

# Vurdering af kysterosion foran dige - Gniben Digelag

Vurdering af erosionsforhold og ralbanketløsning for  
Gniben digelags dige

Rapport  
11831265

16-04-2024

Digelaget Gniben - Sjællands Odde

Vurdering af kysterosion foran dige - Griben Digelag

Rapport  
Projekt No 11831265.

Udarbejdet til: Digelaget Griben - Sjællands Odde  
Repræsenteret af Hr. Anders Liehti

Kladder

Contact person:	Anders Liehti, <a href="mailto:anli@dhigroup.com">anli@dhigroup.com</a>
Project Manager:	Nils K. Drønen
Quality Supervisor:	Berry Elfrink
Author:	Nils Kjetil Drønen
Project No.:	11831265
Approved by:	Flemming Jakobsen
Approval date:	16-04-2024
Revision:	Final 1.0
Classification:	<b>Åben</b>

File name: 11831265 - Vurdering af erosionsforhold foran dige - Griben.docx

## Contents

<b>1</b>	<b>Indledning</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Kysterosion</b> .....	<b>5</b>
2.1	Ortofotos .....	5
2.1.1	Kystlinjerne 1970 hhv. 2023 .....	5
2.2	Kystlinjens udviklingshistorie: 2006, 2013, 2014 .....	6
2.3	Vurdering af sedimentforhold .....	8
2.4	Vurdering af kysttilbagerykning .....	8
2.5	Diskussion af særlige ydre påvirkninger .....	9
<b>3</b>	<b>Vurdering af eksisterende bølgedæmpende tiltag (ralbanket)</b> .....	<b>10</b>
3.1	Vandstande og bølger i området under stormhændelser .....	10
3.1.1	Kystdirektoratets højvandsstatistik.....	10
3.1.2	DHI's model database MOOD .....	10
3.2	Bølgepåvirkningen af ralbanket under storme .....	12
3.3	Vurdering af muligheden for en stabil ral/stenbanket.....	12
3.4	Ralbanketten.....	13
3.5	Overvejelser angående ralfodring .....	13
3.6	Genvurdering af ralbanketten som virkemiddel .....	14
3.6.1	Generelt om profilændringer ved bølgeeksponerede kyster.....	14
3.7	Tilførsel af ral-sten-grus materiale til kysten .....	14
3.7.1	Fordele ved sten, grus og ralfodring .....	15
3.7.2	Overvågning og tilpasning .....	15
3.8	Ligevægtsprofiler foran ralbanket.....	15
3.8.1	"Closure depth" og grænse for sedimentbevægelser .....	16
3.8.2	Forslag 1: Udvikling af et forstrandsprofil.....	16
3.8.3	Forslag 2: Ralbankettens dimensioner.....	18
3.8.4	Forslag 3: Dæksten .....	19
3.8.5	Forslag 4: Videreudvikling af banketten .....	19
3.9	Konklusion .....	20
<b>4</b>	<b>References</b> .....	<b>22</b>

# 1 Indledning

**Digeløsningen etableret af Gniben Digelag i samarbejde med Odsherred Kommune vurderes hhv. revurderes i dette arbejde, idet det primære tiltag til at nedbringe risikoen for brud på diget – nemlig en videreudvikling af ral-banket princippet til at tage energi ud af bølger mod stranden – med henblik på at oversvømmelsessikringen forstærkes.**

Det blev klart for beboere i området at risikoen for oversvømmelse er stor når ekstreme storme som Bodil (2013) rammer den vestlige side af Odden. Under Bodil stormen oversvømmedes mange boliger med skader på bygninger og inventar og dermed økonomiske tab som resultat.

I den forbindelse blev der efterfølgende etableret et dige (2014) og en yderligere foranstaltning på stranden – en ralbanket i nærheden af vandlinjen – til at bryde bølger og dermed beskytte diget mod de kræfter en brydende bølge ellers ville have kunne påvirke diget med.

I denne rapport præsenteres baggrunden for arbejdet (data og antagelser) og der præsenteres i første halvdel et princip for, hvordan der kan arbejdes videre med at etablere en beskyttelse af diget ved at fodre med ral og sten - herunder 1) at øge volumen af banketten og 2) stabilisere profilet foran banketten.

Som det vil fremgå af rapporten er forslagene et oplæg til at igangsætte arbejdet og vil indeholde tilstrækkelige informationer til at opbygge et egentligt program for opstart og vedligehold:

- 1) Initialfodring
- 2) Overvågning (opmåling af effekter af storme mv.)
- 3) Løbende vurdering (genvurdering) effekterne – tilpasset behov for opfølgende fodring fodringmateriale, placering og mængder
- 4) Opfølgende fodring

Det er således meningen at punkt 2-4 gentages med jævne mellemrum, gerne en gang om året og gerne før og efter stormsæson.

Den anden halvdel af vurderingen angår etablering af dæksten som stabiliserende element for selve ralbanketten. Dette forslag diskuteres, men anbefales ikke, idet det vurderes at være alt for risikofyldt i forhold til dets virkning og stabilitet. Forslaget ligner et begyndende forsøg på at lave en egentlig fast konstruktion - og der vil være alt for stor risiko for at "konstruktionen" fejler på et strandplan med store bølger og bevægelige sedimenter (erosionsskår og ustabilitet). Hvis der skal laves en egentlig konstruktion, skal denne funderes og udvikles ud fra solide ingeniørmæssige principper. Derudover vil en sådan konstruktion der blot tilføjer "dæksten" til en ralbanket ikke følge almindelig praksis i Danmark må anses for at udgøre et eksperiment.

## 2 Kysterosion

Kysten foran diget er under stadig erosion og har været det over historisk tid.

### 2.1 Ortofotos

#### 2.1.1 Kystlinjerne 1970 hhv. 2023

For at få et indtryk af hvordan kysten har flyttet sig over et længere tidsperspektiv vises først til sammenligning ortofotos med indtegnede kystlinjer i året 1970 og i året 2023 (se Figur 1).



