



FORSØG MED
TRYKUDLIGNINGSMODULER SOM
KYSTBESKYTTELSESMETODE
JUNI 2022



Projekt navn	MFVM – Opmåling og tilsyn af strand
Kunde	Miljøministeriet
Projektleder	Lars Brammer Nejrup
Projekt nummer	3621800330
Til	Miljøministeriet
Udarbejdet af	Lars Brammer Nejrup & Aalborg Universitet
Kvalitetssikret af	JANN
Godkendt af	LESC
Version	1.3
Versionsdato	24-06-2022
Første udgivelsesdato	13-06-2022

Forside: Dronebillede fra opmåling i november 2021 taget ca. 1 km syd for Kandestederne.

FORORD

Miljøministeriet (tidligere Miljø- og Fødevarerministeriet) ønsker at undersøge, hvorvidt nedgravede trykudligningsmoduler, udviklet af SIC, Skagen, har en kystopbyggende effekt.

I forbindelse med "Aftale om udmøntning af pulje til kystbeskyttelse- og naturindsatser af 8. februar 2018" indgået imellem daværende VLAK-regering, Dansk Folkeparti, Socialdemokratiet, Radikale Venstre og Socialistisk Folkeparti er der afsat midler til udførsel af endnu et forsøg, som skal undersøge metodens effektivitet i relation til kystbeskyttelse af sandstrande.

WSP Danmark A/S (tidligere Orbicon), med Aalborg Universitet som underrådgiver, er blevet valgt som rådgiver på opgaven. Aalborg Universitets kysteksperter blev inddraget med det formål at varetage design og evaluering af undersøgelsen således, at projektet blev gennemført på indiskutable videnskabelige præmisser og af fagpersoner, som tilhører den absolutte elite indenfor deres felt, både nationalt og internationalt.

Nærværende dokument er den afsluttende afrapportering, hvori metode og resultater beskrives. Desuden konkluderes der på resultaterne for kystens udvikling over forsøgets tre år.

I tillæg til nærværende undersøgelse er der lavet søpmålinger ved projektets begyndelse og afslutning, der afrapporteres i et særskilt tillægsnotat med titlen "Søpmåling – Forsøg med trykudligningsmoduler som kystbeskyttelsesmetode".

INDHOLD

FORORD.....	3
1 INDLEDNING	5
2 BESKRIVELSE AF KYSTEN	6
3 OPMÅLINGER.....	8
4 DATAANALYSE	9
5 RESULTATER OG DISKUSSION	11
6 KONKLUSION	14
7 FREMTIDIG BRUG AF DATA	15

1 INDLEDNING

I forbindelse med forsøg hvor nedgravede trykudligningsmoduler afprøves som kystbeskyttelsesmetode, er der gennemført opmålinger af en 15 km lang strækning ved Kandestederne, Frederikshavn Kommune. Opmålingerne har til formål at danne grundlag for evaluering for, hvorvidt etableringen af trykudligningsmoduler kan medføre en opbygning af sand på stranden og således reducere kysttilbagerykningen.

Målingerne er foretaget i perioden december 2018 til november 2021. Projektområdet er inddelt i et 5 km testområde, hvor trykudligningsmodulerne er etableret samt to 5 km referenceområder, som er placeret henholdsvis nord og syd for testområdet.

Evalueringen af kystens udvikling i projektperioden tager udgangspunkt i en sammenligning af de kystmorfologiske ændringer mellem testområdet og referenceområderne. Sammenligningen er baseret på den tidlige udvikling af strandens terrænniveau, som er blevet opmålt i alt 10 gange over forsøgets treårige periode.

