



Opmåling af kystnær havbund med grøn laser

December 2013



Projekt **Kystdirektoratets Udviklingsprogram KUP 2010 - 2013**
Klima, Shallow Water

Startdato April 2012
Slutdato December 2013
Projektansvarlig (PA) Per Sørensen
Projektleder (PL) Carlo Sørensen
Projektmedarbejder (PM) Carlo Sørensen
Søren Bjerre Knudsen
Per Sørensen
Irene Andersen
Timeregistrering 35210233
Kontering 35210233
Godkendt den 12.12.2013 

Rapport **Opmåling af kystnær havbund med grøn laser**

Forfattere Carlo Sørensen
Søren Bjerre Knudsen
Per Sørensen
Nøgleord grøn laser, laserscanning, bathymetri, opmåling, metode, kystnær, kystprofil
Distribution www.kyst.dk, Transportministeriet,
www.dab.dk/anmeld.asp

Resume

Sørensen, C., Knudsen, S.B. og Sørensen, P. (2013). Opmåling af kystnær havbund med grøn laser. Teknisk Rapport. Kystdirektoratet. 28p.

INDEX: grøn laser, laserscanning, bathymetri, opmåling, metode, kystnær, kystprofil.

Kystdirektoratet (KDI) præsenterer dybdeforholdene for en pilotstrækning langs Nordsjællands kyst, der er baseret på opmåling fra fly med grøn laser.

Mens alle landområder er opmålt ud fra laserscanning, er opmåling af kystnære dybdeforhold ud fra luftbårne målemetoder hidtil ikke publiceret i Danmark. Tilgængelig viden om dybdeforhold er primært i ældre søkort, hvor der ikke ligger detaljerede opmålinger til grund for kortlægningen. Det er besværligt og dyrt at foretage detaljeret opmåling på lav vanddybde, og behovet har hidtil ikke, udover i forhold til navigation og sejladsikkerhed, været tilstrækkeligt stort. Interessen for og efterspørgslen efter detaljerede og opdaterede dybdata opleves dog nu ud fra både kommercielle, forvaltningsmæssige og videnskabelige tilgange.

Kystdirektoratet (KDI) har i et metodestudie under vores tekniske udviklingsprogram (KUP) ønsket at vurdere og medvirke til at udvikle grøn lasers anvendelighed til opmåling af kystnære dybdeforhold mht. metoder og nøjagtighed for mere præcise og detaljerede dybdata. Detaljeret kortlægning, i denne sammenhæng fra kystlinjen og ud til cirka 6 meters vanddybde, er vigtig ud fra et kystteknisk synspunkt i forhold til både dybde-

forhold, geologi og sedimenter, og kystprofilen i forhold til den fremtidige kystudvikling; herunder set i lyset af klimaændringer. Et godt kendskab til de faktiske dybde- og bundforhold vil give bedre mulighed for fremskrivning af erosion/kystlinjeændringer, for modellering af oversvømmelsesfaren langs kysterne, og i optimering af nuværende og fremtidige kystbeskyttelsestiltag langs kysterne. Endvidere vil grøn laser potentielt kunne styrke forvaltning og miljømonitoring i relation til eksempelvis sandfodring/bypass og kystnær maritim rumlig planlægning.

Med grøn laser er der produceret en detaljeret bathymetri med en, overordnet set, tilfredsstillende nøjagtighed fra kystlinjen og ud til 7 meters vanddybde. Resultaterne viser også, at metoder i forhold til både opmåling, kalibrering, behandling og tolkning af data kan forbedres. Metoden vurderes at have et stort potentiale i forhold til ovennævnte tekniske og tværfaglige problemstillinger; især i kombination med simultant optagne luftfotos og/eller med andre målemetoder. På denne baggrund ønsker Kystdirektoratet fremadrettet at indgå i et bredere udviklingssamarbejde med offentlige og private virksomheder og vidensinstitutioner mv. om videre anvendelse af grøn laser til forskellige formål langs Danmarks kyster.

Indhold

Resume	3
1. Introduktion	5
2. Metode	7
2.1. Laserscanning generelt	7
2.2. Pilotstrækningen	9
2.3. Laserscanning	9
2.4. Søopmåling	12
3. Resultater	13
3.1. Bathymetri fra laserscanning	13
3.2. Sammenligning mellem søopmåling og laserscanning	15
3.3. Bundforhold	16
3.4. Datareduktion og singulære punkter	18
3.5. Nøjagtigheder ved grøn laser	19
3.6. Grafisk præsentation af opmåling	20
4. Diskussion og konklusioner	23
5. Perspektivering	26
6. Referencer	27



1. Introduktion

Fly- og satellitbaserede målemetoder bliver mere og mere almindelige, og teknikker og data herfra er efterhånden tilgængelige i forhold til deres anvendelsesområder; herunder opmåling af højde- og dybdeforhold.

Alle Danmarks landområder er opmålt ud fra laserscanning (Lidar) fra fly i perioden 2005-2007, og resultaterne er offentligt tilgængelige i digitalt format i Danmarks Højdemodel (DHM). DHM består af en række produkter/datasæt til beskrivelse af terræn og landoverflade, højdekurver mv. i høj opløsning og med relativ stor præcision (Hawa et al., 2011; Rosenkrantz et al., 2011; Rosenkrantz og Frederiksen, 2011), jf. tillige www.gst.dk.

Opmåling af kystnære dybdeforhold ud fra luftbårne målemetoder er ikke hidtil afrapporteret i Danmark. Tilgængelig viden om dybdeforholdene langs Danmarks kyster er derfor primært fra ældre søkort, hvor der ikke ligger detaljerede opmålinger til grund for kortlægningen. Grunde hertil er, at det både er besværligt og dyrt at foretage detaljerede opmålinger på lave vanddybder, og at behovet, udover i forhold til navigation og sejladsikkerhed, hidtil ikke har været tilstrækkeligt stort. Interessen for og efterspørgslen efter detaljerede og opdaterede data er dog til stede ud fra både kommercielle, forvaltningsmæssige og videnskabelige tilgange.

Kystdirektoratet (KDI) har ønsket at vurdere anvendeligheden af laserscanning til opmåling af kystnære dybdeforhold. Målet er dels en øget viden om metoder og nøjagtigheder for at opnå mere præcise og detaljerede dybdedata langs de danske kyster. Samtidig vil KDI gerne være en kompetent sparringspartner for virksomheder, offentlige som private, der arbejder med søopmåling mv. Her besidder KDI stor erfaring og viden om opmålingstekniske aspekter og kystudvikling generelt. Kystdirektoratet har endvidere ønsket at foretage en indledende vurdering af metodens anvendelighed til habitat/miljømonitoring

En detaljeret kortlægning af de kystnære områder - i denne sammenhæng fra kystlinjen og ud til cirka 6 meters vanddybde, er vigtig ud fra et kystteknisk synspunkt i forhold til både dybdeforhold, geologi og sedimenter, og kystprofilen i forhold til den fremtidige kystudvikling; herunder set i lyset af klimaændringer. Et større kendskab til de faktiske dybdeforhold vil give bedre mulighed for fremskrivning af erosion/kystlinjeændringer og for modellering af oversvømmelsesfaren langs kysterne, og hvor bølgeklima og vindklima er andre væsentlige parametre. Endvidere er viden om dybdeforhold vigtig i forhold til at optimere nuværende og fremtidige kystbeskyttelsestiltag langs kysterne.

Der er valgt en pilotstrækning på en relativt eksponeret kyst i Nordsjælland. Strækningen er opmålt ved grøn laserscanning, og en del af det scannede område er opmålt af Kystdirektoratet ved en traditionel fladedækkende opmåling med flerstråle ekkolod. Endvidere er der foretaget undervandsoptagelser til verifikation af de faktiske forhold, ligesom luftfotos er inddraget.

Metodestudiet har til formål at analysere og evaluere anvendeligheden af grøn laser i kysttekniske sammenhænge. Her vil faktorer som nøjagtigheds- og detaljeringsbehovet for kystteknisk anvendelse blive analyseret og diskuteret i relation til blandt andet de fysiske forhold, økonomi, dataprocesering og en mere bred anvendelse af laserscan-

ning; alene eller i sammenhæng med anden indsamling af data, fx fotos og traditionel opmåling. En nøje gennemgang af metoderne til procesering og efterbehandling af data har dog ikke været et mål, idet resultaterne dog, som nævnt, vil blive adresseret i forhold til forbedringsmuligheder for anvendelse i kysttekniske sammenhænge. Rapporten skal således ses som et indledende arbejde, der kan danne baggrund for yderligere udforskning af metodeanvendelighed. Det er tilstræbt at gøre afrapporteringen alment tilgængelig, hvorfor der ikke teknisk er gået i detaljer med alle aspekter af metoden, men i stedet henvises til relevant litteratur.



2. Metode

Efter en kort generel introduktion til grøn laser scanning, præsenteres pilotstrækningen samt de udførte opmålinger.

