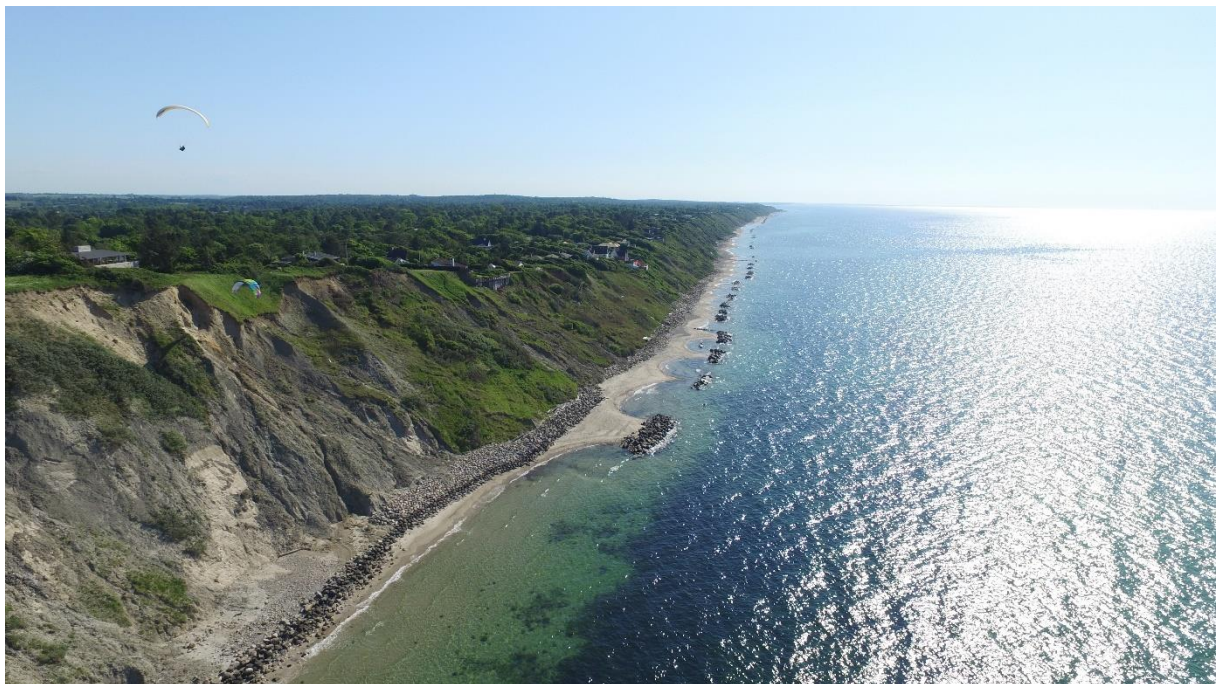


Nordkystens fremtid - Myndighedsprojekt

Numerisk modellering

Fase 2: Kystteknisk grundlag



NIRAS A/S

Rapport

Juni 2018

Denne rapport er udarbejdet under DHI's ledelsessystem, som er certificeret af Bureau Veritas for overensstemmelse med ISO 9001 for kvalitetsledelse

ISO 9001
Management System Certification

BUREAU VERITAS
Certification Denmark A/S



Nordkystens fremtid - Myndighedsprojekt

Numerisk modellering

Fase 2: Kystteknisk grundlag

Udarbejdet for

NIRAS A/S

Repræsenteret ved

Christian Helledie, Projektchef



Nordsjællands kyst maj 2018

Projektleder	Nils Drønen
Kvalitetsansvarlig	Rolf Deigaard

Projektnummer	11821353-2
Godkendelsesdato	20. juni 2018
Revision	Final Draft 0.3
Klassifikation	Konfidentiel

INDHOLDSFORTEGNELSE

1	Resumé	1
2	Introduktion	3
3	Datagrundlag	5
3.1	Horisontale og vertikale koordinater	5
3.2	GIS baggrundskort	5
3.3	Vandstandsmålinger	7
4	Meteomarine forhold	9
4.1	Indledning og baggrund	9
4.2	Numeriske modeller	9
4.2.1	Hydrodynamisk model	10
4.2.2	Bølgemodellen	11
4.3	Bølgeklima	14
4.3.1	Udtrækspunkter	14
4.3.2	Tidsserier	15
4.3.3	Bølgehøjde H_s versus vandstand tabel	15
4.3.4	Bølgehøjde H_s versus middelbølgeretning tabel	16
4.3.5	Bølgehøjde H_s versus bølgeperiode T_p tabel	16
4.3.6	Bølgeroser og bølgehøjdens variation langs kysten	17
4.3.7	Relation for designbølgernes bølgeperiode T_p	21
4.4	Ekstremstatistik for vandstand og bølgehøjder	23
4.4.1	Estimer på ekstreme vandstande Hornbæk	23
4.4.2	Estimer for ekstreme vandstande langs med Nordkysten	25
4.4.3	Estimer for ekstreme bølgehøjder langs med Nordkysten	29
5	Langsgående sandtransport og sedimentbudget	33
5.1	Baggrund for en opdatering af sedimentbudgettet for Nordkysten	33
5.2	Modelleret transportkapacitet	35
5.2.1	Modelbeskrivelse	35
5.2.2	Grundlag for modelinput	35
5.2.2.1	Beregningspunkter	35
5.2.2.2	Kystprofilets form	38
5.2.2.3	Sandkornstørrelsen	38
5.2.2.4	Meteomarine forhold	40
5.2.2.5	Fodrede profiler	41
5.2.3	Modelleret langsgående transport kapacitet	42
5.2.3.1	År-til-år variationer i langstransporten	42
5.2.3.2	Sæsonvariationer i transporten	44
5.3	Reduktion i transport	46
5.3.1	Metodebeskrivelse	46
5.3.1.1	Reduktion som følge af kystkonstruktioner	46
5.3.1.2	Reduktion som følge af sandtilgængelighed	47
5.3.1.3	Bidrag til langstransporten fra regionale kyststrømme	47
5.3.1.4	Passage af sand forbi Gilleleje Havn og Hornbæk Havn	50
5.3.2	Resultater	55
5.4	Overordnet sandbudget for den langsgående transport	57
5.4.1	Littoraltransport for eksisterende kystlinje	57
5.4.1.1	Sammenligning med tidligere vurderinger	57

5.4.1.2	Aktiv dybde og bredde af transportzonen	57
5.4.1.3	Vurdering af kronisk erosion langs fodringsstrækningerne	58
5.4.2	Littoraltransport for fodringsscenarie 1	59
5.4.3	Randeffekter ved kystfodring	61
5.4.4	Vurdering af hotspots	62
5.5	Anbefalinger til fodringsvoluminer – modvirkning af kronisk erosion	62
5.5.1	Baggrundserosion: Hundested – Gilleleje	63
5.5.2	Baggrundserosion: Gilleleje – Helsingør	63
5.5.3	Opsamling på anbefalede fodringsrater	63
6	Akuterrosion – modellering.....	65
6.1	Fænomen.....	65
6.2	Model	65
6.3	Modellering	66
6.3.1	Designstorme.....	66
6.3.2	Ligevægtsprofil.....	67
6.3.3	Skråningsbeskyttelse	67
6.3.4	Morfologisk modellering	69
6.3.5	Følsomhedstests.....	70
6.3.6	Designkurver for minimumshøjder, maksimale erosionsdybder og erosionsvoluminer	74
6.3.6.1	Erosionsresultater	74
6.3.6.2	Erosionsvoluminer	76
6.3.7	Designbølgehøjder og vandstande foran konstruktion	78
7	Overordnede konklusioner	83
8	Referencer.....	85

FIGURER

Figur 3-1	Satellitfoto af Nordsjælland og dele af Sverige.....	5
Figur 3-2	Højopløst luftfoto hentet fra Geodatastyrelsen (www.gst.dk).....	6
Figur 3-3	Højopløst foto fra overflyvning med fly, gennemført af NIRAS.....	6
Figur 3-4	Målte vandstande i Hornbæk 1994-2017.	7
Figur 4-1	Analysepunkter til fastlæggelse af vandstand og bølgeklima.....	9
Figur 4-2	Den regionale hydrodynamisk models beregningsnet dækkende Nordsøen og Østersøen anvendt til modellering af strøm og vandstand for perioden 2008-2016 (inkl.).....	10
Figur 4-3	Bølgemodellens beregningsnet anvendt til beskrivelse af forholdene langs med Nordkysten.....	10
Figur 4-4	Modelverifikation – målt Hornbæk vandstand versus model vandstand for perioden 1997-2016.....	11
Figur 4-5	Øjebliksbillede af bølgefelt (signifikant bølgeperiode H_s).....	12
Figur 4-6	Øjebliksbillede af bølgefelt (peak periode T_p).....	13
Figur 4-7	Øjebliksbillede af vandstand.....	13
Figur 4-8	Bølgehøjdens variation langs med Nordkysten på strækningen fra Hundested til Helsingør udregnet på baggrund af 20 års simulerede bølger.	17
Figur 4-9	Bølgeroser for ST3, ST8, ST13 og ST18 beskrivende strækningen fra Hundested til Rågeleje.....	18
Figur 4-10	Bølgeroser for ST23, ST28, ST33 og ST38 beskrivende strækningen fra Gilleleje vest til Helsingør.....	18
Figur 4-11	Overskridelseshyppighedsdiagram af indkommende bølger fordelt på retninger i station ST5.	19
Figur 4-12	Overskridelseshyppighedsdiagram af indkommende bølger fordelt på retninger i station ST15.	20

Figur 4-13	Overskridelseshyppighedsdiagram af indkommende bølger fordelt på retninger i station ST25.....	20
Figur 4-14	Overskridelseshyppighedsdiagram af indkommende bølger fordelt på retninger i station ST35.....	21
Figur 4-15	Relation mellem designbølgehøjde og bølgeperiode T_p i ST3.	22
Figur 4-16	Tilpasset sandsynlighedsfordeling til estimering af ekstreme vandstande i Hornbæk.	25
Figur 4-17	Tilpasset sandsynlighedsfordeling til estimering af ekstreme vandstande for ST19.	26
Figur 4-18	Designvandstandenes variation langs med Nordkysten på strækningen fra Hundested til Helsingør.	29
Figur 4-19	Tilpasset sandsynlighedsfordeling til estimering af ekstreme bølgehøjder for ST20.	30
Figur 4-20	Designbølgerne variation langs med Nordkysten på strækningen fra Hundested til Helsingør.	31
Figur 5-1	Beregningselementer i sandtransportberegningerne.....	35
Figur 5-2	Oversigtsplan for 21 kystprofiler hvorpå langstransporten er beregnet.	36
Figur 5-3	Eksempel på de anvendte opmålinger til fastlæggelse af kystprofilets form.	38
Figur 5-4	Kornstørrelsesfordeling over dybden.	39
Figur 5-5	Kornstørrelsesfordeling over dybden inklusiv lokaliteter.	40
Figur 5-6	Eksempel på bølgeroser udtrukket på en vanddybde på 8 m samt bølgeroser (højre), hvor bølgerne er transformeret yderligere ind til mellem 4 m og 5 m vha. Snels lov.	41
Figur 5-7	Eksempel på et fodret kystprofil.	42
Figur 5-8	År-til-år variationer i littoraltransport for tre udvalgte profiler, placeret vest for Gilleleje Havn.	43
Figur 5-9	År-til-år variationer i littoraltransport for to udvalgte profiler, placeret øst for Gilleleje Havn.	44
Figur 5-10	Sæsonvariation i langstransporten for tre udvalgte profiler placeret vest for Gilleleje Havn.	45
Figur 5-11	Sæsonvariation i langstransporten for to udvalgte profiler, placeret øst for Gilleleje Havn.	46
Figur 5-12	Kystnære bundformer vest for Helsingør.	48
Figur 5-13	Pejlelinjer vest for Helsingør.	49
Figur 5-14	Eksempler på kystprofiler, der skærer bundformerne.....	49
Figur 5-15	Søkort med Gilleleje Havn.	50
Figur 5-16	Den Historiske kystudvikling omkring Gilleleje Havn.	51
Figur 5-17	Gilleleje Havns udvikling 1954-2012, www.Kortal.dk , Ref. /15/.	52
Figur 5-18	Den historiske kystudvikling omkring Hornbæk Havn.....	53
Figur 5-19	Hornbæks Havns udvikling fra 1967 til 2006, historiske kort og Google Earth, Ref. /15/.	54
Figur 5-20	Eksempel på samlet information om hvert kystprofil, der analyseres i Bilag B.1 og B.2.	55
Figur 5-21	Eksempel på vurdering af langstransporten efter strandfodring.	56
Figur 5-22	Overordnet sedimentbudget.	57
Figur 5-23	Overordnet sedimentbudget for fodringsscenario 1.....	60
Figur 5-24	Designkurver for randeffekter af sandfodringer for langsgående længder 100m, 500m og 2000m.	62
Figur 6-1	Et eksempel på bundkoterne for konstruktion, strand og dykket del af profilet interpoleret ind på beregningsnettet.	67
Figur 6-2	Eksempler på placeringer af skråningsbeskyttelsen i forskellige niveauer.	68
Figur 6-3	Eksempel på erosionsberegning over stormen, med 1-times mellemrum.	69
Figur 6-4	Definitioner af maksimal erosionsdybde og minimumshøjde i relation til det eroderede profil.	70
Figur 6-5	Strandens minimumshøjdes følsomhed overfor kornstørrelsen.	71
Figur 6-6	Den maksimale erosionsdybdes følsomhed overfor kornstørrelsen.	72
Figur 6-7	Strandens minimumshøjdes følsomhed overfor strandhældningen.	73
Figur 6-8	Den maksimale erosionsdybdes følsomhed overfor strandhældningen.....	74
Figur 6-9	Minimumhøjder som funktion af initial højde af punktet, hvor stranden møder konstruktionen. Tre stormscenarier.	75
Figur 6-10	Maximum erosionsdybder som funktion af højden, hvor stranden møder konstruktionen (minimumshøjde før storm). Tre stormscenarier.	76
Figur 6-11	Erosionsvolumener ved de tre stormscenarier for forskellige placering af konstruktion.	77
Figur 6-12	Signifikant bølgehøjde som funktion af initiel strandhøjde ved konstruktion.	79
Figur 6-13	Middelvandsspejl ved slutningen af stormen, som funktion af minimumshøjde før storm.	80
Figur 6-14	Gennemsnitlig vanddybde foran konstruktionen i slutningen af stormen, som funktion af minimumshøjde før storm.	81

TABELLER

Tabel 4.1	Vanddybde og positioner for de 40 udtrækspunkter.....	14
Tabel 4.2	Tabel over hyppigheden af kombineret bølgehøjde H_s og vandstand for P24.	16
Tabel 4.3	Tabel over hyppigheden af bølgehøjde H_s og middelbølgeretning for P24.	16
Tabel 4.4	Tabel over hyppigheden af bølgehøjde H_s og bølgeperiode T_p for P24.	17
Tabel 4.5	Parametre til estimering af designbølgeperioder T_p i de 40 stationer langs Nordkysten.	22
Tabel 4.6	Trendfrie Hornbæk vandstande for de 48 højvandshændelser med angivelse af anvendte estimerer benyttet af DHI og KD.	23
Tabel 4.7	Hornbæk designvandstande.	25
Tabel 4.8	Estimeret ekstrem vandstand VS og tilhørende spredning σ i ST1-ST10 for returperioder 2, 5, 10, 20 og 50 år baseret på 20 års simulerede data (1997-2016).	27
Tabel 4.9	Estimeret ekstrem vandstand VS og tilhørende spredning σ i ST11-ST20 for returperioder 2, 5, 10, 20 og 50 år baseret på 20 års simulerede data (1997-2016).	27
Tabel 4.10	Estimeret ekstrem vandstand VS og tilhørende spredning σ i ST21-ST30 for returperioder 2, 5, 10, 20 og 50 år baseret på 20 års simulerede data (1997-2016).	27
Tabel 4.11	Estimeret ekstrem vandstand VS og tilhørende spredning σ i ST31-ST40 for returperioder 2, 5, 10, 20 og 50 år baseret på 20 års simulerede data (1997-2016).	28
Tabel 4.12	Estimeret ekstrem vandstand VS langs Nordkysten på strækningen fra Hundested til Helsingør, baseret på en korrektion af Hornbæk statistikken.	28
Tabel 4.13	Ekstrembølgehøjder H_s og tilhørende spredning σ i ST1-ST10 for returperioder 2, 5, 10, 20 og 50 år.	30
Tabel 4.14	Ekstrembølgehøjder H_s og tilhørende spredning σ i ST11-ST20 for returperioder 2, 5, 10, 20 og 50 år.	30
Tabel 4.15	Ekstrembølgehøjder H_s og tilhørende spredning σ i ST21-ST30 for returperioder 2, 5, 10, 20 og 50 år.	31
Tabel 4.16	Ekstrembølgehøjder H_s og tilhørende spredning σ i ST31-ST40 for returperioder 2, 5, 10, 20 og 50 år.	31
Tabel 5.1	Væsentlige kystanalyser af Sjællands nordkyst.	33
Tabel 5.2	Kystprofiler og bølgeudtrækningspunkter.	37
Tabel 5.3	Aktuelle transportrater samt kronisk erosion i hvert af fodringsområderne for Eksisterende kyst.	58
Tabel 5.4	Aktuelle transportrater samt kronisk erosion i hvert af fodringsområderne for Fodrings-scenarie 1.	59
Tabel 5.5	Reduktion af sandvoluminet i fodringområde på grund af randeffekter.	61
Tabel 5.6	Anbefalinger til vedligeholdelsesfodringsvolumener som følge af kronisk erosion.	64
Tabel 6.1	De tre storm scenarier.	67
Tabel 6.2	Parametre for ligevægtsprofil.	67
Tabel 6.3	Minimumshøjde af strand foran konstruktion efter storm for tre forskellige kornstørrelser.	71
Tabel 6.4	Maksimal akut erosion ved konstruktion for tre forskellige kornstørrelser.	71
Tabel 6.5	Minimumshøjde af strand foran konstruktion efter storm (m).	72
Tabel 6.6	Maksimal akut erosion ved konstruktionen for tre forskellige strandhældninger.	73
Tabel 6.7	Minimumshøjde af strand foran konstruktion efter storm.	75
Tabel 6.8	Maksimal akut erosion ved konstruktion over stormen.	76
Tabel 6.9	Erosionsvolumener ved de tre stormscenarier for forskellige placeringer af konstruktionen.	77
Tabel 6.10	Signifikant bølgehøjde foran konstruktion (top).	78
Tabel 6.11	Middel vandstand foran konstruktionen (ved top).	79
Tabel 6.12	Vandstandens variation om middel angivet som spredningen for de tre stormscenarier.	80

BILAG

BILAG A – Meteomarine forhold

Vandstands- og bølgeforhold

BILAG B – Langsgående sandtransport

Modelresultater fra 21 kystprofiler

BILAG C – Akut erosionsberegninger

Morfologisk udvikling

Denne side skal være blank.

1 Resumé

I denne rapport udarbejdes et data-grundlag som har til formål at give input til udviklingen af design af kystbeskyttelse ved Sjællands Nordkyst forestået af NIRAS. Data og analyser er udviklet ved hjælp af numerisk modellering med DHI's software og indbefatter:

- Meteomarine forhold. Bølge og vandstandsforhold langs kysten, herunder ekstremværdistatistikker for bølgehøjder og vandstande, samt korrelationer mellem parametrene.
- Littoraltransport. Langsgående sandtransport og bestemmelse af sandbudget og kronisk erosion for de af NIRAS udvalgte fodringsområder.
- Akut erosion. Akut erosion for 50 års hændelsen og Bodil stormen, inkluderende erosionsdybder, foran en repræsentativ skråningsbeskyttelse placeret ved forskellige niveauer på stranden for et for kysten repræsentativt middelfprofil.

Opsummering af hoved-output er som følger:

Meteomarine forhold:

- Modellerede ekstremvandstande matcher ekstremvandstande i måletidsserien ved Hornbæk 1994-2017 og variationen i ekstremværdier (for returperioder 2, 10, 20 og 50 år) er etableret langs hele kysten.
- Kysten er eksponeret med 50 års bølgehændelser i størrelsesordenen 4 m (signifikant bølgehøjde) og variationen af middel og max bølgehøjder langs kysten er etableret for hele strækningen.
- Ligeledes er ekstremstatistikker med returperioder 2, 10, 20 og 50 år etableret langs kysten.
- Korrelationer mellem bølgehøjde, retning og bølgeperiode er etableret i form af diagrammer og korrelationsanalyser for bølgeparametre for hele kystens længde.

Langstransport:

- Langstransporten er beregnet og korrigeret for manglende sand i profilet, kystnære konstruktioner og transport forårsaget af regionale strømninger udenfor brydningszonen for 21 punkter dækkende alle fodringsområderne langs kysten.
- Sandbudget og erosionsrater er bestemt for alle fodringsområder og analyserne er sammenholdt med tendenser fra historiske data af kysttilbagerykninger.
- Langstransport, sandbudget og erosionsrater bestemt for sandfodrede profiler - med fodringssand med en anelse højere mediankorndiameter og med sandet distribueret i den indre del af profilet – viser ingen væsentlig påvirkning af den bagvedliggende erosionsproces. Fodringssandet fungerer således som en "neutral" buffer for baggrundserosionen.

Akut erosion:

- Akuterosionen i form af erosionsdybder, samt bølgehøjder og vandstande lige foran skråningsbeskyttelsen er beregnet og angivet i tabelform og som kurver for en række forskellige placeringer af skræntfodsbeskyttelsen.

- For en 50-årshændelse (svarende til den mest ekstreme hændelse vest for Gilleleje) med en varighed af stormpeaket på 12 timer eroderes mellem 0,9-1,8 m foran beskyttelsen afhængig af placering.
- En varighed på kun 6 timer giver omkring 0,5 m mindre erosionsdybder sammenlignet med erosionsdybder for en varighed på 12 timer.
- Erosionen forårsager større dybder lige foran konstruktionen og mindre dybder længere ude i profilet, hvilket gør at bølgerne bryder mere længere ude og mindre tæt på konstruktionen, hvilket gør at erosionsraten tenderer til at aftage i slutningen af stormen.

2 Introduktion

Nordkystens Fremtid er et samarbejde mellem Halsnæs, Gribskov og Helsingør kommune om en stor helhedsorienteret beskyttelse af hele den Nordsjællandske kyst.

Sjællands nordkyst omfatter ca. 60 km kyst mellem Hundested og Helsingør. Kysten er, som følge af sin beliggenhed ud til Kattegat udsat for en betydelig påvirkning af bølger, vind, vandstand og strøm som er med til at transportere sand fra vest mod øst. Samtidig højvande og pålandsvind præger især kystens udformning ved erosion af skrænterne og stranden, hvilket over årene har medført at store dele af kysten i dag er beskyttet af såkaldt hård kystbeskyttelse. Kysten er naturligt *kronisk* eroderende, hvilket gør den mere eksponeret overfor ekstremstorme under hvilke strande, klitter og klinter eroderes (*akut* erosion). Således ses der mange steder langs kysten en tilbagerykning af kystlinjen henover årene med særligt markante tilbageryk under ekstremstormene.

Historisk er kysten på en række udsatte områder forsøgt beskyttet med hårde konstruktioner i form af kystparallelle bølgebrydere, kystnormale høfder samt skræntfodsbeskyttelse. De første kystbeskyttelseskonstruktioner blev ifølge Ref. /5/ anlagt i 1921 og i dag består kun ca. 15 km af strækningen af naturlig kyststrækning uden beskyttelse.

De etablerede konstruktioner tenderer til at fastholde kysten lokalt, men adresserer ikke den overordnede bagvedliggende kroniske erosion. Derudover er mange af konstruktionerne i dag mere eller mindre udtjente med en eroderet kyst foran konstruktionerne og flere strækninger med eroderende strande, klitter og klinter.

Kysten er blevet påvirket kraftigt af flere større hændelser igennem tiden, f.eks. under stormen Bodil d. 6. dec. 2013, og med baggrund i de historiske erosionsindhug i kysten under de kraftige storme er en beslutning nu taget om at gennemføre en større tværkommunal indsats for at adressere det grundlæggende erosionsproblem vha. sandfordringer, og supplere denne større indsats med en vejledning til første-række borger om skræntbeskyttelse af egen matrikel, alt sammen som en samlet indsats for at beskytte sig mod lignende hændelser i fremtiden.

I den sammenhæng udarbejder DHI i denne rapport et modelbaseret grundlag som input til NIRAS i udarbejdelsen af det endelige design af sandfordringer, der dækker en række udvalgte særligt udsatte områder, samt designvejledninger til lokal skråningsbeskyttelse. Målet er at de af NIRAS bearbejdede resultater og designdata herefter via en GIS platform vil kunne tilgås af borgere og de tre kommuner.

Denne side skal være blank.

3 Datagrundlag

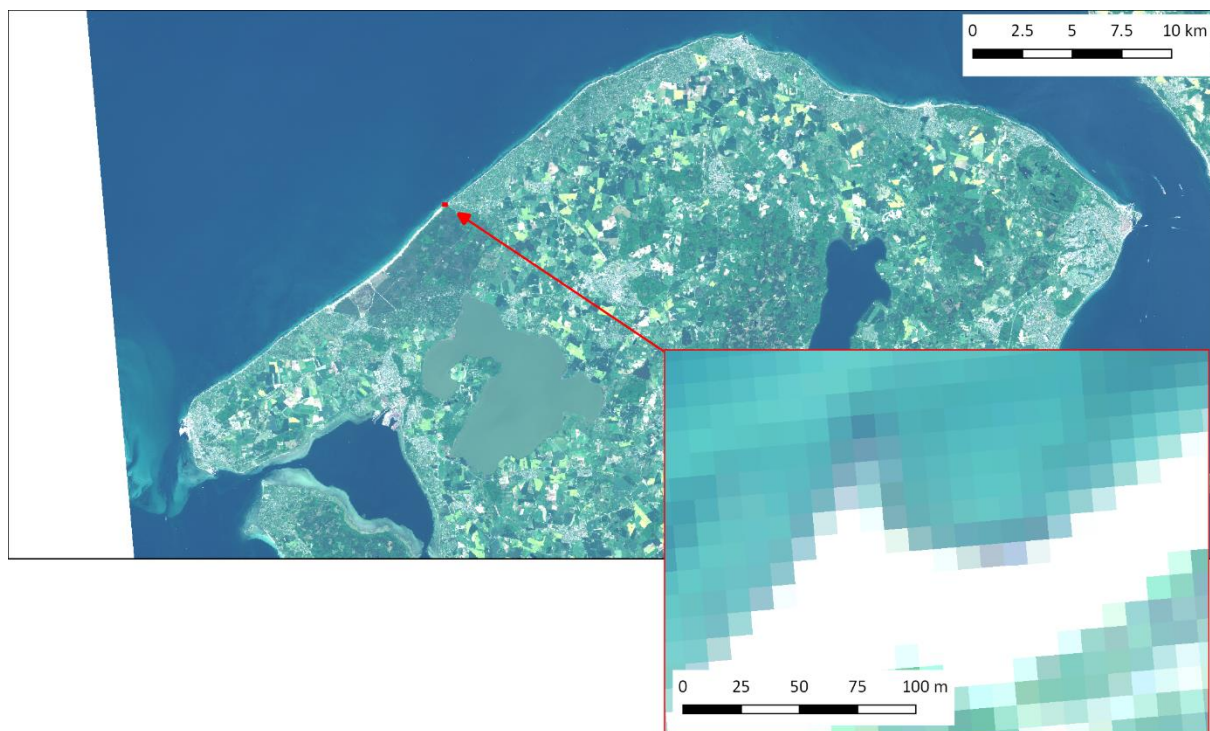
3.1 Horisontale og vertikale koordinater

Horisontale koordinater angives i meter i UTM-32 projektionen på ETRS89 geoiden.

Lodrette niveauer angives i meter relativt til DVR90, som svarer nogenlunde til middelvandstanden. Positive niveauer ligger over udgangsniveauet.

3.2 GIS baggrundskort

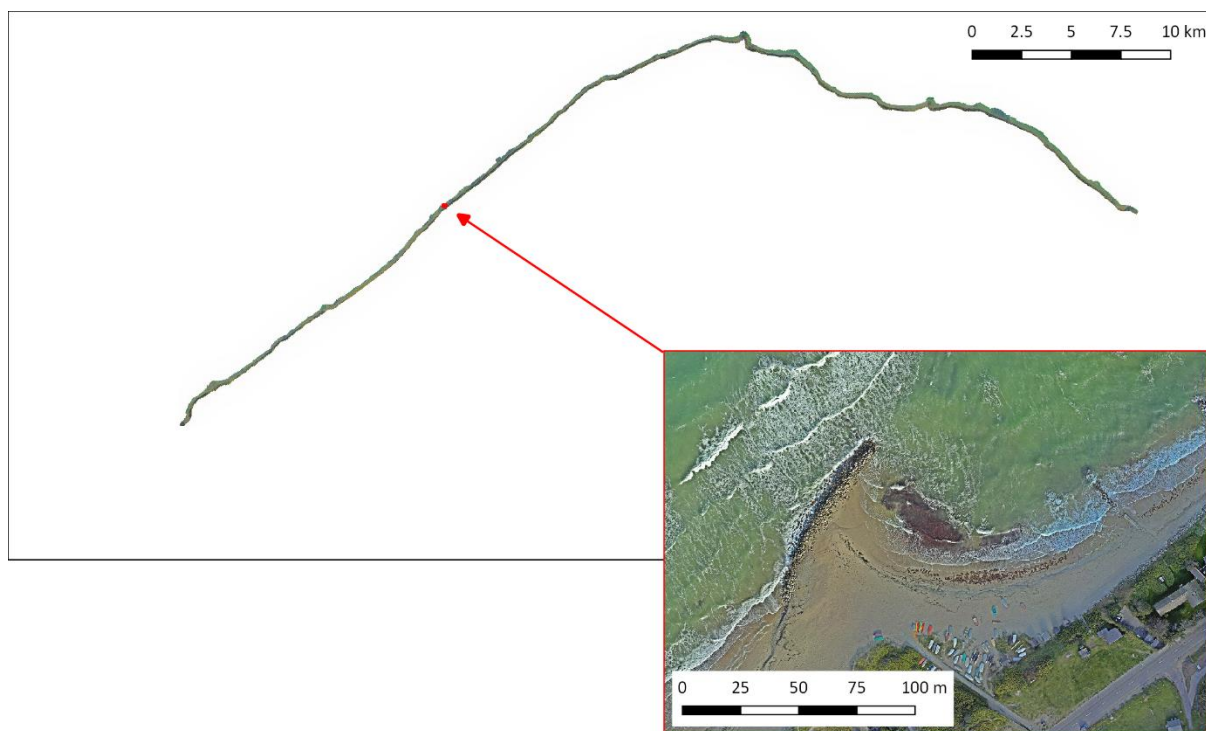
Der er indhentet forskellige baggrundsbilleder til brug i projektet. Baggrundsbillederne er vist i Figur 3-1 - Figur 3-3. Figureerne viser billedernes dækning af Nordkysten og sammenligner detaljeringsgraden ved at vise et udsnit af Tisvilde bølgebryderen.



Figur 3-1 Satellitfoto af Nordsjælland og dele af Sverige. Lav opløsning. Dato ukendt.



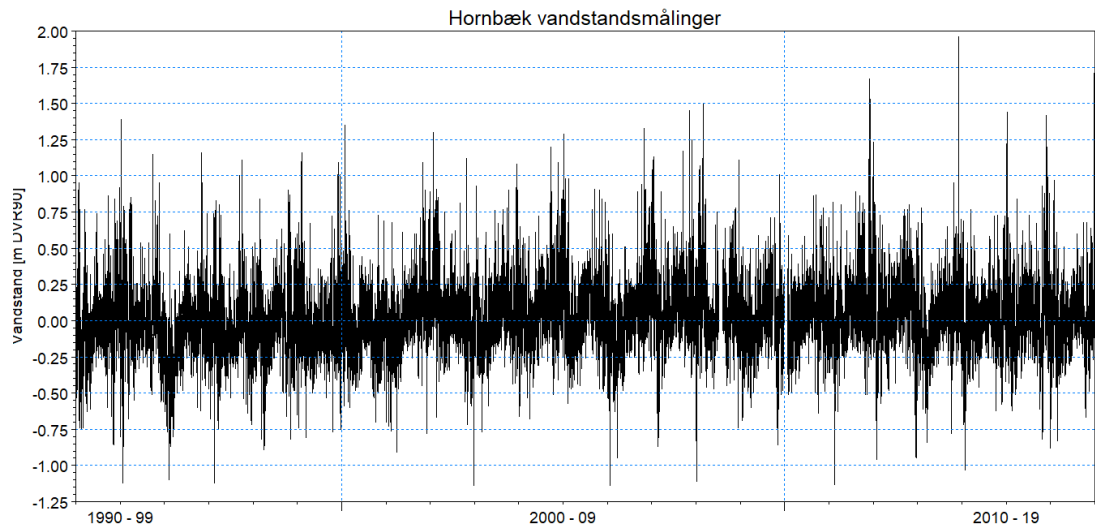
Figur 3-2 Højopløst luftfoto hentet fra Geodatastyrelsen (www.gst.dk). Billederne er fra foråret 2017.



Figur 3-3 Højopløst foto fra overflyvning med fly, gennemført af NIRAS. Droneflyvningen blev gennemført 9. oktober 2017. Se yderligere detaljer i Ref. /9/.

3.3 Vandstandsmålinger

Målte vandstande ved Hornbæk i perioden 1994-2017, har været anvendt til at verificere den hydrodynamiske model. Vandstandsvariationen i perioden er vist i Figur 3-4.



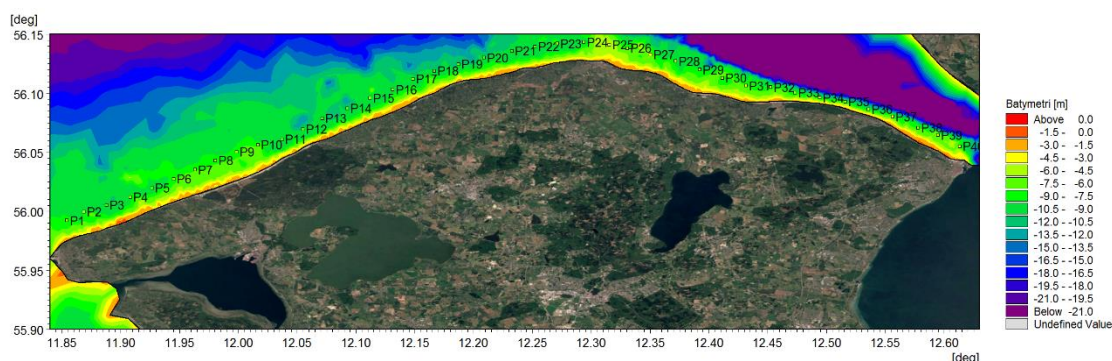
Figur 3-4 Målte vandstande i Hornbæk 1994-2017.

Denne side skal være blank.

4 Meteomarine forhold

4.1 Indledning og baggrund

Bølgeklimaet langs Nordkysten er styrende for materialevandringen langs kysten (langstransporten). For at kunne beskrive materialevandringen gennem en række profiler er det derfor nødvendigt at fastlægge bølgeklimaet i en række punkter udenfor brydningszonen på strækningen fra Hundested til Helsingør. I dette studie er bølgeklimaet blevet fastlagt i de 40 punkter som er vist på Figur 4-1.



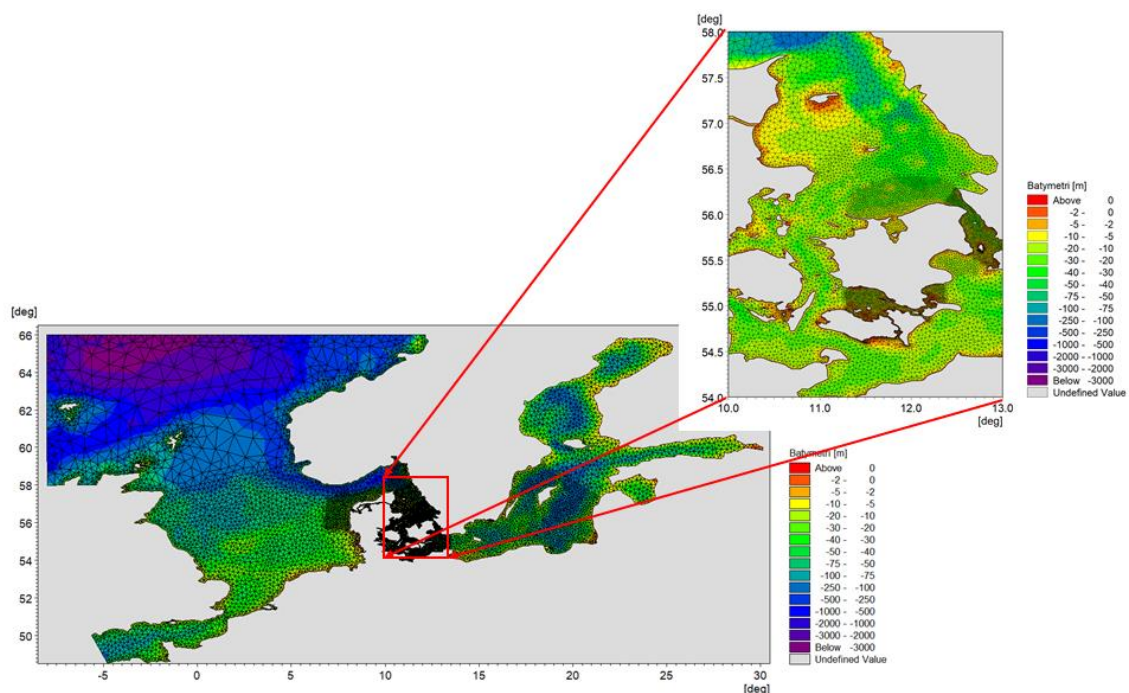
Figur 4-1 Analysepunkter til fastlæggelse af vandstand og bølgeklima.

Bølgeklimaet i de 40 punkter er fastlagt ved hjælp af hindcastmodellering, hvilket betyder at bølgeforholdene reproducere/modelleres for en længere historisk periode ud fra tilgængelige vindfelter, samt modelleret vandstand og strømforhold. Bølgeforholdene i Kattegat og langs Nordkysten er blevet simuleret ved hjælp af DHIs MIKE 21 SW numeriske bølgeberegningsmodel for en periode på 20 år, 1997-2016. For denne årrække råder DHI over vinddata fra meteorologiske modeller, hvormed det er muligt, med vinden som den drivende kraft, at simulere bølgeforholdene time for time over det betragtede farvandsområde. Hermed er etableret en simuleret tidsserie af bølgeforholdene i perioden 1997-2016 i ethvert punkt inden for modelområdet, indeholdende den signifikante bølgehøjde samt den tilhørende bølgeperiode, bølgeretning og retningsspredning. I tidsserierne er der også gemt information om vandstand.

I hvert af de 40 punkter er der efterfølgende lavet en ekstremværdianalyse for vandstand og signifikant bølgehøjde H_s . De udtrukne tidsserier er anvendt i studiet der beskriver langstransport og sedimentbudget.

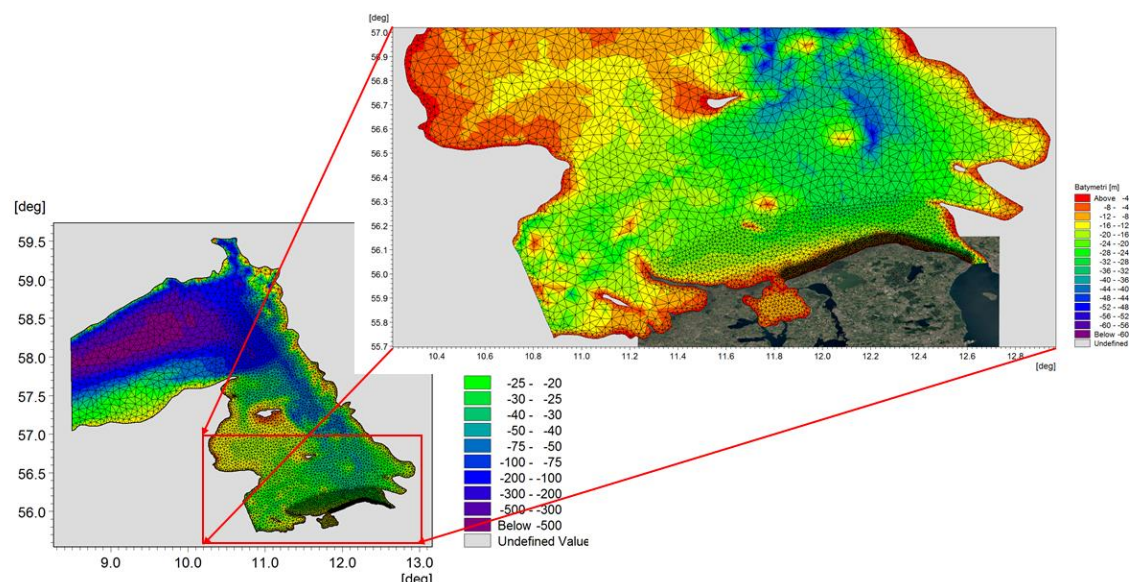
4.2 Numeriske modeller

Til beskrivelse af de meteomarine forhold, dvs. vandstand, strøm og bølger er der taget udgangspunkt i eksisterende DHI modelopsætninger, som er blevet genkørt med en forfinet modelopløsning langs Nordkysten. Bølgemodellen kræver kendskab til strøm og vandstandsforhold. For perioden 1997-2007 (inkl.) er der anvendt strøm og vandstand fra tidligere modelkørsler, mens der for perioden 2008-2016 (inkl.) er anvendt en separat regional model (North Sea Baltic Sea, NSBS) til beskrivelse af de hydrodynamiske forhold. NSBS-modellens beregningsnet er vist i Figur 4-2. Det ses at opløsningen er forbedret i området ud for Nordkysten og i Øresund. Strøm og vandstand i modellen er dikteret af tidevand og vind og trykfelter.



Figur 4-2 Den regionale hydrodynamiske models beregningsnet dækkende Nordsøen og Østersøen anvendt til modellering af strøm og vandstand for perioden 2008-2016 (inkl.).

Mens strøm og vandstandsforhold er styret af vandudvekslingen mellem Nordsøen og Østersøen er bølgeforholdene langs Nordkysten bestemt af vindforholdene i Kattegat. Bølgemodellen dækker derfor et noget mindre område end den hydrodynamiske model. Bølgemodellens beregningsnet er vist i Figur 4-3. Det ses at den er lokalt forfinet langs med Nordkysten på strækningen fra Hundested til Helsingør.

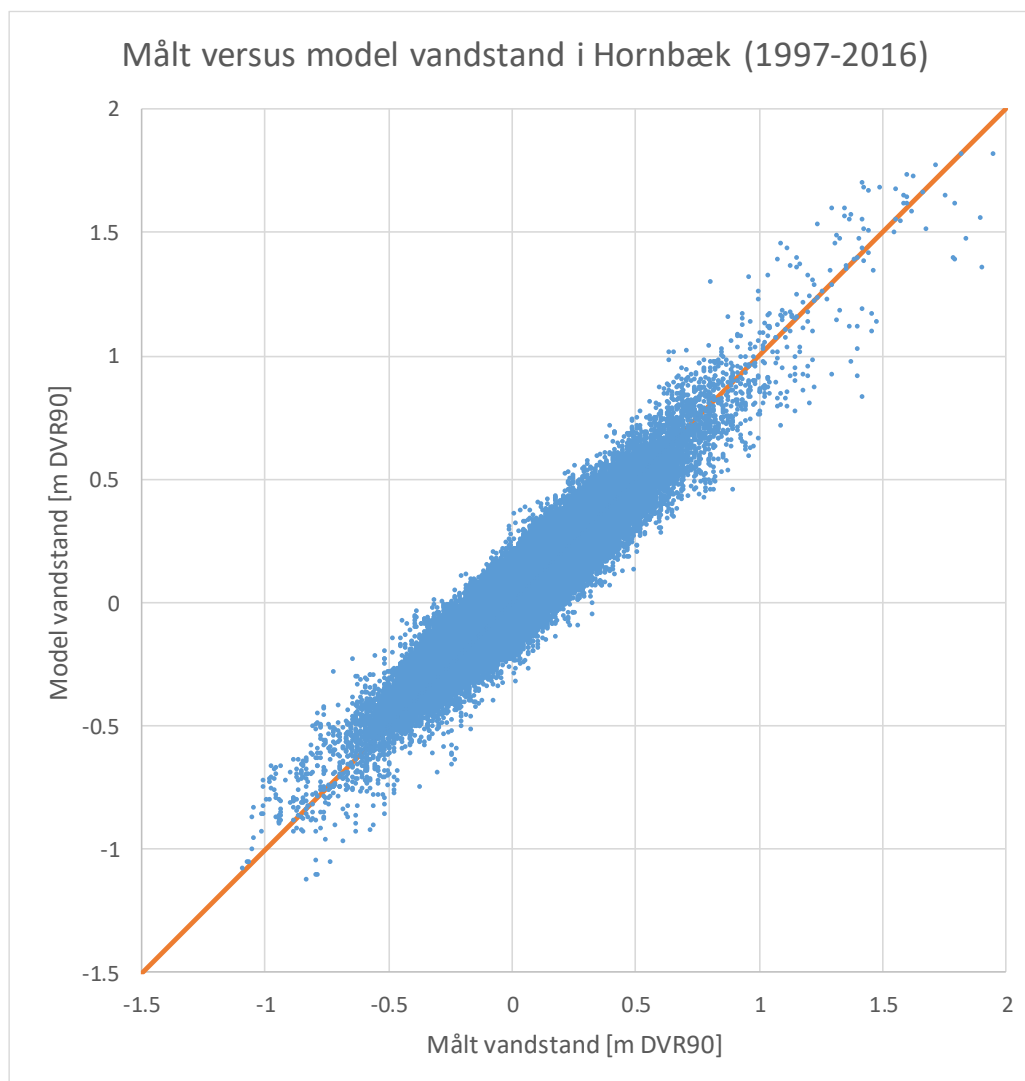


Figur 4-3 Bølgemodellens beregningsnet anvendt til beskrivelse af forholdene langs med Nordkysten.

4.2.1 Hydrodynamisk model

Den hydrodynamiske model bruges til at beskrive vandstanden i bølgemodellen og variationen i vandstanden langs med Nordkysten. Da modeludtrækspunkterne er på mellem 6 og 10 meters

vanddybde har vandstandsvariationen kun en yderst beskedne betydning for bølgehøjderne. Det er primært i forbindelse med estimering af designvandstande langs med Nordkysten, at kvaliteten af den hydrodynamiske model er af stor betydning. I Figur 4-4 er der vist en sammenligning af målte og modellerede vandstande ved Hornbæk for perioden 1997-2016 (inkl.). Det ses at punktskyen ligger i et bånd omkring "line of perfect agreement", og at vandstandsforholdene langs med Nordkysten derfor er godt beskrevet i den modellerede periode.

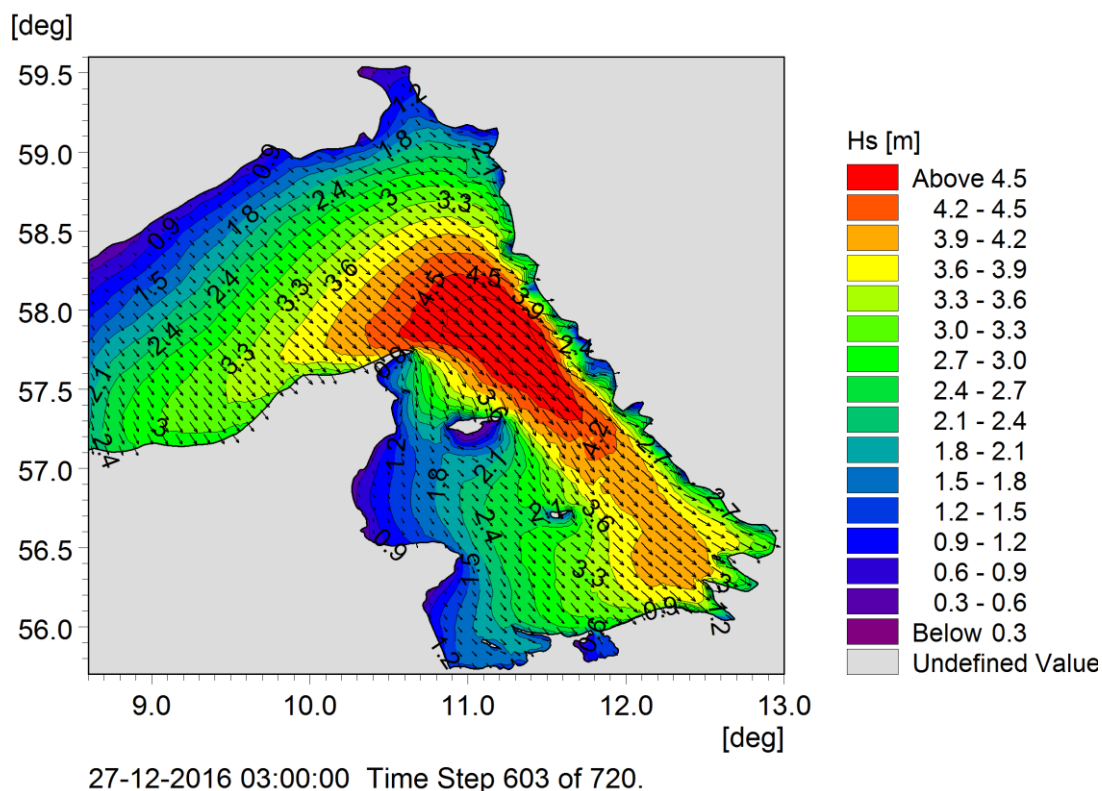


Figur 4-4 Modelverifikation – målt Hornbæk vandstand versus model vandstand for perioden 1997-2016.

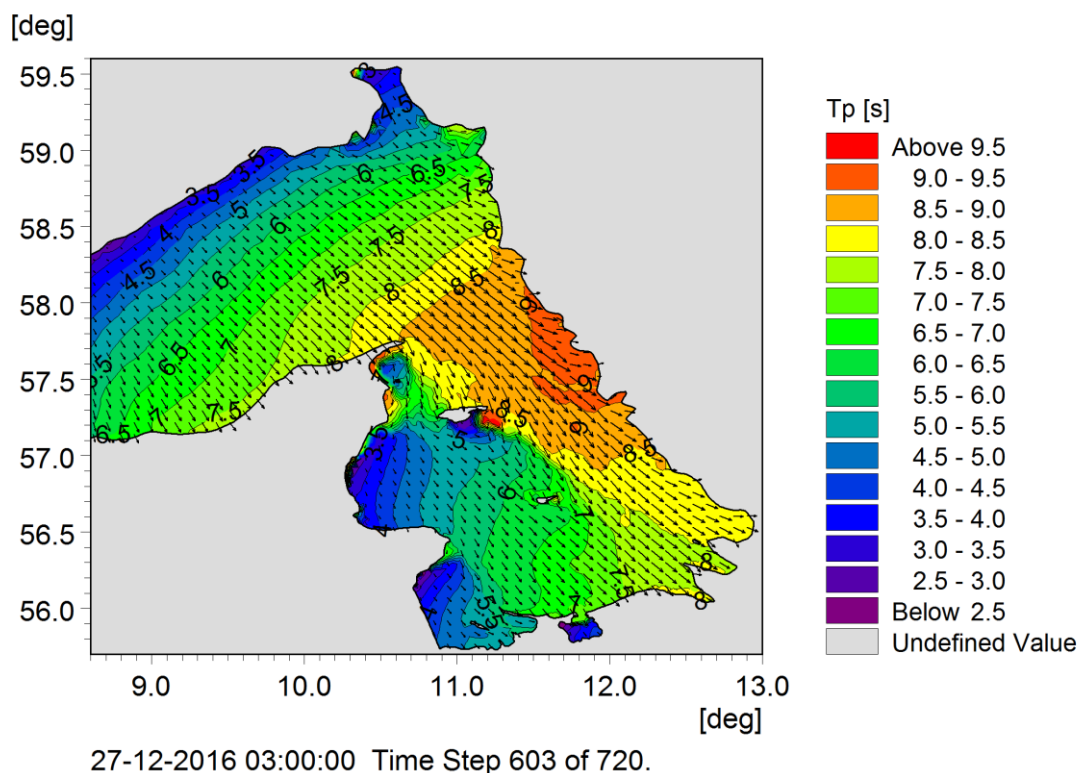
4.2.2 Bølgemodellen

Bølgemodelleringen er blevet gennemført med DHIs numeriske bølgemodell, MIKE 21 SW. Modellen er en såkaldt spektral bølgemodell, som simulerer dannelsen, spredningen og henfaldet af bølger genereret af vindens påvirkning på havoverfladen. Modellen tager hensyn til alle væsentlige effekter, herunder for eksempel vindens variation i både tid og sted, og de varierende vanddybde og kystlinjeforhold i modelområdet, som vil påvirke blandt andet bølgernes vækst og henfald, udbredelse, dæmpning og brydning. MIKE 21 SW blev benyttet i en fuld spektral version.

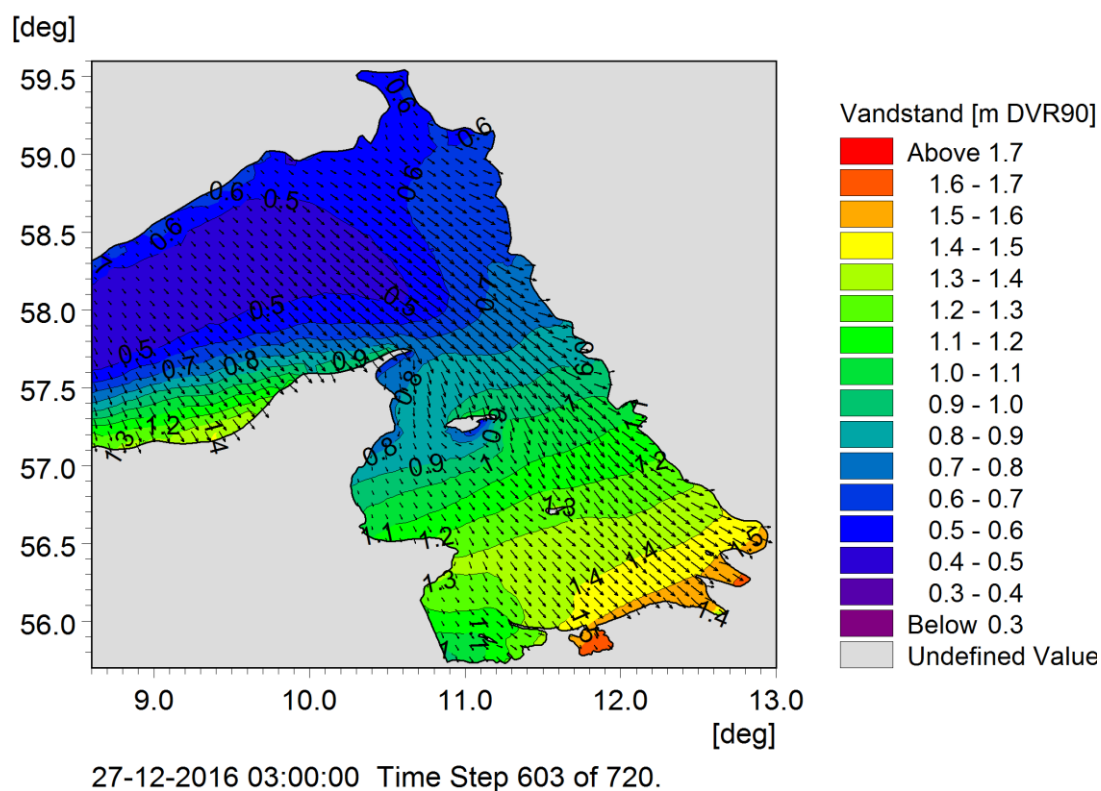
Eksempler på modellerede bølgehøjder, bølgeperioder og vandstande under Stormen Urd i december 2016 er vist i Figur 4-5 - Figur 4-7. På viste tidspunkt blev der målt en vandstand på 1,63 m DVR90 ved Hornbæk, 1,47 m ved Hundested og 1,37 m ved Odden. Under stormen nåede vandstanden, som registreres hvert 10. minut, op på 1,71 m DVR90 ved Hornbæk, 1,56 m ved Hundested og 1,52 m ved Odden.



Figur 4-5 Øjebliksbillede af bølgefelt (signifikant bølgeperiode H_s). Vektorer angiver middelbølgeretning. Tidspunkt 27-12-2016 kl. 3 (UTC-tid).



Figur 4-6 Øjebliksbillede af bølgefelt (peak periode T_p).
Vektorer angiver middelbølgeretning. Tidspunkt 27-12-2016 kl. 3 (UTC-tid).



Figur 4-7 Øjebliksbillede af vandstand.
Vektorer angiver middelbølgeretning. Tidspunkt 27-12-2016 kl. 3 (UTC-tid).

4.3 Bølgeklima

Følgende typer data er blevet genereret for de 40 punkter indikeret i Figur 4-1:

- Tidsserier som danner grundlag for beregningen af den langsgående sedimenttransport
- Scatter tabeller som viser sammenhæng mellem bølgehøjde og vandstand, bølgehøjde og middelbølgeretning, og bølgehøjde og peak bølgeperiode T_p
- Bølgeroser og bølgehøjdens variation langs Nordkysten
- Estimerer på ekstremvandstand og ekstrembølgehøjder med returperioder på 5, 10, 20, 50 og 100 år inklusiv relation for de tilhørende bølgeperioder T_p

4.3.1 Udtrækspunkter

De 40 udtrækspunkters koordinater og vanddybde i forhold til DVR90 er angivet i Tabel 4.1 og illustreret i Figur 4-1. Vanddybderne er baseret på C-Map data (søkort) og ikke faktiske opmålinger.

Tabel 4.1 Vanddybde og positioner for de 40 udtrækspunkter.

Station	Længdegrad	Breddegrad	Vanddybde [m]	Station	Længdegrad	Breddegrad	Vanddybde [m]
P1	11.85387	55.99234	8.1	P21	12.23229	56.13614	10.0
P2	11.86861	55.99971	9.4	P22	12.25201	56.13973	10.0
P3	11.88773	56.00549	10.2	P23	12.27113	56.14232	8.9
P4	11.90785	56.01226	9.3	P24	12.29343	56.14351	9.6
P5	11.92637	56.01983	10.0	P25	12.31514	56.14132	6.0
P6	11.94509	56.02760	8.0	P26	12.33048	56.13853	7.7
P7	11.96322	56.03536	7.7	P27	12.35	56.13276	6.1
P8	11.98034	56.04313	8.3	P28	12.37131	56.12738	9.8
P9	11.99847	56.0503	8.4	P29	12.39202	56.12021	9.2
P10	12.01659	56.05648	8.5	P30	12.41114	56.11304	7.8
P11	12.03711	56.06126	10	P31	12.43126	56.10647	7.0
P12	12.05463	56.06962	10.0	P32	12.45217	56.10527	8.3
P13	12.07136	56.07898	10.1	P33	12.47328	56.10069	9.0
P14	12.09267	56.08755	10.7	P34	12.4942	56.09651	8.5
P15	12.11179	56.09611	10.0	P35	12.5159	56.09292	8.6
P16	12.13111	56.10328	10.0	P36	12.53562	56.08655	8.6
P17	12.14824	56.11224	9.9	P37	12.55594	56.08038	7.4

Station	Længdegrad	Breddegrad	Vanddybde [m]	Station	Længdegrad	Breddegrad	Vanddybde [m]
P18	12.16657	56.11921	10.3	P38	12.57765	56.07102	7.8
P19	12.18708	56.12479	10.7	P39	12.59477	56.06464	7.1
P20	12.20859	56.13017	10.4	P40	12.6133	56.05528	7.5

4.3.2 Tidsserier

For hvert af de 40 ekstraktionspunkter langs med Nordkysten er der genereret modellerede tidsserier indeholdende 20 års data (1997-2016) for følgende parametre:

- Signifikant bølgehøjde H_s
- Peak bølgeperiode T_p
- Middel bølgeperiode T
- Middelbølgeretning
- Bølgenes retningsspredning
- Vandstand
- Strømhastighed
- Strømretning
- Vindhastighed
- Vindretning

De genererede tidsserier indeholder timeværdier for perioden 1997-2016 (inkl.) og er anvendt i analyserne af den langsgående sedimenttransport.

4.3.3 Bølgehøjde H_s versus vandstand tabel

Der er beregnet bølgehøjde versus vandstand tabeller, som angiver hyppigheden i pct. for de relevante kombinationer af bølgehøjde (H_s) og vandstand (VS). Et eksempel er vist i Tabel 4.2. Som eksempel ses, at bølgehøjden er i intervallet 0,4-0,6 m med en samtidig vandstand i intervallet -0,1-0,0 m i 2,57% af tiden. Endvidere ses det, at vandstanden er i intervallet mellem -0,2-0,3 m i 79,9% (90,6035-10,689) af tiden.

Tabel 4.2 Tabel over hyppigheden af kombineret bølgehøjde H_s og vandstand for P24.

V_S	H_s	<0.2	0.2-0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	0.8-1	1-1.2	1.2-1.4	1.4-1.6	1.6-1.8	1.8-2	2-2.2	2.2-2.4	2.4-2.6	2.6-2.8	2.8-3	3-3.2	3.2-3.4	3.4-3.6	3.6-3.8	3.8-4	4-4.2	Total	Akkumuleret
-1.2	-1.1	0.0000	0.0017	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0017	0.0017
-1.1	-1	0.0000	0.0011	0.0006	0.0017	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0034	0.0051
-1	-0.9	0.0011	0.0017	0.0006	0.0029	0.0017	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0080	0.0131
-0.9	-0.8	0.0011	0.0046	0.0125	0.0120	0.0080	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0382	0.0513
-0.8	-0.7	0.0006	0.0188	0.0234	0.0268	0.0046	0.0040	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0781	0.1295
-0.7	-0.6	0.0086	0.0302	0.0462	0.0411	0.0137	0.0051	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1449	0.2744
-0.6	-0.5	0.0616	0.0753	0.1255	0.0781	0.0114	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3519	0.6263
-0.5	-0.4	0.2316	0.2675	0.2647	0.1306	0.0154	0.0011	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9109	1.5372
-0.4	-0.3	1.1316	0.7073	0.4917	0.1437	0.0171	0.0034	0.0000	0.0000	0.0000	0.0006	0.0006	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.4966	4.0338
-0.3	-0.2	3.7007	1.7556	0.8379	0.2407	0.0975	0.0143	0.0063	0.0011	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	6.6553	10.6890
-0.2	-0.1	7.6243	3.4440	1.5771	0.6337	0.1882	0.0633	0.0183	0.0125	0.0051	0.0006	0.0011	0.0006	0.0000	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	13.5695	24.2585
-0.1	0	10.3040	4.8129	2.5650	1.4100	0.5573	0.2447	0.1124	0.0337	0.0125	0.0023	0.0006	0.0011	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	20.0570	44.3155
0	0.1	8.6955	5.2150	3.3077	2.1566	0.1860	0.5692	0.2225	0.0901	0.0365	0.0160	0.0023	0.0006	0.0029	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	21.4009	65.7164
0.1	0.2	3.8147	3.6510	3.0179	2.2878	1.4282	0.9269	0.4609	0.1882	0.0747	0.0337	0.0188	0.0057	0.0000	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.9092	81.6256
0.2	0.3	1.0894	1.4351	1.7414	1.5389	1.1527	0.8721	0.5356	0.3177	0.1529	0.0901	0.0262	0.0143	0.0080	0.0029	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	8.9779	90.6035
0.3	0.4	0.2584	0.4523	0.6907	0.7854	0.6320	0.6075	0.5019	0.3034	0.1626	0.1095	0.0394	0.0228	0.0125	0.0068	0.0029	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	4.5882	95.1916
0.4	0.5	0.0542	0.1055	0.2487	0.2898	0.3012	0.3742	0.3303	0.2681	0.1643	0.1095	0.0616	0.0331	0.0108	0.0057	0.0046	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.3620	97.5536
0.5	0.6	0.0080	0.0302	0.0787	0.0941	0.1352	0.1723	0.1802	0.1637	0.1278	0.0770	0.0371	0.0462	0.0160	0.0051	0.0046	0.0017	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.1784	98.7320
0.6	0.7	0.0063	0.0040	0.0183	0.0405	0.0473	0.0639	0.0975	0.0981	0.0736	0.0496	0.0496	0.0291	0.0137	0.0080	0.0023	0.0011	0.0006	0.0017	0.0000	0.0000	0.0000	0.6052	99.3372
0.7	0.8	0.0000	0.0023	0.0029	0.0091	0.0188	0.0268	0.0359	0.0570	0.0359	0.0371	0.0399	0.0240	0.0108	0.0063	0.0051	0.0006	0.0006	0.0011	0.0000	0.0000	0.0000	0.3143	99.6515
0.8	0.9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0057	0.0131	0.0063	0.0086	0.0217	0.0291	0.0251	0.0297	0.0143	0.0165	0.0063	0.0057	0.0006	0.0011	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1837	99.8352
0.9	1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0011	0.0040	0.0029	0.0063	0.0097	0.0080	0.0108	0.0068	0.0057	0.0023	0.0023	0.0017	0.0006	0.0000	0.0011	0.0000	0.0000	0.0633	99.8985
1	1.1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0017	0.0034	0.0068	0.0006	0.0034	0.0046	0.0029	0.0011	0.0040	0.0006	0.0011	0.0000	0.0011	0.0000	0.0000	0.0000	0.0257	99.9241
1.1	1.2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0023	0.0006	0.0011	0.0029	0.0046	0.0029	0.0011	0.0029	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0217	99.9458
1.2	1.3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0006	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0006	0.0017	0.0029	0.0017	0.0006	0.0006	0.0011	0.0000	0.0000	0.0120	99.9578
1.3	1.4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0000	0.0034	0.0023	0.0011	0.0040	0.0029	0.0017	0.0000	0.0000	0.0000	0.0177	99.9755
1.4	1.5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0006	0.0011	0.0000	0.0006	0.0000	0.0011	0.0017	0.0011	0.0017	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0091	99.9846
1.5	1.6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0006	0.0006	0.0011	0.0023	0.0006	0.0011	0.0006	0.0000	0.0000	0.0068	99.9914
1.6	1.7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0006	0.0000	0.0023	0.0017	0.0011	0.0011	0.0000	0.0000	0.0000	0.0068	99.9983
1.7	1.8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0017	0.0000	0.0000	0.0000	0.0017	100.0000
1.8	1.9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	100.0000
Total		36.9918	22.0163	15.0513	9.9293	5.7307	3.9613	2.5194	1.5634	0.8887	0.5658	0.3303	0.2053	0.1067	0.0570	0.0365	0.0183	0.0097	0.0108	0.0074	0.0000	0.0000		
Akkumuleret		36.9918	59.0081	74.0594	83.9887	89.7194	93.6807	96.2001	97.7635	98.6522	99.2180	99.5483	99.7536	99.8603	99.9173	99.9538	99.9721	99.9817	99.9926	100.0000	100.0000	100.0000		

4.3.4 Bølgehøjde H_s versus middelbølgeretning tabel

Der er beregnet bølgehøjde versus middelbølgeretning tabeller, som angiver hyppigheden i pct. for de relevante kombinationer af bølgehøjde (H_s) og middelbølgeretning (MWD). Et eksempel er vist i Tabel 4.3. Som eksempel ses, at bølgehøjden er i intervallet 0,6-0,8 m med en samtidig middelbølgeretning i intervallet 270-285° i 2,86% af tiden. Endvidere kan det findes at middelbølgeretningen er i intervallet 300-345° i 32,5% (90,5595-58,0196) af tiden.

Tabel 4.3 Tabel over hyppigheden af bølgehøjde H_s og middelbølgeretning for P24.

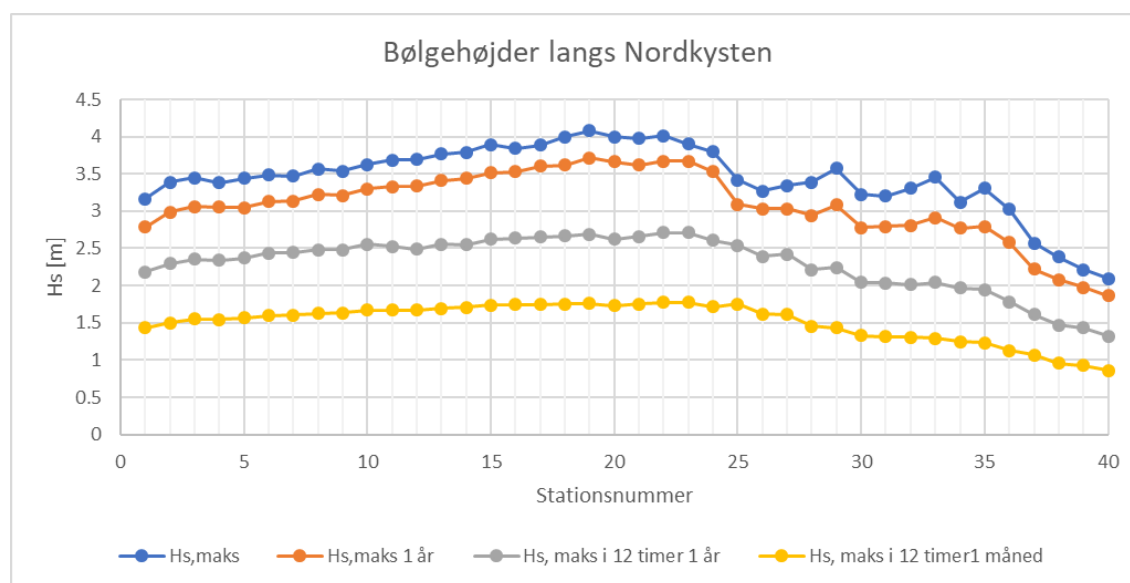
MWD	H _s	<0.2	0.2-0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	0.8-1	1-1.2	1.2-1.4	1.4-1.6	1.6-1.8	1.8-2	2-2.2	2.2-2.4	2.4-2.6	2.6-2.8	2.8-3	3-3.2	3.2-3.4	3.4-3.6	3.6-3.8	3.8-4	4-4.2	Total	Akkumuleret
0-15	1.4687	0.6731	0.4130	0.2379	0.1300	0.0964	0.0376	0.0205	0.0034	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.0807	3.0807
15-30	1.4802	0.7215	0.4512	0.2926	0.1346	0.0331	0.0074	0.0011	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.1217	6.2024
30-45	0.3862	0.3029	0.3337	0.1489	0.0314	0.0046	0.0011	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.2086	7.4110
45-60	0.3582	0.1466	0.1934	0.0348	0.0108	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.7444	8.1554
60-75	0.5687	0.2527	0.2219	0.0599	0.0091	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.1128	9.2682
75-90	0.6571	0.8641	0.3508	0.1004	0.0262	0.0040	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.0026	11.2708
90-105	0.5835	1.7420	0.8909	0.2755	0.0319	0.0051	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.5290	14.7998
105-120	0.3451	0.5287	0.2886	0.0451	0.0023	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.2098	16.0096
120-135	0.0439	0.0468	0.0131	0.0011	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1050	16.1145
135-150	0.0205	0.0302	0.0108	0.0023	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0639	16.1784
150-165	0.0148	0.0120	0.0063	0.0017	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0348	16.2132
165-180	0.0165	0.0086	0.0063	0.0011	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0325	16.2457
180-195	0.0215	0.0097	0.0034	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0274	16.2731
195-210	0.0131	0.0114	0.0063	0.0034	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0242	16.3074
210-225	0.0251	0.0137	0.0091	0.0029	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0508	16.3581
225-240	0.0411	0.0291	0.0080	0.0029	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0810	16.4391
240-255	0.4443	0.1055	0.0627	0.0240	0.0091	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.6462	17.0853
255-270	3.2141	3.0909	2.8268	1.8503	0.6788	0.2401	0.0565	0.0108	0.0034	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	11.9730	29.0583
270-285	4.5192	4.1935	3.4571	2.8559	1.8920	1.4225	0.7563	0.3650	0.1506	0.0730	0.0291	0.0120	0.0029	0.0017	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	19.7319	48.7902
285-300	1.9325	1.5957	1.3661	1.1870	0.9731	0.7900	0.5989	0.3776	0.1852	0.0816	0.0724	0.0433	0.0217	0.0114	0.0091	0.0051	0.0011	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	9.2294	58.0196
300-315	1.6307	1.5594	1.0706	0.9406	0.6702	0.5430	0.4546	0.3793	0.2510	0.1916	0.0884	0.0548	0.0285	0.0165	0.0040	0.0011	0.0006	0.0005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	7.8930	65.9122
315-330	2.4732	1.9906	1.0535	0.6696	0.4130	0.3308	0.2418	0.1768	0.1386	0.1021	0.0650	0.0553	0.0245	0.0108	0.0103	0.0080	0.0046	0.0004	0.0023	0.0004	0.0000	0.0000	7.7761	73.6887
330-345	10.1654	3.0458	1.3943	0.7449	0.4478	0.3211	0.2521	0.1842	0.1124	0.0749	0.0476	0.0359	0.0262	0.0165	0.0125	0.0034	0.0034	0.0006	0.0017	0.0000	0.0000	0.0000	16.9108	90.5995
345-360	2.0824	2.0778	0.9474	0.4449	0.2326	0.1688	0.1126	0.0749	0.0476	0.0359	0.0262	0.0165	0.0125	0.0034	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	4.9059	95.5054
N.A.	4.16	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.4944	100.0000
Total	36.9918	22.0163	15.0512	9.9293	5.7307	3.9613	2.5194	1.5634	0.8887	0.5658	0.3303	0.2053	0.1067	0.0570	0.0265	0.0183	0.0097	0.0108	0.0074	0.0000	0.0000	0.0000	100.0000	100.0000
Akkumuleret	36.9918	59.9918	74.0594	83.9887	89.7194	93.6875	96.2001	97.7635	99.1180	99.5483	99.7536	99.8603	99.9173	99.9538	99.9789	99.9817	99.9826	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000

Tabel 4.4 Tabel over hyppigheden af bølgehøjde H_s og bølgeperiode T_p for P24.

$T_p \backslash H_s$	< 0.2	0.2-0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	0.8-1	1-1.2	1.2-1.4	1.4-1.6	1.6-1.8	1.8-2	2-2.2	2.2-2.4	2.4-2.6	2.6-2.8	2.8-3	3-3.2	3.2-3.4	3.4-3.6	3.6-3.8	3.8-4	4-4.2	Total	Akkumuleret
1-2	3.5495	0.5362	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	4.0857	4.0857
2-3	17.0676	5.5864	1.8001	0.0125	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	24.4667	28.5524
3-4	9.3287	11.4950	6.2201	2.0140	0.1312	0.0108	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	29.1997	57.7521
4-5	1.9787	3.8923	6.2303	6.2081	3.7201	1.2742	0.1004	0.0040	0.0011	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	23.4092	81.1613
5-6	0.5168	0.4883	0.7757	1.6553	1.7984	2.5394	2.2331	1.1881	0.3411	0.0388	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	11.5754	92.7367
6-7	0.0542	0.0183	0.0251	0.0394	0.0810	0.1358	0.1848	0.3702	0.5436	0.5179	0.2818	0.1181	0.0165	0.0006	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.3876	95.1243
7-8	0.0017	0.0000	0.0000	0.0000	0.0011	0.0011	0.0011	0.0029	0.0091	0.0479	0.0873	0.0901	0.0565	0.0348	0.0131	0.0011	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3485	95.4728
8-9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0011	0.0051	0.0086	0.0103	0.0074	0.0000	0.0000	0.0325	95.5054
N.A	4.4946	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	4.4946	100.0000
Total	36.9918	22.0163	15.0513	9.9293	5.7307	3.9613	2.5194	1.5634	0.8887	0.5658	0.3303	0.2053	0.1067	0.0570	0.0265	0.0183	0.0097	0.0108	0.0074	0.0000	0.0000		
Akkumuleret	36.9918	59.0081	74.0594	83.9887	89.7194	93.6807	96.2001	97.7635	98.6522	99.2180	99.5483	99.7536	99.8603	99.9173	99.9538	99.9721	99.9817	99.9926	100.0000	100.0000	100.0000		

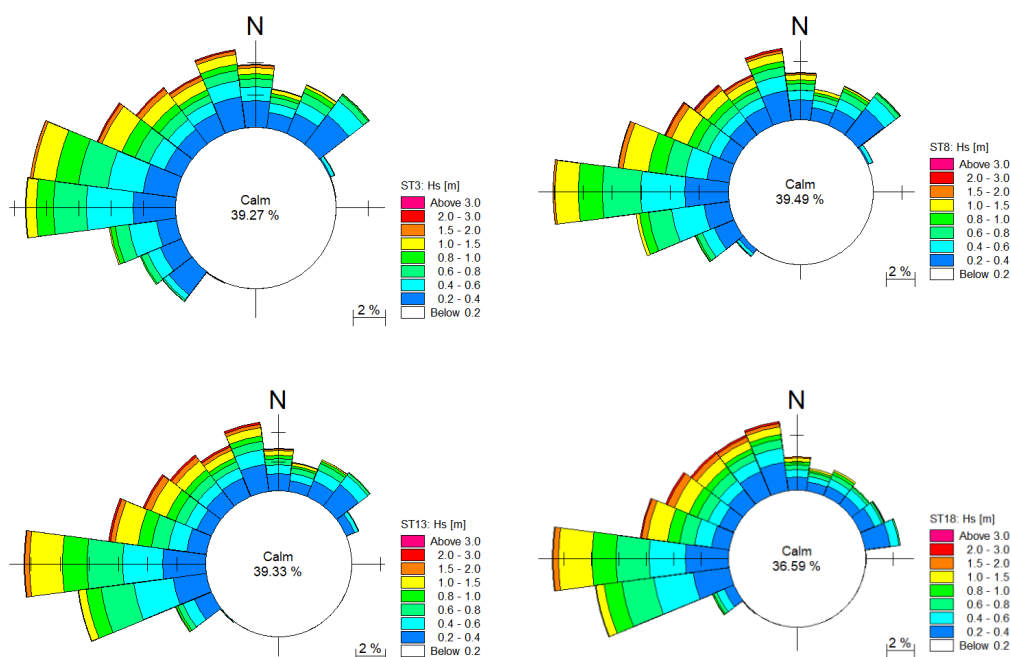
4.3.6 Bølgeroser og bølgehøjdens variation langs kysten

For de 40 lokaliteter er der på baggrund af de udtrukne tidsserier optegnet bølgeroser. Endvidere er den maksimale bølgehøjde H_s , bølgehøjden som i gennemsnit overskrides en gang per år, bølgehøjden som i gennemsnit overskrides 12 timer per år og bølgehøjden som i gennemsnit overskrides 12 timer per måned estimeret og optegnet i Figur 4-8, så man kan se dens variation langs Nordkysten på strækningen fra Hundested til Helsingør. Værdierne er fundet ved at rangordne de 20 års simulerede data, som er gemt med timeværdier. $H_{s,maks}$ er fundet som den største værdi, $H_{s,maks}$ 1 år er fundet som den 20. største værdi, $H_{s,maks}$ i 12 timer 1 år er fundet som den 20x12 = 240 højeste værdi, og $H_{s,maks}$ i 12 timer 1 måned er fundet som den 12x240 = 2880 højeste værdi.

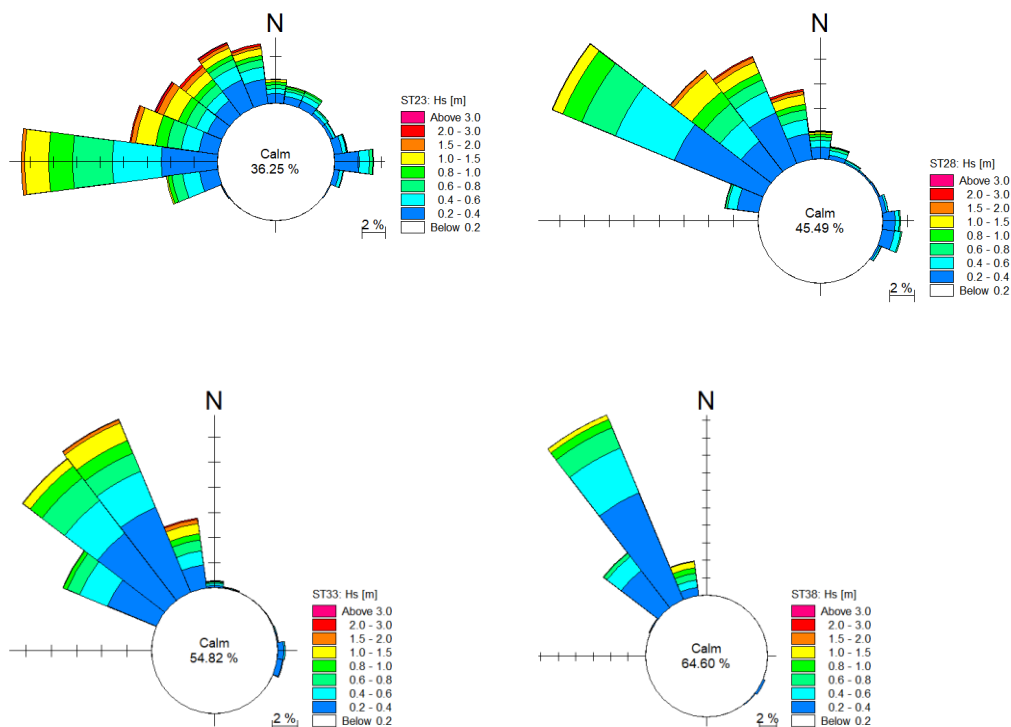


Figur 4-8 Bølgehøjdens variation langs med Nordkysten på strækningen fra Hundested til Helsingør udregnet på baggrund af 20 års simulerede bølger.

Eksempler på bølgeroser gældende for strækningen fra Hundested til Rågeleje er vist i Figur 4-9 for stationerne ST3, ST8, ST13 og ST18. Det ses at de største bølger kommer fra NNV og N, men at den hyppigste bølgeretning er fra V. I Figur 4-10 er der vist eksempler på bølgeroser gældende for strækningen fra Gilleleje vest til Helsingør (ST23, ST28, ST33 og ST38). Det ses at bølgeretningen snævre sammen i et smallere bånd efterhånden som man bevæger sig i retning mod øst samtidig med at bølgerne bliver mindre.



