

Notat

Kolding Kommune

Højvandssikring, Binderup og Grønninghoved

Kystteknisk analyse og detailprojektering

Projekt nr.: 10401074
Dokument nr.: 1230728576
Version 1
Revision 2

Udarbejdet af MLV, SSC
Kontrolleret af CHLD
Godkendt af OKL

1 Introduktion

I dette bilag præsenteres de kysttekniske analyser og beregninger samt detailprojektering af diget ved Binderup Strand. Bilaget omfatter to hovedemner:

1. Dige: Beskrivelse af sikringsniveau og projektering af højvandsbeskyttelsen. Gennemgang af dimensionsgivende vandstand og bølgeklima.
2. Strandfodring: Analyse af den historiske kystudvikling. Bestemmelse af strandfodringsmængder som kompensation for kronisk erosion og havspejlsstigning. Analyse af potentiel akut erosion og bestemmelse af nødvendig strandfodringsbuffer til beskyttelse af diget og opretholdelse af stranden. Nødvendige strandfodringsmængde ift. initial- og vedligeholdelsesfodring.

2 Sikringsniveau og dimensionering

I nærværende projekt har lodsejere, repræsenteret i Digegruppen, som udgangspunkt ønsket højvandsbeskyttelsen dimensioneret med en på forhånd fastsat kronokote på +2,0 m DVR90. Dette er på baggrund af, at et ønske om at udsigtsforhold og adgangsforhold til stranden med mere ikke påvirkes betydeligt.

Med tiden skal højvandsbeskyttelsen kunne hæves til en kronokote på +2,2 m eller +2,5 m DVR90.

Kolding Kommunes klimatilpasningsplaner strækker sig indtil år 2050 (om 30 år). Digets sikringsniveau vurderes derfor til dels ud fra denne levetid.

2.1 Sikringsniveau

Dimensionering af højvandsbeskyttelse fastlægges ud fra en hændelse, der statistisk set forekommer med et valgt interval (middeltidshændelse/returperiode) og digets ønskede levetid. Levetid definerer hvor længe frem i tiden, det ønskes at være sikret mod hændelsen.

Generelt er valget af den dimensionsgivende hændelse en afvejning af flere parametre, hvoraf de mest afgørende er:

- Ønsket om at være sikret mod så ekstrem en hændelse som muligt

- Ønsket om at bevare udsigten til vandet
- Reducere anlægsomkostninger.

For diger og anden højvandsbeskyttelse dimensionerer man sædvanligvis minimum for en 100-års middeltidshændelse, men med forskellig tilgang til levetid. Det anbefales som minimum at vælge en levetid på 50 år.

Prognoserne for den fremtidige havspejlsstigning er usikker. Eventuelt valg om kortere levetid kan baseres på, at digerne senere forhøjes i takt med, at havspejlet stiger.

Der vil altid være en sandsynlighed for, at vandstanden ved den valgte middeltidshændelse vil forekomme eller overskrides inden for den valgte levetid. Ved at kombinere middeltid og levetid kan sandsynligheden for, at højvandsbeskyttelsens dimensioneringsforudsætninger overskrides bestemmes, se Tabel 2.1.

Tabel 2.1: Beregnet sandsynlighed i % for at middeltidshændelsen overskrides inden for en given levetid.

Levetid i år	Middeltidshændelse (MT) i år					
	1	5	10	30	50	100
1	100	20	10	3	2	1
5	100	67	41	16	10	5
10	100	89	65	29	18	10
30	100	100	96	64	45	26
50	100	100	99	82	64	39
100	100	100	100	97	87	63

Tabellen viser, at der er 39 % risiko for, at en 100-års middeltidshændelse optræder inden for en 50-års levetid. Dimensionering for større middeltidshændelse reducerer risikoen for overskridelse af den dimensionsgivende vandstand og dermed risikoen for oversvømmelse og skader.

3 Dimensionering af højvandsbeskyttelse

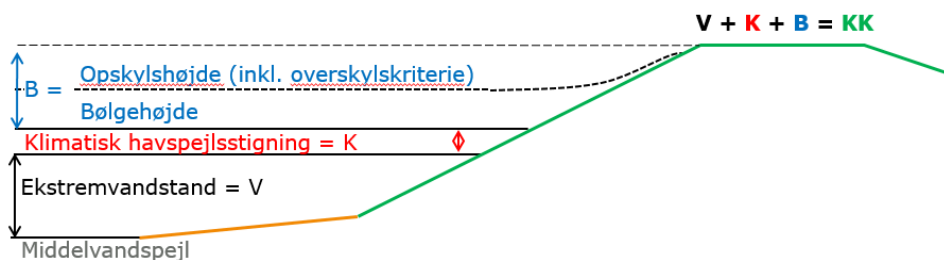
Dimensionerne på højvandsbeskyttelsen bestemmes på baggrund af det valgte sikringsniveau. Kronekoten af beskyttelsen bestemmes overordnet set ud fra følgende bidrag:

1. Ekstremvandstanden, der svarer til den valgte middeltidshændelse findes ud fra højvandsstatistikkerne (V).
2. Dernæst estimeres størrelsen på den forventede havspejlsstigning inden for den valgte levetid (K).
3. Historiske hændelser for området granske ift. om der forventes samtidighed mellem ekstrem vandstand og bølgepåvirkning (om der er pålandsvind samtidig med ekstrem vandstand).
4. Summen af V og K udgør den dimensionsgivende vandstand. Forventes ingen bølgepåvirkning, samtidig med at den ekstreme vandstand forekommer, fastsættes kronekoten (KK) ud fra den dimensionsgivende vandstand. Dog anbefales, at kronekoten er lidt højere end selve den dimensionsgivende vandstand.

5. Forventes samtidighed mellem ekstrem vandstand og bølgepåvirkning, skal der estimeres en højde hvortil bølgerne kan nå (B). Dette afgøres bl.a. ud fra koten af det foranliggende terræn, da bølgenes højde bl.a. varierer med vanddybden. Kronekoten justeres ud fra B samt et acceptabelt niveau af overskyl fra bølgerne (overskylskriterie). Derudover kan kronekoten hæves eller sænkes ved anvendelse af hhv. en stejlere eller fladere anlægsside eller foranliggende strand. Jo fladere forsiden er, jo mindre er bølgerne på diget. Ligeledes vil en forhøjelse af den foranliggende strand kunne reducere bølgehøjden, der når beskyttelsen. Dermed vil den nødvendige kronekote også kunne reduceres.

De forskellige bidrag er visualiseret i principskitzen i Figur 3.1. For at opfylde det valgte sikringsniveau er det nødvendigt med en højere kronekote, hvis der er samtidighed mellem ekstrem vandstand og bølgepåvirkning.

Figur 3.1: Principskitse for bidrag til beregning af digers kronekote i fremtiden (KK). Kronekoten ved anlægstidspunktet findes ved at fratrage den forventede landhævning.



3.1.1 Bølgedynamik

Bølgehøjder på dybt vand afhænger af det frie stræk over hvilket vinden blæser over havet, længden af perioden vinden blæser fra samme retning, samt vindens styrke og dybden i farvandet. Når bølger kommer ind på mindre vanddybder, påvirkes de af ruheden fra bunden, hvormed de bremses og bliver stejlere indtil de begynder at bryde.

Nå bølger rammer kysten eller konstruktioner skyller de op af stranden/konstruktionen.

Opskylshøjden og størrelsen af bølgeopskyllet afhænger i store træk af konstruktionens forsidehældning, terrænet og bølgenes størrelse umiddelbart foran. Jo lavere det foranliggende terræn er, jo større bølger kan nå ind til digets fod, og jo større og højere bliver opskyllet og dermed et eventuelt overskyl.

3.1.1.1 Overskylskriterie

Overskyl fra bølger kan være kraftfuldt og kan skade nærliggende bygninger, konstruktioner og deres stabilitet. Betydelig bølgeoverskyl kan over længere tid resultere i oversvømmelser i baglandet.

Hældningen af bagsiden af diget har stor indflydelse på, hvor modstandsdygtigt diget er mod bølgeoverskyl. Digebrud indledes ofte ved beskadigelse af digets bagside ved et enkelt kraftigt bølgeoverskyl. Jo fladere bagsiden er, jo mindre er sandsynligheden for skader og gennembrud. Et diges for- og bagsidehældning bør som minimum være 1:3 ved bølgepåvirkede kyster, [1].

Et diges kronekote fastsættes ud fra et fastsat kriterie for tilladeligt overskyl, som angivet i Tabel 3.1.

Tabel 3.1: Overskylskriterie for velholdt græsdige, [2].

	Gennemsnitligt overskyl [L/s/m]	Maksimalt overskyl [L/m]
Område med nærtliggende bebyggelse og dårlig mulighed for afløb af overskyl til arealer uden bebyggelse eller anlæg.	2	2000

3.2 Stormflodstyper Binderup Grønninghoved

Som beskrevet ovenfor er det vigtigt at identificere om der er samtidighed mellem ekstrem vandstand og bølgepåvirkning.

Når bølger og vandstand er fuldt korrelerede, dvs. forekommer samtidigt, skal begge ekstremer inkluderes i beregningerne.

Når bølger og vandstand ikke er fuldt korrelerede bør forskellige kombinationer af bølgehøjde og vandstand vurderes som f.eks.:

- en ekstremt forhøjet vandstand uden bølge
- en moderat forhøjet vandstand med en moderat eller ekstrem bølge
- ingen forhøjet vandstand med en moderat eller ekstrem bølge

Kendskab til kritiske kombinationer af bølgeforhold og vandstand er ikke kun vigtigt ift. bestemmelse af kronekoten, men også ift. bestemmelse af mulig erosion foran diget under den dimensionsgivende hændelse.

Til analyse af tidligere hændelser anvendes vandstandsmålerne i Kolding og Assens, som er de nærmest placerede vandstandsmålere samt højvandsstatistikker for dette område.

Ved Binderup-Grønninghoved kan identificeres 5 forskellige meteorologiske og hydrauliske hændelsestyper, der kan skabe højvande og potentielt oversvømmelse af området.

3.2.1 Scenarie 1. Vindstuvning

Østlige vinde kan give en lokal vindstuvning i Mosvig bugten, hvor der samtidig vil være moderat eller maksimal bølgepåvirkning på kysten.

3.2.2 Scenarie 2: Storm fra nordlige retninger

Ofte begynder storme over Danmark med vind fra sydvest til nordvest. Hermed presses store mængder vand ind gennem Skagerrak og ind i Kattegat. Ved langvarig vindpåvirkning fra vestlige retninger kan en del af den forhøjede vandstand bevæge sig fra Kattegat ned gennem bælteerne. Da de Indre Danske Farvande, udgør en tragt mellem Kattegat og Østersøen øges vandstanden, når vandet skal passere Øresund og Bælthavet.

I forbindelse med nogle lavtrykspassager vil den kraftigste vind fra vestlige retninger efterfølges af kraftig vind fra nordlige retninger. Størrelsen af højvandet i de

indre danske farvande afhænger af, hvor kraftig og hvor langvarig stormen fra nord er og hvor meget vand der i forvejen er presset ind i Kattegat under den foregående vestenvind.

Under denne type stormflod er der ikke samtidig direkte bølgepåvirkning på kysten ved Binderup-Grønninghoved.

3.2.3 Scenarie 3: Tilbageløb

Når store mængder vand under en storm fra nordlige retninger over Danmark er presset ind i Østersøen, vil vandet strømme tilbage gennem de Indre Danske Farvande, Kattegat og ud i Skagerrak, når vinden lægger sig eller ændrer retning. Ind imellem sker det desuden, at lavtrykket bevæger sig videre over til den Botniske Bugt og skaber nordenvind her. Herved presses vandet i den Botniske Bugt mod syd og ind i de Indre Danske Farvande.

Der skabes forhøjet vandstand i de snævre Indre Danske Farvande, når vandet strømmer retur til Nordsøen. Ligesom i Scenarie 2 er der ingen bølgepåvirkning i projektområdet under Scenarie 3.

