

OKTOBER 2019  
DET FALSTERSKE DIGELAG

# SEDIMENTTRANSPORT VED DET FALSTERSKE DIGE

TEKNISK RAPPORT





OKTOBER 2019  
DET FALSTERSKE DIGELAG

# SEDIMENTTRANSPORT VED DET FALSTERSKE DIGE

TEKNISK RAPPORT

PROJEKTNR.

A119857

DOKUMENTNR.

RP001

VERSION

1.0

UDGIVELSESDATO

21-11-2019

BESKRIVELSE

Teknisk rapport

UDARBEJDET

JBUN

KONTROLLERET

HSV

GODKENDT

JBUN



# INDHOLD

1	Indledning	7
2	Hydrauliske forhold	8
2.1	Vinddata	8
2.2	Bathymetri	8
2.3	Bølgemodellen	9
2.4	Bølgeklima	10
3	Sediment transport	15
3.1	Generel	15
3.2	Sandprøver	15
3.3	Kystlinjens orientering	17
3.4	Resultat	21
4	Kystteknisk analyse	22
4.1	Kystbeskyttelse	26
5	Konklusion	31
6	Referencer	32



# 1 Indledning

Det falsterske digelag har observeret, at der i de seneste år er sket en større erosion på dele af kyststrækningen ved det falsterske dige. COWI er i denne forbindelse blevet bedt om at vurdere størrelsen af sandtransporten ud for kysten ved diget. Ved opstarten af projektet har COWI sammen med formanden og tilsynsmanden for digelaget besigtiget de berørte steder på diget. Under besigtigelsen blev digets beskaffenhed vurderet, og det blev diskuteret hvorledes diget kan sikres nu og i fremtiden for at imødekomme klimaforandringer som f.eks. havspejlsstigninger mv..

Rapporten beskriver bølgeforholdene ved kysten ud for det falsterske dige, samt transporten af sand på kysten langs diget. I analysen undersøges desuden hvordan kystlinjen har ændret sig med tiden, da dette sammen med sedimenttransportanalysen giver et mere klart billede af hvordan kysten ændrer sig. I rapporten angives anbefalinger for kystbeskyttelse med sandfodring samt skråningsbeskyttelse.

## 2 Hydrauliske forhold

For at undersøge sedimenttransporten ved det falsterske dige, er det nødvendigt at kende bølgeklimaet ud for kysten. Bølgerne løfter sedimentpartiklerne op i vandsøjlen fra havbunden, og den langsgående strøm, der dannes af de brydende bølger, fører sedimenterne væk.

Bølgeklimaet ud for det falsterske dige beregnes ved hjælp af en numerisk bølgemodel, MIKE 21 SW (spektral bølgemodel), der på baggrund af vinddata for en given periode udregner de vindgenererede bølger i området.

### 2.1 Vinddata

De benyttede vinddata i modellen er fra målestationen Arkona i Østersøen, se Figur 1. Vinddataene er målt fra januar 2003 til december 2013, og dækker således 11 år. Vinddataene fra målestationen benyttes i modelleringen over hele modelområdet. Dvs. vinden varierer med tiden, men er konstant i modelområdet.

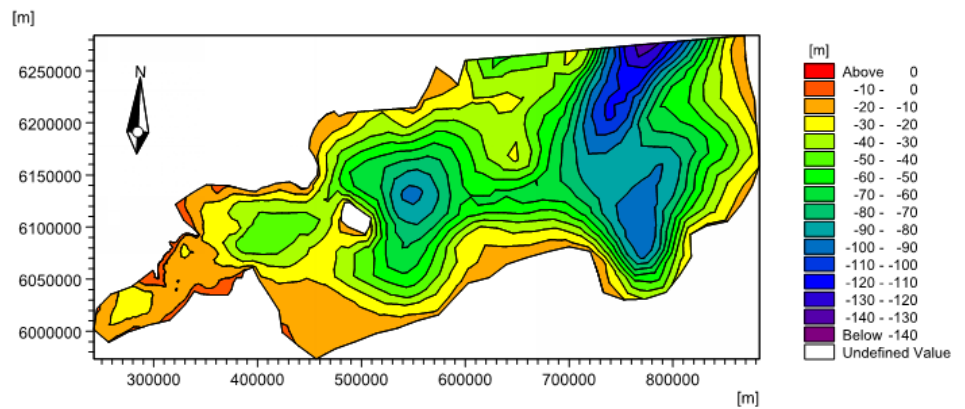


Figur 1 Arkona målestation i østersøen. Kort fra Google Earth. Det falsterske dige er angivet med orange farve.

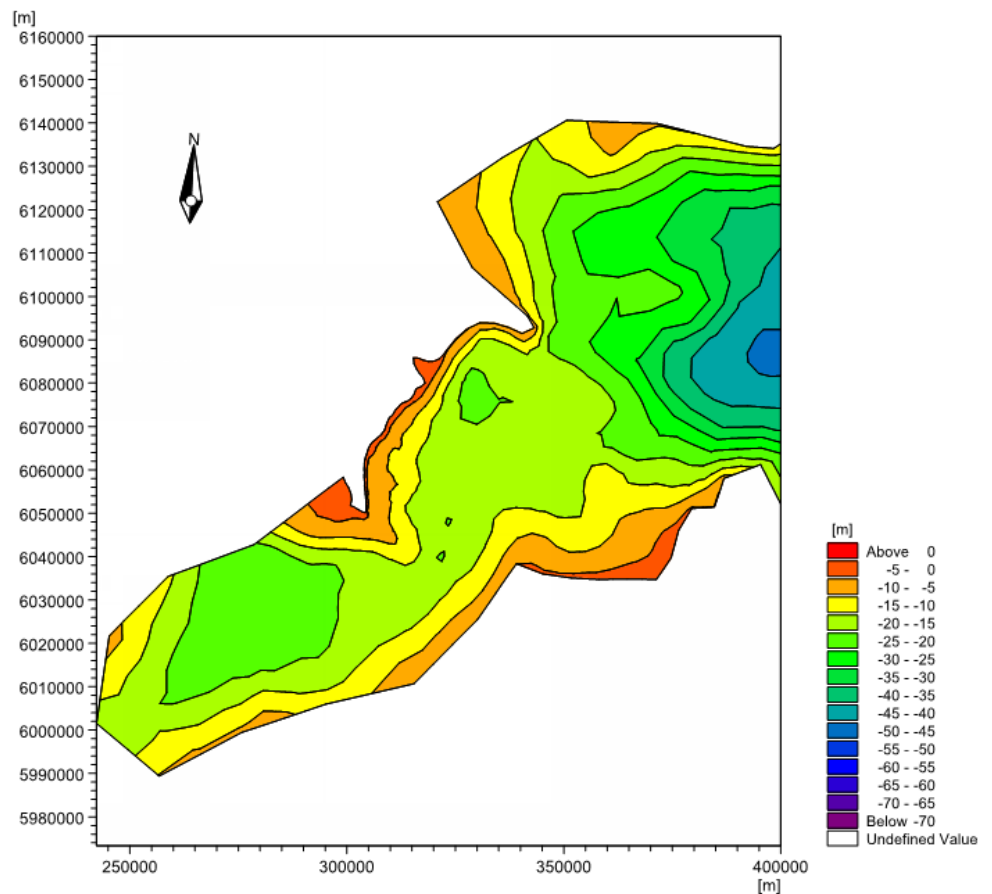
### 2.2 Bathymetri

Bathymetrien (havbundens vanddybder) benyttet i modellen består af en kombination af opmålinger foretaget foran strandene ved diget, og data indhentet fra søkort. På Figur 2 og Figur 3 ses modelbathymetrien for Østersøen. Det ses at der øst for Falster er en relativt flad havbund, da der er langt mellem konturlinjerne.





Figur 2 Bathymetri af Østersøen, der benyttes i modellen.

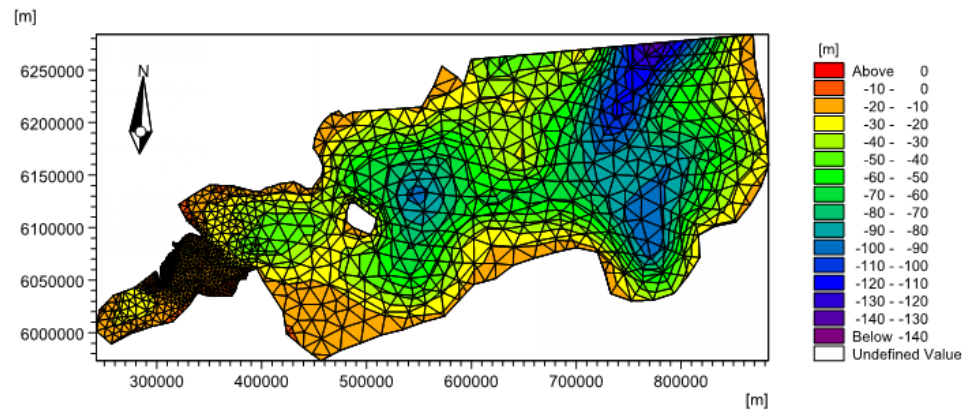


Figur 3 Zoom på bathymetrien omkring falster.