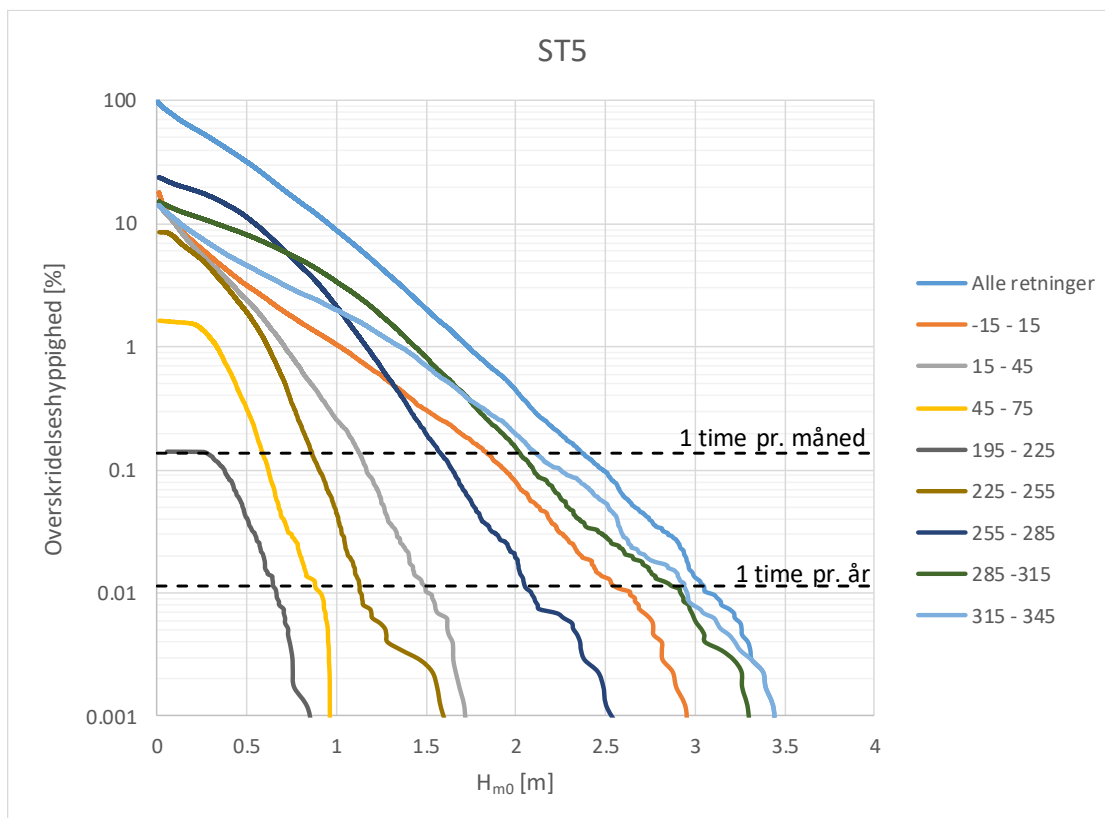
Figur 4-9 Bølgeroser for ST3, ST8, ST13 og ST18 beskrivende strækningen fra Hundested til Rågeleje.



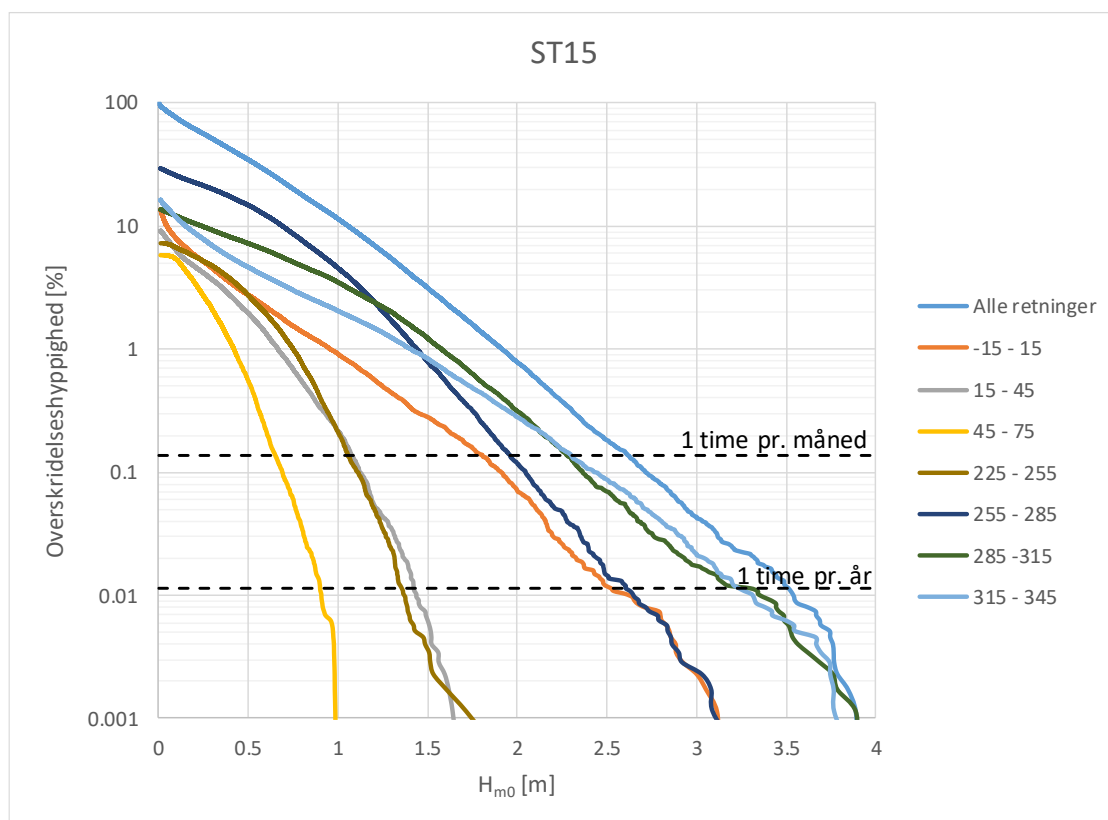
Figur 4-10 Bølgeroser for ST23, ST28, ST33 og ST38 beskrivende strækningen fra Gilleleje vest til Helsingør.

Bølgeklimaet langs hele Nordkysten på strækningen fra Hundested til Helsingør er illustreret i Bilag A.1 ved hjælp af bølgeroser for samtlige 40 udtrækspunkter (ST1-ST40).

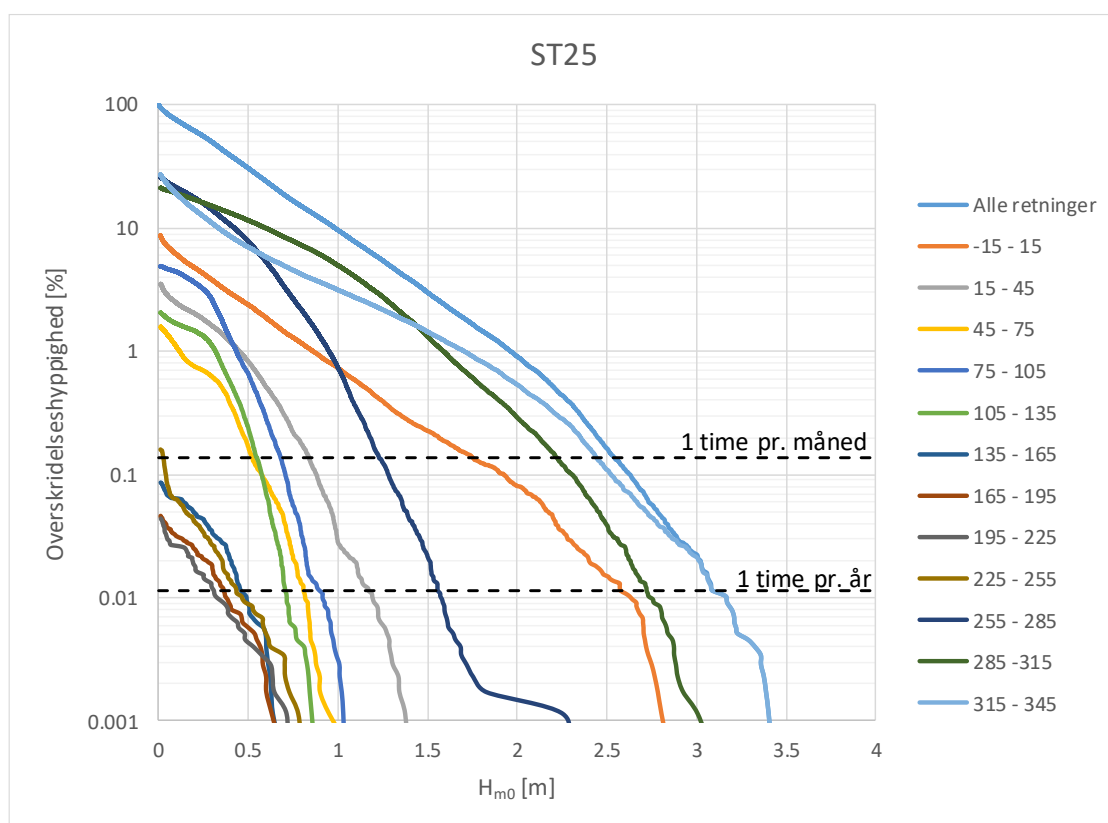
En bedre gengivelse af de største bølger kan illustreres ved hjælp af overskridelsesdiagrammer for bølgerne fordelt på retninger. Dette er gjort for stationerne ST5, ST15, ST25 og ST35 i Figur 4-11 til Figur 4-14, som repræsenterer tendenserne lang med Nordkysten. I figurene er der ligeledes indikeret hvilken bølgehøjde (alle retninger), der kan forventes at forekomme i en time pr år og 1 time pr måned.



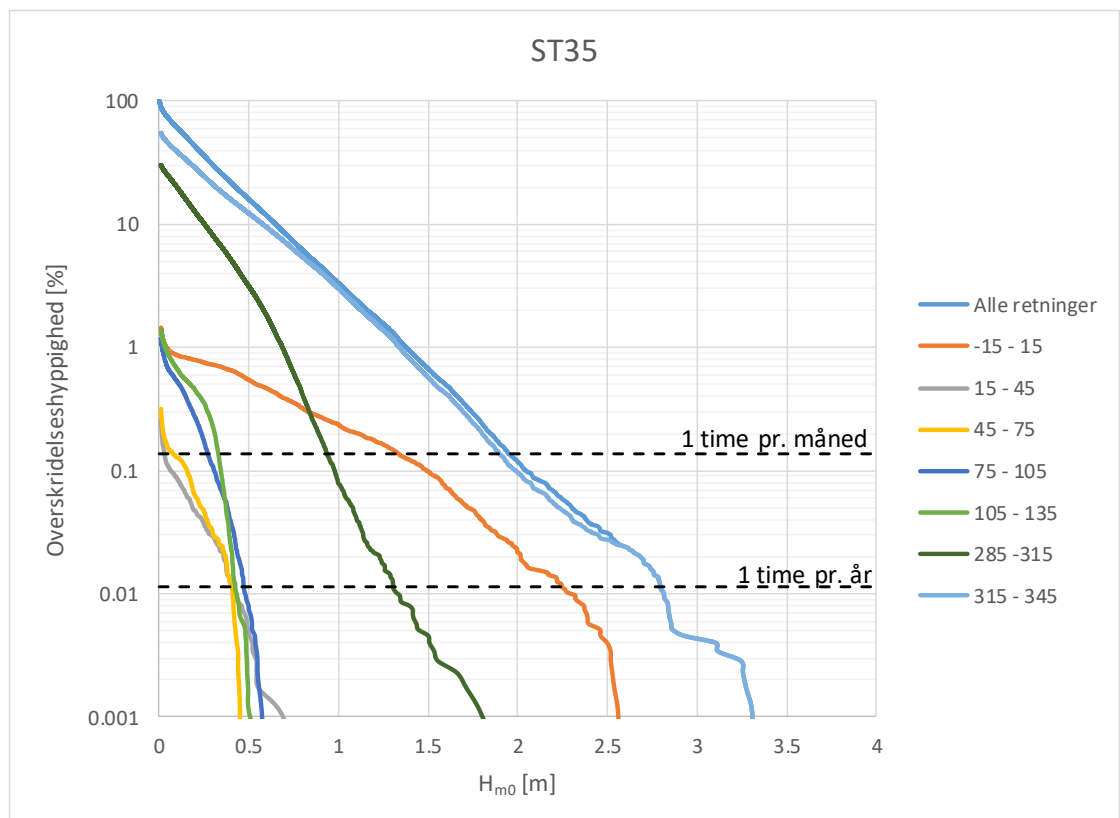
Figur 4-11 Overskridelseshyppighedsdiagram af indkommende bølger fordelt på retninger i station ST5.



Figur 4-12 Overskridelseshyppighedsdiagram af indkommende bølger fordelt på retninger i station ST15.



Figur 4-13 Overskridelseshyppighedsdiagram af indkommende bølger fordelt på retninger i station ST25.



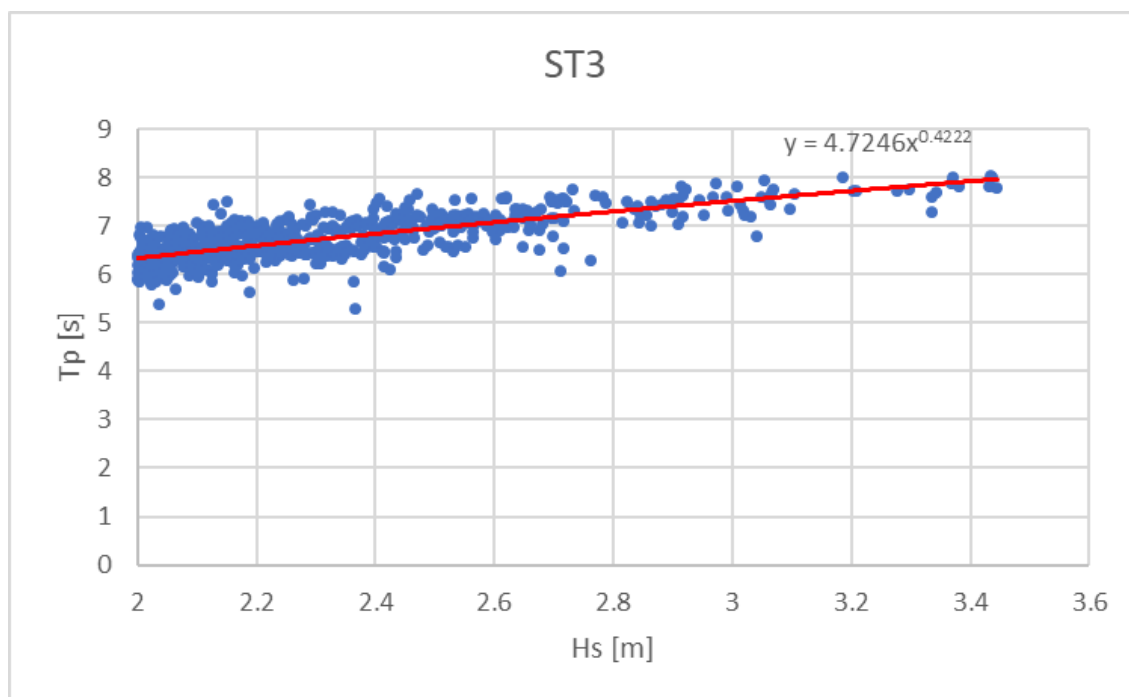
Figur 4-14 Overskridelseshyppighedsdiagram af indkommende bølger fordelt på retninger i station ST35.

4.3.7 Relation for designbølgernes bølgeperiode T_p

Bølgeperioden T_p for de største bølger har en svagt stigende tendens i retningen fra Hundested til Helsingør, hvilket også fremgår af øjebliksbilledet i Figur 4-6. Typisk ligger bølgeperioden for de største bølger i intervallet fra 7,5-9 sekunder. Trenden i bølgeperiodens variation følger, som det ses i Figur 4-8, ikke bølgehøjdernes variation langs med kysten. Det er derfor ikke muligt at angive en samlet relation for designbølgernes bølgeperiode som er repræsentativ for hele strækningen. Det er derfor i stedet valgt at angive en relation for hver enkelt station. Relationerne er tilnærmet med en potensfunktion og baseret på 0,4% af de højeste bølger i løbet af de modellerede 20 år:

$$T_p = aH_s^p$$

Et eksempel på den tilnærmede potensfunktion og sammenhørende værdier af de højeste signifikante bølgehøjder og peak bølgeperioder er vist for udtrækspunktet ST3 i Figur 4-15.



Figur 4-15 Relation mellem designbølgehøjde og bølgeperiode T_p i ST3.

Korrelationen og en relation mellem den signifikante bølgehøjde og peak bølgeperioden er illustreret i Bilag A.2 ved hjælp af scatter plot for samtlige af de 40 definerede stationer langs med Nordkysten. Ydermere er potensfunktionens styrende parametre (a , p) angivet i Tabel 4.5 for samtlige af de 40 definerede stationer (ST1-ST40).

Tabel 4.5 Parametre til estimering af designbølgeperioder T_p i de 40 stationer langs Nordkysten.

Station	Faktor a	Potens p	Station	Faktor a	Potens p
ST1	4,7376	0,4735	ST21	4,8248	0,4108
ST2	4,7510	0,4419	ST22	4,8003	0,4173
ST3	4,7246	0,4222	ST23	4,7856	0,4244
ST4	4,7855	0,4193	ST24	4,8499	0,4318
ST5	4,7634	0,4288	ST25	4,5444	0,5222
ST6	4,7282	0,4326	ST26	4,8440	0,4789
ST7	4,7410	0,4278	ST27	4,8650	0,4783
ST8	4,7274	0,4244	ST28	5,2578	0,4279
ST9	4,7329	0,4292	ST29	5,4291	0,3848
ST10	4,6957	0,4256	ST30	5,5106	0,4039
ST11	4,7407	0,4146	ST31	5,5307	0,3983
ST12	4,6982	0,4210	ST32	5,5256	0,3950
ST13	4,7226	0,4178	ST33	5,6495	0,3685

Station	Faktor a	Potens p	Station	Faktor a	Potens p
ST14	4,6761	0,4156	ST34	5,6869	0,3845
ST15	4,6704	0,4206	ST35	5,9083	0,3633
ST16	4,7028	0,4125	ST36	6,1205	0,3574
ST17	4,7440	0,4061	ST37	6,0154	0,4680
ST18	4,7835	0,4073	ST38	6,2090	0,4423
ST19	4,8045	0,4027	ST39	6,1934	0,4941
ST20	4,8380	0,4014	ST40	6,3869	0,4894

4.4 Ekstremstatistik for vandstand og bølgehøjder

4.4.1 Estimerer på ekstreme vandstande Hornbæk

Ekstremvandstande er langt mere følsomme over for måletidsseriens længde end ekstrembølgehøjder. I estimererne er det derfor valgt at tage udgangspunkt i måletidsserien for Hornbæk, som dækker en observationsperiode på 127 år, og i kombination med denne blot bruge de 20 års modellerede vandstande til at udregne en korrektion til Hornbæk statistikken langs med Nordkysten på strækningen fra Hundested til Helsingør.

For Hornbæk er Kystdirektoratets højvandsstatistik reproduceret, men med enkelte korrektioner, idet der er fundet afvigelser mellem målte vandstande og benyttede vandstande i fem af de højvandshændelser som indgår i grundlaget for højvandsstatistikken. Afvigelserne er dog så beskedne at de ikke influerer nævneværdigt på de estimerede ekstremvandstande.

Følgende 48 hændelser angivet i Tabel 4.6 er anvendt som grundlag for ekstremværdianalysen

Tabel 4.6 Trendfrie Hornbæk vandstande for de 48 højvandshændelser med angivelse af anvendte estimerer benyttet af DHI og KD.

Dato	VS _{DHI} [m]	VS _{KD} [m]	Dato	VS _{DHI} [m]	VS _{KD} [m]
30-01-1892	1.39	1.39	25-11-1964	1.29	1.29
06-12-1895	1.37	1.37	05-12-1967	1.39	1.39
16-01-1896	1.29	1.29	22-10-1971	1.27	1.27
05-12-1899	1.31	1.31	20-11-1973	1.50	1.50
10-09-1903	1.43	1.43	25-11-1981	1.38	1.38
22-11-1903	1.30	1.30	16-12-1982	1.41	1.41
01-02-1905	1.30	1.30	07-11-1985	1.64	1.64
14-12-1912	1.28	1.28	29-12-1986	1.36	1.36
28-09-1914	1.29	1.29	15-02-1989	1.35	1.35

Dato	VS _{DHI} [m]	VS _{KD} [m]	Dato	VS _{DHI} [m]	VS _{KD} [m]
02-11-1921	1.58	1.58	27-02-1990	1.33	1.33
18-12-1921	1.62	1.62	14-03-1992	1.25	1.25
01-01-1922	1.77	1.77	11-01-1995	1.38	1.38
10-10-1923	1.47	1.47	05-02-1999	1.25	1.25
10-09-1924	1.35	1.35	30-01-2000	1.33	1.33
10-10-1926	1.33	1.33	29-01-2002	1.28	1.28
04-10-1927	1.50	1.50	01-11-2006	1.31	1.30
12-10-1929	1.35	1.35	09-11-2007	1.42	1.42
09-10-1930	1.27	1.27	02-03-2008	1.47	1.47
03-02-1935	1.24	1.24	27-11-2011	1.63	1.64
18-09-1948	1.31	1.31	10-12-2011	1.49	1.50
23-10-1948	1.36	1.36	06-12-2013	1.92	1.92
21-02-1953	1.25	1.25	10-01-2015	1.40	1.37
22-12-1954	1.36	1.36	29-11-2015	1.38	1.35
17-02-1962	1.35	1.35	26-12-2016	1.67	1.67

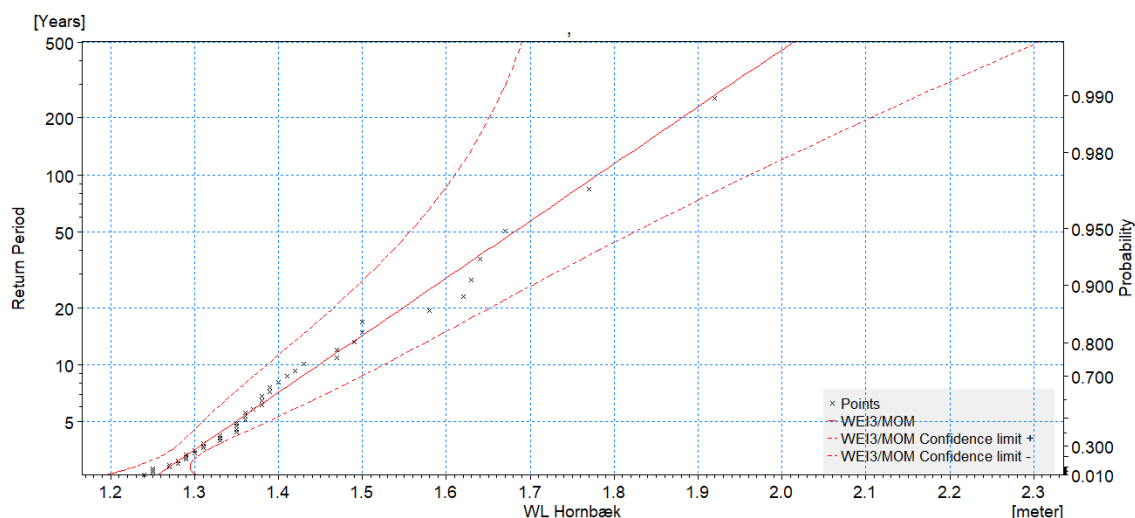
Til beskrivelsen er der anvendt en trunkeket Weibull fordeling, som er en 3-parameter givet ved:

$$P(X < x) = 1 - \frac{1}{P_0} - \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right]$$

Med fordelingsparametre α (formparameter) og β (skalaparameter) og overskridelsessandsynligheden P_0 , ved grænseværdi γ (afskæringsniveau), givet ved:

$$P_0 = \exp\left[-\left(\frac{\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right]$$

Hvor grænseværdien angiver kriteriet i en "peak-over-threshold" analyse. I udvælgelse af hændelserne i peak-over-threshold analysen udvælges maksimumværdien for individuelle hændelser. For at hændelser kan betragtes som individuelle er der anvendt som kriterie, at de som minimum skal være adskilt af en periode på 24 timer. Afskæringsniveauet er sat til 1,24 m og observationsperiodens længde er 125,8 år.



Figur 4-16 Tilpasset sandsynlighedsfordeling til estimering af ekstreme vandstande i Hornbæk. Hændelsernes forekomst er vist ved hjælp af en Hazen fordeling.

Tabel 4.7 Hornbæk designvandstande.

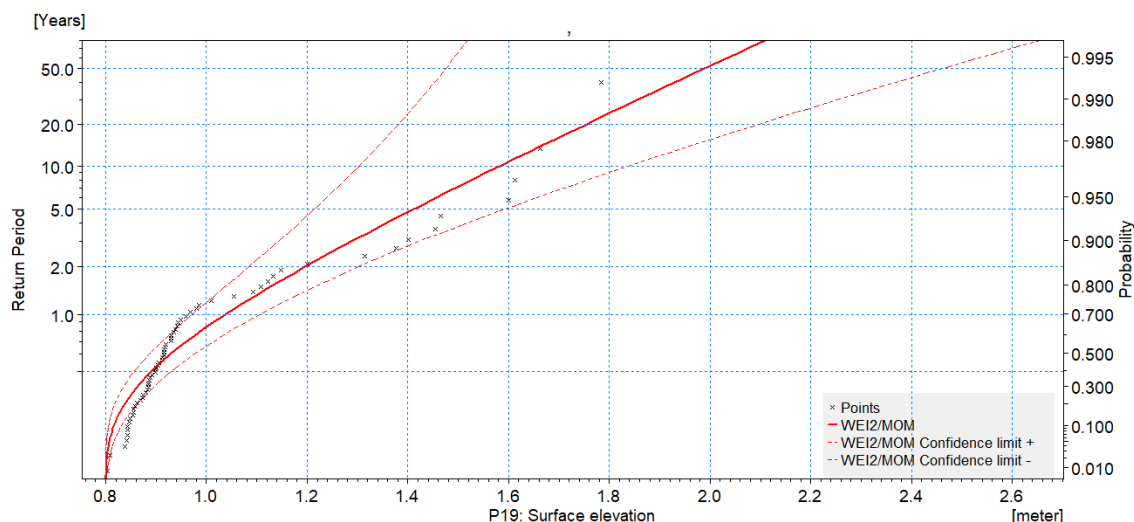
Returperiode [år]	Trendfri vandstand [m DVR90]	Vandstand år 2018 [m DVR90]	Spredning [m]
2	1,194	1,236	0,013
5	1,332	1,374	0,016
10	1,441	1,483	0,034
20	1,545	1,587	0,046
50	1,679	1,721	0,067
100	1,780	1,822	0,088

Figur 4-16 viser de udvalgte hændelser og det tilpassede fit. Det ses af figuren og Tabel 4.7, at der er en relativ lille spredning og at Hornbæk estimeret derfor statistisk set er relativt sikkert. Hændelsernes forekomst er vist ved hjælp af en Hazen fordeling, hvilket vil sige at den største hændelse i plotmæssig sammenhæng ($i=1$) tillægges en forekomst en gang i løbet af to gange observationsperioden n (125,8 år), altså sandsynligheden $p_i = (i-0,5)/n$.

4.4.2 Estimerer for ekstreme vandstande langs med Nordkysten

På baggrund af de 20 års modellerede vandstande (1997-2016) er der lavet en ekstremværdianalyse for de 40 definerede punkter langs Nordkysten på strækningen fra Hundested til Helsingør. Til beskrivelsen er der anvendt en trunkeret Weibull fordeling. I udvælgelse af hændelserne i peak-over-threshold analysen er der benyttet et afskæringsniveau på 0,8 m. For at hændelser kan betragtes som individuelle er der anvendt som kriterie, at de som minimum skal være adskilt af en periode på 24 timer. Observationsperiodens længde udgør 20 år.

Et eksempel fra ekstremværdianalysen er vist i Figur 4-17 for ST19, som viser de udvalgte hændelser og det estimerede fit. Det ses at der er en relativ stor spredning på estimererne og at de estimerede ekstremvandstande derfor er behæftet med en usikkerhed.



Figur 4-17 Tilpasset sandsynlighedsfordeling til estimering af ekstreme vandstande for ST19. Hændelsernes forekomst er vist ved hjælp af en Hazen fordeling.

Tabel 4.8 - Tabel 4.11 angiver estimerede ekstremvandstande for de 40 definerede punkter fordelt langs med Nordkysten. Det ses, at estimererne for ST34 er højere end hvad der findes med udgangspunkt i Hornbækstatistikken. For hændelser med en returperiode på 50 år er forskellen cirka 30 cm. Omvendt ses det at spredningen er relativ stor og at estimererne derfor er behæftet med usikkerhed. Estimererne er påvirket af, at man i de seneste 10 år har haft en del højvandshændelser som rangerer blandt de mest ekstreme observeret ved Hornbæk. Nogen vil umiddelbart konkludere, at denne "klump" af højvandshændelser skyldes klimaforandringer, men en gennemgang af ekstremhændelserne viser, at der i perioden 1921-1927 fandt 8 ekstremhændelser sted og 5 af disse rangerer mellem de 12 værste observerede højvandshændelser. Det er derfor ikke unormalt, at hændelser har en tendens til at klumpe sig sammen, hvorefter der følger en længere periode med relativt få hændelser. For eksempel optræder der blot 8 hændelser i perioden 1931-1970 og ingen af disse hændelser er blandt de 15 værste. Det vurderes derfor, at de mest sikre estimerer findes ved at tage udgangspunkt i Hornbækstatistikken, hvor observationsperioden er lang og blot korrigerer den med den modelestimerede variation langs med Nordkysten. Nutids designvandstande og de tilhørende spredninger med returperiode 2 år, 5 år, 10 år, 20 år og 50 år er angivet i Tabel 4.12 for de 40 definerede punkter fordelt langs Nordkysten på strækningen fra Hundested til Helsingør. Endvidere er de optegnet i form af et diagram i Figur 4-18. De tilpassede sandsynlighedsfordelinger af ekstremvandstandene for samtlige 40 stationer er indsat i Bilag A.3.

Tabel 4.8 Estimeret ekstrem vandstand VS og tilhørende spredning σ i ST1-ST10 for returperioder 2, 5, 10, 20 og 50 år baseret på 20 års simulerede data (1997-2016).

Punkt	ST1	ST2	ST3	ST4	ST5	ST6	ST7	ST8	ST9	ST10
Returperiode [år]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]
2	1.072	1.074	1.067	1.081	1.085	1.085	1.093	1.09	1.098	1.101
5	1.339	1.343	1.336	1.349	1.354	1.354	1.362	1.357	1.367	1.37
10	1.526	1.533	1.53	1.54	1.544	1.545	1.552	1.545	1.556	1.557
20	1.713	1.722	1.725	1.732	1.735	1.735	1.741	1.733	1.743	1.744
50	1.962	1.975	1.988	1.989	1.992	1.991	1.994	1.984	1.992	1.992
Afskæringsniveau	0.8 m	0.8 m	0.8 m	0.8 m	0.8 m	0.8 m	0.8 m	0.8 m	0.8 m	0.8 m
Returperiode [år]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]
2	0.042	0.042	0.043	0.042	0.043	0.043	0.043	0.043	0.043	0.043
5	0.09	0.091	0.093	0.091	0.092	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091
10	0.136	0.137	0.142	0.138	0.138	0.138	0.137	0.136	0.135	0.135
20	0.188	0.19	0.199	0.192	0.192	0.192	0.189	0.188	0.186	0.185
50	0.267	0.271	0.286	0.275	0.273	0.273	0.268	0.266	0.262	0.261

Tabel 4.9 Estimeret ekstrem vandstand VS og tilhørende spredning σ i ST11-ST20 for returperioder 2, 5, 10, 20 og 50 år baseret på 20 års simulerede data (1997-2016).

Punkt	ST11	ST12	ST13	ST14	ST15	ST16	ST17	ST18	ST19	ST20
Returperiode [år]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]
2	1.091	1.104	1.119	1.115	1.115	1.108	1.119	1.119	1.12	1.131
5	1.361	1.373	1.386	1.382	1.386	1.375	1.386	1.384	1.386	1.396
10	1.553	1.562	1.571	1.569	1.576	1.562	1.57	1.567	1.569	1.58
20	1.744	1.749	1.752	1.753	1.764	1.747	1.752	1.747	1.748	1.759
50	2.001	1.999	1.993	1.997	2.015	1.993	1.994	1.986	1.986	1.997
Afskæringsniveau	0.8 m	0.8 m	0.8 m	0.8 m	0.8 m	0.8 m	0.8 m	0.8 m	0.8 m	0.8 m
Returperiode [år]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]
2	0.043	0.044	0.044	0.044	0.044	0.043	0.043	0.043	0.044	0.044
5	0.092	0.092	0.09	0.09	0.092	0.09	0.09	0.089	0.089	0.089
10	0.138	0.136	0.132	0.133	0.136	0.134	0.133	0.131	0.13	0.131
20	0.191	0.187	0.179	0.182	0.187	0.183	0.18	0.177	0.177	0.177
50	0.272	0.263	0.249	0.255	0.262	0.257	0.252	0.246	0.246	0.245

Tabel 4.10 Estimeret ekstrem vandstand VS og tilhørende spredning σ i ST21-ST30 for returperioder 2, 5, 10, 20 og 50 år baseret på 20 års simulerede data (1997-2016).

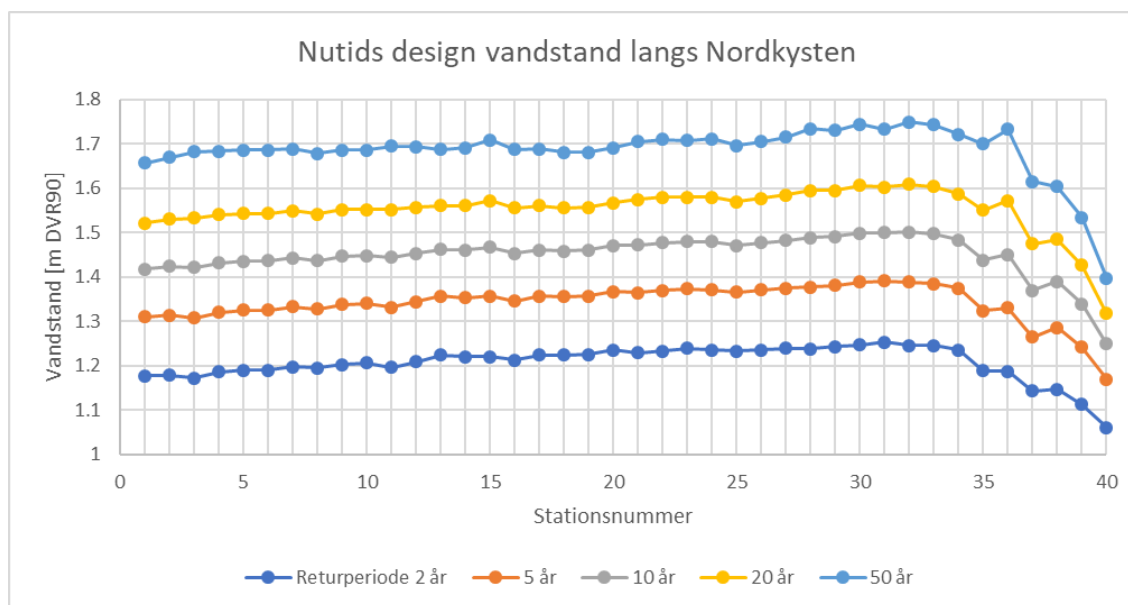
Punkt	ST21	ST22	ST23	ST24	ST25	ST26	ST27	ST28	ST29	ST30
Returperiode [år]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]
2	1.124	1.128	1.134	1.13	1.128	1.131	1.134	1.133	1.138	1.142
5	1.394	1.399	1.402	1.4	1.395	1.4	1.404	1.406	1.41	1.417
10	1.581	1.586	1.588	1.588	1.58	1.586	1.591	1.597	1.6	1.608
20	1.766	1.771	1.771	1.772	1.761	1.769	1.776	1.787	1.787	1.798
50	2.011	2.016	2.013	2.017	2.002	2.011	2.021	2.04	2.036	2.05
Afskæringsniveau	0.8 m	0.8 m	0.8 m	0.8 m	0.8 m	0.8 m	0.8 m	0.8 m	0.8 m	0.8 m
Returperiode [år]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]
2	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.045	0.045	0.045	0.045
5	0.091	0.092	0.09	0.091	0.09	0.091	0.092	0.094	0.092	0.093
10	0.134	0.134	0.132	0.134	0.132	0.133	0.135	0.138	0.135	0.137
20	0.183	0.183	0.179	0.183	0.179	0.18	0.184	0.188	0.184	0.187
50	0.255	0.254	0.248	0.254	0.249	0.25	0.255	0.262	0.256	0.26

Tabel 4.11 Estimeret ekstrem vandstand VS og tilhørende spredning σ i ST31-ST40 for returperioder 2, 5, 10, 20 og 50 år baseret på 20 års simulerede data (1997-2016).

Punkt	ST31	ST32	ST33	ST34	ST35	ST36	ST37	ST38	ST39	ST40
Returperiode [år]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]
2	1.148	1.141	1.14	1.131	1.084	1.082	1.038	1.042	1.008	0.956
5	1.42	1.417	1.414	1.403	1.353	1.359	1.293	1.315	1.271	1.199
10	1.609	1.61	1.606	1.592	1.547	1.56	1.479	1.499	1.448	1.358
20	1.794	1.801	1.796	1.779	1.742	1.764	1.666	1.677	1.618	1.509
50	2.039	2.055	2.049	2.027	2.005	2.039	1.921	1.91	1.84	1.703
Afskæringsniveau	0.8 m	0.8 m	0.8 m	0.8 m	0.8 m	0.8 m	0.8 m	0.8 m	0.8 m	0.8 m
Returperiode [år]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]
2	0.046	0.046	0.045	0.045	0.043	0.044	0.04	0.042	0.04	0.035
5	0.092	0.094	0.093	0.093	0.093	0.096	0.088	0.088	0.083	0.074
10	0.135	0.139	0.137	0.137	0.141	0.146	0.136	0.131	0.125	0.111
20	0.182	0.188	0.187	0.186	0.196	0.205	0.192	0.18	0.174	0.155
50	0.251	0.263	0.261	0.259	0.281	0.295	0.278	0.254	0.247	0.22

Tabel 4.12 Estimeret ekstrem vandstand VS langs Nordkysten på strækningen fra Hundested til Helsingør, baseret på en korrektion af Hornbæk statistikken.
De angivne værdier er nutids estimater (2018).

Korrigerede designvandstande for Nordkysten										
Punkt	ST1	ST2	ST3	ST4	ST5	ST6	ST7	ST8	ST9	ST10
Returperiode [år]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]
2	1.177	1.179	1.172	1.186	1.19	1.19	1.198	1.195	1.203	1.206
5	1.31	1.314	1.307	1.32	1.325	1.325	1.333	1.328	1.338	1.341
10	1.417	1.424	1.421	1.431	1.435	1.436	1.443	1.436	1.447	1.448
20	1.521	1.53	1.533	1.54	1.543	1.543	1.549	1.541	1.551	1.552
50	1.656	1.669	1.682	1.683	1.686	1.685	1.688	1.678	1.686	1.686
Punkt	ST11	ST12	ST13	ST14	ST15	ST16	ST17	ST18	ST19	ST20
Returperiode [år]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]
2	1.196	1.209	1.224	1.22	1.22	1.213	1.224	1.224	1.225	1.236
5	1.332	1.344	1.357	1.353	1.357	1.346	1.357	1.355	1.357	1.367
10	1.444	1.453	1.462	1.46	1.467	1.453	1.461	1.458	1.46	1.471
20	1.552	1.557	1.56	1.561	1.572	1.555	1.56	1.555	1.556	1.567
50	1.695	1.693	1.687	1.691	1.709	1.687	1.688	1.68	1.68	1.691
Punkt	ST21	ST22	ST23	ST24	ST25	ST26	ST27	ST28	ST29	ST30
Returperiode [år]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]
2	1.229	1.233	1.239	1.235	1.233	1.236	1.239	1.238	1.243	1.247
5	1.365	1.37	1.373	1.371	1.366	1.371	1.375	1.377	1.381	1.388
10	1.472	1.477	1.479	1.479	1.471	1.477	1.482	1.488	1.491	1.499
20	1.574	1.579	1.579	1.58	1.569	1.577	1.584	1.595	1.595	1.606
50	1.705	1.71	1.707	1.711	1.696	1.705	1.715	1.734	1.73	1.744
Punkt	ST31	ST32	ST33	ST34	ST35	ST36	ST37	ST38	ST39	ST40
Returperiode [år]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]
2	1.253	1.246	1.245	1.236	1.189	1.187	1.143	1.147	1.113	1.061
5	1.391	1.388	1.385	1.374	1.324	1.33	1.264	1.286	1.242	1.17
10	1.5	1.501	1.497	1.483	1.438	1.451	1.37	1.39	1.339	1.249
20	1.602	1.609	1.604	1.587	1.55	1.572	1.474	1.485	1.426	1.317
50	1.733	1.749	1.743	1.721	1.699	1.733	1.615	1.604	1.534	1.397



Figur 4-18 Designvandstandenes variation langs med Nordkysten på strækningen fra Hundested til Helsingør.

4.4.3 Estimerer for ekstreme bølgehøjder langs med Nordkysten

Der er estimeret signifikante bølgehøjder, som forventes at blive overskredet for hver 2, 5, 10, 20 og 50 år. De analyserede bølgehøjder er udtrykt udenfor brydningszonen. Disse analyser er gennemført ved at tilpasse en sandsynlighedsfordeling til de modellerede bølgehøjder for perioden 1997-2016 (inkl.). Til beskrivelsen er der anvendt en trunke Weibull fordeling, som er en 3-parameter givet ved:

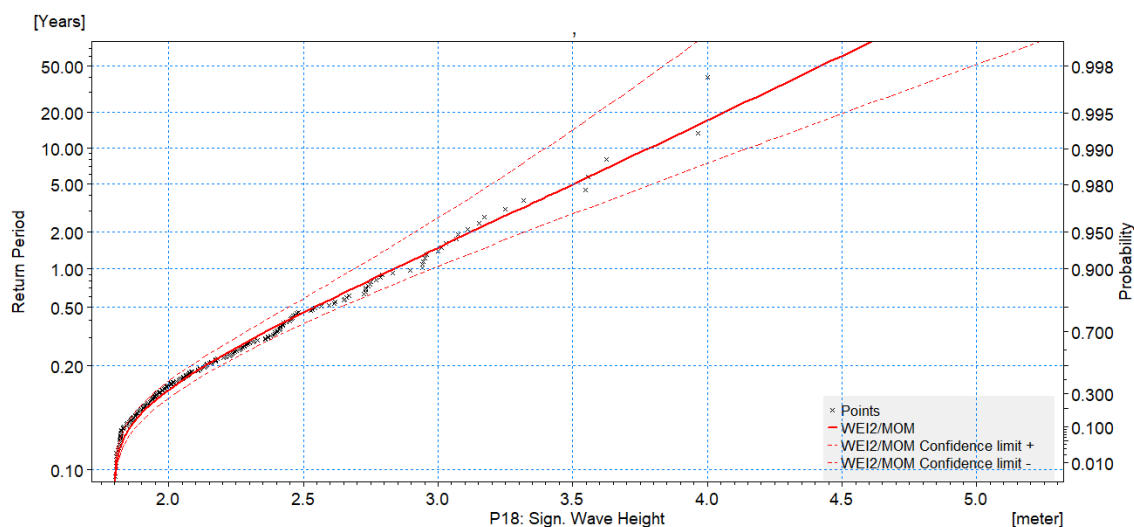
$$P(X < x) = 1 - \frac{1}{P_0} - \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right]$$

Med fordelingsparametre α (formparameter) og β (skalaparameter) og overskridelsessandsynligheden P_0 , ved grænseværdi γ (afskæringsniveau), givet ved:

$$P_0 = \exp\left[-\left(\frac{\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right]$$

Hvor grænseværdien angiver kriteriet i en "peak-over-threshold" analyse. I udvælgelse af hændelserne i peak-over-threshold analysen udvælges maksimumværdien for individuelle hændelser. For at hændelser kan betragtes som individuelle er der anvendt som kriterie, at de som minimum skal være adskilt af en periode på 24 timer. Afskæringsniveauet varierer mellem 1,2-1,8 m i de 40 punkter og observationsperiodens længde er 20 år.

Et eksempel fra ekstremværdianalysen er vist i Figur 4-19 for ST18, som viser de udvalgte hændelser og det estimerede fit. De tilpassede sandsynlighedsfordelinger af ekstrembølgehøjderne for samtlige 40 stationer er indsat i Bilag A.4.



Figur 4-19 Tilpasset sandsynlighedsfordeling til estimering af ekstreme bølgehøjder for ST20. Hændelsernes forekomst er vist ved hjælp af en Hazen fordeling.

Tabel 4.13-Tabel 4.16 angiver estimerede ekstrembølgehøjder samt deres spredning for de 40 definerede punkter fordelt langs med Nordkysten.

Tabel 4.13 Ekstrembølgehøjder H_s og tilhørende spredning σ i ST1-ST10 for returperioder 2, 5, 10, 20 og 50 år.

Punkt	ST1	ST2	ST3	ST4	ST5	ST6	ST7	ST8	ST9	ST10
Returperiode [år]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]
2	2.396	2.544	2.612	2.587	2.618	2.682	2.695	2.744	2.739	2.813
5	2.729	2.899	2.985	2.957	2.994	3.071	3.083	3.147	3.133	3.216
10	2.942	3.126	3.225	3.197	3.236	3.323	3.333	3.408	3.387	3.476
20	3.142	3.339	3.452	3.423	3.466	3.562	3.568	3.655	3.626	3.721
50	3.394	3.609	3.74	3.712	3.758	3.867	3.869	3.97	3.93	4.033
Afskæringsniveau	1.6 m	1.7 m	1.7 m	1.7 m	1.7 m	1.7 m	1.7 m	1.7 m	1.7 m	1.8 m
Returperiode [år]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]
2	0.062	0.066	0.07	0.069	0.07	0.073	0.073	0.076	0.074	0.076
5	0.103	0.11	0.115	0.115	0.115	0.119	0.118	0.123	0.12	0.124
10	0.133	0.143	0.149	0.149	0.149	0.154	0.152	0.158	0.154	0.16
20	0.165	0.177	0.184	0.185	0.184	0.19	0.187	0.194	0.188	0.197
50	0.208	0.224	0.232	0.234	0.233	0.239	0.234	0.243	0.235	0.248

Tabel 4.14 Ekstrembølgehøjder H_s og tilhørende spredning σ i ST11-ST20 for returperioder 2, 5, 10, 20 og 50 år.

Punkt	ST11	ST12	ST13	ST14	ST15	ST16	ST17	ST18	ST19	ST20
Returperiode [år]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]
2	2.807	2.786	2.848	2.869	2.921	2.944	2.964	2.99	3.027	2.963
5	3.212	3.194	3.267	3.292	3.355	3.381	3.417	3.457	3.494	3.418
10	3.474	3.459	3.537	3.566	3.637	3.663	3.712	3.762	3.795	3.713
20	3.721	3.71	3.793	3.825	3.904	3.93	3.992	4.05	4.08	3.992
50	4.036	4.031	4.119	4.155	4.245	4.27	4.351	4.421	4.445	4.349
Afskæringsniveau	1.8 m	1.8 m	1.8 m	1.8 m	1.8 m	1.8 m	1.8 m	1.8 m	1.8 m	1.8 m
Returperiode [år]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]
2	0.076	0.076	0.079	0.079	0.081	0.083	0.085	0.088	0.088	0.085
5	0.124	0.125	0.129	0.129	0.132	0.134	0.139	0.143	0.142	0.139
10	0.161	0.163	0.167	0.167	0.17	0.172	0.179	0.185	0.182	0.179
20	0.199	0.202	0.206	0.206	0.209	0.21	0.22	0.228	0.223	0.22
50	0.251	0.256	0.259	0.26	0.263	0.263	0.277	0.287	0.279	0.277

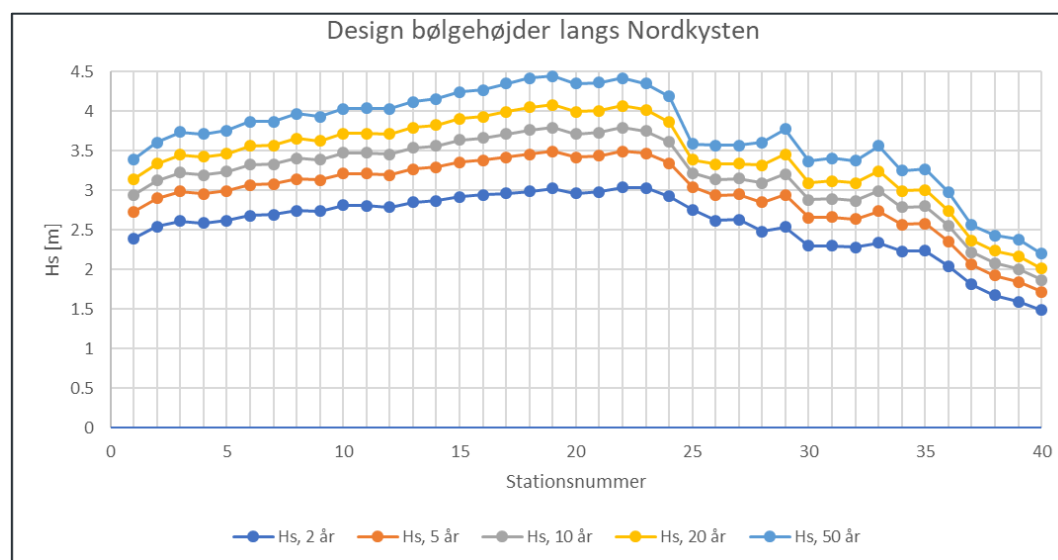
Tabel 4.15 Ekstrembølgehøjder H_s og tilhørende spredning σ i ST21-ST30 for returperioder 2, 5, 10, 20 og 50 år.

Punkt	ST21	ST22	ST23	ST24	ST25	ST26	ST27	ST28	ST29	ST30
Returperiode [år]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]
2	2.983	3.04	3.032	2.923	2.756	2.619	2.632	2.484	2.54	2.303
5	3.437	3.497	3.472	3.343	3.043	2.939	2.95	2.853	2.944	2.654
10	3.73	3.792	3.753	3.612	3.221	3.141	3.151	3.092	3.207	2.881
20	4.007	4.069	4.017	3.865	3.385	3.33	3.337	3.317	3.456	3.096
50	4.361	4.422	4.352	4.186	3.589	3.567	3.572	3.604	3.774	3.37
Afskæringsniveau	1.8 m	1.8 m	1.8 m	1.8 m	1.8 m	1.7 m	1.7 m	1.5 m	1.5 m	1.4 m
Returperiode [år]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]
2	0.086	0.086	0.083	0.08	0.055	0.061	0.06	0.07	0.075	0.066
5	0.139	0.138	0.13	0.128	0.082	0.095	0.094	0.112	0.123	0.107
10	0.178	0.176	0.166	0.163	0.102	0.12	0.118	0.144	0.159	0.138
20	0.219	0.215	0.202	0.2	0.121	0.146	0.142	0.176	0.195	0.17
50	0.274	0.268	0.25	0.249	0.146	0.18	0.175	0.219	0.245	0.213

Tabel 4.16 Ekstrembølgehøjder H_s og tilhørende spredning σ i ST31-ST40 for returperioder 2, 5, 10, 20 og 50 år.

Punkt	ST31	ST32	ST33	ST34	ST35	ST36	ST37	ST38	ST39	ST40
Returperiode [år]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]
2	2.299	2.283	2.339	2.233	2.236	2.043	1.814	1.676	1.595	1.491
5	2.661	2.64	2.735	2.572	2.582	2.356	2.061	1.923	1.842	1.72
10	2.897	2.872	2.995	2.789	2.802	2.556	2.221	2.084	2.009	1.871
20	3.12	3.092	3.243	2.993	3.008	2.743	2.371	2.237	2.172	2.015
50	3.406	3.373	3.561	3.251	3.27	2.981	2.563	2.433	2.385	2.201
Afskæringsniveau	1.4 m	1.4 m	1.4 m	1.4 m	1.4 m	1.3 m	1.3 m	1.2 m	1.2 m	1.2 m
Returperiode [år]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]	σ [m]
2	0.068	0.067	0.073	0.063	0.064	0.058	0.045	0.045	0.043	0.038
5	0.113	0.11	0.123	0.104	0.106	0.096	0.078	0.08	0.083	0.074
10	0.146	0.143	0.161	0.134	0.138	0.126	0.104	0.107	0.117	0.105
20	0.18	0.176	0.2	0.166	0.17	0.155	0.131	0.136	0.153	0.14
50	0.227	0.222	0.255	0.209	0.214	0.196	0.168	0.177	0.206	0.19

Til anskueliggørelse er designbølgenes variation langs med Nordkysten på strækningen fra Hundested til Helsingør tydeliggjort i Figur 4-20 ved hjælp af informationen fra de 40 udtrækspunkter.



Figur 4-20 Designbølgenes variation langs med Nordkysten på strækningen fra Hundested til Helsingør.

Denne skal være blank.

5 Langsgående sandtransport og sedimentbudget

5.1 Baggrund for en opdatering af sedimentbudgettet for Nordkysten

Der er en generel konsensus om at den langsgående sandtransport på Nordkysten er gående fra vest mod øst. Sandtransporten er primært drevet af den bølgeinducerede langsgående kyststrøm. Denne langsgående sandtransport betegnes nogle gange også synonymt "littoraltransport" og "langstransport" eller "langsgående materialevandring".

De første kystanalyser af Nordkysten indeholdende vurderinger af den langsgående transport blev gennemført i 1978 og revideret i 1984 af Hostrup-Schultz & Sørensen og DHI. Transportraterne var vurderet ud fra observerede kystlinjeændringer for tre delperioder (1898-1949, 1949-1967 samt 1967-1983) og var behæftet med stor usikkerhed og store variationer imellem delperioderne. Dog viser analyserne fra dengang entydigt at transporten går fra ingenting nær Kikhavn (Hundested) og er stigende til Gilleleje. Gilleleje havn blokerer store dele af sandtransporten hvilket over tid har medført fremrykning af stranden vest for havnen samt betydelige aflejringer af sand uden for den aktive transportzone. Fra Gilleleje havn til Hornbæk havn er transporten fortsat stigende og reduceres brat ved Hornbæk havn som følge af havnens blokerende virkning. Øst for Hornbæk er transporten fortsat østgående, men relativt stabil hen til Helsingør Nordhavn.

Transportforholdene langs med Nordkysten er sidenhen beskrevet flere gange med reference til studierne fra 1978 og 1984 (se eksempelvis Ref. /3,4,5/, alle er resumeret i Tabel 5.1) og der er derfor over tid oparbejdet en forståelse af at den observerede transport langs med Nordkysten er velforstået. Det er den imidlertid ikke, idet den nuværende forståelse er baseret på kystlinjeændringer for mere end 30 år siden. Den observerede transport er desuden ikke justeret i forhold til nye beskyttelseskonstruktioner som er bygget siden.

Nærværende studie skal give en egentlig opdatering på transportforholdene langs med Nordkysten ved hjælp af numeriske modeller. Beregningerne gennemføres i 21 kystprofiler fordelt langs med kysten, men koncentreret omkring de foreslåede fodringsområder. Revideringen af sedimentbudgettet gennemføres ved først at bruge de numeriske modeller til at beregne transportkapaciteten, altså den transport af sand der finder sted uden hensyn til sandtilgængelighed og kystkonstruktioner. Disse beregninger gennemføres med DHIs numeriske model: Litoral Processes FM. Den faktiske transport vurderes herefter ved at reducere transportkapaciteten langs med de områder hvor målinger af sandlagstykkelser viser at der ikke er sand tilgængeligt samt omkring kystkonstruktioner.

Tabel 5.1 Væsentlige kystanalyser af Sjællands nordkyst.

1978	Kystpleje og Kystsikring på Nordkysten Resultater fra grundlæggende undersøgelse af kysttekniske forhold, vejledninger til kystpleje og kystsikring samt en diskussion af forslag til samordnede kystanlæg, der kan danne baggrund for en langsigtet planlægning for kysten. Væsentlige resultater: • Kystlinjeanalyse for tre perioder (1880-1948, 1948-1967 samt 1967-1983) • 2 forskellige sedimentbudget på baggrund af kystlinjeanalyser • Kortlægning af geologi Rapporten er udarbejdet af Hostrup-Schultz & Sørensen og DHI på vegne af Fællesudvalget for kystpleje og kystsikring af Nordkysten.
1984	Kystpleje og Kystsikring på Nordkysten (rev.)

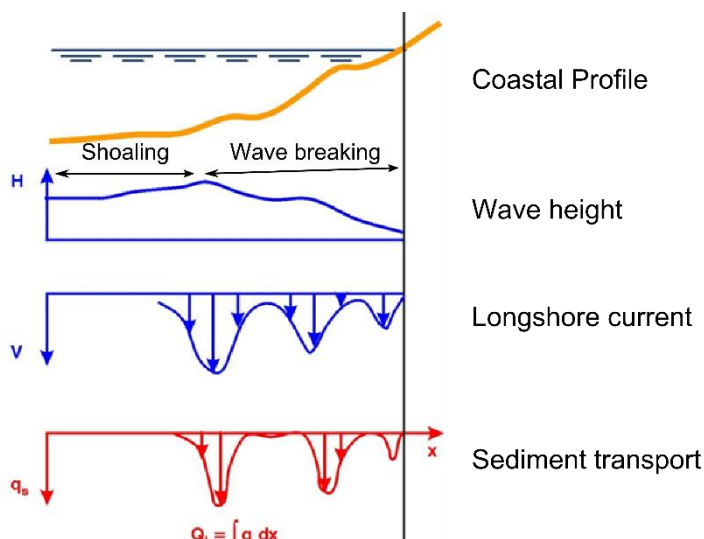
	"Omredigeret og revideret udgave" af 1978 rapporterne som følge af kystudvalgets fortsatte arbejde. Rapporten er udarbejdet af Hostrup-Schultz & Sørensen og DHI på vegne af Fællesudvalget for kystpleje og kystsikring af Nordkysten
1987	Sjællands nordkyst, strandfodringsforsøg Hald strand Afrapportering fra en 23.100 m³ strandfodring ved Hald strand der blev overvåget og opmålt over 4 år. Væsentlige konklusioner: • Fornuftigt at sandfodre med relativt groft sand • Kysten blev beskyttet bedre mod efterårsstorme i forhold til nabostrækningerne • God sammenligning af nyudviklet sandtransport model imod målte bundændringer Rapporten er udarbejdet af Fællesudvalget for kystpleje og kystsikring af Nordkysten.
2013	Genanvendelse af havnesand fra Gilleje og Hornbæk havne Beskrivelse af nuværende oprensningspraksis og en overordnet beskrivelse af kystdynamikken på Nordkysten. Desuden gives der forslag til ændret oprensningspraksis omkring Gilleje havn og Hornbæk havn, hvor oprensningen foretages hvert 4-5 år. Rapporten er udarbejdet af Hasløv & Kjærsgaard i samarbejde med DHI for Gribskov kommune og Helsingør kommune.
2016	Nordkystens Fremtid, Kystteknisk Skitseprojekt Beskrivelse af et samordnet storskala kystbeskyttelsesprojekt med strandfodring som et nødvendigt element. Rapporten er udarbejdet af COWI, NIRAS, DHI samt Hasløv & Kjærsgaard for Gribskov kommune, Halsnæs kommune og Helsingør kommune.

5.2 Modelleret transportkapacitet

5.2.1 Modelbeskrivelse

Den langsgående sandtransport beregnes vha. DHIs kystmodel: Littoral Processes FM (Førhen kendt som LITPACK). Modellen beregner transporten på et givet tidspunkt ved at simulere de hydrodynamiske forhold og sedimenttransporten i detaljer henover kystprofilen: Først beregnes bølgehøjden og –retningen og de drivende kræfter fra bølgebrydningen. Dernæst beregnes fordelingen af strømmen og sedimenttransporten over profilet. Littoraltransporten findes herefter ved at integrere transporten over profilet.

Modelberegningerne antager at bundkonturerne er lige og parallelle. For beregning af kyststrømmen medfører dette at de drivende kræfter fra bølgerne er i ligevægt med bundfriktionen. Modellen indeholder ikke uensformige strømninger på langs af kysten, som eksempelvis opbygning/nedbremsning af den langsgående kyststrøm omkring havne og kystfrespring. Ligeledes indeholder modellen ikke en egentlig beskrivelse af effekten af kystkonstruktioner. Effekten af ovenstående vurderes derfor efterfølgende og beregningerne korrigeres.



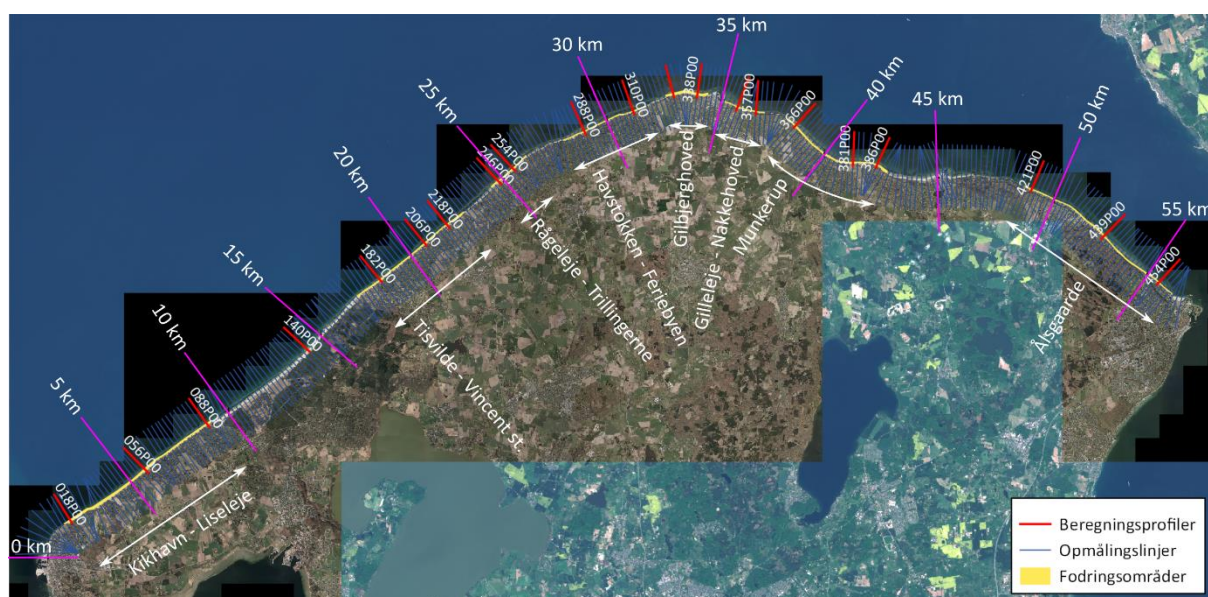
Figur 5-1 Beregningselementer i sandtransportberegningerne.

5.2.2 Grundlag for modelinput

I det følgende beskrives de udvalgte lokaliteter efterfulgt af beskrivelser af data og input, der danner grundlag for bestemmelse af den langsgående transport og raterne for den kroniske erosion i fodringsområderne før og efter fodringen.

5.2.2.1 Beregningspunkter

Den langsgående sandtransport beregnes i 21 kystprofiler fordelt langs med Nordkysten som vist med de røde profiler i Figur 5-2. De 7 fodringsområder som undersøges er desuden indtegnet i figuren (markeret med gult). Det bemærkes at de 21 kystprofiler som sandtransporten beregnes for er koncentreret omkring fodringsområderne.



Figur 5-2 Oversigtsplan for 21 kystprofiler hvorpå langtransporten er beregnet. Fodringsområderne er indtegnet i gult og 5 km mærker for afstanden til Hundested er vist med lilla linjer.

Tabel 5.2 Kystprofiler og bølgeudtrækningspunkter.
Kystnormal en angiver orienteringen af kysten. Normal af -5m konturen er benyttet ved transformation længere ind på kysten.

ID	Profil navn	Bølge ID	Kystnormal (gr. N)	Normal af -5m DVR90 (gr. N)	Afstand til Hundested havn (m)	Fodringsområde
1	018P00	ST1	331	327	2.000	Kikhavn – Liseleje (7.500 m)
2	056P00	ST4	317	315	5.800	
3	088P00	ST6	328	327	9.000	
4	140P00	ST9	315	314	14.200	-
5	182P00	ST12	322	323	18.400	Tisvilde – Vincent st. (5.600 m)
6	206P00	ST14	323	321	20.800	
7	218P00	ST15	327	327	22.000	
8	246P00	ST17	322	325	24.800	Raageleje – Trillingerne (2.000 m)
9	254P00	ST18	318	316	25.600	
10	288P00	ST20	335	338	29.000	Havstokken – Feriebyen (3.600 m)
11	310P00	ST22	342	343	31.200	
12	328P00	ST23	346	352	33.000	Gilbjerg hoved (1.800 m)
13	338P00	ST24	16	4	34.000	
14	353P00	ST26	25	31	35.700	Gilleleje – Nakkehoved (2.000 m)
15	357P00	ST27	8	28	36.500	
16	366P00	ST28	42	40	38.300	Munkerup inkl. forlængelse (4.800 m)
17	381P00	ST29	4	15	41.300	
18	386P00	ST30	27	28	42.300	
19	421P00	ST35	26	24	49.000	Ålsgaarde inkl. forlængelse (7.700 m)
20	439P00	ST38	52	49	52.600	
21	454P00	ST40	45	42	55.600	

5.2.2.2 Kystprofilens form

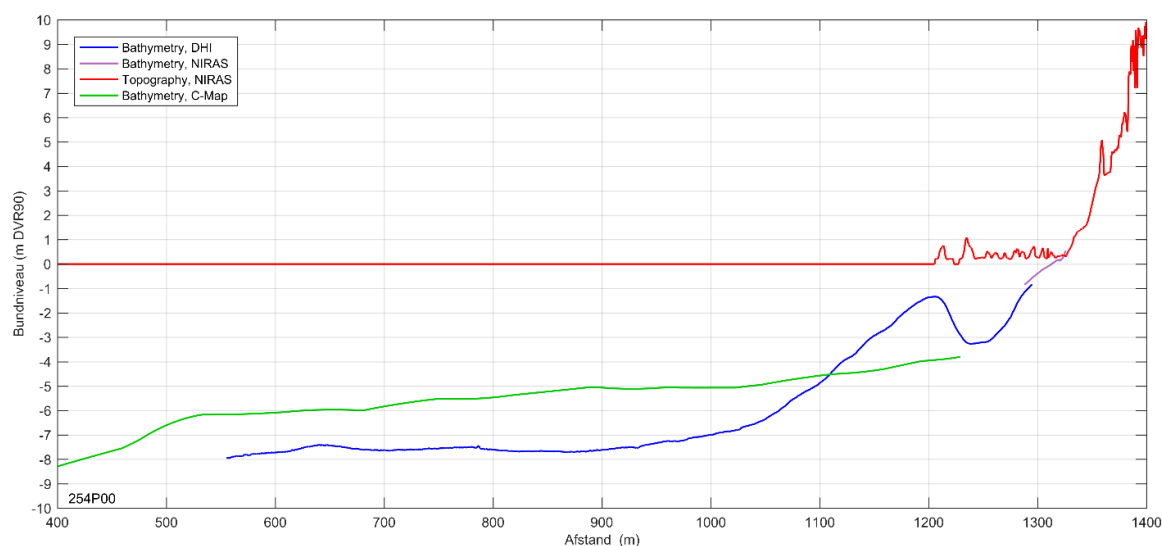
Kystprofilens form er sammensat på baggrund af tre forskellige opmålinger:

- Opmålinger fra båd med ekkolod, DHI, niveauer mellem -8 og -0.8 m DVR90 (Ref. /12/)
- Opmålinger fra RTK-GPS, NIRAS, fra midt på stranden ud til ca. -0.8 m DVR90 (Ref. /10/)
- Opmålinger fra fly med laserskanning, NIRAS, strand og bagland (Ref. /9/)

Figur 5-3 viser et eksempel på de forskellige målinger der er anvendt til fastlæggelse af kystprofilens form. I figuren vises desuden et eksempel på dybder der kan udtrækkes fra digitale søkort (C-MAP) og her ses at nøjagtigheden af digitale søkort ikke er høj i den kystnære zone.

Den røde kurve angiver bundvariationen fra droneopmålingen. Laseropmålingen fra fly kan ikke penetrere vandoverfladen, hvorfor den ude over vand giver indtryk af vandstand og bølger og ikke bundens variation.

Figuren viser endelig at der er god overensstemmelse imellem de tre opmålingssæt, der er anvendt til fastlæggelse af kystprofilens form. Dette er et generelt billede af de 21 kystprofiler anvendt i nærværende studie.



Figur 5-3 Eksempel på de anvendte opmålinger til fastlæggelse af kystprofilens form. Den grønne kurve viser bundvariationen fra digitale søkort og viser med al tydelighed hvorfor detaljerede opmålinger er nødvendige inde i den kystnære zone.

5.2.2.3 Sandkornstørrelsen

Kornstørrelsesfordelingen er opmålt i forbindelse med forundersøgelserne til nærværende projekt. 68 prøver er udtaget i den våde del af kystprofilen af DHI (Ref. /13/) og 28 prøver er udtaget på stranden af NIRAS (Ref. /11/).

Sigteanalyser er gennemført for alle sandprøver til bestemmelse af median kornstørrelse (d_{50}) og den geometriske spredning af sandet, defineret ved: $(d_{84}/d_{16})^{0.5}$.

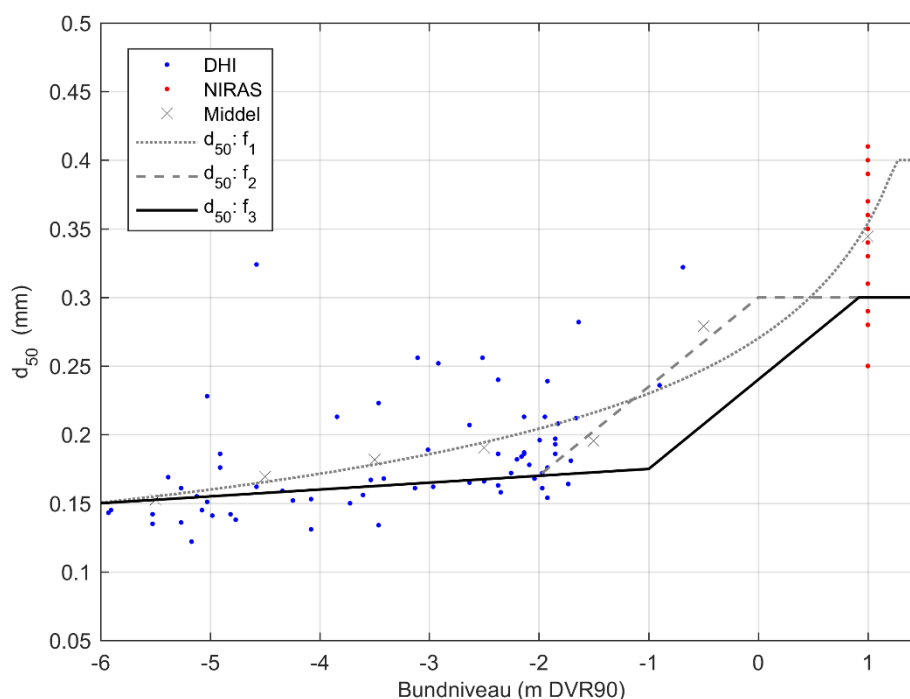
Middelværdien af den geometriske spredning for alle sandprøverne i vandet er fundet til $S_{geo}=1.4$. Denne værdi er benyttet i sandtransportberegningerne.

Median kornstørrelsen varierer normalvis med vanddybden, således at sandet på dybere vand er finere end sand i opskylszonen og på den nederste del af stranden. Denne fordeling skyldes

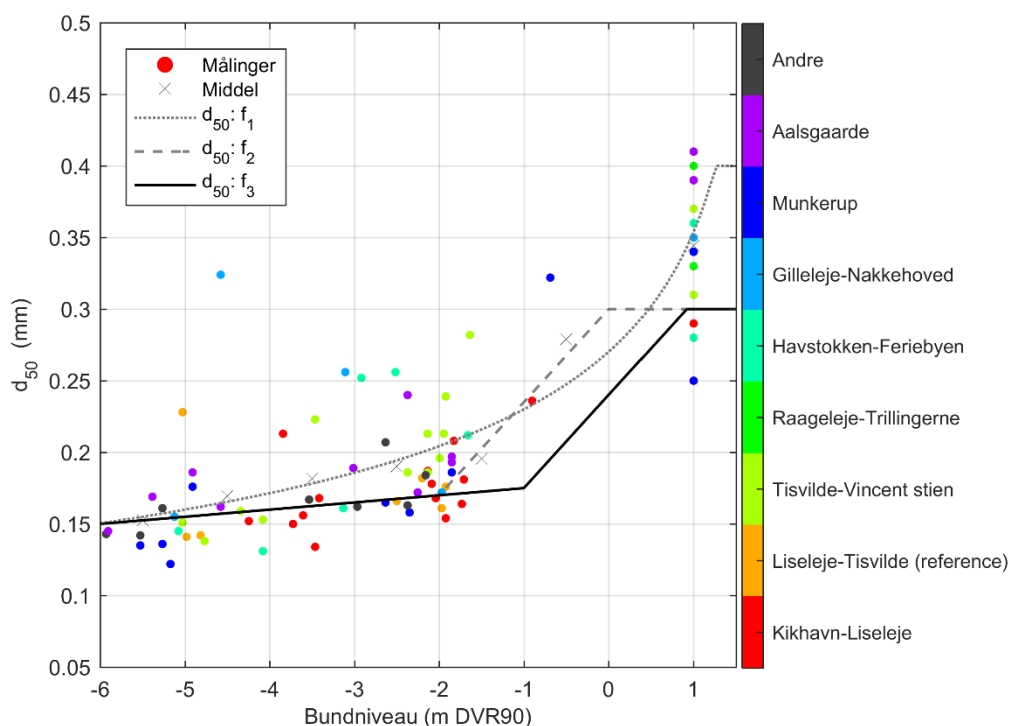
kornsortering fra naturens hånd, hvor finere sand vaskes ud af kystprofilet i den aktive transportzone og i opskylszonen således at kun grovere sandfraktioner er tilbage.

Fordelingen af median kornstørrelsen over vanddybden er vist i Figur 5-4 og Figur 5-5. Figureerne viser at kornstørrelsen typisk er under 0.17 mm for bundniveauet under -2 m DVR90 og at sandet er grovere højere oppe i kystprofilet. Målingerne af sandkornstørrelser på stranden indeholder ikke nogen information om hvilket niveau de er taget i. Disse prøver er derfor blot vist som værende placeret på +1 m DVR90. Middelværdierne for målte kornstørrelser inden for lodrette bånd af 1 m er vist med de sorte krydser. fx er middelværdien af de målte median kornstørrelser på mellem -6 m og -5 m DVR90 fundet til 0.15 mm.

Til brug for sandtransportberegningerne er følsomheden over for tre forskellige kornstørrelsesfordelinger testet. Mindre forskelle noteredes og efter sammenholdning af kornstørrelsesfordelinger og inspektion af satellitbilleder vurderedes det at den tredje fordeling ($d_{50}: f_3$) repræsenterer forholdene ved Nordkysten bedst til fastlæggelse af det overordnede sandbudget.



Figur 5-4 Kornstørrelsesfordeling over dybden.
De stiplede kurver angiver to forskellige tilnærmelser som er anvendt i studiet.
Middelværdierne (x) er baseret målinger inden for bånd af 1 m dybde.

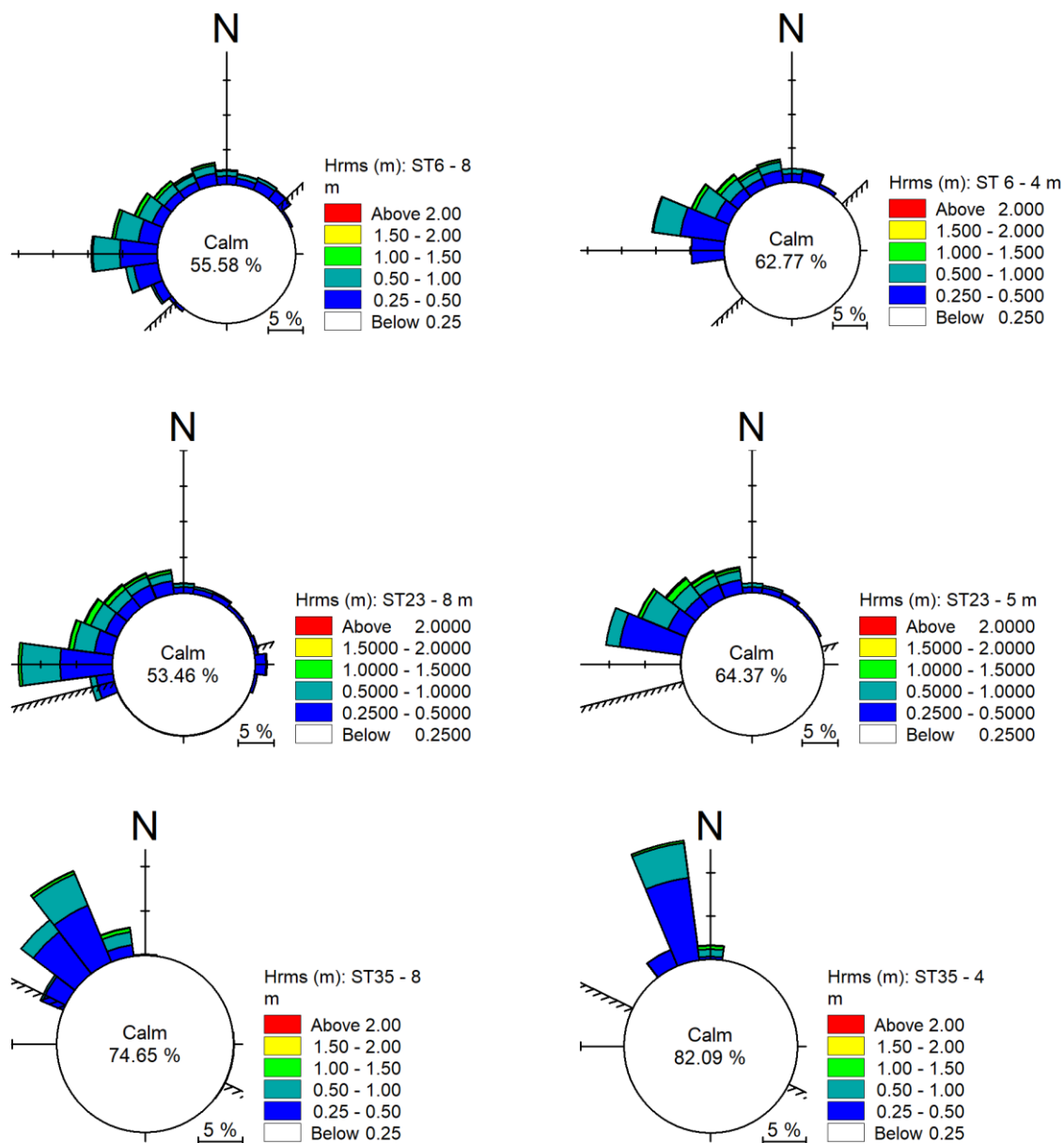


Figur 5-5 Kornstørrelsesfordeling over dybden inklusiv lokaliteter. Målingernes placering på langs af kysten er angivet med farveskalaen.

5.2.2.4 Meteomarine forhold

Tidsserier af vandstande og kystnære bølger påsættes på søværts ende af kystprofilen. Tidsserierne er udtrukket fra modelarbejdet beskrevet i afsnit 4 i 21 punkter på en vanddybde på ca. 8 m. Tabel 5.2 sammenkobler de kystnære udtrækningspunkter med kystprofilerne.

Undervejs blev det vurderet nødvendigt at transformere de kystnære bølger længere ind fra ca. 8 m vanddybde til en såkaldt aktiv dybde, der er grænsen for hvor langt ud i profilet at den litorale transport påvirker bunden. Ved transformationen ind til aktiv dybde er benyttet Snel's lov som antager at bølgerne refrakterer og opgrunder (på engelsk: shoaling) som følge af lige og parallelle bundkonturer. Tabel 5.2 angiver orienteringen af dybdekonturen brugt ved anvendelse af Snels lov. Orienteringen er baseret på den opmålte orientering af -5 m DVR90 konturen.



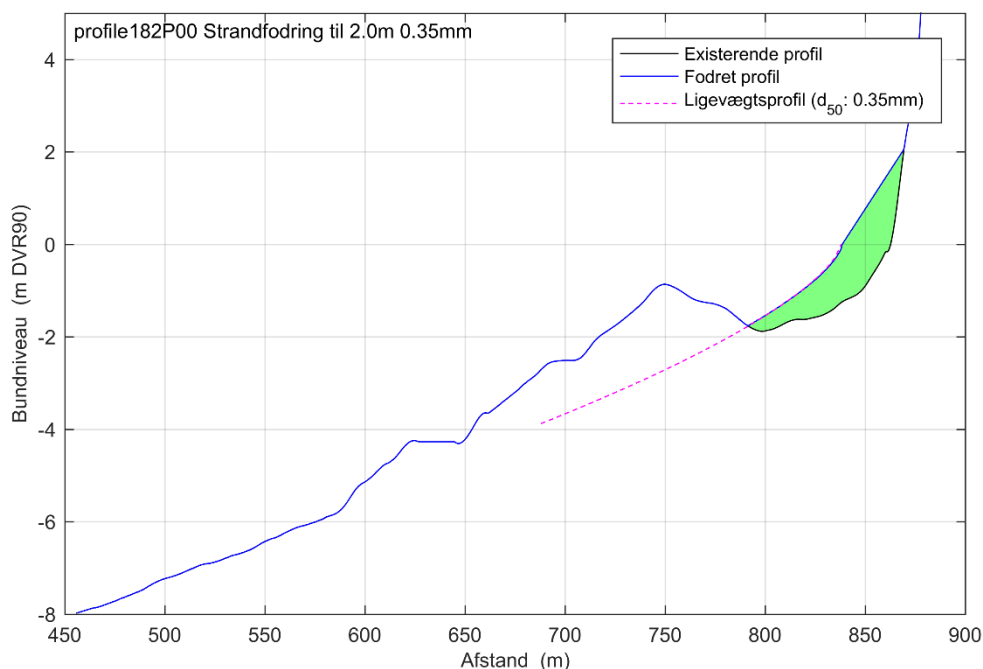
Figur 5-6 Eksempel på bølgeroser udtrukket på en vanddybde på 8 m samt bølgeroser (højre), hvor bølgerne er transformeret yderligere ind til mellem 4 m og 5 m vha. Snells lov.

5.2.2.5 Fodrede profiler

Effekten af at sandfodre på den langsgående sandtransport vurderes ved at ændre formen på kystprofil svarende til følgende parametre:

- Kysten fremrykkes således at man opnår en topkote på bagstranden på mindst 2.0 m DVR90
- Bagstranden vurderes at have en hældning på 1/15
- Kystprofil under vand fastlægges som et såkaldt Ligevægtsprofil svarende til en median kornstørrelse på 0.35 mm.

Figur 5-7 sammenligner det eksisterende kystprofil (i sort) med et fodret kystprofil (i blå). Det grønne område angiver fodringssand og den stiplede kurve viser formen på ligevægtsprofil.



Figur 5-7 Eksempel på et fodret kystprofil.

Udover at formen på kystprofilet ændres, ændres desuden median kornstørrelsen i visse dele af kystprofilet, idet der fodres med relativt groft sand i forhold til det sand, der ligger på kysten i forvejen. Kornstørrelsen ændres til 0.35 mm i det fodrede område samt ud til ca. -2 m DVR90. Baggrunden for at antage at det fodrede sand når ud til ca. -2 m DVR90 skyldes at kystprocesser vil naturligt flytte rundt på sandet således at der nødvendigvis må dannes en tynd film af det fodrede sand i kystprofilet (også længere søværts end hvor den oprindelige fodring når ud til).

