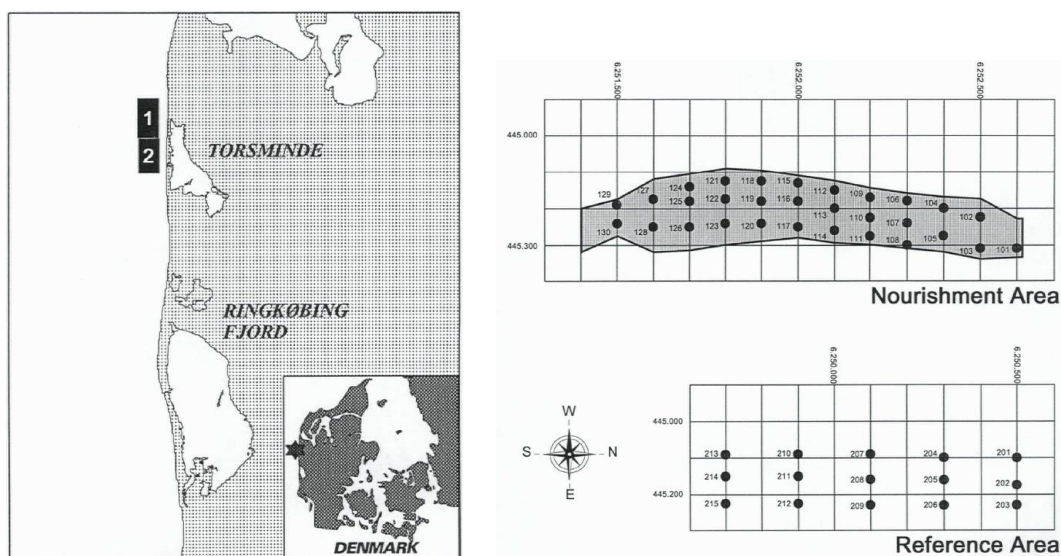
* Fordelingen er omtrentlig, da det prioriteres at anvende Lodbjerg A i det omfang det er muligt. Fordelingen kan derfor være 0-100% for begge indvindingsområder.

2.2.2 Indflydelse på sedimentkarakteristik ved kystnær fodring

Gentagende sandfodring med grovere materiale end det naturligt forekommende (jf. afsnit 1.6) vil medføre, at sandet på havbunden bliver grovere. Forøgelsen af d_{50} vil være størst ved Sdr. Holmsland Tange, da der på denne strækning forekommer den største forskel imellem d_{50} på hovedstrækningen og d_{50} på indvindingsområdet. På de resterende hovedstrækninger vurderes det, at forøgelsen af d_{50} i det aktive profil som følge af den kystnære fodring vil være af relativt begrænset omfang, da sandet fra indvindingsområderne her er forholdsvis lig den lokale sandkarakteristik.

Dette understøttes af RIACON-projektet (Birklund, J. H., Toxvig, H., & Laustrop, C., 1997), der blev gennemført i perioden 1994 – 1995, hvor sediment og bundfauna i et sandfodringsområde samt i et referenceområde umiddelbart nord for Thorsminde blev undersøgt. Undersøgelserne inkluderede en kystnær fodring på 250.000 m³ sand på 4-6 meter vanddybde indenfor et område på 200 x 1.200 meter (0,24 km²). Sandfodringen blev udført med materiale med $d_{50} = 0,5 - 0,6$ mm, og det vurderes derfor, at konklusioner for RIACON-projektet vedr. bl.a. effekterne på sedimentkarakteristikken i et vist omfang er sammenlignelige med de forventede effekter i nærværende projekt.

Placeringen af sandfodringsområdet (1) samt referenceområdet (2) i RIACON-projektet er vist i figur 2-4 (venstre) og specifikke placeringer af prøveudtag på de to områder er vist i figur 2-4 (højre). Sandprøverne blev indhentet i de øverste 0-1 meter af havbunden.



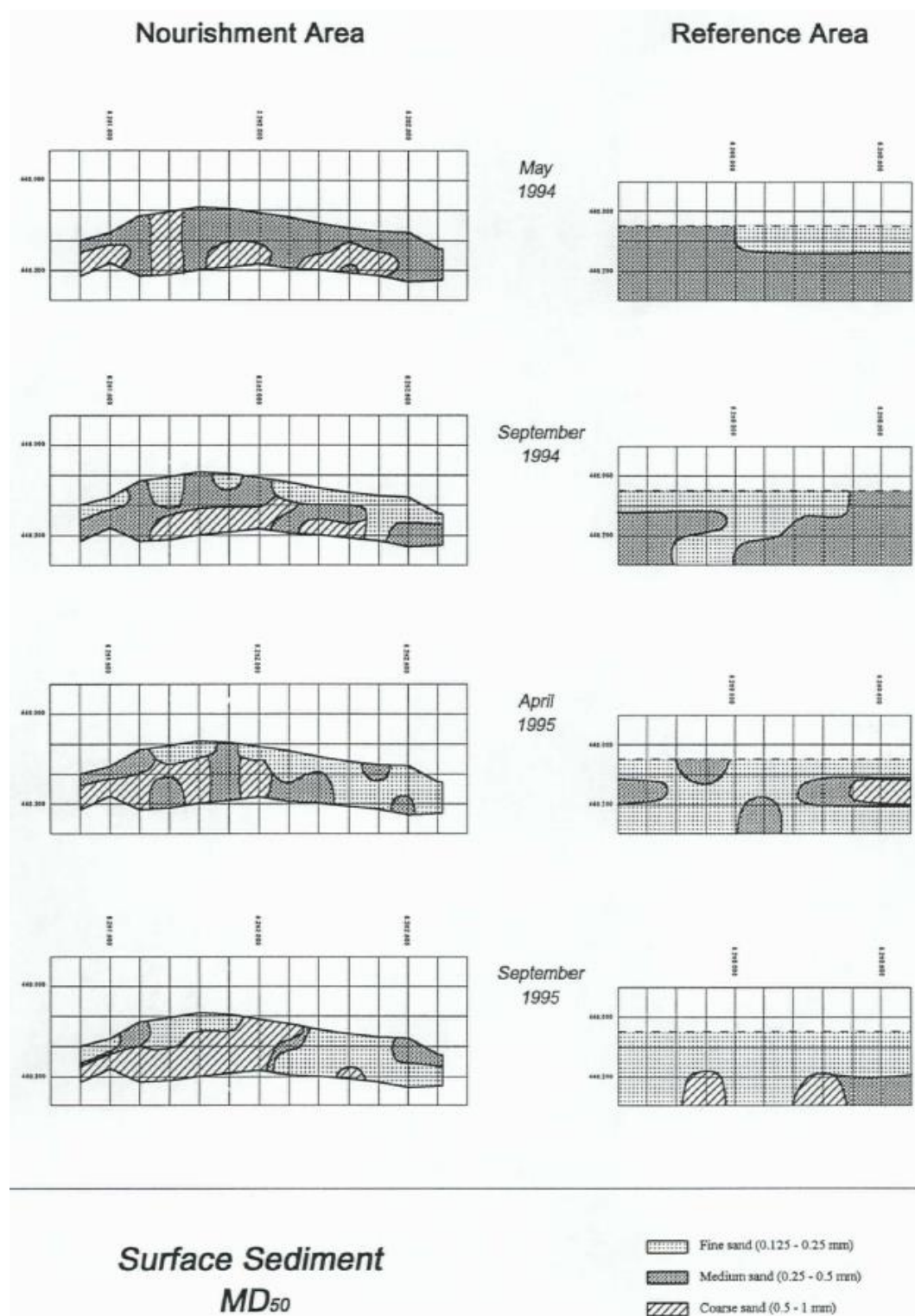
Figur 2-4. Placering af sandfodringsområdet (1) samt referenceområdet (2) (venstre) og illustration af placeringer for prøveudtagning af sediment på sandfodringsområdet samt referenceområdet (højre) (Birklund, J. H., Toxvig, H., & Laustrop, C., 1997).

Figur 2-5 viser en sammenligning af den geografiske sammensætning af det *fine* ($d_{50} = 0,125 - 0,25$ mm), *medium* ($d_{50} = 0,25 - 0,5$ mm) og *grove* sediment ($d_{50} = 0,5-1$ mm) i overfladen ved fodringsområdet samt i et referenceområde i perioden efter sandfodringen, der blev gennemført i 1993. Som det fremgår af figuren, opstår der i sandfodringsområdet en større forskellighed i den geografiske sammensætning af kornstørrelserne sammenlignet med i referenceområdet. De dynamiske ændringer i sammensætningen af sedimentkornstørrelserne ses dog at være nogenlunde identiske i de to områder, og samme tendens må forventes at forekomme ved gennemførelsen af den kystnære fodring i nærværende projekt.

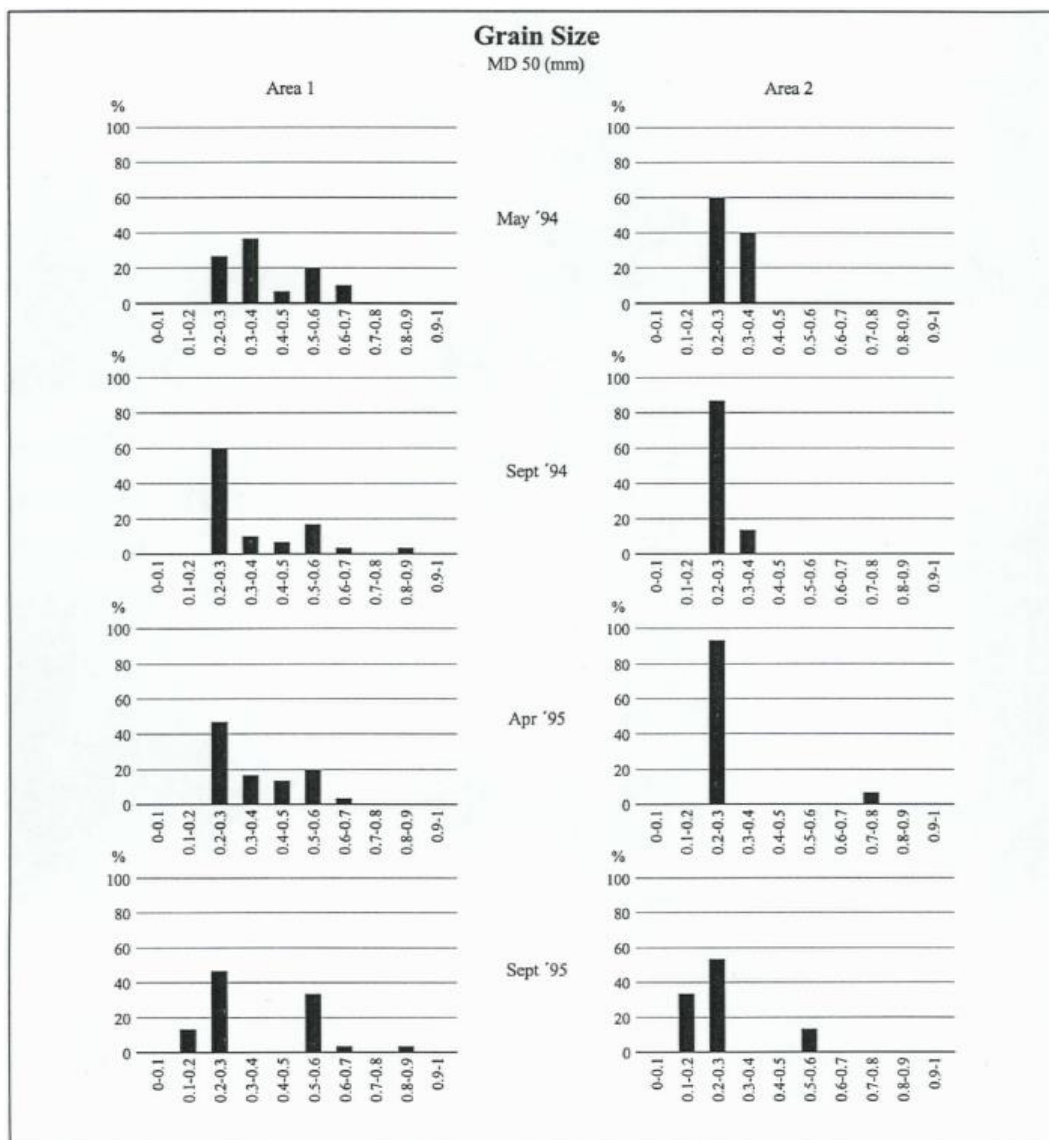
Det fremgår yderligere, at der indenfor perioden opstår en udskiftning af "medium" kornfraktionerne med finere sediment på både sandfodringsarealet samt referencearealet. Denne ændring er dermed ikke forårsaget af sandfodringen, men er i stedet et billede af den naturlige variation, hvilket forventes at være sammenligneligt med situationen efter gennemførelse af den kystnære sandfodring i nærværende projekt.

Figur 2-6 viser histogrammer af sedimentkornstørrelser på sandfodringsområdet samt referenceområdet i perioden 1994 – 1995, og som det fremgår af figuren, er tendensen, at andelen af den fineste sandfraktion øges i sandfodringsområdet i perioden efter sandfodringen. Generelt set er d_{50} dog lidt højere ved sandfodringsområdet sammenlignet med i referenceområdet, men forskellen er dog kraftigt reduceret efter ca. to år (dvs. i september 1995).

Samme tendens i forhold til at effekten af sandfodringsaktivitetens påvirkning af d_{50} reduceres med tiden, må forventes at forekomme ved gennemførelsen af den kystnære fodring i nærværende projekt. Effekten fra sandfodringen på sedimentkarakteristikken ved kysten vil være mest markant i tilfælde af gentagende kampagner, hvormed det ikke kan udelukkes, at fodringen vil medføre en længerevarende påvirkning af sedimentkornstørrelsen og graderingen i området. Efter endt sandfodring vil kornkurverne dog formentlig naturligt ændres tilbage til de naturlige, og igen skal det nævnes, at sedimentkarakteristikken fra indvindingsområderne er relativt sammenlignelig med det lokale sand.



Figur 2-5. Sammenligning af sammensætningen af sandkornstørrelser på sandfodringsarealet samt referencearealet. (Birklund, J. H., Toxvig, H., & Lastrup, C., 1997)



Figur 2-6. Middelværdier af sedimentkornstørrelser på sandfodringsområdet (1) samt referenceområdet (2) i perioden 1994 – 1995. (Birklund, J. H., Toxvig, H., & Laustrop, C., 1997)

2.2.3

Vurdering af indflydelse på sedimentkarakteristik ved strandfodring

Placering af sand på stranden (strandfodring) forventes i et vist omfang at medføre en lille forøgelse af d_{50} i perioden umiddelbart efter fodringen. Som tidligere nævnt vil Kystdirektoratet ikke tillade, at der sandfodres med materiale, der har et væsentligt indhold af grus, og det forventes derfor ikke, at mængden af mindre sten på stranden forøges betragteligt.

Af rekreative grunde er det relevant, hvorvidt stranden i perioden efter fodringen ændrer farve pga. en forskellig farvesammensætning i strandfodringsmaterialet sammenlignet med det naturligt forekommende materiale. Erfaringsmæssigt viser det sig, at det indpumpede sand er forholdsvis mørkt, umiddelbart når det kommer ind på stranden, men efter et par døgn i solen er erfaringerne dog, at det typisk er bleget og ligner det naturligt forekommende sand på stranden (oplyst af Kystdirektoratet).

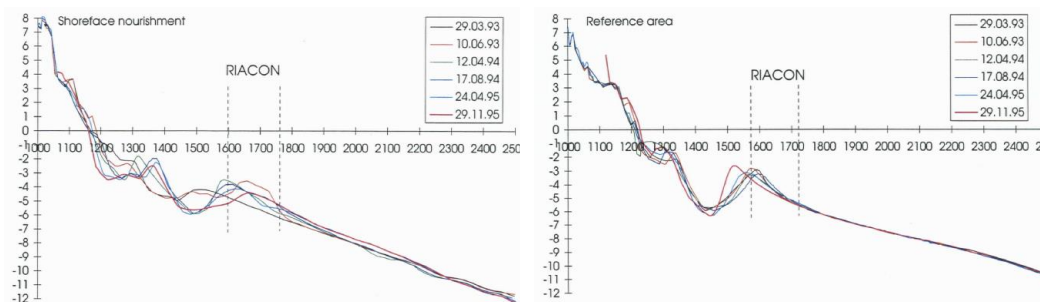
2.3 Ændring i kystmorfologi og sedimenttransport

I det følgende vurderes på indflydelsen fra den kystnære fodring samt effekten af de ændrede sedimentforhold på kystmorfologien langs strækningen i den fremtidige situation.

2.3.1 Indflydelse på kystmorfologien ved kystnær fodring

Sandfodringen ved Thorsminde (RIACON-projektet) resulterede i en forøgelse af havbundskoten på over 0,8 meter i 70 % af sandfodringsområdet, hvilket er af samme størrelsesorden som det der i nærværende projekt ønskes miljøkonsekvensvurderet. Det vurderes derfor, at observerede kystmorfologiske ændringer baseret på i RIACON-projektet er sammenlignelige med forventede kystmorfologiske ændringer på strækningen ved gennemførelsen af den planlagte sandfodring.

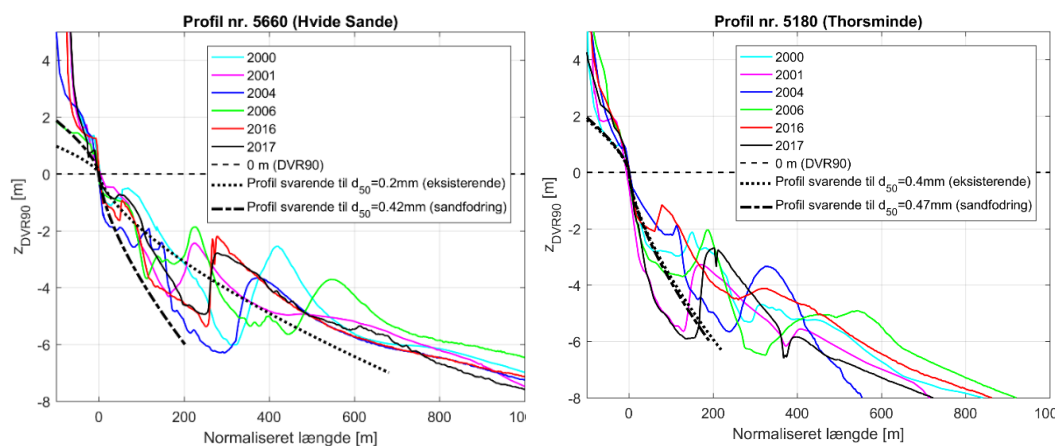
Figur 2-7 viser kystprofiler i midten af sandfodringsområdet (*venstre*) og i midten af referenceområdet (*højre*) før (1. opmåling fra 1993) og efter sandfodringen (2. opmåling fra 1993 samt opmålinger fra 1994 og 1995). Som det fremgår af figuren, forekom der i perioden for RIACON-projektet forholdsvis store naturlige variationer i kystprofilet, som dog umiddelbart var af samme omfang i referenceområdet som i sandfodringsområdet. (Birklund, J. H., Toxvig, H., & Laustrop, C., 1997)



Figur 2-7. Kystprofiler fra midten af sandfodringsområdet (*venstre*) og midten af referenceområdet (*højre*) før/efter sandfodring. (Birklund, J. H., Toxvig, H., & Laustrop, C., 1997)

Jf. afsnit 2.2 er det sandsynligt, at vedvarende kystfodringer kan medføre en generel forøgelse af middeldørnstørrelse langs strækningen. Dette kan således betyde, at kystprofilet med tiden vil blive lidt stejle, samt at bredden af brydningszonen (inklusive bredden af den tidligere nævnte aktive zone) mindskes. Forstejlingen af kystprofilet kan reelt ses på figur 2-7 (*venstre*), hvor den seneste opmåling viser et stejle profil end referenceopmålingen, inden sandfodringen blev gennemført.

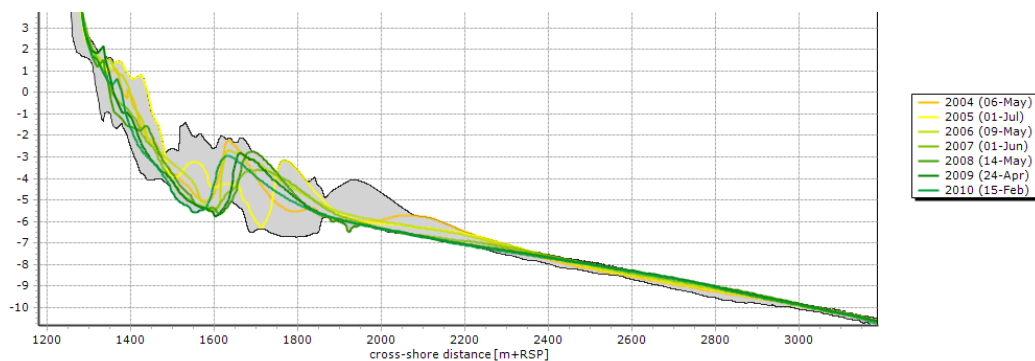
Kystdirektoratet har igennem en længere periode opmålt kystprofiler på strækningen Lodbjerg – Nymindegab, og på figur 2-8 ses variationer i kystprofiler for henholdsvis Hvide Sande (*venstre*) og Thorsminde (*højre*) i perioden 2000 – 2017. Desuden er to såkaldte ligevægtsprofiler inkluderet, som er de gennemsnitlige teoretiske profiler for det naturligt forekommende sand og sandfodringssandet, d_{50} , på den pågældende strækning. Ligevægtsprofilerne inkluderer dog ikke effekten fra revledannelse.



Figur 2-8. Variation af kystprofiler for Hvide Sande (venstre) og Thorsminde (højre) i perioden 2000 – 2017, samt ligevægtsprofiler svarende til d_{50} på den pågældende strækning samt d_{50} for sandfodningsmaterialet.

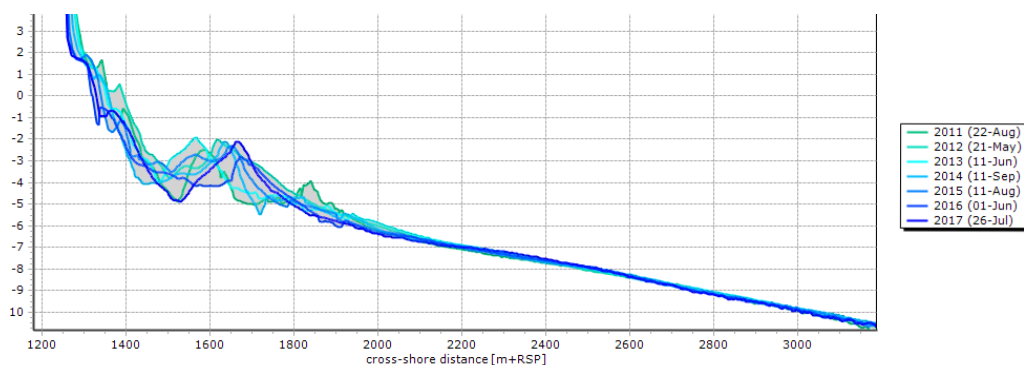
Som det fremgår af figur 2-8, ligger den potentielle forstejling af kystprofilen inden for den naturlige variation af kystprofilerne ved Hvide Sande (venstre), mens det er mindre udtalt ved Thorsminde, hvor der dog sandfodres med sand der ligger tæt på det naturligt forekommende. Derfor må udsvingene her tilskrives den naturlige dynamik, der giver en variation af d_{50} over tid. Desuden kan det umiddelbart konkluderes, at den naturlige revledynamik har større betydning for kystprofilen sammenlignet med middeldørnstørrelsen.

Som et eksempel på profildynamikken før/efter sandfodring er der i figur 2-9 og figur 2-10 vist profilvariationen for henholdsvis seks år før og seks år efter kystnær fodring på profil 5730, beliggende på Sdr. Holmsland Tange hovedstrækningen syd for Hvide Sande. Den grå farve viser profilvariationen. Bemærk at figur 2-9 viser variationen i kystprofiler (grå farve) fra tidligere årstal end 2004.



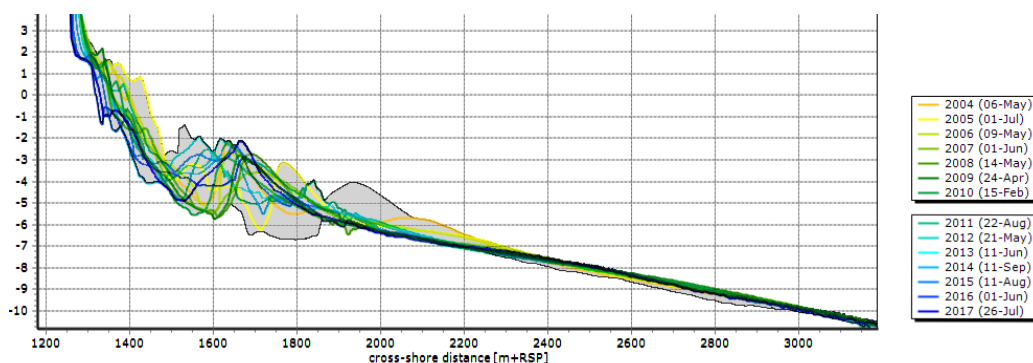
Figur 2-9. Profilvariationen seks år før, der blev fodret kystnært ved vestkystprofil 5730.¹

¹ Figur er delt af Kystdirektoratet, 2018



Figur 2-10. Profilvariationen seks år efter, at der blev foretaget kystnær fodring ved vestkystprofil 5730.²

Figur 2-11 viser en kombination af figur 2-9 og figur 2-10, hvor kystprofilerne før/efter den kystnære fodring er vist på samme figur, og som det fremgår af figuren ligger variationen af kystprofilerne for perioden 2011 – 2017 (dvs. efter kystnær fodring) indenfor variationen af kystprofilet fra før den kystnære fodring.



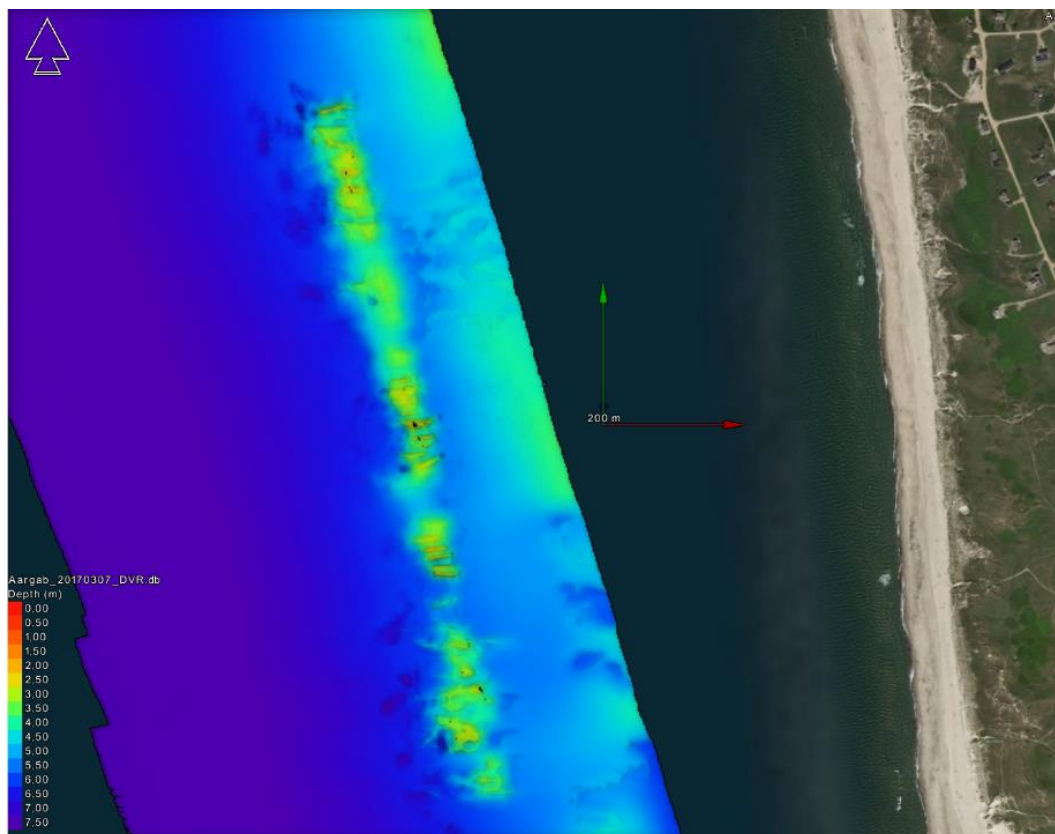
Figur 2-11. Kombination af figur 2-9 og figur 2-10 for profilvariation henholdsvis før/efter kystnær fodring.

Kystnær fodring gennemføres fra otte meter dybdekurven og indtil ca. 150 meter landværts for fem meter dybdekurven. Netop i denne del af kystprofilet forekommer der i forvejen en signifikant dynamik og revlevandring i profilet. Afstanden fra kysten til det placerede materiale vil variere pga. varierende kysthældning og dermed varierende placering af 6 – 8 meter vanddybden på det pågældende tidspunkt for sandfodringen. I figur 2-9 kan det ses, at afstanden af 6 meter vanddybden fra kystlinjen varierer med ca. 400 meter.

Det kan ikke udelukkes, at der ved kystnær fodring kan etableres en højere revle sammenlignet med den naturlige kystprofilvariation, men i så fald vurderes det, at ændringen i kystprofilet vil være forholdsvis kortvarig, da revlernes højde og form relativt hurtigt tilpasses bølgeforholdene på kysten.

I figur 2-12 ses en opmåling af kystprofilet ved Hvide Sande under en igangværende kystnær fodringskampagne. Fodring af sand vil akut ændre revlens form, således den ønskede kystbeskyttende effekt opnås. Ændringen er dog af samme størrelsesorden som de naturlige variationer i kystprofilet.

² Figur er delt af Kystdirektoratet, 2018



Figur 2-12. Eksempel på kystnær fodring ved Hvide Sande. Figur er delt af Kystdirektoratet.

Jf. afsnit 1.7.3 er den aktive dybde langs strækningen ca. 12 meter, hvilket betyder, at fodrings-sandet placeres umiddelbart midt i det aktive profil. Dette betyder således også, at mindre bølger (dvs. bølger som ikke påvirkes signifikant af vanddybden på revlen, $H_{m0} \approx 1-2$ m) kun i mindre omfang vil påvirkes af sandfodringen. Desuden vil de mindre bølger bevirke, at kystprofilen udjævnes i sommerperioden, samt at sandet flyttes tættere ind mod kysten.

Umiddelbart efter gennemførelsen af den kystnære fodring vil sandet fra sandfodringen indgå i den langs- og tværgående sandtransport. En større omfordeling af sandet forventes dog først at forekomme ved $H_{m0} \geq 2-3$ meter, hvormed bølgerne begynder at blive dybdebegrænsede. Bølger i den størrelse er oftest forekommende i vinterhalvåret, hvilket betyder, at såfremt sandfodringen gennemføres i foråret, vil sandet kun have en mindre effekt på det indre strandprofil i løbet af sommerperioden.