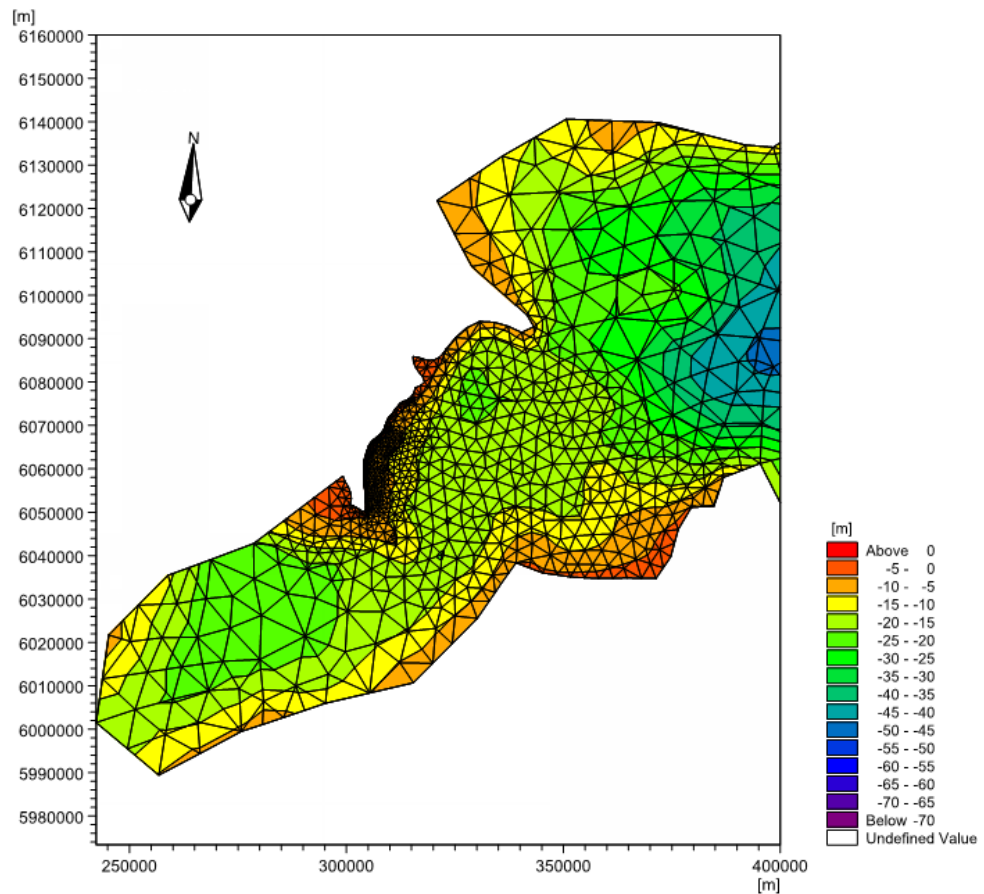
## 2.3 Bølgemodellen

Bølgemodellen (SW-modellen) er opdelt i mange elementer, hvor hvert element bruges til at beregne bølgerne for det område et element dækker. For at reducere beregningstiden, laves der en inddeling med relative store elementer i områder væk fra diget, da der i disse områder af modellen ikke udtrækkes værdier, se Figur 4. Ved Falster er inddelingen af elementer forfinet, se Figur 5, for at sikre en høj opløsning i modellen i nærområdet. Dette giver et mere fint inddelt

bølgeklima, til brug i sedimenttransportanalysen. Modellen er kørt med konstant vandstand.



Figur 4 Oversigt over elementerne i SW-modellen.



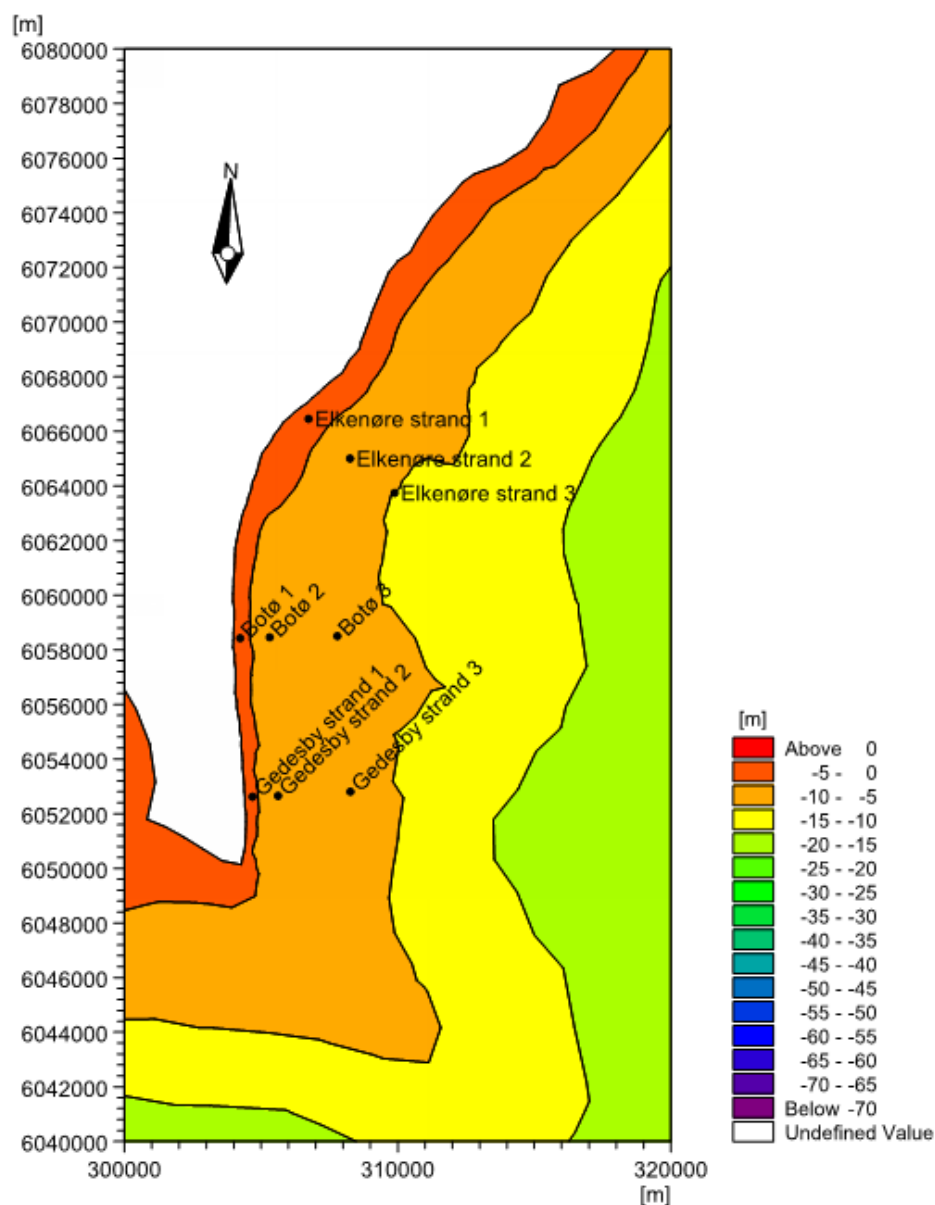
Figur 5 Zoom på modelementer ud for falster.

## 2.4 Bølgeklima

Bølgeklimaet er udtrykt ved 3 lokaliteter: Elkenøre strand, Botø og Gedesby strand. Ved hver lokalitet er der udtrykt information fra 3 forskellige dybder. Da sedimenttransportberegningen kræver at bølgerne er dybvandsbølger, skal

det være tilstrækkeligt med dybde for at undgå brydende bølger. Figur 6 viser udtrækspunkterne ved kysten langs diget. I Tabel 1 er givet vanddybderne for udtrækspunkterne. Tidsserierne dækker en periode på 11 år.

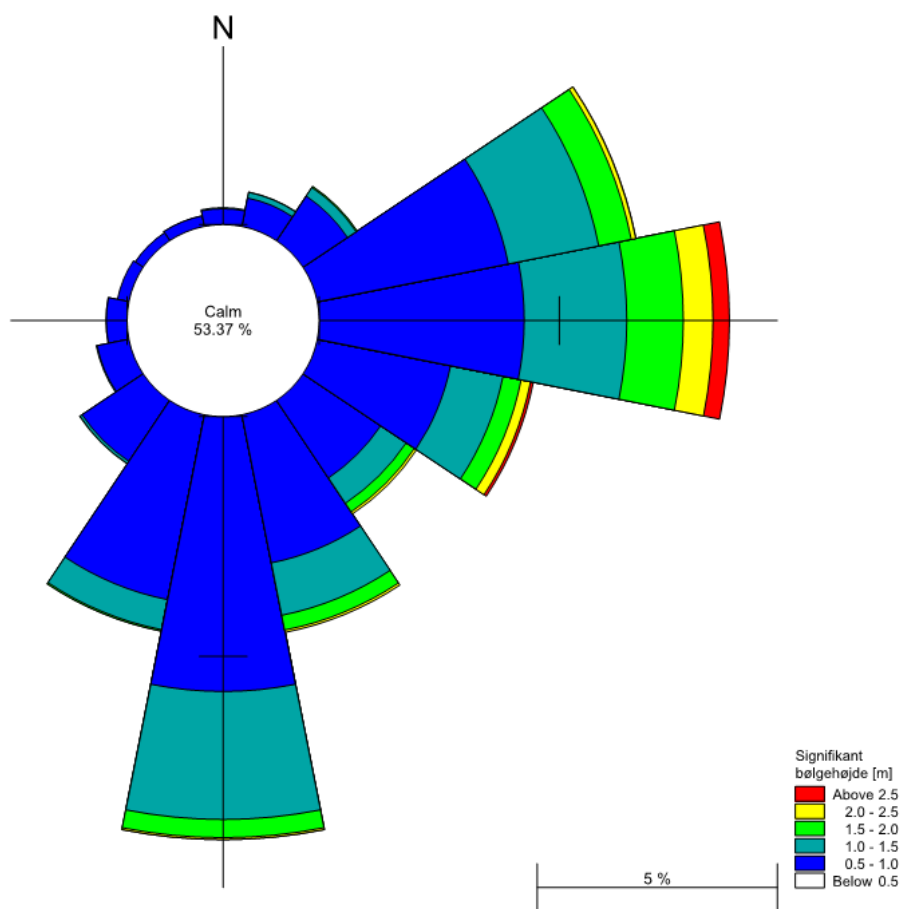
Figur 7 til Figur 9 viser bølgeroser for udtrækspunkt 2 for hver lokalitet. Bølgeroserne viser hyppigheden af bølger af forskellige størrelse fra forskellige retninger. For Elkenøre kommer de største bølger fra øst, samtidig er der en stor forekomst af mindre bølger fra syd. For Botø er situationen den samme, dog kommer bølgerne primært fra ØNØ og SSØ. For Gedesby strand kommer bølgerne primært fra ØNØ og sydlig retning.