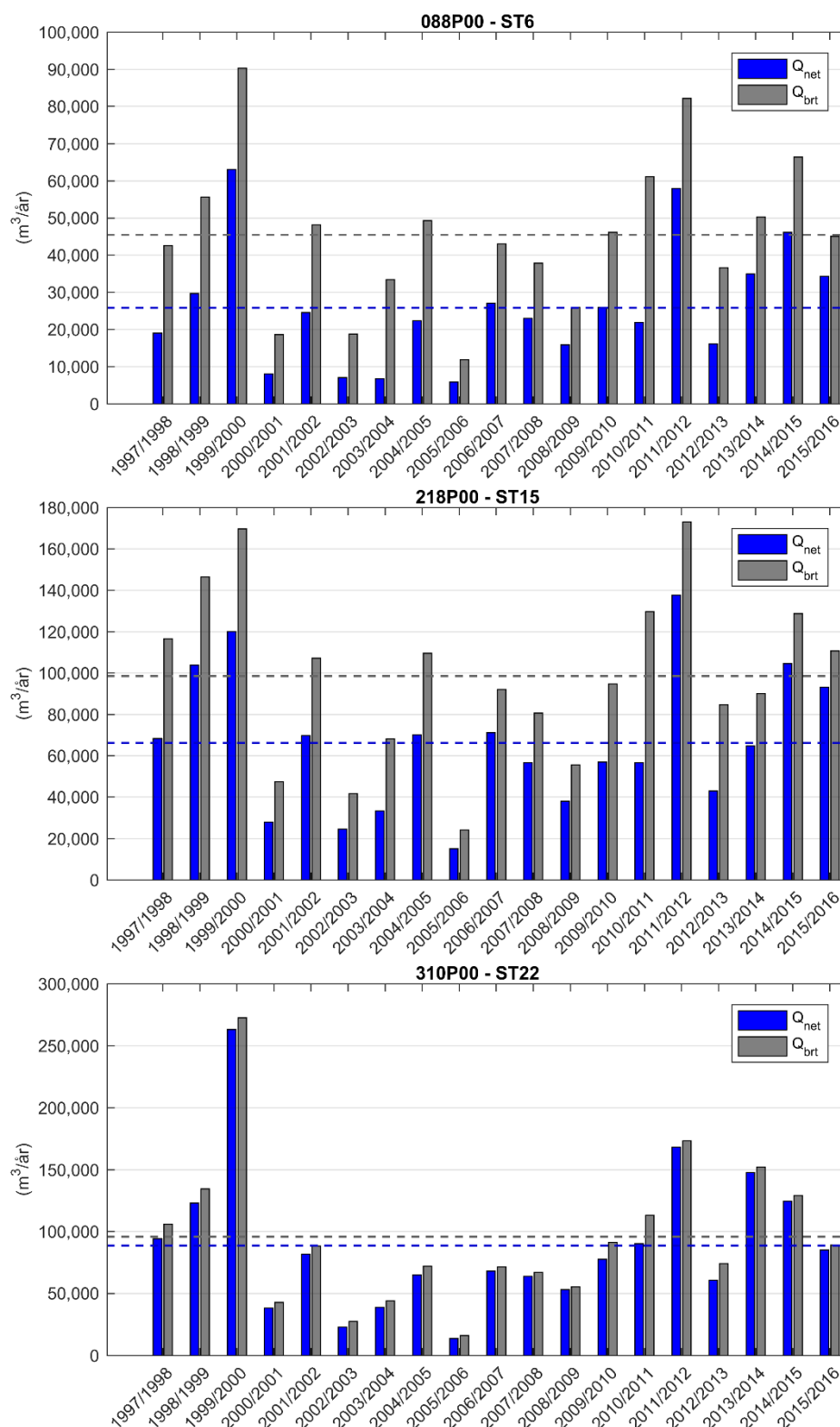
Dog er det vurderet at i profiler, hvor en større revle afbryder det fodrede sand (eksempelvis i Figur 5-7) vil det fodrede sand ikke nå længere ud end til foden af fodringen.

5.2.3 Modelleret langsgående transport kapacitet

5.2.3.1 År-til-år variationer i langstransporten

Naturlige variationer i vejrforhold og tilstedeværelsen af storme nogle år og år med særligt stille vejr påvirker den langsgående sandtransport. Figur 5-8 og Figur 5-9 viser år-til-år variationer i den langsgående sand transport for tre profiler placeret vest for Gilleleje Havn hhv. to profiler placeret øst for Gilleleje Havn. Transportraterne er beregnet for et såkaldt hydrologisk år, dvs. fra juli i et år til juni i det følgende år. Figurerne viser både år-til-år variationen i netto- og bruttotransporten.

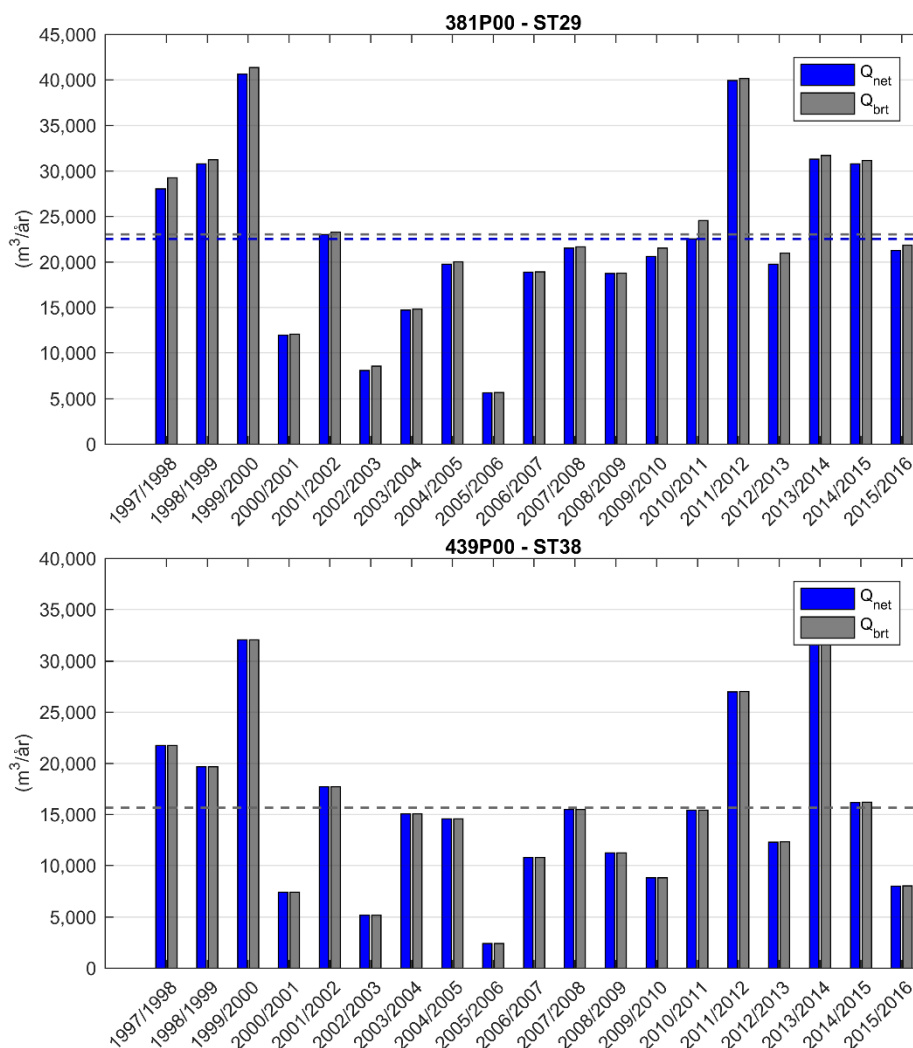
For de vestligste kystprofiler gælder der, at den vestgående sandtransport er markant, men mindre end den østgående sandtransport, hvilket medfører at nettotransporten er positiv (mod øst) og at bruttotransporten (altid positiv) er betydelig større. For kystprofilerne længere østpå bliver den vestgående transport forsvindende lille. Netto- og bruttotransporterne vil derfor være af samme størrelsesorden.



Figur 5-8 År-til-år variationer i littoraltransport for tre udvalgte profiler, placeret vest for Gilleje Havn.

Figurene viser entydigt at der i årene 2000 – 2010 har været flere år med relativt stille vejr (Bruttotransporten er mindre end middelværdien), mens årene efter 2010 generelt har haft transportrater over middel.

For fire ud af de fem viste kystprofiler er juli 1999 – juni 2000 det år med de største transporttrater efterfulgt af perioden juli 2011 – juni 2012.

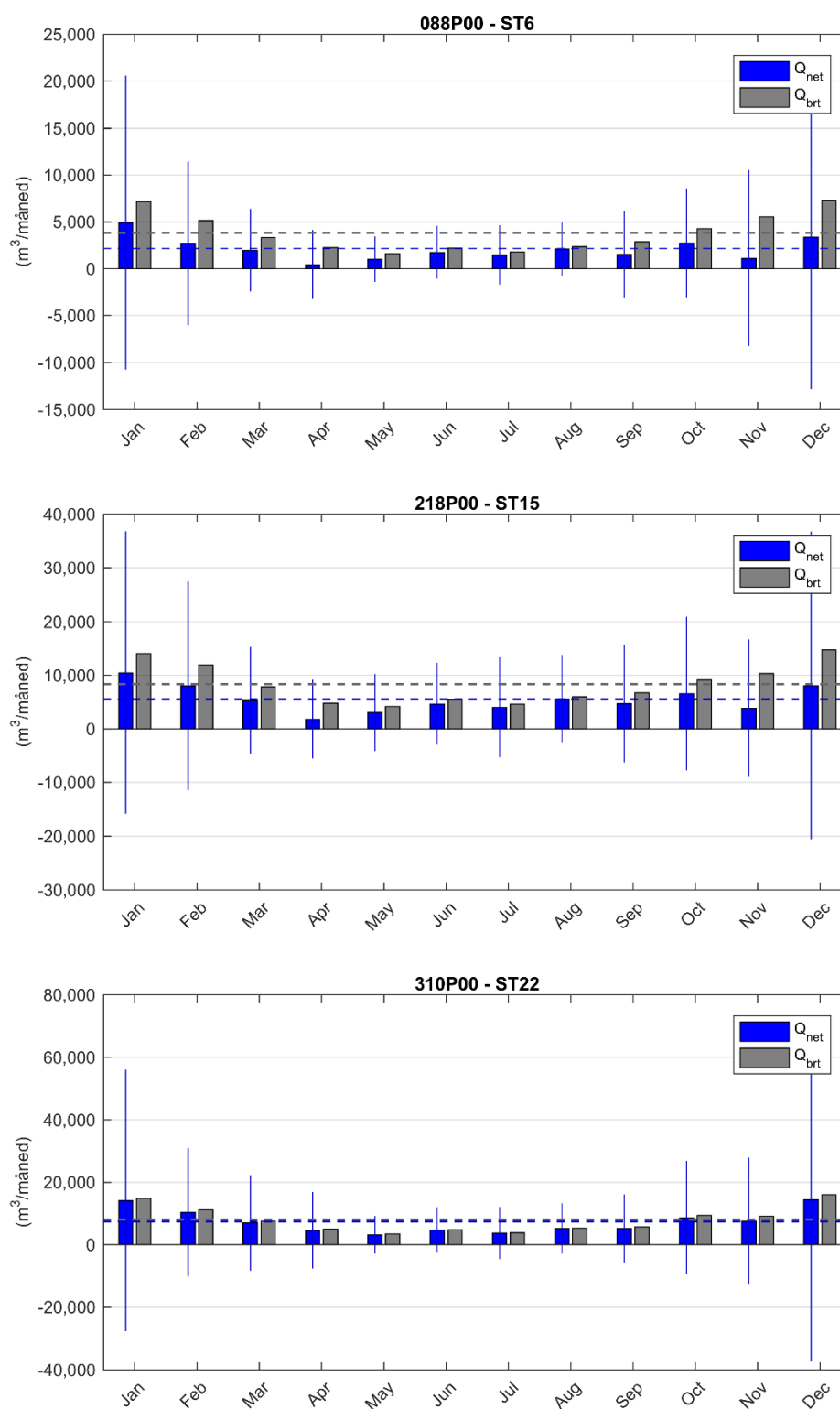


Figur 5-9 År-til-år variationer i littoraltransport for to udvalgte profiler, placeret øst for Gilleleje Havn.

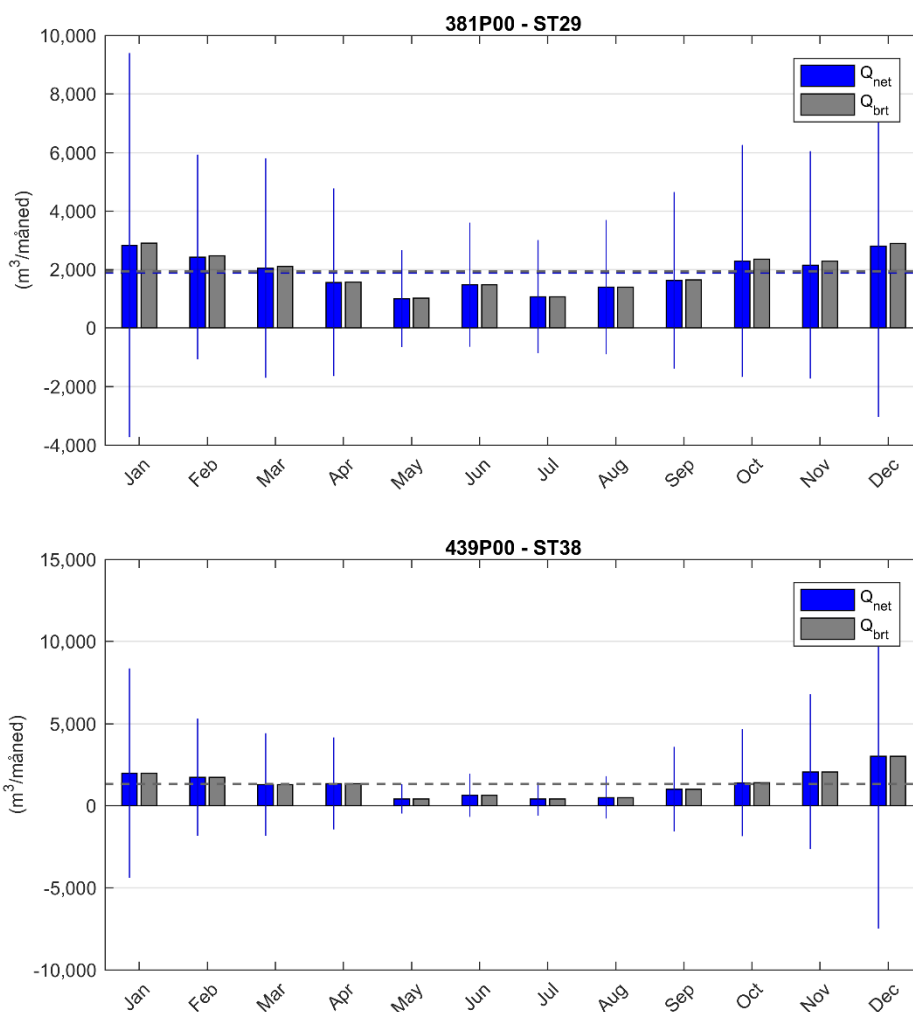
5.2.3.2 Sæsonvariationer i transporten

Sæsonvariationen af den langsgående sandtransport (Netto og brutto) er vist for fem udvalgte kystprofiler i Figur 5-10 og Figur 5-11. Søjlediagrammet i figurene viser middelværdier af den månedlige sandtransport beregnet over 20 år og de lodrette blå kurver viser spredningen af de månedlige værdier omkring månedsmidlet. Spredningen er her defineret som $\pm 2\sigma$, σ er standarddeviationen af 20 års månedsværdier. Middeltransporten for alle måneder og alle år er vist med de vandrette stiplede kurver.

Figurene viser en tydelig variation i netto- og bruttotransport over sæsonen med de største transporttrater og de største variationer i transporttrater forekommende i efterårs- og vintermånederne.



Figur 5-10 Sæsonvariation i langstransporten for tre udvalgte profiler placeret vest for Gilleleje Havn.



Figur 5-11 Sæsonvariation i langstransporten for to udvalgte profiler, placeret øst for Gilleleje Havn.

5.3 Reduktion i transport

De beregnede transportrater svarer til potentielle rater for bølgedrevne langsgående strømme over fuldt sanddækkede profiler. I det følgende korrigeres disse rater idet der tages hensyn til at profilet ikke alle steder er fuldt dækket med sand, og at der udenfor brydningszonen foregår langsgående transport pga. effekten af kontraherende regionale strømme langs kysten mod Helsingør.

5.3.1 Metodebeskrivelse

Metoder benyttet til at korrigere de potentielle rater beskrives i det følgende.

5.3.1.1 Reduktion som følge af kystkonstruktioner

Reduktion ved vurdering af blokering af den langsgående transport i profilet suppleret med vurderinger af bypass-evnen med støtte fra empiriske relationer i Ref. /7,8/.

5.3.1.2 Reduktion som følge af sandtilgængelighed

Den aktuelle transport antages at være nul i områder med vegetation. I områder med sten (særligt i opskylszonen) reduceres transporten med en faktor der afhænger af visuel bedømmelse af tætheden af stenlaget.

5.3.1.3 Bidrag til langstransporten fra regionale kyststrømme

De beregnede transportrater vest for Helsingør er forholdsvis små og det er derfor af interesse, at analysere transportforholdene på denne kyststrækning.

I kystanalysen i Ref. /2/ beskrives en analyse af den langsgående kysttransport vest for Helsingør ud fra tilsandingen vest for Helsingør Nordhavn. Resultatet er at transporten må forventes at være lille, af en størrelsesorden $1.000 \text{ m}^3/\text{år}$.

Ref. /2/ analyserede også forholdene på Lappegrunden, som er beliggende omkring tre kilometer nordvest for Helsingør ud for Hotel Marienlyst. Ud fra den observerede vandring af sandbølger blev sandtransporten over Lappegrunden beregnet til $22.000 \text{ m}^3/\text{år}$ gående mod øst.

På luftfotos kan der ses kystnære bundformer uden for transportzonen for den langsgående bølgedrevne transport, som kun er fundet at have en bredde på 30-40 m. Eksempler vest for Helsingør er vist på Figur 5-12. Bundformerne ses at bevæge sig mod øst. Vandringshastigheden er omkring $30 \text{ m}/\text{år}$.

Bundformerne gennemskæres af pejlelinjer i opmålingen udført i efterår og vinter 2017, Figur 5-13. Ud fra de målte kystprofiler, Figur 5-14, skønnes højden af bundformerne at være 1-2 meter. Bundformerne kan observeres ud til en afstand på omkring 300 m fra kysten. Ud fra disse værdier findes en transportrate på

$$Q_{s, \text{strøm}} = 30 \text{ m}/\text{år} \cdot 1,5 \text{ m} \cdot 300 \text{ m} = 13500 \text{ m}^3/\text{år}$$

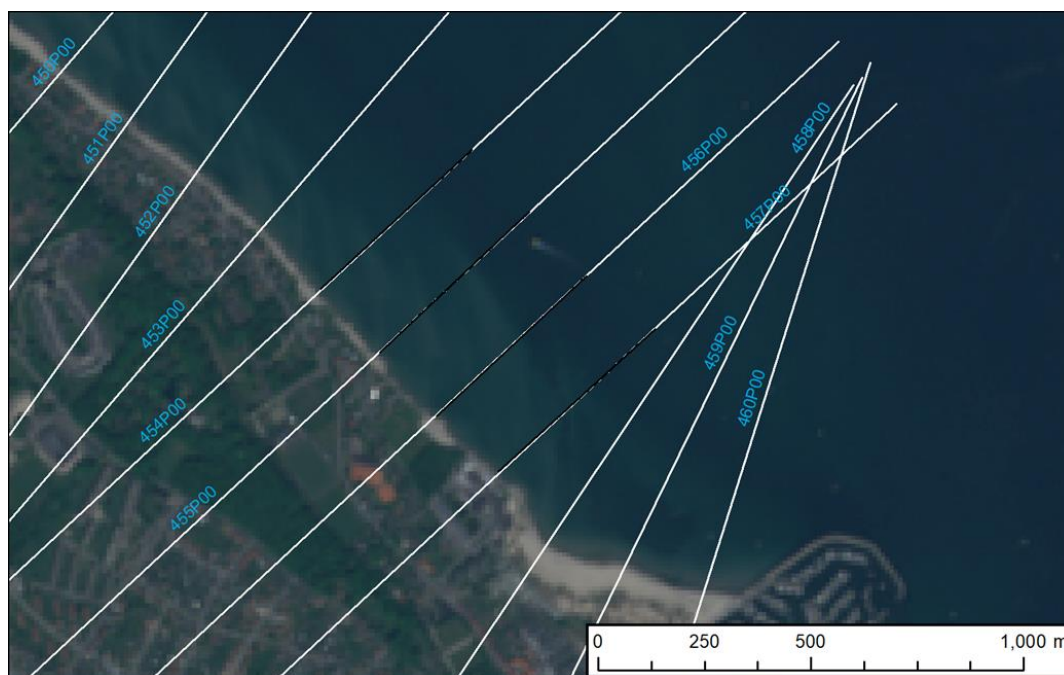
Forholdene med strømgenererede bundformer fortsætter omkring 5 km længere mod vest til Ålsgårde.

Det ses således, at den kystnære strøm driver en sandtransport af størrelsesorden $10.000 \text{ m}^3/\text{år}$. Det er imidlertid sandsynligt at denne transport ikke kun forløber parallelt med kysten, men også har en komponent væk fra kysten, som fører sand fra transporten i brydningszonen og ud på større dybder, hvor strømmen er kraftigere og fører sandet videre.

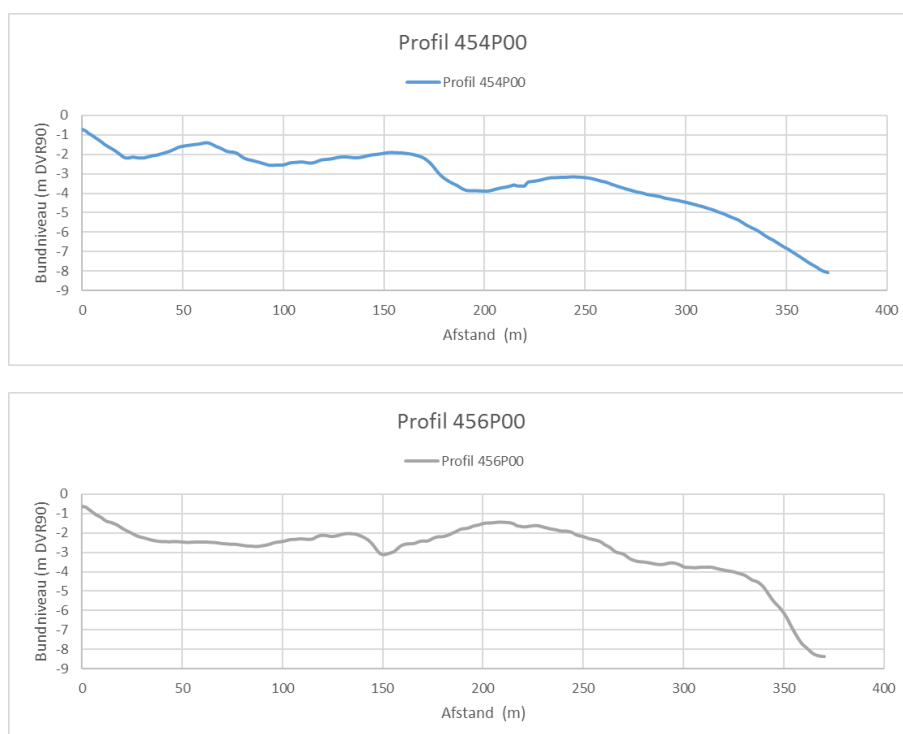
Ud fra disse resultater kan det konkluderes, at selv om den langsgående transport er få tusind kubikmeter per år tæt på Helsingør er der en betydelig strømdreven østgående transport af sand uden for brydningszonen. Den samlede transport kan skønnes til at være af en størrelse på $10.000 - 25.000 \text{ m}^3/\text{år}$.



Figur 5-12 Kystnære bundformer vest for Helsingør.
Øverst: 2012, midt: 2014. Nederst: 2016. Fra Arealinfo, Miljøportalen.



Figur 5-13 Pejlelinjer vest for Helsingør.



Figur 5-14 Eksempler på kystprofiler, der skærer bundformerne. Deres placering ses på Figur 5-13.

5.3.1.4 Passage af sand forbi Gilleleje Havn og Hornbæk Havn

Af de fire havne på Nordkysten (Hundested, Gilleleje, Hornbæk og Helsingør) har Gilleleje og Hornbæk direkte indflydelse på sandtransporten og kystens erosionsforhold.

Havnene blev etableret som egentlige havne i slutningen af 1800-tallet. Siden er de i blevet udbygget gennem adskillige etaper, som i høj grad har været begrundet i deres samspil med sandtransporten og kystudviklingen. Havnene har delvist blokeret for langstransporten, hvilket har forårsaget fremrykning af kysten vest for havnen og erosion mod øst. Fremrykningen har gradvist givet forøget bypass af sand, reduceret den naturlige besejlingsdybde og krævet mere oprensning omkring indsejlingen. Udvidelsen er så blandt andet udført for at fremrykke indsejlingen til større vanddybder, hvilket igen har skabt reduceret bypass, fremrykning mod vest og erosion mod øst.

De seneste omfattende analyser af havnenes samspil med kysterne er udført i Ref. /15/ fra 2013, som er anvendt i det følgende.

Gilleleje Havn

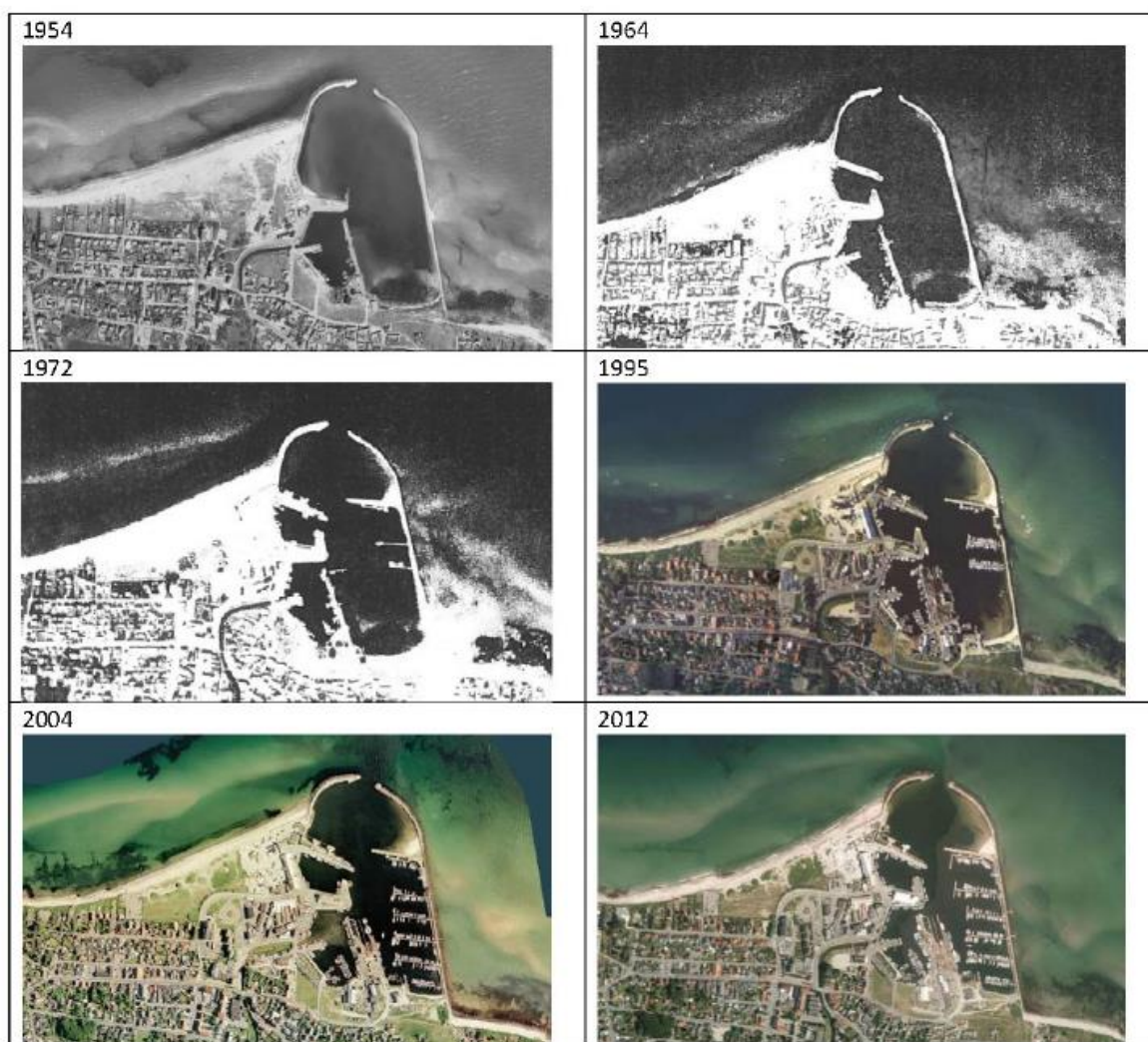
Havnen i Gilleleje blev etableret ved en eksisterende landingsplads i 1870-80. Havnen er vist på søkort i Figur 5-15 og dens udvikling ses på Figur 5-16 og Figur 5-17. Fremrykningen af kysten mod vest og erosionen øst for havnen er åbenbar. Revlesystemet omkring havnen kan også ses med revlen, der fører sand hen mod sejlløbet fra vest.



Figur 5-15 Søkort med Gilleleje Havn.



Figur 5-16 Den Historiske kystudvikling omkring Gilleleje Havn.
Målebordsblade fra 1898 og 1915-30 samt flyfoto ca. 2012, Ref. /15/.



Figur 5-17 Gilleleje Havns udvikling 1954-2012, www.Kortal.dk, Ref. /15/.

I Ref. /15/ er havnes betydning for sand transporten opgjort ved at betragte de forskellige bidrag:

- Der aflejres sand på stranden vest for havnen, som stadig er under opbygning
- Der er foregået en afgravning af materiale på veststranden, som er nyttiggjort
- Der oprenses sand i sejløbet og yderhavnen, som klappes kystnært
- En mindre oprensningsmængde fra lystbådehavnen og østlige del af yderhavnen klappes på godkendt klapplads
- En del aflejres i et større aflejningsområde øst for havnen og en del transporteres videre langs kysten øst for havnen

Samlet er det skønnet at **cirka 40.000 kubikmeter årligt passerer havnen** i form af naturlig bypass og kystnær klapping, og føres videre som langstransport langs kysten øst for havnen.

I Ref. /15/ blev det foreslået, at tilsandingsproblemerne ved Gilleleje kunne løses for en årrække ved at foretage en massiv engangsoprensning på 200.000 kubikmeter omkring havnen og anvende det indvundne sand til kystfodring. Aflejringen vil så foregå i det etablerede reservoir uden at mindske havnens besejlingsdybde. Der er dog ikke foretaget undersøgelser af de miljømæssige konsekvenser af projektet, og der er ikke gået videre med det.

Hornbæk Havn

Hornbæk Havn blev opført i 1881, og det daværende anlæg er i dag den mindre inderhavn. Udviklingen omkring havnen er illustreret på Figur 5-18 og Figur 5-19. Det ses, hvorledes kysten er rykket frem vest for havnen, hvorfor man har opført stadigt længere 'sandfangere' og til sidst en egentlig yderhavn med to dækværker, så sandet i nogen grad kan føres forbi uden at aflejres bag 'sandfangeren'.



Figur 5-18 Den historiske kystudvikling omkring Hornbæk Havn.
Målebords blade fra 1898 og 1915-30 samt flyfoto ca. 2012, Ref. /15/.

De forskellige hovedbidrag i sandbudgettet omkring havnen er beskrevet i Ref. /15/:

- Der aflejres stadig betydelige sandmængder vest for havnen, hvor sandet blæser ind i land og danner høje klitter
- Der afgraves en betydelig del af det aflejrede sand på veststranden, som dels er blevet nyttiggjort og dels er klappet kystnært for her at indgå i langtransporten
- Der aflejres sand i indsejlingen, som oprenses og klappes kystnært
- Sandet, som passerer havnen, aflejres i læområdet øst for denne og har svært ved at komme ind til kysten og indgå i langtransporten, en del af dette er oprenset og klappet kystnært

Samlet er det skønnet, at **omkring 25.000 kubikmeter årligt er ført videre** og indgår i langtransporten øst for havnen.



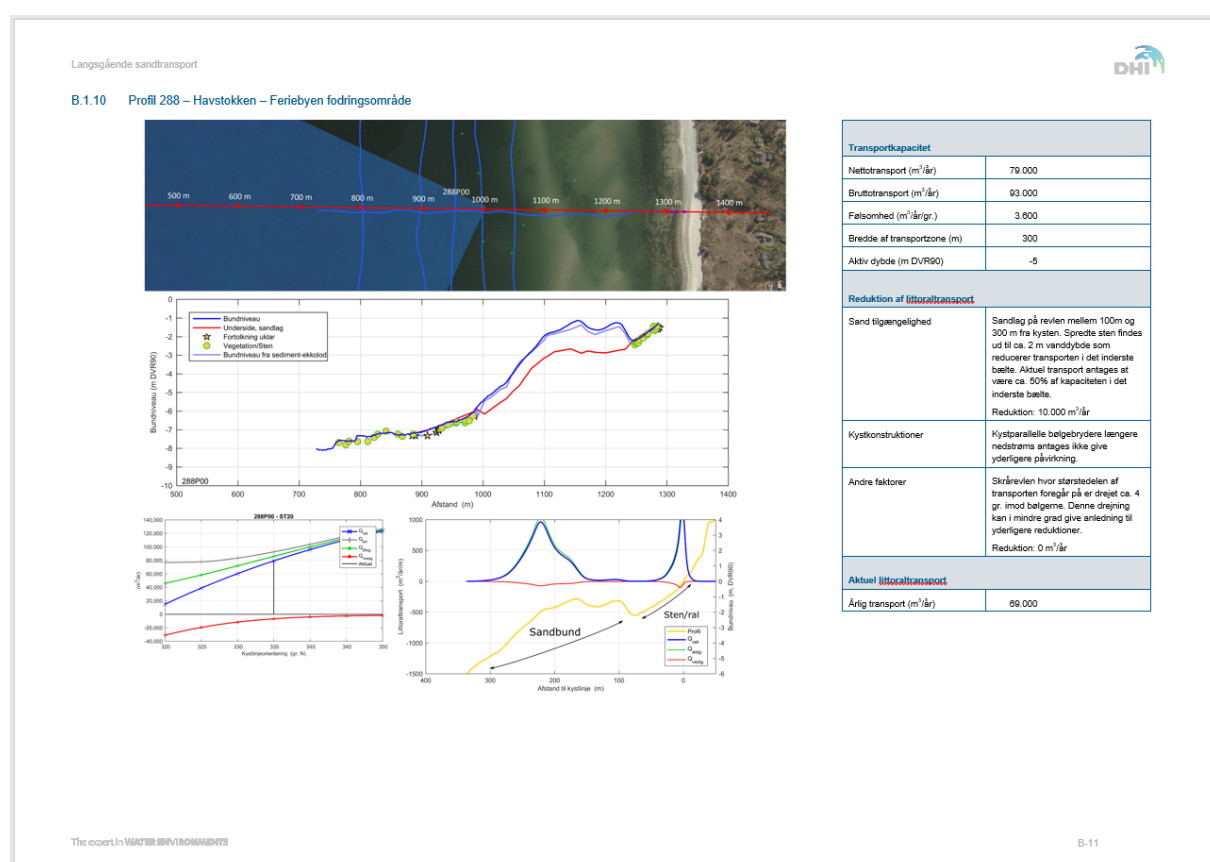
Figur 5-19 Hornbæks Havns udvikling fra 1967 til 2006, historiske kort og Google Earth, Ref. /15/.

I lighed med Gilleleje Havn er det i Ref. /15/ forslået, at tilsandingsproblemet ved Hornbæk Havn kan løses for en årrække ved at etablere et sedimentationsreservoir ved en større enkelttoprensning på omkring 100.000 kubikmeter.

5.3.2 Resultater

Transportfordelinger samt vurderinger af reduktionsfaktorer er angivet for hvert af de 21 kystprofiler i Bilag B.1 og B.2. Figur 5-20 viser et eksempel på hvordan de indsamlede oplysninger i forprojektet sammenholdes for profil 288P00. For hvert profil sammenholdes den indsamlede information om sandlagstykkelser fra satellitfotos (Foråret 2017 fra Geodata Styrelsen) samt fra målinger af sandlagstykkelser. På baggrund heraf, vurderes omfanget af tilgængeligt sand (vist med pile og tekst i figuren nederst til højre) og effekten af sandtilgængelighed vurderes. For de profiler, hvor der er konstruktioner på stranden og i vandet gives desuden en vurdering af effekten fra disse på transporten.

Figureerne med satellitbilledet, fordelingen af sandlagstykkelser samt tværfordelingen af langtransporten er desuden skaleret og forskudt så samhørende punkter kan genfindes ved lodret forskydning af billederne.



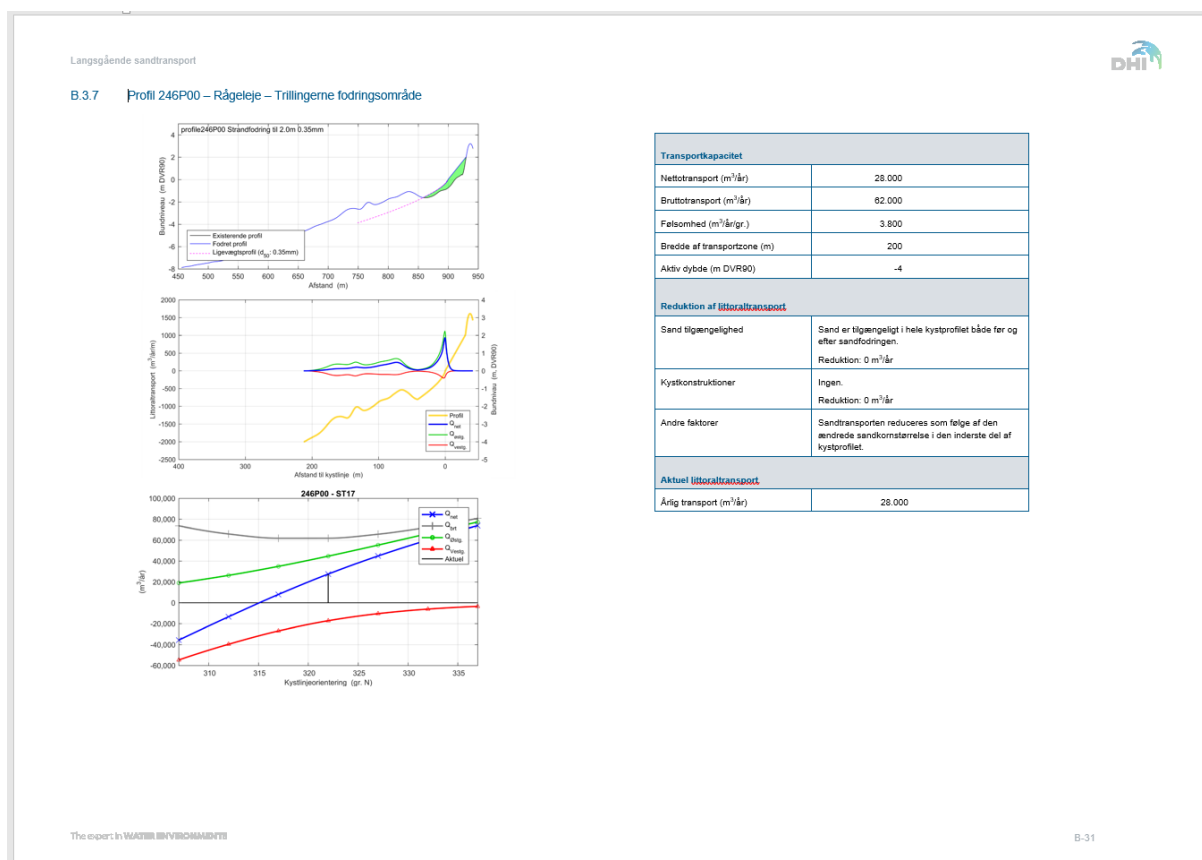
Figur 5-20 Eksempel på samlet information om hvert kystprofil, der analyseres i Bilag B.1 og B.2.

Tabellen th. (i Figur 5-20) angiver nøgletal for transportkapaciteten og beskriver de reduktioner som følge af sandtilgængelighed og konstruktioner og andre faktorer der er medtaget i vurderingen. Værdier for bredde af transportzonen og aktiv dybde er vurderet ud fra tværfordeling af langtransporten som vises i venstre side for hvert af kystprofilerne.

Den aktuelle langsgående sandtransport angives til sidst i tabellen.

Effekten af strandfodring på langtransporten vurderes i Bilag B.3 og B.4. Analysen præsenteres for hvert kystprofil som vist i Figur 5-21. Øverst tv. sammenlignes det eksisterende kystprofil med det fodrede kystprofil og fodringssandet er farvelagt med grøn. Midterst tv. vises tværfordelingen af langtransporten (kapacitet) og nederst tv. vises følsomheden af langtransporten til en ændring i kystorientering (kapacitet).

Den vandrette afstandsskala i de to øverste figurer (i Figur 5-21) er forskudt og i forskellig skalaforhold.



Figur 5-21 Eksempel på vurdering af langstransporten efter strandfodring. Analysen gentages for hvert af de fodrede kystprofiler og præsenteres i Bilag B.3 og B.4.

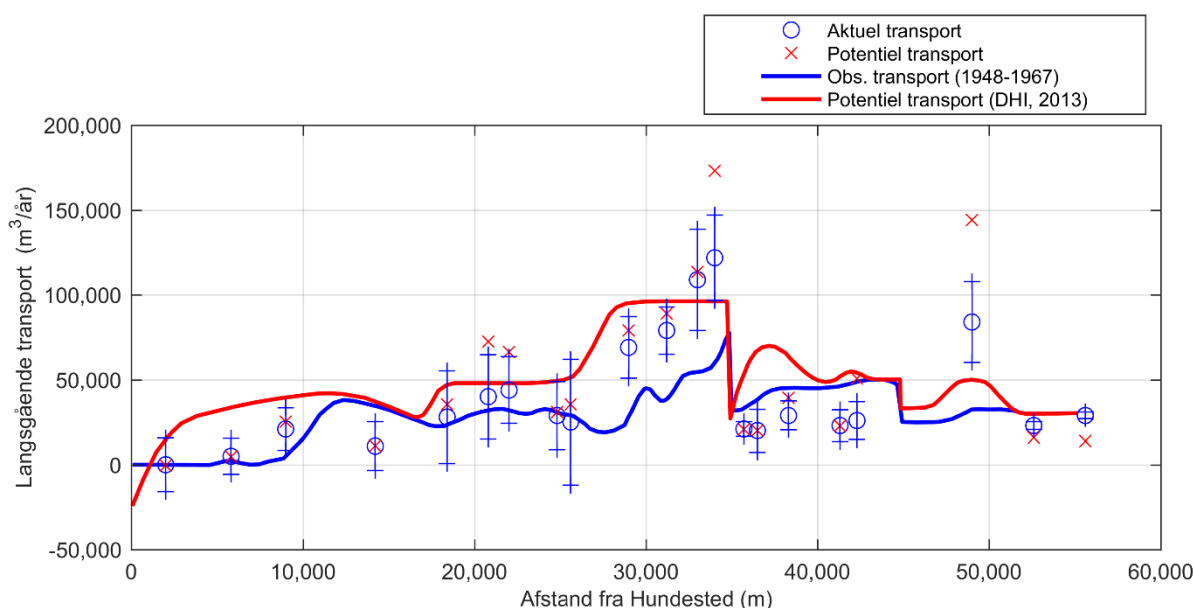
5.4 Overordnet sandbudget for den langsgående transport

5.4.1 Littoraltransport for eksisterende kystlinje

I det følgende præsenteres de korrigerede modelresultater for den nuværende situation.

5.4.1.1 Sammenligning med tidligere vurderinger

Figur 5-22 viser fordelingen af den overordnede littoraltransport. Transportkapaciteten (før reduktion fra sandtilgængelighed, konstruktioner og andre hensyn) er vist med røde krydser. Den aktuelle littoraltransport vurderet ud fra beregninger er vist med de blå cirkler. De lodrette kurver ved hver cirkel angiver variationen i transport ved en ændring i kystlinjeorienteringen på +/- 5 gr.



Figur 5-22 Overordnet sedimentbudget. De blå cirkler angiver aktuel transport jf. beregninger i 21 kystprofiler og de røde krydser viser den potentielle transport. Til sammenligning vises tidligere vurderinger af transporten.

Til sammenligning vises tidligere vurderinger af littoraltransporten med de fuldt optrukne kurver. Den røde kurve viser fordelingen vurderet som led i en analyse DHI gennemførte til brug for Kystdirektoratets erosionsatlas (Ref. /6/) og den blå kurve viser den vurderede aktuelle transport produceret til Fællesudvalget for kystpleje og kystsikring af Nordkysten i 1978 (den ene af de tre perioder).

De nye opdaterede transportrater er sammenlignelige med tidligere vurderinger. I særdeleshed bemærkes det at gradienterne inden for hvert af fodringsområderne stemmer overens med de tidligere vurderinger af den aktuelle transport.

Modelberegningerne af littoraltransporten for den eksisterende kyst vurderes derfor at give et reelt billede af sandtransporten.

5.4.1.2 Aktiv dybde og bredde af transportzonen

Den aktive dybde beskriver ud til hvilken dybde bundændringer over tid kan observeres. I praksis fortolkes dette som den dybde hvortil bølgerne flytter sand på sandbunden. Aktiv dybde er her bestemt ud fra tværfordelingen af langstransporten, idet aktiv dybde aflæses ud fra det punkt på transportfordelingen, hvor sandtransporten er ubetydelig.

For langtransportberegningerne på Nordkysten går aktiv dybde fra at være ca. 3 m (under middelvandstanden) ved Hundested stigende til ca. 4 m langs den vestlige halvdel af kysten. Nær Havstokken og Gilleleje havn er aktiv dybde ca. 5 m. Øst for Gilleleje havn er aktiv dybde lavere fordi kysten her er drejet op mod Sverige og kysten er derfor eksponeret for mindre bølger end det er tilfældet langs den vestlige halvdel af Nordkysten. Således varierer aktiv dybde mellem 3 m (nær Gilleleje) og 2 m (længst mod øst).

Bredden af transportzonen afhænger den aktive dybde og middelhældningen på kystprofilen. Langs den vestlige halvdel af Nordkysten er transportzonen typisk 200-300 m bred, mens den øst for Gilleleje havn typisk er 100-200 m bred.

5.4.1.3 Vurdering af kronisk erosion langs fodringsstrækningerne

Den korrigerede littoraltransport er præsenteret på tabelform i Tabel 5.3. Tabellen giver desuden et mål for den kroniske erosion langs hvert af fodringsområderne under antagelse af at den kroniske erosion beregnes som forskellen imellem det sand der transporteres langs et profil i den vestlige ende af fodringsområdet og sandtransporten i et profil ved den østlige ende af fodringsområdet. Erosionen er angivet som $\text{m}^3/\text{år}/\text{m}$, der skal forstås som tabet af sand per løbende meter langs med den fodrede kyststrækning.

Tabel 5.3 Aktuelle transportrater samt kronisk erosion i hvert af fodringsområderne for Eksisterende kyst.
Positiv nettotransport er mod øst. Positiv erosion svarer til tab af sand.
Beregningerne antyder at visse områder i fodringsområdet ikke er under erosion.

Profil	Q_{net} ($\text{m}^3/\text{år}$)	Q_{brt} ($\text{m}^3/\text{år}$)	Kronisk erosion ($\text{m}^3/\text{år}/\text{m}$)	Fodringsområde
018P00	0	40.000	2,8	Kikhavn – Liseleje (7.500 m)
056P00	5.000	36.000		
088P00	21.000	40.000		
140P00	11.000	50.000	-	-
182P00	28.000	72.000	2,9	Tisvilde – Vincent st. (5.600 m)
206P00	40.000	63.000		
218P00	44.000	63.000		
246P00	29.000	65.000	0*	Rågeleje – Trillingerne (2.000 m)
254P00	25.000	104.000		
288P00	69.000	83.000	2,8	Havstokken – Feriebyen (3.600 m)
310P00	79.000	87.000		
328P00	109.000	113.000	7,2	Gilbjerghoved (1.800 m)
338P00	122.000	123.000		
353P00	21.000	21.000	~0	Gilleleje – Nakkehoved (2.000 m)
357P00	20.000	22.000		
366P00	29.000	30.000	0 – 3,0*	

Profil	Q_{net} (m ³ /år)	Q_{brt} (m ³ /år)	Kronisk erosion (m ³ /år/m)	Fodringsområde
381P00	23.000	23.000		Munkerup inkl. forlænget (4.800 m)
386P00	26.000	26.000		
421P00	84.000	84.000	0 – 2,0*	Ålsgårde inkl. forlængelse (7.700 m)
439P00	23.000	23.000		
454P00	29.000	29.000		

Den aktuelle kroniske erosion ligger typisk omkring 3 m³/år/m vest for Gilleleje. Dog er erosionen på Gilbjerg hoved markant større og skyldes at kysten her har et markant knæk i orienteringen. Fodringsområdet: Rågeleje-Trillingerne er ifølge beregningerne ikke under mærkbar erosion. Variationen i erosionspresset er stor for fodringsområderne øst for Gilleleje.

5.4.2 Littoraltransport for fodringsscenarie 1

Beregningerne af littoraltransporten er gentaget for nye kystprofiler, hvori der er indlagt en sandfodring som påvirker kystprofilens form samt kornstørrelsen af sandet i kystprofilet. Beregningerne korrigeres desuden for sandtilgængelighed og kystkonstruktioner. Tabel 5.4 angiver littoraltransporten og størrelsen af den kroniske erosion for tilfældet med kystfodring. Sedimentbudgettet er desuden vist grafisk i Figur 5-23.

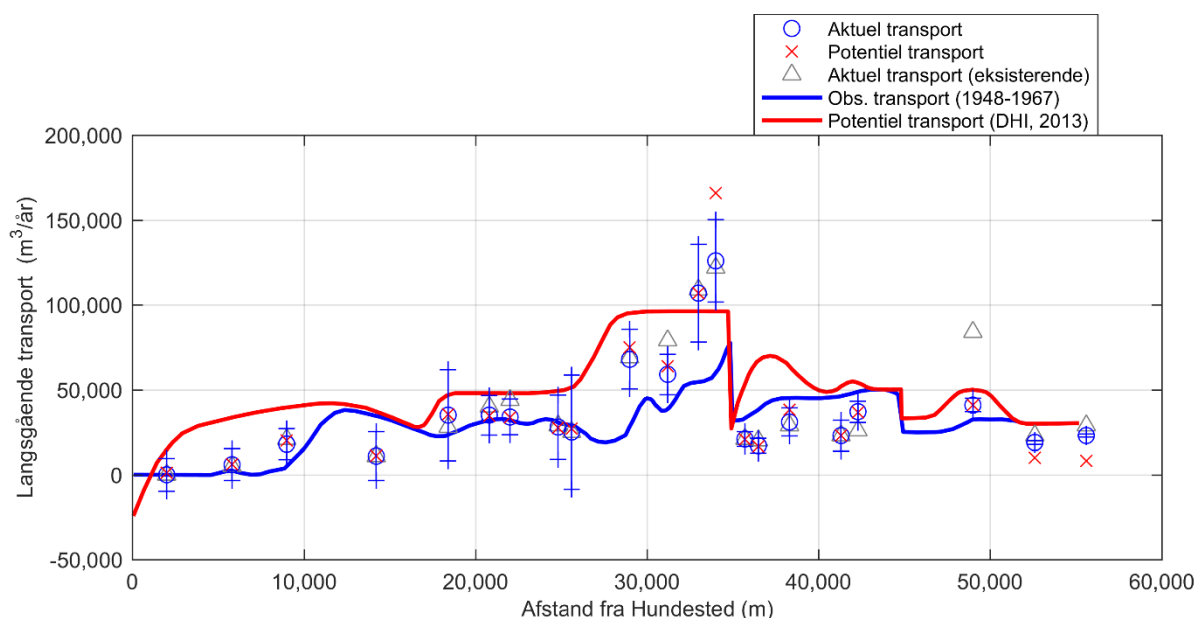
Tabel 5.4 Aktuelle transportrater samt kronisk erosion i hvert af fodringsområderne for Fodringssscenarie 1.
Positiv nettotransport er mod øst. Positiv erosion svarer til tab af sand.
Beregningerne antyder at visse områder i fodringsområdet ikke er under erosion.

Profil	Q_{net} (m ³ /år)	Q_{brt} (m ³ /år)	Kronisk erosion (m ³ /år/m)	Fodringsområde
018P00	0	29.000	2,4	Kikhavn – Liseleje (7.500 m)
056P00	6.000	35.000		
088P00	18.000	34.000		
140P00				-
182P00	35.000	82.000	0*	Tisvilde – Vincent st. (5.600 m)
206P00	35.000	53.000		
218P00	34.000	51.000		
246P00	28.000	62.000	0*	Rågeleje – Trillingerne (2.000 m)
254P00	25.000	101.000		
288P00	68.000	79.000	0*	Havstokken – Feriebyen (3.600 m)
310P00	59.000	63.000		

328P00	107.000	112.000	11	Gilbjerg hoved (1.800 m)
338P00	126.000	127.000		
353P00	21.000	21.000	0*	Gilleleje – Nakkehoved (2.000 m)
357P00	17.000	17.000		
366P00	31.000	32.000	1,3	Munkerup inkl. forlænget (4.800 m)
381P00	23.000	23.000		
386P00	37.000	37.000		
421P00	41.000	41.000	0 – 1,5*	Ålsgårde inkl. forlængelse (7.700 m)
439P00	19.000	19.000		
454P00	23.000	23.000		

Sedimentbudgettet ændres ikke væsentligt fra sedimentbudgettet for de eksisterende forhold. Generelt falder sandtransport nær stranden som følge af den ændrede kornstørrelse. I nogle profiler stiger transporten dog, fordi kystprofillets hældning øges ved stranden.

Fodringsvoluminet af strandfodringerne medfører ikke væsentlige ændringer på reduktionen af sandtransport fra kystkonstruktioner. Fodringsvoluminet er dog tilstrækkeligt til at reduktioner fra tilstedeværelsen af ral ikke medtages.



Figur 5-23 Overordnet sedimentbudget for fodringsscenarie 1. Den aktuelle transport for de eksisterende forhold er desuden vist med grå trekanten for at sammenligne effekten af sandfodringerne.

Sammenligning af transportraterne angivet i Tabel 5.4 og Figur 5-23 antyder at de fleste fodringsområder ikke påvirker eller påvirkes af den naturlige kroniske erosion.

Dette er dog ikke helt tilfældet, idet fodringsområderne mister sand langs enderne af de fodrede områder. Desuden vil den kontinuerte omfordeling af sand ændre på kornstørrelsesfordelingen

på tværs af profilet og på langs af kysten og dermed gradvist føre kysten tilbage til sin naturligt eroderende tilstand. Denne effekt skal medtages i overvejelserne over de endelige sandvolumener samt placering af disse i fordringsområderne.

Effekten diskuteres i nedenstående afsnit.

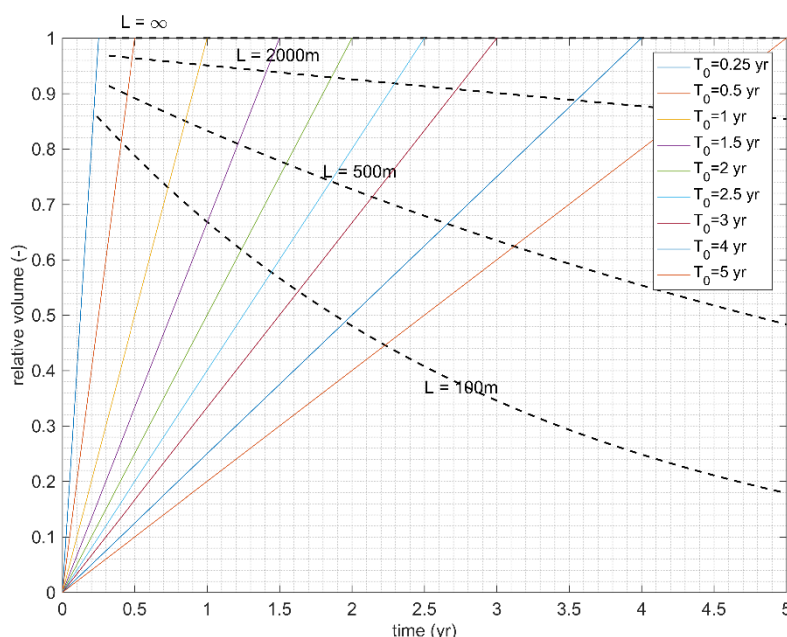
5.4.3 Randeffekter ved kystfodring

Sandfodringen udgør en sandformation, der vil ændre form og jævnes ud som tiden går. Placeres sandet f.eks. uniformt i den langsgående retning og udelukkende i det område der ønskes beskyttet, vil denne effekt opleves som et tab af sand til de omgivende strækninger. På den måde vil det fodrede sand i fordringsområdet forsvinde hurtigere end den bagvedliggende erosion tilsiger, mens de tilstødende kyststrækninger oplever tilførsel af sand fra fordringsområderne.

Til vurdering af disse forhold kan nedenstående designkurver i Figur 5-24 fra /14/ benyttes. Kurverne svarer til reduktion af det effektive sandvolumen i et fodringsområde pga. randeffekter for typiske bølgeforskel, der svarer til Nordsjællands Nordkyst. Kurverne svarer til fodringer med en uniform initialfodring i den langsgående retning. Fra kurverne aflæses, at man for en 5-årig periode vil opleve et tab af sand til omgivelserne som afhænger af længden af fodringsområdet. Tabet i procent er angivet i Tabel 5.5.

Tabel 5.5 Reduktion af sandvolumenet i fodringsområde på grund af randeffekter.

Fodringsstræknings længde	Reduktion (5 år)
100m	82 %
500m	52 %
2000m	14 %
Uendelig lang fodring	0%



Figur 5-24 Designkurver for randeffekter af sandfodringer for langsgående længder 100m, 500m og 2000m.
 T_0 svarer til den tid det tager for den kroniske erosion at fjerne sandfodringen 100% i fald der ingen randeffekter er. Fra [14].

De valgte fodringsstrækninger er typisk længere end 2 km, og i det tilfælde vil tabet til omgivelserne relativt til den fodrede totalmængde være mindre end 14%.

5.4.4 Vurdering af hotspots

På baggrund af det overordnede sandbudget vurderes det at særligt **Gilbjergshoved** fodringsområdet vil være udsat for erosion. Dette skyldes i særlig grad at fodringsområdet ligger på et fremskudt hårdt forland, hvor transportkapaciteten er særlig høj.

Desuden vurderes fodringsområderne **Havstokken – Feriebyen** samt **Kikhavn – Liseleje** fodringsområderne er være udsatte for erosion.

Havstokken – Feriebyen ligger i et område, hvor den langsgående sandtransport begynder at stige mærkbart og erosionen forventes at starte vest for fodringsområdet.

Kikhavn – Liseleje fodringsområdet er udsat for erosion fordi dette området ligger i et kritisk punkt for den langsgående sandtransport, idet sand fjernes naturligt fra området mens der ikke er nogen væsentlig tilførsel fra opstrøms strande. Tilførsel af sand i dette område i form af fodringer vil således gavne selve fodringsområdet, men også give anledning til sandtilførsel af det nedstrøms område mellem Liseleje og Tisvilde.

5.5 Anbefalinger til fodringsvoluminer – modvirkning af kronisk erosion

Det overordnede sandbudget er vurderet for de nuværende forhold og for tilfældet med sandfodring i afsnit 5.4.1 hhv. afsnit 5.4.2. Heraf fremgår det at det overordnede transportmønster er uændret før og efter sandfodringer med stigende transport mellem Hundested og Gilleje samt stigende transport imellem havnene Gilleje – Hundested, Hundested – Helsingør. Sammenholdes beregnede sandtransportrater ind og ud af fodringsområderne vil flere af fodringsområderne i tilsyneladende være stabile imod erosion efter fodring. Dette forhold

vurderes ikke af være tilfældet, men skyldes at beregningerne er vedhæftet med en vis usikkerhed. Således er det nødvendigt at udlede nødvendige fodringsvolumener ved fortolkning af de tilgængelige modelresultater.

DHIs anbefalinger til nødvendige volumener til modvirkning af kronisk erosion i fodringsområderne er baseret på følgende:

- Alle områder påvirkes af en baggrundserosion som udledes ved at vægte længden af fodringsområdet i forhold til den samlede kyststrækning med det samlede sandtab.
- Der tillægges et yderligere bidrag til hvert af fodringsområderne på baggrund af de erosionsrater som er vurderet i afsnit 5.4.1 og 5.4.2.

Baggrundserosionen bestemmes individuelt for strækningen Hundested – Gilleleje og for strækningen Gilleleje – Helsingør.

5.5.1 Baggrundserosion: Hundested – Gilleleje

Den aktuelle langsgående sandtransport går fra ca. 0 ved Hundested til ca. 125,000 m³/år ved Gilleleje. Fordeles denne stigning i langstransport lineært over hele strækningen fås en erosion på ca. 3.7 m³/år/m. Denne rater ligger generelt højere end erosionsraterne i fodringsområderne, fordi beregningerne viser at der foregår en betydelig erosion i naturområderne.

5.5.2 Baggrundserosion: Gilleleje – Helsingør

Den aktuelle langstransport fra Gilleleje til Helsingør er overordnet set jævn og omkring 20,000 – 40,000 m³/år. Dog giver havnene Gilleleje og Hornbæk anledning til erosion idet en del af langstransporten blokeres og en del aflejres et stykke fra kysten hvorved kysten umiddelbart øst for havnene udsættes for et erosionspres.

Havnene gennemfører en delvis kunstig bypass af sandet, men nogen erosion pågår.

Omkring Gilleleje havn vurderes området at blive tilført med ca. 35,000 m³/år fordelt som 15,000 m³/år fra kystnær klapning og 20,000 m³/år som naturligt bypass.

Ved Hornbæk vurderes kysten af miste ca. 20,000 m³/år som følge af et voksende klitlandskab, afgravning af stranden vest for havnen samt tilbageførsel af sand i form af kystfodring og kystnær klapning af oprenset sand.

Ved Helsingør vurderes den naturlige sandtransport ud af kystzonen at være omkring 25,000 m³/år.

Således fås en baggrundserosion for den østlige halvdel af Nordkysten svarende til ca. 0.5 m³/år/m.

5.5.3 Opsamling på anbefalede fodringsrater

Med baggrund i ovenstående overvejelser gives der i

Tabel 5.6 anbefalinger til årlige fodringsvolumener til vedligeholdelse af strandfodringerne. Summen af de anbefalede fodringsvolumener beløber sig til **ca. 110,000 m³/år**. Hertil skal lægges et yderligere bidrag pga. randeffekter som beskrevet i afsnit 5.4.3. Dette bidrag kan ikke medtages på nuværende tidspunkt idet tab af sand pga. randeffekter afhænger af det samlede fodringsvolumen.

Tabel 5.6 Anbefalinger til vedligeholdelsesfodringsvoluminer som følge af kronisk erosion.

Fodringsområde	Længde (m)	Årligt tab (m ³ /år/m)	Anbefalet fodringsrate (m ³ /år)
Kikhavn – Liseleje	7.500	3,7	28.000
Tisvilde – Vincent st.	5.600	3,7	21.000
Rågeleje – Trillingerne	2.000	3,7	7.500
Havstokken – Feriebyen	3.600	3,7	13.500
Gilbjerghoved	1.800	11	20.000
Gilleleje – Nakkehoved	2.000	0,5	1.000
Munkerup inkl. forlænget	4.800	1,3	6.500
Ålsgårde inkl. forlængelse	7.700	1,5	12.000

6 Akuterosion – modellering

Formålet med denne del af analysen er at give et modelbaseret datagrundlag til designregler for bestemmelse af maksimal-dybden af skråningsbeskyttelser på en given lokalitet ved Sjællands Nordkyst.

6.1 Fænomen

Under stormhændelser stiger vandspejlet og bølger begynder at slå ind mod stranden. Derved oplever den øvre del af profilet et erosionspres i stormens varighed. Typisk vil sand blive eroderet i den øvre del af profilet og transporteret et stykke ud i profilet hvor det aflejres. Efter stormen vil man således typisk se at stormen har afstedkommet erosion af strand og evt. klitter. Dette sand ligger nu skjult længere ude i profilet og kan have afstedkommet en ændring i strandens bredde og hældning.

6.2 Model

En model for akuterosion foran en skåningsbeskyttelse skal indeholde mange forskellige samspillende processer for at kunne beskrive den resulterende erosion:

- Korte vindgenererede bølger, der i bølgegrupper vandrer ind over profilet, stejler op og bryder
- Frigivelse, opskyl og refleksion af lange bundne bølger
- Understrøm genereret af bølgerkræfter fra de brydende bølger
- Den resulterende tværgående sandtransport og den tilhørende morfologiske udvikling

En særlig opsætning/udgave af DHI's model MIKE 21 FM benyttes til at modellere disse processer.

For at opnå de ønskede effekter kobles modulerne MIKE 21 SW FM, MIKE 21 HD FM og MIKE 21 ST/MD FM så variationerne henover bølgegrupper i tid og sted opløses af modellen, mens de kortere vindgenererede bølger er beskrevet af integrerede bølgeparametre (bølgehøjde, bølgeretning og bølgeperiode).

Bølgemodellen MIKE 21 SW FM anvendes til at repræsentere de korte bølger i bølgegrupperne gennem øjeblikkelige værdier af bølgehøjder, mv.. Modellen beregner, hvordan disse korte bølger bliver kortere, stejler op og bryder. Dette sker for hvert tidskridt hvor bølgerne vandrer ind i beregningsdomænet fra randen på dybere vand ind over profilet ind mod stranden.

Variationen over bølgegrupperne på dybtvands-randen opnås ved en særlig procedure, hvor et bølgesignal der opløser de både korte og lange bølger genereres med DHI's MIKE 21 Random Wave Generator. Dette signal analyseres for omhylningskurven, som er et udtryk for den langsomt varierende amplitude af signalet, hvilket giver variationen af bølgehøjden over bølgegrupperne. Dette signal anvendes herefter i simuleringerne som randbetingelse i bølgemodellen.

MIKE 21 HD FM påvirkes igennem radiation stresses i beregningsdomænet fra MIKE 21 SW FM i hvert tidskridt og genererer derved lange bølger, der til at starte med er bundne til bølgegrupperne, men som slippes løs så snart de korte bølger bryder. De fra stranden/konstruktionen reflekterede lange bølger forlader domænet ved dybtvands-randen via en ikke-reflekterende randbetingelse, der sørger for at der ingen forstyrrende tilbagerefleksion sker af de lange bølger her.

Sedimenttransporten beregnes med den deterministiske model STP, der inkluderer en faseopløst hydrodynamisk beskrivelse af turbulens og bundfriktion fra brydende og ikke-brydende bølger samt 3-dimensionelle bølgedrevne strømninger (f.eks. tværgående understrømme).

Modulet MIKE 21 ST/MD sørger for i hvert tidskridt at beregne sedimenttransporten og den morfologiske opdatering.

Det antages, at langsgående gradienter i bundforhold, strøm-, vandstands- og bølgeforhold lokalt set har en minimal indflydelse på de tværgående sandtransporter. Det antages yderligere at bølgerne vandrer vinkelret ind på kysten. Derved kan der benyttes en 1D version af modellen der fokuserer på ændringer i det tværgående profil. 1D version af modellen opnås ved at opstille et beregningsnet, der er en enkelt celle bred langs kysten og opløser profilet på tværs.

6.3 Modellering

6.3.1 Designstorme

Tre hændelser er valgt som grundlag til at udvikle designkurverne for skråningsbeskyttelsen:

- Mest ekstreme 50 års returperiode langs kysten vest for Gilleleje
- Mest ekstreme 50 års returperiode langs kysten øst for Gilleleje
- Mest ekstreme vandstand og bølgehøjde svarende til stormen Bodil

Stormhændelsen

Vandstande og bølger er bestemt fra ekstremværdianalysen af de meteo-marine modelresultater og en vurdering af en typisk varighed for stormens kulmination. Bølgeenergi og vandstand antages at vokse lineært op fra nul over to timer, hvorefter begge holdes konstant indtil stormen er ovre.

For at beregne bølgegrupperne skal der antages et bølgespektrum for de vindgenererede bølger uden for brydningszone. I den forbindelse antages her et standard Jonswap spektrum.

Varigheden

Varigheden har stor betydning for erosionsdybderne, og er derfor en vigtig parameter for bestemmelse af sikkerhedsniveauet. Fra analyser af tidsserier over ekstremhændelserne vurderes det at hele stormforløbet for 50-årshændelser typisk har varigheder i størrelsesordenen 10-15 timer, mens det tidsrum, hvor bølger og vandstand er maksimale og sammenfaldende under stormen, og dermed hvor den akutte erosion foregår højt i profilet, er i størrelsesordenen 5-6 timer.

For at vurdere følsomheden af de beregnede erosionsdybder overfor varigheden beregnedes erosionen i alle tilfælde videre fra de 6 timer og op til 12 timer. Forskellen i de resulterende erosionsdybderne mellem en storm, der peaker 6 timer og en storm der peaker 12 timer noteredes til at være i størrelsesordenen 0.3-0.5m afhængig af skræntbeskyttelsens placering i strandprofilet.

På baggrund af overstående vurderinger og overvejelser er varigheden for 50 års hændelserne valgt til 6 timer.

Som supplement til nedenstående gennemgang af resultater for design-varigheden på 6 timer er beregningsresultaterne for den eksterme varighed på 12 timer givet i appendiks C4.

Bodil-stormens varighed er bestemt ud fra kombinerede vurderinger af målinger af vandstand ved Hornbæk og Metomarine bølger- og vandstandsresultater. Bodil-stormen er en hændelse,

der ifølge nyeste statistik har en returperiode på mere en 200 år, modelleres med en varighed på 15 timer.

Opsummerende er følgende designparametre valgt:

Tabel 6.1 De tre storm scenarier.

Returperiode	Bølgehøjde, H_s (m)	Vandstand (m)	Varighed (timer)
50 år vest	4.4	1.69	6
50 år øst	3.6	1.73	6
Bodil	4.0	1.92	15

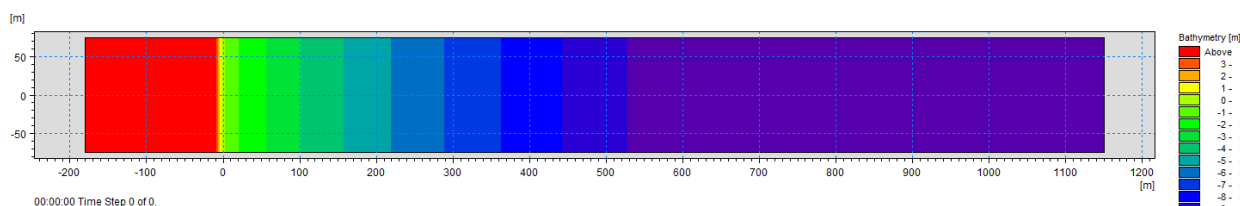
6.3.2 Ligevægtsprofil

Et såkaldt ligevægtsprofil (eller Dean-profil) for den dykkede del og en retlinet strand er valgt som grundlag for beregningerne og er baseret på input fra NIRAS. Et sådan profil har ingen revler og de beregnede erosionsdybder udgør dermed relativt konservative estimater, idet revler er med til at bryde bølgerne og tage en andel af energien ud før bølgerne når den øvre del af profilet under stormvejr. Når revlerne ikke medtages vil stranden typisk blive mødt af højere bølger end hvis der havde været revler.

Med input fra NIRAS anvendes et repræsentativt ligevægtsprofil med følgende karakteristika:

Tabel 6.2 Parametre for ligevægtsprofil.

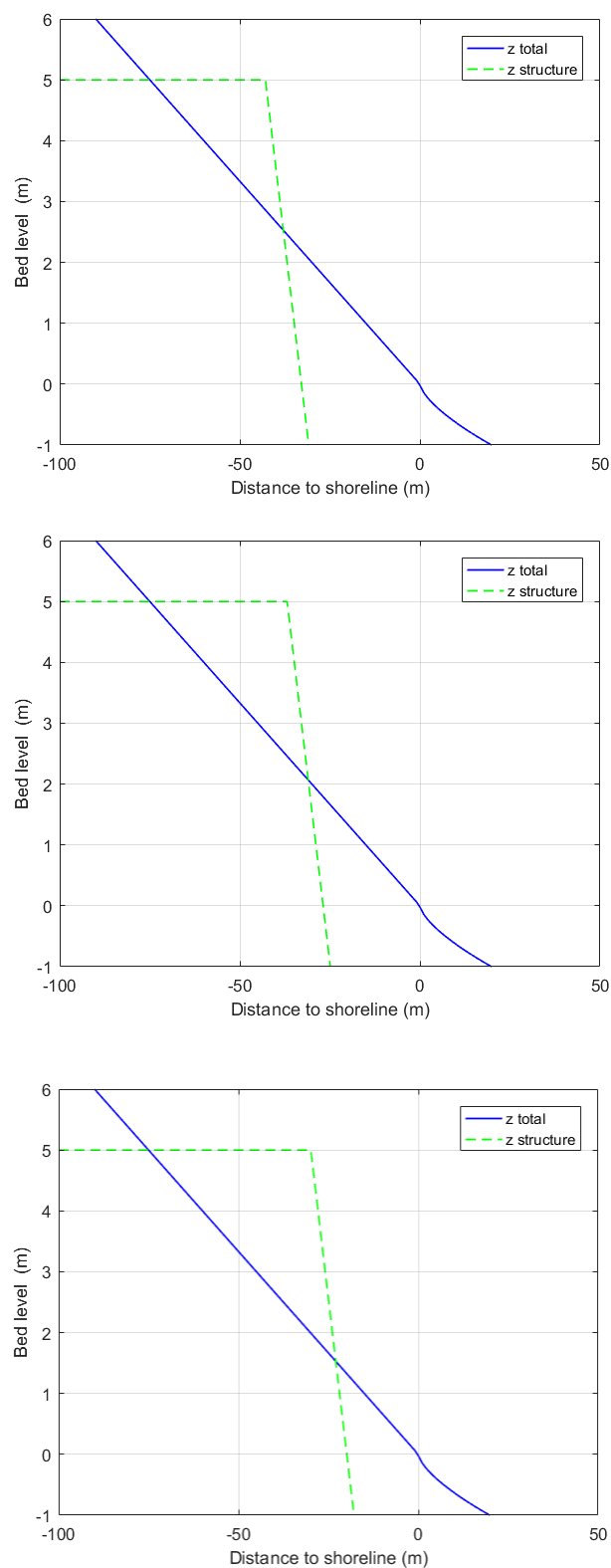
Profil	Dean A	Dean's m	Strandhældning
Ligevægtsprofil	0.135	0.67	1:15



Figur 6-1 Et eksempel på bundkoterne for konstruktion, strand og dykket del af profilet interpoleret ind på beregningsnettet. Nettet er 1 celle bred i den på kysten langsgående retning og 1500 celler i den tværgående retning.

6.3.3 Skråningsbeskyttelse

Der anvendes en skråningsbeskyttelse med en hældning på 1:2. Den morfologiske udvikling beregnes for skråningsbeskyttelser placeret i forskellige niveauer i profilet.



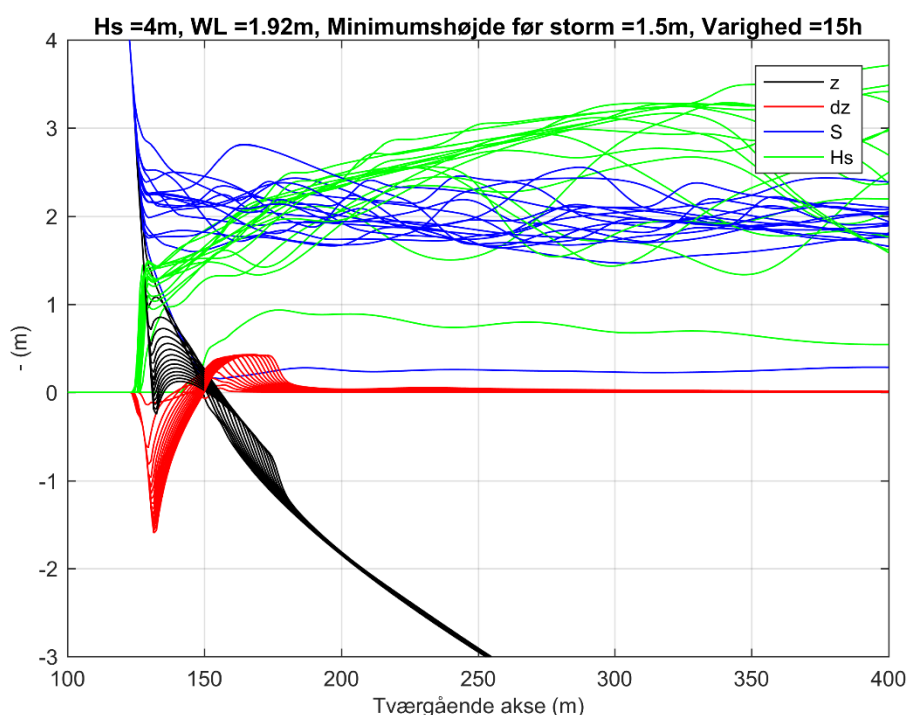
Figur 6-2 Eksempler på placeringer af skråningsbeskyttelsen i forskellige niveauer. Konstruktionen skærer i eksemplerne stranden i 2,5m (øverst), 2,0m (midt), 1,5m (nederst).

6.3.4 Morfologisk modellering

Der er udført følgende beregninger:

- Følsomhedstest for strandhældning for den vestlige 50års hændelse
- Følsomhedstest for kornstørrelse for den vestlige 50års hændelse
- Designsimuleringer baseret på de 3 udvalgte storme (50 års, vest og øst – samt Bodil stormen) og 6 højder hvor konstruktionen og stranden mødes

Resultaterne for alle modellerede akuterosionshændelser ses i Bilag C, hvor udviklingen af profilet foran konstruktionen ses afbilledet sammen med erosionsdybder, bølgehøjdefordeling og vandstandsfordeling for hver time over hver simuleret storm. Nedenstående figur giver et indtryk af den modellerede udvikling af morfologien.



Figur 6-3 Eksempel på erosionsberegning over stormen, med 1-times mellemrum. Sorte kurver viser udviklingen af kystprofilet. Røde kurver viser udviklingen i erosion og aflejningsmønstre. Grønne kurver viser øjebliksbilleder af bølgehøjdens variation over profilet. Blå kurver er øjebliksbilleder af vandstanden.

Figuren indikerer hvordan de vindgenererede bølger inducerer bølgegrupper og hvordan disse forstærkes mod kysten og "frigives" idet de vindgenererede kortere bølger bryder. De lange frigivne bølger danner et opskyl på konstruktionen og skaber reflekterede bølger der vandrer ud igennem profilet mod dybere vand.

Det ses hvordan de mere energiholdige bølger i grupperne bryder længere ude i den dybere del af profilet, mens bølgegrupper med mindre bølgeenergi bryder længere inde. Dette indebærer at den gennemsnitlige bølgebrydning (gennemsnit over mange bølgeperioder) intensiveres som bølgerne nærmer sig konstruktionen. Den overskydende bølgeenergi tages ud af bølgebrydning på den stejle skråning.

De bølgebevægelser og strømninger der foregår i dette forløb eroderer stranden tæt ved konstruktion og tager det eroderede sand længere ud i profilet, hvor det aflejres i den ydre del af

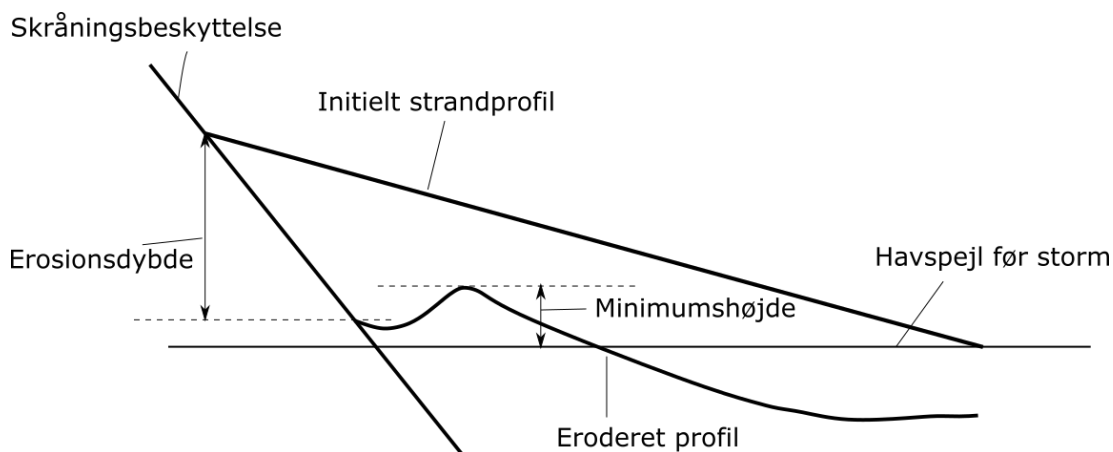
det intensive bølgebrydningsområde. Dette betyder at stranden ved konstruktionens fodpunkt eroderes således at den før begravede del af konstruktionen bliver blotlagt mere og mere.

Samtidig ses der i beregningen en tendens til en kraftigere erosion tæt konstruktionen end lidt væk fra, hvor en "top" dannes efterhånden som erosionen pågår. Sagt på en anden måde er erosionen helt tæt på konstruktionen større end et lille stykke væk fra.

Fra disse beregninger udtrækkes og præsenteres i det følgende en række størrelser, som input til design af konstruktionen:

- Strandhøjden lige foran konstruktionen (ved den lille top), herfra kaldet "minimumshøjden af strand foran konstruktionen"
- Den maksimale erosion som vil angive højdeforskellen mellem startniveauet og slutniveauet efter stormen af det punkt, hvor konstruktion og strand mødes
- Det eroderede sandvolumen
- Gennemsnitsbølgehøjder foran konstruktion over de sidste 3 timer af stormen
- Gennemsnitsvandstanden foran konstruktion over de sidste 3 timer af stormen

Definitionerne af erosionsdybden og minimumshøjden ses ydermere fremstillet i grafisk form i nedenstående principtegning Figur 6-4. Læg mærke til at den maksimale erosionsdybde måles fra det punkt hvor konstruktion og sandstrand mødes, mens minimumshøjden bestemmes ved den lille forhøjning, der dannes i simuleringen.



Figur 6-4 Definitioner af maksimal erosionsdybde og minimumshøjde i relation til det eroderede profil.

6.3.5 Følsomhedstests

Betydningen af sedimentstørrelsen og strandhældningen på erosionsdybden testes ved at gentage en beregnet akut erosion med variationer af disse inputparametre.

Følsomhedstestene vises for den ekstreme varighed på 12 timer.