Den kystnære fodring vil sandsynligvis give anledning til en mindre påvirkning af den langsgående netto-sandtransport. Dels må det forventes, at transport-kapaciteten øges lokalt som følge af reduktionen af vanddybden i det aktive profil, hvormed bølgeenergien potentielt kan bringe mere sediment i suspension, og dels vil der være mere sand til rådighed. Effekten fra den kystnære fodring på klittens stabilitet forventes først at kunne ses efter ca. ét år. Dette er desuden nærmere beskrevet i afsnit 2.5 vedr. sedimentationsforhold ved havnene.

Den æoliske sandtransport (vindens transport af sedimentet) vurderes ikke at blive ændret betragteligt som følge af den kystnære fodring, sammenlignet med den naturlige æoliske transport, da sandet placeres under vand. (DHI, 2001)

2.3.2 Vurdering af morfologiske ændringer af kystprofilen ved strandfodring

Ved strandfodringen fordeles sandet forholdsvis jævnt på hele stranden. Sandet pumpes ind imod klitskrænten, hvorefter det aflejres naturligt i kegleform ud imod vandet. Herefter udjævnes sandet delvist mekanisk (med entreprenørmateriel), hvilket dog udelukkende foregår lokalt på de toppe af sand, hvor indpumpningsrøret har ligget på, samt kørespor på stranden. Ændringen af kystprofilen som følge af strandfodring er typisk af næsten samme størrelsesorden som den naturlige variation, lidt større ned mod vandlinjen. I visse tilfælde medfører strandfodringen en direkte udvidelse af strandbredden.

Strandfodringen sikrer både en forstærket klit og en større buffer ift. kliterosion. Umiddelbart efter strandfodringen forekommer der en lidt bredere strand, men efter nogen tid må det dog forventes, at strandbreddeudvidelsen forsvinder, hvilket kan skyldes den naturlige omfordeling af sand, hvor de fineste sandfraktioner udvaskes og aflejres i swash-zonen. Efter nogen tid vil vinden yderligere transportere de øverste lag af fine sandfraktioner, hvilket kan føre til, at der efterlades enkelte større sten/grus på stranden. Samme tendens forekommer dog i den eksisterende situation. (DHI, 2001)

Strandfodringen kan potentielt give anledning til en lille forøgelse af den æoliske sandtransport til forklitten samt måske til områder længere inde i land. Strandfodringen kan desuden bevirke en forøget generering af såkaldte erosionskanter, som erfaringsmæssigt opstår, når sandet bliver fordelt på stranden med større hældning sammenlignet med den naturlige hældning (som er styret af middeldkornstørrelsen).

2.4 Ændring i bølgeforhold samt strømforhold

Kystnær fodring kan lokalt give anledning til ændrede bølge- og strømforhold langs strækningen, hvilket potentielt kan påvirke de rekreative interesser (f.eks. surf- og badeforhold). I det følgende gives en kort beskrivelse af den potentielle påvirkning af bølge- og strømforhold på strækningen, som følge af den kystnære fodring.

2.4.1 Indflydelse på bølgeforhold ved kystnær fodring

Formålet med den kystnære fodring på strækningen er dels, som tidligere nævnt, at fremprovokere bølgebrydning på revlen, hvormed bølgeenergien tæt ved stranden reduceres, og dels at fodringen akut vil reducere den naturlige forstejlning af den indre del af kystprofilen, hvilket bl.a. kan påvirke brydningstypen. Jf. det såkaldte Iribarren-tal vil et lavt forhold imellem stejlegheden af kystprofilen og bølgestejlegheden bevirke topbrydende bølger fremfor styrtbrydende. Det skal dog hertil nævnes, at den naturlige forstejlning udenfor 6 meter vanddybden ikke bremses.

I forhold til surfere kan en gennemførelse af en kystnær fodring på en revle, som er parallel med kysten, skabe en bølgebrydning, der forekommer forholdsvis samtidigt på hele den pågældende kyststrækning (dog afhængig af retningen på den brydende bølge). Dette kan i nogle tilfælde give anledning til delvist forringede surf-forhold. Desuden kan revlen umiddelbart efter gennemførelsen af den kystnære fodring give anledning til såkaldte styrtbrydende bølger, hvor en signifikant andel af bølgeenergien udløses forholdsvis akut, hvilket i nogle tilfælde kan være farligt for bade-gæster. Omvendt vil den reducerede bølgeenergi tæt ved kysten virke til gunst for badesikkerheden nærmere stranden, og den reducerede stejlehed af kystprofilen vil give anledning til mere topbrydende bølger, som i mindre omfang er til gene for badegæster. Hertil skal det desuden nævnes, at bølgebrydningen umiddelbart først vil blive påvirket i tilfælde af forhold med større bølger ($H_{mo} \geq 2$ m), hvor det normalt ikke tilrådes at bade på Vestkysten.

Med tiden vil sandet fra den kystnære fodring, som tidligere nævnt, omfordeles i kystprofilen, og derfor vil indvirkningen på bølgebrydningen være mest signifikant umiddelbart efter fodringen,

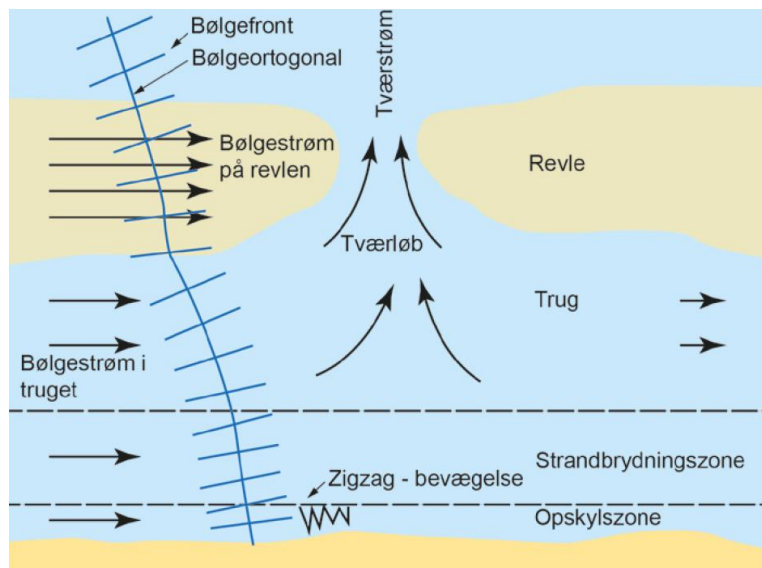
dvs. i tilfældet svarende til situationen vist i figur 2-12. Desuden er det i afsnit 2.3 konkluderet, at den variation i kystprofilet, der skyldes kystnær fodring, ligger indenfor den naturlige variation i revlerne på strækningen, hvormed den reelle virkning på bølgebrydningen er begrænset, sammenlignet med de naturlige variationer.

2.4.2 Indflydelse på strømforhold ved kystnær fodring

Det vurderes, at der ift. indvirkningen på strømforhold udelukkende er tale om den potentielle indflydelse fra ændringer i den bølgeinducerede strøm indenfor den aktive zone. Den tidevands-generede kyststrøm vil umiddelbart ikke blive påvirket ved kystnær fodring indenfor 6 meter vanddybden.

Den bølgegenererede strøm opstår, som tidligere nævnt, pga. bølgebrydningen, og derfor kan en ændring i bølgebrydningen (dvs. brydningsstypen samt placeringen af bølgebrydningen i kystprofilet) potentielt skabe en lokal ændring i strømforholdene tæt ved kysten. Ændrede bølgebrydningsforhold kan potentielt være til gene for f.eks. badegæster i tilfælde af en forøgelse af den langsgående strømhastighed og/eller tværgående strømhastighed (inkl. f.eks. øget understrøm visse steder i kystprofilet).

Udover potentielt ændrede bølgegenererede strømforhold kan der ved kystnær fodring potentielt opstå lokale påvirkninger af strømmen, som følge af revlehuller (dvs. huller som potentielt opstår i den anlagte revle af enten naturlige årsager eller pga. lokale ophør i den kystnære fodring). Revlehullerne kan give anledning til en udadgående tværstrøm, se illustration i figur 2-13, som bl.a. kan virke til gene for badene. Naturligt forekommer der revlehuller på strækningen Lodbjerg – Nymindegab, men kystnær fodring kan potentielt give anledning til en ændring/forstærkning af effekten af revlehullerne.



Figur 2-13. Illustration af tværgående strøm ved revlehul. (Kystdirektoratet, 2018)

2.5 Ændring i sedimentationsforhold ved havnene samt fjordene

Tilførslen af mere sand ved den kystnære fodring på strækningen kan betyde, at sandtransporten øges. Dette vil ske, hvis der på nogle strækninger for eksisterende forhold er en større transportkapacitet end den tilgængelige sandmængde (så sandtransporten er begrænset af tykkelsen af sandlaget på havbunden). Hvis dette er tilfældet, vil der efter en sandfodring kunne forekomme forøget sandtransport. Dette kan forekomme, idet der jf. figur 1-23 er enkelte strækninger, hvor der ikke er 100% sand i profilet i den eksisterende situation.

Kystnær fodring kan desuden potentielt bevirke en bredere aktiv zone pga. den reducerede hældning på kystprofilen (dvs. en brydningszone, som er placeret i større afstand fra kysten). Dette kan f.eks. betyde, at mere sand kan transporteres forbi ydermoler ved vestkysthavnene på strækningen, og dermed kan det potentielt betyde mere sedimentation i f.eks. indsejlingen samt i yderbassinene. I det følgende vurderes nærmere på sedimentationsforhold ved hhv. Hvide Sande Havn, Thorsminde havn, samt Thyborøn kanal og dermed Thyborøn havn, som følge af de planlagte sandfodringsaktiviteter.

2.5.1 Vurdering af ændring i sedimentationsforhold ved Hvide Sande havn

En illustration af brydningszonen samt det tilhørende strøm-/sedimenttransportprofil nord for Hvide Sande er vist i figur 2-14. Hvis kysten rykker frem nord for Hvide Sande havn kan dette naturligt betyde, at sandtransporten vil foregå i kortere afstand fra det nordlige molehoved. Omvendt kan en tilbagetrækning af kysten medføre større sandbuffer ved nordmolen til Hvide Sande.

Jf. afsnit 1.2 haves der ingen målsætning om fastholdelse af kystlinjen umiddelbart nord for Hvide Sande havn, da kysten på denne strækning jf. figur 1-1 og figur 1-2 rykker frem. Grunden hertil kan potentielt være påvirkningen fra Hvide Sande havn, som medfører sedimentation nord for nordmolen, pga. den netto- sydgående sandtransport. På delstrækningerne nord herfor haves der dog en målsætning om fastholdelse af kystlinjehøjden, og da der er erosion her, medfører det et behov for sandfodring. Således kan det ikke udelukkes, at sandfodring på strækningerne mod nord også påvirker sedimentationen ved Hvide Sande havn. Hertil skal det dog nævnes, at en sandfodring formentlig kun vil påvirke et potentielt behov for hyppigere præventive oprensninger nord for havnen ift. at undgå sedimentation i indsejlingen, sammenlignet med situationen, hvor der ikke sandfodres. Grunden hertil er, at der efter ophørt fodring, over tid kan opstå en ny ligevægt pga. den signifikante sandtransport langs kysten, som vil medføre at der over tid vil opstå sedimentation nord for havnen hvilket vil genoprette den naturlige bypass samt sedimentation i indsejlingen. Det skal desuden nævnes, at transportprocessen og dermed sedimentationen er meget dynamisk og er i forvejen meget afhængig af den naturlige revles beliggenhed.

Jf. figur 1-23 forekommer der ikke 100% sand i den eksisterende situation ved Hvide Sande. Derfor kan sandfodring potentielt medføre en øget sandtransport, såfremt der i den eksisterende situation forekommer større sandtransportkapacitet sammenlignet med den tilgængelige mobile sandmængde. Derfor kan det ikke udelukkes, at sandfodring potentielt medfører en øget sedimentation ved Hvide Sande havn.

Klimaændringer medfører et øget sandfodringsbehov, og dermed kan det ikke udelukkes, at der pga. klimaændringer fremover kan forekomme en mindre forøgelse i oprensningsbehov som følge af sandfodring.



Figur 2-14. Illustration af brydningszonens placering og det tilhørende sedimenttransportprofil ved Hvide Sande Havn. (Google Earth, 2023)

2.5.2

Vurdering af ændring i sedimentationsforhold ved Thorsminde havn

På samme vis som ved Hvide Sande Havn er der i figur 2-15 illustreret et eksempel på brydningszonens placering ved Thorsminde Havn og dennes indflydelse på transportprofilen for den langsgående sandtransport.

Netto-sandtransporten ved Thorsminde Havn er sydgående. Desuden haves der jf. afsnit 1.2 en stor naturlig kysttilbagerykning nord for Thorsminde og dermed et behov for at sandfodre på disse strækninger. Således vil sandbufferen ved den nordlige mole potentielt forøges, såfremt der ikke sandfodres sammenlignet med situationen, hvor kysten fastholdes, da kysten rykker tilbage. På samme vis som ved Hvide Sande vurderes det dog, at påvirkningen fra sandfodring i den forbindelse blot kan være et behov for hyppigere præventive oprensninger sammenlignet med situationen, hvor der ikke sandfodres.

Jf. figur 1-23 forekommer der ikke 100% sand i den eksisterende situation ved Thorsminde. Derfor kan sandfodring potentielt medføre en øget sandtransport, såfremt der i den eksisterende situation forekommer større sandtransportkapacitet sammenlignet med den tilgængelige mobile sandmængde. Derfor kan det ikke udelukkes, at sandfodring potentielt medfører en øget sedimentation ved Thorsminde havn.

Klimaændringer medfører et øget sandfodringsbehov, og dermed kan det ikke udelukkes, at der pga. klimaændringer fremover kan forekomme en mindre forøgelse i oprensningsbehov som følge af sandfodring.



Figur 2-15. Eksempel på den potentielle ændring i placering af brydningszone samt langsgående sandtransport-profil for eksisterende og fremtidige situation ved Thorsminde. (Google Earth, 2023)

2.5.3

Vurdering af ændring i sedimentationsforhold ved Thyborøn kanal og Thyborøn Havn

Jf. figur 1-23 forekommer der 100% sand i den eksisterende situation ved Thyborøn. Derfor vil sandfodring på tangerne umiddelbart ikke medføre en øget sandtransport. Dog kan det ikke udelukkes, at en del af sandet fra sandfodring på Harboøre Tange og Agger Tange kan havne i Nissum Bredning samt i Thyborøn kanal. Såfremt der ikke sandfodres, vil der dog alligevel forekomme en naturlig sandtransport på tangerne, og dermed en sedimentation ved Thyborøn kanal. Sandtransporten vil i dette tilfælde blot stamme fra eroderet sand på tangerne. Hertil kan det ikke udelukkes, at der pga. klimaændringer fremover kan forekomme en mindre forøgelse i oprensningsbehovet som følge af sandfodring.

2.6

Ændring i koncentration af suspenderet sediment ved kystnær fodring

I nærværende afsnit vurderes på ændringen af koncentrationen af suspenderet sediment i vandsøjlen (SSC), som følge af kystnær fodring på strækningen Lodbjerg – Nymindegab. Kystnær fodring sker ved, jf. afsnit 2.1, at store mængder sand udledes direkte i vandsøjlen, hvorefter hovedparten af sandet aflejres mere eller mindre momentant på fodringspositionen. De finere sandfraktioner i sandfodringsmaterialet kan dog have en så lang opholdstid i vandsøjlen, at de transporteres væk fra fodringsområdet, hvormed de påvirker vandmiljøet udenfor selve sandfodringslokaliteten. Kystbeskyttelse i form af sandfodring vil derfor, i de perioder hvor sandfodringen gennemføres, give anledning til øget SSC, hvilket er betragtet som en ændring ift. eksisterende forhold.

Spredning af sedimenter samt vurdering af påvirkningen af SSC-niveauet, som følge af den kystnære fodringsaktivitet, er beskrevet ud fra viden opnået i forbindelse med måleprogrammer gennemført i år 2020 samt 2022, se afsnit 2.6.1 samt ud fra numerisk modellering af eksempler på realistiske sandfodringsscenarier, se afsnit 2.6.2 - 2.6.3 for hhv. beskrivelse af forudsætninger for de gennemførte numeriske modelberegninger og de tilhørende resultater af specifikke sandfodringsskammer.

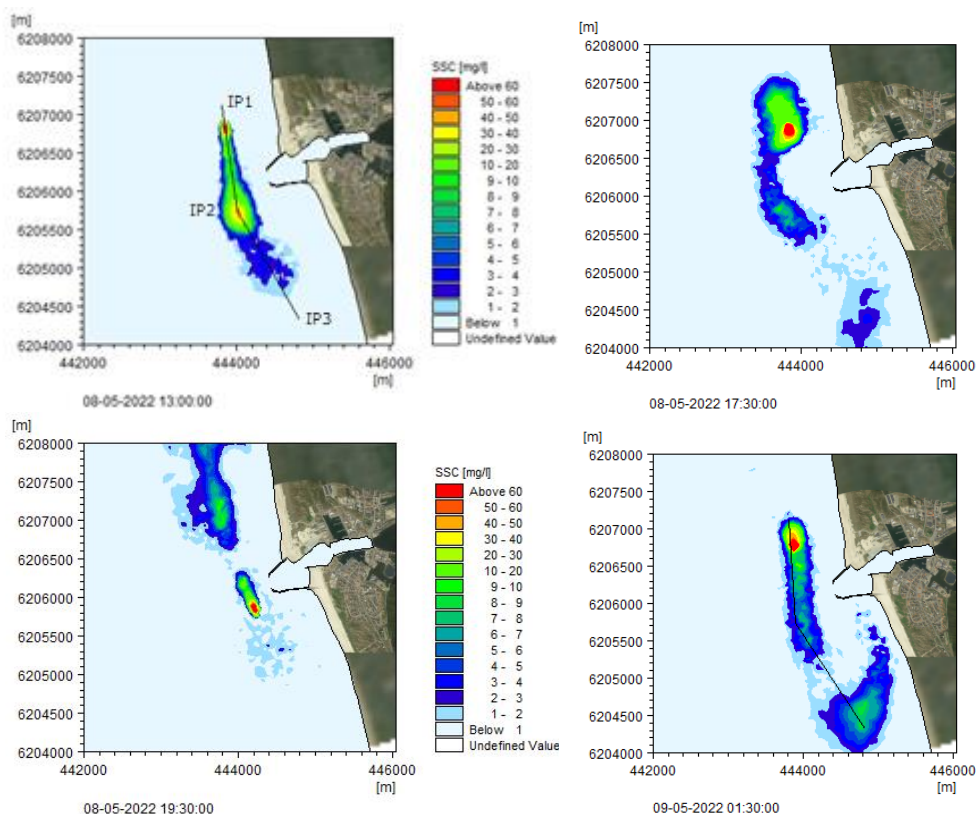
Ved den numeriske modellering bestemmes udelukkende ændringen af SSC som følge af den kystnære sandfodringsaktivitet. For at få det samlede SSC-niveau i vandsøjlen skal tillægges den naturlige baggrundskoncentration, der bl.a. afhænger af bølgeforholdene og lokaliteten. Den kystnære sandfodring gennemføres hovedsageligt i perioder med forholdsvis roligt vejr, $H_s < 1,5$ meter, men kan gennemføres for H_s op til ca. 3,0 m (jf. Projektbeskrivelsen). Vurderinger af baggrundskoncentrationen for forskellige bølgehøjder og lokaliteter er tidligere beskrevet i afsnit 1.9 (jf. tabel 1-13). Det skal bemærkes, at den naturlige baggrundskoncentration primært er høj ved bunden, mens påvirkningen fra den kystnære sandfodring vil påvirke forskellige dele af vandsøjlen afhængig af afstanden fra sandfodringslokaliteten, idet sedimenterne har en naturlig bevægelse ned gennem vandsøjlen.

2.6.1 Erfaringer vedr. påvirkning af SSC fra sandfodringer ifm. måleprogrammer

Ifm. måleprogrammet i 2020 (Rambøll, 2021) blev det vurderet, at sandfodring kan medføre et lidt højere indhold af de grovere sedimenter sammenlignet med de naturlige forhold. Vurderingerne var baseret på en sammenligning af kornstørrelsesfordelingen ved Hvide Sande, Thorsminde og Thyborøn med/uden sandfodring/bypass.

Påvirkningen af SSC-niveauet blev bl.a. undersøgt ifm. måleprogrammet i 2022, hvor der blev gennemført såkaldte kunstige SSC-kampanjer med det formål at øge SSC-niveauet omkring Hvide Sande Havn. Der blev konstateret højere SSC-niveau ved en måleposition umiddelbart udenfor havnen som følge af den kunstige SSC-kampagne, men inde i havnen var det ikke muligt at observere nogen signifikant påvirkning af SSC-niveauet. Ved frasortering af baggrundskoncentration af SSC er det vurderet, at påvirkningen umiddelbart udenfor havnen under det aktuelle SSC-scenarie har været op til ca. 15 mg/l.

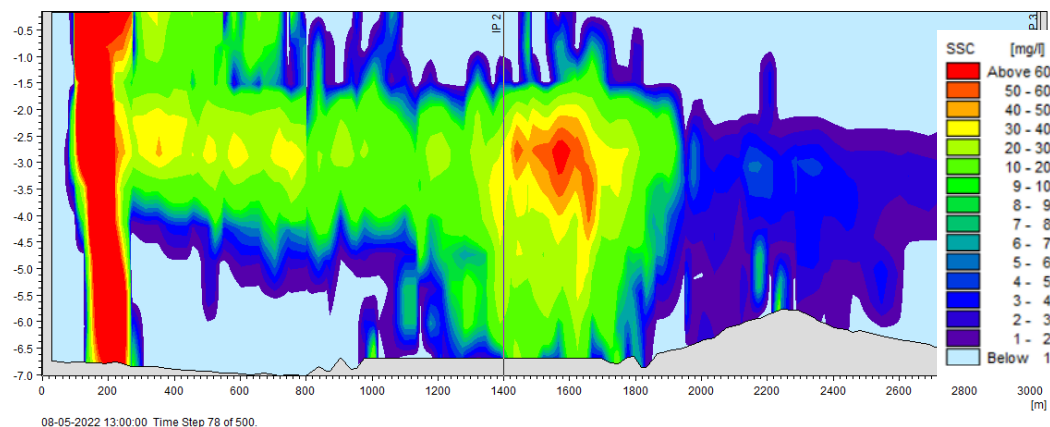
Der blev efterfølgende gennemført modellering af udvalgte gennemførte kunstige SSC-kampanjer for at visualisere både påvirkningsniveauet og -området. Resultater fra denne modellering er nærmere beskrevet i (Rambøll, 2023b), men udvalgte resultater er gengivet her. Figur 2-16 viser øjeblikbilleder af det modellerede SSC-niveau opnået under en af de gennemførte kunstige SSC-kampanjer. Øjeblikbillederne dækker forskellige strømscenarier med hhv. nord- og sydgående strøm samt scenarier med både ind- og udgående vandføring fra Ringkøbing Fjord. Som det fremgår af figurerne, har SSC-påvirkningen under den pågældende SSC-kampagne været relativt lokal, med stor påvirkning (høje SSC-niveauer) umiddelbart ved lokaliteten for sandsugeren (højeste SSC-niveau indikerer positionen for sandsugeren til det aktuelle tidspunkt), og reduceret SSC-niveau i større afstand til sandsugeren. Fælles for de fire øjeblikbilleder er, at der ikke er en SSC-påvirkning helt tæt ved molehovederne samt inden for molerne.



Figur 2-16. Øjebliksplot af dybdemidlet SSC til udvalgte tidspunkter under gennemførelse af kunstig SSC-kampagne. Baggrundsfoto er fra (Google Earth, 2023). Specifikke forhold vedr. den numeriske modellering er nærmere beskrevet i (Rambøll, 2023b).

Tendensen er, at der nærmest sandsugerens arbejdsområde generelt forekommer et højt dybde-midlet SSC-niveau, hvorefter SSC-niveauet reduceres.

Figur 2-17 viser et øjebliksplot af SSC-niveauet i et vertikalt snit (positionen er angivet med sorte linjer i figur 2-16 (øverst til venstre)) under en af de kunstige SSC-kampagner. Som det ses af figuren, er der stort set ingen påvirkning af SSC-niveauet i den øverste del af vandsøjlen ca. 1.000 m fra fodringspositionen. Efter ca. 2.000 m fra fodringspositionen er der ingen påvirkning i de øverste 2 m af vandsøjlen.



Figur 2-17. Øjebliksplot af SSC i snit markeret på figur 2-16 (snit fra N mod S) til tidspunktet 08. maj kl. 13:00 (en time efter start af kunstig SSC-kampagne). Fodringspositionen ses i venstre del af figuren, hvor der forekommer høj dybdemidlet SSC-niveau $SSC > 50$ mg/l.

Baseret på måleprogrammerne kan det derfor konkluderes, at sandfodringsaktiviteter kan medføre både et højere SSC-niveau og/eller en ændring af fraktionsfordelingen på lokaliteten.

2.6.2 Modellering af suspenderet sediment under kystnær fodring

Nærværende afsnit indeholder en beskrivelse af den gennemførte numeriske modellering, hvis formål er at skabe grundlag for at vurdere påvirkningen af SSC-niveauet, som følge af den kystnære fodringsaktivitet. I afsnittet beskrives modelinput, forudsætninger, de modellerede scenarier samt valideringen af modellen, mens resultater er præsenteret i afsnit 2.6.3.

Idet hverken den naturlige kystudvikling eller målsætningen for strækningen Lodbjerg – Nymindegab er konstant, varierer det kystnære fodringsbehov indenfor en aftaleperiode, jf. tabel 2-3. Desuden er det defineret, at en kystnær sandfodringskampagne for én strækning består af fodring med op til 1.500.000 m³ sand indenfor en periode på op til 70 dage, jf. tabel 2-2. Overstiger det samlede behov for fodring på strækningen denne kampagnemængde, eller vælges det at gennemføre en fodring med en mindre mængde end det forventede behov i aftaleperioden, må det forventes, at den samme strækning genbesøges.

Scenarier for modelberegningerne er repræsentative for gennemførelse af én fodringskampagne, dvs. kystnær fodring med op til 1.500.000 m³ indenfor en periode på op til 70 døgn.

Indhold af fint sand i sandfodringsmaterialet

Den numeriske modellering indeholder kun de sedimenter, der forbliver i vandsøjlen i tilstrækkelig tid til, at de kan føres med strømmen og dermed give anledning til en påvirkning af SSC-niveauet nedstrøms for sandfodringslokaliteten. Dette medfører, at spredningsberegningerne gennemføres for den del af sandfodringsmaterialet, der har en kornstørrelse, $d < 0,125$ mm, hvilket i det følgende generelt defineres og omtales som "*fint sand*" eller "*fint sediment*".

De seks sandindvindingsområder, som Kystdirektoratet har udpeget som værende primære kilder til levering af sandressourcer til sandfodringen, er beskrevet i tabel 2-4 (jf. afsnit 2.2.1) i forhold til kornstørrelsesfordelingen. Heraf fremgår det, at indholdet af fint sand for de enkelte indvindingsområder er bestemt til mellem 0,8% og 3,7%, hvor den største andel er fra indvindingsområde Lodbjerg A. Indholdet af fint sand er defineret ud fra 75% fraktilen, hvilket betyder, at andelen af fint sand er lavere i 75 % af prøverne end det specificerede i tabel 2-4.

I forbindelse med indvindingen forekommer der et naturligt spild/udvaskning af de fineste sedimenter til vandsøjlen, hvilket medfører, at andelen af fint sediment i sandsugerens last er lavere

end den definerede andel baseret på kornstørrelsesanalyse af prøver taget på selve indvindingsområdet. Tidligere analyser af spild under indvinding har vist, at der forekommer et minimum spild af det fineste sand på mellem 0,1% og 0,7%, se tabel 2-6 (der foreligger ikke oplysninger om spild under indvindingen for de to indvindingsområder Lodbjerg A og Lodbjerg B).

Indholdet af fint sediment jf. tabel 2-4 er derfor justeret med 0,1% for at tage et forsigtigt hensyn til spild under indvindingen.

	578-AA Husby Klit	562-AD Ferring	562-AE Thyborøn	562-PA Thyborøn	Lodbjerg A	Lodbjerg B
Middelkornstørrelse, d_{50}	0,42mm	0,47 mm	0,42 mm	0,54 mm	0,46 mm	0,50 mm
Andel, $d_{75\%} < 0,125$ mm	1,3%	0,8%	1,3%	1,6%	3,7%	2,5%
Min. spild ved indvinding	0,5%	0,4%	0,7%	0,1%	?	?
Antaget andel af fint sediment i lasten	1,2%	0,7%	1,2%	1,5%	3,6%	2,4%

Tabel 2-6. Antaget andel af fint sediment i lasten.

Som det fremgår af tabel 2-6 er indholdet af fint sand op til ca. 1,5% bortset fra indvindingsområderne Lodbjerg A og Lodbjerg B, hvor andelen er op til ca. 3,6%.

I modelberegningerne er det forudsat, at indholdet af fint sediment i fodringssandet ved gennemførelse af en kampagne ikke overstiger 2% for fodring på alle hovedstrækninger med undtagelse af Agger Tange og Harbøre Tange, hvor det er forudsat, at indholdet af fint sediment ikke overstiger 6%, idet der her anvendes sand fra Lodbjerg A og Lodbjerg B.

Metodebeskrivelse til vurdering af bidrag til SSC fra kystnære fodringsaktiviteter

Vurderingen af påvirkning af SSC-niveauet, som følge af gennemførelse af den kystnære sandfodring, baseres på beregninger gennemført i state-of-art programpakken MIKE3 FM udviklet af DHI. Output fra modellen er tids- og stedsvarierende faner af suspenderet sedimentkoncentrationer samt sedimenterede aflejringstykkelser.

MIKE3 FM er en 3-dimensionel numerisk model bestående af en række moduler, som kan kombineres efter behov. Modellen er opstillet i et såkaldt "fleksibelt mesh", som muliggør at optimere på detaljeringsgraden samt CPU-tiden i visse områder.

I dette tilfælde, hvor der ønskes modelleret spredning af suspenderet sediment i vandsøjlen, er der anvendt følgende modelmoduler:

- MIKE3 FM HD (hydrodynamisk modul) – til modellering af 3D strømfelter
- MIKE3 FM PT (partikel tracking modul) – til modellering af 3D spredningen af partikler

Kombinationen af de ovenfor nævnte modelmoduler muliggør en realistisk gengivelse af strømfelter, vandstande, spredning af suspenderet sediment i vandsøjlen samt sedimentation af sediment udledt i vandsøjlen.

De hydrodynamiske processer simuleres via MIKE3 FM HD med påførte randbetingelser. Output fra det hydrodynamiske modul anvendes som input til de efterfølgende spredningsberegninger.

Transport, spredning og aflejring af sediment i forbindelse med den kystnære sandfodring er simuleret ved anvendelse af MIKE3 FM PT, som simulerer sedimenttransporten ved en Lagransk model, hvor det spildte materiale beskrives ved et antal partikler, der transporteres med det beregnede strømfelt (partiklerne/partikelintensiteten påvirker ikke strømfeltet). Hver partikel tilskrives egenskaber i form af en masse og en faldhastighed og indenfor hvert tidsstep flyttes hver af partiklerne både horisontalt og vertikalt. Partiklerne flyttes i modellen via både advektion og dispersion.

Evaluerede scenarier ifm. modellering af spredning af suspenderet sediment

Den numeriske modellering til vurdering af påvirkningen af SSC-niveauet, som følge af kystnær fodring, er gennemført for udvalgte eksempler, der afspejler realistiske sandfodringsscenarier. Der er taget udgangspunkt i en forholdsvis intensiv fodring, som medfører en høj påvirkning af SSC-niveauet, men under hensyntagen til de definerede rammer i tabel 2-2.