Binderup Grønninghoved ligger syd for det smalleste punkt i Lillebælt. Analyser af tidligere hændelser viser, at der ofte er højvande ved Binderup som følge af tilbageløb af opstuvet vand fra den østlige del af Østersøen.

Af de 5 største observerede hændelser for både Assens og Kolding har to af dem (2003 og 2017) været et resultat af tilbageløb af opstuvet vand i den østlige del af Østersøen. Tilbageløb af opstuvet vand efter Urd i januar 2017 er den højeste målte vandstand i Kolding, hvor der blev registreret en vandstand på +1,56 m DVR90.

3.2.4 Scenarie 4: Tilbageløb og storm fra øst

I sjældne tilfælde kan der opstå kraftige lavtryk syd for Østersøen, som giver storm fra øst over Østersøen og Indre Danske Farvande. Herved presses vandet fra Østersøen ind i de Indre Danske Farvande, hvilket kan skabe ekstreme stormfloder.

Vandstanden kan øges yderligere, hvis der i forvejen er presset vand ind i Østersøen. Dette vurderes dog ikke at være en forudsætning for ekstremt højvande under storm fra øst. Ved Binderup-Grønninghoved vil storme fra østlige retninger give ekstreme bølger samtidig med højvandet. Dette scenarie forekommer sjældent og er senest observeret under den voldsomme stormflod i 1872.

3.2.5 Scenarie 5: Sammenfald af forhøjet vandstand

To af de fem højeste målte vandstandshændelser i Kolding og Assens forekom i 1993 og 2006 under et specielt sammenfald af meteorologiske forhold. Højvandet i disse situationer blev skabt ved;

- At en storm med vind fra nord først presser vand ind i Østersøen. Efterfølgende bevæger dette lavtryk sig mod øst og skaber storm fra nord over den Botniske Bugt og Østersøen. Dette resulterer i, at der strømmer vand tilbage mod Bælt-havet og Sundet og derved skaber højvande her (Scenarie 3).
- Samtidig skabes et nyt lavtryk og dermed en ny storm fra nord over Danmark. Hermed presses vand på ny ned gennem Indre Danske Farvande (Scenarie 2).
- Stormflodsbølgen fra Østersøen og vandet som presses ind gennem Skagerrak og Kattegat mødes i de Indre Danske Farvande. Herved kan der skabes ekstremt højvande ved Binderup.

Sammenfaldet af stormflod fra nord i Kattegat og fra den Botniske Bugt er primært genereret af vind fra nordlige retninger og er derfor ikke sammenfaldende med ekstreme bølgeforhold ved Binderup-Grønninghoved.

3.2.6 Opsummering

Gennemgangen af højvandstandssituationer og historiske hændelser viser, at der kun i Scenarie 1 og 4 vil være direkte bølgepåvirkning på kysten ved Binderup-Grønninghoved. Scenarie 4 vurderes at forekomme sjældent, men vil have alvorlige konsekvenser for projektområdet.

I forbindelse med Scenarie 2, 3 og 5 med vind fra nordlige retninger kan der forekomme mindre bølgepåvirkning i projektområdet.

I områder, hvor der ikke er fuld korrelation mellem ekstrem vandstand og ekstrem bølgepåvirkning, anbefales det, at undersøge sammenhængen mellem vandstand og bølgehøjde nærmere, se Afsnit 4.2 og Afsnit 5.3.

3.3 Dimensionsgivende vandstand

Den dimensionsgivende vandstand er summen af den forventede havspejlsstigning og stormflodsvandstanden på dybt vand svarende til den valgte middeltidshændelse. Vandstanden på lavt vand kan være højere som følge af bølge- og vind-setup.

I nærværende projekt vurderes den fremtidige havspejlsstigning og højvandsstatistikkerne med henblik på at bestemme, hvilket sikringsniveau kronekote på +2,0; +2,2 og +2,5 m DVR90 svarer til.

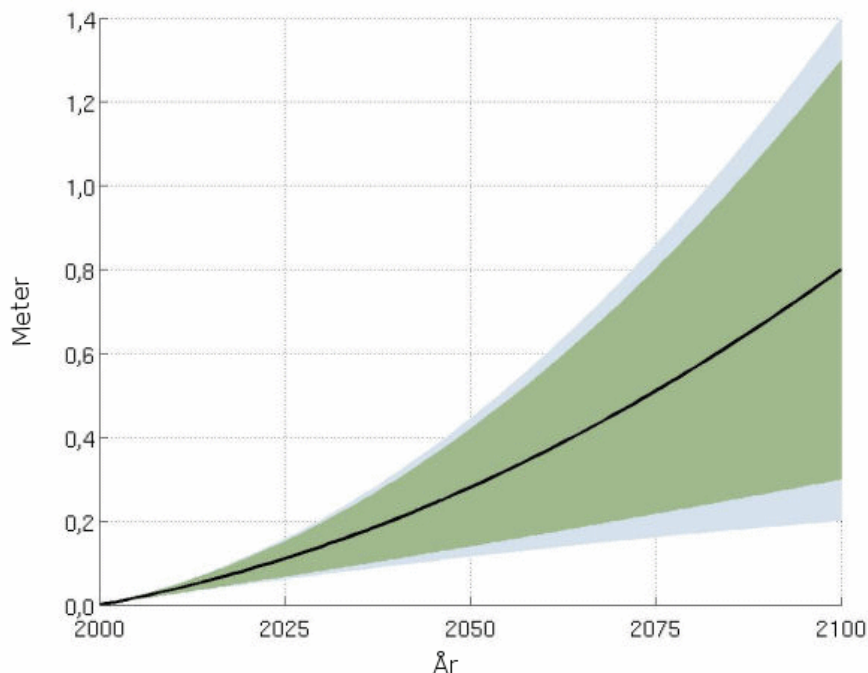
3.3.1 Global havspejlsstigning

Den forventede fremtidige havspejlsstigning afhænger af, hvilken prognose der benyttes.

Baseret på IPCC's 2013 rapport med den seneste fremskrivning af den globale havspejlsstigning har DMI og Danmarks Klimacenter i 2014 vurderet den regionale fremskrivning for Danmark i tilfælde af forskellige scenarier (RCP) vedrørende bl.a. CO₂-udledninger og temperaturstigninger, [3].

I nærværende projekt er valgt at anvende DMI's bedste bud på vandstandsstigninger indtil år 2100, se Figur 3.2.

Figur 3.2: DMI's bedste bud på vandstandsstigninger de næste 100 år i meter, når der ses bort fra landhævning. Den sorte kurve viser middelværdien, mens det grønne og blå område viser usikkerheden henholdsvis globalt og omkring Danmark, [3].



DMI vurderer, at den fremtidig havspejlsstigning er 0,8 m for perioden mellem år 2000 og 2100, hvilket er en gennemsnitlig stigning på 8 mm/år. Havspejlet forventes at stige eksponentielt med tiden.

Vandstanden er i dag (år 2020) allerede er steget 8 cm i forhold til 1990, hvilket trækkes fra de aflæste fremtidige værdier, se Figur 3.2. En levetid på 30 år (år 2050) svarer dermed til en havspejlsstigning på 20 cm.

3.3.2 Højvandsstatistik

Den dimensionsgivende stormflodsvandstand som diget kan modstå vurderes ud fra højvandstandsstatistikker.

Kystdirektoratets nyeste højvandsstatistik for Kolding Havn er baseret på målinger mellem 1986-2017, [4]. Der har dog været dataudfald i perioden 1996-1999 samt flere mindre dataudfald.

Realdania har udgivet en højvandsstatistik, hvor alle målestationer inddeles mellem at være mest påvirket af stormflod fra nord eller syd. Kolding er vurderet, at højvandstanden primært er styret af hændelser fra sydlige retninger, [5]. Realdanias statistik indeholder historiske stormflodshændelser, som ikke er med i Kystdirektoratets datagrundlag.

Tabel 3.2 viser sammenligning af udvalgte middeltidshændelser bestemt af Kystdirektoratet og Realdania.

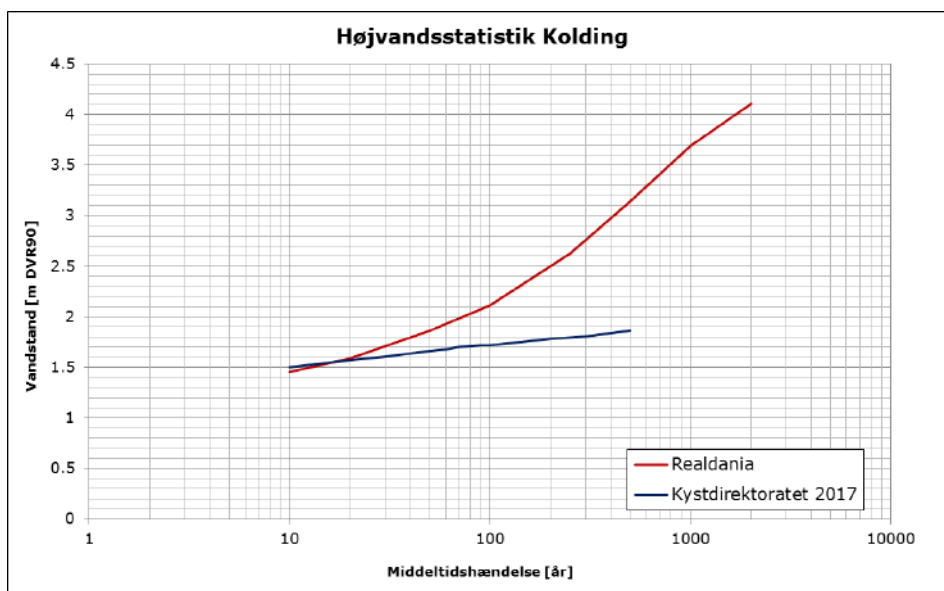
Ekstremvandstandene er nogenlunde ens for returperioder op til 20 år. Der er betydelig forskel i de beregnede ekstremhændelser for returperioder på 50 år og derover.

Tabel 3.2: Sammenligning af højvandsstatistikudgivet af Kystdirektoratet 2017, [4] og Realdania 2017, [5].

Middeltidshændelse [år]	Højvandsstatistik	
	Kystdirektoratet [cm]	Realdania [cm]
10	+150	+145
20	+157	+159
50	+166	+186
100	+172	+211
500	+186	+314
1000	-	+369

Hvad der i Realdanias statistik svarer til en 50-års hændelse svarer i Kystdirektoratets statistik til en 500-års hændelse, se Tabel 3.2 og Figur 3.3.

Figur 3.3: Sammenligning af højvandsstatistik for Kolding udgivet af Realdania og Kystdirektoratet, [5] og [4].



Under stormfloden i 1872 var vandstanden ved Kolding cirka +3 m DVR90, [6].

Ifølge Realdanias statistik svarer 1872-hændelsen til en ca. 400-års middeltidshændelse ved Kolding.

NIRAS anbefaler at anvende Realdanias højvandsstatistik til vurdering af højvandsbeskyttelsen ved Binderup, da denne statistik medtager historiske stormfloder, som ikke er indeholdt i Kystdirektoratets statistik.

NIRAS vurderer, at Kystdirektoratets statistik medfører, at digets styrke overvurderes.

I det følgende er digets sikkerhed vurderet ud fra begge statistikker til sammenligning.

3.3.3 Dimensionsgivende vandstand og sikringsniveau

I det følgende opstilles en række kombinationer af kronekote og levetid for at synliggøre sammenhængen mellem disse og sikringsniveauet. Dette gøres både for tilfælde med og uden bølgepåvirkning.

3.3.3.1 Uden bølgepåvirkning

Hvis det antages, at der ikke er bølgepåvirkning på diget samtidig med ekstreme højvande, kan den dimensionsgivende vandstand næsten sættes lig med kronekoten.