2.1. Laserscanning generelt

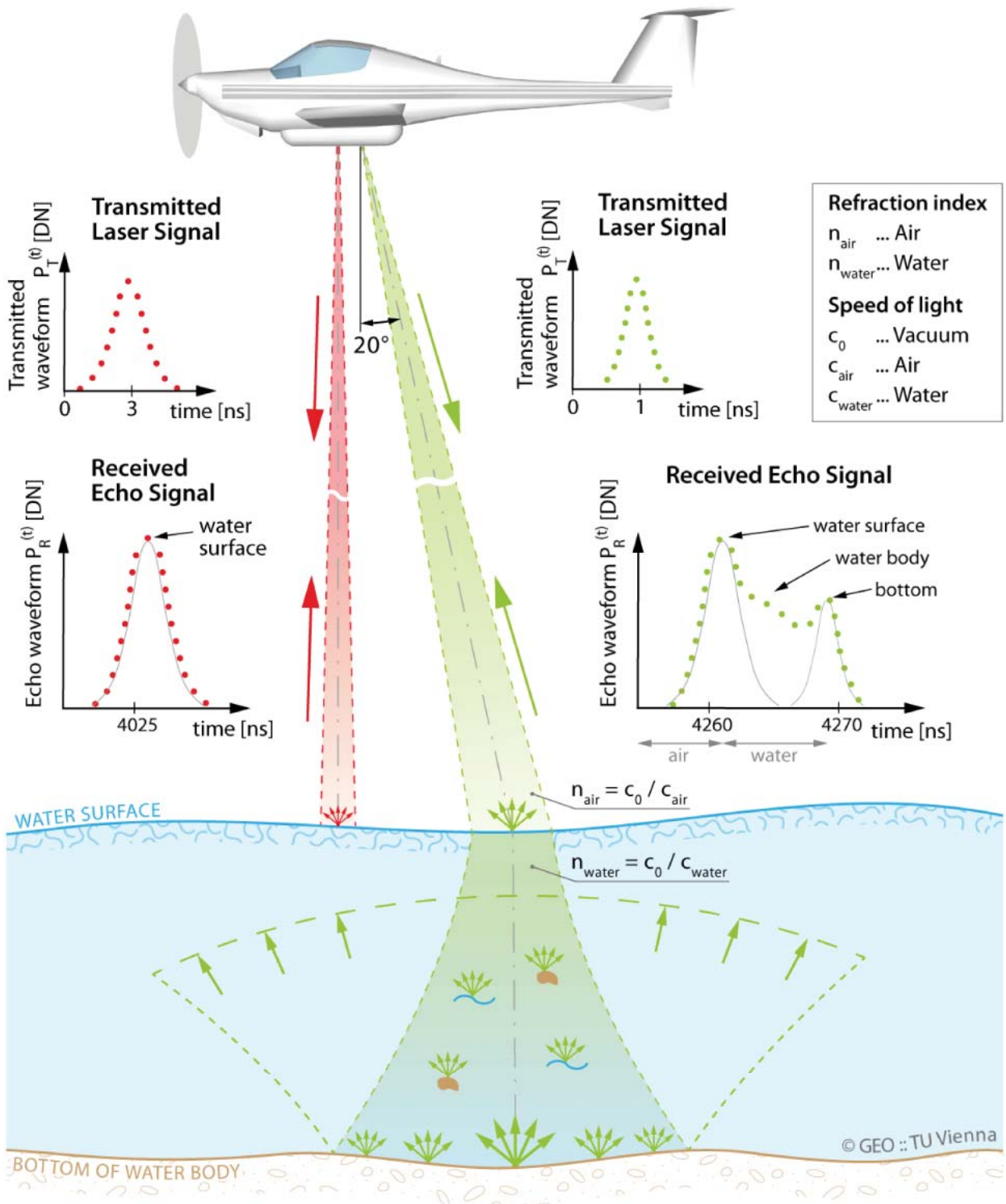
Der eksisterer en lang række metoder til opmåling, der går under betegnelsen Lidar ('Light Detection and Ranging' eller 'Laser imaging, detection and ranging'). Teknologien bygger på, at udsendt lys reflekteres, og ved at måle tiden fra udsendelsen, til lyset når tilbage til sensoren, kan afstanden til for eksempel jordoverfladen beregnes.

I forhold til måling af overflader fra fly (drone eller helikopter) opereres med udtrykkene 'rød laser' og 'grøn laser', der refererer til bølgelængden af det udsendte lys. Mens rød laser anvendes til opmåling af landoverfladen, kan grøn laser anvendes til at måle havdybder, idet lyset bryder i vandoverfladen og en del tilbagekastes fra bunden (jf. eksempelvis Mandlbürger et al., 2011; 2012), Figur 1, og en del forskellige firmaer tilbyder i dag opmålinger. Jævnfør fx Quadros (2013) for et overblik over metoder og anvendelse.

De indsamlede rådata vil i udgangspunkt være i en "punktsky" med signal fra både havbund, hav-

overflade, samt fra signaler reflekteret i vandsøjlen. En forudsætning for gode målinger af havbunden er, at der er god sigt i vandet (fx Guenther et al., 2000). Generelt vurderer leverandører af grøn laserscanning, at der kan måles ned til dybder af to gange sigtddybden i vandet i forbindelse med detaljerede opmålingsopgaver og med mulighed for at detektere ned til $0,5 * 0,5 * 0,5$ m store objekter (Steinbacher et al., 2012).

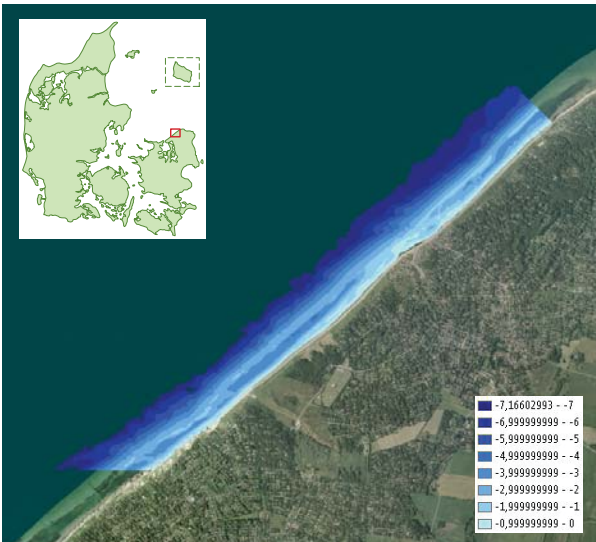
Udover data fra selve scanningen, hvor en del af databehandlingen sker, mens der flyves, beregner tilhørende udstyr den nøjagtige flyvehøjde og position mv., så målingerne af dybdeforholdene kan stedfæstes ret præcist (RIEGL, 2013a; 2013b). Endvidere sker der en efterbehandling af de indsamlede data forud for, at målingens resultater er tilgængelige. Hele databehandlingen er ret kompliceret, hvorfor det da også kun er relativt få institutioner, der foretager denne. Endvidere er databehandlingen, grundet de store datamængder, automatiseret i forhold til de algoritmer, der anvendes til at opnå de færdige resultater. Selve dataene og databehandlingen redegøres for i Kapitel 2.3.



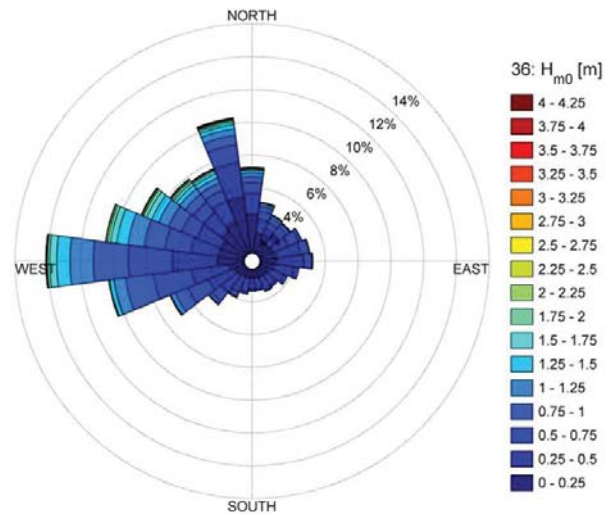
Figur 1 Principskitse for opmåling med rød henholdsvis grøn laser (Mandlbürger et al., 2011; 2013).

2.2. Pilotstrækningen

Pilotstrækningen udgøres af et område på ca. 4,5 km i længden og 0,6 km i bredden på Sjællands nordkyst mellem Rågeleje og Heatherhill, Figur 2. Mod land afgrænses området på bagstranden, mens det udadtil når ca. 8-10 meters vanddybde. Kysten er en klintkyst, der er under erosion, og som er relativt eksponeret mod de fremherskende bølgeretninger mellem vest og nord, Figur 3. Dette bevirker, at der er relativt meget energi til at transportere sediment på langs og tværs af kystprofilen. Den generelle transport af sand er mod øst, og der er på dele af strækningen etableret kystbeskyttelse i form af høfder og bølgebrydere. Generelt er vurderingen, at strækningen mangler sand til opretholdelse af kystprofilen.



Figur 2 Oversigtskort over pilotstrækningens placering.

