

Hirtshals Havn

Sediment budget omkring Hirtshals Havn og effekten af havneudvidelsen

Rapport 2.0

19-4-2024


Udarbejdet for Hirtshals Havn

Udvidelsen af Hirtshals Havn

Sediment budget omkring Hirtshals Havn og effekten af havneudvidelsen

Rapport

Udarbejdet for: Hirtshals Havn
Repræsenteret ved: Niels Kiersgaaard

Godkendt af


Kontaktperson: Kasper Kærgaard, kak@dhigroup.com
Projektleder: Bo Brahtz Christensen
Kvalitetsansvarlig: Nils Drønen og Flemming Jakobsen
Udarbejdet af: Kasper Kærgaard
Projektnr.: 11829317
Godkendt af: Kasper Kærgaard
Godkendelsesdato: 19-4-2024
Revision: Final 2.0
Klassifikation: **Begrænset:** Dette dokument er tilgængeligt for personer ansat i DHI-koncernen men må ikke deles med andre udenfor DHI-koncernen uden kundens forhåndsgodkendelse.

Filnavn: 11829317 Sediment budget omkring Hirtshals Havn Rapport 2.0.docx

Indholdsfortegnelse

1	Introduktion	7
2	Sammenfatning	9
3	Datagrundlag	12
3.1	Vestkystlinjer opmålt at kystdirektoratet.....	12
3.2	Søopmålingsdata fra Hirtshals Havn.....	14
3.3	Satellitbilleder fra Sentinel 2.....	14
3.4	Fordeling af oprensningsemængder.....	16
3.5	Luffotos.....	17
3.6	Tidligere rapporter.....	17
3.6.1	Kysten nordøst for Hirtshals Havn (DHI et al., 1994).....	17
3.6.2	Sedimentbudget Vestkysten (Kystdirektoratet, 2001).....	18
3.6.3	Hirtshals Havn, indvirkning på kysten af inddæmning (DHI, 2013).....	18
3.6.4	Analyse af sedimenttransport ved Hirtshals Havn (Kystdirektoratet, 2018).....	18
3.7	Historiske udvikling af Hirtshals Havn.....	18
4	Analysemetoder og numeriske modeller	20
4.1	Opgave 1: Analyse af sandbølgebevægelser.....	20
4.2	Opgave 2: Analyse af opmålt profil på tværs af sandbølgefronterne og vestkystlinjer.....	21
4.2.1	Analyse af opmålt profil på tværs af sandbølgefronter.....	21
4.2.2	Analyse af vestkystlinjer.....	22
4.3	Opgave 3: Analyse af kystlinje- og vegetationslinje positionen.....	25
4.4	Opgave 4: Etablering af samlet sedimentbudget for både sandbølger og kystlinjen.....	25
4.5	Opgave 5: Effekten af havneudvidelsen på sedimentbudgettet.....	26
4.6	Opgave 6: Effekten af havneudvidelsen på kysten øst for havnen.....	27
4.7	Opgave 7: Effekten af havneudvidelsen på morfologien omkring havnen.....	27
5	Validering af analysemetoder og numerisk model	28
5.1	Validering af sandbølgebevægelser.....	28
5.2	Validering af kystlinjeanalyse.....	28
5.3	Validering af sandtransportmodel.....	29
6	Analyseresultater	33
6.1	Opgave 1: Sandbølgebevægelser.....	33
6.2	Opgave 2: Analyse af opmålt profil på tværs af sandbølgefronterne og vestkystlinjer.....	33
6.2.1	Analyse af opmålt profil på tværs af sandbølgefronter.....	33
6.2.2	Analyse af vestkystlinjer.....	33
6.3	Opgave 3: Analyse af kystlinjer og vegetationslinjer.....	38
6.3.1	Effekten af havspejlsstigninger.....	45
6.4	Opsummering af dataanalyse.....	47
6.5	Opgave 4: Etablering af sedimentbudget.....	48
6.5.1	Beregnet sandtransport omkring havnen.....	48
6.6	Opgave 5: Effekten af havneudvidelsen på sedimentbudgettet.....	52
6.7	Opgave 6: Effekten af havneudvidelsen på kysten øst for havnen.....	57
6.8	Opgave 7: Effekten af havneudvidelsen på morfologien omkring havnen.....	61
6.8.1	Bathymetrier.....	61
6.8.2	Opbygning af havbunden ved tidligere havneudvidelser.....	64
6.8.3	Analyse af den historiske havneudbygning.....	65
6.8.4	Effekten af havneudvidelsen på kystlinjen og vegetationslinjen.....	66
7	Diskussion og konklusion	68
7.1	Sedimentbudget for den eksisterende situation.....	68
7.2	Effekten af havneudvidelsen på sedimentbudgettet.....	69
7.3	Effekten af havneudvidelsen på kysten og vegetationslinjen øst for havnen.....	70
8	Referencer	72

Figurer

Figur 1-1	Planlagt havneudvidelse.	7
Figur 1-2:	Eksempel på luftfoto af sandbølger øst for Hirtshals Havn.	8
Figur 2-1:	Sedimentbudget for den kystnære sedimenttransport omkring Hirtshals Havn (1980-2019).	9
Figur 3-1:	Kystprofiler målt af Kystdirektoratet omkring Hirtshals Havn.....	12
Figur 3-2:	Kystprofilet linje 1510 målt vest for havnen.	13
Figur 3-3:	Kystprofilet linje 1500 målt øst for havnen.	13
Figur 3-4:	Interpoleret vanddybde fra multibeam pejling fra den 30. maj 2023.	14
Figur 3-5:	Sentinel 2 billede fra den 26. maj 2017.....	15
Figur 3-6:	Oprensede mængder, fra DHI (2013).	17
Figur 3-7:	Den historiske udvikling af Hirtshals Havn, fra Hirtshals Havn.....	19
Figur 4-1:	Lodret snit gennem en vandrende sandbølge.	20
Figur 4-2:	Alle sandbølgefronter fra årlige billeder i perioden 2017-2023.	21
Figur 4-3:	Multibeam data (blå prikker) blev interpoleret ind på den røde linje.....	21
Figur 4-4:	Bundniveau langs med linje defineret i Figur 4-3.....	22
Figur 4-5:	Afvigelse af bundniveau fra trend.	22
Figur 4-6:	Målte kystprofiler for linje 1460 med de tre dybder z_1 , z_2 og z_3 indikeret med stiplede linjer.	24
Figur 4-7:	Ændringen i profilvolumenet for linje 1460.....	24
Figur 4-8:	Vanddybden omkring havneindsejlingen i først tidskridt.	26
Figur 4-9:	Vanddybden omkring havneindsejlingen for den nye havneudvidelse.	26
Figur 5-1:	Toppe af sandbølger målt den 30. maj 2023, tegnet op på satellitbillede fra den 14. maj 2023.....	28
Figur 5-2:	Sammenligning mellem kystlinjehavneposition estimeret fra orto-foto fra 2008 og kyst-profiler fra 2008.	29
Figur 5-3:	Bundniveauer (initial og efter 1 års simulering).	31
Figur 5-4:	Ændringer i bundniveau i løbet af simuleringen.	32
Figur 6-1:	Variationen i profilvolumenet for linje 1450, 1460 og 1470.....	34
Figur 6-2:	Variationen i profilvolumenet for linje 1480, 1490 og 1500.....	35
Figur 6-3:	Ændringen i profilvolumenet per år siden 1995.	36
Figur 6-4:	Profiler målt på linje 1500.....	37
Figur 6-5:	Ændring i sedimentvolumenet mellem afstand 3800 og 4700 m for linje 1500.....	37
Figur 6-6:	Middeldybden mellem afstand 1000-2000, 2000-3000 osv. for profil 1500.	38
Figur 6-7:	Udtrukne kystlinjer (top) og vegetationslinjer (bund).	39
Figur 6-8:	Kystlinje- og vegetationslinje position for vestkystlinjer 1490 og 1480.....	40
Figur 6-9:	Kystlinje- og vegetationslinje position for vestkystlinjer 1470 og 1460.....	41
Figur 6-10:	Kystlinje- og vegetationslinje position for vestkystlinjer 1450 og 1440.....	42
Figur 6-11:	Variation i skræntens beliggenhed, fra Kystdirektoratet (2018).....	45
Figur 6-12:	Den relative havspejlsstigning 1990-2020, fra (DMI, 2021).....	46
Figur 6-13:	Estimeret havspejlsstigning fra DMI's klimaatlas.	47
Figur 6-14:	Akkumuleret sand transport omkring havnen baseret på 1 års simuleringen.	48
Figur 6-15:	Øverst: Øst-vest gående netto sandtransport øst-vest. Nederst: Nord-syd gående netto sandtransport.	49
Figur 6-16:	Transportlinjer fra hjørnerne på klappads, bypass pladsen og den lille bypass plads.	50
Figur 6-17:	Simuleret netto transport i $m^3/år$ for året 2021 for udvalgte linjestykker.....	51
Figur 6-18:	Netto transporten efter 1 års simulering omkring den planlagte havn.....	52
Figur 6-19:	Udvalgte linjestykker omkring havneindsejlingen af den udvidede havn.	53
Figur 6-20:	Fordelingen af netto sandtransport over Linje 1.	54
Figur 6-21:	Fordelingen af netto sandtransport over Linje 2.	54
Figur 6-22:	Fordelingen af netto sandtransport over Linje 3.	55
Figur 6-23:	Fordelingen af netto sandtransport over Linje 4.	55
Figur 6-24:	Fordelingen af netto sandtransport over Linje 5.	56

Figur 6-25:	Kystprofiler benyttet til det forfinede beregningsnet.....	57
Figur 6-26:	Beregningsnet for modellen med det forfinede beregningsnet langs kysten.	57
Figur 6-27:	Udvalgte linjer.....	58
Figur 6-28:	Nettotransporten over beregningsåret (2021) for linje 7.....	60
Figur 6-29:	Morfologien omkring den nuværende havn og relation til sediment bypass.	61
Figur 6-30:	Nuværende morfologi omkring den udvidede havn.....	62
Figur 6-31:	Opdateret bathymetri omkring den nye havn.....	63
Figur 6-32:	Transportlinjer.	64
Figur 6-33:	Differensbathymetri fra 1972 til 1982. Modtaget fra Hirtshals havn i filen <i>Havpejlinger 1982-1988_Hirtshals Havn.pdf</i>	65
Figur 6-34:	Området øst for havnen der eroderer mellem 0.5 km og 3.5 km øst for den østlige bølgebryder	67
Figur 7-1:	Skematisk sediment budget omkring Hirtshals Havn.	68
Figur 7-2:	Samlet sediment budget for 1980-2019, etableret på basis af dataanalysen, supporteret af den numeriske modellering.....	68

Tabeller

Tabel 3-1:	Fordelingen af oprensingsmængder i m ³ fra 1999 til 2023, Hirtshals Havn.	16
Tabel 5-1:	Fordelingen af oprensede mængder for 2021.	29
Tabel 6-1:	Hældning (Trend) og standardafvigelse (Std) af tendenslinje for kystlinjehavne før (1884-1954) og efter 1954 (1954-2023), samt periode for svingninger.	43
Tabel 6-2:	Hældning (Trend) og standardafvigelse (Std) af tendenslinje for vegetationslinjehavne før (1884-1954) og efter 1954 (1954-2023), samt periode for svingninger.	43
Tabel 6-3:	Nettotransport over udvalgte linjestykker for eksisterende og udvidede havne samt ændringen (ny-eksisterende).	53
Tabel 6-4:	Netto sedimenttransporten over udvalgte linjer for den eksisterende og nye havn.	58
Tabel 6-5:	Sedimenttransporten over linjer.	64
Tabel 7-1:	Opsummering af effekten af havneudvidelsen på sedimentbudgettet og kystlinjen / vegetationslinjen.....	70

Bilag

Bilag A	Vestkystprofiler
Bilag B	Sentinel 2 billeder
Bilag C	Bathymetrvariationer
Bilag D	Netto transport over udvalgte linjer

1 Introduktion

Hirtshals Havn planlægger en større havneudvidelse mod nord (se Figur 1-1), og har i den forbindelse bedt DHI A/S (DHI) om at vurdere det nuværende sedimentbudget omkring havnen og efterfølgende at vurdere effekten af den planlagte havneudvidelse på sedimentbudgettet, herunder effekten på kysten vest og øst for havnen.



Figur 1-1 Planlagt havneudvidelse.

Der findes i forvejen en lang række rapporter og studier, der omhandler sediment transport omkring Hirtshals Havn. I forhold til sedimentbudgettet er det vurderet, at de væsentligste rapporter er følgende:

- DHI et. al. (1994): Kysten nordøst for Hirtshals Havn.
- Kystdirektoratet (2001): Sedimentbudget Vestkysten.
- DHI (2013): Hirtshals Havn, indvirkning på kysten af inddæmning.
- Kystdirektoratet (2018): Analyse af sedimenttransport ved Hirtshals havn.

Sammenligner man disse rapporter synes der at være nogle uklarheder og uoverensstemmelser mellem de forskellige rapporters vurderinger i forhold til detaljerne i sedimenttransporten omkring havnen.

Blandt andet skriver DHI (1994) at der ikke er noget bypass forbi havnen og at hele transporten fra syd tabes fra det kystnære sedimentbudget til dybt vand nord for havnen.

I Kystdirektoratet (2001) står der:

”Da der heller ikke i Kystdirektoratets pejlinger er indikationer af, at der forsvinder sediment ud af kontrolvolumet vurderes det derfor, at al sedimentet passerer Hirtshals. Det gælder også det oprensede materiale, idet dette klappes kystnært nord for havnen.”

Samtidig findes der mange luftfotos og satellitbilleder, hvor der tydeligt ses sandbølger øst for havnen, et eksempel er vist på Figur 1-2.



Figur 1-2: Eksempel på luftfoto af sandbølger øst for Hirtshals Havn.
Formen på sandbølgerne indikerer at de vandrer mod øst.

For at adressere uklarheder og opklare modstridigheder mellem de eksisterende vurderinger med henblik på at få etableret et mere entydigt billede af forholdene, har Hirtshals Havn bedt DHI om dels at undersøge sedimentbudgettet omkring havnen og dels vurdere effekten af den kommende havneudvidelse på sedimentbudgettet. Konkret ved at gennemføre følgende aktiviteter:

- **Opgave 1:** Analyse af sandbølgebevægelser (vandring og tidsskala herfor).
- **Opgave 2:** Analyse af vestkystlinjer samt opmålt profil på tværs af sandbølgefronterne (på langs af sandbølgerne) til estimering af sandvolumen, der transporteres i sandbølgerne.
- **Opgave 3:** Analyse af kystlinje og vegetationslinje positionen.
- **Opgave 4:** Etablering af samlet sedimentbudget for både sandbølger og kystlinjen.
- **Opgave 5:** Effekten af havneudvidelsen på sedimentbudgettet.
- **Opgave 6:** Effekten af havneudvidelsen på kysten øst for havnen.
- **Opgave 7:** Effekten af havneudvidelsen på morfologien omkring havnen.

Nærværende rapport beskriver DHI's analyser samt resultaterne af disse.

2 Sammenfatning

Der er i nærværende studie benyttet dataanalyse og numerisk modellering til at estimere sedimentbudgettet omkring Hirtshals Havn samt effekten af den planlagte havneudvidelse på dette.

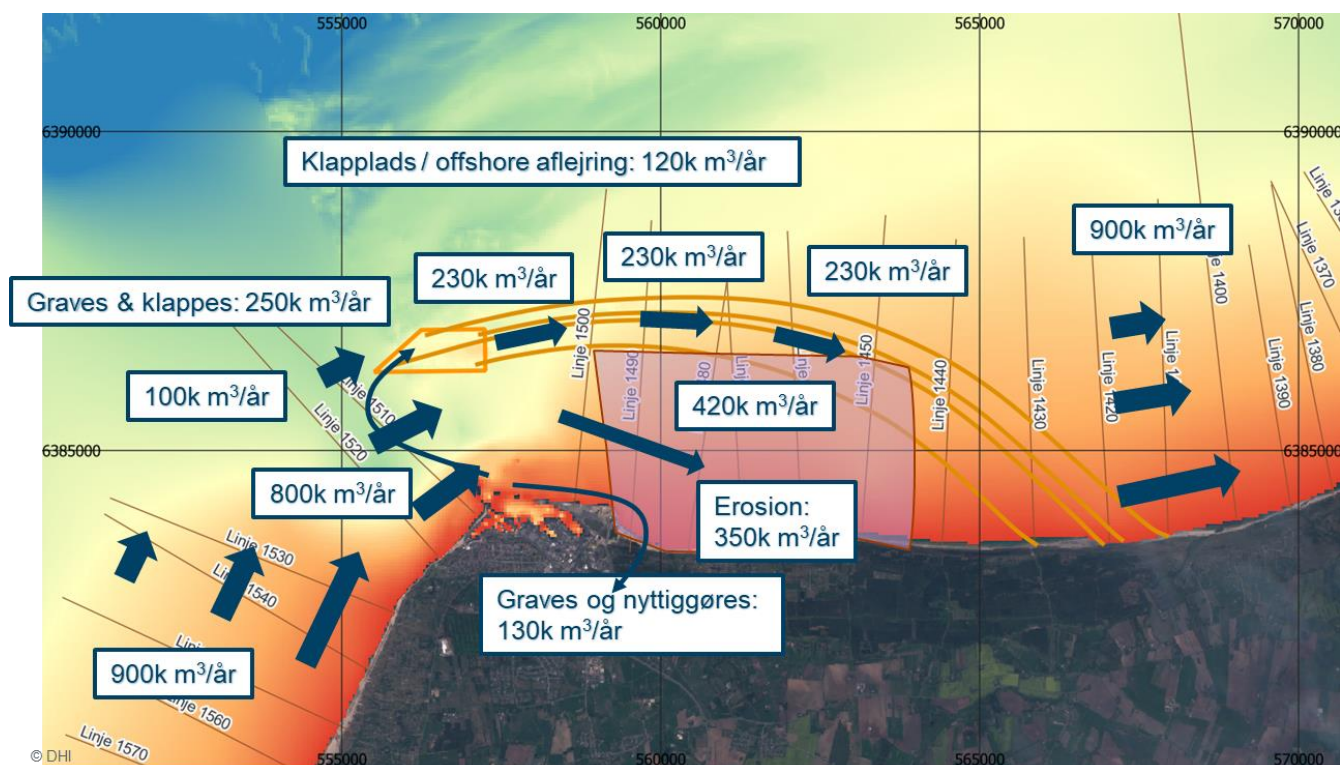
Resultater fra arbejdet sammenfattes i det følgende.

Sediment budget

Sedimentbudgettet omkring den eksisterende havn - som det er analyseret i denne rapport - er vist på Figur 2-1 for perioden fra omkring 1980 frem til 2019, hvor størstedelen af sedimentet, der blev gravet op af sejlrenden, blev klappet på klappadsen.

På kysten vest for havnen har Kystdirektoratet i 2001 estimeret sedimenttransporten til 900,000 m³/år – jf. /2/. Dette tal er baseret på den observerede erosion længere mod syd, hvilket ligger uden for nærværende undersøgelsesområde.

Nærværende undersøgelse har vist at ud af de 900,000 m³/år, så passerer 420,000 forbi havnen indenfor den ældre klappads. Derudover ender ca. 380,000 m³/år i sejlrenden, hvor der graves materiale op for at sikre besejlingsdybden til havnen, og endelig aflejres der omkring 100,000 m³/år omkring den gamle klappads.



Figur 2-1: Sedimentbudget for den kystnære sedimenttransport omkring Hirtshals Havn (1980-2019).

Figuren viser kun netto transporter.

De kystnære sandbølger (indenfor 2 km fra kysten), der vandrer fra området nord for havnen mod sydøst, transporterer omkring 100,000 m³/år, ud af den samlede transport i området på omkring 300,000 m³/år. Disse tal er ikke vist på ovenstående figur.

Nærværende studie har vist at transportkapaciteten på den gamle klappads ikke er tilstrækkelig til at transportere hele det klappede sandvolumen væk fra klappadsen (idet der også naturligt kommer sand til klappadsen fra vest). Transportkapaciteten er omkring 230,000 m³/år, hvor imod der historisk er blevet klappet omkring 250,000 m³/år og der kommer ~100,000 m³/år fra vest. Der er således aflejret sand i området. Dette ses dels på bathymetriske data fra den danske dybde model, hvor en undersøisk bakke ses på klappadsen, dels i nye data fra Hirtshals Havn, der viser at vanddybden på størstedelen af klappadsen er lavere end de 17 m dybde, som klaptilladelsen kræver.

Den del af sandet, der er blevet transporteret videre mod øst, er ca. 6-8 km øst for havnen igen blevet en integreret del af det kystnære sedimentbudget.

Historisk udvikling af kyst og vegetationslinjen

De historiske kystlinjer og vegetationslinjer øst for havnen fra 1884 til 2023 er analyseret og resultatet af analysen er sammenlignet med tidligere analyser. Denne analyse viser at der er store udsving på positionen af kystlinjen og vegetationslinjen, dels pga. akuterosion under storme, men også pga. cykliske bevægelser af kystlinjen forårsaget af vandring af kystlinje-udbugtninger mod øst.

I området lige øst for havnen (ca. den første halve kilometer fra den østlige bølgebryder) er kysten stabiliseret siden 1990, formentlig pga. havneudbygningerne mod øst som har stabiliseret området. Tidligere lå havnen længere væk og i denne periode (1954-1990) oplevede området erosion.

Længere mod øst (ca. mellem 0.5 km og 3.5 km øst for den østlige bølgebryder) har kysten og vegetationslinjen oplevet erosion på ca. 1 m/år siden 1954. Inden 1954 var udviklingen i området flad.

Analysen af kystprofilerne (målinger af vanddybden på tværs af kysten), viser klare tegn på øget erosion på større vanddybder (uden for 7 m vanddybde) i de seneste 20 år, på mindre vanddybder (<7 m) er der også tegn på erosion, men i mindre omfang. Erosionen på mindre vanddybder svarer ca. til den erosion, der er observeret på kystlinjer og vegetationslinjer.

Denne svage underliggende erosion på kysten øst for havnen kan være forårsaget af den eksisterende havn. Havnen er kontinuert blevet udvidet siden 1930. Ved hver udvidelse har morfologien omkring havnen skullet indstille sig til en ny ligevægt, hvilket må have medført en reduktion i tilførslen af sand til området øst for havnen i en periode.

Endvidere er sandet, der historisk er blevet gravet op af sejlrenden, blevet klappet på klappadsen nord vest for havnen, hvorfra det meste kan blive transporteret mod øst. Det som bliver transporteret videre mod øst, kommer dog først ind på kysten igen 6-8 km øst for den østlige bølgebryder og dermed får kysten lige øst for havnen ikke glæde af det.

Effekten af havneudvidelsen på sediment budget

Beregningerne af effekten af havneudvidelsen på sedimentbudgettet, viser at havneudvidelsen på sigt ikke vil påvirke erosionen nedstrøms havnen såfremt den hidtidige bypass / klappingspraksis, hvor en stor del af det oprensede sediment klappes på bypass pladsen øst for havnen, opretholdes efter havneudvidelsen.

Både vest for havnen og langs den østlige bølgebryder vil havbunden dog skulle tilpasse sig de nye forhold forårsaget af havneudvidelsen. Der vil således

være en overgangsperiode fra udvidelsen implementeres til en ny ligevægt har indstillet sig. Denne overgangsperiode er vurderet til at strække sig over 20-30 år, hvor morfologien (havbunden) omkring havnen gradvist tilpasser sig den nye havneudformning. Tidsskalaen herfor er således nogenlunde sammenligning med tidsskalaen for hvornår effekten vil begynde at påvirke kysten øst for havnen.

I tilpasningsperioden vil erosionen i området øst for havnen øges i forhold til de nuværende forhold idet tilførslen af sediment fra øst midlertidigt mindskes.

Ud fra sandbølgenes bevægelser samt de tilgængelige data er det estimeret at tidsskalaen er omkring 30 år for hvornår morfologiske ændringer omkring havnen (som følge af havneudvidelser eller ændringer i praksis for det oprensede sediment) kan ses på kysten 4 km øst for havnen. Da havnekonstruktionerne og praksis for håndtering af oprenset sediment har ændret sig oftere end hvert 30. år, er det i praksis meget svært at se en direkte sammenhæng mellem de forskellige udvidelser / ændringer og udviklingen af kysten øst for havnen.

Effekten af havneudvidelsen på kyst- og vegetationslinje

Den øgede erosion i området øst for havnen vil i tilpasningsperioden ca. svare til den historiske erosion i området, dvs. omkring 1 m/år og vil dermed betyde en samlet erosion på omkring 2 m/år i området mellem 1 km og 4 km øst for den østlige bølgebryder. For at modvirke den øgede erosion anbefales det at by-passe hele sedimentvolumenet, der oprenses fra havneindsejlingen. Det meste kan klappes på den eksisterende bypass plads, men det anbefales at klappe en del mængde på omkring 100k m³/år på lavere vanddybde så det kan modvirke erosionen på kysten og vegetationslinjen.

Såfremt det i en periode ønskes at nyttiggøre en delmængde af det oprensede sediment, anbefales det at der som minimum klappes 100k m³/år kystnært for at modvirke erosionen på kystlinjen og vegetationslinjen.

Den nyttiggjorte mængde vil føre til øget erosion øst for havnen, men udelukkende på større vanddybder (større end 7 m), hvor der er masser af sediment. Det vurderes dermed at store mængder sand kan nyttiggøres uden konsekvenser for kysten og vegetationslinjen så længe den kystnære sandfodring på omkring 100k m³/år opretholdes, eventuelt kan den kystnære sandfodring øges i perioder hvor der nyttiggøres materiale.

Resten af rapporten er opbygget som følger:

- Afsnit 3 beskriver de tilgængelige data.
- Afsnit 4 beskriver analysemetoder og de i analysen anvendte numeriske modeller.
- Afsnit 5 beskriver valideringen af metoder og modeller.
- Afsnit 6 beskriver resultaterne fra de udførte analyser og i
- Afsnit 7 diskuteres resultaterne og der drages konklusioner.

3 Datagrundlag

I dette afsnit beskrives det anvendte datagrundlag.

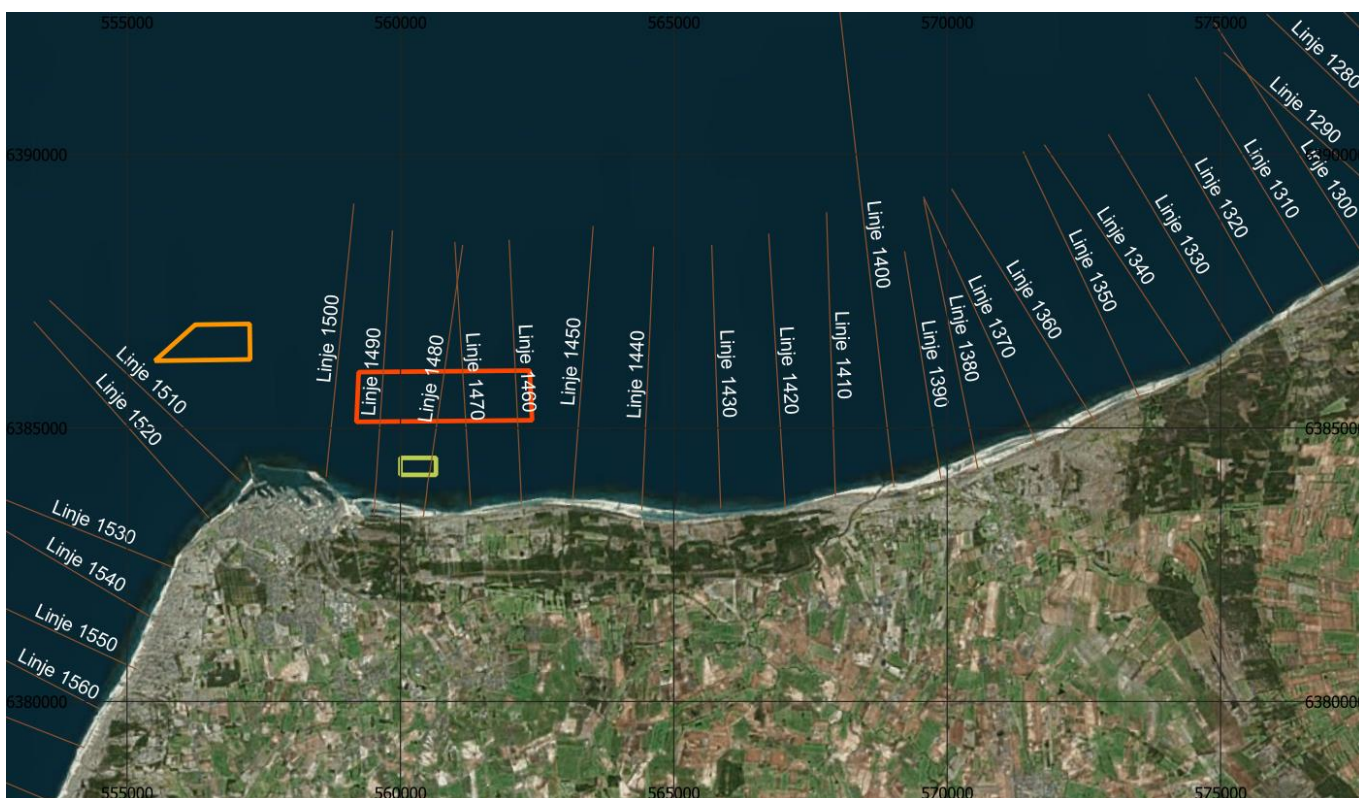
Følgende data har været tilgængelige:

- Vestkystlinjer opmålt af kystdirektoratet (1970-2023).
- Pejledata fra Hirtshals Havn (2017-2023).
- Satellitbilleder fra Sentinel 2 (2017-2023).
- Fordeling af oprensingsmængder (1999-2023).
- Luffotos (1960-2023).
- Tidligere rapporter (1994-2013).
- Den historiske og planlagte udvikling af Hirtshals Havn (1896-2027).

Disse data beskrives i de følgende underafsnit.

3.1 Vestkystlinjer opmålt af kystdirektoratet

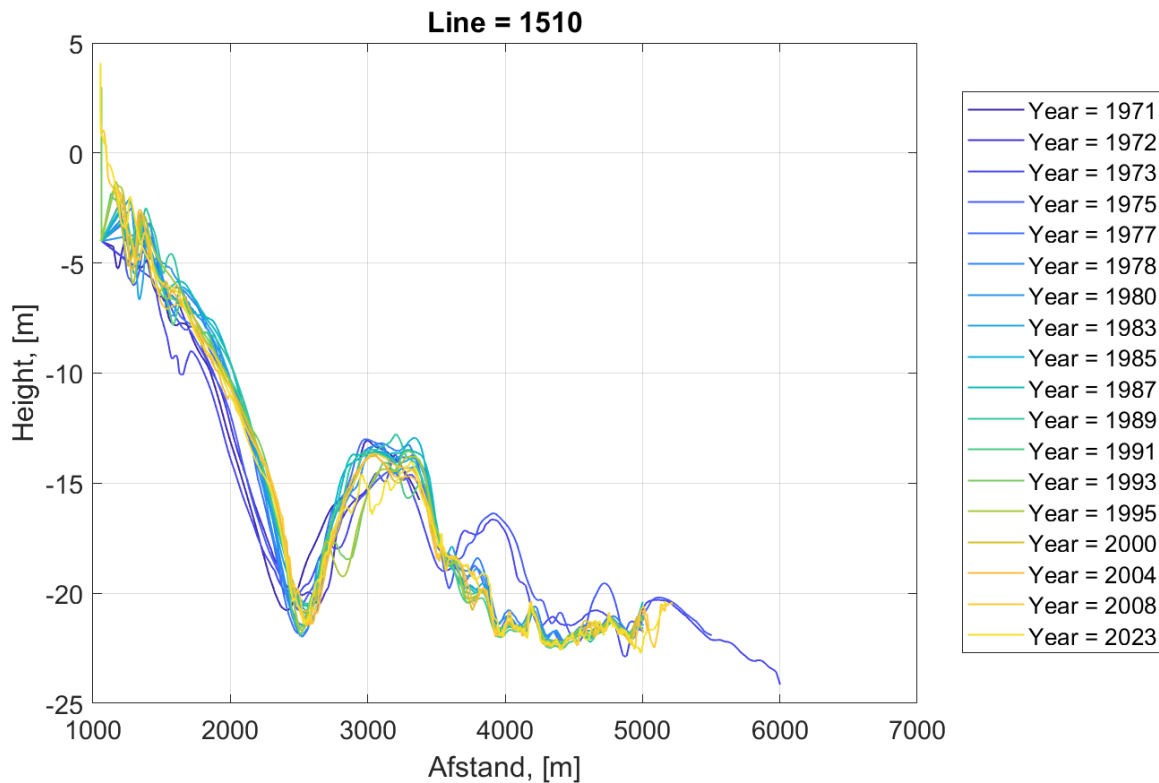
Kystdirektoratet har målt kystprofiler på vestkysten siden 1950'erne. På kyststrækningen omkring Hirtshals Havn er der målt profiler siden 1970'erne. Positionen af profilerne er vist på Figur 3-1.



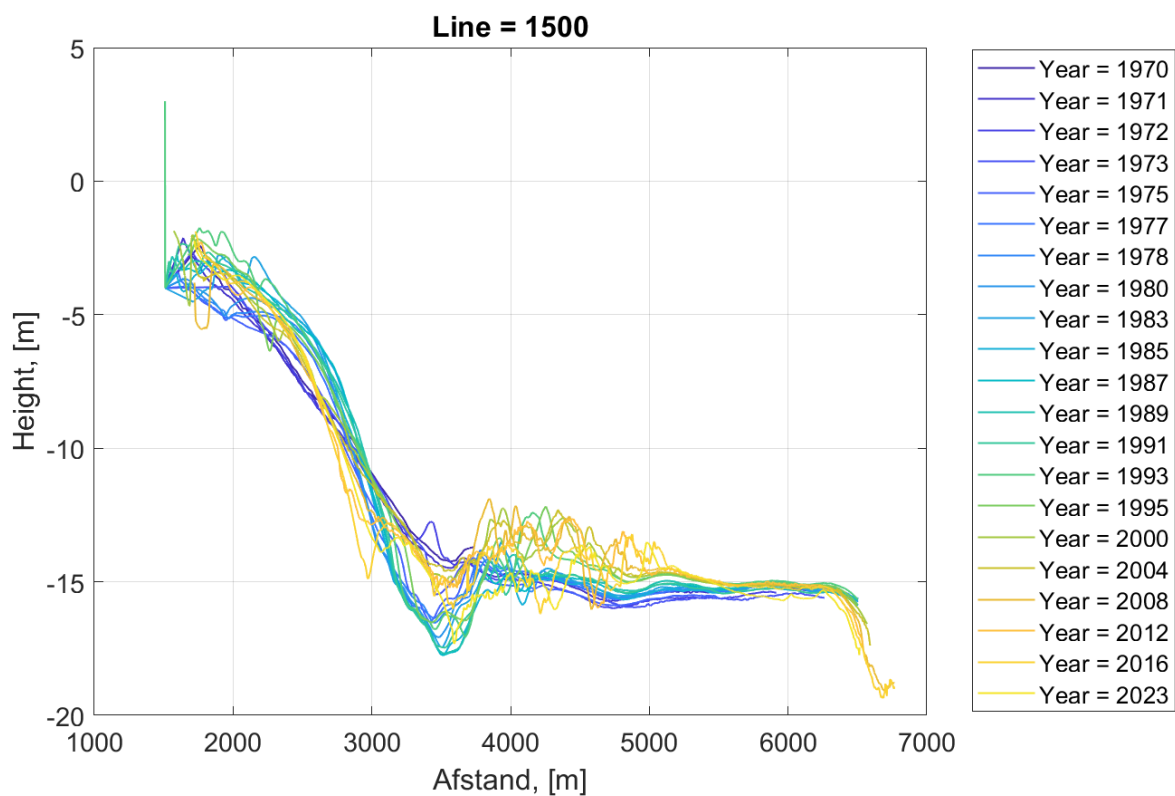
Figur 3-1: Kystprofiler målt af Kystdirektoratet omkring Hirtshals Havn. Klapplassen nordøst for havnen er vist med orange firkant, mens bypass pladsen er vist med rød firkant øst for havnen.

Linje 1510 vest for havneindsejlingen og Linje 1500 øst for havneindsejlingen er vist på Figur 3-2 og Figur 3-3. Generelt ses store bundændringer over årene i profilerne både i brydningszone og på store vanddybder. De store bundændringer er en tydelig indikation på signifikant sedimenttransport både i kystzonen (brydningszone) og på store vanddybder nordøst for Hirtshals Havn.

De resterende profiler for linjerne 1300 til 1580 ses i Bilag A.



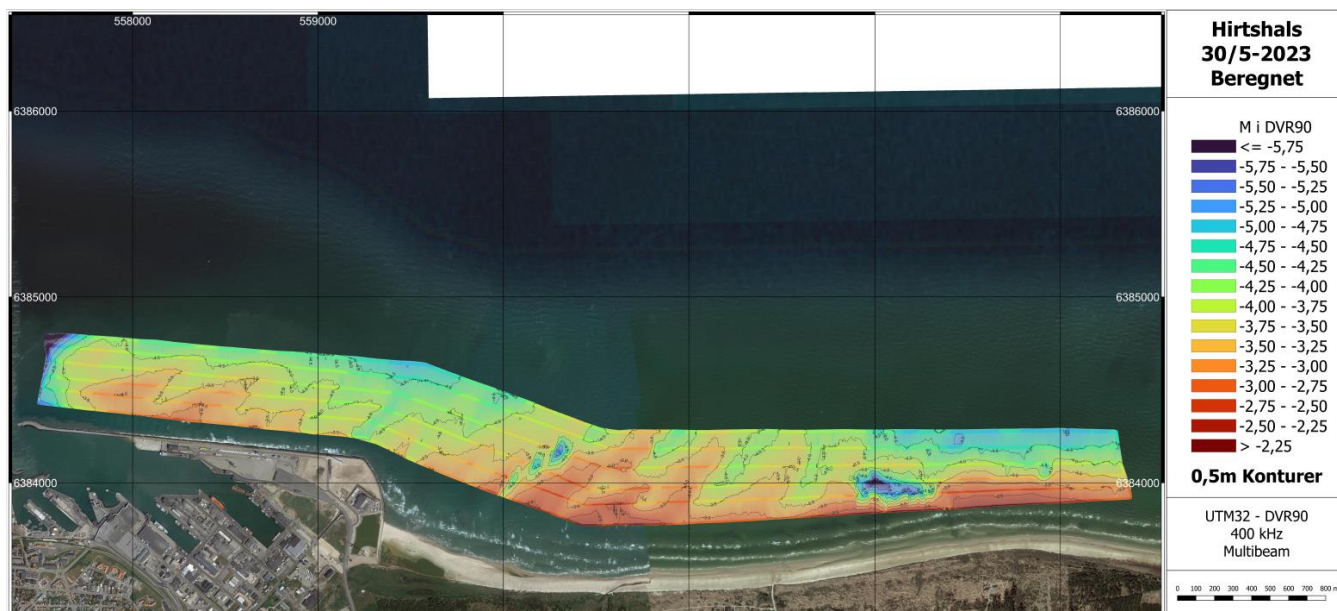
Figur 3-2: Kystprofilen linje 1510 målt vest for havnen.



Figur 3-3: Kystprofilen linje 1500 målt øst for havnen.

3.2 Søopmålingsdata fra Hirtshals Havn

Hirtshals Havn har med multibeam opmålt langs med kysten på tværs af sandbølgerne øst for havnen den 30. maj 2023. Den interpolerede bathymetri baseret på opmålingen er vist på Figur 3-4. På figuren ses sandbølgerne tydeligt med alternerende toppe og dale når man bevæger sig fra vest mod øst langs havnen og kysten.



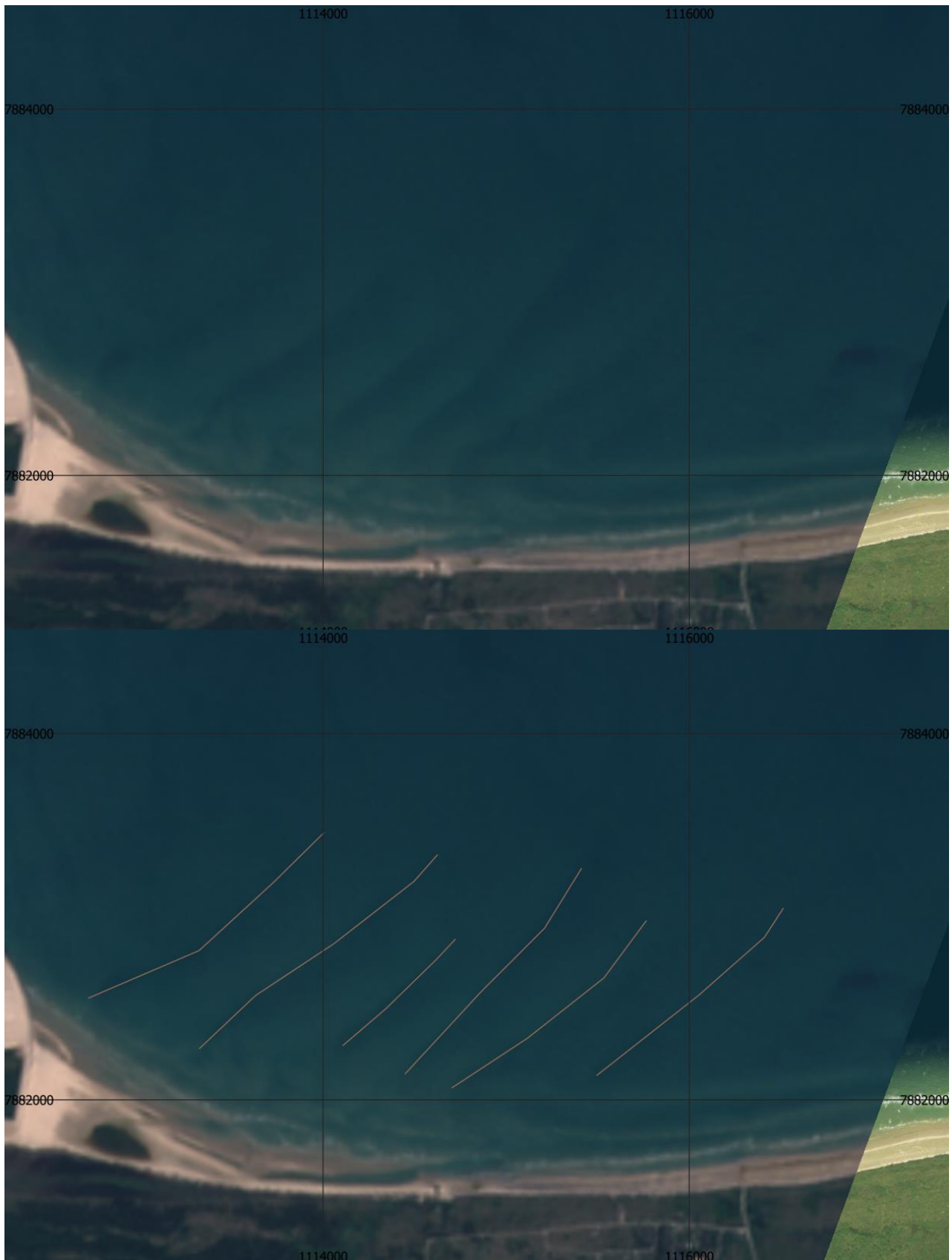
Figur 3-4: Interpoleret vanddybde fra multibeam pejling fra den 30. maj 2023.

3.3 Satellitbilleder fra Sentinel 2

DHI har rekvireret satellitbilleder fra Sentinel 2 for hvert år i perioden 2017 til 2023. Dette omkring april / maj måned.

Figur 3-5 viser billeder fra den 26. maj 2017. På hvert billede er fronter / toppe på sandbølgerne tegnet op. Ud fra de tegnede fronter er bevægelsen af fronterne estimeret. Der er dog nogen usikkerhed forbundet med dette da fronterne ikke står knivskarpt på alle billederne.

De resterende billeder kan ses i Bilag B.



Figur 3-5: Sentinel 2 billede fra den 26. maj 2017.
 Øverst: Sentinel 2 billede fra den 26. maj 2017. Nederst: Samme billede men med sandbølgefronterne tegnet op for at tydeliggøre dem.

3.4 Fordeling af oprensningmængder.

Fordelingen af oprensningmængder fra havnen for hvert år siden 1999 er modtaget som en Excel fil fra Hirtshals Havn (filnavn: Fordeling af oprensningmængder Nk 02 06 23.xlsx).

Disse data er opsummeret i det følgende:

- Data fra 1999 til 2023, dvs. 23.5 år.
- Oprensset I alt: 8.9 M m³.
- Klappet: 4.6 M m³.
- Bypass: 1.3 M m³.
- Nyttiggjort: 2.9 M m³.

Kun lidt over halvdelen af det oprensede materiale er klappet på klapplassen og denne er ikke benyttet efter 2018. Allerede i 2017 begyndte man at bruge bypass pladsen.

1999-2016

Fra 1999 til og med 2016 er der således i gennemsnit klappet omkring 265,000 m³/år på klapplassen, det lidt lavere tal i tabellen nedenfor fremkommer fordi både klapplassen og bypass pladsen blev benyttet i 2017 og 2018. Fra 1999 til og med 2016 er der samlet nyttiggjort 2.1 M m³ svarende til omkring 125,000 m³/år. I gennemsnit (1999-2016) er der oprenset 390,000 m³/år.

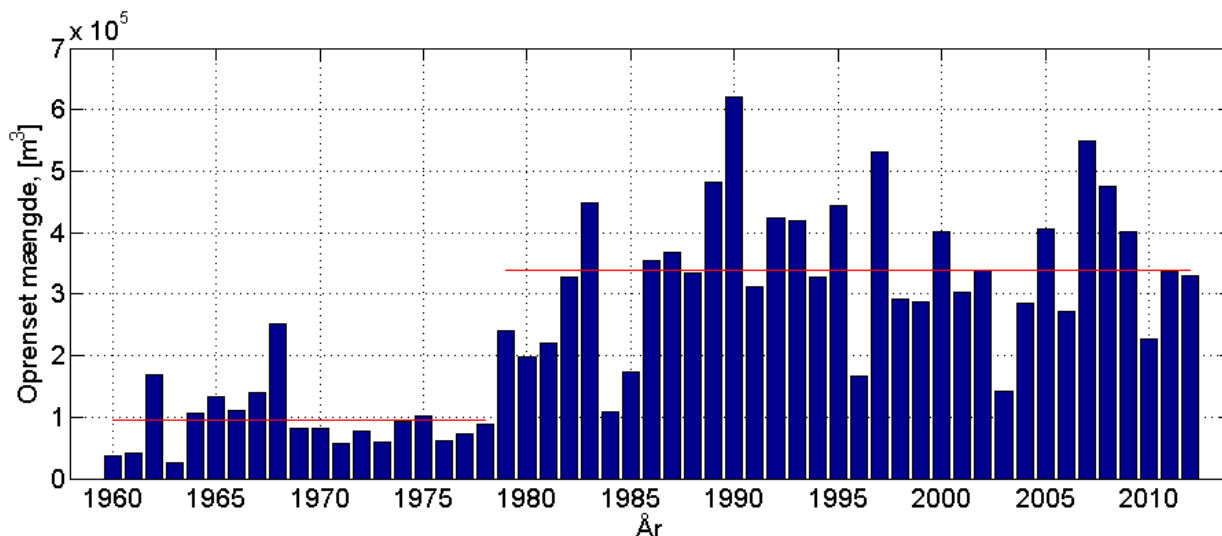
2019-2023

Siden 2018 er klapplassen ikke benyttet. I denne periode er der bypasset 215,000 m³/år og nyttiggjort 155,000 m³/år ud af en samlet oprenset mængde på 370,000 m³/år.

Tabel 3-1: Fordelingen af oprensningmængder i m³ fra 1999 til 2023, Hirtshals Havn.

Samlet oversigt			
	Klappet	Bypass	Nyttiggjort
Udførelsesår	fra 1999-2018	fra 2019-2023	1999-2023
Samlet mængde	4,681,797	1,324,388	2,924,111
Gns.mængde/år	234,090	264,878	127,135

Fra DHI (2013) findes de oprensede mængder for tidligere år, vist på Figur 3-6. Det vides pt. ikke hvordan det oprensede materiale blev fordelt inden 1999.