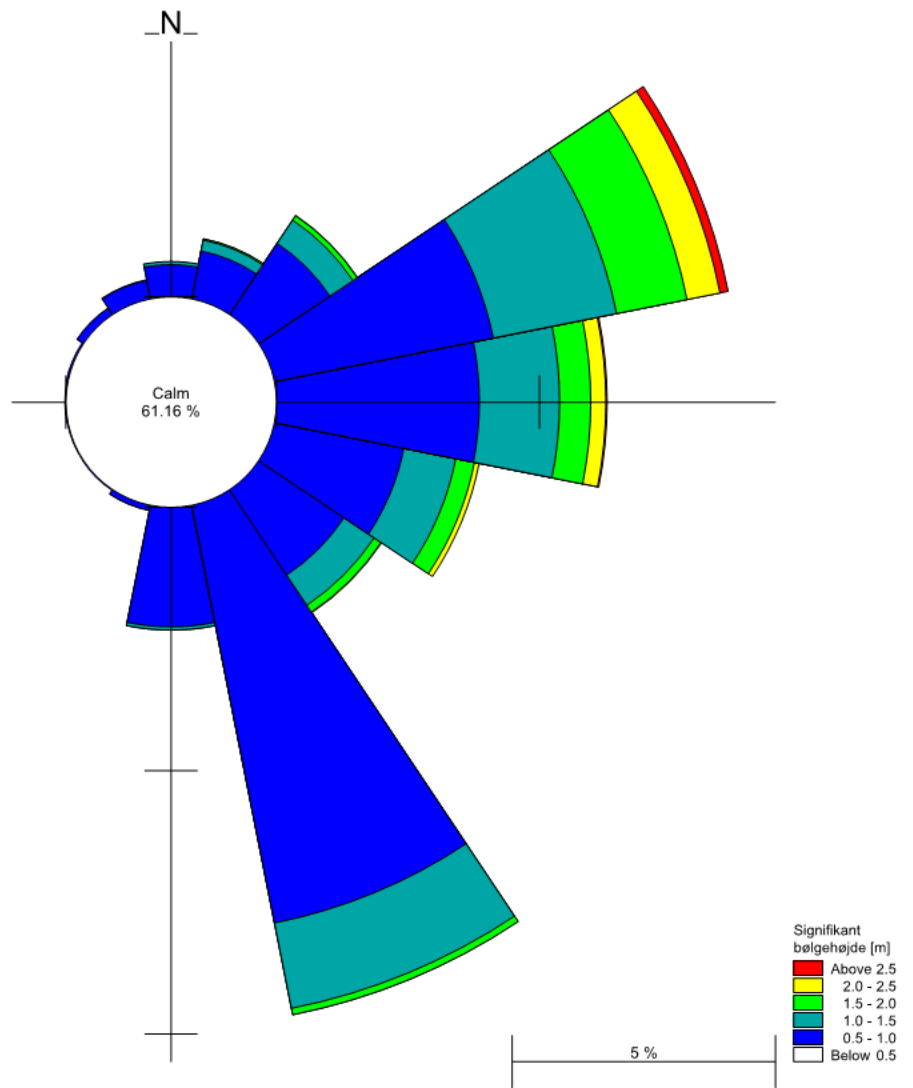
Figur 6 Udtrækspunkter fra MIKE 21 SW-modellen.

Tabel 1 Vanddybde ved udtrækspunkter vist i Figur 6. Vanddybderne er relativ til middelvandstanden (MSL).

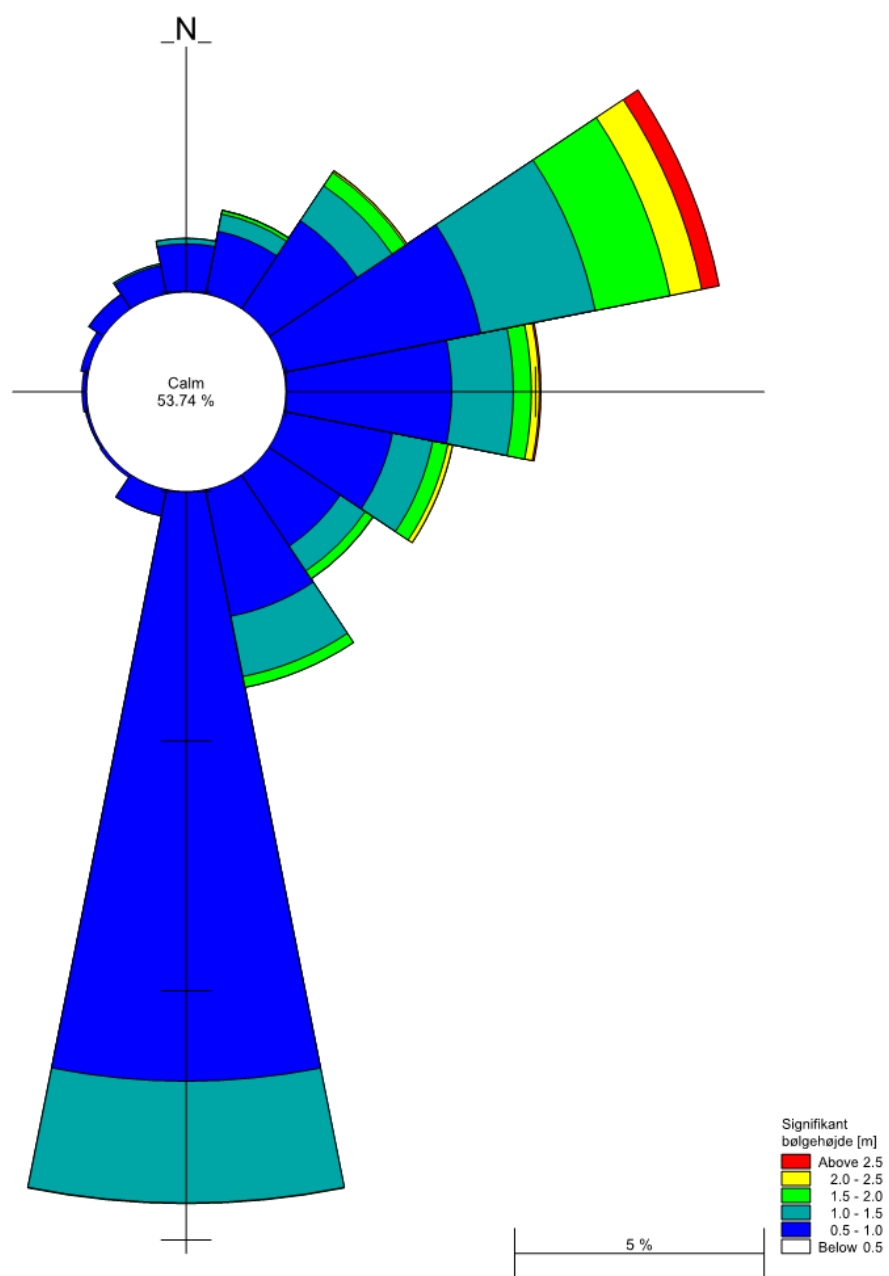
Udtrækspunkt	Vanddybde [m MSL]
Elkenøre strand 1	-3,3
Elkenøre strand 2	-7,5
Elkenøre strand 3	-10,0
Botø 1	-3,0
Botø 2	-6,9
Botø 3	-8,8
Gedesby strand 1	-3,4
Gedesby strand 2	-7,7
Gedesby strand 3	-9,4



Figur 7 Bølgerose for den signifikante bølgehøjde ved Elkenøre, udtrækspunkt 2.



Figur 8 Bølgerose for den signifikante bølgehøjde ved Botø, udtrækspunkt 2.



Figur 9 Bølgerose for den signifikante bølgehøjde ved Gedesby strand, udtrækspunkt 2.

## 3 Sediment transport

### 3.1 Generel

For at kunne vurdere den morfologiske udvikling af kysten, er der foretaget en analytisk beregning af sedimenttransportkapaciteten forskellige steder langs kysten. Beregningerne er udført med udgangspunkt i 11 års bølgedata fra bølgemodelleringen beskrevet i afsnit 2.4.