**Figur 1 Kystlinjer 1970 (turkis) hhv. 2023 (rød). Øverst: Kystlinjerne plottet over 1970 ortofoto. Nederst: Kystlinjerne plottet over 2023 ortofoto.**

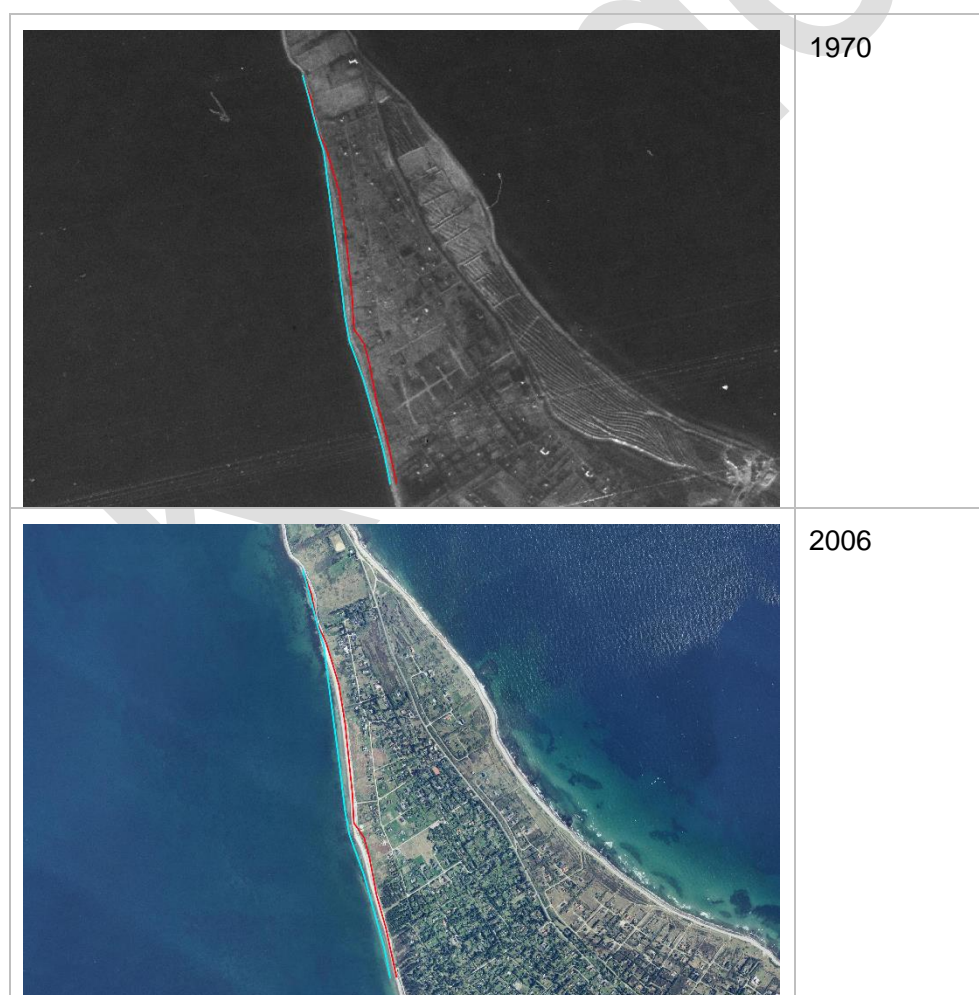
Af denne figur ses og vurderes følgende:

- Der er sket en markant tilbagerykning af kystlinjen (vandlinjen) i denne periode.
- Tilbagerykningerne varierer langs kysten i spændet ca. 30m-55m

- I den nordlige ende (nord for fokusområdet) er der mindre tilbagemykninger, hvilket kan skyldes, at der i dette område gennem årene på forskellige vis er udviklet hård kystbeskyttelse.
- Sidstnævnte betyder ikke nødvendigvis, at der ikke har været erosion i dette område, idet der vil kunne foregå erosion foran kystbeskyttelsen, sådan at bundniveauet foran kystbeskyttelsen sænker sig uden af dette kan ses på kystlinjen (kystbeskyttelsen "fastholder" kystlinjen, men erosionen vedbliver).
- Udenfor det analyserede område mod nord ses ingen kysttilbageknying.
- Udenfor det analyserede område mod syd er der en tendens til erosion.

## 2.2 Kystlinjens udviklingshistorie: 2006, 2013, 2014

For at vurdere erosionen i de mellemliggende år (mellem 1970 og 2023) er kystlinjerne for 1970 og 2023 vist i Figur 2 - ortofotos for årene 2006, 2013 og 2014.





**Figur 2 Ortofotos for årene 1970, 2006, 2013, 2014 og 2023**

Af disse plots vurderes følgende:

- Der har været en markant tilbagerykning fra 1970 til 2006 (30 år)
- Raten hvormed denne tilbagerykning er sket er i størrelsesordenen 1 m per år (gennemsnitligt).
- Der er sket en vis tilbagerykning i perioden 2006 til 2023 (17 år), men raten hvormed kysten rykker tilbage synes at have aftaget relativt til perioden 1970 til 2006 (mindre end 1m per år i gennemsnit)
- En af de mest markante storme i nyere tid er Bodil december 2013, hvor der de pågældende dage var stærkt vind, der startede i vest og

efterhånden drejede om i nord. I denne periode sker der en større tilbagerykning af kysten. Ved nærmere inspektion af ortofotos vurderes det således, at der i perioden forår 2013 til vinter 2014 er sket en tilsyneladende tilbagerykning af vandlinjen i størrelsesorden 5-10m. Det eroderede materiale på kysten er ikke nødvendigvis tabt i dette tilfælde, idet erosionen sker i det øvre strandplan, hvor materiale flyttes ud i profilet uden at blive transporteret væk fra området – i.e. dette er ikke erosion af morænebund, der brydes op i finkornet materiale der ikke bundfælder før bølger og strømme har taget det væk fra området.

### 2.3 Vurdering af sedimentforhold

Stranden ses ved inspektion 12/4 - 2024 at være domineret af grus, ral og større sten. Dette materiale skrubes sammen i en banket beliggende tæt ved vandkanten og danner en formation med en vis højde, der har til formål at bryde bølger ved stormsituationer før de når det græsbeklædte jorddige, der ligger tilbagetrukket.