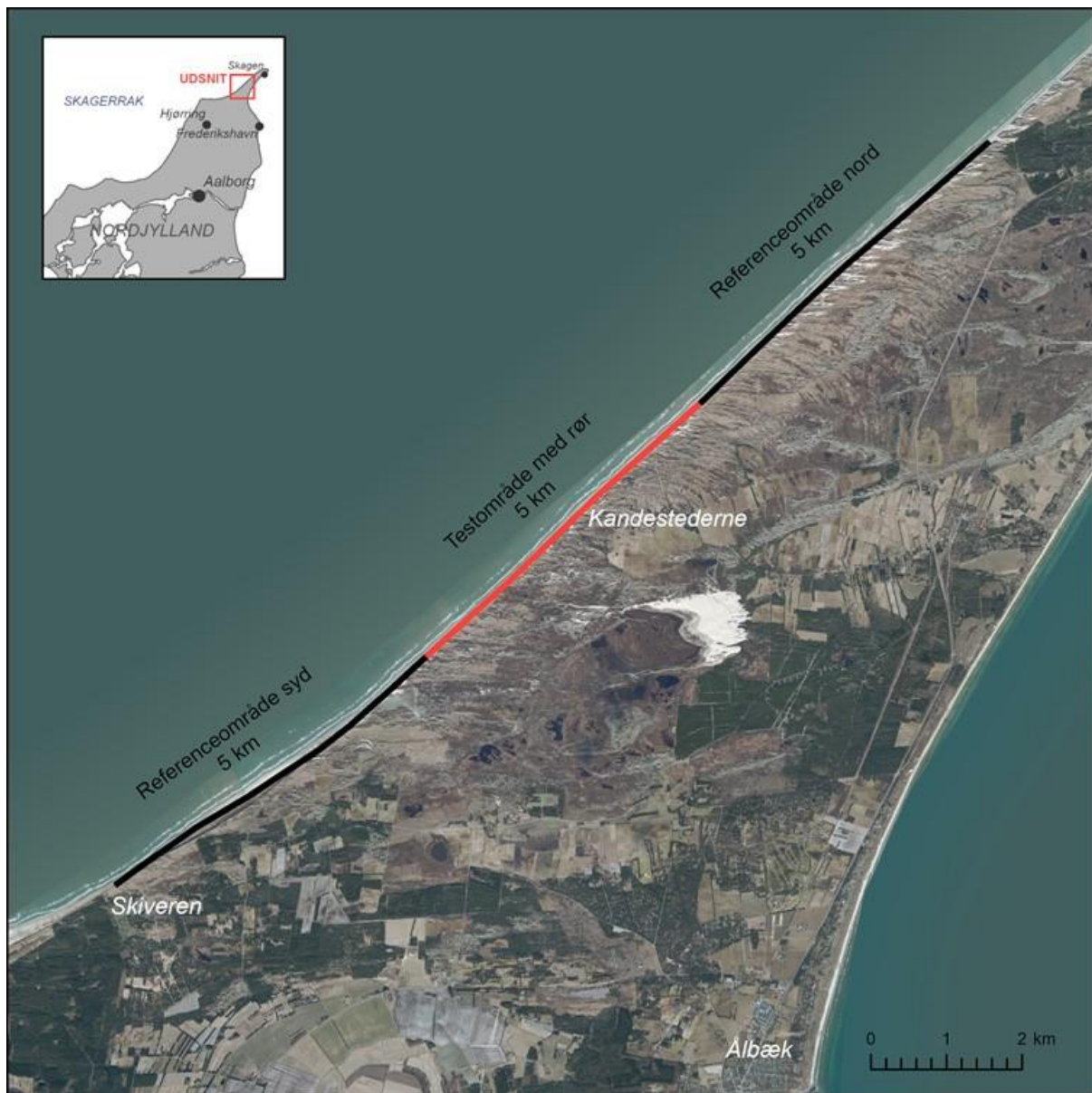
Synlige moduler blev optaget ved ugentlige tilsyn af stranden. Efterfølgende blev de reetableret ved vedligehold af stranden. Dette blev gennemført tre gange om året.

I arbejdet tages der ikke stilling til hvorvidt de nedgravede trykudligningsmoduler er anvendelige som kystbeskyttelsesmetode, men udelukkende til de kystmorfologiske ændringer af stranden i projektperioden.