Modelberegningerne er gennemført for udvalgte hydrodynamiske scenarier baseret på de forhold, der er beskrevet i afsnit 1.5, herunder *stille forhold*, hvor der er tidevandsdominerede strømforhold samt perioder, hvor der er en kraftig *dominerende nordgående strøm*. Sandfodring i stille perioder medfører mindre spredning af sedimenterne men derimod højere SSC-niveauer i vandsøjlen, mens sandfodring i perioder med kraftigere strøm medfører øget spredning af de fine sedimenter og dermed et større berørt areal. Modelberegningerne er således gennemført med den forudsætning, at der i hele sandfodringsperioden er forhold svarende til enten stille strøm (tidevandsdomineret strøm) eller dominerende nordgående strøm (under påvirkning fra både tidevands- samt bølgedomineret strøm). Perioderne er vurderet repræsentative for normale forhold, men er ikke statistiske ekstremperioder.

Dominerende nordgående strøm er forudsat, da de højeste strømhastigheder forekommer i denne retning jf. tabel 1-7 – tabel 1-9. Resultaterne skal dog betragtes som værende repræsentative for scenarier med både nord- og sydgående strøm ift. påvirkning relativt til fodringspositionen.

Udover de hydrodynamiske scenarier er der defineret nogle scenarier, som følge af den mulige variation i sandfodringsmetoderne, herunder kystnær fodring ved rainbowng og klapning/split.

Specifikationer/forudsætninger anvendt ved opsætning af spredningsberegningerne for hhv. klapning/split og rainbowng er givet i tabel 2-7 og er i overensstemmelse med de overordnede rammer specificeret i Projektbeskrivelsen og i tabel 2-2 samt ønsket om, at modelberegningerne tager udgangspunkt i en intensiv fodring.

	Antal sandsugere	Last- stør- relse	Udled- ningsni- veau *	Tøm- metid	Tidscyklus	Varig- hed
	[stk]	[m ³]	[m]	[min]		[døgn]
Klap- ning/split	4	6.000	2	5	3 t 55 min	15
Rainbowng	2	12.000	0	40	4 t 40 min	20

Tabel 2-7. Forudsætninger for spredningsberegningerne. *afstanden er defineret ift. vandoverfladen.

I forbindelse med sandsugersens tidscyklus er der gjort en række forudsætninger, herunder en gennemsnitlig sejltid til og fra indvindingsområderne, tid for indvindingen af sandfodringsmateriale, samt klargøring ved indvinding og indbygning. Tømmetiden varierer ligeledes, og i nedenstående tabel 2-8 er vist en statistisk analyse af data for tømmetider opdelt på hhv. rainbowing, samt hvor lasten afleveres til rør ved eksempelvis strandfodring. Som det fremgår af tabel 2-8 varierer tømmetiden for rainbowing fra 15 min. til 159 min. I modelberegningerne er der forudsat en forholdsvis kort tømmetid på 40 min. (jf. tabel 2-7) for de store sandsugere med en laststørrelse på 12.000 m³, hvilket medfører, at modelresultaterne er repræsentative for en kort tidscyklus og en høj koncentration af sedimenter under tømningen i forbindelse med den kystnære fodringsproces.

Statistik	Tømmetid [minutter]	
	Rainbowing	Losset på rør
Maks	159	379
99.9% fraktil	146	265
99% fraktil	101	139
95% fraktil	86	105
90% fraktil	81	94
85% fraktil	77	88
75% fraktil	65	76
50% fraktil	51	58
25% fraktil	43	49
15% fraktil	39	46
10% fraktil	36	45
5% fraktil	33	43
1% fraktil	29	38
0.1% fraktil	17	12
Min	15	4

Tabel 2-8. Statistisk analyse af tømmetider for sandsugere, der hhv. rainbower og afleverer lasten til rør. Data er udleveret af Kystdirektoratet.

De numeriske modelberegninger er gennemført for kystnær fodring på tre strækninger ved hhv. Hvide Sande, Thorsminde og Thyborøn Kanal.

Input til de numeriske modeller

Følgende datainput er anvendt i forbindelse med opstilling af de numeriske modeller:

- Digitaliseret bathymetri (interpolerede dybdeforhold)
- Forceringsdata, strøm og vandstandsvariationer
- Karakteristika af de spildte sedimenter (faldhastighed, densitet)
- Spildrate (hvor meget sediment spildes)
- Geografisk placering af spildet

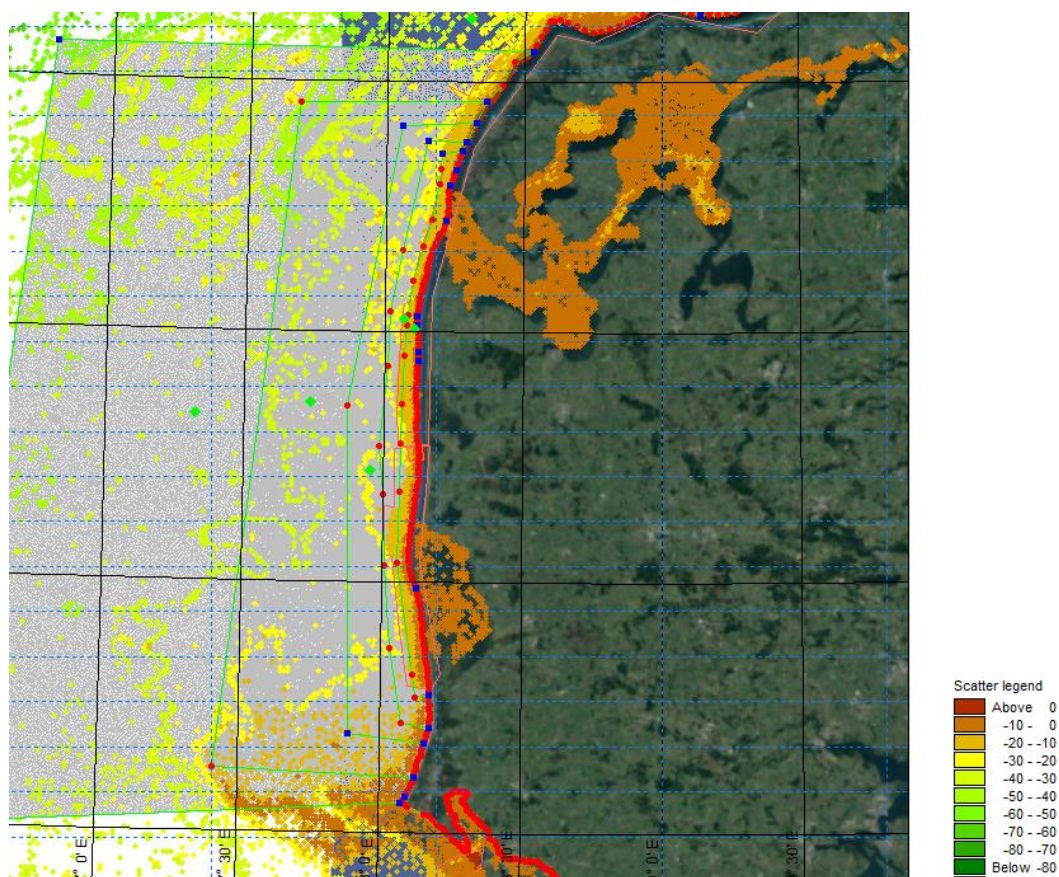
Der er generelt ifm. opsætningen af modellen anvendt viden og erfaringer opnået i forbindelse med måleprogrammet i 2022, hvor der efterfølgende blev opsat en numerisk model og gennemført modellering af de kunstige SSC-kampagner, dokumenteret i (Rambøll, 2023b). I måleprogrammet, der undersøgte påvirkningen af SSC ifm. gennemførelse af kunstige sandfodringskampagner ved Hvide Sande Havn, blev den anvendte numeriske model kalibreret i forhold til bl.a.

strømhastigheder, faldhastigheder for det udledte sediment samt dispersionsforhold op mod faktisk målte strømhastigheder og SSC-værdier. Erfaringer herfra er også anvendt ift. opbygningen af den mere generiske model, som det beskrives i det følgende

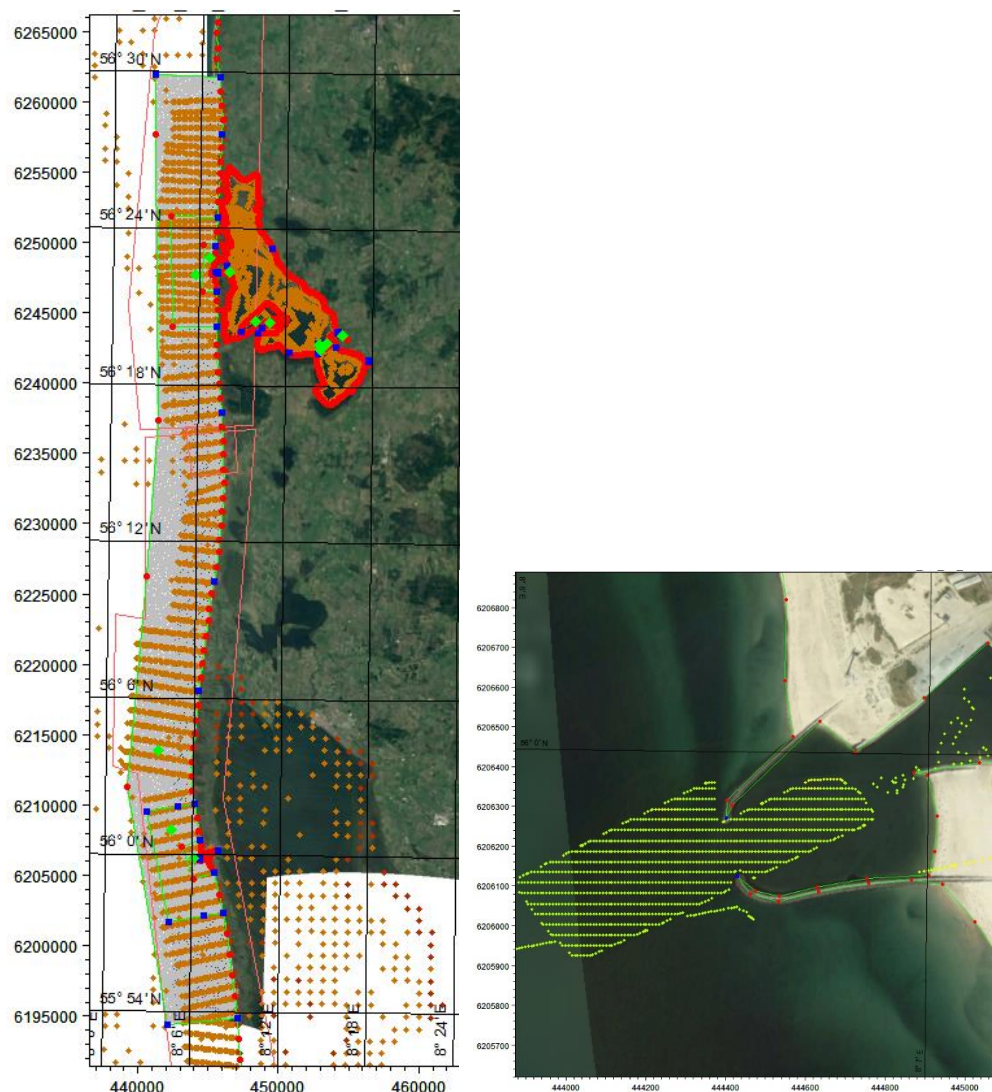
Dybdeforhold (bathymetri) og modeldomæne

En vigtig forudsætning for at opstille en retvisende model med retvisende strømfelter er en tilstrækkelig korrekt beskrivelse af dybdeforholdene (bathymetri). Bathymetrien for strækningen Lodbjerg – Nymindegab er i dette tilfælde baseret på data fra følgende kilder:

- Elektroniske søkort, MIKE C-map, se illustration i figur 2-18
- Pejledata (seneste opmålte vestkystprofiler fra 2022) langs strækningen Lodbjerg – Nymindegab. Data er udleveret af KDI, se illustration i figur 2-19 (venstre)
- Pejledata fra Hvide Sande Havn. Data er udleveret af Hvide Sande Havn, se figur 2-19 (højre)

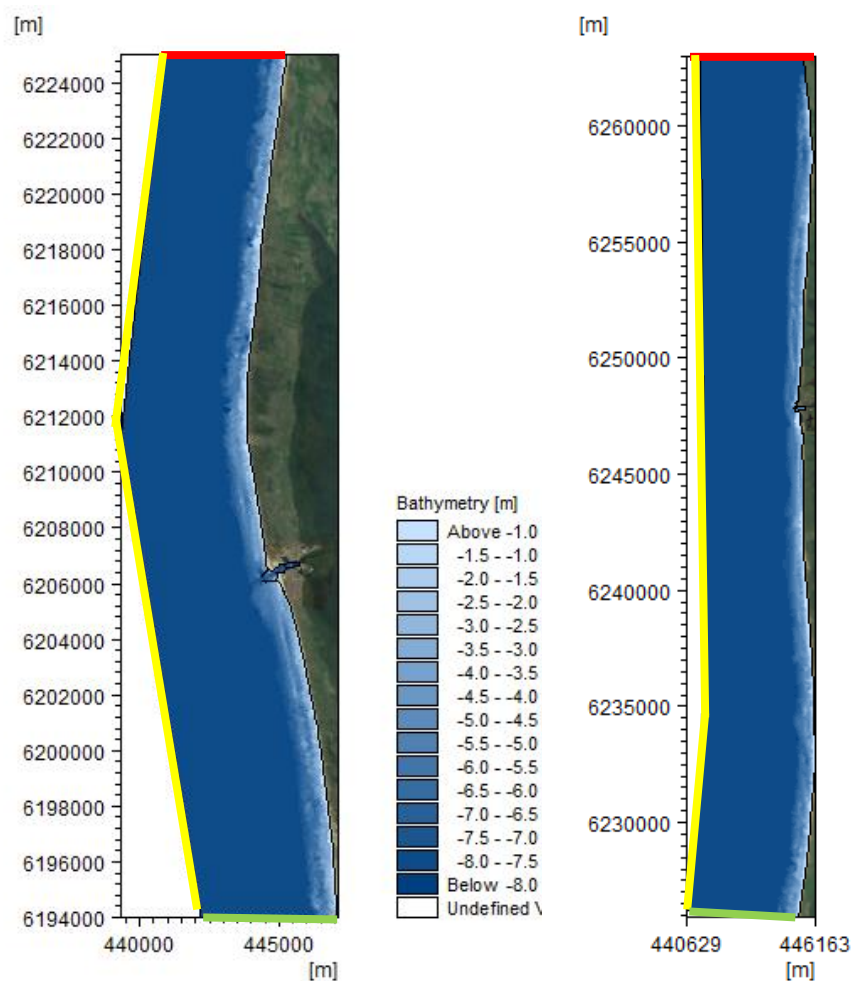


Figur 2-18. Illustration af pejledata fra MIKE C-map. Baggrundsfoto er fra (Google Earth, 2023).

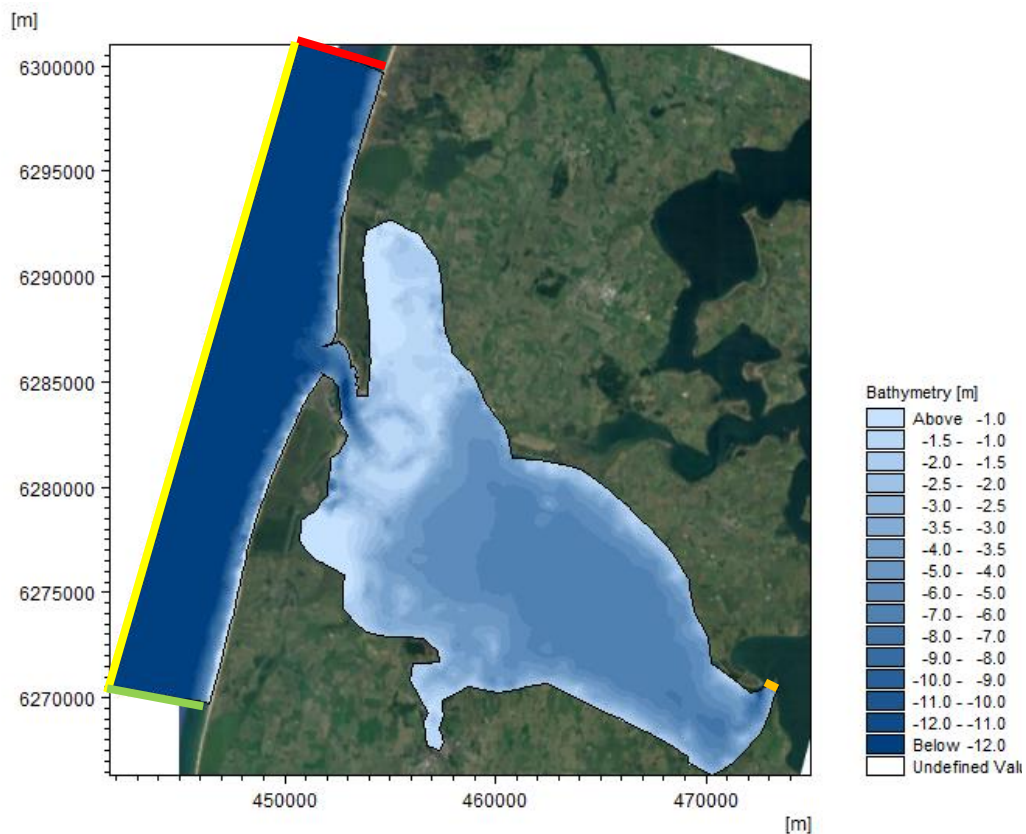


Figur 2-19. Illustration af pejledata (vestkystprofiler) leveret fra KDI (venstre) samt pejledata leveret fra Hvide Sande Havn (højre). Baggrundsfoto er fra (Google Earth, 2023).

Der er opsat en numerisk model for hver af de tre strækninger ved hhv. Hvide Sande, Thorsminde og Thyborøn Kanal. Hver model har en samlet udstrækning på ca. 30 km langs kysten og modelområderne med vanddybder samt åbne rande er vist i figur 2-20 og figur 2-21.

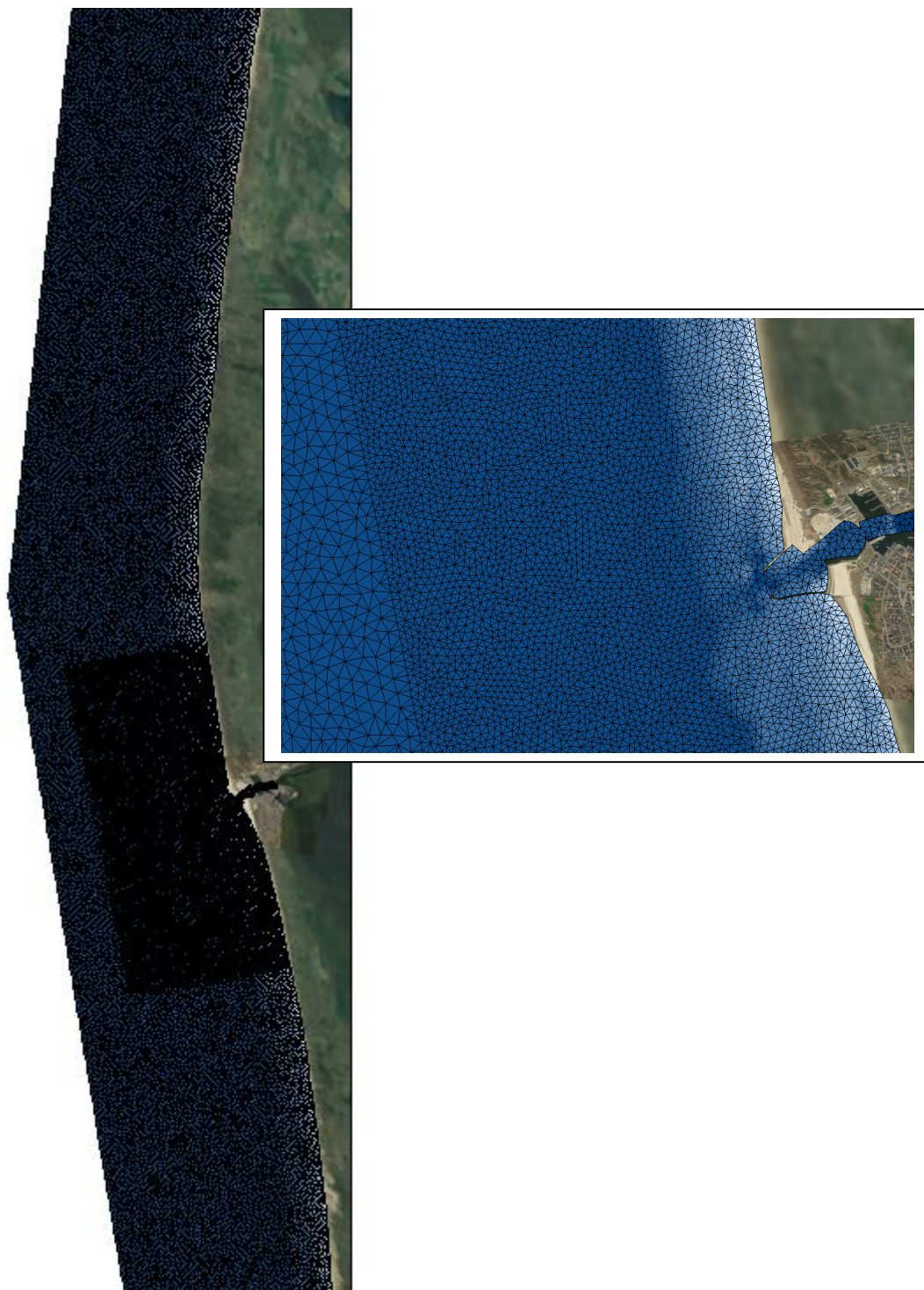


Figur 2-20. Modelområde og vanddybder for modellen for hhv. Hvide Sande-strækningen (venstre) og Thorsminde-strækningen (højre). Rød, gul og grønne linjer markerer åbne modelrande. Baggrundsfotos er fra (Google Earth, 2023).



Figur 2-21. Modelområde og vanddybder for strækningen omkring Thyborøn Kanal. Rød, gul, grøn og orange linje markerer åbne modelrande. Baggrundsfoto er fra (Google Earth, 2023).

I forhold til gennemførelse af de numeriske beregninger er modelområdet inddelt i et antal beregningselementer med en såkaldt flexible mesh (FM) inddeling, hvilket betyder, at elementstørrelsen er varierende, afhængig af den ønskede detaljeringsgrad i det pågældende område. Der anvendes således et fint beregningsnet i områder med lav vanddybde og hvor den kystnære fodring pågår, og større beregningselementer i områder langt væk fra sandfodringsaktiviteten og i områder med større vanddybde. Dermed kan et mere optimalt forhold imellem beregningstid og detaljeret diskretisering opnås. Eksempel på det anvendte beregningsnet er vist i figur 2-22 for modellen på strækningen ved Hvide Sande. Tilsvarende beregningsnet er anvendt ved hhv. Thorsminde og Thyborøn.



Figur 2-22. Diskretisering af modelområdet i trekantede beregningslementer af varierende størrelse (*venstre*) og zoom af diskretiseringen af modelområdet ind mod kysten (*højre*). Modellen er den anvendte ved Hvide Sande. Baggrundsfotos er fra (Google Earth, 2023).

De maksimale elementarealer spænder fra 1.500 m² i områderne nær havnene til 18.000 m² længst fra havnene.

Forcering og validering af de hydrodynamiske modeller

Modellerne er generelt forceret med vandstandsvariationer og strømhastigheder på de åbne modelrande (se modelrande i figur 2-20 og figur 2-21), bortset fra den nordlige modelrand, hvor der alene forceres med strømhastigheder. De påførte vandstandsvariationer og strømhastigheder er såkaldte hindcast-data fra Copernicus, se mere i afsnit 1.5.

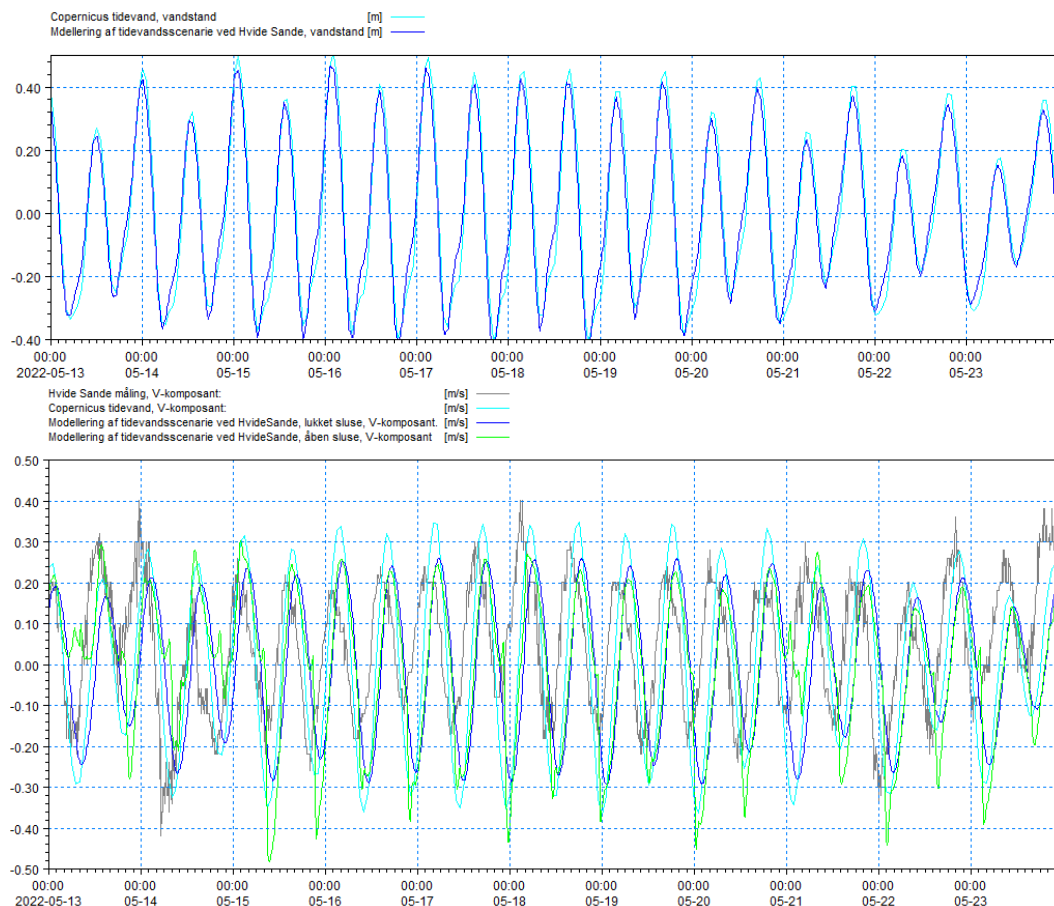
Ved "stille-scenariet" er modellerne forceret med tidsserier af vandstandsvariationer og hastighedskomponenter, der svarer til tidevandsforhold. Scenarierne med dominerende nordgående strøm er forceret med vandstandsvariationer samt justerede hastighedskomponenter, der medfører, at den gennemsnitlige strømhastighed er øget med 90% fraktilen for residual-hastighedskomponenten for nordgående strøm. Ved Hvide Sande medfører dette, at den gennemsnitlige strømhastighed er øget med ca. +0,29 m/s, tilsvarende ved Thorsminde, hvor den gennemsnitlige strømhastighed er øget med ca. +0,16 m/s og ved Thyborøn Kanal ca. +0,23 m/s, jf. tabel 1-7 – tabel 1-9.

I både Thorsminde Havn og Hvide Sande Havn forekommer der en afvandingssluse mellem de bagvedliggende fjorde og havnene. Ved Hvide Sande er der gennemført modelberegninger for tilfældet, hvor afvandingssluserne er aktive og dermed genererer en tværgående strøm ud/ind i havnene, og for et scenarie, hvor afvandingssluserne er lukkede. Ved aktive sluser er påført vandstandsvariationer og strømhastigheder ved slusen.

Ved Thyborøn er der i den østlige del af modelområdet en åben rand ved Oddesund, hvor der er påført strømhastigheder og vandstandsvariationer svarende til udvekslingen af vand med den østlige del af Limfjorden for en periode med hhv. tidevandsdominerede forhold og stærkere strøm.

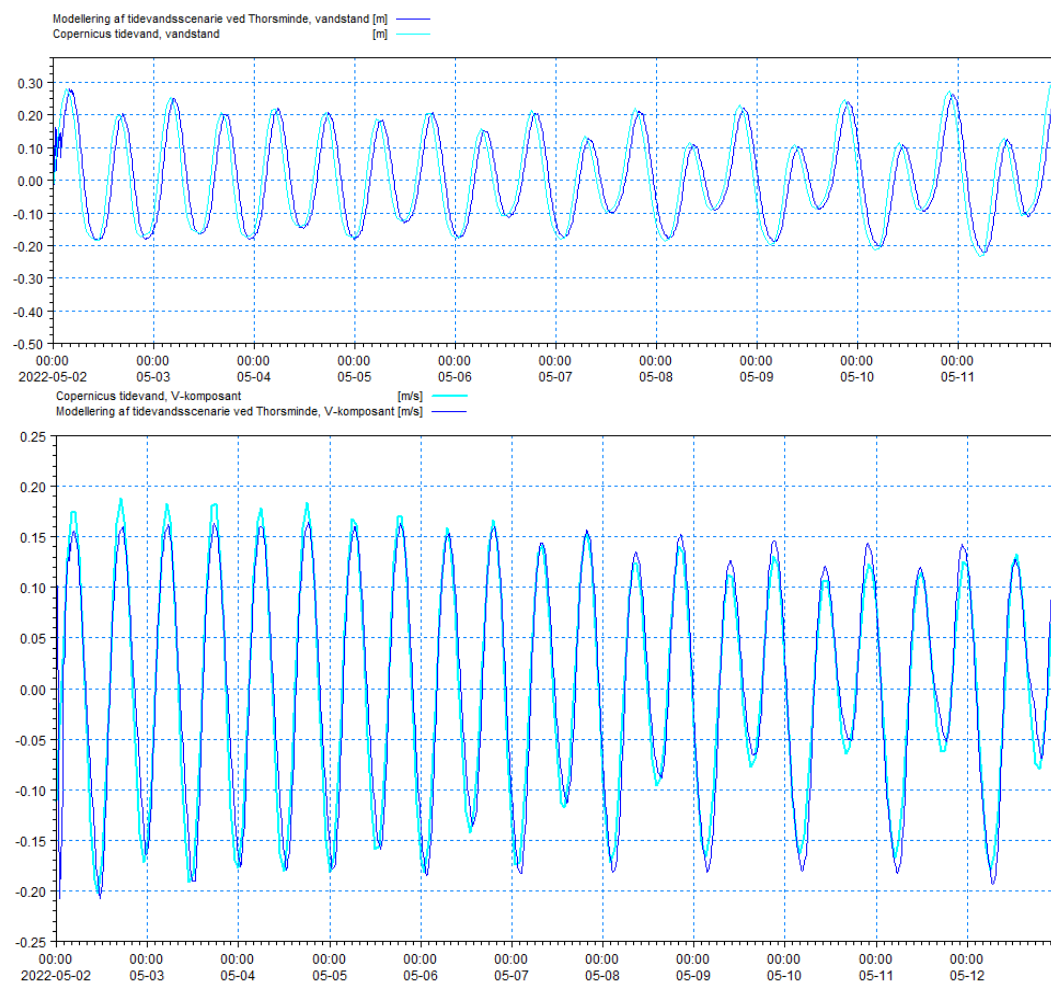
Modellerne er alle valideret ift. "stille-scenariet" og for strækningen ved Hvide Sande ses i figur 2-23 tidsserie-udtræk af hhv. overfladeelevationen samt hastighedskomponenten for nord-sydgående strøm (V) for Copernicus data (turkis) samt modelresultater (blå og grøn). Desuden haves måledata fra en bølge udenfor Hvide Sande Havn (grå) som er inkluderet som reference for en periode med primært tidevandsdominerede forhold. Heraf fremgår det, at der er stor overensstemmelse mellem de modellerede vandstandsvariationer og hindcast-vandstandsvariationer fra Copernicus. Ift. hastighedskomponenten viser figur 2-23, at modellen (blå og grøn kurve) er i stand til at gengive hastighedsvariationer i samme størrelsesorden som de forventede ud fra de målte data. Desuden kan det konstateres, at tidevandsvariationerne fra Copernicus viser lidt højere hastigheder end de målte.