Figur 3-6: Oprensede mængder, fra DHI (2013).
De røde linjer viser gennemsnittet for de forskellige perioder.

3.5 Luffotos

Luffotoet vist på Figur 1-2 er fra Hjørring Kommune. Billedet viser tydeligt sandbølgerne øst for havnen. Formen på sandbølgerne på billedet indikerer ydermere, hvordan de vandrer fra vest mod øst. Helt tæt på hjørnet af den østlige bølgebryder ses mindre bundformer, der ser ud til muligvis at vandre tilbage mod vest tættere på kysten.

3.6 Tidligere rapporter

Følgende tidligere rapporter er inddraget i nærværende arbejde:

- DHI et. al. (1994): Kysten nordøst for Hirtshals Havn.
- Kystdirektoratet (2001): Sedimentbudget Vestkysten.
- DHI (2013): Hirtshals Havn, indvirkning på kysten af inddæmning.
- Kystdirektoratet (2018): Analyse af sedimenttransport ved Hirtshals havn.

DHI har benyttet de data, der er vist i ovenstående rapporter i det omfang det har været muligt til nærværende studie. Et kort resume af hver rapport gives i de følgende afsnit.

3.6.1 Kysten nordøst for Hirtshals Havn (DHI et al., 1994)

I denne rapport er det estimeret at af de 900,000 m³/år, der transporteres forbi Hirtshals Havn, tabes 650,000 m³/år på dybt vand, mens der graves 350,000 m³/år op af sejrenden. Således menes der i denne rapport at hele transporten fra syd tabes fra det kystnære sediment budget øst for havnen. Da der endvidere er vestgående bølgedrevet transport på kysten lige øst for havnen er dette skyld i den store erosion, som observeres længere mod øst.

Rapporten estimerer således, at der ikke er noget bypass forbi Hirtshals Havn.

3.6.2 Sedimentbudget Vestkysten (Kystdirektoratet, 2001)

I denne rapport er sedimentbudgettet for hele vestkysten baseret på analyser af kystprofiler samt numerisk modellering.

Transporten omkring Hirtshals Havn er specifikt beskrevet og det estimeres at hele transporten fra syd passerer forbi Hirtshals Havn. Det er dog uklart hvorvidt denne transport kommer ind på kysten øst for havnen, eller blot passerer forbi på dybere vand.

3.6.3 Hirtshals Havn, indvirkning på kysten af inddæmning (DHI, 2013)

I denne rapport er der ikke nogen nye informationer vedrørende sedimenttransporten omkring havnen.

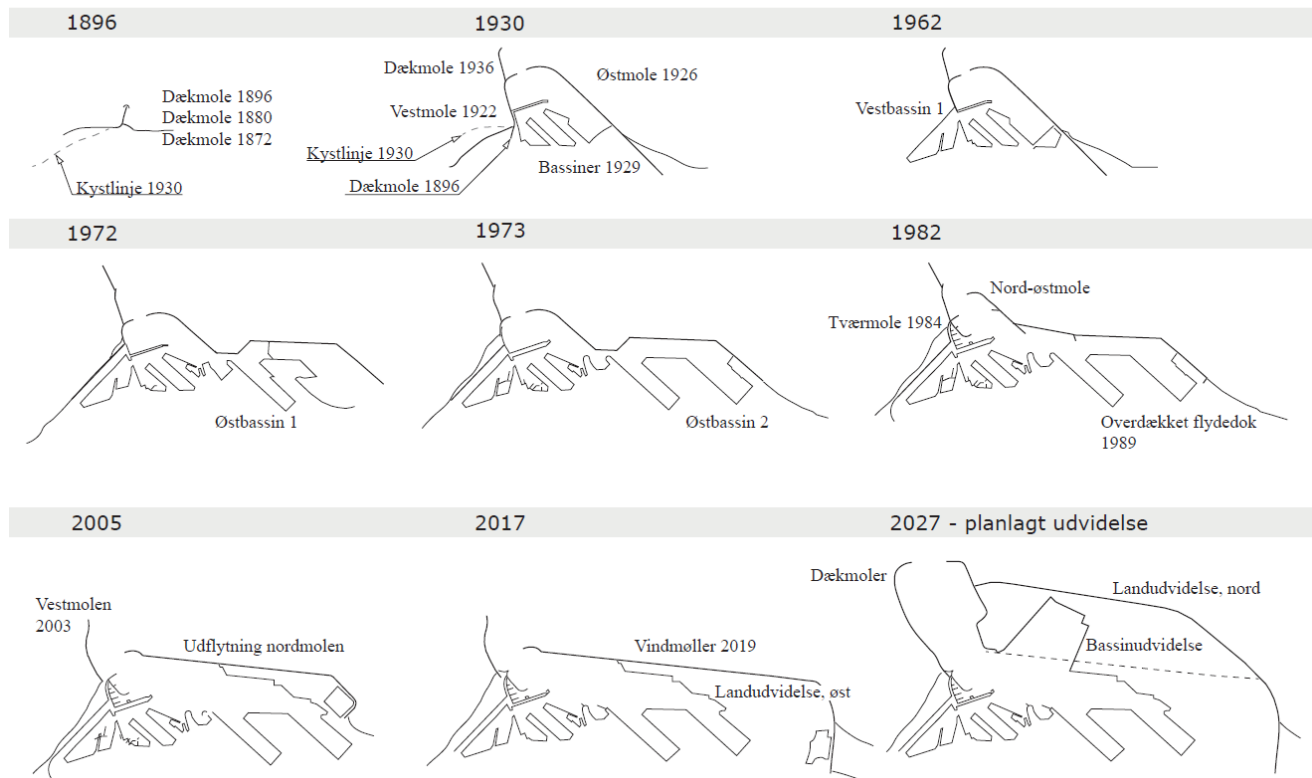
3.6.4 Analyse af sedimenttransport ved Hirtshals Havn (Kystdirektoratet, 2018)

I denne rapport analyserer Kystdirektoratet positionen af skræntfoden øst for havnen og konkluderer at kysten har været stabil siden 1898 samt at Hirtshals Havn har været en medvirkende faktor til den stabile kyst øst for havnen (set over lang tid, på kort sigt varierer positionen af skræntfoden).

3.7 Historiske udvikling af Hirtshals Havn

Den historiske udvikling af Hirtshals Havn er vist på Figur 3-7. Det ses at havnen er udviklet af mange omgange over de sidste 90 - 100 år. Ved hver af disse konstruktive ændringer har havbunden skulle tilpasse sig og finde en ny ligevægt, dette analyseres nærmere i afsnit 6.8.3.

Hirtshals Havn - Historisk udvikling



Figur 3-7: Den historiske udvikling af Hirtshals Havn, fra Hirtshals Havn.

4 Analysemetoder og numeriske modeller

Nærværende studie benytter en kombination af dataanalyse og numeriske modeller til at etablere et sedimentbudget omkring Hirtshals Havn. I det følgende afsnit beskrives analysemetoderne samt de numeriske modeller, der efterfølgende benyttes.

Opdraget til studiet består af følgende:

- **Opgave 1:** Analyse af sandbølgebevægelser (migration og tidsskala herfor).
- **Opgave 2:** Analyse af vestkystlinjer samt opmålt profil på tværs af sandbølgefronterne til estimering af sandvolumen der transporteres i sandbølgerne.
- **Opgave 3:** Analyse af kystlinjer og vegetationslinjer.
- **Opgave 4:** Etablering af samlet sedimentbudget for både sandbølger og kystlinjen.
- **Opgave 5:** Effekten af havneudvidelsen på sedimentbudgettet.

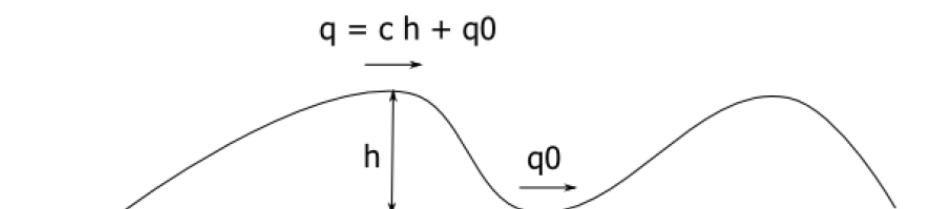
I det følgende beskrives metoderne, der er benyttet for hver opgave.

4.1 Opgave 1: Analyse af sandbølgebevægelser

Analysen af sandbølgebevægelserne har til formål at bestemme følgende:

- Migrationshastigheden (vandingshastighed) på sandbølgerne.
- Bredden af sandbølgerne.
- Højden af sandbølgerne.

Grunden til at vi gerne vil kende disse parametre er at disse kan omsættes til hvor meget sediment, der transporteres via vandringen af sandbølgerne. Figur 4-1 viser et snit gennem en sandbølge og viser sammenhængen mellem sandtransporten, q , vandingshastigheden, c og højden, h . Idet q angiver transporten i et snit langs den vandrende sandbølge, dvs. transport per meters bredde, af sandbølgen, skal vi også kende bredden b for at kunne bestemme det samlede volumen sand $Q = b \cdot q$ der transporteres.



Figur 4-1: Lodret snit gennem en vandrende sandbølge.

q er transporten af sand på toppen af sandbølgen og q_0 er transporten af sand i bunden / truget af sandbølgen. c er migrationshastigheden, h er højden.

På de rekvirerede Sentinel 2 satellitbilleder blev fronterne / toppene tegnet op og migrationen per år mellem de forskellige billeder blev estimeret. I Bilag B ses alle billeder med og uden fronter tegnet på. Figur 4-2 viser alle sandbølgefronter.

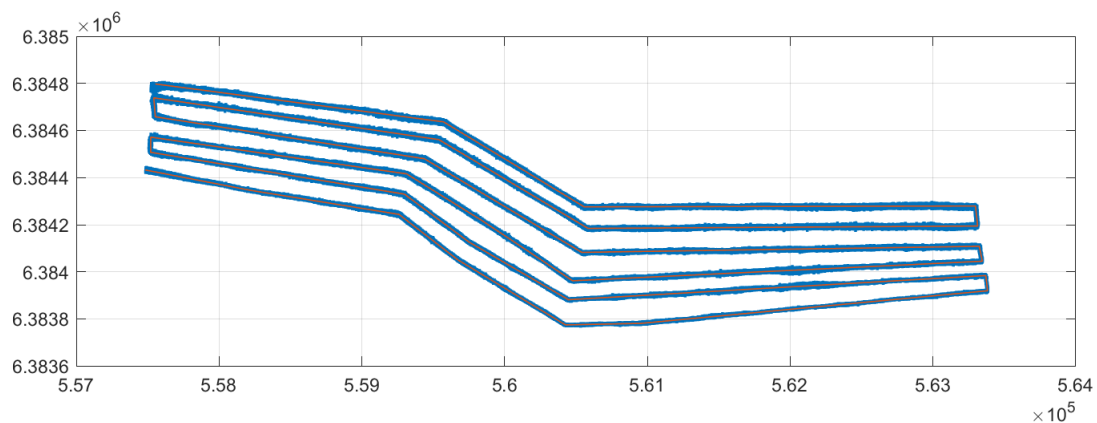


Figur 4-2: Alle sandbølgefronter fra årlige billeder i perioden 2017-2023. Afstanden mellem de to gule prikker er 600 m. De fleste af de optegnede fronter er således lidt længere end 600 m, men 600 m er konservativt valgt som bredde af sandbølgerne.

4.2 Opgave 2: Analyse af opmålt profil på tværs af sandbølgefronterne og vestkystlinjer

4.2.1 Analyse af opmålt profil på tværs af sandbølgefronter

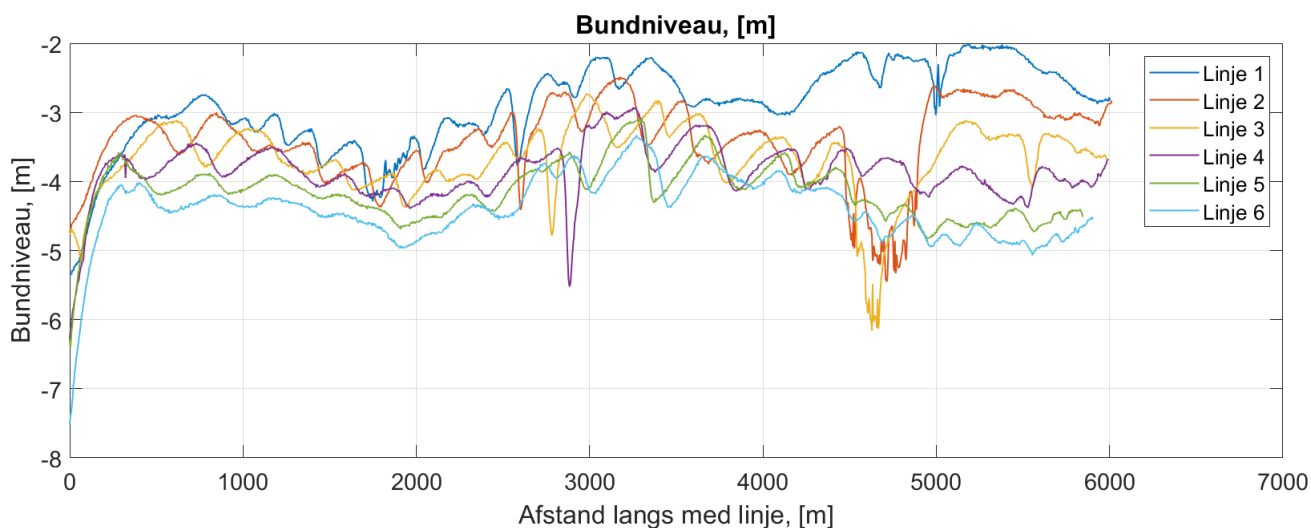
Til at estimere højden af sandbølgerne blev multibeam pejlingen (vist på Figur 3-4) analyseret. Først blev multibeam data interpoleret ind på de røde linjer, der svagt kan ses inde i de blå linjer på Figur 4-3.



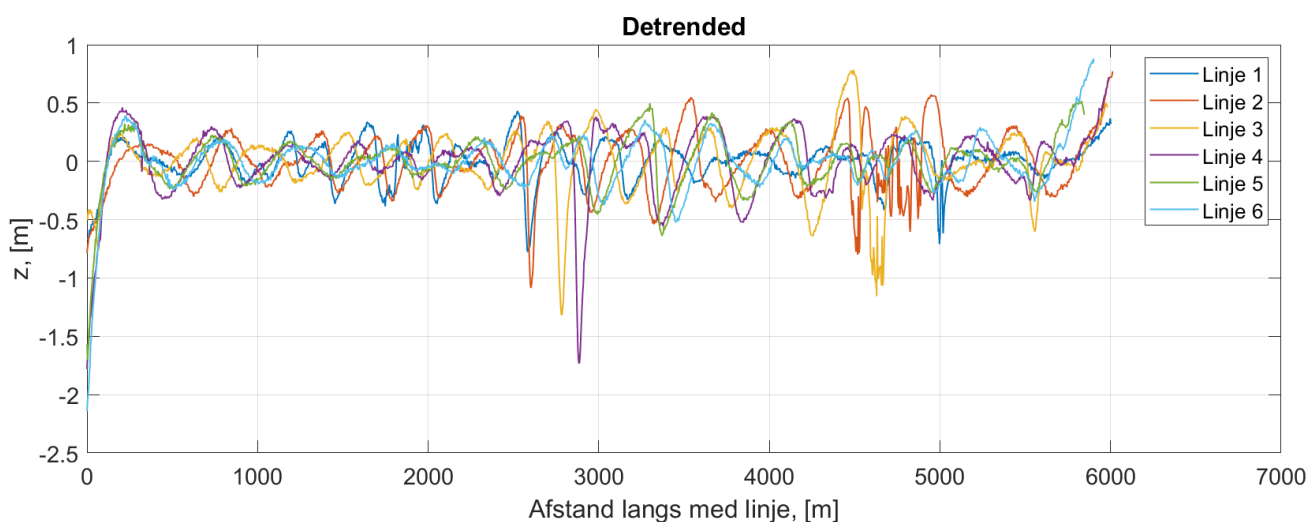
Figur 4-3: Multibeam data (blå prikker) blev interpoleret ind på den røde linje.

Bundniveauet langs linjerne fra vest mod øst er tegnet op på Figur 4-4.

Lange variationer i bundniveauet kan fjernes ved hjælp af FFT-analyse, herved findes det "de-trendede" signal, som er vist på Figur 4-5. Her er alle bølgelængder i signalet over 500 m samt underliggende hældninger på profilerne filtreret fra, hvormed højden på sandbølgerne nemt kan identificeres.



Figur 4-4: Bundniveau langs med linje defineret i Figur 4-3.



Figur 4-5: Afgang af bundniveau fra trend.

4.2.2 Analyse af vestkystlinjer

Vestkystlinjerne opmålt af Kystdirektoratet er analyseret ved at beregne sedimentvolumenet i hvert profil mellem følgende dybder:

- $z_1 = +5$ m,
- $z_2 = -7$ m og
- $z_3 = -12$ m.

Niveauerne er valgt dels ved visuel inspektion af profilerne (+5 m og -12 m), og dels ved at estimere closure depth, som er den dybde som de bølgedrevne kystprocesser normalt påvirker kystprofilen ud til. Til beregning af closure depth er benyttet en tidsserie af bølger (1995 til 2018) trukket ud fra DHI's metocean on demand hindcast database.

Langs det meste af vestkysten kan closure depth fastlægges ved at analysere de målte profiler og se på hvor langt ud signifikante ændringer i profilet kan observeres. Dette virker ikke på kysten øst for Hirtshals pga. ændringer fra blandt andet sandbølger, som mudrer billedet.

Derfor er i stedet benyttet udtrykket fra Hallermeier (1981):

$$D_{clid} = 2.28 \times H_{s,12 \text{ hr/yr}} - 68.5 \times \frac{H_{s,12 \text{ yr/hr}}^2}{g \times T_s^2}$$

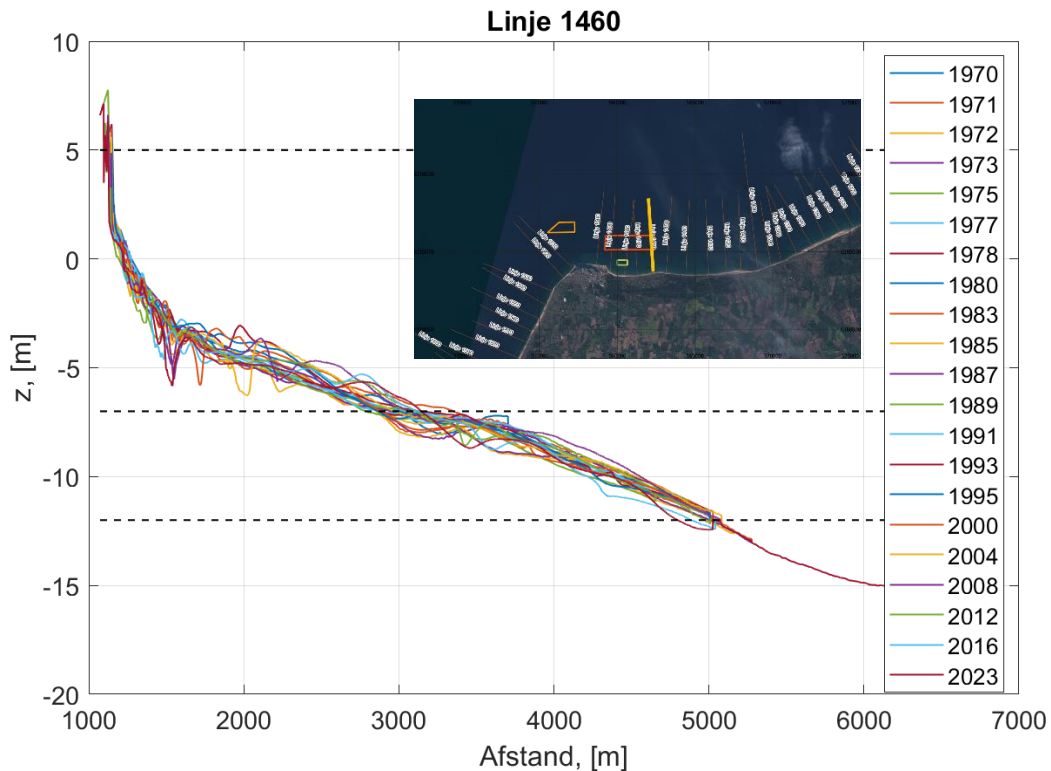
Hvor D_{clid} er closure depth, $H_{s,12 \text{ hr/yr}}$ er den bølgehøjde der overstiges i 12 timer per år, T_s er den tilhørende peak periode og g er tyngdeaccelerationen.

Med ovenstående udtryk finder vi closure depth til mellem 6 m og 7 m for kysten øst for Hirtshals Havn (vest for havnen findes omkring 9 m). Konservativt sættes closure depth til 7 m i det følgende.

En øgning af profilvolumen er et udtryk for, at der er aflejring af sediment på profilet mellem de valgte bundniveauer, men en reduktion af profilvolumen er et udtryk for erosion af sediment mellem de to bundniveauer.

Ideelt set vælges dybderne der integreres mellem således at der ikke er bundformer på de valgte dybder. Det er dog ikke muligt på kysten øst for Hirtshals Havn pga. interaktionen mellem sandbølger og kystnære revler.

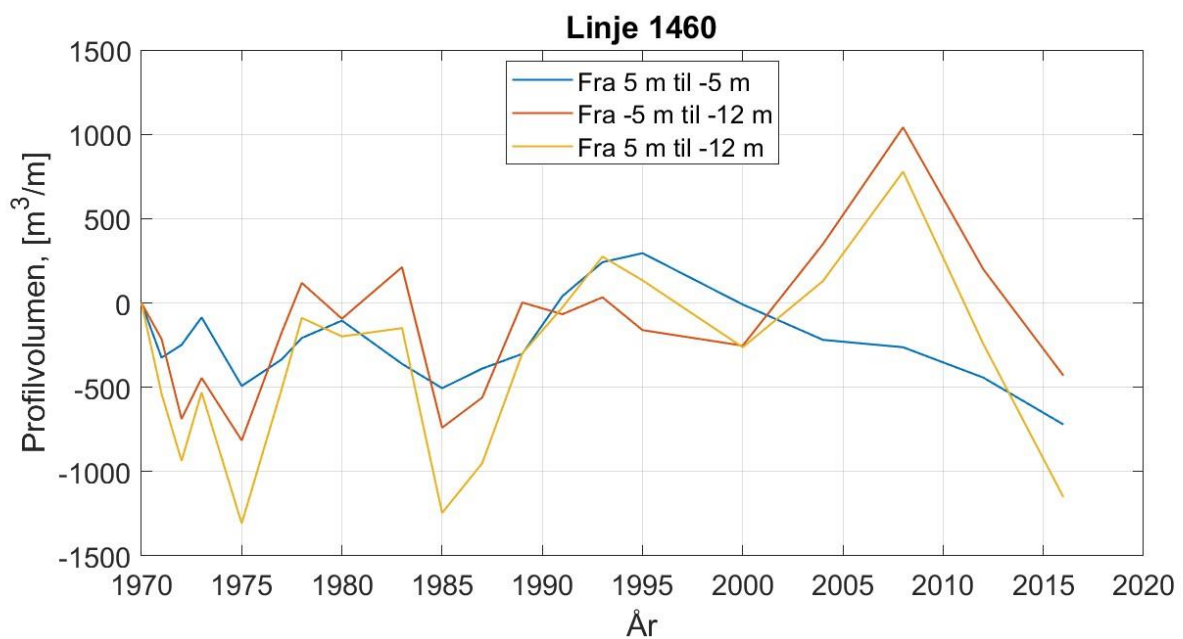
Et eksempel er vist for linje 1460 i figur 4-6. Som det ses går ikke alle de målte profiler ud til samme dybde. For steder i et givet profil, hvor der mangler målte bundniveauer, er middelniveauet (for de år hvor der findes data) indsat på det pågældende sted i profilet inden analysen er lavet.



Figur 4-6: Målte kystprofiler for linje 1460 med de tre dybder z_1 , z_2 og z_3 indikeret med stiplede linjer.

Den gule linje på den indsatte figur viser positionen af profilet.

For hver profilinje beregnes herefter ændringen i profilvolumen fra det først år, et eksempel er vist på Figur 4-7.



Figur 4-7: Ændringen i profilvolumenet for linje 1460.

4.3 Opgave 3: Analyse af kystlinje- og vegetationslinje positionen

I DHI (2013) blev en analyse af kystlinjerne fra 1960 frem til 2013 præsenteret. Den nuværende analyse bygger videre på det forrige studie, idet er kystlinjerne fra 2017-2023 er blevet tilføjet. Endvidere er vegetationslinjerne også digitaliseret og alle de til gængelige ældre billeder er medtaget i analysen. Dermed kan effekten af den seneste udvidelse af havnen også kvantificeres i forhold til den observerede effekt på kystlinje-positionen. Kystlinje-positionen er her defineret som vandlinjen.

Det bemærkes at kystlinje-positionen kan være meget dynamisk, idet den ændrer position pga. forskelle i vandstand og i formen på kystprofilet. Det er derfor tilstræbt at udvælge data fra samme årstid (så data fra vinter profiler ikke sammenlignes med data fra sommerprofiler) og fra tidspunkter hvor vandstanden er ca. 0 m MSL.

Vegetationslinjen er noget mere stabil end kystlinjen og derfor er den også medtaget i analysen.

4.4 Opgave 4: Etablering af samlet sedimentbudget for både sandbølger og kystlinjen

Til etablering af et samlet sedimentbudget omkring Hirtshals Havn for både sandbølger og kystlinjen er benyttet en kombination af dataanalysen beskrevet i de forrige afsnit og numerisk modellering.

Den numeriske model, der er benyttet, er den samme MIKE 3 FM model, som er beskrevet i DHI (2023) og tidligere har været benyttet til spredningsberegninger af sedimentfaner i forbindelse med gravearbejdet for den nye havn. Der er lavet 2 ændringer i modellen i forhold til DHI (2023):

- Beregningsnettet er for den nuværende havn.
- Der benyttes en sandtransport model (MIKE 3 FM Sand Transport Module) i stedet for muddertransportmodellen Mud Transport Module.

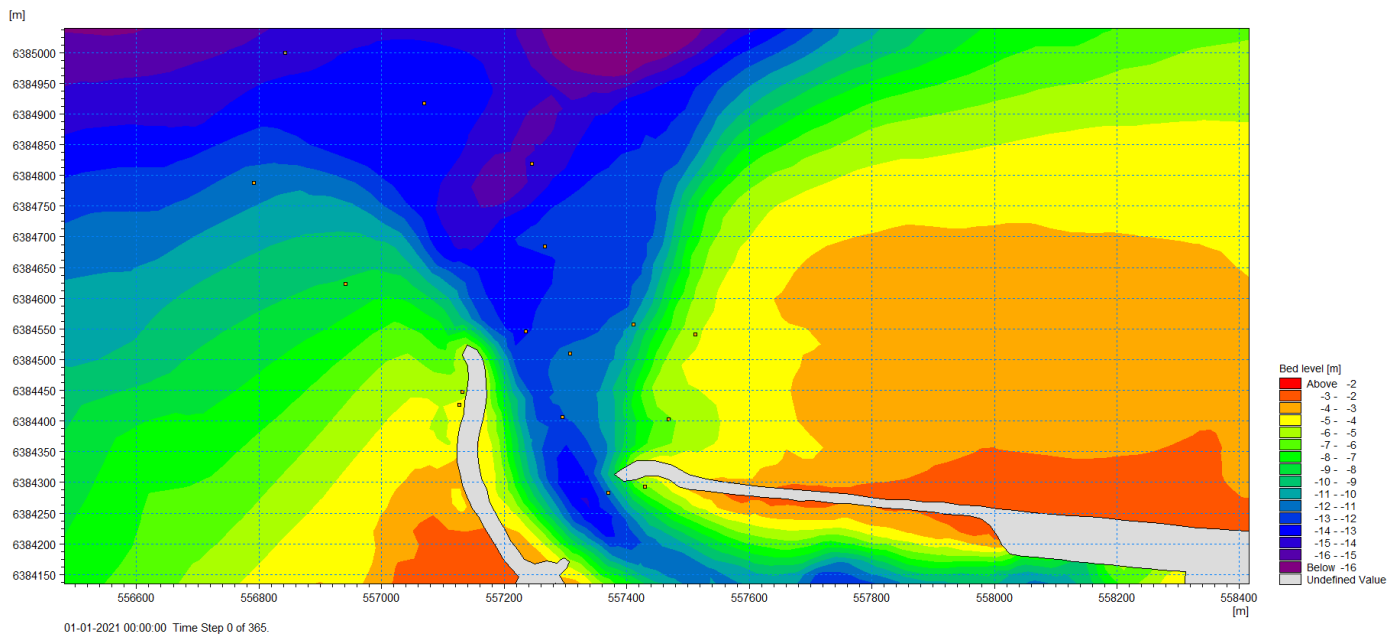
Simuleringsperioden er den samme, dvs. modellen simulerer et helt år, fra den 1. januar 2021 til den 1. januar 2022.

Sandtransporten er beregnet under antagelse af sand med en median diameter på $d_{50} = 0.2$ mm og en geometrisk standardafvigelse på $\sigma_g = 1.3$.

I modellen benyttes DHI's sandtransportmodel STP, der kan bruges til at beregne kvasi-3D sediment transport i og udenfor brydningszonen. Modellen blev anvendt med henblik på at reproducere de processer, der styrer vandringen af sandbølger bedst muligt. I den forbindelse er effekter af understrømme i brydningszonen, som typisk er involveret i revledannelse på lavere vanddybder, ikke medtaget i beregningerne. Denne tilnærmelse vurderes plausibel og understøttes af kontrol-beregninger, hvor effekten af understrøm blev inkluderet, og som viste sig at give resultater, der ikke afviger markant fra beregningerne uden disse effekter.

I modellen opdateres bunden hver time på basis af de beregnede gradienter i sand transporten.

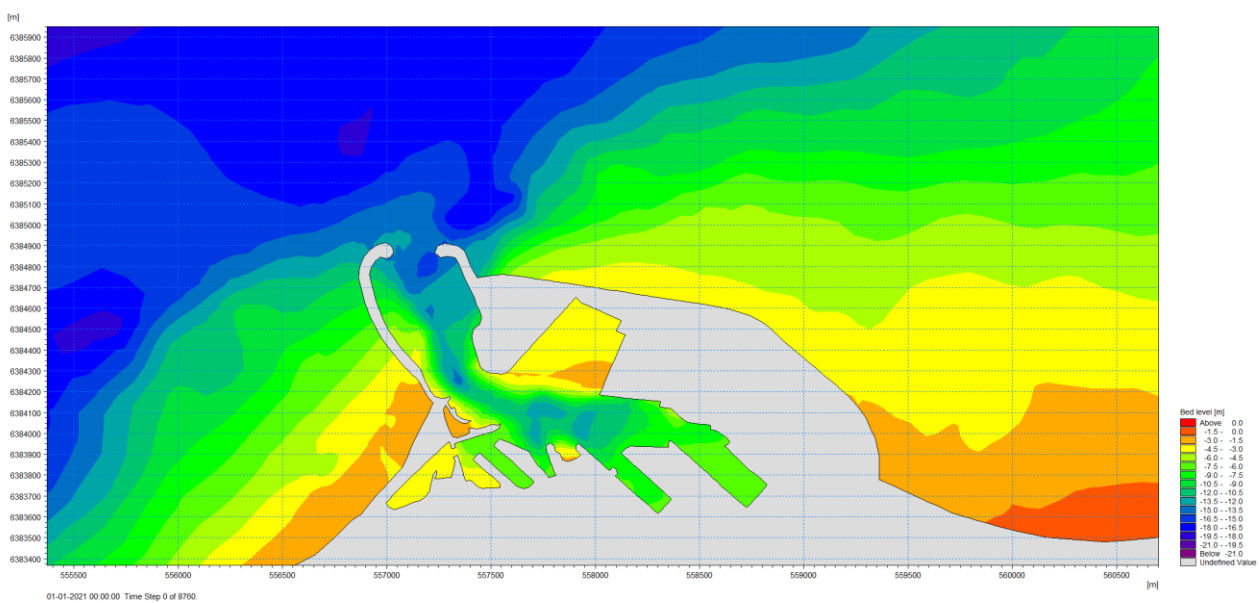
Modellen antager at der er rigeligt med sand til rådighed for transporten. Dette passer i langt størstedelen af domænet med de observerede profiler, der også indikerer at der er masser af sand, som kan transporteres.



Figur 4-8: Vanddybden omkring havneindsejlingen i først tidskridt.

4.5 Opgave 5: Effekten af havneudvidelsen på sedimentbudgettet

Til estimering af effekten af havneudvidelsen på sedimentbudgettet omkring havnen benyttes den numeriske model som er beskrevet i Opgave 4, men med den forskel at beregningsnettet inkluderer den nye havn som vist på Figur 4-9.



Figur 4-9: Vanddybden omkring havneindsejlingen for den nye havneudvidelse.

Simuleringsperioden er den samme 1-års periode som i Opgave 4, dvs. kalenderåret 2021.

Resultaterne analyseres således at estimater for effekten af havneudvidelsen på sedimentbudgettet omkring havnen og dermed på de hosliggende kystlinjer kan kvantificeres. Resultaterne præsenteres i afsnit 6.6.

4.6 Opgave 6: Effekten af havneudvidelsen på kysten øst for havnen

I denne opgave benyttes modellen beskrevet i afsnit 4.5 med modifikationerne beskrevet i afsnit 6.7.

4.7 Opgave 7: Effekten af havneudvidelsen på morfologien omkring havnen

I denne opgave benyttes ligeledes modellen beskrevet i afsnit 4.5 med modifikationerne beskrevet i afsnit 6.8.

5 Validering af analysemetoder og numerisk model

I dette afsnit beskrives hvorledes analysemetoderne er valideret.

5.1 Validering af sandbølgebevægelser

Den største usikkerhed i analysen af sandbølgebevægelserne er at satellitbillederne ikke er helt tydelige og sandbølgenes fronter derfor kan være svære at bestemme. For at sikre at de fronter, der er estimeret fra billederne rent faktisk repræsenterer sandbølger, er toppene af de målte sandbølger optegnet ovenpå det seneste satellitbillede med sandbølger på Figur 5-1.

Det ses at mønstret i sandbølgerne kan genfindes i formationen af punkter, hvor analysen af pejlingen fandt sandbølgetoppe, og på billedet nedenunder. Dette viser at de former der er estimeret fra billederne med stor sikkerhed netop er sandbølger.



Figur 5-1: Toppe af sandbølger målt den 30. maj 2023, tegnet op på satellitbillede fra den 14. maj 2023.

5.2 Validering af kystlinjeanalyse

Til at validere kystlinjeanalysen er kystlinjepositionen fra Kystdirektoratets profiler fra 2008 tegnet op sammen med kystlinjepositionen på Figur 5-2. Det ses at kystlinjepositionen estimeret fra billedet stemmer overens med kystlinjepositionen estimeret fra kyst-profilerne på nær ved udløbet af åen, hvilket kan skyldes at området omkring å-udløbet er meget dynamisk.



Figur 5-2: Sammenligning mellem kystlinje-position estimeret fra orto-foto fra 2008 og kyst-profiler fra 2008.

Baggrundsbilledet er orto-fotoet fra 2008. Den røde linje er kystlinje-positionen og de røde punkter er positionen bestemt ud fra vestkystlinjerne.

5.3 Validering af sandtransportmodel

Validering af sandtransportmodellen er foretaget ved at beregne sandtransporten for året 2021 og sammenligne oprensingsmængderne fra havneindsejlingen for 2021 med mængder og arealmæssig fordeling af depositionen i modellen i samme periode.

Ud fra fordelingen af de oprensingsmængder som havnen har oplyst, findes den samlede oprensede mængde i 2021 til ca. 250,000 m³, se Tabel 5-1.

Tabel 5-1: Fordelingen af oprensede mængder for 2021.

Se Figur 3-1 for placering af klappladsen og by-pass pladsen.

2021	Klapplads	By-pass plads	Lønstrup	I alt
Januar		102,986		102,986
Marts			29,208	29,208
April			120,710	120,710
I alt		102,986	149,918	252,904

Figur 5-3 viser det initiale og endelige bundniveau for simuleringen. Der ses en signifikant aflejring i den vestlige side af indsejlingskorridoren, men også en mindre aflejring i den østlige side tæt på bølgebryderen. Ændringerne i bundniveauet i løbet af simuleringen er vist på Figur 5-4.

Hvis aflejringen i de tre viste områder summeres, findes følgende:

Akkumulering i område 1: 330,000 m³

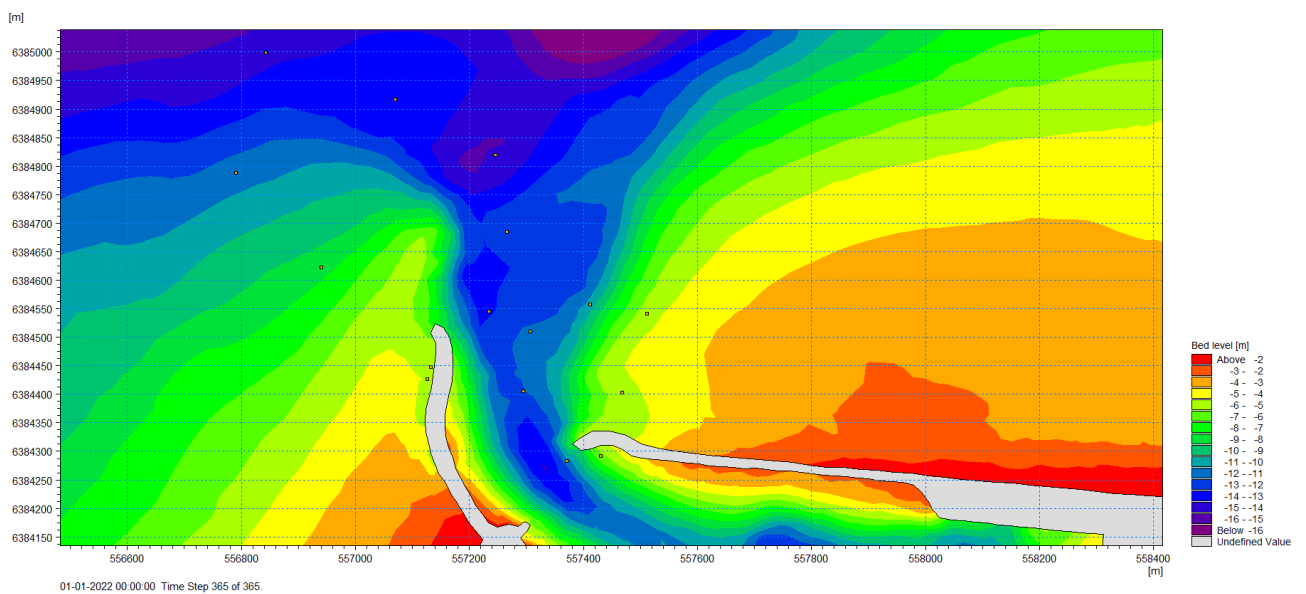
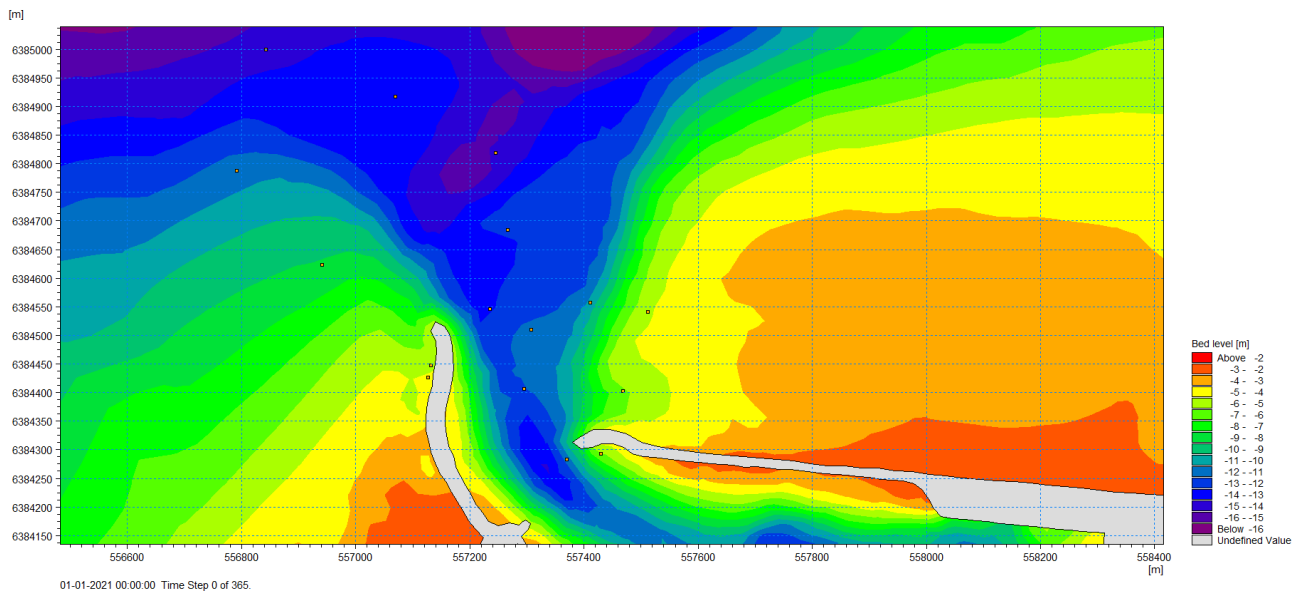
Akkumulering i område 2: 30,000 m³

Erosion i område 3: 230,000 m³

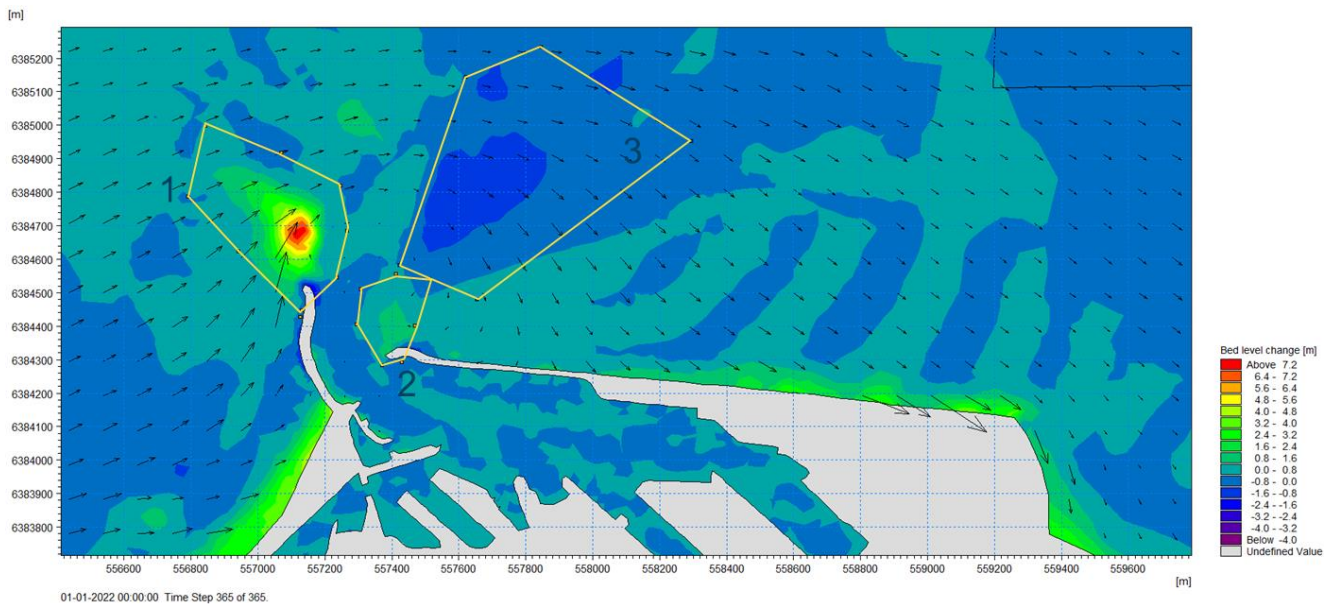
Det ses således at modellen simulerer samlet aflejring på omkring 360,000 m³/år, hvilket er ca. 50% større end det opgravede volumen på 250,000 m³, men ca. svarende til det gennemsnitlige oprensningensvolumen. Således kan det simulerede år 2021 repræsentere et gennemsnitligt år for perioden. Der benyttes således ikke nogen korrektionsfaktor fra de simulerede transporter til den gennemsnitlige transporter.

Erosionen, som modellen simulerer i område 3, ses ikke i målingerne. Dette kan skyldes at modellen ikke er initialiseret/"varmet op", dvs. bunden i området ikke helt er i ligevægt med forceringen fra bølger og strøm. En test med en initialiseret/opvarmet model (1 års initialisering/opvarmning) viser at erosionen i område 3 falder til 150,000 m³, mens aflejringer i de to andre områder er det samme som for den ikke initialiserede/opvarmede model.

Det bemærkes at aflejringen langs med bølgebryderne sker da modellen ikke inkluderer "return current" og "undertow", hvilket er vigtige processer tæt på strukturer og kystlinjen. Dette betyder dog ikke noget for den overordnede validering af modellen.



Figur 5-3: Bundniveauer (initial og efter 1 års simulering).
 Top: Initial bundniveau ud for havneindsejlingen. Bund: Bundniveau efter 1 års simulering.



Figur 5-4: Ændringer i bundniveau i løbet af simuleringen.

6 Analyseresultater

I dette afsnit præsenteres resultaterne fra de gennemførte analyser.

6.1 Opgave 1: Sandbølgebevægelser

Analysen af sandbølgebevægelserne for perioden 2017 til 2023 og det opmålte profil viser følgende:

- Migration / vandringshastighed: $c = 140 \text{ m/år}$.
- Sandbølgehøjde: $h = 1 \text{ m}$.
- Bredde på fronter: $\sim 600 \text{ m}$.
- Materialetransport i sandbølger = $140 \text{ m/år} * 1 \text{ m} * 600 \text{ m} = 84,000 \text{ m}^3/\text{år}$.

Dette er kun transporten i sandbølgebevægelserne. Da sandbølgerne er relativt flade og lave vil der være sandtransport i trugene og dermed vil den samlede transport være større som det vises i afsnit 6.5.

Sandbølgerne ses de første 5 km af kystlinjen øst for havnen. Idet sandbølgerne bevæger sig med 140 m/år , vil det tage 35 år for en sandbølge at vandre fra havnen til den østlige ende af sandbølgefeltet.

Ændringer i morfologien af sandbølgerne vil således tage omkring 30 år før de når fra havnen til den østlige ende af sandbølgefeltet.

6.2 Opgave 2: Analyse af opmålt profil på tværs af sandbølgefronterne og vestkystlinjer

6.2.1 Analyse af opmålt profil på tværs af sandbølgefronter

Resultatet af analysen af profilet på tværs af sandbølgefronterne (på langs af sandbølgerne) er at sandbølgehøjden er ca. 1 m.

