

Orbicon WSP

Nordfyns Kommune

Bogense Diger

Version 2 af 21-04-2020/ TRB/TL

Skitseprojekt

Bilag 3

Sedimentbalancebudget, strømningforhold og erosionsanalyse

Indholdsfortegnelse

1. Det generelle indtryk af kystens morfologi og dynamik	4
2. Strømforhold i farvandet ud for Bogense	6
3. Modellering af sedimenttransport - sedimentbalancebudget	10
Modellering af sedimenttransport og dybdeændringer	11
Bemærkninger til modellering af sedimenttransport og sedimentbudgetbalance	16
4. Erosionsanalyse – analyse af kystlinjeændringer ud fra ortofotos	18
5. Afsluttende sammenfatning og diskussion af erosionsanalyse og sedimentbalancebudget	21

1. Det generelle indtryk af kystens morfologi og dynamik

Bogense er beliggende på de næsten retlinede kyst på Nordvestfyn der stækker sig fra Båring Vig i sydvest til Fyns nordspids Agernæs mod nordøst (Figur 1). Denne strækning er ca. 30 km lang og retningen vinkelret på kysten er ca. WNW, hvorfra de kraftigste vinde forekommer. Vindens frie stræk mod WNW til munden af Vejle Fjord er omkring 18 km og mod N op til ca. 30 km.



Figur 1 Kyst og farvand omkring Bogense (Krak-kort)

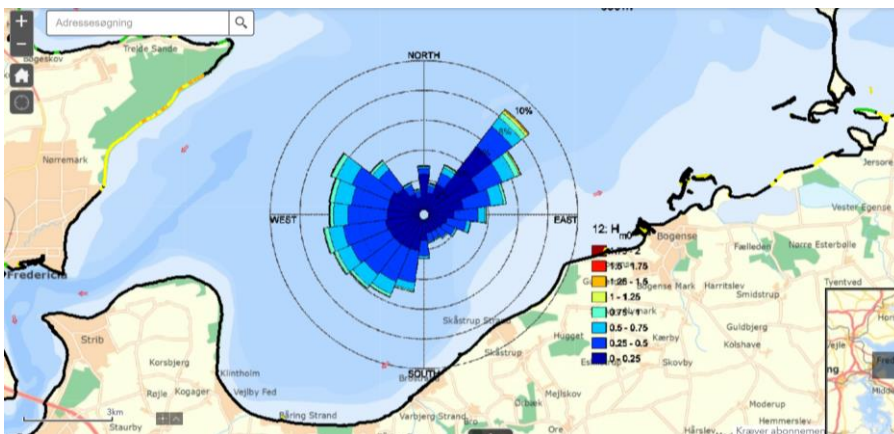
Havnelodsen angiver, at forskellen mellem middelhøjvande og middellavvande er 0,5 m. Med roligt vejr skifter højvande og lavvande regelmæssigt. Storm fra NNE kan give indtil 1,6 m højvande og storm fra SSW indtil 1,6 m lavvande. (Denne relativt store spændvidde mellem høj- og lavvande variationer skyldes sandsynligvis vindstuvning i Kattegat og Samsø Bælt. Til trods for at Havnelodsens tal synes at være lidt for høje må høj- og lavvande af denne størrelse betegnes at være meget sjældne.

Der eksisterer ikke gentagne opmålinger af kystprofiler kyststrækning, som kunne have været hjørnestenen i både en kvalitativ og kvantitativ bedømmelse af områdets dynamik og sedimentbalance. Den tilsvarende viden må indhentes med edb-modellering, hvilket i sagens natur er behæftet med usikkerhed.

Kystens orientering i forhold til vinden, vindforholdene i øvrigt samt vandstandsforholdene minder en del om situationen for Nordsjællands kyst fra Hundested til Gilleleje, men på grund af vindens frie stræk er bølgepåvirkningen langt mindre på Bogensekysten, som da også fremtræder meget forskelligt fra Nordsjællandskysten. Fra luftfotos (fx Figur 1) ses blandt andet at kysten ikke har revler, hvilket ellers normalt opstår, når en kyst er under erosion, hvor der løbende fra kysterrosionen føres sediment ud i den aktive transportzone. Endvidere viser luftfotos at de kystnære områder er relativt lavvandet mest nord for Bogense op mod Æbleø. Alt i alt er det generelle indtryk, at kysten nærmest må betragtes som værende erosionsmæssig neutral med en vis karakter af at være en tilvækstkyst særligt på den nordvestlige del.

Det er bølgerne, der er den dominerende faktor for kysterosion og den langsgående sedimenttransport. For det første skaber bølgerne en resuspension af sedimenterne (sandet) op fra havbunden til vandfasen. Dette sker primært i bølgenes brydningszone. Dernæst skaber den fremadrettede impuls af vandet i de brydende bølger en langsgående bølgestrøm, hvis retning bestemmes af de indkomne bølgers retning. Denne bølgestrøm transporterer herefter det suspenderede sand i strømmen retning dvs. langs kysten.

På Figur 2 ses uddrag af Kystdirektoratets Kystatlas, hvor vises bølgerose, sedimenttransport retning samt kysterosion.



Figur 2 Kystdirektoratets Kystatlas viser her bølgerose, sedimenttransportretning (små røde pile). Desuden markerer den sorte linje på kystlinjen at kysterosionen er ubetydelig. (Senere i dette bilag vises, at der reelt sker en svag kystfremrykning omkring Bogense)