2 BESKRIVELSE AF KYSTEN

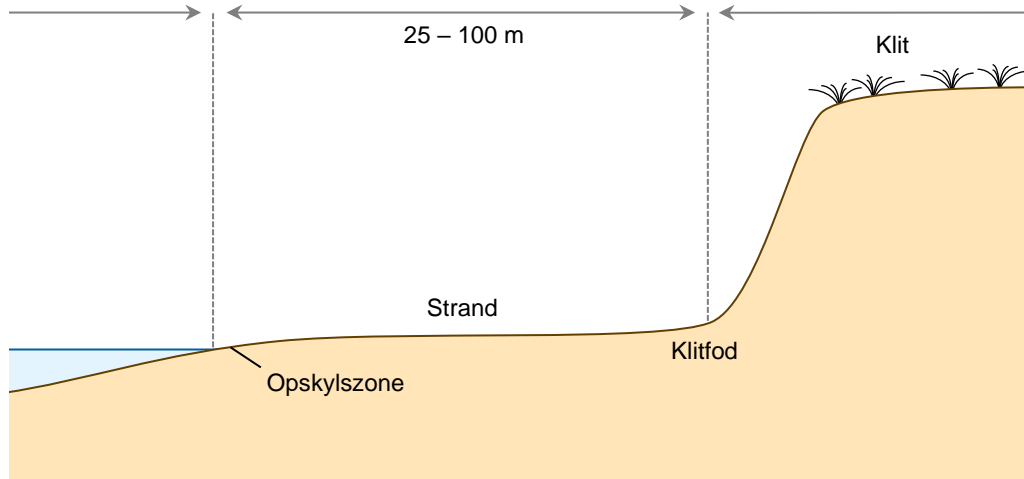
Undersøelsesområdet strækker sig fra Skiveren i syd og 15 km mod nordøst med Kandestederne placeret ca. midtvejs. Kysten er valgt ud fra et ønske om at testområdet og referenceområderne skal være så ens som muligt. Det ses at testområdet og referenceområderne stort set ligger på en linje, og dermed har samme orientering (Figur 1).

Kysten kan karakteriseres som en såkaldt højenergi kyst, der er eksponeret for store bølger og kraftige vinde fra vestlige retninger. Undersøelsesområdet er ud fra et kystmorfologisk synspunkt dynamisk med væsentlige variationer på stranden fra sæson til sæson med både bølgedrevet og vinddrevet sedimenttransport.



Figur 1. Kortudsnit, der viser placeringen af test- og referenceområderne.

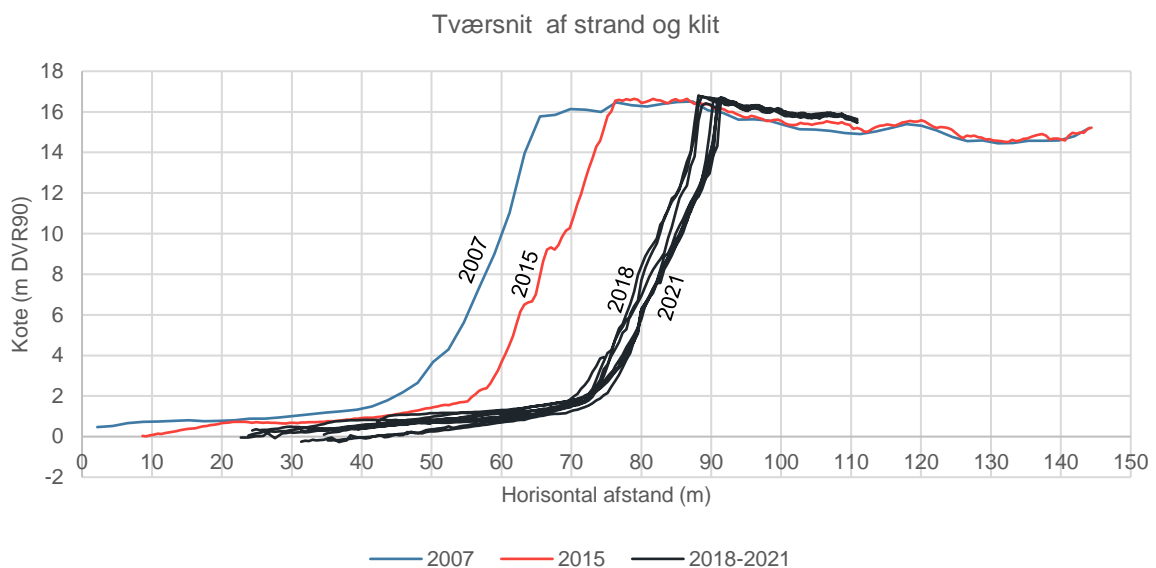
Kyststrækningen består af en typisk 25 – 100 m bred strand afgrænset kystværts af opskylszonen og landværts af klitfoden (Figur 2). Klitten er delvist dækket af vegetation og er flere steder over 20 m høj.