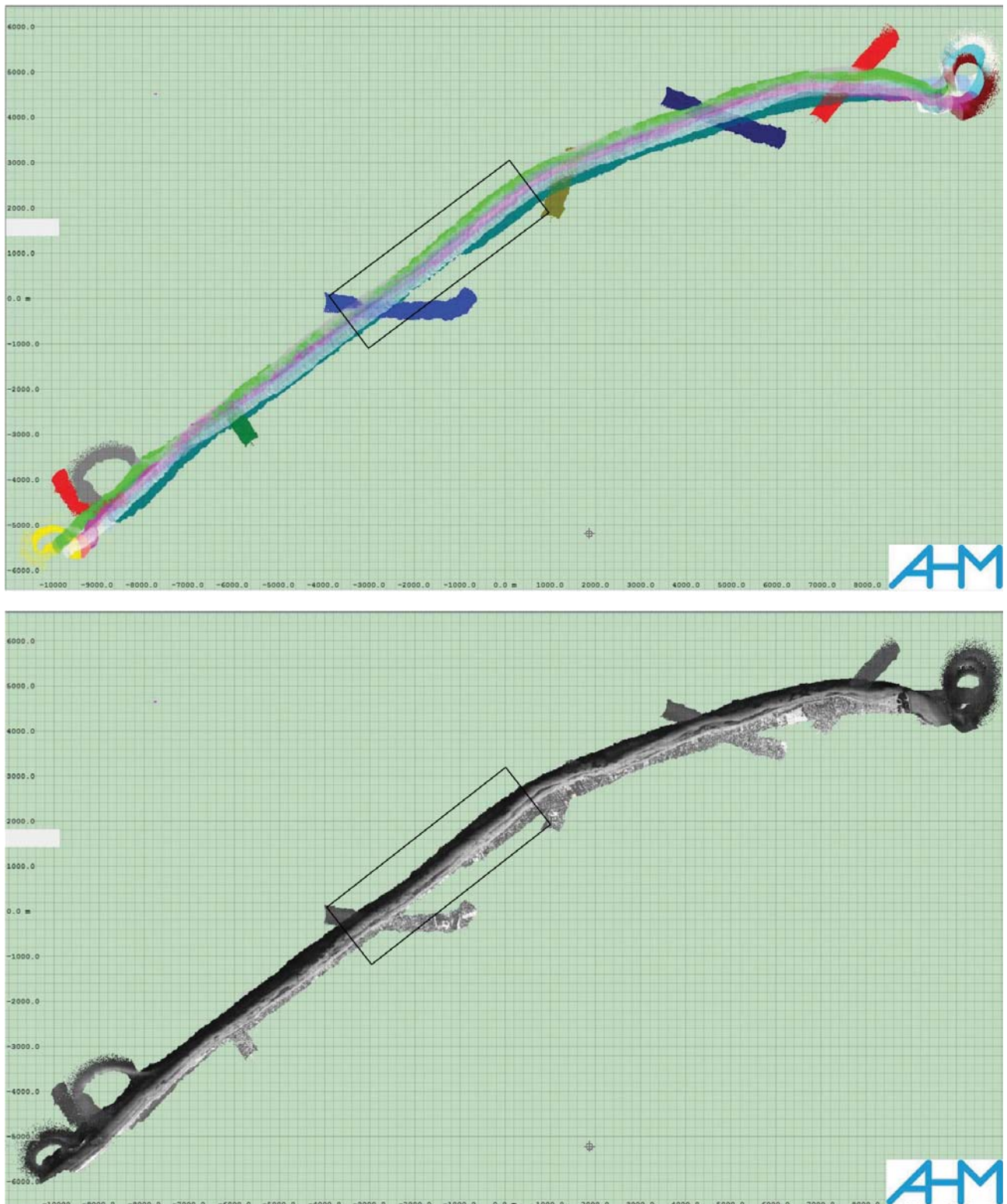


Figur 3 Bølgerose for området ved pilotstrækningen, der er udformet på baggrund af hindcast-simuleringer (Jensen, 2012; KDI, 2012).

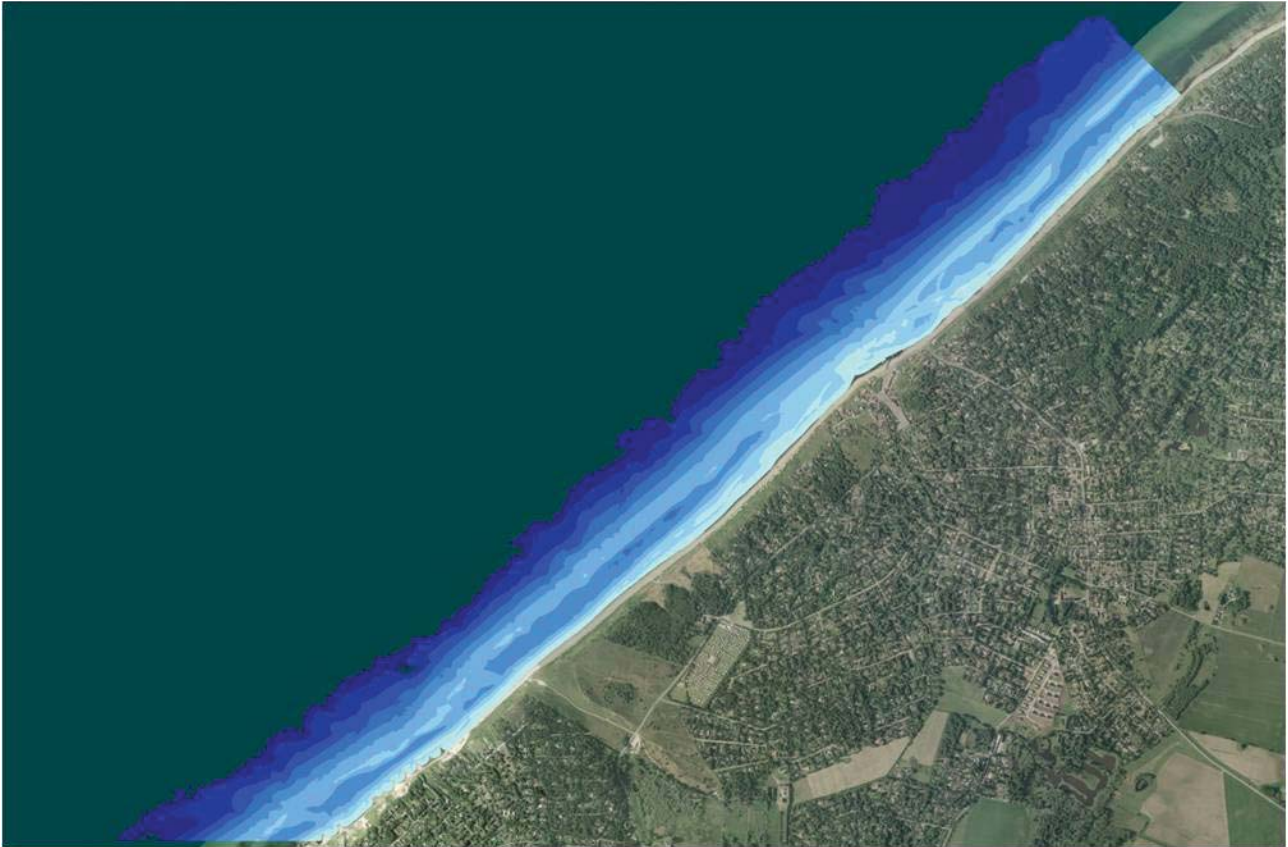
2.3. Laserscanning

Laserscanningen er udført af NIRAS og post-processing af data er foretaget af firmaet AHM (Airborne Hydromapping GmbH, <http://www.ahm.co.at/>) sammen med NIRAS. Flyvningen er udført den 9. april 2013 under gunstige vind- og vejrforhold (roligt vejr) og med god sigt i vandet.

NIRAS har foretaget opmåling af en længere strækning, hvor data for pilotstrækningen udgør en mindre del. Figur 4 viser hele det opmålte område, og af Figur 5 ses det udsnit, der er modtaget data for til anvendelse i metodestudiet. Der er i forbindelse med opmålingen optaget luftfotos i høj opløsning (ca. 5 cm).



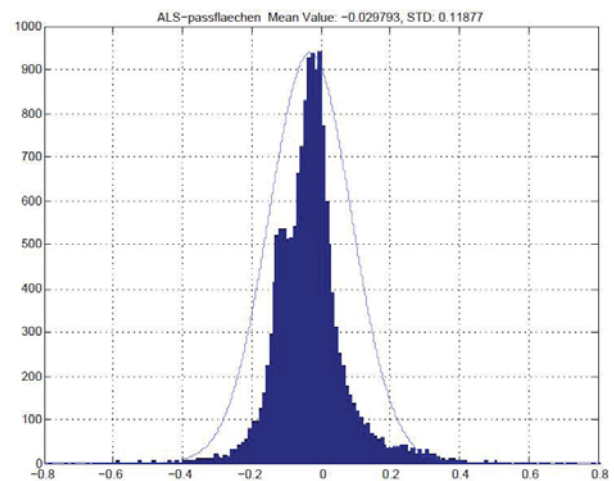
Figur 4 Opmåling af kystnær bathymetri med grøn laser udført af NIRAS på Sjællands nordkyst, 9. april 2013. Pilotstrækningen udgør kun en mindre del, jf. den sorte ramme og Figur 5. Farvelægningen (øverst) viser flyvelinjerne, og nederst ses kysten fra fotos taget under flyvningen (Grafik: NIRAS & AHM).