Den grønne kurve er for modellen med åben sluse og ved en sammenligning af denne med den blå kurve (lukket sluse) fremgår det, at afvandingsslusen også påvirker strømhastighederne i indsejlingen til Hvide Sande havn. Dette blev også konstateret ifm. modelkalibreringen dokumenteret i (Rambøll, 2023b).

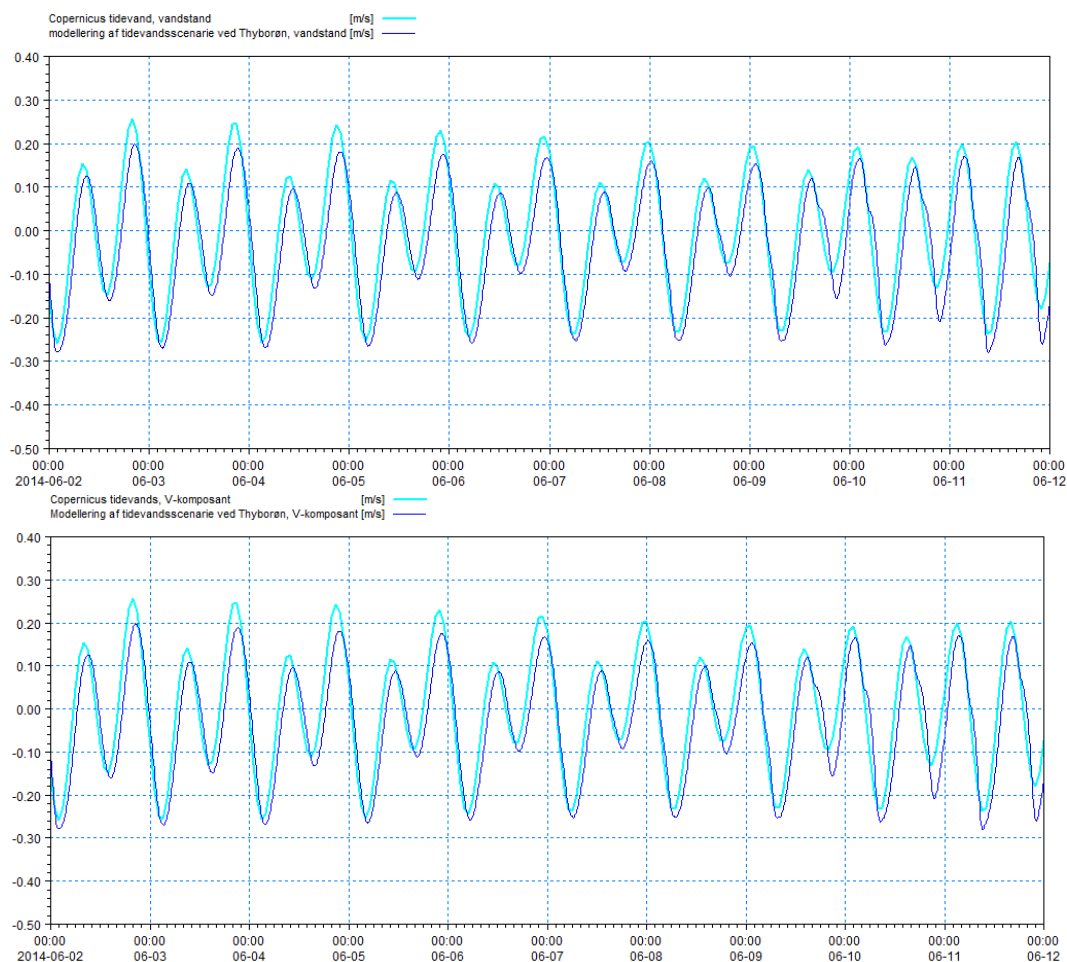


Figur 2-23. Validering af modellen for Hvide Sande ift. vandstandsvariationer (øverst) og hastighedskomponenten, V, (nederst). Valideringen er gennemført for en periode domineret af tidevand.

Modellerede tidevandsscenarier for modelstrækningerne ved Thorsminde og Thyborøn (blå) er valideret op mod tidevandsdata fra Copernicus (turkis), se figur 2-24 og figur 2-25. Heraf fremgår det, at modellerne er i stand til at gengive både hastigheds- og vandstandsvariationer tilfredsstillende ift. at modellere et tidevandsdominerende scenarie.

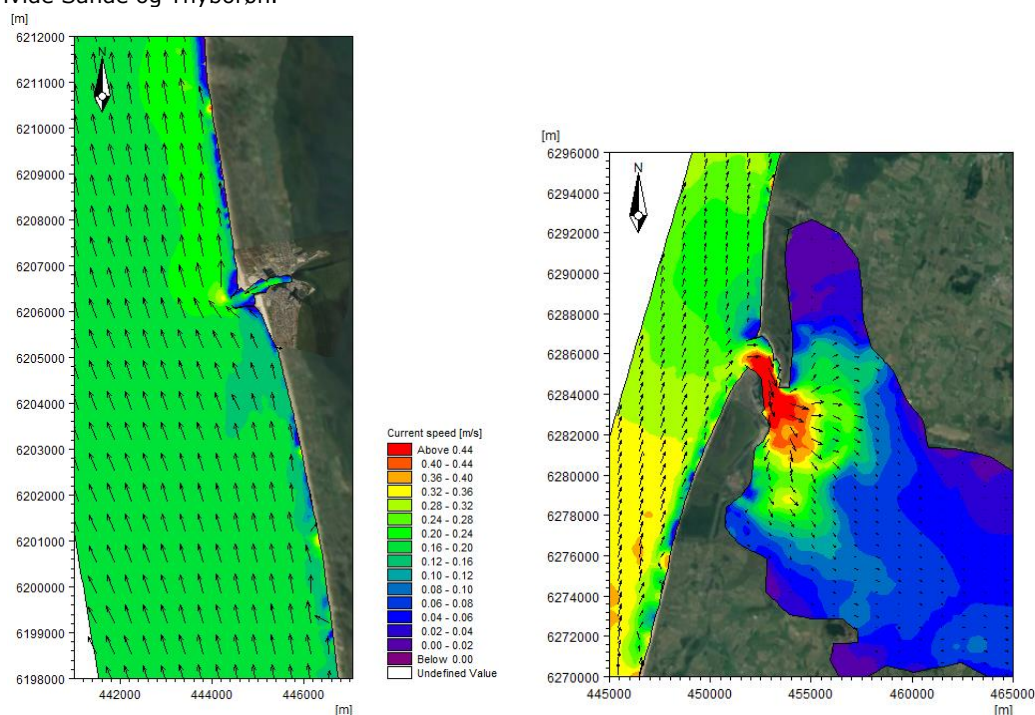


Figur 2-24. Validering af modellen for Thorsminde ift. vandstandsvariationer (øverst) og hastighedskomponenten, V, (nederst). Valideringen er gennemført for en periode domineret af tidevand, hvor modeldata er gengivet med blå-kurve.



Figur 2-25. Validering af modellen for Thyborøn ift. vandstandsvariationer (øverst) og hastighedskomponenten, V , (nederst). Valideringen er gennemført for en periode domineret af tidevand, hvor modeldata er gengivet med blå-kurve.

Output fra de hydrodynamiske beregninger er strømfelter og vandstandsvariationer, der anvendes som input til de efterfølgende spredningsberegninger. Som et eksempel herpå er vist et øjebliksplot af strømfeltet for en periode med nordgående strøm på figur 2-26 for modellen ved Hvide Sande og Thyborøn.



Figur 2-26. Øjebliksbillede af strømfeltet ved Hvide Sande (venstre) og Thyborøn (højre) for stillescenariet. Baggrundsfotos er fra (Google Earth, 2023).

Den kystnære langsgående strøm er forholdsvis homogen langs vestkysten, dog med lokale variationer f.eks. som følge af udstrømning fra Ringkøbing Fjord (via åbne sluser) ved Hvide Sande og ind-/udstrømning i Thyborøn Kanal.

Sedimentkarakteristik anvendt i spredningsberegningerne

I de gennemførte modelberegninger er den fine del af sedimenterne ($d < 0,125 \text{ mm}$) inddelt i tre fraktioner. Afgørende for sedimenternes opholdstid i vandsøjlen og dermed spredningen er faldhastigheden, w_s . Idet sedimenterne er at betragte som sand (friktionsmateriale) kan der gennemføres en teoretisk beregning af faldhastigheden med Stokes-formel, baseret på kornstørrelsen, se nedenstående:

Stokes formel:

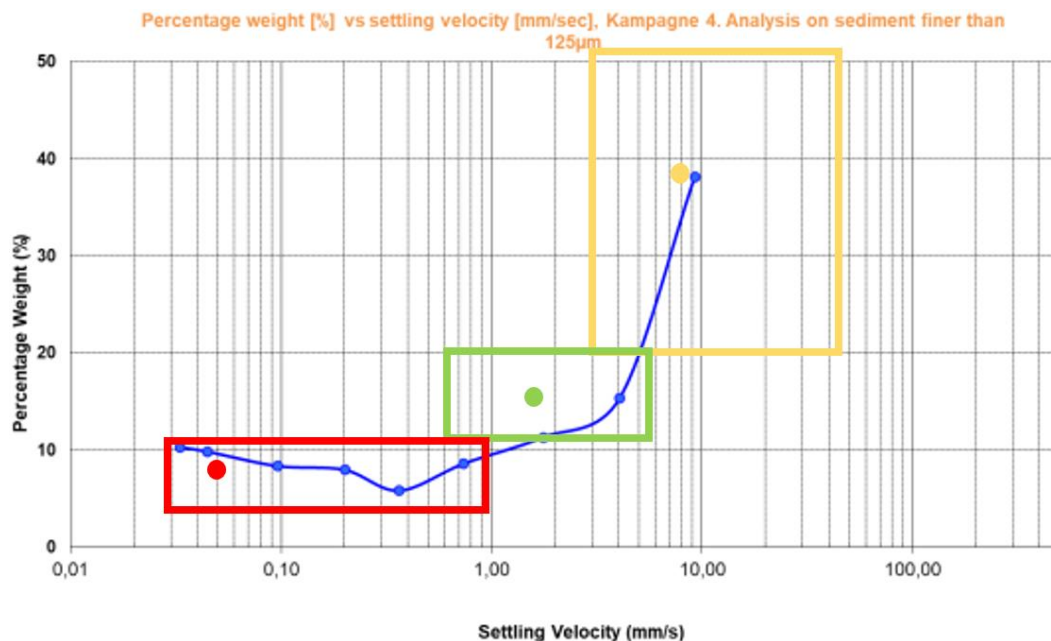
$$w_s = \frac{2}{9} g \left(\frac{d}{2} \right)^2 \frac{\rho_s - \rho_v}{\nu}$$

hvor

d = korn diameteren	[mm]
ρ_s = densitet af sand	[kg/m ³]
ρ_v = densitet af vand	[kg/m ³]
ν = viskositet	[kg/m/s]

Hvis partiklerne er meget små, kan de dog "finde sammen" i større klumper (de flokkulerer), og dermed opfører de sig ikke som enkelt-partikler, hvormed faldhastigheden øges. De teoretiske beregninger er derfor suppleret med viden opnået i forbindelse med gennemførelsen af måleprogrammer i 2020 og 2022, hvor der blev udtaget laste-prøver til laboratorie-test for fastlæggelse af blandt andet faldhastigheder, se mere i (DHI, 2021) (DHI, 2022).

Eksempel på resultat fra faldhastighedsanalyserne er vist i figur 2-27, hvor opdelingen af den fine del af sandet er markeret inddelt i tre fraktioner.



Figur 2-27. Resultat fra faldhastighedsanalyse gennemført på en lasteprobe fra måleprogram 2022. (DHI, 2022)

Baseret på resultaterne fra de gennemførte faldhastighedsanalyser fra lasteprover, de teoretiske beregninger af faldhastigheder, kornkurver samt modelkalibrering gennemført ifm. modellering af måleprogram 2022 (Rambøll, 2023b) er der i de gennemførte modelberegninger anvendt følgende vurderede konservative fraktionsfordeling og tilhørende faldhastigheder (se tabel 2-9), idet andelen af fraktion 2 og 3, der forbliver i vandsøjlen i længere tid, er justeret ift. faldhastighedsanalyserne.

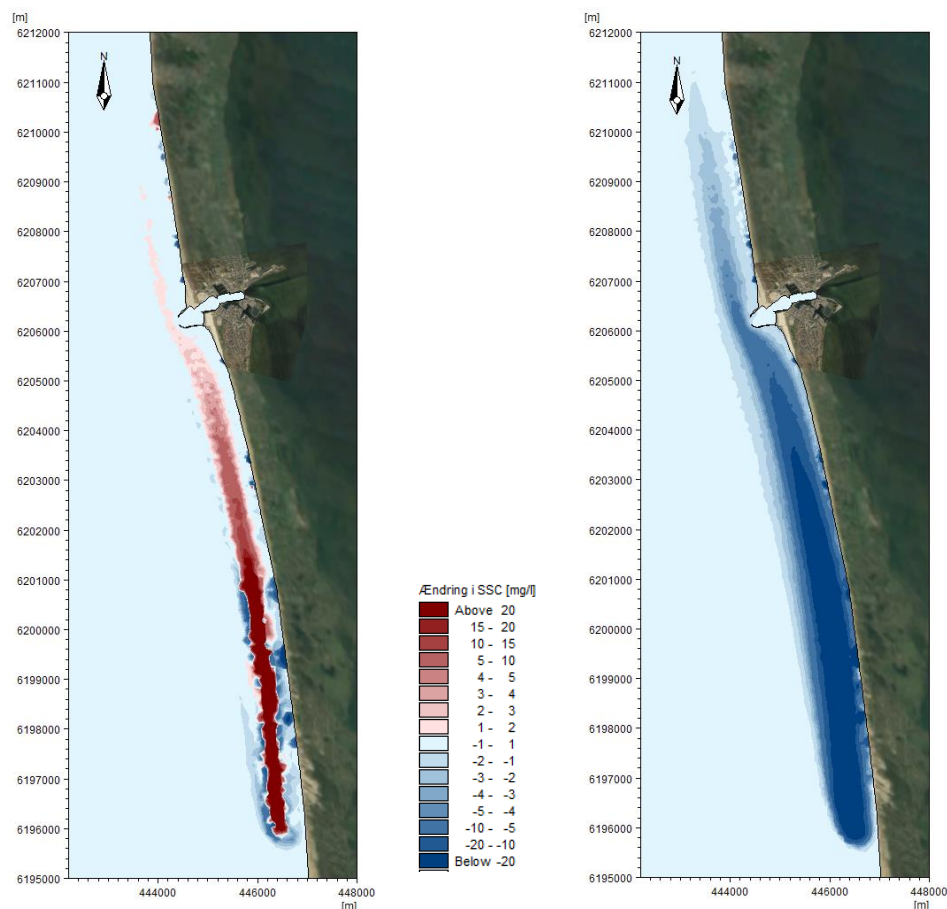
	Andel	Faldhastighed [mm/s]
Fraktion 1	60 %	7
Fraktion 2	20 %	1,5
Fraktion 3	20 %	0,05

Tabel 2-9. Anvendt fraktionsfordeling og faldhastighed for de modellerede fineste sedimenter.

De forudsatte faldhastigheder anvendes både for scenarierne, hvor den kystnære fodring gennemføres som rainbowing og klapning/split.

Supplerende forudsætninger anvendt i modelopsætningen

Den turbulente del af strømningens bidrag til flytningen af partiklerne (dispersionen) inkluderes ved en såkaldt dispersionskoefficient. Resultaternes følsomhed overfor signifikante variationer i dispersionskoefficienten er dog undersøgt, se ændringen af max. SSC som følge af 30% reduktion af den anvendte horisontale dispersionskoefficient og en forøgelse med en faktor 10 af den anvendte vertikale dispersionskoefficient i figur 2-28.



Figur 2-28. Ændring af maksimal dybdemidlet SSC, som følge af en signifikant reduktion af den horisontale dispersionskoefficient (venstre) og en signifikant forøgelse af den vertikale dispersionskoefficient (højre). Baggrundskort fra (Google Earth, 2023).

Resultaterne af følsomhedssimuleringerne i figur 2-28 viser, at hvis den horisontale dispersionskoefficient reduceres med ca. 30%, vil der generelt være en lidt højere SSC i midten af sedimentfanen og i nogle områder en lidt lavere SSC i yderkanten af sedimentfanen (som følge af at sedimenterne ikke spredes helt så meget). Lokalt omkring havnen øges den maksimale SSC med op til ca. 1 mg/l ved reduceret horisontal dispersion. En signifikant forøgelse af den vertikale dispersion medfører en generel reduktion af det maksimale dybdemidlede SSC-niveau. Dispersionskoefficienten er en kalibreringsfaktor, og i det endelige anvendte model-setup er der anvendt de samme dispersionsforhold, som blev fastlagt under kalibreringen af modellen til simulering af forsøgskampagnen, jf. (Rambøll, 2023b). Ovenstående anvendes således alene til at vise følsomheden overfor signifikante ændringer af dispersionsforholdene.

De numeriske simuleringer er gennemført uden re-suspension af sedimentet (dvs. uden en op-hvirvling af allerede aflejret sediment), da re-suspensionen reelt ikke er direkte relateret til selve sandfodringen, men i stedet er et naturligt forekommende fænomen på strækningen Lodbjerg - Nymindegab, hvor havbunden består af sand. Det vurderes, at sandfodringen ikke vil have nogen umiddelbar effekt på re-suspensionen.

2.6.3

Resultater fra numerisk modellering af suspenderet sediment ved kystnær fodring

I nærværende afsnit præsenteres resultater fra de numeriske modelberegninger af spredningen af suspenderet sediment, som følge af kystnær sandfodring langs strækningen Lodbjerg - Nymindegab. Resultater præsenteres generelt for gennemførelse af én fodringskampagne svarende til kystnær fodring med 1.500.000 m³ over en strækning på ca. 5 km. Modelberegningerne er, som

tidligere nævnt, gennemført for kystnær fodring på tre strækninger ved hhv. Hvide Sande, Thorsminde og Thyborøn (for hver strækning er modelleret to positioner for den gennemførte kampagne), og skal således betragtes som værende eksempler på SSC-påvirkninger under relativt konservative scenarier. Antallet af evaluerede scenarier er dog ikke udtømmende, og derfor bør videre anvendelse af resultaterne tilknyttes konservatisme. Eksempelvis kan der forekomme færre aktive sandsugere, ændret tidscyklus, ændret tømmetid, andre strømforhold, andet indhold af fint materiale mv. der alle kan medføre en ændring af det faktiske påvirkningsniveau ift. det modellerede. Desuden er modellen kun til en vis grad valideret, hvilket også medfører et behov for konservatisme i den videre anvendelse.

Modelusikkerheder er til en vis grad imødekommet ved at sikre, at der anvendes en vis konservatisme ifm. modelleringen – se nedenstående. Til trods for de nedenstående konservative forudsætninger anbefales det dog stadig at tilføje robusthed i den videre anvendelse af modelresultater til vurdering af miljøpåvirkninger.

- Sandet udledes relativt tæt på seks meter dybdekurven, hvilket vurderes at være en konservativ antagelse for sandfodring via rainbowing, hvor dele af sandmængderne reelt vil blive udledt på lavere vanddybde, hvormed opholdstiden i vandsøjlen reduceres.
- Klappet/splittet materialer antages udledt to meter under vandoverfladen. Typisk vil sandsugere dog stikke dybere (jf. tabel 1-7 i Projektbeskrivelsen), hvormed sedimenternes opholdstid i vandsøjlen er lavere end antaget i simuleringerne. Desuden vil en stor andel af de finere sedimenter blive "transporteret" ned gennem vandsøjlen, som følge af den store volumenmængde, der frigives mere eller mindre momentant. Dermed er den reelle andel af fint materiale, der frigives til fri transport med strømmen, mindre.
- I simuleringerne er det forudsat, at sedimentet udledes i ét punkt pr. lastning. Ved rainbowing vil udledningen i praksis forekomme over et større areal, hvilket medfører, at koncentrationerne i simuleringerne vil være højere sammenlignet med den reelt forekommende.
- Andelen af fint sand i fodringsmaterialet er baseret på 75%-fraktilen.
- Scenariet med dominerende nordgående strøm vurderes for værende konservativt, idet det dels er baseret på 90 % fraktilen for strømhastigheden og dels er genereret således, at der indenfor sandfodringsperioden stort set ikke forekommer sydgående strøm eller perioder med mere tidevandsdominerende forhold.

Modelberegningerne er gennemført for to 5 km strækninger for hver af de tre lokaliteter, men fodringsstrækningerne kan og vil variere jf. målsætningen for de enkelte hovedstrækninger, og modelberegningerne skal derfor alene betragtes som eksempler for fodringsstrækninger. Der vil som tidligere nævnt også forekomme strækninger, hvor fodringsmængden er lavere end 1.500.000 m³. På sådanne strækninger vil en fodringskampagne være mindre end 1.500.000 m³, mens der på andre strækninger skal gennemføres mere end en fodringskampagne indenfor aftaleperioden. Modelresultaterne vil dog alle være repræsentative for påvirkningen ved gennemførelsen af én kystnær fodringskampagne.

Resultaterne fra spredningsberegningerne for de modellerede scenarierne præsenteres i form af:

- Statistiske areal-plots af maksimal SSC [mg/l].
- Øjeblikplots af SSC [mg/l]
- Udtræk af tidsserier af SSC i specifikke punkter [mg/l]
- Varighed for overskridelse af en given SSC [døgn]
- Aflejringstykkelser [m]

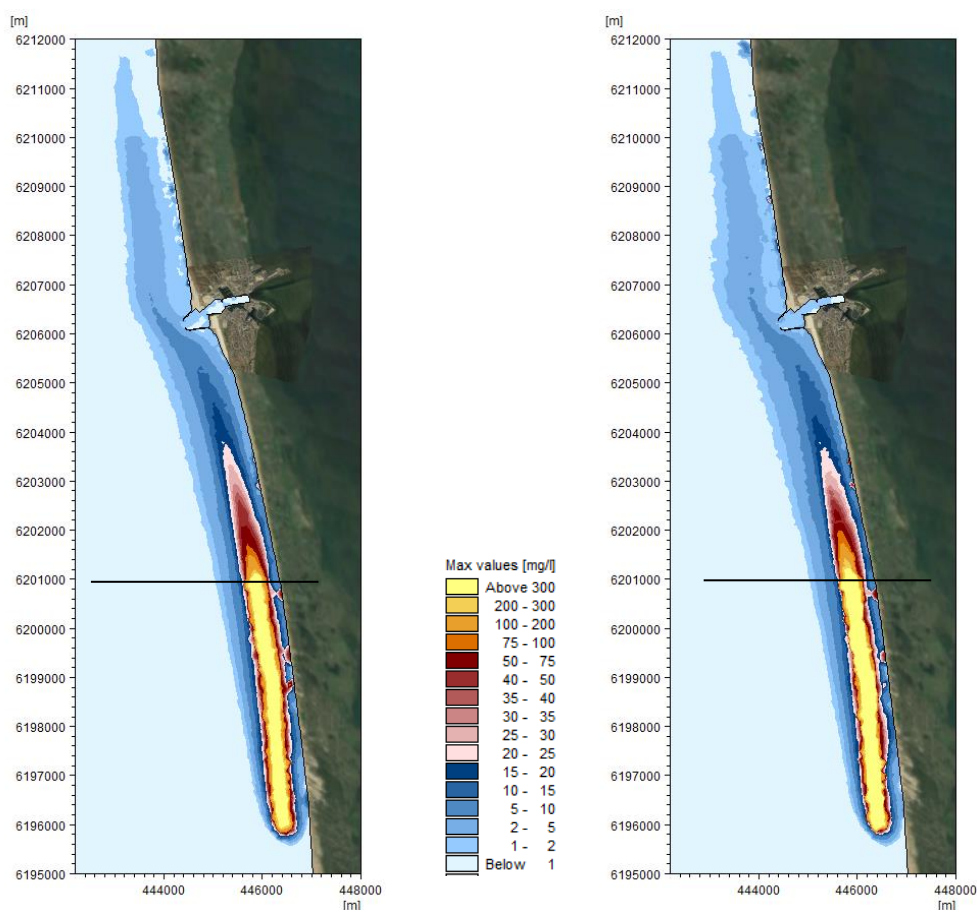
SSC præsenteres generelt som et dybdemidlet koncentrationsniveau, hvilket betyder, at det er den gennemsnitlige koncentration af suspenderet sediment i hele vandsøjlen, der angives. Udvalgte resultater viser dybdevariationen gennem vandsøjlen til et givet tidspunkt og på en given lokalitet.

Modelresultaterne er alene repræsentative for påvirkningen udenfor selve fodringsstrækningen. Dette skyldes at modelberegningerne alene inkluderer de sediment-fraktioner, der har en vis opholdstid i vandet, således at de kan transporteres væk fra fodringsstrækningen. Det maksimale og gennemsnitlige SSC-niveau samt aflejringstykkelser på selve fodringsstrækningen vil overstige de viste resultater, da påvirkningen fra de momentant aflejrte sedimenter vil bidrage helt lokalt.

Udtræk af tidsserier i specifikke punkter er alene repræsentative for det aktuelle punkt. Arealplots bør konsulteres ift. at vurdere om udtrækkene er repræsentative for et større område.

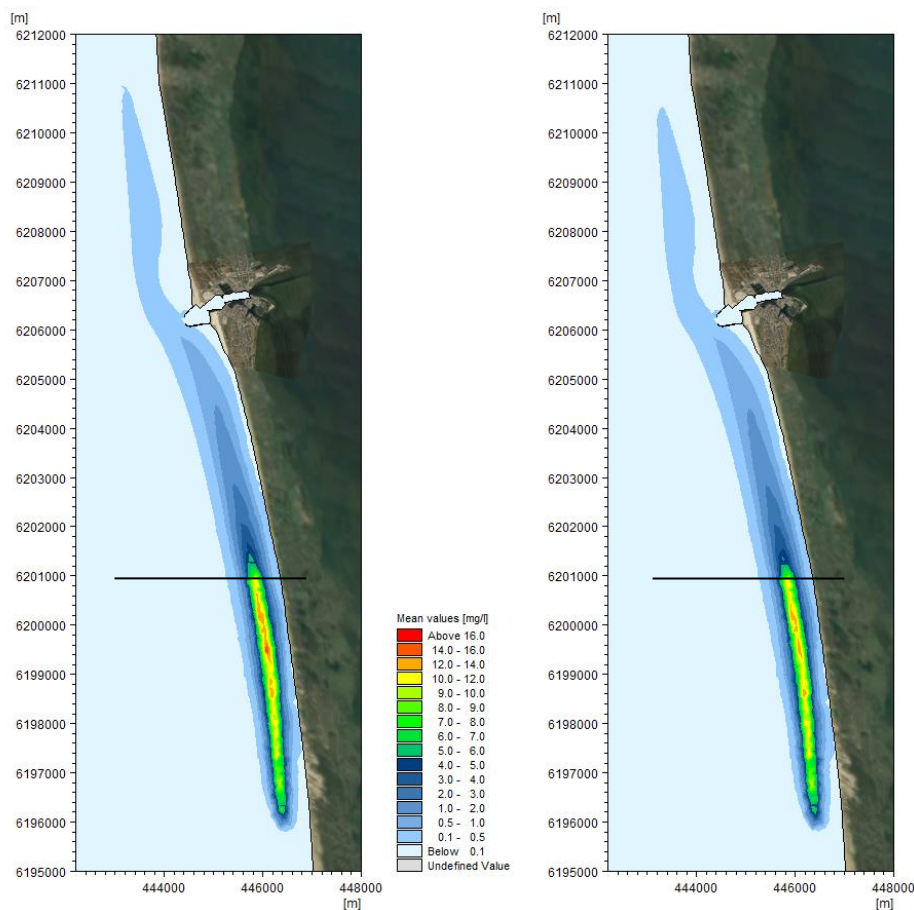
Resultater for kystnær sandfodring på strækningen ved Hvide Sande

Arealplots af dybdemidlet maksimal og middel SSC i fodringsperioden er vist i figur 2-29 og figur 2-30 for kystnær fodring ved hhv. rainbowing og klapping/split i en afstand på minimum 6 km til Hvide Sande Havn. Heraf fremgår det, at der ikke er stor forskel på de opnåede maksimale og gennemsnitlige SSC-niveauer om den kystnære fodring gennemføres ved klapping/split af materialet, eller der rainbowes.



Figur 2-29. Statistisk maksimal dybdemidlet SSC ved kystnær fodring ved Hvide Sande for et scenarie, hvor den kystnære fodring gennemføres ved rainbowing (venstre) og klapping/split (højre) i en afstand på minimum 6 km til Hvide Sande Havn. Nordligste omtrentlige fodringsposition er markeret med en sort vandret streg. Scenariet er for dominerende nordgående strøm. Baggrundsfotos er fra (Google Earth, 2023).

Som det fremgår af de statistiske maksimale SSC-niveauer vil der kunne forekomme en påvirkning af SSC-niveauet > 2 mg/l i en afstand på op til ca. 10 km fra fodringsstrækningen, mens påvirkninger på > 30 mg/l ligger indenfor ca. 2-3 km fra fodringsstrækningen. Fodringen gennemføres som tidligere nævnt over en strækning på ca. 5 km, hvilket omtrentlig svarer til strækningen, hvor $SSC > 300$ mg/l.



Figur 2-30. Statistisk middel dybde-midlet SSC ved kystnær fodring ved Hvide Sande for et scenarie, hvor den kystnære fodring gennemføres ved rainbowing (venstre) og klapping/split (højre) i en afstand på minimum ca. 6 km til Hvide Sande havn. Nordligste omtrentlige fodringsposition er markeret med en sort vandret streg. Scenariet er for dominerende nordgående strøm. Baggrundsfotos er fra (Google Earth, 2023).