Figur 2. Definition og udbredelse af begreberne opskylszone, strand, klitfod og klit for undersøgelsesområdet.

Figur 3 viser, at lokaliteten kan karakteriseres som en erosionskyst, hvor der historisk har været en tilbagerykning af kysten på et par meter per år. Figur 3 viser også, at i et større perspektiv er projektets testperiode på 3 år, en forholdsvis kort testperiode.

Selvom testområdet og referenceområderne er udvalgt med fokus på at de rent kystmorfologiske er ens, vil der altid være små forskelle. Disse forskelle vurderes dog at være så små, at det giver mening at sammenligne områderne. Figur 3 kan derfor overordnet ses som repræsentativ for hele den 15 km lange kyststrækning.



Figur 3. Udvikling i tværsnitsprofilen i testområdet ca. 450 m sydvest for nedkørslen ved Kandestederne. Bredde/højde forhold ca. 1:4.

3 OPMÅLINGER

Der er i alt blevet foretaget 10 droneopmålinger af den 15 km lange kyststrækning, tre gange årligt i perioden fra december 2018 til november 2021 (Tabel 1). Opmålingerne dækker stranden fra opskylszonen til klit, dog med varierende dækning afhængig af vandstanden for opmålingstidspunktet.

Tabel 1. Oversigt over tidspunkt for opmålinger

Opmåling	Dato	År
T0	3. – 5. december	2018
T1	8. – 10. april	2019
T2	22. – 24. august	2019
T3	29. november – 1. december	2019
T4	16. – 19. april	2020
T5	1. – 3. september	2020
T6	13. – 15. januar	2021
T7	11. – 13. april	2021
T8	6. – 8. oktober	2021
T9	3. – 4. november	2021

Opmålingerne er udført med en UAV (Unmanned Aerial Vehicle), bedre kendt som en drone, i dette tilfælde en DJI Phantom 4 Pro med en 1 tomme (25 mm) 20 MP CMOS-sensor. Droneopmålingerne blev udført med forprogrammerede ruter med automatisk indsamling af billeddata for undersøgelsesområdet.

Ud fra den såkaldte fotogrammetriske metode "Structure from Motion" blev der for hver opmåling genereret en punktsky med xyz information for terrænet i programmet Pix4Dmapper, der ved hjælp af overlappende billeder af terrænet kan få tredimensionale oplysninger for det afbildede terræn og dets beliggenhed.

Under opmålingen blev der opmålt såkaldte Ground Control Points (GCP's) samt referencepunkter med en RTK GPS, der blev brugt til georeferering af punktskyen i koordinatsystemet UTM Zone 32N ETRS89 og kotesystemet DVR90. GPS punkterne har en maksimal afvigelse på 2,0 cm i alle retninger, mens afvigelsen (RMSE) for referencepunkterne for samtlige 10 opmålinger gennemsnitligt var 2,6 cm vertikalt. Dette tal er baseret på afvigelsen af i alt 868 referencepunkter, fordelt på gennemsnitligt 86 referencepunkter per opmåling langs den 15 km lange strækning.