Det vurderes at der ikke meget sedimentært materiale tilstede i systemet ("udsultet kyst"), men at bunden et stykke udenfor kystlinjen sandsynligvis er eksponeret morænebund (et geologisk lag hvis oprindelse strækker sig tilbage til sidste istid).

Der er endvidere evidens for eksistensen af sand, idet man ved østenvind har konstateret endog store sandophobninger på stranden. Dette kan skyldes at østenvind skaber en udadgående strøm i overfladen og en kompenserende strøm mod kysten tættere på bunden der kan flytte f.eks. sand fra dybere områder mod land. Derudover kan det ikke udelukkes, at der er horisontale strømme, der yderligere kan trække sandet hen mod området hhv. ind mod land. Sandet synes dog at forsvinde hurtigt igen ved storm fra andre retninger, idet de fleste år er karakteriseret ved en stendomineret strand.

### 2.4 Vurdering af kysttilbagerykning

Der er over de sidste 54 år (fra 1970) observeret en kontinuerlig tilbagerykning af kysten i området – i størrelsesorden 50m over perioden 1970 - 2023.

Derudover er der ved etablerede stenkastninger (skråningsbeskyttelser) nord og syd for de i denne rapport betragtede område tegn på at erosion udenfor foden. F.eks. er der ved stenkastningen mod nord sket et decideret skred, og der er udover skredet opstået et åben hul mellem sten og muldlaget bag konstruktionen /6/.

Sidstnævnte vurderes til at være et udtryk for underminering at bunden foran konstruktion der afstedkommer at stensætningen er skredet ud og efterlader et hulrum bagved hhv. at bølger har forårsaget udvaskning ved overskyl og bagside-erosion.

Kysten rykker kontinuerligt (netto) tilbage over årene (erosion) og der er kun i mindre grad tendenser til at kysten opbygger sig igen ved mildere vejr og bølgeklime (recovery). Dog er der indikationer af at stenfraktioner frigivet fra morænelagene over tid tenderer til at bevæge sig mod land så der langsomt tilføres stranden mere stenmateriale. Sidstnævnte foregår dog i en grad, der ikke modsvarer den pågående erosion.



## 2.5 Diskussion af særlige ydre påvirkninger

Der er jf. vurderinger af kystlinjer fra ortofotos konstateret at der er sket erosion af kysten siden 1970 til nu, idet vandlinjen dokumenterbart er rykket mere og mere tilbage over årene.

Der er flere forhold der kan være på spil i den sammenhæng:

- 1) Bortgravning af bundsedimenter i slutningen af 1960'erne.
- 2) Underskud af bølgeenergi om sommeren, samt underskud af sedimenter i et randmoræneområde.
- 3) Øget stormintensiteter, vindstyrke og retning, der giver anledning til opvækst af større og større bølger hen over årtierne.
- 4) Vandstandsstigninger

Ad 1) Gravning i havbunden der sænker bunden på dybere vand kan i visse tilfælde teoretisk give større bølger ved kysten, men en sådan effekt forventes som udgangspunkt at være lille. Der foreligger ikke umiddelbart kvantitative informationer om bundændringerne pga. graveaktiviteter og det er derfor ikke muligt at give yderligere tal-estimer af virkningen på erosionen af disse aktiviteter.

Ad 2) Sedimenter der af bølger og strømme under storme flyttes fra højere beliggende dele af profilet (stranden) ud på dybere vand kan ende i områder, hvor de ikke under mildere forhold kan transporteres tilbage til kystlinjen og dermed ikke kunne forme en dynamisk ligevægt, men derimod resulterer i en pågående erosion.

Ad 3) Man ser i bølgedata en vis tendens til grupperinger over dekader af storme med højere bølger hhv. højere vandstande, men der er ikke som sådan konstateret en egentlig trend i bølgeenergien generelt. Der synes dog at være en årrække hvor der har været "pause" i store storme, hvilket kan være korreleret til lavere observeret i erosionrater i perioden 2006 til 2013 (før Bodil).

Ad 4) Vandstandsstigninger vil alt andet lige kunne afstedkomme en tilbagerykning af kystprofilet, men vurderinger af denne effekt tyder ikke på at effekten er en vigtig effekt i forhold til at kysten er rykket tilbage fra 1970 til i dag.

### 3 Vurdering af eksisterende bølgedæmpende tiltag (ralbanket)

#### 3.1 Vandstande og bølger i området under stormhændelser

Idet følgende præsenteres databaggrund efterfulgt af vurderinger af ralbanketten som virkemiddel til at beskytte det bagvedliggende dige og muligheder for at udvide virkningen af denne og samtidig nedsætte erosionstendenser.

##### 3.1.1 Kystdirektoratets højvandsstatistik

De højeste vandstande mål ved Odden havn angivet i nedenstående Figur 3

**Højeste registrerede vandstande [cm] i DVR90**

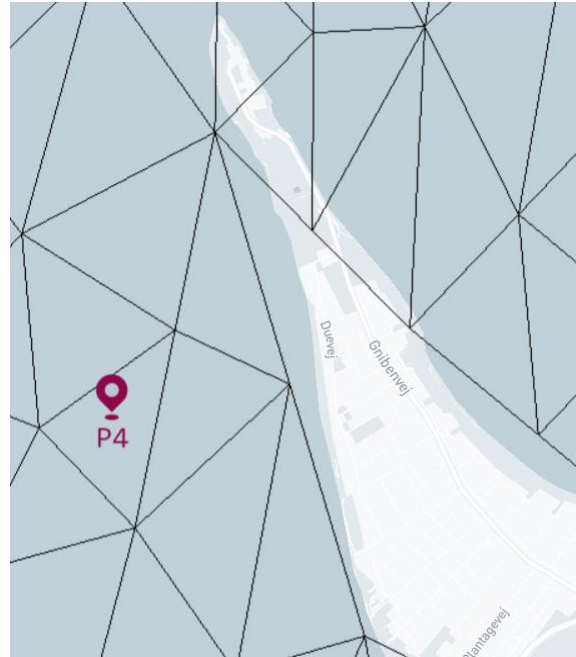
6. december 2013	163	10. december 2011	132	30. oktober 1996	111	28. september 1995	104
27. december 2016	152	11. januar 1995	130	26. november 2007	111	3. januar 2015	104
1. november 2006	143	30. januar 2000	125	11. januar 2015	111	25. december 2016	104
9. november 2007	135	26. januar 2016	116	12. januar 2007	110	19. januar 2007	103
2. marts 2008	134	27. november 2011	113	21. februar 1993	104	30. november 2015	103