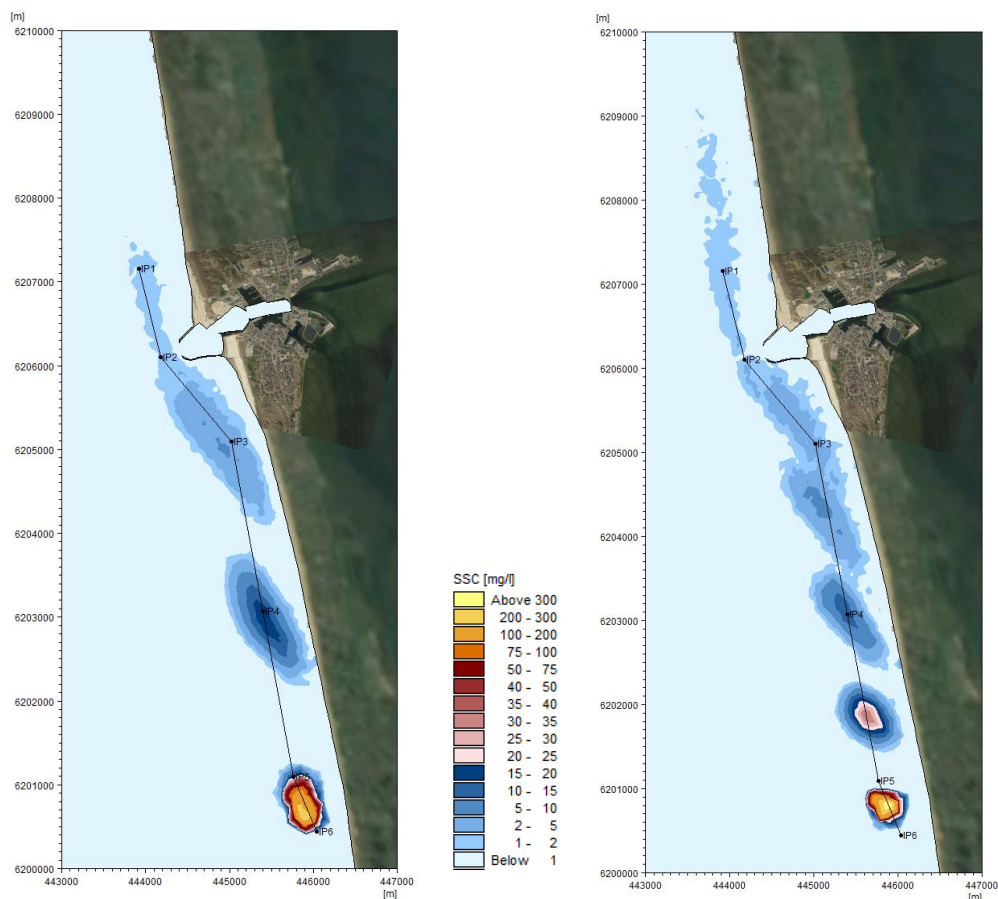
I en afstand på ca. 4-5 km fra fodringsstrækningen kan det jf. figur 2-30 forventes, at det gennemsnitlige SSC-niveau øges med op til ca. 1 mg/l under en fodringsperiode.

Det skal understreges, at figur 2-29 og figur 2-30 ikke viser en samtidig forekommende sedimentfane. Statistiske dybde-midlede resultater dækker således både over store tidslige og dybde-mæssige variationer af den faktiske påvirkning af SSC-niveauet.

Den tidslige variation er vist ved hhv. øjebliksplosts af den dybde-midlede sedimentkoncentration i figur 2-31 og ved tidsserieplots i figur 2-32 og figur 2-33.

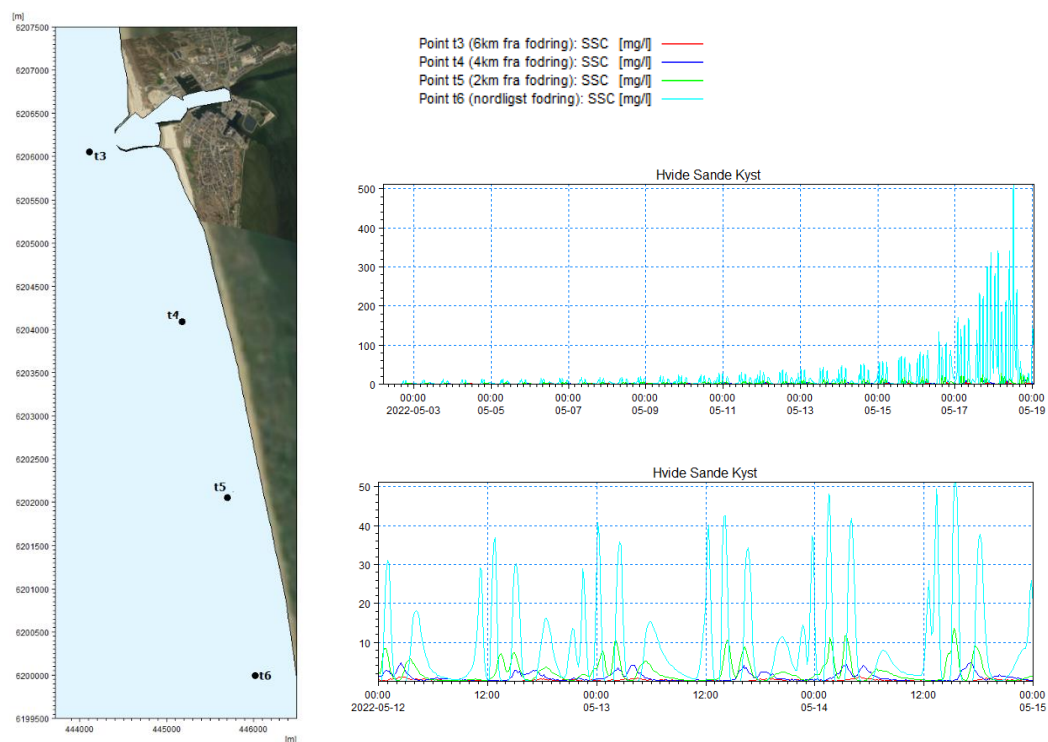
øjebliksploterne viser sedimentfanerne til et givent tidspunkt under fodringsprocessen og jf. figur 2-31 kan ses, at der ved rainbowing (venstre) er spor af tre-fire sedimentfaner svarende til tre-fire sandsugeres tømning af lasten, mens der ved klapping/split forekommer spor af fem-seks sedimentfaner (fem-seks lastetømninger). Umiddelbart efter tømningen er sedimentfanerne adskilte og nogle områder har ingen påvirkning fra fodring, mens andre områder påvirkes. Jo længere væk fra fodringspositionen des mere spredes sedimenterne, hvilket medfører lavere SSC-niveau,

men længere sedimentfane, der i nogle tilfælde bliver sammenhængende med sedimentfane fra den tilstødende laste-tømning. I modelberegningerne er der forudsat en jævn tidsmæssig afstand imellem sandsugerne. Hvis to sandsugere kommer til fodringsområdet indenfor en kortere tidsperiode end antaget/modelleret vil de pågældende sedimentfaner ligge tættere, men idet de modellerede fodringsscenarier overholder rammerne for fodringsintensiteten, vil den gennemsnitlige afstand mellem sandsugerne være som forudsat.

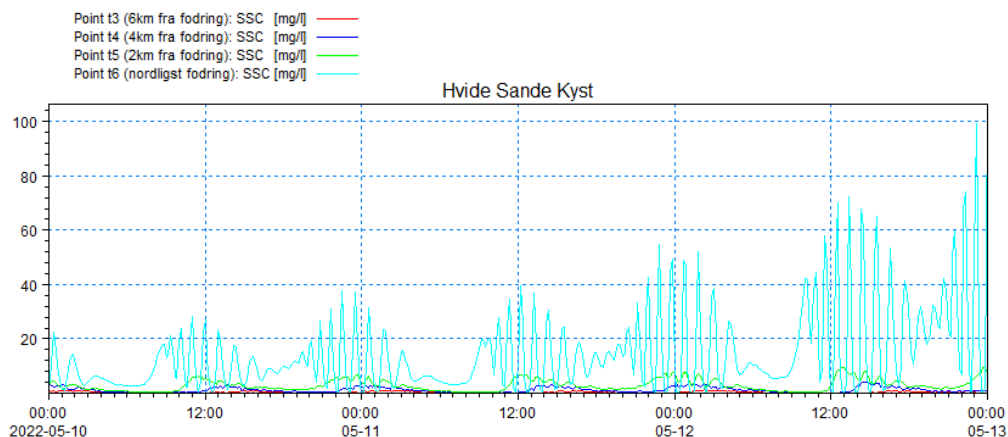


Figur 2-31. Øjebliksplot, der viser dybdemidlet sedimentfane under fodring ved rainbowing (venstre) og klapning/split (højre). Scenariet er for dominerende nordgående strøm. De sorte linjer markerer snit, hvor SSC-niveauet gennem vandsøjlen vises (se figur 2-34 og figur 2-35). Baggrundsfotos er fra (Google Earth, 2023).

Den tidlige variation er ligeledes vist ved udtræk af det dybdemidlede SSC-niveau i fire punkter langs kysten, se figur 2-32 og figur 2-33 for tidsserie fra hhv. rainbowing og klapning/split. Heraf fremgår det, at der i umiddelbar nærhed til fodringspositionen forekommer et højt SSC-niveau, mens der i større afstand til fodringen haves en reduceret påvirkning af SSC-niveauet. Tidsserierne viser yderligere, at der er perioder med højt SSC-niveau afløst af perioder uden påvirkning. Sammenlignes tidsserierne for rainbowing og klapning/split ses det, at der er flere toppe ved klapning/split (figur 2-33), og at de er smallere. Antallet af toppe afspejler antallet af arbejdende sandsugere, hvor der i modelberegningerne er anvendt fire sandsugere, når fodringen gennemføres ved klapning/split og to sandsugere, når fodringen gennemføres ved rainbowing. Bredden af toppene afspejler tømningstiden, hvor lasten ved klapning/split tømmes på ca. 5 min., mens det tager 40 min. ved rainbowing.



Figur 2-32. Positioner for udtræk af tidsserier af SSC-niveauet langs kysten i en afstand på hhv. 0, 2, 4 og 6 km fra den nordligste fodringsposition (venstre) samt tidsserie af SSC for hele fodringsperioden (øverst) og uddrag (nederst). Baggrundsfoto er fra (Google Earth, 2023).



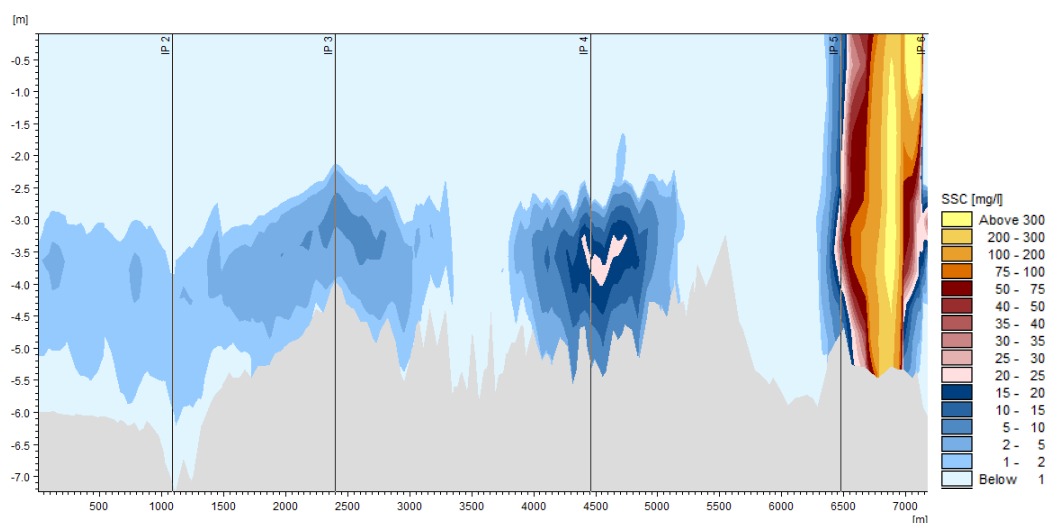
Figur 2-33. Uddrag af tidsserie, der viser sedimentkoncentrationen i fire punkter langs kysten. Scenariet er for fodring via klapping/split og dominerende nordgående strøm.

Anvendes færre sandsugere vil dette medføre, at der vil være længere mellem toppene (dvs. længere perioder uden fodring), mens den samlede tid for gennemførelsen vil være længere.

Der vil naturligt forekomme en dybdevariation af SSC-niveauet ned gennem vandsøjlen, hvilket skyldes kombinationen af variationen af sedimenternes faldhastighed, afstanden til/fra udledningspositionen samt varierende strømforhold mv. Ved gennemførelse af de kystnære fodringsaktiviteter vil sedimenterne frigives i den øvre del af vandsøjlen, ved rainboring helt i toppen og lidt dybere, når fodringen gennemføres ved klapping/split. Dybdevariationen i SSC-påvirkningen er vist ved øjeblikkeplots ned gennem vandsøjlen for scenariet med hhv. rainboring og klapping/split i figur 2-34 og figur 2-35. Variationen i dybden er vist for samme tidspunkt som øjeblikkeplottene i figur 2-31, hvor også markeringen af strækningen for dybdeplottene er markeret. Det skal dog bemærkes, at øjeblikkeplottene for scenariet med hhv. rainboring og klapping/split ikke er til det

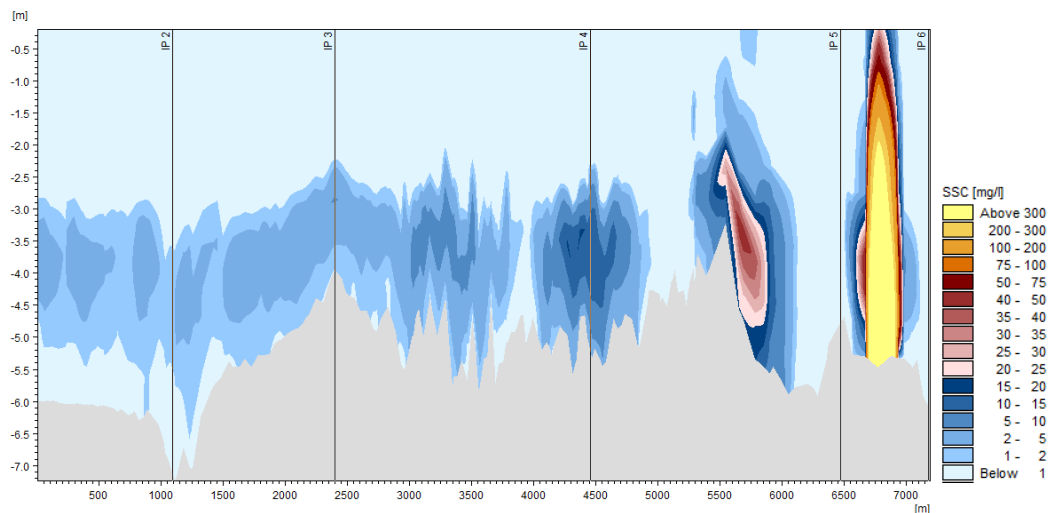
samme tidspunkt, da der er forskel på tidscyklus for sandsugerne. Der kan dermed ikke laves en præcis sammenligning mellem de to scenarier, da der vil være nogle variationer i det strømfelt, der forekommer til det pågældende tidspunkt, men der kan udtrækkes tendenser.

Frigivelsen af sedimenter i toppen af vandsøjlen under rainboring ses af det forholdsvis høje SSC-niveau i hele vandsøjlen nær fodringsområdet (den gul/orange søjle i højre side af figur 2-34). Af dybdevariationen fremgår desuden at der nærmest fodringspositionen genereres en separat (smal) sedimentfane pr. lastetømning, mens sedimenterne spredes mere ved større afstand til frigivelsen, hvormed sedimentfanerne i perioder kan nå sammen. Sedimentfane, der har en afstand på mere end ca. 2 km til fodringspositionen er primært i den nedre del af vandsøjlen og de øverste ca. 2 m er således upåvirkede af fodringsaktiviteterne.



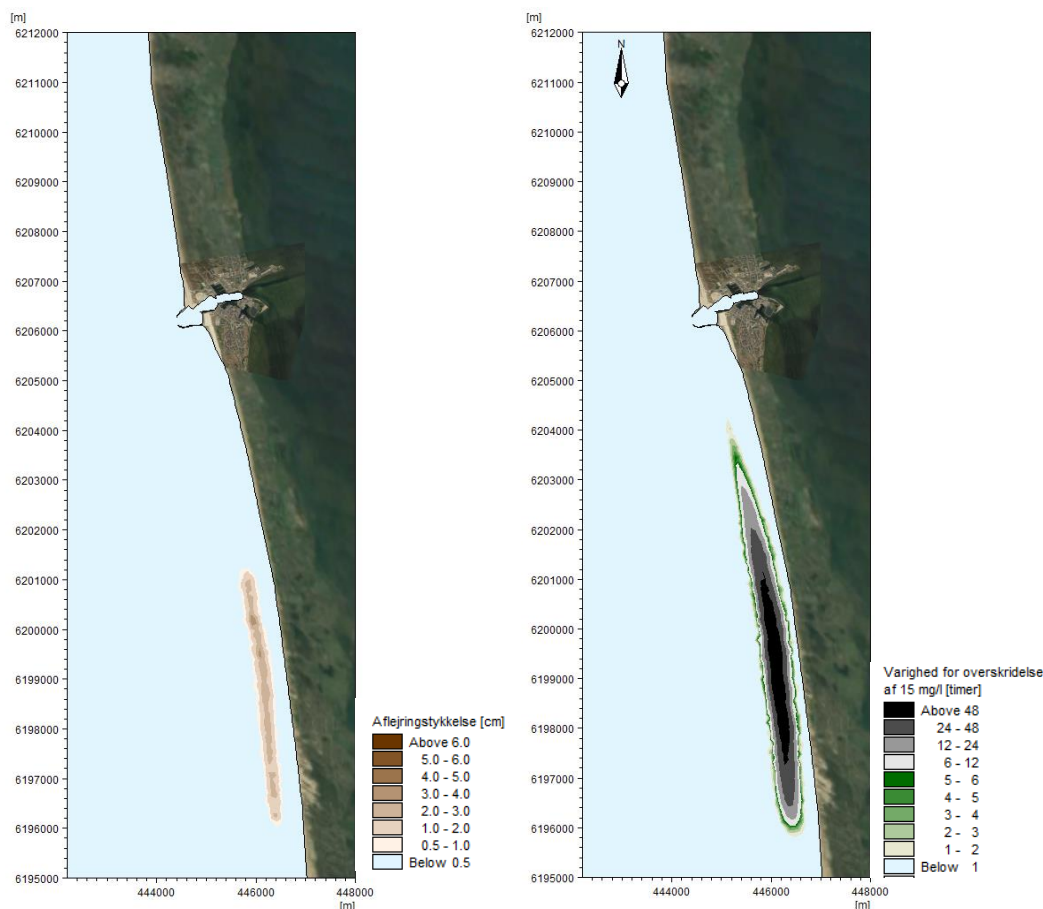
Figur 2-34. Øjeblikbillede af SSC i et snit i dybden som markeret på figur 2-31 for scenariet, hvor fodringen gennemføres ved rainboring ved Hvide Sande under dominerende nordgående strøm.

Gennemføres fodringen i stedet ved klapning/split (figur 2-35) ses, at omkring fodringspositionen er SSC-niveauet lidt lavere i overfladen (sammenlignet med scenariet med rainboring), hvilket skyldes at sedimenterne frigives ca. 2 m under vandoverfladen. Herefter er tendenserne de samme som ved rainboring, dvs. med en afstand på ca. 2 km fra fodringspositionen er koncentrationsniveauet i sedimentfanen i de øverste 2 m af vandsøjlen kraftigt reduceret. Dette stemmer overens med de konklusioner, der blev draget ifm. gennemførelse af måleprogrammet jf. (Rambøll, 2023b), hvor model-resultaterne også viste, at ved en afstand på ca. 2 km fra sandsugers position var de øverste ca. 2 m af vandsøjlen upåvirket af den gennemførte kunstige SSC-kampagne.



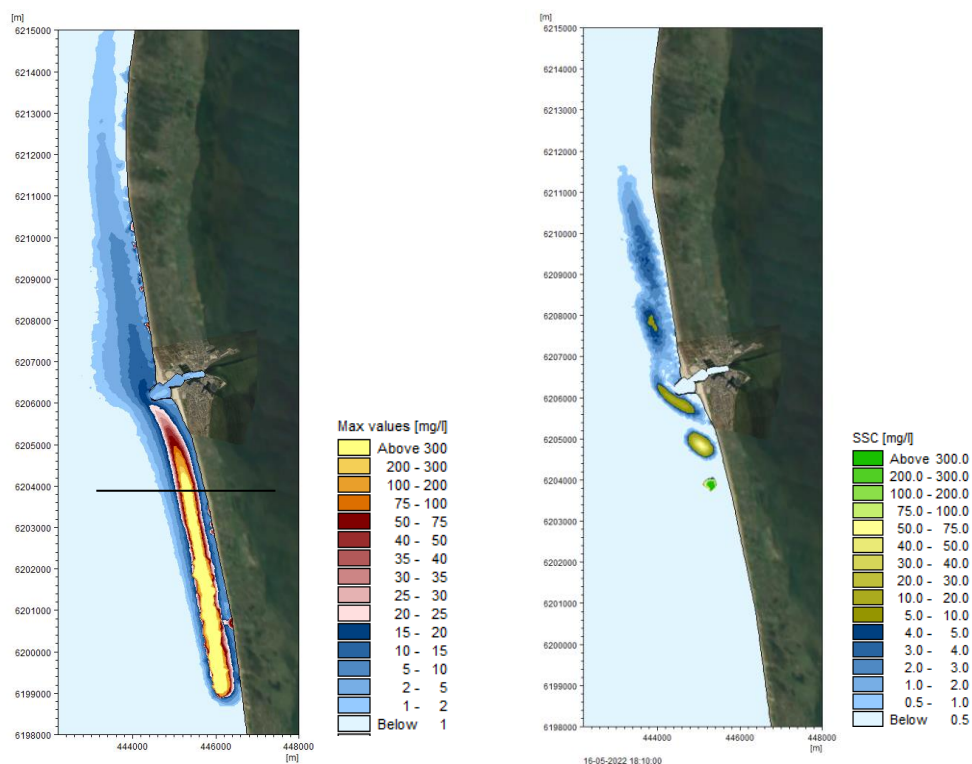
Figur 2-35. Øjeblikksbillede af SSC i snit i dybden som markeret på figur 2-31 for scenariet, hvor fodringen gennemføres ved klapning/split ved Hvide Sande og dominerende nordgående strøm.

Figur 2-36 viser hhv. aflejringstykkelsen for den fine sedimentfraktion og varighed for overskridelse af dybdemidlet SSC på 15 mg/l for scenariet med kystnær fodring via rainbowing og konstant nordgående strøm. Som det fremgår af figuren, vil spredningen af de fineste sedimentfraktioner ikke medføre, at der forekommer aflejringstykkelser større end 0,5 cm udenfor selve fodringsområdet. Bemærk at plottet alene viser aflejringstykkelsen for de modellerede fine sedimentfraktioner, og dermed ikke for hele den kystnære sandfodring, hvor det er vurderet at fodringsmængden medfører en lagtykkelse på minimum 1,5 m ved klapning/split (jf. Projektbeskrivelsen). I en afstand på 3 km fra fodringslokaliteten vil den kystnære fodring overskride et SSC-niveau på 15 mg/l i en periode på op til ca. 12 timer ud af den samlede fodringsperiode på ca. 20 døgn (svarende til ca. 3-4 % af fodringsperioden). Overskridelsen af 15 mg/l i ca. 12 timer vil ikke være i en kontinuert periode, grundet den store tidslige dynamik, hvilket blandt andet fremgår af figur 2-32 og figur 2-33.



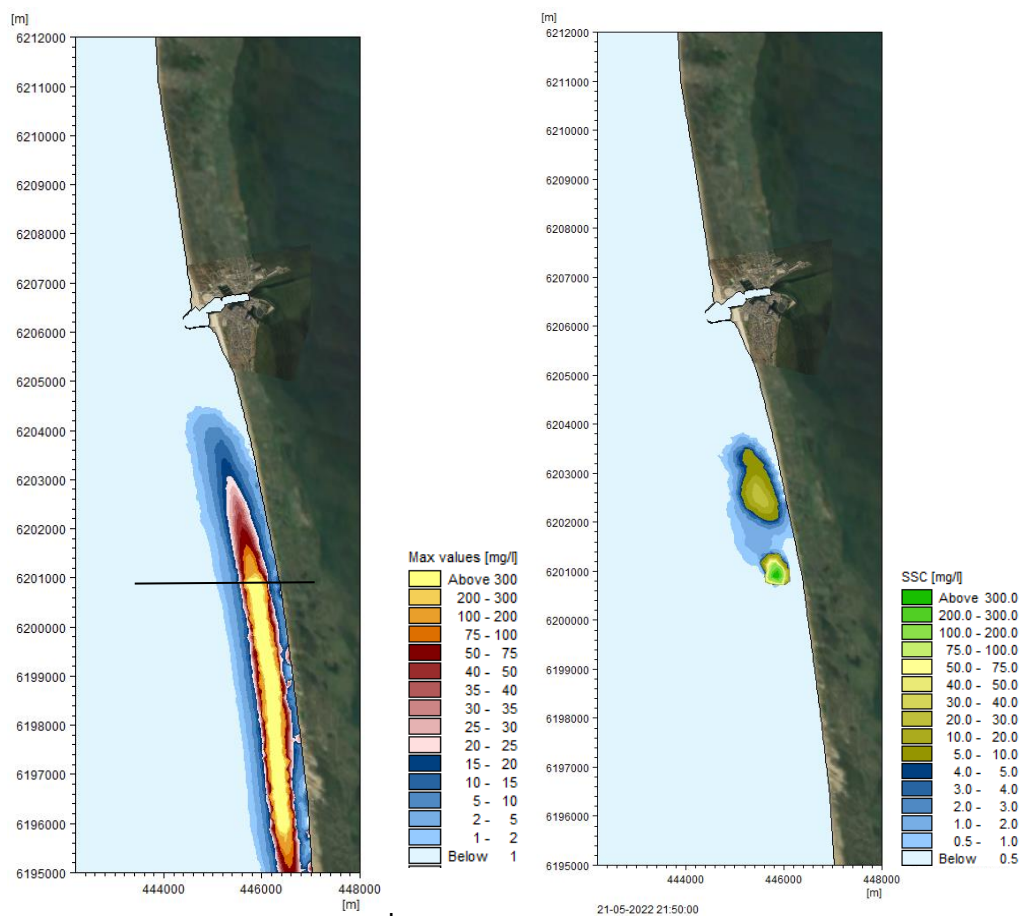
Figur 2-36. Aflejringsstykkelse af den fine sedimentfraktion (venstre) og varighed for overskridelse af SSC på 15 mg/l (højre) for scenariet med kystnær fodring i en minimumafstand på ca. 6 km til Hvide Sande Havn ved rainbowing og dominerende nordgående strøm. Baggrundskort fra (Google Earth, 2023).

For fodring i en afstand på minimum ca. 3 km fra Hvide Sande Havn (dvs. ca. 3 km nærmere havnen end tidligere præsenterede resultater) er hhv. statistisk maksimal dybdemidlet SSC og et øjeblicsbillede af sedimentfanerne vist på figur 2-37. Heraf fremgår det, at tendensen er den samme ift. påvirkningsniveauet relativt til fodringsstrækningen, idet der kan forventes en påvirkning på $SSC > 2 \text{ mg/l}$ i en afstand på op til ca. 10 km fra fodringslokaliteten og $SSC > 30 \text{ mg/l}$ op til ca. 4 km fra fodringslokaliteten.



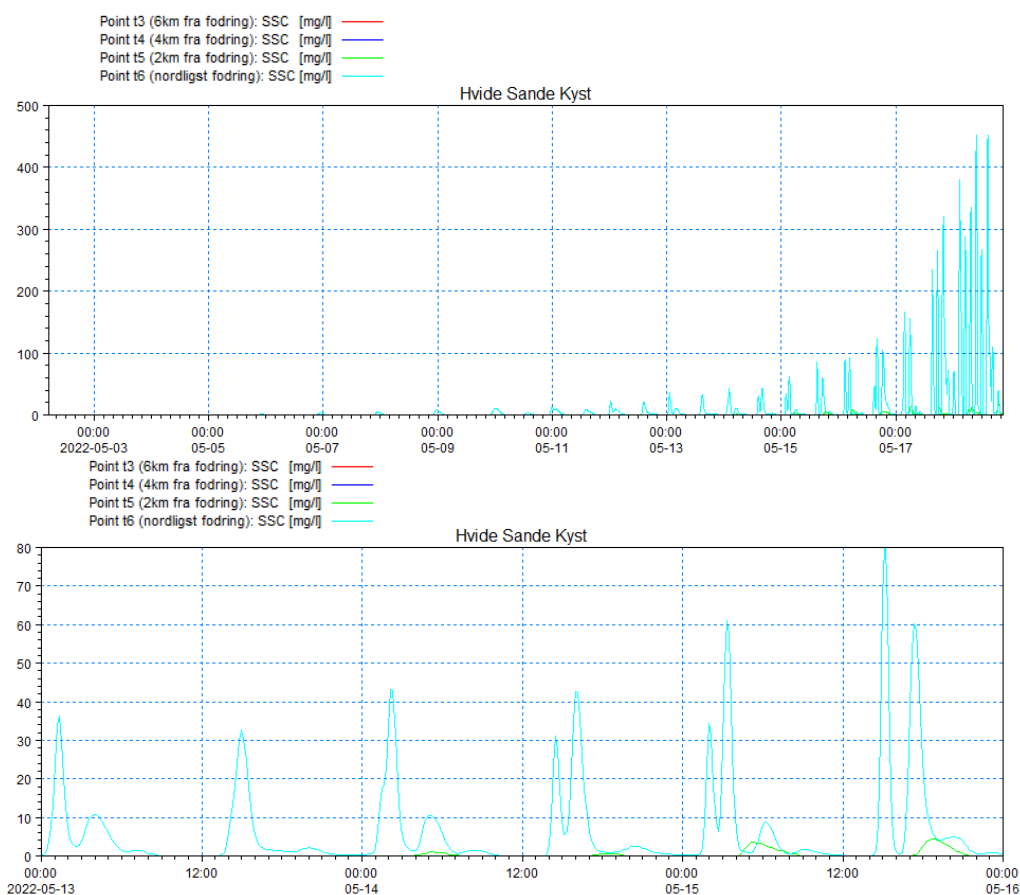
Figur 2-37. Statistisk maksimal dybdeindelt SSC (venstre) og øjebliksplot (højre) ved kystnær fodring ved Hvide Sande for et scenarie, hvor den kystnære fodring gennemføres ved klappning/splitning med en minimum-afstand til Hvide Sande havn på ca. 3 km. Omtrentlig nordligst fodringsposition er markeret med den sorte vandrette streg. Scenariet er for dominerende nordgående strøm. Baggrundsfotos er fra (Google Earth, 2023).

For kystnær fodring ved Hvide Sande i en minimumsafstand på ca. 6 km til Hvide Sande Havn er der ligeledes gennemført modelberegninger for scenariet med fodring ved rainbowing i en periode domineret af tidevandsforhold (stille-scenariet), se plot af statistisk maks. SSC og øjebliksplot af SSC på figur 2-38. Heraf fremgår det, at sedimentfanen bevæges hhv. nord og syd for fodringsstrækningen, med en udbredelse af SSC > 1 mg/l) indtil ca. 4 km fra fodringspositionen.