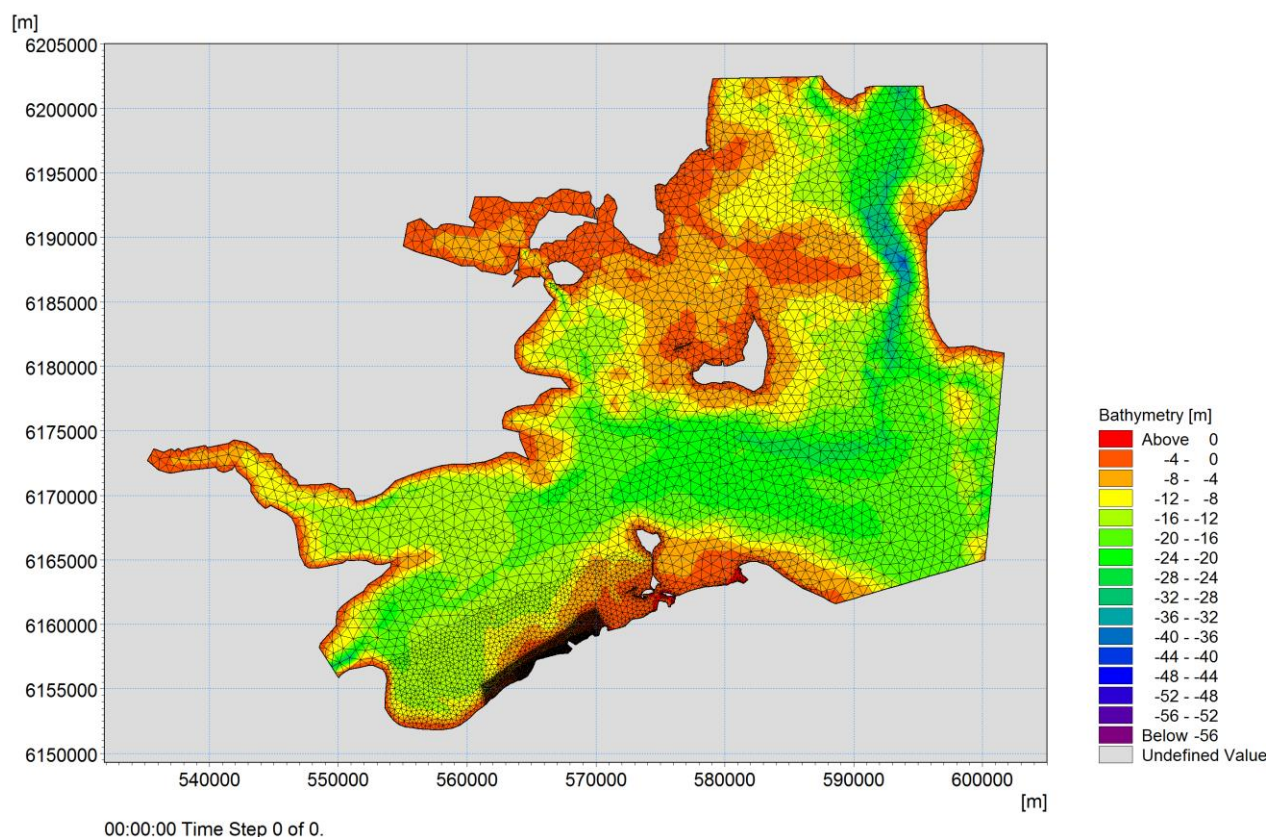
Det bemærkes at sedimenttransportretningen ved Bogense er nordøst gående. Det ses også at på kystens sydvestlige del er transportretningen modsat. Hvis dette er korrekt betyder det, at der må eksistere et nulpunkt for sedimenttransporten et sted på kysten sydvest for Bogense (måske ca. ved Skåstrup Strand). Da det samtidig angives, at der næsten ingen kysterosion foregår der kan føde sediment ind i profilet, så må det alt i alt konkluderes, at den nordøstgående sedimenttransport frem til området ved Bogense må være meget begrænset, og at den lille del der er, øjensynligt ikke er knyttet sammen med ændringer af kystlinjen.

På denne baggrund er det valgt at modellere sedimenttransporten med en to-dimensional model, som beregner både den langs- og tværgående transport i hele det aktive profil. Resultatet heraf ses i det følgende afsnit.

2. Strømforhold i farvandet ud for Bogense

Både modelleringen af de ekstreme bølgeforhold og langtidsmodelleringen af sedimenttransporten på kysten ved Bogense indebærer at strømforholdene også modelleres, hvilket betyder at effekten strømmen på bølger og sedimenttransport, således allerede er medregnet i de præsenterede resultater.

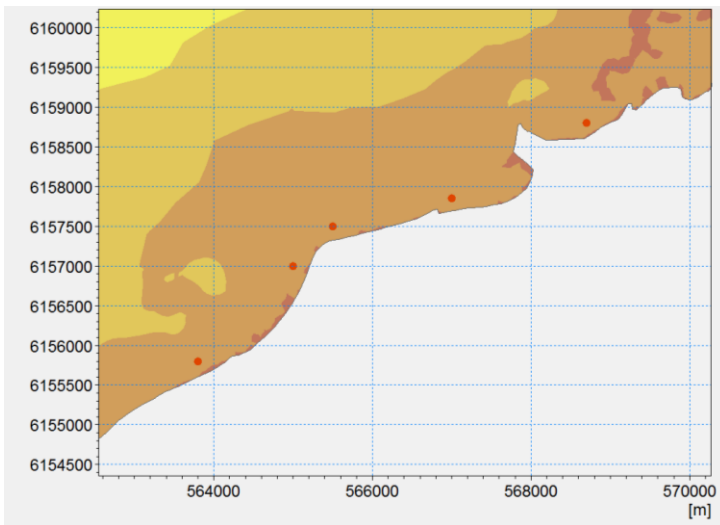
I forbindelse med denne analyse af sedimentdynamikken langs kysten ved Bogense er der udført en større hydraulisk modellering over et helt år. Modelåret er valgt til 2015, både på grund af at randbetingelser for dette år har været tilgængelige samt, at 2015 var lidt mere blæsende end et normalt år jf. DMI dog uden at være ekstremt. Den hydrodynamiske model er opsat i MIKE21 (en 2D model) der regner de tidsvarierende hydrodynamiske parametre (strømhastigheder og vandstande) ud baseret på målte randbetingelser for vandstand og vind. Modelområdet samt anvendt gridstørrelse er vist på Figur 3, hvor af det ses at gridstørrelsen er mindsket kraftigt i området langs kysten ved Bogense. Vanddybder i modelområdet er digitaliseret på baggrund af Farvandsvæsenets tidligere 50x50 m grid samt detaljerede opmålinger langs kysten foretaget af Orbicon WSP i forbindelse med denne undersøgelse. Modellen dækker kun området ind til kystlinjen. De anvendte vandstandsrandbetingelser i modellen er baseret på tættest beliggende DMI vandstandsstationer samt vind målt på tættestbeliggende station (Samsø). Sideløbende med den traditionelle MIKE21 beregningen beregnes også den bølgegenererede strøm med MIKE21 SW (spectral wave). Det strømningsmæssige resultat af modellen er således et resultat af alle drivende kræfter i området (vandstandsændringer, vindgenereret strøm samt vindgenererede bølger og den afledte strøm heraf tæt på kysterne).



Figur 3 Modelområde for modellering af strømforhold samt sedimenttransport.

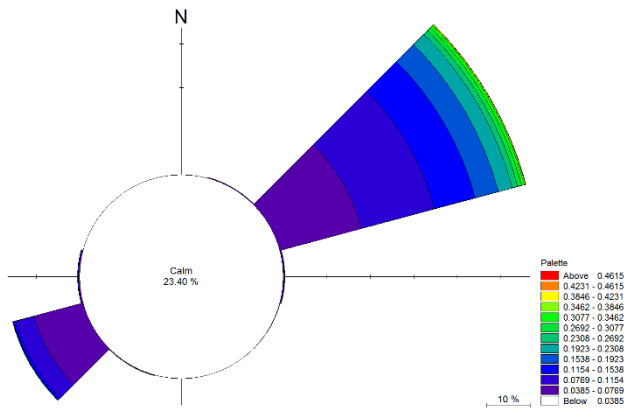
For fremtidsscenarioet om 50 år er modellen kørt med samme forudsætninger som ved den detaljerede bølgemodellering i forbindelse med digeundersøgelsen altså med en tillagt vandstandsstigning på 30 cm og en forøget vindstyrke med 6 %.

I de røde punkter på Figur 4 er der for hele den modellerede periode er der efterfølgende vist både generelle billeder (strømroser) langs kysten ved Bogense.