Hvis middeltidshændelsen svarende til denne vandstand skal bestemmes forudsætter det dog en valgt levetid, og dermed en højde på forventet havspejlsstigning. Levetiden antages i det følgende at være 30 år (frem til år 2050 og dermed anvendes en havspejlsstigning på 20 cm.

Ud fra ovenstående antagelser estimeres den resulterende middeltidshændelse i Tabel 3.3 for forskellige kronekoter. Heraf ses det, at sikringsniveauet ifølge Kystdirektoratets nyeste højvandsstatistik bliver en 270-års hændelse om 30 år (i år 2050), hvis kronekoten er +2,0 m DVR90. Ifølge Realdanias højvandsstatistik er sikringsniveauet dog kun svarende til en returperiode på 40 år.

Ud fra Kystdirektoratets og Realdanias statistikker er der hhv. 11 % og 53 % risiko for digets kronekote overoverstiges inden år 2050, se Tabel 2.1.

Tabel 3.3: Resulterende middeltidshændelse for en kronekote på +2,0 m DVR90, hvis det antages at der ikke er bølgepåvirkning samtidig med ekstrem højvandstand.

Kronekote [m DVR90]	+2,0	+2,2	+2,5	+2,5
Levetid [år]	30	30	30	60
Havspejlsstigning [m]	0,2	0,2	0,2	0,5
Resulterende ekstremvandstand [m DVR90]	+1,8	+2,0	+2,3	+2,0
Tilsvarende middeltidshændelse [år] Kystdirektoratet:	270	>500	>500	>500
Realdania:	40	75	150	75

Hæves kronekoten ved etablering til +2,2 m DVR90 vil middeltidshændelserne øges til 2.500 og 75 år ved brug af hhv. Kystdirektoratets og Realdanias højvandsstatistik for en levetid på 30 år. Risikoen for at hændelsen indtræffer er således hhv. 1 % og 33 %.

Hæves kronekoten yderligere til +2,5 m DVR90 med samme levetid på 30 år, bliver middeltidshændelserne på mere end 10.000 år og 150 år for hhv. Kystdirektoratets og Realdanias statistikker. Dette svarer til en overskridelsesrisiko på hhv. 0,3 % og 18 %.

Vælges en længere levetid reduceres sikringsniveauet, da digets frihøjde reduceres af et højere havspejl. Samtidig øges risikoen for, at hændelsen indtræffer. Dette ses ved eksemplet på en kronekote på +2,5 m DVR90 med en levetid på 60

år (til år 2080). Dette eksempel er opstillet med antagelse om, at kronen hæves til +2,5m DVR90 efter 30 år.

Opretholdes anbefalingen om 10 cm fribord mellem dimensionsgivende vandstand og kronekoten bliver sikringsniveauet blot 70 og 30 år i år 2050 ud fra statistikken for hhv. Kystdirektoratet og Realdania med en kronekote på +2,0 m DVR90.

3.3.3.2 Med bølgepåvirkning

Størrelsen af det nødvendige bølgetillæg til digets højde øges med bølgehøjden. Erosion af kystprofilen foran digefoden øger desuden vanddybden og bølgehøjden foran diget.

I Afsnit 4 vurderes sikringsniveauet for diget med en kronekote på +2,0 m DVR90 ud fra en række kombinationer af bølgehøjde og vandstand.

4 Bølgeklima og kystprofil

Kyststrækningen ligger i Mosvig Bugt, hvor der er mulighed for bølger på diget fra vindretninger mellem 75 og 150 grader, hvor der er et frit stræk på op til 18 km mod SØ. Ekstrem vandstand og bølgepåvirkning er ikke stærkt korrelerede i projektområdet.

I det følgende undersøges, hvilken kombinationer af vandstande og bølgehøjde der kan forekomme og hvilket af disse scenarier, der giver størst bølgepåvirkning og den højeste kronekote af diget.

15.- 18. marts 2018 forekom en længerevarende hændelse med østenvind på omtrent 10 m/s der varede i over 50 timer. Fra observationer på stranden i denne periode vides, at hændelsen resulterede i en del akut erosion af stranden. Hændelsen svarer til en 100-års hændelse.

Diger anbefales som minimum at dimensioneres mod en 100-års hændelse. Kombinationen af vandstand og bølgehøjde svarende til en middeltidshændelse på 100 år som i marts 2018 er anvendt til beregning af bølgetillæg, akut erosion og nødvendige mængder sand til strandfodring.

4.1 Dybt vand

Dybden i Lillebælt ud for Binderup-Grønninghoved er i store områder over 10 m (søkort nr. 15).

Bølgeklimaet ved Binderup Strand er beregnet med numerisk bølgemodel (MIKE 21 SW [7]) som dækker Lillebælt ud fra vindklimaet i området. Modellen er baseret på følgende:

- 1) Vindfelter for perioden 1/4-2011 til 1/5-2018 med en horisontal opløsning på minimum 0,2° og en tidlig opløsning på en time [8];
- 2) Vandstanden er konstant i modelområdet med en tidlig variation som målt ved Fåborg leveret af DMI;
- 3) Dybdata er trukket fra Miljøstyrelsen AIS database (tidligere Farvandsvæsenet) [9].
- 4) Modellen er ikke kalibreret, men baseret på standard parametrene i modellen [7];

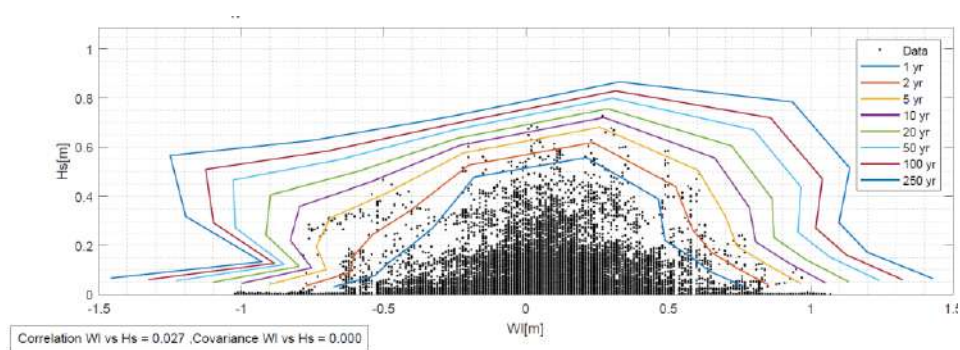
Bølgeklimaet for farvandet er simuleret for en 7 års periode (1/4-2011 til 1/5-2018). Tidsserien er herefter benyttet til at bestemme ekstremværdier med forskellige middeltidshændelser.

Ekstremværdierne er bestemt ud fra peak-over-threshold metoden med en minimum afstand mellem stormene på 2 dage og et gennemsnit på 2 storme pr. år. Værdierne er bestemt med en 3-parameter Weibull fordeling. Dette er gjort for intervaller af samtidige værdier af signifikant bølgehøjde og vandstand. Kovariansen for de to datasæt er tæt på nul, hvorfor de kan betragtes som værende uafhængige.

Den samlede sandsynlighed for en given kombination af bølgehøjde og vandstand bestemmes som sandsynligheden for den ene multipliceret med sandsynligheden for den anden: F.eks. forekommer en given bølgehøjde med en returperiode på 10 år og vandstanden med en returperiode på 2 år, vil den samlede returperiode være 20 år.

Figur 4.1 viser simulerede kombinationer af vandstand og bølgehøjde på dybt vand ud for projektområdet. Figuren viser, at de største signifikante bølgehøjder på mellem 0,8 - 0,9 m kan forekomme samtidigt med vandstande på mellem +0 til +1,0 m DVR90.

Figur 4.1: Sammenhæng mellem vandstand og signifikant bølgehøjde på 10 m dybde i Lillebælt ud for Binderup-Grønninghoved. Sorte prikker er simulerede hændelser med sammenhængen mellem bølgehøjde og vandstand. Linjerne viser middeltidshændelser for de simulerede kombinationer af bølgehøjde og vandstand.



Generelt anbefales ikke at anvende kurverne for høje middeltidshændelser ved så kort en dataperiode som de 7 år anvendt i ovenstående analyse.

Vindstuvningen ved marts-hændelsen resulterede i en vandstandshævning til +1,0 m DVR90 (Scenarie 1 i Afsnit 3.2.1). Den signifikante bølgehøjde på dybt vand er estimeret til at være omtrent 45 cm. Denne hændelse er inkluderet i ovenstående analyse og svarer til en 100-års hændelse i dag på Figur 4.1.

Hvilken middeltidshændelse/sikringsniveau for bølgepåvirkningen, der skal undersøges er ikke foruddefineret i nærværende projekt. Derimod er fastsat en ønsket kronokote på +2,0 m, som skal kunne forhøjes til +2,5 m DVR90 på et senere tidspunkt.

Udover marts-hændelsen, er tre andre kombinationer af vandstand og bølger svarende til en 100-års hændelse transformeret ind til digefoden og analyseret, Tabel 4.1 og Figur 4.1.

Dette er gjort for at vurdere hvilken 100-års kombination af bølgehøjde og vandstand, der kræver den højeste kronokote og medfører den største akutte erosion. Transformation af designvandstand og bølgehøjde til lavt vand samt beregning af den akutte erosion er foretaget med LITPROF.

Tabel 4.1: Kombinationer af vandstande og bølgehøjder samt tilhørende bølgeperioder for 100-års hændelse i Lillebælt på dybt vand ud for Binnerup-Grønninghoved.

Vandstand på dybt vand i år 2020 [m DVR90]	Vandstand på dybt vand i år 2050 [m DVR90]	Bølgehøjde på dybt vand (H_s) for 100 års MT [m]	T_p [s]
0,3	0,5	0,8	3,3
0,85	1,05	0,7	3,0
1,0	1,2	0,45	2,5
1,1	1,3	0,15	2,2

Havspejlsstigningen frem til år 2050 skal tillægges de nuværende vandstande før modellering, for at opnå situationen ved slutningen af beskyttelsens levetid.

4.2 Lavt vand

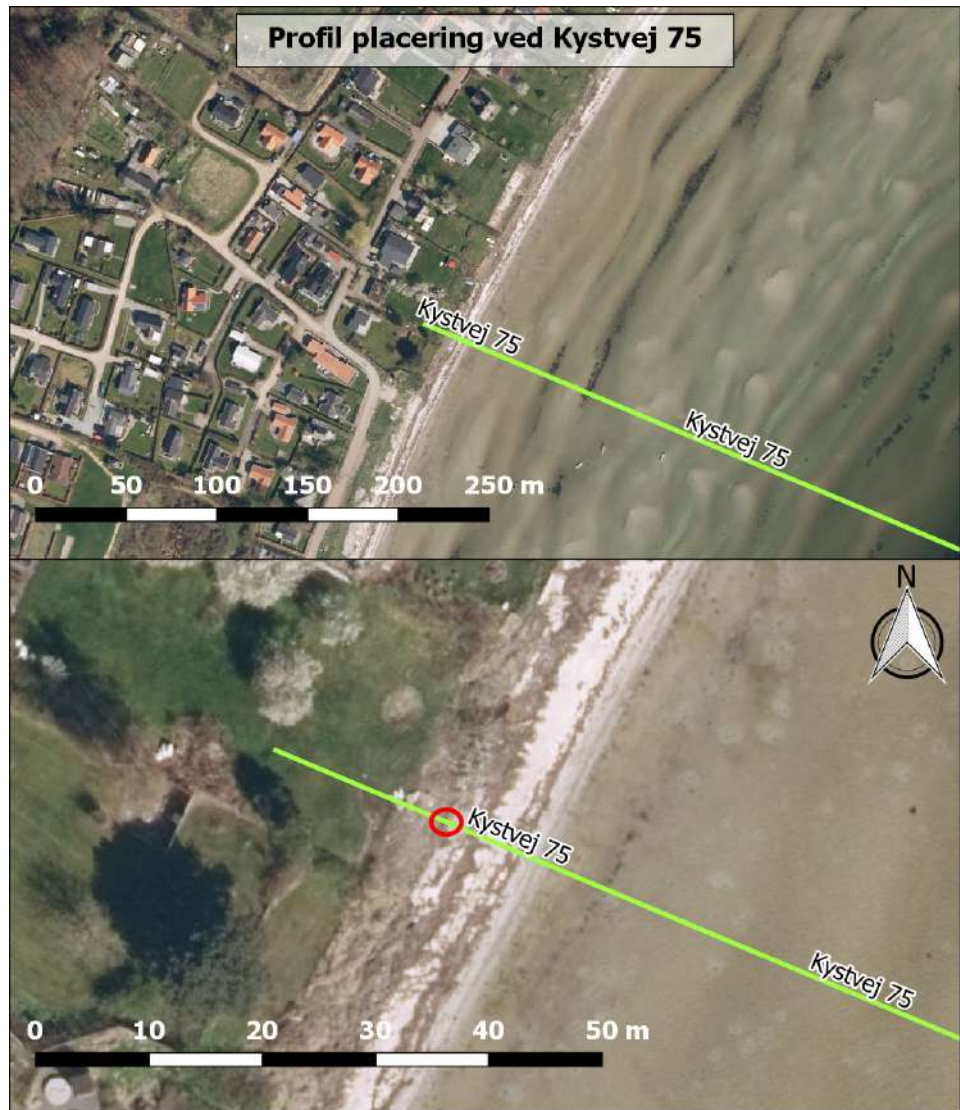
Bølgerne transformeres fra dybt vand til kysten ved brug af LITPROF og et kystprofil ud for Kystvej 75. Lokaliteten ved Kystvej 75 er valgt som repræsentativ for hele strækningen. Stranden er generelt smallere og topkoten af klitten lavere på øvrige strækninger. Placering og form af det anvendte kystprofil ses på Figur 4.2 og Figur 4.3.