Til beregning af sedimenttransportkapaciteten anvendes Kamphuis' formel fra 1991 [ref. /1/]:

$$Q = 7,3H_{sb}^2 T_p^{1.5} m_b^{0.75} d_{50}^{-0.25} \sin^{0.6}(2\alpha_b)$$

Hvor,

$H_{sb}$  Er brydningsbølgehøjden

$T_p$  Er peak bølgeperioden

$m_b$  Er bundhældningen i brydningszonen

$d_{50}$  Er middelkorndiameteren

$\alpha_b$  Er bølgeindfaldsretningen ved brydning

Bølgetransformationen fra dybt vand, hvor bølgeforholdene er trukket ud af MIKE 21 SW-modellen, og ind til brydningszonen (brændingen) foretages analytisk ved brug af Snells lov:

$$\frac{c}{\sin(\beta)} = \text{konstant}$$

Hvor,

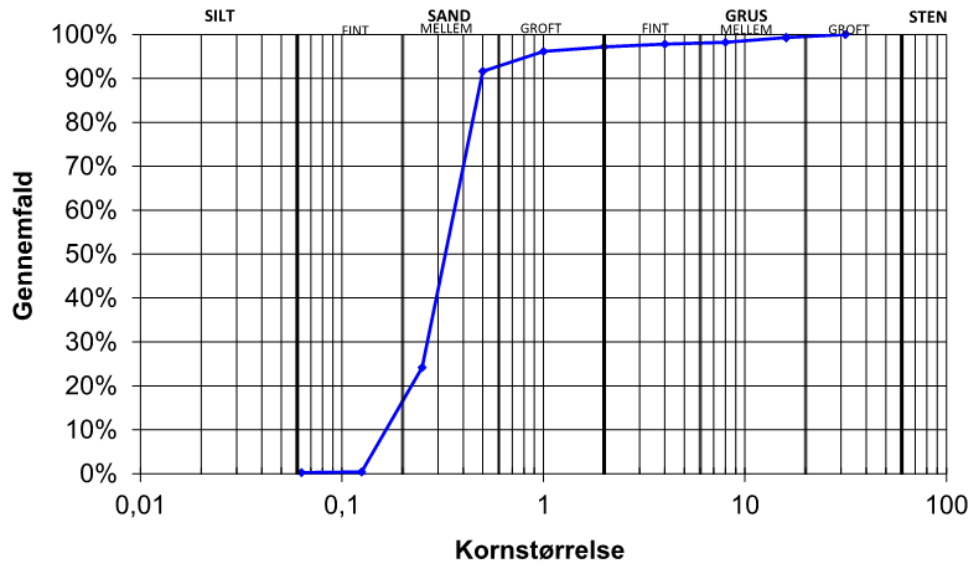
$c$  Er bølgehastigheden

$\beta$  Bølgeretningen ift. kystnormalen

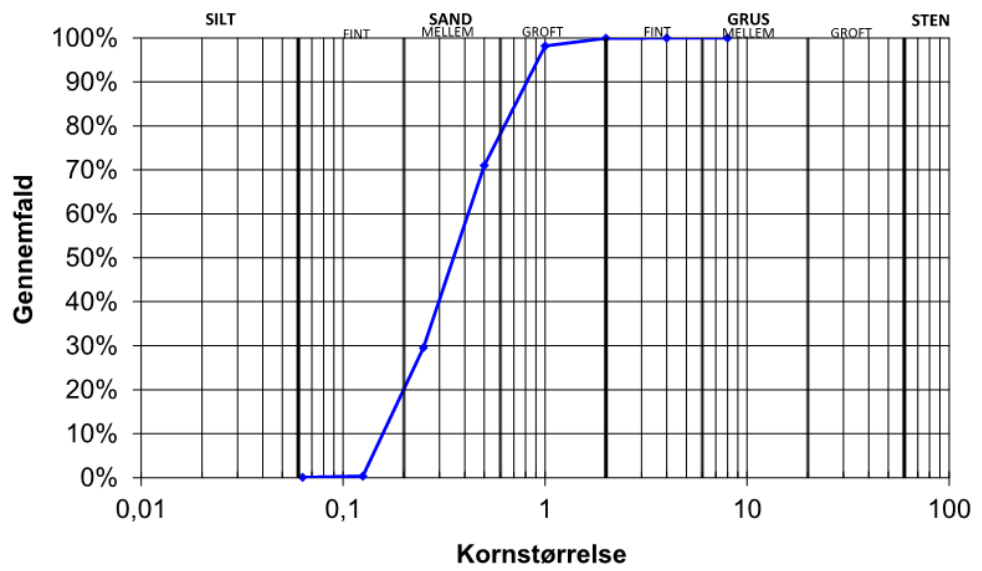
Sedimenttransportkapaciteten beregnet i dette afsnit anvendes til at beskrive den kroniske erosion af sediment på strækningen. Den kroniske erosion kan også beskrives som den "daglige" erosion af strækningen. Foruden kronisk erosion findes også akut erosion. Den akutte erosion beskriver den erosion der opstår som følge af store stormhændelser, der oftest opstår i vinterhalvåret.

### 3.2 Sandprøver

Som nævnt ovenfor (Kamphuis' formel) benyttes middelkorndiameteren af sedimentet i forbindelse med sedimenttransportberegningen. Der er derfor udtaget prøver på de analyserede strækninger til brug i beregningerne. Middelkorndiameteren for Elkenøre strand, Botø og Gedesby strand er henholdsvis 0,33 mm, 0,35 mm og 0,36 mm, se Figur 10 til Figur 12.

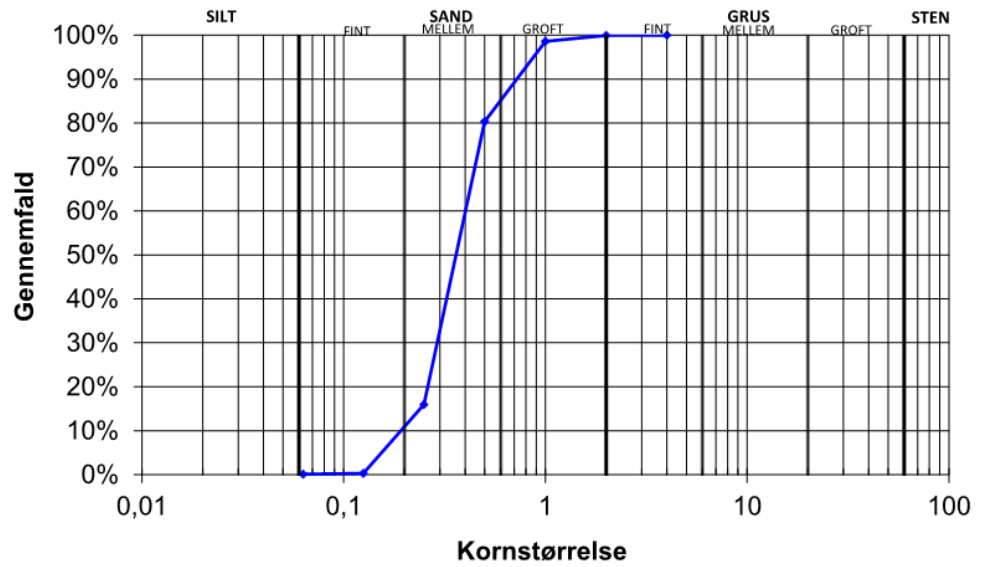


Figur 10 Sigteanalyse – Elkenøre strand.



Figur 11 Sigteanalyse – Botø.





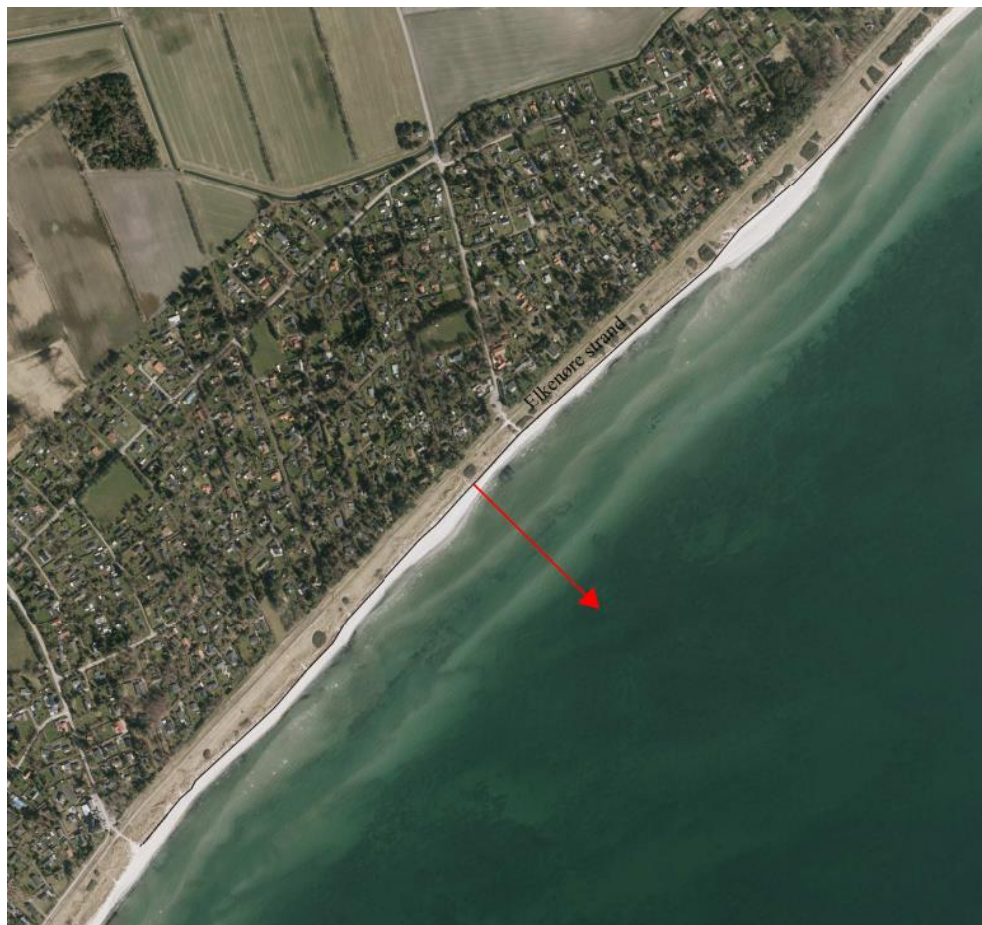
Figur 12 Sigteanalyse – Gedesby strand.