Efter endt georeferering blev punktskyen rensat i programmet CloudCompare, hvorefter der blev genereret højdemodeller ud fra punktskyen i GIS softwaret ArcGIS Pro med en opløsning på 0,4 m.

Nøjagtigheden af stranden i højdemodellerne ligger i langt de fleste af tilfældene inden for få centimeter, mens der for klitområdet er en lidt større usikkerhed (0 – 10 cm) grundet vegetationsdække og færre GCP punkter.

4 DATAANALYSE

For vurdering af massebalancerne for hver af de tre områder, testområdet og de to referenceområder, er den gennemsnitlige terrænhøjde opgjort for hver opmåling. Da massebalancerne således bestemmes ud fra områdernes volumenændringer, tages der ikke hensyn til små forskelle, der skyldes ændring af materialernes aflejringstæthed samt materialernes indhold af ler. Disse små forskelle vurderes at være ubetydelige i denne sammenhæng.

De tre områder i opgørelserne har været præcis de samme hvad angår geometri og rumlig beliggenhed for alle 10 opmålinger. Disse områder er udvalgt så de udgør de største arealer, der er fælles for alle 10 opmålinger uden at de ved nogen opmålinger har været dækket af vand. Arealer der har befundet sig uden for opskylszonen ved en eller flere af opmålingerne indgår således ikke (se Figur 4 for eksempel).



Figur 4. Eksempel på afgrænsning af områder brugt i opgørelser til beregning af gennemsnitlig terrænhøjde. Her for testområdet ca. 800 nordøst for nedkørslen ved Kandestederne. Baggrundskort: GeoDanmark Ortofoto 2021 (Datafordeler).

Resultaterne er opdelt i en opgørelse for strand alene samt en opgørelse, der dækker både strand og en mindre del af den bagvedliggende klit således at opgørelserne medtager resultatet af de nedskridninger af klitten, der løbende finder sted. Sidstnævnte opgørelse indeholder således også den førstnævnte opgørelse. Grænsen mellem strand og klit blev fastlagt ud fra klitfodens placering ved den første opmåling (T0).

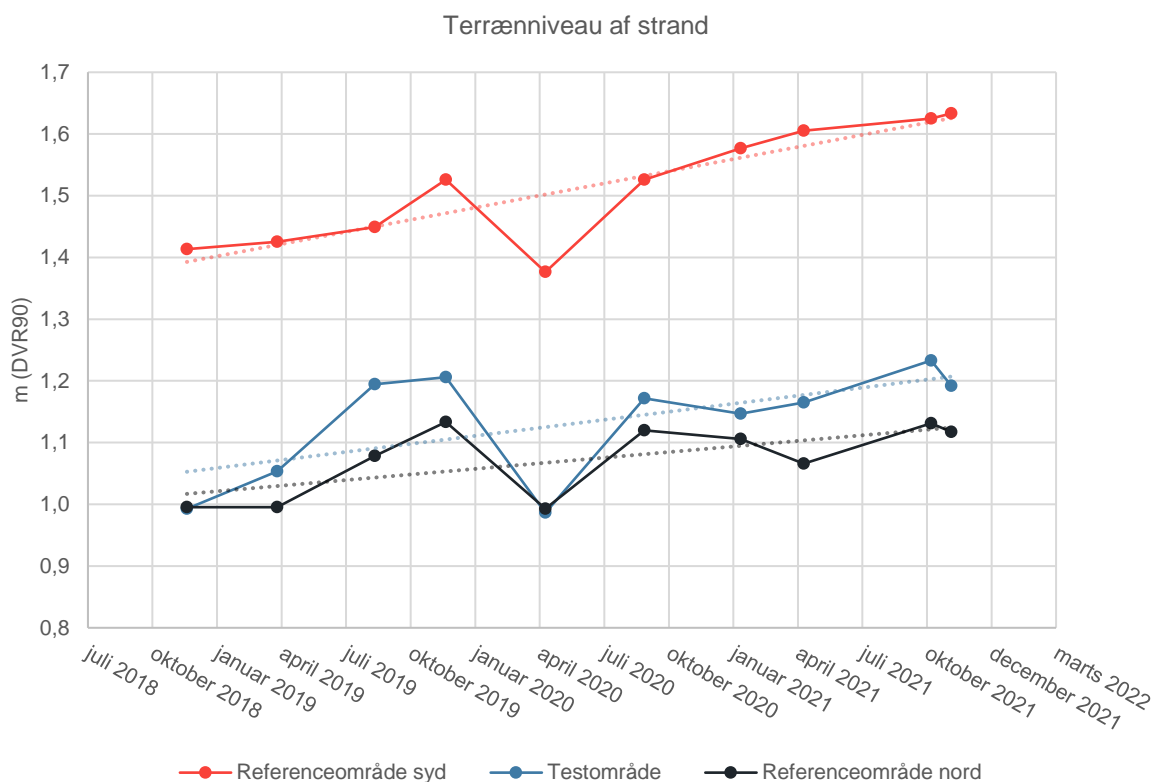
På Figur 4 og Figur 5 er vist grafer, der angiver hvorledes terrænniveauerne har udviklet sig over de tre år. For disse grafer er indlagt tendenslinjer, der derved udtrykker den gennemsnitlige tidsmæssige udvikling. Ved at betragte de ændringer, der fremgår af tendenslinjerne, udnyttes hele det samlede opmålingsmateriale, der er indsamlet i herværende undersøgelse ved de 10 opmålinger. Med en opløsning på 0,4 m repræsenterer hver figur altså information for mere end en million datapunkter.