**Figur 3 Højvandsmålinger ved Odden Havn, /7/**

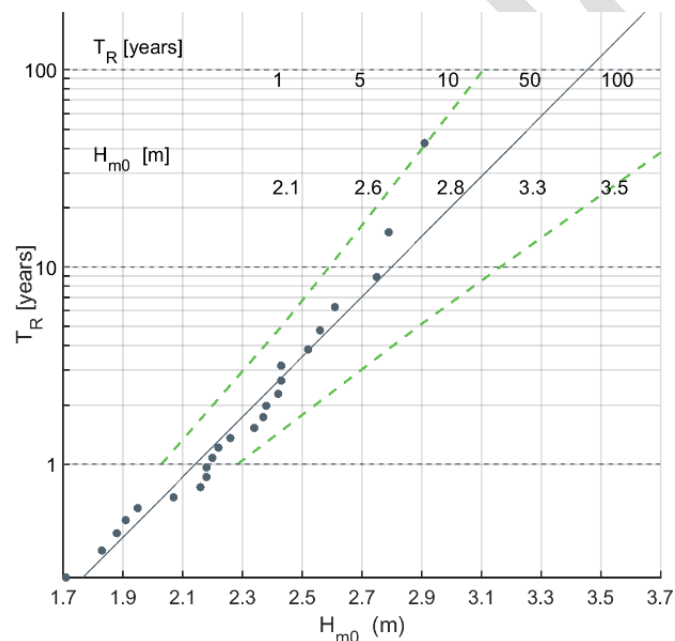
Det noteres at stormen Bodil d. 6 december udgør mest ekstreme hændelse i Kystdirektoratets statistikker.

##### 3.1.2 DHI's model database MOOD

Der er udtrukket data fra DHI's modeldatabase for perioden 1995 – 2017 i et punkt ud for kysten, jf. nedenstående Figur 4.



**Figur 4** Punkt for udtræk af bølgedata fra DHI's database MOOD ved en dybde på 6m.



**Figur 5** Ekstremværdistatistik for MOOD bølgehøjder

Det ses hvordan værdierne for ekstreme bølgehøjder "samler sig" i plottet. Der er en tendens til at værdierne "bøjer" af ved højere bølgehøjder, hvilket kan skyldes at bølgedata er udtrukket ved ca. 6m dybde og betydningen af dybderelateret bølgebrydning spiller en rolle ved højere bølger på en sådan dybde. På den baggrund er de angivne højere returperioder sandsynligvis en anelse for høje.

I det følgende vil vi anvende bølgehøjderne under Bodil som designmodel for den videre udvikling af beskyttelseskonceptet.

### 3.2 Bølgepåvirkningen af ralbanket under storme

I perioden 1995-2017 betragtes begivenheder ved den højeste bølgehøjde i området (jf. MOOD database) jf. bølgerne der ankom til området under Bodil 2013.

I dette datasæt ses der en forskydning i tid mellem maksimal bølgehøjde og maksimal vandstand i den givne periode. I Tabel 1 og Tabel 2 er tal for disse forhold angivet.

Det ses hvordan bølgehøjden er størst 12 timer før vandstanden er nået sit maksimum. Dette skyldes at området befinder sig ca. midt imellem den jyske østkyst og den svenske vestkyst ("vippepunkt" for vindstuvning) og at der skabes strømninger i nord-syd-retningen igennem bælteerne og Øresund. Der er således omkringliggende havområder der "fyldes op" uden at området ved Gniben mærker en vandstandsstigning i den periode hvor dette pågår. Når vinden løjer af flyder de ophobede vandmængder i havområder øst (mod Sverige) og syd (Østersøen og Bælteerne) for området tilbage og passerer området med vandstandsstigning til følge. På dette tidspunkt er bølgehøjden faldet fordi vindstyrken er faldet.

Denne forsinkelse mellem vindpåvirkning og vandstandsstigning er et fænomen der også ses i den vestlige del af Østersøen, hvor de høje vandstande går under navnet "stille stormfloder".

**Tabel 1 Højeste bølgehøjde (Bodil) i perioden 1995-2017.**

	Bølgehøjde (m)	Vandstand (m)	Tid til VS peak (h)	Bølgehøjde (m)	Vandstand peak (m)
06.12.2013	2.8	0.3	12	2.2	1.6

**Tabel 2 Bølgeperiode og bølgeretning fro højeste bølge i perioden 1995-2017**

Dato	Bølgehøjde (m)	Bølgeperiode (s)	Bølgeretning (deg N)
05.12.2013	2.8	6.8	270
06.12.2013	2.2	6.3	310

### 3.3 Vurdering af muligheden for en stabil ral/stenbanket

Sedimenter ved kyster flyttes helt generelt på to måder:

- Tværgående transport i profilet
- Langsgående transport langs kysten

*Tværgående transport* skyldes vandbevægelser der er mere eller mindre i bølgernes retning tæt ved land, samt returstrømme / understrømme der skyldes især brydende bølger.

*Langsgående transport* er forårsaget af bølger der rammer kysten med en vis vinkel og samtidig tæt ved land bryder. Dette skaber en kraft der skaber en langsgående strøm, som ophvirvlet bundsediment bliver transporteret med.

Det vurderes at netto langsgående transport af sedimenter (herunder ral) i området er minimal, idet orienteringen af kysten vurderes til at være nogenlunde normalt på bølgernes retning tæt ved land (lige før bølgerne bryder). Dette er et fænomen der ofte ses at være gældende for de øvre dele af sten og ral-dominerede kysters profiler.