Figur 2-38. Statistisk maksimal dybdemidlet SSC (venstre) samt øjebliksplot af dybdemidlet SSC (højre) ved kystnær fodring på strækningen ved Hvide Sande i en afstand på minimum ca. 6 km til Hvide Sande Havn for et scenarie, hvor den kystnære fodring gennemføres ved rainbowing i en periode med tidevandsdominerende strøm. Den omtrentlige nordligste fodringsposition er markeret med en vandret sort streg. Baggrundfotos er fra (Google Earth, 2023).

Udtræk af tidsserie af SSC-niveauet langs kysten i figur 2-39 viser ligeledes, at i en afstand på op til ca. 2 km fra fodringspositionen (t5 og t6) opleves en påvirkning af SSC-niveauet, som følge af kystnær fodring, mens der i en større afstand ikke forekommer en signifikant påvirkning. Positionerne er vist på figur 2-32.

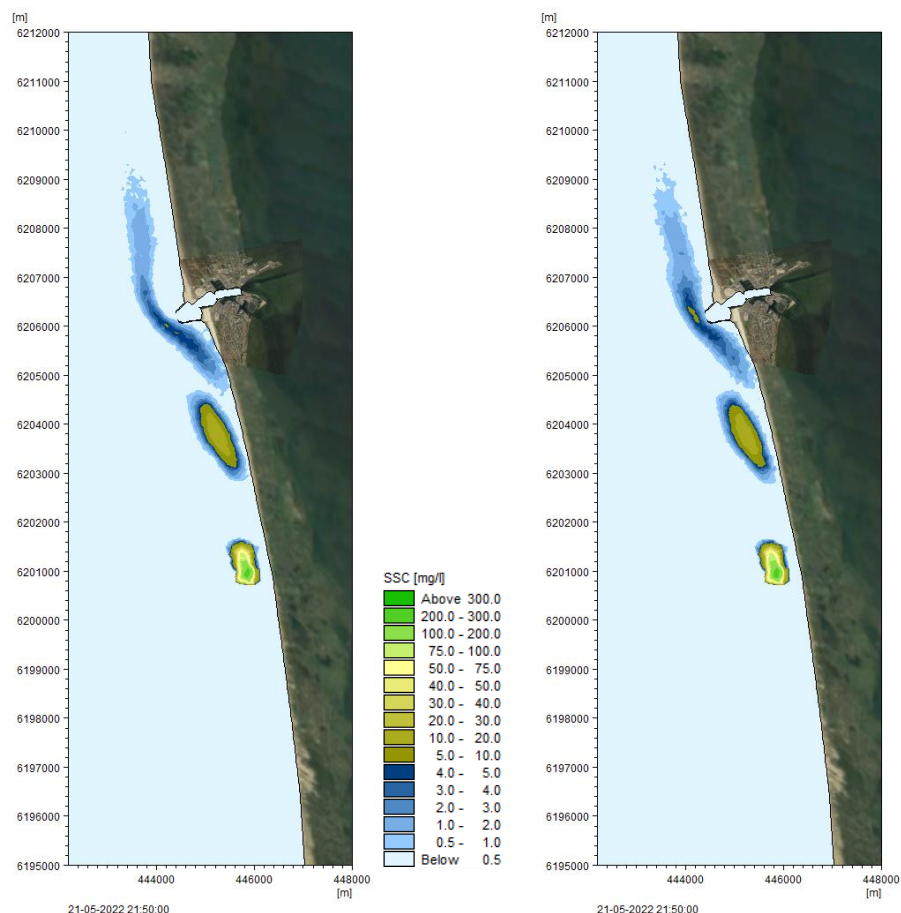


Figur 2-39. Tidsserie, der viser det dybdemidlede SSC-niveau i fire punkter langs kysten for perioden med sandfodring (øverst) og uddrag af tidserien (nederst). Scenariet er for fodring via rainbowing og stille scenarie.

Ved en sammenligning af tidsserieudtrækkene for hhv. dominerende nordgående strøm og stille scenariet (figur 2-32 og figur 2-39) fremgår det, at der ved stillesscenariet er færre SSC-peaks, hvilket skyldes at strømmen i ca. halvdelen af tiden er sydgående, hvormed sedimentfanen ikke bevæges op mod udtrækspunkterne.

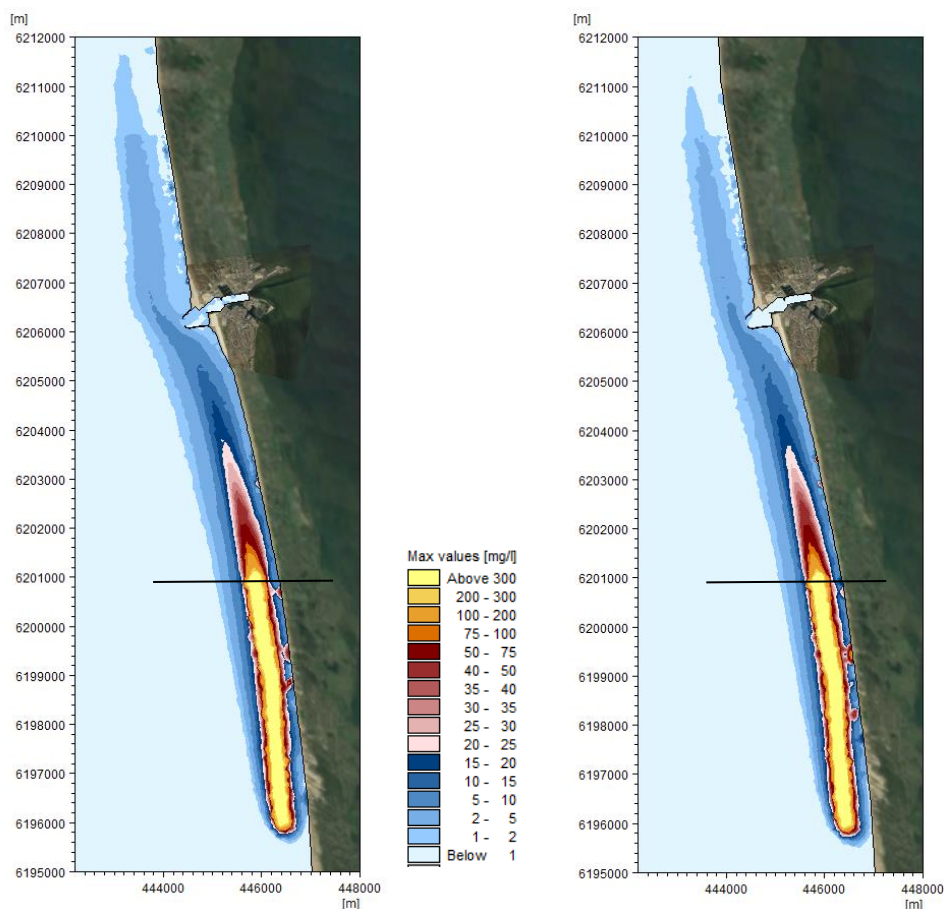
Der vises ikke resultater for modelberegninger af stillesscenariet ved hhv. Thorsminde og Thyborøn, da SSC-påvirkningsniveauet udenfor selve fodringsstrækningen er lavere for dette scenarie sammenlignet med scenariet med dominerende nordgående strøm.

Som nævnt tidligere påvirker driften af slusen i Hvide Sande Havn i perioder strømfeltet, hvilket ses af et øjebliksbillede af sedimentfanen ud for Hvide Sande Havn for scenariet med nordgående strøm og hhv. åben og lukket sluse på figur 2-40. Heraf fremgår det, at sedimentfanen skubbes længere ud, når slusen er åben og der forekommer en udadgående strøm.



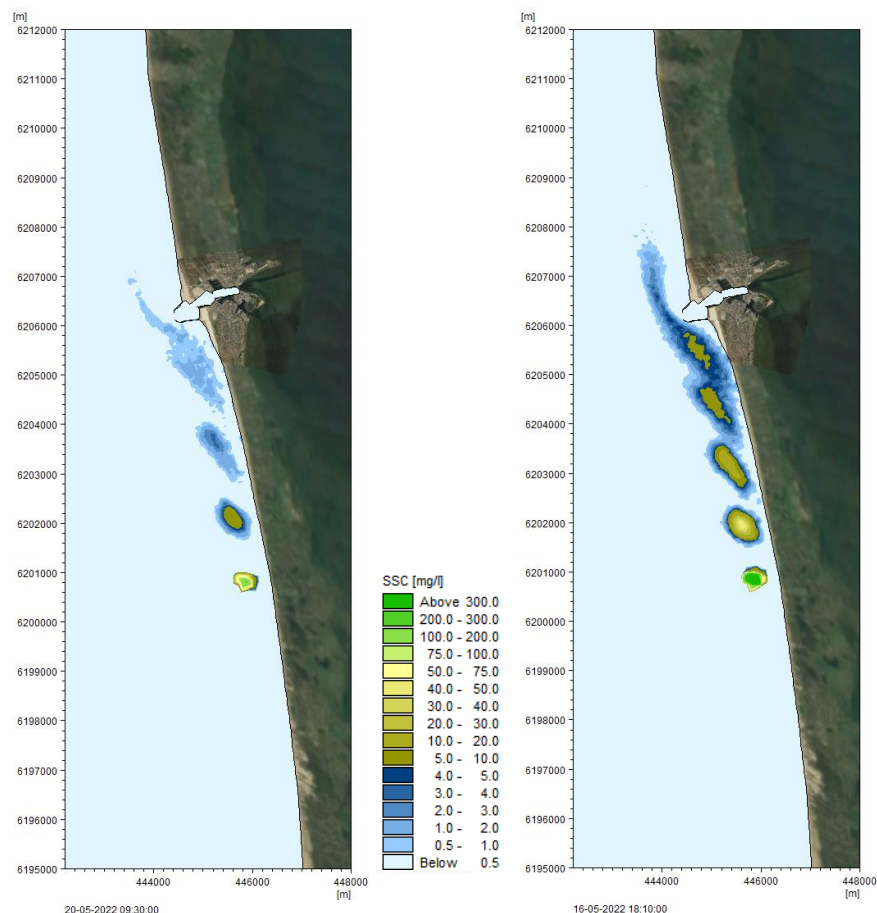
Figur 2-40. Øjebliksplot af dybdemidlet SSC-niveau for scenariet med kystnær fodring ved rainbowing og dominerende nordgående strøm, når slusen er åben (venstre) og lukket (højre). Baggrundskort er fra (Google Earth, 2023).

I perioder med åben sluse og indadgående strøm kan der forekomme en mindre påvirkning af SSC-niveauet inde i havnen (op til ca. 2 mg/l), hvilket fremgår af de statistiske maks. plot i figur 2-41 for modelberegninger med hhv. åben og lukket sluse. Dette blev analyseret og dokumenteret yderligere i forbindelse med gennemførelse af måleprogrammet i 2022 (Rambøll, 2023b), hvor målingerne viste, at SSC-niveauet inde i havnen ikke blev påvirket signifikant af sedimentfærner udenfor havnemundingen. Dette blev desuden understøttet af modelberegningerne af forsøgskampagnerne.



Figur 2-41. Statistiske plot af dybdemidlet maksimal SSC-niveau opnået under kystnær fodring ved rainbowing for scenariet med dominerende nordgående strøm for en periodevis åben sluse i Hvide Sande Havn (venstre) og en lukket sluse (højre). Begge scenarier for fodring i en afstand på minimum ca. 6 km til Hvide Sande Havn. Baggrundskort fra (Google Earth, 2023).

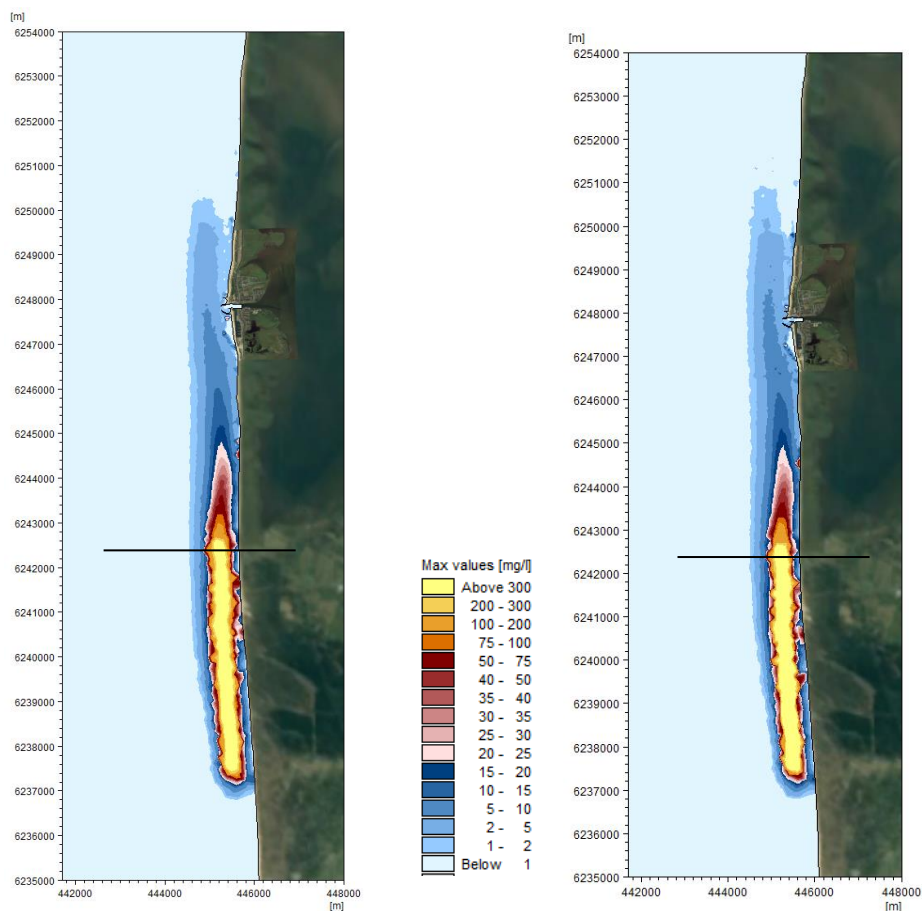
De præsenterede resultater har alle været for en intensiv gennemførelse af en sandfodringskampagne jf. tabel 2-7, dvs. mange store fartøjer, indenfor rammerne defineret i tabel 2-2. Som reference er der lavet modelberegninger for et scenarie, hvor den kystnære sandfodring gennemføres med få små fartøjer, der klapper/splitter materialet. For at sikre at rammen på gennemførelsen af en kampagne ikke overstiger 70 døgn er modelberegningerne gennemført for et scenarie med tre samtidigt arbejdende sandsugere, der hver har en laststørrelse på 2.000 m³. Et øjebliksplot af SSC-påvirkningen for klapping/split med tre små fartøjer er vist sammen med et tilsvarende plot af SSC-påvirkningen, når fodringsmaterialet klappes med fire mellem sandsugere (der hver har en laststørrelse på 4.000 m³) i figur 2-42. Heraf fremgår det, at påvirkningen af SSC-niveauet er signifikant lavere ved sandfodring med færre små sandsugere, og der vil derfor ikke blive vist flere resultater for mindre intensive fodringer.



Figur 2-42. Øjebliksplot, der viser det dybdeindledte SSC-niveau, som følge af kystnær fodring ved klapping med tre små sandsugere (venstre) og fire mellem sandsugere (højre) for scenariet med dominerende nordgående strøm. Baggrundsfotos er fra (Google Earth, 2023).

Resultater for kystnær sandfodring på strækningen ved Thorsminde

For sandfodring på strækningen ved Thorsminde er der i figur 2-43 vist statistiske resultater af maks. SSC-påvirkning, som følge af gennemførelsen af en kampagne ved hhv. rainbowing og klapping/split med en fodringsafstand til Thorsminde Havn på minimum ca. 6 km.

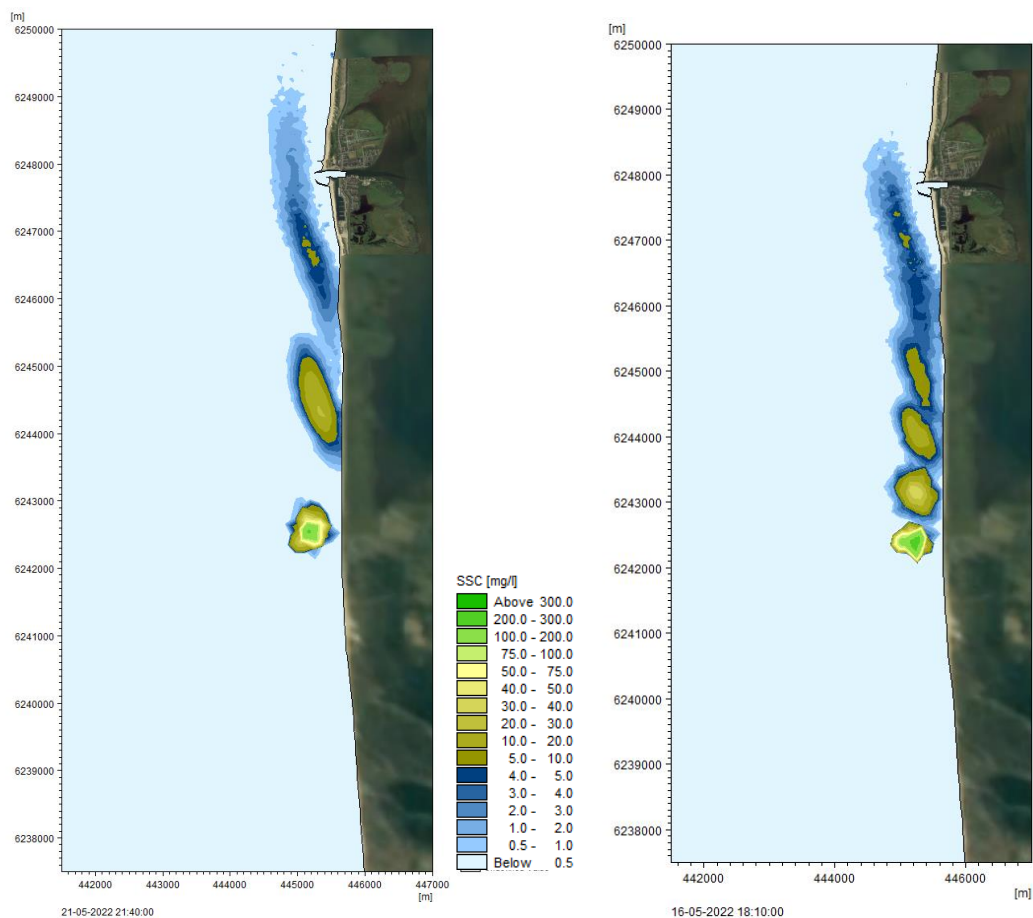


Figur 2-43.

Statistisk maksimal dybdemidlet SSC ved kystnær fodring ved Thorsminde for et scenarie, hvor den kystnære fodring gennemføres ved rainbowing (venstre) og klapning/split (højre) med en minimumsafstand til Thorsminde Havn på ca. 6 km. Omtrentlig nordligst position for fodring er markeret med den sorte vandrette streg. Scenariet er for dominerende nordgående strøm. Baggrundskort er fra (Google Earth, 2023).

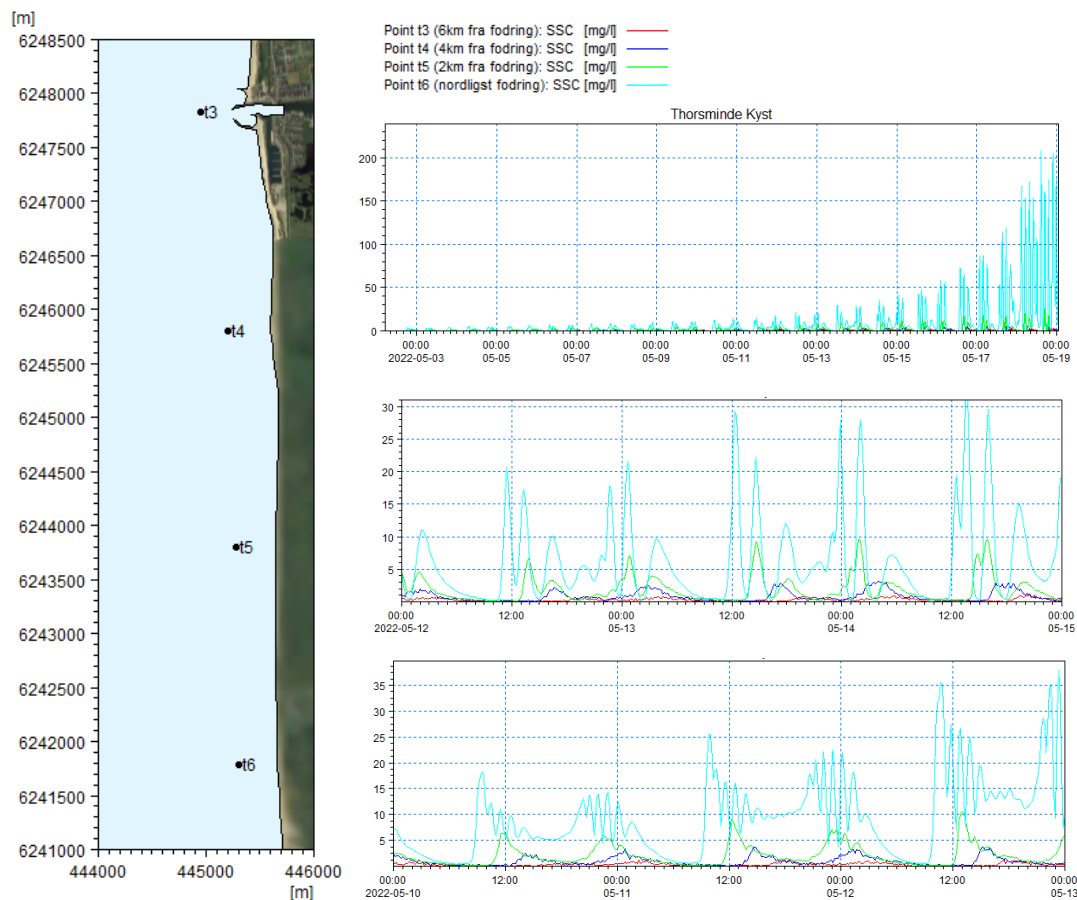
Som det var gældende for sandfodring på strækningen ved Hvide Sande ses det, at det statistiske maks. SSC-niveau ikke påvirkes signifikant af, hvorvidt sandfodringen gennemføres ved klapning/split eller rainbowing under de givne forudsætninger for modelberegningerne og -scenariet. Området hvor $SSC > 2$ mg/l strækker sig op til ca. 7 km fra fodringspositionen, mens påvirkninger på $SSC > 30$ mg/l forekommer indtil ca. 2 km fra fodringslokaliteten. Fodringsstrækningen er ca. 5 km, hvilket omtrentlig svarer til strækningen, hvor SSC overstiger 300 mg/l. Sammenlignes med de tilsvarende resultater for strækningen ved Hvide Sande (jf. figur 2-29) fremgår det, at påvirkningerne er på samme niveau, mens udbredelsesområdet er reduceret ved Thorsminde, hvilket skyldes, at den dominerende nordgående strøm har lavere hastighed på denne strækning sammenlignet med ved Hvide Sande. Som tidligere nævnt skal det erindres, at statistiske maks. SSC ikke viser en samtidig forekommende sedimentfane og dækker over både tidlige og dybdemæssige variationer.

De tidlige variationer ved fodringer ved Thorsminde er vist ved hhv. øjebliksplots og tidsserie plots på figur 2-44 og figur 2-45. Heraf fremgår det, at der genereres en separat sedimentfane for hver lastetømning, og som afstanden til fodringspositionen øges, reduceres koncentrationsniveauet signifikant, samtidig med at sedimentfanerne får en udstrækning, så de når sammen.



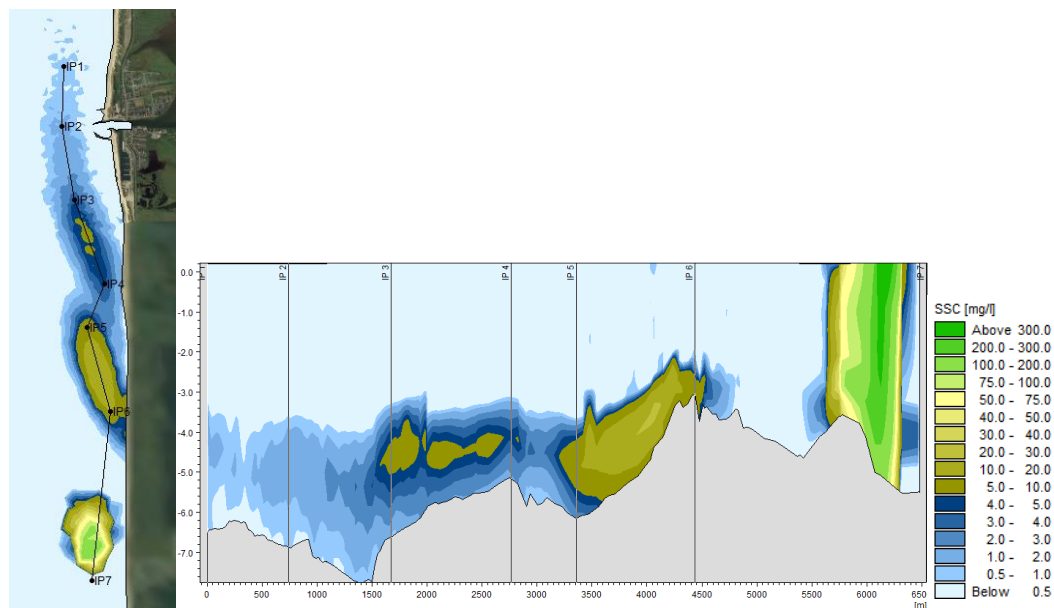
Figur 2-44. Øjebliksplot, der viser det dybdemidlede SSC-niveau under fodring for scenariet med rainboring (venstre) og klapning/split (højre). Scenariet er for dominerende nordgående strøm. Baggrundkort er fra (Google Earth, 2023).

Tidsserier af SSC i fire punkter langs kysten er vist i figur 2-45. Den tidlige dynamik viser, at der nærmest fodringspositionen periodisk forekommer en høj SSC-påvirkning afløst af perioder uden påvirkning, mens sandsugerne er ude for at indvinde sand. Dynamikken er nogenlunde ens ved hhv. klapning/split og rainboring. Forskellen er dog, at der er flere smallere peaks ved klapning/split, da der er antaget flere samtidigt arbejdende sandsugere og tiden for tømning af lasten er kort.



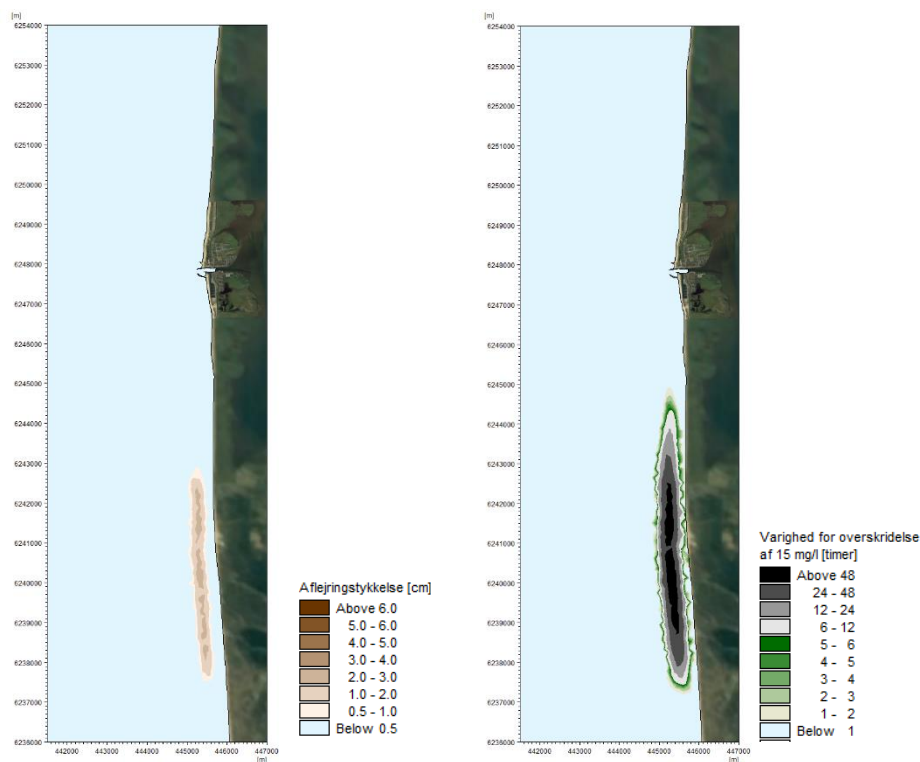
Figur 2-45. Tidsserie af SSC-påvirkningen i fire punkter langs kysten ved Thorsminde for fodring via rainboring (øverst og midt) og klapning/split (nederst) under dominerende nordgående strøm.

Dybdevariationen er illustreret i figur 2-46, hvor frigivelsen af sedimenter i toppen af vandsøjlen under rainboring ses af det forholdsvis høje SSC-niveau i hele vandsøjlen nær fodringsområdet (den gul/grønne søjle i højre side af figur 2-46). Af dybdevariationen fremgår desuden, at der nærmest fodringspositionen genereres en separat (smal) sedimentfane pr. lastetømning, mens sedimenterne spredes mere ved større afstand til frigivelsen, hvormed sedimentfanerne i perioder kan nå sammen. Sedimentfaner, der har en afstand på mere end ca. 2 km til fodringspositionen, er primært i den nedre del af vandsøjlen, og de øverste ca. 2-2,5 m er således upåvirkede af fodringsaktiviteterne. Dermed kan konkluderes, at tendensen er den samme som ved Hvide Sande og som erfaret ifm. måleprogrammet.



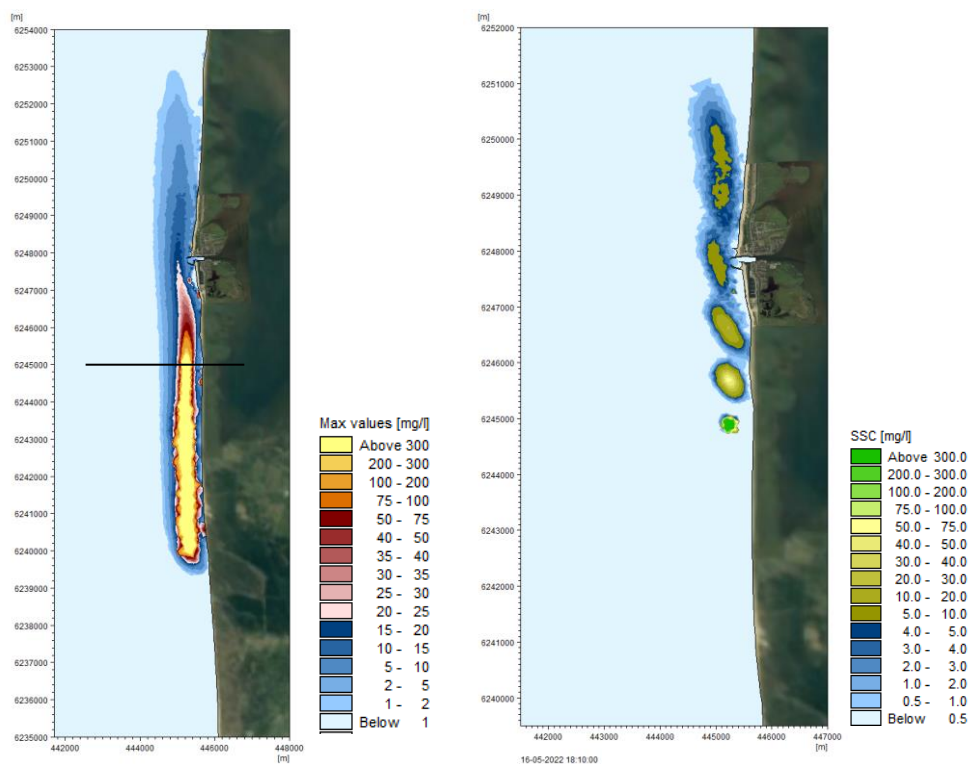
Figur 2-46. Øjeblikksbillede af SSC dybdemidlet (venstre) og vertikalt i dybden (højre) for scenariet, hvor fodringen gennemføres ved rainbowing ved Thorsminde under dominerende nordgående strøm. Baggrundsfotos er fra (Google Earth, 2023).