Tabel 2. Arealer der ligger til grund for den gennemsnitlige terrænhøjde (Figur 5 og 6).

	Strand (m²)	Strand og klit (m²)
Referenceområde syd	215.307	360.352
Testområde med moduler	170.520	294.052
Referenceområde nord	122.952	269.915

5 RESULTATER OG DISKUSSION

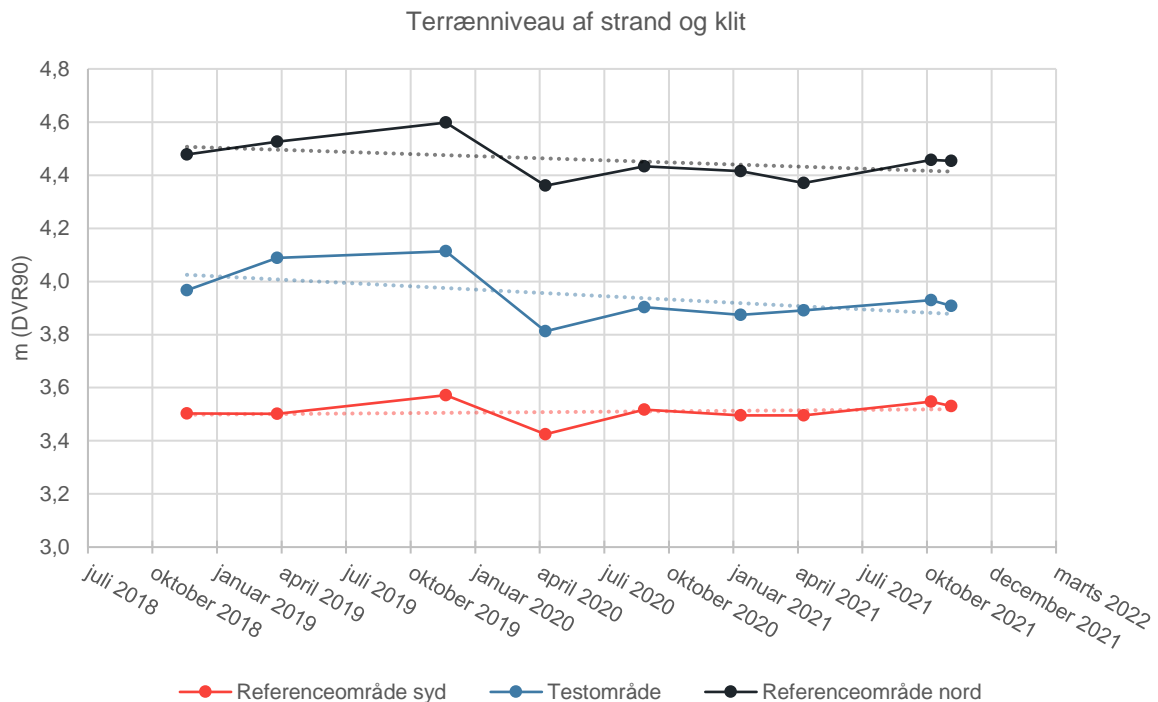
Over forsøgsperioden på de tre år har stranden hævet sig i alle tre områder. Testområdet med trykudligningsmoduler har hævet sig mere end det nordlige referenceområde, men mindre end det sydlige. For det samlede område (dvs. stranden plus den nærmeste aktive del af klitten) gælder, at både det nordlige referenceområde og testområdet har sænket sig, hvor testområde har sænket sig mest, mens det sydlige referenceområde har hævet sig ganske svagt. Det vurderes, at forskellen mellem ændringen af stranden og ændringen af det samlede område skyldes, at der i undersøgelsesperioden kortvarigt er blevet tilført ekstra meget materiale til stranden fra erosionen af klitten. Set i et længere tidsperspektiv vil stranden utvivlsomt fortsat sænke sig på grund af den generelle og velkendte kysttilbagerykning.