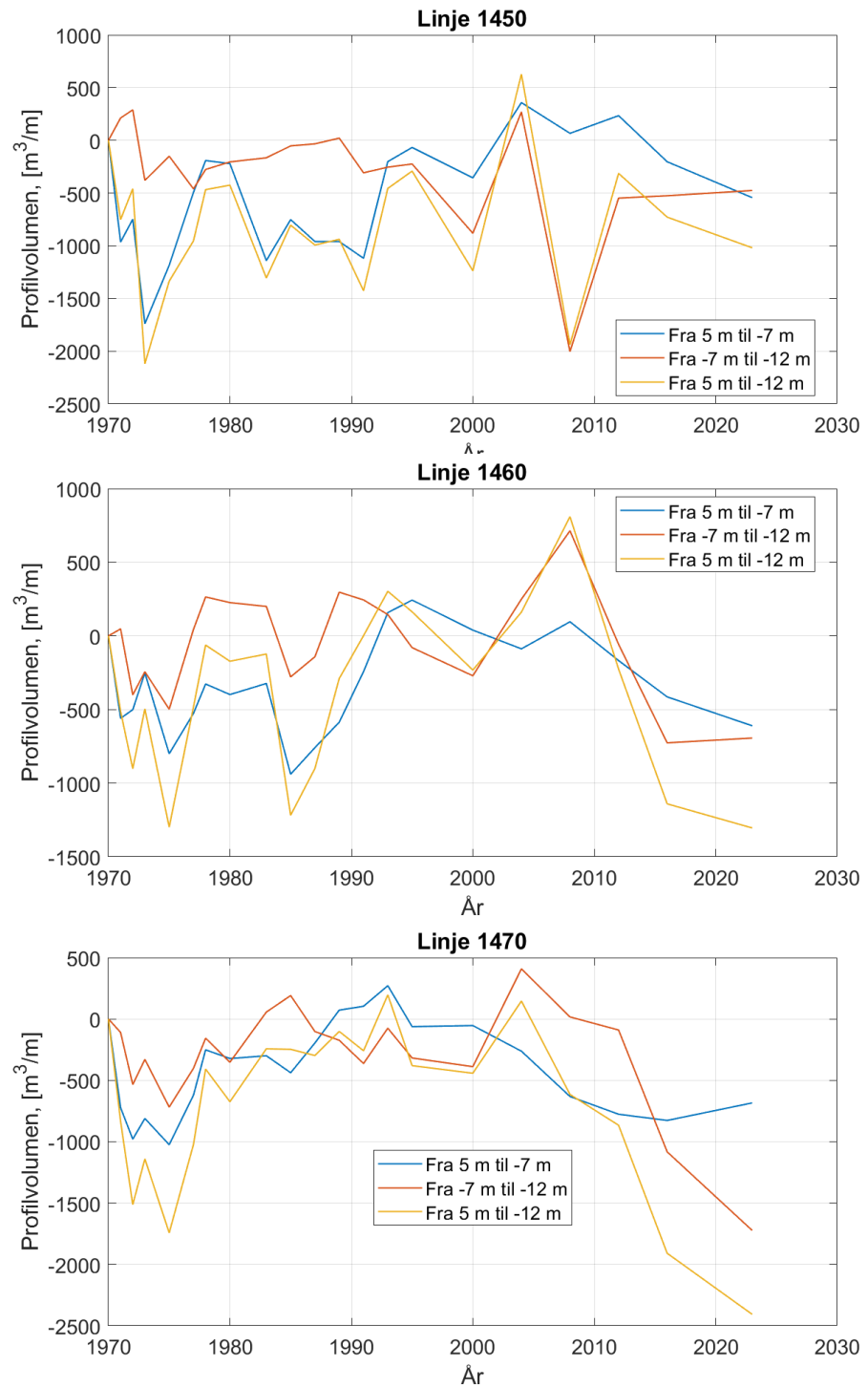
6.2.2 Analyse af vestkystlinjer

Ændringen i profilvolumenet mellem niveauerne:

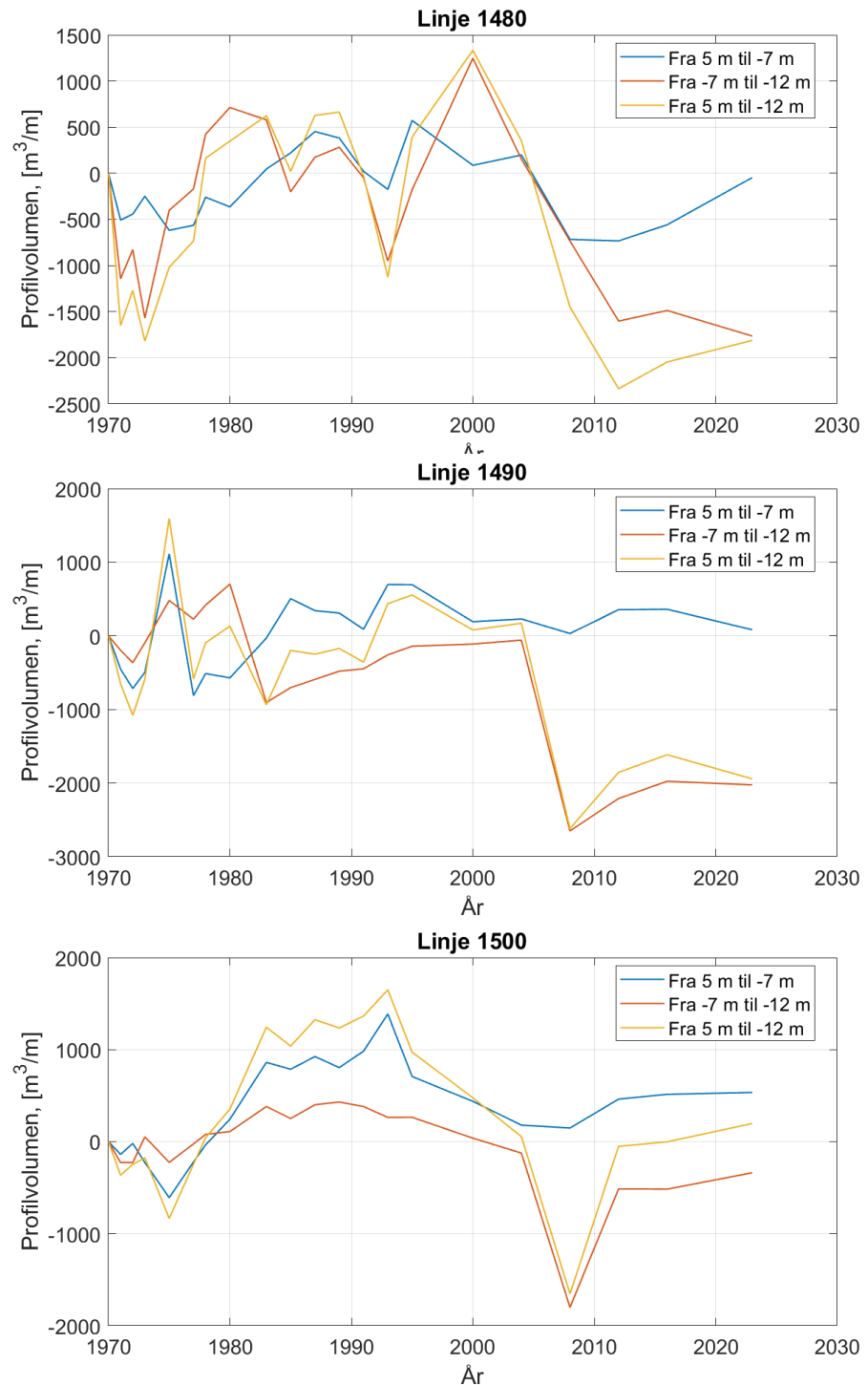
- $z_1 = +5 \text{ m}$,
- $z_2 = -7 \text{ m}$ og
- $z_3 = -12 \text{ m}$

er beregnet for alle profiler (linje 1300-1480). På profil 1500 er der meget store ændringer på bundniveauet dybere end 12 m, og disse profiler er derfor analyseret på den anden måde som beskrevet nedenfor.

For profil 1450-1500 ses variationen i profilvolumenet på Figur 6-1 og Figur 6-2. Der ses store tidlige variationer i volumenet, især mellem bundniveauerne -7 m og -12 m. I profilerne tættest på havnen (profiler 1500-1470) ses en tydelig tendens til erosion efter midten af 1990'erne.



Figur 6-1: Variationen i profilvolumenet for linje 1450, 1460 og 1470.

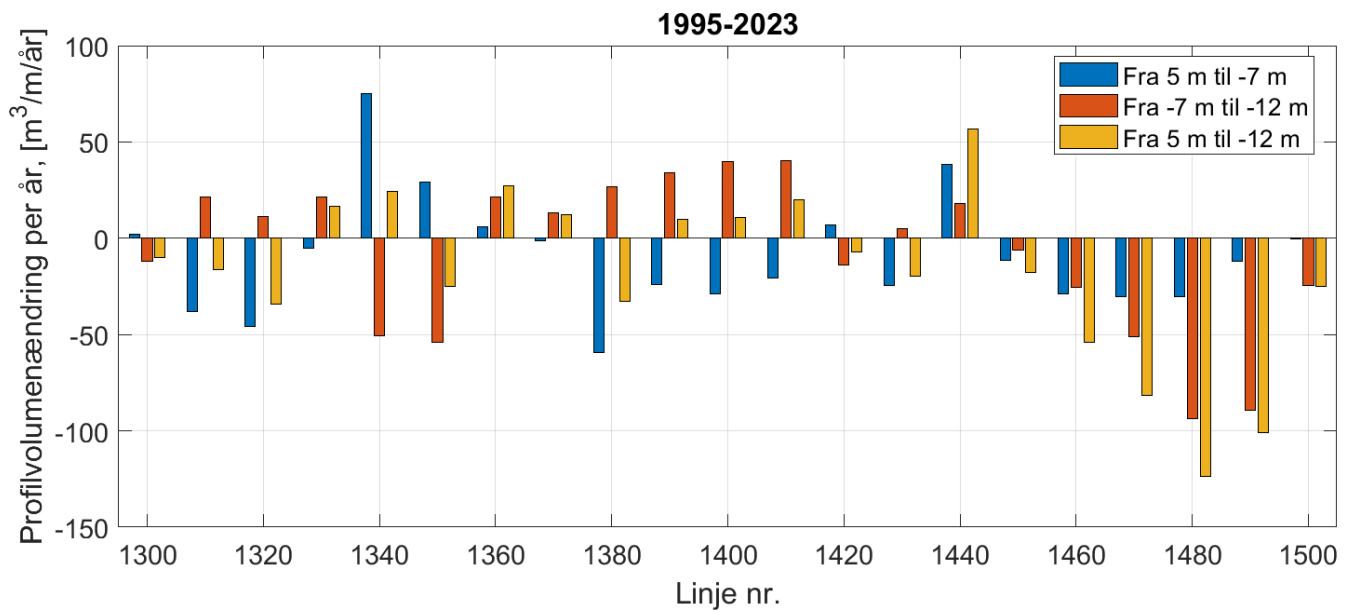


Figur 6-2: Variationen i profilvolumenet for linje 1480, 1490 og 1500.

Figur 6-3 viser ændringen per år i profilvolumenet for profilerne 1300 til 1490 for perioden 1995 til 2023. Bemærk at de højeste linjenumre er tættest på havnen. Generelt ses der i området lige øst for havnen (profilerne 1450-1490) erosion i profilet på i gennemsnit $75 \text{ m}^3/\text{m}/\text{år}$ svarende til $375\text{k m}^3/\text{år}$ for disse 5 km af kysten; den største del foregår i den ydre del af profilet: Indenfor 7 m dybde-kurven er erosionen i gennemsnit $22 \text{ m}^3/\text{m}/\text{år}$. Dette svarer til en tilbagerykning af profilet på ca. 2 m/år.

Længere mod øst (profiler 1420-1390) viser profilerne erosion i den indre del og aflejring i den ydre del af profilet.

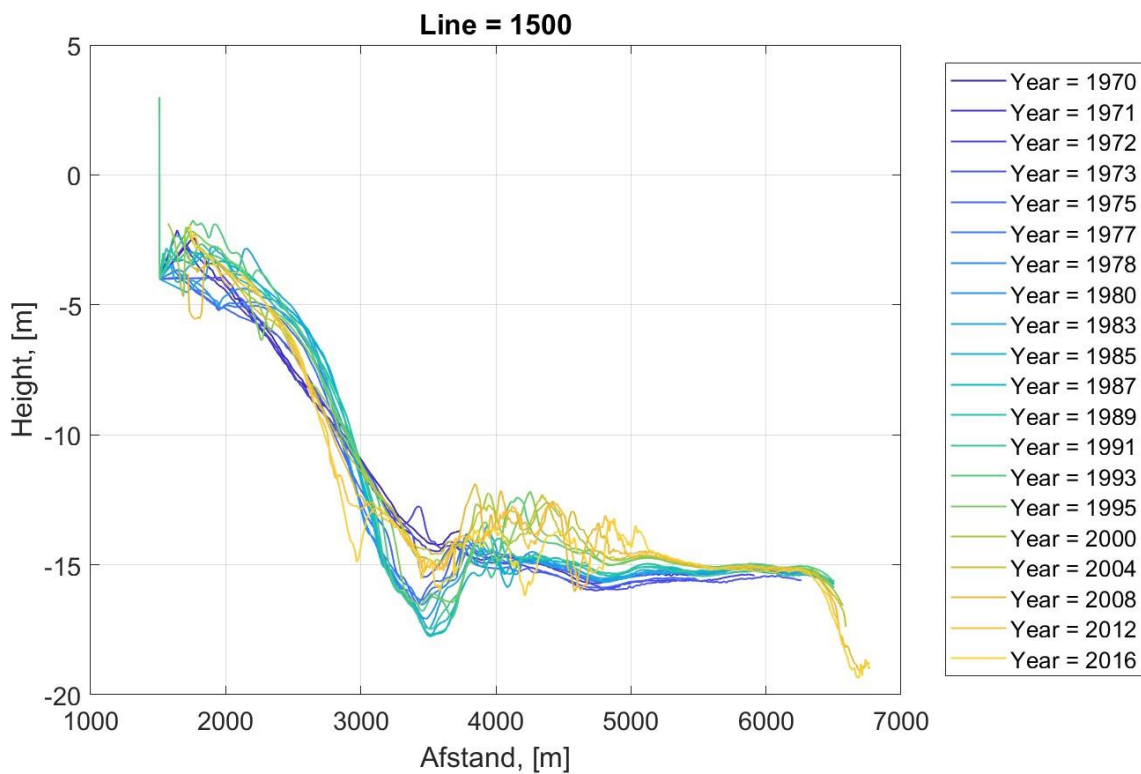
Det bemærkes at der er en vis usikkerhed forbundet med denne analyse på trods af, at den baserer sig på målte data. Det skyldes de observerede store variationer i kystprofilerne selv på store vanddybder.



Figur 6-3: Ændringen i profilvolumenet per år siden 1995.

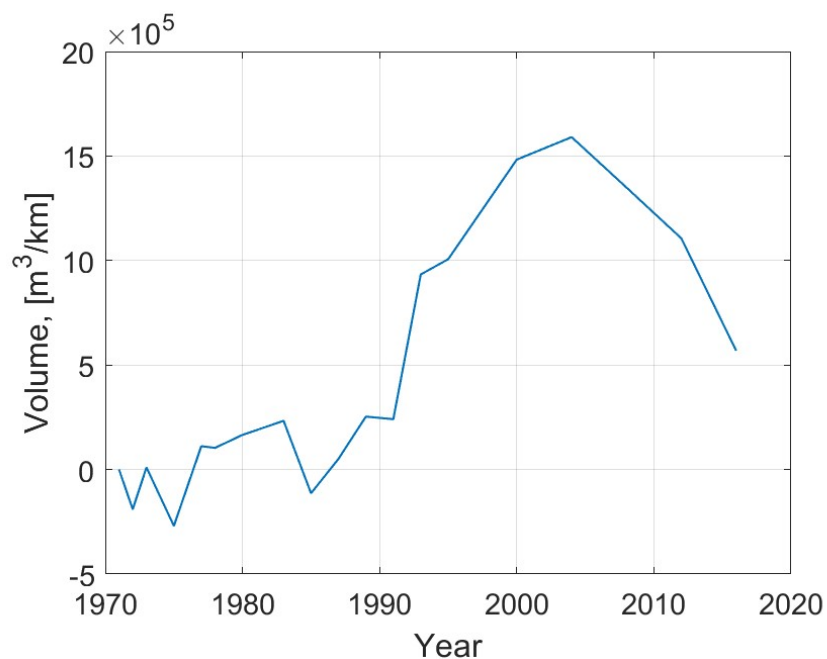
Det bemærkes at for profiler med numre større end 1420 stopper data i år 2012. Dette er uden betydning for analysen, da disse profiler er langt fra havnen.

De målte kystprofiler på linje 1500 ses på Figur 6-4. Det ses at der er store bundændringer mellem afstand 3700 m og 4800 m efter år 1990. Disse ændringer er integreret og plottet på Figur 6-5. Derudover ses det, at der mellem 1990 og 2004 blev aflejret omkring 1,5 M m³ / km (der er ca. 1 km mellem vestkystlinjerne). Det er nærliggende at tænke at disse ændringer i sedimentvolumenet er relateret til materialet, der klappes på klapplassen 1,5 km vest herfor.



Figur 6-4: Profiler målt på linje 1500.

Der ses store bundændringer på vanddybder større end 12 m fra slut 1990 og frem. Volumenet mellem afstand 3800 og 4700 er vist på Figur 6-5.



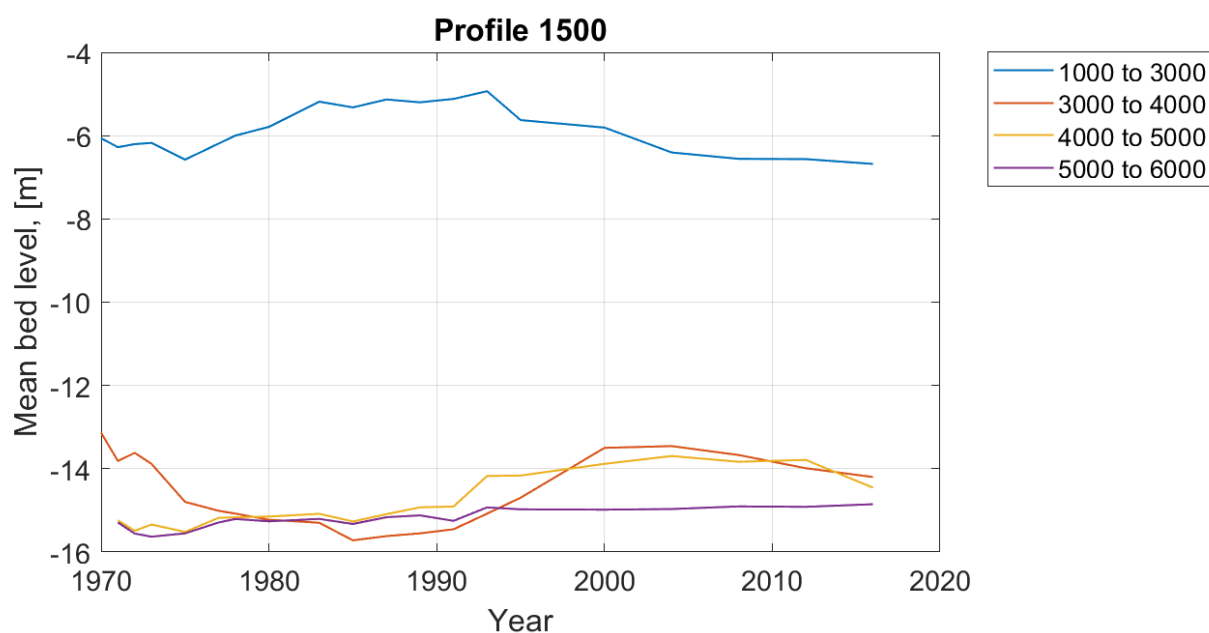
Figur 6-5: Ændring i sedimentvolumenet mellem afstand 3800 og 4700 m for linje 1500.

Volumenet er vist som volumen per km for at vise hvor store ændringer i sedimentvolumenet observationerne giver anledning til.

Middel dybden mellem afstand 1000-3000, 3000-4000 og 4000-5000 for profil 1500 er vist på Figur 6-6. Det ses at middelvanddybden foran den østlige bølgebryder de inderste 1.5 km steg mellem 1970 og 1990, hvorefter den er faldet siden, dog med et noget mindre fald fra 2005 til 2015.

Reduktionen i middelvanddybden er omkring 1.5 m fra 1990 til 2016. Denne reduktion i vanddybde svarer til et volumen på (groft estimat):

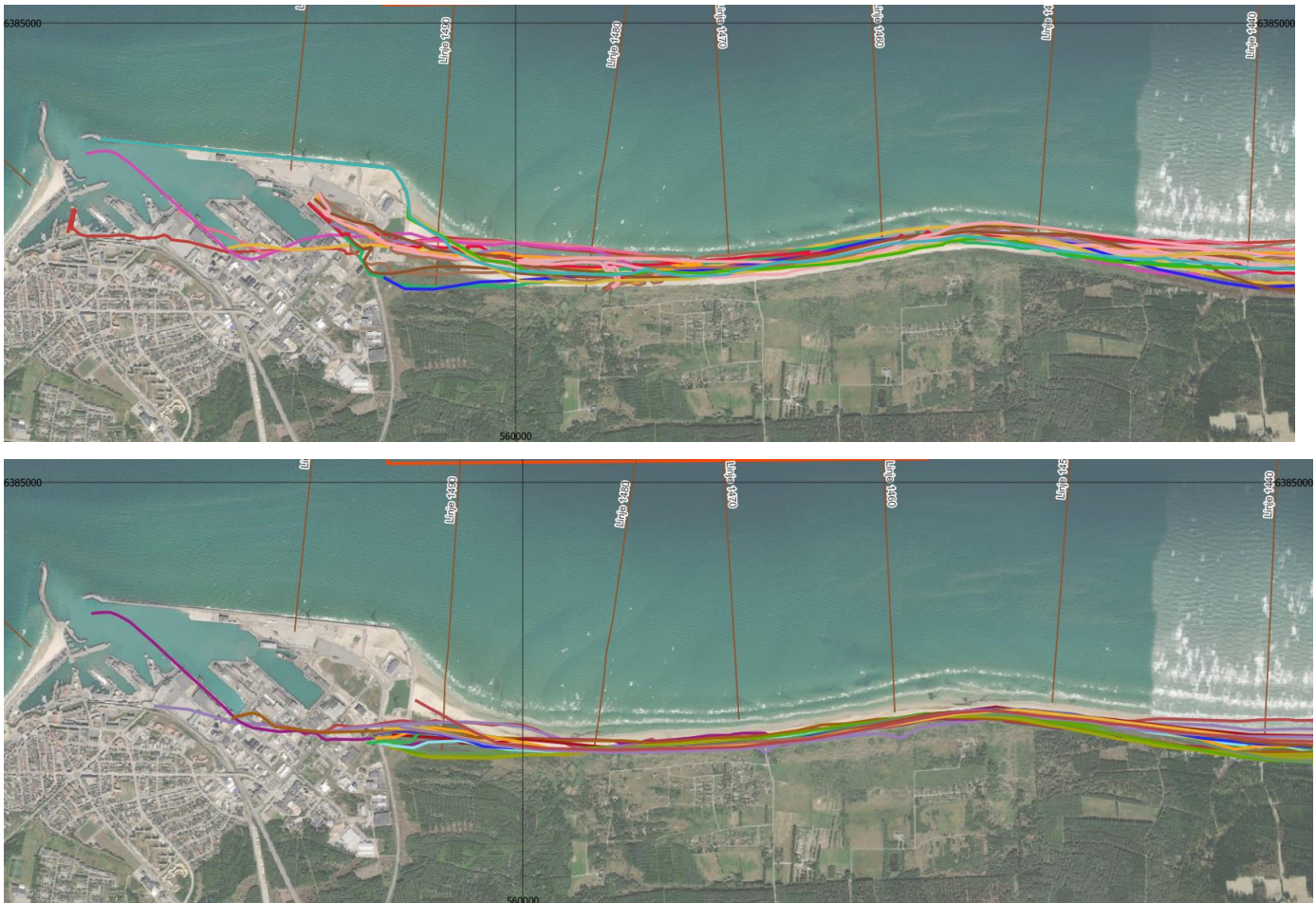
$1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ km (på tværs)} \times 1.5 \text{ km (langs bølgebryderen)} = 3,4 \text{ M m}^3$.



Figur 6-6: Middeldybden mellem afstand 1000-2000, 2000-3000 osv. for profil 1500.

6.3 Opgave 3: Analyse af kystlinjer og vegetationslinjer

De udtrukne kystlinjer er vist på Figur 6-7. Der ses stor variation i kystlinjens position i perioden. Fra dette billede ses der ikke nogen klar generel / entydig tendens til en netto frem- eller tilbagerykning af kysten gennem perioden. Derimod ses det, at kysten rykker skiftevis frem og tilbage.



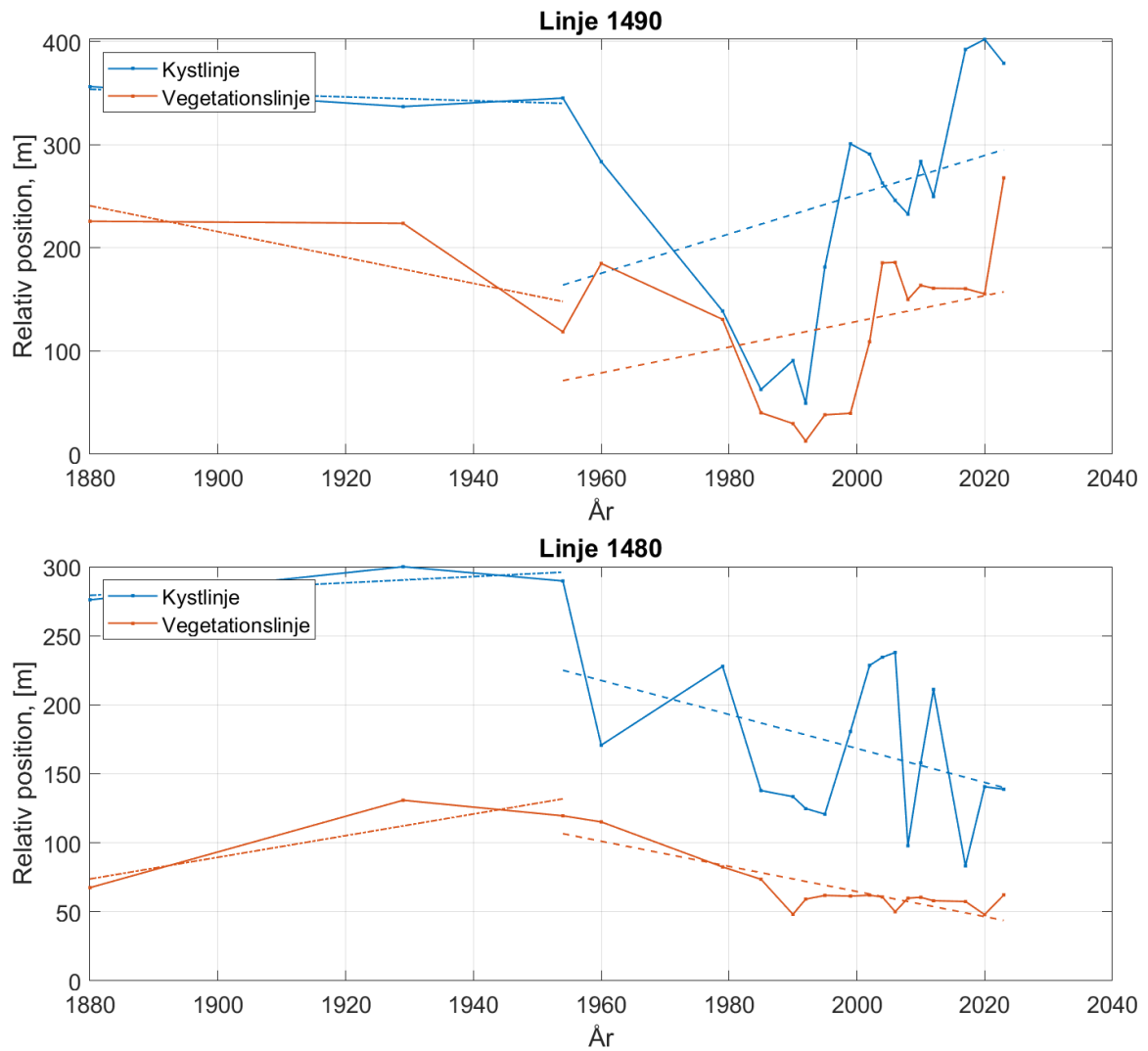
Figur 6-7: Udtrukne kystlinjer (top) og vegetationslinjer (bund).

Positionen i vestkystlinjerne 1440-1490 er vist på Figur 6-8, Figur 6-9 og Figur 6-10.

For at se nærmere på frem og tilbagerykningen er positionen af kystlinjen og vegetationslinjen til de forskellige år bestemt for vestkystlinjerne 1440 – 1490 vist på Figur 6-8, Figur 6-9 samt Figur 6-10. Endvidere er tendenslinjen gennem alle punkter før og efter 1954 tegnet op.

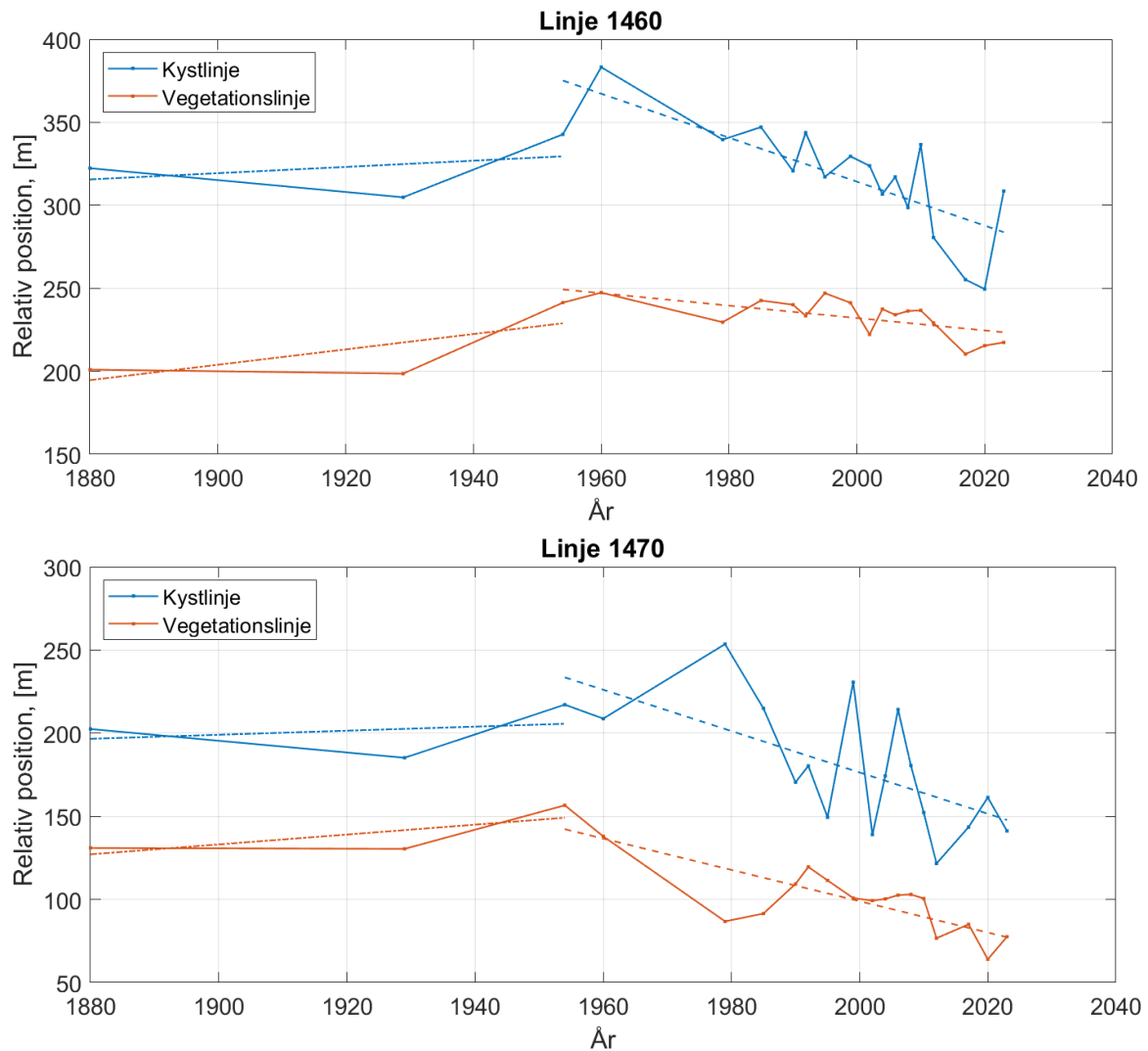
I Tabel 6-1 og Tabel 6-2 er vist følgende:

- Hældningen af tendenslinjerne efter 1954.
- Standard-afvigelsen på hældningen af tendenslinjerne efter 1954. Dette er et mål for usikkerheden af de estimerede hældninger.
- Root mean square (RMS) af kystlinjen og vegetationslinjen i forhold til tendenslinjerne. RMS kan ses som et mål for amplituden af svingningerne omkring tendenslinjerne. Dvs. et mål for hvor meget kystlinjen eller vegetationslinjen svinger frem og tilbage over perioden.
- Perioden af svingninger på vegetationslinjen. Dette er antallet af år mellem lokale maksimum eller minimums punkter på vegetationslinjen.

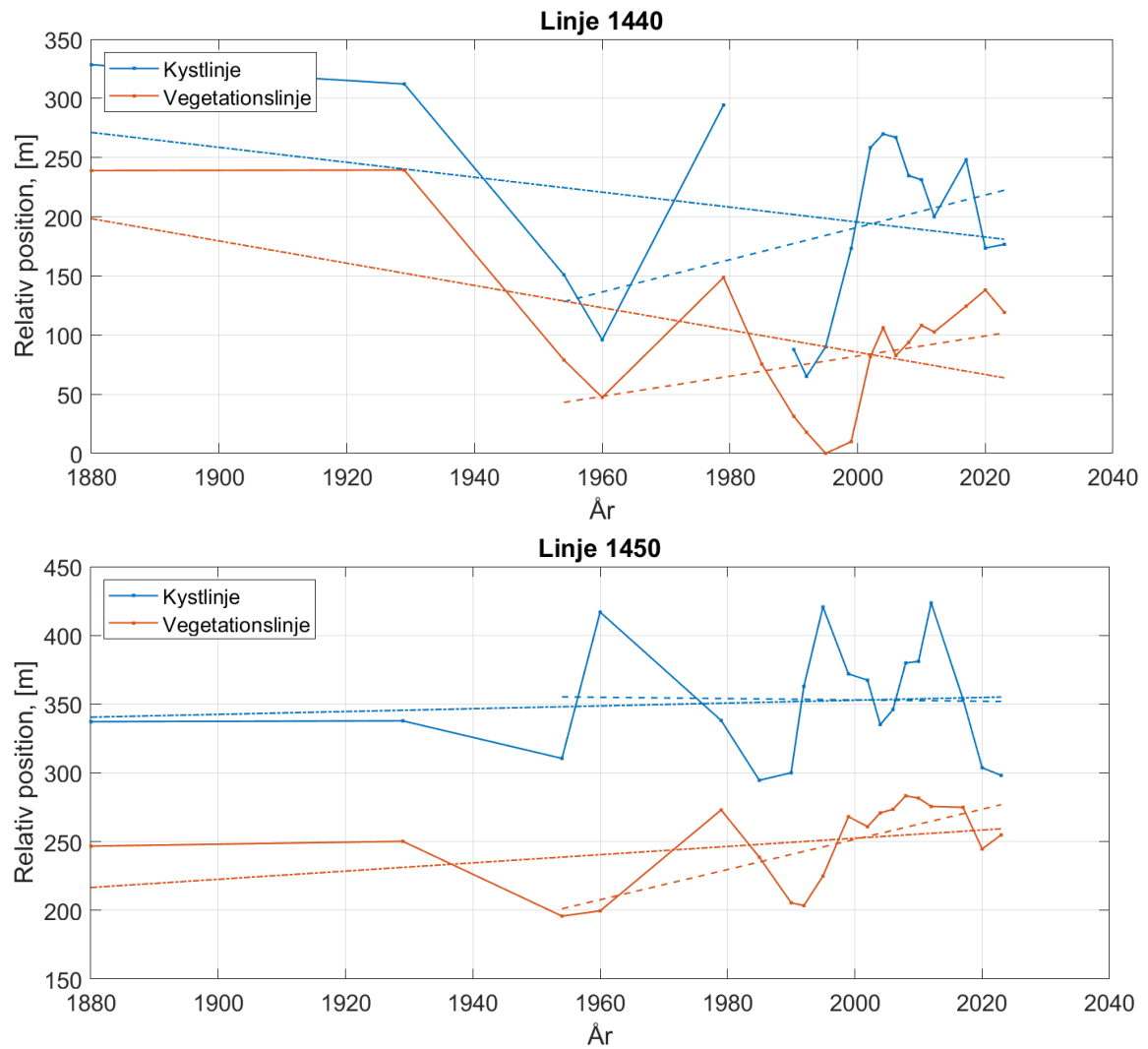


Figur 6-8: Kystlinje- og vegetationslinje position for vestkystlinjer 1490 og 1480.

Fuld optrukket linje: Udtrukne data punkter. -.- linjer: Lineær tendenslinje. -- Lineær tendenslinje fra 1990.



Figur 6-9: Kystlinje- og vegetationslinje position for vestkystlinjer 1470 og 1460.
 Fuld optrukket linje: Udtrukne data punkter. -.- linjer: Lineær tendenslinje. -- Lineær tendenslinje fra 1990.



Figur 6-10: Kystlinje- og vegetationslinje position for vestkystlinjer 1450 og 1440.

Fuld optrukket linje: Udtrukne data punkter. -.- linjer: Lineær tendenslinje. -- Lineær tendenslinje fra 1990.

Tabel 6-1: Hældning (Trend) og standardafvigelse (Std) af tendenslinje for kystlinjepositioner før (1884-1954) og efter 1954 (1954-2023), samt periode for svingninger.

Profil	Trend 1884-1954	Trend 1954-2023	Std Trend 1884-1954	Std Trend 1954-2023
1490	-0.2	1.9	0.2	1.4
1480	0.2	-1.2	0.2	0.7
1470	0.1	-1.2	0.4	0.4
1460	0.2	-1.3	0.5	0.3
1450	-0.3	0	0.3	0.6
1440	-2.3	1.4	1.6	0.9

Tabel 6-2: Hældning (Trend) og standardafvigelse (Std) af tendenslinje for vegetationslinjepositioner før (1884-1954) og efter 1954 (1954-2023), samt periode for svingninger.

Profil	Trend 1884-1954	Trend 1954-2023	Std Trend 1884-1954	Std Trend 1954-2023	Periode, [år]
1490	-1.4	1.2	1.1	0.9	20
1480	0.8	-0.9	0.5	0.1	15
1470	0.3	-0.9	0.3	0.2	15
1460	0.5	-0.4	0.5	0.1	10
1450	-0.6	1.1	0.6	0.3	35
1440	-2	0.9	1.7	0.6	30

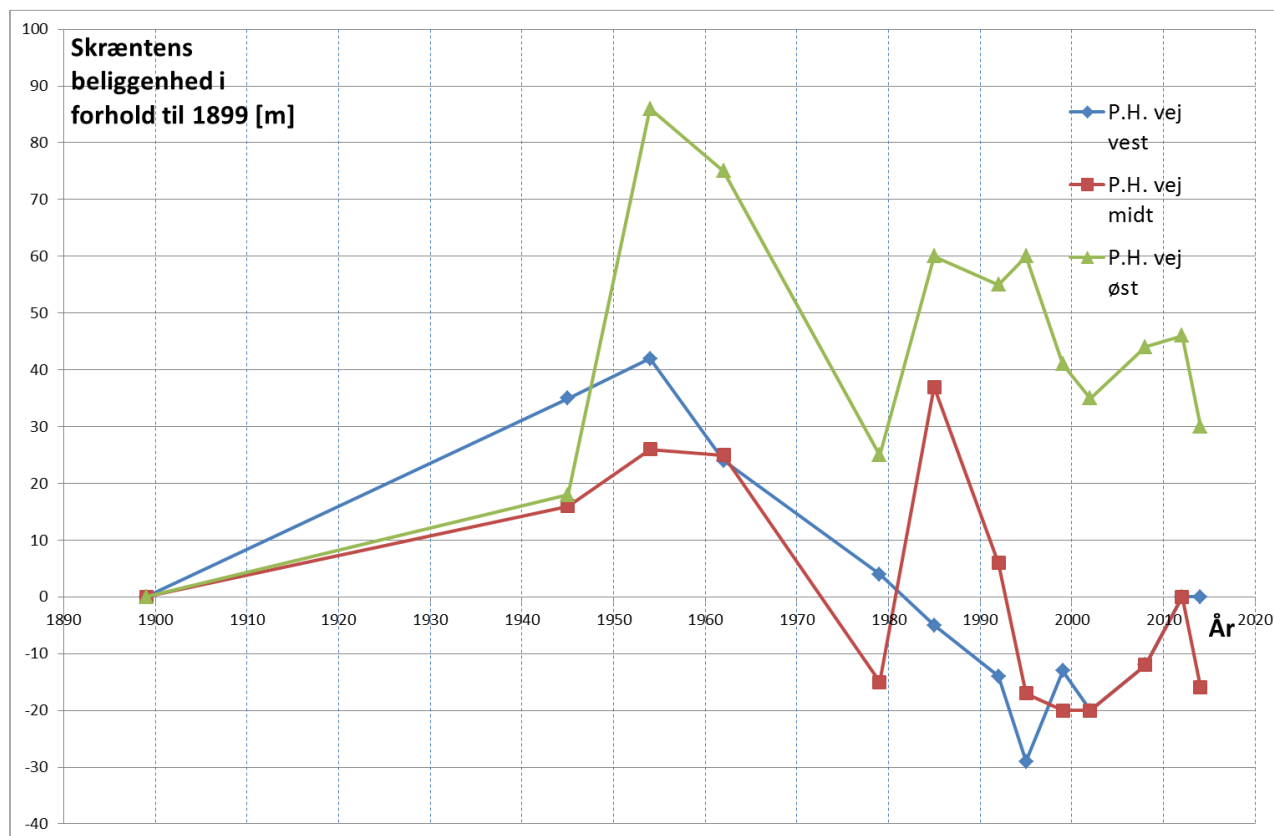
Følgende bemærkes:

- Der ses store variationer / svingninger i både kystlinjens og vegetationslinjens position hen over årene. Disse svingninger er størst både mht. amplitude og periode i profilerne længst fra havnen (1450 og 1440).
- Længst fra havnen (profil 1450 og 1440) er perioden på svingningerne omkring 35 år. Dermed kan potentielle ændringer fra havnen ikke skilles ad fra den naturlige svingninger på kysten, idet disse ændringer tager 35 år at vandre fra havnen til disse profiler. Endvidere kan hældningen på tendenslinjen før og efter 1954 ikke bruges til en vurdering af ændringer i tendens til erosion eller aflejring på kysten. Svingningerne overlejrer eventuelle ændringer i trendlinjen, så selvom der ses en ændring på trendlinjerne, vurderes disse at skyldes svingningerne og ikke effekten af havnen.
- I profilet tættest på havnen (1490) ses først en relativt flad udvikling frem til 1954. Dernæst tilbagerykning fra 1960 til 1990 og senest fremrykning fra 1990 til 2023. Dette gælder for både vegetationslinjen og kystlinjen. Tilbagerykningen fra 1954-1990 kan forklares med

effekten af etableringen af havnen i 1930. Havnekonstruktionerne sluttede på dette tidspunkt ca. 1.5 km fra profil 1490 og der ses en tydelig tilbagerykning. Senere (i 1970'erne og frem) blev havnen udbygget mod øst, således at profil 1490 kom til at ligge tæt op af havnekonstruktionerne, og dermed begyndte kysten og vegetationslinjen at rykke frem.

- I profilerne 1480-1460 ses først en relativ flad udvikling fra 1884 til 1954, men siden 1954 ses en svag tendens til erosion af både kystlinje og vegetationslinje. Erosionen er størst på kystlinjen i profil 1460 på omkring 1.3 m/år. For vegetationslinjerne er tilbagerykningen lidt mindre - omkring 0.9 m/år. Svingerne på vegetationslinjen ses at have en amplitude på 10-20 m og en periode på omkring 15 år. Idet perioden på svingningerne er mindre i disse profiler, kan hældningen på tendenslinjerne efter 1954 godt bruges til at vurdere ændringer i tendensen til erosion på kysten, idet perioden siden 1954 er meget længere end svingningsperioden.
- Den observerede gennemsnitlige erosion på kysten og vegetationslinjen for profilerne 1460, 1470 og 1480 på 1 m/år er lidt mindre end den beregnede reduktion i sedimentvolumenet mellem -7 m og +5 m, jf. afsnit 6.2.2, der svarede til ca. 2 m/år. Dette passer med de tidligere observationer af, at der sker mere erosion i den ydre del af profilet end inde på selve kysten og klitten.
- Det bemærkes at øgningen i erosionen siden år 2000, som observeres på profil-volumenerne (Figur 6-1 og Figur 6-2), ikke kan observeres i analysen af kystlinje og vegetationslinje positionen. Dette stemmer med at størstedelen af øgningen i erosionen i profilerne sker uden for 5 m dybde, og dermed ikke påvirker kyst og vegetationslinje på den tidsskala, der er data for.
- Ændringerne siden 2017 er mindre end de naturlige variationer siden 1960, hvorfor effekten af den seneste havneudvidelse ikke kan skilles ad fra den langsigtede udvikling af kysten. Det bemærkes dog at noget af påvirkningen fra denne udvidelse formentlig ikke kan ses på kysten endnu pga. den langsomme respons diskuteret ovenfor.

Variationen i skræntfodens beliggenhed fra Kystdirektoratet (2018) er vist på Figur 6-11.



Figur 6-11: Variation i skræntens beliggenhed, fra Kystdirektoratet (2018).

Det ses at i perioden fra 1960 og frem til i dag har skræntfoden rykket tilbage på de undersøgte positioner med omkring 1 m/år, dog med store variationer mellem nogle af årene. Dette stemmer nogenlunde overens med tilbagerykningen bestemt i det forrige afsnit.

6.3.1 Effekten af havspejlsstigninger

Havspejlsstigninger fører til generel tilbagerykning af kysten. Den simpleste måde at vurdere effekten af dette er ved at benytte hældningen af det kystnære strandprofil samt størrelsen af havspejlsstigningen.

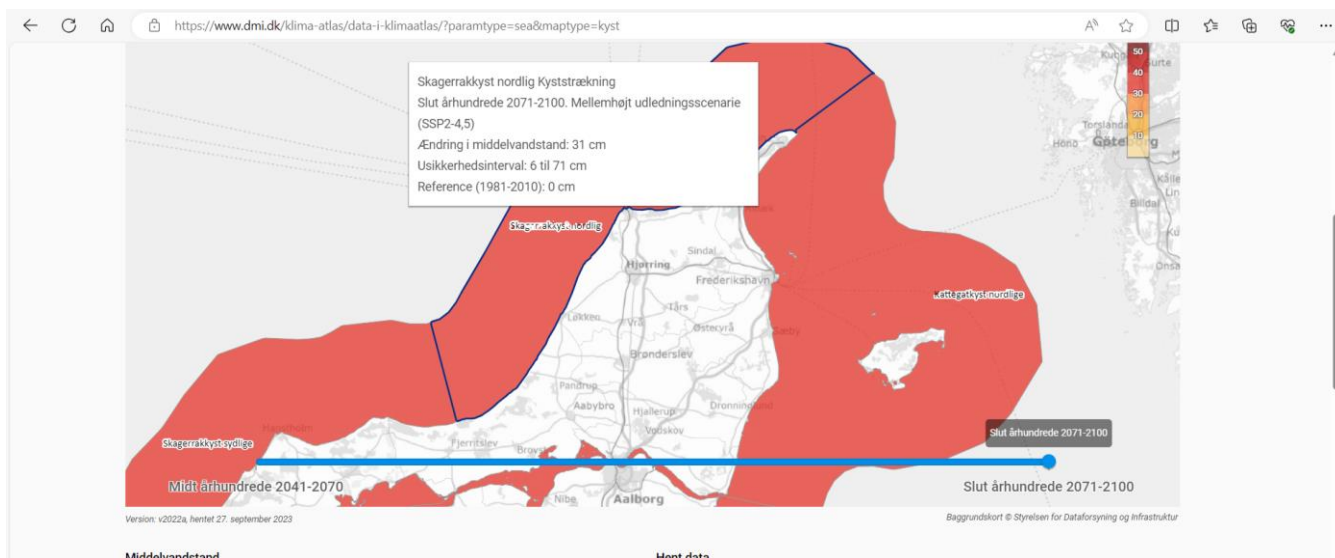
Hældningen på kystprofilen er således en vigtig parameter. Ud fra de målte vestkystlinjer er den gennemsnitlige hældning mellem -1 m og +1 m beregnet for profilerne 1300 til 1490. Denne er fundet til 1:47. 1:50 benyttes i det følgende. Det bemærkes, at beregnes den gennemsnitlige hældning mellem +1 og 0 m, er hældningen kun 1:30.

Ifølge (DMI, 2021) er den relative havspejlsstigning siden 1990 på 3 cm i Hirtshals, se Figur 6-12. Dermed findes den gennemsnitlige kysttilbagerykning som følge af havspejlsstigninger fra 1990 til 2020 til 3 cm x 50 = 150 cm, eller omkring 0.05 m/år. Det vil sige meget mindre end de ændringer der observeres på kysten.