### 3.3 Kystlinjens orientering

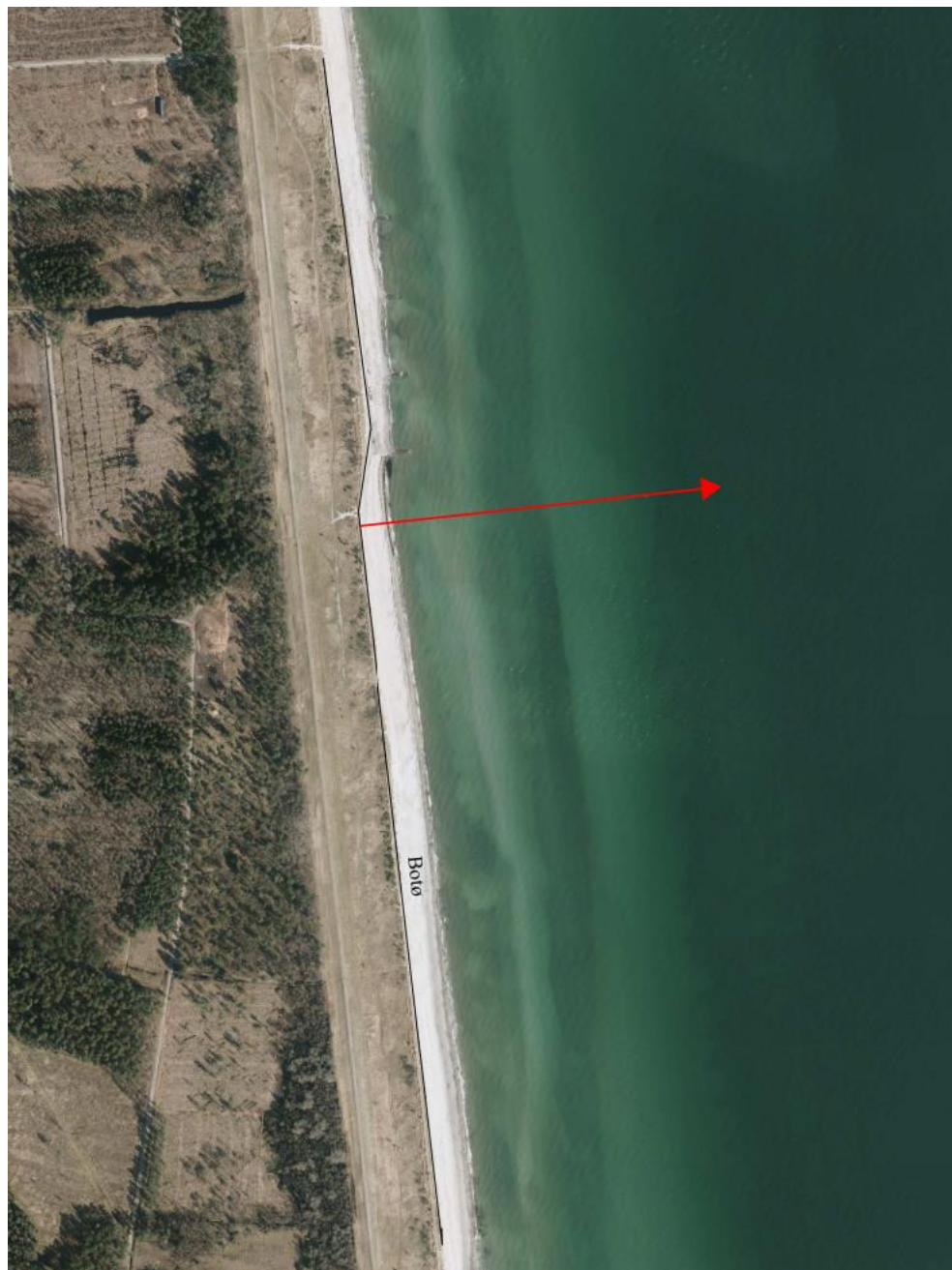
Bølgeindfaldsretningen ved brydning af bølgerne beregnes relativ til kystlinjens orientering (kystnormalen). Kystnormalerne anvendt i sedimenttransportberegningen er givet i Tabel 2 og vist på Figur 13 til Figur 15.

Tabel 2 Kystnormaler.

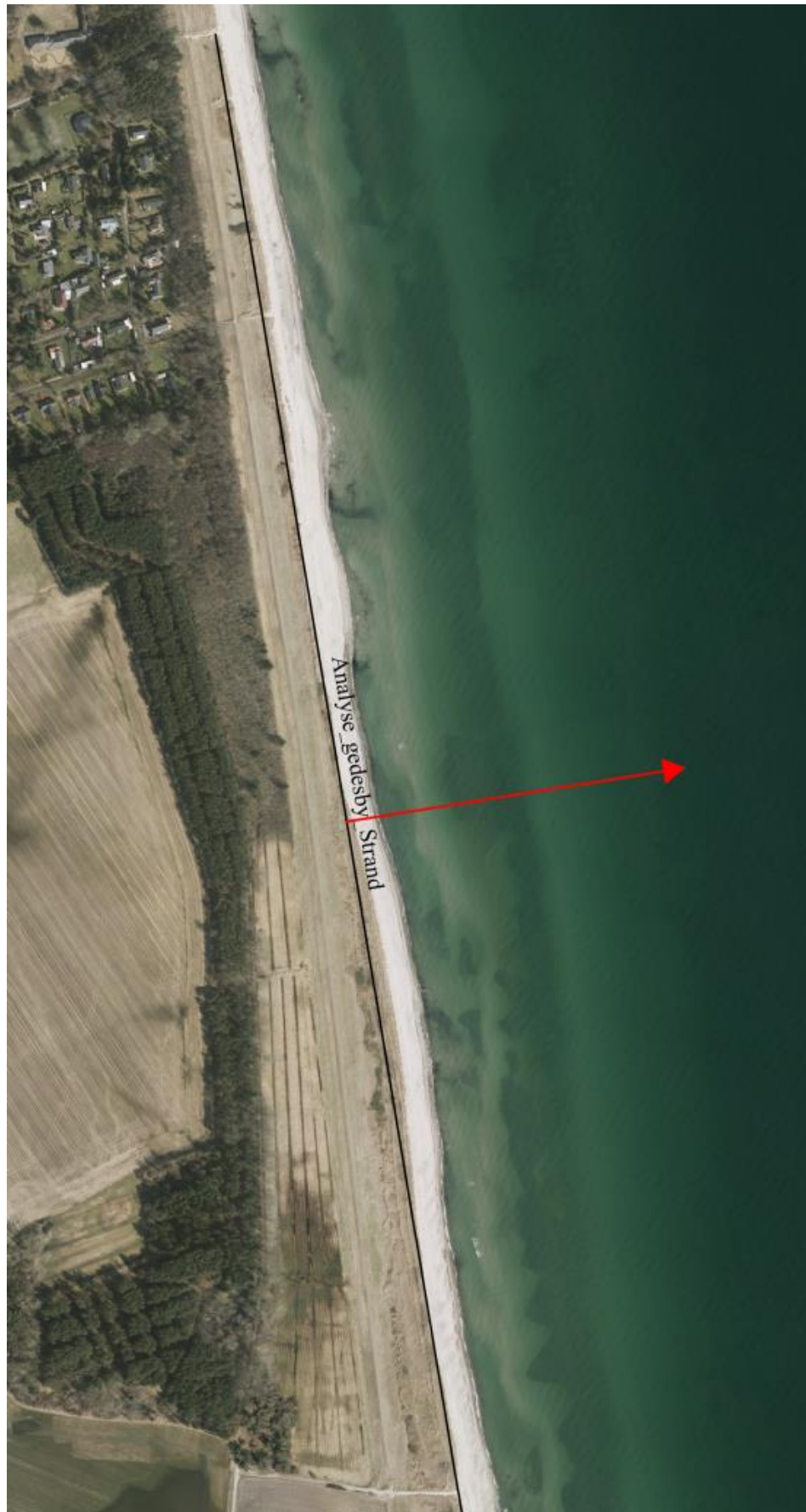
	Kystnormal [° N]
Elkenøre strand	135,9
Botø	86,1
Gedesby strand	83,3



Figur 13 Kystnormal for Elkenøre strand.



Figur 14 Kystnormal for Botø.



Figur 15 Kystnormal for Gedesby strand.

### 3.4 Resultat

Ved brug af Kamphuis' formel, se afsnit 3.1, bølgeklimaet foran diget, middelnørrelsen og kystlinjes orientering udregnes sedimenttransporten langs det falsterske dige. Transportmængderne er givet i Tabel 3.

*Tabel 3 Sedimenttransport langs det falsterske dige.*

Lokalitet	Netto transport [m <sup>3</sup> /år]	Total transport [m <sup>3</sup> /år]	Nordgående transport [m <sup>3</sup> /år]	Sydgående transport [m <sup>3</sup> /år]
Elkenøre strand	9.693	23.985	-7.146	16.839
Botø	3.308	21.607	-9.150	12.458
Gedesby strand	12.213	30.809	-9.298	21.511

Fra Tabel 3 ses, at der er en sydliggående transport af sand. Transportmængden er relativ begrænset, hvilket stemmer godt overens med at kysten generelt betragtes som stabil. Fra Elkenøre strand til Gedesby strand er der en difference i transporten på ca. 2.500 m<sup>3</sup> sand om året, dette betyder at der årligt er et underskud på ca. 2.500 m<sup>3</sup> sand fordelt over hele strækningen.