Figur 5. Gennemsnitligt terrænniveau af strand over tid fordelt på de tre områder.

Tabel 3. Tendenslinje information for de tre områder for strand.

	Hældning på tendenslinje (m/år)	Ændring over tre år ud fra tendenslinje (m)
Referenceområde syd	+ 0,081	+ 0,243
Testområde med moduler	+ 0,053	+ 0,159
Referenceområde nord	+ 0,037	+ 0,111



Figur 6. Gennemsnitligt terrænniveau af strand og klit over tid fordelt på de tre områder.

Tabel 4. Tendenslinje information for de tre områder for strand og klit.

	Hældning på tendenslinje (m/år)	Ændring over tre år ud fra tendenslinje (m)
Referenceområde syd	+ 0,007	+ 0,021
Testområde med moduler	- 0,050	- 0,150
Referenceområde nord	- 0,032	- 0,096

Som det ses af Figur 6 og af Tabel 4 synes ændringerne i det gennemsnitlige terrænniveau for testområdet (strand og klit) ikke at skille sig ud fra hvad der ses i de to referenceområder. Som tidligere omtalt repræsenterer ændringerne af det gennemsnitlige terrænniveau ændringerne af den samlede massebalance for det pågældende område.

Søopmålinger ved projektet begyndelse og afslutning viser, at der har været erosion af strandplanet i testområdet og referenceområde syd, mens der for referenceområde nord har været en mindre aflejring. Testområdet er det område, som har mistet mest volumen. Det formodes, at de morfologiske ændringer skyldes naturlige bølgeprocesser. For en nærmere beskrivelse af metode og resultater henvises til det tekniske notat "Søopmåling – Forsøg med trykudligningsmoduler som kystbeskyttelsesmetode".

Undersøelsesperioden fra 2018 til 2021 skiller sig ikke væsentligt ud fra det sidste årti, hvad angår kuling events (Tabel 5). Dog er der ingen storm events i undersøelsesperioden, hvilket delvist kan forklare, at der ikke har været større kysttilbagerykninger i perioden. Dette vidner om, at 2018-2021 har været en relativt rolig periode med kun lidt erosion i forhold til hvad der er observeret tidligere.

Tabel 5. Kombination af vind* og vandstandsdata**.