Figur 6-12: Den relative havspejlsstigning 1990-2020, fra (DMI, 2021).

Den fremtidige havspejlsstigning kan findes på DMI's klimaatlas. For det nordlige Skagerrak findes en estimeret relativ stigning på 31 cm i forhold til gennemsnittet for 1981-2010 for et mellemlangt udledningsscenario, se Figur 6-13. Dermed findes kysttilbagerykningen til $31 \text{ cm} \times 50 \text{ cm/cm} = 1550 \text{ cm} = 15 \text{ m}$ over de næste 50 år, eller omkring 0.3 m/år . Sammenlignet med de observerede ændringer på kysten er dette en relativt lille ændring.



Figur 6-13: Estimeret havspejlsstigning fra DMI's klimaatlas.

6.4 Opsummering af dataanalyse

Sandbølgerne bevægelser indikerer signifikant østgående transport i området ud for den østlige bølgebryder (mindst 80,000 m³/år). Da der er tegn på erosion i den indre del af vestkystlinje 1500, kan dette sediment enten stamme fra lokal erosion i området foran den østlige bølgebryder, fra bypass af sediment forbi havneindsejlingen eller sediment fra offshore.

Desuden viser de tilgængelige kystlinjedata, skræntfodsdata samt vestkystprofiler, at der på kysten øst for havnen sker en tilbagerykning (~1 m/år) af kysten overlejret med en større svingning (frem- og tilbagerykning) (+/- 20-150 m over 10-35 år afhængigt af stedet langs kysten).

En tilbagerykning på 1 m per år for et 12 m højt kystprofil over en strækning på 3 km, giver en årlig erosion på 1 m x 12 m x 3000 m = 36,000 m³/år.

Dette giver en indikation på størrelsen af underskuddet af sediment på kystlinjen i området op fra 1 km til 4 km øst for havnen som er det område der viser erosion på kystlinjen og vegetationslinjen.

Ses der i stedet på volumenændringerne i vestkystlinjerne målt af kystdirektoratet ses lidt større erosion (2 m/år) og i et lidt større område (5 km langs med kysten). For et 12 m højt profil svarer dette til erosion på 120,000 m³/år. Erosionen ses således at være større længere ude i profilet end på selve kystlinjen og vegetationslinjen.

Det bemærkes at begge disse tal dog er noget mindre end mængden af sediment, der de seneste 23 år er opgravet af sejlrenden ~350,000 m³/år, hvilket viser at det kun er en mindre del af det samlede sedimentunderskud, som påvirker selve kysten og vegetationslinjen.

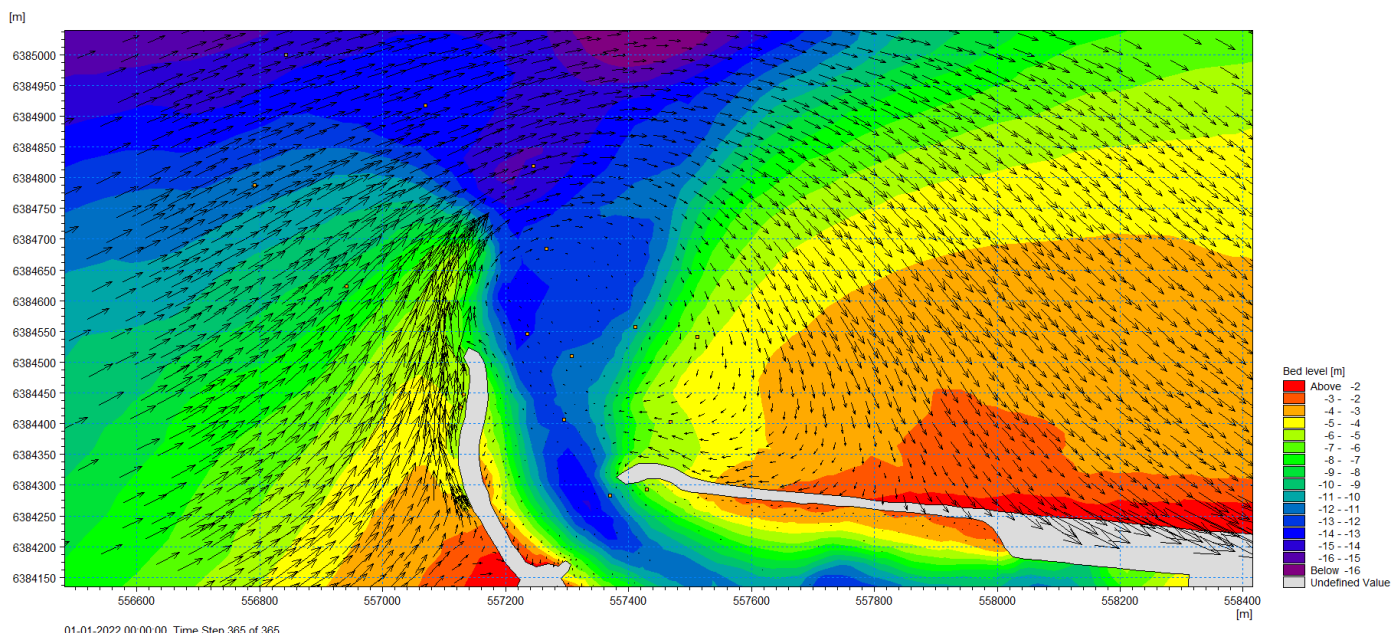
De historiske havspejlsstigninger har ikke haft nogen signifikant betydning på kysten, da ændringerne har været meget små (~1.5 m). I fremtiden vil havspejlsstigninger føre til generel tilbagerykning af kysten på omkring 15 m ind til 2070. Set i forhold til de andre ændringer på kysten er dette et betydeligt, men dog mindre bidrag.

6.5 Opgave 4: Etablering af sedimentbudget

I dette afsnit etableres sedimentbudgettet omkring Hirtshals Havn. Først præsenteres resultater fra modelsimuleringerne og samtidig sammenholdes resultaterne i videst muligt omfang med data fra de forrige afsnit til frembringelse af en samlet forståelse og kvantificering af sedimentbudgettet omkring havnen.

6.5.1 Beregnet sandtransport omkring havnen

Figur 6-14 viser feltet af den beregnede akkumulerede sandtransport omkring havnen fra 1 års simuleringen for året 2021. Vektorerne viser således retning og størrelse af netto transporten for hele året. Der ses klar østgående sandtransport forbi havnen; dvs. forbi og gennem indsejlingskorridoren. Dog ses der også en mindre vestgående transport langs den vestlige ende af den østlige bølgebryder. Dette skyldes formentlig kombinationen af en strømhvirvel under østgående strøm, der giver vestgående strøm her, men også vestgående strøm langs bølgebryderen, når det blæser fra nordøst.



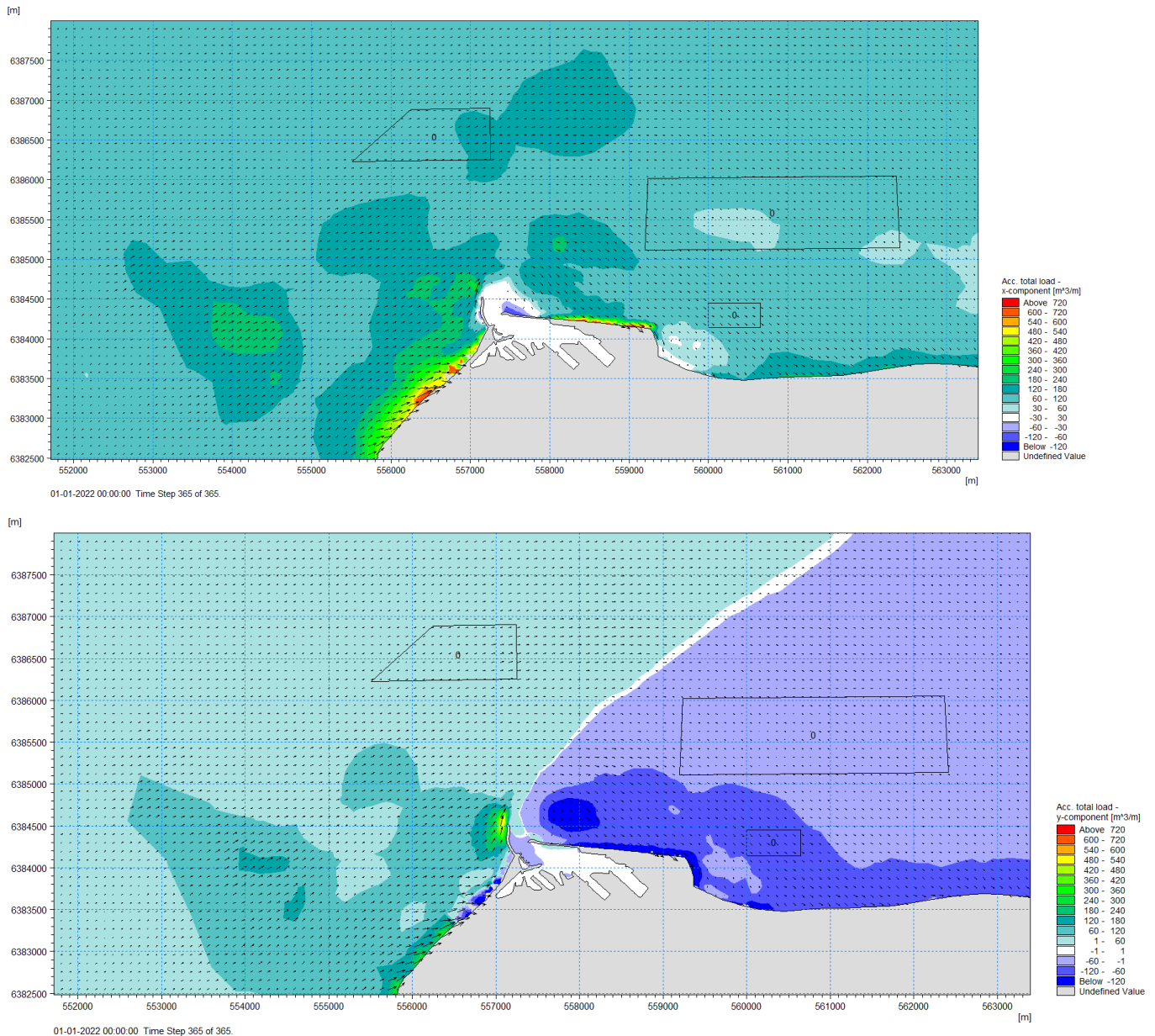
Figur 6-14: Akkumuleret sand transport omkring havnen baseret på 1 års simuleringen.

På Figur 6-15 ses henholdsvis øst-vest-gående (øverst) og nord-syd-gående (nederst) netto sandtransport i løbet af simuleringensperiode. Det ses at der er relativt store sandtransport rater ($60-120 \text{ m}^3/\text{m}/\text{år}$) selv flere kilometer fra havnen og kysten. Det er således svært at definere præcis, hvor meget sand, der bypasser havnen, da det afhænger af hvor langt ud transporten integreres over.

På den nordlige klappads ses også relativt store transportrater (netto mod øst), hvilket indikerer, at i hvert fald en del af det klappede sediment vil blive transporteret fra klappadsen mod øst.

På Figur 6-15 nederst, hvor den nord-sydige komponent af netto-transporten er plottet, ses en linje, der skiller nordgående (positive rater) og sydgående (negative rater) transport. Sand, der befinder sig syd for linjen, tenderer til at blive transporteret ind mod kysten øst for havnen. Således vil sand klappet på

klappladsen blive transporteret ind på kysten, hvis den østgående transportvektor er stærk nok til at få sandet over linjen.



Figur 6-15: Øverst: Øst-vest gående netto sandtransport øst-vest. Nederst: Nord-syd gående netto sandtransport.

En anden måde at se på hvor sandet fra forskellige lokaliteter bliver transporteret hen, er ved at beregne transportlinjer fra et givet punkt. Disse beregnes ved følgende skridt:

1. Et punkt vælges.
2. Transportvektoren i punktet bestemmes fra netto sandtransport feltet.
3. Punktet flyttes 50 m i vektorens retning.
4. Hvis det nye punkt stadig er ude i vandet (indenfor modelområdet), start igen fra 2.

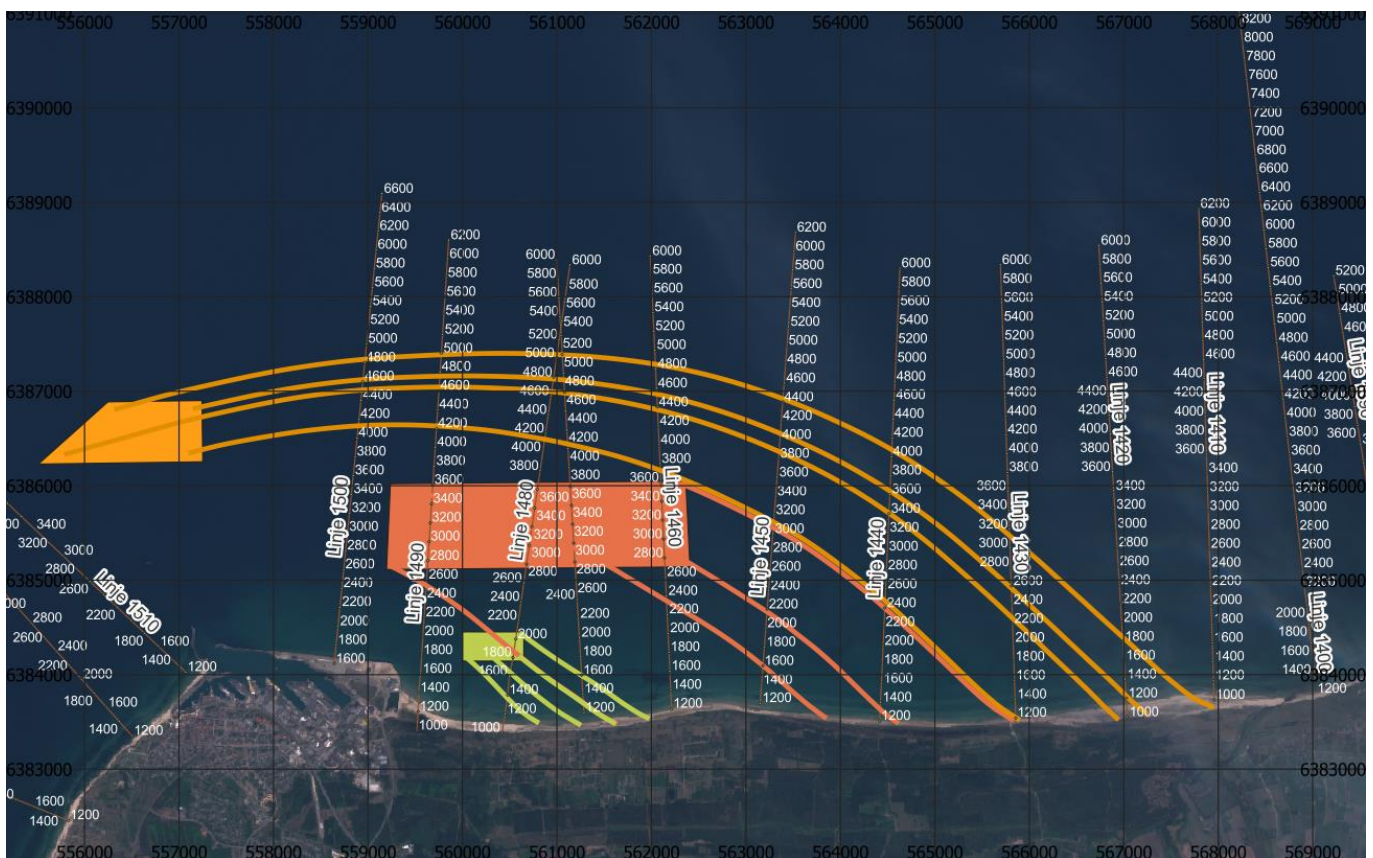
Figur 6-16 viser transportlinjerne fra klappladsen, bypass-pladsen og den lille bypass-plads. Det ses at sediment klappet på alle tre pladser ender på kysten øst for havnen:

- Klappladsen: 6.5 km – 8.5 km fra havnen.
- Bypass: 2.5 km – 6.5 km fra havnen.
- Lille bypass: 1.5 km – 2.5 km fra havnen.

Fordelene ved bypass pladserne er åbenlyse da sandet kommer ind på kysten meget tættere på havnen. Dog bemærkes det at sedimentet i princippet ikke forsvinder helt fra sedimentbudgettet når det klappes på klappladsen, idet der er transport fra klappladsen til kysten, men de første 6-8 km af kysten modtager ikke sedimenter fra klappladsen.

Transportlinjerne viser at sand transporteres fra dybere områder ind mod kysten øst for havnen. Inspektion af transportraterne viser at disse er relativt konstante i styrke langs linjerne, hvilket indikerer at en stor del af sandet fra dybere områder tenderer til at blive ført ind mod kysten, og her tilføjer sand til sedimentbudgettet i brydningszonen øst for havnen.

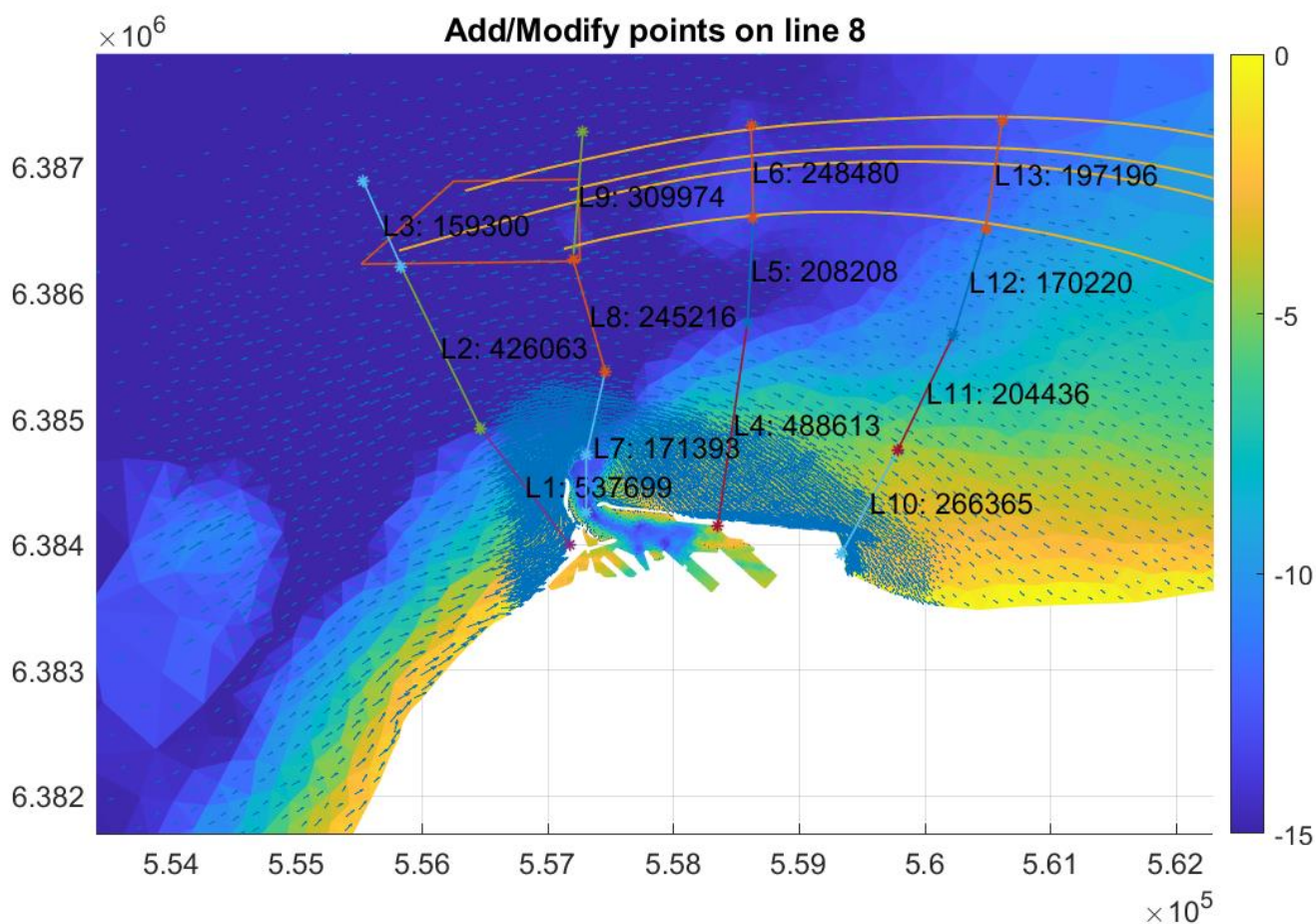
Det bemærkes at sandtransportmodellen formentlig overdriver landværts transport tæt på kysten og strukturer idet undertow og return currents ikke er medtaget, men overordnet set vurderer DHI at den giver et realistisk billede af transportlinjerne.



Figur 6-16: Transportlinjer fra hjørnerne på klapplads, bypass pladsen og den lille bypass plads.

Positionen af vestkystlinjerne samt offshore afstand på hver linje er også vist.

For at vurdere, hvor meget sand der transporteres forskellige steder i modellen integreres sandtransporten over udvalgte linjer. Figur 6-17 viser transporten for udvalgte linjestykker.



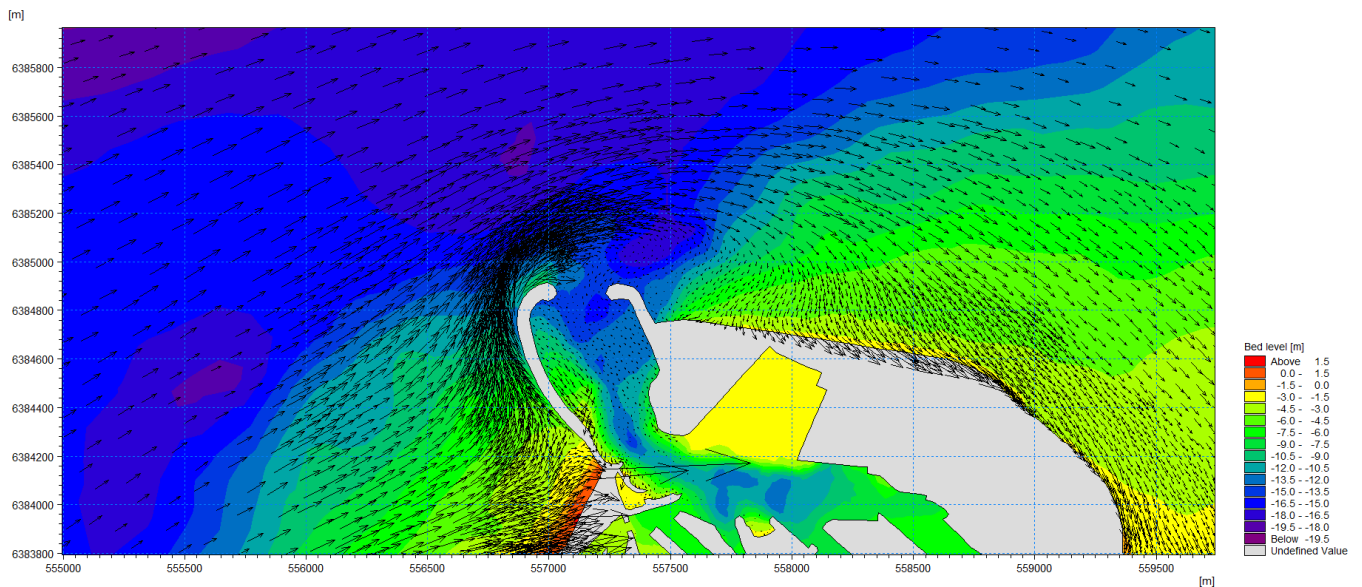
Figur 6-17: Simuleret netto transport i m³/år for året 2021 for udvalgte linjestykker.

Følgende bemærkes:

- Sandtransporten væk fra klapplassen er ca. 300,000 m³/år, der transporteres dog 150,000 m³/år dertil fra vest. Simuleringerne indikerer således at der har fundet en akkumulering sted på klapplassen. Endvidere er transporterne i transportbåndet længere mod øst også mindre, hvilket indikerer yderligere aflejring på og øst for klapplassen.
- I området med sandbølger transporteres der ca. 300,000 m³/år, hvilket passer med analysen af sandbølgerne bevægelse, se afsnit 6.1.
- Der transporteres ca. 550,000 m³/år ind i indsejlingskorridoren (indenfor 15 m vanddybde), 170,000 m³/år bypasser naturligt, mens ca. 380,000 m³/år oprenses.
- Hvis der integreres langt nok ud, transporteres der mere end 900,000 m³/år idet transporten uden for 15 m vanddybde er signifikant. De 900,000 m³/år, der kommer som kystnær transport ifølge Kystdirektoratet, kan således ikke direkte genfindes på figuren.

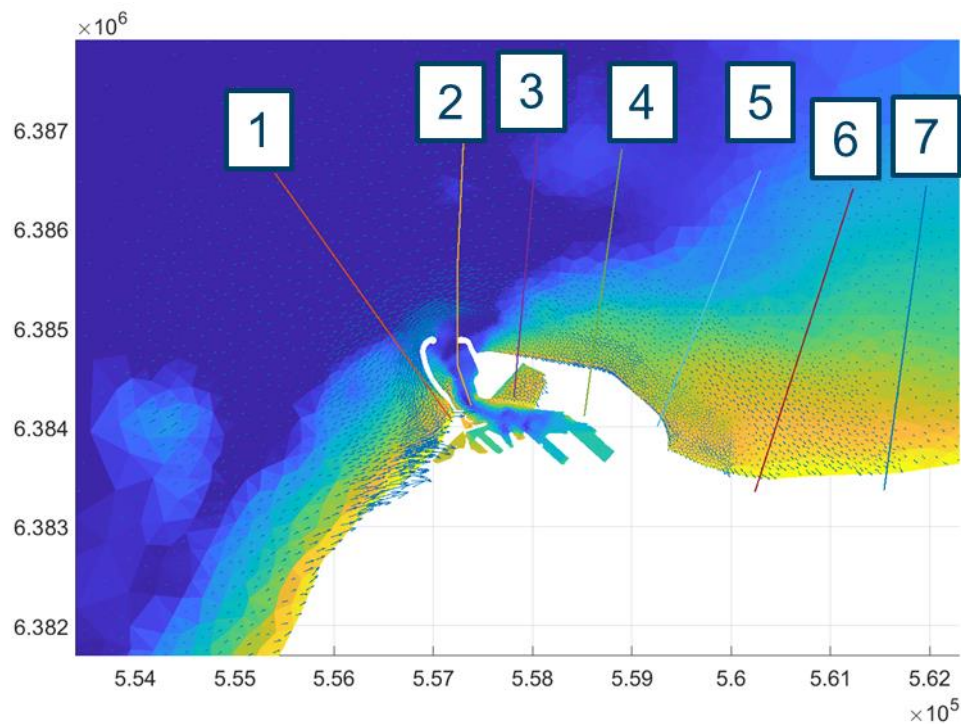
6.6 Opgave 5: Effekten af havneudvidelsen på sedimentbudgettet.

Figur 6-18 viser netto transporten omkring den nye havneindsejling. Det ses at der også med den nye konfiguration er masser af naturlig bypass af sediment forbi havneindsejlingen. Sammenlignes med Figur 6-14, ses der også ændringer i transportmønstret; f.eks. ses det at hvirvlen nordøst for indsejlingen er blevet mindre med den nye indsejling.



Figur 6-18: Netto transporten efter 1 års simulering omkring den planlagte havn.

Effekten af havneindsejlingen på sandtransporten omkring havnen kvantificeres ved at se på netto transporten over udvalgte linjestykker. De udvalgte linjestykker ses på Figur 6-19.



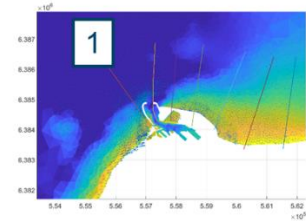
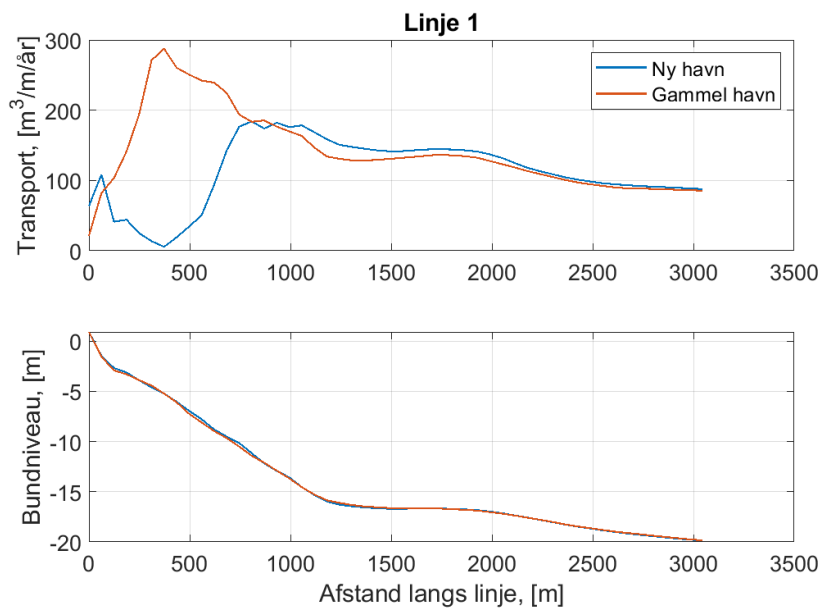
Figur 6-19: Udvalgte linjestykker omkring havneindsejlingen af den udvidede havn.

Den simulerede nettotransport over de udvalgte linjer er vist i Tabel 6-3 for både den eksisterende og udvidede havn. Derudover er ændringen i nettotransporten også angivet.

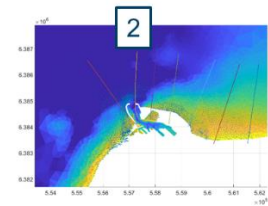
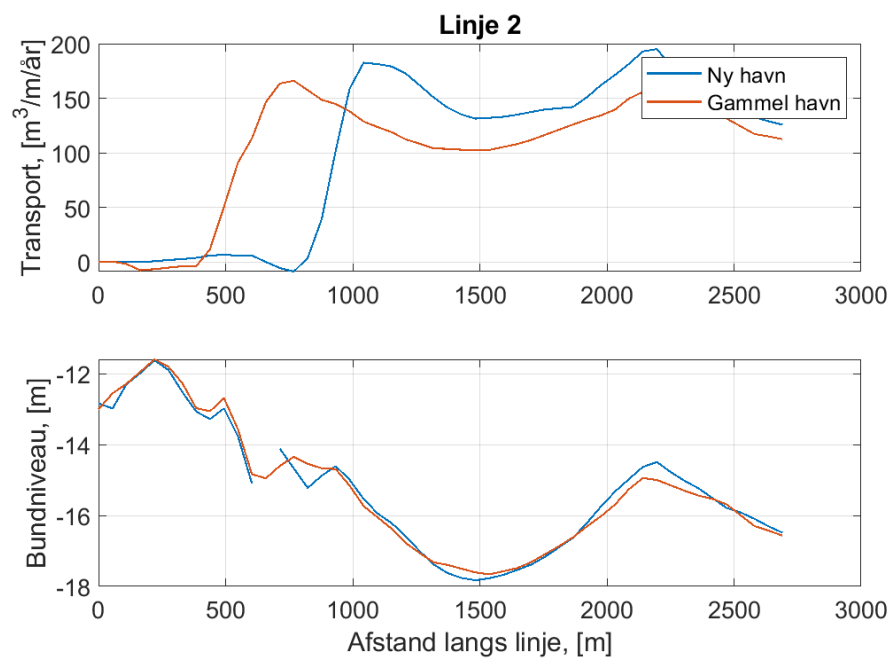
Tabel 6-3: Nettotransport over udvalgte linjestykker for eksisterende og udvidede havn samt ændringen (ny-eksisterende).

	Eksisterende havn, [m ³ /år]	Udvidet havn, [m ³ /år]	Ændring, [m ³ /år]
Linje 1	1,018,200	779,900	238,300
Linje 2	671,400	657,100	14,300
Linje 3	739,600	508,900	230,700
Linje 4	770,700	451,800	318,900
Linje 5	637,900	405,600	232,300
Linje 6	624,500	505,200	119,300
Linje 7	532,300	466,300	66,000

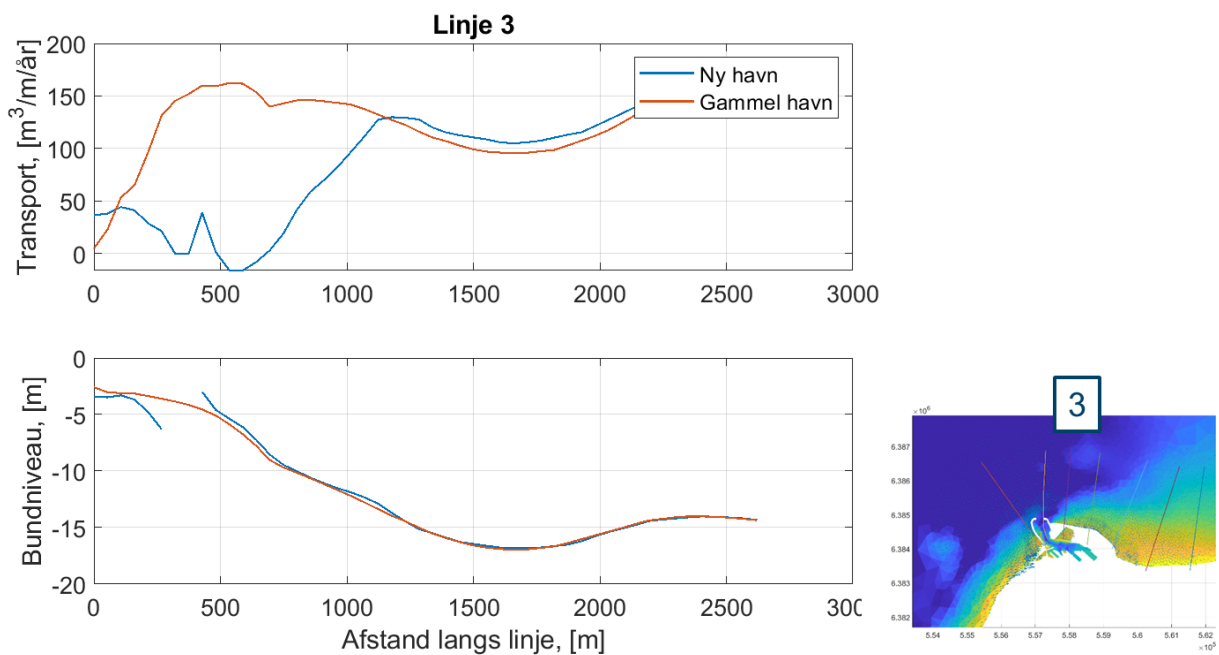
Fordelingen af sandtransporten over de udvalgte linjer er vist på Figur 6-20 til Figur 6-24.



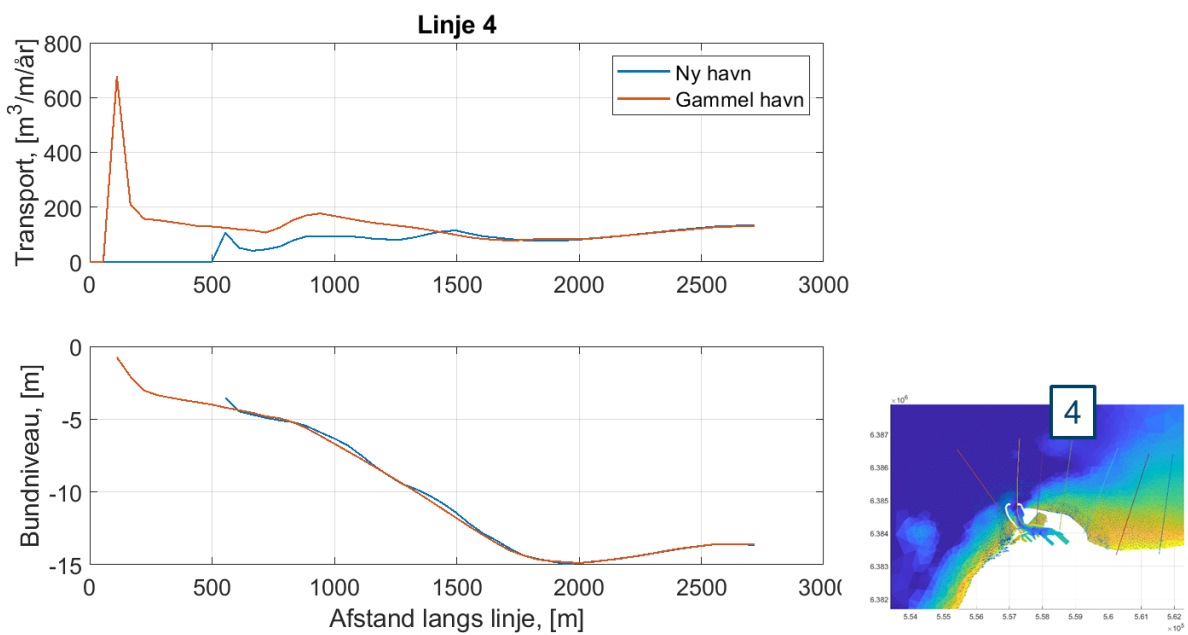
Figur 6-20: Fordelingen af netto sandtransport over Linje 1.



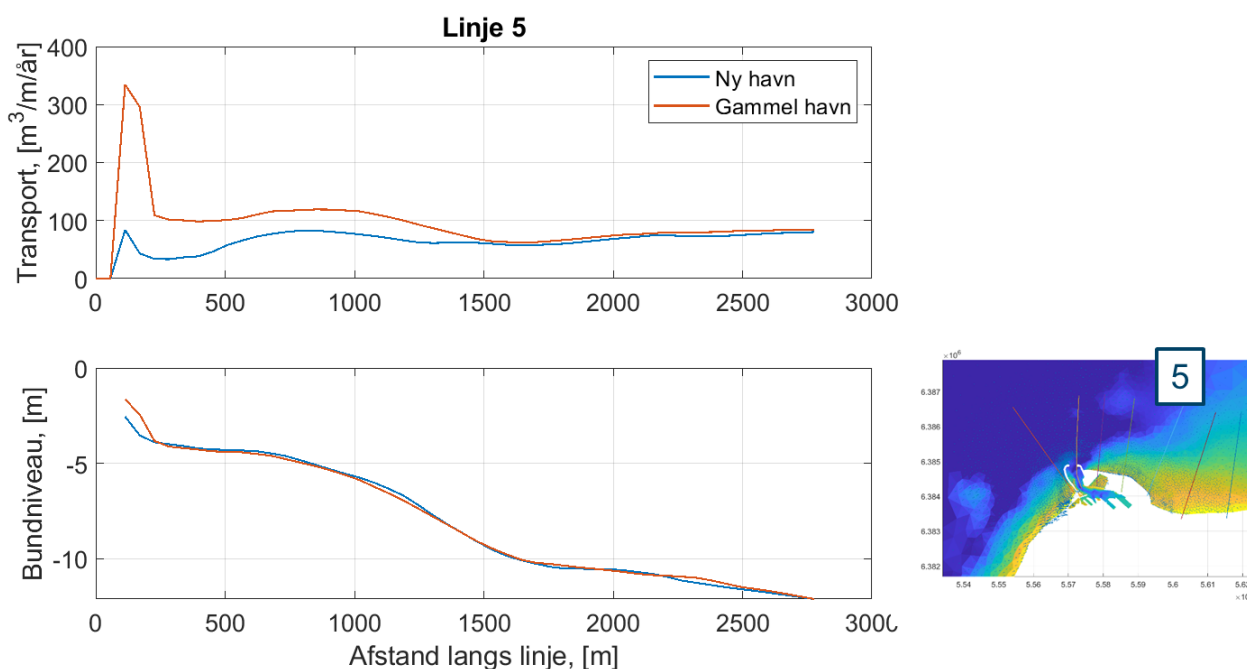
Figur 6-21: Fordelingen af netto sandtransport over Linje 2.



Figur 6-22: Fordelingen af netto sandtransport over Linje 3.



Figur 6-23: Fordelingen af netto sandtransport over Linje 4.



Figur 6-24: Fordelingen af netto sandtransport over Linje 5.

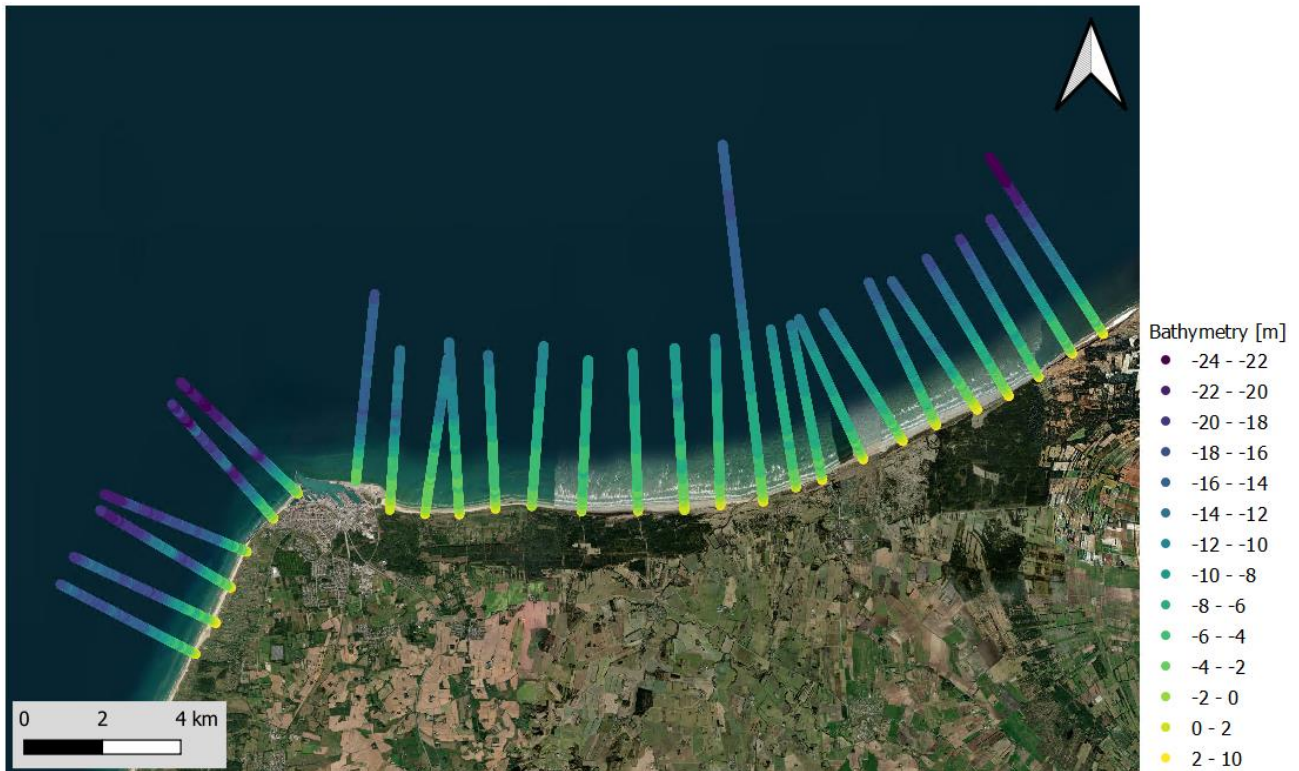
Følgende bemærkes:

- Opstrøms havnen (Linje 1) er netto transporten reduceret for den udvidede havn. Dermed vil der forekomme aflejring i området idet transporten fra syd er uændret. Aflejringen vil stoppe når transportkapaciteten er genoprettet, i den mellemliggende periode vil tilsandingen i havnemundingen være reduceret.
- På tværs af havneindsejlingen (linje 2) er netto transporten uændret med havneudvidelsen. Dette indikerer at det naturlige bypass forbi indsejlingen vil være uændret for den udvidede havn. Derfor kan det på sigt forventes at oprensningmængderne i havneindsejlingen vil være ca. de samme for den udvidede havn som for den eksisterende havn.
- Øst for havneindsejlingen (linjer 3, 4 og 5) ses en reduktion i nettotransporten på ca. 200k m³. Dette er dels pga. den øgede skyggeeffekt af havnen og dels fordi vanddybden foran den nye østlige bølgebryder initialt er reduceret i forhold til vanddybden foran den eksisterende bølgebryder.
- Øst for havnen (linje 6 og 7) er effekten af havneudvidelsen på sandtransporten mindre. Da model-opløsningen i dette område er reduceret i forhold til fokusområdet omkring havnen er usikkerheden på resultaterne i dette område større end for de andre profiler.
- Idet transporten langs den østlige bølgebryder er reduceret, mens transporten forbi havneindsejlingen er uændret, kan det forventes at havbunden bygger op ved at der aflejres sand langs bølgebryderen. Sandet, der aflejres i området langs bølgebryderen, vil mangle i sedimentbudgettet længere mod øst hvor det kan forventes at føre til en øget erosion i kystprofilen og på kysten.
- Hvor meget havbunden skal bygges op omkring den udvidede havn før ligevægten er fremkommet beregnes i afsnit 6.7.

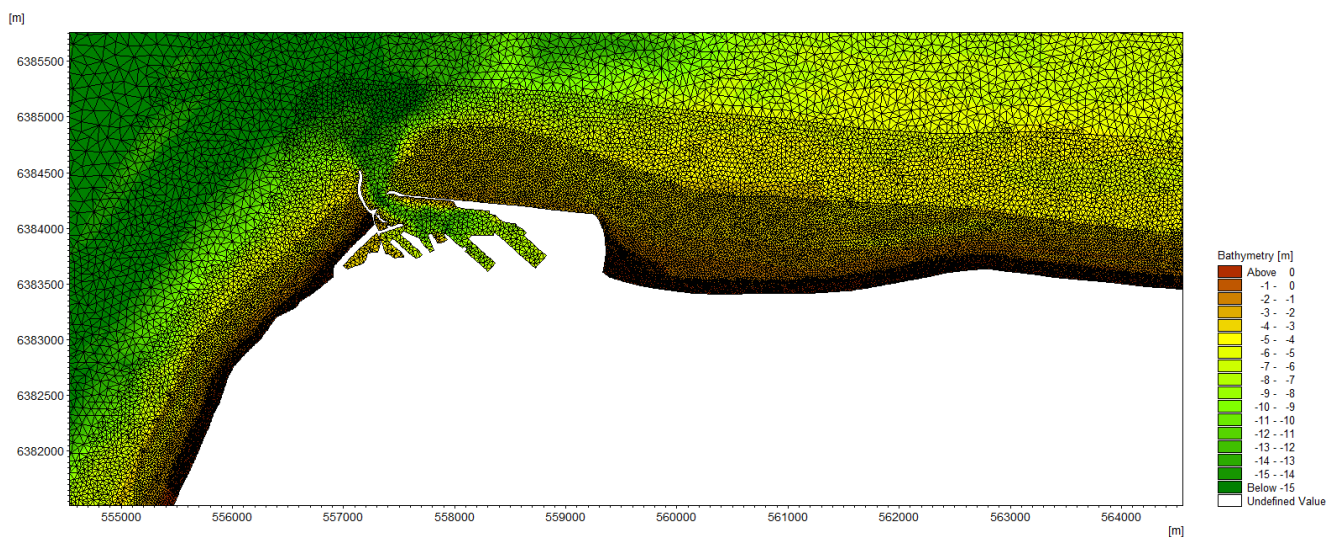
6.7 Opgave 6: Effekten af havneudvidelsen på kysten øst for havnen

For at beregne hvor langt mod øst havneudvidelsen vil påvirke kysten, er modellen beskrevet i afsnit 4.5, forfinet på kysten både vest og øst for havnen. Desuden, er kystprofilerne fra 2023 benyttet til at beskrive vanddybden i modellen langs med kysten.

De benyttede profiler er vist på Figur 6-25 og det forfinede beregningsnet er vist på Figur 6-26.



Figur 6-25: Kystprofiler benyttet til det forfinede beregningsnet.



Figur 6-26: Beregningsnet for modellen med det forfinede beregningsnet langs kysten.