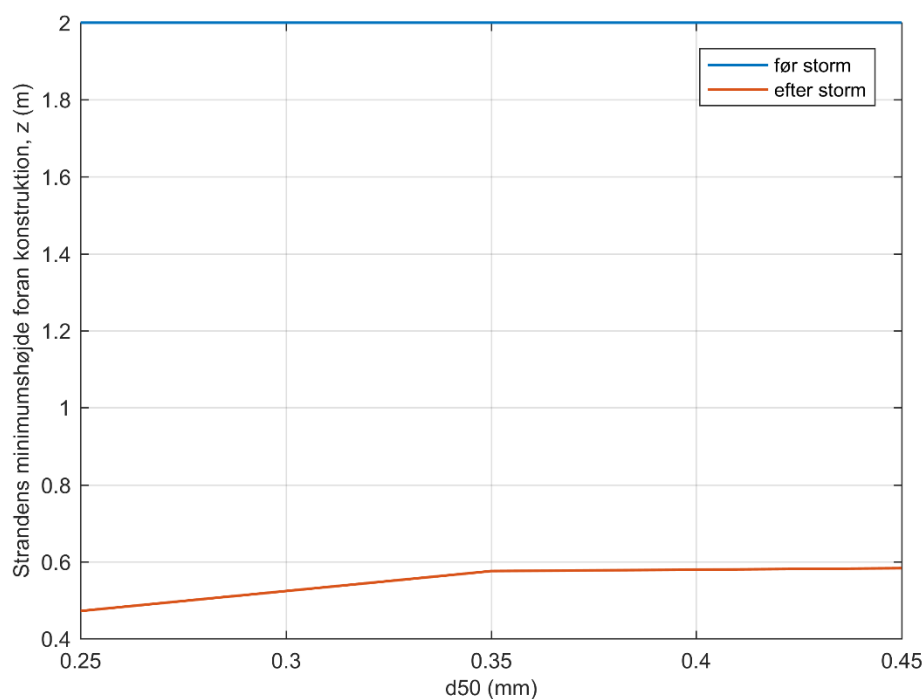
Sediment

Beregninger foretages med sediment med en middeldiameter på 0.35 mm og en geometrisk spredning på 1.5. En vurdering af følsomheden på resultaterne overfor denne antagelse undersøges ved at beregne erosionsdybderne med 50 års, vest hændelsen. Kote for skråningsbeskyttelsens fodpunkt er +2.0m og strandhældning er 1:15.

I nedenstående tabeller og figurer gives minimumshøjde foran konstruktionen hhv. erosionsdybderne ved konstruktionen efter storm for tre kornstørrelser svarende til mediandiametre på 0.25mm, 0.35mm og 0.45mm.

Tabel 6.3 Minimumshøjde af strand foran konstruktion efter storm for tre forskellige kornstørrelser.

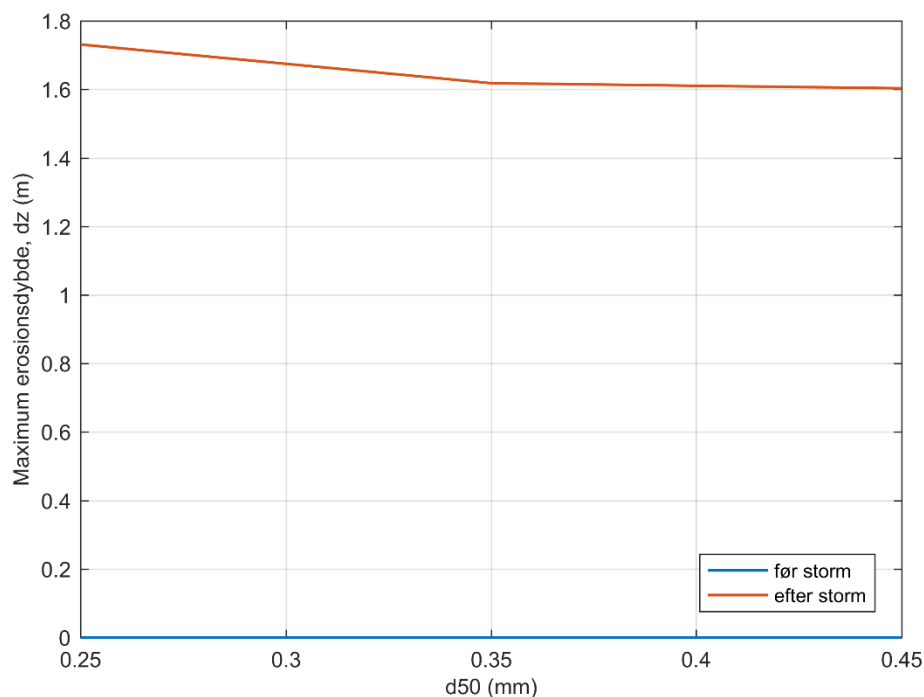
Sediment median diameter (mm)	Minimumshøjde af strand foran konstruktion efter storm (m)
0.25	+0.47
0.35	+0.58
0.45	+0.58



Figur 6-5 Strandens minimumshøjdes følsomhed overfor kornstørrelsen.

Tabel 6.4 Maksimal akut erosion ved konstruktion for tre forskellige kornstørrelser.

Sediment median diameter (mm)	Maksimal akut erosion ved konstruktion (m)
0.25	-1.73
0.35	-1.63
0.45	-1.61



Figur 6-6 Den maksimale erosionsdybdes følsomhed overfor kornstørrelsen.

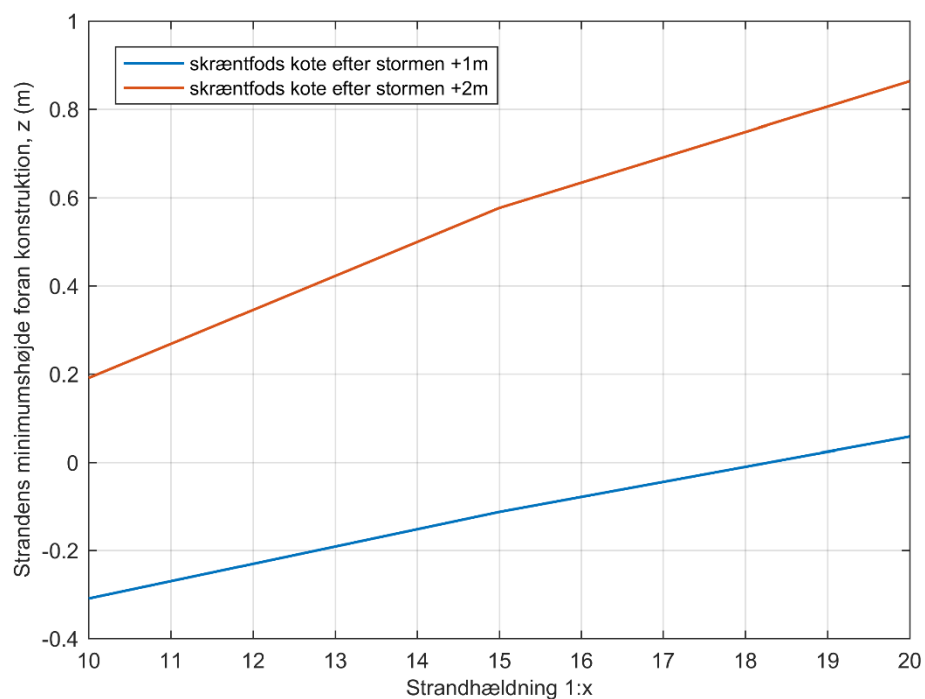
Af ovenstående tabeller og figurer ses at en mindre kornstørrelse har en tendens til at give anledning til større erosion.

Strandhældning

Følsomheden overfor strandhældningen er undersøgt ved følgende beregninger for den mest ekstreme 50 årsstorm på den vestlige side af Gilleleje med 1:2 skråningsbeskyttelsen i to niveauer +1.0m og +2.0m. Der er benyttet en median diameter 0.35mm og stormhændelsen svarende til den største 50 års returperiode vest for Gilleleje.

Tabel 6.5 Minimumshøjde af strand foran konstruktion efter storm (m).

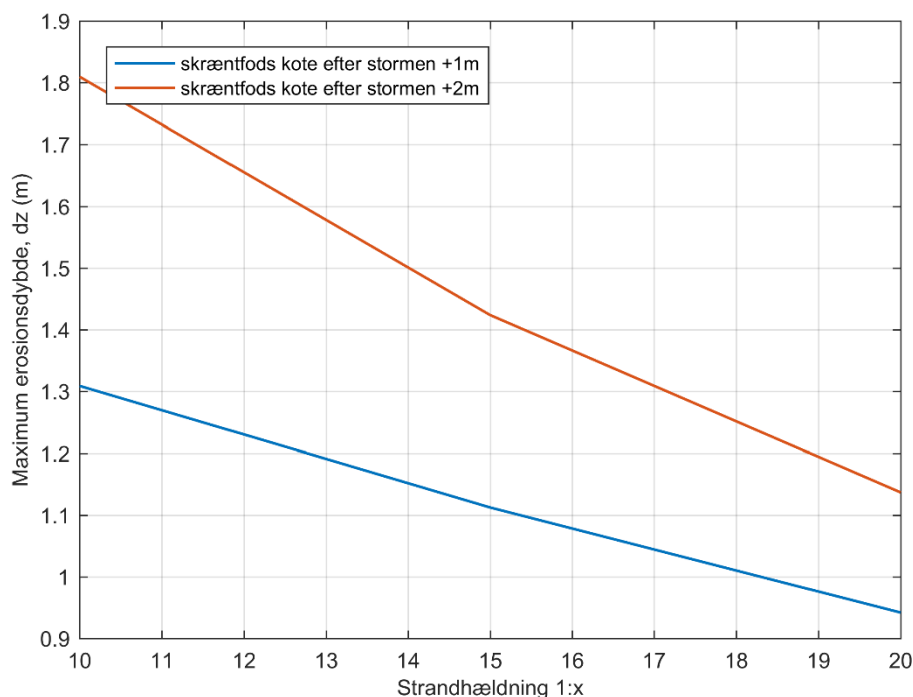
	Minimumshøjde af strand foran konstruktion efter storm (m)	
Strandhældning	+1.0 (initialt)	+2.0 (initialt)
1:10	-0.31	+0.19
1:15	-0.12	+0.58
1:20	+0.06	+0.86



Figur 6-7 Strandens minimumshøjdes følsomhed overfor strandhældningen.

Tabel 6.6 Maksimal akut erosion ved konstruktionen for tre forskellige strandhældninger.

	Maksimal akut erosion ved konstruktion (m)	
Strandhældning	+1.0 (initial minimumshøjde)	+2.0 (initial minimumshøjde)
1:10	-1.8	-2.1
1:15	-1.5	-1.6
1:20	-1.3	-1.3



Figur 6-8 Den maksimale erosionsdybdes følsomhed overfor strandhældningen.

Af Figur 6-7 og Figur 6-8 ses at en mildere strandhældning giver en mindre grad af erosion, hvilket er i overensstemmelse med forventningen, idet en bredere strand vil tage energien ud af bølgerne (gennem brydningsprocessen) over et længere stykke.

6.3.6 Designkurver for minimumshøjder, maksimale erosionsdybder og erosionsvoluminer

Som baggrund for design af skråningsbeskyttelsen beregnes akuterosionen for 7 placeringer af konstruktionen i strandprofilet for de tre stormhændelser præsenteret indledningsvist. Resultaterne af beregninger kan ses i Bilag C i form af kurveskarer for forløbet af profiludviklingen.

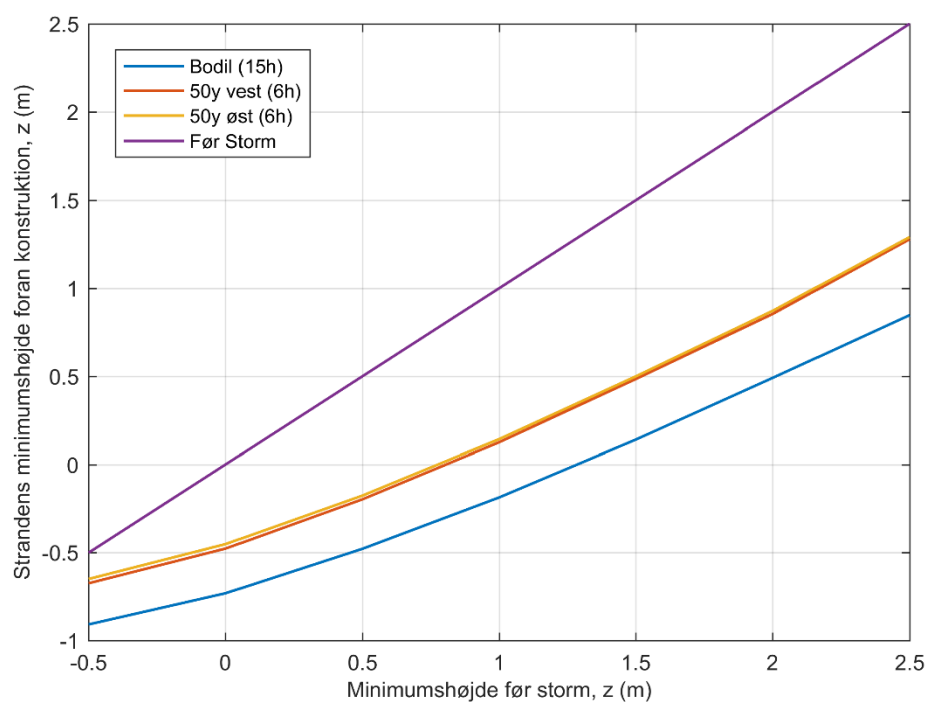
I det efterfølgende gives resultaterne i form af erosionsdybder og minimumshøjder samt erosionsvolumener foran konstruktionen.

6.3.6.1 Erosionsresultater

I nedenstående tabel ses de beregnede minimumshøjderne.

Tabel 6.7 Minimumshøjde af strand foran konstruktion efter storm.

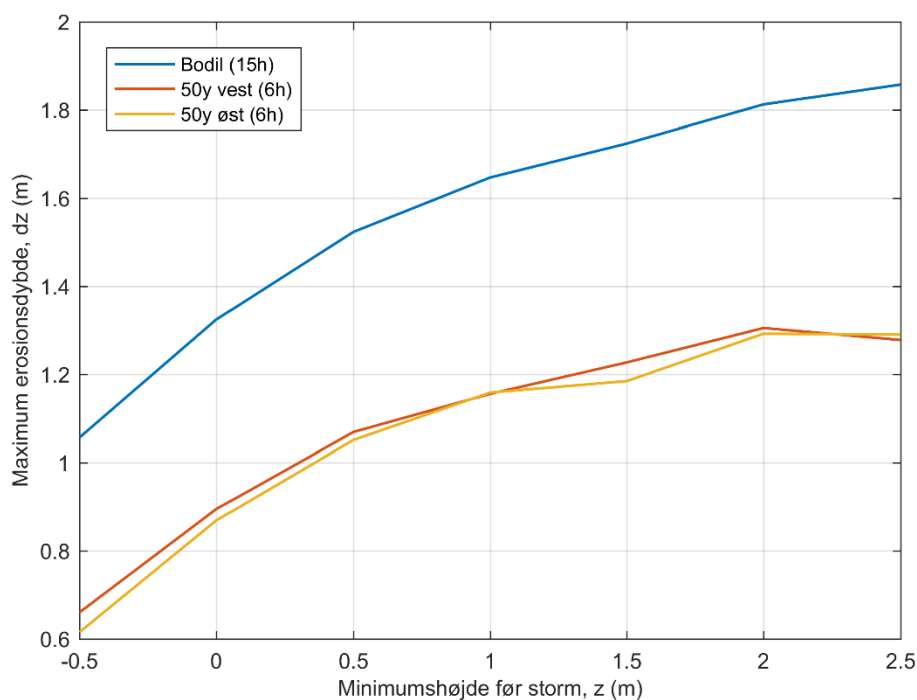
	Minimumshøjde af strand foran konstruktion efter storm (m)		
Initial minimumshøjde af strand foran konstruktionen (m)	50 års hændelse, Vest	50 årshændelse, Øst	Bodil
- 0.5	-0.67	-0.65	-0,91
+0.0	-0.48	-0.45	-0,73
+0.5	-0.20	-0.18	-0,48
+1.0	+0.13	+0.14	-0,19
+1.5	+0.48	+0.50	+0,14
+2.0	+0.85	+0.87	+0,49
+2.5	+1.28	+1.29	+0,85



Figur 6-9 Minimumhøjder som funktion af initial højde af punktet, hvor stranden møder konstruktionen. Tre stormscenarier.

Tabel 6.8 Maksimal akut erosion ved konstruktion over stormen.

Initial minimumshøjde af strand foran konstruktionen (m)	Maksimal akut erosion ved konstruktion (m)		
	50 års hændelse, Vest	50 årshændelse, Øst	Bodil
- 0.5	-0.66	-0.62	-1.06
+0.0	-0.90	-0.87	-1.30
+0.5	-1.07	-1.05	-1.52
+1.0	-1.16	-1.16	-1.65
+1.5	-1.23	-1.18	-1.72
+2.0	-1.31	-1.29	-1.81
+2.5	-1.28	-1.29	-1.86



Figur 6-10 Maximum erosionsdybder som funktion af højden, hvor stranden møder konstruktionen (minimumshøjde før storm). Tre stormscenarier.

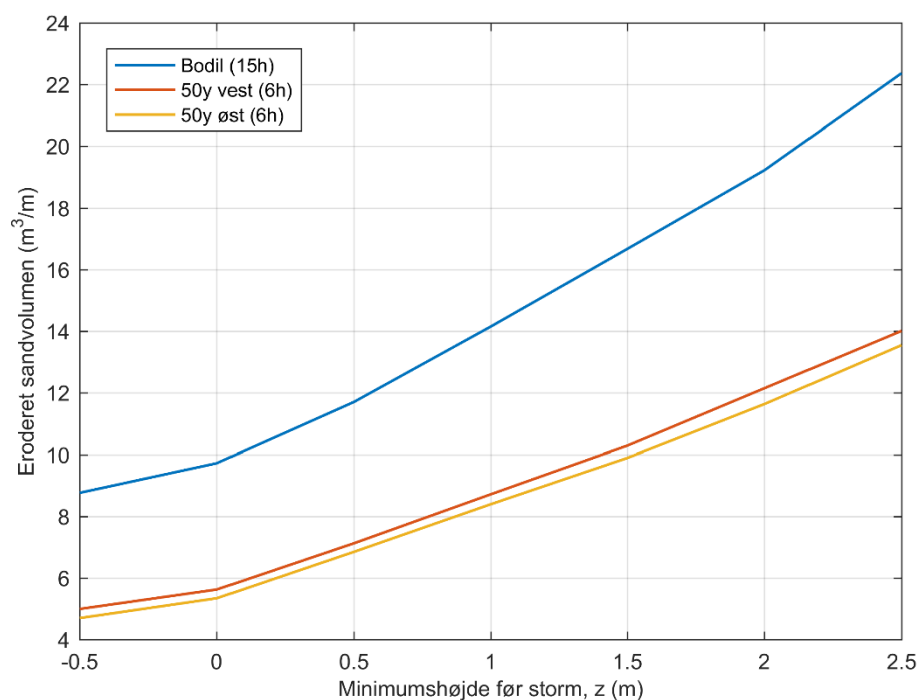
6.3.6.2 Erosionsvoluminer

Volumenet af sandet der eroderes fra området tæt foran konstruktionen og aflejres længere ude i profilet er angivet i nedenstående Tabel 6.9 og Figur 6-11 som eroderet volumen per løbende meter langs kysten. Det ses her at erosionsvolumener er i størrelsesordenen 7-22 m^3/m

afhængig af placeringen af konstruktionen. Jo højere konstruktionen er placeret des større volumener flyttes.

Tabel 6.9 Erosionsvolumener ved de tre stormscenarier for forskellige placeringer af konstruktionen.

	Total akut erosion volumen (m ³ /m)		
Initial minimumshøjde af strand foran konstruktionen (m)	50 års hændelse, Vest	50 årshændelse, Øst	Bodil
- 0.5	5.0	4.7	7.2
+0.0	5.6	5.3	8.1
+0.5	7.1	6.9	9.9
+1.0	8.7	8.4	12.1
+1.5	10.3	9.9	14.4
+2.0	12.2	11.6	16.8
+2.5	14.0	13.5	19.9



Figur 6-11 Erosionsvolumener ved de tre stormscenarier for forskellige placering af konstruktion.

6.3.7 Designbølgehøjder og vandstande foran konstruktion

Modellen opløser bølgegrupperne i den hydrodynamiske model og inkluderer således både de inducerede bundne lange bølger, deres frigivelse i brydningszonen, opskyl og refleksion. For at bestemme en middelbølgehøjde og middelvandstande til brug i design af konstruktionen, udregnes middelværdierne af de øjeblikkelige værdier over stormen af bølgehøjder og vandstande ved toppunktet. Der gives derudover værdier for variationen i vandstanden omkring middel. Endelig vises den totale vanddybde som afhænger af vandstanden og det eroderede bundniveau.

Middelbølgehøjden

Middelbølgehøjden beregnes ved at midle den øjeblikkelige bølgeenergi over bølgegrupperne over de sidste 3 timer af stormen. Dette resulterer i en middel bølgehøjde bestemt ved

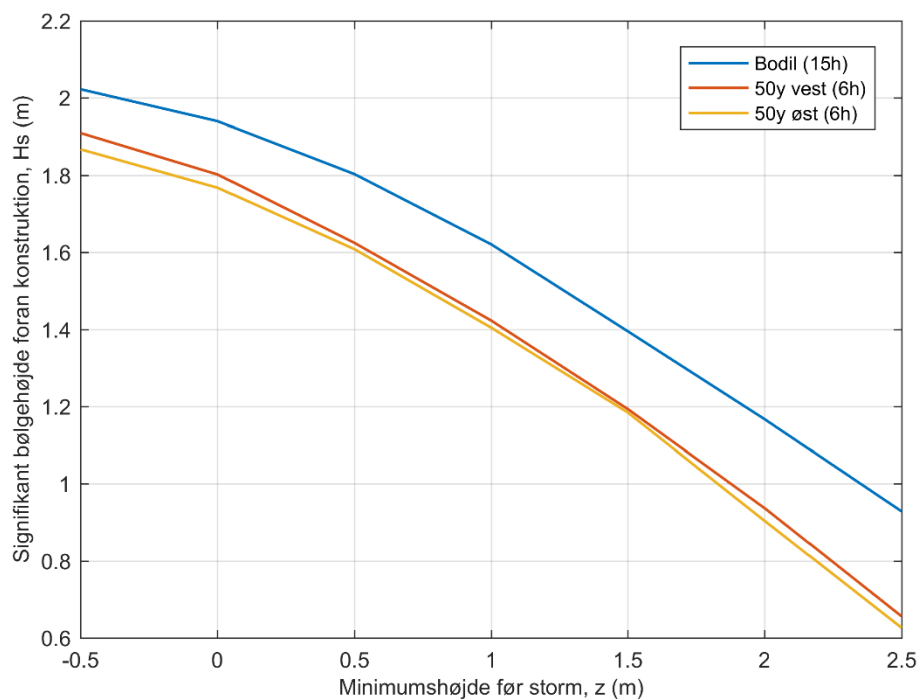
$$H = \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_{T_{slut}-\Delta T}^{T_{slut}} H(t)^2 dt}$$

T_{slut} er sidste tidspunkt, hvor stormen er på sit maksimum lige før den begynder at aftage og $H(t)$ er den øjeblikkelige bølgehøjde i det givne punkt (som varierer med bølgegrupperne). ΔT er perioden der midles over.

I Tabel 6.10 og Figur 6-12 ses den signifikante bølgehøjde foran konstruktionen som funktion af den initiale højde, hvor konstruktion og strand mødes før stormen. Der noteres overordnet at der her er tale om en situation med dybdebegrænset bølgebrydning, idet variationen af bølgehøjden i store stræk følger den totale dybde foran konstruktionen.

Tabel 6.10 Signifikant bølgehøjde foran konstruktion (top).

	Middel signifikant bølgehøjde, H_s (m)		
Initiel minimumshøjde af strand foran konstruktionen (m)	50 års hændelse, Vest	50 årshændelse, Øst	Bodil
- 0.5	1.91	1.87	2.02
+0.0	1.80	1.77	1.94
+0.5	1.62	1.61	1.80
+1.0	1.42	1.40	1.62
+1.5	1.19	1.18	1.39
+2.0	0.94	0.90	1.17
+2.5	0.66	0.63	0.93



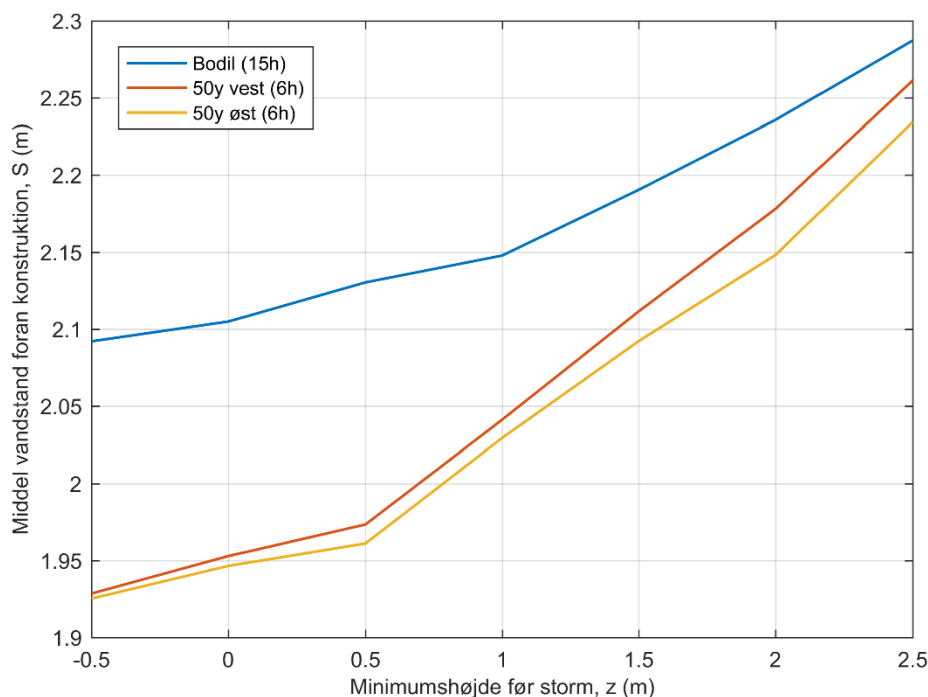
Figur 6-12 Signifikant bølgehøjde som funktion af initiel strandhøjde ved konstruktion.

Middelvandstanden

Middelvandstanden er bestemt som gennemsnittet af vandstanden foran konstruktion over de sidste 3 timer af den voldsomste del af stormen. I Tabel 6.11 og Figur 6-13 er resultatet af middelvandstanden foran konstruktion vist. Det ses at punktet foran konstruktionen i alle tilfælde er påvirket af bølge-setup pga. kræfterne fra bølgebrydningen, idet alle vandstande er højere end vandstanden på dybt vand.

Tabel 6.11 Middel vandstand foran konstruktionen (ved top).

	Middel vandstand, S (m)		
Initiel minimumshøjde af strand foran konstruktionen (m)	50 års hændelse, Vest	50 årshændelse, Øst	Bodil
- 0.5	1.93	1.93	2.09
+0.0	1.95	1.95	2.11
+0.5	1.97	1.96	2.13
+1.0	2.04	2.03	2.15
+1.5	2.11	2.09	2.19
+2.0	2.18	2.15	2.24
+2.5	2.26	2.23	2.29



Figur 6-13 Middelvandspejl ved slutningen af stormen, som funktion af minimumshøjde før storm.

Spredning

Vandstanden varierer under stormen omkring middelværdien svarende til den samlede effekt af bølgegrupper (bundne lange bølger, opstejling, brydning, frigivelse, opskyl og refleksion). Spredningen af denne variation er bestemt ved

$$dS = \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_{T_{slut}-\Delta T}^{T_{slut}} (S(t) - \bar{S})^2 dt}$$

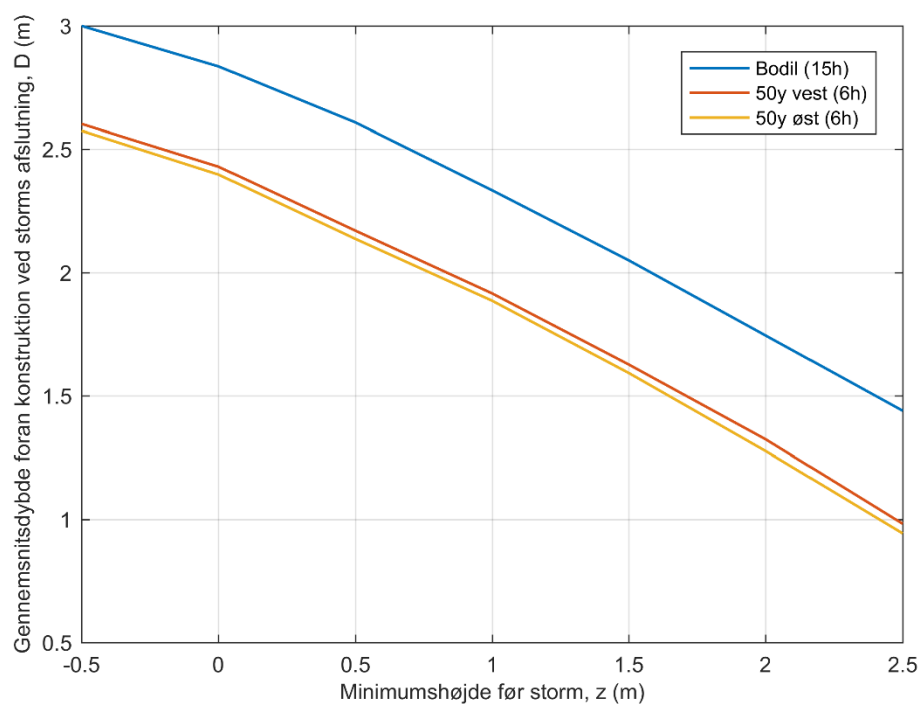
Værdier af spredningen for de tre stormscenarier er angivet i Tabel 6.12.

Tabel 6.12 Vandstandens variation om middel angivet som spredningen for de tre stormscenarier.

Variation af vandstand om middel, spredning, dS (m)		
50 års hændelse, Vest	50 årshændelse, Øst	Bodil
0.27	0.25	0.30

Total vanddybde

Den total middel-vanddybde er en relevant parameter, idet bølgerne er begrænsede af samme dybde. Dybden er bestemt af summen af vandstand og højde af den eroderede strand foran konstruktionen. I Figur 6-14 ses middel dybden som funktion af de forskellige placeringer af konstruktionen på stranden.



Figur 6-14 Gennemsnitlig vanddybde foran konstruktionen i slutningen af stormen, som funktion af minimumshøjde før storm.

Denne side skal være blank.

7 Overordnede konklusioner

Der er gennemført et modelleringsstudie af Nordkystens kystfysiske forhold herunder de meteomarine forhold (bølger og vandstande), langsgående sandtransportrater, kronisk erosion (erosion over lang tid) og akut erosion foran skråningsbeskyttelse (erosion under ekstreme storme). Dette studie har dels konsolideret forståelsen af centrale meteomarine og morfologiske processer, der danner baggrund for designet af den overordnede kystbeskyttelsesstrategi ved Sjællands Nordkyst, dels produceret en række grunddata som input dette design.

De meteomarine forhold er udarbejdet i form af variationer i middel og ekstremstatikker langs hele strækningen fra Hundested til Helsingør, hvilket - sammen med de opmålte kystprofiler og sandlagstykkelser udført i forundersøgelsesdelen - danner basis for vurderingerne af sedimenttransport og erosion på lang og kort tidsskala på kysten.

De langsgående transportrater er beregnet for 21 profiler dækkende de af NIRAS udpegede fodringsområder og korrigeret for manglende sand, konstruktioner og effekten af langsgående regionale strømme udenfor brydningszonen. Analysen for nutidige forhold konsoliderer forståelsen af den kroniske erosion og understreger centrale forhold i hele strækningens morfologi. Beregninger med tilført sandfodringsmateriale viser at sandfodring ikke vil ændre den overordnede transportdynamik som dermed kan anvendes direkte til at modgå den kroniske erosion.

Akuterrosion over ekstreme storme foran en skråningsbeskyttelseskonstruktion med en 1:2 hældning er beregnet for tre udvalgte stormscenarier. Kurver for erosionsforhold og bølgeforhold er produceret på baggrund af disse beregninger. Beregninger viser at der under meget ekstreme storme eroderes kraftigt på den øvre del af stranden og foran skråningsbeskyttelsen.

Et vigtigt datagrundlag er hermed etableret som input til NIRAS for at vælge det endelige design af sandfodringerne langs de udvalgte strækninger og for at udvikle retningslinjer for, hvordan skråningsbeskyttelse kan udformes med henblik på at minimere risikoen for tab af grundareal ved situationer med akut erosion under særligt ekstreme hændelser.

Denne side skal være blank.

8 Referencer

- /1/ Nordkysten, Kystpleje og Kystsikring teknisk rapport udarbejdet af Hostrup-Schultz & Sørensen og DHI på vegne af Fællesudvalget for kystpleje og kystsikring af Nordkysten, 1978
- /2/ Nordkysten, Kystpleje og Kystsikring teknisk rapport udarbejdet af Hostrup-Schultz & Sørensen og DHI på vegne af Fællesudvalget for kystpleje og kystsikring af Nordkysten, 1984
- /3/ Sjællands nordkyst, strandfodringsforsøg Hald strand, teknisk rapport udarbejdet af Fællesudvalget for kystpleje og kystsikring af Nordkysten, 1987
- /4/ Genanvendelse af havesand fra Gilleleje og Hornbæk havne, teknisk brochure udarbejdet af Hasløv & Kjærsgaard i samarbejde med DHI for Gribskov kommune og Helsingør kommune, 2013
- /5/ Nordkystens Fremtid, Kystteknisk skitseprojekt, udarbejdet af COWI, NIRAS, DHI samt Hasløv & Kjærsgaard for Gribskov kommune, Halsnæs kommune og Helsingør kommune, 2016
- /6/ Erosionsatlas, Metodeudvikling og Pilotprojekt for Sjællands nordkyst. Teknisk rapport produceret af DHI til Kystdirektoratet, 2013
- /7/ Kristensen, S.E., Drønen, N., Deigaard, R. og Fredsoe, J. (2013). Hybrid morphological modelling of shoreline response to a detached breakwater. Coastal Engineering, Vol. 71, s. 13-27
- /8/ Kristensen, S.E., Drønen, N., Deigaard, R. og Fredsoe, J. (2016). Impact of groyne fields on the littoral drift: A hybrid morphological modelling study. Coastal Engineering, Vol. 111, s. 13-22
- /9/ Nordkystens Fremtid: Forundersøgelser, Topografisk survey, Datarapport udarbejdet af NIRAS til Gribskov kommune. 6. december 2017.
- /10/ Nordkystens Fremtid: Forundersøgelser, Bathymetrisk survey på lavt vand. Datarapport udarbejdet af NIRAS til Gribskov kommune. 19. februar 2018.
- /11/ Nordkystens Fremtid: Forundersøgelser, Sedimentprøver på land. Datarapport udarbejdet af NIRAS til Gribskov kommune. 21. februar 2018.
- /12/ Nordkystens Fremtid – Forundersøgelser, Bathymetrisk opmåling og bestemmelse af sandlag. Datarapport udarbejdet af DHI til NIRAS. 20. marts 2018
- /13/ Nordkystens Fremtid – Forundersøgelser, Sedimentprøver fra havbunden. Datarapport udarbejdet af DHI til NIRAS. 15. marts 2018.
- /14/ Drønen N., Sørensen, P., Deigaard, R., Kristensen, S. and Ries, O. 2017, A model based study of sand nourishment decay, Proceeding in Coastal Dynamics 2017, Paper no . 220, Coastal Dynamics conference, Helsingør 2017.
- /15/ Genanvendelse af havnesand fra Gilleleje og Hornbæk havne. Teknisk publikation udarbejdet af DHI og Hasløv & Kjærsgaard for Gribskov og Helsingør kommune, Endelig rapport, 23. maj 2013.

Denne side skal være blank.

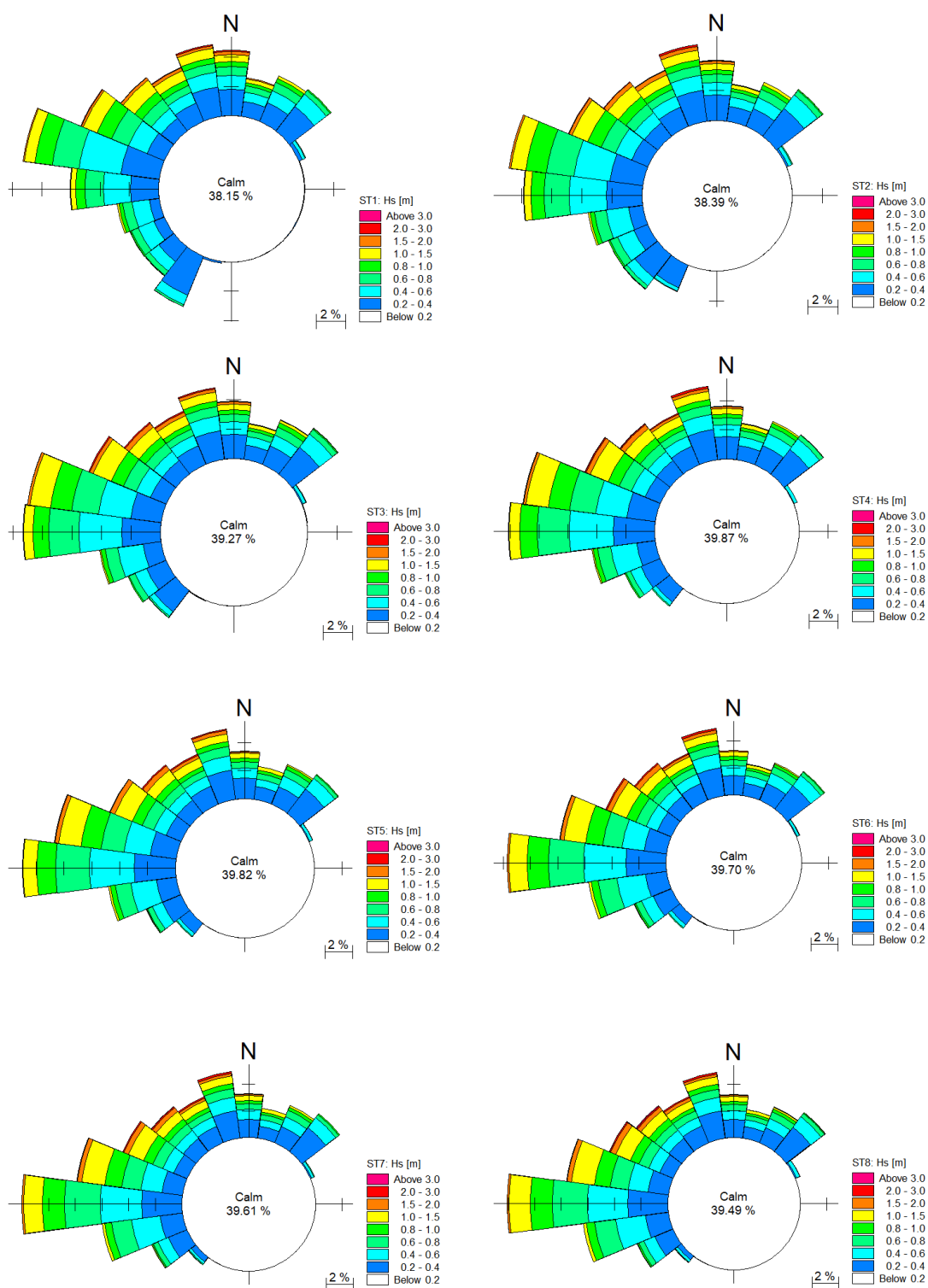
BILAG

BILAG A – Meteomarine forhold

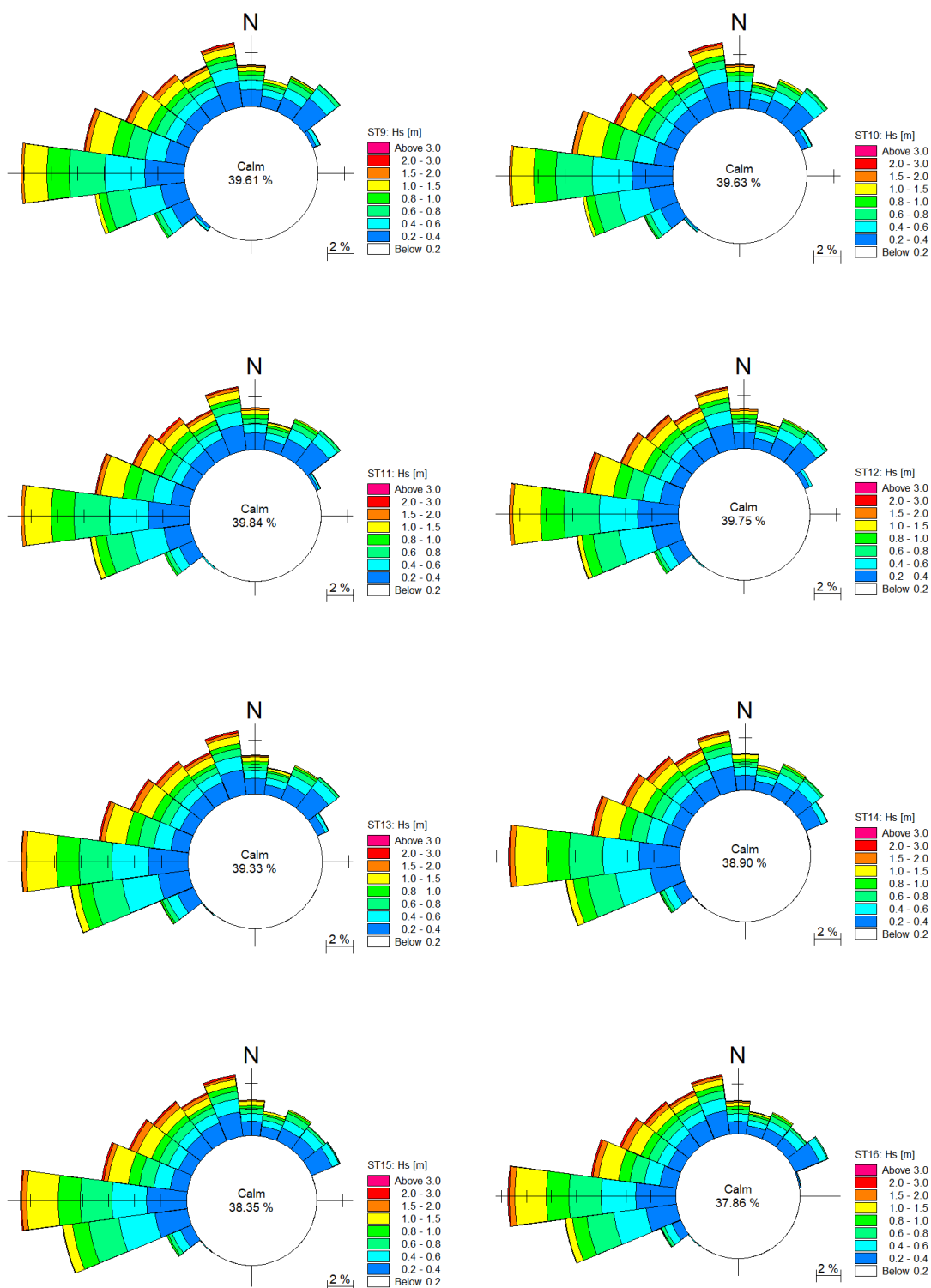
Vandstands- og bølgeforhold

A Meteomarine forhold

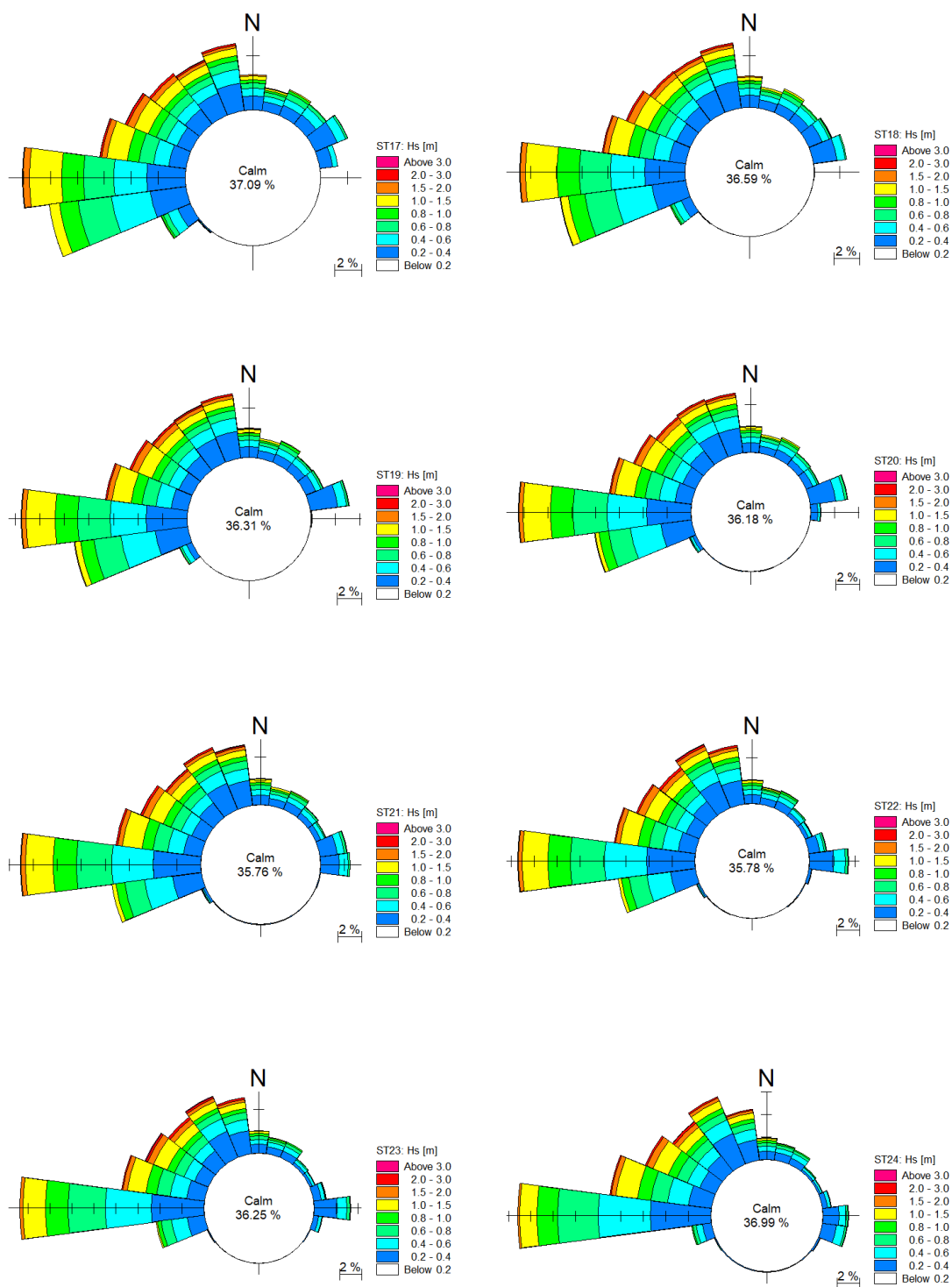
A.1 Bølgeroser i de 40 stationer



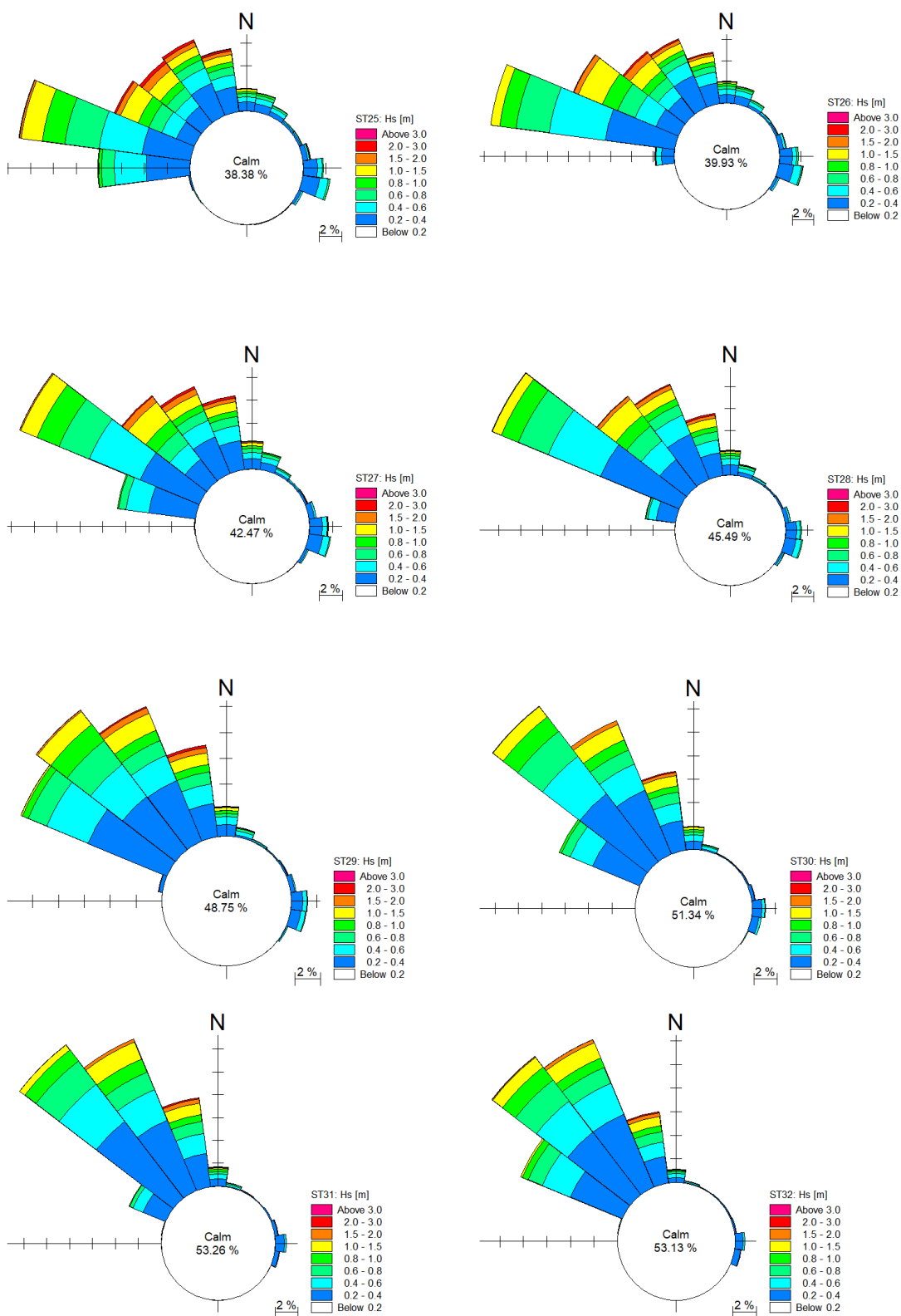
Figur A.1 Bølgeroser station 1-8.



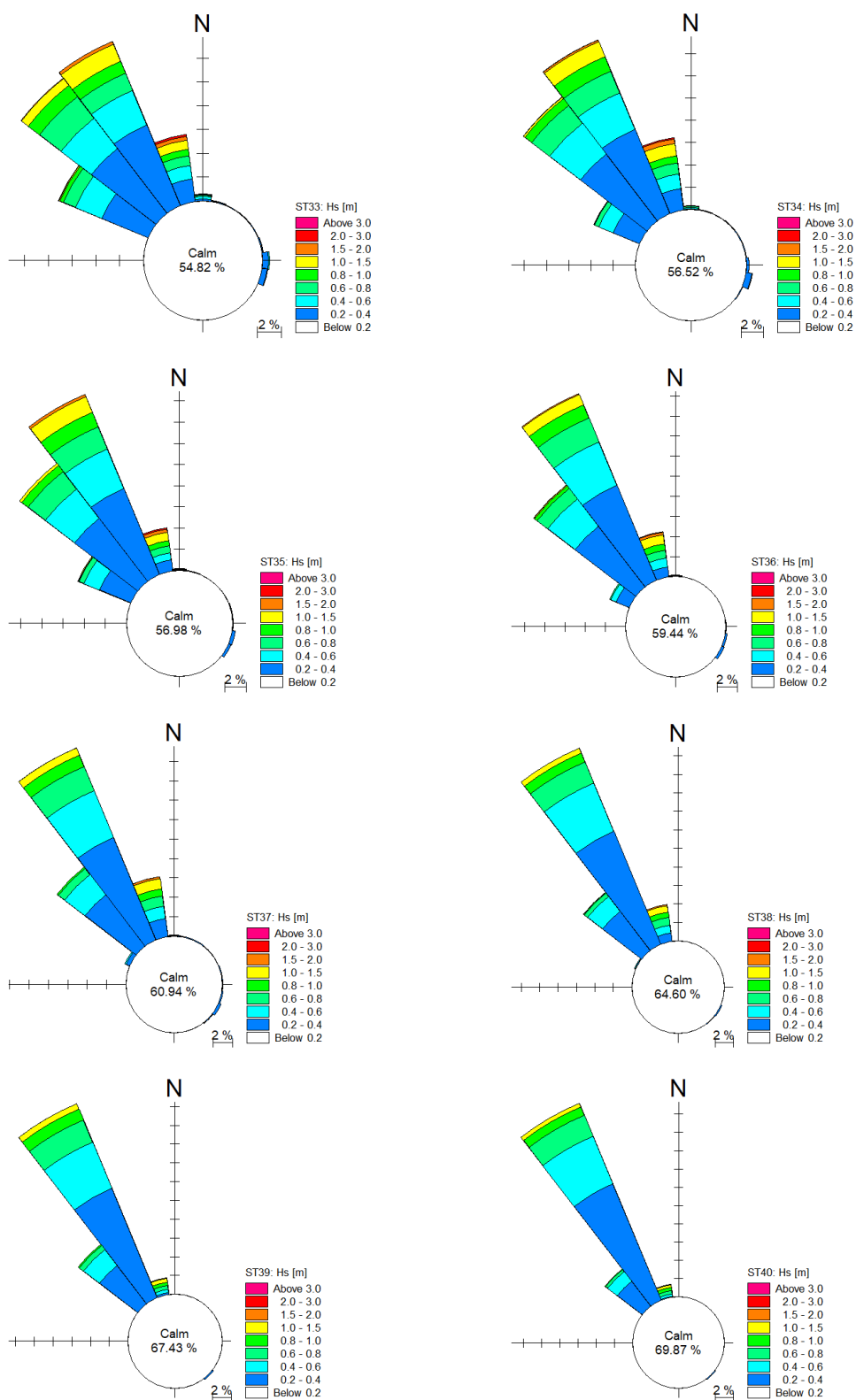
Figur A.2 Bølgeroser station 9-16.



Figur A.3 Bølgeroser station 17-24.

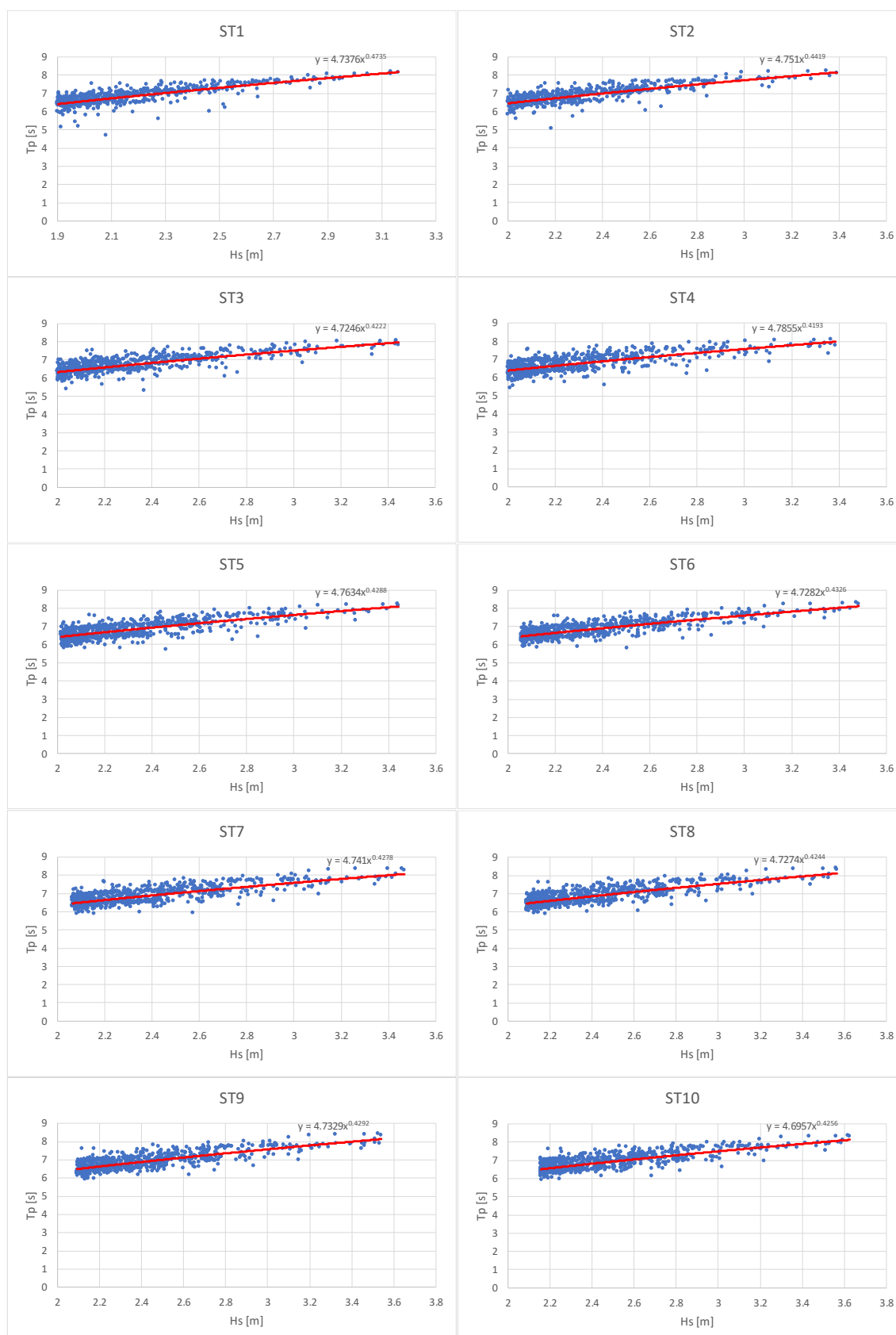


Figur A.4 Bølgeroser station 25-32.

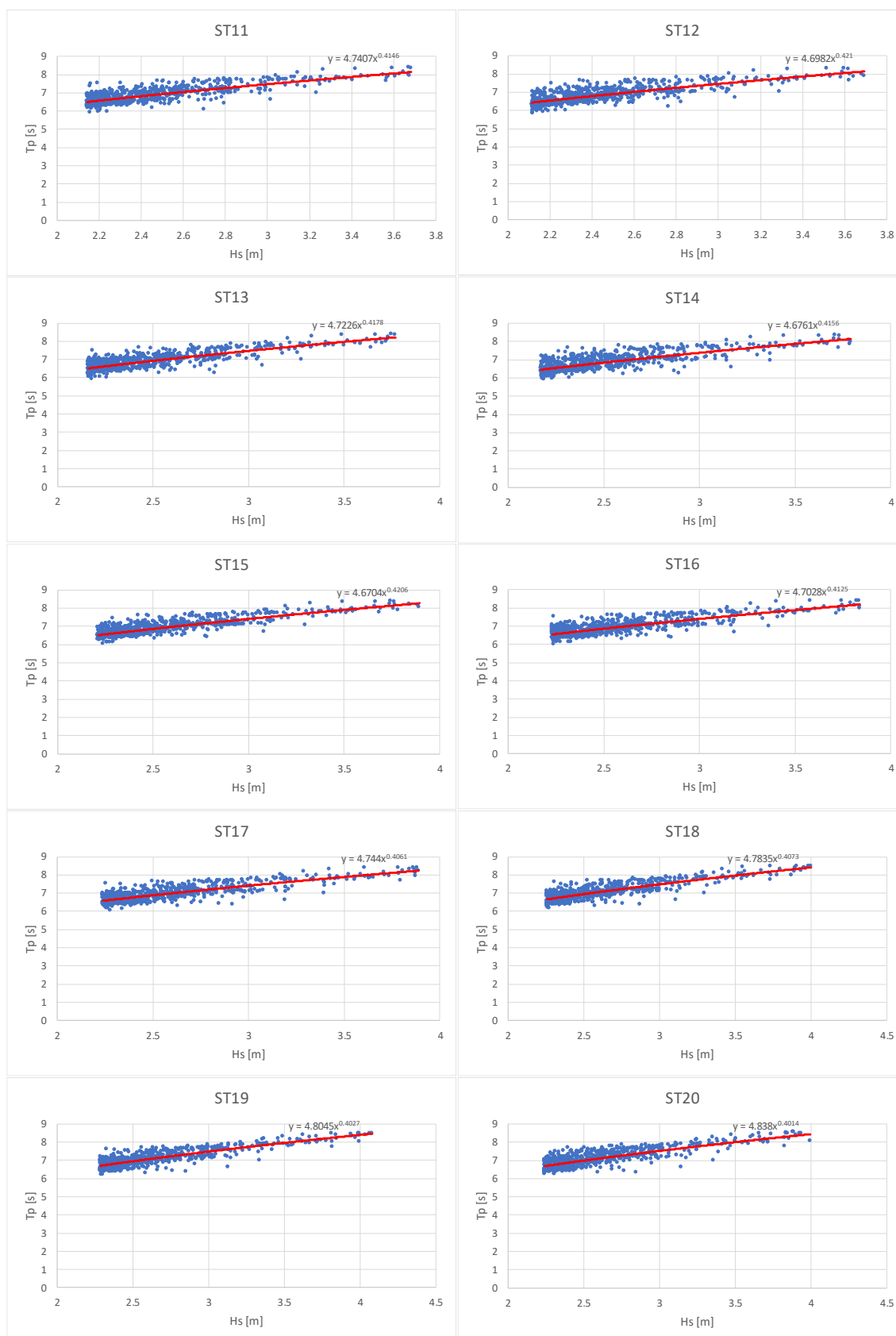


Figur A.5 Bølgeroser station 33-40.

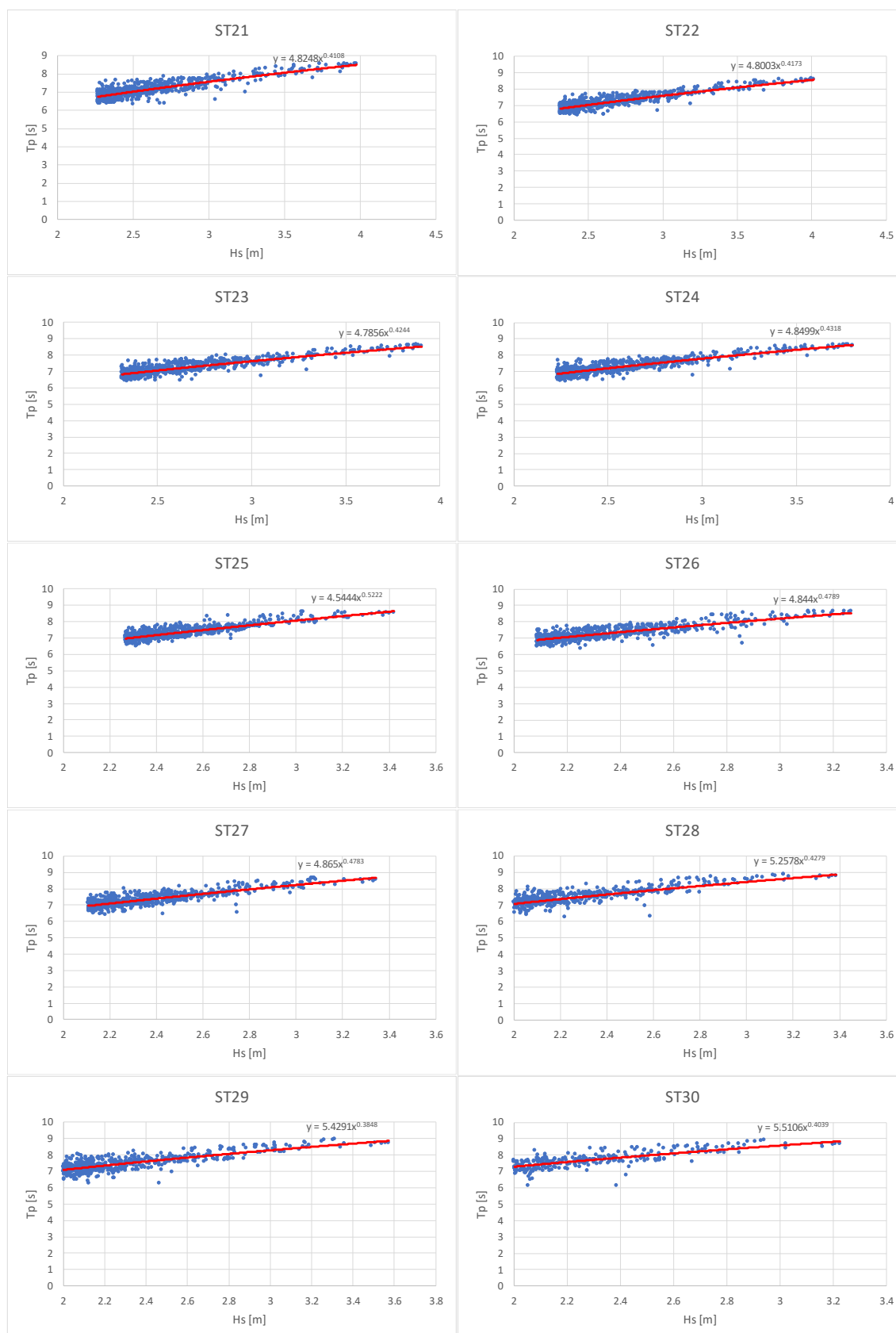
A.2 Relationer mellem bølgehøjder og peak bølgeperiode



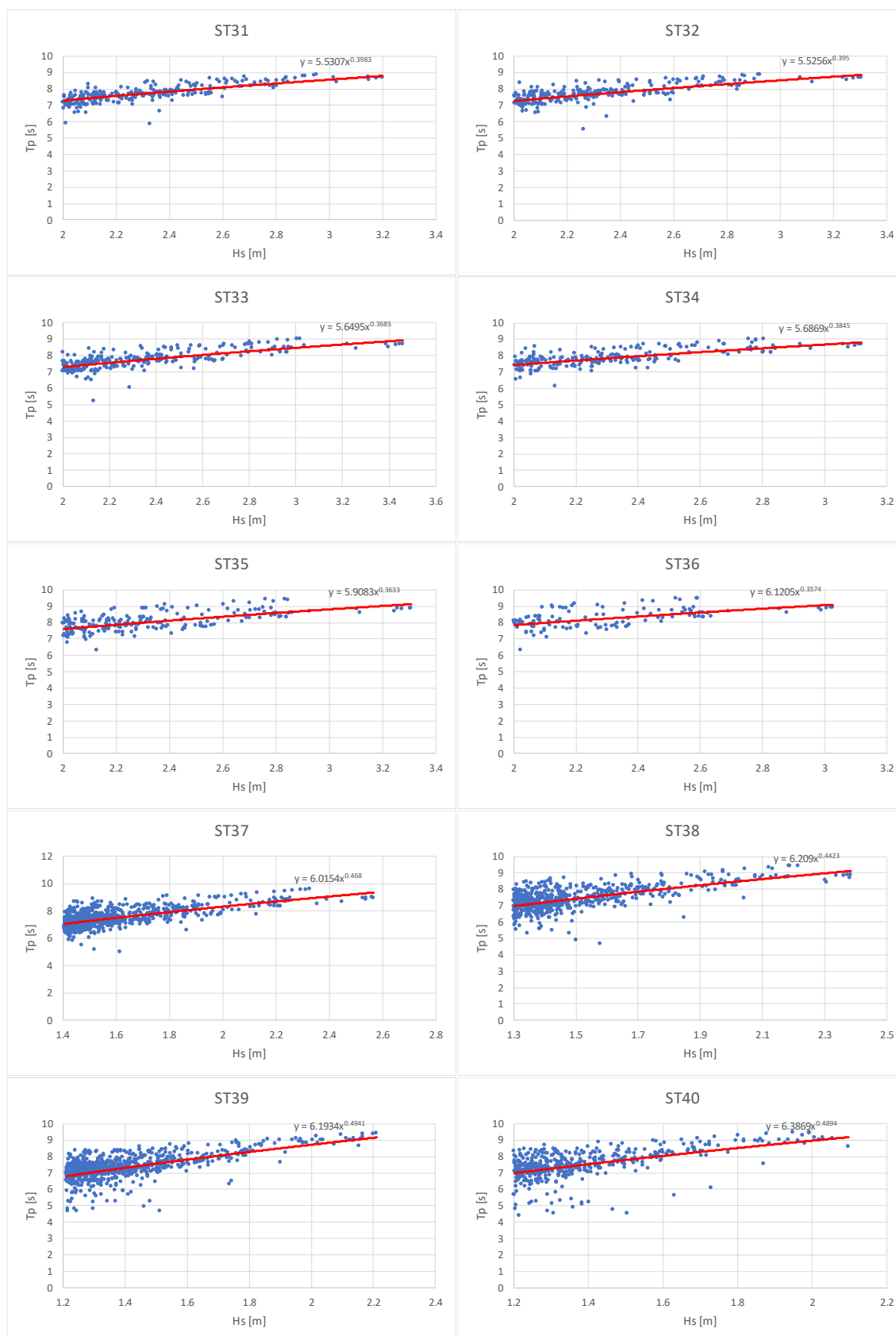
Figur A.6 Relation mellem signifikant bølgehøjde og peak bølgeperiode station 1-10.



Figur A.7 Relation mellem signifikant bølgehøjde og peak bølgeperiode station 11-20.

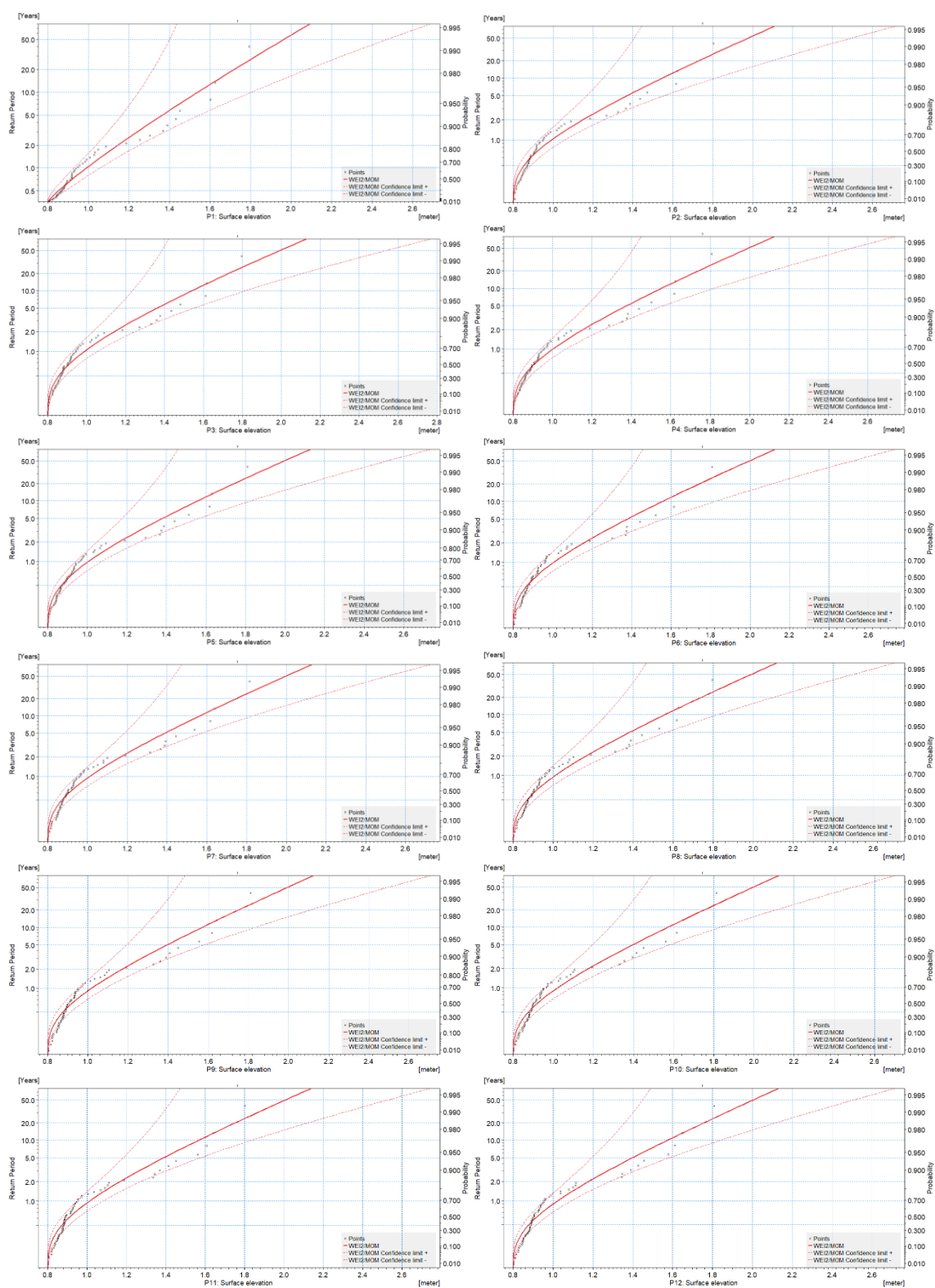


Figur A.8 Relation mellem signifikant bølgehøjde og peak bølgeperiode station 21-30.

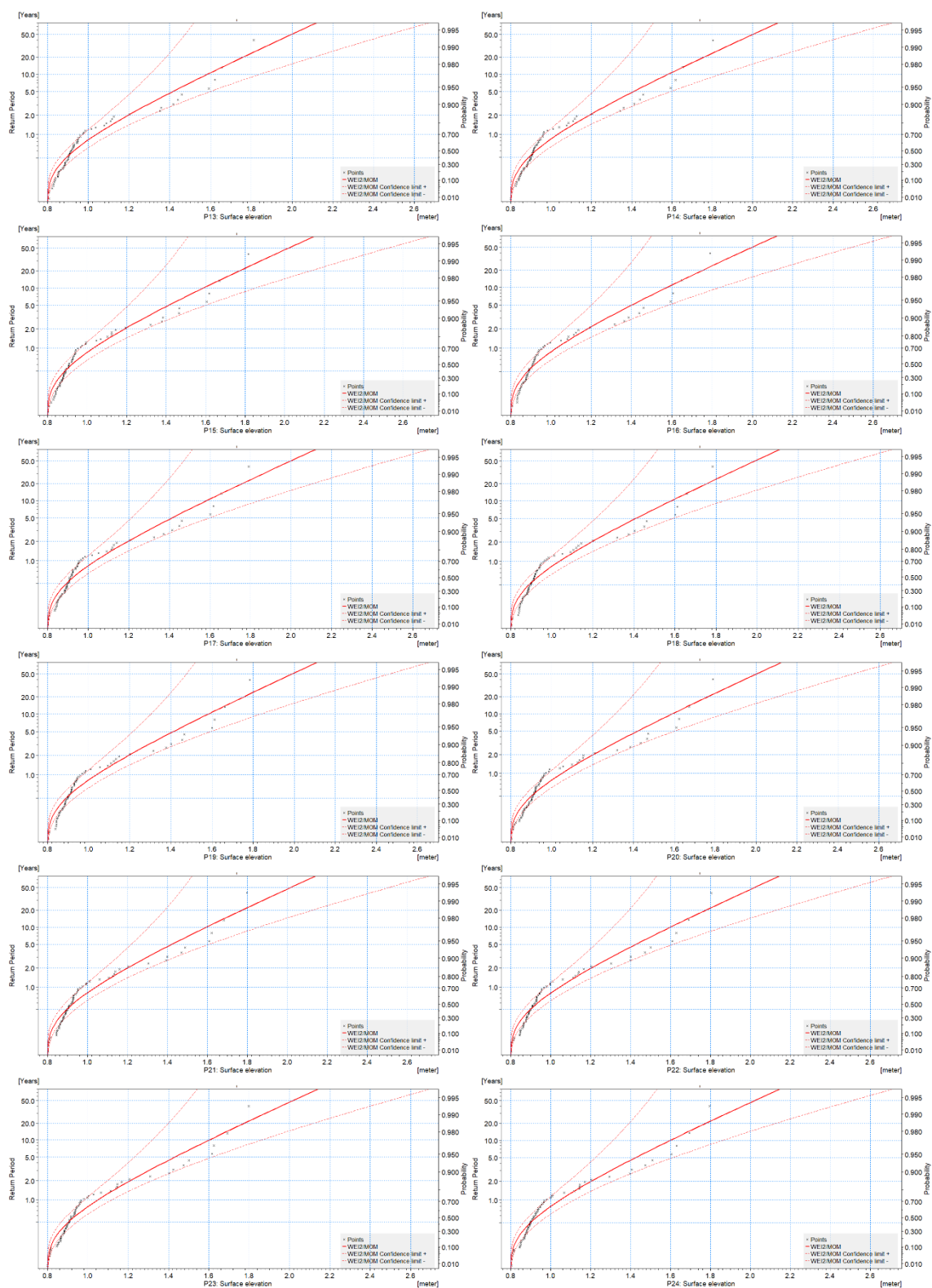


Figur A.9 Relation mellem signifikant bølgehøjde og peak bølgeperiode station 31-40.

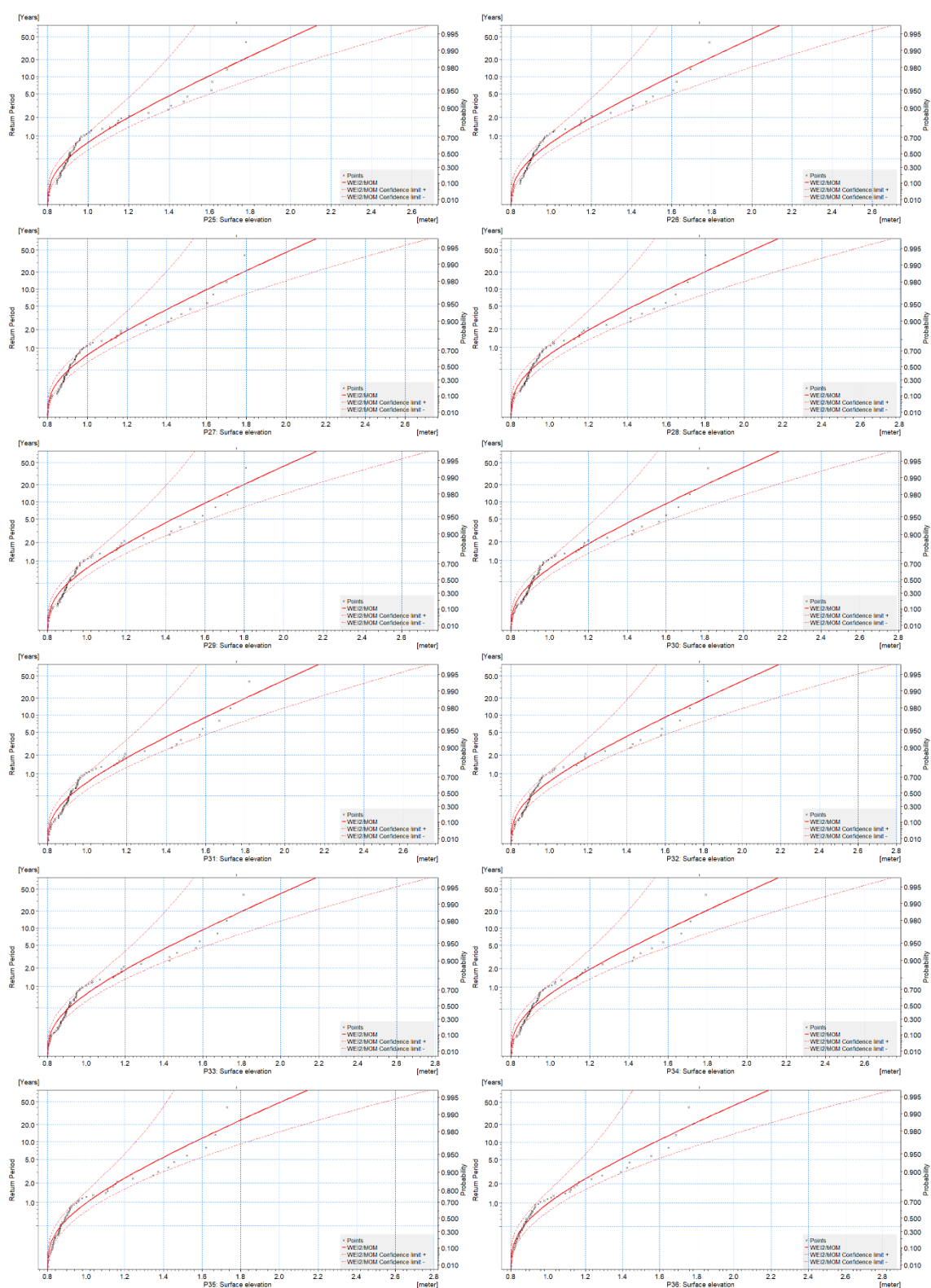
A.3 Højvandsstatistik for Nordkysten



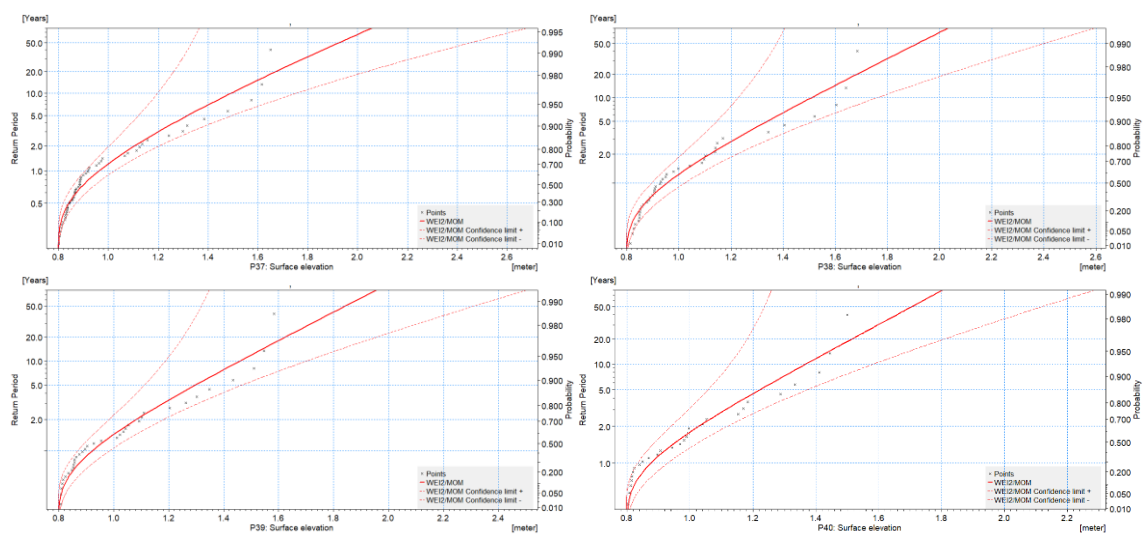
Figur A.10 Ekstremstatistik for vandstanden i udtrækspunkterne ST1-ST12 baseret på modellerede vandstande i perioden 1997-2016.



Figur A.11 Ekstremstatistik for vandstanden i udtrækspunkterne ST13-ST24 baseret på modellerede vandstande i perioden 1997-2016.