Diget skal placeres på grænsen til stranden og det er derfor vigtigt at inkludere den potentielle akutte erosion ved digefoden i bestemmelsen af designbølgehøjde og design vandstand. Diget anbefales at have en forside hældning op 1:3.

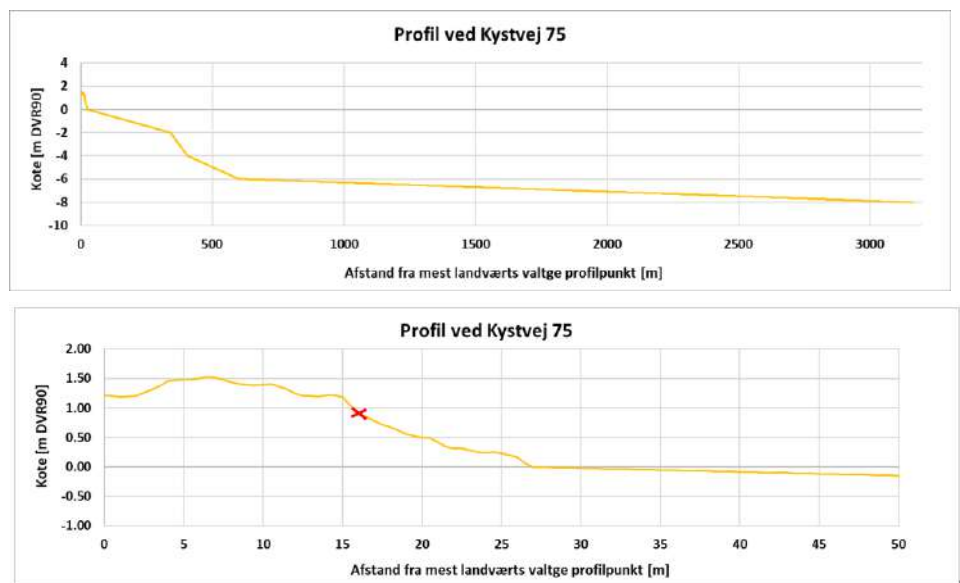
Eroderes stranden under hændelsen øges bølgepåvirkningen, og dermed opskylshøjden og -mængden, på diget. Ligeledes kan diget undermineres og ødelægges af bølgerne nedefra, se Afsnit 5.3.

Figur 4.2: Placering af kystprofil ved Kystvej 75. Den identificerede klitfod er markeret med en rød cirkel på nederste foto.

Baggrundskort: Orthofoto 2017, Geodatastyrelsen, WMS tjeneste.



Figur 4.3: Kystprofil ved Kystvej 75. Terræn over kote +0,0 m DVR90 er udtrukket fra DHM 2014. Vanddybder under kote +0,0 m DVR90 er aflæst fra søkort nr. 151. Øverst: hele kystprofilen ud til 8 m vanddybde. Nederst: inderste 50 m af kystprofilen.



De opstillede scenarier er konstrueret med en varighed på 24 timer med maksimal vandstand i 6 timer og lineært stigende/aftagende vandstand i perioden før og efter den maksimale vandstand. Bølgehøjde og -periode er holdt konstante gennem hele hændelsen. Hændelserne inkluderer den forventede havspejlsstigning.

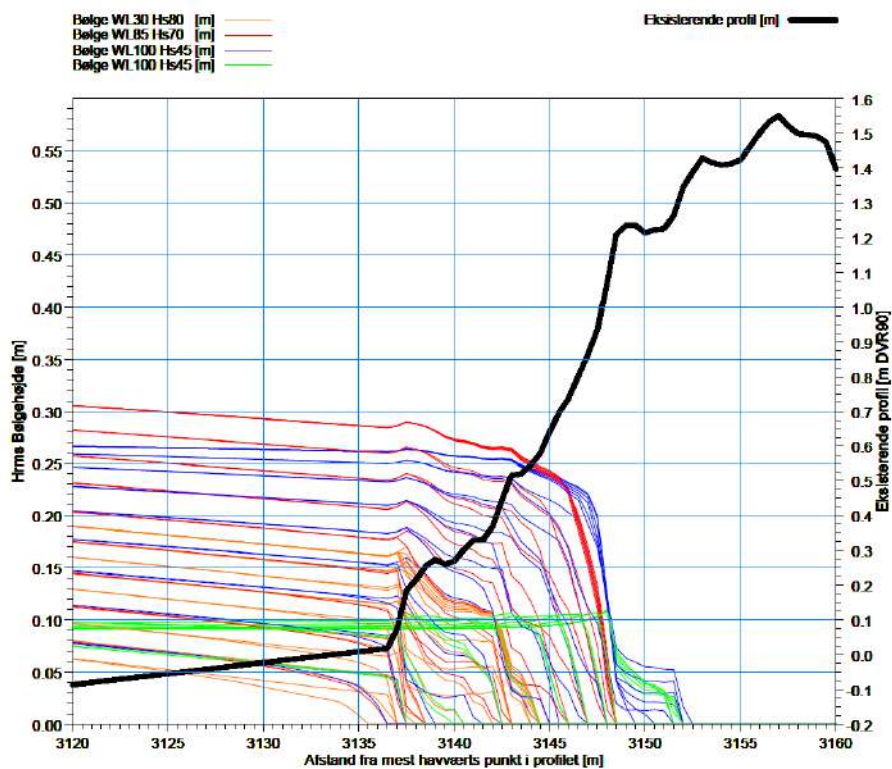
De resulterende H_{rms} -bølgehøjder for de forskellige scenarier gennem den inderste del af profilet ses af nedenstående Figur 4.4.

Bølgehøjden foran diget for kombinationen med en vandstand på dybt vand på +1,0 m DVR90 og en signifikant bølgehøjde på dybt vand på 45 cm er resulterer i den største bølgehøjde ved klitfoden. Bølgehøjden foran diget for kombinationen med en vandstand på dybt vand på +0,85 m DVR90 og en signifikant bølgehøjde på 70 cm på dybt vand er marginalt mindre.

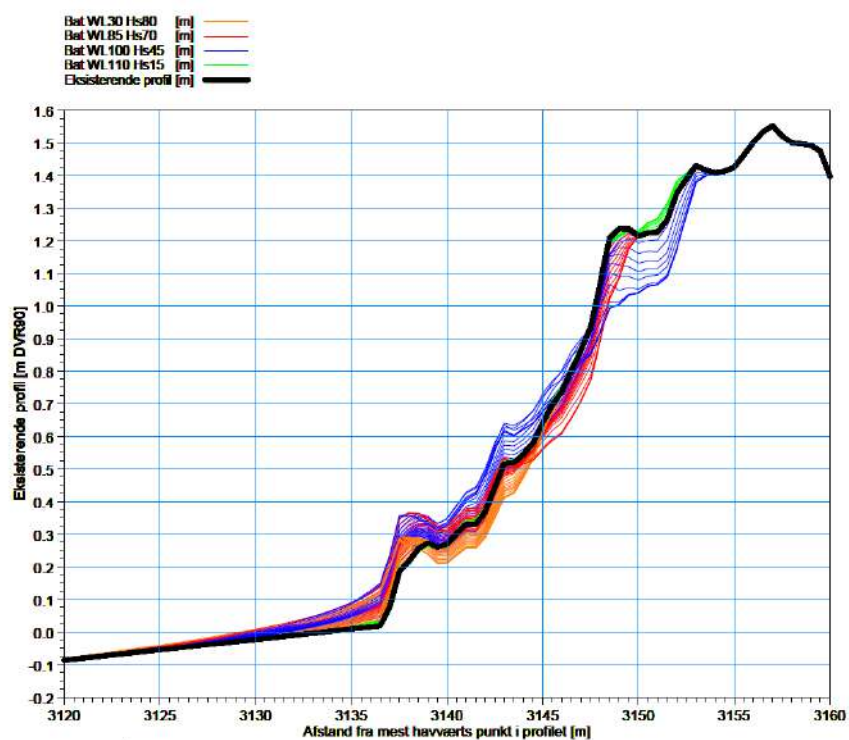
Af Figur 4.5 ses, at det er kombinationen med en vandstand på +1,0 m DVR90 og en signifikant bølgehøjde på 45 cm, der eroderer længst ind i klitten. Det er dog kombinationen med en vandstand på +0,85 m DVR90 og signifikant bølgehøjde på 70 cm, der giver den største vertikale akutte erosion ved klitfoden.

Kombinationen med vandstand på +0,3 m DVR90 og signifikant bølgehøjde på 0,8 m giver ikke anledning til betydelig erosion ved klitfoden, da bølgerne ikke når derop, se Figur 4.4 og Figur 4.5. Øvrige modelscenarier giver akut erosion foran klitfoden på op mod 20 cm.

Figur 4.4: Variation af bølgehøjden præsenteret som Hr_{ms} foran diget for fire analyserede kombinationer af vandstand, WL og bølgehøjde, H_s svarende til 100 års hændelser. Figuren viser den inderste del af kystprofilen.



Figur 4.5: Akut erosion foran klitfoden for analyserede kombinationer af vandstand og bølgehøjde svarende til 100 års hændelser..



Modellerede bølgehøjder og bølgetillæg er vist for de fire kombinationer af vandstand og bølgehøjde i Tabel 4.2.

Tabel 4.2: Udtræk af resulterende bølgehøjde, vandstand og bathymetri for fire analyserede kombinationer af vandstand og bølgehøjde. Udtrækkene er ved digefoden. Derudover er den resulterende kronekote vist både ved etableringstidspunkt og efter 30 år (inkl. landhævning).

Vandstand, bølgehøjde på dybt vand [m DVR90] og [m]	Resultende klitfodskote [m DVR90]	Bølgehøjde ved klitfod [H _s , m]	Nødvendig minimumskronekote i år 2050 [m DVR90]	Nødvendig minimumskronekote i år 2020 [m DVR90]
V=0,3→0,5 H_s=0,8	-	-	-	-
V=0,85→1,05 H_s=0,7	0,70	0,24	1,51	1,46
V=1,0→1,2 H_s=0,45	0,85	0,25	1,64	1,59
V=1,1→1,3 H_s=0,15	0,95	0,13	1,47	1,42

Den beregnede kronekote for de undersøgte kombinationer af vandstand og bølgehøjde var markant under de +2,0 m DVR90, som diget opbygges til.