### 3.4 Ralbanketten

Ved kysten foran diget er der som et led i beskyttelse af diget overfor bølger etableret en "manipulering" af kystprofilet i form af en ral banket. Formålet med denne banket er at bølgerne brydes over denne, og energien tages ud af bølgerne før de når at slå ind mod diget (hvor de vil kunne forårsage skader / erosion).

Denne "ral-banket" består af en dyngde ral, der kunstigt holdes ved lige tæt ved vandkanten ved at ral der er flyttet ud eller op i profilet (af bølger og strømme) efter stormen er løjet flyttes tilbage til den oprindelige position.

I det følgende diskuteres denne bankes "dynamik" og et forslag til hvordan ralformationen kan bearbejdes for at forbedre dens virkning foreslås derefter.

### 3.5 Overvejelser angående ralfodring

Ved anvendelse af sedimenter som materiale tilføjet til en kyst med henblik på at dæmpe bølger (ved at øge brydning af disse bølger) er der en række forhold, der skal overvejes:

- Hvilket fodringsmateriale, dvs. hvilke sand/grus/sten-størrelser, bør man anvende?
- Hvor store volumener skal der tilføres kysten?
- Hvordan vil fodringsmateriale rykke på sig og fordele sig når bølger og strømme påvirker materialet?

I nærværende tilfælde er der forsøgt at anvende en metode der varierer fra en egentlig ralfodring, nemlig en metode der er baseret på

- Ral-fraktionen i området "genanvendes" som "fodringsmateriale"
- Det "sammenskrabede" materiale består af flere forskellige fraktioner og inkluderer både grus, ral og større sten.
- Der tilføres ikke nyt materiale, idet tilgængeligt ral skubbes ind i et banket mellem hver storm
- Materialet flytter sig i profilet, dvs. banketten ændrer sig i dimensioner og udstrækning.

Det vurderes at det er en glimrende taktik at arbejde med en ralbanket et stykke væk fra det sårbare dige, men risikoen synes at være stor idet det ikke er klart om man ved næste storm kan opleve at:

- Ralbanketten eroderer væk ved høje bølger der virker direkte på den ydre del af banketten (skrænterosion)
- Ralbanketten overskyldes ved ekstremt højvande hvormed der skabes erosion pga. det strømninger henover banketten (fladeerosion).

## 3.6 Genvurdering af ralbanketten som virkemiddel

### 3.6.1 Generelt om profilændringer ved bølgeeksponerede kyster

En ralbanket kan på forhånd forventes at ville flytte sig. Især forventes det at ral transporteres ud i profilet pga. en kombination af opskylsbølger (i tilfældet af større bølger der rammer banketten under normal vandstand) og den af bølgerne genererede understrøm under brydende bølger henover ralformationen ved højere vandstand.

Det fænomen at ændringer i det naturligt forekommende profil ændrer sig under bølgepåvirkning er velkendt ved alle kyster.

De to overordnede "mekanismer" der styrer dette er:

1. Erosion af kystprofilen under kraftige bølgepåvirkninger (vinterstorme), idet de inderste / øverste dele eroderer og det eroderede materiale flyttes ud i de dybere områder af profilet
2. Genetablering af profilet idet bølgerne under mildere bølgeklimaer (sommer) skubber det eroderede materiale tilbage (mod land).

Foran diget ved Gniben ser det ud til at der ikke er balance mellem erosion under vinter storme og tilbagevandring af materiale under milde forhold.

Dette indikerer at materiale tabes på dybere vand, dvs. det materiale der eroderes fra strandplanet under vinterstorme og transporteres ud på dybere vand, ikke kan skubbes tilbage under mere milde sommer forhold (recovery), se f.eks. /2/.

Der er flere forhold der vil kunne give en forklaring af denne situation:

- 1) Der er generelt mangel på sedimenter i området, og der er store områder med blotlagt eroderbar moræne – moræne som vil blive hvirvlet op som fine partikler og blive ført bort fra området med strømme og bølger.
- 2) Der er mangel på ikke-brydende bølger med stor skævhed / asymmetri der mellem store storme ville kunne bringe sedimenter tilbage til kysten (efter at have været eroderet på kysten og bragt ud i profilet under stormene).

Med dette udgangspunkt forslås nu følgende ide.

## 3.7 Tilførsel af ral-sten-grus materiale til kysten

Vi er nu klar til at udvikle den overordnede ide: Tilførsel af ral / sten / grus til kysten.

Med tilførsel af en passende mængde sten / grus / ral materiale til kystens øvre profil (herunder stranden) vil man kunne øge stabiliteten af stranden herunder 1) den våde del af profilet mod erosion og 2) ral-grus-sten banketten selv.

Ved at udvide sten-grus-ralbanketten med nyt materiale bragt til området udefra og under storme lade bølgerne erodere dennes bankets forside vil man opnå følgende:

- Materialet vil blive trukket ud i profilet hvor man opnår en erosionsbeskyttende effekt i profilet.
- Sten-grus-ral-banketten gøres stor nok i volumen og høj nok til at bryde bølgerne så den eroderede mængde ved storme er minimal i forhold til at hele "formationen" stadig virker beskyttende – i.e. minimering af risiko for gennembrud.
- Efter hver storm tilføres der nyt materiale til ral-sten-banketten, hvormed man så at sige har etableret en "maskine" (erosion- profil-stabilisering -genpåfyld), der over tid vil stabilisere profilet med flere og flere ophobede sten, grus og ralfraktioner. Over tid er det så meningen at man vil opstå en ligevægt hvor der er tilstrækkeligt sten, grus og ral materiale til at profilet kan opretholde sig selv og hvor banketten indgår som en integreret del af dette – muligvis uden behov for meget vedligehold.

### 3.7.1 Fordele ved sten, grus og ralfodring

Det tiltrækkende ved ral og stenfodring er, at man ikke vil forvente et tab af sedimenterne på langs af kysten. Især for ral og sten vil det gælde at de vil flytte sig frem og tilbage i profilet men ikke forlade område på langs med kysten. Se f.eks. /4/.