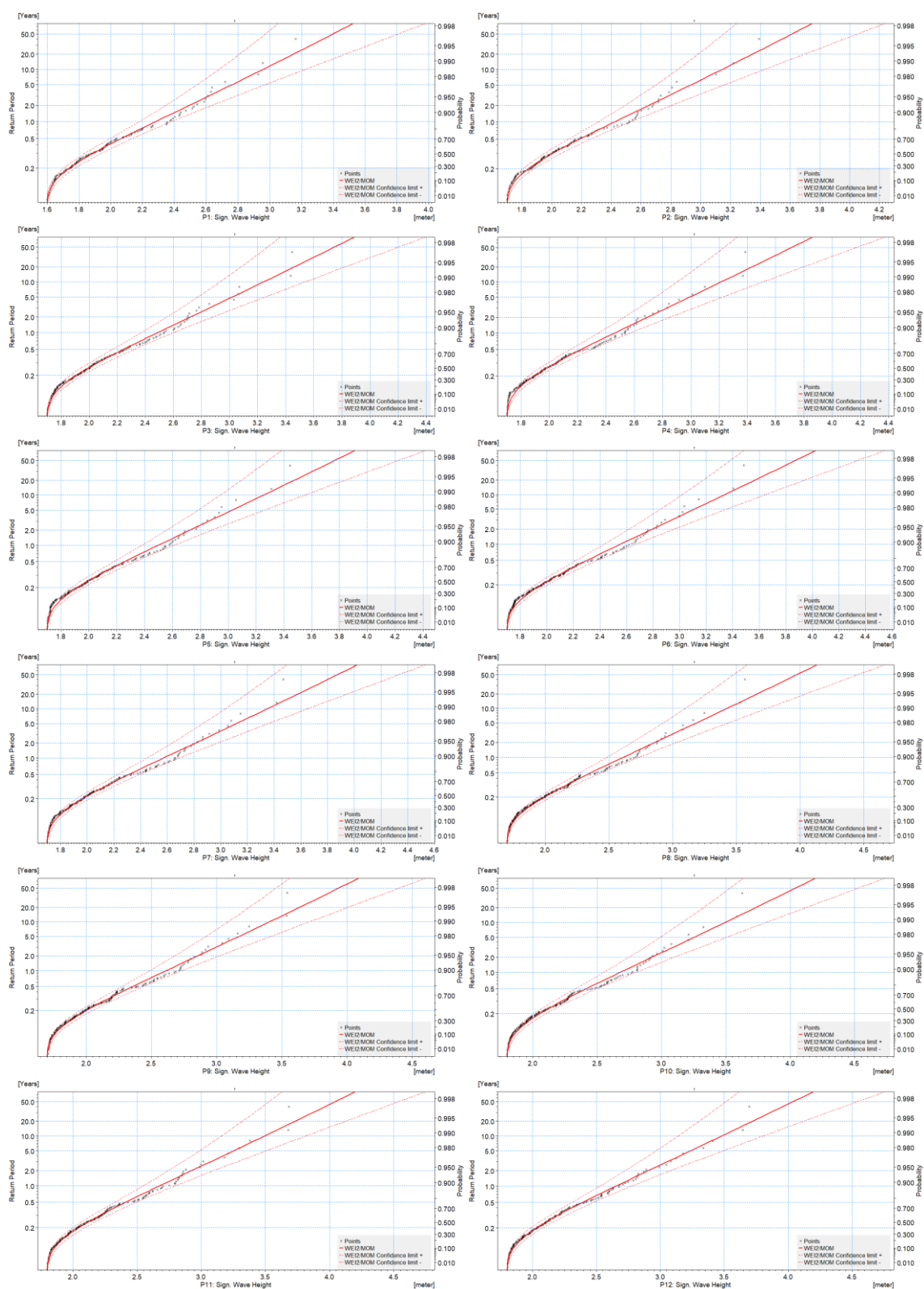


Figur A.12 Ekstremstatistik for vandstanden i udtrækspunkterne ST25-ST36 baseret på modellerede vandstande i perioden 1997-2016.

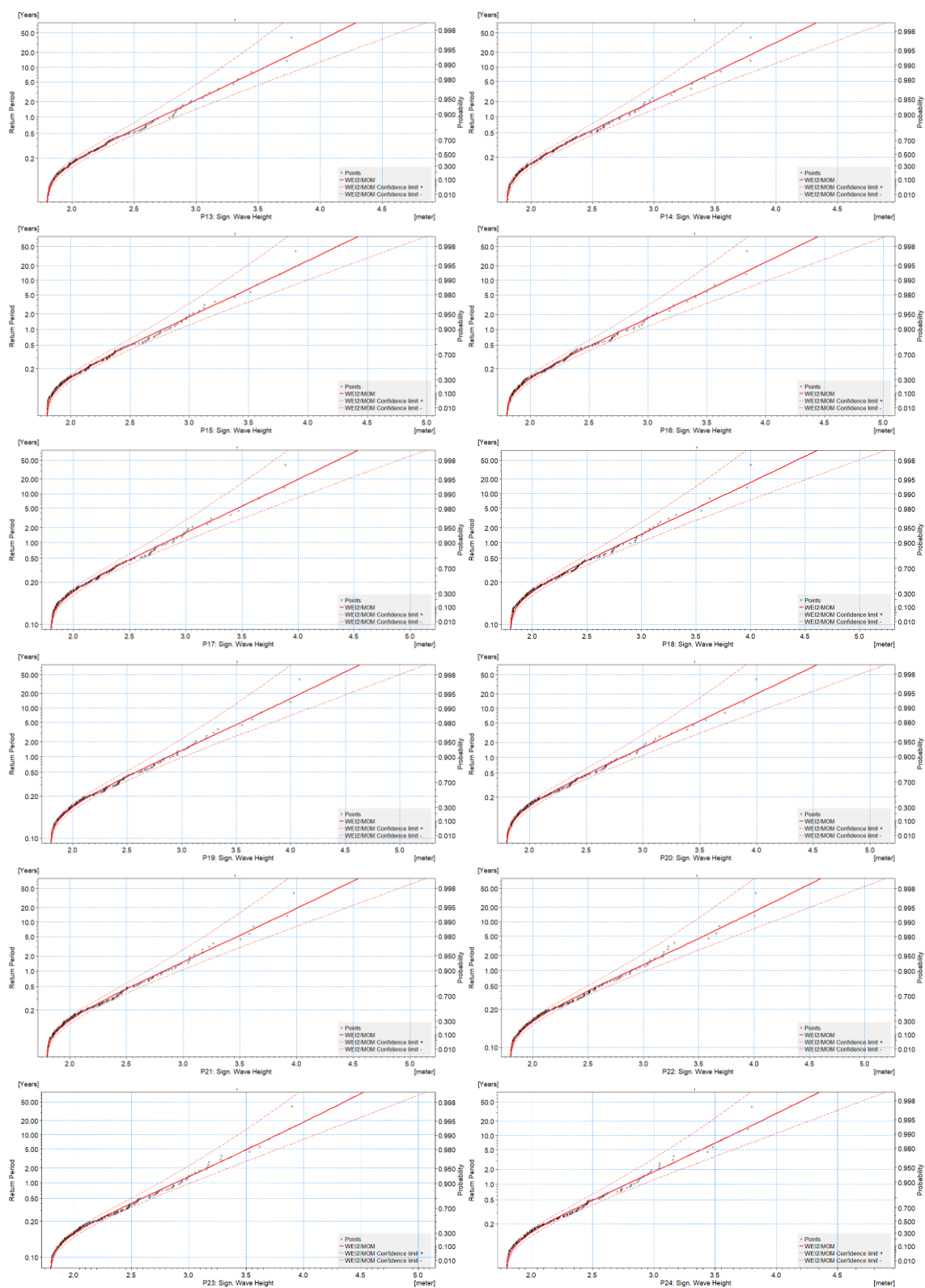


Figur A.13 Ekstremstatistik for vandstanden i udtrækspunkterne ST37-ST40 baseret på modellerede vandstande i perioden 1997-2016.

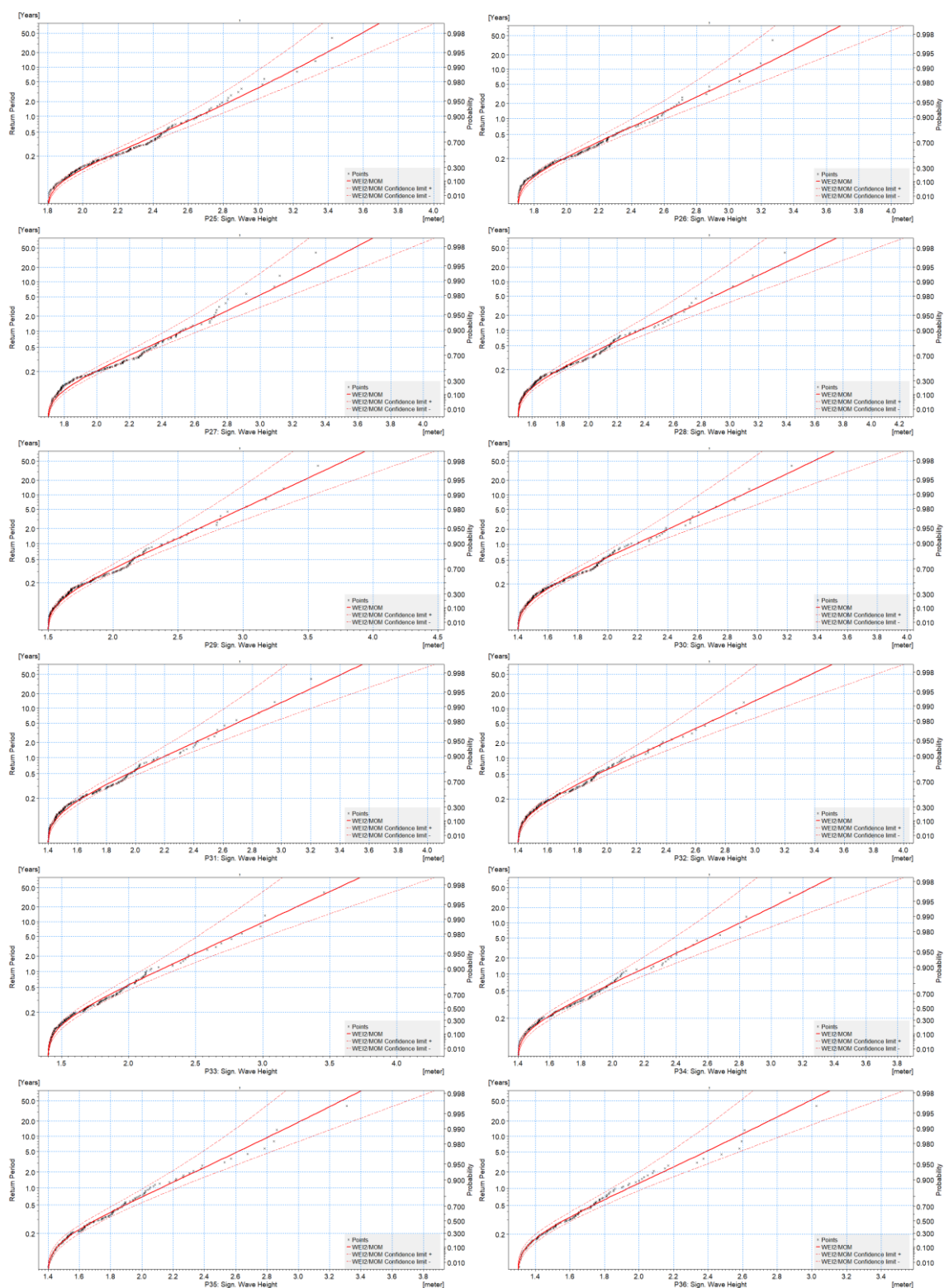
A.4 Ekstremløgestatistik for Nordkysten



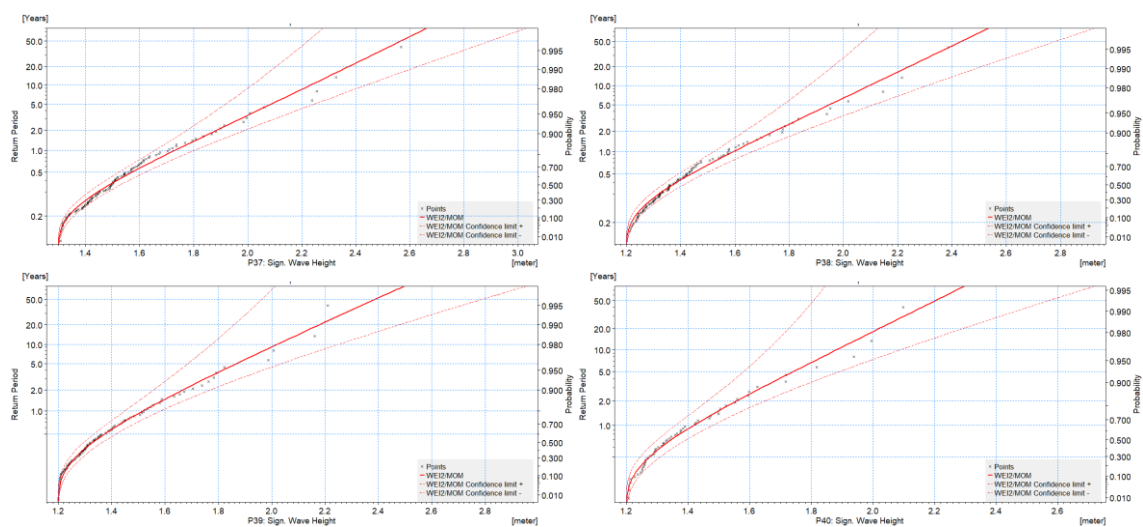
Figur A.14 Bølgeekstremløgestatistik i udtrækspunkterne ST1-ST12 baseret på modellerede bølgehøjder i perioden 1997-2016.



Figur A.15 Bølgeekstremstatistik i udtrækspunkterne ST13-ST24 baseret på modellerede bølgehøjder i perioden 1997-2016.



Figur A.16 Bølgeekstremstatistik i udtrækspunkterne ST25-ST36 baseret på modellerede bølgehøjder i perioden 1997-2016.



Figur A.17 Bølgeekstremstatistik i udrækspunkterne ST37-ST40 baseret på modellerede bølgehøjder i perioden 1997-2016.

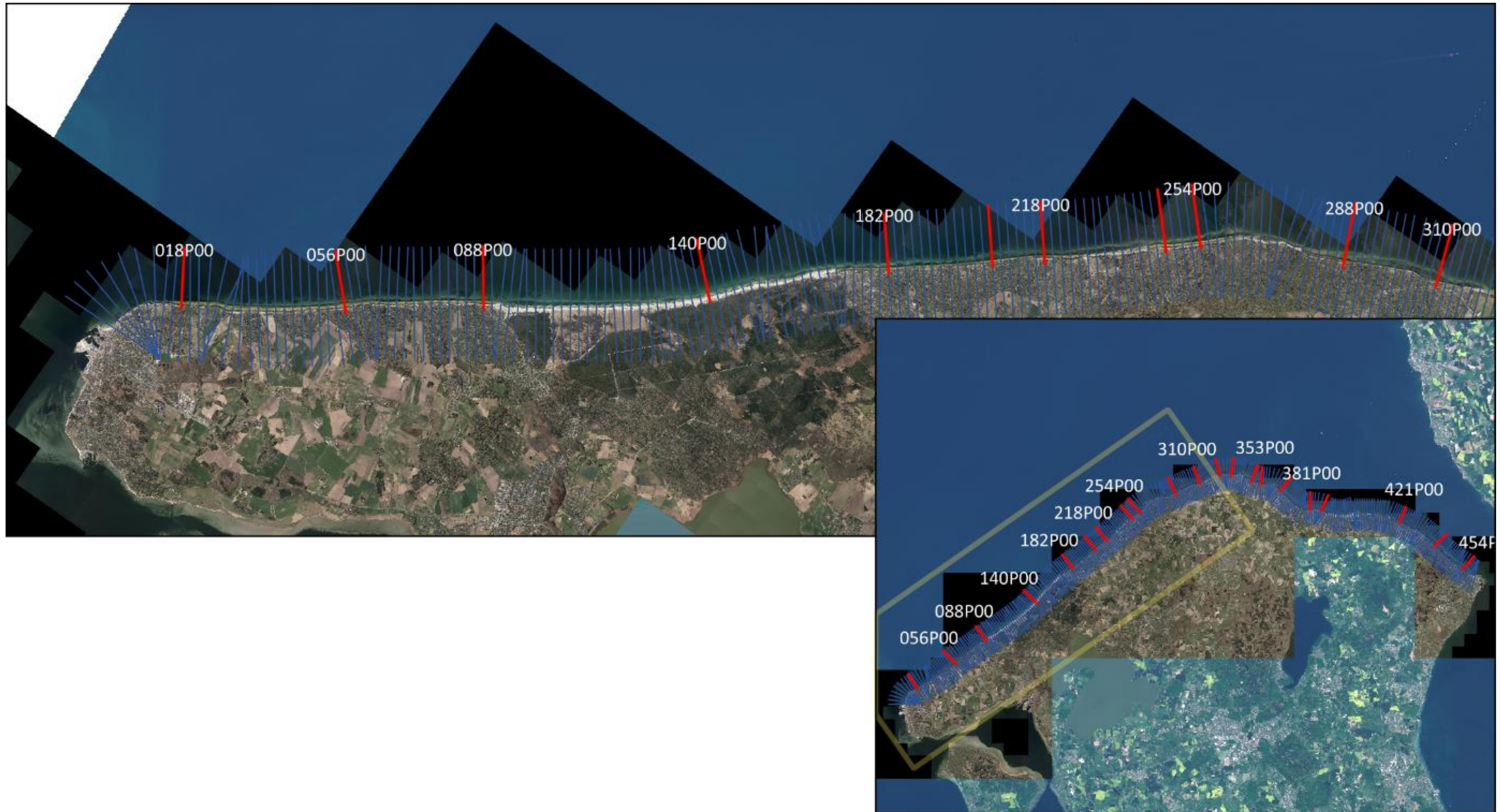
BILAG B – Langsgående sandtransport

Modelresultater fra 21 kystprofiler

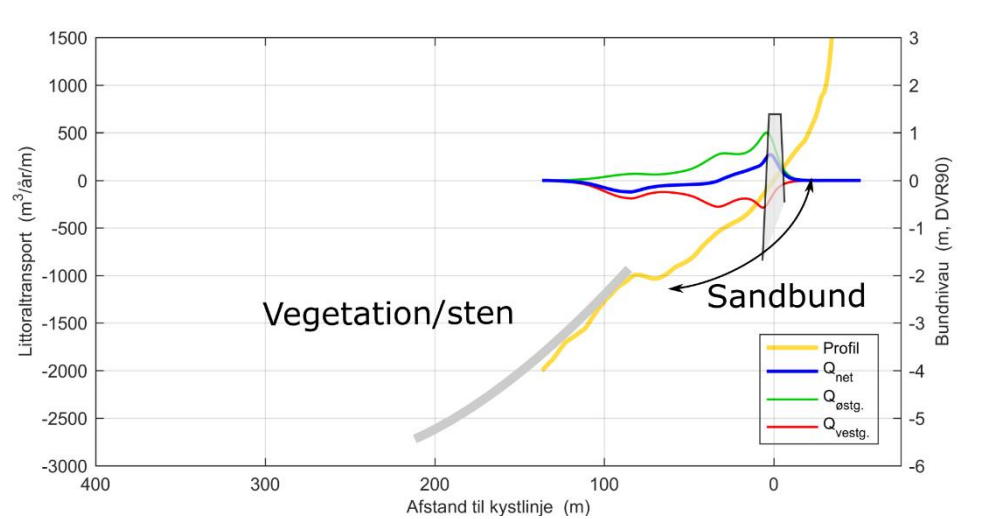
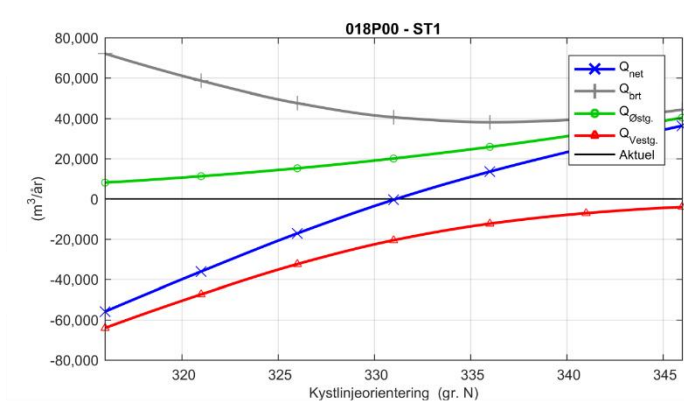
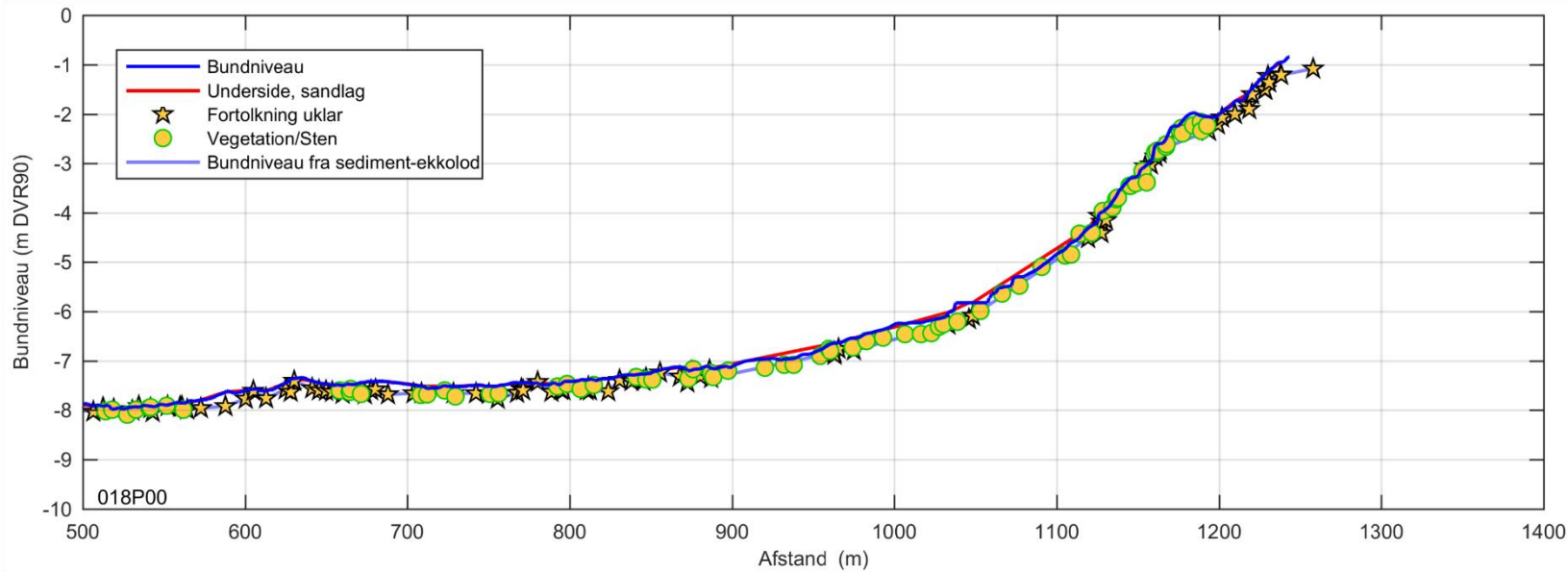
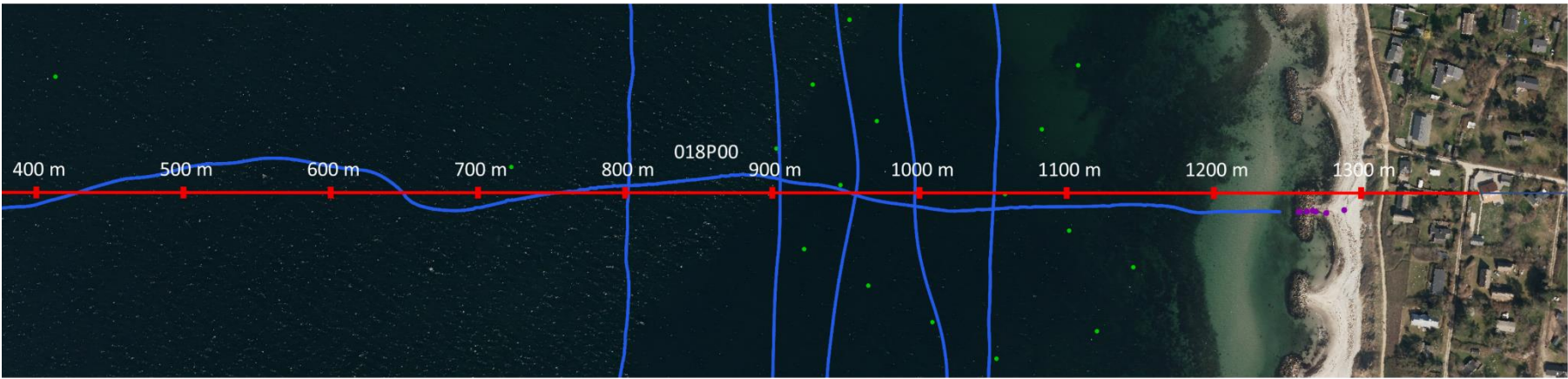
B Langsgående sandtransport

Introduktion til opbygning af dette appendiks.

B.1 Korrektion af langstransporten for eksisterende kyst – Profiler vest for Gilleleje havn

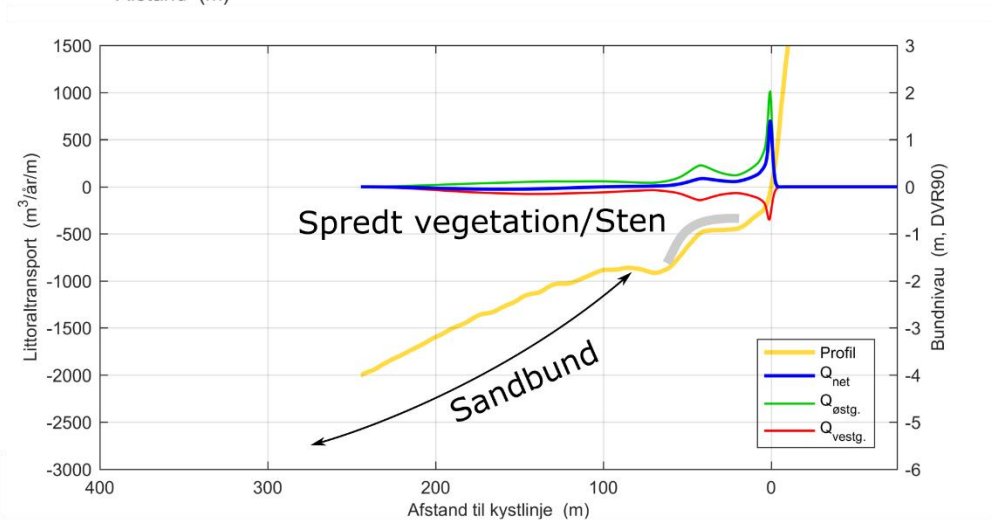
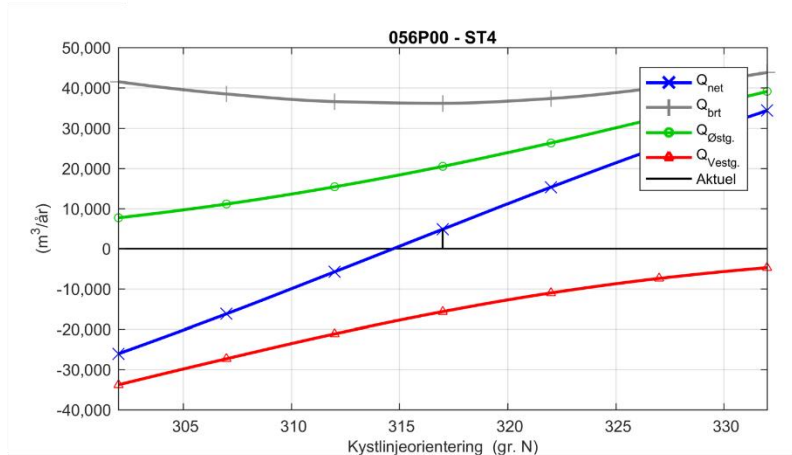
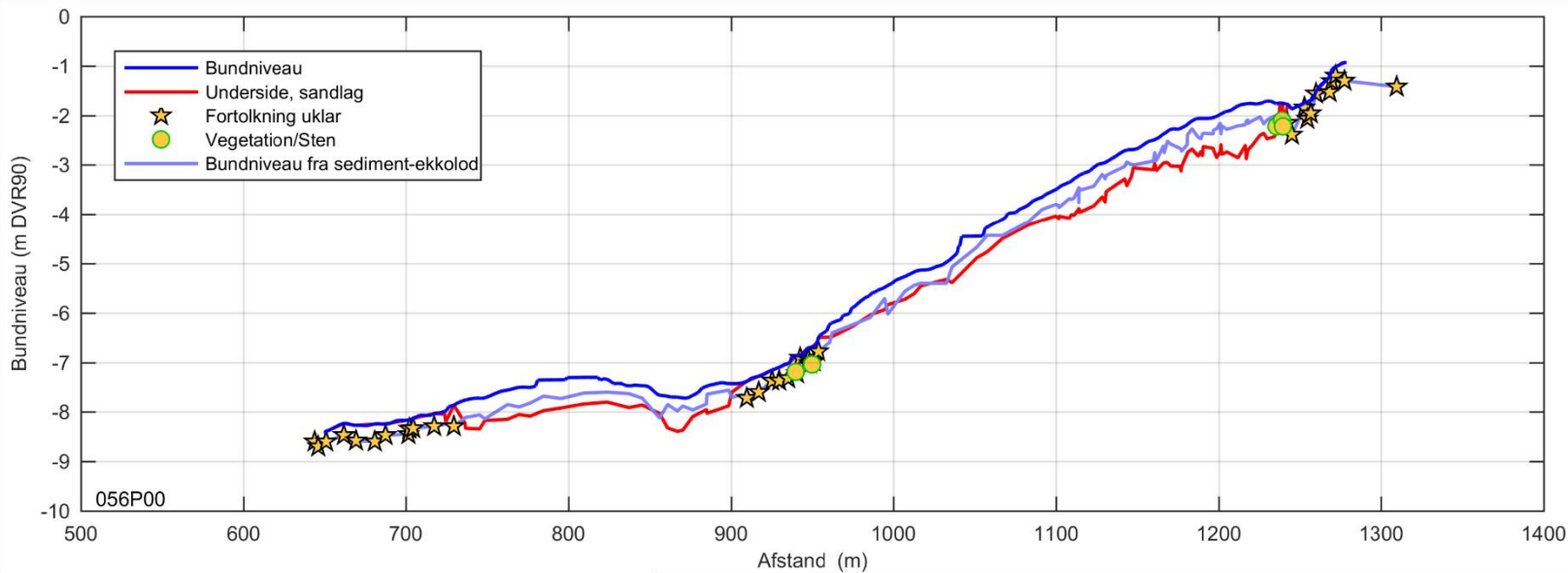
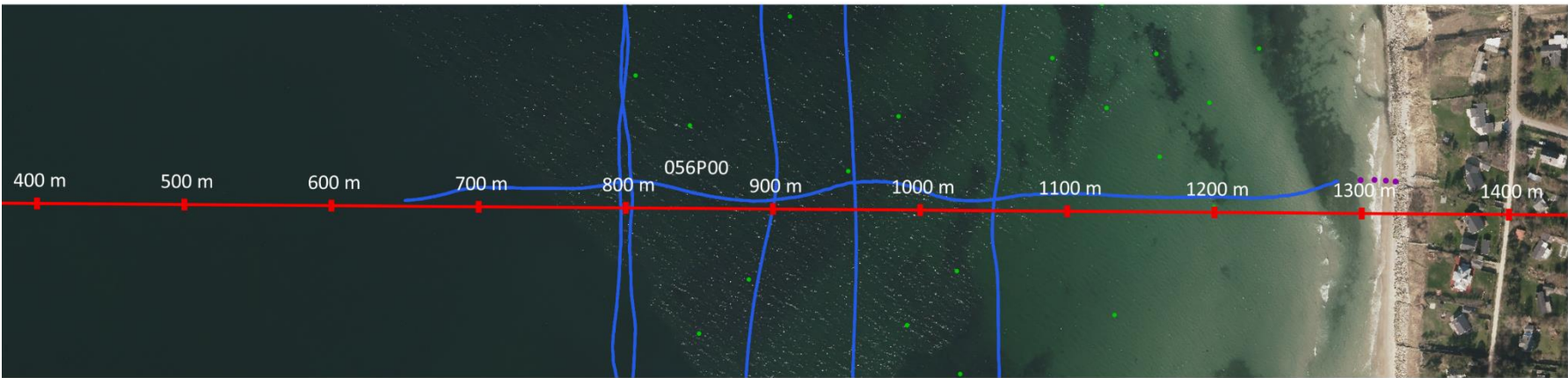


B.1.1 Profil 018P00 – Kikhavn – Liseleje fodringsområde



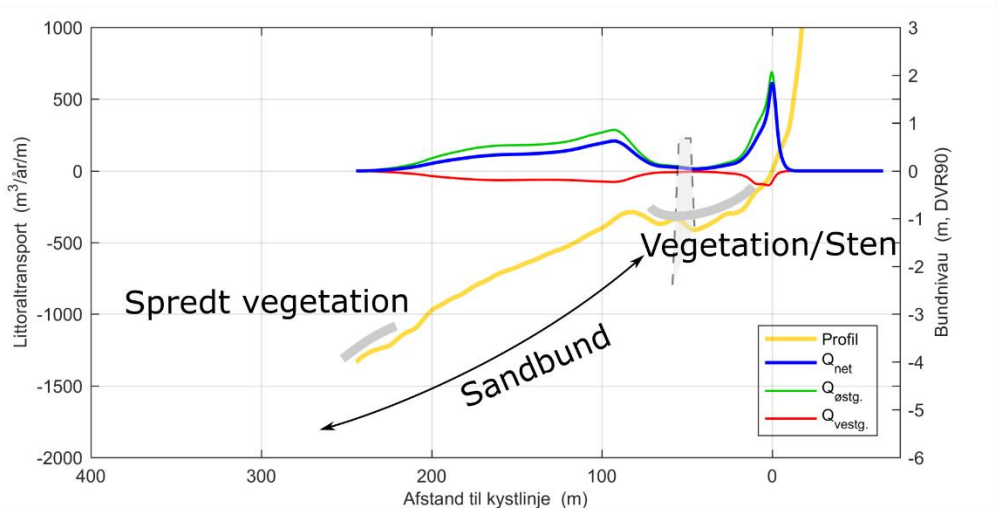
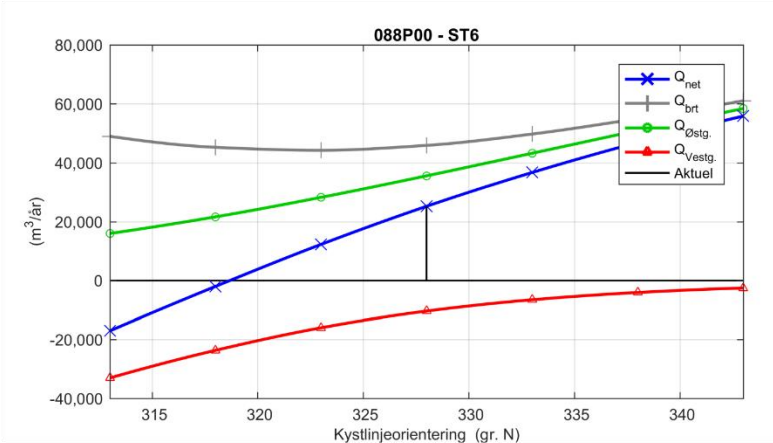
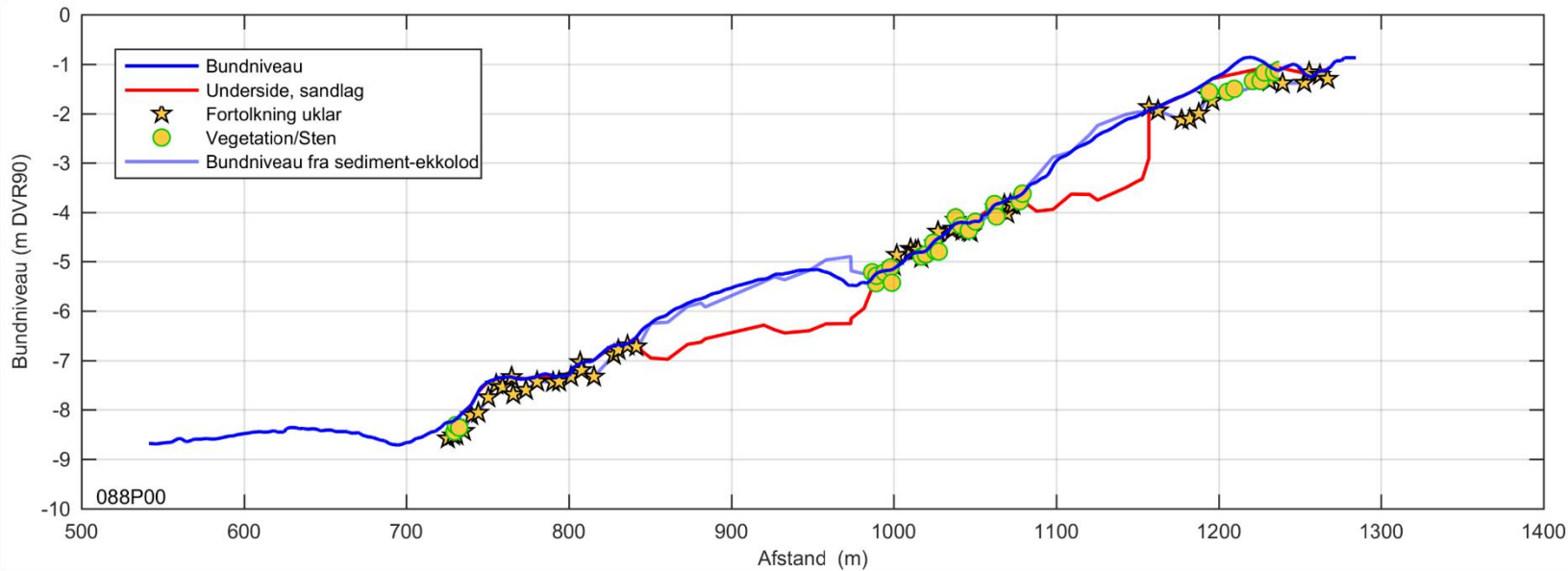
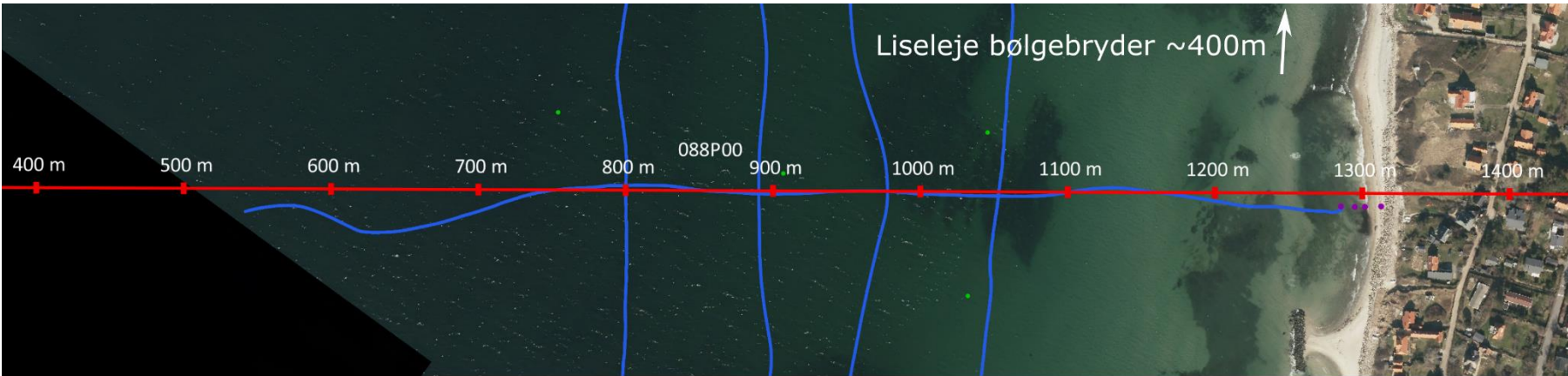
Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	0
Bruttotransport (m³/år)	41.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	3.100
Bredde af transportzone (m)	125
Aktiv dybde (m DVR90)	-3
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sand er tilgængeligt i den inderste del af profilet (i den aktive transport zone) Reduktion: 0 m³/år
Kystkonstruktioner	Kystparallelle bølgebrydere der når ud på en vaddedybde på ca. 0.5 m. Bølgebryderne holder på den bagvedliggende sandstrand, men påvirker ikke det samlede sandbudget nævneværdigt. Reduktion: 0 m³/år
Andre faktorer	
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	0

B.1.2 Profil 056P00 – Kikhavn – Liseleje fodringsområde



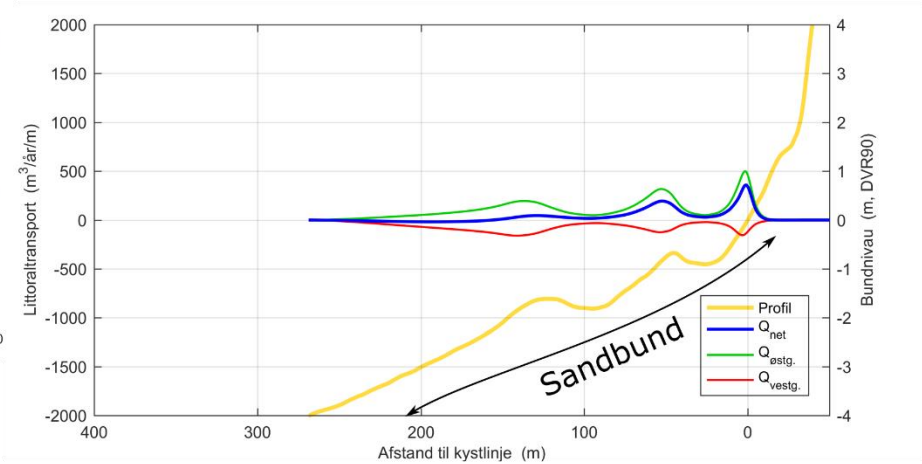
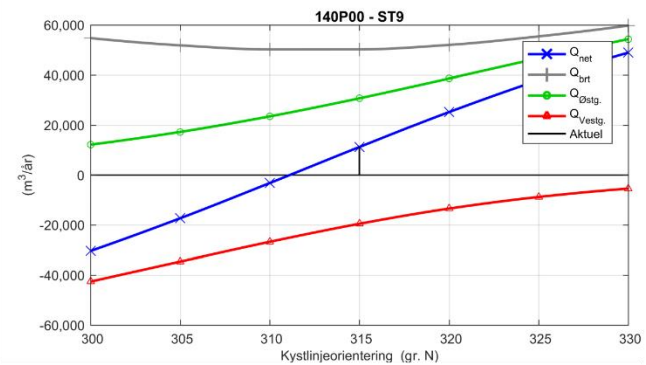
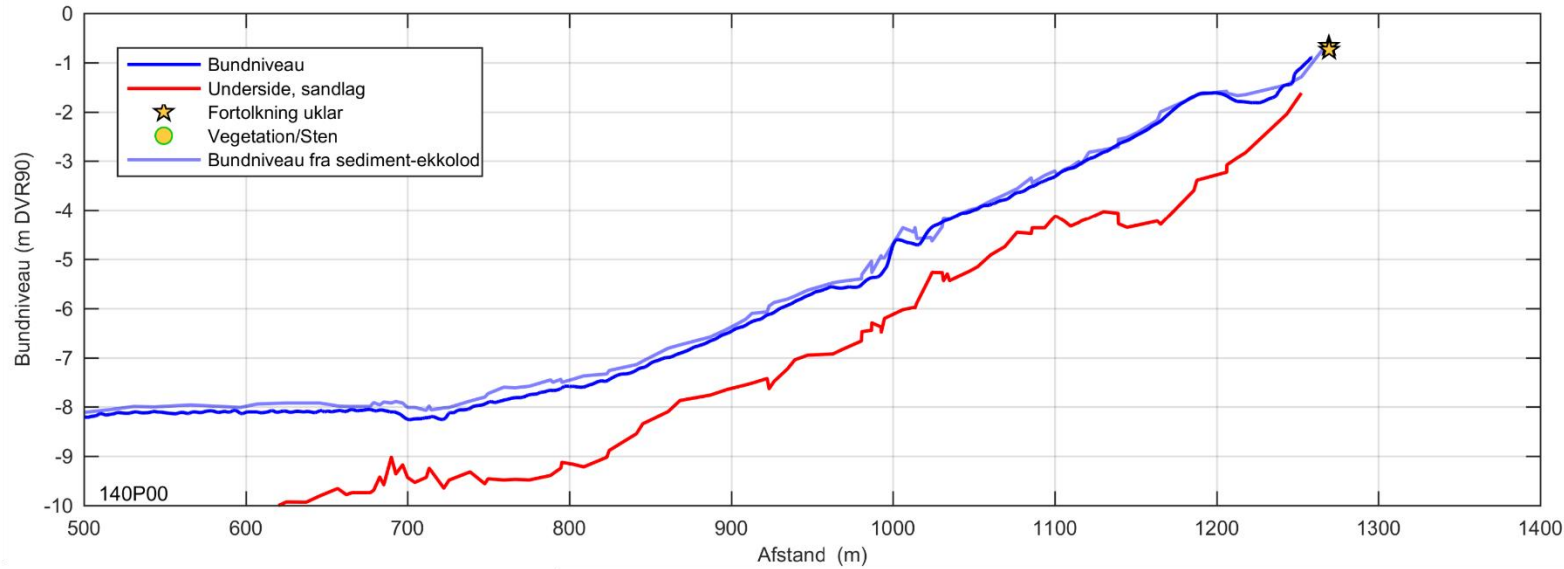
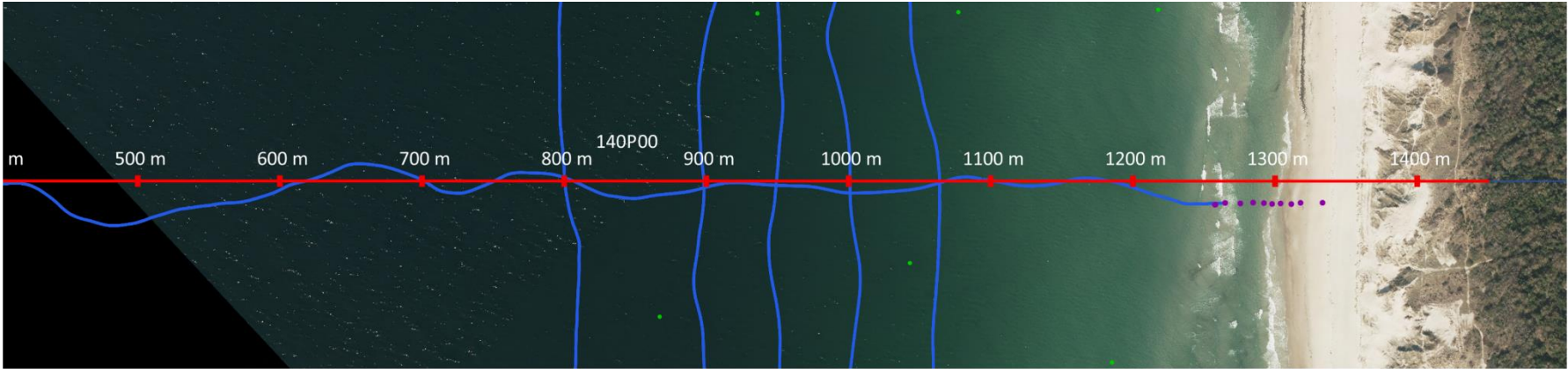
Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	5.000
Bruttotransport (m³/år)	36.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	2.100
Bredde af transportzone (m)	200
Aktiv dybde (m DVR90)	-3
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sand er tilgængeligt i hele profilet. Der er enkelte områder med bevoksning/sten, men områderne er spredte og vurderes at have minimalpåvirkning på den langsgående sandtransport Reduktion: 0 m³/år
Kystkonstruktioner	Reduktion: 0 m³/år
Andre faktorer	
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	5.000

B.1.3 Profil 088P00 – Kikhavn – Liseleje fodringsområde



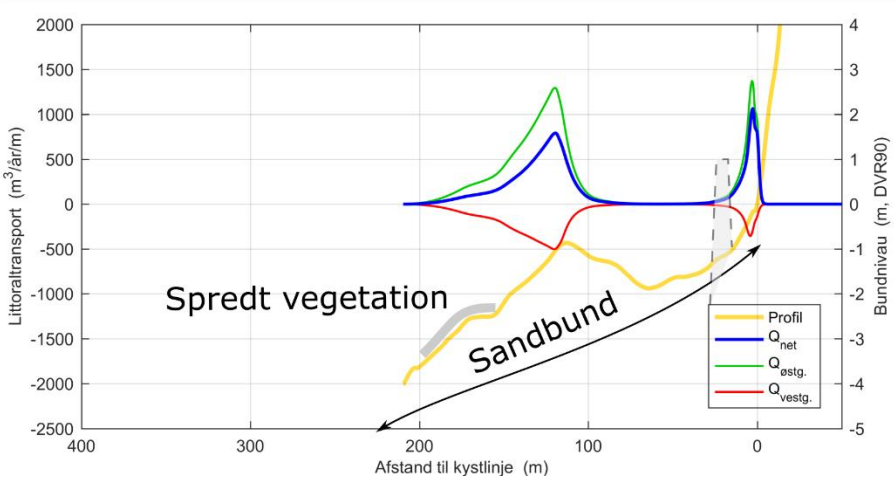
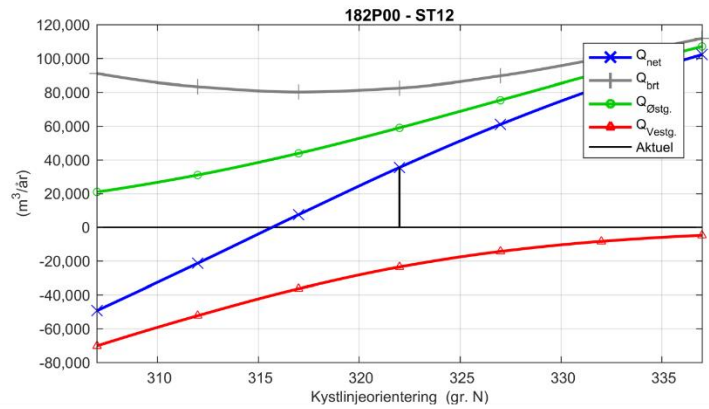
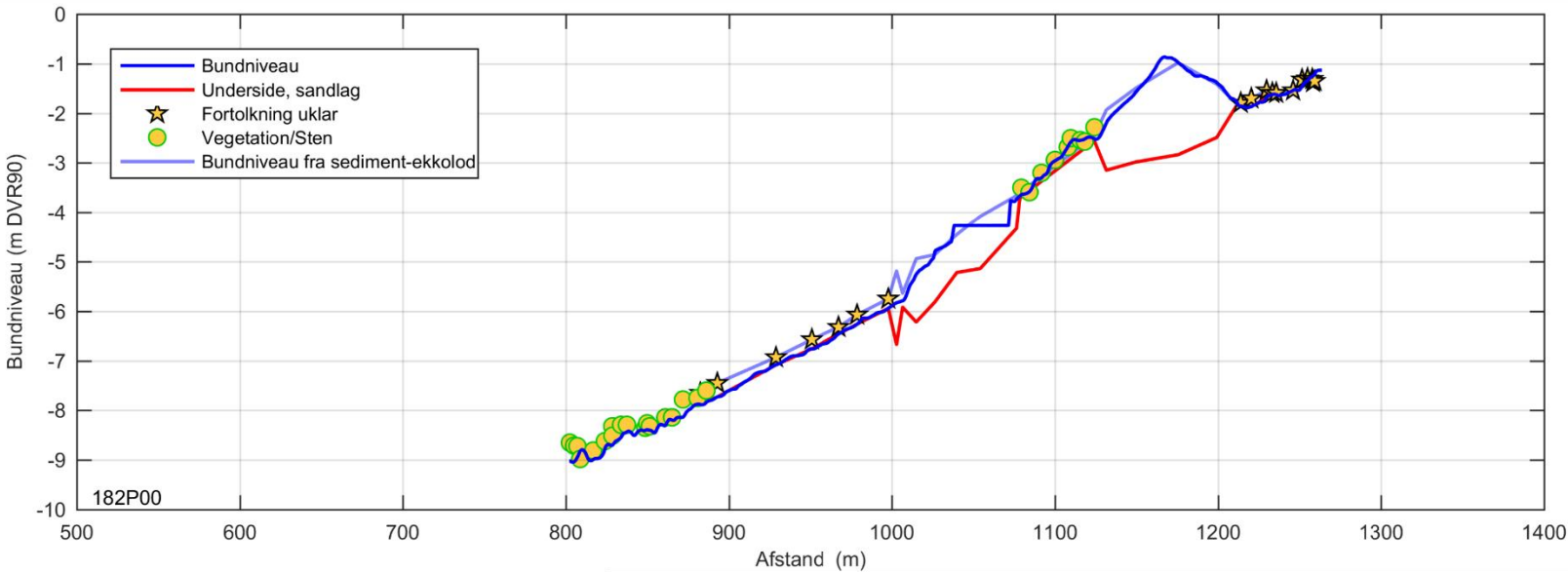
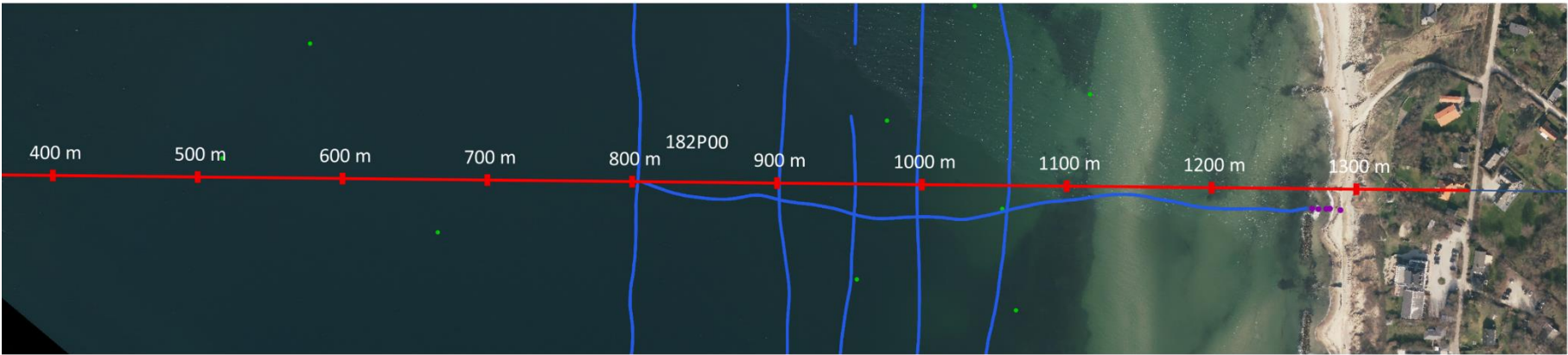
Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	25.000
Bruttotransport (m³/år)	46.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	2.500
Bredde af transportzone (m)	200
Aktiv dybde (m DVR90)	-4
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sand er tilgængeligt fra inderste revle og udefter. Den inderste del af profilet er dækket af sten/vegetation som reducerer transporten med ca. 25% Reduktion: 2.000 m³/år
Kystkonstruktioner	Kystparallelle bølgebrydere der når ud på en vaddybde på ca. 1 m. Bølgebryderne vurderes at reducere transporten i det inderste transportbælte med ca. 25% Reduktion: 2.000 m³/år
Andre faktorer	
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	21.000

B.1.4 Profil 140P00 - Tisvildeleje referenceområde



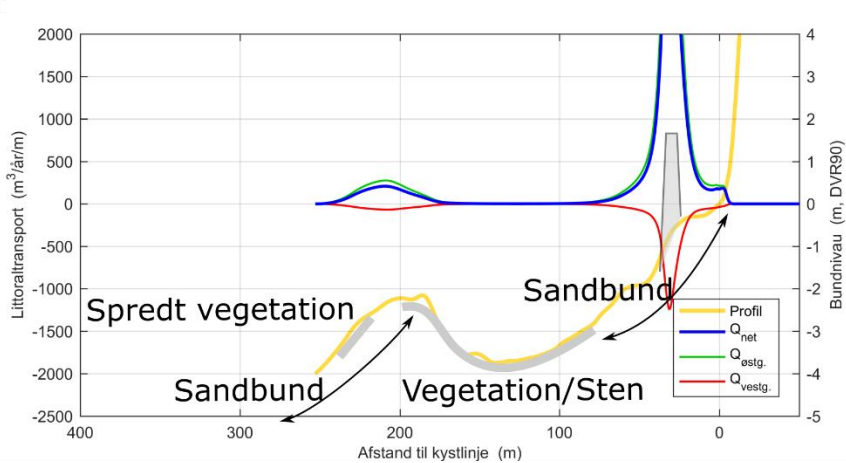
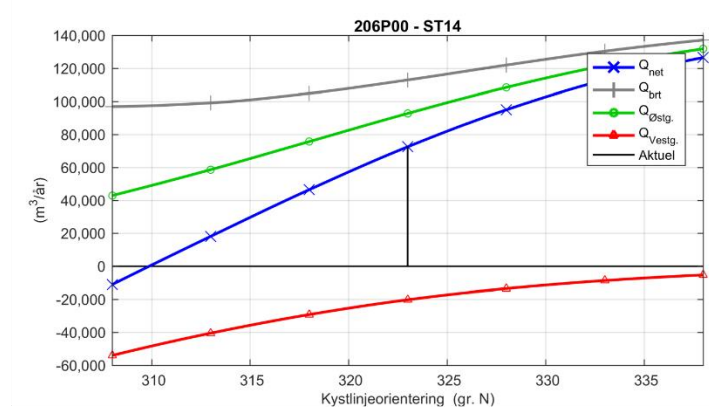
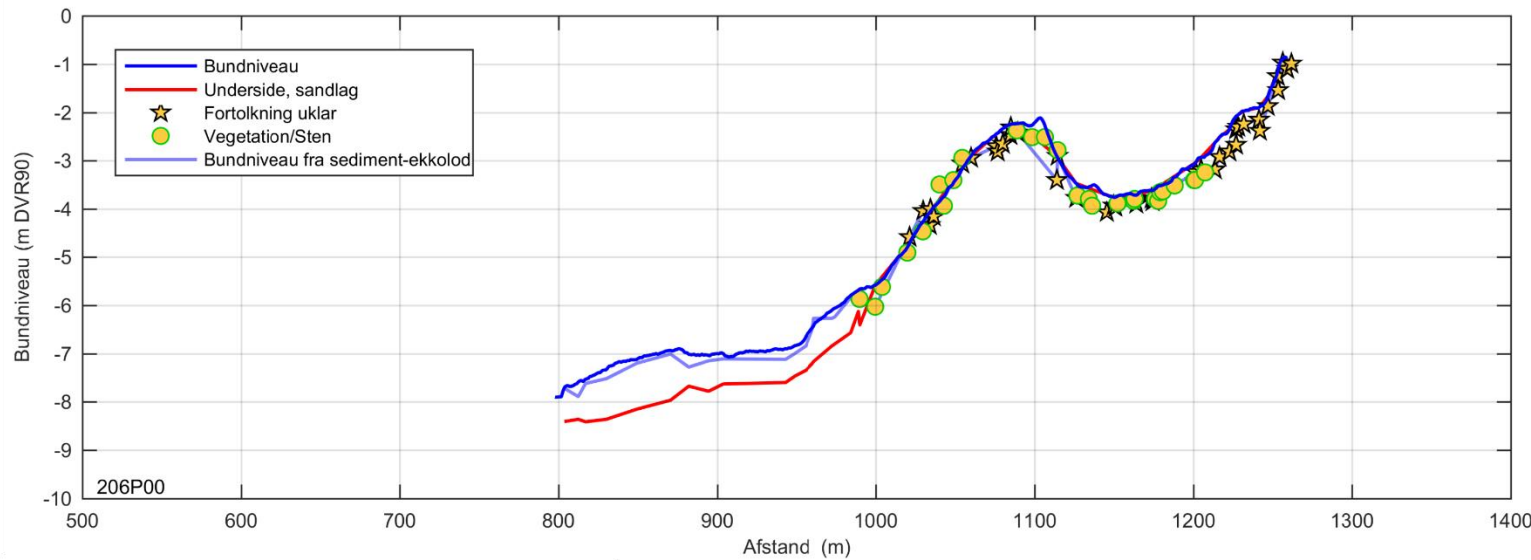
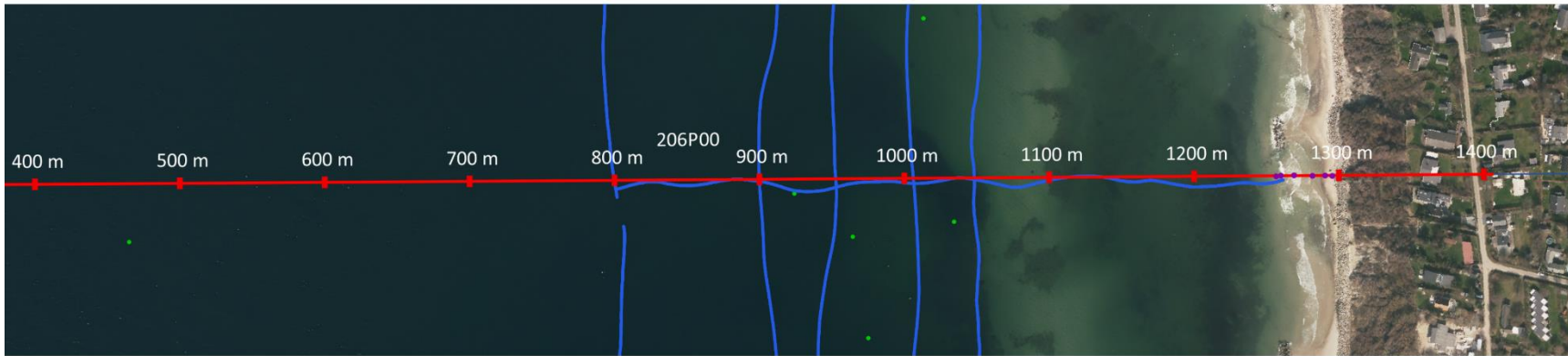
Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	11.000
Bruttotransport (m³/år)	50.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	2.900
Bredde af transportzone (m)	250
Aktiv dybde (m DVR90)	-4
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sand er tilgængeligt i hele profilet. Reduktion: 0 m³/år
Kystkonstruktioner	Reduktion: 0 m³/år
Andre faktorer	På geologiske tidsskalaer er dette et typisk aflejningsområde. Siden konstruktion af Liselejevålbryderen er tilførslen af sand dog reduceret og den vestlige ende af dette område er trukket tilbage. Kystens orientering ændres følgelig betragteligt, og i dette profil er kysten drejet ca. 12 gr. op imod den dominerende bølgeretning i forhold til den opstrøms ende af referenceområdet.
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	11.000

B.1.5 Profil 182P00 – Tisvilde – Vincentstien fodringsområde



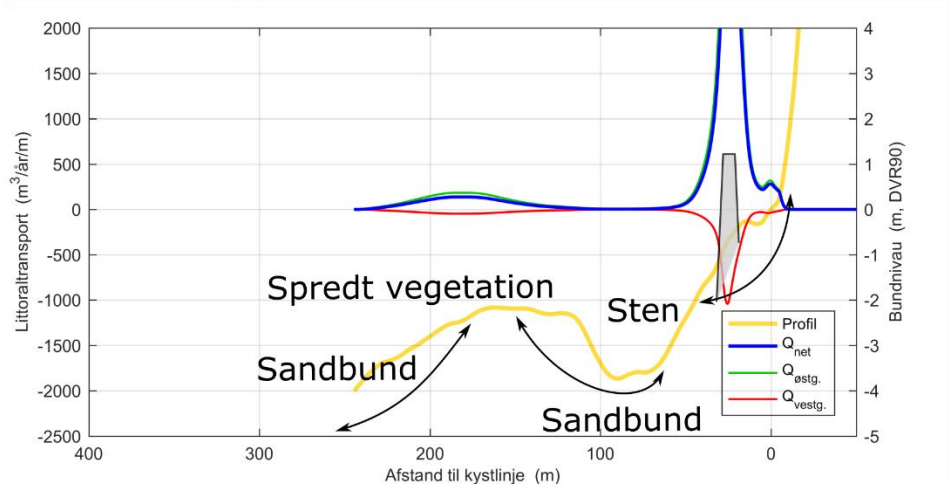
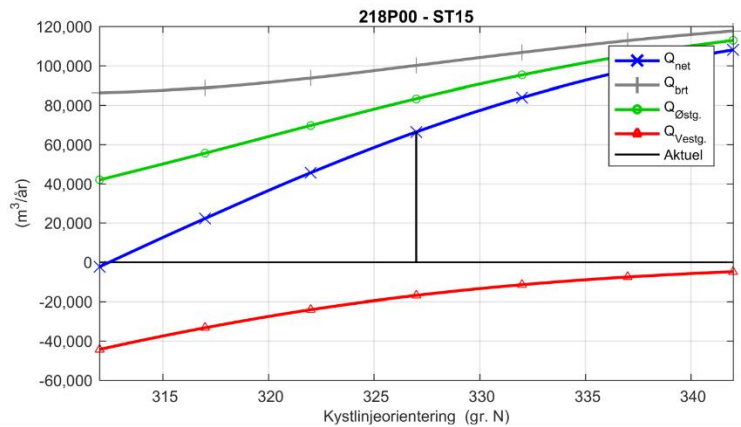
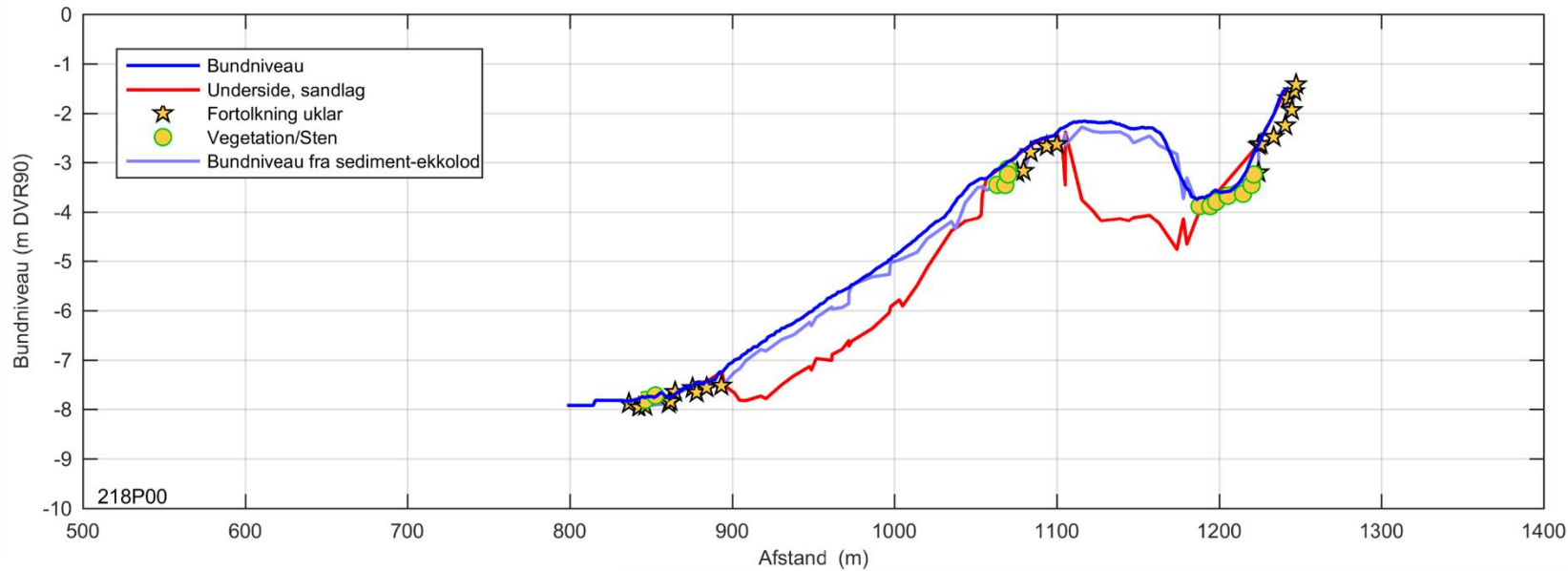
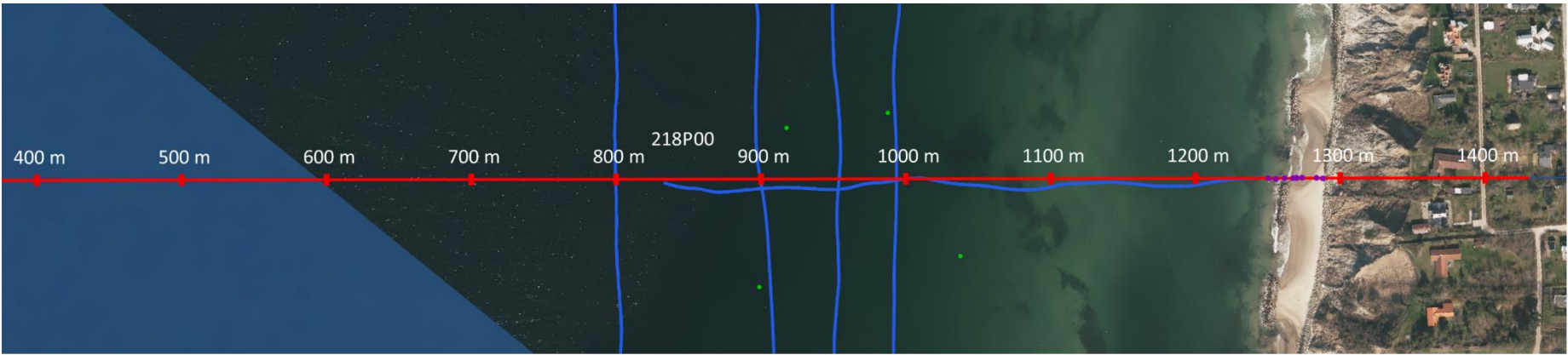
Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	35.000
Bruttotransport (m³/år)	82.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	5.400
Bredde af transportzone (m)	200
Aktiv dybde (m DVR90)	-4
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sand er tilgængeligt i hele profilet. Søværts -3 m DVR90 bundkonturen findes spredte områder med vegetation/sten Reduktion: 0 m³/år
Kystkonstruktioner	Der findes bølgebrydere opstrøms og en enkelt høfde nedstrøms. Konstruktionerne når ud til ca. -1.5 m DVR90 og vurderes at reducere transporten i det inderste bælte med ca. 70% Reduktion: 7.000 m³/år
Andre faktorer	
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	28.000

B.1.6 Profil 206P00 – Tisvilde – Vincentstien fodringsområde



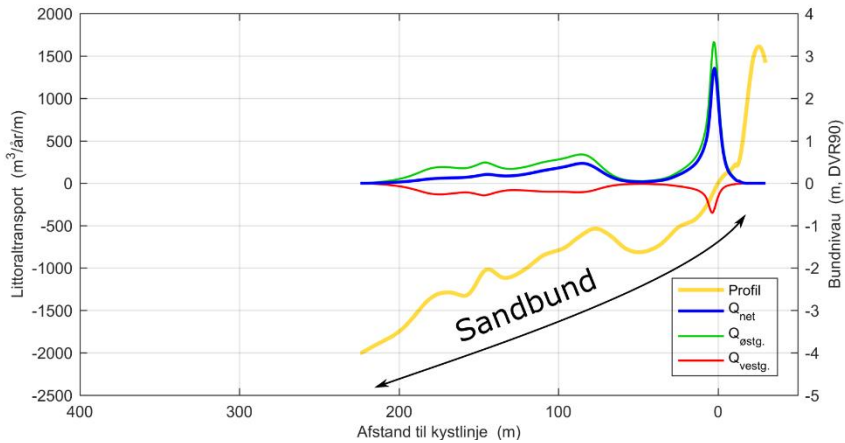
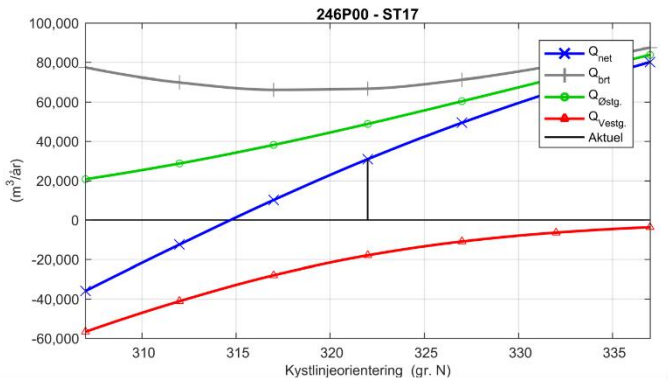
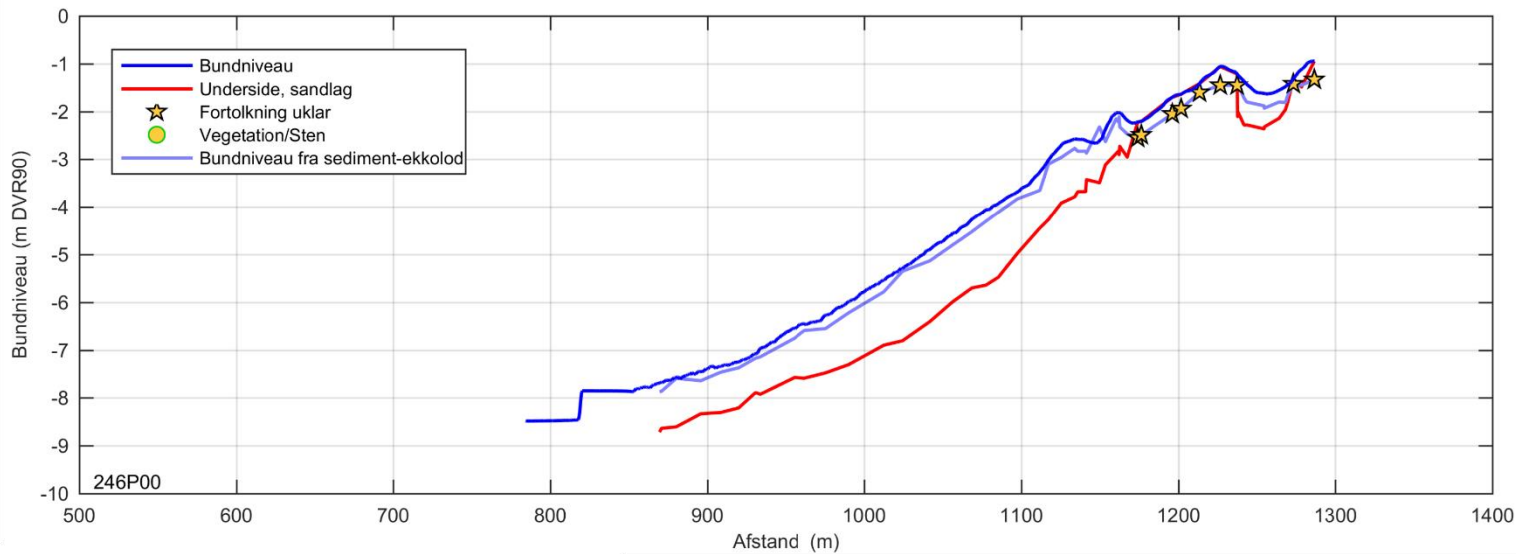
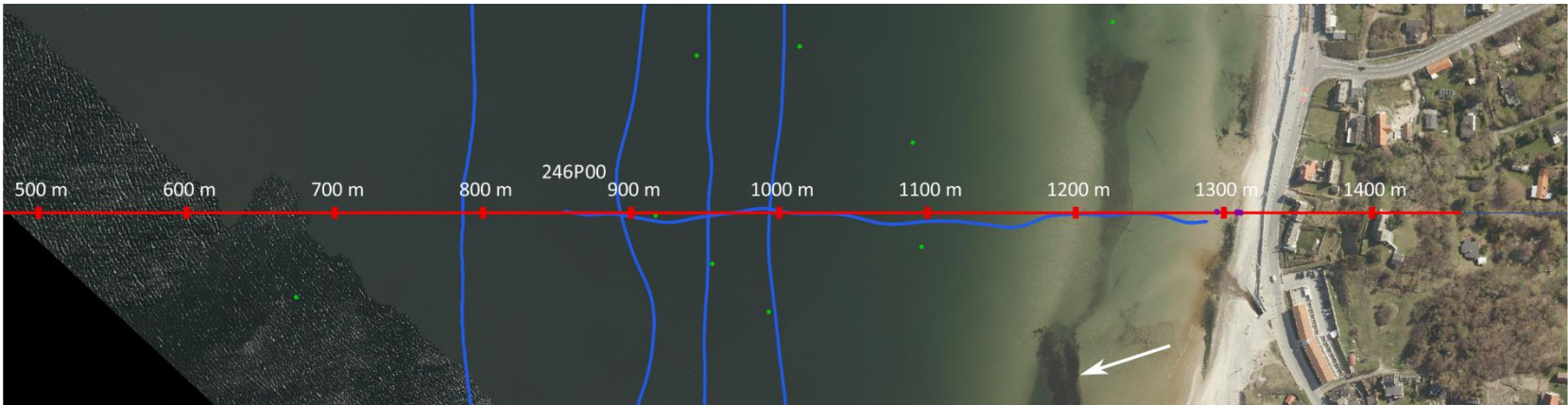
Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	72.000
Bruttotransport (m³/år)	113.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	5000
Bredde af transportzone (m)	250
Aktiv dybde (m DVR90)	-4
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sand er tilgængeligt på ydersiden af revlen og i den inderste del af kystprofillet, hvor der er transport. Der findes spredte områder med bevoksning på ydersiden af revlen (ca. 250 m fra kysten) og et stenet område på mellem 2 m og 3 m vanddybde i truget landværts revlen. Transporten vurderes ikke at blive påvirket nævneværdigt. Reduktion: 0 m³/år
Kystkonstruktioner	Kystparallelle bølgebrydere der når ud på en vaddybde på ca. 1.5 m. Bølgebryderne vurderes at reducere transporten i det inderste transportbælte med ca. 40% Reduktion: 32.000 m³/år
Andre faktorer	
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	40.000

B.1.7 Profil 218P00 – Tisvilde – Vincentstien fodringsområde



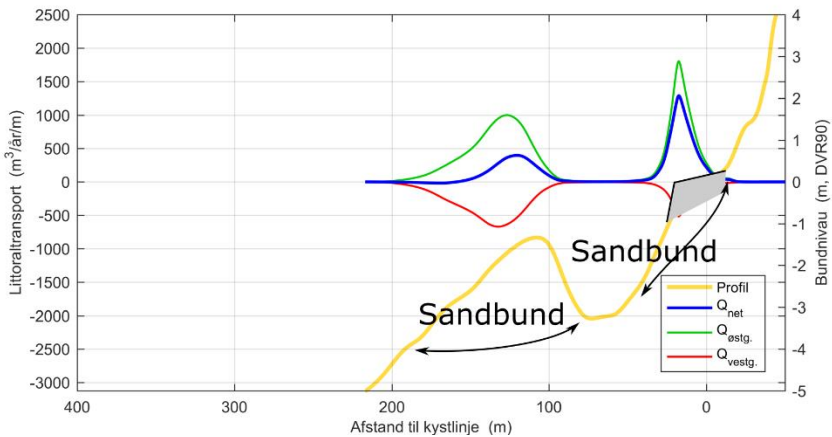
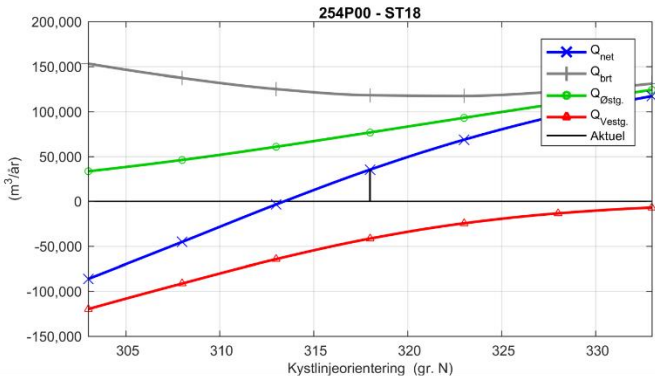
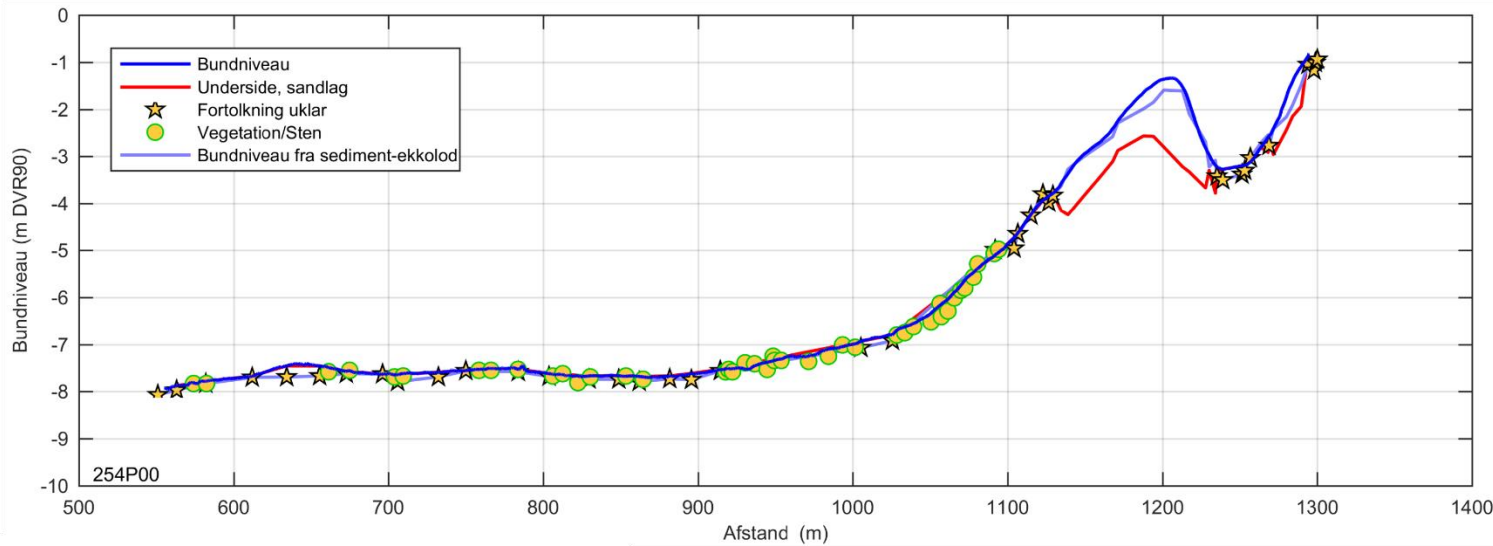
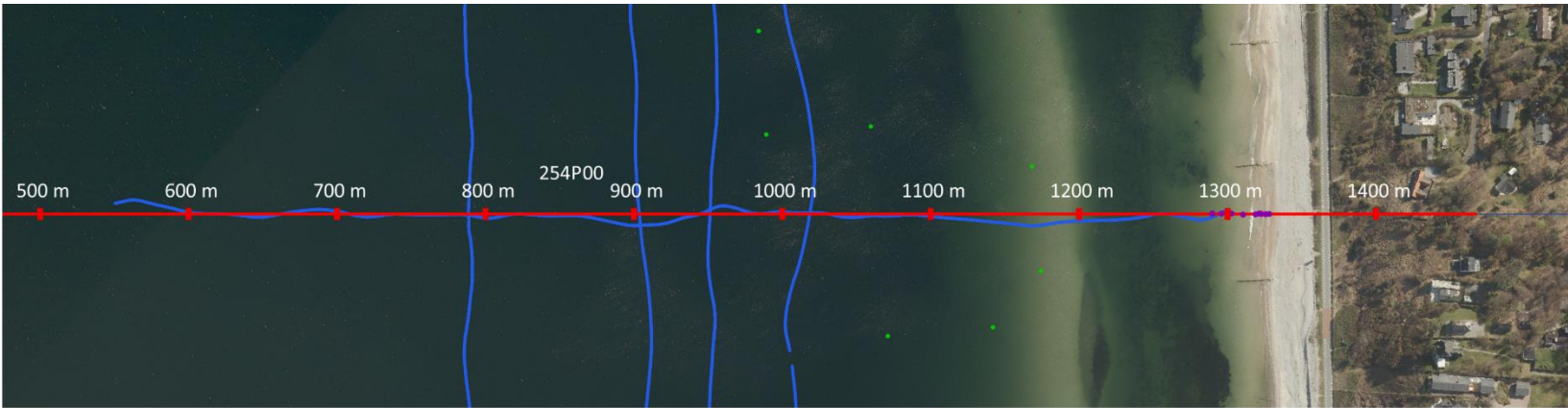
Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	66.000
Bruttotransport (m³/år)	100.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	3.900
Bredde af transportzone (m)	200
Aktiv dybde (m DVR90)	-4
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sand er tilgængeligt i det meste af profilet. Dog findes spredte områder med bevoksning på ydersiden af revlen (ca. 175 m fra kysten) og et stenet område på mellem 2 m og 3 m vanddybde. Transporten vurderes ikke at blive påvirket nævneværdigt. Reduktion: 0 m³/år
Kystkonstruktioner	Kystparallelle bølgebrydere der når ud på en vaddybde på ca. 1.5 m. Bølgebryderne vurderes at reducere transporten i det inderste transportbælte med ca. 40% Reduktion: 22.000 m³/år
Andre faktorer	
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	44.000