Figur 5 Pilotstrækningen opmålt med grøn laser med dybdeforholdene skitseret (1 meter ækvidistance, jf. Figur 8).

Opmålingen er foretaget med en RIEGL VQ-820-G scanner med tilførende udstyr til positionsbestemmelse mv. og er foretaget ved en flyvehøjde på ca. 500 meter. I teorien kunne opmålingen godt have været gennemført ved en lavere flyvehøjde, men af overvejende økonomiske grunde flyves i denne højde. Systemet har en høj opløsning og en hurtig indsamling af punkter. I praksis, jf. Figur 4, er opmålingen gennemført ved, at området er overfløjet flere gange i parallelle linjer, der hver dækker ca. 300 meter i bredden. Linjerne overlapper således, og de enkelte positioner er opmålt 1- 3 gange. Endvidere er der foretaget en kontroloverflyvning i "zig-zag", der er anvendt til at kontrollere GPS-højderne. Samlet set fås retur-signal fra land, havoverflade og havbund. NIRAS angiver en punkttæthed (i punktskyen) over hav på +20 punkter/m².

Laserscanningen er tilpasset Danmarks Højdemodel (DHM) i overgangen fra land til vand, og der angives en nøjagtighed i tilpasningen på 3 cm, Figur 6. Herudover er opmålingen kalibreret mod/sammenlignet med resultaterne af den fladedækkende søopmåling, jf. nedenfor.



Figur 6 Fordeling i afvigelsen mellem DHM og scanning ved overgang fra vand til land.

Den første del af databehandlingen foregår under dataindsamlingen. Udstyret modtager et analogt signal, som omregnes til afstande/dybdere, og styrken af signalet måles. Des svagere et signal, udstyret indstilles til at modtage, des flere fejlpunkter/singulære punkter vil blive målt. Ifølge NIRAS foretages der en testflyvning, hvorefter udstyret justeres til den givne opgave. I den efterfølgende databehandling korrigeres blandt andet for den grønne lasers bevægelse gennem vandet.

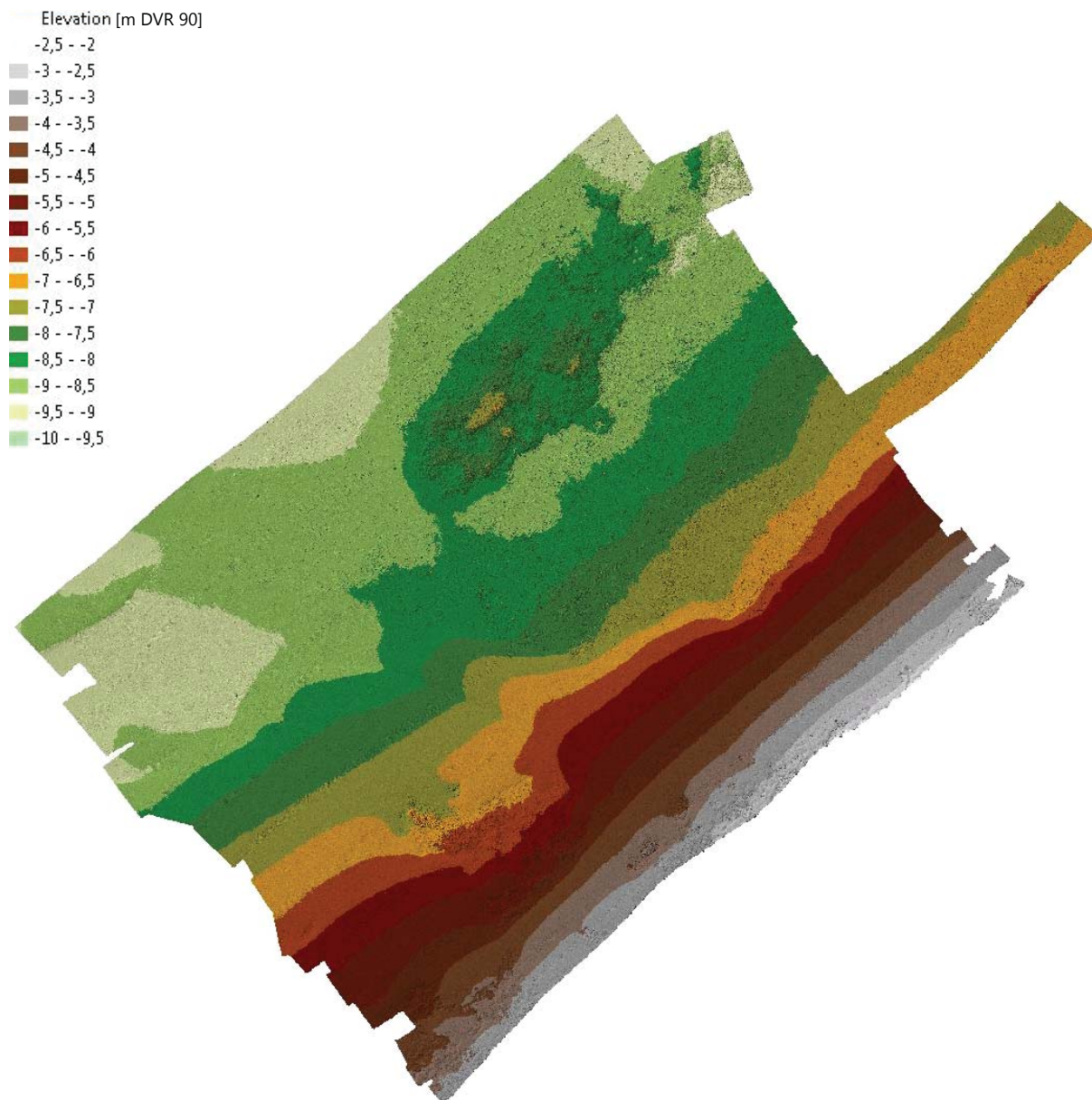
Til brug for analyserne har KDI modtaget rådata, automatisk processerede data og en efterfølgende leverance, der har søgt at medtage en større del af bundformer mv. i processeringen. Data er leveret som punktdata (rådata) og i grid filer i ascii-format med koordinater i UTM32, Euref89 og højder i DVR90. Fra leverandøren er data leveret med en forventet nøjagtighed i højden/dybden på ± 5 -10 cm.

2.4. Søopmåling.

I pilotområdet er der foretaget en mindre fladedækkende opmåling af Kystdirektoratet. Opmålingen er foretaget fra båd med multistråle ekkolod (multibeam) den 15. april 2013. Opmålingen dækker vanddybder på mellem 2 og 10 meter, Figur 7. Opmålingen er foretaget ud til en større vand-

dybde, end der er dækket af laserscanningen, og det overlappende område udgør ca. 550 * 160 m. Ind mod kystlinjen er afgrænsningen af den overlappende del jævn, da den er styret af grænsen på fladeopmålingen, mens den er mere uregelmæssig udadtil og begrænset af laseropmålingens evne til at måle dybder og modtage signal fra bunden, hvis denne er mørk. Måleusikkerheden på dybden ved traditionel fladeopmåling med flerstråle ekkolod vurderes til ± 5 cm og i planet på 25 cm (Kystdirektoratet, 1995).

Både forud for opmålingen (efterår 2012) og efterfølgende (sommer 2013) er der lavet undervandsoptagelser indenfor pilotområdet for at verificere bundforhold, bevoksning mv.



Figur 7 Bathymetri opmålt med multistråle ekkolod i et delområde på pilotstrækningen.