Kombination af vandstand og gns. vindstød	Storm events	Kuling events
	Døgn pr. år med vind > 20 m/s og vandstand > 1 m	Døgn pr. år med vind > 15 m/s og vandstand > 0,5 m
1. dec. 2011 – 1. dec. 2021		
I alt døgn pr. år (tid i %)	0,14 %	1,29 %
I alt døgn pr. år (tid i dage pr. år)	0,5	4,7
1. dec. 2018 – 1. dec. 2021		
I alt døgn pr. år (tid i %)	0	1,37 %
I alt døgn pr. år (tid i dage pr. år)	0	5,02
1. dec. 2011 – 30 nov. 2018		
I alt døgn pr. år (tid i %)	0,20 %	1,25 %
I alt døgn pr. år (tid i dage pr. år)	0,7	4,6
*Vinddata fra Thyborøn, som den nærmeste Vesterhavsmålestation.		
**Vandstandsdata fra Hirtshals Havn.		

For at sikre offentlighedens frie og sikre adgang til stranden har der i forsøgsperioden været afholdt ugentlige tilsyn af stranden. Denne procedure blev implementeret efter år 1 af projektet da de nedgravede trykudligningsmoduler ofte blev fritskyllede, så man kunne se og potentielt kunne komme til skade på modulstumper. Enkelte matrikelejere trak sig på den baggrund ud af forsøget, og det blev besluttet at indsamle synlige moduler hver uge som efterfølgende blev nedgravet ved det kommende vedligehold. Der blev i projektets samlede forsøgsperiode optaget 192 moduler.

Denne tilsynsudgift, som er vurderet nødvendig, skal tillægges den samlede udgift til afholdelse af projektet.

6 KONKLUSION

Undersøgelsens formål har været at vurdere om etablering af nedgravede trykudligningsmoduler på stranden kan påvirke aflejring eller erosion udtrykt ved ændringerne af strandens terrænniveau. Undersøgelsen baserer sig på droneopmålinger over tre år (2018-2021) af terrænniveau for en samlet kyststrækning på 15 km langs Vestkysten ved Kandestederne. Strækningen bestod af tre delområder efter hinanden: 5 km referenceområde, 5 km testområde med trykudligningsmoduler samt 5 km referenceområde.

Med udgangspunkt i de 10 opmålinger, der er foretaget i denne undersøgelse, må det konkluderes at der ikke er fremkommet resultater i forhold til ændring af terrænniveau, der viser at testområdet med trykudligningsmoduler adskiller sig tydeligt fra de nærliggende referenceområder. Denne konklusion bygger primært på Figur 6 og Tabel 4 i herværende rapport.

På grund af den relativt korte forsøgsperiode kan det ikke med sikkerhed fastslås, hvordan massebalancerne for de tre kyststrækninger detaljeret vil udvikle sig i fremtiden. Der er dog ikke i resultaterne fra denne undersøgelse indikationer for, at en tilsvarende længerevarende undersøgelse ville kunne føre til en anden konklusion end ovenstående.

7 FREMTIDIG BRUG AF DATA

Data fra projektet er af relativ høj rumlig opløsning og dækker en lang kyststrækning, og derudover er der med tre årlige opmålinger over en treårig periode ligeledes en høj tidslig opløsning i data. Dette gør det til et unikt datasæt, og kun få kyster rundt omkring i verden er opmålt med lignende detaljegrad.

Data stilles til fri afbenyttelse, og det er håbet, at de i fremtiden kan benyttes til forskningsprojekter indenfor f.eks. sedimentdynamik og kystændringer. Det er desuden oplagt, at data bruges i forbindelse med studenterprojekter, formidling mv. Ved fremtidige kystprojekter på strækningen vil disse data danne et naturligt fundament til planlægning og projektering af kystbeskyttelsesforanstaltninger.

Data fra de 10 opmålinger kan rekvireres ved kontakt til WSP Danmark mod betaling af et servicegebyr.

KONTAKTPERSON

Lars Brammer Nejrup

Market Director
Port & Coastal Development
Ph.D. Scient.
Natur og Vand Øst 362

lars.nejrup@wsp.com