Den højeste nødvendige kronekote kræves ved kombinationen med en vandstand på +1,0 m DVR90 og signifikant bølgehøjde på 45 cm, hvilket også giver den største akutte erosion af stranden foran diget.

Når det eksisterende kystprofil kombineres med et ikke-eroderbart dige, bliver den vertikale akutte erosion 0,5 m. Herved bliver den nødvendige kronekote +1,8 m DVR90. Dette er dog under antagelse af, at for- og bagstrand altid er så bred som på denne lokalitet og at digets fodkote ligger i minimum +0,94 m DVR90.

Samme analyse er foretaget med et dige, der er placeret længere fremme, således at fodkoten er +0,7 m DVR90. Grundet det flade profil ændrer dette dog ikke markant på den vertikale erosion og den nødvendige kronekote er kun på +1,8 m DVR90.

Kronekoten på diget er +2,0 m DVR90, hvilket er acceptabel til at modstå en 100-års hændelse med forskellige kombinationer af vandstand og bølgehøjde. Dette forudsætter dog, at strandkoten foran diget minimum er +0,7 m DVR90 før hændelsen indtræffer.

5 Erosion og strandfodring

For at beskytte diget mod bølger, er det nødvendigt at opretholde et tilstrækkeligt højt strandprofil foran konstruktionen.

Den nødvendige strandhøjde foran diget afhænger af den dimensionsgivende kombination af bølger og vandstand. Hvis fodkoten bliver mindre øges bølgehøjden, hvilket kan beskadige digets forside og i sidste ende resulterer i digebrud.

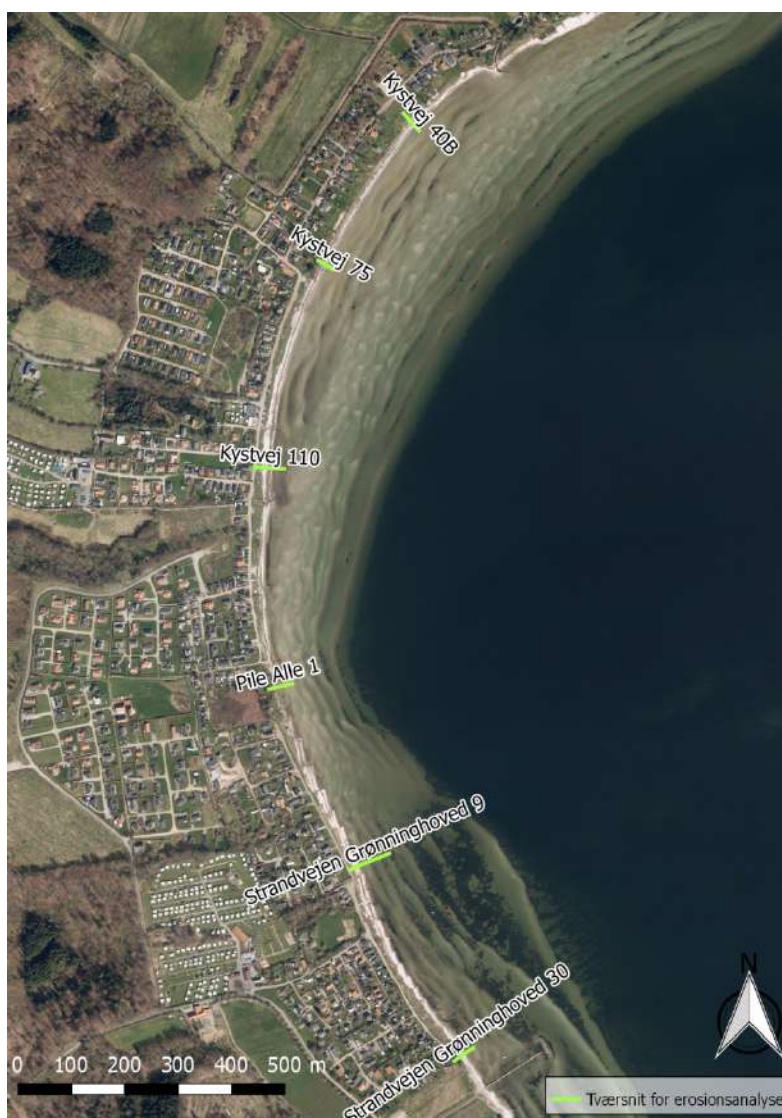
Indtil vegetationen på diget er udviklet med et solidt rodnet (3-4 år) bør bølgepåvirkning af diget undgås.

For at sikre at ovenstående forhold opretholdes er det nødvendigt med en initial strandfodring foran diget samt løbende vedligeholdelsesfodring. Strandfodringsmængden indeholder primært tre bidrag:

- I takt med **havspejlsstigningerne** vil strandbredden blive mindre, eftersom bagstranden fastholdes ved diget. Hermed bliver bølgepåvirkningen på beskyttelsen også større, med mindre det foranliggende strandprofil løbende hæves tilsvarende havspejlsstigningen.
- Den **kroniske erosion** på nogle delstrækninger i området betyder at stranden rykker tilbage. Dette øger også bølgepåvirkningen på diget. Der skal derfor strandfodres for at kompensere det sediment der løbende tabes ud af området, hvorved stranden kan stabiliseres.
- I forbindelse med hændelser med forhøjet vandstand og bølgepåvirkning vil der forekomme **akut erosion** af stranden foran diget. For at sikre at fodkoten ikke bliver mindre end forudsat i beregningerne, er det nødvendigt at strandfodre for at modvirke akut erosion.

Hvert enkelt af disse bidrag beskrives grundigere og estimeres i de nedenstående afsnit. Strandfodringsmængderne til kompensation for havspejlsstigning og kronisk erosion varierer langs kysten. Disse to bidrag beregnes derfor ud fra 6 delstrækninger repræsenteret ved de 6 stationeringslinjer, se Figur 5.1.

Figur 5.1: Lokalteter for erosions- og vandlinjeeanalyse.

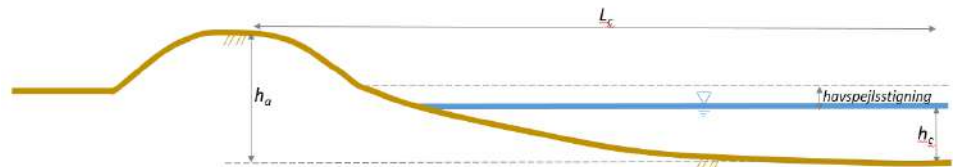


5.1 Havspejlsstigning

For at kompensere for at havspejlsstigning flytter vandlinjen længere tilbage, bør den aktive del af kystprofilen hæves tilsvarende, således at strandbredden fastholdes. Som beskrevet i Afsnit 3.3.1 vil der fra 2020-2050 ske en havspejlsstigning på ca. 0,2 m.

Størrelsesordenen på fodringsmængden afhænger af kystens aktive højde, h_a , som definerer den del af kystprofilen, hvor der forekommer ændringer i kystprofilen over kortere tidsskalaer, se Figur 5.2.

Figur 5.2: Definition på aktiv dybde (h_a), aktive højde (h_c) og aktive længde (L_c).



Dette område strækker sig fra strandens bagerste afgrænsning eller klittoppen og ud til den aktive dybde, h_c . Denne bestemmes ud fra den signifikante bølgehøjde, der overskrides 12 timer pr år, H_{s12} .

Ved at køre en bølgemodel for området omkring Binderup-Grønninghoved for perioden 2011-2018 er H_{s12} beregnet til 0,6 m. Dette medfører en aktiv dybde på $h_c \sim 1,1$ m.

Den samlede aktive højde og længde varierer langs kysten. Højderne samt længderne for det aktive profil langs projektstrækningen er angivet i Tabel 5.1 med udgangspunkt i stationeringslinjerne, se Figur 5.1. I tabellen er også angivet, hvilken længde de enkelte lokaliteter repræsenterer. I alt er denne længde 2.146 m.

Tabel 5.1: Aktive højder og længder for repræsentative lokaliteter anvendt i analysen af de nødvendig strandfodring mod havspejlsstigninger.

	Kystvej 40B	Kystvej 75	Kystvej 110	Pile Alle 1	Strandv. Grønh. 9	Strandv. Grønh. 30
Aktive højde [m]	2,4	2,6	2,5	2,4	2,5	2,5
Aktive længde [m]	186	186	159	99	129	181
Længde langs kysten [m]	334	370	419	387	354	282

Den årlige strandfodningsmængde findes som den aktive længde, (fra digefoden til den aktive dybde), ganget med den årlige havspejlsstigning. Længden af den aktive højde er baseret på søkort, [10].

Tabel 5.2: Resulterende årlige strandfodningsmængder forårsaget af havspejlsstigninger fordelt på delstrækninger.

	Kystvej 40B	Kystvej 75	Kystvej 110	Pile Alle 1	Strandv. Grønh. 9	Strandv. Grønh. 30
Strandmængde per lokalitet [m ³ /år/m]	1.1	1.1	1.0	0.6	0.8	1.1
Strandmængde per delstrækning [m ³ /år]	380	420	410	240	280	310

Langs kysten varierer denne gennemsnitlige mængde mellem 0,6 - 1,1 m³/m/år i perioden 2020-2050, Tabel 5.2. Som det ses af tabellen er det nødvendigt årligt at fodre med 2.000 m³ for at kompensere for havspejlsstigningen.

5.2 Kronisk erosion

Kronisk erosion eller kystfremrykning er et resultat af ændringer i størrelsen på den langsgående sedimenttransport langs kysten.

Stiger langstransporten henover en strækning betyder det, at der fjernes mere sand fra området end der tilføres, hvilket resulterer i kronisk erosion. Omvendt vil en faldende langstransport resultere i aflejring af sand og kystfremrykning. Størrelsen på langstransporten afhænger af det generelle bølgeklime (bølge type, størrelse, indfaldsvinkel) samt tilgængelighed af sand.

Den potentielle langstransport er et udtryk for, hvor meget sand bølgerne kan transportere, såfremt der er ubegrænsede mængder sand til rådighed. Den aktuelle transport afhænger af, om der er kystkonstruktioner i den aktive del af profilet og tilstedeværelsen af sten og ler, der vil reducere transporten.

I det følgende foretages en analyse af den historiske kystudvikling. Analysen giver den årlige mængde sediment, som eroderes og aflejres fra de enkelte delområder.