3. Resultater

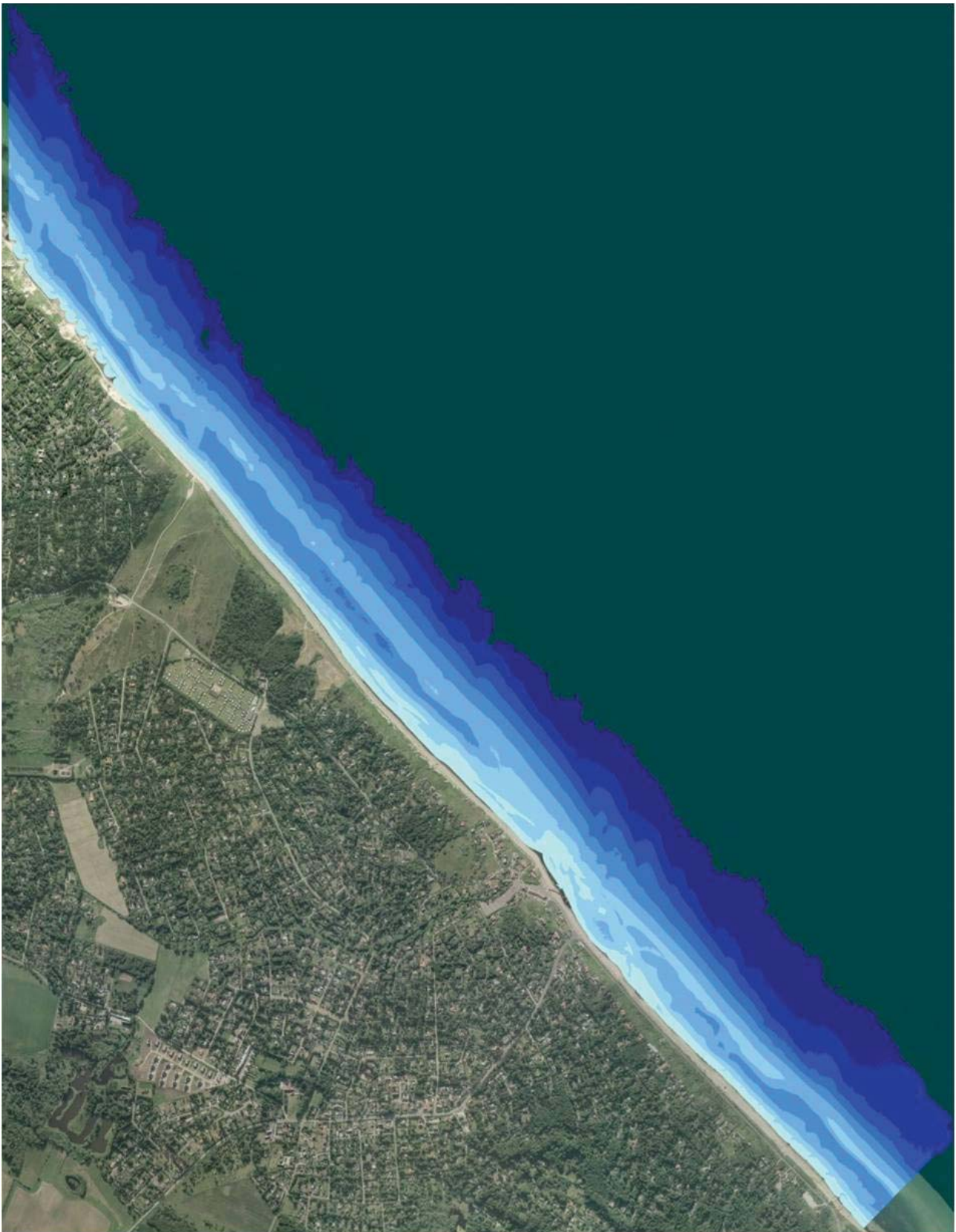
De overordnede resultater af laserscanningen præsenteres. Herefter ses mere detaljeret på udvalgte områder af databehandlingen og detailresultater.

3.1. Bathymetri fra laserscanning

Ved laserscanningen er der målt dybder på over 7 meter, og der er på baggrund af målingerne lavet en bathymetri, Figur 8. Bathymetrien vurderes at give en udmærket repræsentation af dybderne i området.

Bathymetrien er lavet på baggrund af de processerede data. Her er der i rutinen lavet en punktreduktion, således at punkterne i fx havoverfladen ikke er med. Da punktreduktionen foregår efter automatiserede rutiner og med et "groft filter", fjernes imidlertid også større sten på bunden samt kystbeskyttelseskonstruktioner mv., på hvilken baggrund den efterfølgende dataleverance rekvireres. Disse refereres herefter som 1. hhv. 2. databehandling. I rutinen til punktreduktion er oprindeligt benyttet en algoritme, der er udviklet til at måle terræn og til samtidig at fjerne indflydelsen fra vegetation og bebyggelse. Denne vil, hvis der

udelukkende ønskes et mål for en plan bund eller strand, være tilstrækkelig, mens den er mangelfuld i forhold til identifikation af objekter under vandet, der ligger højere end den omgivende bund (fx store sten eller høfder). Ved at gennemgå alle målte punkter for høfder og bølgebrydere, er det konstateret, at laserscanningen måler mange af dem, men at den efterfølgende punktreduktion fjerner de fleste. Fritliggende større sten på stranden er også undersøgt, og de bliver ikke registreret af laserscanningen. Den efterfølgende dataleverance, behandlet med en anden rutine, giver en væsentlig forbedring. Flere høfder, bølgebrydere og skræntkanter er nu med i det endelige resultat, og dybden i nogle områder, der er målt flere gange under overflyvningerne, er ændret væsentligt. Forskelle mellem rådata, den første og den anden dataleverance er behandlet mere detaljeret i Kapitel 3.4 sammen med vurderingen af de ubehandlede data. Overordnet set betragtes opmålingen som værende vellykket, idet det dog umiddelbart bemærkes, at efterbehandlingen af data er meget afgørende for de endelige og mere detaljerede resultater.



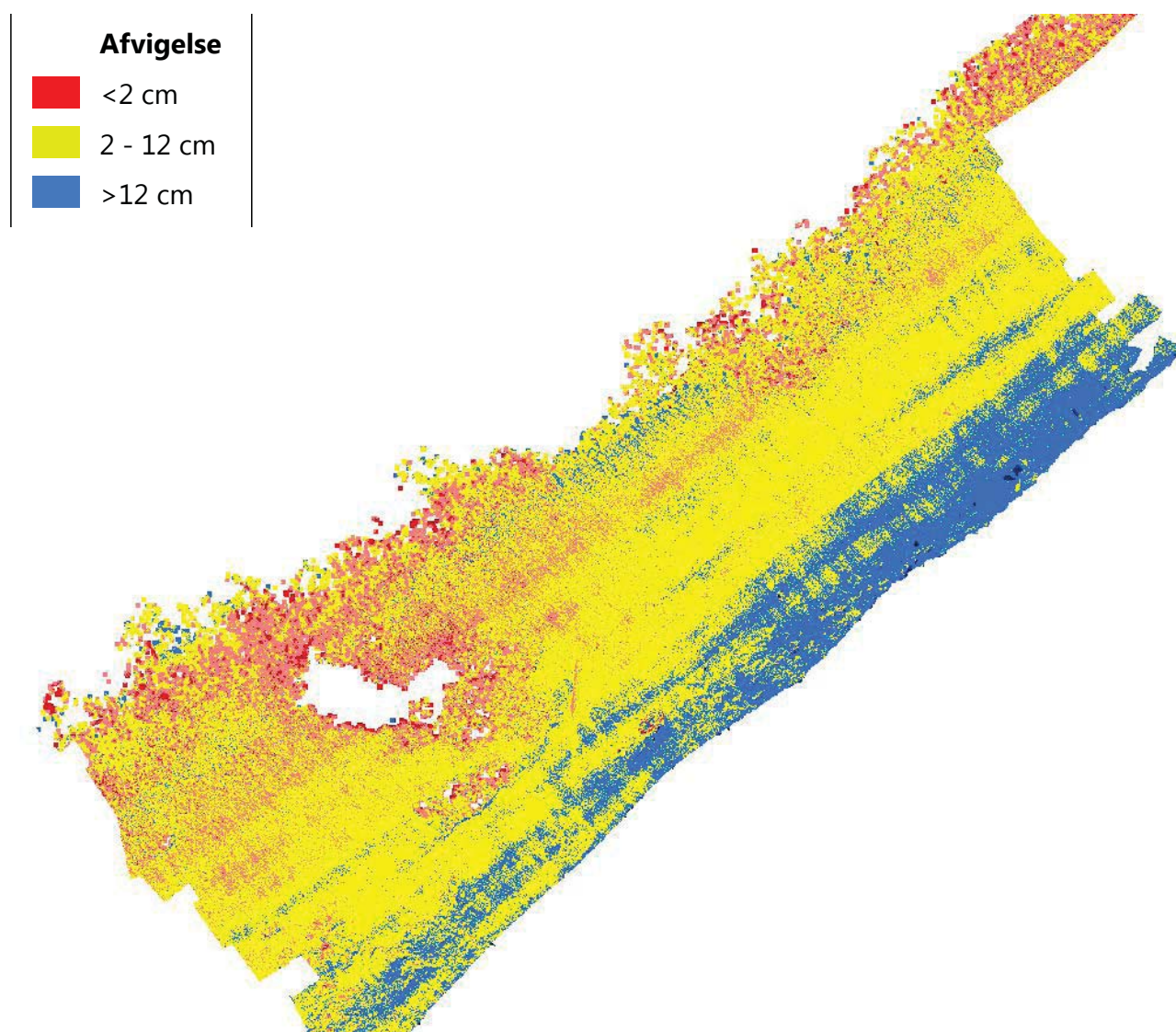
Figur 8 Bathymetri produceret ud fra opmåling med grøn laser (0-8 m dybde, ækvidistance 1 meter), 1. databehandling, jf. tekst.

3.2. Sammenligning mellem søp-måling og laserscanning

KDI har målt en mindre del af området med en fladedækkende opmåling. Mens en del af den fladedækkende opmåling er på dybder, hvortil laserscanningen ikke når ned under opmålingen, har laserscanningen derimod resultater fra lavt vand og fra stranden. Det fælles område er, som nævnt, ca. 550 m * 160 m. De to målinger har en gennemsnitlig forskel på ca. 7 cm indenfor det fælles område.

Figur 9 viser en differensplan mellem den fladedækkende opmåling og laserscanningen. Her ses med gult de områder, hvor forskellen er på mellem 2 og 12 cm, svarende til 7 ± 5 cm. Det synes at være størstedelen af området.

Af Figur 9 ses endvidere den ujævne afgrænsning mod NV af det fælles opmålte område. Endvidere er der et hvidt område, der ikke er målt af laserscanningen. Dette område behandles i næste afsnit. På Figur 10 er den gule farve udeladt.