B.1.8 Profil 246P00 - Rågeleje-Trillingerne fodringsområde



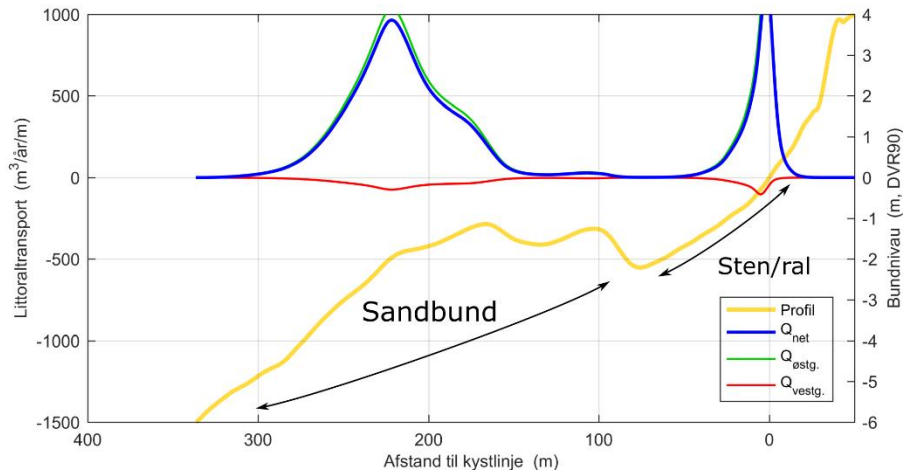
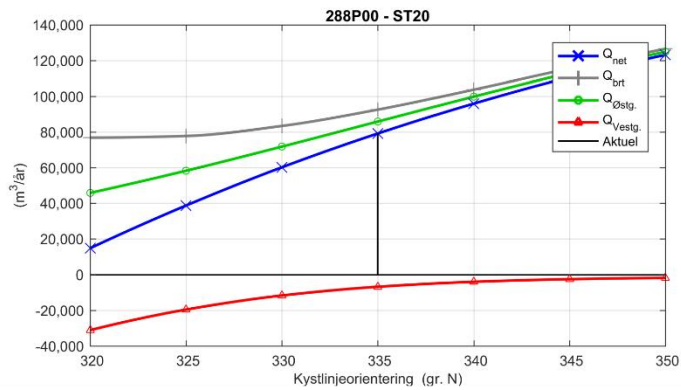
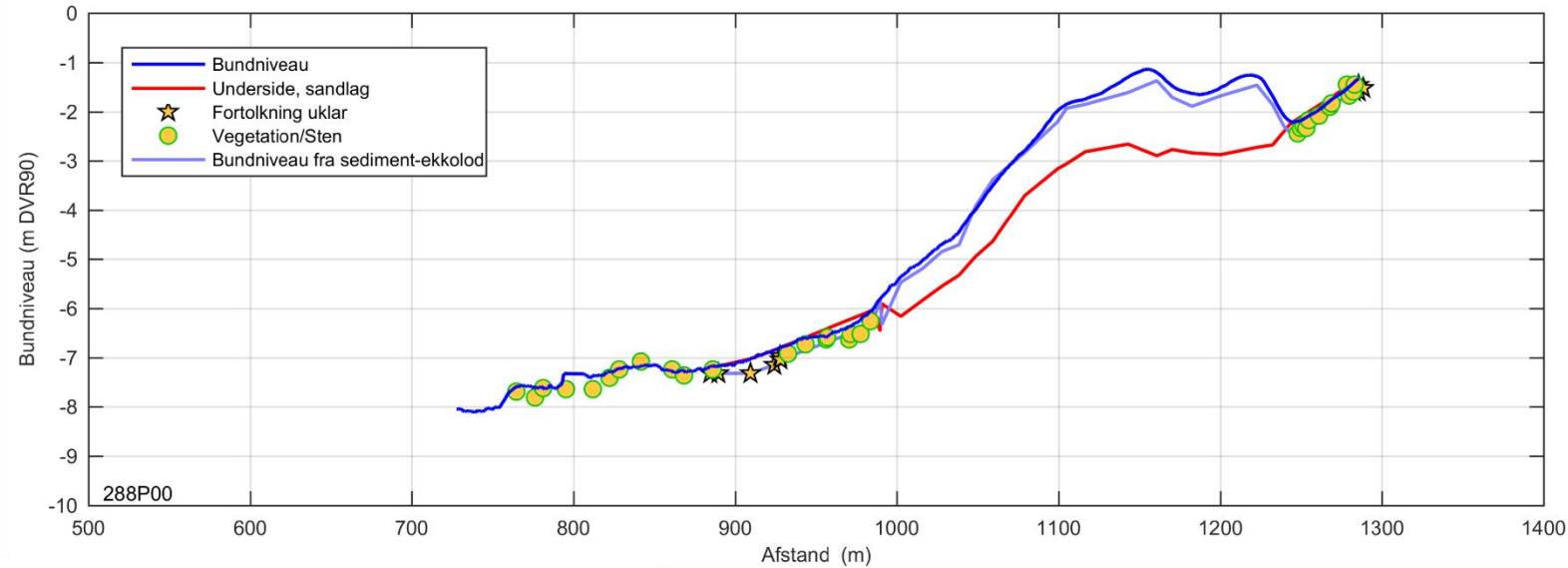
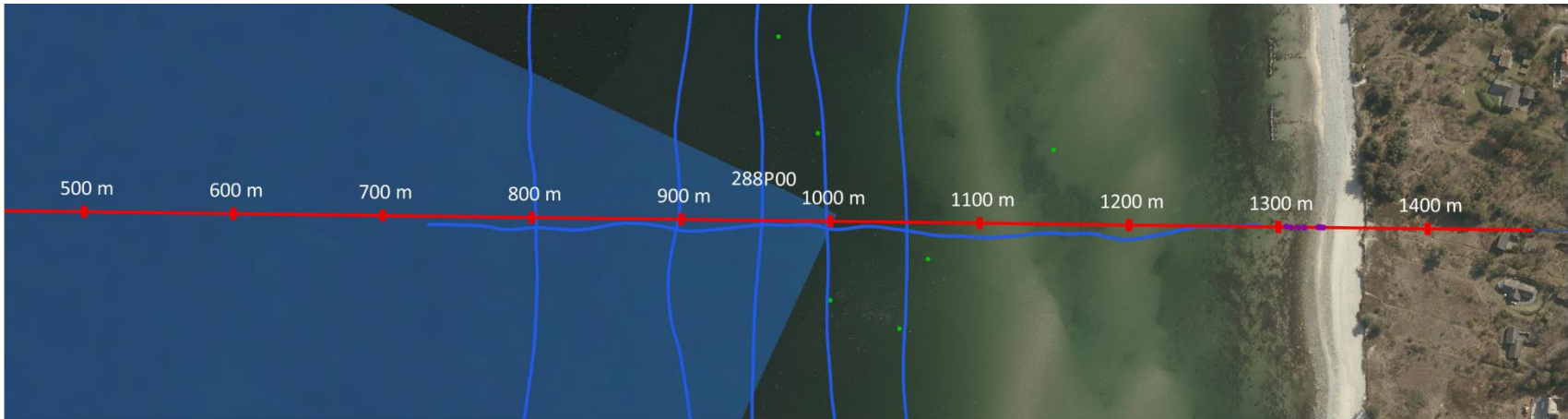
Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	31.000
Bruttotransport (m³/år)	67.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	4.000
Bredde af transportzone (m)	200
Aktiv dybde (m DVR90)	-4
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sandlag på revlen mellem 100 m og 200 m fra kysten. Sand fra truget (ca. -1.5 m DVR90) og ind på kysten. Foto fra Forår 2017 viser sand på stranden, mens droneopmåling fra efterår 2017 afslører store områder med ral. Aktuell transport antages at være ca. 10% af kapaciteten i det inderste bælte. Reduktion: 2.000 m³/år
Kystkonstruktioner	Ingen. Neddykket bølgebryder umiddelbart vest herfor (vist med hvid pil). Reduktion: 0 m³/år
Andre faktorer	
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	29.000

B.1.9 Profil 254P00 – Rågeleje-Trillingerne fodringsområde



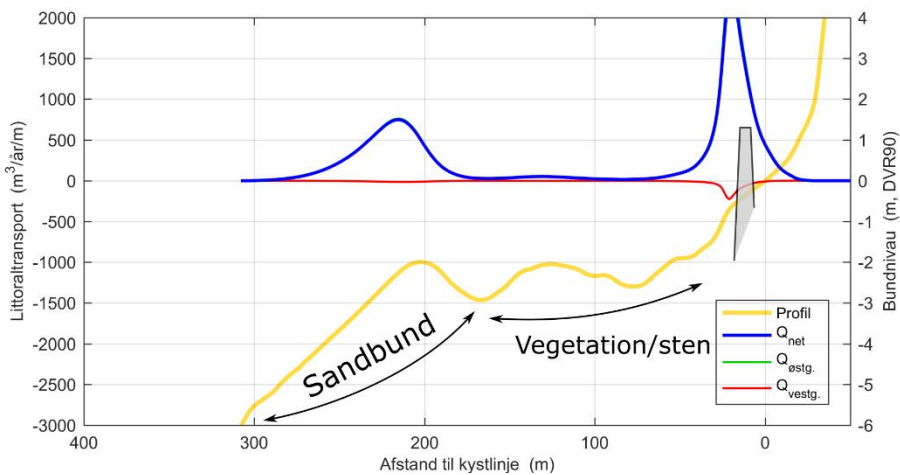
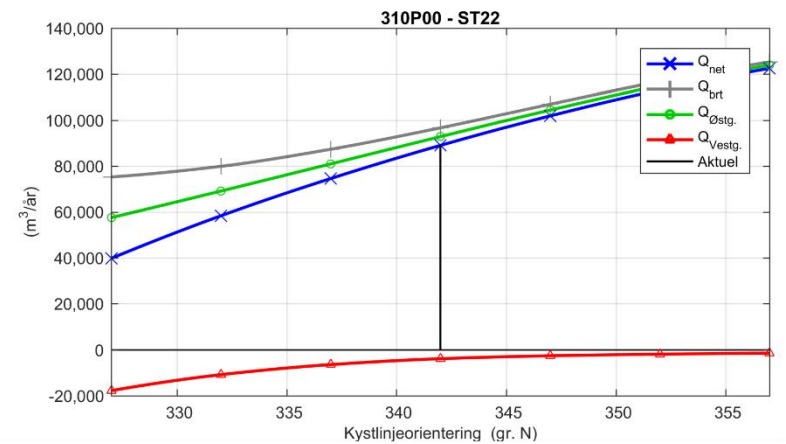
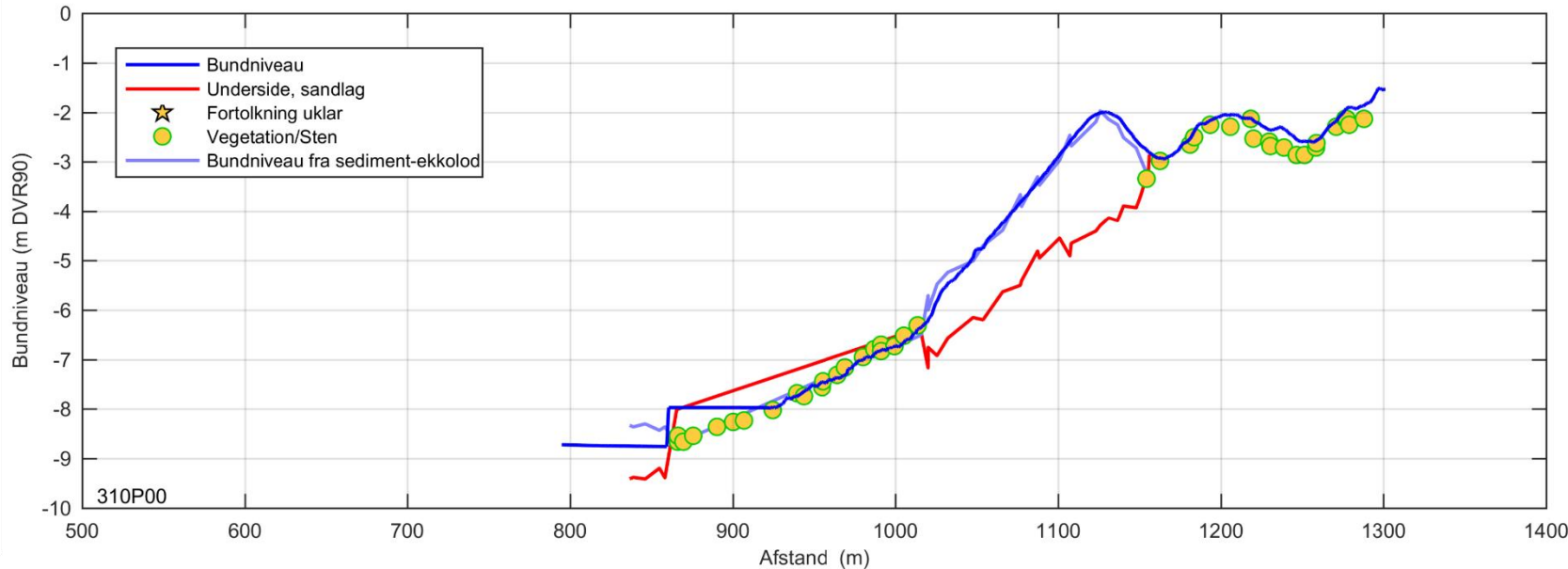
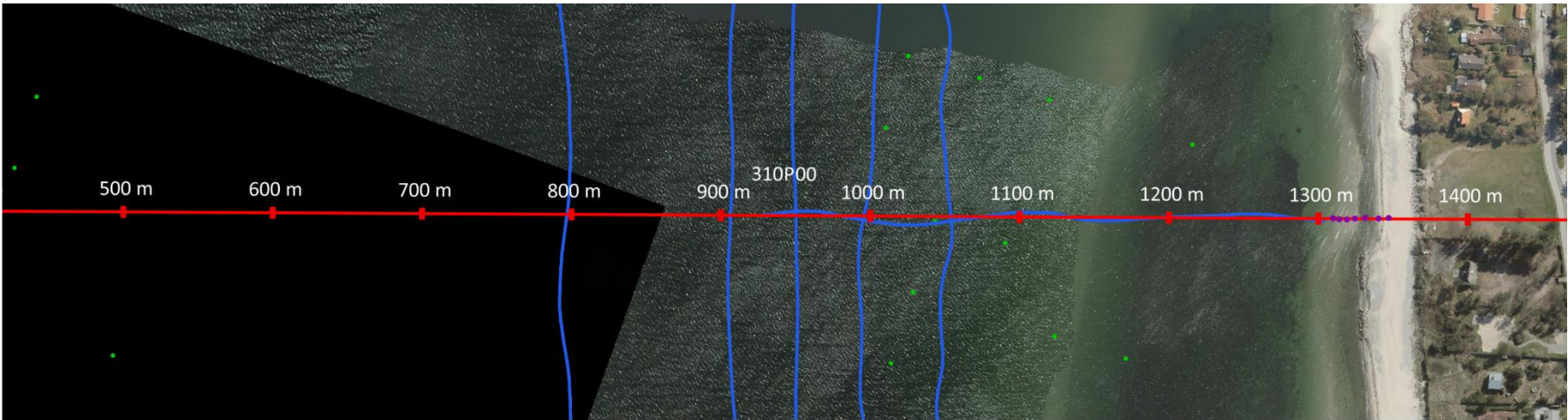
Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	35.000
Bruttotransport (m³/år)	118.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	7.400
Bredde af transportzone (m)	200
Aktiv dybde (m DVR90)	-4
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sandlag på revlen mellem 100m og 200 m fra kysten. Sand fra truet (ca. -3 m) og ind på kysten. Foto fra forår 2017 viser sand på stranden, mens droneopmåling fra efterår 2017 afslører store områder med ral. Aktuell transport antages at være ca. 10% af kapaciteten i det inderste bælte. Reduktion: 5.000 m³/år
Kystkonstruktioner	Korte høfder konstrueret som kombination af stenkastning (inderst) og andet materiale yderst (træ eller spuns). Konstruktionernes vurderes at reducere transporten i det inderste transportbælte med ca. 10%. Den lille påvirkning skyldes: Stor indbyrdes afstand og meget korte konstruktioner samt minimal påvirkning på kysten i fotos Reduktion: 5.000 m³/år
Andre faktorer	
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	25.000

B.1.10 Profil 288 – Havstokken – Feriebyen fodringsområde



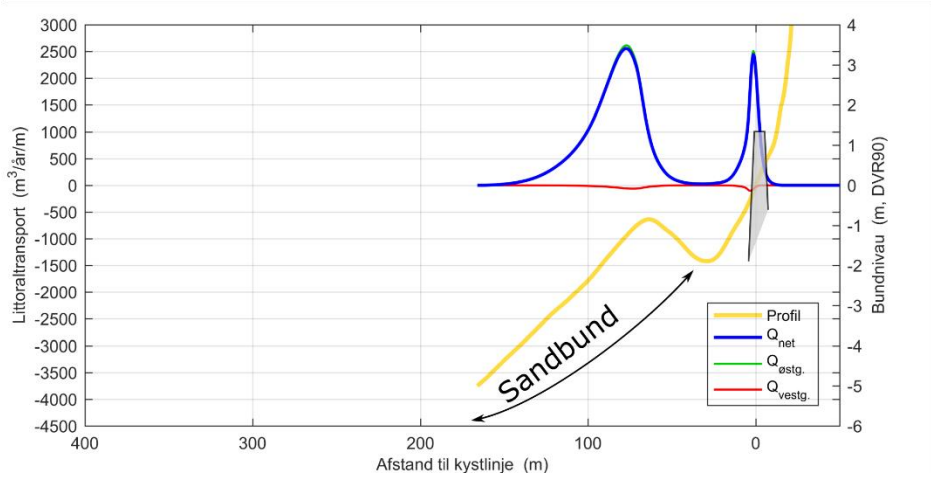
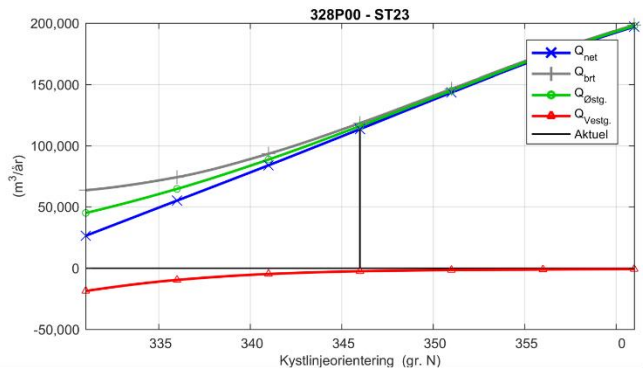
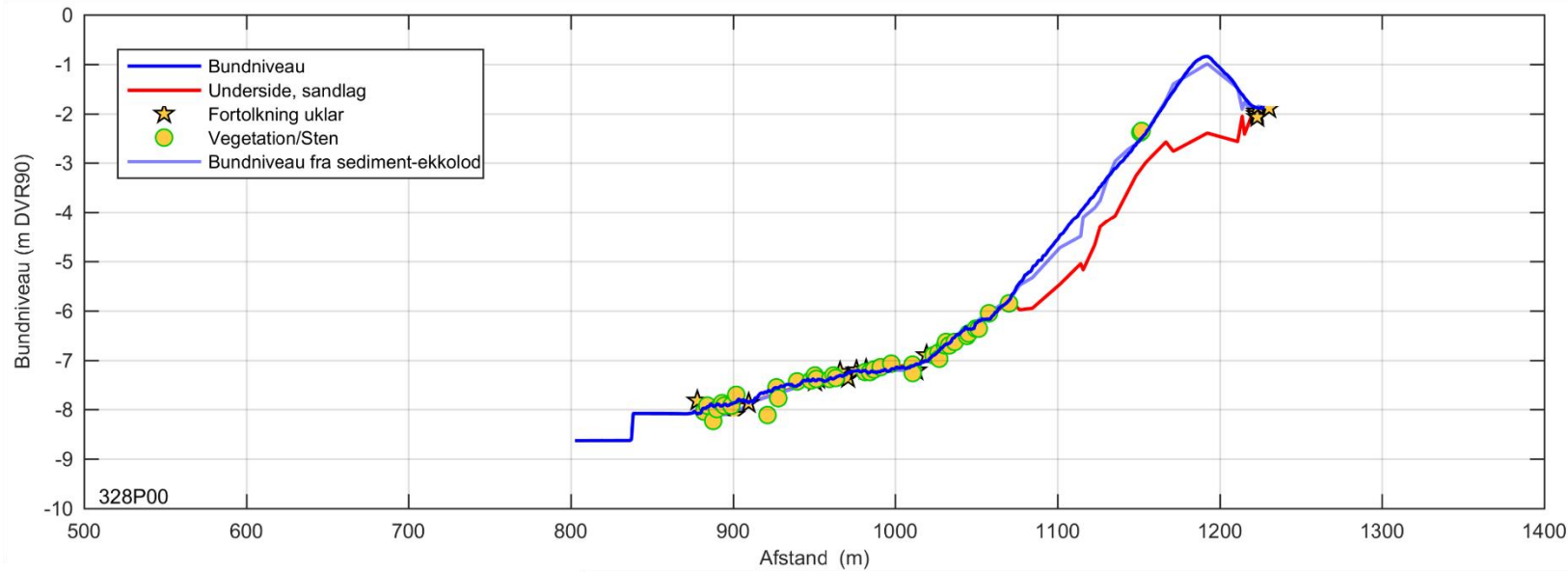
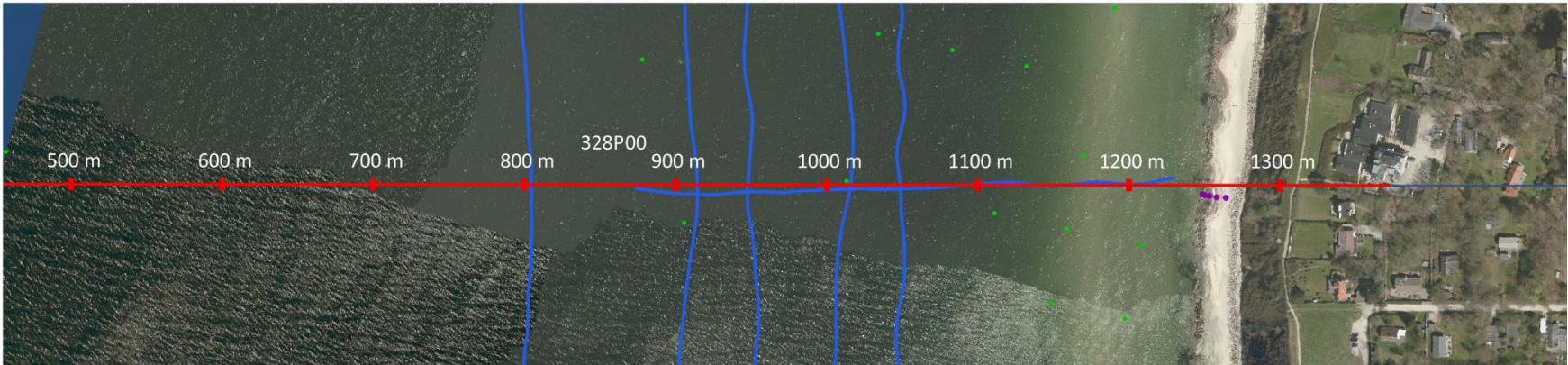
Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	79.000
Bruttotransport (m³/år)	93.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	3.600
Bredde af transportzone (m)	300
Aktiv dybde (m DVR90)	-5
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sandlag på revlen mellem 100m og 300 m fra kysten. Spredte sten findes ud til ca. 2 m vanddybde som reducerer transporten i det inderste bælte. Aktuell transport antages at være ca. 50% af kapaciteten i det inderste bælte. Reduktion: 10.000 m³/år
Kystkonstruktioner	Kystparallelle bølgebrydere længere nedstrøms antages ikke give yderligere påvirkning.
Andre faktorer	Skrårevlen hvor størstedelen af transporten foregår på er drejet ca. 4 gr. imod bølgerne. Denne drejning kan i mindre grad give anledning til yderligere reduktioner. Reduktion: 0 m³/år
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	69.000

B.1.11 Profil 310P00 – Havstokken – Feriebyen fodringsområde



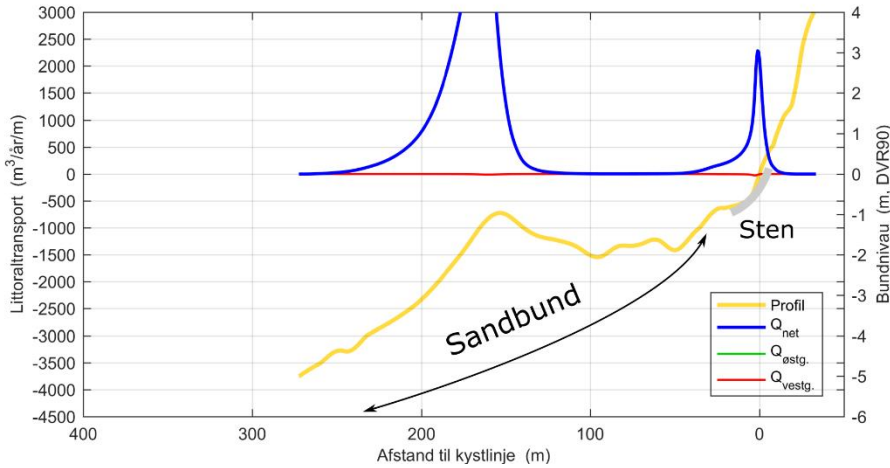
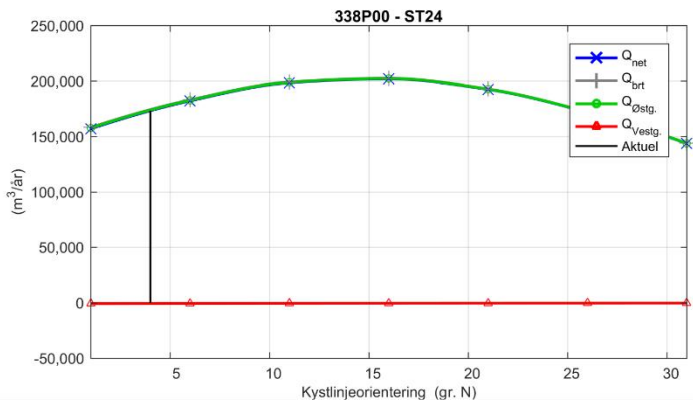
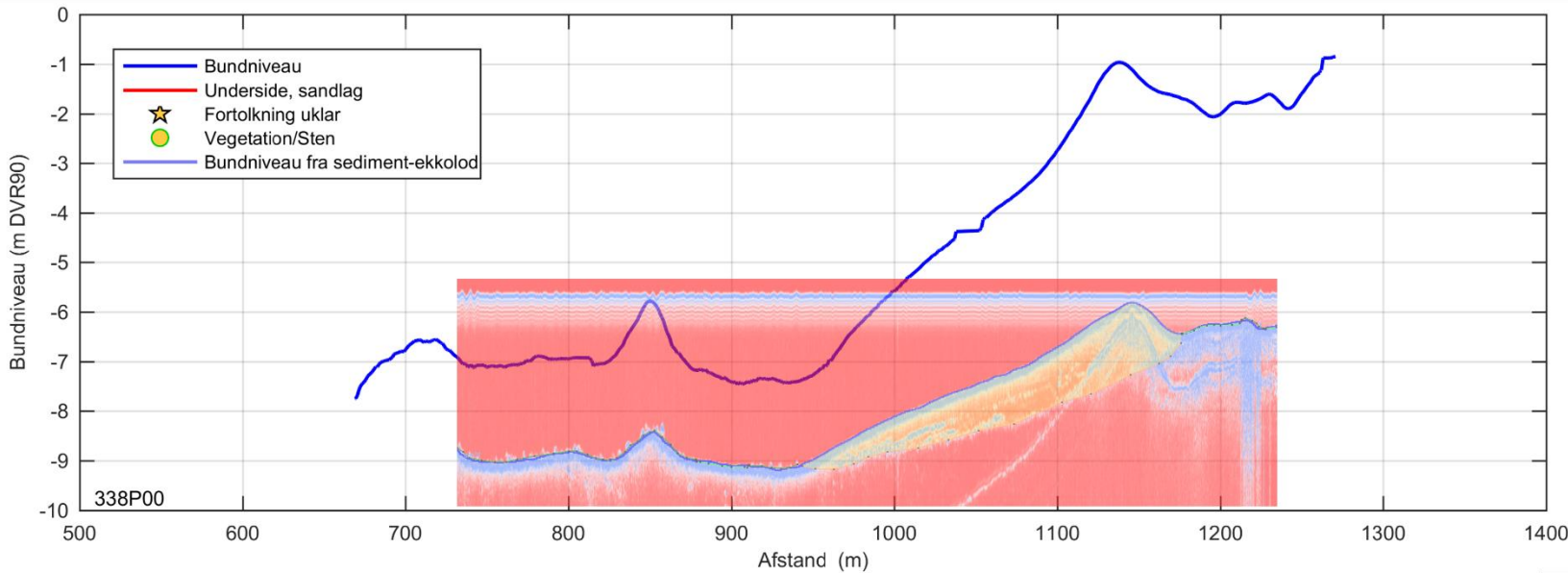
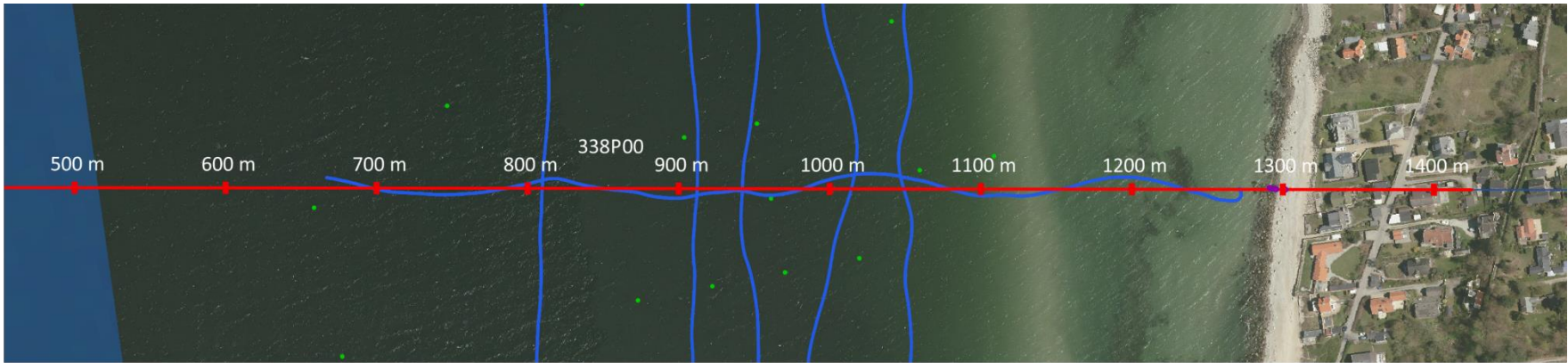
Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	89.000
Bruttotransport (m³/år)	97.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	2.800
Bredde af transportzone (m)	300
Aktiv dybde (m DVR90)	-5
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sandlag på revlen mellem 200m og 300 m fra kysten. Sten/Vegetation i revletruget på dybder mellem 2 m og 3 m (transportkapaciteten er nul i dette område). Reduktion: 0 m³/år
Kystkonstruktioner	Kystparallelle bølgebrydere ligger i forlængelse af stranden. Foden af bølgebryderene vurderes at ligge i ca. -1 m - -0.75 m DVR90. Bølgebryderne vurderes at reducere transporten i det inderste bælte med ca. 20%. Reduktion: 10.000 m³/år
Andre faktorer	
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	79.000

B.1.12 Profil 328P00 – Gilbjerghoved fodringsområde



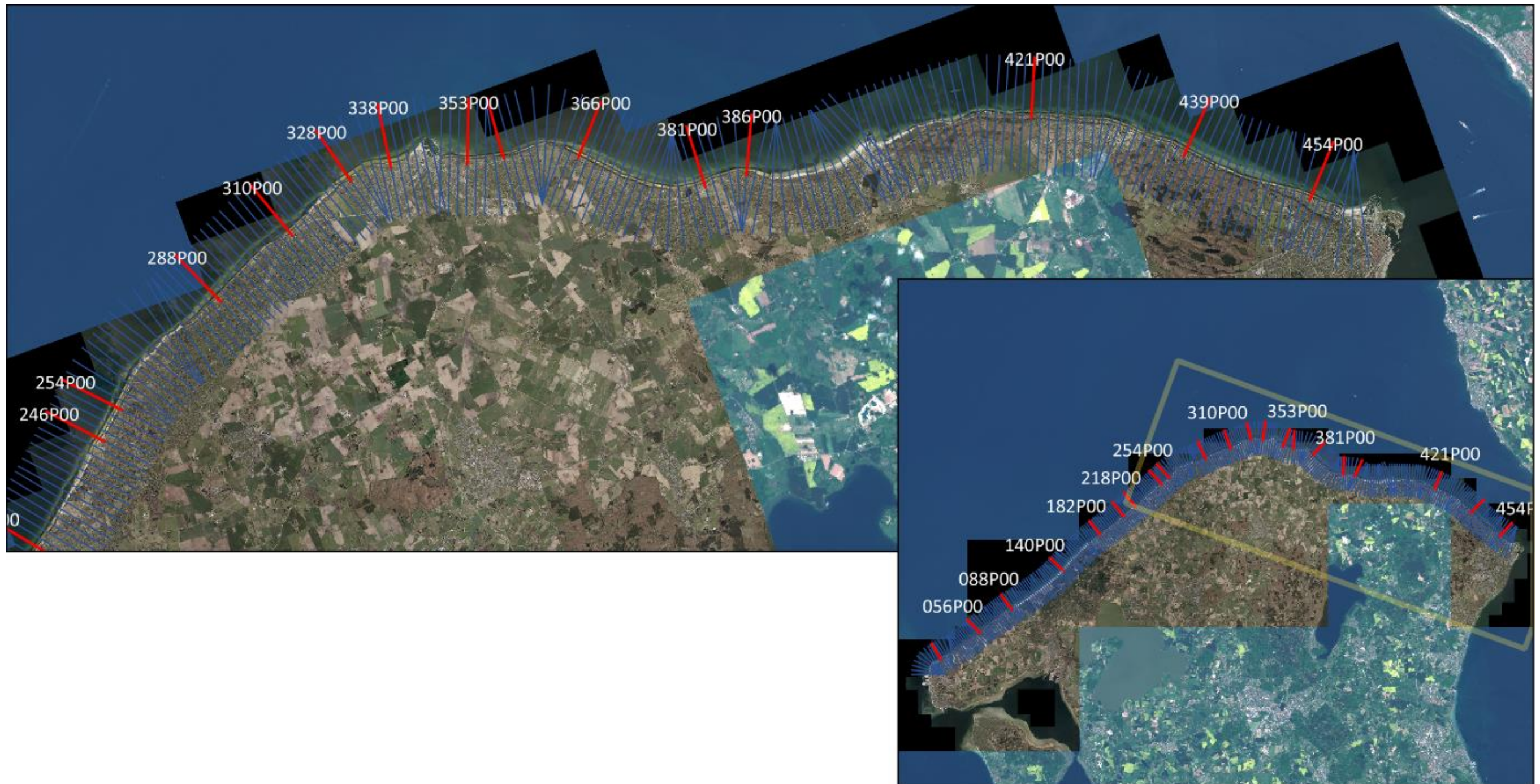
Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	114.000
Bruttotransport (m³/år)	118.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	6.000
Bredde af transportzone (m)	150
Aktiv dybde (m DVR90)	-5
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sandlag på revlen mellem 50 m og 150 m fra kysten. Vegetation uden for den aktive transportzone. Reduktion: 0 m³/år
Kystkonstruktioner	Kystparallelle bølgebrydere i opskylszonen ud til ca. 0.5 m vanddybde. Bølgebryderne vurderes at reducere transporten i det inderste bælte med ca. 25%. Reduktion: 5.000 m³/år
Andre faktorer	Reduktion: 0 m³/år
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	109.000

B.1.13 Profil 338P00 – Gilbjerghoved fodringsområde

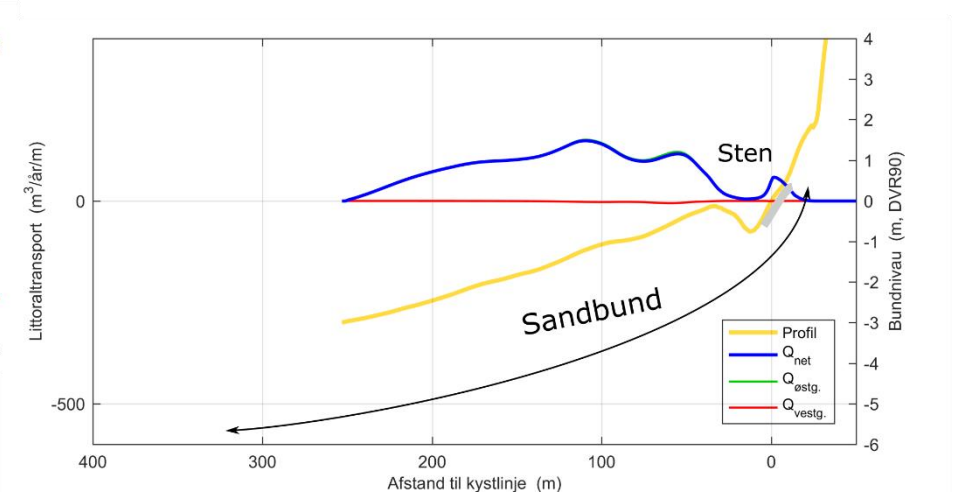
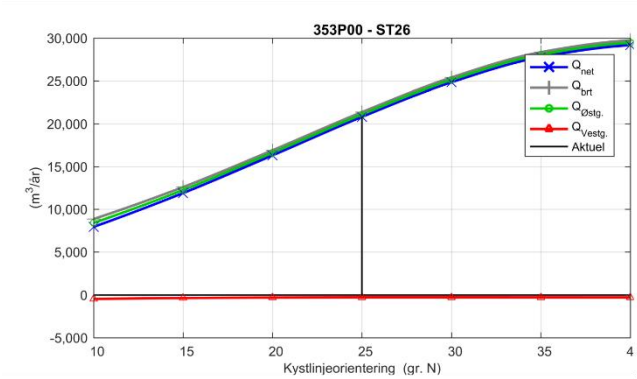
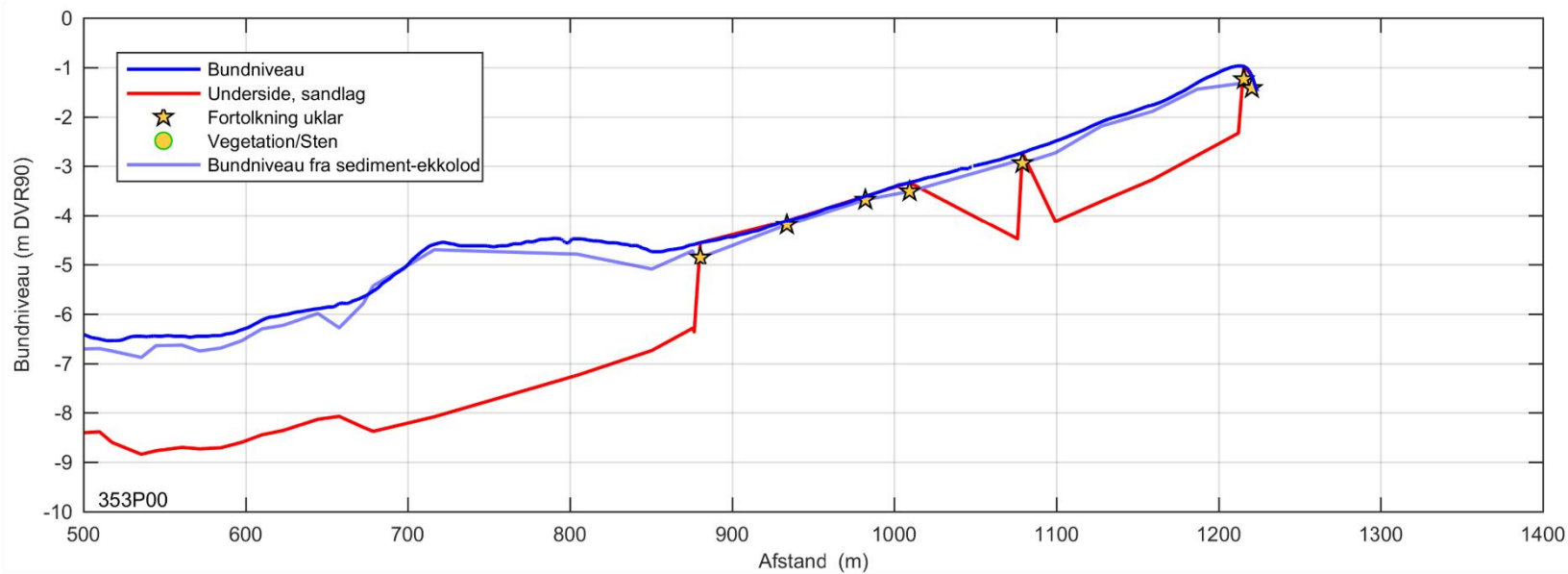
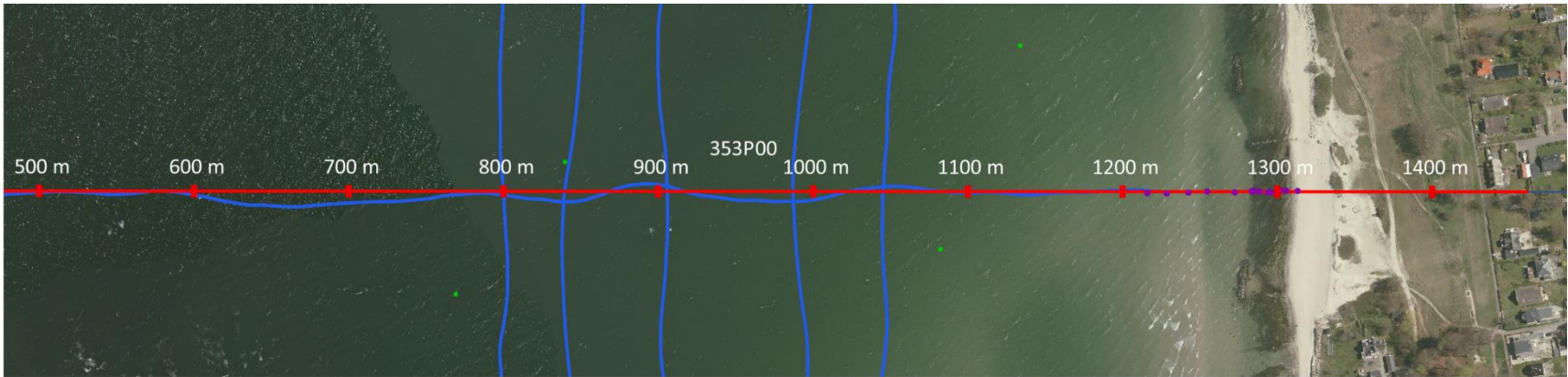


Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	173.000
Bruttotransport (m³/år)	174.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	-5.000
Bredde af transportzone (m)	250
Aktiv dybde (m DVR90)	-5
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Fejl i positionering. Sandlagstykkelsen er derfor angivet ved skærbillede fra bundprofilprogram. Sandlag på revlen mellem 100 m og ca. 300 m fra kysten. Sten i opskylszonen ud til ca. 1 m vanddybde. Aktuell transport i det inderste bælte vurderes at være ca. 50% af transportkapaciteten. Reduktion: 11.000 m³/år
Kystkonstruktioner	Reduktion: 0 m³/år
Andre faktorer	Transporten foregår fortrinsvis på revlen. Revlen er som følge af det fremskudte forland på Gilbjerg hoved og Gilleleje havn drejet ca. 10 gr. imod uret i forhold til kysten. Ved fastlæggelse af transporten er revlens normal orientering benyttet. Desuden krummer kysten betragteligt hvilket medfører at strømmen i realiteten skal accelereres op over et stykke på 500 m. Denne acceleration er ikke medtaget i modelberegninger og det giver derfor et yderligere bidrag til reduktion af transporten. Reduktion: 40.000 m³/år
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	122.000

B.2 Korrektion af langstransporten for eksisterende kyst – Profiler øst for Gilleleje havn

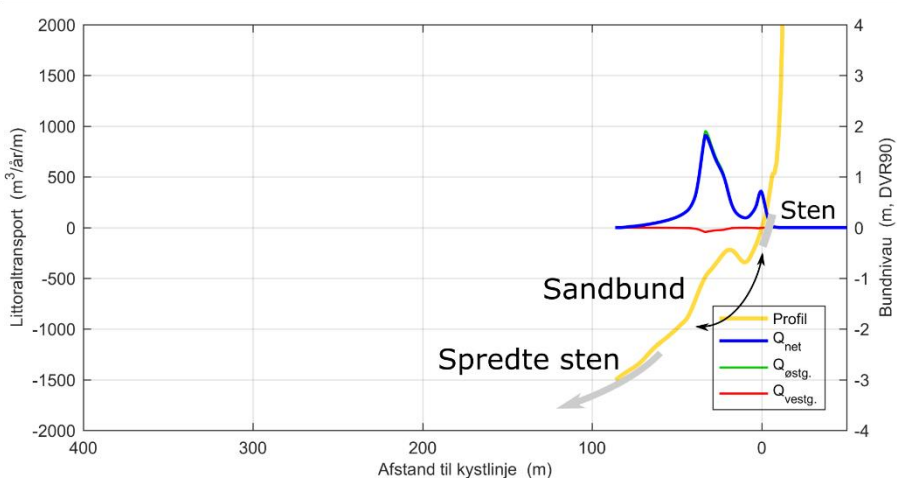
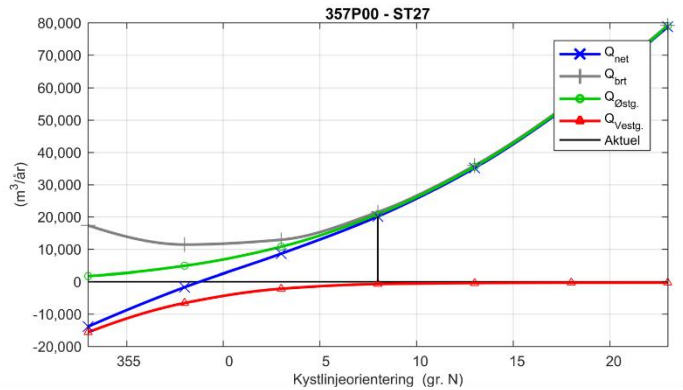
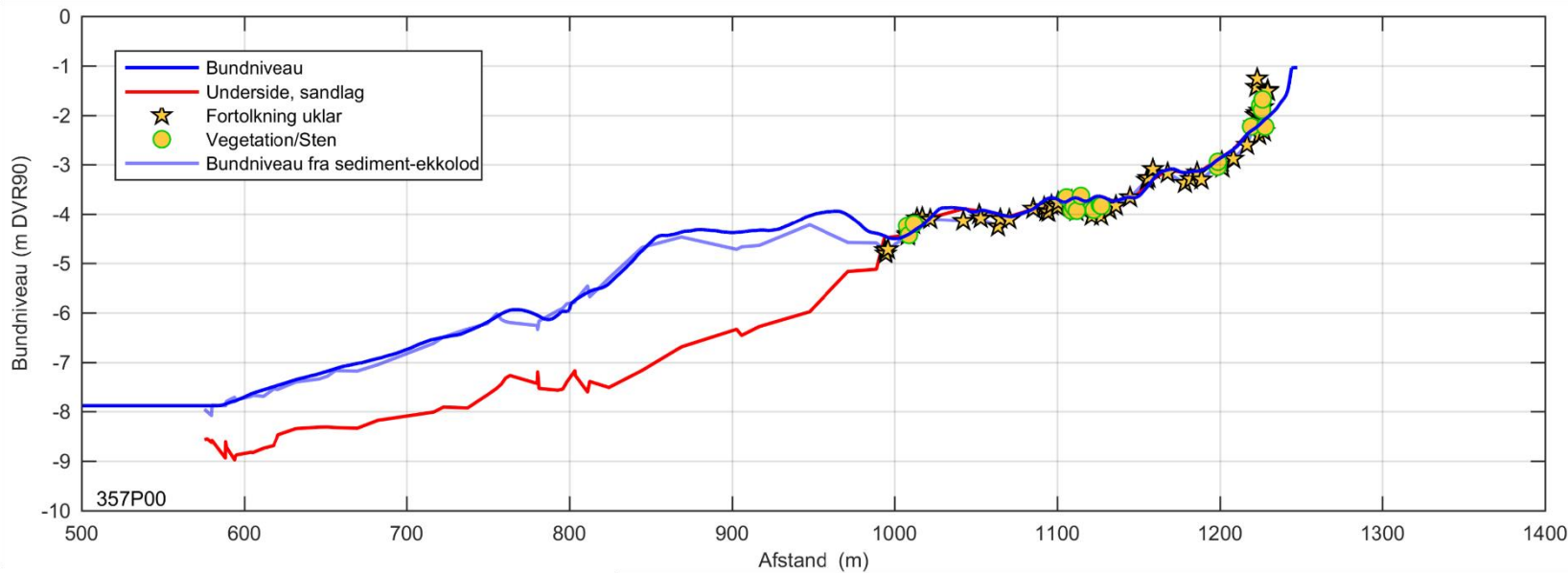


B.2.1 Profil 353P00 – Gilleje – Nakkehoved fodringsområde



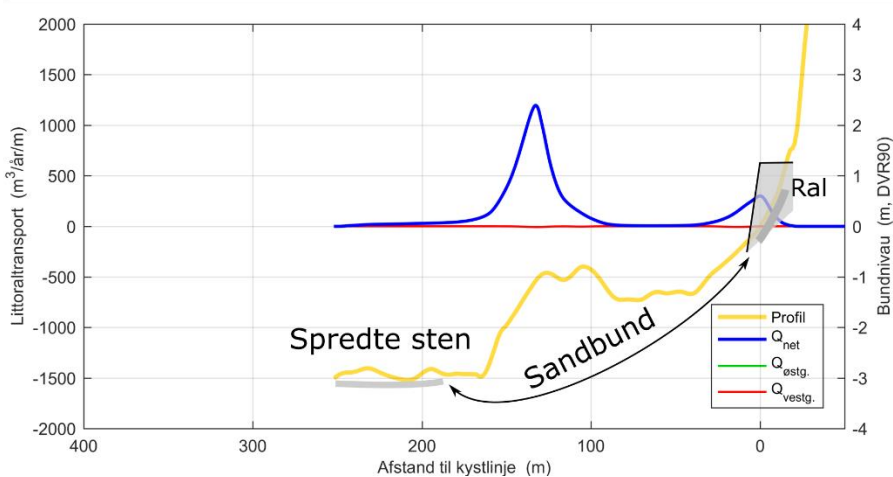
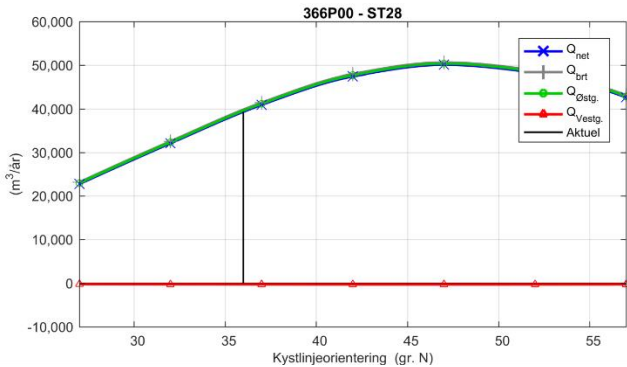
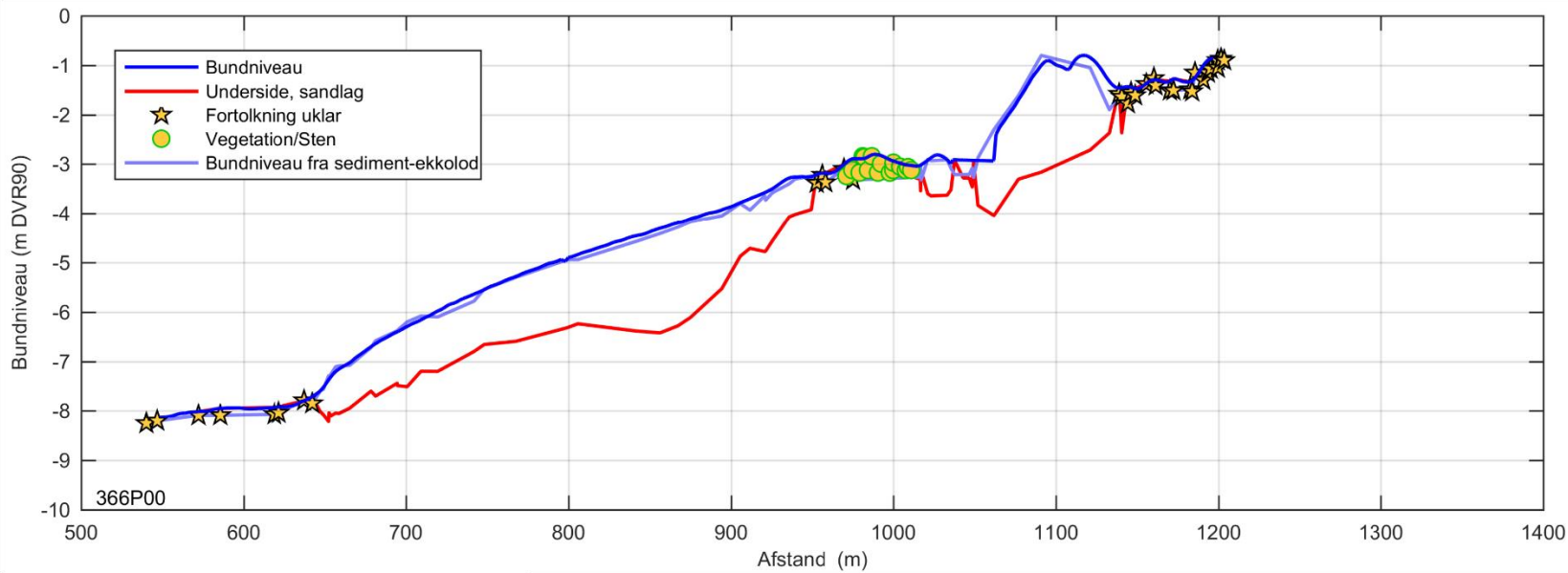
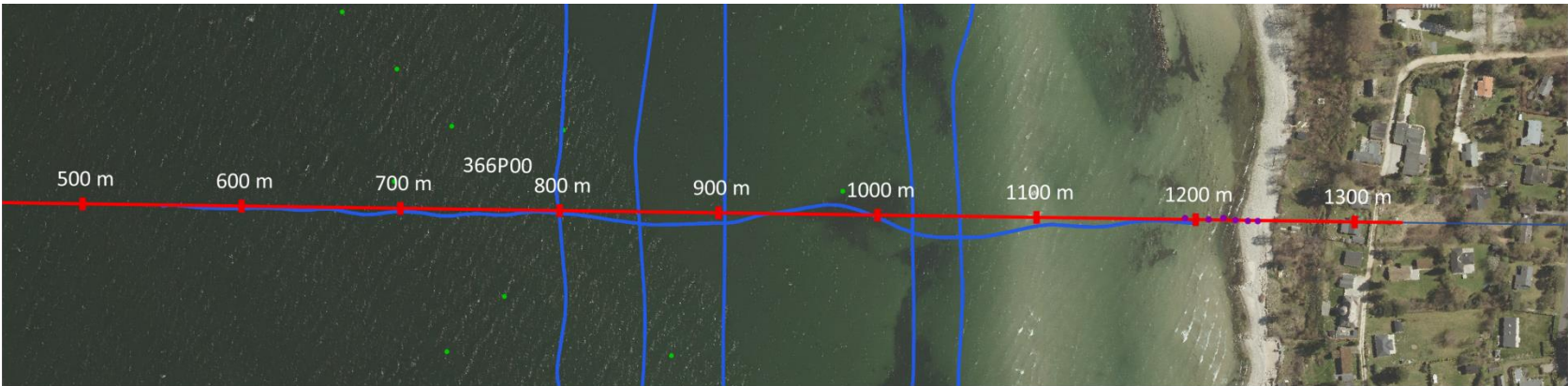
Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	21.000
Bruttotransport (m³/år)	21.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	900
Bredde af transportzone (m)	250
Aktiv dybde (m DVR90)	-3
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Massive mængder af sand tilgængeligt i størstedelen af kystprofilet. Sten/ral i opskylszonen. Reduktion: 0 m³/år
Kystkonstruktioner	Reduktion: 0 m³/år
Andre faktorer	Sandlaget på større vanddybde optræder som følge af bypass (naturligt og kunstigt) omkring Gilleleje havn.
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	21.000

B.2.2 Profil 357P00 – Gilleje – Nakkehoved fodringsområde



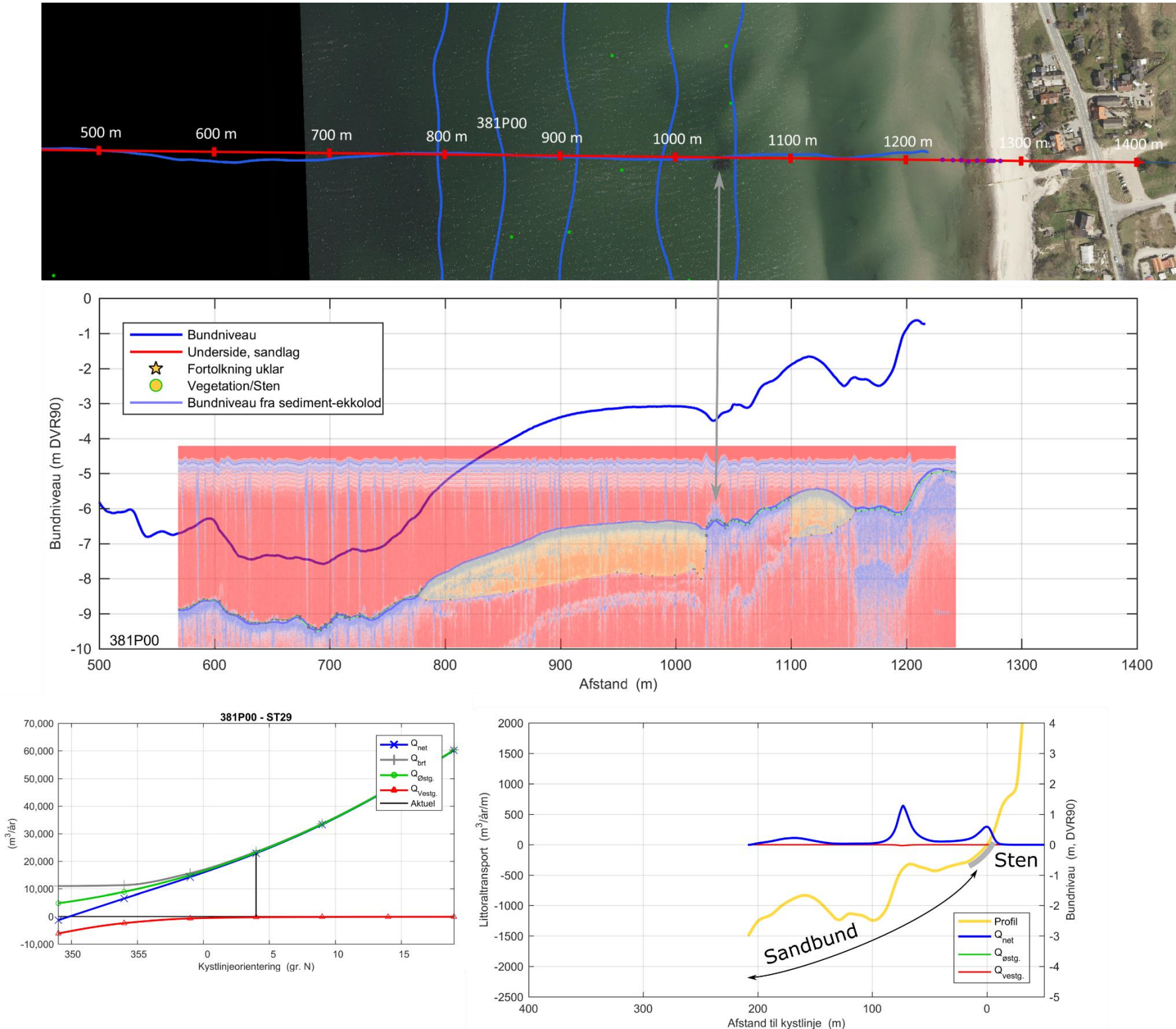
Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	20.000
Bruttotransport (m³/år)	22.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	2.500
Bredde af transportzone (m)	100
Aktiv dybde (m DVR90)	-3
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Massive mængder af sand tilgængeligt i den ydre del af profilet (søværts -4 m DVR90). Sten/ral i opskylszonen. Reduktion: 0 m³/år
Kystkonstruktioner	Reduktion: 0 m³/år
Andre faktorer	Reduktion: 0 m³/år
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	20.000

B.2.3 Profil 366P00 – Munkerup fodringsområde



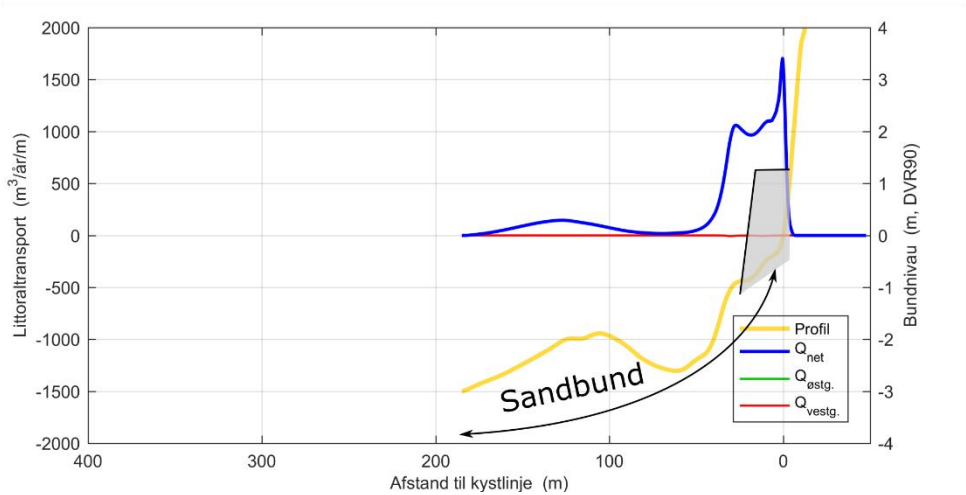
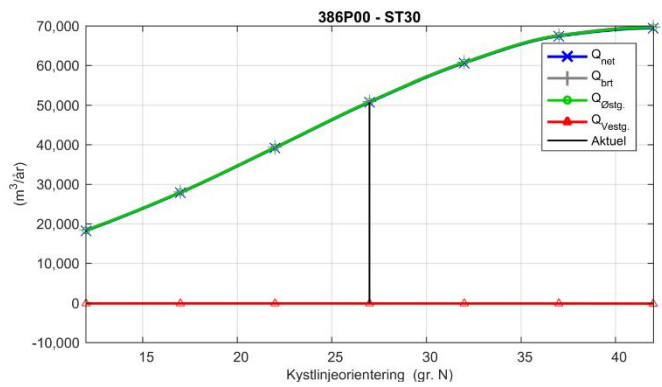
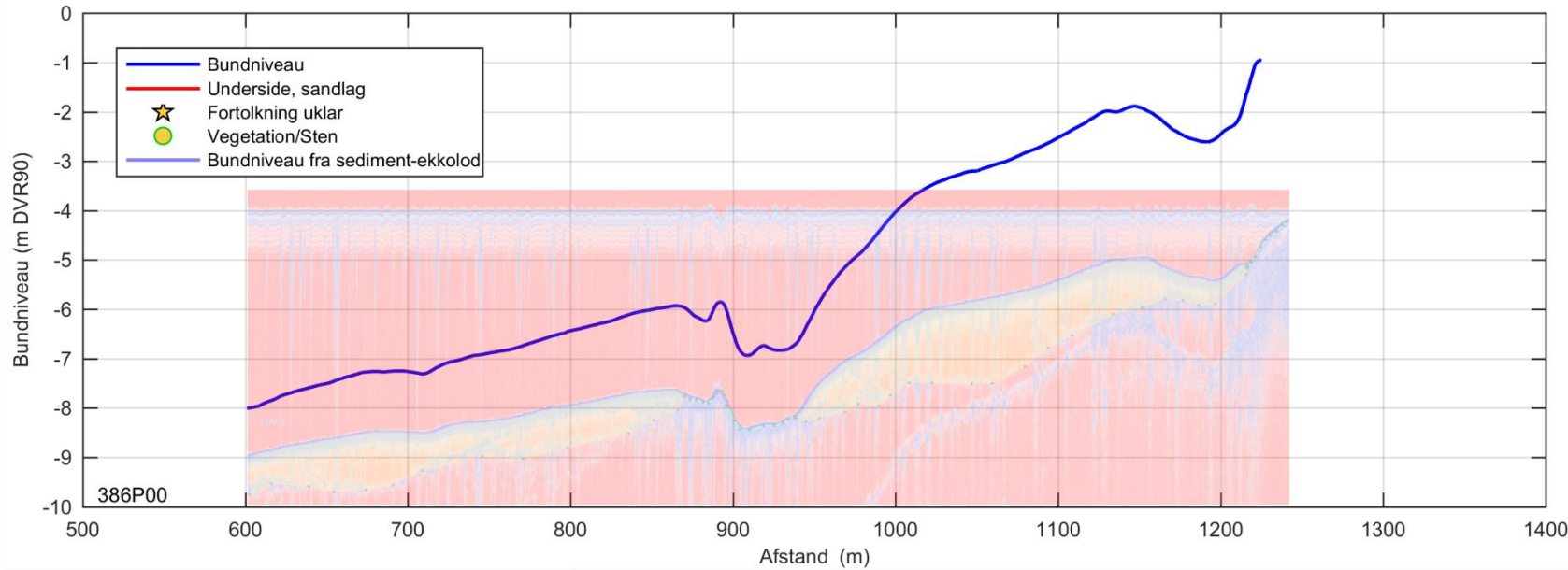
Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	39.000
Bruttotransport (m³/år)	40.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	1.700
Bredde af transportzone (m)	200
Aktiv dybde (m DVR90)	-3
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sand er tilgængeligt lige udenfor opskylszonen, på inderste revle og længere ude i profilet (søværts -3 m DVR90 konturen). Sten/ral i opskylszonen. Reduktion: 0 m³/år
Kystkonstruktioner	Små høfder findes både opstrøms og nedstrøms. Høfderne vurderes at nå ud til ca. -0.5 m DVR90. Desuden er der en enkelt bølgebryder længere nedstrøms. Konstruktionerne vurderes at reducere den inderste del af transporten med ca. 25%. Reduktion: 2.000 m³/år
Andre faktorer	Kystprofilet ligger ca. 800 m nedstrøms en markant ændring i kystlinjeorientering. Sandtransportberegningerne antager fuldt udviklede bølgedrevne strømme, hvilket ikke er rimelig her. Groft sagt vil en tilpasning af strømmen kunne foregå over ca. 5 gange bredden af brændingszonen. Transporten vurderes at blive reduceret med 20%. Reduktion: 8.000 m³/år
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	29.000

B.2.4 Profil 381P00 – Munkerup fodringsområde



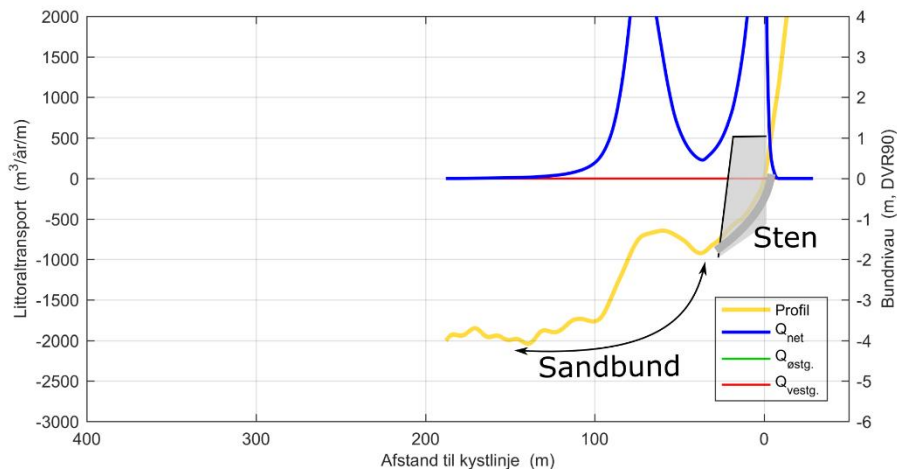
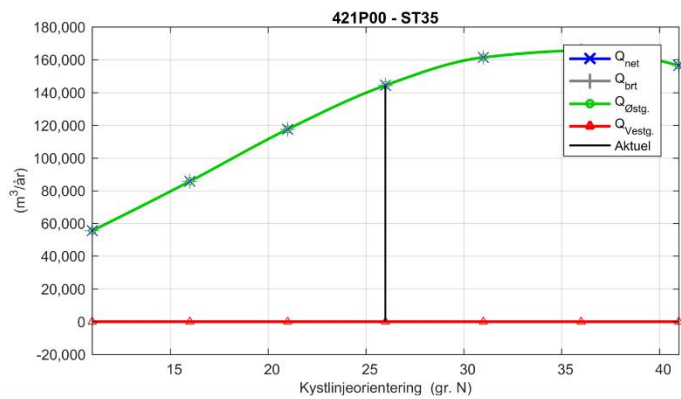
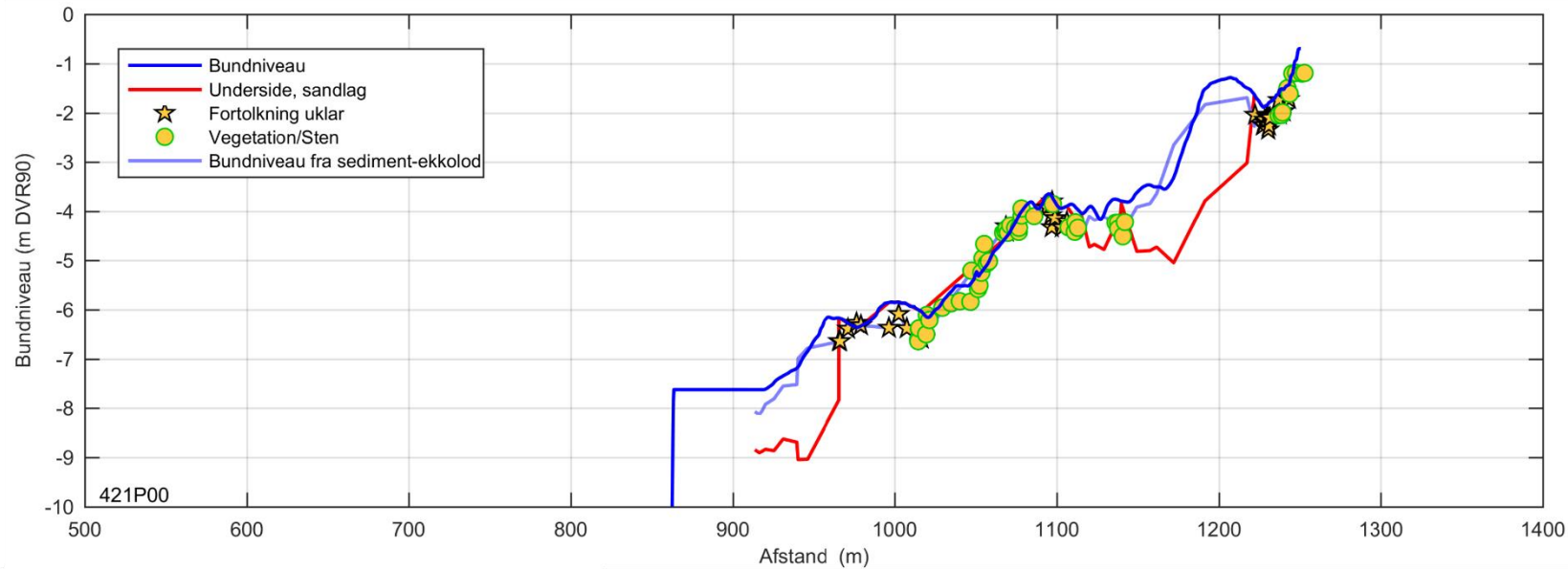
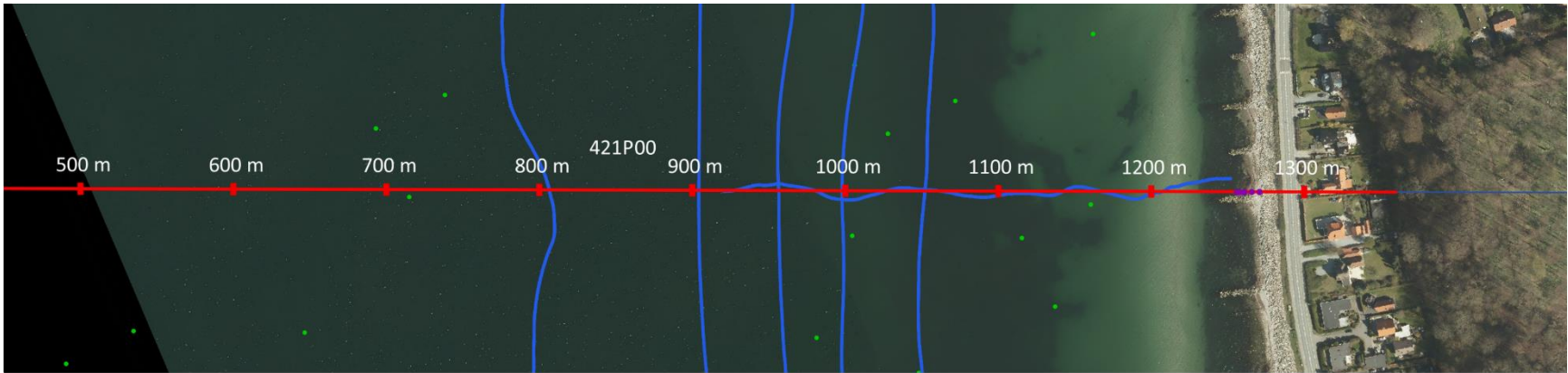
Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	23.000
Bruttotransport (m³/år)	23.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	1.800
Bredde af transportzone (m)	200
Aktiv dybde (m DVR90)	-3
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sand er tilgængeligt i det meste af kystprofillet (søværts -0.75 m DVR90 konturen). Sten/ral i opskylszonen, dog ikke i et omfang, der påvirker transporten nævneværdigt. Den grå pil afmærker et lille rev. Sandtilgængeligheden generelt gør dog at revet ikke har nogen påvirkning på transporten. Reduktion: 0 m³/år
Kystkonstruktioner	Badebroen umiddelbart vest for profiler påvirker ikke transporten. Reduktion: 0 m³/år
Andre faktorer	Reduktion: 0 m³/år
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	23.000

B.2.5 Profil 386P00 – Munkerup fodringsområde



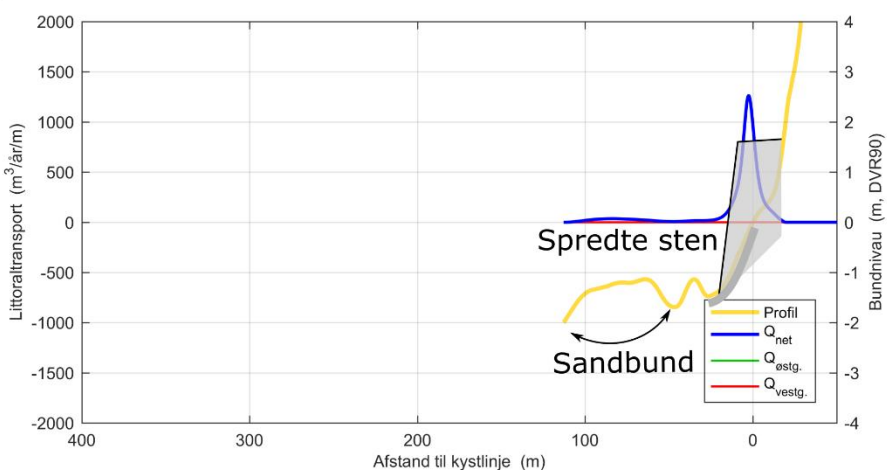
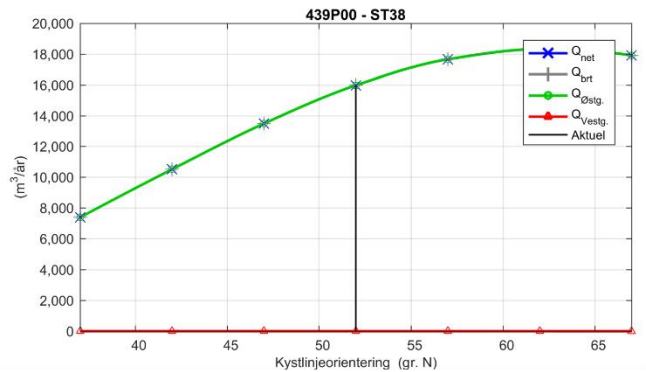
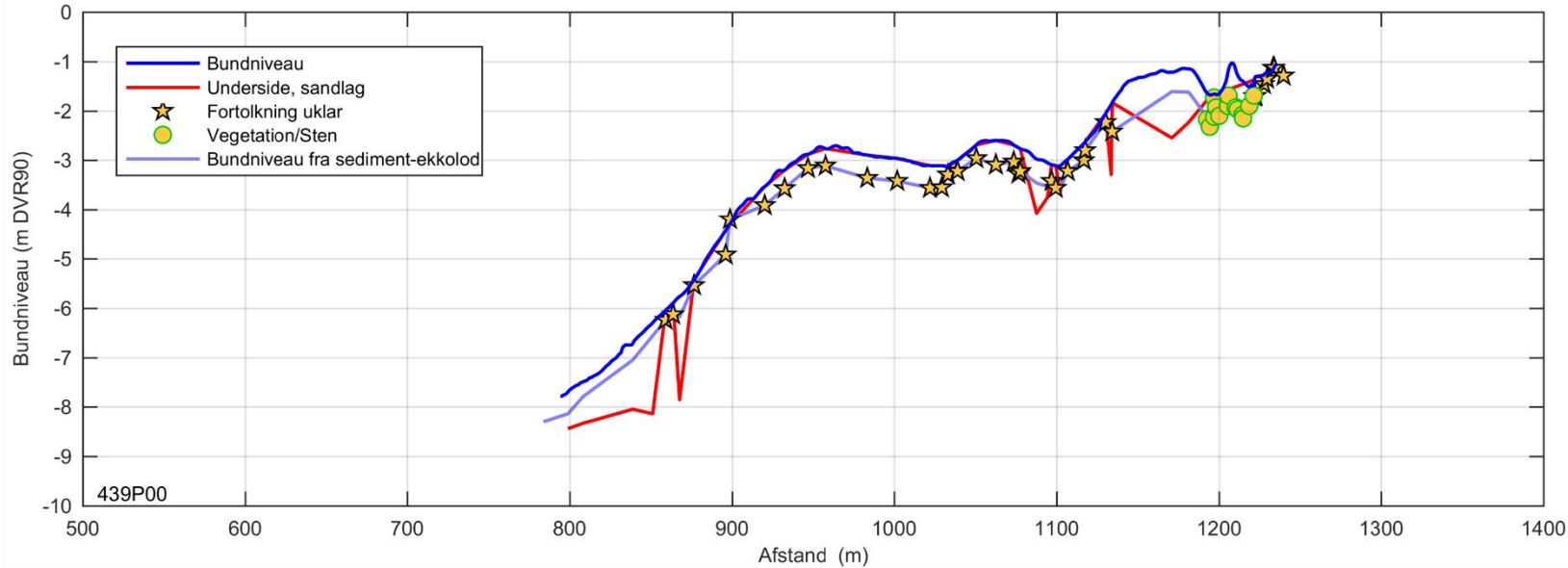
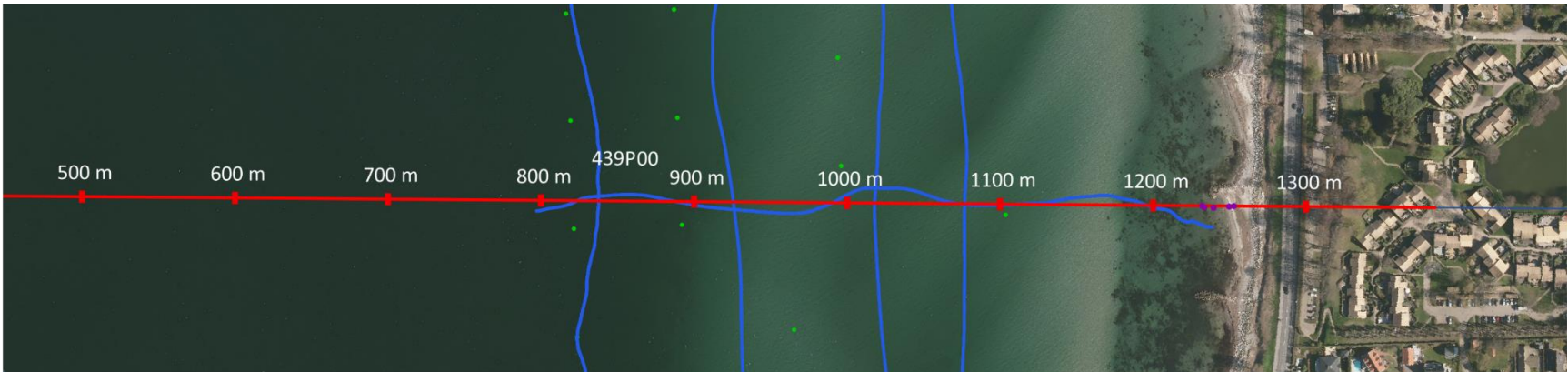
Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	51.000
Bruttotransport (m³/år)	51.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	2.200
Bredde af transportzone (m)	200
Aktiv dybde (m DVR90)	-3
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sand er tilgængeligt i det meste af kystprofilet (søværts -0.75 m DVR90 konturen). Sten/ral i opskylszonen, imellem høfderne. Reduktion: 0 m³/år
Kystkonstruktioner	Det tætpakkede høfdefelt vurderes at reducere transporten i det inderste transportbælte med ca. 60%. Reduktion: 25.000 m³/år
Andre faktorer	Reduktion: 0 m³/år
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	26.000