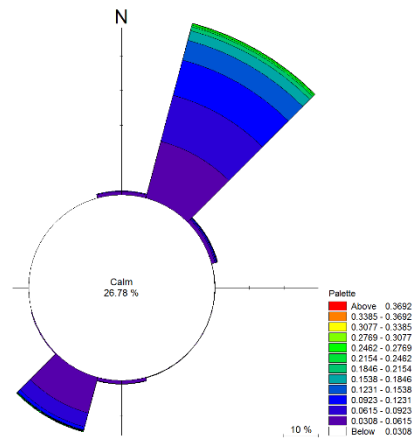


Figur 4 Udtrækspunkter for strøm (punkterne er nummereret fra 1-5 med nr. 1 længst mod vest og 5 længst mod øst)

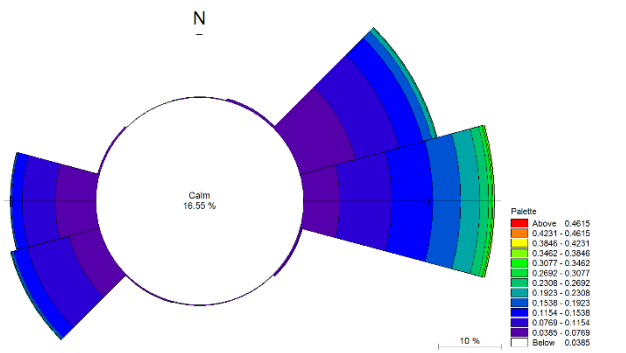
Generelt ses det af Figur 5 til Figur 12 at strømretningen følger orienteringen af kysten og maksimalt ca. 1 knob langsgående strømningshastigheder og mindst på østsiden af havnen. De viste strømroser (Figur 5 til Figur 9) forventes ikke at varierer signifikant fra år til år. Middel og maksimale strømhastigheder (uanset retning) er efterfølgende vist på Figur 10 og Figur 11.