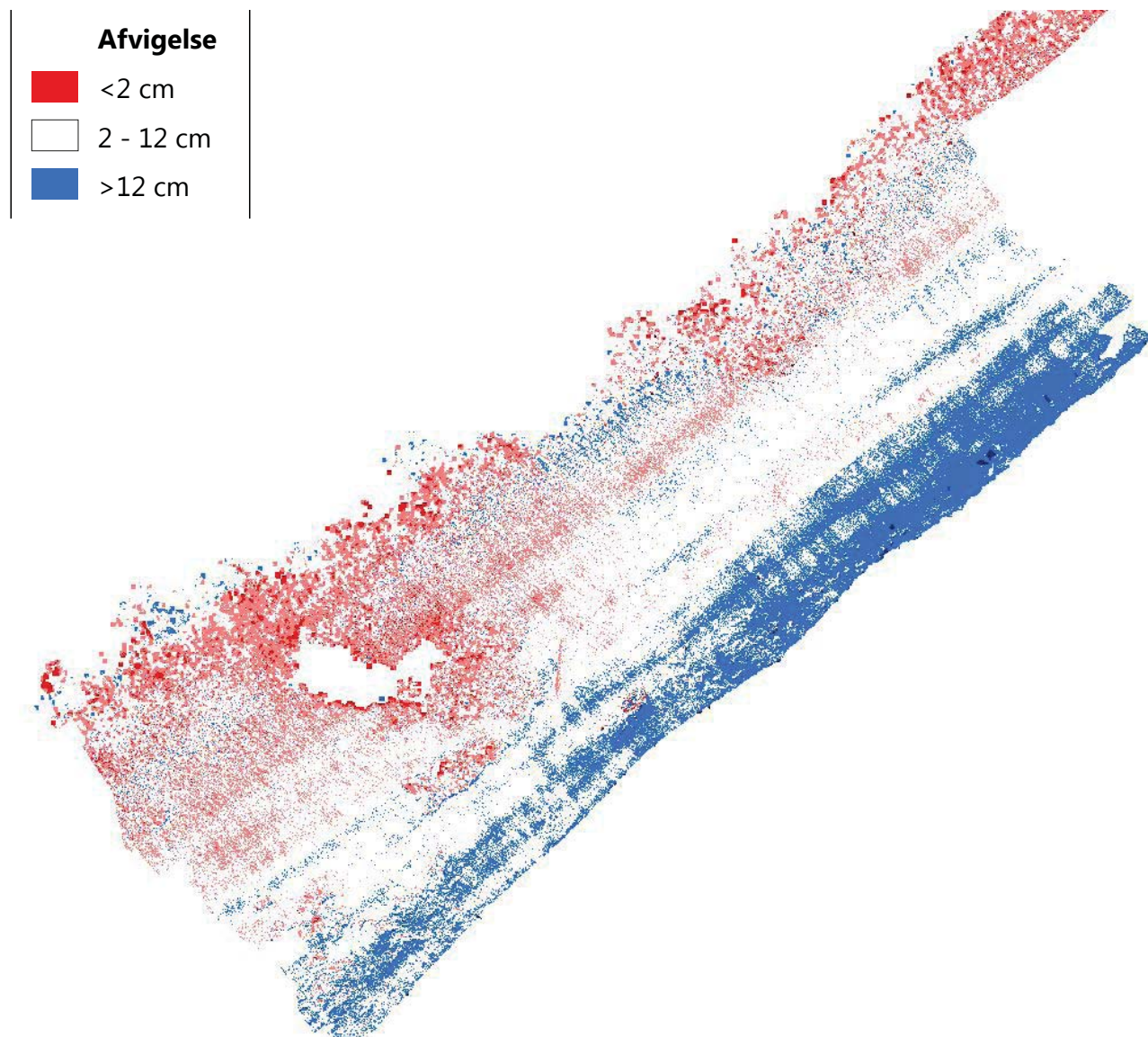
Figur 9 Differensplan mellem den fladedækkende opmåling med multibeam og laserscanningens 1. databehandling, hvor forskellen over store dele er mellem 2 cm og 12 cm.

Her ses de områder, der afviger mere end 5 cm, hvis de to målinger justeres i forhold til hinanden. Det iagttages, at der er afvigelser, der tilsyneladende afhænger af dybden. I den østlige og inderste del af området når afvigelsen enkelte steder op på over 0,5 m (ved en vanddybde på ca. 2 meter). Laserscanningens standardafvigelse og dens afhængighed af dybden kan evt. fremadrettet adresseres ved fremtidige sammenligninger med fx opmålte tværprofiler med 200 meters mellemrum.

3.3. Bundforhold

Som en del af metodestudiet, har det været et ønske at undersøge den grønne lasers anvendelighed til at vise detaljer som fx sten, tangskove og øvrige forhold på havbunden.

Først betragtes det relativt store område indenfor området opmålt med multibeam, hvorfra der ikke er målinger, Figur 11. Ved opmåling med multibeam vil der normalt komme et kraftigt signal fra et område med sten, hvor dybden er mere end 0,5 m lavere end omgivelserne. Her vil hårde "mål" langt fra ekkoloddet normalt vokse i størrelse. Med laserscanning forholder det sig omvendt. Sten under vandet er normalt begroede og fremtræder mørke på fotos. Det betyder, at et stenområde tilbagesender meget lidt lys. Med den valgte opsætning af måleudstyret registreres således ingen punkter, hvis stenene ligger på ca.



Figur 10 Differensplan mellem den fladedækkende opmåling med multibeam og laserscanningens 1. databehandling, der viser forskelle større end 5 cm; dvs. >12 cm (blå) og mindre end 5 cm; dvs. < 2cm (rød).

6 m vand og er begroede. Området fremtræder tydeligt på fotoet, og verifikation af, at der er tale om et stenrev, er foretaget med undervands-optagelse. Optagelsen bekræfter endvidere, at der er mange sten i området omkring revet.

For begge metoder vil dog generelt gælde, at en sikker estimering af havbundens niveau besværliggøres af tangskov. Kombinationen af fotos og scanning, der optages simultant, synes dog her at være et godt værktøj til både detaljerede studier af bundens beskaffenhed og til videre dokumentation af mulighederne for anvendelse af grøn laser.

I forhold til større samlinger af sten, kan laserscanningen måle, at stenene findes, hvis de ligger på lavt vand (< ca. 4 m) eller på stranden. Desværre er selv større samlinger af sten blevet slettet i 1. databehandling af opmålingen.

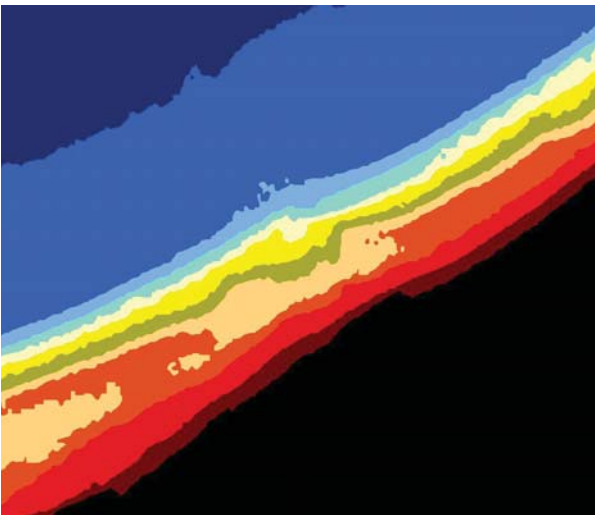
Af Figur 12 og Figur 13 ses en høfde og en bathymetri omkring høfden, der meget detaljeret (ækvidistance = 0,1 m) viser dybden omkring høfden. Blot mangler høfden. Den manglende opmåling af denne høfde er opdaget, fordi der ikke var ændringer i dybden fra 1. til 2. databehandling. Desuden er de enkelte opmålte punkter på høfden undersøgt, og opmålingen viser ingen ændring i højden, selvom høfden kaster en pæn skygge. Dette tyder på, at opmåling og databehandling ikke er optimeret til den rumlige opløsning, som udstyret burde være i stand til at måle (0,5 m). Snarere synes et realistisk mål at være 2 m, hvilket stemmer overens med, at sten med en sideflade på 1 m ikke bliver målt. Det bemærkes dog, at det af ressourcemæssige årsager ikke har været muligt at analysere 2. databehandling i samme detaljeringsgrad som den 1., men at opløsning af bundformer mv. fremadrettet bør adresseres yderligere.



Figur 11 Område med manglende data i laserscanningen (øverst) og et foto af området (Foto: Danmarks Miljøportal).



Figur 12 Højden langs kysten, der er for lille til at blive vist i scanningen.



Figur 13 Højde-/dybdekurver på stranden vist med 0,1 meter ækvidistance.

3.4. Datareduktion og singulære punkter

Stikprøvekontroller af den 1. databehandling viser, at der i et område, der også er dækket af fladeopmålingen med flerstråle ekkolod, er ca. 25 punkter per m², hvoraf ca. 7 punkter per m² er godkendte.

Et singulært punkt/måling er løst sagt et punkt, der afviger fra nabopunkterne. I 1. databehandling af laseropmålingen er det generelt kun de målinger, der har største dybde, der er bevaret, mens flertallet af punkter bliver udeladt, når de viser en dybde, der er lidt mindre.