B.2.6 Profil 421P00 – Ålsgårde fodringsområde



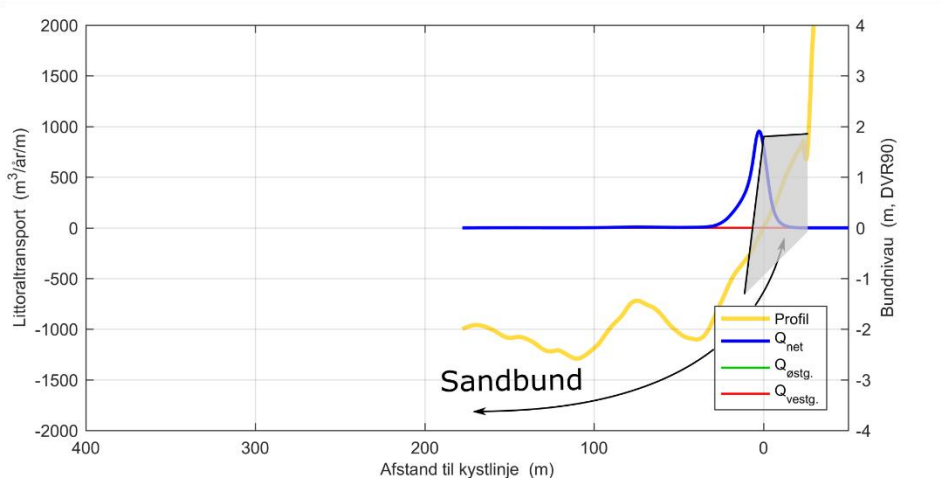
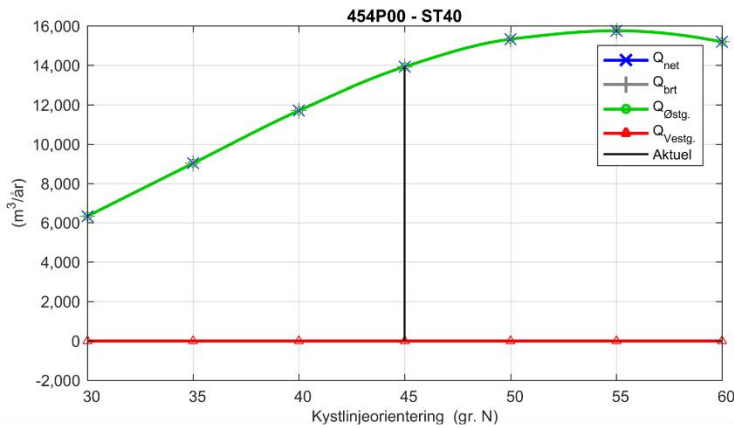
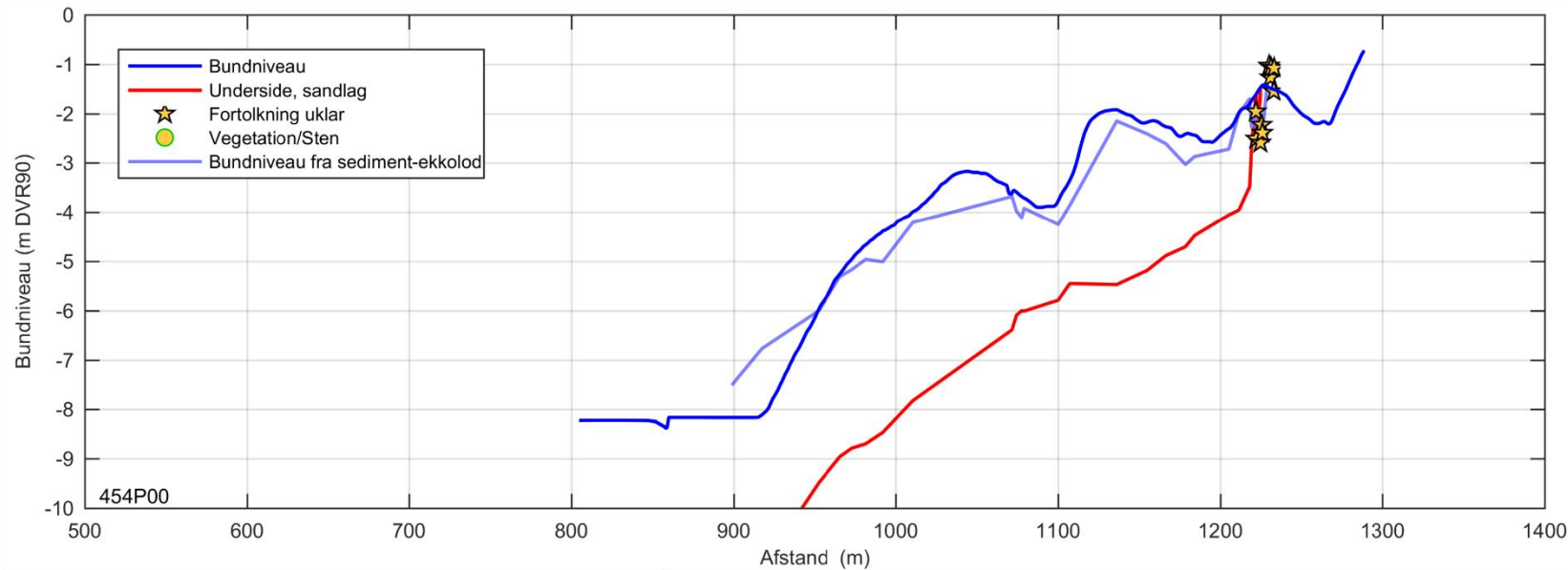
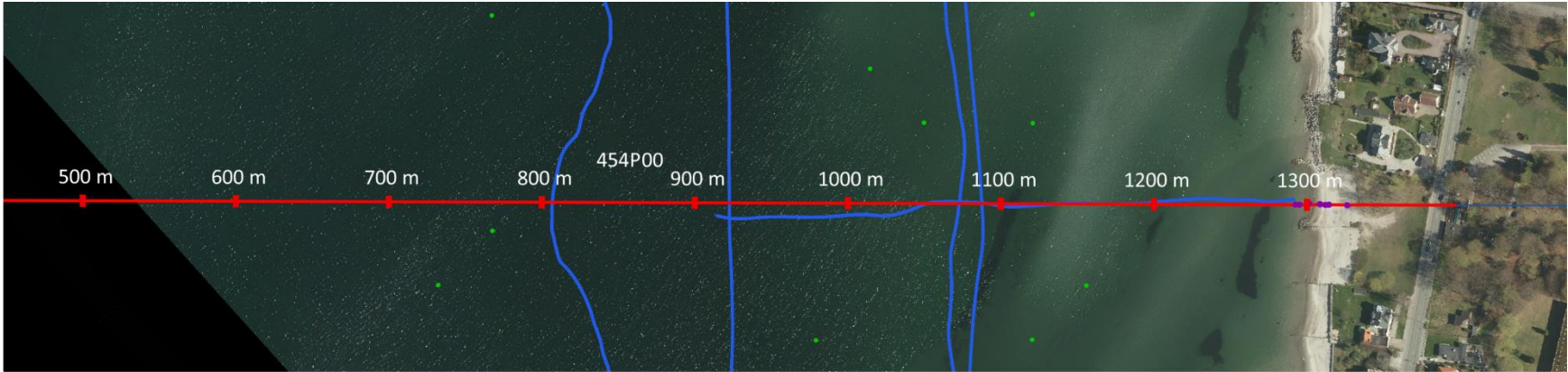
Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	144.000
Bruttotransport (m³/år)	144.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	4.800
Bredde af transportzone (m)	125
Aktiv dybde (m DVR90)	-4
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sand er tilgængeligt på revlen samt søværts -6 m DVR90 konturen. Sten/ral i opskylszonen, imellem høfderne. Reduktion: 0 m³/år
Kystkonstruktioner	Det tætpakkede høfdefelt vurderes at reducere transporten i det inderste transportbælte med ca. 90%. Reduktion: 60.000 m³/år
Andre faktorer	Reduktion: 0 m³/år
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	84.000

B.2.7 Profil 439P00 – Ålsgårde fodringsområde



Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	16.000
Bruttotransport (m³/år)	16.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	400
Bredde af transportzone (m)	100
Aktiv dybde (m DVR90)	-2
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sand er tilgængeligt fra revlen og udefter. Imellem revlen og stranden ligger der spredte sten med bevoksning på. Stenene vurderes ikke at påvirke sandtransporten nævneværdigt. Reduktion: 0 m³/år
Kystkonstruktioner	Høfdefeltet vurderes at reducere transporten i det inderste transportbælte med ca. 25%. Reduktion: 3.000 m³/år
Andre faktorer	Kystprofilen indeholder skrårevler der ligger i et niveau på ca. -3 m DVR90 (mellem 150 m og 300 m fra kysten). Disse revler er dannet af regionale strømme som i dette område forstærkes af tragten mellem Sjælland og Sverige. Der foregår en betydelig transport af sand herpå og en del af sandet kommer fra littoraltransporten længere vestpå. En vurdering af størrelsen er givet i afsnit 5.3.1.3. Forøgelse: 10.000 m³/år
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	23.000

B.2.8 Profil 454P00 – Ålsgårde fodringsområde



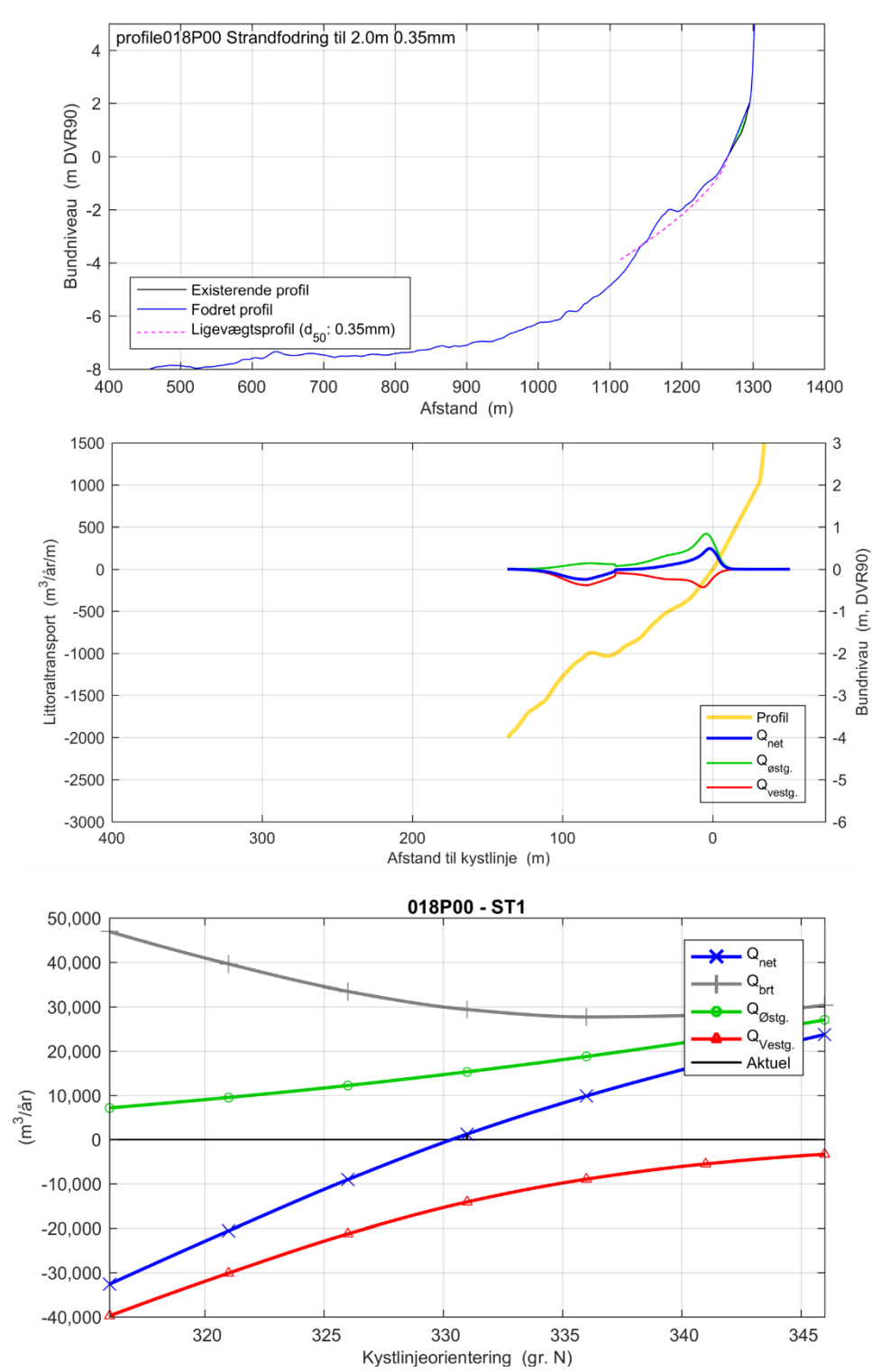
Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	14.000
Bruttotransport (m³/år)	14.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	400
Bredde af transportzone (m)	<100
Aktiv dybde (m DVR90)	-2
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Massive mængder af sand er tilgængelige i hele kystprofilet. Reduktion: 0 m³/år
Kystkonstruktioner	Højdefeltet vurderes ikke at påvirke transporten nævneværdigt. Reduktion: 0 m³/år
Andre faktorer	Kystprofilet indeholder skrårevler der ligger i et niveau på fra -2 m DVR90 og ud til ca. -7 m DVR90 (mellem 50 m og 400 m fra kysten). Disse revler er dannet af regionale strømme som i dette område forstærkes af tragten mellem Sjælland og Sverige. Der foregår en betydelig transport af sand herpå og en del af sandet kommer fra littoraltransporten længere vestpå. En vurdering af størrelsen er givet i afsnit 5.3.1.3. Forøgelse: 15.000 m³/år
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	29.000



Denne side skal være blank.

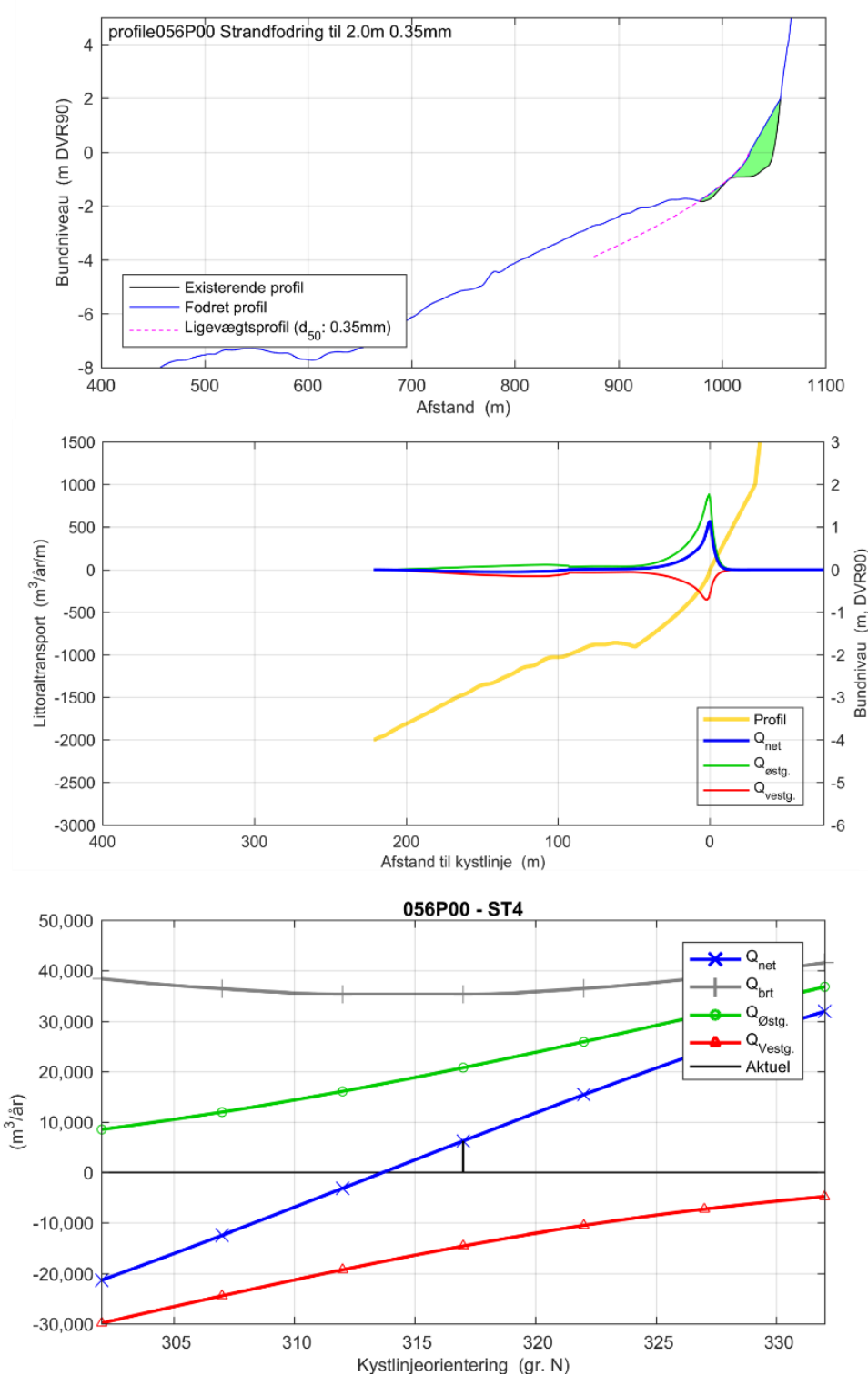
B.3 Korrektion af langtransporten for fodringscenarie 1 – Vest for Gilleleje havn

B.3.1 Profil 018P00 – Kikhavn – Liseleje fodringsområde



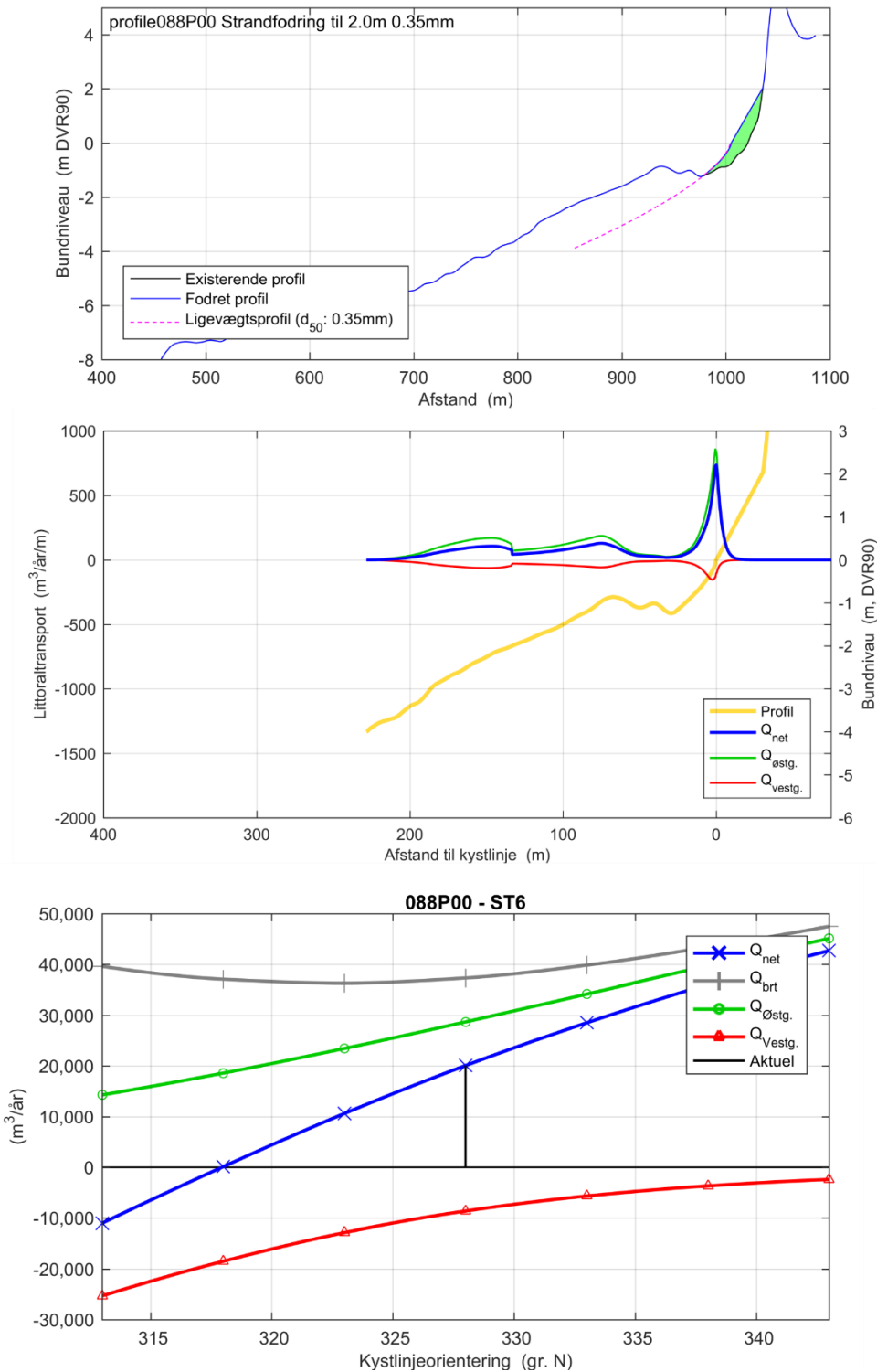
Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	0
Bruttotransport (m³/år)	29.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	1.900
Bredde af transportzone (m)	125
Aktiv dybde (m DVR90)	-3
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sand er tilgængeligt i den inderste del af profilet, hvor transporten foregår. Sandfodringen påvirker ikke sandtilgængeligheden, men ændrer på sandstørrelsen i den inderste del af kystprofilet. Reduktion: 0 m³/år
Kystkonstruktioner	Kystparallelle bølgebrydere, der når ud til en vanddybde på ca. 0,5 m. Bølgebryderene holder på den bagvedliggende sandstrand, men påvirker ikke det samlede sandbudget nævneværdigt. Reduktion: 0 m³/år
Andre faktorer	
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	0

B.3.2 Profil 056P00 – Kikhavn – Liseleje fodringsområde



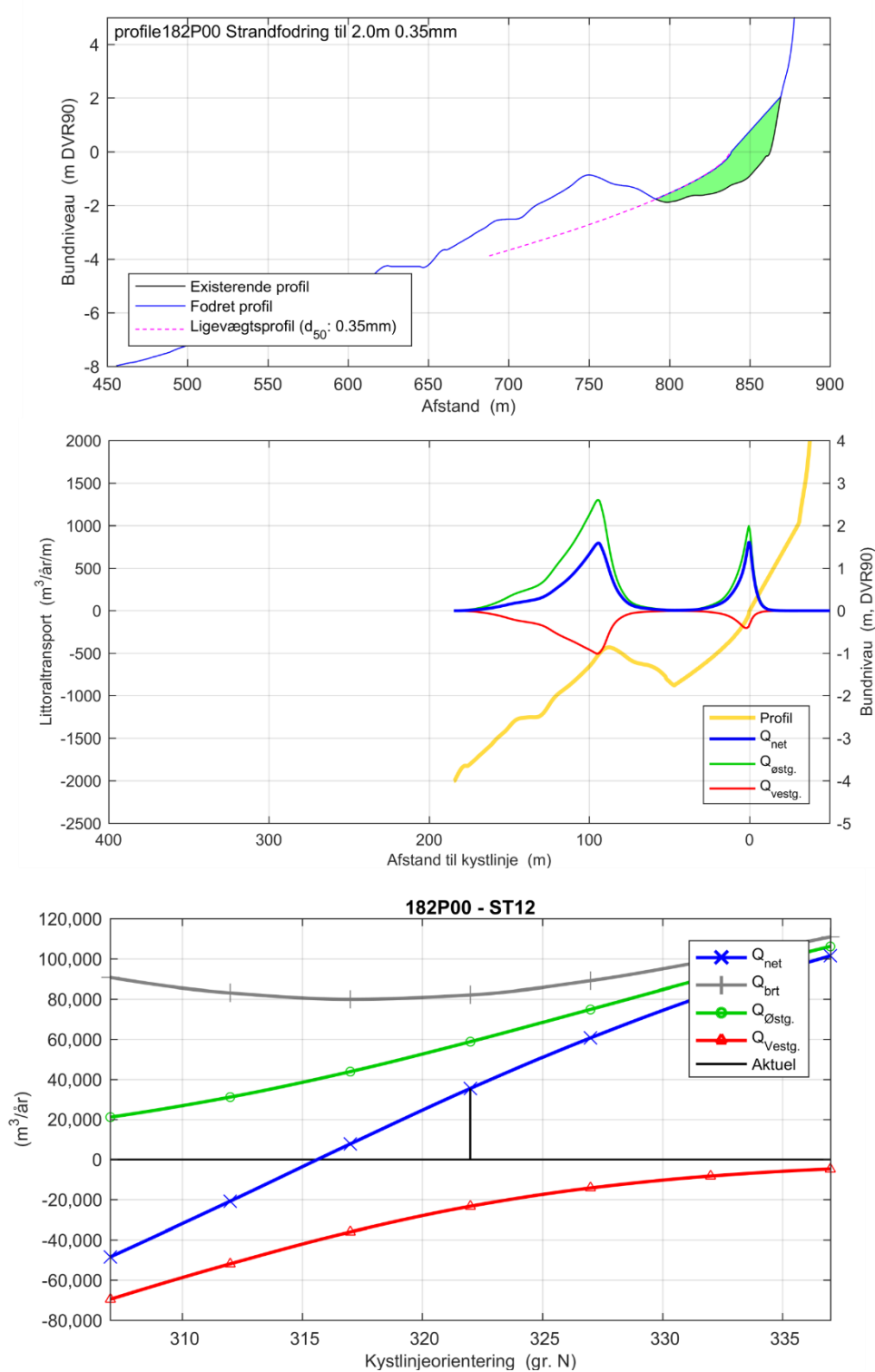
Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	6.000
Bruttotransport (m³/år)	35.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	1.900
Bredde af transportzone (m)	200
Aktiv dybde (m DVR90)	-3
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sand er tilgængeligt i hele profilet. Der er enkelte områder med bevoksning/sten, men områderne er spredte og vurderes at have minimal påvirkning på den langsgående sandtransport. Sandfodringen påvirker ikke sandtilgængeligheden men ændrer på sandstørrelsen i den inderste del af kystprofilet. Reduktion: 0 m³/år
Kystkonstruktioner	Reduktion: 0 m³/år
Andre faktorer	Transporten stiger ifølge modelberegningerne, fordi kystprofilet bliver stejlere i den inderste del af profilet. Ændringen er på 1,000 m³/år men vurderes ikke at have at være mærkbar i praksis.
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	6.000

B.3.3 Profil 088P00 – Kikhavn – Liseleje fodringsområde



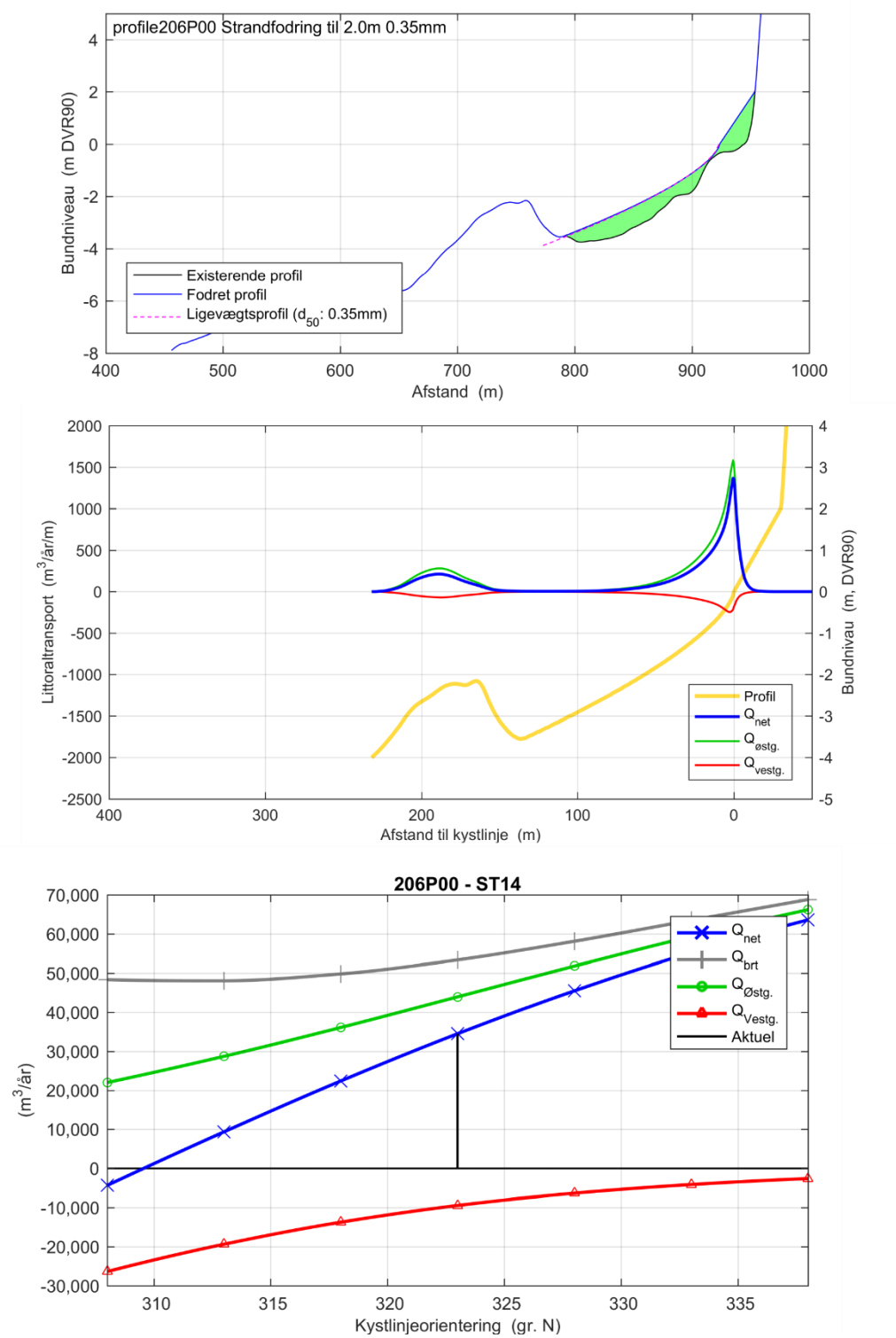
Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	20.000
Bruttotransport (m³/år)	37.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	1.800
Bredde af transportzone (m)	200
Aktiv dybde (m DVR90)	-3
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sand er tilgængeligt fra inderste revle og udefter. Den inderste del af profilet er dækket af fodringssand. Desuden antages fodringssandet at påvirke kornstørrelsesfordelingen ud til ca. -2 m DVR90. Der vurderes ikke at være nogen reduktion i transport som følge af sandtilgængelighed. Reduktion: 0 m³/år
Kystkonstruktioner	Kystparallelle bølgebrydere, der når ud til en vanddybde på ca. 1 m (også efter fodringen). Bølgebryderne vurderes at reducere transporten i det inderste transportbælte med ca. 25%. Reduktion: 2.000 m³/år
Andre faktorer	Kystprofilet bliver stejlere i den inderste del hvilket medfører at sandtransporten i det inderste bælte stiger i forhold til nuværende forhold. Samlet set falder transportkapaciteten marginalt fordi den ændrede kornstørrelse på inderrevlen reducerer transporten yderligere.
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	18.000

B.3.4 Profil 182P00 – Tisvilde – Vincentstien fodringsområde



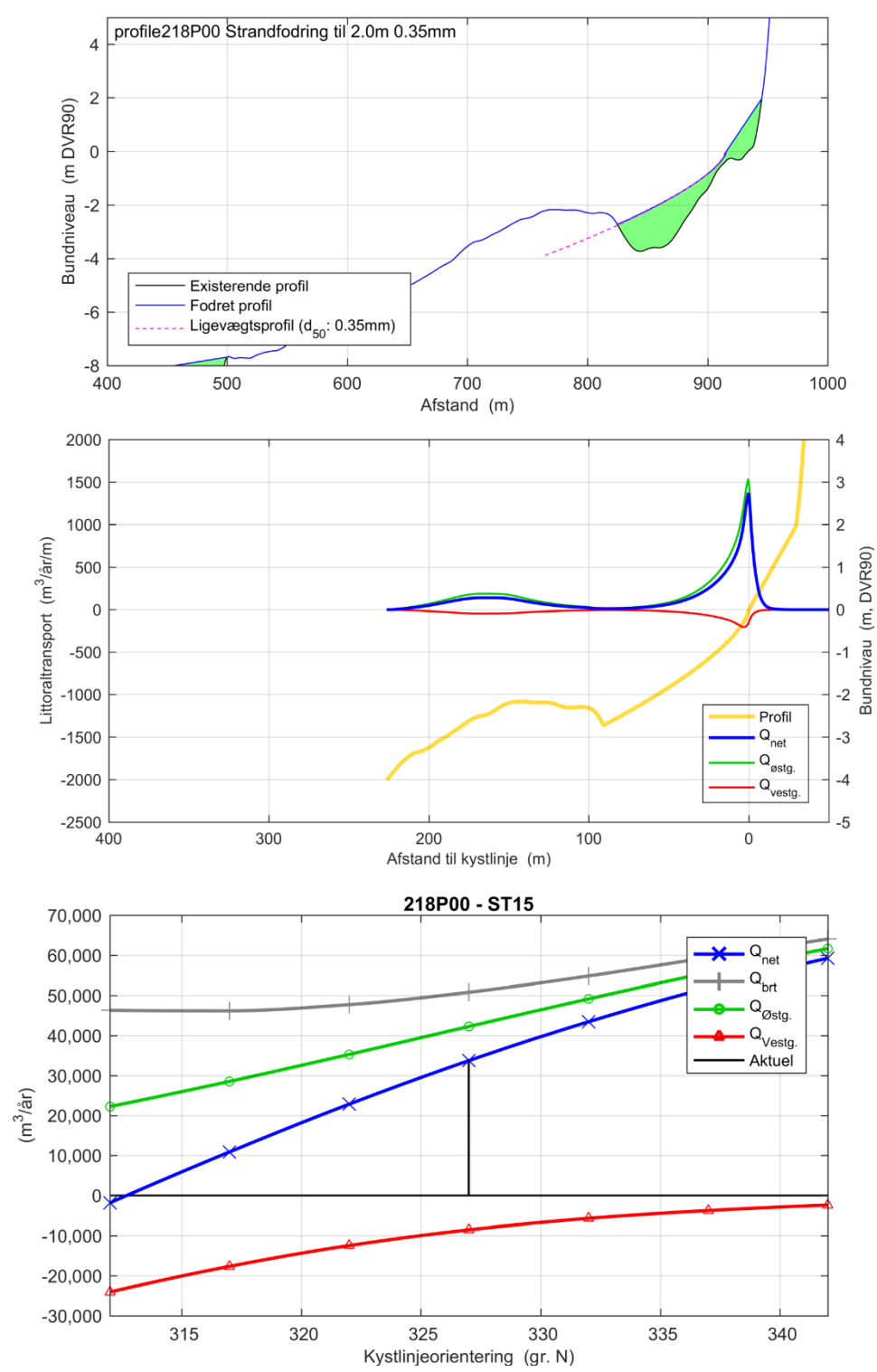
Transportkapacitet	
Nettotransport ($\text{m}^3/\text{år}$)	35.000
Bruttotransport ($\text{m}^3/\text{år}$)	82.000
Følsomhed ($\text{m}^3/\text{år/gr.}$)	5.400
Bredde af transportzone (m)	200
Aktiv dybde (m DVR90)	-4
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sand er tilgængeligt i hele profilet. Søværts -3 m DVR90 bundkonturen findes spredte områder med vegetation/sten, som ikke vurderes at påvirke transporten. Reduktion: 0 $\text{m}^3/\text{år}$
Kystkonstruktioner	Der findes bølgebrydere opstrøms og en enkelt høfde nedstrøms. Strandfodringen flytter her stranden søværts så konstruktionerne begravnes og ikke længere har nogen nævneværdig effekt. Konstruktionerne vil blive virksomme igen, når stranden over årene rykker tilbage, som følge af erosion. Reduktion: 0 $\text{m}^3/\text{år}$
Andre faktorer	
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport ($\text{m}^3/\text{år}$)	35.000

B.3.5 Profil 206P00 – Tisvilde – Vincentstien fodringsområde



Transportkapacitet	
Nettotransport ($m^3/år$)	35.000
Bruttotransport ($m^3/år$)	53.000
Følsomhed ($m^3/år/gr.$)	2.300
Bredde af transportzone (m)	250
Aktiv dybde (m DVR90)	-4
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Før fodringen er sand tilgængeligt på ydersiden af revlen og i den inderste del af kystprofilet. Efter fodringen vil der desuden være sand tilgængeligt fra revletruget og indefter. Reduktion: 0 $m^3/år$
Kystkonstruktioner	De kystparallelle bølgebrydere begraves i forbindelse med strandfodringen og har derfor ingen nævneværdig effekt på den langsgående sandtransport. Konstruktionerne vil blive virksomme igen, når stranden over årene rykker tilbage, som følge af erosion. Reduktion: 0 $m^3/år$
Andre faktorer	Sandtransporten reduceres betydeligt som følge af den ændrede sandkornstørrelse i den inderste del af kystprofilet.
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport ($m^3/år$)	35.000

B.3.6 Profil 218P00 – Tisvilde – Vincentstien fodringsområde



Transportkapacitet

Nettotransport ($m^3/år$)	34.000
Bruttotransport ($m^3/år$)	51.000
Følsomhed ($m^3/år/gr.$)	2.100
Bredde af transportzone (m)	200
Aktiv dybde (m DVR90)	-4

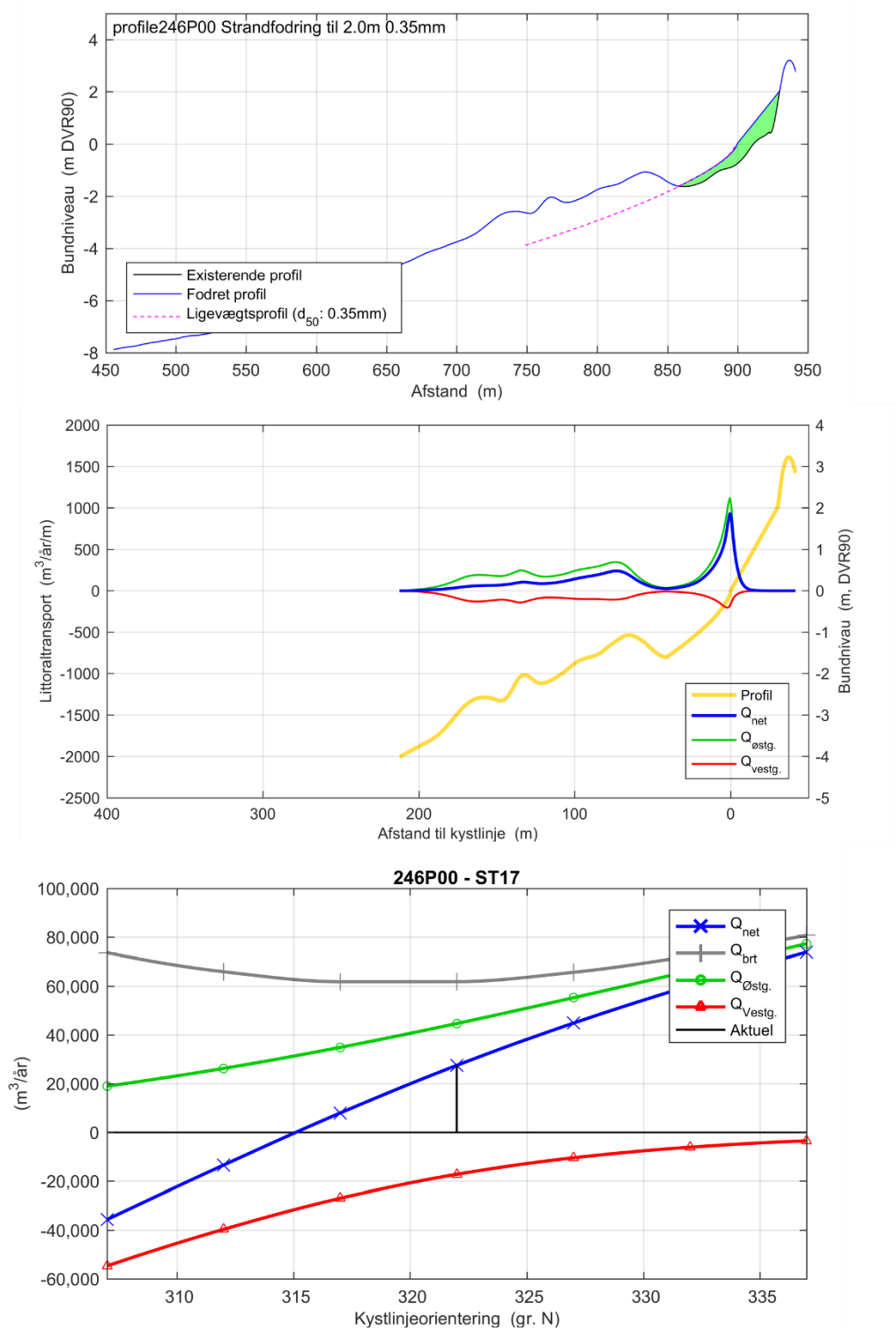
Reduktion af littoraltransport

Sand tilgængelighed	Sand er tilgængeligt i hele kystprofilet både før og efter sandfodringen. Reduktion: 0 $m^3/år$
Kystkonstruktioner	De kystparallelle bølgebrydere begraves i forbindelse med strandfodringen og har derfor ingen nævneværdig effekt på den langsgående sandtransport. Konstruktionerne vil blive virksomme igen, når stranden over årene rykker tilbage, som følge af erosion. Reduktion: 0 $m^3/år$
Andre faktorer	Sandtransporten reduceres betydeligt som følge af den ændrede sandkornstørrelse i den inderste del af kystprofilet.

Aktuel littoraltransport

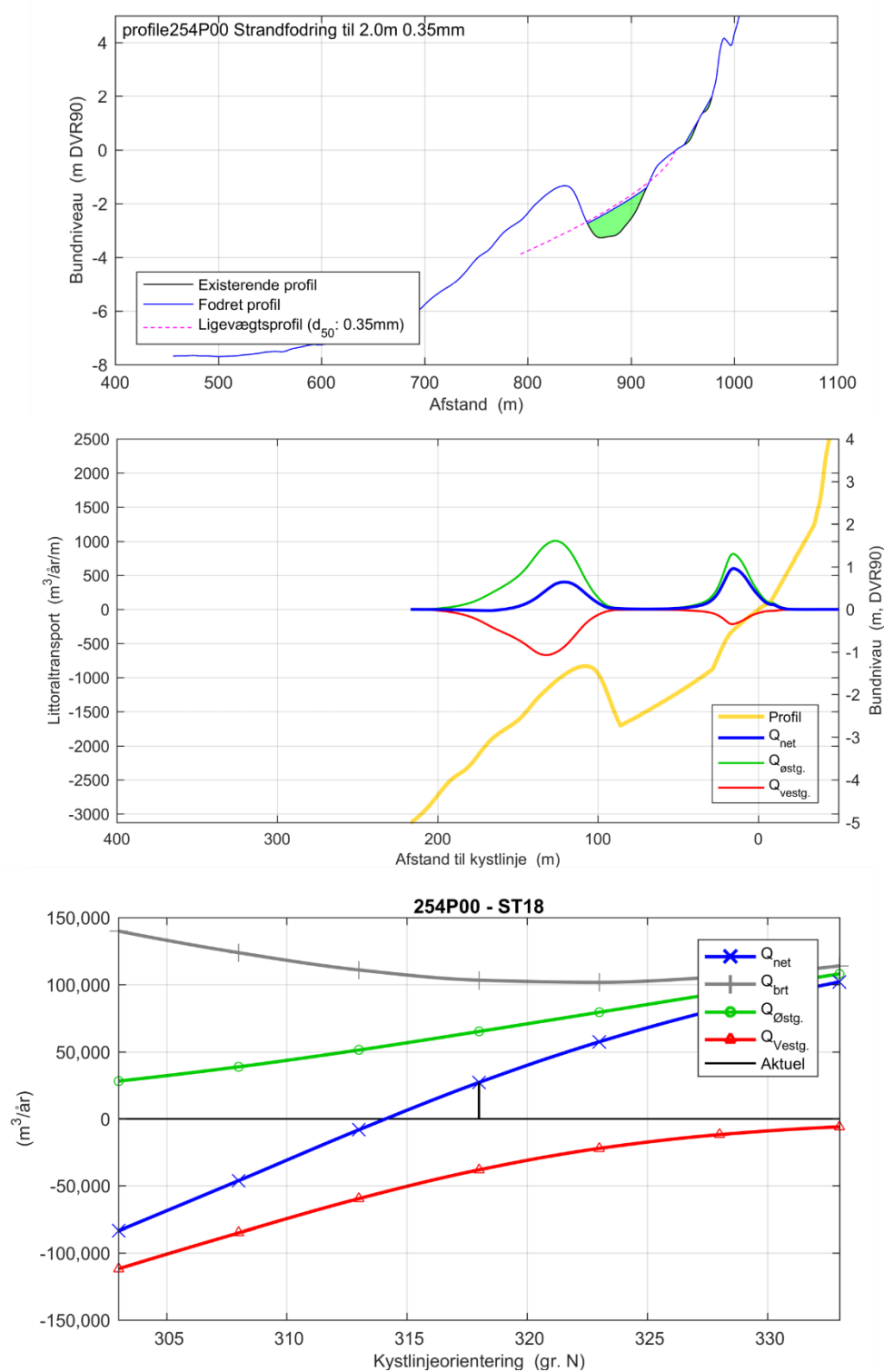
Årlig transport ($m^3/år$)	34.000
------------------------------	--------

B.3.7 Profil 246P00 – Rågeleje – Trillingerne fodringsområde



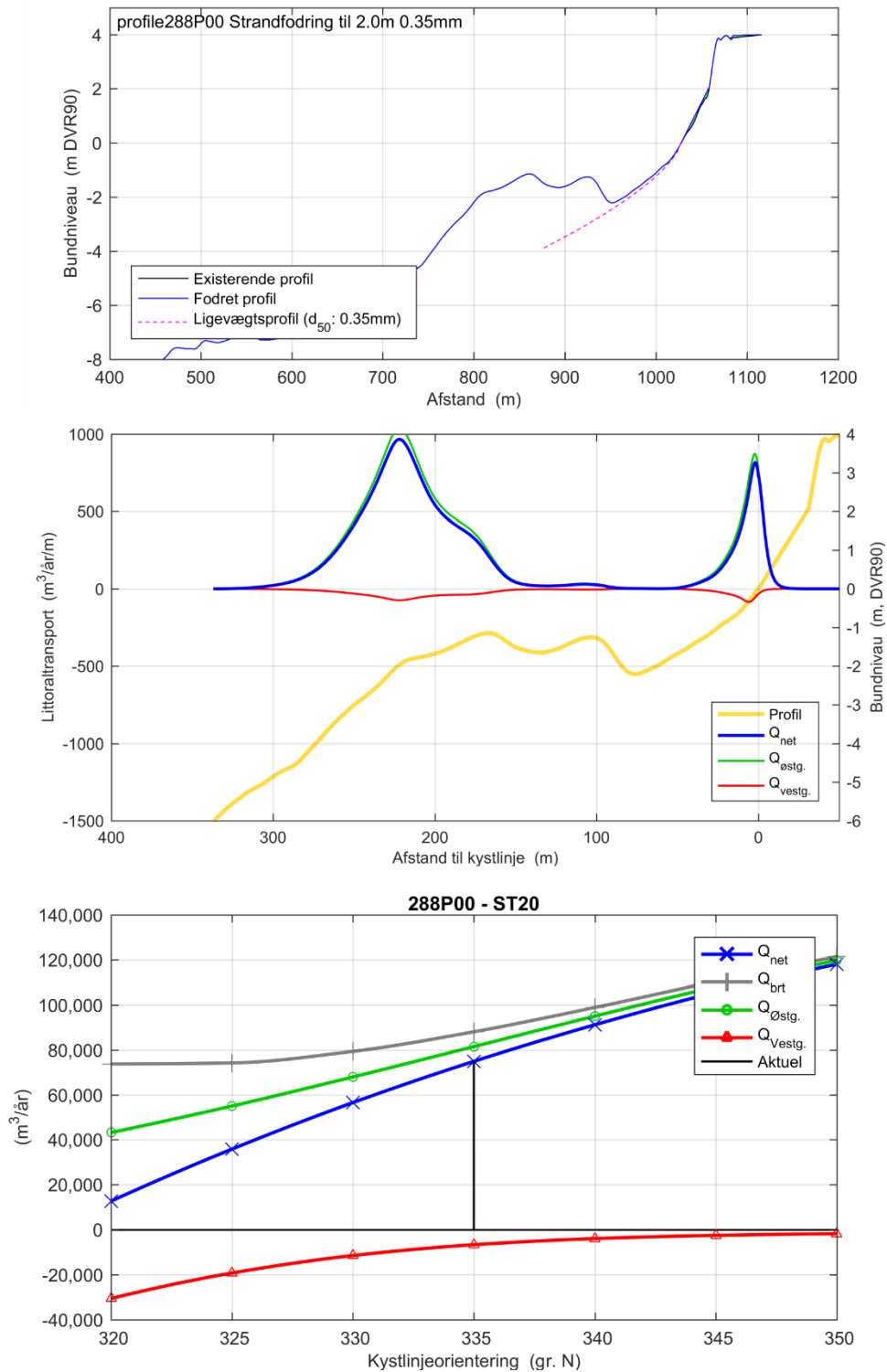
Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	28.000
Bruttotransport (m³/år)	62.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	3.800
Bredde af transportzone (m)	200
Aktiv dybde (m DVR90)	-4
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sand er tilgængeligt i hele kystprofilet både før og efter sandfodringen. Reduktion: 0 m³/år
Kystkonstruktioner	Ingen. Reduktion: 0 m³/år
Andre faktorer	Sandtransporten reduceres som følge af den ændrede sandkornstørrelse i den inderste del af kystprofilet.
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	28.000

B.3.8 Profil 254P00 – Rågeleje – Trillingerne fodringsområde



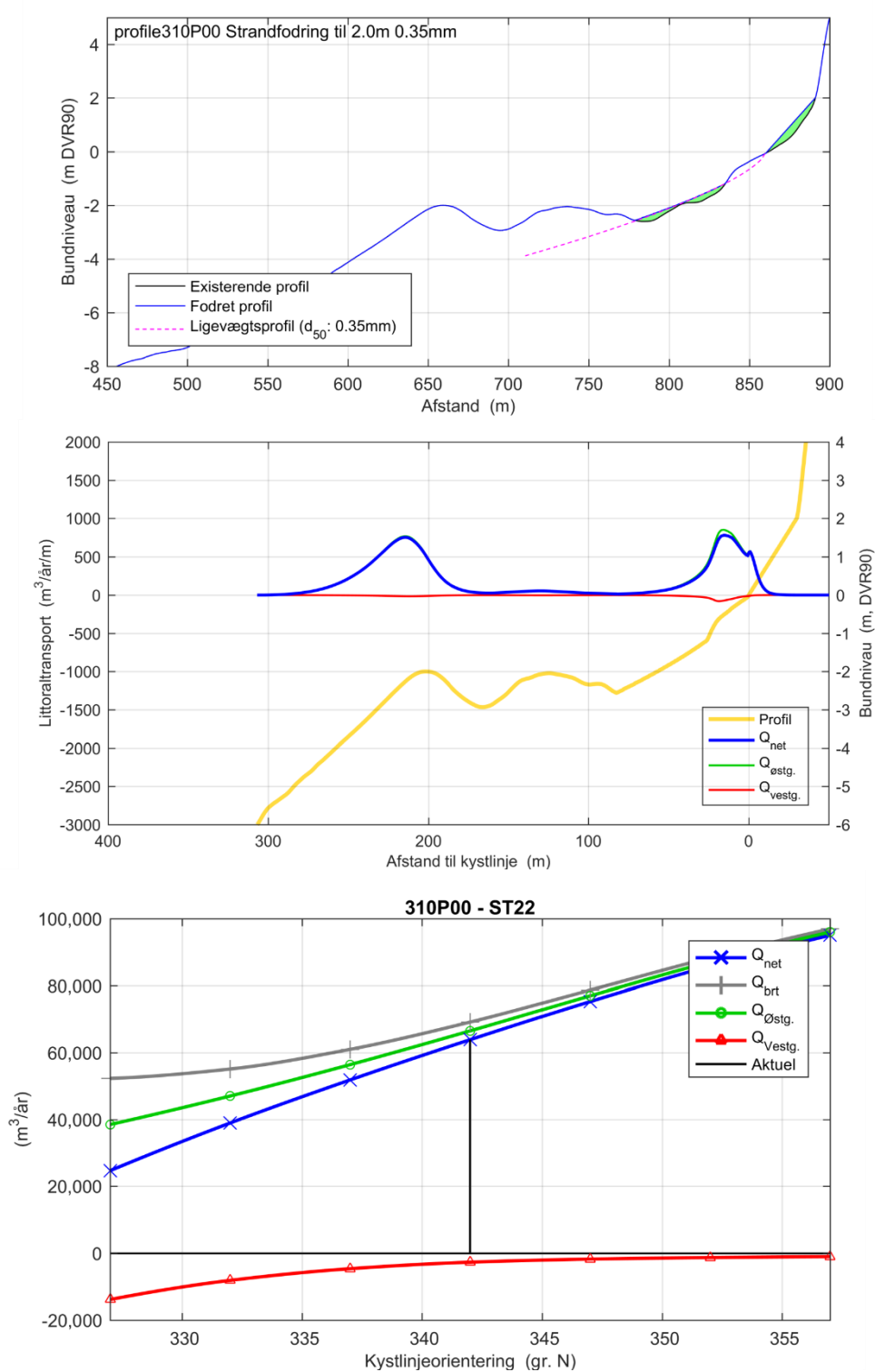
Transportkapacitet	
Nettotransport ($\text{m}^3/\text{år}$)	27.000
Bruttotransport ($\text{m}^3/\text{år}$)	103.000
Følsomhed ($\text{m}^3/\text{år/gr.}$)	6.700
Bredde af transportzone (m)	200
Aktiv dybde (m DVR90)	-4
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sand er tilgængeligt i hele kystprofilet både før og efter sandfodringen. Reduktion: 0 $\text{m}^3/\text{år}$
Kystkonstruktioner	Korte høfder, konstrueret som kombination af stenkastning (inderst) og andet materiale yders (træ eller spuns). Konstruktionerne bliver ikke påvirket af strandfodringen og vurderes fortsat at reducere transporten i det inderste transportbælte med ca. 10%. Reduktion: 2.000 $\text{m}^3/\text{år}$
Andre faktorer	Sandtransporten reduceres som følge af den ændrede sandkornstørrelse i den inderste del af kystprofilet.
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport ($\text{m}^3/\text{år}$)	25.000

B.3.9 Profil 288P00 – Havstokken – Feriebyen fodringsområde



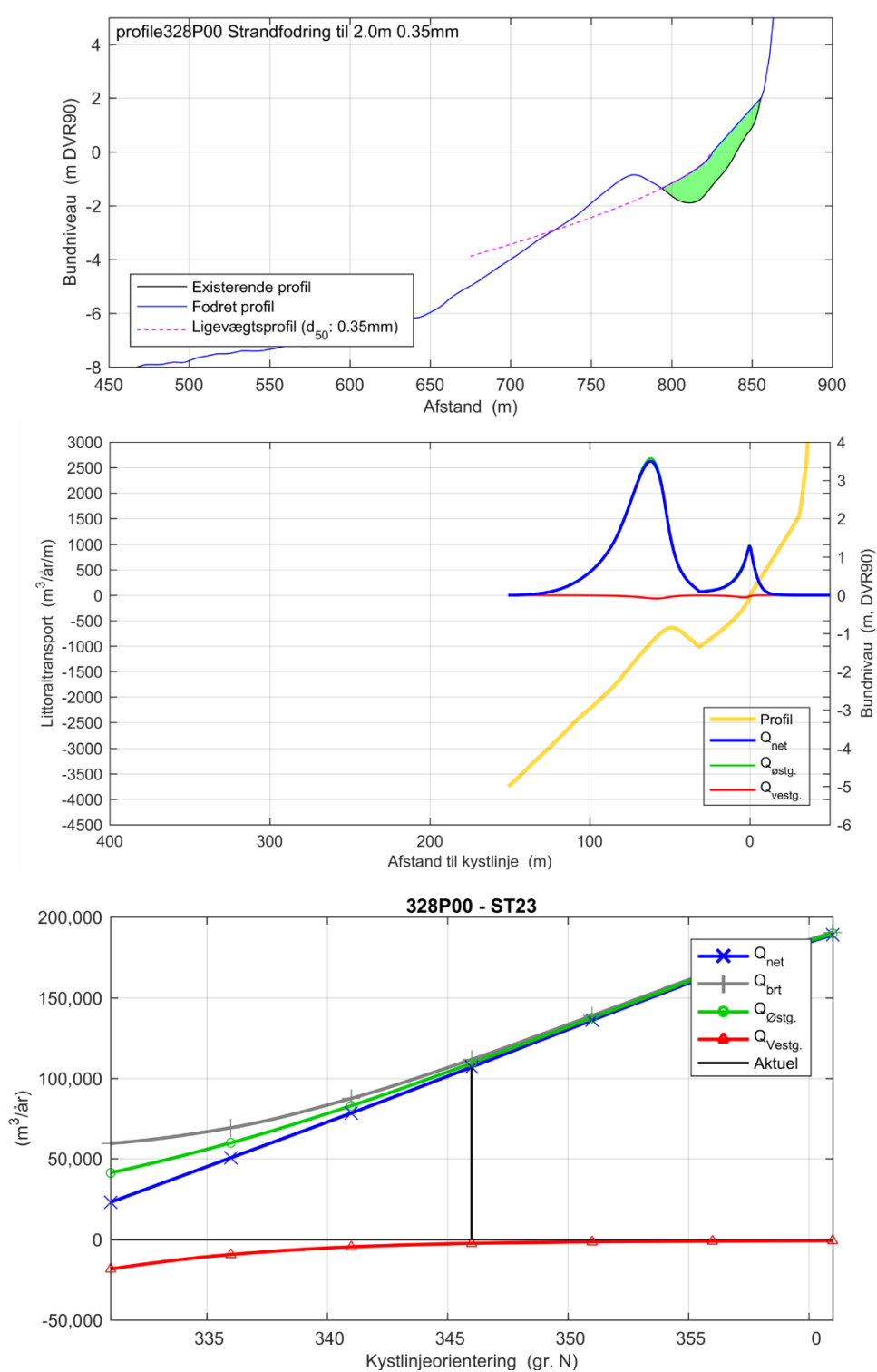
Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	75.000
Bruttotransport (m³/år)	88.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	3.500
Bredde af transportzone (m)	300
Aktiv dybde (m DVR90)	-5
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sandfodringen påvirker ikke sandtilgængeligheden. Der er således fortsat sand tilgængeligt på revlen, mens der forekomster af ral i den inderste del af kystprofillet. Forekomsten af ral vurderes at reducere transporten i det inderste transportbælte med ca. 50%. Reduktion: 7.000 m³/år
Kystkonstruktioner	De kystparallelle bølgebrydere længere nedstrøms vurderes ikke at give yderligere påvirkning. Reduktion: 0 m³/år
Andre faktorer	Sandtransporten reduceres som følge af den ændrede sandkornstørrelse i den inderste del af kystprofillet.
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	68.000

B.3.10 Profil 310P00 – Havstokken – Feriebyen fodringsområde



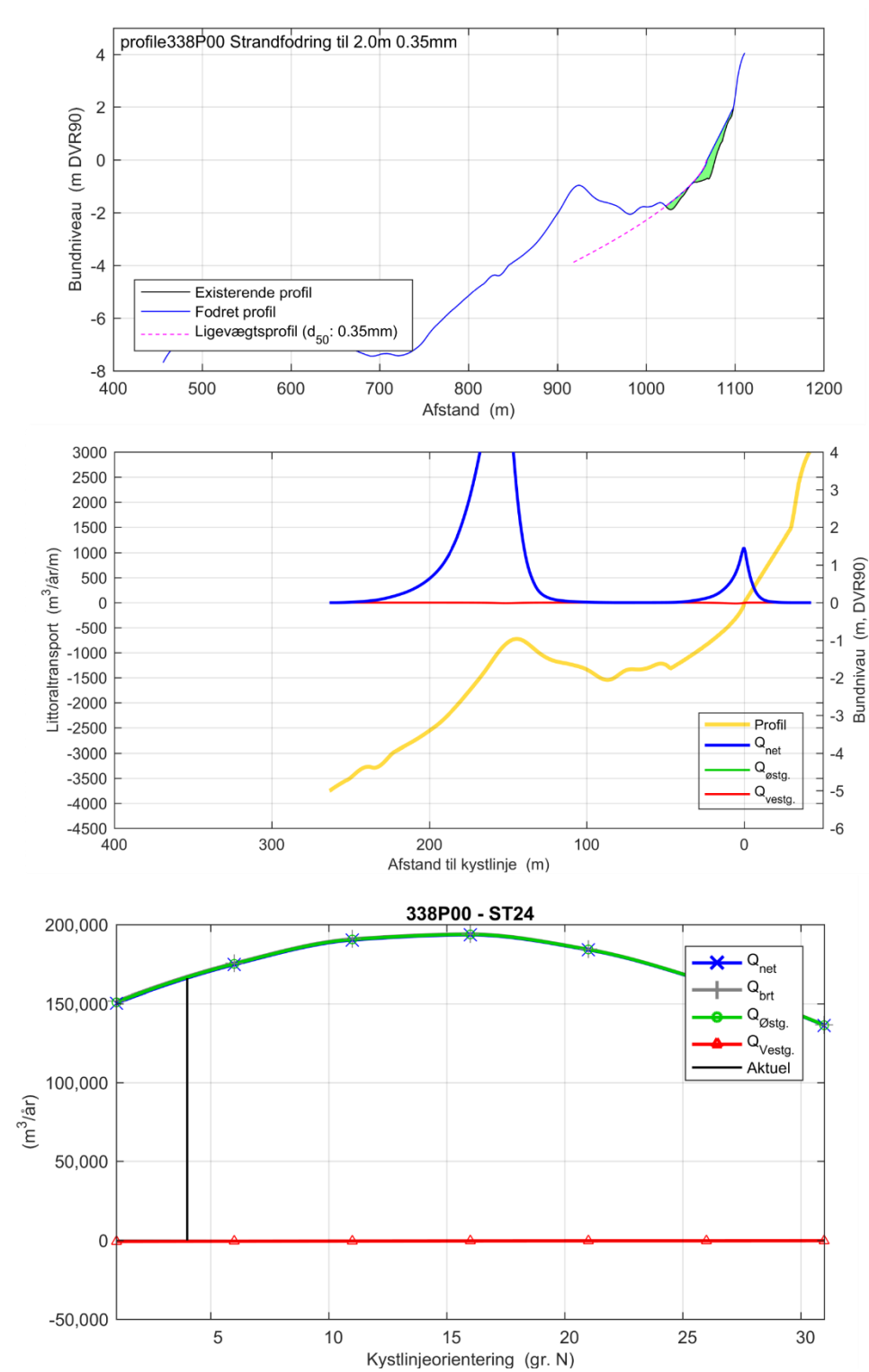
Transportkapacitet	
Nettotransport ($m^3/år$)	64.000
Bruttotransport ($m^3/år$)	69.000
Følsomhed ($m^3/år/gr.$)	2.400
Bredde af transportzone (m)	300
Aktiv dybde (m DVR90)	-5
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sand er tilgængeligt i hele kystprofilet. Reduktion: 0 $m^3/år$
Kystkonstruktioner	De kystparallelle bølgebrydere ligger fortsat på dybder mellem -1 m og -0,75 m DVR90. Bølgebryderne vurderes at reducere transporten i det inderste bælte med ca. 20%. Reduktion: 5.000 $m^3/år$
Andre faktorer	Sandtransporten reduceres som følge af den ændrede sandkornstørrelse i den inderste del af kystprofilet.
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport ($m^3/år$)	59.000

B.3.11 Profil 328P00 – Gilbjerghoved fodringsområde



Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	107.000
Bruttotransport (m³/år)	112.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	5.800
Bredde af transportzone (m)	150
Aktiv dybde (m DVR90)	-5
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sand er tilgængeligt i hele kystprofilet. Reduktion: 0 m³/år
Kystkonstruktioner	De kystparallelle bølgebrydere begraves som følge af strandfodringen. Konstruktionerne vil blive virksomme igen, når stranden over årene rykker tilbage, som følge af erosion. Reduktion: 0 m³/år
Andre faktorer	Sandtransporten reduceres som følge af den ændrede sandkornstørrelse i den inderste del af kystprofilet.
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	59.000

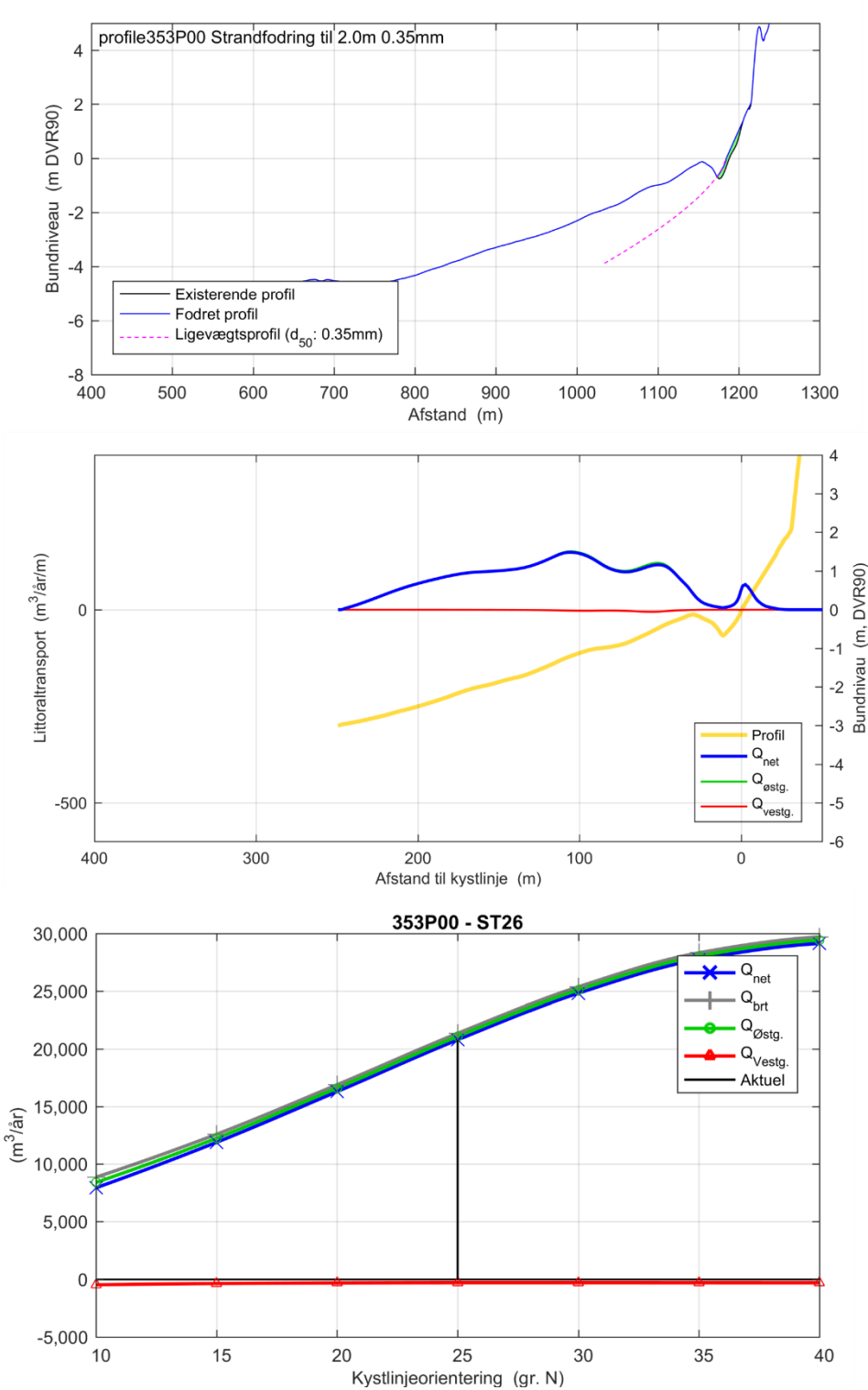
B.3.12 Profil 338P00 – Gilbjerghoved fodringsområde



Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	166.000
Bruttotransport (m³/år)	167.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	4.900
Bredde af transportzone (m)	250
Aktiv dybde (m DVR90)	-5
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sand er tilgængeligt i hele kystprofilet efter strandfodringen. Reduktion: 0 m³/år
Kystkonstruktioner	Ingen. Reduktion: 0 m³/år
Andre faktorer	Sandtransporten foregår fortrinsvis på revlen. Revlen er som følge af det fremskudte forland på Gilbjerghoved og Gilleleje havn drejet ca. 10 gr. imod uret i forhold til kysten. Ved fastlæggelse af transorten er revlens normal orientering benyttet. Desuden krummer kysten betragteligt, hvilket medfører at strømmen i realiteten skal accelereres op over et stykke på 500 m. Denne acceleration er ikke medtaget i modelberegningerne og det giver derfor et yderligere bidrag til reduktion af transporten. Reduktion: 40,000 m³/år.
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	126.000

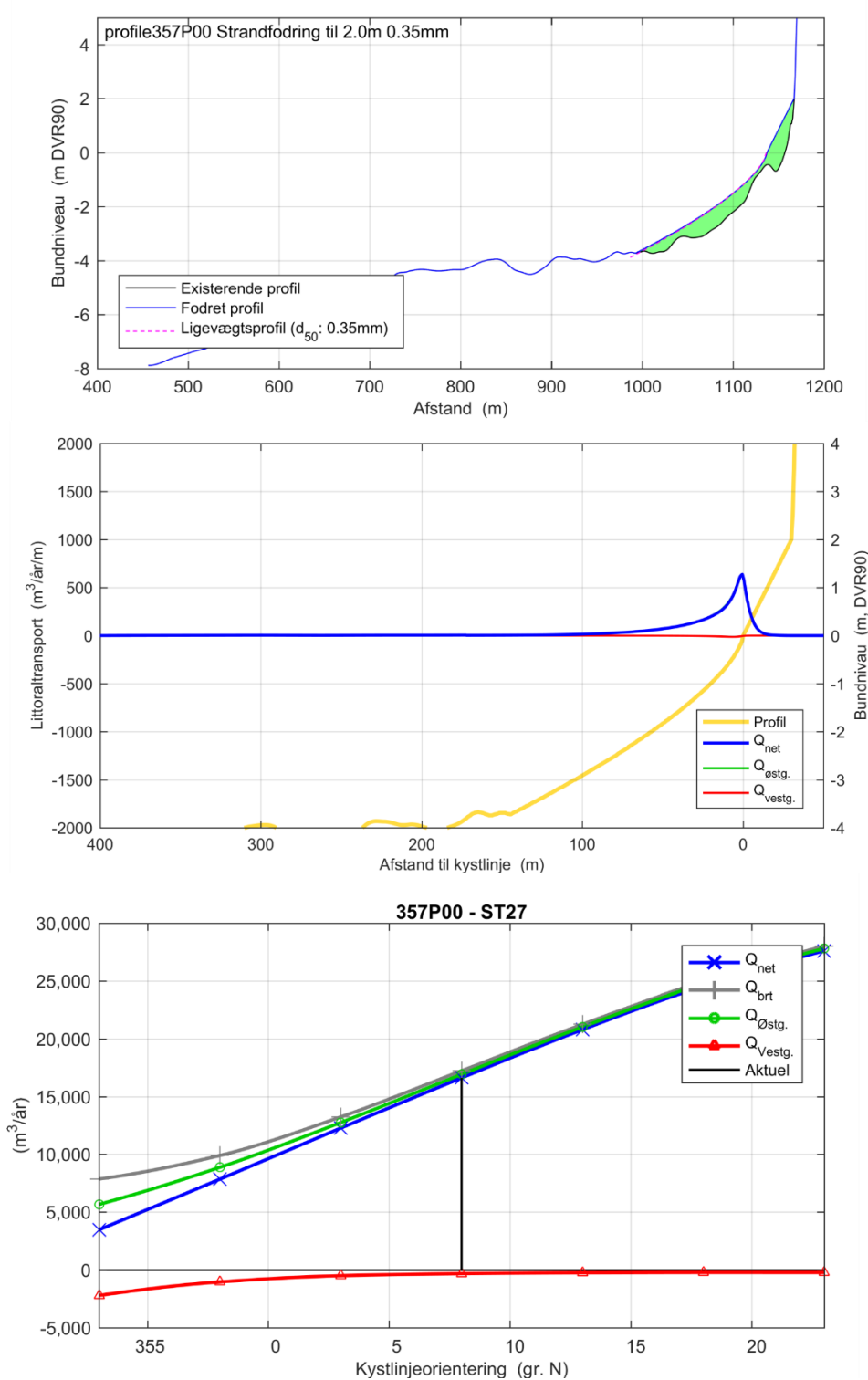
B.4 Korrektion af langstransporten for fodringsscenario 1 – Øst for Gilleleje havn

B.4.1 Profil 353P00 – Gilleleje – Nakkehoved fodringsområde



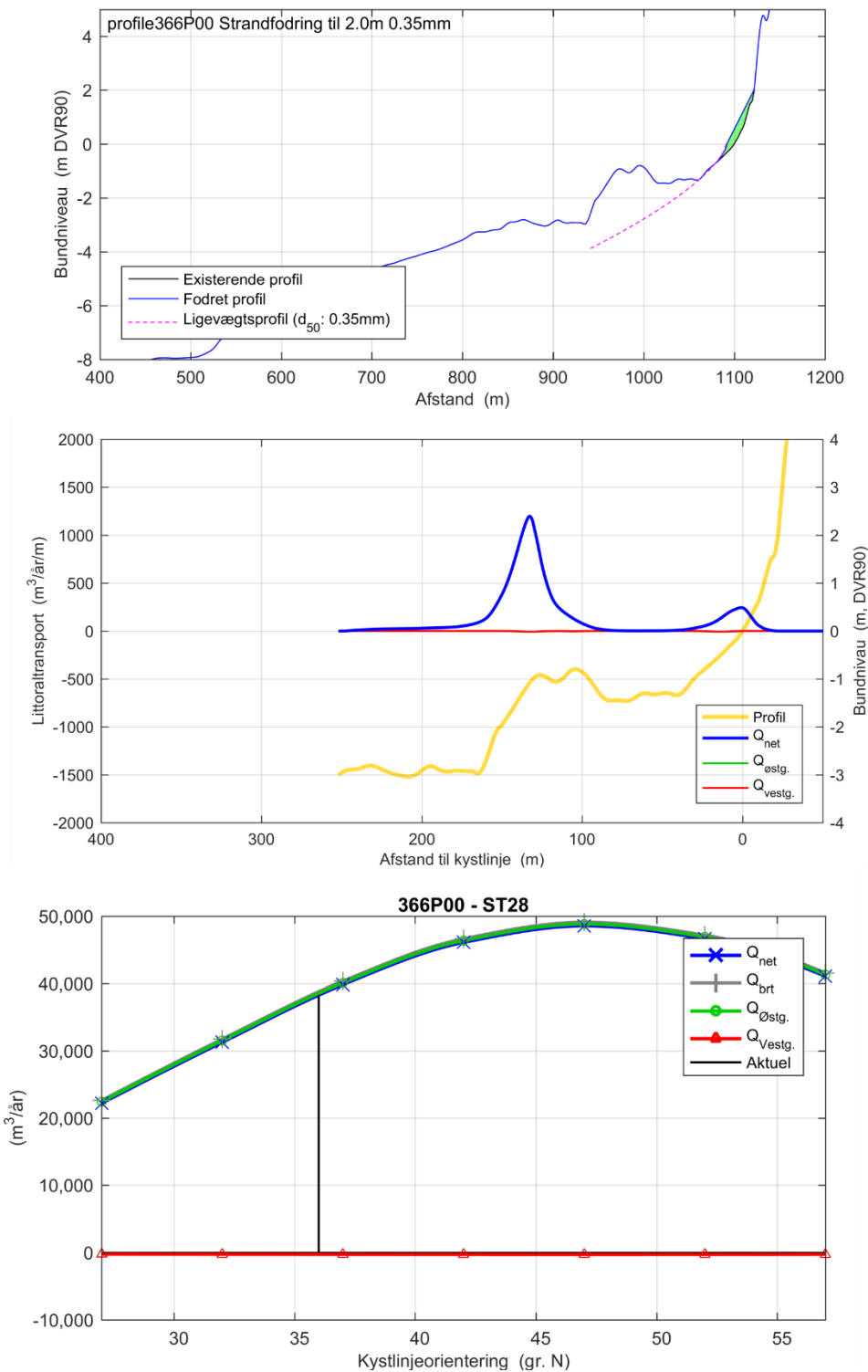
Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	21.000
Bruttotransport (m³/år)	21.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	900
Bredde af transportzone (m)	250
Aktiv dybde (m DVR90)	-3
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sand er tilgængeligt i hele kystprofilet både før og efter strandfodringen. Reduktion: 0 m³/år
Kystkonstruktioner	Ingen. Reduktion: 0 m³/år
Andre faktorer	Sandtransporten reduceres som følge af den ændrede sandkornstørrelse i den inderste del af kystprofilet.
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	21.000

B.4.2 Profil 357P00 – Gillejele – Nakkehoved fodringsområde



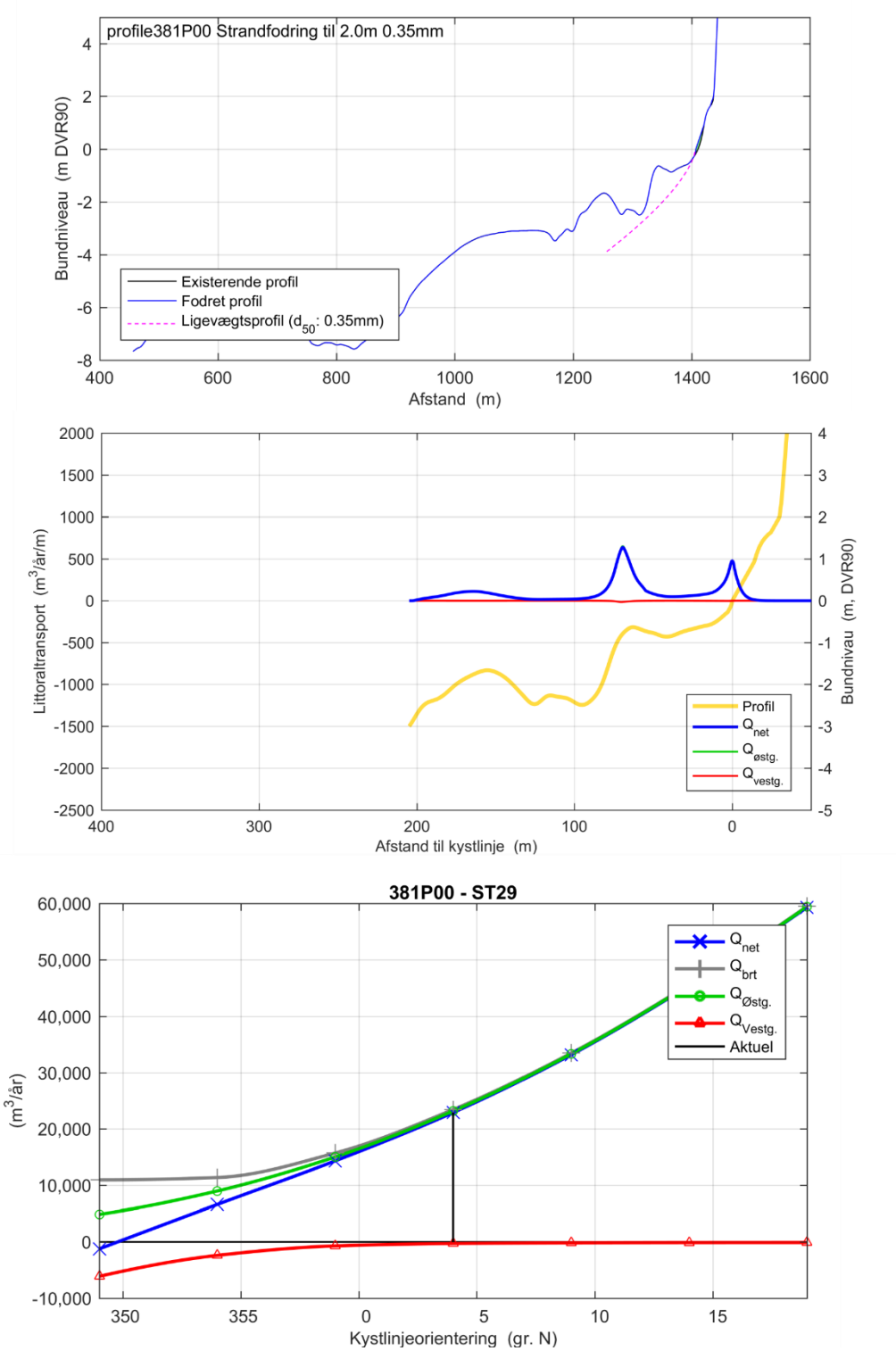
Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	17.000
Bruttotransport (m³/år)	17.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	900
Bredde af transportzone (m)	100
Aktiv dybde (m DVR90)	-3
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sand er tilgængeligt i hele kystprofilet både før og efter strandfodringen. Reduktion: 0 m³/år
Kystkonstruktioner	Ingen. Reduktion: 0 m³/år
Andre faktorer	Sandtransporten reduceres som følge af den ændrede sandkornstørrelse i den inderste del af kystprofilet.
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	17.000