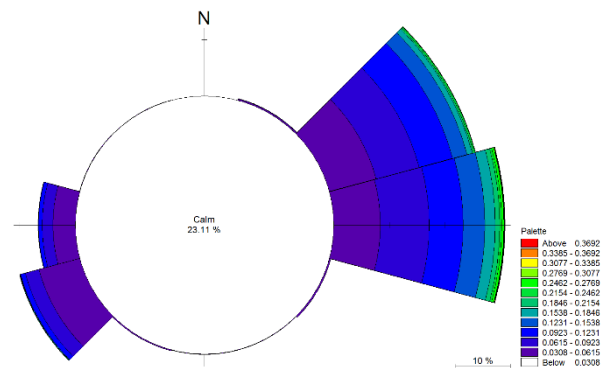
Figur 5 Strømrose 2015, punkt 1



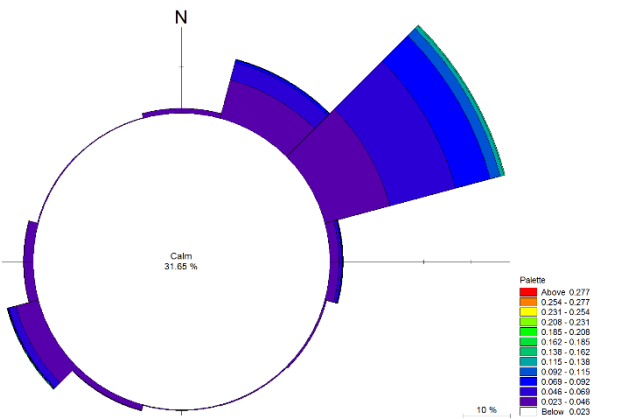
Figur 6 Strømrose 2015, punkt 2



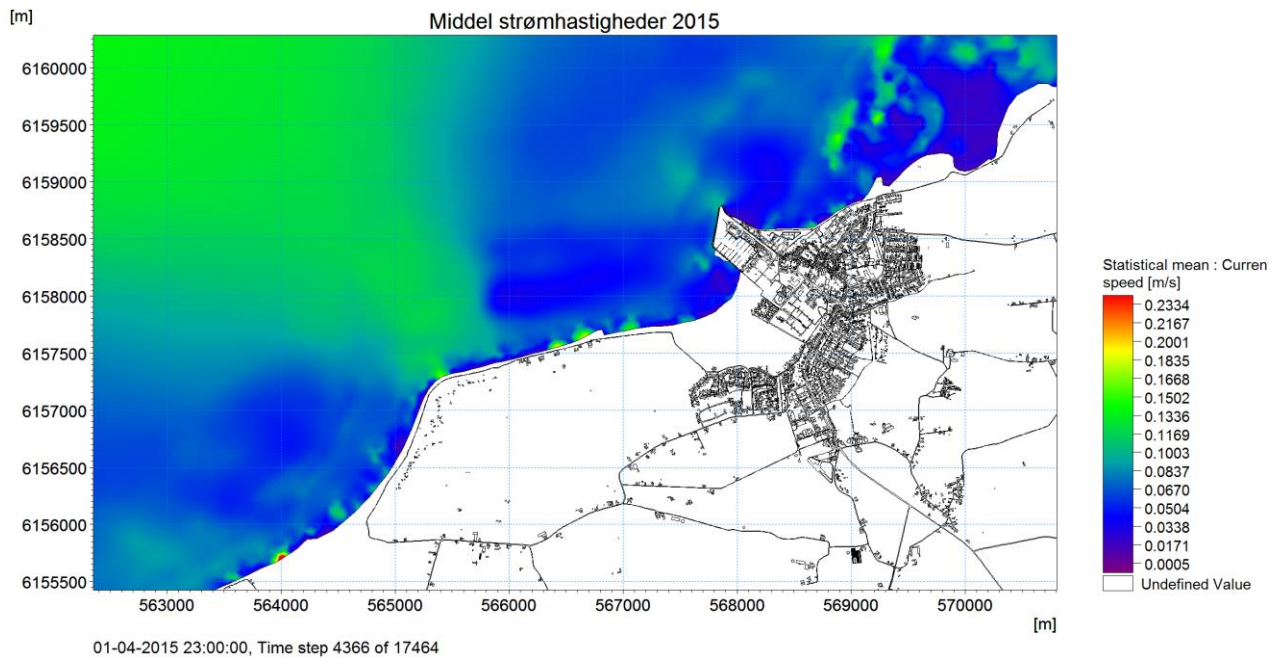
Figur 7 Strømrose 2015, punkt 3



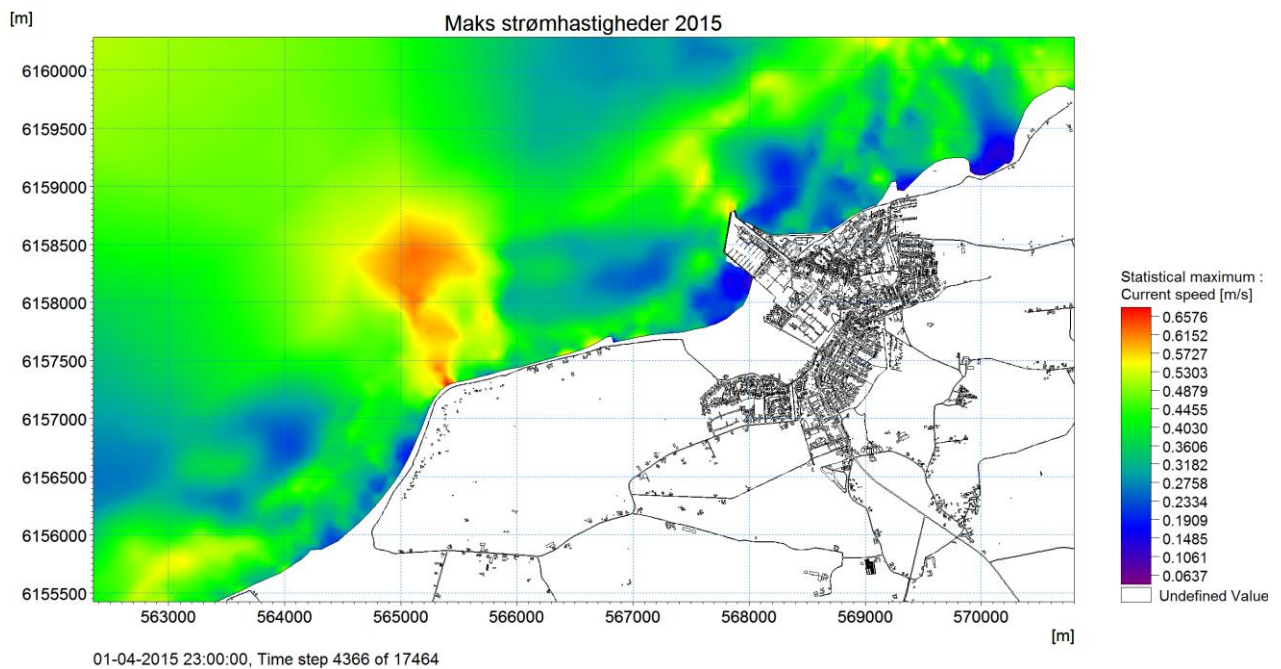
Figur 8 Strømrose 2015, punkt 4



Figur 9 Strømrose 2015, punkt 5



Figur 10 Modelleret middelstrøm [m/s]



Figur 11 Modelleret maksstrøm [m/s]

Strømforholdene har kun i mindre grad indflydelse på sedimentbevægelserne i kystzonen. Her er bølgestrømmen genereret af de brydende bølger dominerende. På dybere vand uden for brydningszonen kan de generelle strømforhold beskrevet i dette afsnit skabe en svagere strømbaseret transport fordi strømmen ofte overskrider den kritiske hastighed for bundtransport. I givet fald skulle dette betyde at sker en svagere nordøst gående bundtransport. Dette vurderes ikke at være relevant i forhold til sikring af kysten og klimasikringen af Bogense.

3. Modellering af sedimenttransport - sedimentbalancebudget

Sideløbende med simuleringen af strøm- og bølgeforskel som beskrevet i kapitel 2 er sedimenttransporten i området beregnet vha. af ST-modulet (SandTransport) i MIKE21. Hvorvidt sedimenttransport er til stede og størrelsen heraf, kan henføres til om de destabiliserende forskydningskræfter skabt af strøm og bølger er større end de stabiliserende kræfter for sedimentet (sedimentstyrken). Orbicon WSP har i denne forbindelse udtaget flere sedimentprøver på lokaliteten. Figur 12 viser, hvor sedimentprøverne er udtaget, henholdsvis i vandet og på stranden. Karakteristika for sedimentprøverne er opsummeret i Tabel 1 og Tabel 2.



Figur 12 Lokalteter for sedimentprøver til kornstørrelsesbestemmelse.

Tabel 1 Sedimentkarakteristik baseret på målte kornstørrelsesfordelinger (i vand).

	22066	22067	22068	22069	22070	22071	22072	22073	22074	22075
Punkt på Figur 12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d ₁₆ [mm]	0.40	0.10	0.38	0.16	0.16	0.38	0.18	0.30	0.15	0.15
d ₅₀ [mm]	2.10	0.18	0.40	0.30	0.22	1.00	0.60	1.00	0.19	0.19
d ₈₄ [mm]	7.00	0.22	8.00	1.00	0.37	6.00	23.50	6.00	0.25	0.25
Uensformighedstal til MIKE 21FM (ST)	4.2	1.5	4.6	2.5	1.5	4.0	11.4	4.5	1.3	1.3

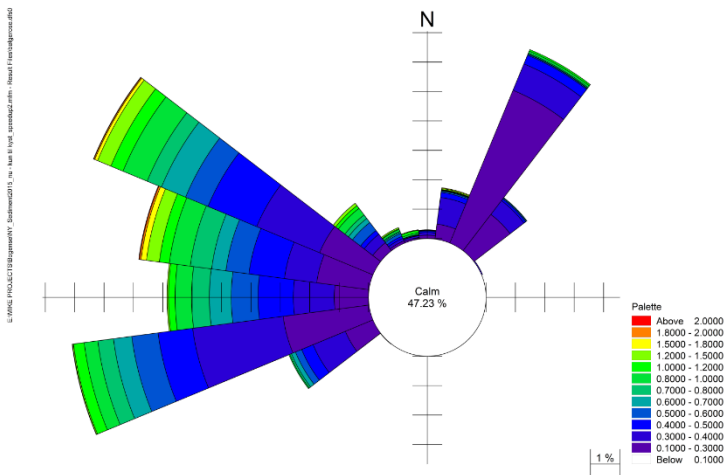
Tabel 2 Sedimentkarakteristik baseret på målte kornstørrelsesfordelinger (på stranden)

	22076	22077	22078	22079	22080	22081	22082	22083	22084	22085
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d ₁₆ [mm]	0.3	0.16	0.5	0.3	0.3	0.25	0.37	0.25	0.37	0.37
d ₅₀ [mm]	0.4	0.3	1.7	0.45	0.48	0.6	0.8	0.5	3	1
d ₈₄ [mm]	1.5	0.4	3.5	0.8	1.5	1.7	14	4	22	8
Uensformighedstal til MIKE 21FM (ST)	2.2	1.6	2.6	1.6	2.2	2.6	6.2	4.0	7.7	4.6

Modellering af sedimenttransport og dybdeændringer

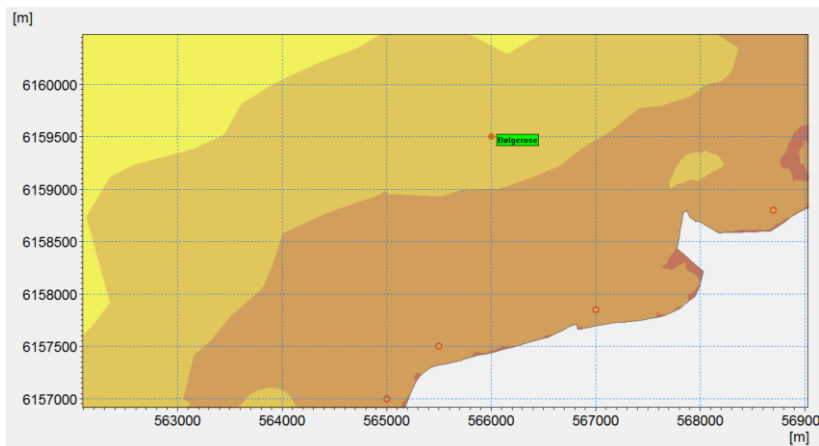
Modelleringen af sedimentdynamikken i området tager således udgangspunkt i de hydrodynamiske forhold i 2015 (vind og vandstand), vanddybder opmålt i 2019 samt de målte sedimentkarakteristika i 2019. Dette betegnes på figurerne *nutidig forcering*. Den *fremtidige forcering* omfatter, at vind og vandstand fra 2015 er opskaleret til forholdene 50 år frem (2070) medens dybdeforhold og sedimentter fortsat er som i 2019.