Da transporten af sand er væsentlig mindre ved Botø, betyder det at der sker omlejring af sand, fra Elkenøre strand til Botø. Således at dele af sandmængden der flyttes fra Elkenøre strand aflejres på strækningen ned til Botø. Dette stemmer godt overens med at der gennem tiden på denne delstrækning er observeret en forøgelse af sand i området foran diget.

Fra Botø og ned til Gedesby strand, er der et underskud af sand på ca. 9.000 m<sup>3</sup> sand. I afsnit 4 undersøges kystlinjen nærmere og hvilken indflydelse dette underskud har.



## 4 Kystteknisk analyse

Ved Elkenøre strand er der en sydlig transport på ca. 9700 m<sup>3</sup> sand, se Tabel 3. Dette betyder dog ikke nødvendigvis at der eroderes denne mængde sand her, da der også kan være en transport af sand fra nord mod syd til Elkenøre strand. For at undersøge dette nærmere sammenlignes kystlinjerne for Elkenøre strand i 2018 og 2006, dækkende 12 års udvikling svarende ca. til perioden for de 11 års sedimenttransport beregnet ovenfor.

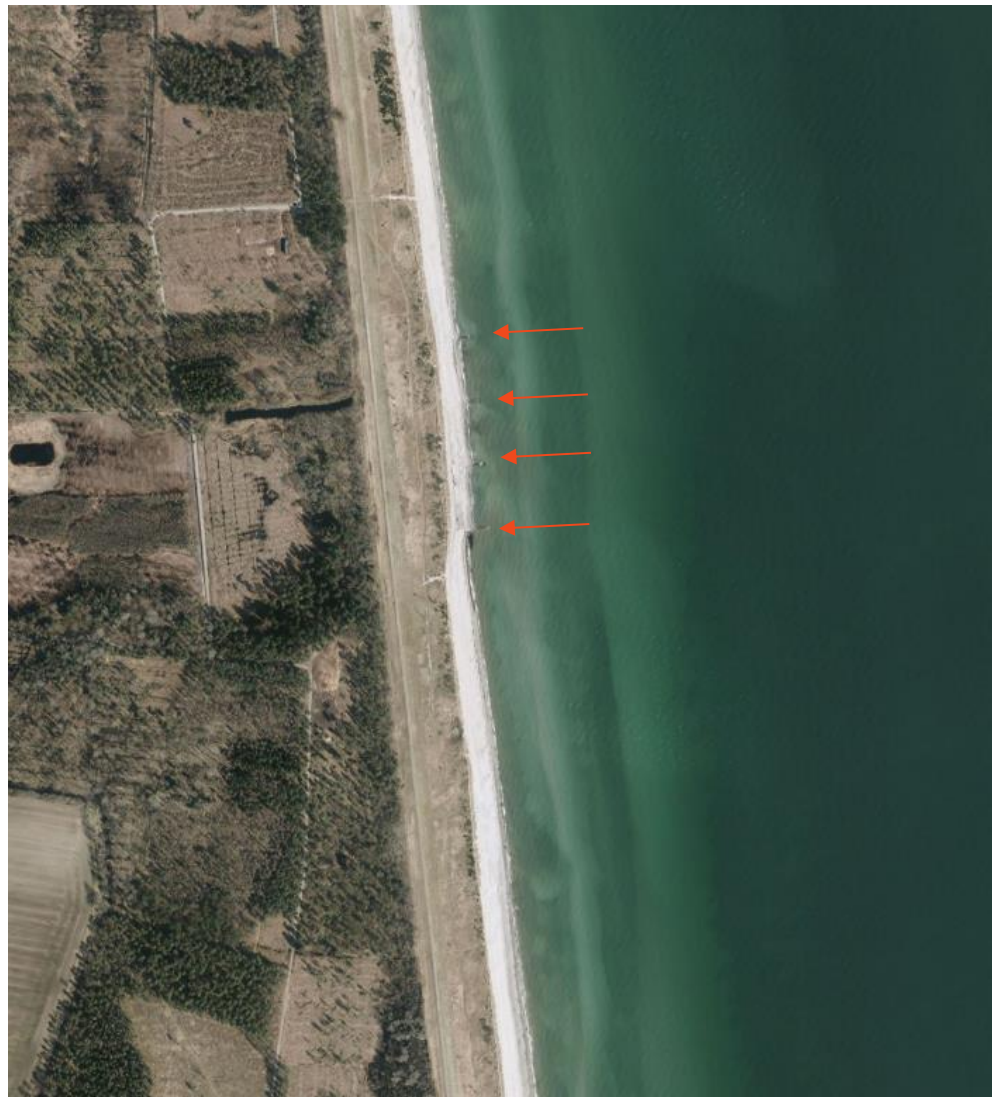
Sammenligningen er lavet ved at analysere vegetationslinjen på ortofotoene fra 2018 og 2006. Af Figur 16 fremgår det at kystlinjen har ændret sig helt lokalt ved enten fremrykning eller tilbagerykning, men det generelle billede viser en stabil kyststrækning. Dette indikerer at sandtransporten nord for Elkenøre strand, er i en størrelsesorden der nogenlunde tilsvarende den ved Elkenøre strand. Den erosion der opstår på strækningen, vil derfor være relateret til storme. Foranstaltninger/løsninger for stormhændelser beskrives i afsnit 4.1.



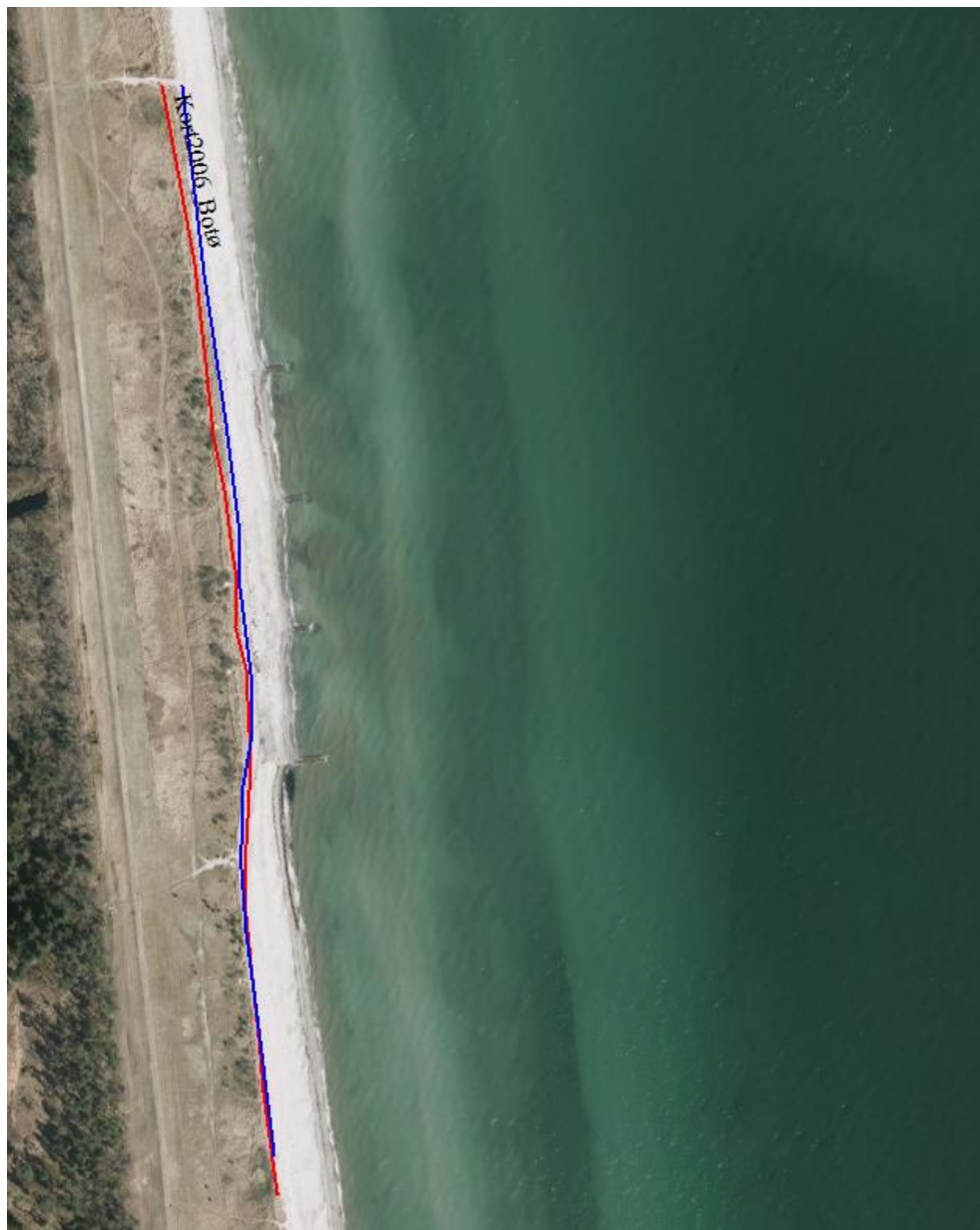
Figur 16 Kystlinjerne for 2018 (blå) og 2006 (rød), ved Elkenøre strand.