### 3.7.2 Overvågning og tilpasning

Den eksakte virkning af denne metode kan kun tilnærmelsesvis forudsiges. Der er gode chancer for at der en positiv virkning som beskrevet, men der bør indskrives et element af overvågning og tilpasning ved udførsel og vedligehold.

Overvågningen bør bestå i at opmåle kystprofilerne årligt og udtage sedimentprøver for at redegøre for hvordan de forskellige fraktioner har flyttet sig år for år. Dette må gerne ske før og efter stormsæsonen (efterår/vinter).

## 3.8 Ligevægtsprofiler foran ralbanket

Der vises nu i det følgende hvordan sten-ral-størrelser der skal fodres med kan bestemmes og baseret på dette hvilke dimensioner banketten skal udføres med (før bølgerne begynder at bearbejde profilet og banketten).

Der anvendes en teori om ligevægtsprofiler "Dean's ligevægtprofil" udviklet til at bestemme hvordan den dykkede del af profilet indstiller sig ved forskellige sediment-størrelser, se. f.eks. /2/.

Et ligevægtsprofil har erfaringsmæssigt vist sig ca. at indstille sig sådan et det ca. følger en formel

$$D = A \cdot x^{\frac{2}{3}}$$

Hvor D er dybden, x er afstanden fra vandlinjen (ud på dybere vand) og A er et tal der kan bestemmes ud fra det givne sediments faldhastighed.

Ved fodring i profilet med forskellige sedimenter får man således forskellige forløb at profilet.

### 3.8.1 "Closure depth" og grænse for sedimentbevægelser

For at bestemme hvilke sedimentstørrelser der kan understøtte stabiliseringen af den dykkede del af profilet.

Denne bestemmes ud fra Hallemeysers formel (se f.eks. /2/), der angivet til hvilken dybde i et givent profil kan ske transport af sedimenter.

$$D_{closure} = 2.28H_{12} - 68 \left( \frac{H_{12}^2}{gT_{12}^2} \right)$$

Hvor index "12" for bølgehøjden  $H_{12}$  indikerer at værdien kun overskrider 12 timer per år, dvs. 12 timer ud af  $365 \cdot 24 = 8760$  timer på et år, hvilket svarer til en sandsynlighed på 0.137%.  $T_{12}$  er den bølgeperiode som denne bølge har.

Bølgedatasættet fra DHI's MOOD database for det givne punkt giver følgende værdier

$$H_{12} = 2,0m$$

$$T_{12} = 7,4m$$

Dette resulterer i en dybde, hvor ingen sedimentbevægelser (for større dybder) sker ved dybden

$$D_{closure} = 4m$$

Ved inspektion af data for bundkoterne indses det, at det netop er ved denne dybde (ved middelvande) at profilerne skifter karakter fra at være hældende til at blive mere vandrette.

### 3.8.2 Forslag 1: Udvikling af et forstrandsprofil

For at forbedre ralbankettens funktion foreslås det som nævnt, at der tilføres mere grus og ral til området, sådan at det totale ralvolumen i profilet øges.

Ved at gøre dette og samtidig tillade at rallen ved almindelig bølgevirkning fordeler sig naturligt over profilet øger man sandsynligheden for at der kan opstå en egentlig raldomineret forstrand. Hvis en sådan naturlig proces kan danne en egentlig forstrand med det tilførte materiale forventes det ydermere, at der vil være et minimalt vedligehold af området.

Skal der en årrække tilføres en yderligere mængde ral (gerne indført ved ralformationens top) – en tilførsel, der over tid er det forventeligt at dette vil blive mindre og mindre efterhånden som de raldominerede profil indstiller sig.

Virkningen af dette tiltag kan ikke afgøres alene ved teoretiske betragtninger, men er nødt til at indgå i en direkte afprøvning. Det foreslås at der udføres et forsøg hvor grus-ral blandingen tilføres over et længere stræk, hvorefter formationens udvikling følges over en eller flere vintre.

Alt efter hvor stor en del af profilet under vand man ønsker dækket med materiale bragt ud af bølger og strømme kan man forstillet sig en blanding af grus og ral.

Disse to fraktioner er karakteriseret ved følgende middeldiametre  $d_{50}$

Grus - $d_{50}$	Ral - $d_{50}$
1 mm	1 cm



Ved at fodre med sådan eller lignende materiale vil man kunne ændre profilet foran banketten og samtidig fremskyde vandlinjen.

I nedenstående Figur 6 er teoretiske ligevægtsprofiler anvendt for at vurdere, hvordan anvendelsen af to forskellige fraktioner vil opføre sig.

I figuren er der vist to situationer – en med en ønsket fremrykning på 10m og en på 20m.