Aflejringstykkelser for den fine sedimentfraktion og varighed for overskridelse af dybdemidlet SSC på 15 mg/l er vist for scenariet med kystnær fodring via rainbowing og konstant nordgående strøm i figur 2-47. Som det var tilfældet ved Hvide Sande, vil spredningen af sedimenter udenfor fodringsområdet ikke medføre aflejringstykkelser der overstiger ca. 0,5 cm. Bemærk, at plottene alene viser sedimentationen for den modellerede fine fraktion af fodringsmaterialet og dermed ikke den samlede effekt af sandfodringen på selve fodringslokaliteten. I en afstand på ca. 3 km fra fodringslokaliteten vil den kystnære fodring overskride 15 mg/l i op til ca. 12 timer, svarende til ca. 3-4% af fodringsperioden.



Figur 2-47. Aflejringstykkelser af den fine sedimentfraktion (venstre) og varighed for overskridelse af SSC på 15 mg/l (højre) for scenariet med kystnær fodring ved rainbowing og dominerende nordgående strøm. Baggrundsfotos fra (Google Earth, 2023).

For fodring i en afstand på ca. 3-8 km fra Thorsminde Havn er hhv. statistisk maksimal dybde-midlet SSC og et øjebliksbillede af sedimentfanerne vist på figur 2-48. Heraf fremgår det, at tendensen er den samme ift. påvirkningsniveauet relativt til fodringspositionen, dvs. maksimale SSC-niveauer > 30 mg/l i en afstand på op til ca. 2 km fra fodringsstrækningen og SSC-niveauer > 2 mg/l i op til ca. 7 km fra fodringen. Øjeblikspottet viser, at der også ved denne fodringsposition genereres en separat sedimentfane for hver lastetømning, og med øget afstand til fodringspositionen reduceres koncentrationsniveauet, samtidig med at sedimentfanerne får en udstrækning, så de når sammen.

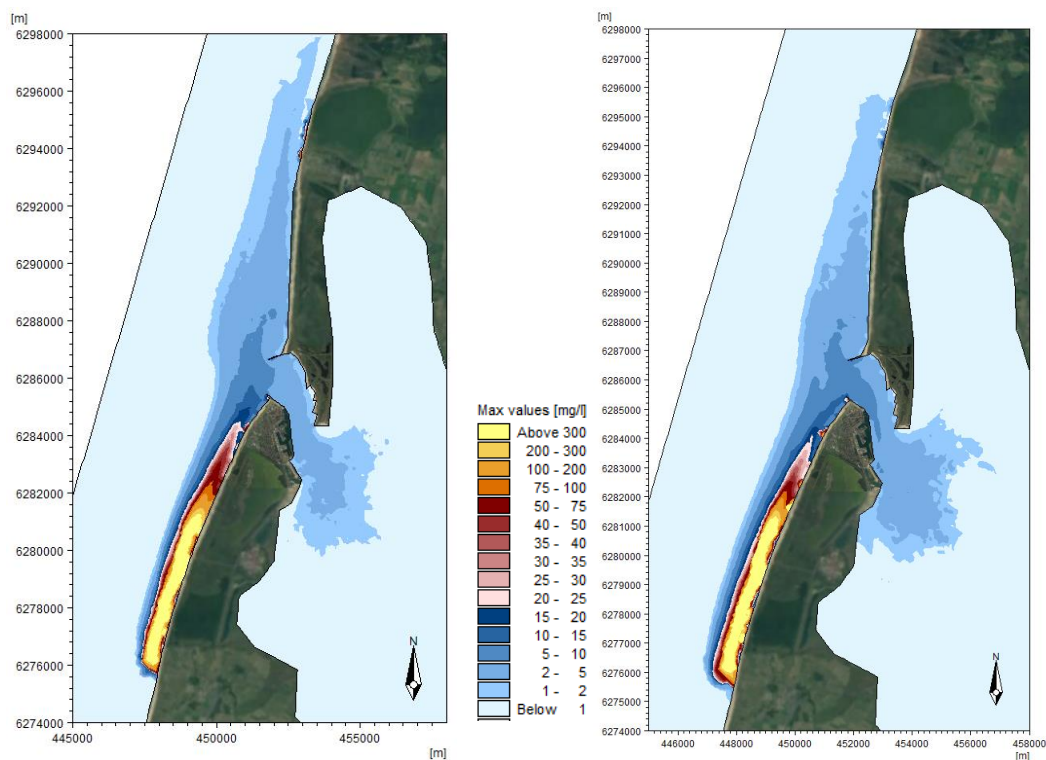


Figur 2-48. Statistisk maksimal dybdemidtet SSC (venstre) og øjebliksplot (højre) ved kystnær fodring ved Thorsminde for et scenarie, hvor den kystnære fodring gennemføres ved klapning/split med en minimumsafstand til Thorsminde havn på ca. 3 km. Den omtrentlige nordligste position for fodring er markeret med en sort streg på det statistiske plot. Scenariet er for dominerende nordgående strøm. Baggrundsfotos er fra (Google Earth, 2023).

Resultater for kystnær sandfodring på strækningen ved Thyborøn

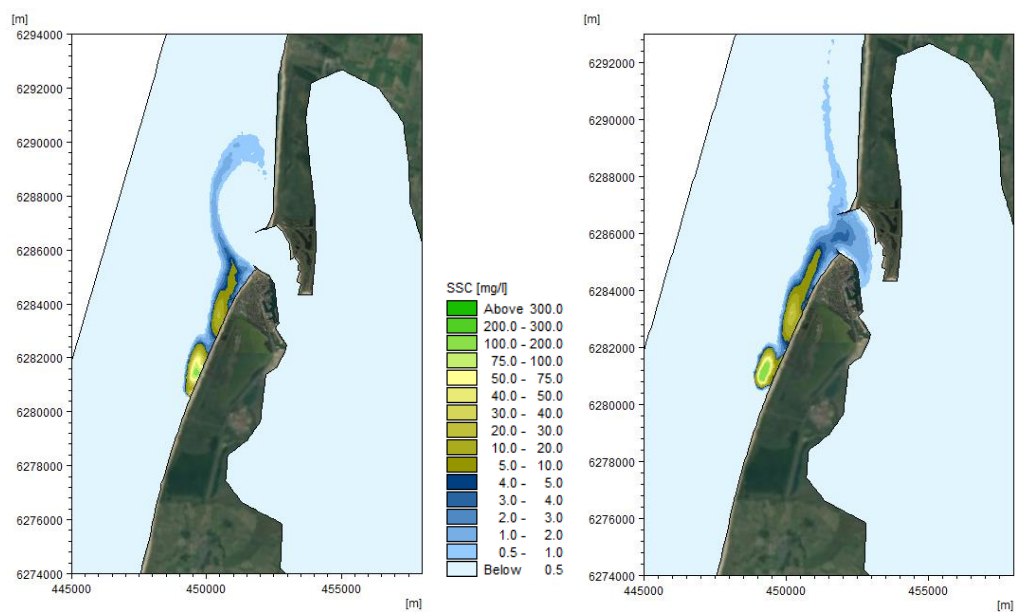
På strækningen ved Thyborøn fodres med sand, der forventelig har et større indhold af de fine fraktioner (i modelberegningerne 6%) sammenlignet med foderne på strækningerne ved Hvide Sande og Thorsminde (2%), jf. tabel 2-6.

I figur 2-49 er vist statistisk maksimal dybdemidtet SSC i foderperioden under hhv. rainbowing og klapning/split med en minimumsafstand til Thyborøn Kanal på ca. 6 km. Heraf fremgår det, at sedimentfanen, hvor SSC-niveauet påvirkes med mere end 2 mg/l, strækker sig ca. 15 km udenfor foderingsområdet langs vestkysten og breder sig ind i Thyborøn Kanal, hvor påvirkningen af SSC-niveauet er op til 5 mg/l. SSC > 30 mg/l strækker sig ca. 4 km udenfor foderingsområdet.



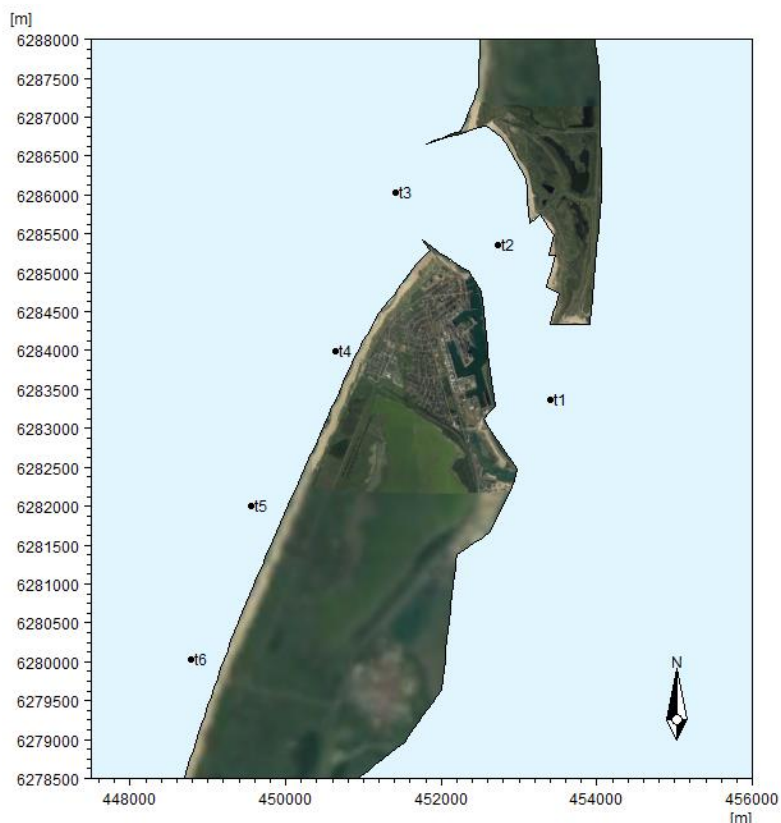
Figur 2-49. Statistisk maksimal dybdemidlet SSC ved kystnær fodring ved Thyborøn for et scenarie, hvor den kystnære fodring gennemføres ved rainbowing (venstre) og klapning/split (højre). Scenariet er for dominerende nordgående strøm. Baggrundsfotos er fra (Google Earth, 2023).

Den statistiske maksimale SSC-påvirkning i figur 2-49 dækker over store tidlige variationer og viser således ikke en samtidig forekommende sedimentfane. Øjeblikplots, der viser den tidlige dynamik samt Thyborøn Kanals ind- og udstrømningspåvirkning af sedimentfanen, er vist for scenariet, hvor den kystnære fodring gennemføres ved rainbowing under forhold med konstant nordgående strøm på figur 2-50.

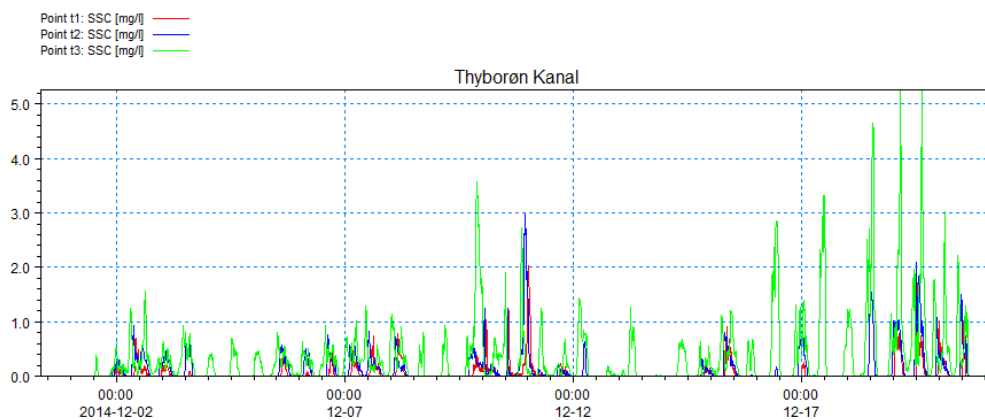


Figur 2-50. Øjebliksplot, der viser sedimentfaner under den kystnære fodring for scenariet med fodring via rainbowing. Scenariet er for dominerende nordgående strøm og udstrømning fra Thyborøn Kanal (venstre) og indstrømning (højre). Baggrundsfotos er fra (Google Earth, 2023).

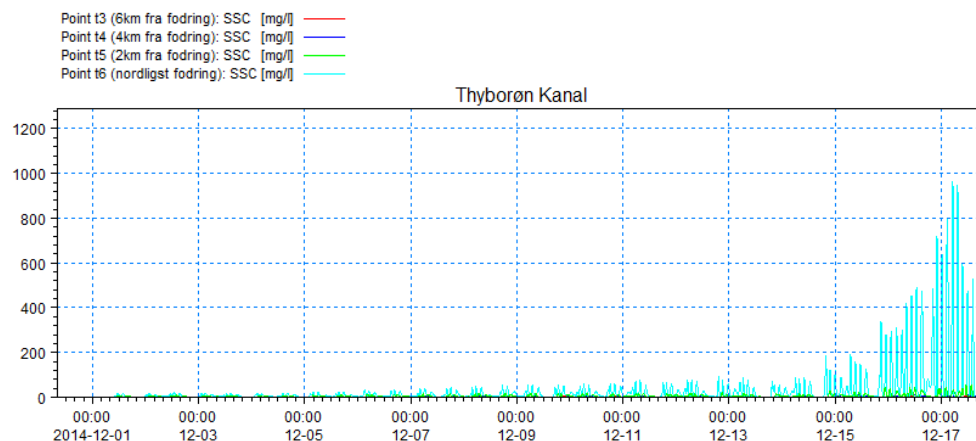
Tidsserier af den dybdemidlede SSC-påvirkning ind gennem Thyborøn Kanal og langs kysten er vist i figur 2-51 – figur 2-53, for hhv. positioner og tidsserier. Heraf fremgår det, at påvirkningen ind igennem Thyborøn Kanal naturligt aftager med afstanden til kysten (figur 2-52). Desuden fremgår det, at der er store tidsmæssige variationer som følge af dynamikken i både fodringsprocessen med vekslende tømning af lasten og indvinding af sand samt ud- og indstrømning i kanalen. Udstrømning fra kanalen tilfører ikke nye sedimentfaner ind i kanalen, men kan bevæge allerede indkommet sediment ud mod kysten igen. Dynamikken på kysten (jf. figur 2-53) er meget som set ved både Thorsminde og Hvide Sande, med den største påvirkning nærmest fodringsstrækningen og derefter aftagende.



Figur 2-51. Positioner for udtræk af tidsserier af SSC-påvirkningen ind gennem Thyborøn Kanal og langs kysten. Baggrund fra (Google Earth, 2023).

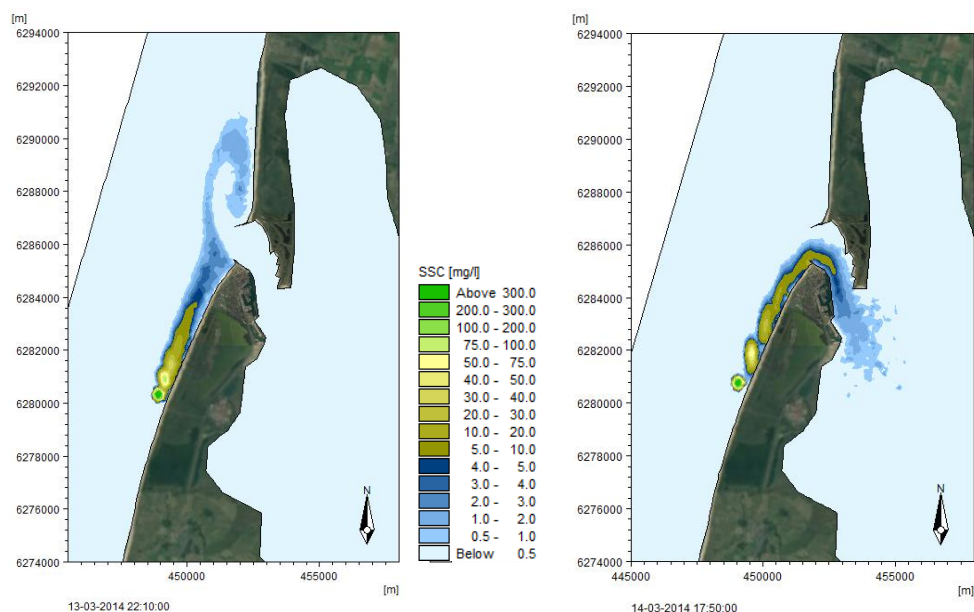


Figur 2-52. Tidsserie, der viser dybdemidlet SSC i tre punkter i Thyborøn Kanal, som følge af kystnær fodring. Scenariet er for fodring via rainbowing og dominerende nordgående strøm.

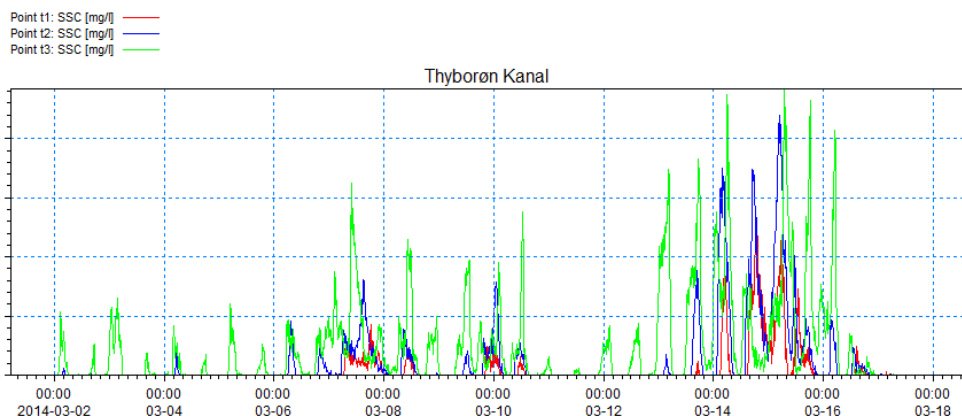


Figur 2-53. Tidsserie, der viser dybdemidlet SSC i fire punkter langs kysten, som følge af kystnær fodring. Scenariet er for fodring via rainbowing og dominerende nordgående strøm.

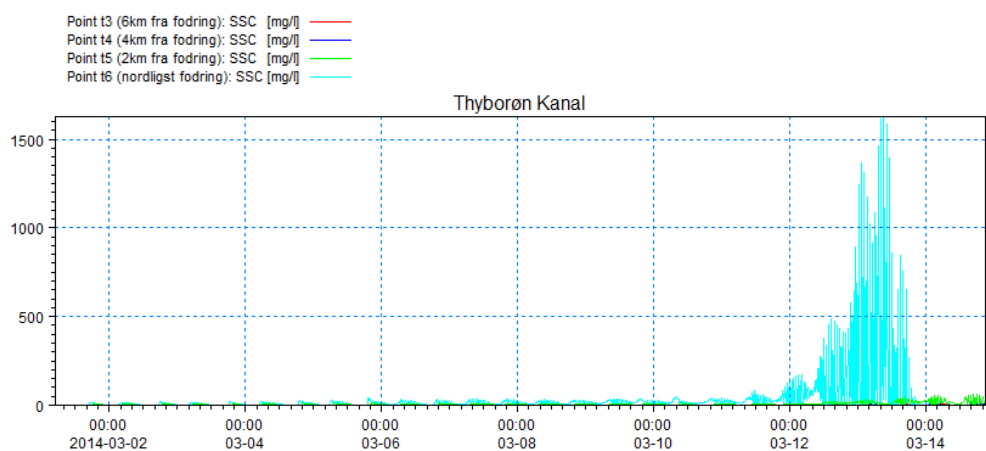
Tilsvarende tidlig variation forekommer, hvis den kystnære fodring gennemføres ved klappning/split, se øjebliksplots med hhv. ind- og udstrømning i Thyborøn Kanal i figur 2-54 og tidsserier gennem Thybørn Kanal og langs kysten i figur 2-55 – figur 2-56.



Figur 2-54. Øjebliksplot, der viser sedimentfaner til et specifikt tidspunkt under fodringen for scenariet med fodring via klappning/split. Scenariet er for dominerende nordgående strøm og udstrømning fra Thyborøn Kanal (venstre) og indstrømning (højre). Baggrundsfotos er fra (Google Earth, 2023).

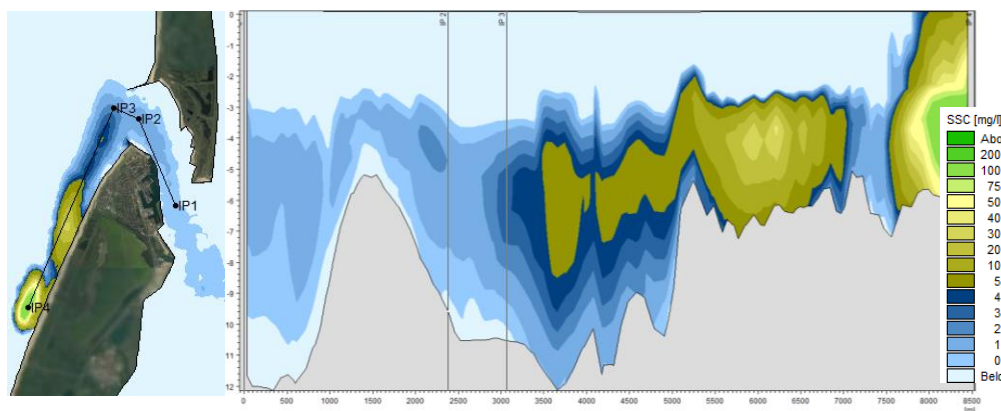


Figur 2-55. Tidsserie, der viser dybdemidlet SSC i tre punkter i Thyborøn Kanal, som følge af kystnær fodring. Scenariet er for fodring via klapping/split og dominerende nordgående strøm.



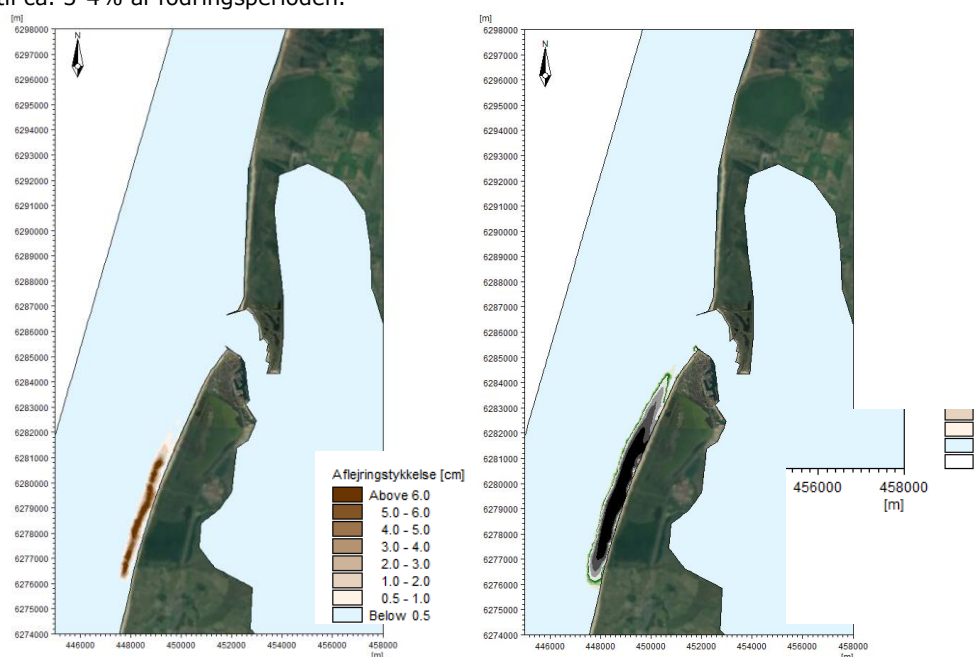
Figur 2-56. Tidsserie, der viser dybdemidlet SSC i fire punkter langs kysten, som følge af kystnær fodring. Scenariet er for fodring via klapping/split og dominerende nordgående strøm.

Dybdevariationen gennem vandsøjlen er vist for scenariet med nordgående strøm og fodring via rainbowing på figur 2-57. Heraf fremgår det, ligesom det var gældende for fodring omkring Hvide Sande og Thorsminde, at der hurtigt sker en transport af sedimenterne ned gennem vandsøjlen, hvormed den øverste del af vandsøjlen ikke er påvirket signifikant af den gennemførte kystnære fodring.



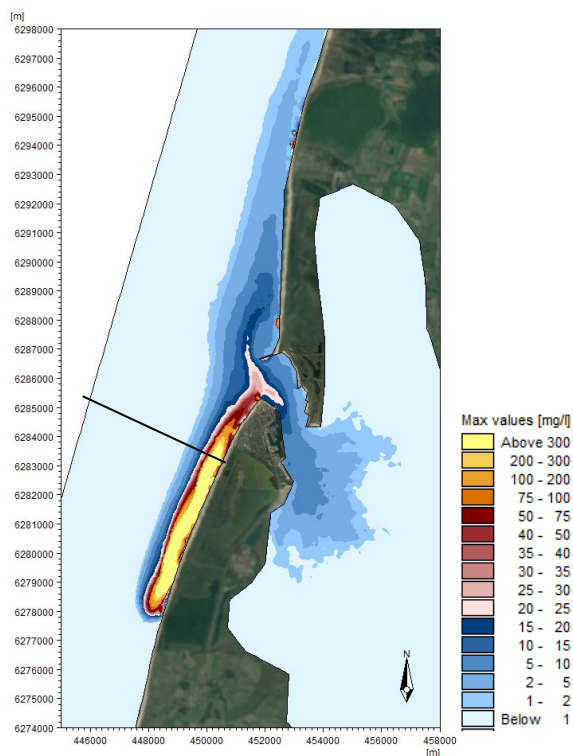
Figur 2-57. Øjeblikksbillede af dybdemidlet SSC (venstre) og SSC vertikalt i dybden (højre) for scenariet, hvor fodringen gennemføres ved rainbowing ved Thyborøn under dominerende nordgående strøm. Baggrundsfotos er fra (Google Earth, 2023).

Aflejringstykkelser for den fine sedimentfraktion og varighed for overskridelse af 15 mg/l er vist for scenariet med kystnær fodring via rainbowing og konstant nordgående strøm i figur 2-58. Som det var tilfældet ved Hvide Sande og Thorsminde vil spredningen af sedimenter udenfor fodringsområdet ikke medføre aflejringstykkelser der overstiger ca. 0,5 cm. Bemærk at plottene alene viser aflejringstykkelser for den modellerede fine fraktion af fodringsmaterialet og dermed ikke den samlede effekt af sandfodringen på selve fodringslokaliteten. I en afstand på ca. 3 km fra fodringlokaliteten vil den kystnære fodring overskride 15 mg/l i op til ca. 12 timer, svarende til ca. 3-4% af fodringsperioden.

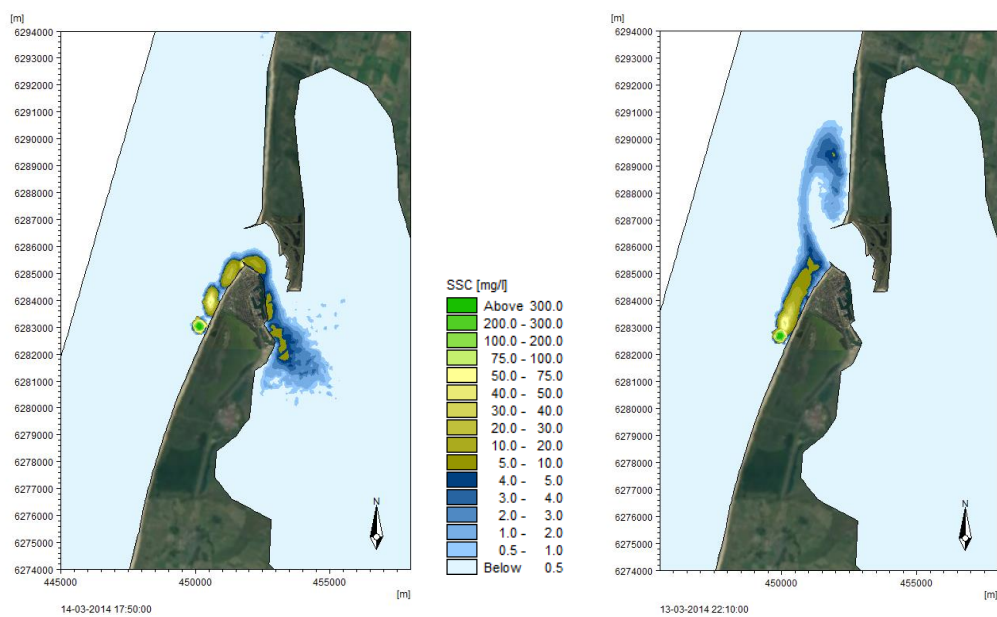


Figur 2-58. Aflejringstykkelser af den fine sedimentfraktion (venstre) og varighed for overskridelse af SSC på 15 mg/l (højre) for scenariet med kystnær fodring ved rainbowing og dominerende nordgående strøm. Baggrundsbillede fra (Google Earth, 2023).

For fodring i en minimumafstand på ca. 3 km til Thyborøn Kanal er hhv. statistisk maksimal SSC og øjebliksbillede af sedimentfanerne vist på Figur 2-59 og Figur 2-60. Heraf fremgår det, at tendensen er den samme ift. påvirkningsniveauet relativt til fodringsstrækningen, dvs. maksimale SSC-niveauer > 30 mg/l i en afstand på ca. 3-4 km fra fodringsstrækningen og SSC-niveauer > 2 mg/l i op til ca. 15 km fra fodringen. Påvirkningsniveauet ind i Thyborøn Kanal øges dog, når fodringerne gennemføres i kortere afstand hertil. Øjeblikspottet viser, at ved indadgående strøm trækkes sedimentfanen med ind i Thyborøn Kanal, hvor med SSC-niveauet øges ind gennem kanalen.



Figur 2-59. Statistisk maksimal dybdemidlet SSC ved kystnær fodring ved Thyborøn for et scenarie, hvor den kystnære fodring gennemføres ved klapning/split (venstre) med en minimumafstand til Thyborøn Kanal på ca. 3 km, markeret med den sorte streg. Scenariet er for dominerende nordgående strøm. Baggrundsphotos er fra (Google Earth, 2023).