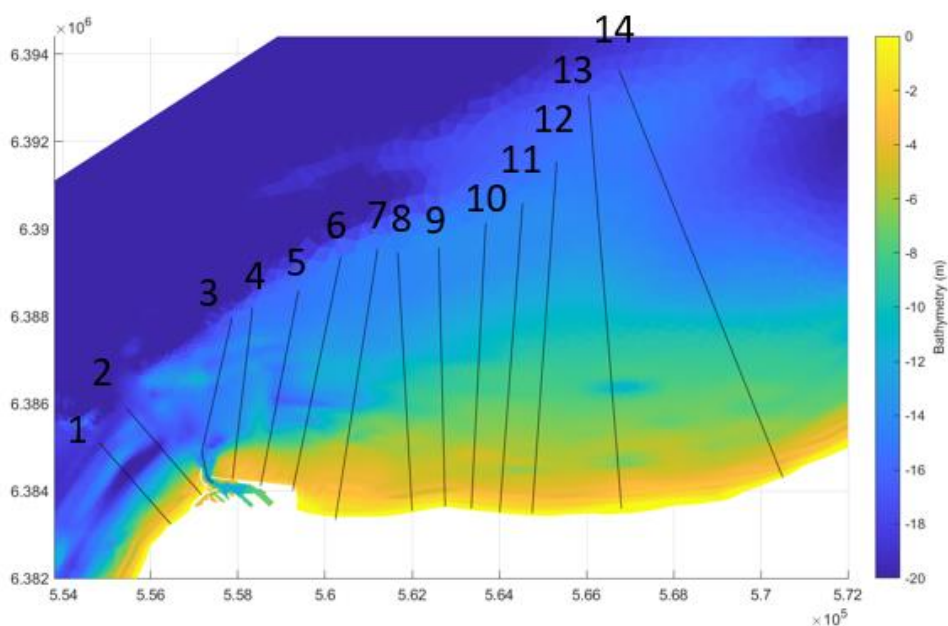
Beregningen foretages med og uden havneudvidelsen for det valgte år (2021) med fast bund, dvs. uden opdateringer af bunden under beregningen. Dette er nødvendigt, idet den morfologiske model ikke kan beskrive udviklingen af kystprofilen i kystzonen korrekt over lange simuleringer, desuden er formålet med modellen at få klarlagt hvor langt mod øst skyggeeffekten af havneudvidelsen påvirker sedimenttransporten og til dette formål er bundopdateringer ikke nødvendige.

Sedimenttransporten trækkes ud over linjerne der er vist på Figur 6-27 for de to beregninger (med og uden havneudvidelse). Nettotransporten integreret over de udvalgte linjer er vist i Tabel 6-3 sammen med forskellen mellem den beregnede transport med havneudvidelsen og uden havneudvidelsen. Linjerne er valgt så de alle går ud til ca. samme dybde omkring 15 m.

Det ses at havneudvidelsen har en effekt på de beregnede nettotransporter som er større end 5% i linjerne 2, 4, 5, 6, 7, 8 og 9.

Det bemærkes at transporten over linje 3 er den samme med den eksisterende havn og den planlagte havneudvidelse. Dette tilskrives fokuseringen af strømmen forbi de nye havnemoler.

Fordelingen af nettotransporten over samtlige udvalgte profiler er vist i Bilag D sammen med fordelingen af forskellen i den beregnede transport mellem havneudvidelsen og den eksisterende havn.



Figur 6-27: Udvalgte linjer.

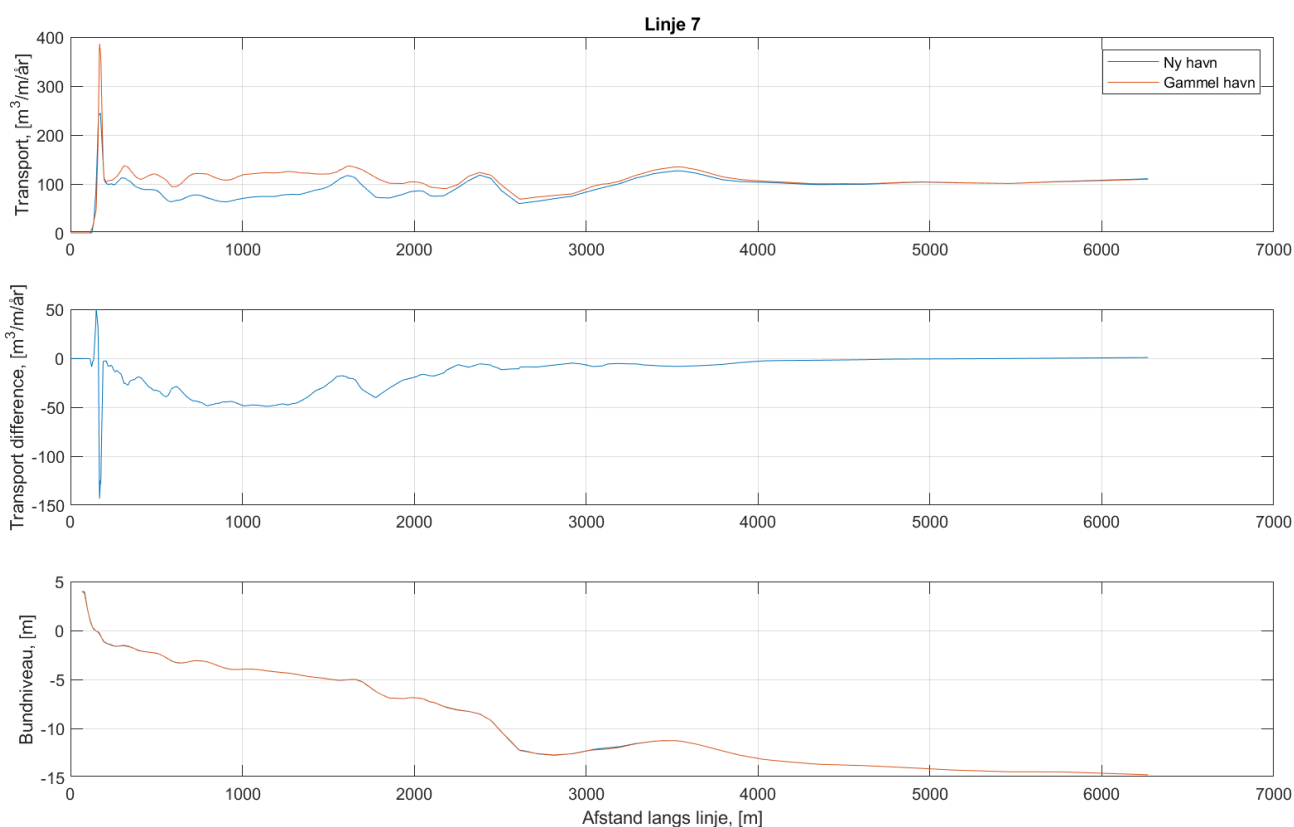
Tabel 6-4: Netto sedimenttransporten over udvalgte linjer for den eksisterende og nye havn.

Linje	Existerende havn [m ³ /år]	Ny havn [m ³ /year]	Forskel [m ³ /year]	Forskel [%]
1	858,202	823,794	-34,407	-4.0
2	845,285	638,700	-206,584	-24.4
3	923,117	943,259	20,142	2.2

4	1,159,769	872,569	-287,199	-24.8
5	1,004,906	714,439	-290,466	-28.9
6	1,108,155	911,579	-196,576	-17.7
7	1,109,097	976,316	-132,780	-12.0
8	896,135	831,763	-64,372	-7.2
9	903,502	853,919	-49,582	-5.5
10	919,335	879,644	-39,690	-4.3
11	885,832	853,658	-32,173	-3.6
12	898,542	875,466	-23,076	-2.6
13	898,708	886,166	-12,542	-1.4
14	626,482	620,884	-5,597	-0.9

På Figur 6-28 er vist fordelingen af nettotransporten over linje 7, forskellen i nettotransporten mellem den eksisterende (Gammel Havn) og den planlagte havneudvidelse (Ny havn). Det ses at forskellen i nettotransport er negativ mellem afstand 0 og 4000 m idet havneudvidelsen skygger for bølgerne og dermed reducere transporten mod øst. Der ses både en reduktion helt tæt på kysten (inden for 5 m dybde) og længere ude, ud til omkring 13 m dybde. Den maksimale nettotransport over profilet er reduceret fra 390 m³/m/år til 240 m³/m/år, altså en reduktion på 150 m³/m/år. Dermed vil skyggeeffekten af havneudvidelsen påvirke kysten der vil rykke frem i dette område efterhånden som den nye ligevægt omkring havnen indstiller sig.

Omkring 2 km fra kysten er reduktionen i transporten nede på ca. 25 m³/m/år. Skyggeeffekten af havneudvidelsen vil således også påvirke havbunden længere ude. Her vil havbunden på sigt også hæve sig for at genoprette nettotransporten i området.



Figur 6-28: Nettotransporten over beregningsåret (2021) for linje 7.
 Øverst: Fordelingen af nettotransporten over profilet. Mellem:
 Forskellen i nettotransport med og uden havneudvidelse. Bund:
 Bundniveauet over profilet.

I linje 8 er billedet det samme, dog med en mindre effekt af havneudvidelsen, idet toppen af nettotransporten er reduceret med $80 \text{ m}^3/\text{m}/\text{år}$.

I linje 9 er billedet mere mudret, idet toppen af nettotransporten stiger lidt i beregningen med havneudvidelsen sammenlignet med den eksisterende situation, mens der overordnet sker en lille reduktion i transporten både tæt på og længere fra kysten.

I linje 10 er der ingen ændringer i toppen af transporten og reduktionen i transporten længere ude som følge af havneudvidelsen er lille.

I linje 11 er der igen et lidt mudret billede, idet toppen af transporten er størst for beregningen med havneudvidelsen, mens transporten generelt reduceres lidt som følge af havneudvidelsen. Ændringerne er dog mindre end i linje 10.

I linje 12 er der ingen ændringer tæt på kysten og ændringerne længere fra kysten er meget små ($< 4 \text{ m}^3/\text{m}/\text{år}$).

Påvirkningen øst for linje 9 vurderes være så lille at den vil være umulig at observere via målinger af positionen af kystlinjen eller vegetationslinjen, idet de naturlige variationer er meget større end den mulige påvirkning fra havneudvidelsen i dette område.

Dermed vurderes det at skyggeeffekten af havneudvidelsen vil kunne påvirke kysten signifikant fra den østlige bølgebryder og øst på til linje 9, dvs. over en afstand på ca. 3.5 km.

6.8 Opgave 7: Effekten af havneudvidelsen på morfologien omkring havnen

For at beregne hvor meget havbunden skal bygges op omkring den nye havn før ligevægten i transporten forbi havnen er genoprettet, er der lavet en række modelberegninger af sedimenttransporten omkring havnen med modellen fra afsnit 6.5.1, hvor havbunden er hævet for at simulere opbygning af sediment omkring havnen.

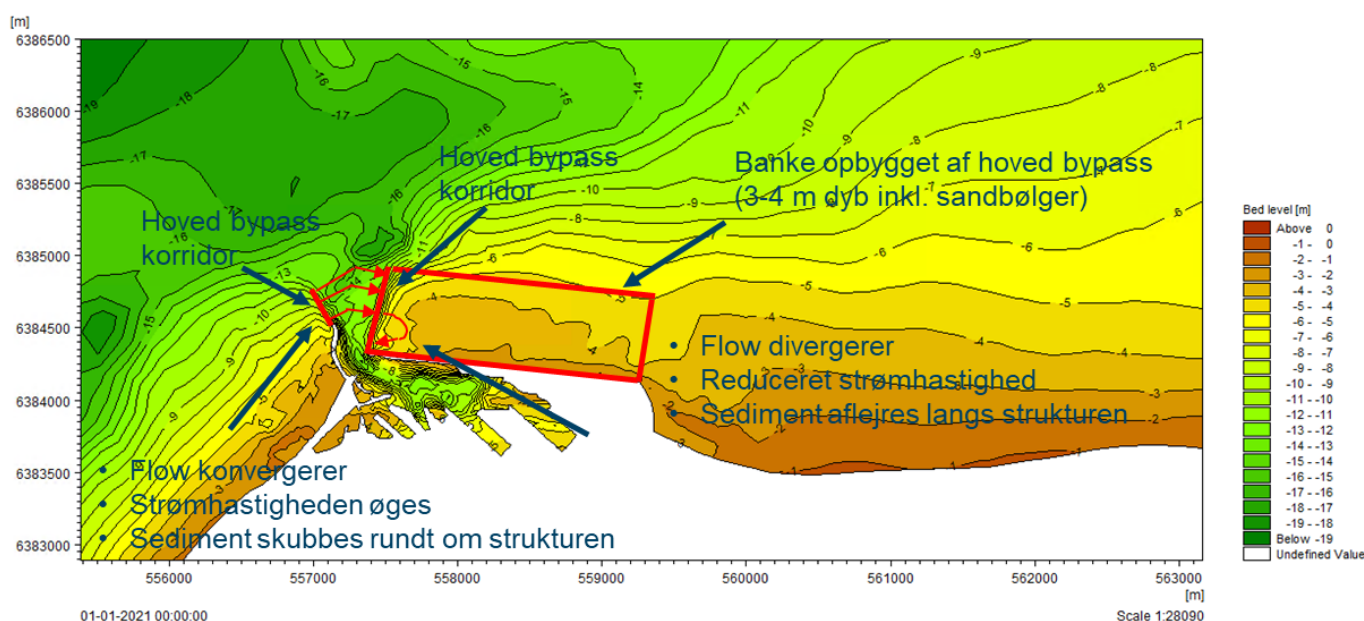
Proceduren er som følger:

1. Baseret på de eksisterende beregninger laves et første skøn på udviklingen af havbunden (bathymetrien) langs den vestlige og østlige havnemole frem til ligevægtssituationen.
2. Den eksisterende model beregner sedimenttransporten for det samme år, som hidtidig er benyttet (2021).
3. Transporten over de udvalgte linjer beregnes og sammenlignes med den eksisterende situation.
4. Bathymetrien korrigeres med et forbedret skøn på udviklingen frem til ligevægtssituationen og punkt 2+3 gentages indtil en tilfredsstillende sammenligning er opnået.

I det følgende præsenteres resultaterne fra analysen.

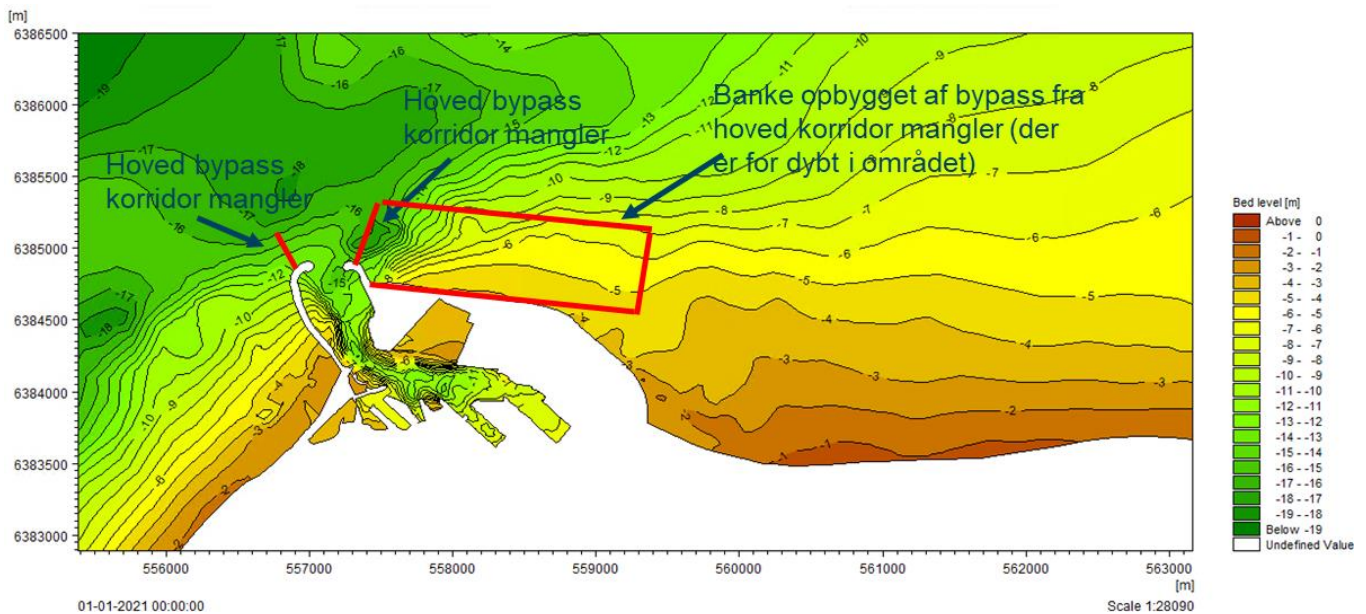
6.8.1 Bathymetrier

De valgte bathymetrier er etableret ved at se på morfologien og transportmønstrene omkring den nuværende havn og sammenligne med morfologien og transportmønstrene omkring den udvidede havn. Figur 6-29 viser morfologien omkring den nuværende havn samt relationen til transporten.



Figur 6-29: Morfologien omkring den nuværende havn og relation til sediment bypass.

Følgende morfologiske features bemærkes: 1) Bypass korridor vest for havneindsejling. 2) Bypass korridor øst for havneindsejling. 3) Sandbanke langs østlig havnemole.



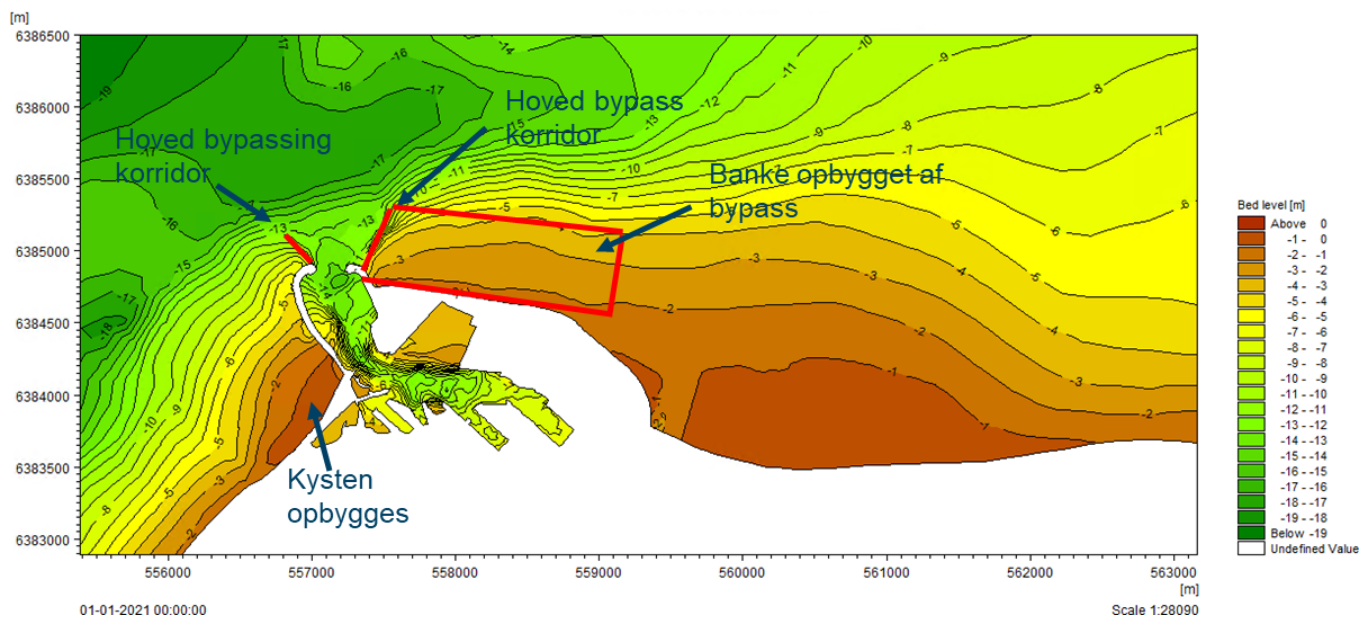
Figur 6-30: Nuværende morfologi omkring den udvidede havn.

Følgende morfologiske karakteristiske træk mangler: 1) Bypass korridor vest for havneindsejling. 2) Bypass korridor øst for havneindsejling. 3) Sandbanke langs østlig havnemole.

På Figur 6-30 ses det at der mangler tre karakteristiske træk omkring den nye havn som ses omkring den nuværende havn:

- Bypass korridor vest for havneindsejlingen. Vanddybden i området vest for havneindsejlingen er for stor til at sedimentet kan passere forbi den vestlige havnemole.
- Bypass korridor øst for havneindsejlingen. Vanddybden i området øst for havneindsejlingen er for stor til at sedimentet kan passere videre mod øst.
- Sandbanke langs den østlige havnemole. Vanddybden langs den østlige havnemole er for stor til at sandet kan passere langs molen og komme videre mod øst.

Ud fra ovenstående blev den første bathymetri etableret. Denne er vist på Figur 6-31.



Figur 6-31: Opdateret bathymetri omkring den nye havn.

Følgende morfologiske karakteristiske træk er etableret: 1) Bypass korridor vest for havneindsejling. 2) Bypass korridor øst for havneindsejling. 3) Sandbanke langs østlig havnemole.

Modellen beskrevet i afsnit 6.5.1 blev dernæst kørt for året 2021 og sedimenttransporten over linjerne vist på Figur 6-32 blev sammenlignet for den gamle havn, den nye havn samt den nye havn med den opdaterede bathymetri. Det viste sig at transporten over linjerne 3 og 4 var en smule større end for den eksisterende havn. Derfor blev bathymetrien modificeret og beregningerne gentaget, de modificerede bathymetrier er vist i Bilag C.

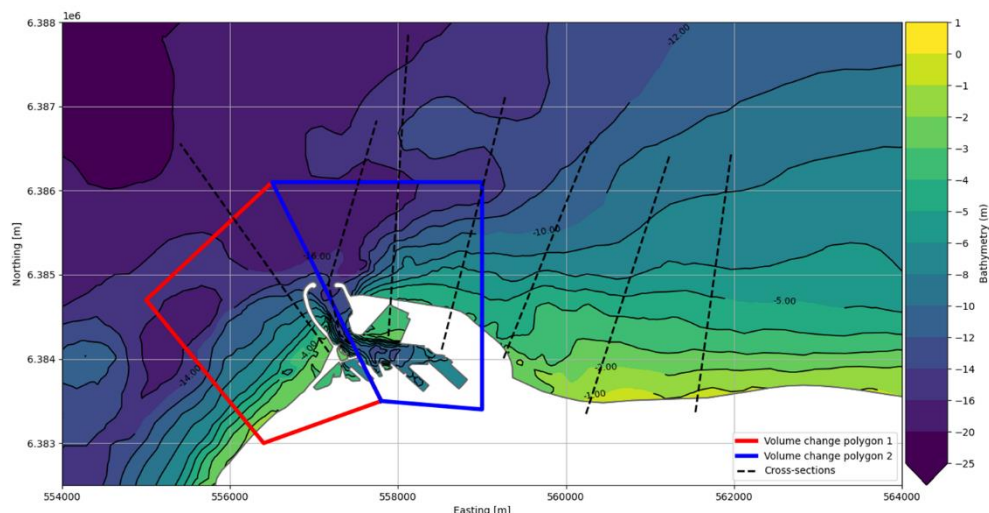
Sedimenttransporten over linjerne for alle bathymetrier er vist i Tabel 6-5.

Det ses at transporterne over linjerne er tættest på den eksisterende havn (v0) for v5 og v11. Da transporten er en smule større for over linje 3 for v5 i forhold til v0 vurderes det, at v11 er den bathymetri som ligger tættest på den som vil fremkomme i virkeligheden.

I bathymetrien v11 er der opbygget ca. 2M m³ vest for havneindsejlingen og 4.5 M m³ øst for havneindsejlingen. Dette er noget mindre end for v5 hvor der er opbygget ca. 4M m³ vest for havneindsejlingen og 6.5 M m³ øst for havneindsejlingen, men dog i samme størrelsesorden.

Fra Tabel 6-5 ses det at transporten reduceres med ca. 20% over linje 1, dvs. ca. 180k m³/år (20% af 900k m³/år). Disse 180k m³/år vil gå til opbygning af kysten og af havbunden. Det vil således tage 2.1 M / 180k = 12 år før transporten ind i havneindsejlingen er genoprettet.

Langs den østlige bølgebryder ses det at transporten er reduceret med 30-40%, eller omkring 180k m³/år. Det vil således tage 4.5 M / 200 k = 26 år før transporten mod øst er genoprettet.



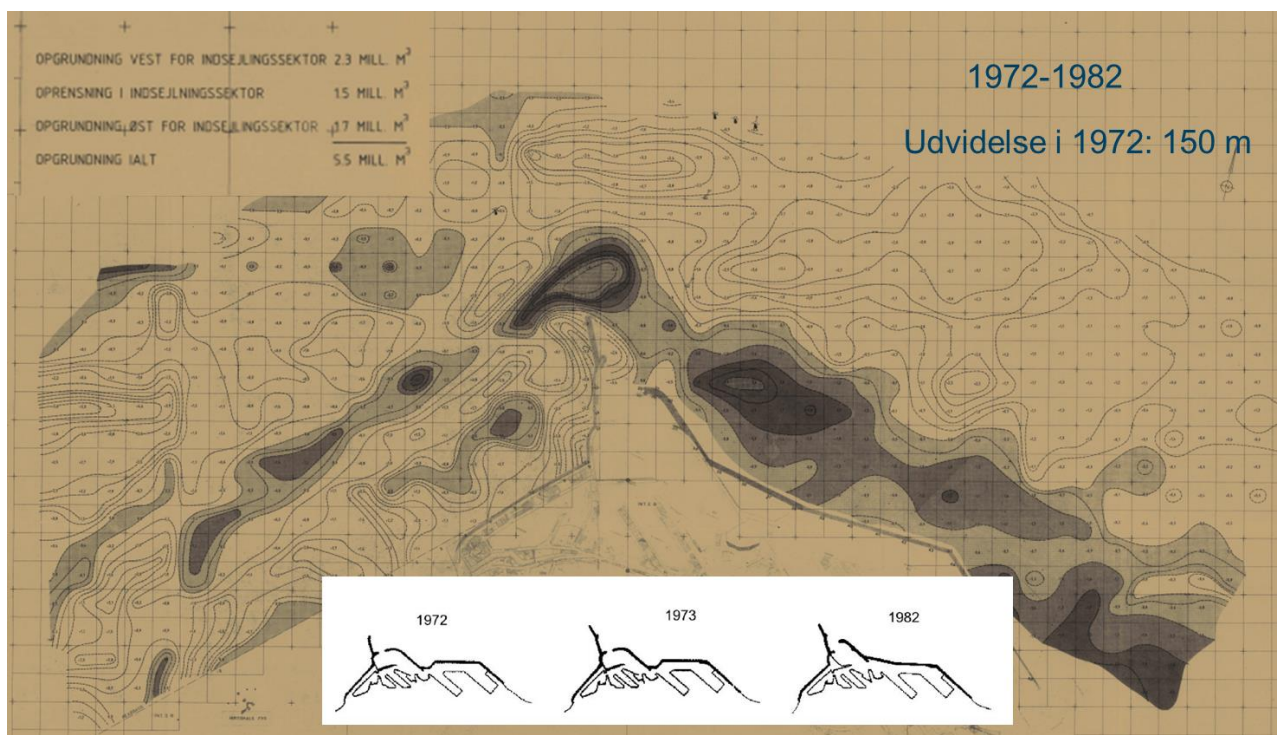
Figur 6-32: Transportlinjer.

Tabel 6-5: Sedimenttransporten over linjer.

Mesh variation	Line bypass (m ³)				Ændring in volumen (m ³)	
	1	2	3	4	Vest	Øst
Existing	1,016,700	563,700	739,900	745,800	0	0
v0	778,900 (-23%)	560,200 (-1%)	509,400 (-31%)	461,000 (-38%)	0	0
v5	1,043,800 (+3%)	530,800 (-6%)	724,700 (-2%)	749,800 (+1%)	3,738,000	6,421,000
v9	979,400 (-4%)	532,000 (-6%)	635,800 (-14%)	791,000 (+6%)	2,148,000	4,758,000
v10	1,001,200 (-2%)	526,300 (-7%)	611,900 (-17%)	759,400 (+2%)	2,098,000	3,974,000
v11	983,500 (-3%)	535,000 (-5%)	658,100 (-11%)	772,500 (+4%)	2,149,000	4,853,000
v12	1,007,900 (-1%)	529,200 (-6%)	603,500 (-18%)	663,700 (-11%)	2,098,000	3,726,000
v13	1,014,200 (0%)	527,500 (-6%)	556,800 (-25%)	633,800 (-15%)	2,068,000	2,793,000

6.8.2 Opbygning af havbunden ved tidligere havneudvidelser

Fra Hirtshals Havn har DHI fået tilsendt en række gamle sø-opmålinger omkring havnen. I et af disse gamle kort er vist opgrunding (dvs. opbygning) af havbunden omkring havnen fra 1972 til 1982, se Figur 6-33. I 1973 blev den vestlige havnemole forlænget med ca. 150 m. Denne udvidelse førte til opgrunding vest for havnen på 2.3 M m³ og opgrunding øst for havnen på 1.7 M m³. Samlet er disse tal mindre end estimatet for opbygning af havbunden omkring den nye havneudvidelse, men når størrelsen af udvidelsen tages med i betragtning, passer tallene meget godt.



Figur 6-33: Differensbathymetri fra 1972 til 1982. Modtaget fra Hirtshals havn i filen *Havpejlinger 1982-1988_Hirtshals Havn.pdf*.

6.8.3 Analyse af den historiske havneudbygning

Den historiske udbygning af Hirtshals havn er vist på Figur 3-7.

Følgende bemærkes:

- En egentlig havn etableres i 1930.
- Allerede i 1936 bygges en læmole, formentlig for at undgå tilsanding i havneindsejlingen.
- Den nye mole virker i en del år hvorefter der bygges endnu en forlængelse i 1972.
- 1972: Endnu en ny mole bygges for at undgå sedimentering. Den nye mole virker i omkring 10 år mere og herefter stiger oprensningen fra sejlrønde og indsejling markant.
- Siden 1985: Opgravning af 380k m³/år fra sejlrønde.

Tilførslen af sediment til området øst for havnen har således været begrænset siden 1930 dels fordi morfologien omkring havnen skulle indstille sig til de konstante ændringer i havnekonstruktionerne og dels pga. oprensning fra sejlrønden. Denne begrænsning i sedimenttilførslen kan forklare den observerede erosion på kystlinjen og vegetationslinjen i området dækket af profilerne 1460-1480, siden 1954.

6.8.4 Effekten af havneudvidelsen på kystlinjen og vegetationslinjen

Analysen i dette afsnit viser at effekten af den planlagte havneudvidelse på sedimentbudgettet for området øst for havnen, er en reduktion af transporten af sediment til dette område på omkring 200k m³/år indtil morfologien omkring havnen har indstillet sig til den nye ligevægt.

Effekten på kystlinjen og vegetationslinjen af denne reduktion i tilførslen af sediment kan vurderes ud fra den historiske udvikling af kystlinjen og vegetationslinjen sammenholdt med den historiske udvikling i tilførslen af sediment til området.

Siden 1985 har området øst for havnen fået tilført 380k m³/år mindre sediment end tidligere, idet materialet gravet op af sejlrenden enten blev nyttiggjort eller klappet nord havnen.

I denne periode har kysten og vegetationslinjen øst for havnen oplevet en erosion på omkring 1 m/år (ca. gennemsnit af kyst og vegetationslinjen).

Med de usikkerheder, der er i forhold til den historiske udvikling, vurderes det at effekten på kysten og vegetationslinjen, af ændringen i sedimenttilførslen som følge af den planlagte havneudvidelse, vil være ca. svarende til den eksisterende erosion, dvs. omkring 1 m/år. Der er nogen konservatisme lagt ind i dette estimat, idet reduktionen i transporten pga. havneudvidelsen er beregnet til 200k m³/år, hvilket er mindre end reduktionen på 380k m³/år området hidtil har været udsat for.

Noget af usikkerheden af estimatet kan estimeres ud fra standardafvigelsen på trendlinjerne som i gennemsnit er omkring 0.2 m/år. 95% fraktilen for usikkerheden er 2 x standardafvigelsen, eller ca. 0.5 m.

Erosionen kan observeres på kysten over et område der er ca. 3 km langt fra mellem profil 1490 og 1480 til mellem profil 1460 og 1450; dette område går ca. fra 0.5 km til 3.5 km øst for den østlige bølgebryder, som vist på Figur 6-34. I afsnit 6.7 blev skyggeeffekten af havneudvidelsen bestemt til at være signifikant i et område op til 3.5 km fra havnen, dvs. i det samme område hvor den eksisterende erosion kan observeres.

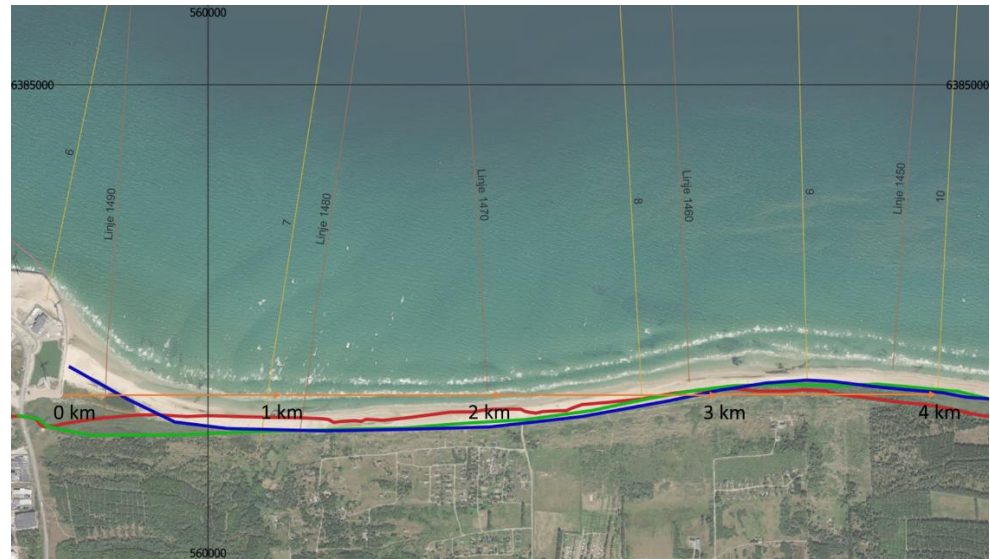
Højden af det aktive profil er ca. 12 meter, fra +5 m til -7 m og endelig er erosionsraten ca. 1 m/år. Samlet giver det en erosion på:

$$1 \text{ m/år} \times 3000 \text{ m} \times 12 \text{ m} = 36,000 \text{ m}^3/\text{år}$$

Såfremt, man ønsker at kompensere for både den forventede erosion som følge af den nye havneudvidelse samt den eksisterende erosion på kysten og vegetationslinjen øst for havnen vurderes det samlede fodringsvolumen at være:

$$2 \text{ m/år} \times 3000 \text{ m} \times 12 \text{ m} = 72,000 \text{ m}^3/\text{år}.$$

Da estimaterne er behæftet med en del usikkerhed, kan man, såfremt man ønsker lidt større sikkerhed for effekten af fodringen, øge volumenet med 50% til omkring 100,000 m³/år i gennemsnit over en årrække.

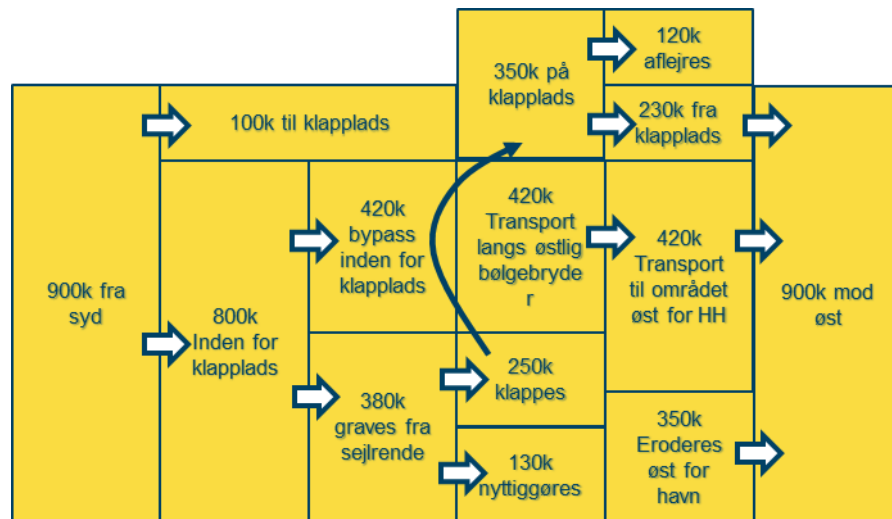


Figur 6-34: Området øst for havnen der eroderer mellem 0.5 km og 3.5 km øst for den østlige bølgebryder
 Rød: Vegetationslinje fra 1954, Grøn: Vegetationslinje fra 1999. Blå: Vegetationslinje fra 2023. Gul: Linjer der integreres over fra Figur 6-27. Orange: Vestkystlinjer.

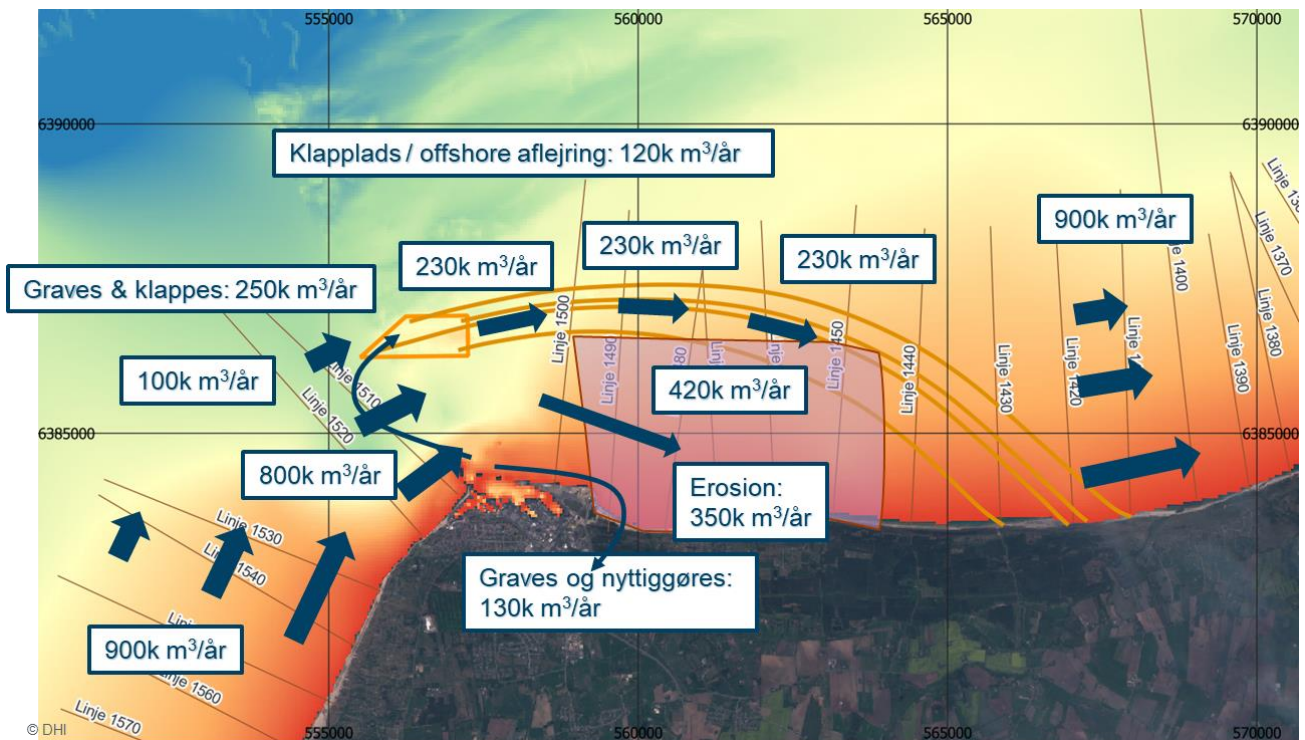
7 Diskussion og konklusion

7.1 Sedimentbudget for den eksisterende situation

Ved at sammenholde informationerne på Figur 6-17 med opsummeringen af dataanalysen etableres det samlede sedimentbudget. Skematisk er det vist på Figur 7-1 samt på kortet på Figur 7-2.



Figur 7-1: Skematisk sediment budget omkring Hirtshals Havn.



Figur 7-2: Samlet sediment budget for 1980-2019, etableret på basis af dataanalysen, supporteret af den numeriske modellering.

Følgende bemærkes:

- Sandtransporten på 900k m³/år som kommer fra syd og forsvinder mod øst, er taget fra Kystdirektoratets sediment budget for vestkysten fra 2001. Da dette sedimentbudget er over 20 år gammelt, anbefales det at opdatere dette med nyeste viden. Denne opdatering er dog uden for nærværende analyses opdrag.
- Det viste sedimentbudget er gældende for den tidligere praksis, hvor oprenset sediment blev klappet på klapplassen.
- Hvis det opgravede sand i stedet klappes på bypass pladsen, er det forventningen at erosionen i området op til 4 km øst for den østlige bølgebryder reduceres væsentligt fra de nuværende ~350k m³/år.
- Ud fra sandbølgenes bevægelser samt de tilgængelige data er det estimeret at tidsskalaen er 20-35 år for hvornår morfologiske ændringer omkring havnen (som følge af havneudvidelser eller ændringer i praksis for det oprensede sediment) kan ses på kysten øst for havnen.
- Det er kun en mindre del af erosionen på omkring 350k m³/år i området ud for kysten øst for havnen, der forårsager erosion på selve kysten og vegetationslinjen. Således er det kun omkring 120k m³/år der eroderes indenfor closure depth (7 m dybden) når der ses på de målte kystprofiler (vestkystlinjer) og kun omkring 35k m³/år der eroderes på selve kysten og vegetationslinjen når der ses på udviklingen i kystlinje- og vegetationslinje positionen.
- Summen af transporten til klapplassen og tilførsel af sediment gennem klappning er større end transporten fra klapplassen. Nogen opbygning af sediment er således formentlig pågået på klapplassen og øst herfor de seneste 35 år, dette er estimeret til 120k m³/år. Dette sediment vil langsomt eroderes de kommende år (eftersom der ikke længere klappes materiale i området) og transportkapaciteten vil samtidig falde tilbage til en ligevægtstransport, således at transporten langs transportlinjerne vil være konstant langs disse.
- Tallene er afrundet idet de er forbundet med en del usikkerhed. Dette gælder både data der er estimeret på baggrund af måledata og tallene fra den numeriske modellering.
- Det er ikke alle tallene som kan genfindes direkte i resultaterne fra den numeriske modellering. De er fremkommet som et kompromis mellem modelleringen og dataanalysen, men med størst vægt på dataanalysen. Nogle steder er det således estimeret at den faktiske transport af sand er mindre end den modellerede transportkapacitet da der ikke overalt i området er mobilt sand på havbunden på alle tidspunkter.

7.2 Effekten af havneudvidelsen på sedimentbudgettet

Havneudvidelsen vil føre til en reduktion af sedimenttilførslen til området øst for havnen i forhold til en situation uden havneudvidelsen. Reduktionen er estimeret til omkring 200k m³/år og den vil vare i omkring 30 år indtil vanddybden omkring de nye havnekonstruktioner er reduceret nok til at transporten af sediment er reetableret.

Dette vil føre til en øgning af den nuværende erosion i området øst for havnen, som siden 1995 har været på 350k m³/år og som dermed vil blive omkring 550k m³/år såfremt det oprensede sediment ikke klappes i området.

Såfremt det oprensede sediment klappes i området, vil erosionen i området være uændret, idet reduktionen af sedimenttilførslen til området kompenseres af det klappede sediment.

7.3 Effekten af havneudvidelsen på kysten og vegetationslinjen øst for havnen

Tabel 7-1 opsummerer effekten af havneudvidelsen på sedimentbalancen og kystudviklingen øst for havnen.

Tabel 7-1: Opsummering af effekten af havneudvidelsen på sedimentbudgettet og kystlinjen / vegetationslinjen.

Scenarie	Beskrivelse	Sediment underskud 0-5 km øst for havnen	Erosion på kysten / vegetationslinjen
		[m ³ /år]	[m/år]
0	Eksisterende situation	350k	1
1	Efter havneudvidelse + status quo	550k	2
2	Efter havneudvidelse + bypass og kystnær fodring	350k	0
3	Efter havneudvidelse + kystnær fodring	450k	0

Scenarie 0 viser den eksisterende situation.

Scenarie 1 viser effekten af havneudvidelsen: Som diskuteret i forrige afsnit er effekten en øgning i erosionen i området øst for havnen. Det forventes at denne øgning af erosionen i området også vil føre til en øget erosion af kystlinjen og vegetationslinjen på omkring 1 m/år, så den øges til omkring 2 m/år i området op til 4 km øst for den østlige bølgebrøder.

Scenarie 2 viser hvorledes effekten af havneudvidelsen kan afværges. Øgningen af erosionen i området øst for havnen kan afværges ved at klappe det sand der i tilpasningsperioden renses op af sejlrenden i området øst for havnen (eksempelvis på den eksisterende bypass plads).

Erosionen af kysten og vegetationslinjen kan afværges ved en kystnær sandfodring af mindst 72,000 m³/år, dvs. en del af det klappede materiale vil skulle klappes mere kystnært eller pumpes helt op på stranden / klitten. Grundet usikkerhederne på de beregnede tal anbefales det at den kystnære fodringsmængde sættes til omkring 100,000 m³/år.

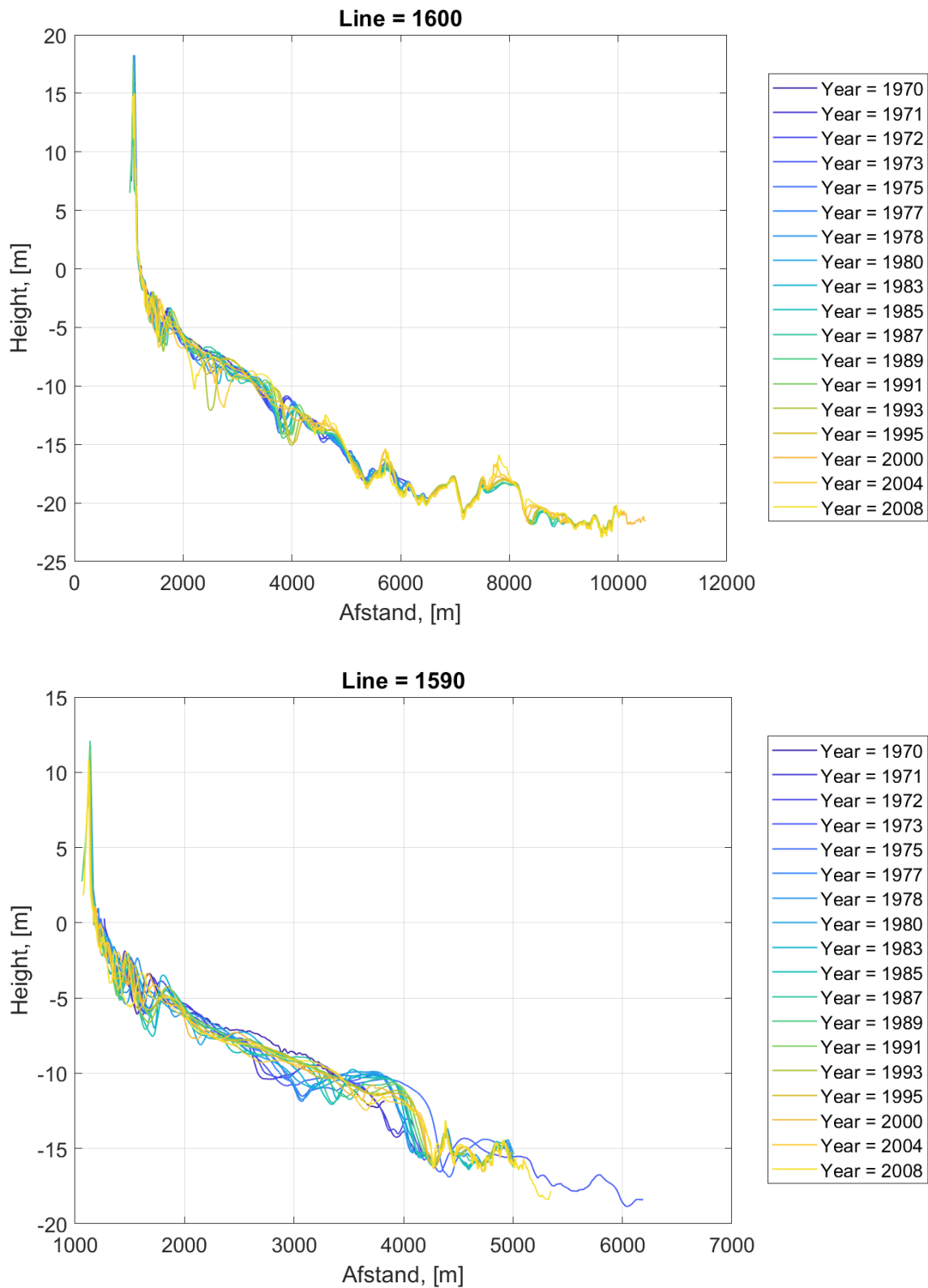
Det forventes at det oprensede volumen er større end 100,000 m³/år, men hvis det oprensede volumen nogle år mod forventningen er mindre kan man blot kompensere mere i årene derefter.