Bølgerosen for de modellerede bølger for 2015 ses af Figur 13



Figur 13 Bølgeserose for modellerede bølger for 2015

Bølgerosen er uddraget af modelleringen for et punkt ud for Bogense Havn vist på Figur 14



Figur 14 Placering af punkt for lokalisering af bølgerose

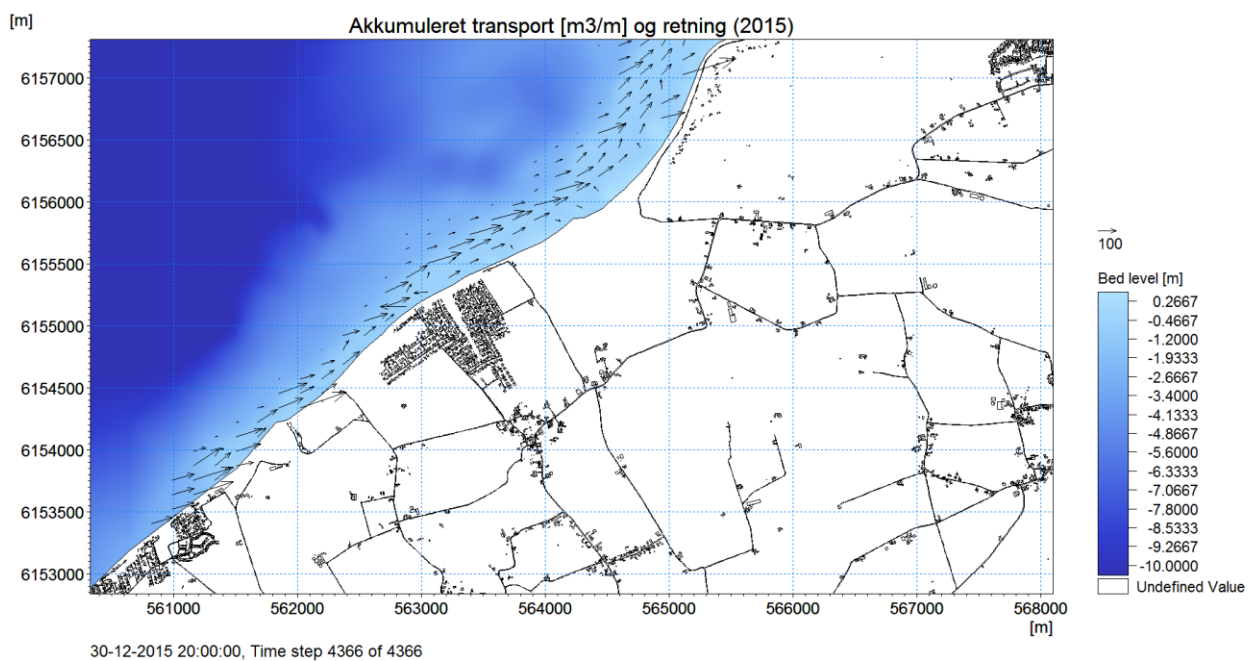
Bølgerosen som vises her antages at være repræsentativ for de gennemsnitlige bølgeforhold. Sammenlignes med bølgerosen fra Kystdirektoratets Kystatlas (Figur 2, kapitel 1) ses, at bølge-roserne i rimelig grad passer overens. Bølgerosen fra Kystdirektoratets Kystatlas er ligeledes baseret modellering med samme model, som i herværende projekt, men den position den er knyttet til er lidt forskellig fra den her anvendte.

Det skal bemærkes, at modelleringen ikke indeholder kilder og dræn, dvs. tilførsler eller fjernelser, der hidrører fra kystens frem- eller tilbagerykning, men beregningen omfatter kun sedimentbevægelser i det aktive kystprofil. Derfor er det ikke muligt, at en modellering som denne kunne omfatte en lang årrække. Dette ville endvidere have krævet, at modelområdet havde indeholdt hele Nordvestfyns kyststrækning. I det aktuelle tilfælde viser modelleringerne således kun hvilke ændringer der konkret vil ske det første år efter opmålingen af havbunden, men en rimelig antagelse vil være at disse ændringer vil fortsætte nogenlunde uændret fremover så længe fx kystlinjen holder sig tilsvarende nogenlunde uændret, hvilket den senere viste undersøgelse bekræfter at den gør.

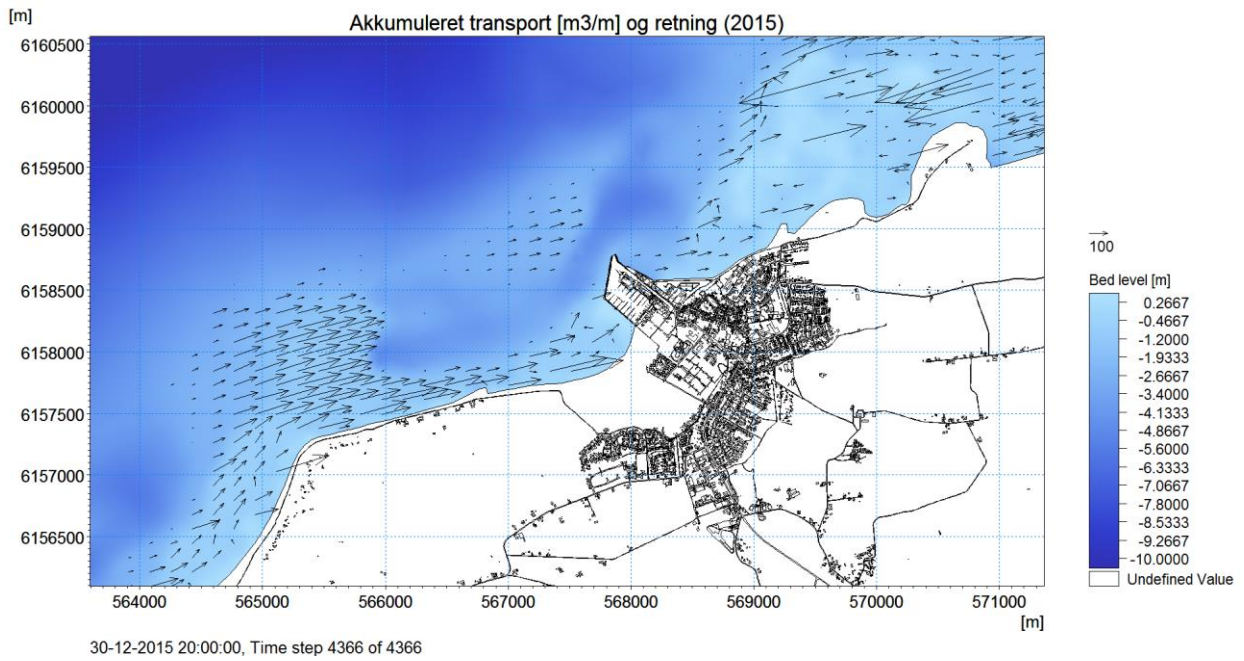
Beregningen er foretaget under antagelse af at alt materiale er friktionsmateriale og ikke besidder nogen kohæsive egenskaber. Der er i modellen medtaget opdateringen af bundens placering og dens tilbagevirkning på de hydrodynamiske forhold. Der er forbundet betydelige usikkerheder i forbindelse med modellering af sedimenttransport generelt. Alle nedenstående resultater må derfor

ikke betragtes som absolutte og entydige værdier men alene som retningsgivende for eksempelvis sedimenttransportretning samt erosions- og aflejringsområder. Figur 15 og Figur 16 angiver den generelle sedimenttransport retning og hvor den største transport må formodes at forefindes. Længden af vektorerne angiver størrelsen af den årligt akkumulerede transport [m^3/m] (jf. referencevektoren på figuren).