Figur 2-60. Øjebliksplots af dybdemidlet SSC ved kystnær fodring ved Thyborøn Kanal for et scenarie, hvor den kystnære fodring gennemføres ved klapning/split med en minimumafstand til Thyborøn Kanal på ca. 3 km for hhv. ind- og udadgående strøm fra Thyborøn Kanal. Scenariet er for dominerende nordgående strøm. Baggrundsphotos er fra (Google Earth, 2023).

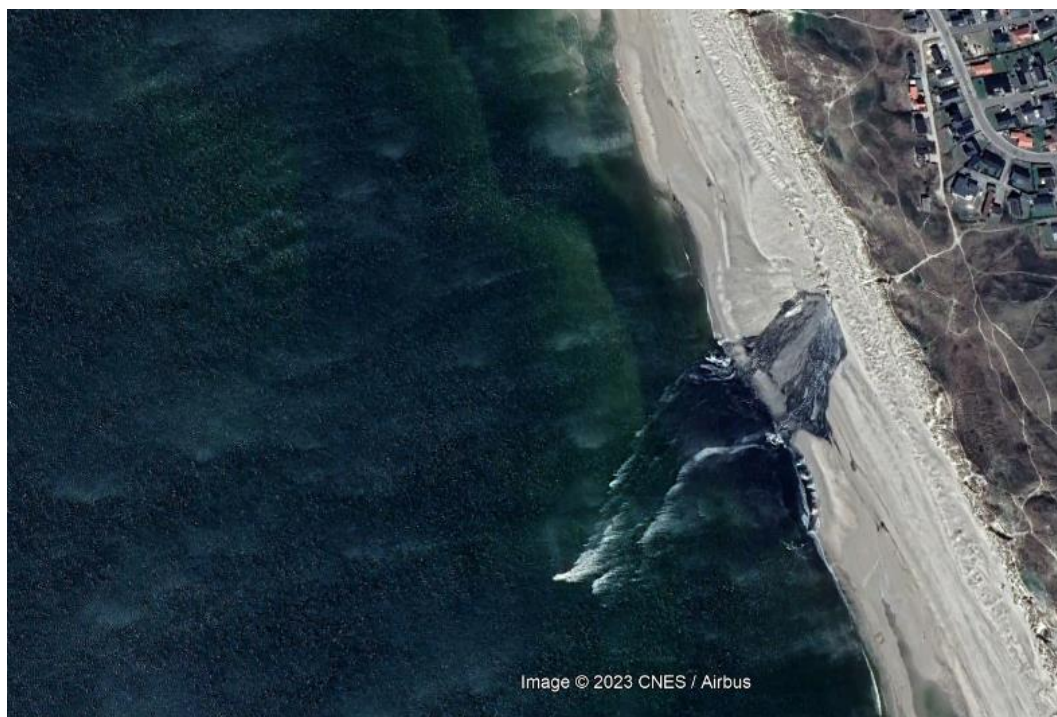
2.7

Ændring i koncentration af suspenderet sediment ved strandfodring

På strækningen Lodbjerg – Nymindegab gennemføres en betydelig del af sandfodringsaktiviteten (ca. 40%) ved strandfodring jf. afsnit 2.1. Strandfodring gennemføres ved, at sand pumpes fra

en sandsuger og ind på stranden. Under indpumpningen sker der en kraftig opblanding af sandet i lasten med vand, hvilket er nødvendigt for at sandet kan pumpes ind på stranden gennem en rørledning. Når sand-/vandblandingen forlader røret, falder hastigheden for opblandingen momentant, og vandet kan ikke længere transportere sandet, hvormed sandet aflejres umiddelbart under rørudmundingen. Vandet løber herefter tilbage til havet enten gennem stranden eller direkte på overfladen. Ved sidstnævnte vil der naturligt ske en sortering af sedimentet, hvor en del af de fineste fraktioner forbliver opblandet med vandet og derfor løber tilbage til havet. Dette vil medføre, at der under strandfodringsprocessen tilføres en høj koncentration af suspenderet sediment i swash-zonen grundet strandfodringen, hvor der dog også naturligt forekommer en høj SSC.

Det vurderes, at der i begyndelsen af indpumpningen primært vil forekomme tilbageløb af vand igennem stranden (dvs. udvaskningen af de finere sedimenter til havet vil være begrænsede), men efter lidt tid vil stranden være vandmættet, hvormed vandet vil løbe hen over overfladen og dermed transportere de fineste sedimenter tilbage til havet. Denne transport af vand på overfladen ses blandt andet i figur 1-16 i Projektbeskrivelsen samt i figur 1-42 som desuden er gengivet i figur 2-61 og figur 2-62 herunder.



Figur 2-61. Oversigtsbillede af bypass via boosterrør på stranden syd for Hvide Sande. (Google Earth, 2023) [DataCNES / Airbus]



Figur 2-62. Strandfodring ved indpumpning af vandopblandet sand.

Udvaskningen af de fineste sedimenter medfører dog, at strandfodringen kan give anledning til en ændring af SSC-niveauet, hvilket er betragtet som en ændring ift. eksisterende forhold.

For strandfodring er defineret, at en kampagne på én strækning består af fodring med op til 1.000.000 m³ sand indenfor en periode på op til 70 dage, jf. tabel 2-2. Overstiger det samlede behov for fodring på strækningen denne kampagnemængde, eller vælges det at gennemføre en fodring med en mindre mængde end det forventede behov i aftaleperioden, må det forventes, at den samme strækning genbesøges.

Sandet der anvendes til strandfodring kommer fra de samme seks bygeherreområder (indvindingsområder), som leverer sandressourcen til kystnær fodring jf. tabel 2-6.

Det anvendte materiel til strandfodring er ligeledes sandsugere af samme størrelse og antal som vurderes anvendt ifm. kystnær fodring, dog med ændrede tømmetider, se yderscenario ift. gennemførelse af en strandfodringskampagne i tabel 2-10, der opfylder rammerne givet i Projektbeskrivelsen og i tabel 2-2.

	Antal	Laststørrelse	Udlednings-niveau *	Tømmetid	Tidscyklus	Varighed
	[stk]	[m ³]	[m]	[min]		[døgn]
Rør	2	2.000	0	30	4 t 10 min	67
Rør	2	12.000	0	40	4 t 40 min	13,5

Tabel 2-10. Scenarier, der repræsenterer yderscenarier for gennemførelse af en strandfodringskampagne.

I forbindelse med sandsugerens tidscyklus er der gjort en række forudsætninger, herunder en gennemsnitlig sejltid til- og fra indvindingsområderne, tid for indvindingen af sandfodringsmaterialet, samt klargøring ved indvinding og indbygning. Tømmetiden varierer ligeledes, og i tabel 2-8 er vist en statistisk analyse af data for tømmetider, hvor lasten afleveres til rør ved eksempelvis strandfodring. Som det fremgår af tabel 2-8 varierer tømmetiden for losning på rør fra 4 min. til 379 min. I ovenstående scenarier er tømmetiden forudsat ud fra en vurderet gennemsnitlig kort tømmetid, hvormed SSC som følge af strandfodringsaktiviteterne er høj.

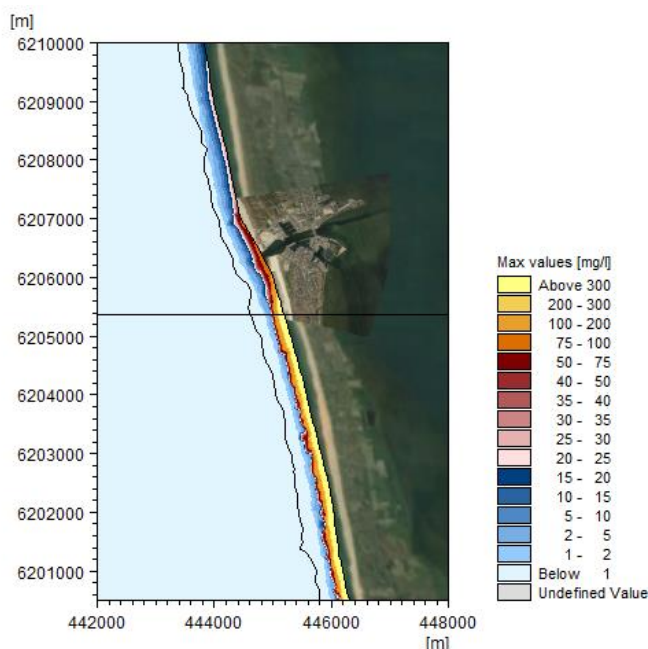
Der er ikke gennemført numerisk modellering af ændringen af SSC-niveau som følge af strandfodring. Dette skyldes, at ændringen, bortset fra helt kystnært (i swash-zonen), er lavere end

ved sandfodring via kystnær fodring ved en sammenligning af SSC-niveauet i samme afstand til fodringspositionen. Dette er vurderet ud fra:

- Specifikationer for strandfodring, der er af samme størrelse som kystnær fodring eller mindre intensive.
- Resultater fra modellering af konservative strandfodringsscenarier ifm. MKV (Rambøll, 2020).

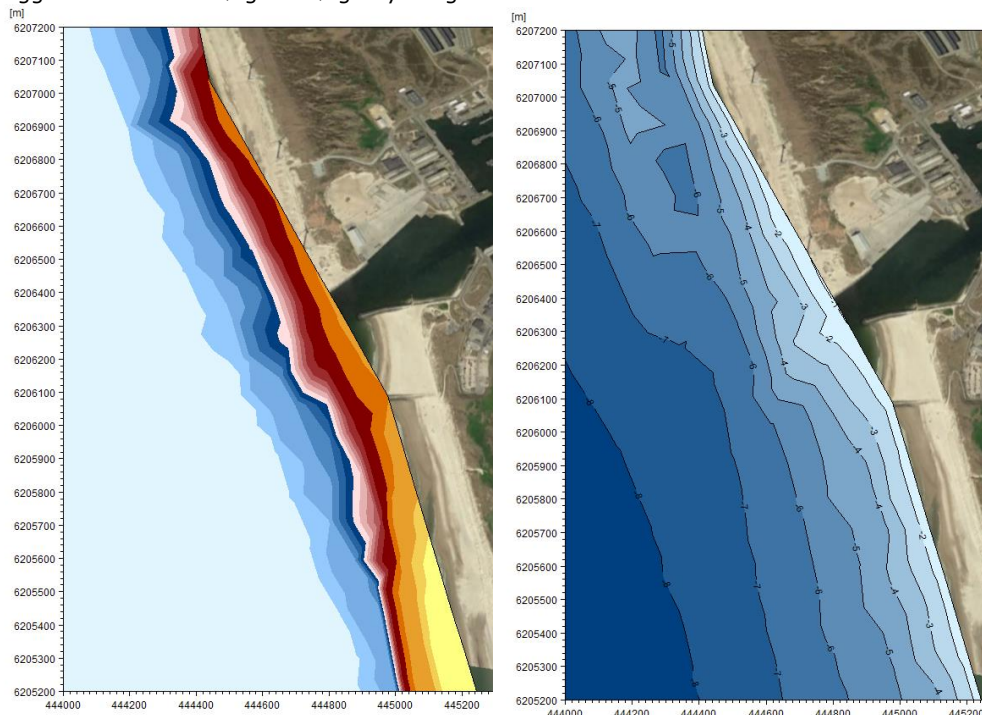
Gennemførelsen af en strandfodringskampagne medfører en teoretisk udledning/tid af fint sediment, der er i samme størrelse som ved kystnær fodring eller lavere, da tømmetiden ved de store sandsugere er den samme, mens den er signifikant højere for de små sandsugere. Indholdet af de fineste sedimentfraktioner i fodringsmaterialet er uændret, og det er konservativt forudsat, at al fint materiale skyller med returvand ud i havet. Lokalt i området hvor returvand skyller ud i havet kan der opstå et højere SSC-niveau grundet udledning i meget kystnære områder, hvor vanddybden er meget lav. Den lave vanddybde medfører dog også, at varigheden for sedimenternes transport ned gennem vandsøjlen er kort, hvormed de relativt hurtigt aflejres og herefter indgår i den naturlige dynamik, hvor bølger medfører op-hvirvling af sedimenter i swash-zonen.

Numeriske modelberegninger af strandfodring blev i MKV 2020 (Rambøll, 2020) gennemført for mere intensive strandfodringsscenarier, end de rammer, der er opstillet i tabel 2-2, muliggør, se resultat fra MKV 2020 i figur 2-63. Modelberegningerne er gennemført for en flux (udledningsmængde pr. sekund), der er 15-20% højere end angivet i tabel 2-2 og en varighed for tømning af lasten som er længere (110 min mod 40 min), samt for et mere konservativt nordgående strøm-scenarie. Denne mere intensive strandfodring medfører, at der helt kystnært forekommer et relativt højt SSC-niveau i en vis udstrækning fra fodringspositionen (markeret med vandret sort streg), men indenfor en afstand på 2-3 km til fodringspositionen er det meget kystnære dybde-midlede SSC-niveau < 25 mg/l, hvilket er meget tilsvarende sandfodring via rainbowing, jf. figur 2-29.



Figur 2-63. Statistisk maksimal dybde-midlet SSC gengivet fra MKV 2020 (Rambøll, 2020) for et scenarie, hvor der gennemføres strandfodring. Scenariet er mere intensivt ift. fodringsintensitet og stærkere nordgående strøm sammenlignet med scenarier i nærværende MKV for strandfodring. Den sorte vandrette linje markerer nordligste fodringsposition, mens den kystparallel linje markerer 6 m dybdekuren. Baggrundsbillede (Google Earth, 2023).

Påvirkningen ved strandfodringen er desuden helt kystnær, hvor SSC > 20 mg/l er indenfor ca. 4-5 m dybdekurven (se figur 2-64), mens SSC-påvirkningen ved kystnær fodring ligger på større vanddybde. Det er derfor vurderet, at SSC-ændringen som følge af gennemførelse af strandfodring er på tilnærmelsesvis samme niveau- eller lavere sammenlignet med ved kystnær fodring. Dette er med undtagelse for de helt lave vanddybder, hvor der dog i forvejen forekommer en høj baggrunds-SSC som følge af bølgebrydning.



Figur 2-64. Statistisk dybdemidlet SSC baseret på numerisk modellering for et mere intensivt strandfodrings-scenarie end muligt ud fra rammerne i tabel 2-2.

2.8 Kumulative effekter i forbindelse med koncentration af suspenderet sediment

Potentielle kumulative effekter ift. påvirkning af SSC-niveau beskrives i det følgende. Til vurdering af kumulative effekter tages afsæt i nævnte kumulative projekter i Projektbeskrivelsen.

Kumulative effekter ved indvinding af sand fra indvindingsområder

Indvinding af sand kan potentiel medføre spredning af suspenderet sediment. Indvindingsområderne er beliggende i relativt stor afstand til sandfodringslokaliteterne, og spredningen af sedimentet i forbindelse med indvindingen vurderes for relativt lokal. Dette er endvidere konkluderet i miljøkonsekvensvurderingerne for indvindingsområderne i (WSP, 2021a), (WSP, 2021b), (WSP, 2021c), (WSP, 2022), (WSP, 2023a), (WSP, 2023b).

De modellerede scenarier ifm. sandfodringsaktiviteterne i afsnit 2.6.3 viser desuden, at sedimentfaner forbliver relativt nær kysten. Baseret herpå, samt det forhold at strømforholdene langs vestkysten er domineret af nord-/sydgående strøm, vurderes det, at der ikke forekommer nogen kumulativ effekt i form af øget SSC fra samtidig sandindvinding og kystnær sandfodring.

Kumulative effekter i forbindelse med oprensningsaktiviteter af havnebassiner

Oprensningsaktiviteter i havnebassiner ved vestkysthavnene og den efterfølgende bypass eller nyttiggørelse kan potentielt generere en lokal øget suspenderet sedimentkoncentration i vandsøj-

len. Måleprogrammet fra 2022 (Rambøll, 2023a) viser dog, at der i forvejen forekommer et signifikant SSC-niveau i Hvide Sande Havn pga. slusen, hvilket også vurderes for værende tilfældet ved Thorsminde Havn. Desuden er det vurderet, at sandfodring udenfor havnen ikke medfører en signifikant påvirkning af SSC-niveauet i havnebassiner. Dette er understøttet af erfaringer fra måleprogram 2022, herunder den supplerende modellering af de kunstige SSC-kampagner (Rambøll, 2023b) samt gennemførte modelberegninger i afsnit 2.6.3. Derfor vurderes kumulative effekter ifm. samtidig oprensning af havnebassiner og sandfodring at være af begrænset omfang.

Kumulative effekter ved oprensning af indsejlinger til havne, samt bypass af oprensningsmateriale

Spredning af suspenderet sediment i forbindelse med oprensningsaktiviteter eller bypassaktiviteter udenfor havnene, i havneindsejlinger mv. vil potentielt kunne generere SSC-faner, der strækker sig ind i områder, der er påvirket af ændret SSC-niveau, som følge af samtidige sandfodringsaktiviteter. Dette kan dermed give anledning til kumulative effekter.

Til oprensningsarbejdet ved vestkysthavnene er der tidligere anvendt jf. (Kystdirektoratet, 2023) sandsugningsfartøjer der har samme kapacitet og størrelse som blev anvendt ifm. de kunstige SSC-kampagner, jf. (Rambøll, DTU Aqua, & KDI, 2023). Påvirkningen af SSC-niveauet som følge af oprensningsaktiviteterne kan konservativt sammenlignes med resultaterne fra modellerede kunstige SSC-kampagner, som beskrevet i afsnit 2.6.1. Det vurderes desuden, at anvendelsen af rør ved Hvide Sande og Thorsminde ifm. bypass kan medføre omtrentlig sammenlignelig (eller lavere) SSC-påvirkning udfor indsejlingen, som opnået under de kunstige SSC-kampagner ved Hvide Sande. Således vurderes det, at påvirkningen herfra tilnærmelsesvist er repræsenteret ved de kunstige SSC-kampagner.

Der kan opstå en kumulativ effekt, idet påvirkningen fra oprensningen og-/eller sandfodring med oprensningsmateriale skal adderes med påvirkningen fra de øvrige sandfodringsaktiviteter jf. afsnit 2.6.3 hvis sandfodringen foregår i nærhed af havnene. Der vil dog også her være en tidlig variation i påvirkningsniveauet.

Kumulative effekter ved oprensning af Thyborøn kanal

Samtidig oprensning af Thyborøn kanal samt sandfodring på Limfjordstangerne kan medføre kumulative effekter ift. SSC-påvirkning. Som nævnt i afsnit 2.6.3 vil påvirkningen fra sandfodring på SSC-niveauet i Thyborøn kanal dog være dynamisk. Således vil der, såfremt der kun sandfodres på én af Limfjordstangerne ad gangen, være stor sandsynlighed for, at der vil være områder, hvor der ikke haves øget SSC-niveau i kanalen fra sandfodring. Desuden vil det suspenderede sediment, afhængig af hvor langt væk fra Thyborøn kanal der fodres, delvist være sunket ned i vandsøjlen. På samme vis vil påvirkningen fra oprensning i kanalen være dynamisk.

Dermed vurderes det, at der pga. de dynamiske forhold, til trods for kumulative SSC-påvirkninger fra samtidige sandfodringer og oprensninger ved Thyborøn kanal, vil være områder i kanalen hvor kumulative effekter på SSC-niveauet ikke vil forekomme – eller vil være meget begrænsede. Disse områder vil dog variere i tid og sted.

Kumulative effekter ved samtidig sandfodring på flere delstrækninger

Gennemførelse af flere sandfodringskampagner kan potentielt medføre kumulative effekter ift. SSC-niveau, såfremt kampagnerne gennemføres samtidigt på nabostrækninger. Den kumulative SSC-påvirkning vil naturligt afhænge af, hvor tæt de samtidige sandfodringer gennemføres. Hertil kan modellerede sedimentfaner i afsnit 2.6.3 adderes, ift. at opnå et bud på den kumulative påvirkning. Det skal dog nævnes, at da fodringerne er dynamiske i tid og sted, vil en direkte addering af sedimentfaner fra en enkel fodringskampagne være konservativt. Kumulative effekter kan

opstå, såfremt der fodres med en indbyrdes afstand imellem kampagner på op til ca. 10 - 11 km, jf. afsnit 2.6.3 på strækningen ved Thorsminde og Hvide Sande, mens der potentielt kan forekomme en kumulativ effekt ved samtidig fodring indenfor 20 km omkring Thyborøn Kanal.

'Åbningen mod Vest – indsnævring af Thyborøn kanal'

Det potentielle projekt vedr. indsnævring af Thyborøn kanal (C2CCC, 2023), som indebærer etablering af relativt store moler, kan potentielt medføre øget suspenderet sedimentkoncentration i anlægsperioden. Da der i skrivende stund ikke er gennemført en miljøkonsekvensvurdering af projektet, kendes påvirkningen herfra ikke med sikkerhed.

Det forventes dog, at anlægsarbejdet kan koordineres med Kystdirektoratet, så der undgås sammenfald, og at der dermed ikke opstår væsentlige kumulative effekter.

Vedligehold af hårde konstruktioner

Vedligehold af hårde konstruktioner på land vurderes ikke at medføre øget SSC langs Lodbjerg – Nymindegab-strækningen, og vurderes derfor ikke at bevirke en kumulativ effekt.

Vedligeholdelse af hårde konstruktioner i vand, f.eks. høfder eller bølgebrydere, kan potentielt bidrage til øget SSC-niveau. Omfanget heraf vil afhænge af mange parametre, som f.eks. vedligeholdelsens omfang. Overordnet set vurderes det dog, at SSC-påvirkningen fra potentiel vedligeholdelse vil være af mindre omfang sammenlignet med påvirkningen fra sandfodringer. Desuden forventes det, at vedligeholdelsen på enkelte strækninger kan koordineres med sandfodringsaktiviteterne, så der ikke forekommer uhensigtsmæssige kumulative effekter herfra.

Oprensning af Høfde 42

Der planlægges en større oprensning ved giftdepotet ved Høfde 42 (Region Midt, 2023). Projektet er i skrivende stund endnu ikke fuldt klarlagt, og derfor kendes eventuelle kumulative effekter herfra ikke med sikkerhed. Hvis oprensningen f.eks. indebærer anlægsarbejder i vandet, kan det ikke udelukkes, at projektet i anlægsfasen bidrager til øget SSC-niveau. Det forventes dog, at eventuelle anlægsarbejder kan koordineres med Kystdirektoratet, så der ikke opstår uhensigtsmæssige kumulative effekter herfra.

Havvindmølleparken Thor

Den planlagte havvindmøllepark Thor forventes placeret i Nordsøen ud for Nisum Fjord ca. 20 kilometer fra kysten (Energistyrelsen, Thor havvindmøllepark, 2023). Grundet afstanden til kysten vurderes det ikke, at der kan forekomme kumulative effekter med de planlagte sandfodringsaktiviteter.

Etablering af landanlæg og herunder kabeltrace kan potentielt bevirke øget SSC-niveau i anlægsperioden. Hertil forventes det dog, at eventuelle anlægsarbejder kan koordineres med Kystdirektoratets sandfodring i området, så der ikke opstår uhensigtsmæssige kumulative effekter.

Havvindmølleparken Vesterhav Nord

Jf. (Energistyrelsen, 2015a) er forøgelsen af SSC ifm. etablering af gravitationsfundamenter ved Vesterhav Nord begrænset. Udenfor havvindmølleparken forekommer der en lav forøgelse af SSC-niveauet, og af modelresultater fremgår det umiddelbart, at etableringen af fundamenter ikke medfører en forøgelse af SSC-niveauet tæt ved kysten. Derfor vurderes det, at etableringen af fundamenter ifm. Vesterhav Nord ikke vil medføre nogen kumulative effekter ift. SSC.

Ifm. etablering af kabelkorridorerne, dvs. nedspuling af kabler, kan der jf. (Energistyrelsen, 2015a) opstå en relativt høj forøgelse af SSC-niveauet tæt ved kysten, samt på en relativt lang

strækning langs kysten. Såfremt der gennemføres sandfodring i samme periode som etableringen af kabelkorridorerne, kan der potentielt forekomme kumulative effekter ift. forøgelse af SSC. Hertil forventes det dog, at eventuelle anlægsarbejder kan koordineres med Kystdirektoratets sandfodring i området, så der ikke opstår u hensigtsmæssige kumulative effekter.

Havvindmølleparken Vesterhav Syd

Jf. (Energistyrelsen, 2015b) er forøgelsen af SSC ifm. etablering af gravitationsfundamenter ved Vesterhav Syd begrænset. Udenfor havmølleparken forekommer der en lav forøgelse af SSC-niveauet og af modelresultater fremgår det umiddelbart, at etableringen af fundamenter ikke medfører en forøgelse af SSC-niveauet tæt ved kysten. Derfor vurderes det, at etableringen af fundamenter ifm. Vesterhav Syd ikke vil medføre nogen kumulative effekter ift. SSC.

Ifm. etablering af kabelkorridorerne, dvs. nedspuling af kabler, kan der jf. (Energistyrelsen, 2015b) opstå en relativt høj forøgelse af SSC-niveauet tæt ved kysten, samt på en relativt lang strækning langs kysten. Hvis der gennemføres sandfodring i samme periode som etableringen af kabelkorridorerne, kan der potentielt forekomme kumulative effekter ift. forøgelse af SSC. Hertil forventes det dog, at eventuelle anlægsarbejder kan koordineres med Kystdirektoratets sandfodring i området, så der ikke opstår kumulative effekter.

REFERENCER

- Birklund, J. H., Toxvig, H., & Laustrop, C. (1997). *RIACON. Risk of Shoreface Nourishment and Subaqueous Sand Extraction for the Coastal Marine Benthic Community. Evaluation of the Nourishment and Sand Extrac-tion off Torsminde, Denmark.*
- Bruun, P. (1954). *Coastal Erosion and the Development of Beach Profiles.*
- C2CCC. (2023). *C9 - Thyborøn Kanal og den vestlige Limfjord.* Retrieved from <https://www.c2ccc.eu/projektmateriale/delprojekterne/aben-land-projekterne/thyboron-kanal-og-den-vestlige-limfjord/>.
- CEFAS. (2016). *Suspended Sediment Climatologies around the UK.*
- Copernicus. (2023a). Retrieved from <https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-OC-QUID-009-101to104-111-113-116-118.pdf>
- Copernicus. (2023b). *NWSHELF_MULTIYEAR_PHY_004_009.* Retrieved from https://data.marine.copernicus.eu/product/NWSHELF_MULTIYEAR_PHY_004_009/description.
- Copernicus. (2023c). https://data.marine.copernicus.eu/product/NORTHWESTSHELF_ANALYSIS_FORECAST_PHY_004_013/description.
- Deltares. (2015). *XBeach Technical Reference: Kingsday Release.* .
- DHI. (2001). *Redegørelse for planlagte kystfodringsprojekter udfor Fjaltring i 2002 og ved Årgab i 2003.* .
- DHI. (2021). *Turbiditetsmålinger langs den jyske Vestkyst, efteråret 2020.*
- DHI. (2022). *Monitering af turbiditet omkring Hvide Sande.*
- EMODNet. (2023). Retrieved from <https://emodnet.ec.europa.eu/geoviewer/#3329441>
- Energistyrelsen. (2015a). *Vesterhav Nord Havmøllepark.*
- Energistyrelsen. (2015b). *Vesterhav Syd Havmøllepark.*
- Energistyrelsen. (2023). *Thor havvindmøllepark.* Retrieved from <https://ens.dk/ansvarsomraader/vindmoeller-paa-hav/udbud-af-havvindmoelleparker/thor-havvindmoellepark>.
- GEUS. (2017). *GEUS-NOTAT nr.: 14-MI-2017-8: Beskrivelse af forhold vedrørende havbunden i danske havområder.* . <https://bit.ly/2KEDYdi>.

- Google Earth. (2023).
- Hansen, L. N. (2019). *Turbidity measurement based on computer vision*.
- Kogsgaard Miljø. (2014). *Sejlrenden til Bork Havn - Ansøgning om fornyet tilladelse til klappning af materiale fra sejlrenden til Bork Havn*.
- Kystdirektoratet. (2000). *Sedimentbudget Vestkysten*.
- Kystdirektoratet. (2008). *Safecoast - CONSEQUENCES OF CLIMATE CHANGE ALONG THE DANISH COASTS*.
- Kystdirektoratet. (2013). *COADAPT - Dune Erosion and safety along the LodbjergNymindegab*.
- Kystdirektoratet. (2016). *Thyborøn Kanal og Vestlige Limfjord - Teknisk resumé*.
- Kystdirektoratet. (2017). *Højvandsstatistikker*.
- Kystdirektoratet. (2018). *Vejledning om kystbeskyttelsesmetoder*.
- Kystdirektoratet. (2023). Udtalelse fra KDI - email sendt d. 19 september.
- Kystinspektoratet. (1999). *Sedimentanalyse - Vestkysten*.
- Miljø- og Fødevareministeriet. (2017). *Tilladelse til bypass ved præventiv oprensning nord for indsejlingen til Hvide Sande Havn*.
- Miljø- og Fødevareministeriet. (2022). *THORSMINDE VESTHAVN, KLAPTILLADELSE 2022*.
- OpenStreetMap. (2023). Retrieved from <https://www.openstreetmap.org/>
- Rambøll. (2020). *VVM for Lodbjerg - Nymindegab Fællesaftalestrækningen*.
- Rambøll. (2021). *Måleprogram på Vestkysten - Måling af suspenderet sediment*.
- Rambøll. (2023a). *Måleprogram ved Hvide Sande 2022 - Suspenderet sediment og smoltvandring*.
- Rambøll. (2023b). *Modellering af kunstige SSC-kampaner ifm. måleprogram 2022*.
- Rambøll, DTU Aqua, & KDI. (2023). *Måleprogram ved Hvide Sande - Opsummering og vurdering af tolerancer for laksesmoltvandring*.
- Region Midt. (2023). *Kemikaliedepotet ved Høfde 42*. Retrieved from <https://www.ru.rm.dk/klima-og-miljo/jordforurening/generationsforureningerne/kemikaliedepotet-hofde42/>.
- TU Delft. (2022). *Shoreline Monitor*. Retrieved from <https://aqua-monitor.appspot.com/?datasets=shoreline>
- WSP. (2021a). *Nyt bygherreområde Lodbjerg A - Miljøkonsekvensrapport for Lodbjerg A*.
- WSP. (2021b). *Nyt bygherreområde Lodbjerg B - Miljøkonsekvensrapport for Lodbjerg B*.
- WSP. (2021c). *RÅSTOFEFTERFORSKNING I BYGHERREOMRÅDE 562-PA THYBORØN - MILJØKONSEKVENSVURDERING OG VÆSENTLIGHEDSVURDERING*.
- WSP. (2022). *RÅSTOFEFTERFORSKNING I BYGHERREOMRÅDE 578-AA HUSBY KLIT - MILJØKONSEKVENSVURDERING OG VÆSENTLIGHEDSVURDERING*.
- WSP. (2023a). *RÅSTOFEFTERFORSKNING I BYGHERREOMRÅDE 562-AD FERRING - MILJØKONSEKVENSVURDERING OG VÆSENTLIGHEDSVURDERING*.
- WSP. (2023b). *RÅSTOFEFTERFORSKNING I BYGHERREOMRÅDE 562-AE THYBORØN A - MILJØKONSEKVENSVURDERING OG VÆSENTLIGHEDSVURDERING*.