Endelig viser **Scenarie 3** et scenarie hvor der accepteres en øgning af erosionen i området øst for havnen idet der kun laves en kystnær sandfodring. Dette scenario vil føre til en øget erosion i området øst for havnen i de dybere dele af kystprofilerne i området. Såfremt det kan antages at denne erosion fordeles over 10 km² vil det føre til en øget erosion på ca. 1 cm / år. Over de 30 år som morfologien er om at indstille sig, vil det føre til øget erosion på 0.3 m over hele dette område.

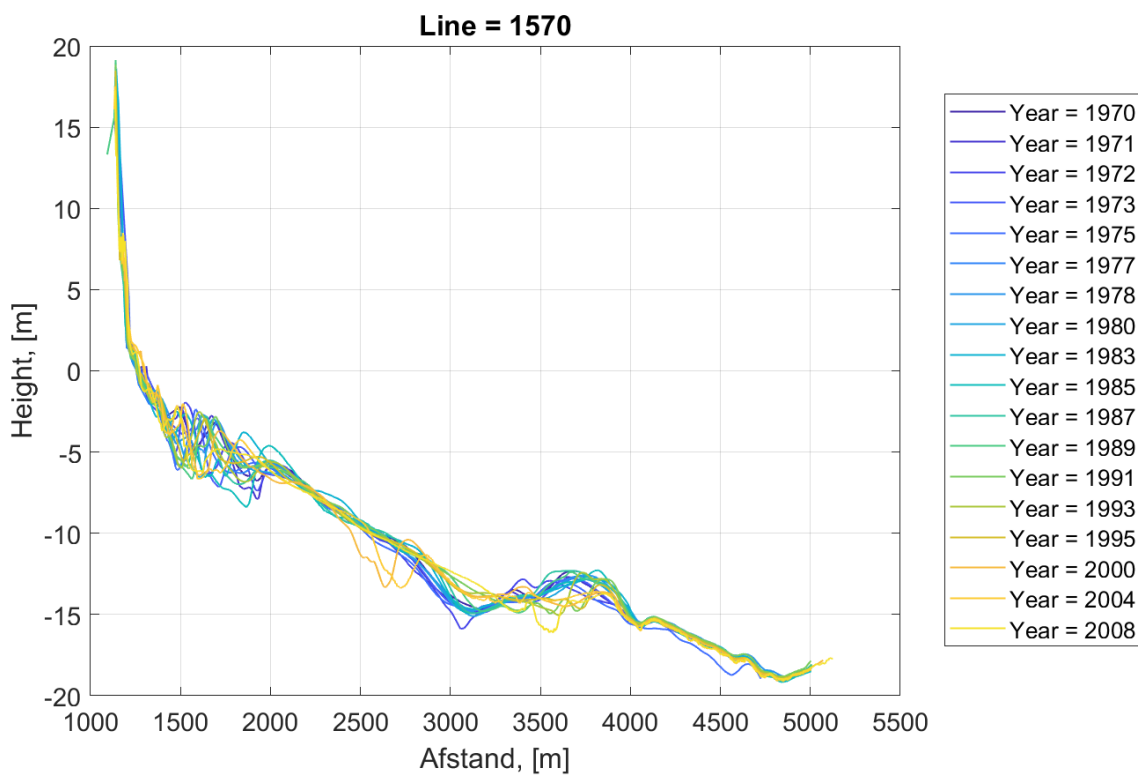
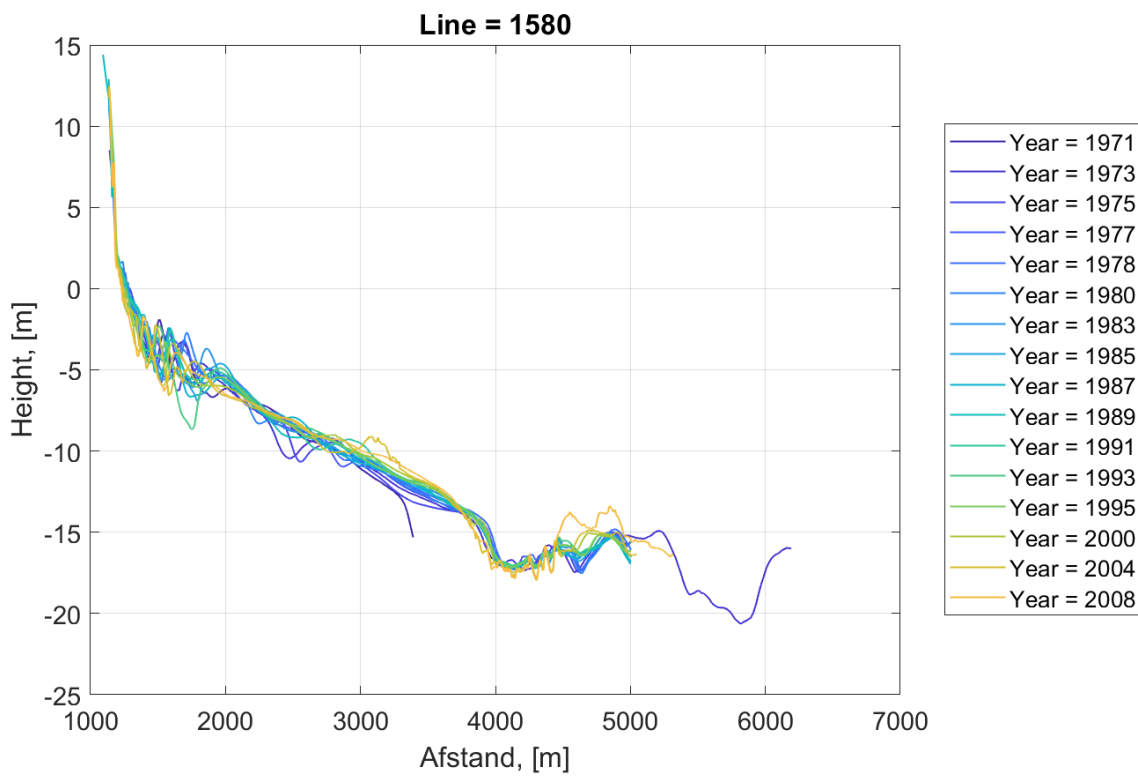
8 Referencer

- /1/ DHI et. al. (1994): Kysten nordøst for Hirtshals Havn
- /2/ Kystdirektoratet (2001): Sedimentbudget Vestkysten
- /3/ DHI (2013): Hirtshals Havn, indvirkning på kysten af inddæmning
- /4/ Kystdirektoratet (2018): Analyse af sedimenttransport ved Hirtshals havn
- /5/ DHI (2023): Sediment spredning ved udvidelsen af Hirtshals Havn. 20-10-2023
- /6/ Hallermeier (1981): A Profile Zonation for Seasonal Sand Beaches from Wave Climate. Coastal Engineering. 4: 253-277

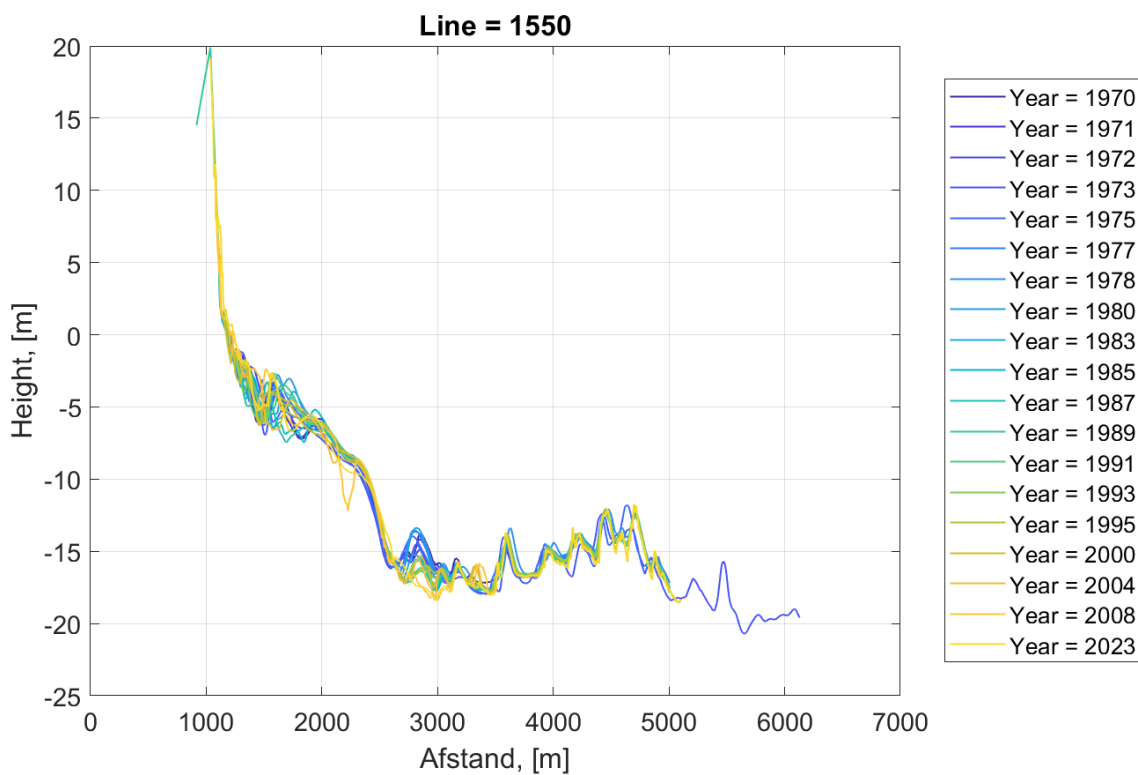
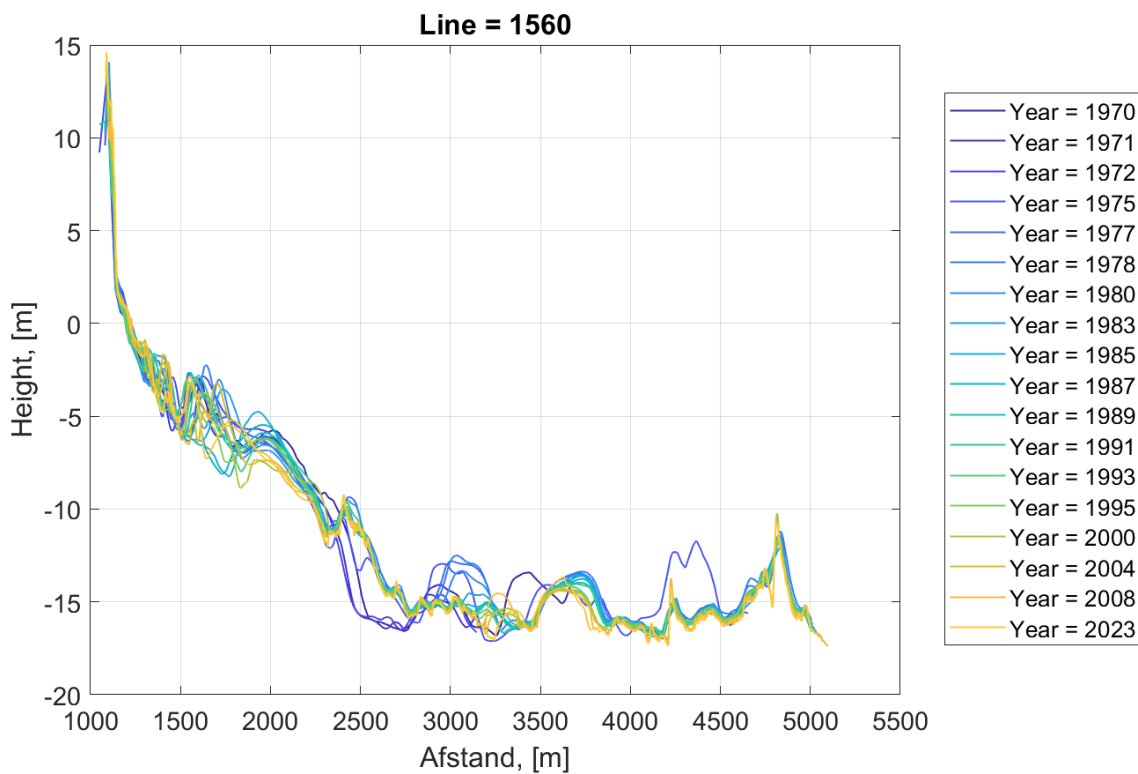
Bilag A Vestkystprofiler



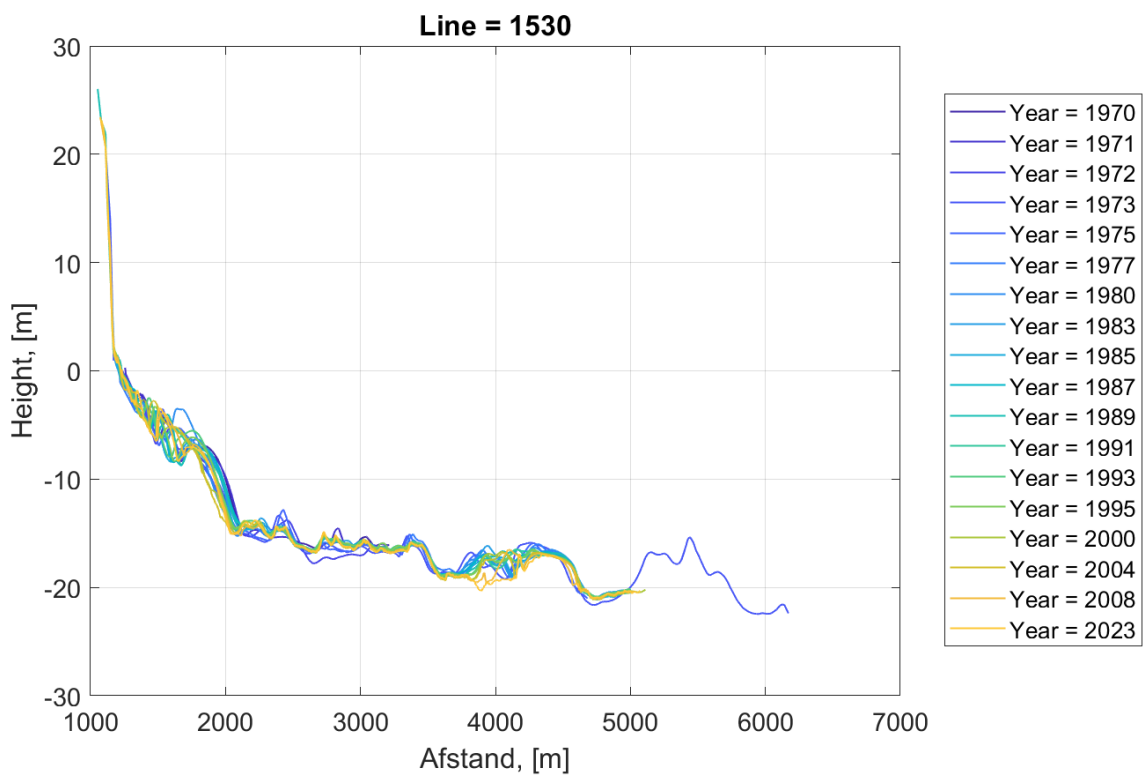
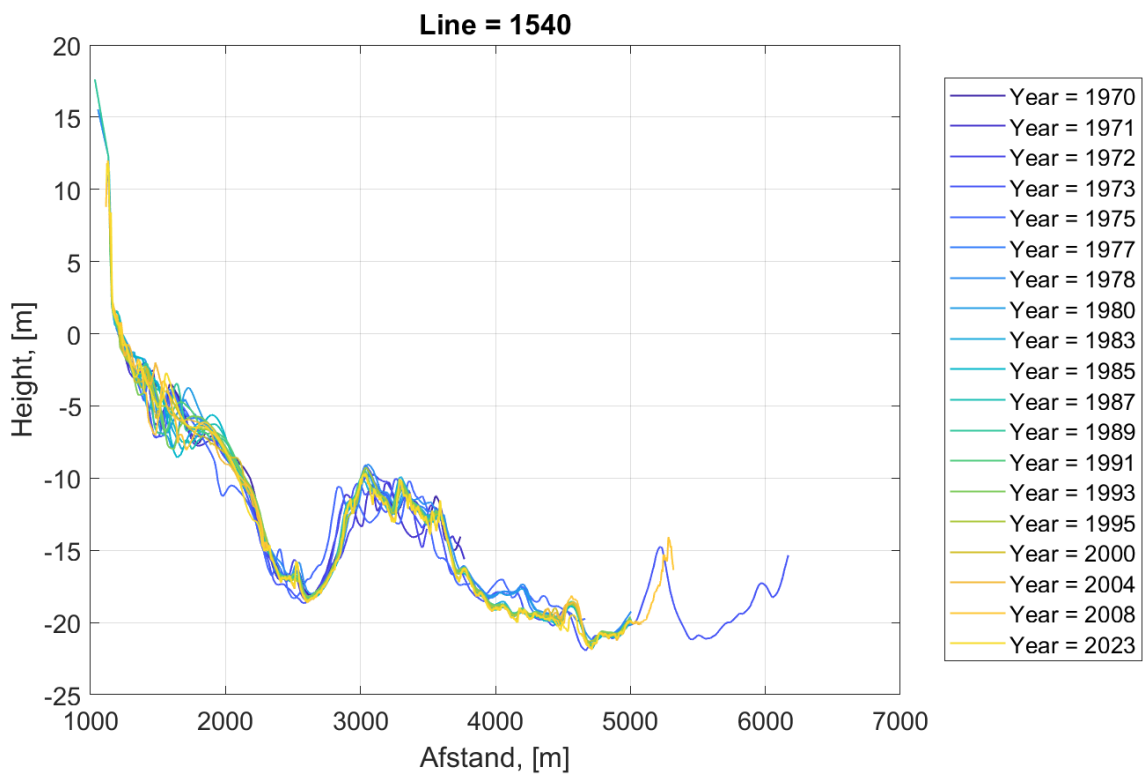
Figur A-1: Vestkystprofiler.
 Øverst: Line = 1600. Nederst: Line = 1590.



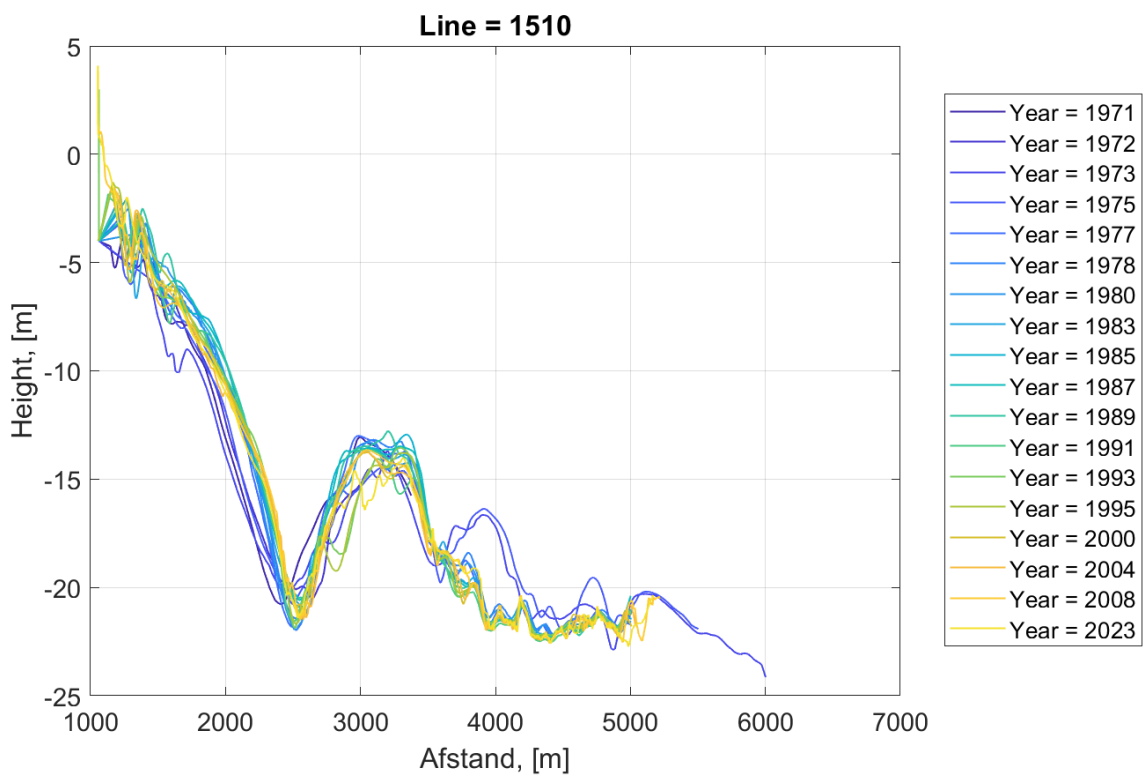
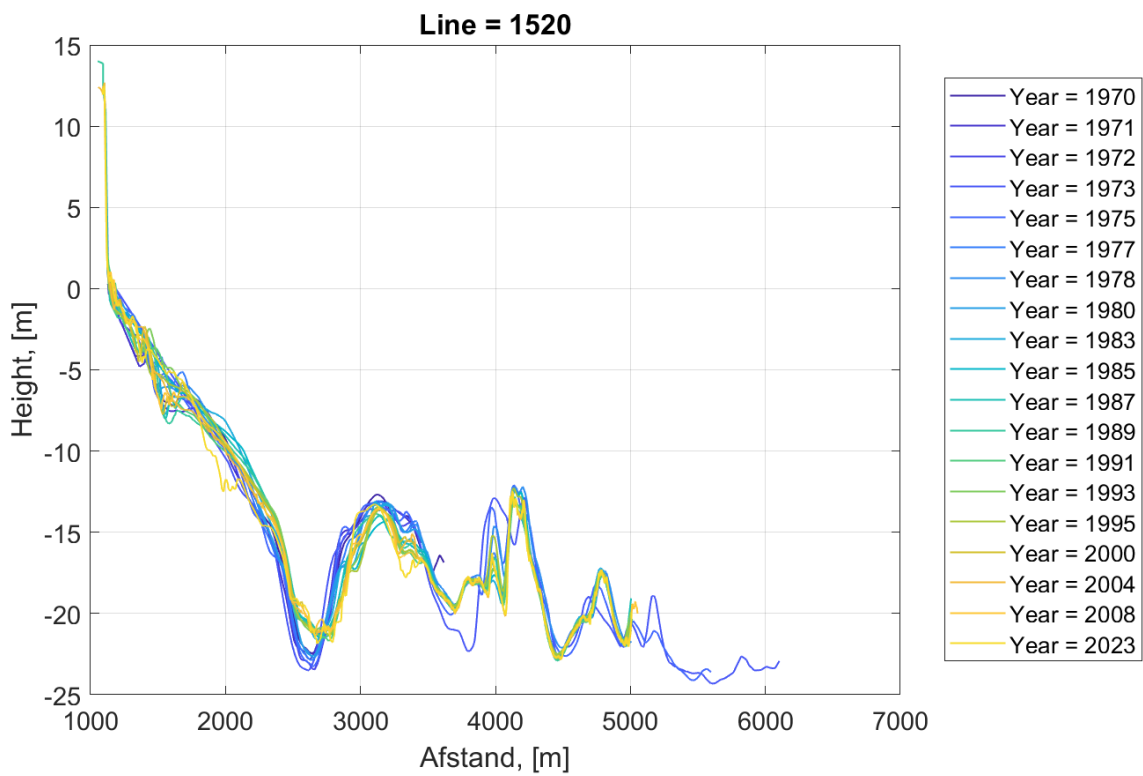
Figur A-2: Vestkystprofiler.
 Øverst: Line = 1580. Nederst: Line = 1570.



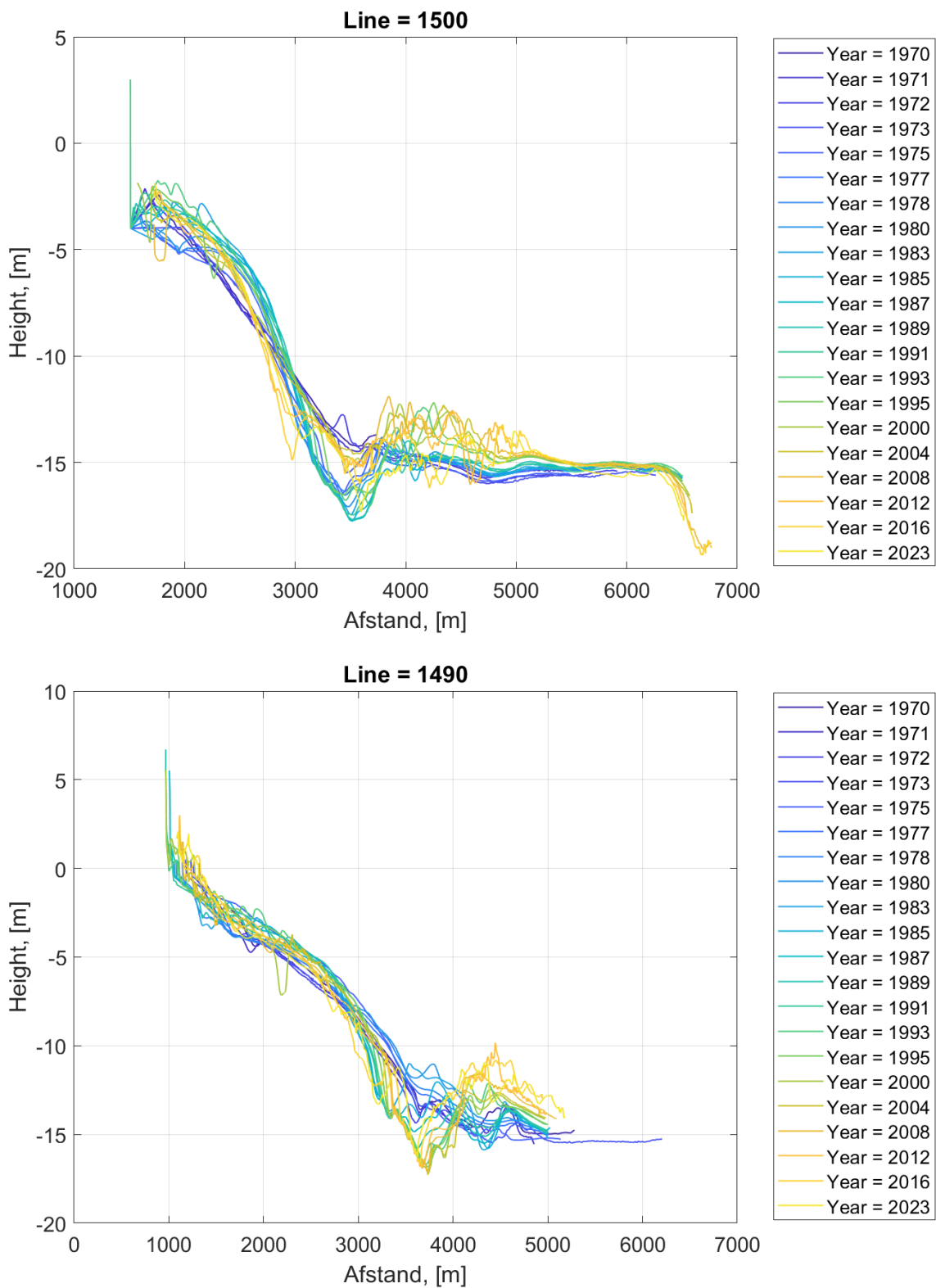
Figur A-3: Vestkystprofiler.
 Øverst: Line = 1560. Nederst: Line = 1550.



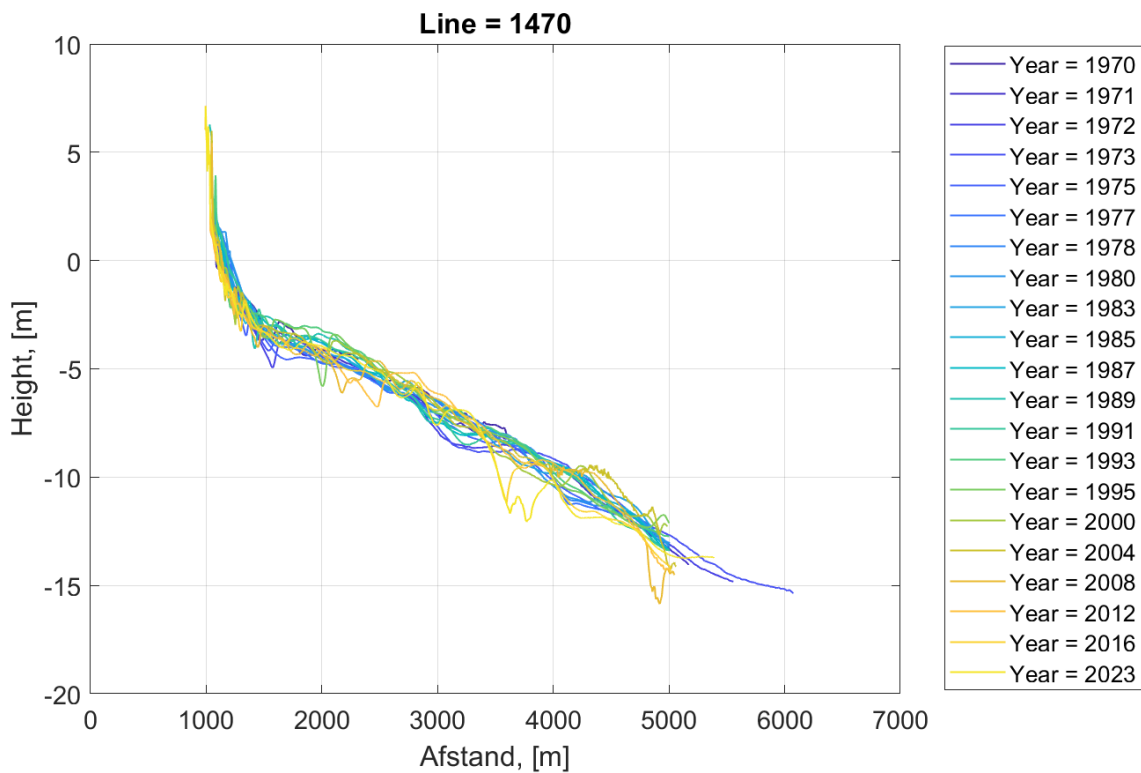
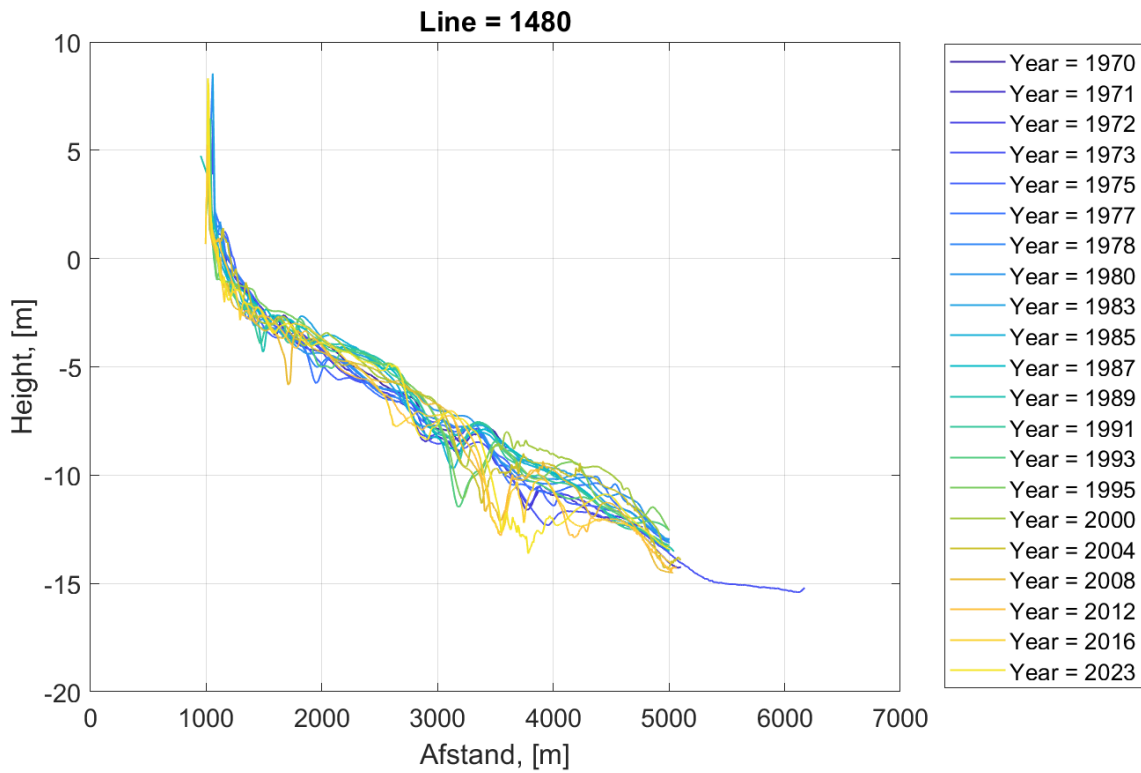
Figur A-4: Vestkystprofiler.
 Øverst: Line = 1540. Nederst: Line = 1530.



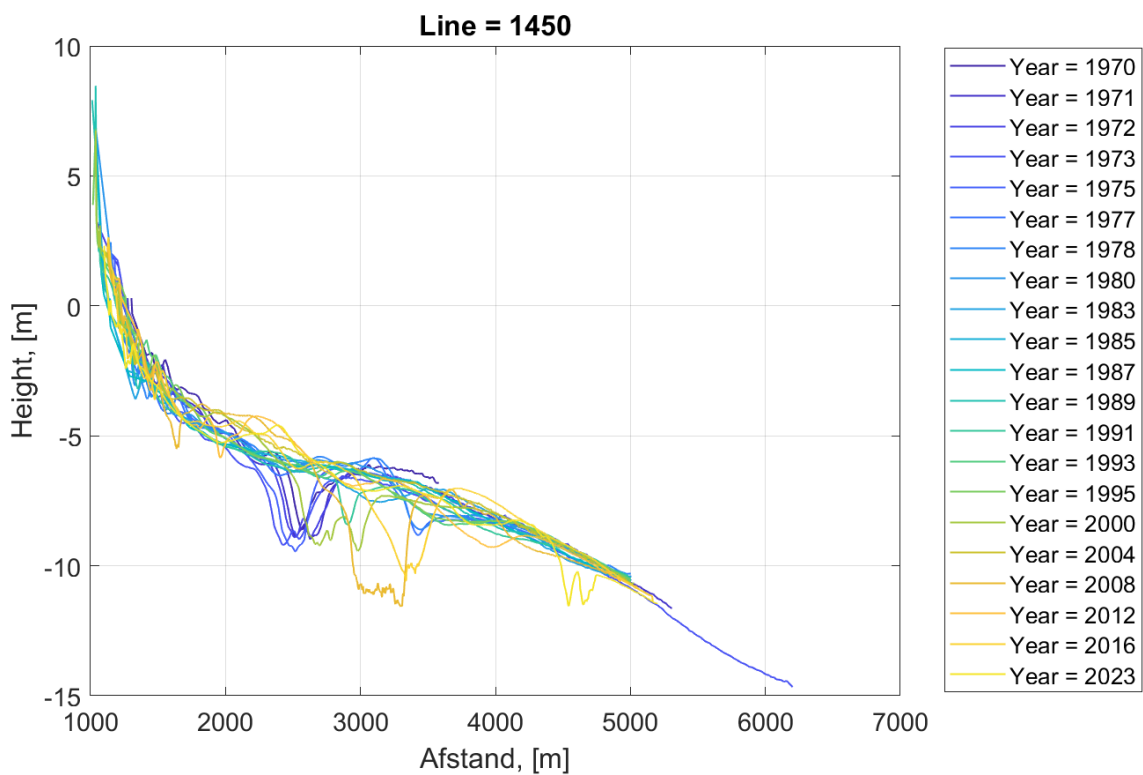
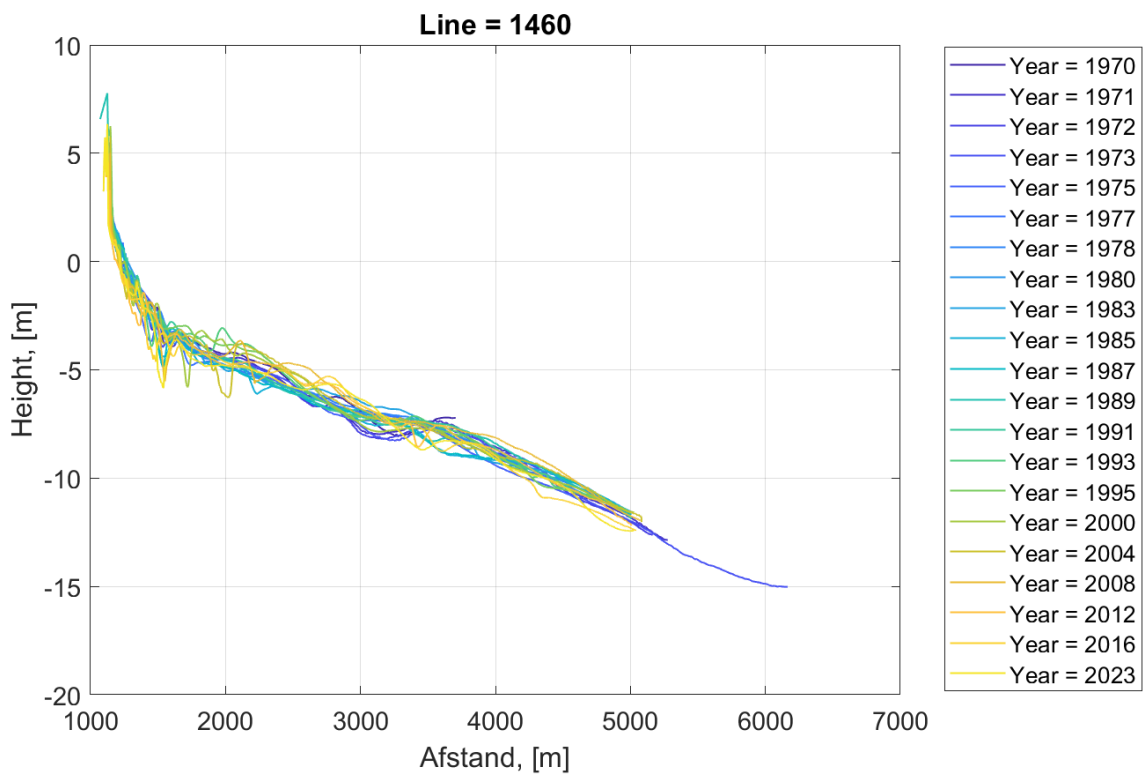
Figur A-5: Vestkystprofiler.
 Øverst: Line = 1520. Nederst: Line = 1510.



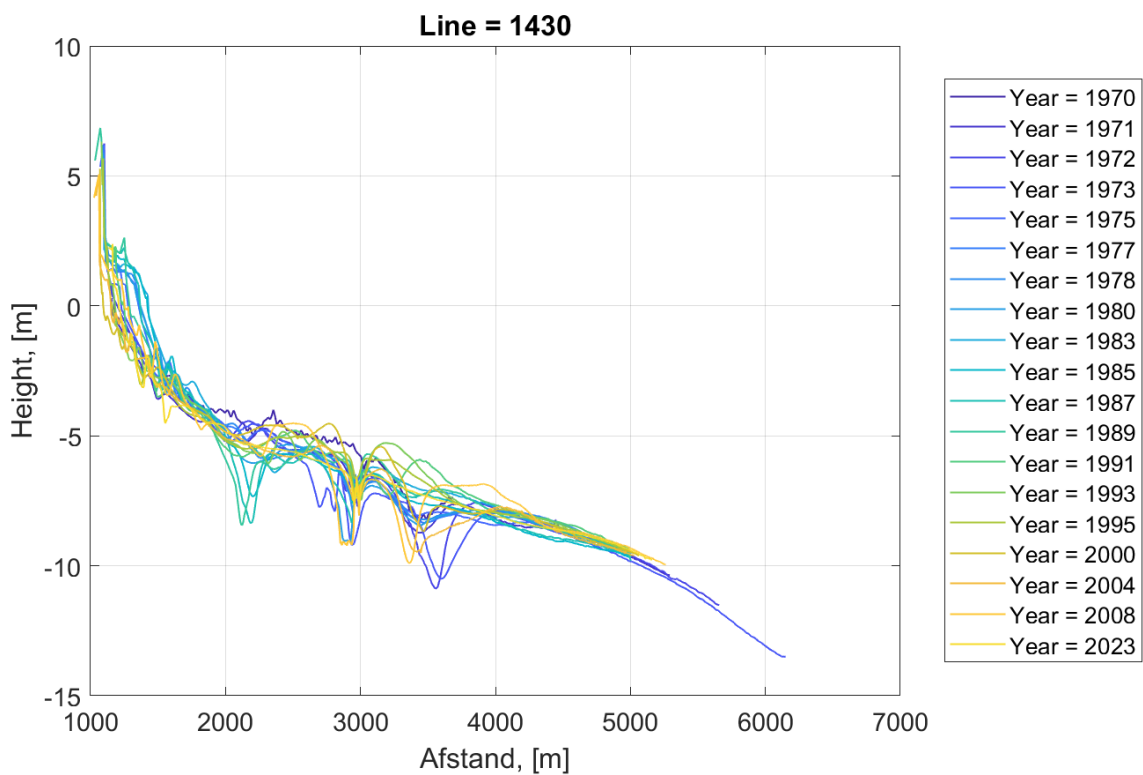
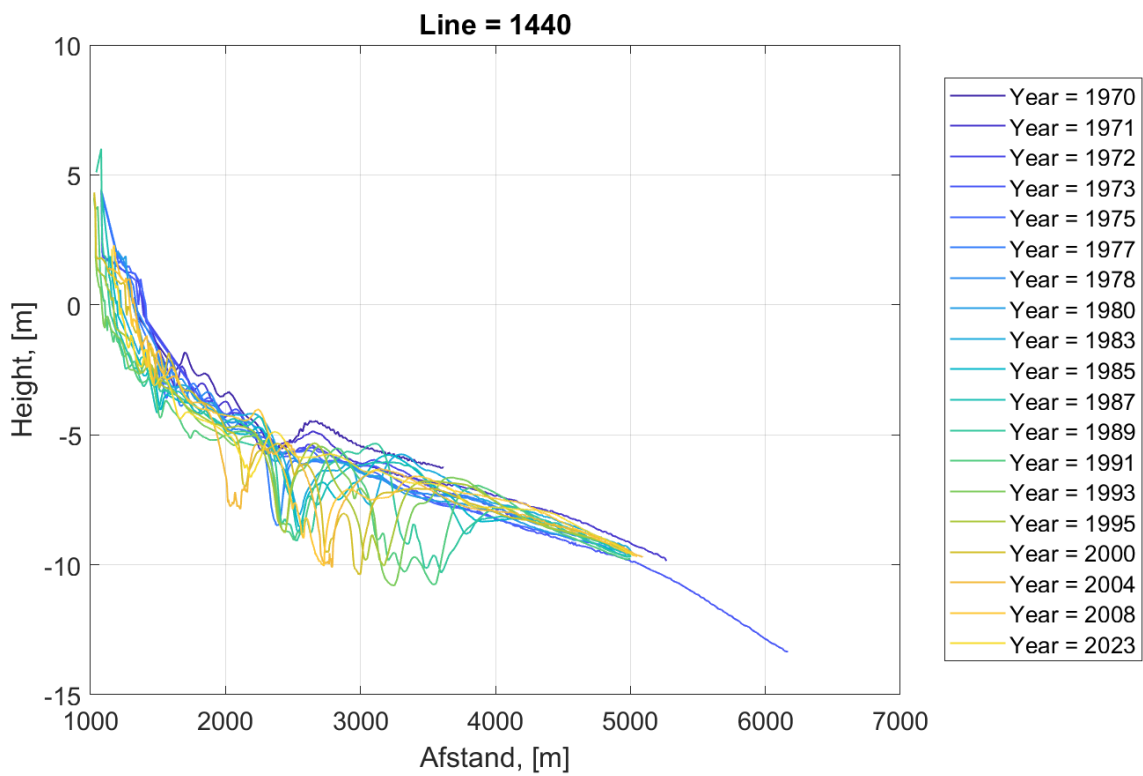
Figur A-6: Vestkystprofiler.
 Øverst: Line = 1500. Nederst: Line = 1490.



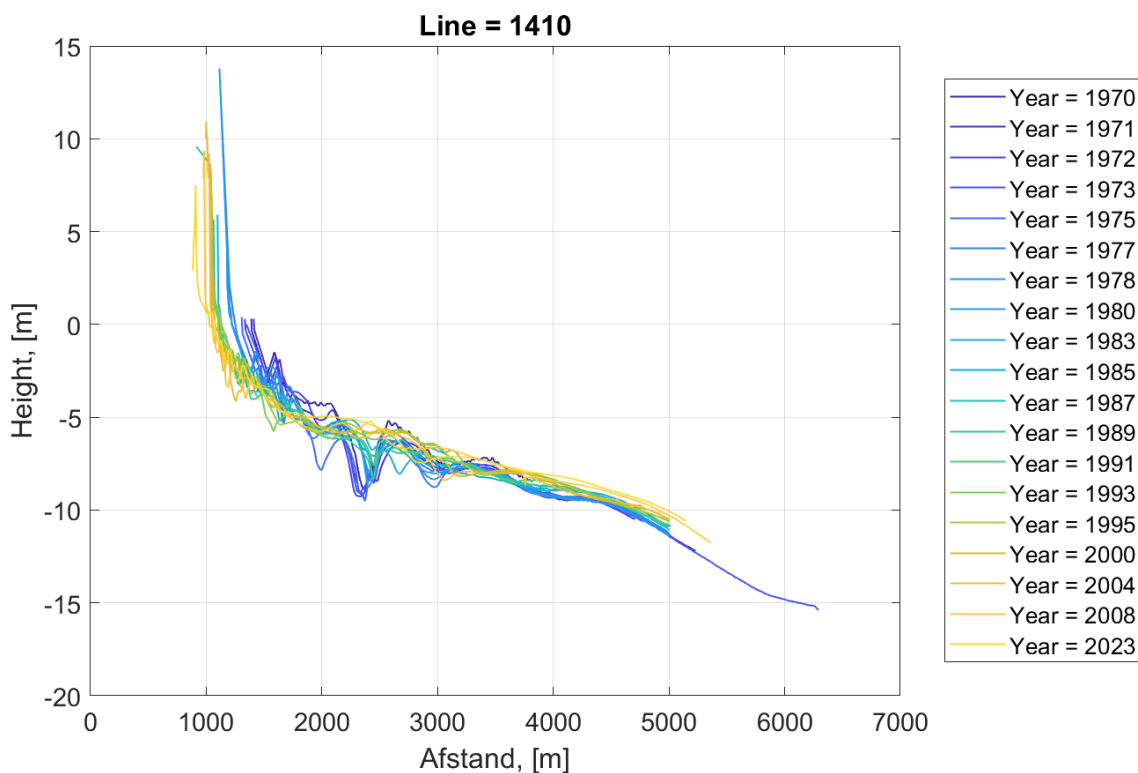
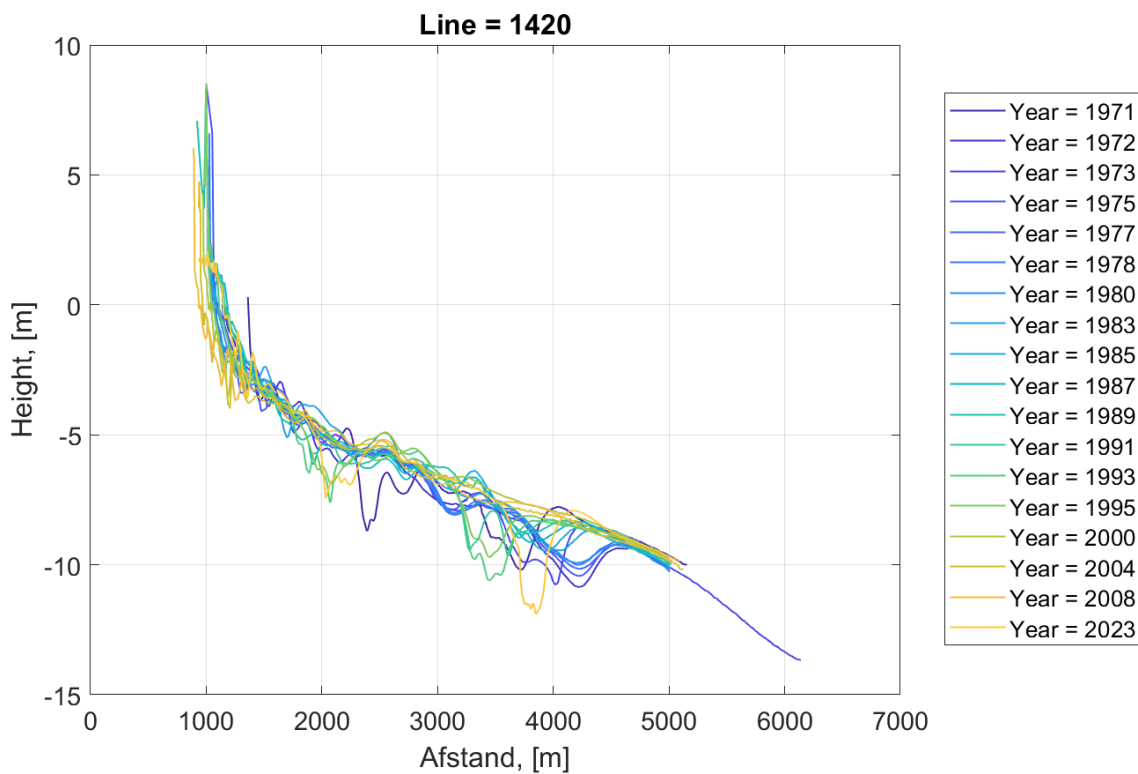
Figur A-7: Vestkystprofiler.
 Øverst: Line = 1480. Nederst: Line = 1470.