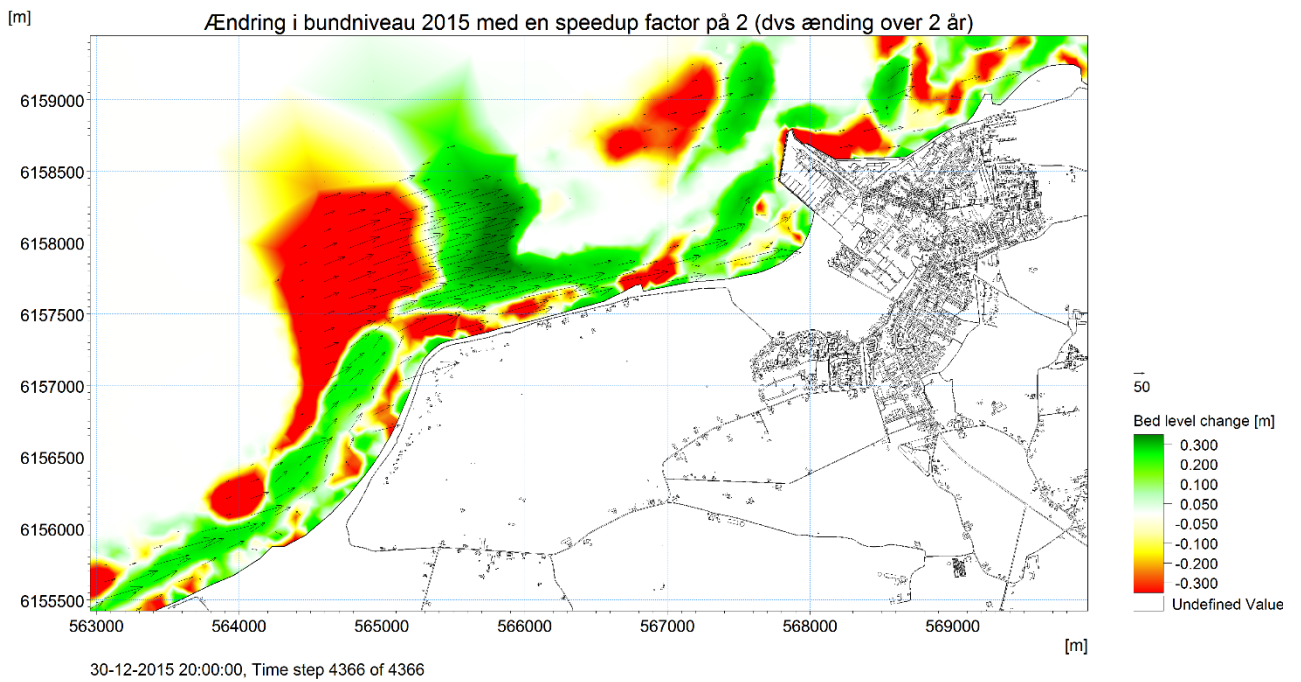
Figur 17 viser ændringen i havbundsniveau. Det skal her bemærkes, at der i modellen er anvendt en såkaldt speedup-factor på 2 for at tydeliggøre graferne. Dvs. at ændringer i havbundens niveau i princippet er et resultat af to års modellering med år 2015 karakteristika. Som før beskrevet er der store usikkerheder forbundet med beregning af sedimenttransport og de numeriske størrelser af aflejring og erosion bør kun betragtes som retningsgivende – derfor også den noget grove farveinddeling.



Figur 15 Akkumuleret transport over 2015. Nutidig forcering. Vektorer angiver retning og størrelse [m^3/m], farver angiver dybdeændringer.

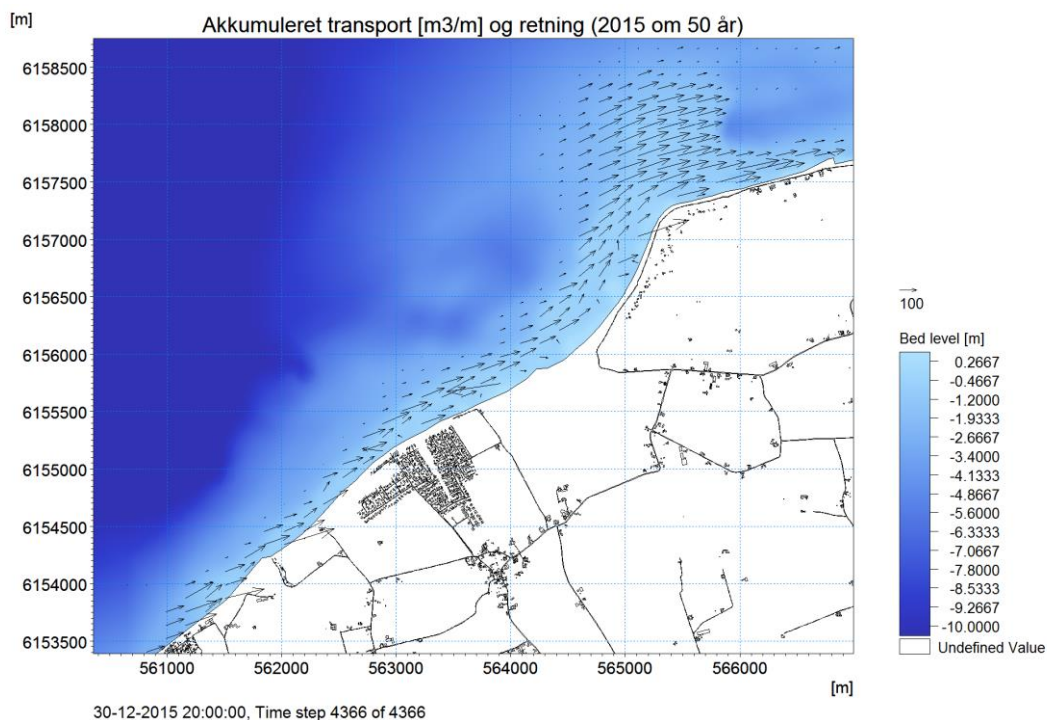


Figur 16 Akkumuleret transport over 2015. Nutidig forcering. Vektorer angiver retning og størrelse [m^3/m], farver angiver dybdeændringer