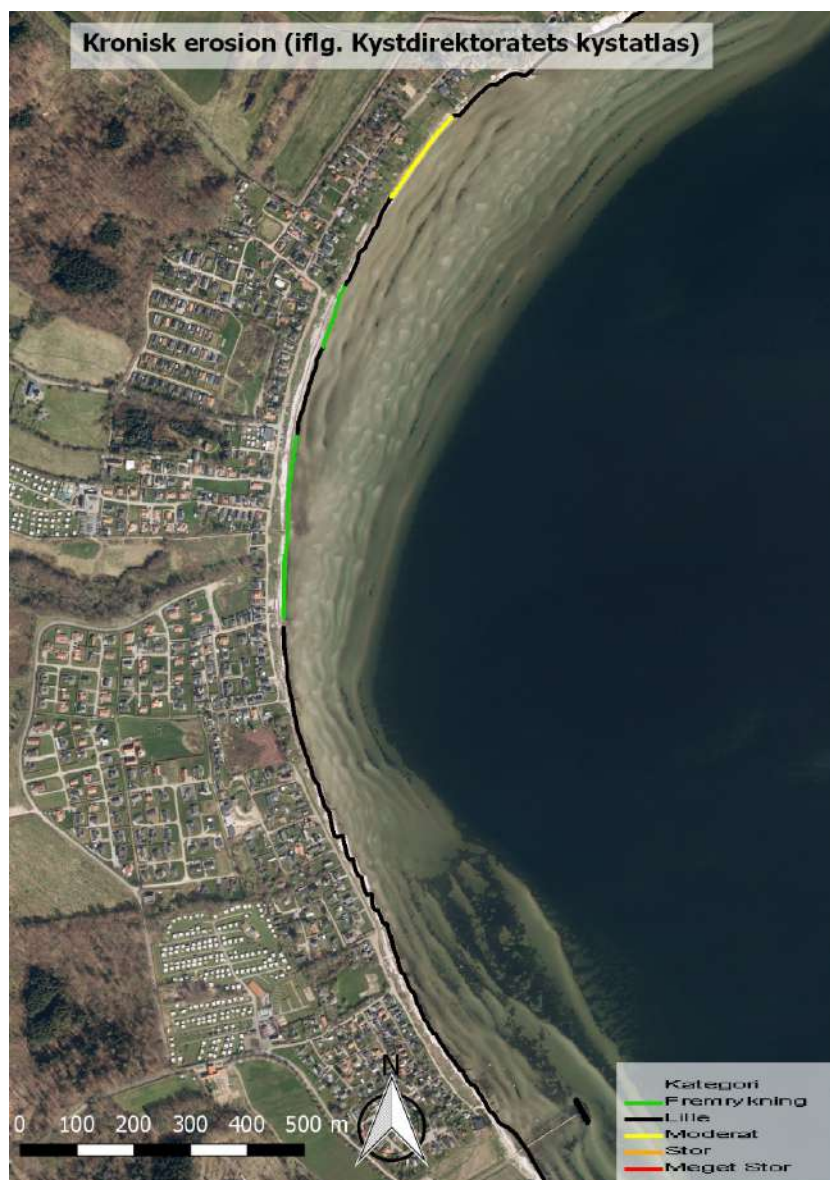
5.2.1 Historisk vandlinjeudvikling

Ved Binderup-Grønninghoved ses et veludviklet revlesystem med flere kystparallelle revler og et fladt kystprofil. Dette er et tegn på stor tilgængelighed af finkornet sand.

Bølgeklimate fra østlige retninger skaber en langsgående netto-sedimenttransport fra nord og syd ind mod midten af bugten. Dette ses bl.a. ved, at der er etableret en række høfder i nord og syd for at bremse erosionen og holde på sandet, mens der ingen konstruktioner er langs den centrale del af bugten.

Grundet det relativt korte frie stræk er både akut erosion under stormhændelser og kronisk erosion som følge af langsgående sedimenttransport vurderet af Kystdirektoratet i Kystatlasset til at være lille, [11]. I den centrale del af bugten rykker kysten frem. I den nordlige del af bugten er der en moderat kronisk erosion, [11], se desuden Afsnit 5.2.2 og 5.3.

Figur 5.3: Kronisk erosion langs Binderup-Grønninghoved strand, [11].

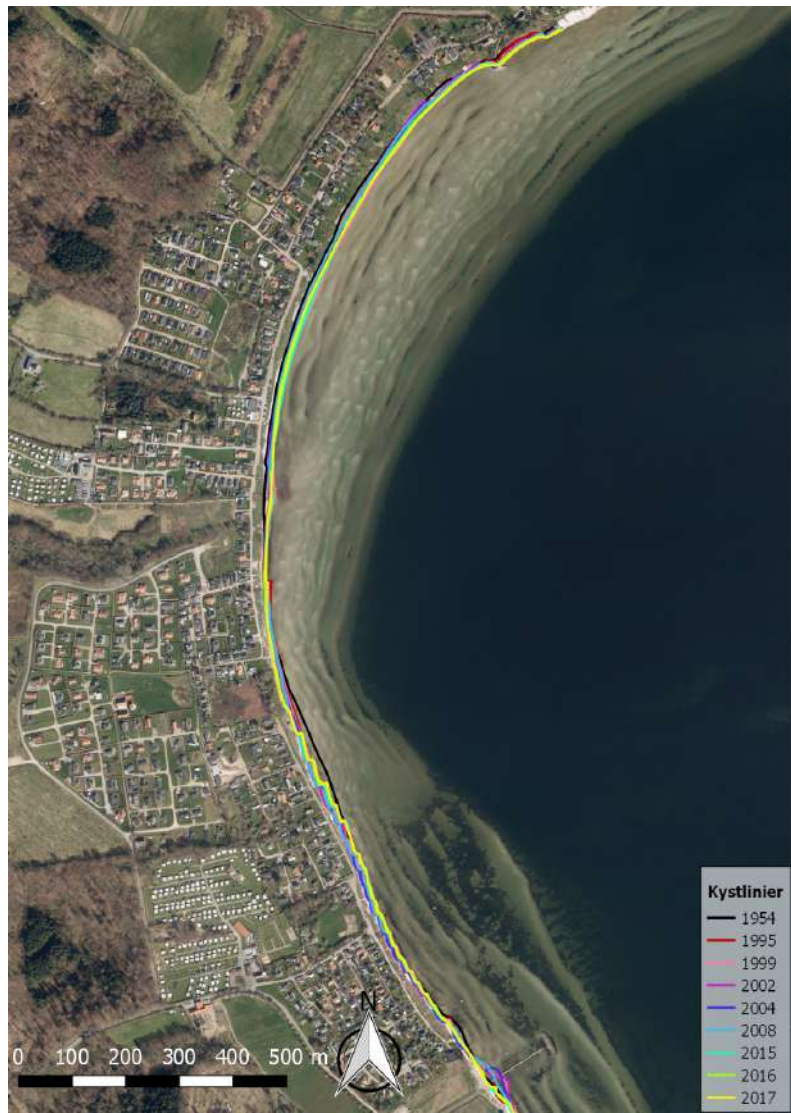


Kystudviklingen ved Binderup og Grønninghoved Strand er analyseret bl.a. ved brug af ortofotos og digitalisering af vandlinjen tilbage fra 1954 og med efterfølgende fotos fra 1995, 1999, 2002, 2004, 2008, 2015, 2016 og 2017.

Ved digitaliseringen er placeringen af vandlinjen bestemt af vandstanden på fotograferingstidspunktet. Ligeledes er digitaliseringen påvirket af fotoets opløsning, som med tiden er blevet bedre. Derudover besværliggøres digitalisering af vandlinjen, ved at;

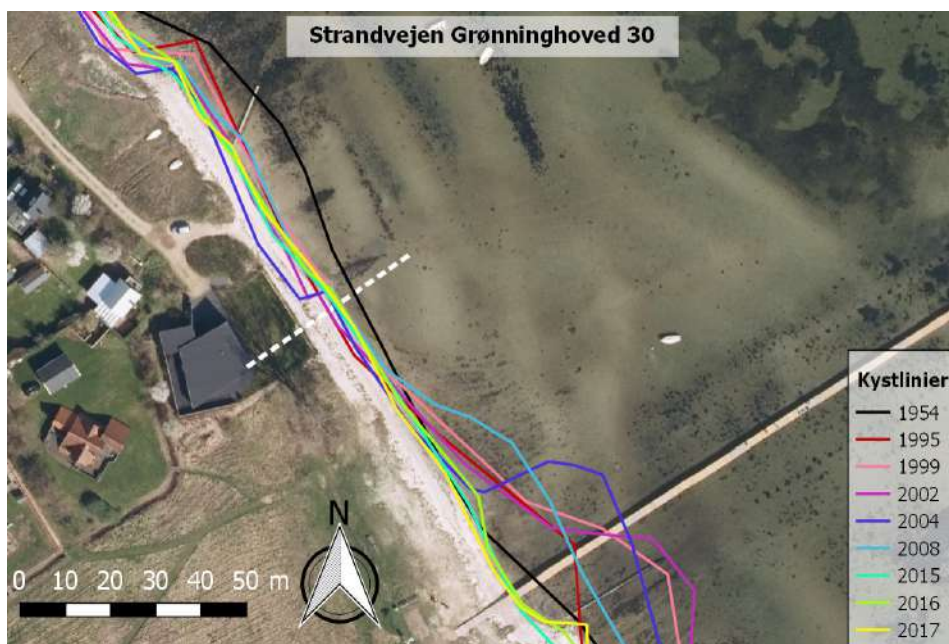
- Profilet er meget fladt, hvorfor det ofte er svært at skelne om revlerne er vokset sammen med stranden, og dermed på hvilken side af revlen vandlinjen er.
- Der til tider ligger store mængder tang i vandlinjen, som utydeliggør overgangen mellem strand og vand.

Figur 5.4: Digitaliserede vandlinjer mellem 1954 og 2017.



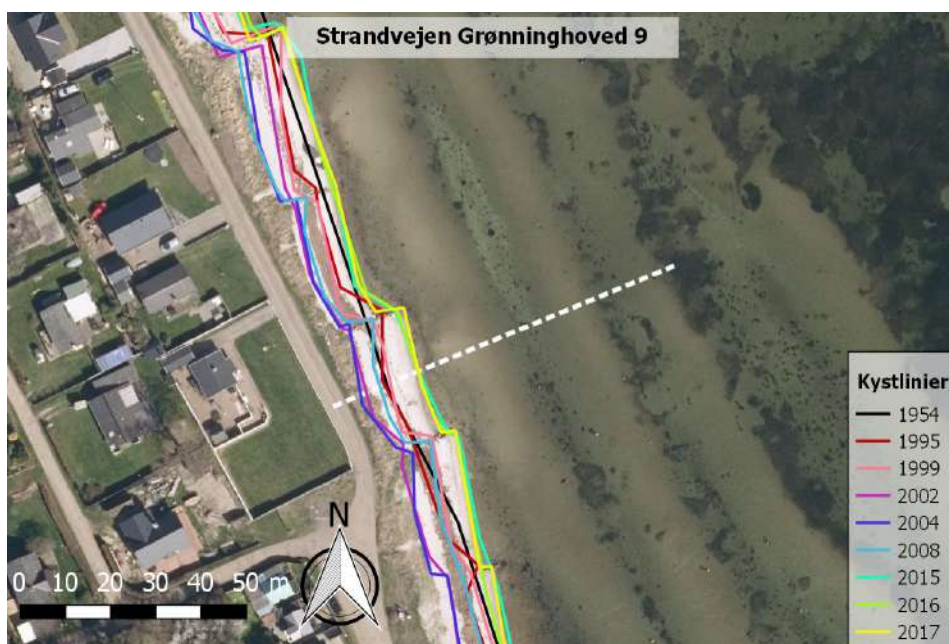
Analysen viser, at bølgebryderen i den sydlige del af bugten skaber en ustabil vandlinje bag bølgebryderen med frem- og tilbagerykning af stranden over årene, se Figur 5.5. Bølgebryderen har desuden medført læsideerosion nordvest for konstruktionen.

Figur 5.5: Vandlinjer mellem 1954 og 2017 omkring bølgebryderen i den sydlige ende af bugten.



I hofdefeltet i den sydlige del af bugten ser der ud til at være fremrykning af kysten i dag, hvor der tidligere var erosion, se Figur 5.6. Dette kan være et resultat af, at kysten bag bølgebryderen efterhånden ser ud til at være stabiliseret og ikke længere rykker frem.

Figur 5.6: Vandlinjer mellem 1954 og 2017 nordvest for bølgebryderen.



I hofdefeltet nordvest for bølgebryderen er stranden først eroderet tilbage, hvorefter der er sket betydelig aflejring af sediment.