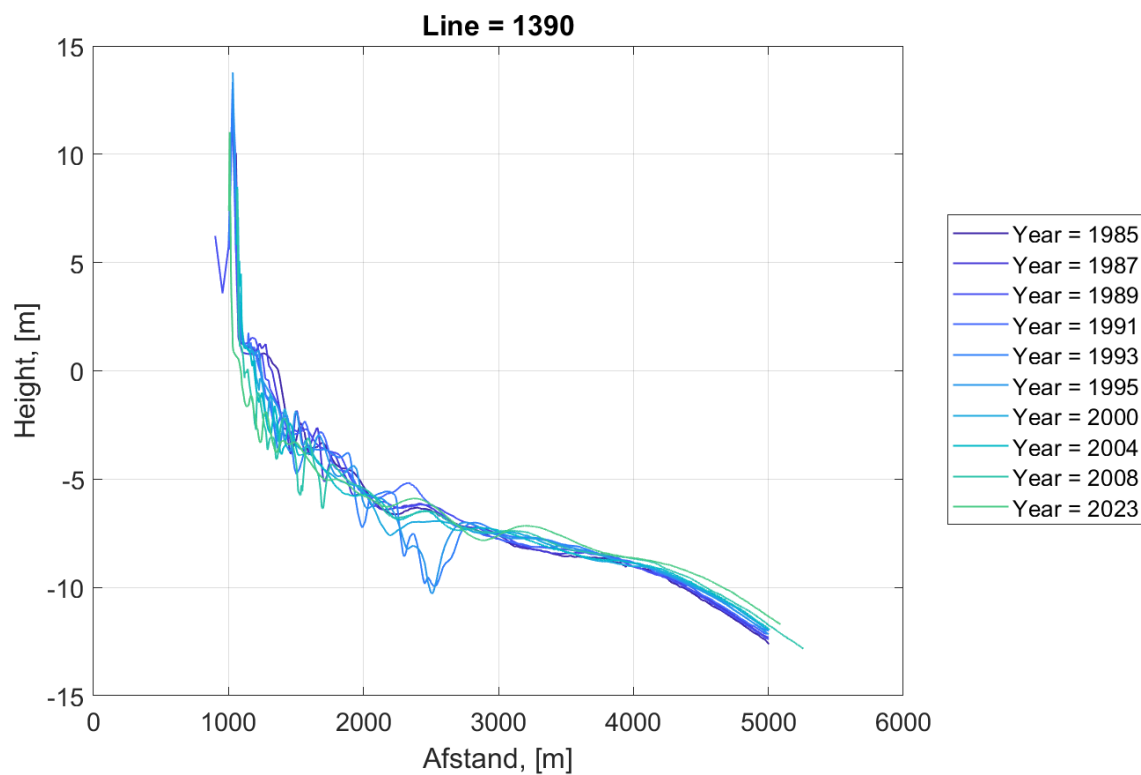
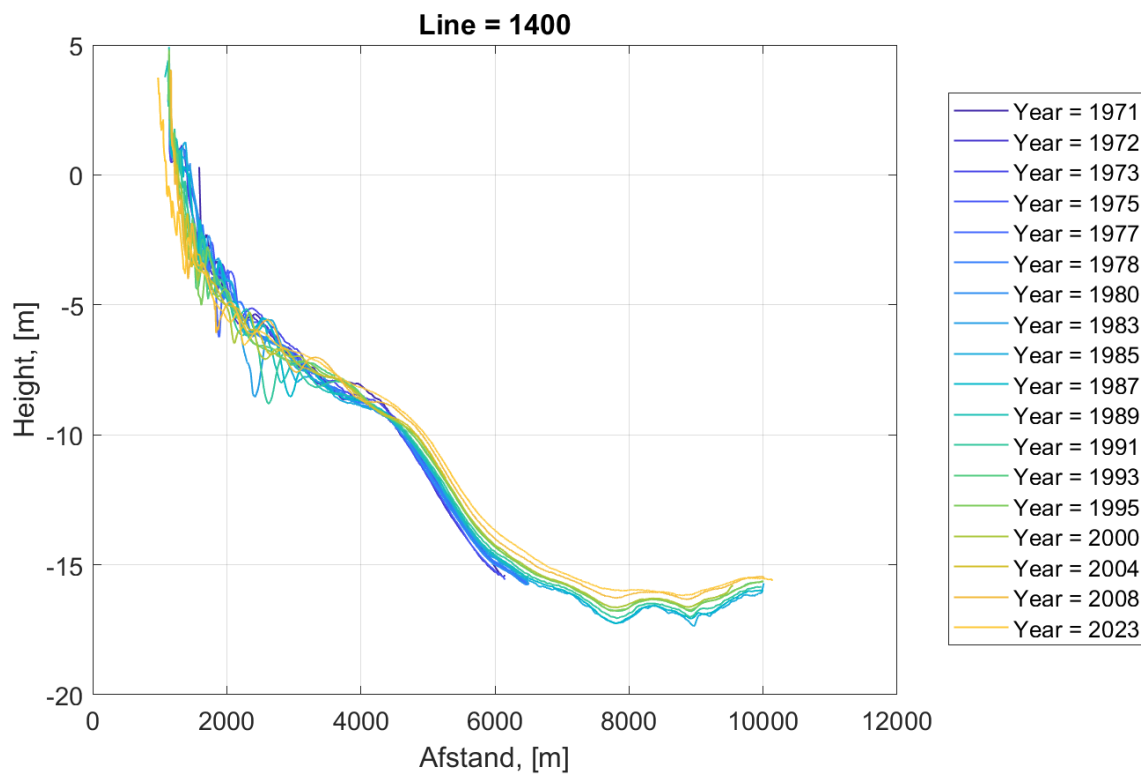
Figur A-8: Vestkystprofiler.
 Øverst: Line = 1460. Nederst: Line = 1450.



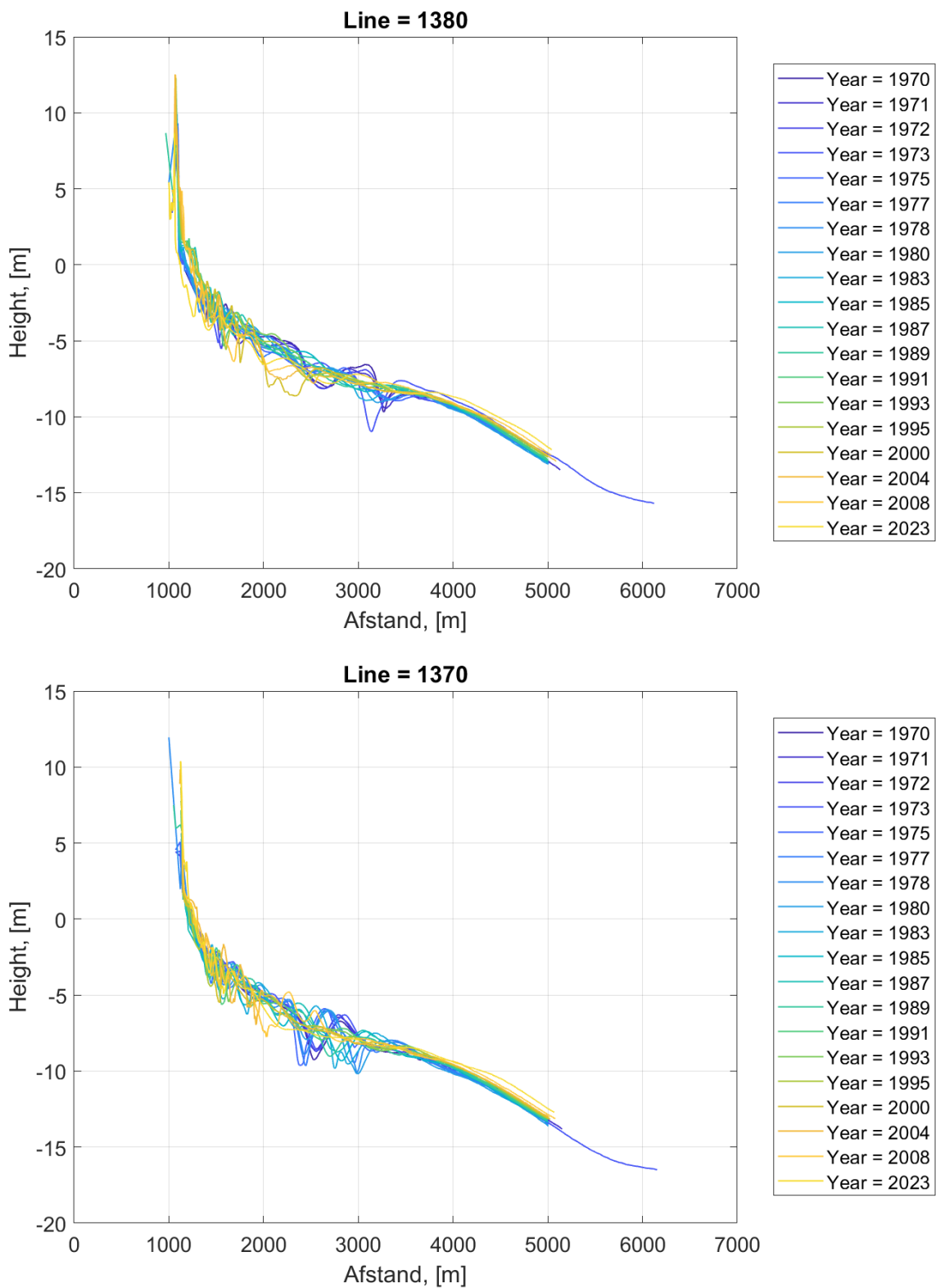
Figur A-9: Vestkystprofiler.
 Øverst: Line = 1440. Nederst: Line = 1430.



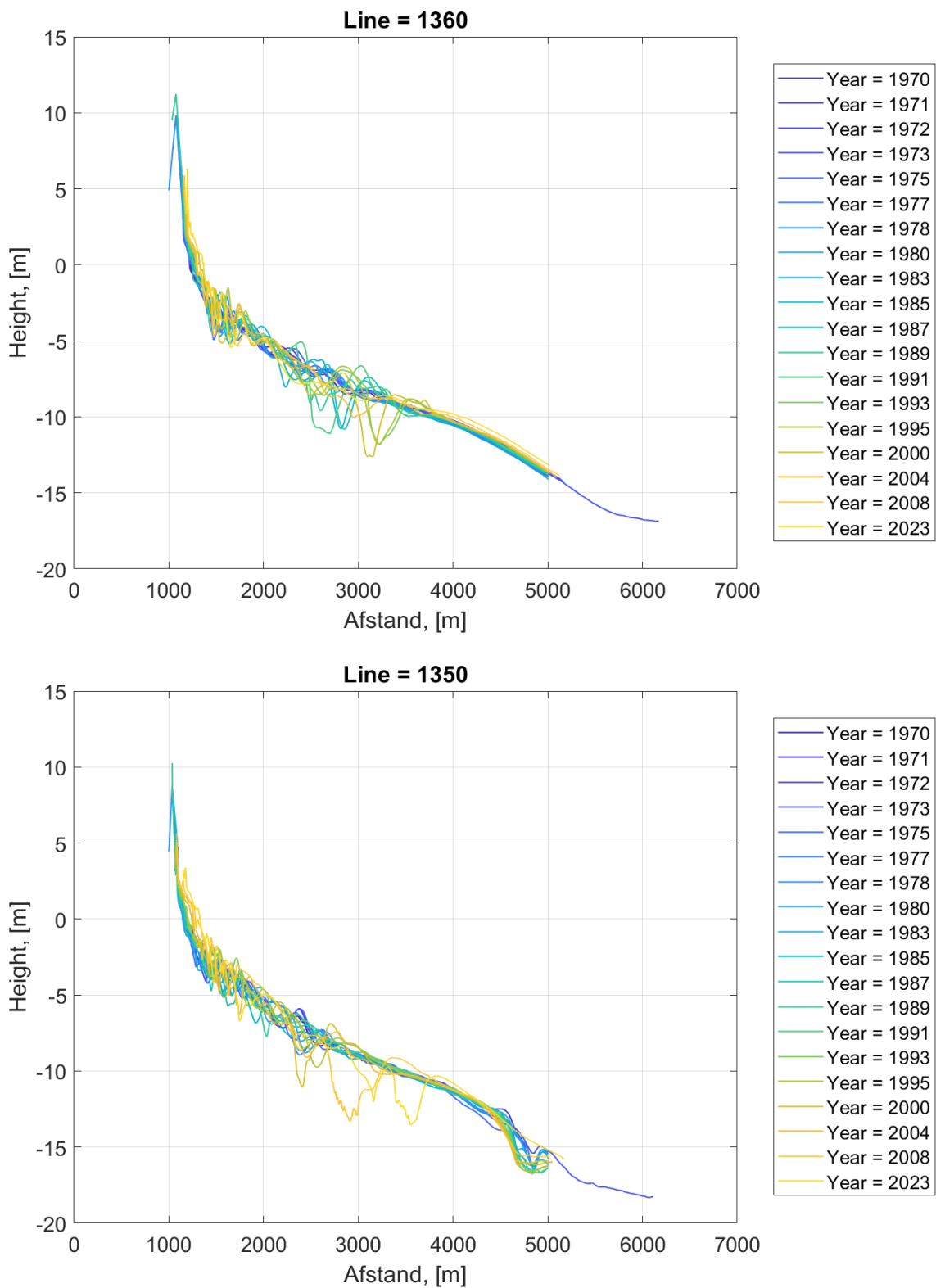
Figur A-10: Vestkystprofiler.
 Øverst: Line = 1420. Nederst: Line = 1410.



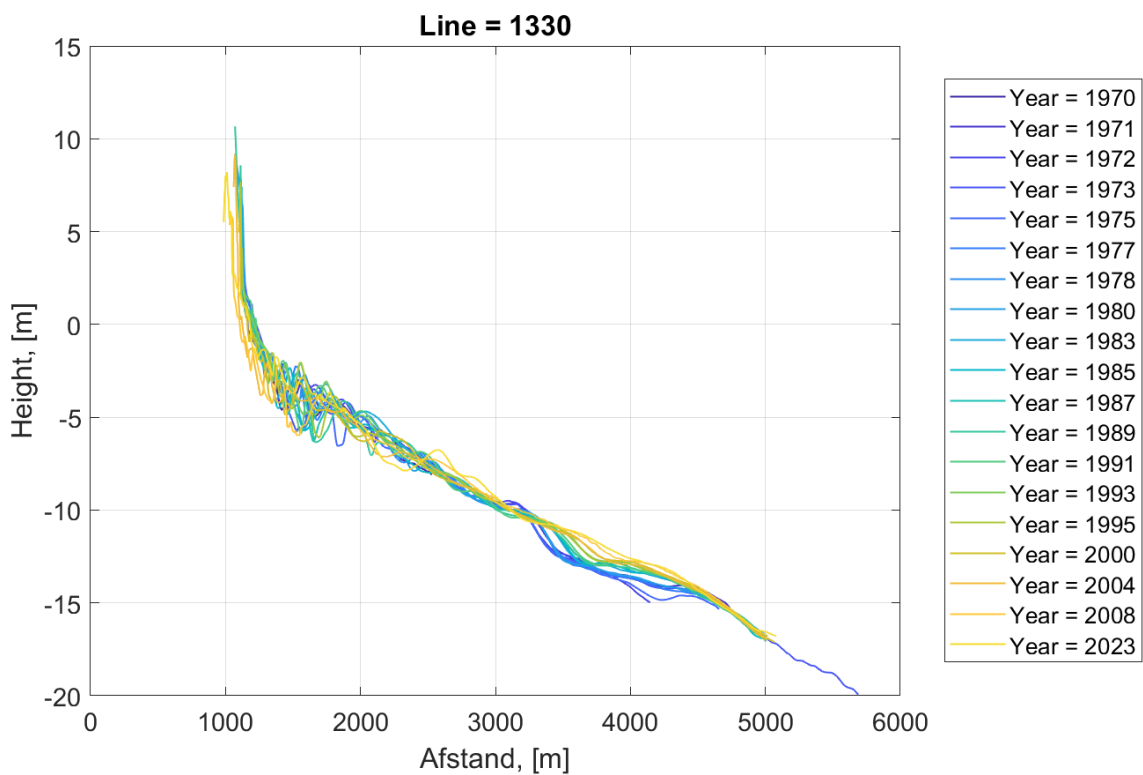
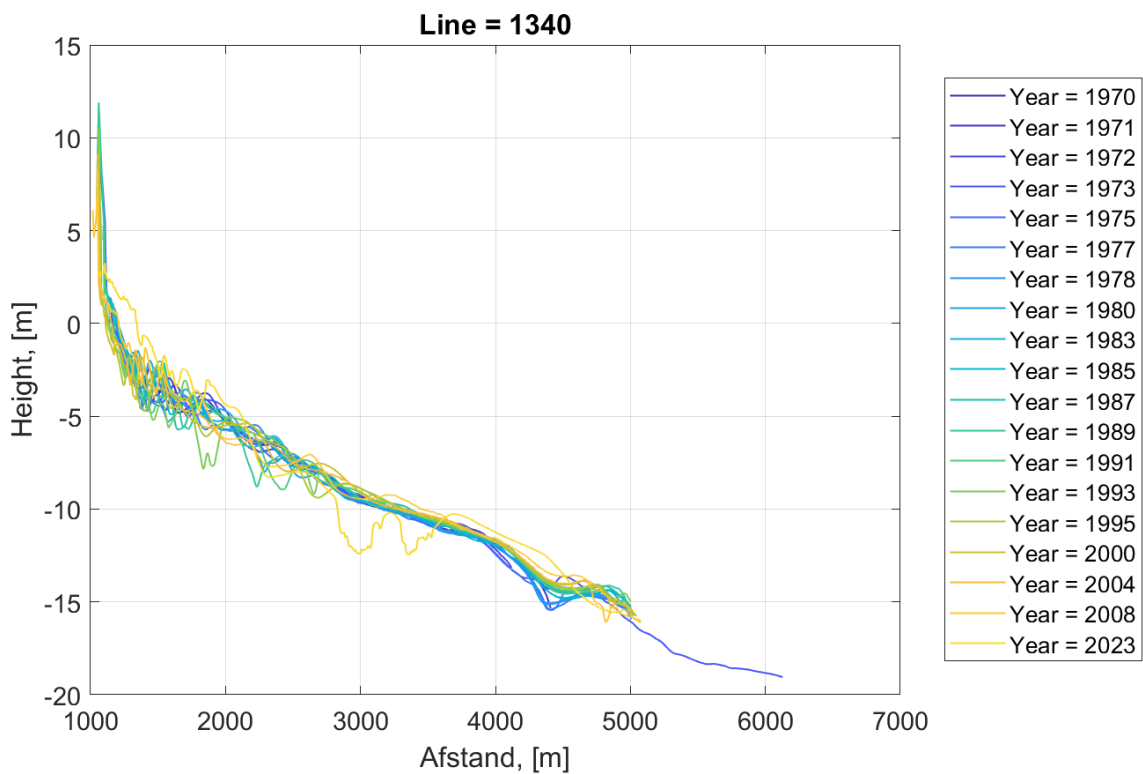
Figur A-11: Vestkystprofiler.
 Øverst: Line = 1400. Nederst: Line = 1390.



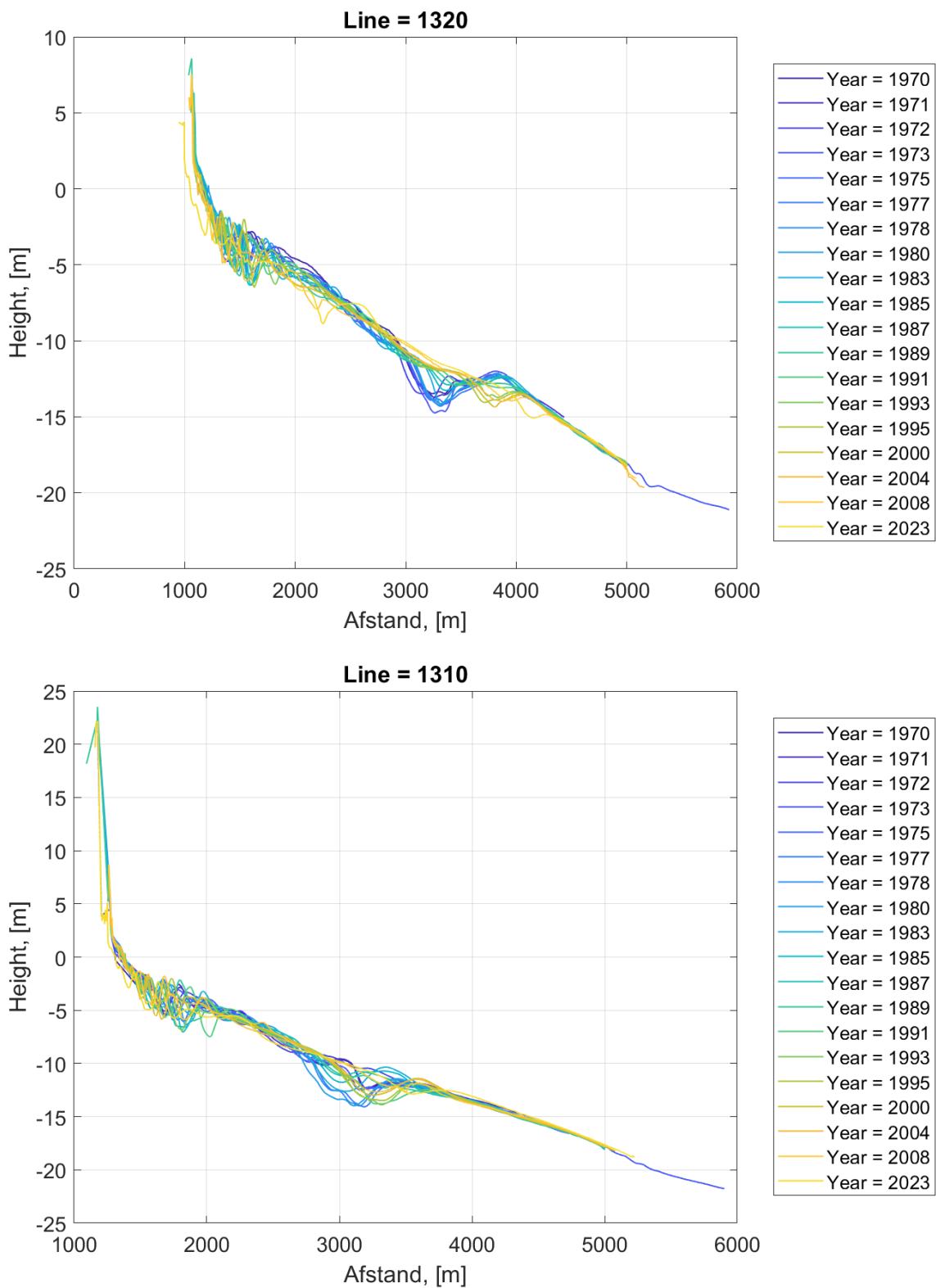
Figur A-12: Vestkystprofiler.
 Øverst: Line = 1380. Nederst: Line = 1370.



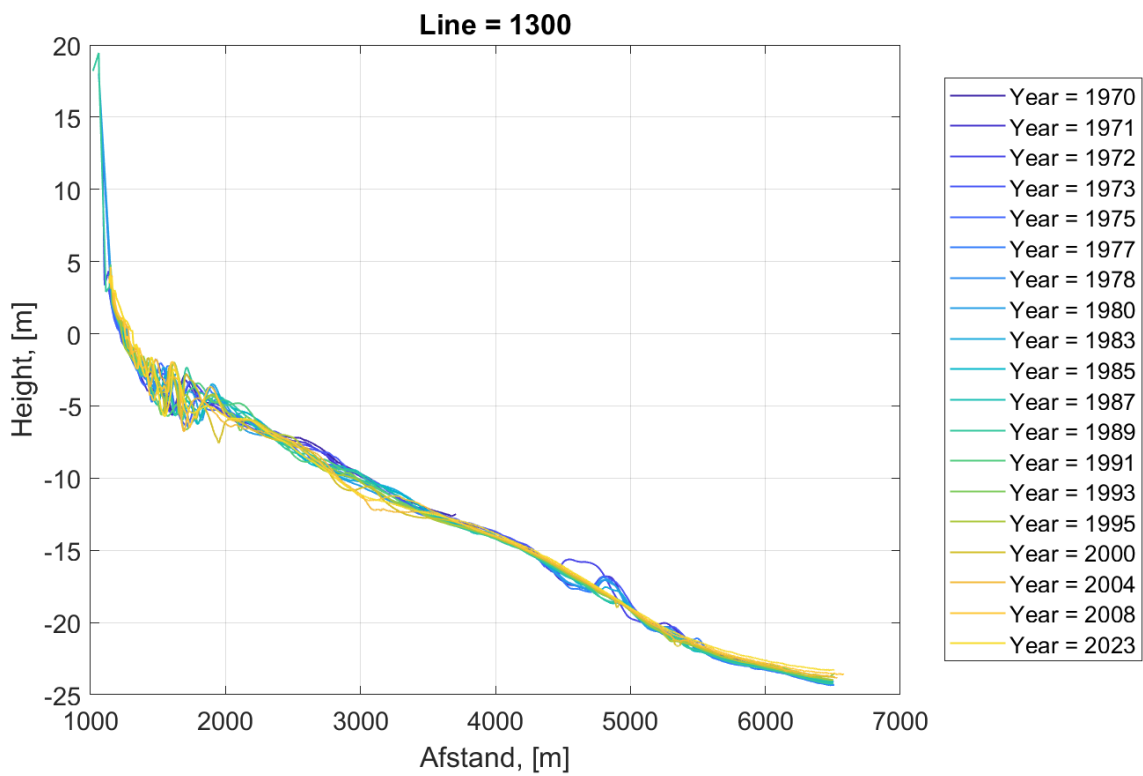
Figur A-13: Vestkystprofiler.
 Øverst: Line = 1360. Nederst: Line = 1350.



Figur A-14: Vestkystprofiler.
 Øverst: Line = 1340. Nederst: Line = 1330.

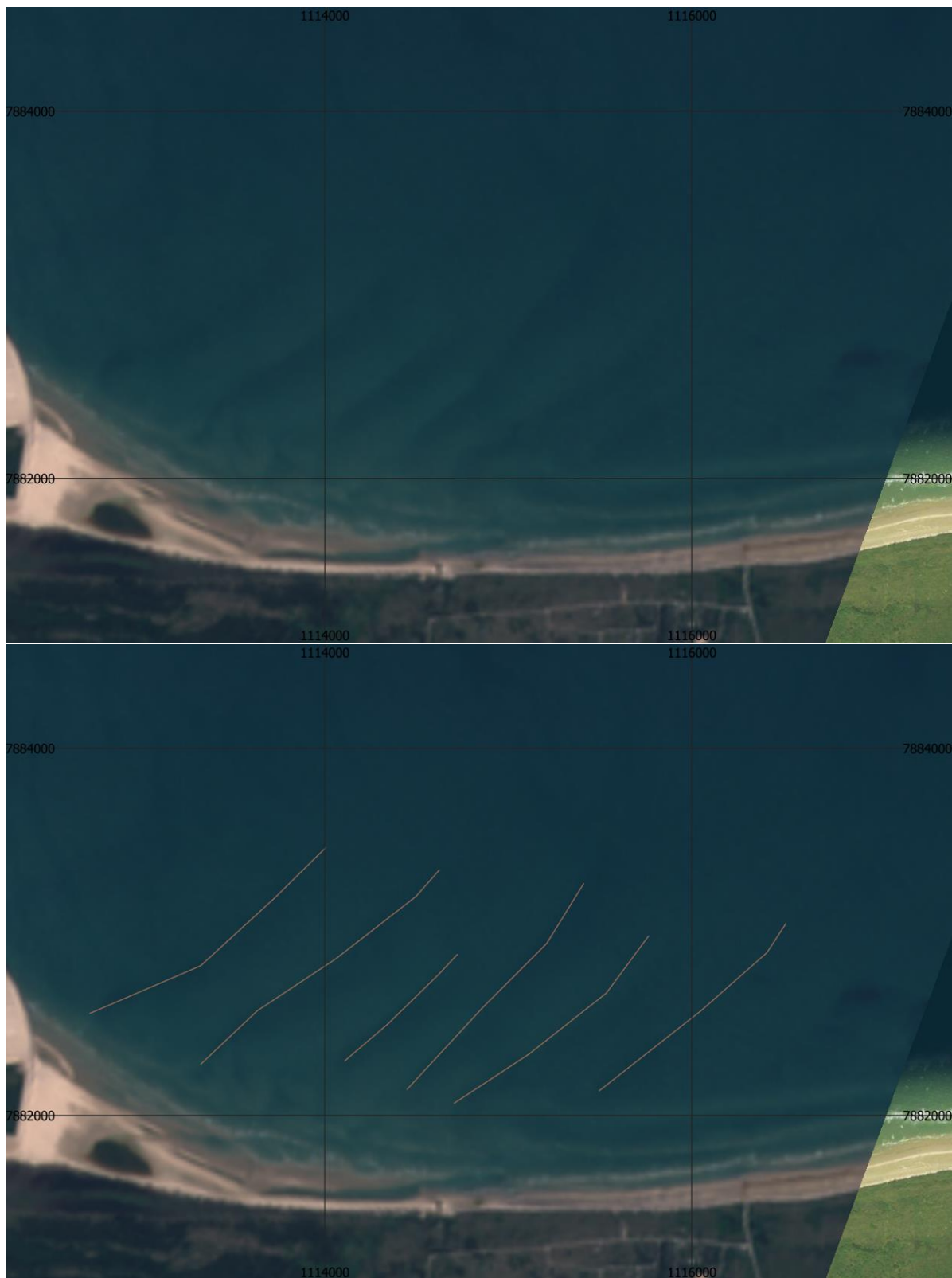


Figur A-15: Vestkystprofiler.
 Øverst: Line = 1320. Nederst: Line = 1310.

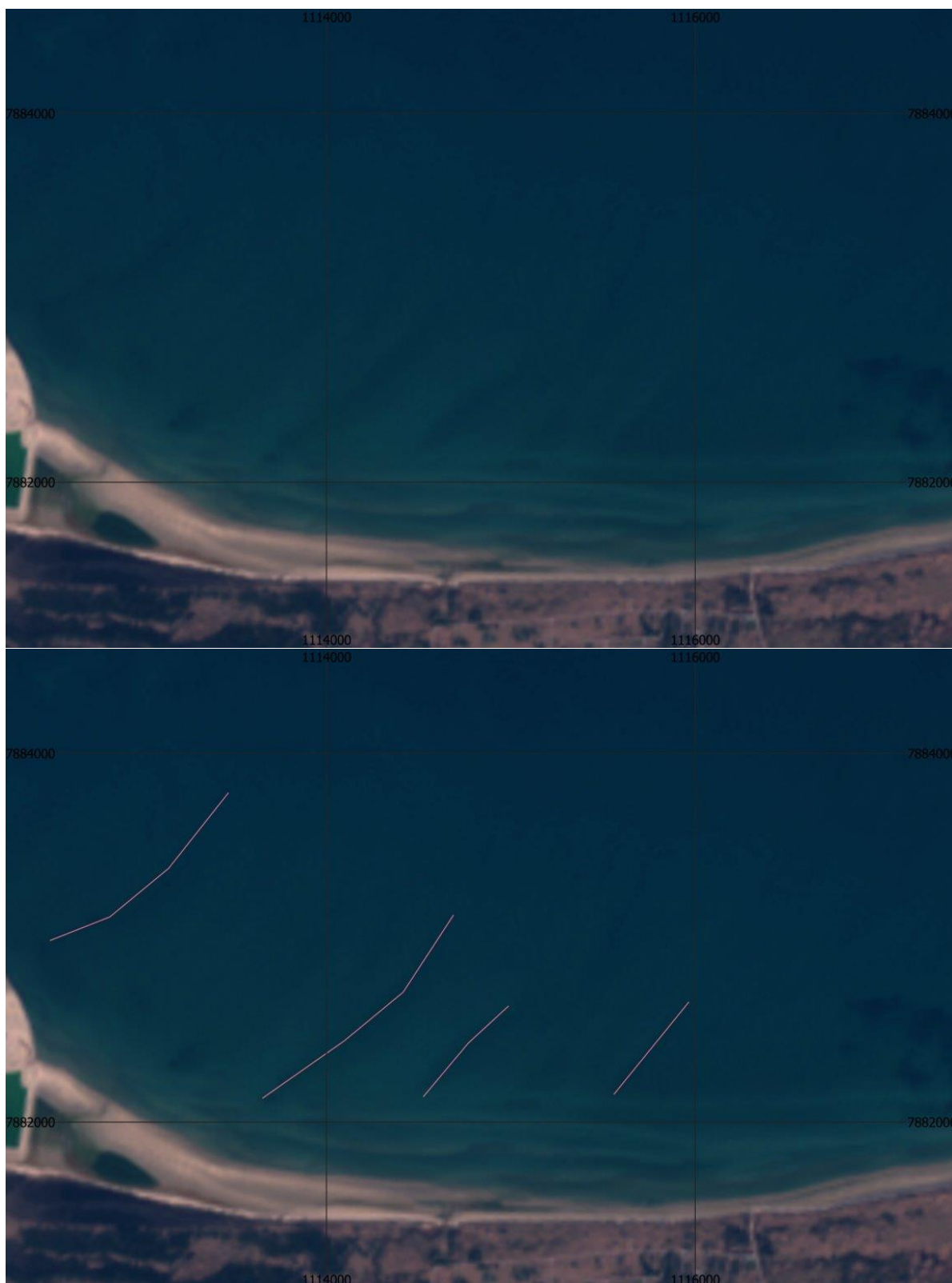


Figur A-16: Vestkystprofil.
Line = 1300.

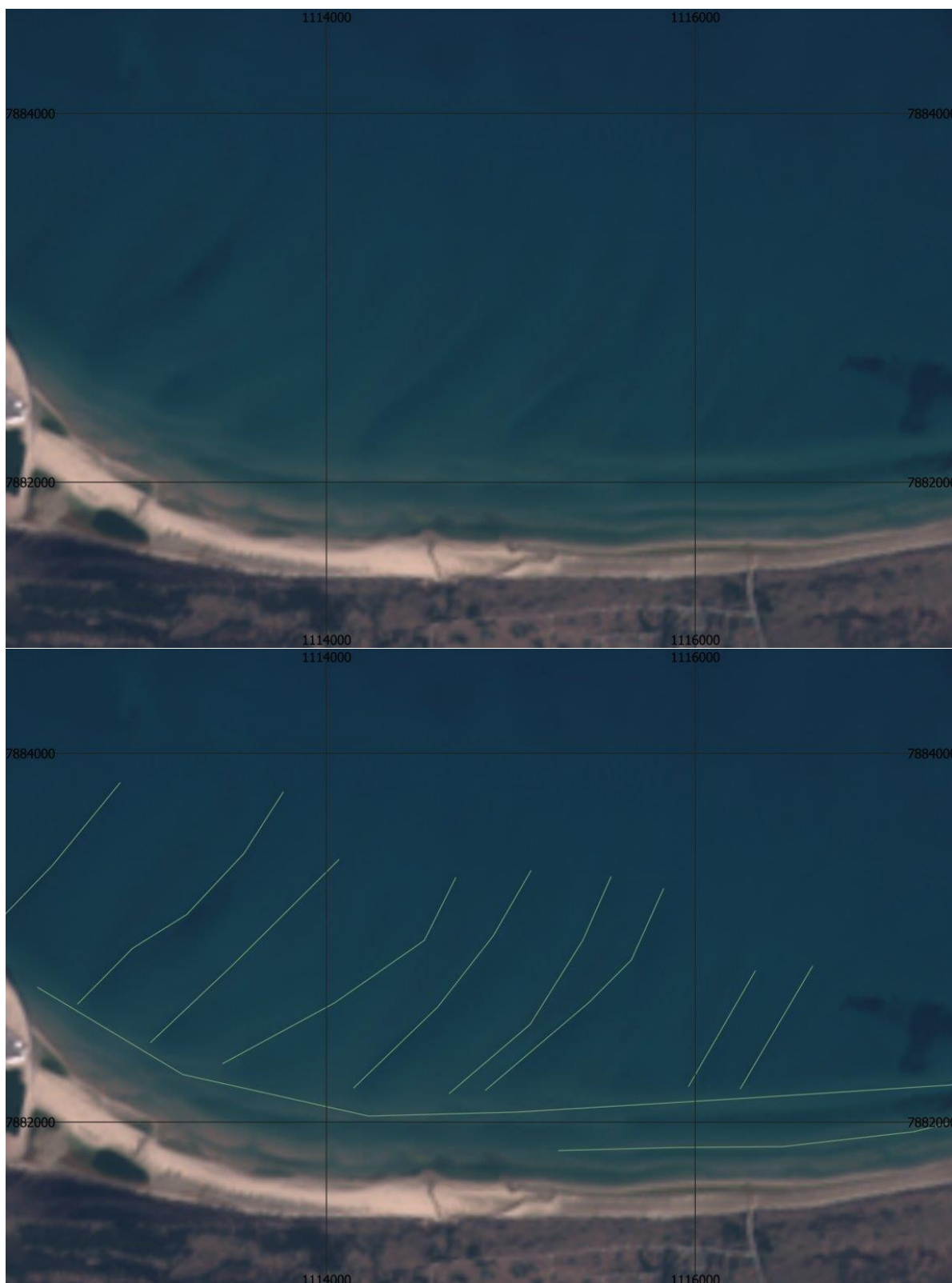
Bilag B Sentinel 2 billeder



Figur B-17: Sentinel 2 billede fra 2017.
 Øverst: Uden markering af sandbølger. Nederst: Med markering af sandbølger.

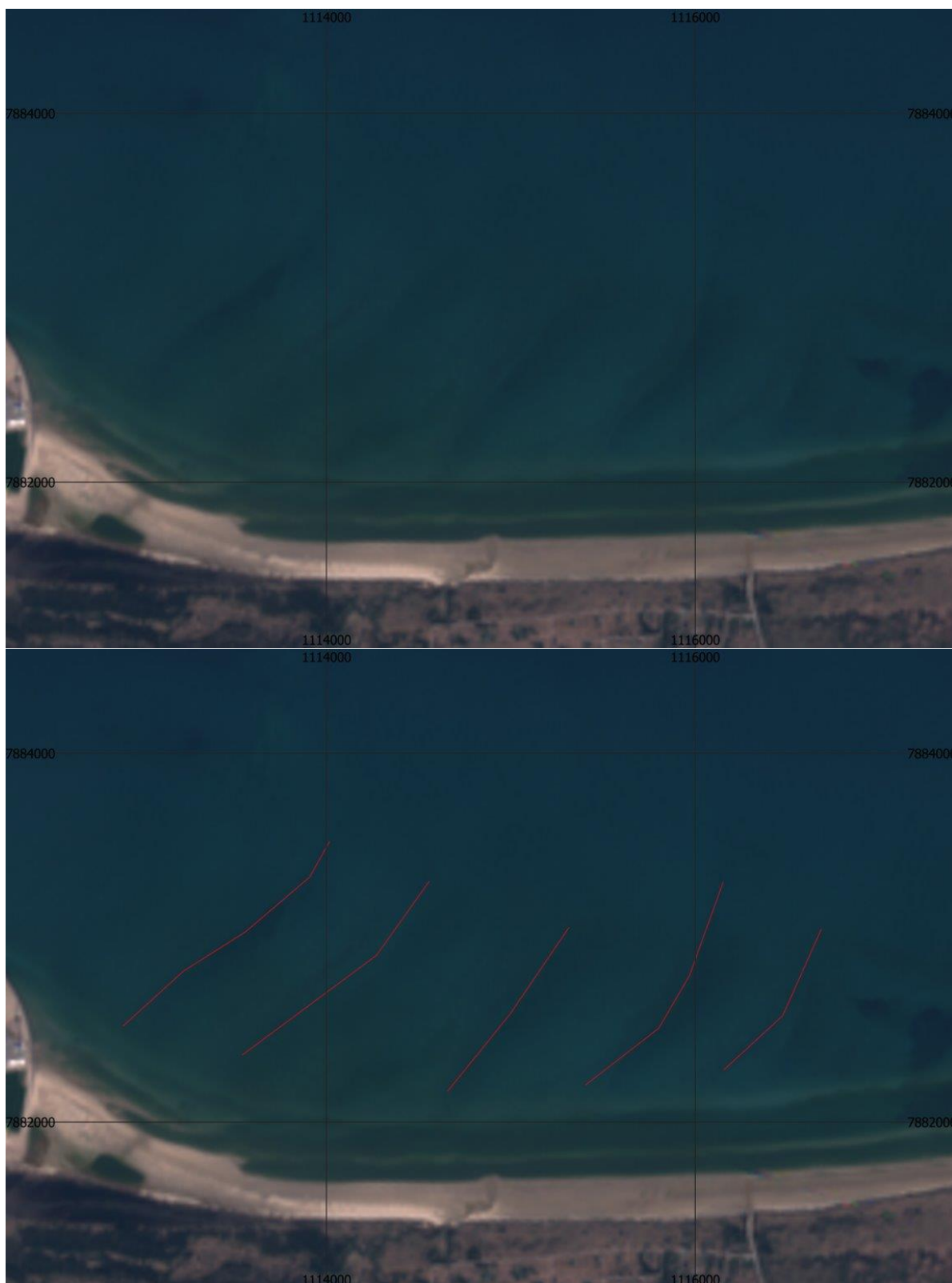


Figur B-18: Sentinel 2 billede fra 2018.
 Øverst: Uden markering af sandbølger. Nederst: Med markering af sandbølger.



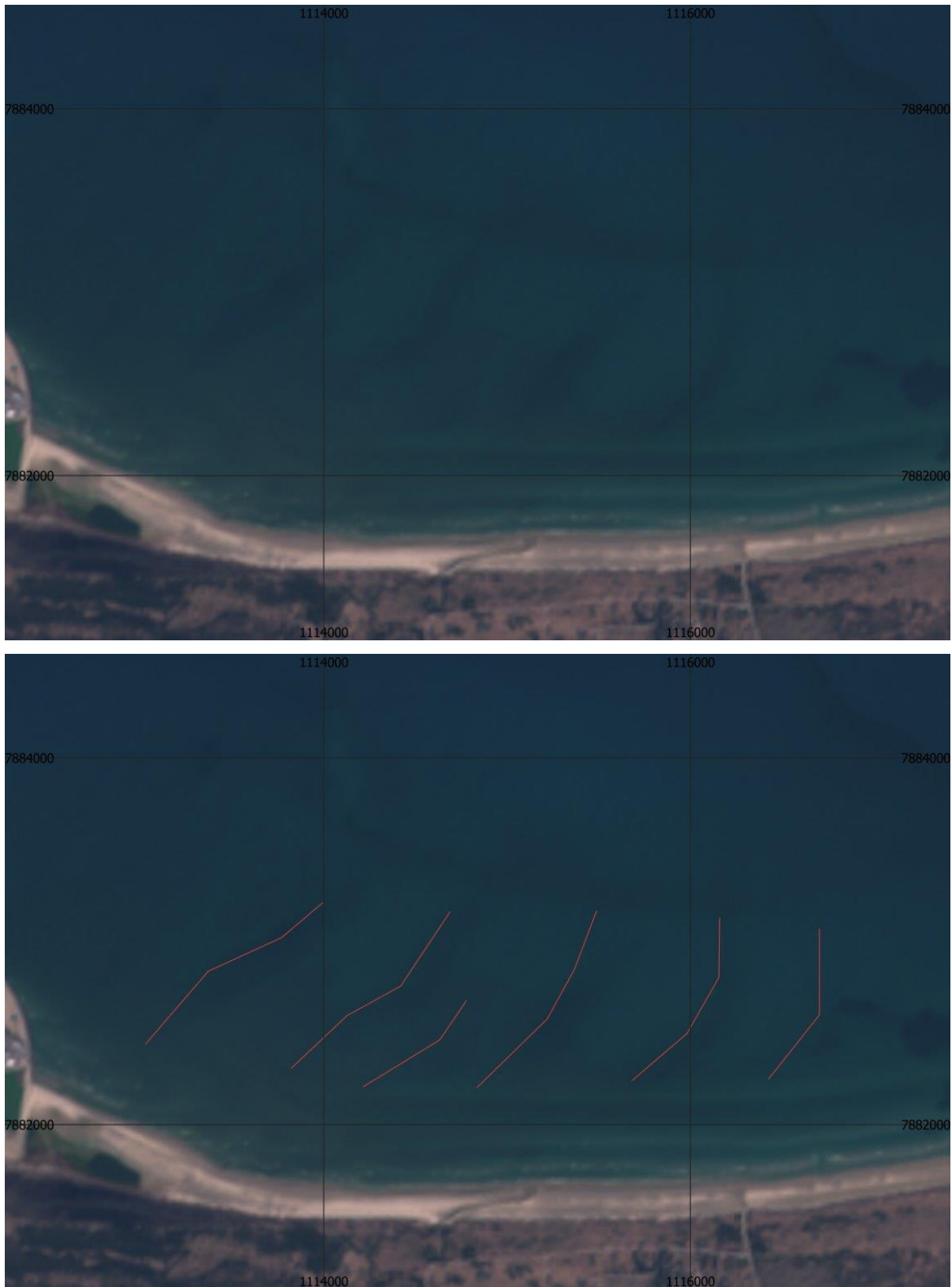
Figur B-19: Sentinel 2 billede fra 2019.

Øverst: Uden markering af sandbølger. Nederst: Med markering af sandbølger.