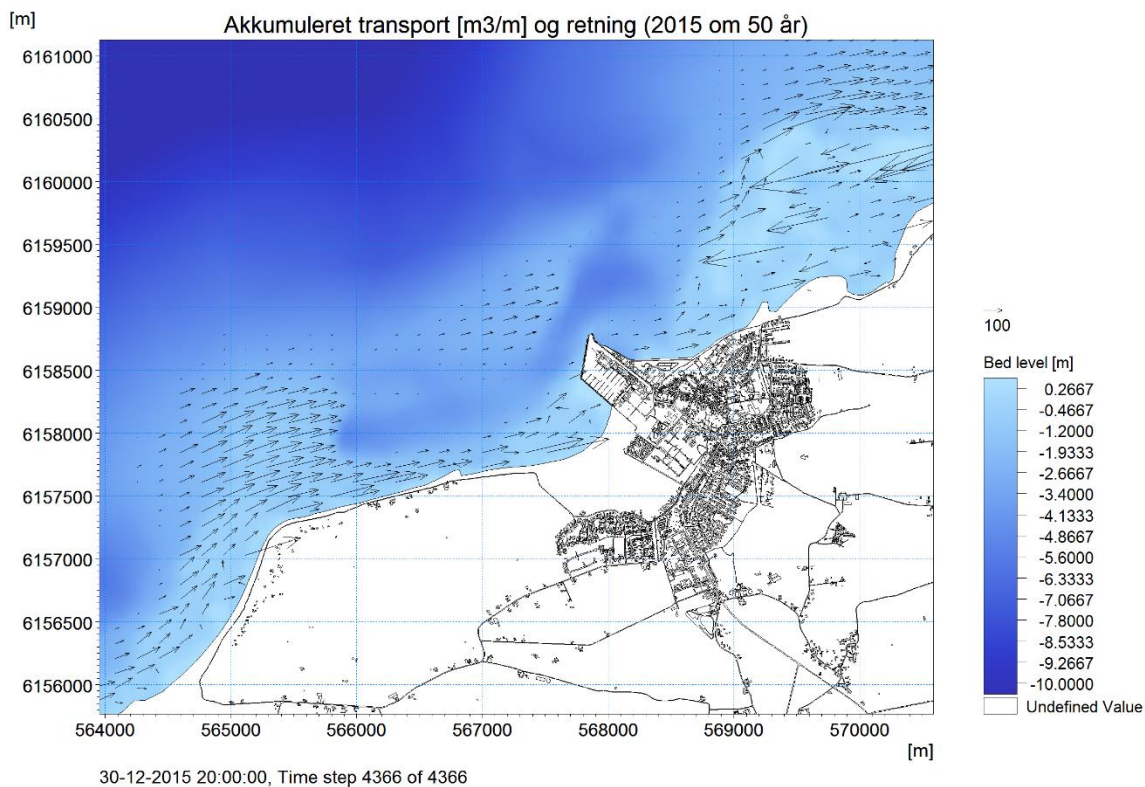


Figur 17 Modelleret erosion og aflejring, nutidig forcering

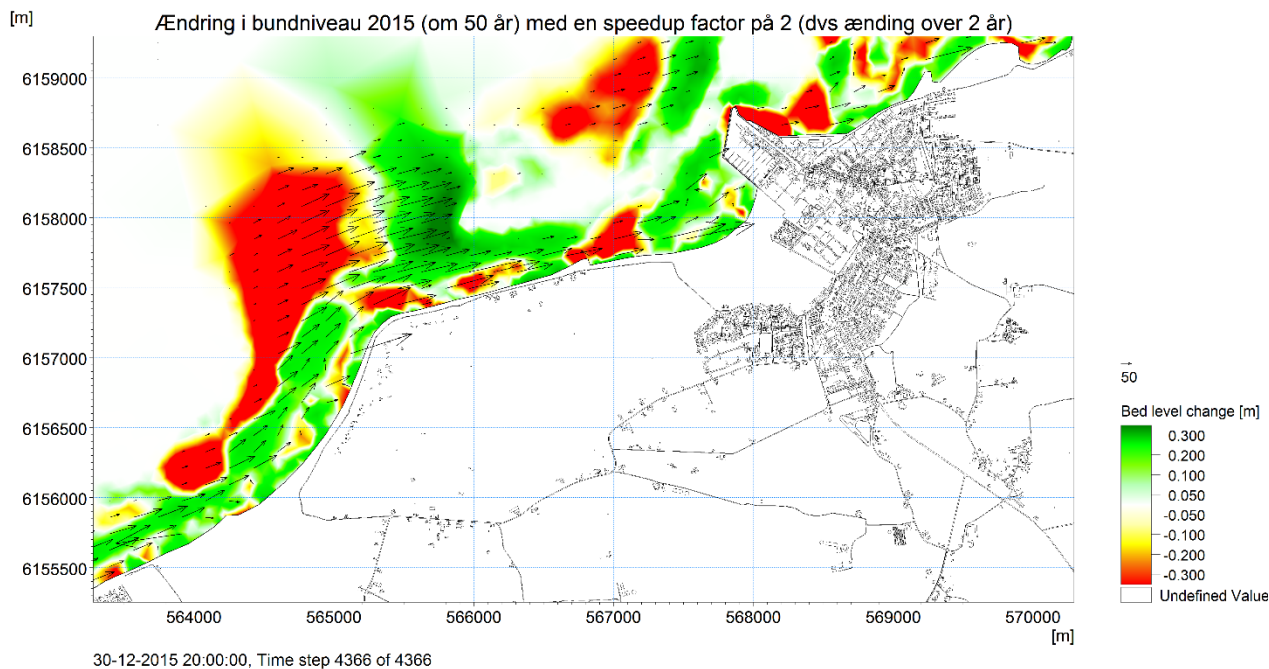
De efterfølgende figurer, dvs Figur 18, Figur 19 og Figur 20, er blot en gentagelse af de tre tidligere, kun med den forskel at her er benyttet den fremtidige forcering dækkende forholdene om 50 år (2070).



Figur 18 Akkumuleret transport over 2015. Fremtidig forcering. Vektorer angiver retning og størrelse [m³/m], farver angiver dybdeændringer



Figur 19 Akkumuleret transport over 2015. Fremtidig forcering. Vektorer angiver retning og størrelse [m³/m], farver angiver dybdeændringer



Figur 20 Modelleret erosion og aflejringsområder, fremtidig forcering.

Bemærkninger til modellering af sedimenttransport og sedimentbudgetbalance

Bemærkningerne omfatter følgende punkter:

- Grafen viser en langsgående sandtransport mod nord øst med en transport i størrelsesorden 5 -10.000 m³/år, hvilket formentlig er overkanten af den virkelige, fordi en del af det sand, der ligger på havbunden, næppe er 100 % tilgængeligt for transport, fx på grund af vegetation.
- Den overordnede fordeling af erosion og aflejring fra 2020 til 2070 synes at være nogenlunde uændret. Der er punkter nær kysten særlig vest for havnen, hvor der ses dybdeforøgelse og hvor sikring måske kunne blive nødvendig.
- Modelleringen viser tydeligt at sedimenttransporterne er større i 2070 end i 2020, hvilket taler for overvågningen (fx kontrolopmåling af havbundens beliggenhed) må øges frem mod 2070.
- Det lavvandede område i havet ud for Fogense Pynt (3 - 4 km sydvest for Bogense Havn) er øjensynligt ved at flytte sig mod nordøst. Dette kan have betydning for erosionen på kysten, hvis bølgebrydningen længere fra kysten reduceres, hvis/når vanddybderne forøges. Endvidere kunne bølgeopskyl på diger ændres.
- Modelleringen viser, at der sker en vis aflejring sydvest for havnen, dvs. en såkaldt luvside aflejring, men ses tilbage på ældre ortofotos (1954) er der øjensynligt kun tale om ubetydelige ændringer. Tilsvarende viser modelleringen, at der sker en øgning af vanddybderne (læsideerosion) umiddelbart nordvest for havnen uden at dette dog påvirker kystlinjen. Alt i alt synes havnen trods dens markante størrelse og mangeårige tilstedeværelse ikke at have (eller at have haft) nogen særlig mærkbar indflydelse på kysten. (Dette er i stærk modsætning fx

til virkningen af Gilleleje Havn på Sjællands nordkyst). Det vurderes, at der vil kunne foretages fremtidige ændringer (opfyldninger) på begge sider af Bogense Havn uden mærkbare negative konsekvenser for kysten.