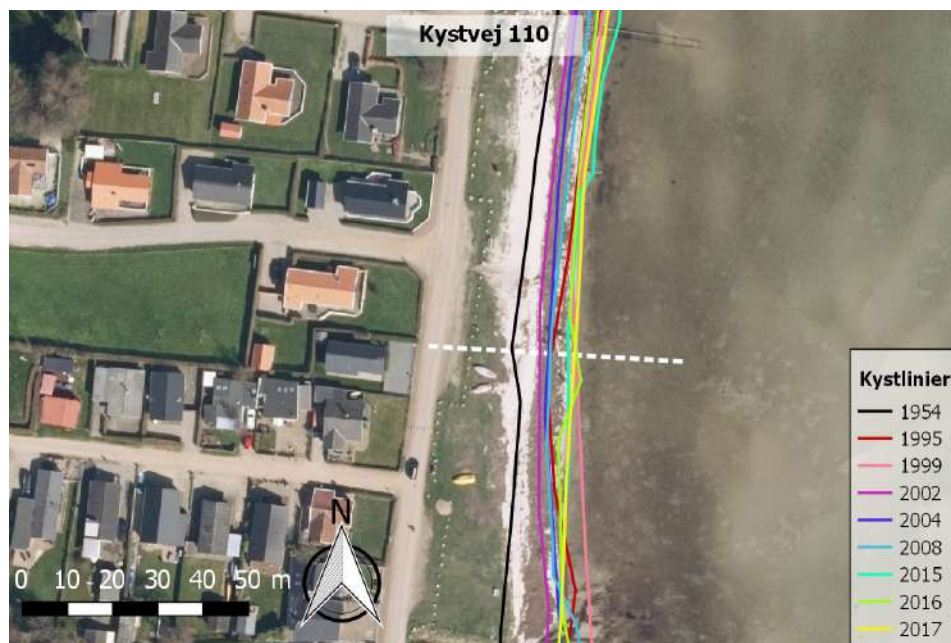
Ud for den centrale del af Mosvig Bugt ved Pile Allé lige nord for høfdefeltet ses læsideerosion, der dog i dag ser ud til at være stabiliseret, se Figur 5.7.

Figur 5.7: Vandlinjer mellem 1954 og 2017 på central del af Mosvig.



Langs den centrale og nordlige del af kyststrækningen ses en generel kystfremrykning, som dog varierer en del over årene, se Figur 5.8 - Figur 5.10.

Figur 5.8: Vandlinjer mellem 1954 og 2017 central og nordlig del.



Figur 5.9: Vandlinjer mellem 1954 og 2017, nordlig del.



Figur 5.10: Vandlinjer mellem 1954 og 2017 nordligste del af bugten.



Generelt viser analysen, at der i perioden mellem 1954 og 1990'erne foregik en erosion i den sydlige del og aflejring i den centrale og nordlige del af projektområdet, se Figur 5.4 - Figur 5.10. Formentlig som en konsekvens af dette er der i denne periode etableret et høfdefelt i den sydlige del. Derudover er der ca. 100 m fra stranden bygget en bølgebryder for at skabe læ for fortøjrede både.

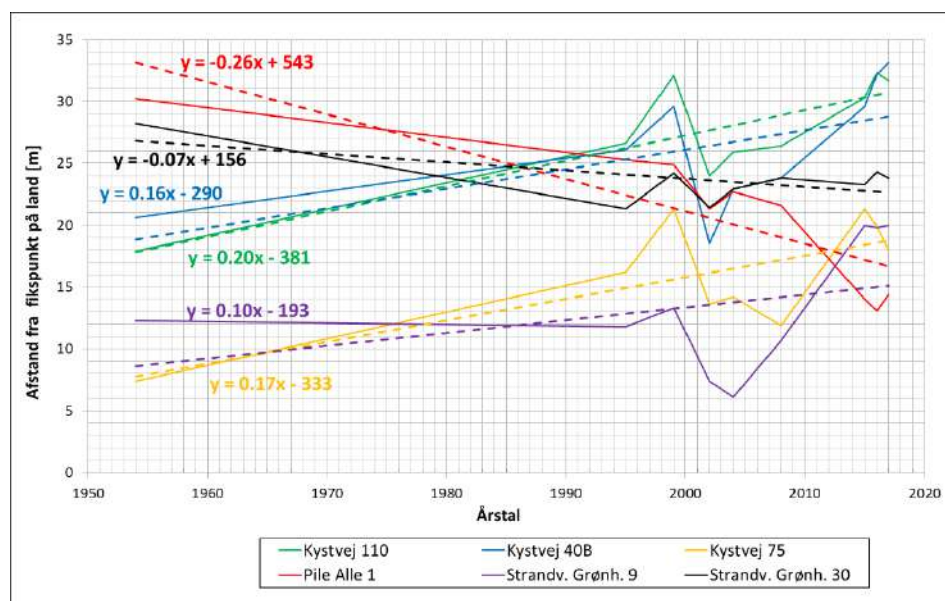
I 00'erne forekommer en mindre fremrykning i af stranden langs høfdefeltet i den sydlige del af bugten. Derfor sker der ikke fremrykning, men kun en mindre erosion på den centrale og nordlige strækning op gennem 00'erne. På den resterende strækning forekommer kystfremrykning.

5.2.2 Erosionsrater

Ændringer i vandlinjens position i forhold til et fikspunkt på land er vist i Figur 5.11 for 6 lokaliteter langs projektstrækningen. Både den observerede position samt trendlinjen er vist i figuren.

Kun ud for Pile Allé 1 og Strandvejen Grønninghoved 30, er der over perioden 1954-2017 samlet sket en tilbagerykning af kysten på henholdsvis 0,26 og 0,07 m/år. Ud for de øvrige lokaliteter er der sket en fremrykning af kysten på mellem 0,1-0,2 m/år.

Figur 5.11: Ændring i vandlinjens position i forhold til fikspunkt på land. Stiplet linje angiver trendlinjen.



De to mest centralt beliggende lokaliteter, Kystvej 75 og 110, har haft den største fremrykning af vandlinjen mellem 1954-2017, se Figur 5.11. Dette skyldes den langsgående nettotransport mod midten af bugten (Afsnit 5.2.1).

Erosionen ved Strandvejen Grønninghoved 30 skyldes læsideerosion fra bølgebryderen, der blev anlagt lige syd herfor mellem 1954-1995.

At kysten ved Strandvejen Grønninghoved 9 ikke eroderer tilbage skyldes, at der er anlagt høfder for at modvirke læsideerosionen. Nedstrøms/nordvest for høfderne ved Pile Allé 1, forekommer læsideerosion som følge af høfderne. Læsideerosion fremkommer fordi høfderne blokerer en del af den langsgående sedimenttransport fra sydøst.

Da kun to delstrækninger eroderer tilbage som følge af kronisk erosion, skal der kun beregnes strandfodringsmængder ud fra disse to lokaliteter. Fodringsmængden pr. m kystlinje ud for Strandvejen Grønninghoved 30 og Pile Allé 1 beregnes

som vandlinjens tilbagerykning pr. år ganget med den aktive højde af kystprofilen, se Afsnit i 0. Værdien er aflæst ud fra trendlinjerne.

Tabel 5.3: Strandfodringsmængder til kompensation for kronisk erosion.

	Kystvej 40B	Kystvej 75	Kystvej 110	Pile Alle 1	Strandv. Grønh. 9	Strandv. Grønh. 30
Sandmængde [$\text{m}^3/\text{år}/\text{m}$]	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	0,2
Sandmængde [$\text{m}^3/\text{år}$]	0	0	0	240	0	50

Langs kysten varierer denne gennemsnitlige mængde mellem 0 - 0,6 $\text{m}^3/\text{m}/\text{år}$ i perioden 2020-2050 som angivet i Tabel 5.3. Dette svarer til en årlig fodringsmængde på 300 m^3 og dermed en mængde hvert 5. år på 1.500 m^3 .

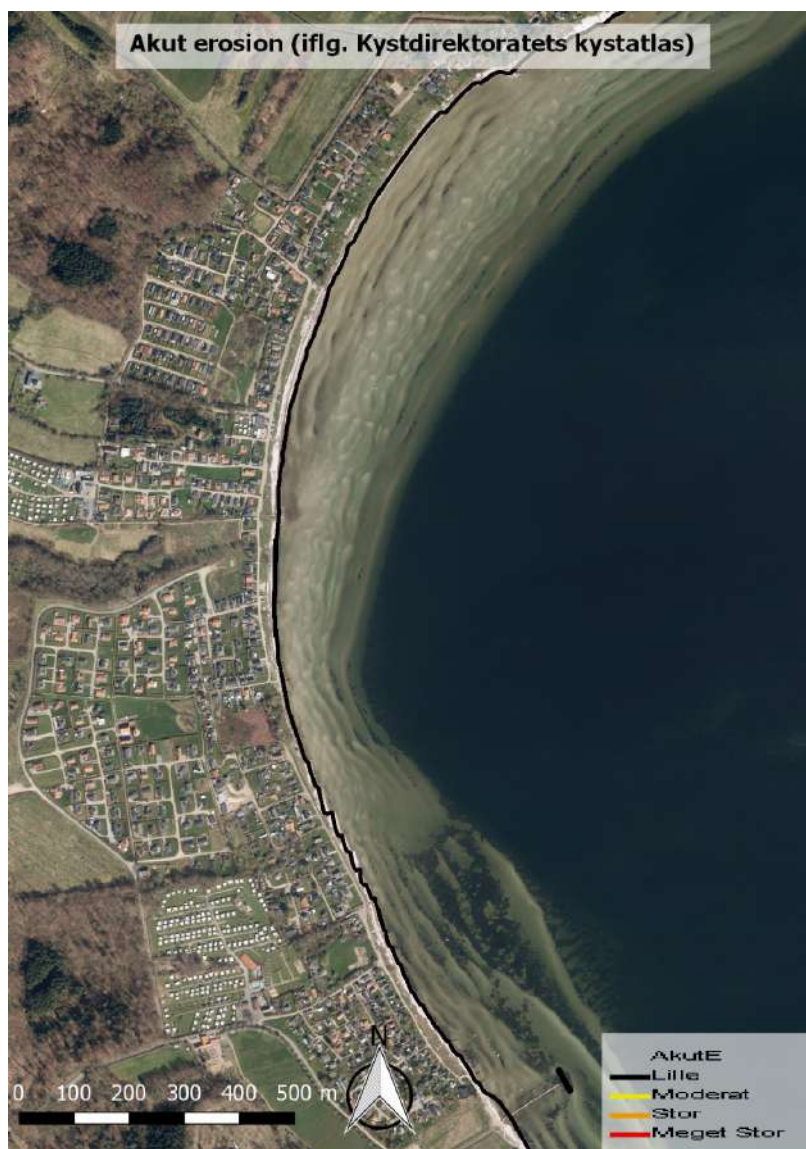
5.3 Akut erosion

Under situationer med forhøjet vandstand og bølger kan erosion af bagstrand og klitter forekomme. Sandet transporteres i stormflodssituationer udad i profilen og betegnes akut erosion.

Den akutte erosion er vurderet af Kystdirektoratet til at være lille ved Binderup-Grønninghoved. Dette er den mindste klassificering, der gives for akut erosion, se Figur 5.12. Årsagen er kombinationen af det flade kystprofil, relativt korte frie stræk samt lav korrelation mellem ekstrem vandstand og ekstrem bølgepåvirkning.

Der kan dog forekomme akut erosion i tilfælde af moderat forhøjet vandstand og moderate bølger. Det bemærkes, at der ved inspektion af området sås tegn på akut erosion på bagstranden.

Figur 5.12: Akut erosion langs Binderup-Grønninghoved strand vurderet af Kystdirektoratet, [11].



I dette projekt er ikke defineret et egentligt dimensionsgivende scenarie, men kronkoten er i stedet fastlagt af Bygherren.

Normalt projekteres nye diger for en 100-års hændelse eller mere om 50 år. I analysen af digets stabilitet og erosion foran diget anvendes en fremskrivning på 30 år. I Afsnit 4 er det vurderet, at der med en kronkote på +2,0 m DVR90 ikke er nogen 100-års hændelse om 30 år, der er kritisk for den valgte kronkoten på +2,0m. Dette på trods af, at der ved nogle scenarier kan forekomme betydelig vertikal akut erosion foran diget.