B.4.3 Profil 366 – Munkerup fodringsområde



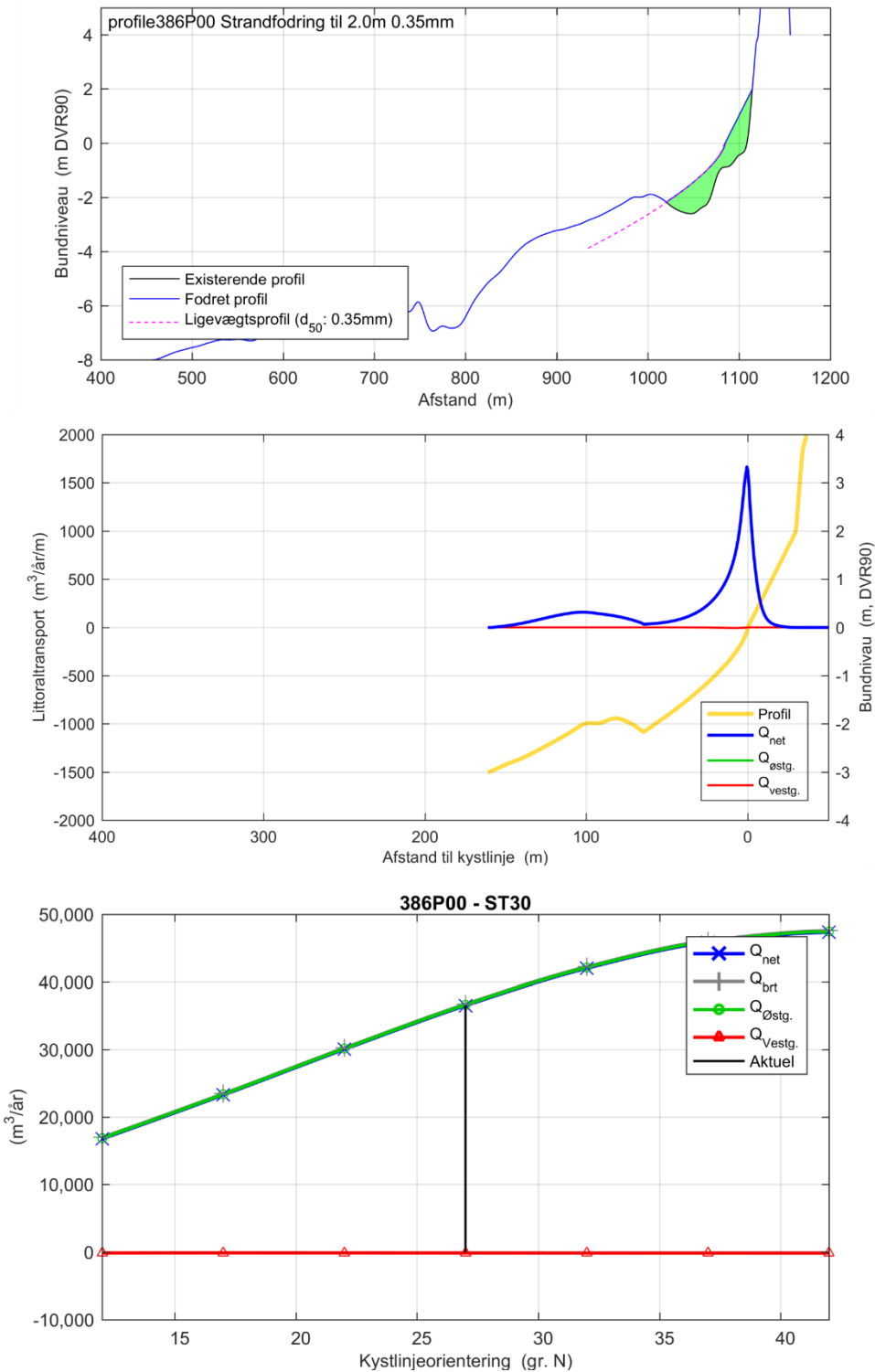
Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	38.000
Bruttotransport (m³/år)	39.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	1.600
Bredde af transportzone (m)	200
Aktiv dybde (m DVR90)	-3
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sand er tilgængeligt i hele kystprofilet efter strandfodringen. Reduktion: 0 m³/år
Kystkonstruktioner	Små hølfer findes både opstrøms og nedstrøms. Hølferne bliver begravet af strandfodringen og vurderes ikke at påvirke sandtransporten. Konstruktionerne vil blive virksomme igen, når stranden over årene rykker tilbage, som følge af erosion. Reduktion: 0 m³/år
Andre faktorer	Sandtransporten reduceres som følge af den ændrede sandkornstørrelse i den inderste del af kystprofilet Kystprofilet ligger ca. 800 m nedstrøms en markant ændring i kystlinjeorientering. Sandtransportberegningerne antager fuld udviklede bølgedrevne strømme., hvilket ikke er rimeligt her. Strømmen antages at tilpasse den ændrede kystlinjeorientering over ca. 5 gange bredden af transportzonen. Transporten vurderes at blive reduceret med 20%. Reduktion: 7.000 m³/år.
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	31.000

B.4.4 Profil 381 – Munkerup fodringsområde



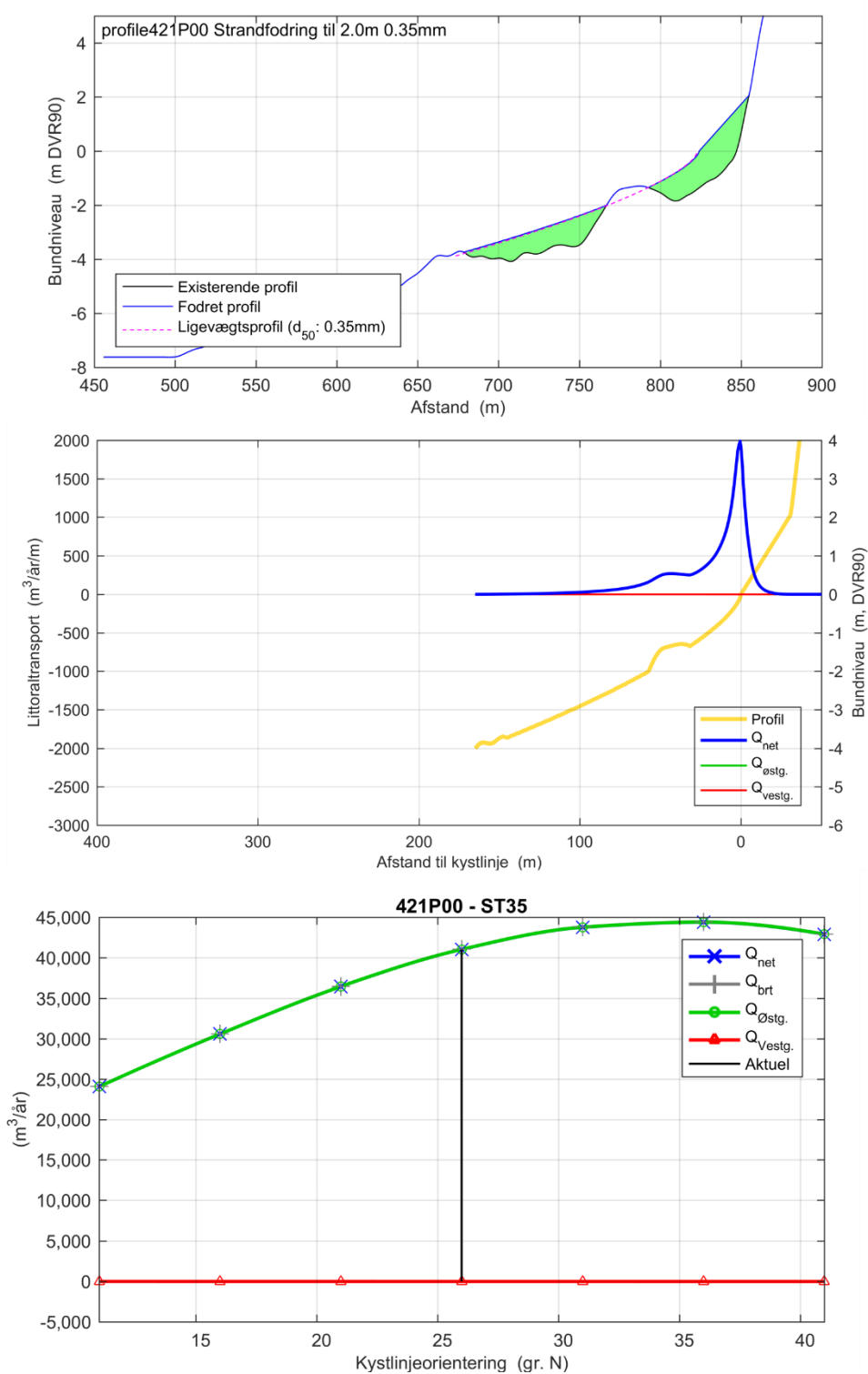
Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	23.000
Bruttotransport (m³/år)	23.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	1.800
Bredde af transportzone (m)	200
Aktiv dybde (m DVR90)	-3
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sand er tilgængeligt i hele kystprofilet efter strandfodringen. Reduktion: 0 m³/år
Kystkonstruktioner	Små hølde findes både opstrøms og nedstrøms. Hølde bliver begravet af strandfodringen og vurderes ikke at påvirke sandtransporten. Konstruktionerne vil blive virksomme igen, når stranden over årene rykker tilbage, som følge af erosion. Reduktion: 0 m³/år
Andre faktorer	Sandtransporten reduceres som følge af den ændrede sandkornstørrelse i den inderste del af kystprofilet. Reduktion: 0 m³/år.
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	23.000

B.4.5 Profil 386 – Munkerup fodringsområde



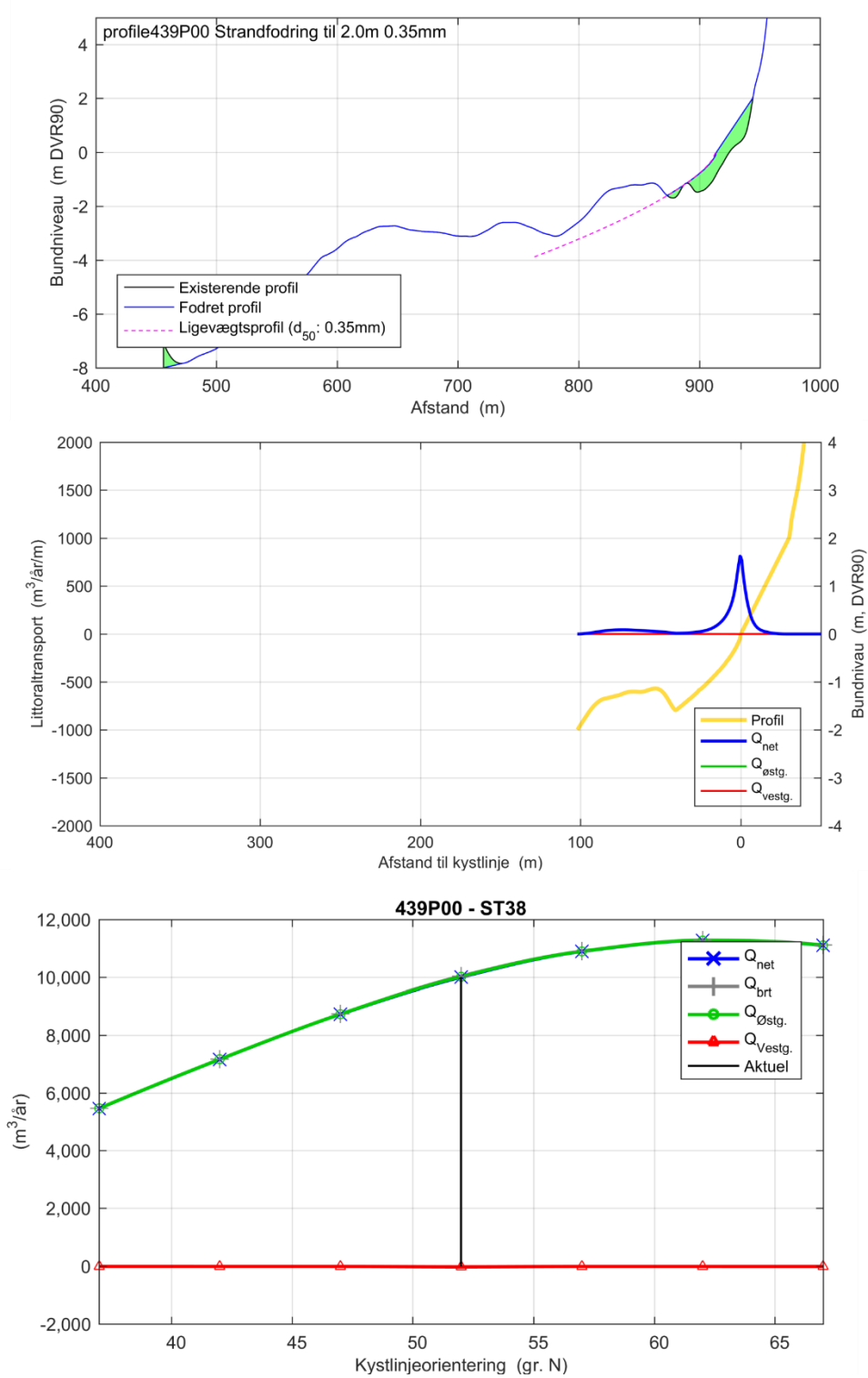
Transportkapacitet	
Nettotransport ($m^3/år$)	37.000
Bruttotransport ($m^3/år$)	37.000
Følsomhed ($m^3/år/gr.$)	1.200
Bredde af transportzone (m)	200
Aktiv dybde (m DVR90)	-3
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sand er tilgængeligt i hele kystprofilet efter strandfodringen. Reduktion: 0 $m^3/år$
Kystkonstruktioner	Høfdefeltet begraves som følge af strandfodringen og påvirker derfor ikke langstransporten nævneværdigt. Konstruktionerne vil blive virksomme igen, når stranden over årene rykker tilbage, som følge af erosion. Reduktion: 0 $m^3/år$
Andre faktorer	Sandtransporten reduceres som følge af den ændrede sandkornstørrelse i den inderste del af kystprofilet.
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport ($m^3/år$)	37.000

B.4.6 Profil 421P00 – Ålsgårde fodringsområde



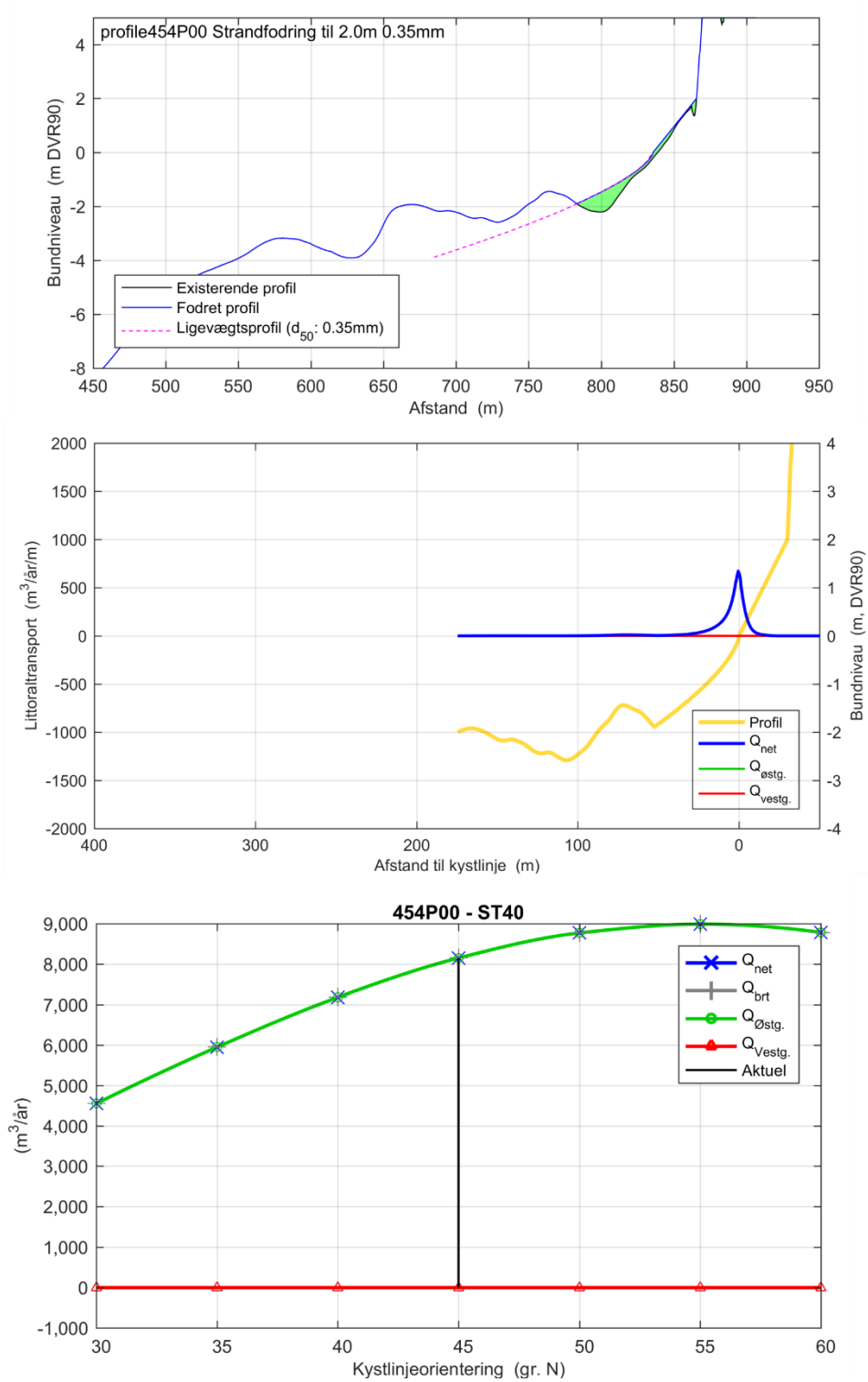
Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	41.000
Bruttotransport (m³/år)	41.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	800
Bredde af transportzone (m)	100
Aktiv dybde (m DVR90)	-4
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sand er tilgængeligt i hele kystprofilen efter strandfodringen. Reduktion: 0 m³/år
Kystkonstruktioner	Højdefeltet begraves som følge af strandfodringen og påvirker derfor ikke langstransporten nævneværdigt. Konstruktionerne vil blive virksomme igen, når stranden over årene rykker tilbage, som følge af erosion. Reduktion: 0 m³/år
Andre faktorer	Sandtransporten reduceres som følge af den ændrede sandkornstørrelse i hele det aktive kystprofil.
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	41.000

B.4.7 Profil 439P00 – Ålsgårde fodringsområde



Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	10.000
Bruttotransport (m³/år)	10.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	200
Bredde af transportzone (m)	100
Aktiv dybde (m DVR90)	-2
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sand er tilgængeligt i hele kystprofilet efter strandfodringen. Reduktion: 0 m³/år
Kystkonstruktioner	Hødefeltet begravs delvist og vurderes at reducere transporten i det inderste transportbælte med ca. 15%. Konstruktionerne vil blive mere virksomme igen, når stranden over årene rykker tilbage, som følge af erosion. Reduktion: 1.000 m³/år
Andre faktorer	Kystprofilet indeholder skrårevler, der ligger i et niveau på ca. -3 m DVR90 (mellem 150 og 300 m fra kysten). Disse revler er dannet af regionale strømme, som i dette område forstærkes af tragten mellem Sjælland og Sverige. Der foregår en betydelig transport af sand herpå og en del af sandet kommer fra littoraltransporten længere vestpå. En vurdering af størrelsen er givet i afsnit 5.3.1.3. Forøgelse: 10.000 m³/år
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	19.000

B.4.8 Profil 454P00 – Ålsgårde fodringsområde



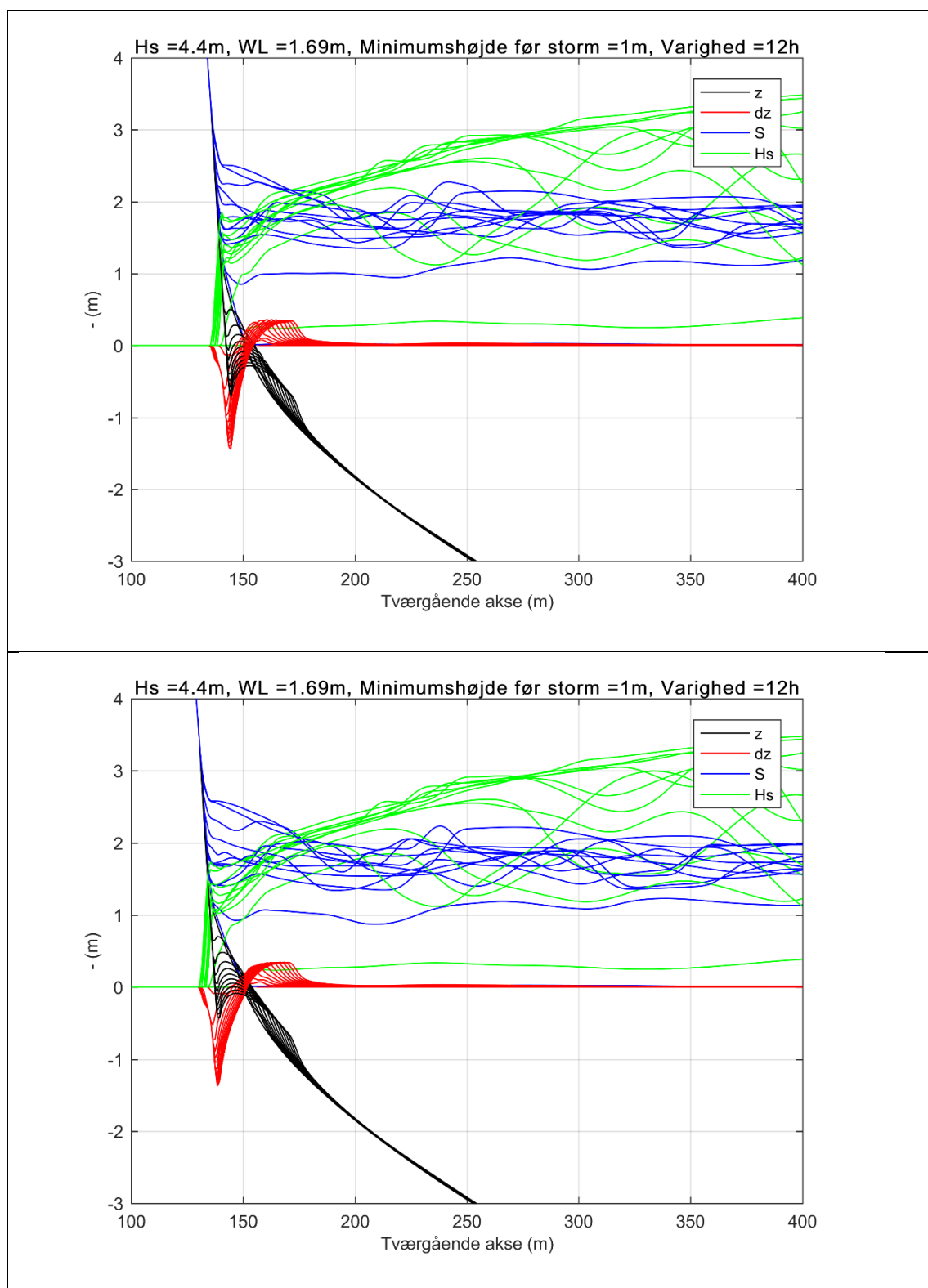
Transportkapacitet	
Nettotransport (m³/år)	8.000
Bruttotransport (m³/år)	8.000
Følsomhed (m³/år/gr.)	200
Bredde af transportzone (m)	<100
Aktiv dybde (m DVR90)	-2
Reduktion af littoraltransport	
Sand tilgængelighed	Sand er tilgængeligt i hele kystprofilet både før og efter strandfodringen. Reduktion: 0 m³/år
Kystkonstruktioner	Høfdefeltet vurderes ikke at påvirke langtransporten. Konstruktionerne vil blive mere virksomme igen, når stranden over årene rykker tilbage, som følge af erosion. Reduktion: 0 m³/år
Andre faktorer	Kystprofilet indeholder skrårevler, der ligger i et niveau på ca. -3 m DVR90 (mellem 150 og 300 m fra kysten). Disse revler er dannet af regionale strømme, som i dette område forstærkes af tragten mellem Sjælland og Sverige. Der foregår en betydelig transport af sand herpå og en del af sandet kommer fra littoraltransporten længere vestpå. En vurdering af størrelsen er givet i afsnit 5.3.1.3. Forøgelse: 15.000 m³/år
Aktuel littoraltransport	
Årlig transport (m³/år)	23.000

BILAG C – Akut erosionsberegninger

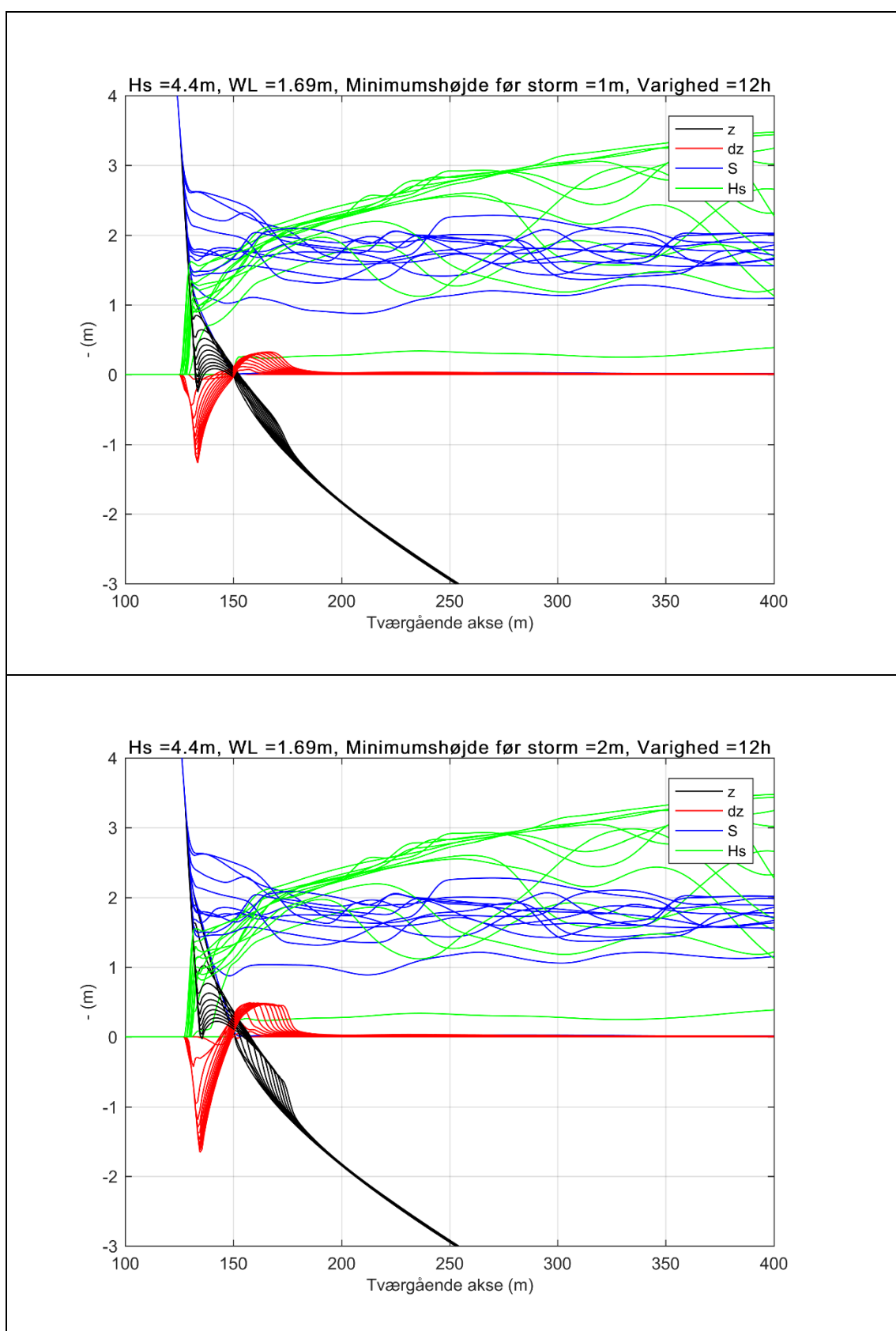
Morfologisk udvikling

C Akuterossionsberegninger

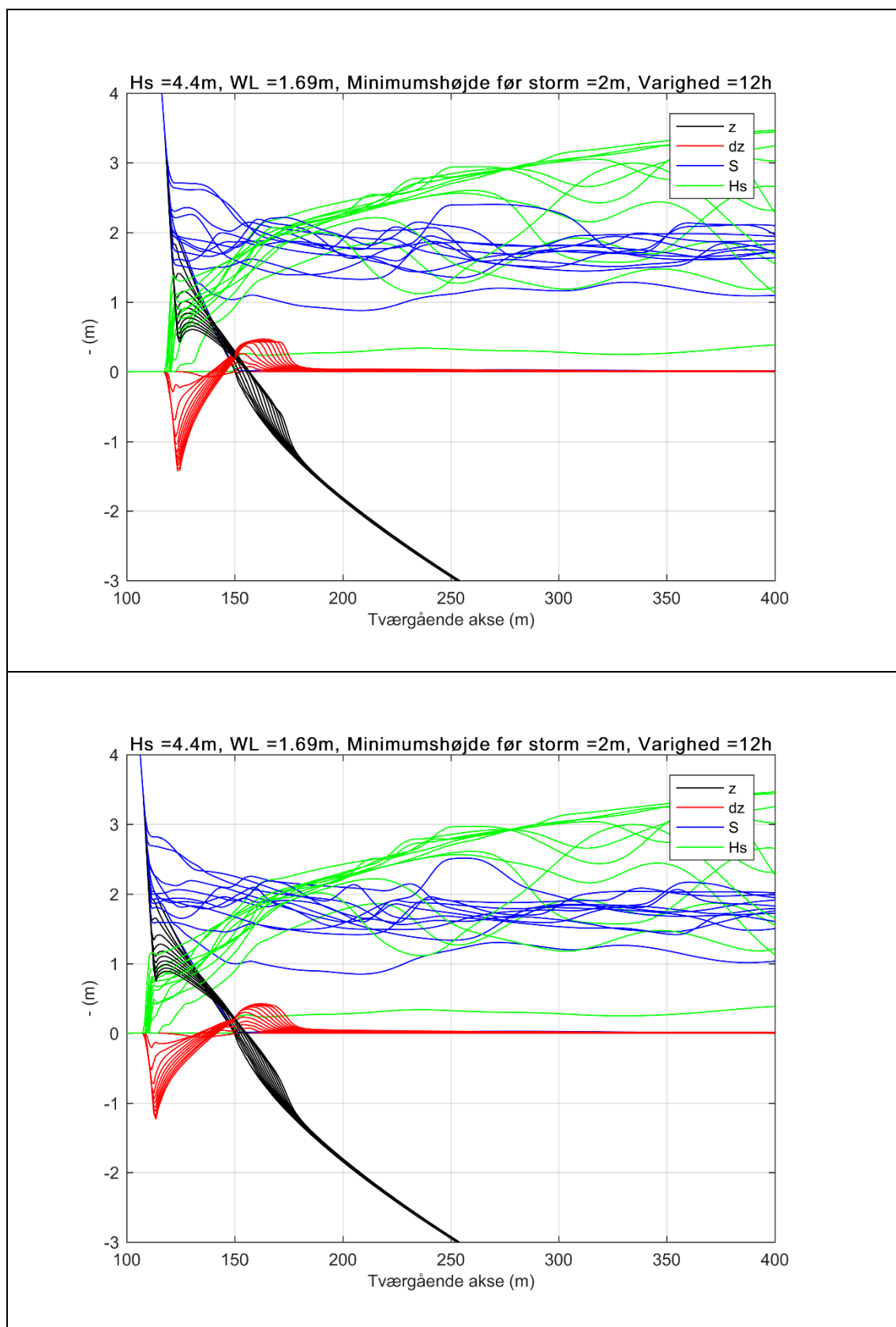
C.1 Følsomhedsanalyse, strandhældning



Figur C-1 Øverst: Placering = 1m, hældning = 1:10. Nederst: Placering = 1m, hældning = 1:15.

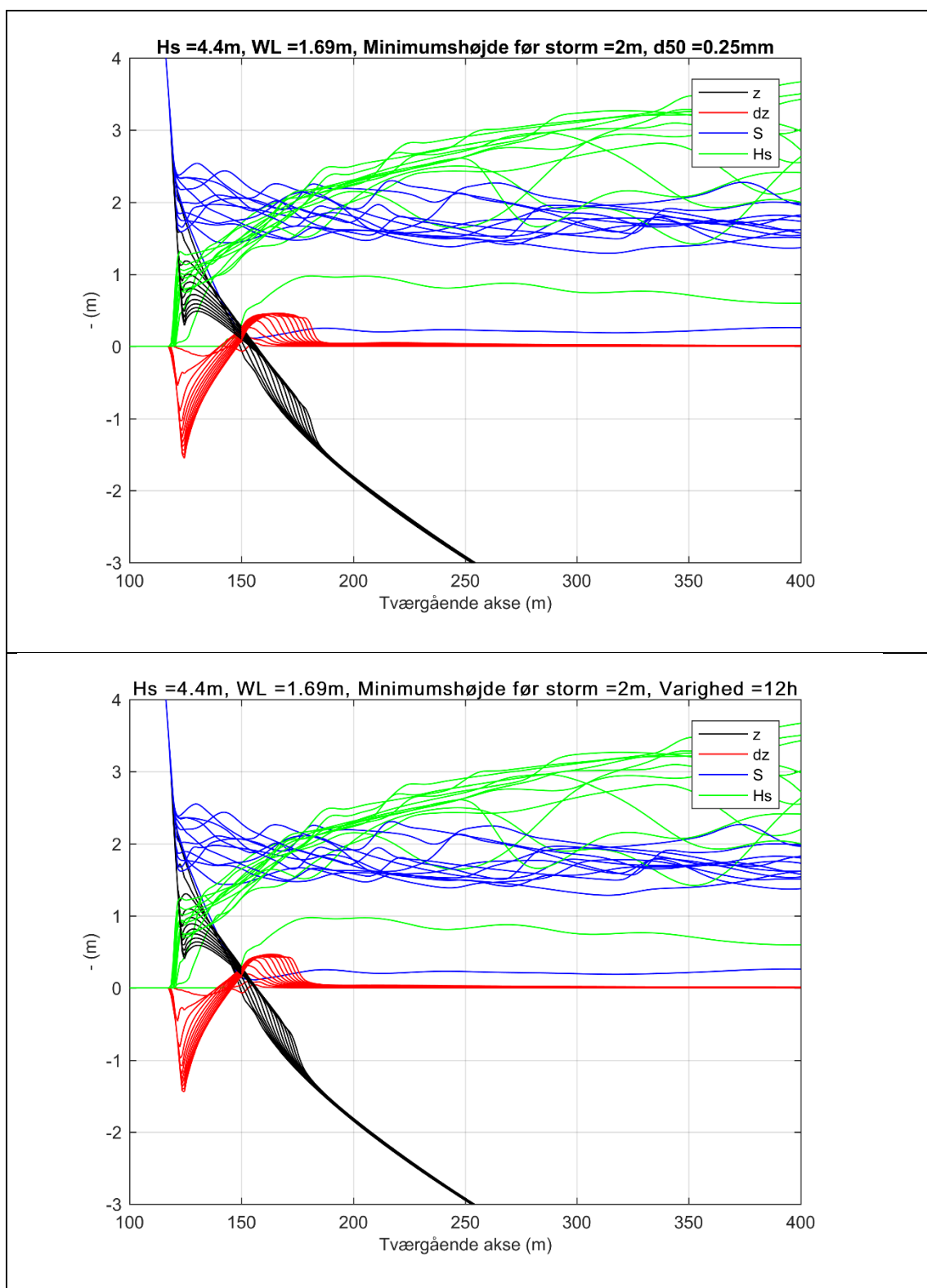


Figur C-2 Øverst: Placering = 1m, hældning = 1:20. Nederst: Placering = 1m, hældning = 1:10.

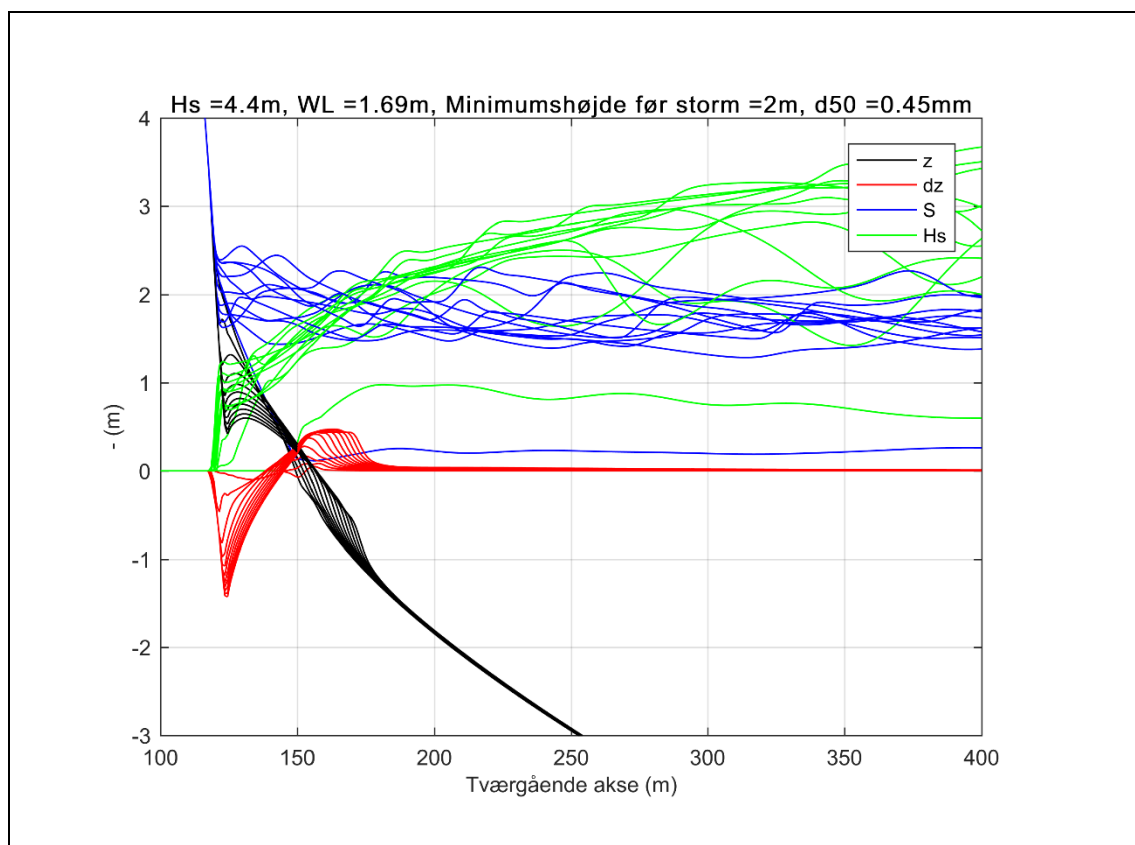


Figur C-3 Øverst: Placering = 2m, hældning = 1:15. Nederst: Placering = 2m, hældning = 1:20.

C.2 Følsomhedsanalyse, sedimentstørrelse

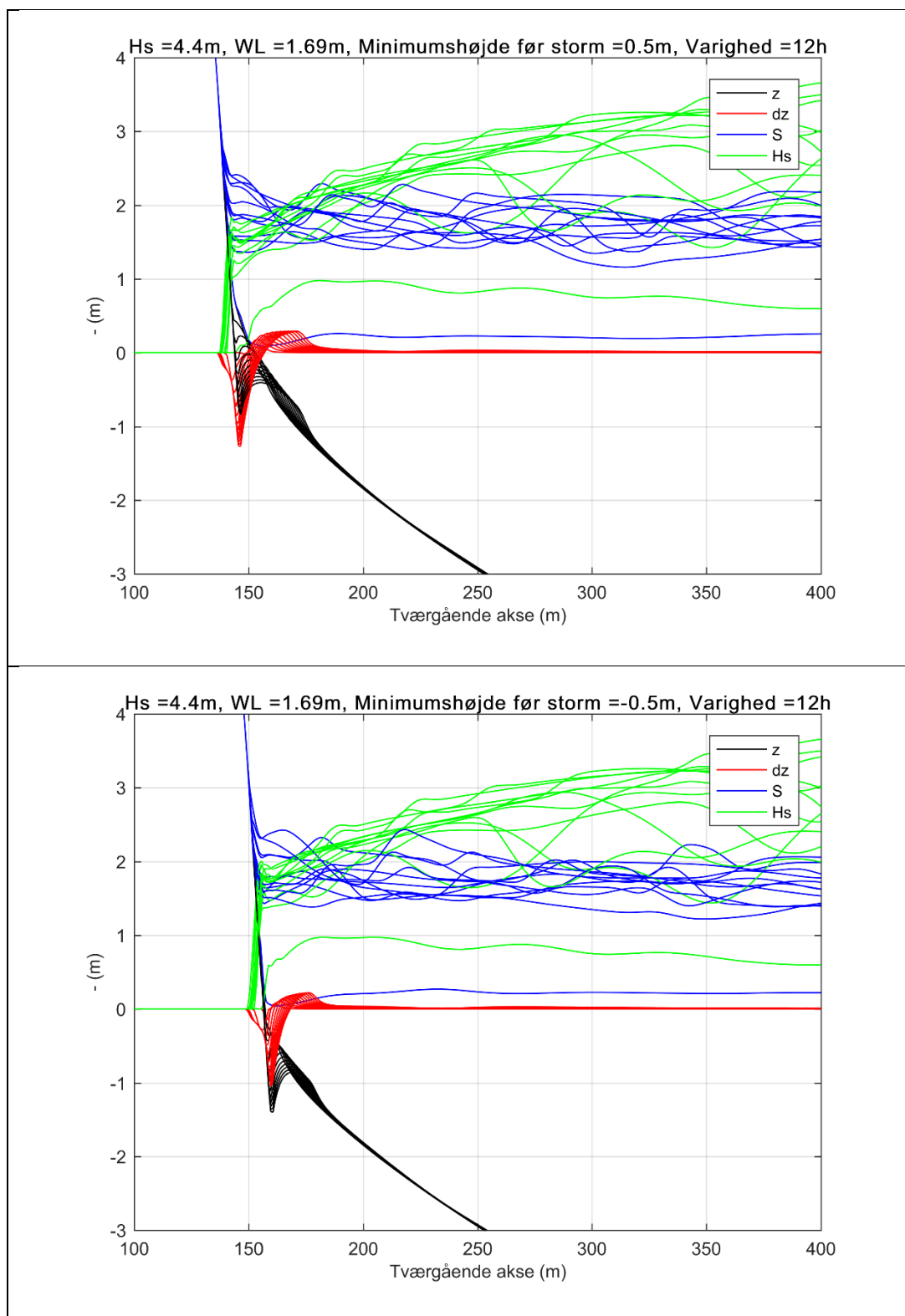


Figur C-4 Øverst: Median kornstørrelse = 0.25mm. Nederst: Median kornstørrelse = 0.35mm.

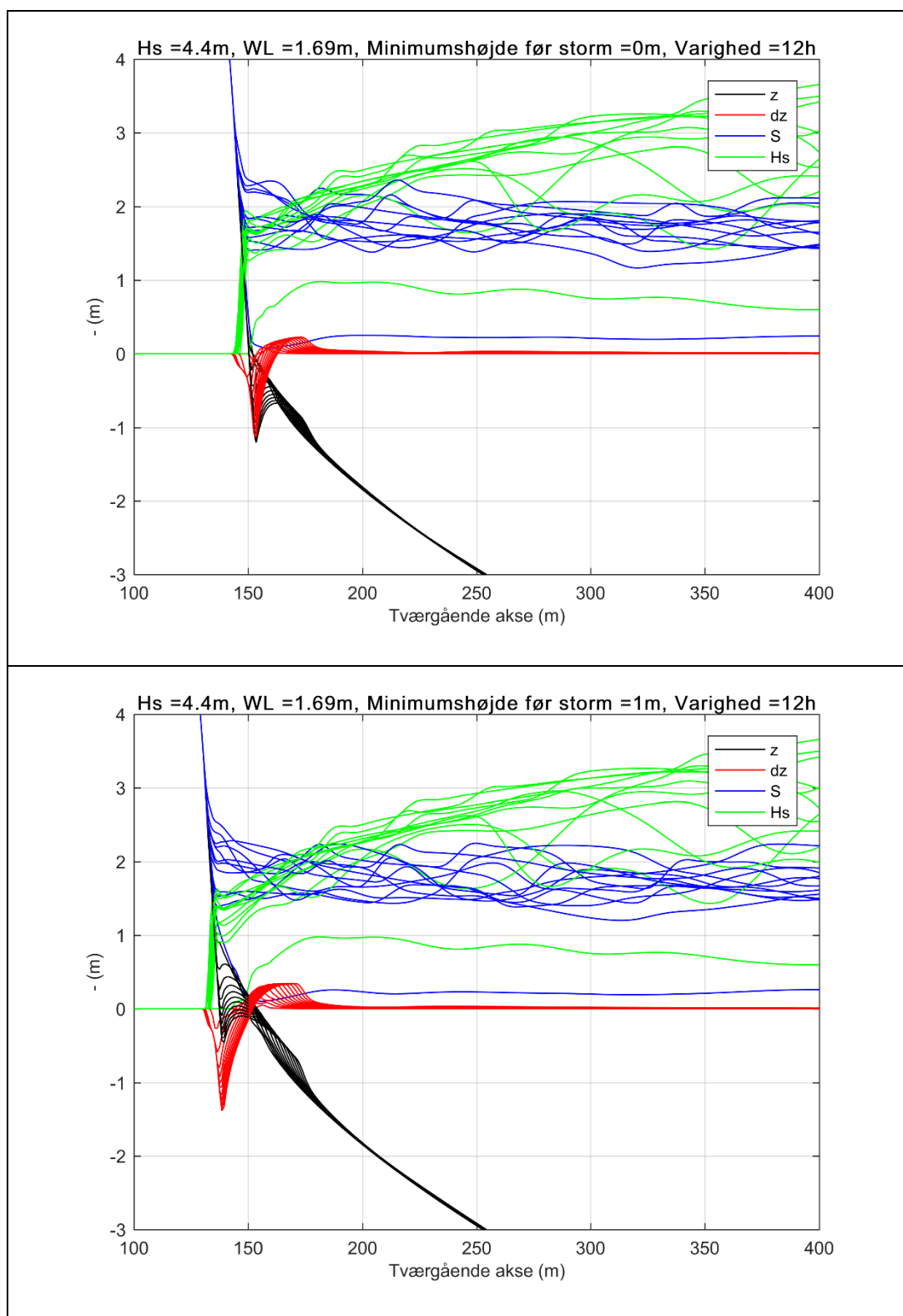


Figur C-5 Median kornstørrelse = 0.45mm.

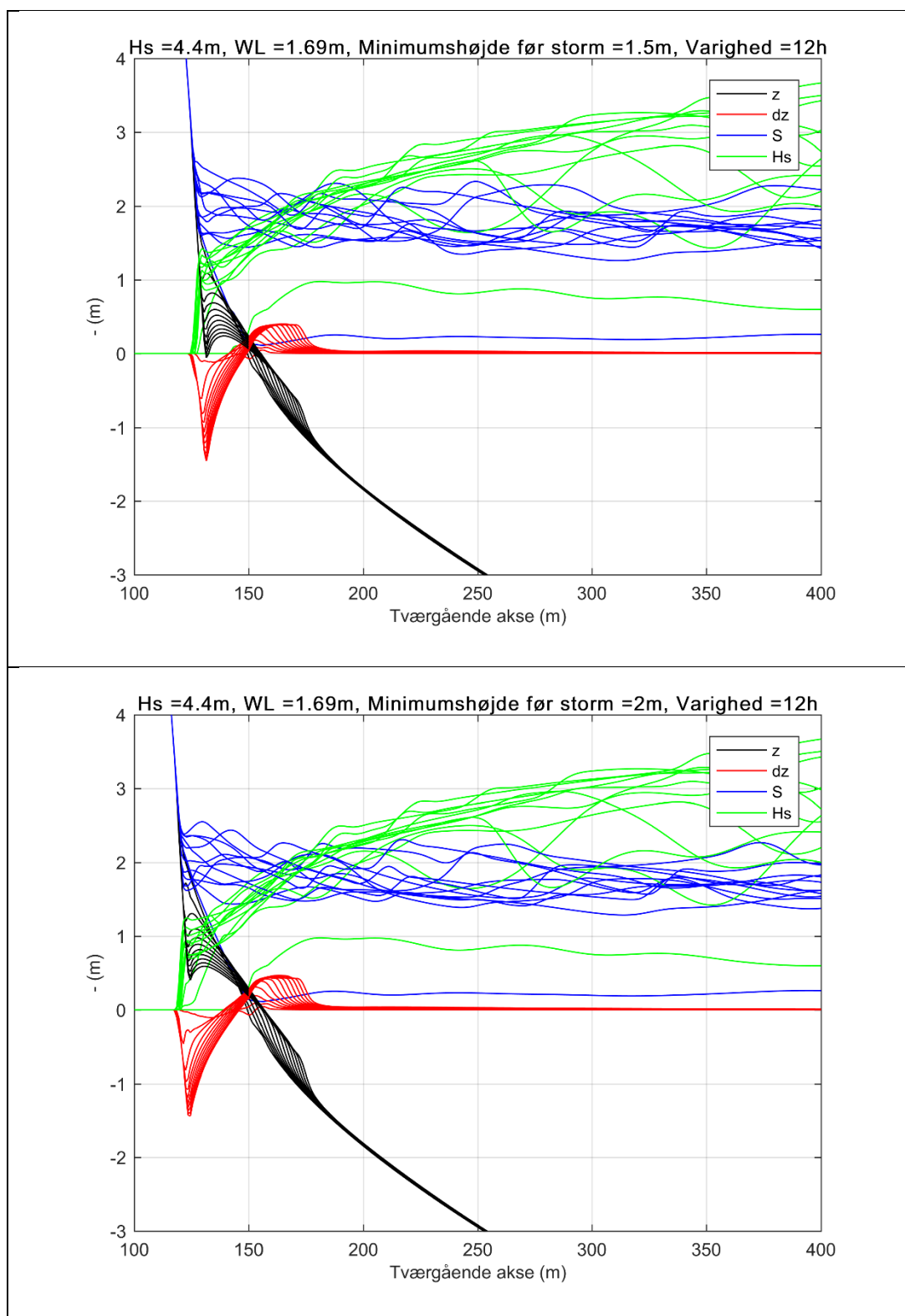
C.3 Designresultater



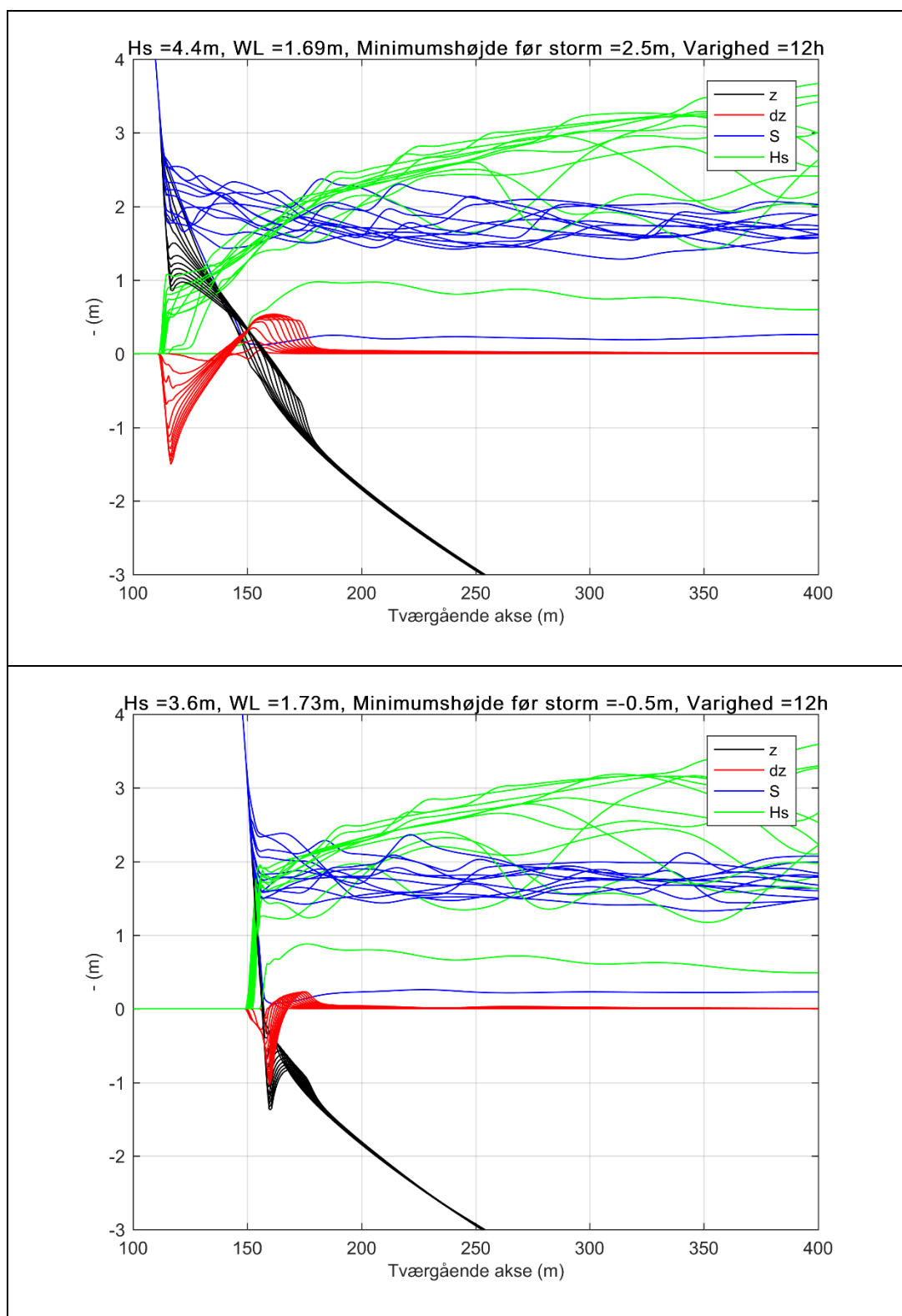
Figur C-6 Akuterosion foran skråningsbeskyttelse. Se figurtitler for yderligere informationer.



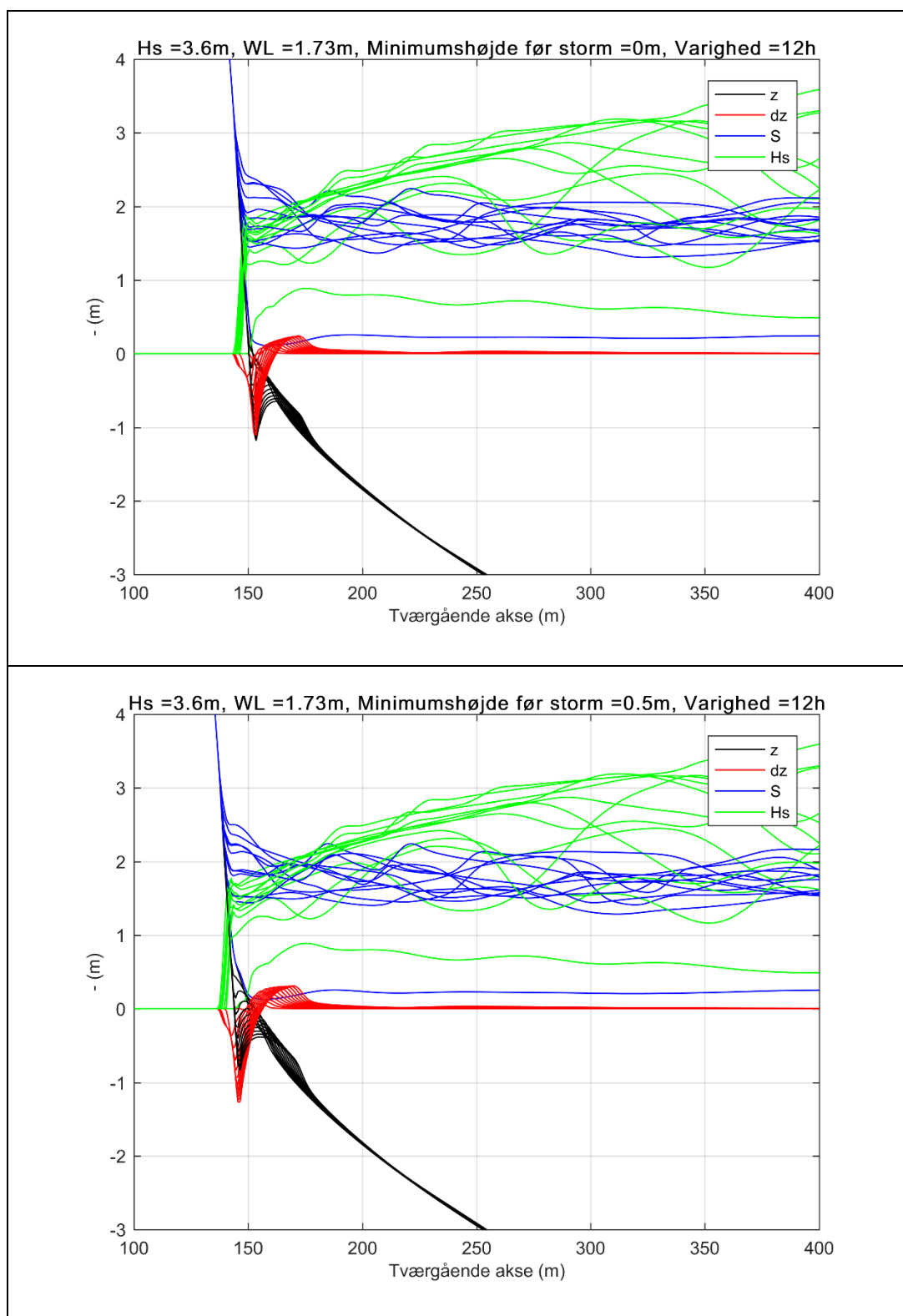
Figur C-7 Akuterosion foran skråningsbeskyttelse. Se figurtitler for yderligere informationer.



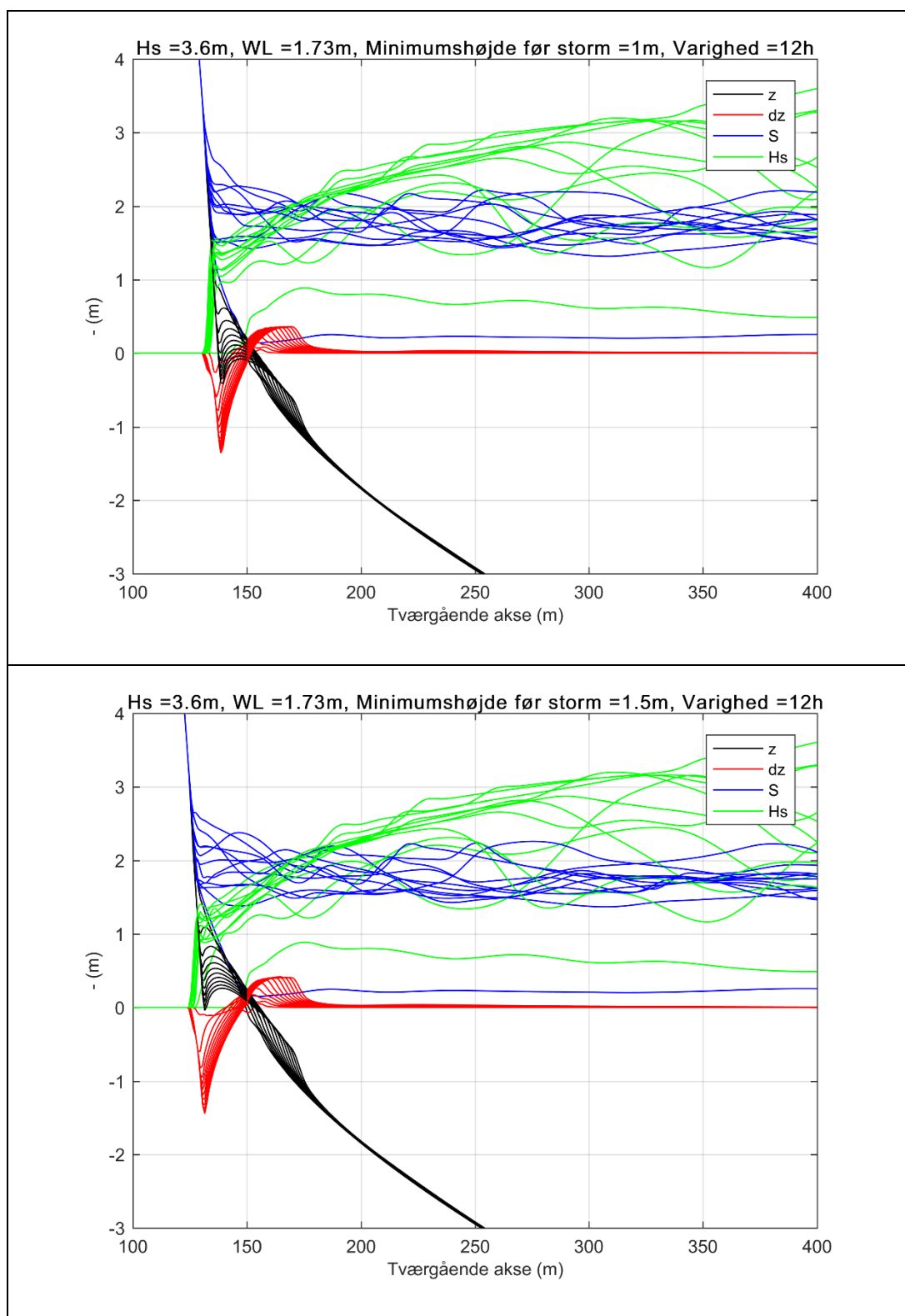
Figur C-8 Akuterosion foran skråningsbeskyttelse. Se figurtitler for yderligere informationer.



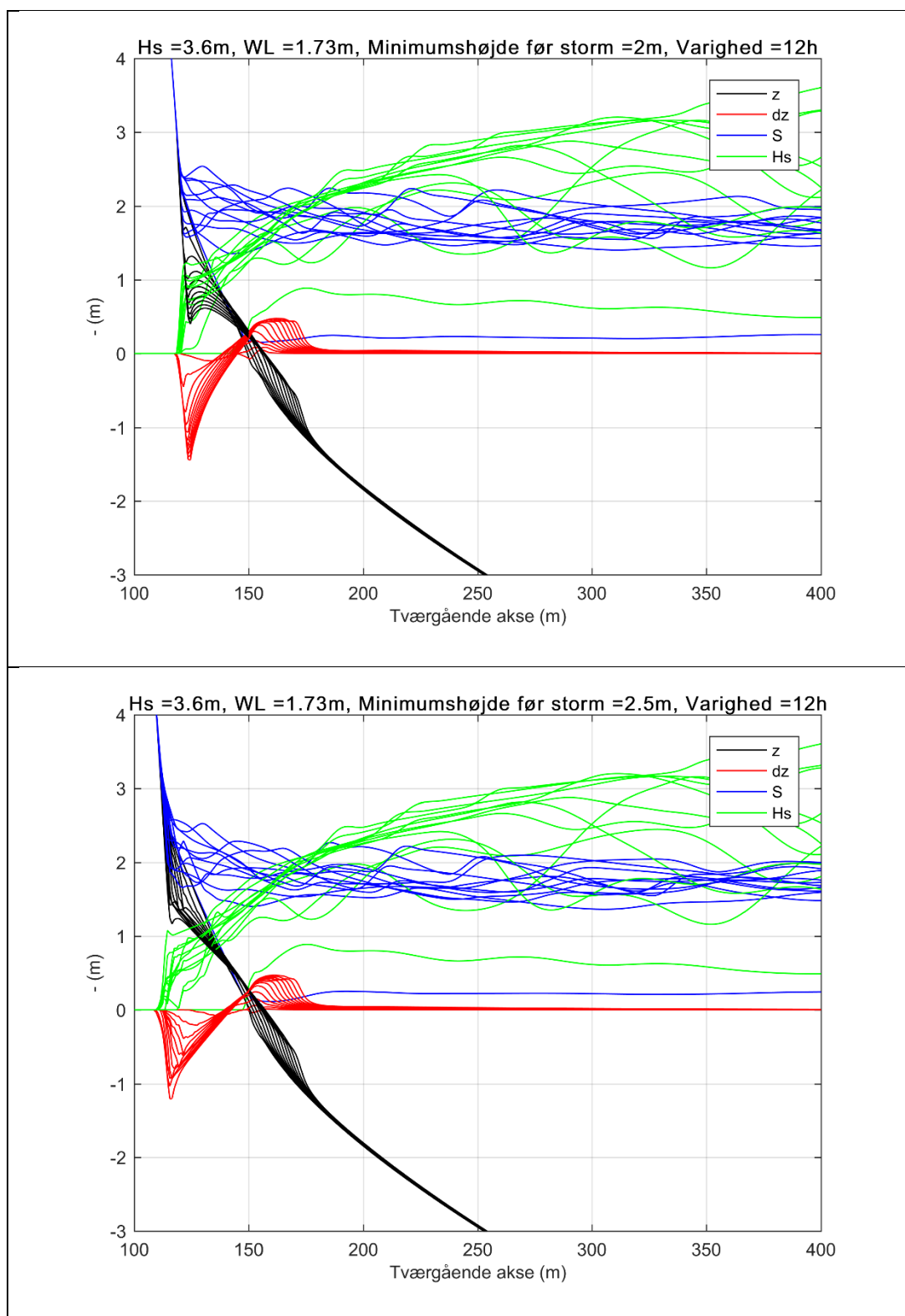
Figur C-9 Akuterosion foran skråningsbeskyttelse. Se figurtitler for yderligere informationer.



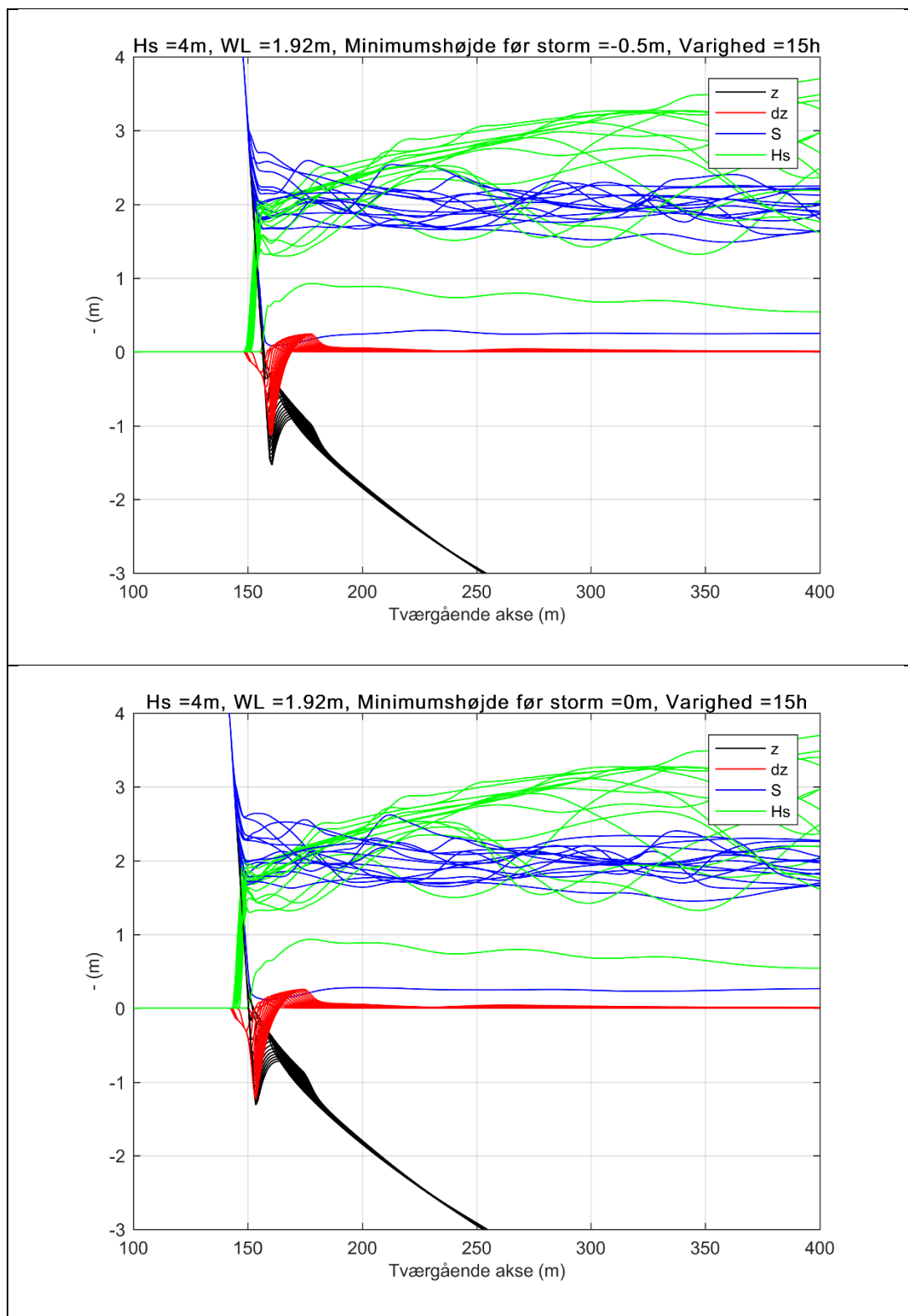
Figur C-10 Akuterosion foran skråningsbeskyttelse. Se figurtitler for yderligere informationer.



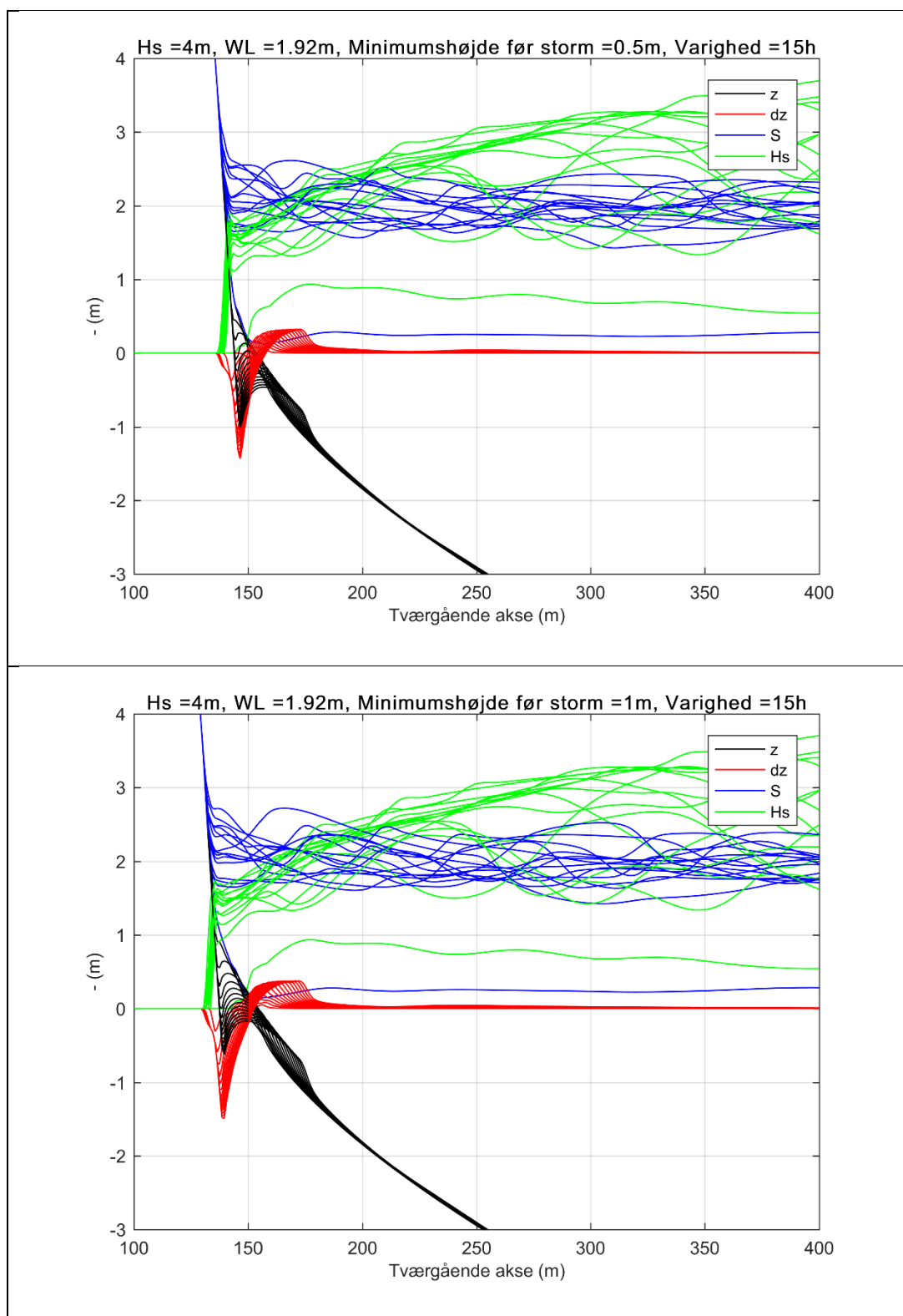
Figur C-11 Akuterosion foran skråningsbeskyttelse. Se figurtitler for yderligere informationer.



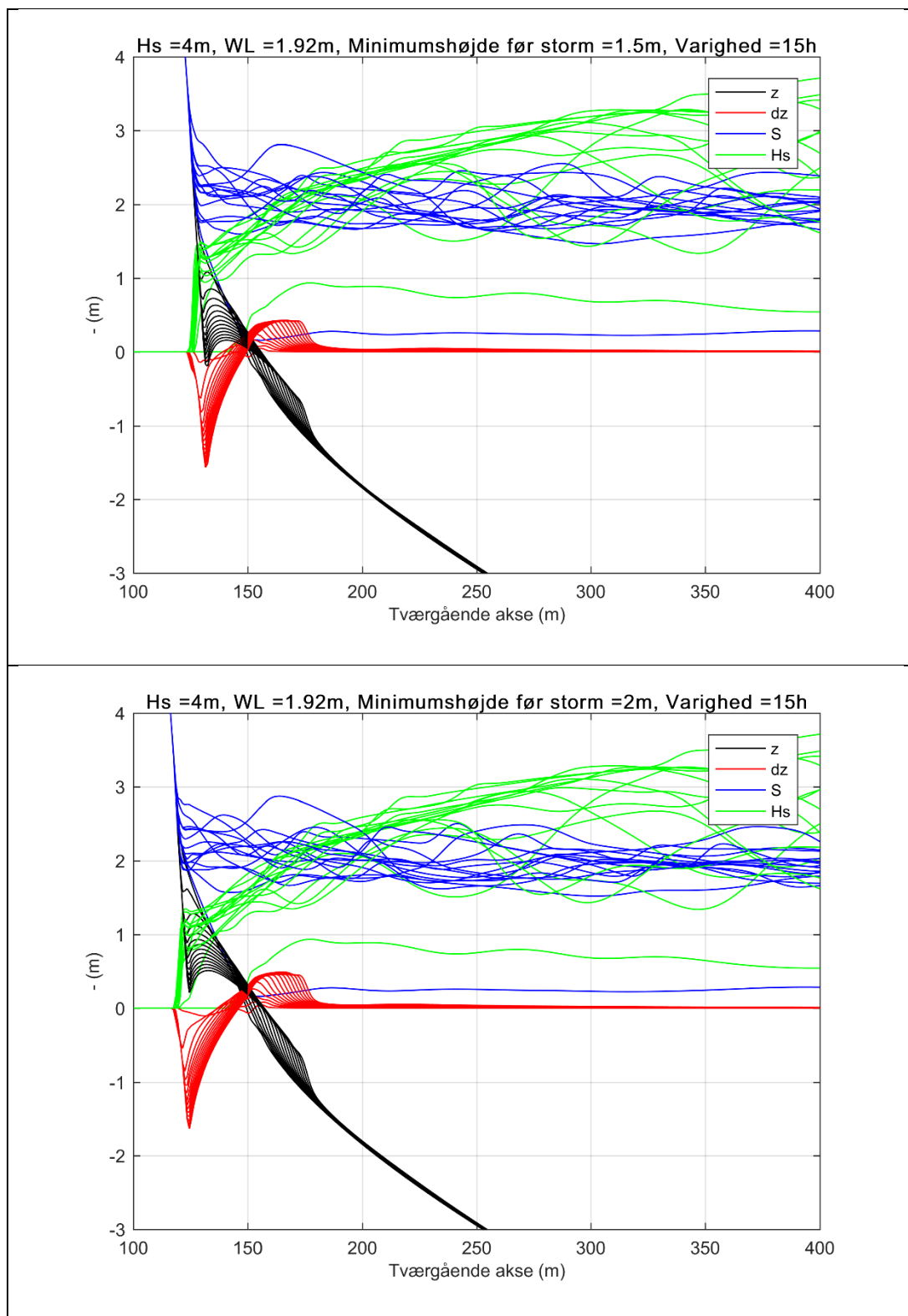
Figur C-12 Akuterosion foran skråningsbeskyttelse. Se figurtitler for yderligere informationer.



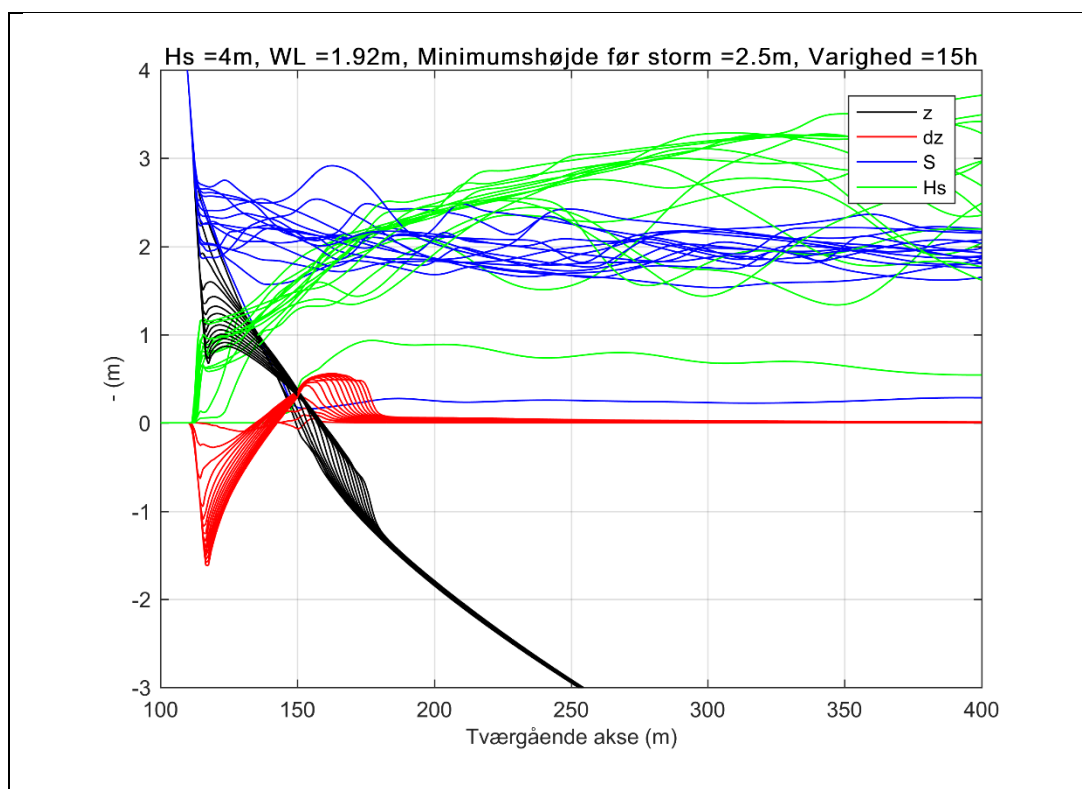
Figur C-13 Akuterosion foran skråningsbeskyttelse. Se figurtitler for yderligere informationer.



Figur C-14 Akuterosion foran skråningsbeskyttelse. Se figurtitler for yderligere informationer



Figur C-15 Akuterosion foran skråningsbeskyttelse. Se figurtitler for yderligere informationer.



Figur C-16 Akuterosion foran skråningsbeskyttelse. Se figurtitler for yderligere informationer.

C.4 Erosionsresultater for ekstrem varighed 12 timers storm-peak

Tabel C-1 Minimumshøjde af strand foran konstruktion efter storm (m).

	Minimumshøjde af strand foran konstruktion efter storm (m)	
Initial minimumshøjde af strand foran konstruktionen (m)	50 års hændelse, Vest	50 årshændelse, Øst
- 0.5	-0.87	-0.85
+0.0	-0.69	-0.66
+0.5	-0.43	-0.40
+1.0	-0.12	-0.10
+1.5	+0.22	+0.24
+2.0	+0.58	+0.59
+2.5	+0.95	+0.94

Tabel C-2 Maksimal akut erosion ved konstruktion over stormen.

	Maksimal akut erosion ved konstruktion (m)	
Initial minimumshøjde af strand foran konstruktionen (m)	50 års hændelse, Vest	50 årshændelse, Øst
- 0.5	-0.93	-0.89
+0.0	-1.23	-1.20
+0.5	-1.37	-1.37
+1.0	-1.49	-1.45
+1.5	-1.58	-1.56
+2.0	-1.63	-1.63
+2.5	-1.68	-1.69

Tabel C-3 Erosionsvolumener for forskellige placeringer af konstruktionen.

	Total akut erosion volumen (m ³ /m)	
Initial minimumshøjde af strand foran konstruktionen (m)	50 års hændelse, Vest	50 årshændelse, Øst
- 0.5	8.8	7.7
+0.0	9.7	8.5
+0.5	11.7	10.4
+1.0	14.2	12.6
+1.5	16.7	14.9
+2.0	19.2	17.5
+2.5	22.4	20.6

Tabel C-4 Middel signifikant bølgehøjde foran konstruktionen.

	Middel bølgehøjde, Hs (m)	
Initiel minimumshøjde af strand foran konstruktionen (m)	50 års hændelse, Vest	50 årshændelse, Øst
- 0.5	1.90	1.94
+0.0	1.79	1.82
+0.5	1.64	1.67
+1.0	1.45	1.48
+1.5	1.24	1.26
+2.0	1.00	1.01
+2.5	0.74	0.74

Tabel C-5 Middel vandstand foran konstruktionen.

	Middel vandstand, S (m)	
Initiel minimumshøjde af strand foran konstruktionen (m)	50 års hændelse, Vest	50 årshændelse, Øst
- 0.5	1.90	1.90
+0.0	1.92	1.92
+0.5	1.93	1.93
+1.0	1.97	1.96
+1.5	2.02	2.00
+2.0	2.07	2.05
+2.5	2.14	2.12