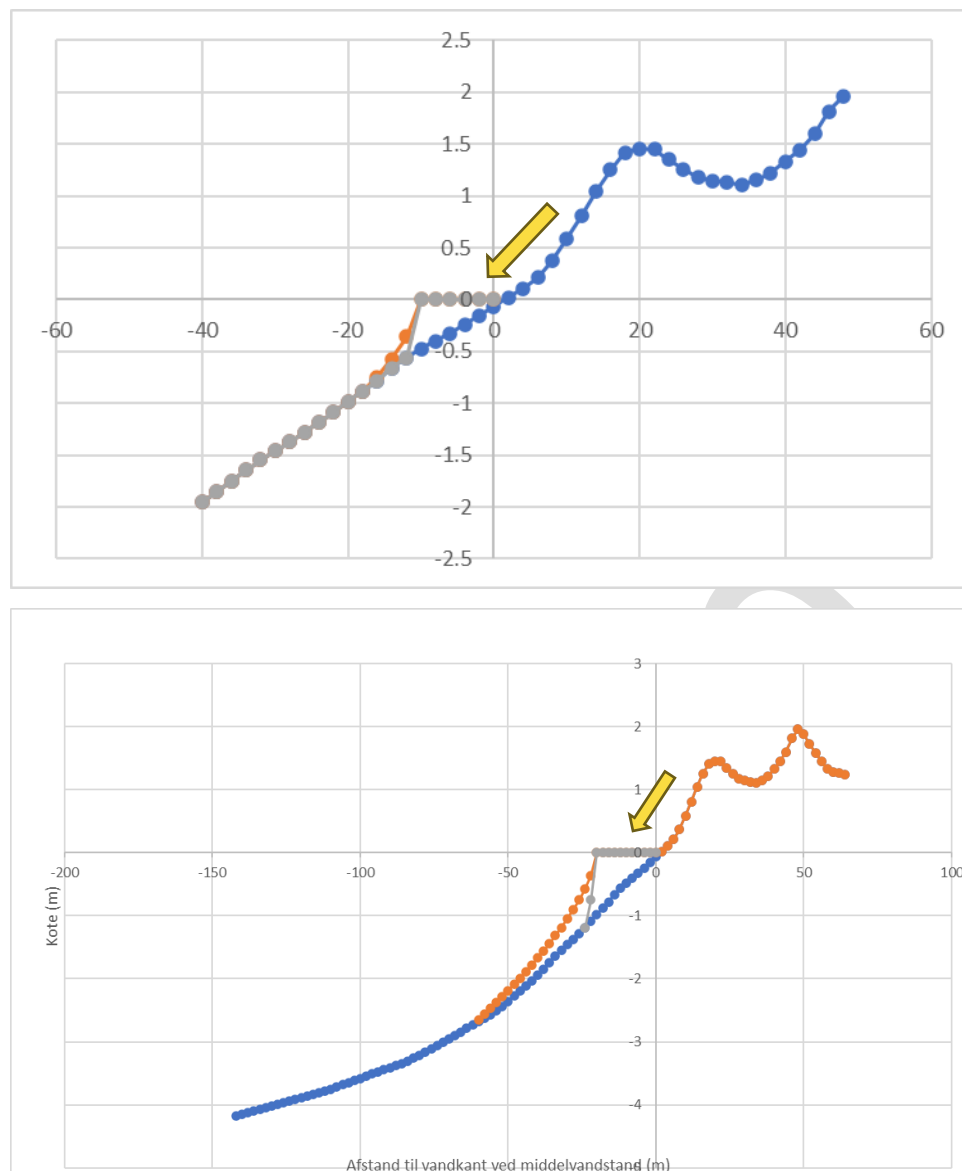
De tilsvarende voluminer per langsgående løbende meter er angivet i nedenstående tabel:

Fremrykning (m)	Volumen grus (m <sup>3</sup> per m)	Volumen ral (m <sup>3</sup> per m)
10	4	3,5
20	23	12

Det ses at man for at rykke kysten frem 10m ifølge denne vurdering skal fodre ca. 3-4 m<sup>3</sup> per løbende meter.

Hvis man ønsker en fremrykning af kysten på 20m, skal der temmelig store fodringsmængder til før profilet er i ligevægt.

Kladder



**Figur 6 Ligevægtsprofiler henover eksisterende profil. Orange=grus. Grå=Ral. Blå=Målt profil. Øverst: 10m kystfremrykning. Nederst: 20m kystfremrykning.**

### 3.8.3 Forslag 2: Ralbankettens dimensioner

Ralbanketten skal have et tilstrækkeligt stort volumen og en tilstrækkelig højde for at

- 1) Bankettens topkote modsvarer vandstand og bølgestuvning
- 2) Bølgeinduceret erosion af ralbankettens ikke nedbryder banketten

Ad 1) Dette kan f.eks. tage udgangspunkt i den kote der er bestemt for diget (designværdi). De største bølger ankommer ifølge modeldata typisk til området ved en lavere vandstand og ved højvande er deres højde mindsket og deres retning ikke stik vest.

Man kan tilnærme en dimensionsgivende højde med:

Maximum kote = Vandstand + 20% af bølgehøjden (bølger med retning mod kysten)

Anvender man stormen Bodil som eksempel vurderes det at bankettens topkote således bør være i størrelsesorden 1,5m eller mere, dvs. samme størrelsesorden som (om end en smule lavere end) diget.

Ad 2) For at undgå at banketten eroderes væk, kan der med fordel tilføjes materiale i form af strandfodring. Der kan således tilføjes ekstra materiale (ral, grus, sten) til at bankettens længderetning i samme grad som der er en trussel om erosion.

Såfremt det kan tillades af godkendende myndigheder (kommune evt. understøttet af Kystdirektoratet) kan det overvejes at blande større sten i banketten, end de allerede forekommende sten / ral /grus fraktioner området.

Det eroderede materiale tabes ikke væk fra kysten, men vil falde ud i profilet har mulighed for at lejre sig i profilet og dermed bidrage med en vis erosionsbeskyttende virkning.

### 3.8.4 Forslag 3: Dæksten

Den anden del af vurderingen handler om et forslag om at tilføje dæksten på overfalden af banketten med henblik på at stabilisere banketten. Den vurderes til at være en meget risikofyldt metode og kan ikke umiddelbart anbefales. Dette skyldes at ralbanketten er etableret på en strand med meget varierende bølge- og vandstandsforhold og sedimentbevægelser, og at større sten i et sådant miljø vil give anledning til vanskeligt forudsigelige / komplicerede virkninger f.eks. i form af erosionsskår ("scour") omkring stenformationen.

Der er efter DHIs erfaring ingen gode eksempler på at placere større stenelementer på et dynamisk strandplan - slet ikke uden at arbejde med en dybereliggende fundering, hhv. erosionsbeskyttelse af foden af konstruktionen. Et egentligt funderet anlæg vil være en helt anden type løsning, som nærmer sig en fremskudt bølgebryder eller ligefrem et fremskudt dige med indbygget erosionssikring.

Det kan ikke udelukkes at en egentlig velkonstrueret fremskudt konstruktion kan udgøre en teknisk udmærket løsning, men det vurderes til at blive en økonomisk dyr løsning. Det vil derudover ændre hele områdets karakter. I et sådan tilfælde alligevel skal også suppleres med fodring og erosionsbeskyttende foranstaltninger foran konstruktionen for at den vedbliver at være stabil.