Den generelle sandtransport ved Botø er sydgående, dette ses også af Figur 17, hvor der syd for den sydligste hofde er læsideerosion. Grundet den lille sedimenttransport samt hofdernes evne til at holde på sandet opleves der ikke kronisk erosion på denne strækning, hvilket også ses af Figur 18. Hofderne bevirker

dog at stranden lokalt på den sydlige side heraf er smallere end nord for. Derfor er området lokalt syd for høfderne mere sårbar over for akut erosion, da stranden ikke beskytter i samme grad mod store bølger. Den erosion der forekommer under storme, vil derfor være større syd for høfderne end nord for, hvilket stemmer overens med observationerne under besigtigelsen. Den erosion der opstår på strækningen, vil derfor primært være relateret til storme. Foranstaltninger/løsninger for stormhændelser beskrives i afsnit 4.1.



Figur 17 Strækning ved Botø. Orange pile indikere position af høfder.



Figur 18 Kystlinjerne for 2018 (blå) og 2006 (rød), ved Botø.

Langs kysten ved Gedesby strand er der en sydgående transport af sand. Analyseres kystlinjeudviklingen over tid, se Figur 19, fremgår det at der generelt for strækningen ikke sker erosion af stranden. Der vurderes at være to årsager til dette. Den første årsag er at der syd for strækningen er høfder som hjælper med at holde på sandet som transporteres i sydlig retning. Den anden årsag findes i forbindelse med opmålinger som er foretaget til dette projekt; her observerede landmåleren at der ud for kysten ved Gedesby strand, blev dybere hurtigere end angivet på søkortet. Dette indikerer at der er stejlere ud for kysten end tidligere, og at den kroniske erosion indtil nu ikke direkte påvirker stranden, men i stedet påvirker havbundsprofilen ud for stranden. De skader som er sket på dige/klit på stranden skyldes derfor ikke direkte den kroniske erosion. Den forøgede dybde ud for kysten har dog den virkning at der i forbindelse med storme vil komme større bølger ind til stranden, og dette medfører at den akutte erosion vil være større. Den synlige erosion som opstår på strækningen, vil



derfor være relateret til storme. Foranstaltninger/løsninger for stormhændelser beskrives i afsnit 4.1.

Der er i 2011 foretaget opmålinger af profiler for kysten ud for diget, opmålingerne er ikke foretaget for præcis de samme profiler som i 2019, og der er derfor blevet benyttet interpolation af landmåleren for at sammenligne opmålingerne. Opmålingerne viser mindre ændringer i profilerne, uden at give en klar indikation på at der er sket ændringer. Da søkort ofte er baseret på ældre opmålinger, forventes observationen af en forøget dybde ud for kysten stadig at være gældende, set over en periode som strækker sig længere tilbage i tiden end 2011.



Figur 19 Kystlinjerne for 2018 (blå) og 2006 (rød), ved Gedesby strand.

## 4.1 Kystbeskyttelse

Beskyttelse af kysten kan ske med 2 forskellige løsninger; en blød beskyttelse (sandfodring) og en hård beskyttelse (skråningsbeskyttelse).

Som beskrevet ovenfor, er der på strækningen fra Elkenøre strand til Botø ikke indikation af kronisk erosion, og det anbefales derfor ikke at lave løbende sandfodring her.

Syd for høfderne ved Botø er der læsideerosion. Ved Gedesby strand er der en kronisk erosion som foregår et stykke fra kysten, dette medfører at der kan forekomme større bølger ved kysten end tidligere, og disse kan påvirke diget. Det anbefales derfor at laves sandfodring både syd for høfderne ved Botø og ved Gedesby strand, for at sikre dette område mod kronisk erosion.

For at beskytte digefoden mod akut erosion (stormhændelser), anbefales det at lave en skråningsbeskyttelse langs de udsatte strækninger hvor dette er et problem. De to løsninger er beskrevet nedenfor.

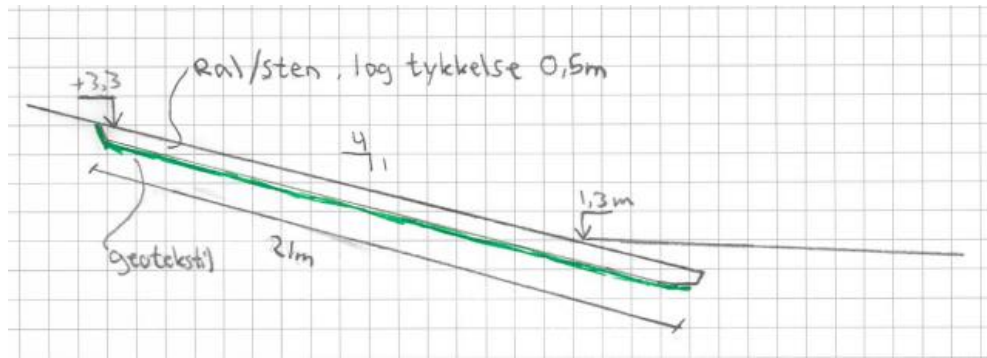
For at kunne udføre kystbeskyttelsen, er det nødvendigt at søge tilladelse hos de relevante myndigheder (kommunen).

#### 4.1.1 Skråningsbeskyttelse

Ved større storme er der sket erosion af skråningerne, som normalt er dækket af marehalm. Dette er den akutte erosion der forekommer når bølgerne når ind til skråningerne bag stranden på grund af højere vandstand og kraftig vind.

Ved besigtigelsen af stranden var der flere strækninger hvor marehalmen ikke var tilstrækkelig stærk til at kunne modstå bølgekræfterne, hvorfor skråningerne bliver beskadiget ved storme.

For at gøre skråningerne mere robuste kan man derfor lave en skråningsbeskyttelse. Et forslag til en skråningsbeskyttelse er givet på Figur 20. Skråningsbeskyttelsen består af ral/sten i en lagtykkelse på ca. 0,5 m, og under rallaget ligger en geotekstil til at sikre mod udvaskning af sandet gennem rallaget. Størrelsen af ral/sten skal bestemmes ved en vurdering af hvilken hændelsestype man vil beskytte imod; kraftigere hændelser vil kræve større ral/stenmaterialer. For ikke at udtrykke af stranden ændres, kan der over skråningsbeskyttelsen placeres sand. Udover en æstetisk betydning vil sandet også virke som en buffer der kan eroderes uden risiko for at der eroderes i selve skråningen. Sandet vil fordele sig på stranden efter en storm, og man vil derfor stadig have en bred strand efterfølgende, som er med til at reducere bølgepåvirkningen på stranden.



Figur 20 Skitse af skråningsbeskyttelse.

### 4.1.2 Sandfodring

Da den generelle sandtransport er mod syd, anbefales det at hvis der skal sandfodres gøres dette bl.a. nord for strækningen ved Gedesby strand. Et oplagt sted at placere sandet, vil være lige syd for høfden ved Botø, herved opnås der en bredere strand syd for høfden. Den ekstra bredde vil med tiden forsvinde, da sandet transporteres mod syd, men i den periode hvor sandet ligger ved Botø, vil den bidrage med ekstra beskyttelse af diget bagved. Se det anbefalede område på Figur 21, arealet svar til ca. 5.300 m<sup>2</sup>.

Hvis man vil opfylde området svarende til strandens højde nord for høfden, vil man skulle benytte ca. 16.000 m<sup>3</sup> sand. Dette skyldes at profilerne nord og syd for høfden er forskudte ned til en dybde på ca. -2 m DVR90, se Figur 23. Dette skal tages med i beregningen af volumen, da hele profilet skal hæves, for at sandet ikke blot flytter sig under havoverfladen efter det er udlagt.

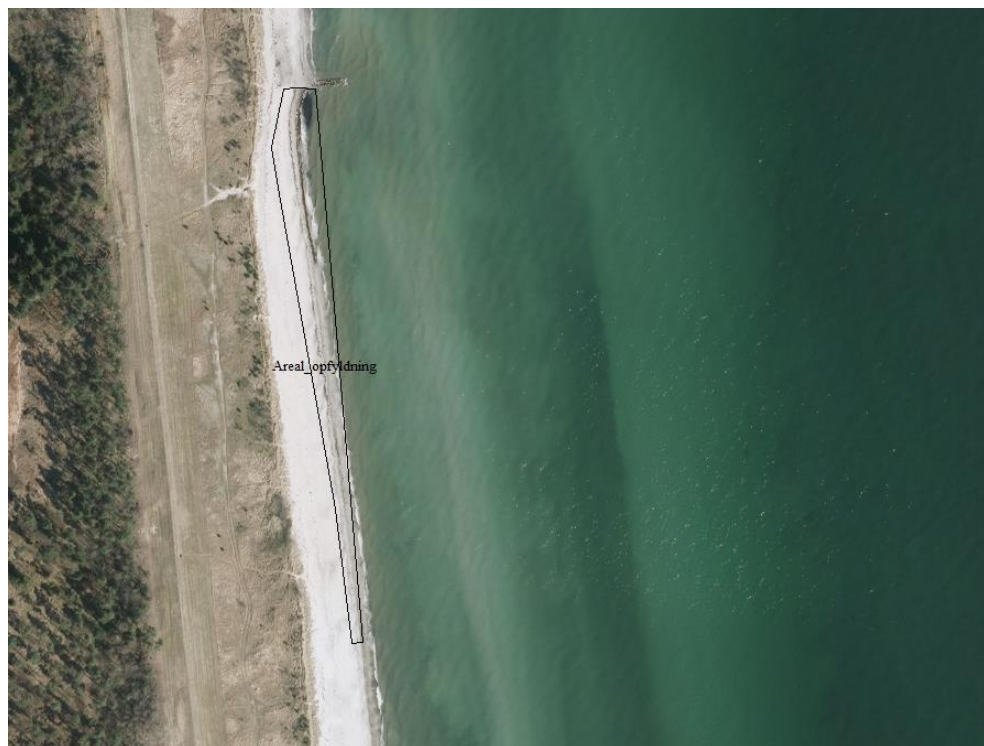
Den kroniske erosion og effekten af læsideerosionen vil medføre at sandet transporteres mod syd. Sandet vil derfor hjælpe til en start ved Botø og vil efterfølgende hjælpe på sandbalancen ved Gedesby strand. Læsideeffekten er forbundet med stor usikkerhed, og det vurderes at det kan tage i størrelsesordenen 5 år for stranden at finde tilbage til udgangspunktet. Dette vil dog være nødvendigt at overvåge.