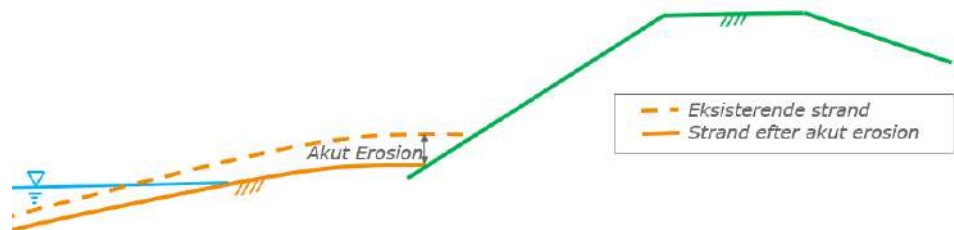
Det er således ikke muligt at definere en bestemt minimums fodkote som altid skal bevares foran diget for at undgå, at for store bølger rammer diget samt for at undgå, at der sker for meget bølgeoverskyl.

Dog er det vigtigt at definere en minimums fodkote ift. at beskytte digets fod mod erosion. For at vurdere digets fodkote tages udgangspunkt i eksisterende forhold.

Kombinationen med en vandstand på +1,0 m DVR90 og en signifikant bølgehøjde på 45 cm giver den største vertikale akutte erosion på op til 0,5 og 0,25 m, hvis digefoden placeres i hhv. kote +0,94m eller +0,7 m DVR90. Underkanten af ler-membranen på forsiden af diget skal derfor som minimum graves ned til +0,45 m DVR90, Figur 5.13.

I tilfælde hvor der ikke forventes betydeligt akut erosion grundet bølgepåvirkning graves digets ler-membran normalt 30 cm ned under terræen.

Figur 5.13: Principskitse, der viser hvordan underkanten af diget er gravet ned ift. foranliggende terræn både før og efter stormflodshændelsen.



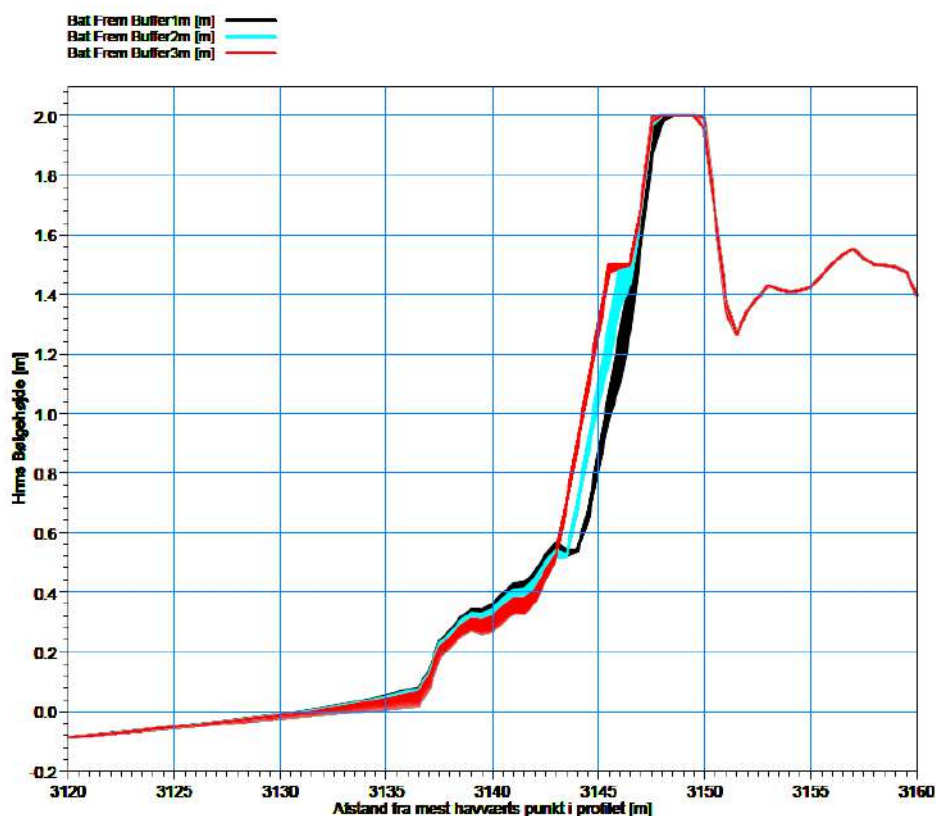
I en senere projektfase er det nødvendigt at undersøge om terrænet ved digefoden er så lavtliggende, at der kræves sandfodring for at holde minimums fodkoten, selv hvis diget placeres længst muligt landværts. Gennem digets levetid vil det være nødvendigt at monitorere om dette forhold er opretholdt eller om der skal vedligeholdelsesfodres for at holde minimums fodkoten.

Initialt anbefales at udlægge en sandbuffer på forsiden af diget, for at sikre diget imod akut erosion før vegetationen har fået ordentligt rod fæste. Derfor forventes det ikke nødvendigt at strandfodre ift. at opretholde minimums fodkoten, da sandbufferen vil kunne sikre dette.

Bufferen placeres opad diget til en bestemt topkote med en forsidehældning på 1:5. Bredden og mængden af denne buffer findes ved at modellere en hændelse, hvorunder det sikres at bølgerne ikke eroderer af selve diget, Figur 5.14.

Fra Figur 5.14 anbefales det, at topkoten af sandbufferen ikke er mindre end +1,5 m DVR90 og består af minimum 3 m³/m. Således vil forsiden af diget ikke blive eroderet før rodnettet er tilstrækkeligt udviklet til at modstå en evt. 100 års bølgepåvirkning, se Figur 5.14. En sandbuffer af denne størrelse svarer omtrent til en bredde af bufferkronen på 1,5 – 2 m afhængigt af det foranliggende terræn, Afsnit 5.4.1. For hele projektstrækningen vil mængden af sand til bufferen være 6.500 m³.

Figur 5.14: Erosion af foranliggende sandbuffer og dige før veludviklet rodnet for kombinationen med en vandstand på +1,0 m DVR90 og en signifikant bølgehøjde på 0,45 m.



5.4 Samlede strandfodringsmængder

Beregningerne i dette notat tager udgangspunkt i strandfodring hvert 5. år for at reducere mobiliseringsomkostningerne til entreprenøren. Det anbefales som minimum at vedligeholdelsesfodre som kompensation for havspejlsstigning og kronisk erosion, se Afsnit 5.4.1.

De resulterende sandfodringsmængder, der er nødvendige for at kompensere for havspejlsstigning og kronisk erosion er vist i Tabel 5.4. Mængderne varierer årligt mellem 1,0 - 1,3 m³/år/m og ved strandfodring hvert 5. år mellem 5,0 - 6,5 m³/5år/m.

Tabel 5.4: Samlede sandmængder til kompensation for kronisk erosion og havspejlsstigning.

	Kystvej 40B	Kystvej 75	Kystvej 110	Pile Alle 1	Strandv. Grønh. 9	Strandv. Grønh. 30
Sandmængde mod kronisk erosion og havspejlsstigning [m ³ /år/m]	1,1	1,1	1,0	1,2	0,8	1,3
Sandmængde mod kronisk erosion og havspejlsstigning for 5 år [m ³ /5år/m]	5,5	5,5	5,0	6,0	4,0	6,5

Så længe minimums-fodkoten opretholdes foran diget vurderes det ikke at være nødvendigt at fodre som kompensation mod akut erosion. Dog anbefales en buffer på minimum $3 \text{ m}^3/\text{år}/\text{m}$ udlagt initialt for at beskytte diget indtil vegetationen har fået et godt rodfast.

Generelt er strandfodringen til kompensation mod kronisk erosion og havspejlsstigning er mere end $3 \text{ m}^3/5\text{år}/\text{m}$ og der er derfor ikke nødvendigt at opbygge sandbufferen yderligere, Tabel 5.4.

Tabel 5.5 viser en oversigt over de samlede anbefalede strandfodringsmængder som er nødvendig for at beskytte det nye dige og stabilisere strandbredden.

Tabel 5.5: Samlede strandfodringsmængder for hele projektstrækningen, som anbefales fodret med initialt og som vedligehold.

Strandfodring	Fodring [m ³]
Havspejlsstigning	10.000
Kronisk erosion	1.500
Akut erosion	-
I alt	11.500

5.4.1 Vedligehold

I dette projekt er der mulighed for at strandfodringsmængderne til forebyggelse af kronisk erosion bliver mindre med tiden.

Årsagen er, at en del af sandet ved Binderup-Grønninghoved forventes at blive aflejret i den centrale del af bugten og herved medvirke til at fremrykke stranden her og reducerer erosionen langs den resterende del af bugten. Skulle det vise sig, kan det overvejes at udskyde vedligeholdelsesfodringerne.

Ligeledes kan vedligeholdelsesfodring ift. kompensation for havspejlsstigninger revideres alt efter om observationerne og prognoserne for de forventede havspejlsstigninger ændrer sig.

Det anbefales at monitorere stranden jævnligt for at sikre, at der er en tilstrækkelig høje af stranden foran diget. Er denne forudsætning ikke opfyldt, bør en buffer svarende til den manglende mængde udlægges.

Det anbefales at vedligeholdelsesfodre hvert 5. år, da mobiliseringsomkostninger ved fodring med sandsuger og rørledninger er store.

Skulle der ske særligt meget erosion grundet ekstraordinære meteorologiske forhold, kan det blive nødvendigt med vedligeholdelsesfodring inden de 5 år er gået.

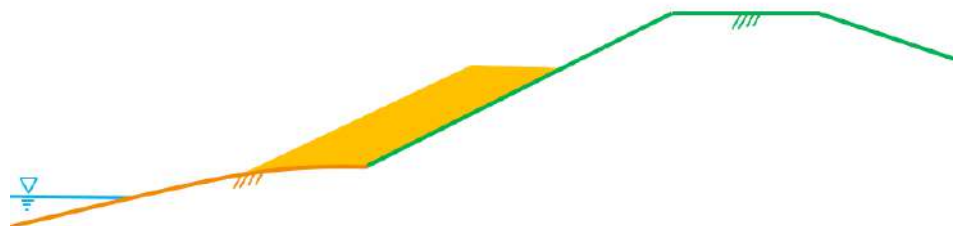
Det er vigtigt at understrege, at en vedligeholdelsesfodring ikke udlægges som kompensation for hvad der har været eroderet de sidste 5 år. En vedligeholdelsesfodring udlægges som kompensation for hvad der forventes at blive eroderet de kommende 5 år.

5.4.2 Udlægning

Det anbefales at udlægge strandfodringerne op ad diget til kote +1,5 m DVR90 og med en forside med hældning på 1:5. Således vil sandet forblive i profilet gennem

længere tid. Sandet vil dermed reducere bølgeenergien på diget og bagstranden over længere tid, se Figur 5.15.

Figur 5.15: Principskitse af udlægning af sandfodring (gul) på forside af dige (grøn). Forsidehældning på fodring kan være fladere end forsidehældningen af diget.



Det anbefales, at udlægning af sand udføres jævnt langs længere strækninger.

6 Økonomi

Anlægsoverslaget for strandfodring er udarbejdet under antagelse af, at sandet pumpes ind på stranden gennem rørledning fra sandsuger.

Pris på udlagt sand er vurderet til omkring 40-45 kr./m³ ekskl. moms.

Mobiliseringsomkostningerne til sandsuger og rørledning er vurderet til ca. 500.000 kr. ekskl. moms per fodring.

Det samlede anlægsoverslag er vist i Tabel 6.1 og svarer til ca. 1 mio. kr. pr. år i gennemsnit ekskl. moms.

Tabel 6.1: Samlede priser for strandfodring af hele projektstrækningen, som anbefales fodret med hvert 5. år.

Strandfodring	Fodring [kr./5 år]
Mobilisering	500.000
Havspejlsstigning	400.000
Kronisk erosion	60.000
Akut erosion	-
I alt	960.000

Digets kerne kan sandsynligvis med fordel opbygges af sand pumpet ind fra sandsuger sammen med fodringsmaterialet.

Udbudsfasen vil vise om det er billigere at tilkøbe materialer til opbygning af dige og strandfodring fra land.