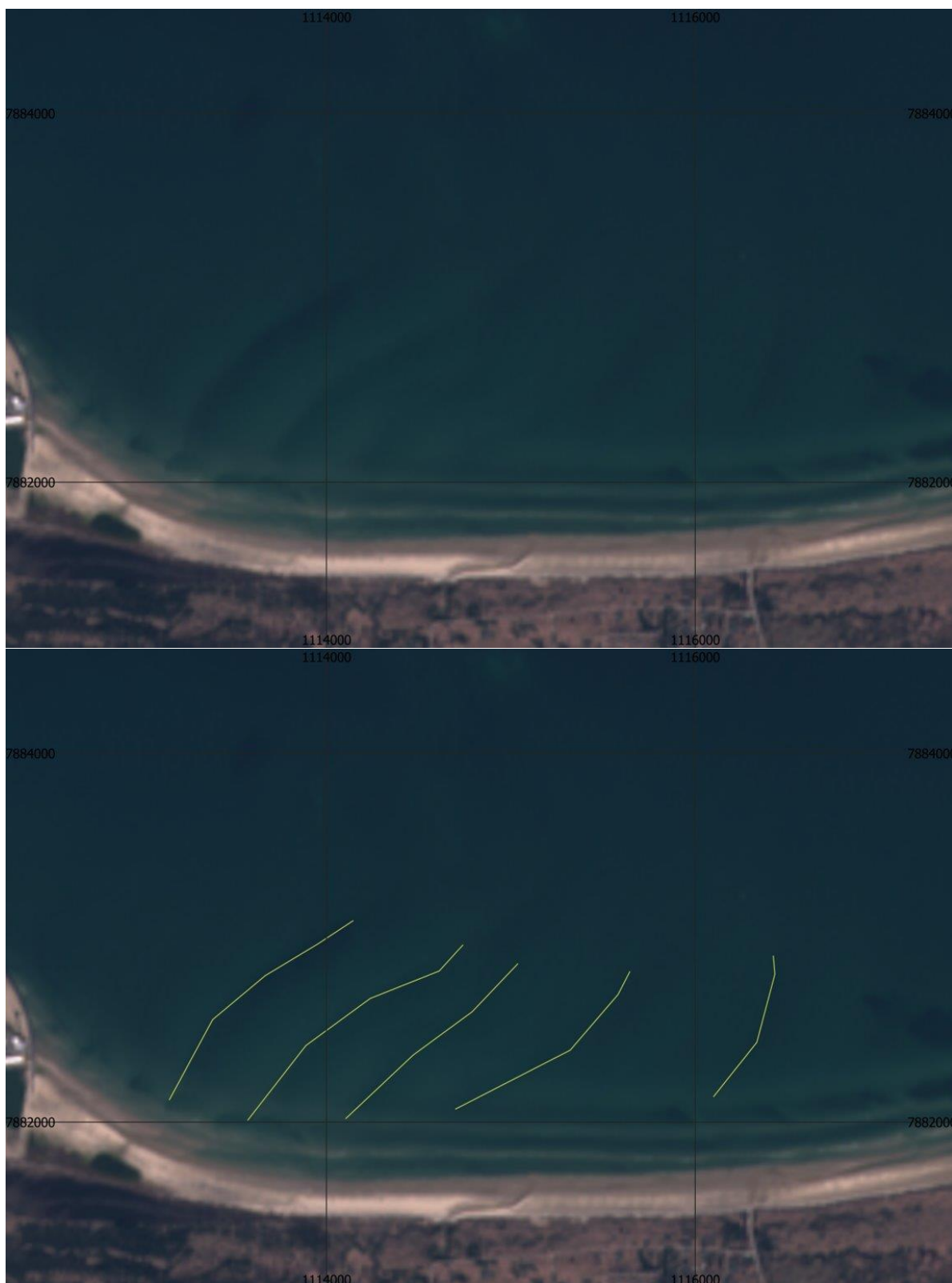


Figur B-20: Sentinel 2 billede fra 2020.

Øverst: Uden markering af sandbølger. Nederst: Med markering af sandbølger.

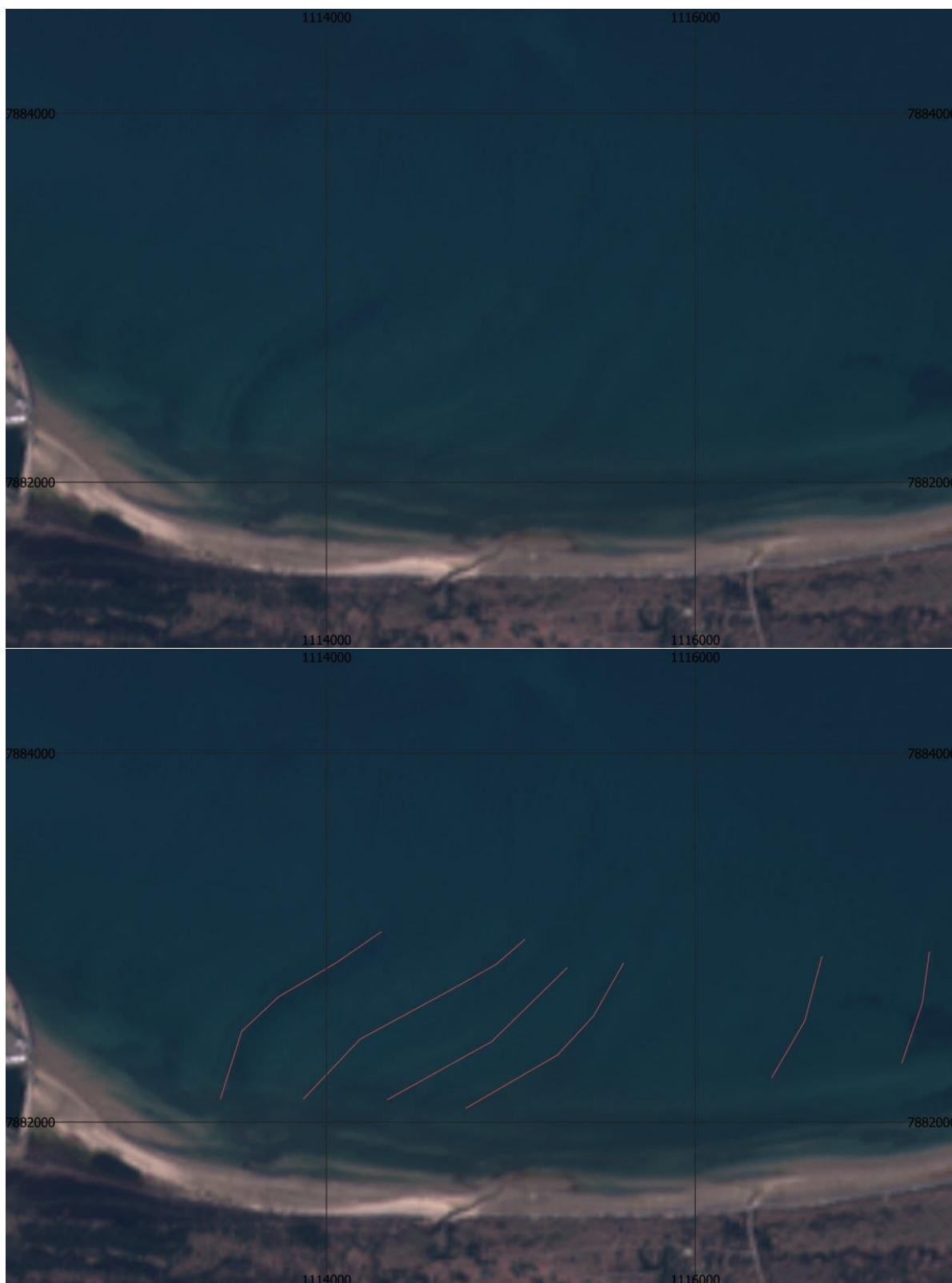


Figur B-21: Sentinel 2 billede fra 2021.
Øverst: Uden markering af sandbølger. Nederst: Med markering af sandbølger.



Figur B-22: Sentinel 2 billede fra 2022.

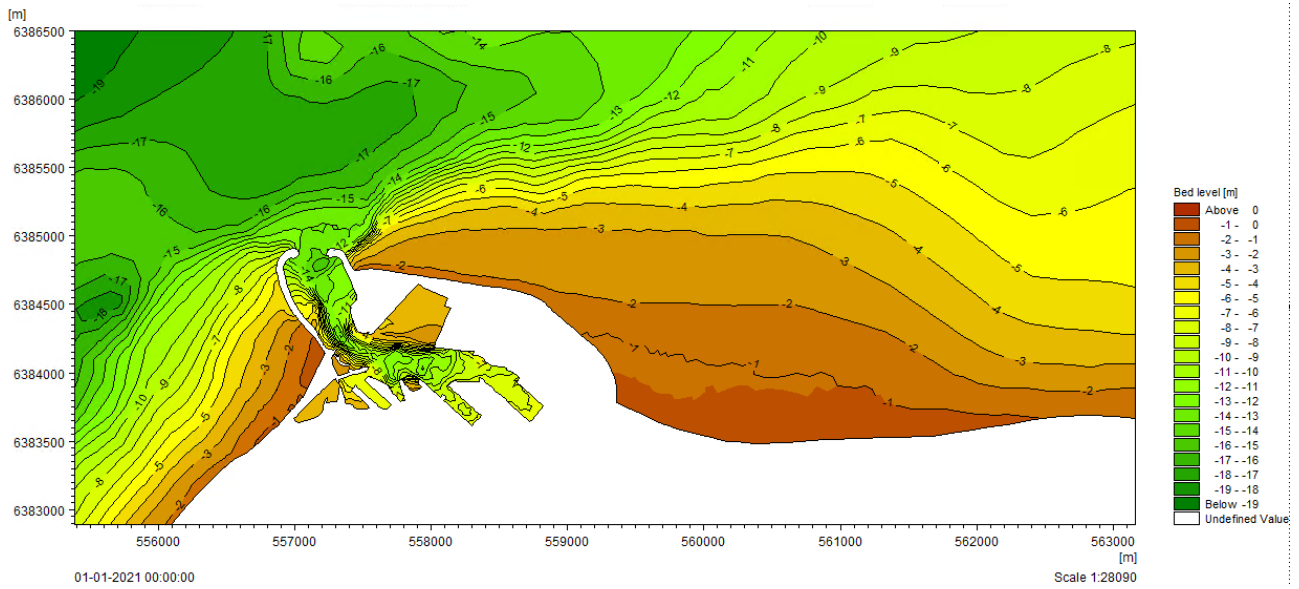
Øverst: Uden markering af sandbølger. Nederst: Med markering af sandbølger.



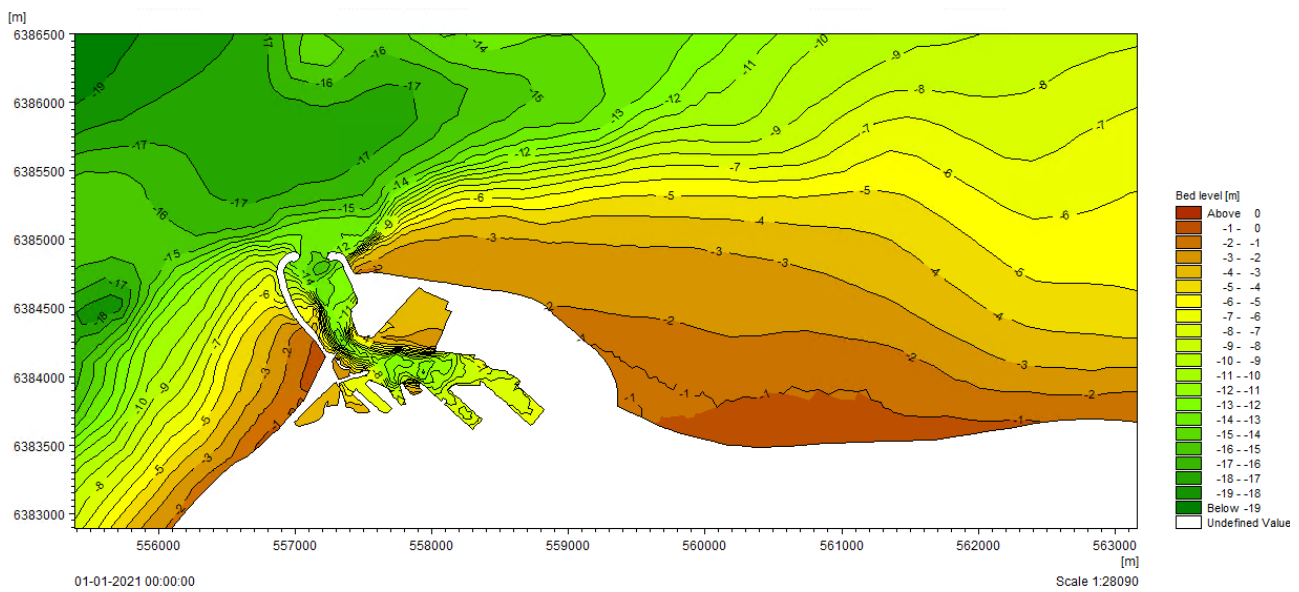
Figur B-23: Sentinel 2 billede fra 2023.

Øverst: Uden markering af sandbølger. Nederst: Med markering af sandbølger.

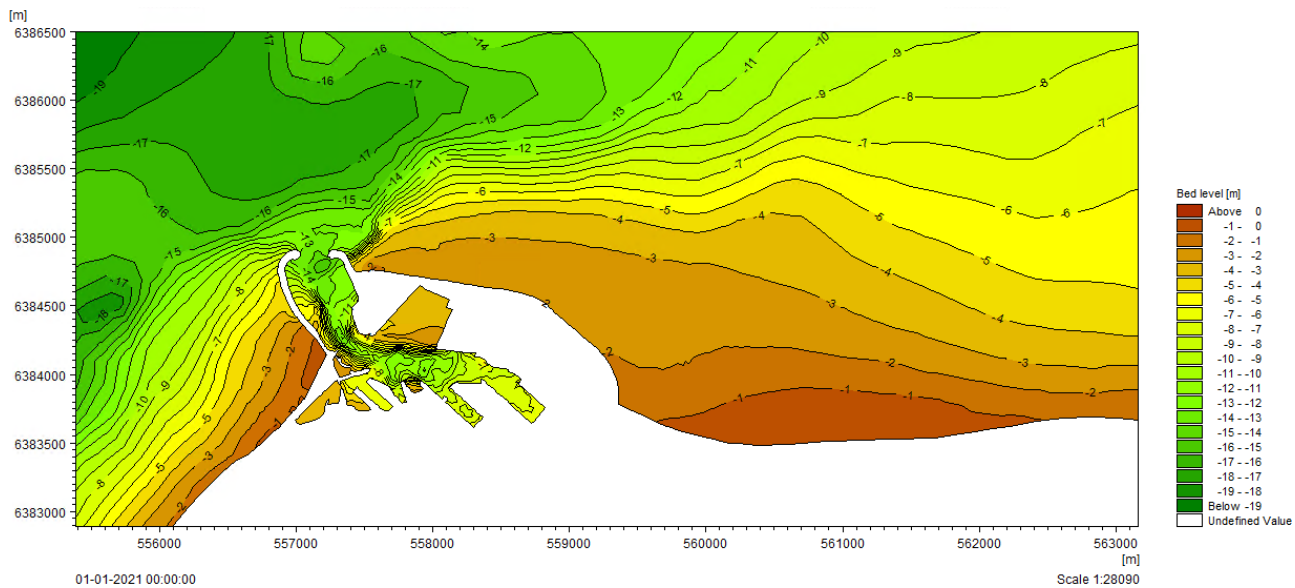
Bilag C Bathymetrivariationer



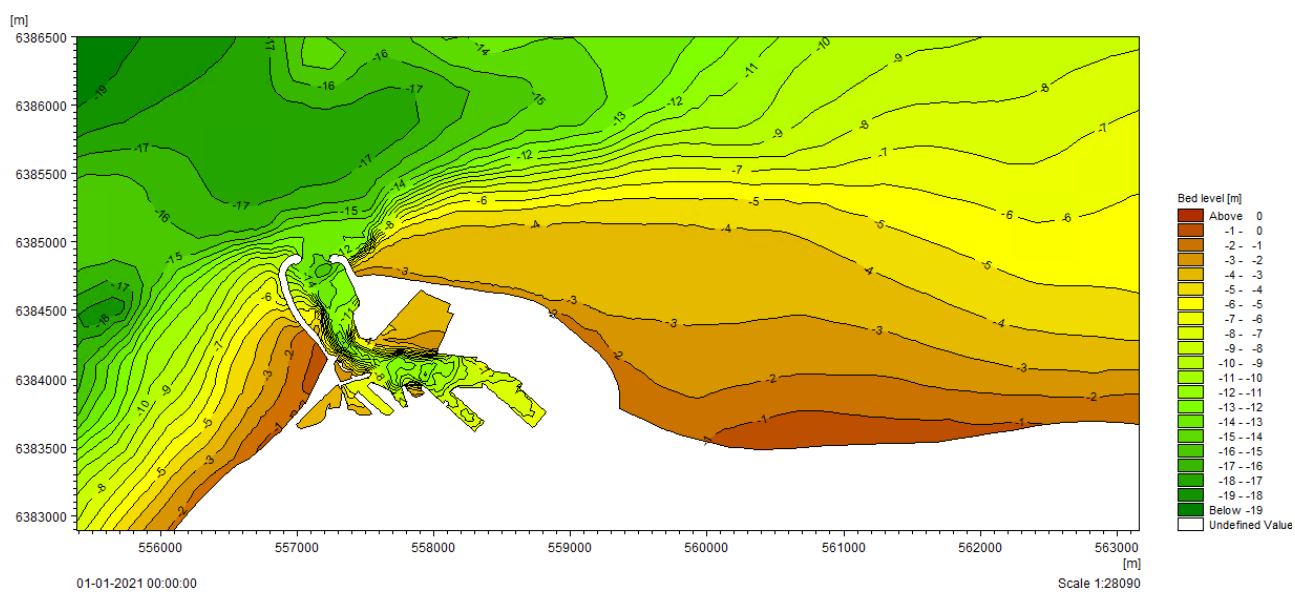
Figur C-1: Bathymetri v9.



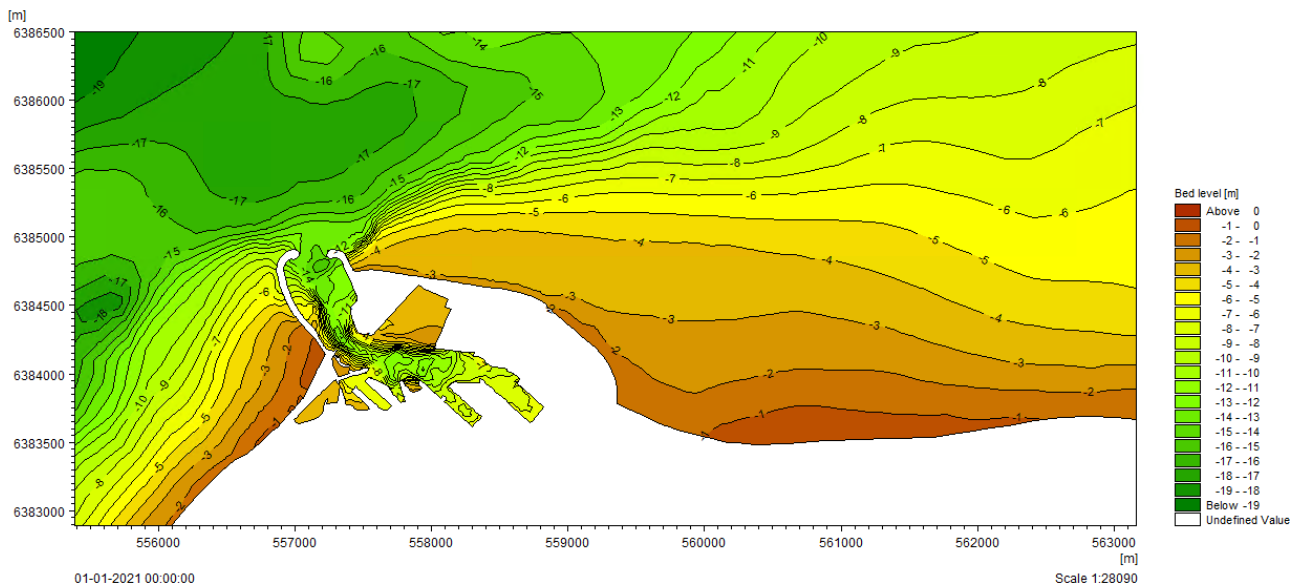
Figur C-2: Bathymetri v10.



Figur C-3: Bathymetri v11.



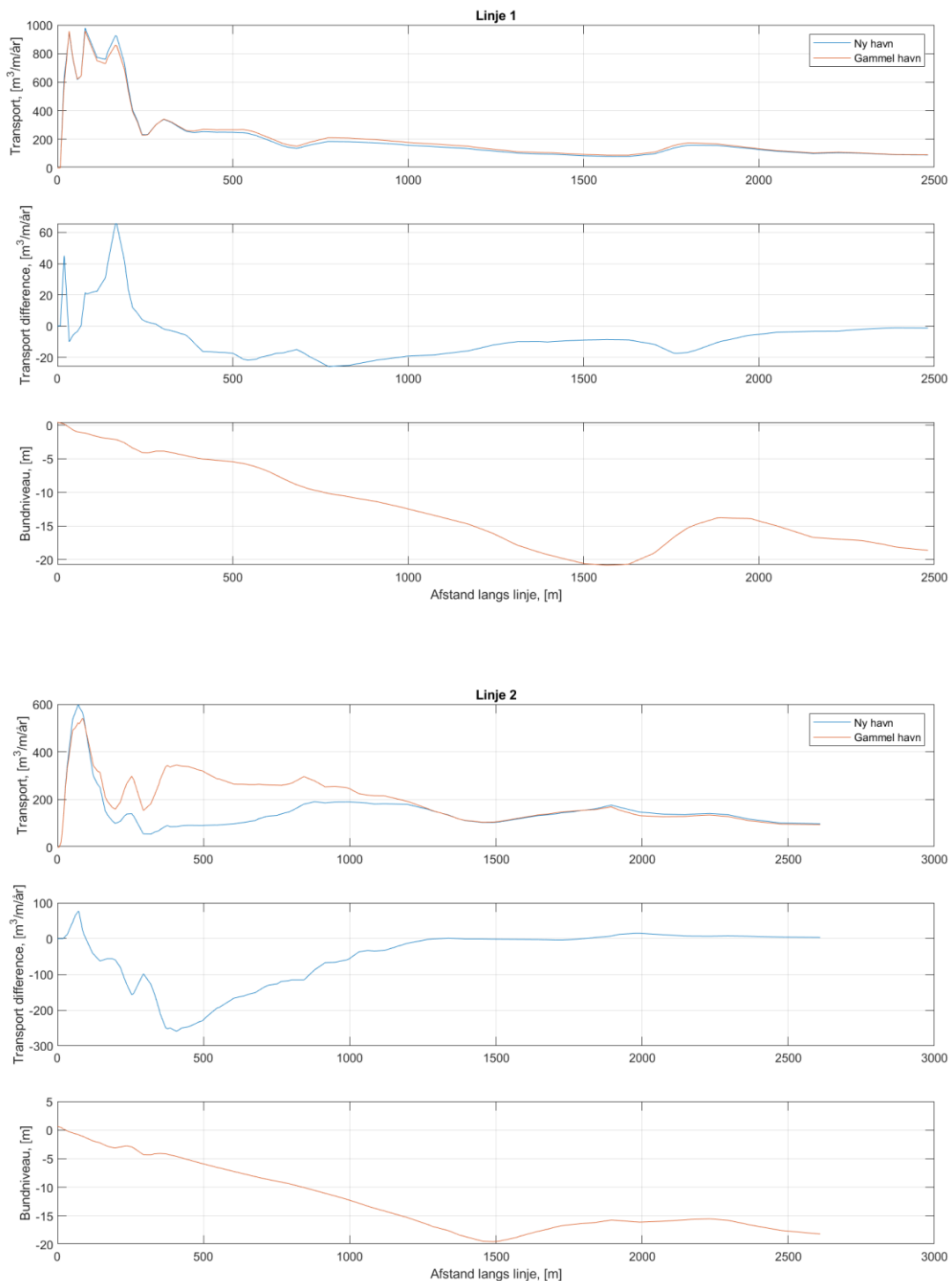
Figur C-4: Bathymetri v12.



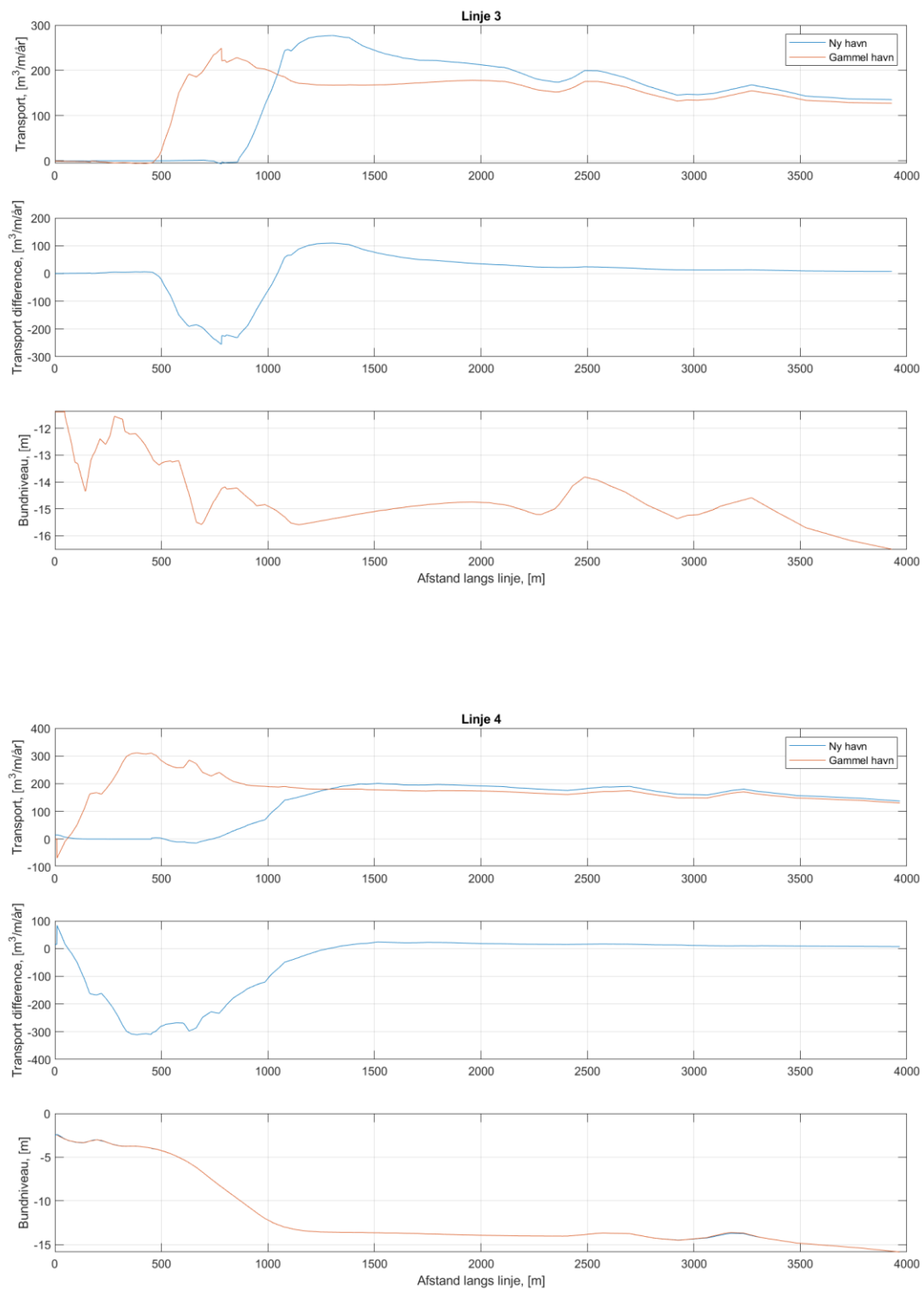
Figur C-5: Bathymetri v13.

Bilag D:

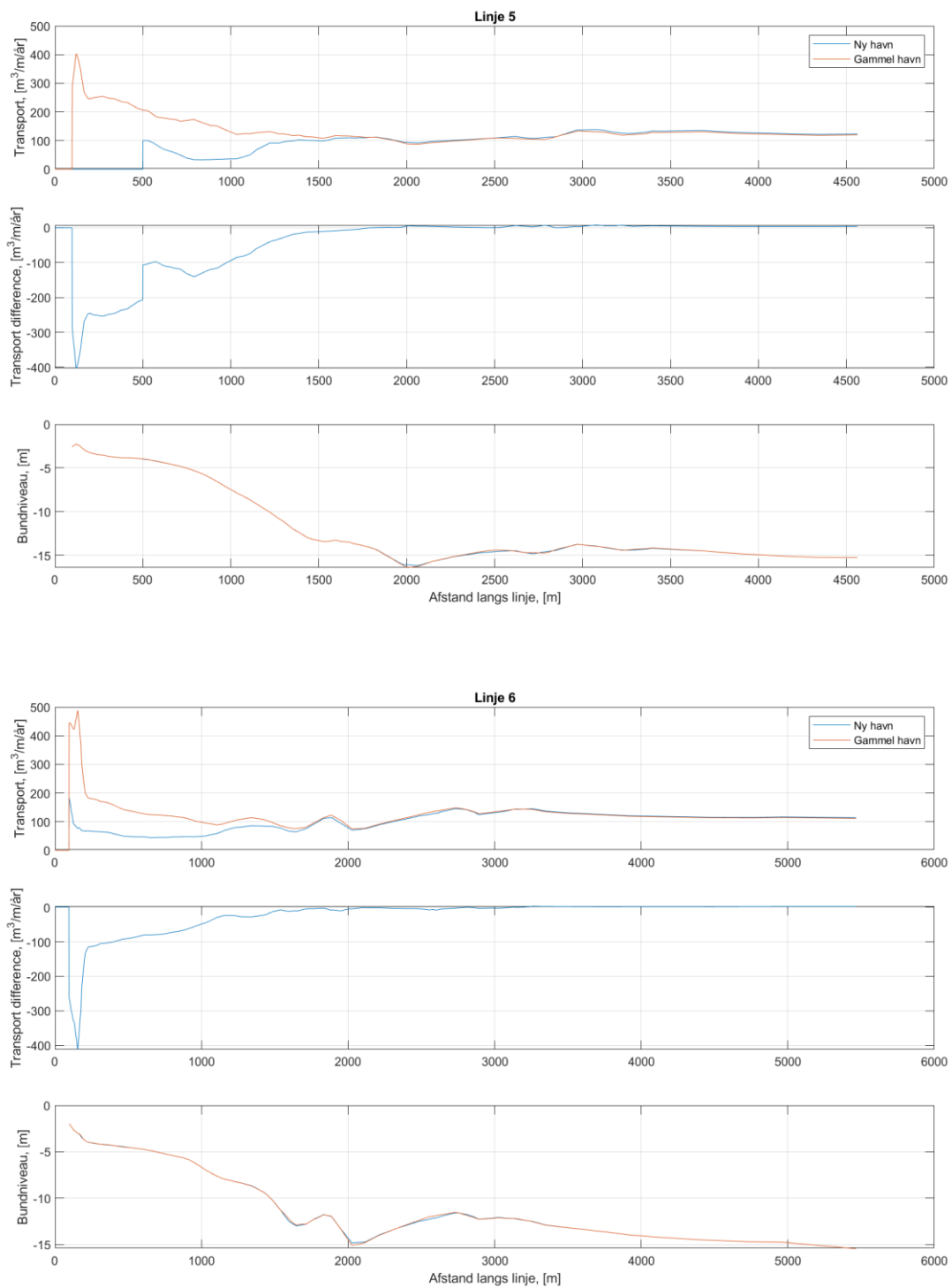
Bilag D Netto transport over udvalgte linjer



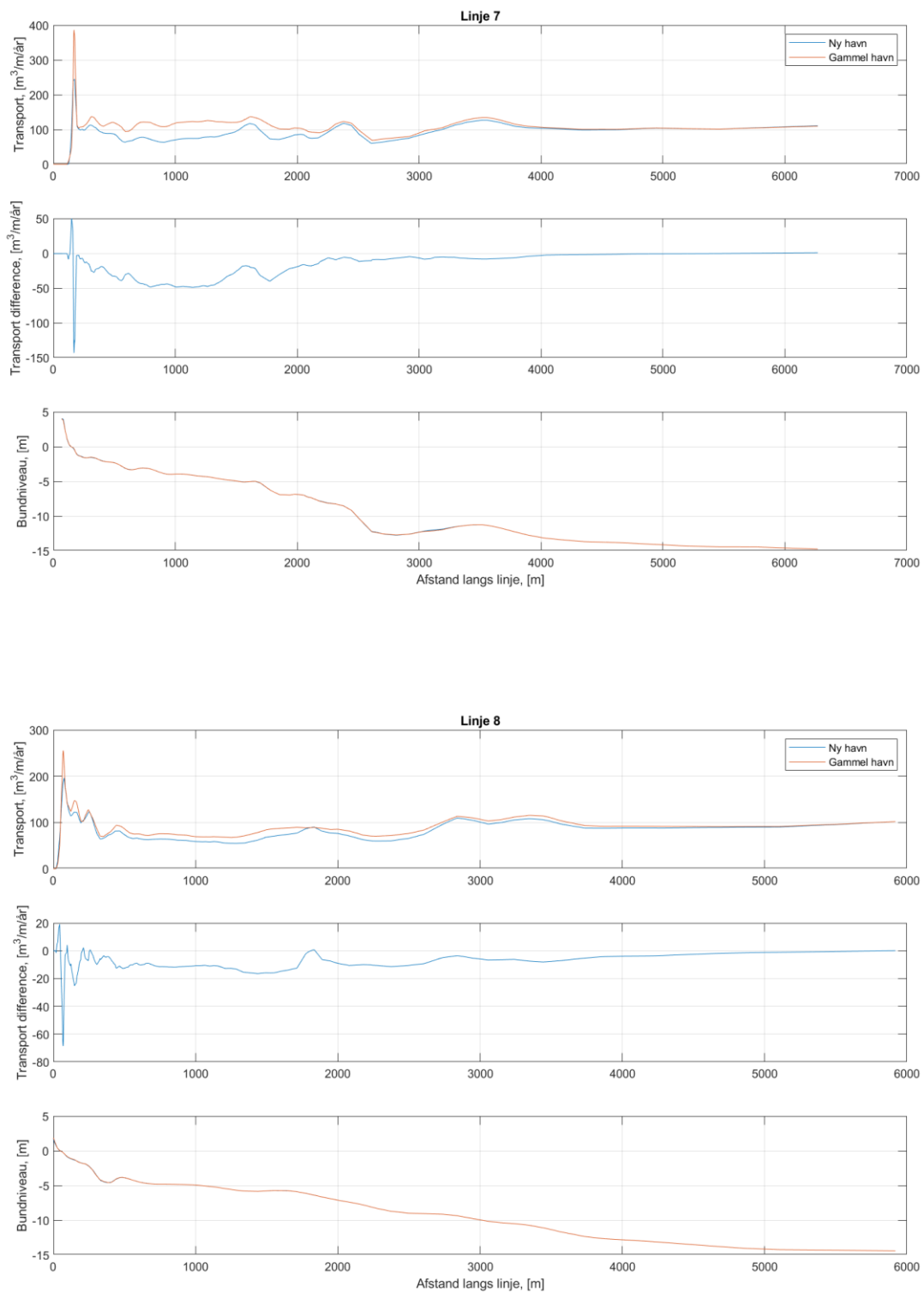
Figur D 1: Nettotransporten over beregningsåret (2021) for linje 1 (Top) og 2 (Bund).
 Øverst: Fordelingen af nettotransporten over profilet. Mellem: Forskellen i nettotransport med og uden havneudvidelse. Bund: Bundniveauet over profilet.



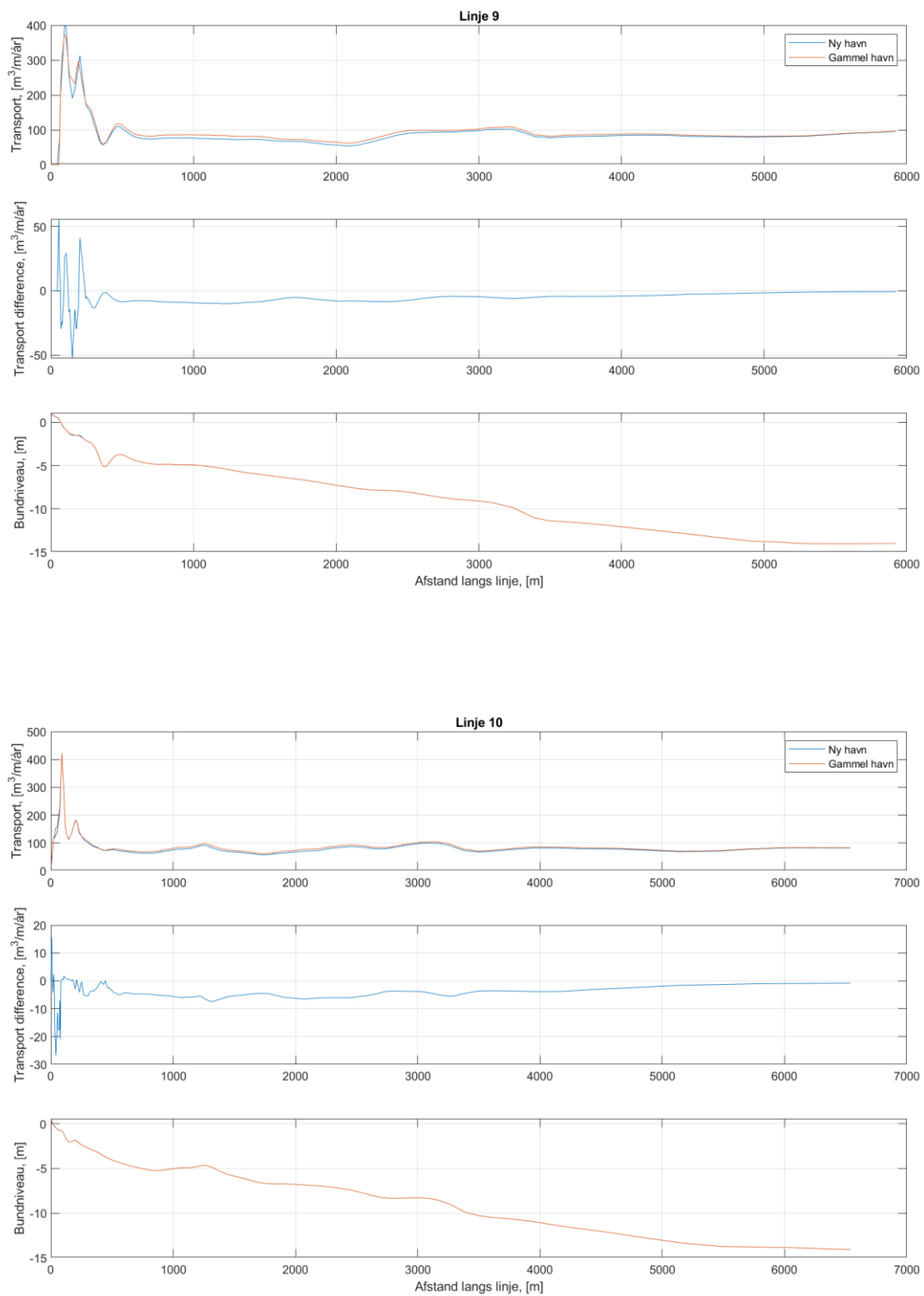
Figur D 2: Nettotransporten over beregningsåret (2021) for linje 3 (Top) og 4 (Bund).
 Øverst: Fordelingen af nettotransporten over profilet. Mellem: Forskellen i nettotransport med og uden havneudvidelse. Nederst: Bundniveauet over profilet.



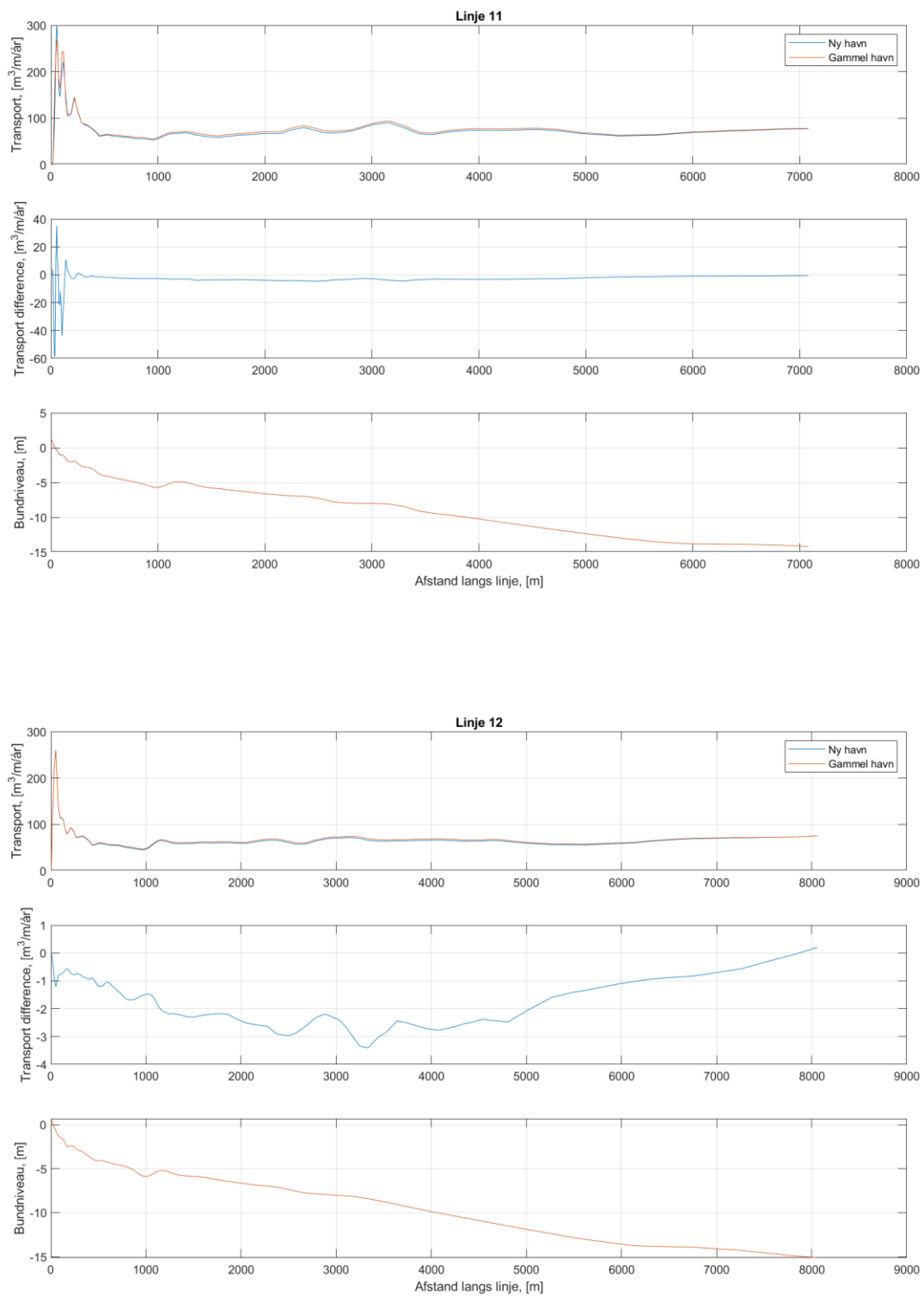
Figur D 3: Nettotransporten over beregningsåret (2021) for linje 5 (Top) og 6 (Bund).
 Øverst: Fordelingen af nettotransport over profilet. Mellem: Forskellen i nettotransport med og uden havneudvidelse. Nederst: Bundniveauet over profilet.



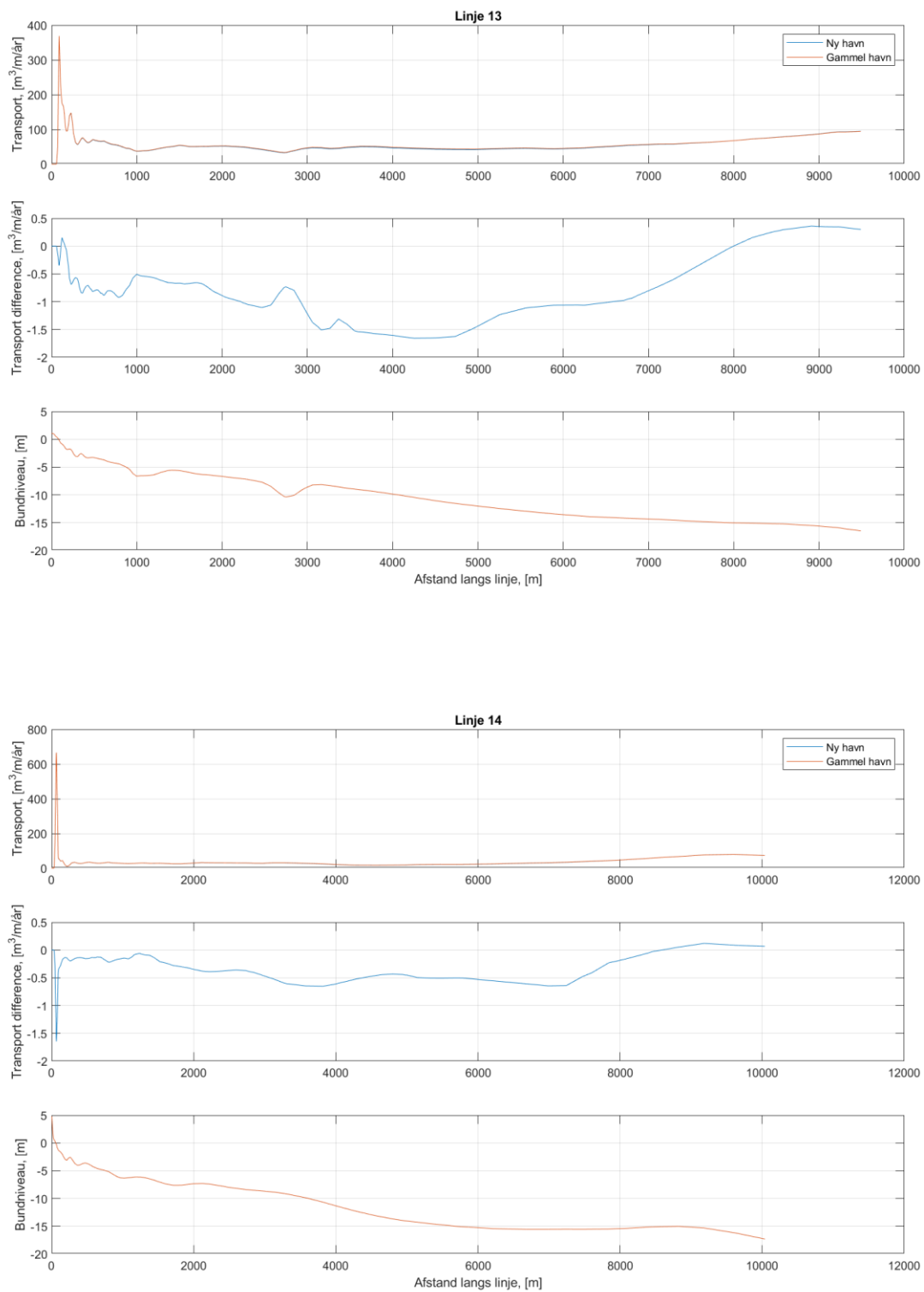
Figur D 4: Nettotransporten over beregningsåret (2021) for linje 7 (Top) og 8 (Bund).
 Øverst: Fordelingen af nettotransporten over profilet. Mellem: Forskellen i nettotransport med og uden havneudvidelse. Nederst: Bundniveauet over profilet.



Figur D 5: Nettotransporten over beregningsåret (2021) for linje 9 (Top) og 10 (Bund).
 Øverst: Fordelingen af nettotransporten over profilet. Mellem: Forskellen i nettotransport med og uden havneudvidelse. Nederst: Bundniveauet over profilet.



Figur D 6: Nettotransporten over beregningsåret (2021) for linje 11 (Top) og 12 (Bund).
 Øverst: Fordelingen af nettotransporten over profilet. Mellem: Forskellen i nettotransport med og uden havneudvidelse. Nederst: Bundniveauet over profilet.



Figur D 7: Nettotransporten over beregningsåret (2021) for linje 13 (Top) og 14 (Bund).
 Øverst: Fordelingen af nettotransporten over profilet. Mellem: Forskellen i nettotransport med og uden havneudvidelse. Nederst: Bundniveauet over profilet.