Det antages at den øgede mængde sand ved Botø, medfører et reduceret underskud af sand ved Gedesby strand. Med ca. 16.000 m<sup>3</sup> sand som forventes at transporteres mod syd over en periode på 5 år, vil der ca. tilføres 3.000 m<sup>3</sup> sand til sandbalancen ved Gedesby strand. Sandunderskuddet ved Gedesby strand vil derfor være ca. 6.000 m<sup>3</sup>/år som der skal fodres med her. Sandet bør udlægges over en længere strækning og afhængig af økonomi og mobiliseringsomkostninger kan det være fordelagtigt at udlægge en større mængde, så vedligeholdelsesfodringen ikke behøver at foregå årligt. Se foreslået fodringsområde på Figur 22.

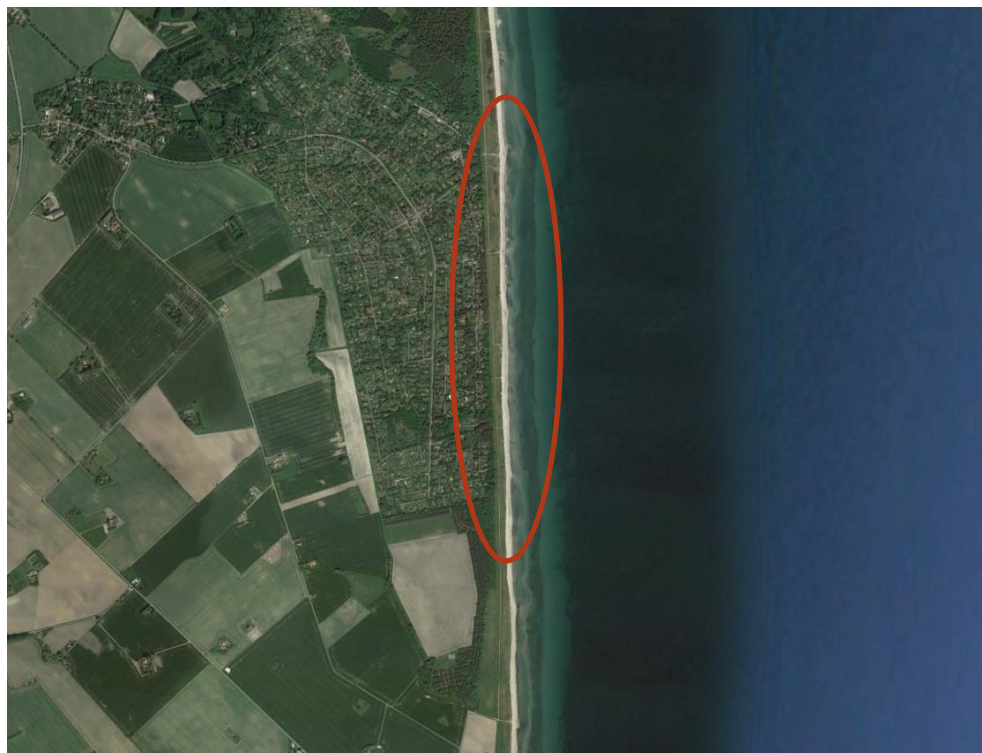
Efter den initiale sandfodring vil det efterfølgende være nødvendigt med løbende vedligeholdelsesfodring. Hyppigheden af vedligeholdelsesfodringen afhænger af hvor store mængder der fodres med, større mængder medfører færre fodringer. Det vil være nødvendigt at fodre med ca. 9000 m<sup>3</sup>/år, da dette er tabet på

strækningen fra Botø til Gedesby strand. Områderne hvor der skal vedligeholdelsesfodres, vurderes på baggrund af effekten af initialfodringen.

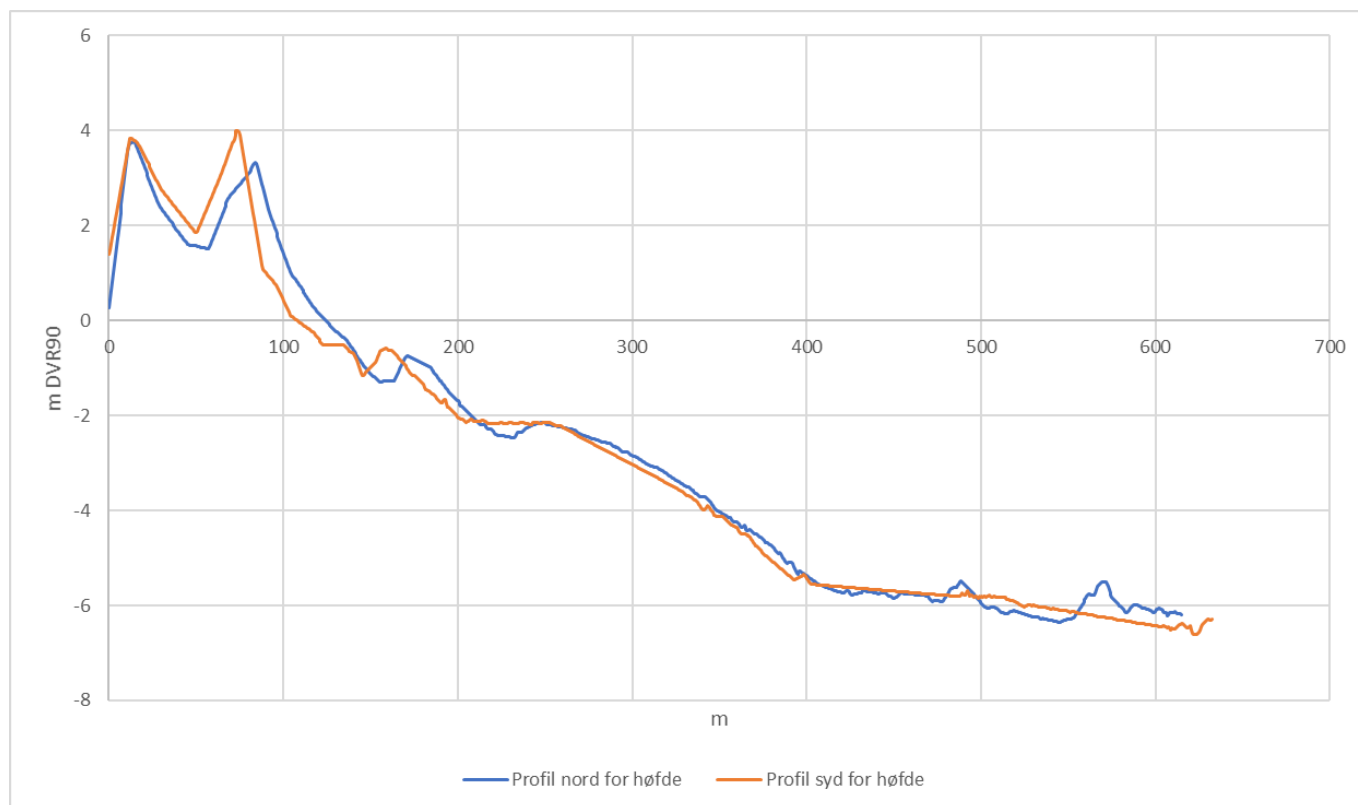
Den anbefalede sandkornstørrelse til sandfodringen er en middelnørrelse på ca.  $d_{50} = 0,4$  mm, da dette svarer til sandet som allerede er på strækningen.



Figur 21      *Anbefalet område for fodring med sand ved Botø.*



Figur 22 Område ved Gedesby strand, indenfor hvor sandfodring forventes at kunne udlægges.



Figur 23 Profiler af havbunden nord og syd for den sydlige hofde ved Botø.

## 5 Konklusion

Sedimenttransportanalysen viser at der er en sydgående transport af sand på kysten langs det falsterske dige. Ved Elkenøre strand viser analysen af ortofotos at stranden er stabil, trods en sydlig transport af sand. Stabiliteten skyldes at sand kommer nord fra strækningen og på denne måde opstår der balance i sandtransporten i området. Ved Botø er transporten mindre end ved Elkenøre strand, og dette indikerer at der aflejres sand på strækningen fra Elkenøre strand til Botø strand. Ved Botø strand er der flere høfder, disse høfder medfører læsideerosion der bevirker at stranden syd for høfderne bliver smallere, hvorved større bølger kan nå ind til digets fod ved stormsituationer. Ved Gedesby strand er der et sandunderskud på ca. 9.000 m<sup>3</sup> sand, og denne mængde har med tiden medført en større vanddybde ud for diget. Denne forøget vanddybde påvirker, ligesom ved Botø, hvor store bølger der kan ramme diget. Det anbefales at der fodres med sand syd for høfderne ved Botø strand, samt at der fodres ved Gedesby strand. Dette er nærmere beskrevet i afsnit 4.1.2. Foruden sandfodring kan der etableres skråningsbeskyttelse ved udsatte steder langs diget, som en ekstra beskyttelse af digefoden i stormsituationer. Skråningsbeskyttelsen er beskrevet i afsnit 4.1.1.

## 6 Referencer

- /1/ **Kamphius, J. W.**  
*Alongshore sediment transport of sand*  
*Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, vol. 117,  
no. No.6, pp. 624-641, ASCE,.