### 3.8.5 Forslag 4: Videreudvikling af banketten

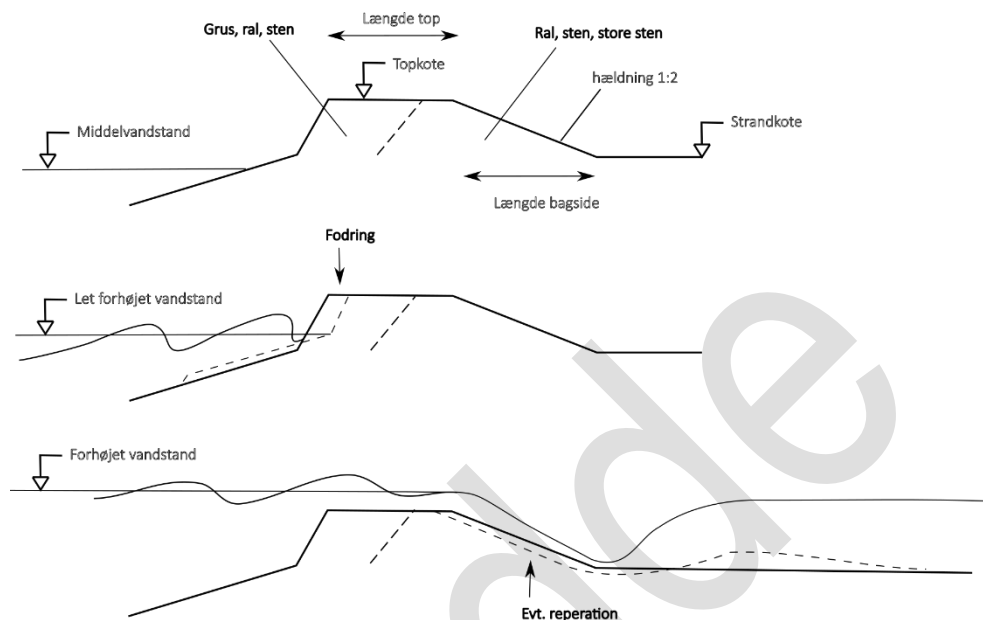
Banketten påvirkes af havet på forskellige måder alt efter hvilke vind og vandstandsforhold der er fremherskende på det givne tidspunkt. Derfor kan det overvejes at udvikle banketten så den under forskellige vind, vandstand og bølge-forhold fungerer efter hensigten nemlig at være: 1) bølgebryder og 2) naturlig "fodringskilde" til profilet foran.

Derudover vil formationen – i grader afhængigt af, hvilken topkote der vælges – opleve ekstreme kræfter, med fare for at blive eroderet, hvis den overskylles ved højvande.

I nedenstående figur er princippet for en udvikling af banketten så den bedre møder disse krav givet. De endelige dimensioner af videreudviklingen skal

udvikles i samspil med digelag og godkendelsesmyndigheder, idet der især skal være enighed om, hvilken risikoprofil man ønsker at følge – dvs. en vurdering af sammenhængen mellem økonomisk investering og effekt.

Den fulde konfiguration vil kunne etableres i etaper over en række år.



**Figur 7 Principskitse af en videreudviklet blandet grus-ral-sten banket med større sedimenter (sten) i hældningen mod land og med et fodringsområde mod havet.**

### 3.9 Konklusion

I denne rapport er forholdene ved fokusområdet - i.e. kysten foran diget etableret af Griben Digelag (i 2014) - undersøgt.

Ved vestenvinde er bølger og vandstande forskudte i tid, idet bølger dannes af vinden og dermed aftager når vinden løjer af - eller drejer væk fra vest når vinden drejer væk fra vest. Dette gør at brydning af bølger mod banketten i højere grad end ved andre forhold sker når bølgerne dannes ved vestenvind og vandrer fra vest mod øst. Så længe dette sker ved lavere vandstand er den nuværende principielle løsning med en fremskudt ralbanket og et tilbagetrukket dige en mulighed.

Det anbefales at fodre banketten op til en kote i størrelsesordenen valgte / eksisterende digekote og derudover årligt at fodre så meget som muligt med en blanding af grus, ral og større sten. Fodringen kan f.eks. med fordel tilføjes fronten og har til hensigt at øge volumen og dermed etablere en bufferkapacitet overfor erosionsgennembrud.

Bankettens længde skal således øges så meget det er muligt indenfor de ressourcer, der kan sættes af til dette.

Ydermere kan man overveje at lade større sten indgå i banketten, især den del der vender væk fra havet. Et oplæg til et princip for design er givet i rapporten.

Det anbefales parallelt hermed at følge virkningen af storme på profilet ved årlige opmålinger af bunden og ved at tage sedimentprøver til at vurdere spredningen af grus, ral og sten. Ud fra sådanne løbende målinger udvikles en mere optimeret forståelse af situationen – og på basis af en sådan vil de tilgængelige midler kunne anvendes mest optimalt til at sikre området.

Kladder

## 4 References

- /1/ Teknisk og økonomisk redegørelse, M.S. Rosbæk, udgave 7, bilag 7, 14. oktober 2011
- /2/ Mangor, K., Drønen, N., Kristensen, S, Kærsgaard, K., Shoreline Management Guidelines, 2017, gratis DHI e-publikation
- /3/ DHI's MetoOcean On Demand (MOOD): [MOODv2 Web App \(metocean-on-demand.com\)](http://MOODv2.Web.App(metocean-on-demand.com))
- /4/ DHI, Hasløv & Kærsgaard, Kystdynamik og kystbeskyttelse, 2015, åben e-rapport, Bilag 1, Kystdirektorats kystanalyse, 2015
- /5/ 1502157\_Opmålingsplan.dwg (data tilsendt DHI af kunden)
- /6/ Kystinspektion d. 12/4 – 2024 – deltagere: Nils Drønen, DHI og Lene Hjelm Poulsen, medlem af Gniben Digelag
- /7/ KDI's højvandsstatistik, 2017, e-dokument, [Højvandsstatistikker - Kystdirektoratet](#)

Kladdede

Kladder