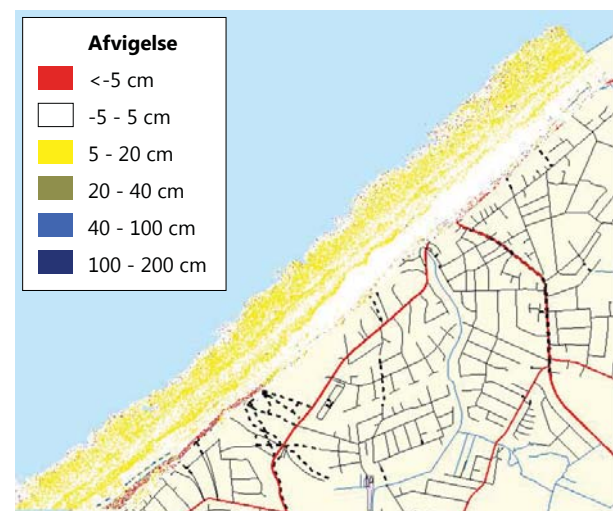
Nogle punkter slettes tilsyneladende, fordi de viser en lidt lavere vanddybde end nabopunkterne. Tre punkter med dybder på henholdsvis 2,76; 2,77 og 2,78 m bevares, mens to punkter, der i planen ligger mellem de 3 nævne punkter, slettes, fordi dybden er lidt lavere (2,74 og 2,75 m). Der er intet

i signalets styrke, der begrundes sletningen, da de 3 godkendte punkter har 974, 839 og 770 i signalstyrke, mens de slettede punkter har 777 og 938. Bunden sænkes her med 1 cm, på grund af den måde de singulære punkter udvælges på. I et andet tilfælde sænkes bunden med 4 cm.

Ved normale opmålinger med multibeam er det også normalt, at punkter, der ligger i en vis afstand fra den gennemsnitlige dybde, bliver slettet. Her vil data tilsvarende skulle processeres i forhold til deres brug. Ved normal opmåling til søkort er det de laveste/mindste dybder, der bruges, mens Kystdirektoratet skifter mellem de mindste dybder til fremstilling af søkort og middeldybder til kysttekniske formål. På den baggrund er der da heller intet i vejen med, at databehandlingen laver en mere eller mindre automatiseret tolkning af bundforholdene, når blot denne tilrettes det aktuelle formål med opmålingen.

Grundet ønsket om at vurdere laserscanningsmetodens anvendelighed, er den 2. databehandling sammenlignet med den første. Her er der "gået knap så drastisk til værks" i datareduktionen. Af Figur 14 ses af differensplanet mellem de to databehandlinger en generel reduktion i dybderne på mellem 5 - 20 cm (de gule områder) ude i vandet. Med god vilje kan bølgebrydere erkendes som blå pletter nederst til venstre i figuren, mens stranden og klinten flere steder er rød, svarende til en reduktion i højden på over 5 cm.

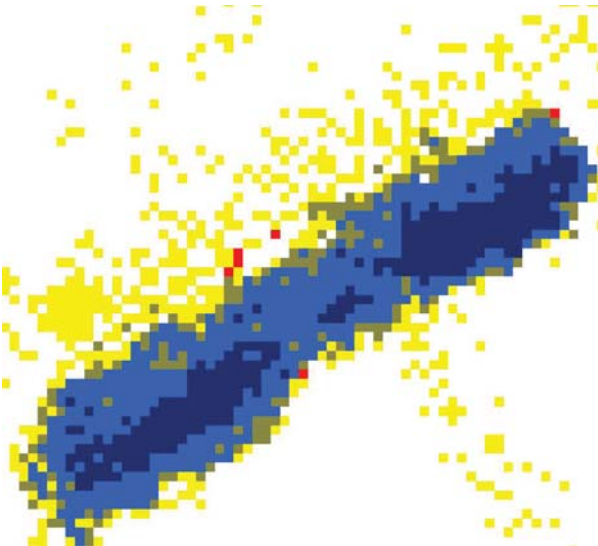
I Figur 15 og Figur 16 ses, at bølgebryderne ved 2. databehandling tydeligt fremtræder, og hvor Figur 16 viser en enkelt bølgebryder.



Figur 14. Differensplan mellem 1. og 2. databehandling.



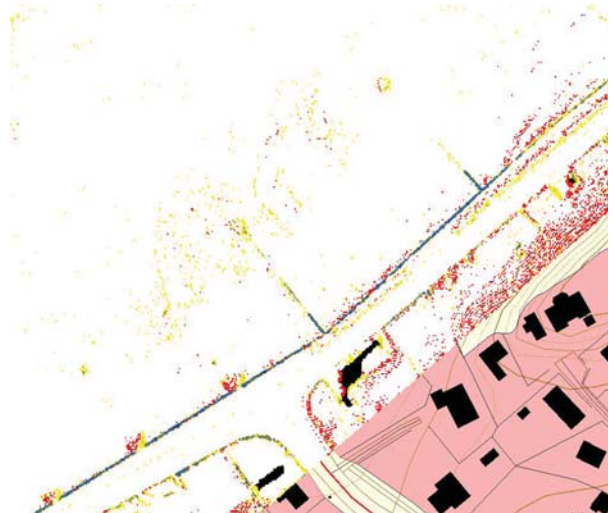
Figur 15 Udsnit af Figur 14; differensplan. Bølgebryderne (blå) fremtræder nu tydeligt. Signaturforklaring som i Figur 14.



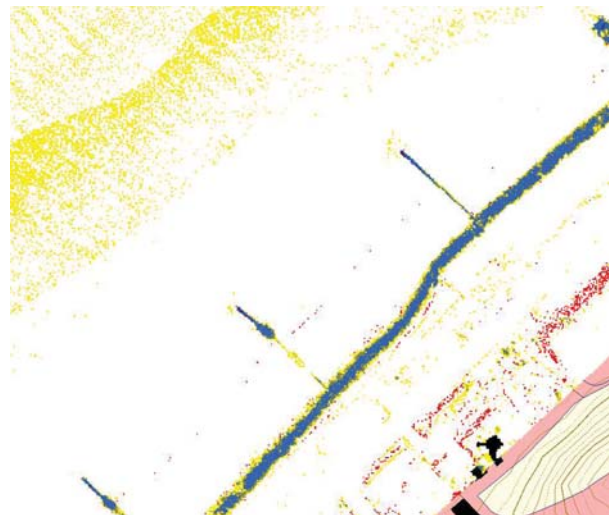
Figur 16 Differensplan mellem 1. og 2. databehandling for en enkelt bølgebryder. Signaturforklaring som i Figur 14.

Her viser gul en ændring på mellem +5 - 20 cm, grøn en ændring på +20 - 40 cm, blå en ændring på 40 - 100 cm, og mørkeblå viser en ændring på mellem 100 cm og 200 cm.

Tilsvarende ændringer ses for to andre områder på stranden og ud i vandet, Figur 17 og Figur 18, hvor høfder og kanten af en højvandsmur, der var fjernet i 1. databehandling, nu fremtræder.



Figur 17 Differensplan mellem 1. og 2. databehandling for en strækning med høfder og højvandsmur. Signaturforklaring som i Figur 14.



Figur 18 Differensplan mellem 1. og 2. databehandling for en strækning med høfder og højvandsmur. Høfderne fremtræder nu tydeligt. Signaturforklaring som i Figur 14.

3.5. Nøjagtigheder ved grøn laser

Som nævnt i både metodeafsnit og i resultater, afhænger nøjagtigheden og præcision ved grøn laser af en del parametre, herunder vejrforhold, bundens beskaffenhed, positionering og databehandling.

Den geometriske nøjagtighed af den bathymetriske scanning er, ud fra oplysninger fra dataleverandøren (NIRAS) teoretisk bestemt ved følgende parametre:

Bestemmelsen af scannerens position (plan og højde):

Scannerens position bestemmes preliminært - og realtime, ud fra satellitsignaler, og positionen forbedres efterfølgende ved databehandlingen

med RTK-korrektioner fra GPSnet. Den resulterende nøjagtighed er (ud fra en konservativ vurdering) bedre end 5 cm i plan og højde.

Bestemmelsen af scannerens position/vinkling (roll, pitch and yaw angle):

IMU'ens (Inertial Measurement Units) nøjagtighed er ca. 0,004 grader, hvilket ved en flyvehøjde på 500 m og en scanningsvinkel på 20 grader fra lodret, giver et maksimalt fejlbidrag på 1,5 m horisontalt. Den horisontale nøjagtighed kan forbedres ved indpasning over fx bygningshjørner på landjorden.

Scannerens instrumentale præcision:

Scanneren har en instrumentpræcision på ca. 2,5 cm i "afstandsmålingen".

I databehandlingen foretages en udjævning af data fra de forskellige flyvelinjer. Her gennemføres en sammenligning af data fra de forskellige flyvelinjer med henblik på en matematisk udjævning af de relative (små)for skydninger, som primært skyldes forskellige højdefvigelser i GPS-beregningen. Den vertikale forskel mellem data fra forskellige flyvelinjer ligger typisk inden for maks. 8 cm. Tværlinjer anvendes til at understøtte den bedst mulige udjævning mellem flyvelinjer. Nøjagtigheden af den resulterende punktsky kan forbedres og valideres yderligere i forhold til kontrolflader på landjorden. I det aktuelle projekt har NIRAS anvendt Danmarks Højdemodel som støtte i kontrollen.