- Sedimentbalancebudgettet omtales ikke her, men diskuteres i sidste afsnit, hvor både sedimenttransport og kystlinjeændringer behandles i sammenhæng.

4. Erosionsanalyse – analyse af kystlinjeændringer ud fra ortofotos

I erosionsanalysen fokuseres på ændringer af kystlinjens beliggenhed. Udgangspunktet har været ortofotos, som er luftfotos, der oprettes geometrisk således, at de viser hvert punkt på jordoverfladen fra et punkt vinkelret (ortogonal) over dette, svarende til det som tilstræbes ved de kendte kortprojektioner. Herved kan disse fotos benyttes til at bestemme vandrette afstande på jordoverfladen. Ved anvendelse af GIS er det muligt at se to fotos af samme område (optaget til forskelligt tidspunkt) samtidigt, og derved udmåle flytninger af fx kystlinjen.

Til bestemmelse af kystlinjens flytninger har været benyttet ortofotos fra henholdsvis 1999 og 2019. På disse fotos blev kystlinjen digitaliseret (dvs. omdannet til en polygonlinje) ved manuel afmærkning af punkter for hver 10 m. Kystlinjen i henholdsvis 1999 og 2019 ses på Figur 21.



Figur 21 Kystlinje i henholdsvis 1999 og 2019

Figur 3 viser nettoændringen af kystlinjen over de 20 år. Kun enkelte lokale tilbagerykninger ses.



Figur 22 Netto kystlinjeændring 1999 til 2020

På Figur 22 ses, at kysten er under fremrykning på de fleste strækninger. Dog ses tilbagerykning på enkelte mindre strækninger spredt over kysten. Kun i delområde 2 (ca. 3 km sydvest for havnen) ses øjensynligt en samlet tilbagerykning over en ca. 300 m lang strækning. En mindre tilbagerykning ses også ved overgangen mellem delområde 3 og 4. Går man imidlertid tilbage i tiden til ældre luftfotos ses ikke, at der på disse punkter er sket tilbagerykning i den samlede periode fra 1954 til 2019.



Figur 23 Kystlinjeændring i gennemsnit over de udvalgte delstrækninger

Den samlede ændring (1999-2019) for hver af de udvalgte delstrækninger er angivet på Figur 4, og det bemærkes, at der kun ses fremrykning.

Det må således konkluderes, at der ikke sket kronisk erosion af betydning i området i en lang år-række.

Da disse er ændringer er sket over de valgte 20 år, hvor der har fundet en svag generel vandstandsstigning sted. Det må formodes at fremrykningen fortsætter i årene fremover. Om den vil fortsætte frem til 2070, hvor vandstandsstigningens hastighed er tiltaget er vanskeligt at bedømme. Men det forekomme usandsynligt at en væsentlig tilbagerykning vil finde sted frem mod 2070

5. Afsluttende sammenfatning og diskussion af erosionsanalyse og sedimentbalance-budget

Som det blev nævnt i det indledende afsnit er kysten omkring Bogense præget af kystprofiler med lille stejlehed og uden øjensynlige kystlinjeændringer. Dette har de udførte undersøgelser bekræftet. Da der således er tale om små ændringer bliver den relative usikkerhed på de opnåede resultater forholdsvis stor.

Dette bekræftes af, at Bogense Havn trods dens markante størrelse og mangeårige tilstedeværelse på kysten ikke har (eller at har haft) nogen særlig tydelig indflydelse på denne. Det vurderes, at der vil kunne foretages fremtidige moderate ændringer (opfyldninger) på begge sider af Bogense Havn uden mærkbare negative konsekvenser for kysten.

Analysen af ortofotos viser, at samlet set har den del af kysten som herværende undersøgelse omfatter, været under fremrykning i 1999 - 2019. En skønsmæssig vurdering af ældre fotos giver samme billede. Det kan heraf afledes, at kystlinjen trods de hidtidige nettovandstandstigninger har været i stand til at tilpasse sig disse og endog forsætte med fremrykning. En direkte fremskrivning vil være at fremrykningen blot fortsætter frem til 2070. Om denne løbende tilpasning reelt kan fortsætte frem til 2070 er naturligvis vanskelig at vurdere blot ud fra denne analyse. På den anden side synes det dog, at være usandsynligt, at der skulle kunne komme så store ændringer i de kommende 50 år, at situationen vil vende så meget, at en mærkbar kysttilbagerykning vil opstå. (Dette sagt med det forbehold, at der er usikkerhed på de forventede stigninger af vandstanden i havet).

Til forudsigelse af kysttilbagerykningen på erosionskyster fra vandstandsstigninger benyttes ofte den såkaldte "Bruuns Regel", der bygger på at kystprofilet fastholder sin form (ligedannede profiler) og rykker translatorisk tilbage. Når Bruuns Regel således ikke har været gældende for den hidtidige periode 1999 til 2019, så må det vurderes, at den heller ikke gælder de kommende årtier.

I ovennævnte perspektiv synes den 2-dimensionale modellering af sedimenttransporten at være i god kvalitativ overensstemmelse med analysen af kystlinjeændringerne og i øvrigt med Kystdirektoratets Kystatlas. Overensstemmelsen ligger i, at det kun er små ændringer der forudses. Det vurderes ikke muligt at opstille et reelt og kvantitativt sedimentbalancebudget. Med lidt skiftende antagelser kan budgettet falde både positivt og negativt ud. For mere karakteristiske erosionskyster (fx Nordsjællands kyst eller kyster ved større havområder) er det forholdsvis lettere at få tallene til at passe sammen, fordi der her er en velkendt kilde fra kysttilbagerykningen, der føder sand til den langsgående transport.

Dette kunne måske lyde som en pessimistisk vurdering. Men det er i virkeligheden det modsatte, for der er klare indikationer for, at der kun i fremtiden kan ske helt små ændringer, som om nødvendigt forholdsvis let kan håndteres når de opstår.

Det vurderes, at der som helhed ikke er behov for generel kystsikring på nogen af de udpegede delområder. Der forekommer ikke at være behov for kronisk kystsikring. Både de praktiske erfaringer og analysen af kystlinjeændringer (ortofotos) fortæller, at der på enkelte tilfældige lokaliteter kan være behov for mindre og afgrænset, akut kystsikring, men det kan ikke af undersøgelserne konkluderes, at det fremover netop vil være netop disse lokaliteter, der vil være udsatte. Det må derfor anbefales, at der ved det almindelige tilsyn af diger og kyst sker en registrering af behovet, og at eventuelle mindre skader udbedres løbende. Der kan ikke forventes at omfanget i forhold til nu vil ændres væsentligt frem mod 2070.

Som led i herværende undersøgelse foreligger der nu en grundig opmåling af havbunden i kystzonen, af strandplanet og af de bagvedliggende diger. Det må derfor anbefales at denne opmåling gentages fx om 20 år. Herved vil der være et sikkert grundlag for at vurdere om eventuelle problemer kunne opstå.