Endelig vil der ved bathymetrisk airborne scanning være et særligt fejlbidrag ved korrektion af lasermålingens "runtime" gennem vandsøjlen. Runtime er bl.a. bestemt ved det beregnede brydningsindeks ved vandoverfladen. NIRAS har ikke p.t. en bud på størrelsen af dette fejlbidrag isoleret set.

Den samlede nøjagtighed vil således være bestemt ud fra ovenstående fejlkilder. Som tidligere nævnt er væsentlige parametre for et godt resultat gunstige vejrforhold og vandforhold (rolig havoverflade med god sigt). Endvidere vil bundens beskaffenhed (lys/mørk) være af stor betydning i forhold til i hvilket omfang og til hvilken dybde, der kan måles.

3.6. Grafisk præsentation af opmåling

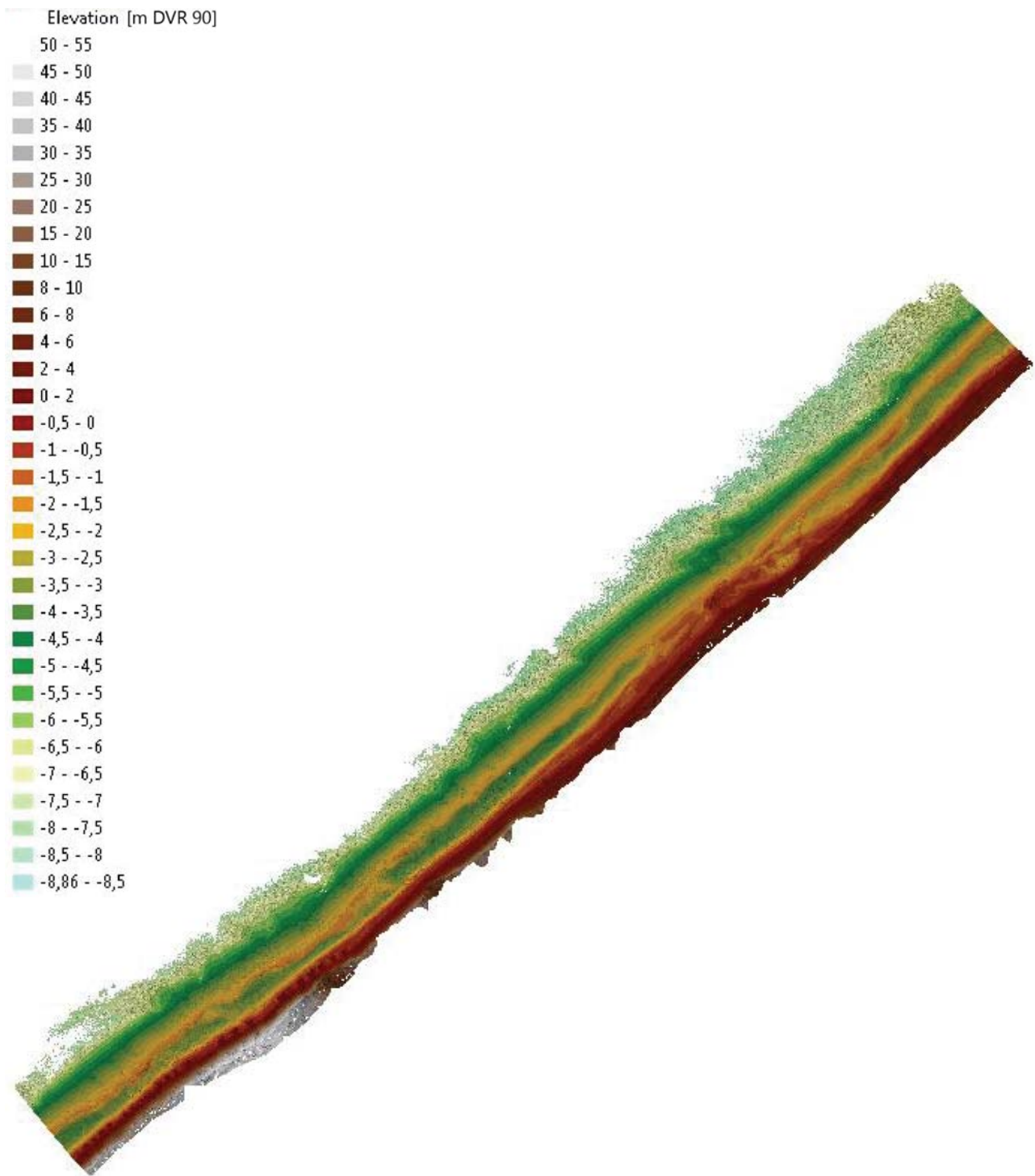
Opmålinger af dybdeforhold og bundformer kan præsenteres på mange måder afhængigt af brugen. Det kan være som punktdata og traditionelle bathymetrier, som præsentationer af gradienter eller, som vist i Figur 19, i en grafik, der kombinerer luftfoto og bundformer med skyggeeffekt (hillshade). Her opnås med grøn laser en meget stor detaljeringsgrad i præsentationen af landskaber på tværs af kystlinjen. Detaljeringsgraden betyder endvidere, at der kan zoomes på de objekter, former eller områder, der skal gøres til genstand for en visualisering eller grafik.

Tilsvarende vil grafikker kunne udvikles i 3D, hvor en drapering af fotos over bathymetrien, giver "real-time" virkelighedsnære repræsentationer af de fysiske forhold. Disse kan fx anvendes til formidling af kystudvikling, af geologi eller til formidling af bølger og strømforhold og deres indvirkning på bundens udseende. I forlængelse af dette metodestudie samarbejder NIRAS og Kystdirektoratet om produktion af en film/animation til formidling af kystforhold og laserscanning ud fra pilotstrækningen.

Figur 20 viser den resulterende bathymetri i 0,5 meters intervaller baseret på den anden databehandling.



Figur 19 Grafik, der kombinerer luftfoto og bathymetri fra grøn laser. Bundformerne erkendes tydeligt (NIRAS/KDI).



Figur 20 Højde- og dybdeforhold (0,5 m ækvidistance) ud fra scanning med grøn laser (2.databehandling).



4. Diskussion og konklusioner

Kystdirektoratet har som en del af vores kysttekniske udviklingsprogram afprøvet grøn laser til opmåling af kystnær bathymetri. Selvom grøn laser er anvendt i forskellige marine opmålingsmæssige sammenhænge gennem de senere år, er der ikke tidligere publiceret resultater fra kystopmålinger i danske farvande.

Projektet har haft som overordnet formål at afprøve og evaluere metodens anvendelighed til en forbedret beskrivelse af kystnære dybdeforhold; herunder at vurdere metodens fordele og ulemper i forhold til at opløse enkeltobjekter (som sten, tangskove mv.), at vurdere bundens beskaffenhed og økonomiske aspekter i relation til traditionelle opmålingsmetoder. Det har endvidere været et formål at undersøge potentialer i anvendelsen af grøn laser sammen med andre data; fx i kombination med traditionel opmåling og luftfoto.

Pilotprojektet, der har været af et begrænset omfang både tidsmæssigt og omfangsmæssigt, har endvidere haft til formål at opnå større viden om metoden, og projektet adresserer dataindsamling og dataprocessering på et overordnet niveau samt den resultatmæssige kvalitet til anvendelse i specielt kysttekniske sammenhænge. Her har viden om kystprofilen og overfladesedimenter mv. betydning i forhold til vurderinger af eksisterende kystbeskyttelse og behov for ny kystbeskyttelse i

forhold til dimensionering og i forhold til fremtidige indsatser med sandfodring. Denne viden kan tillige anvendes i vurderinger og fremskrivning af kystudvikling og til modellering af eksempelvis oversvømmelsesfaren langs kysterne,

Grøn laser udføres af en række virksomheder rundt i verden. I dette projekt er flyvning og dataleverance foretaget af NIRAS. Til opmålingen, der er foretaget fra fly, er anvendt en RIEGL VQ-820-G scanner, og en del af databehandlingen er foretaget af firmaet AirborneHydroMapping (AHM). I tilknytning til laserscanningen er der optaget luftfotos, og Kystdirektoratet har udført en fladedækkende multibeam opmåling af et mindre område samt optaget undervandsvideo fra området.

Metoden er relativt udfordrende, teknisk set, i forhold til både dataindsamling og den efterfølgende databehandling. Da laserlyset ikke er helt ufarligt for mennesker, er der en begrænsning i styrken ved opmåling, der naturligt også begrænser dybder, detaljeringsgrad og nøjagtighed. Metodens anvendelighed er endvidere afhængig af god sigt i vandet. Da opmålingen af pilotstrækningen på Nordsjællands kyst er foretaget under rolige vejrforhold og med god sigt i vandet, må forholdene overordnet set betragtes som noget nær optimale.

Data er modtaget som (processerede) rådata og som behandlede data. De behandlede data er modtaget i to leverancer. Ud fra analyser af data fra 1. databehandling, er der undervejs i projektet rekvireret endnu et sæt data, 2. databehandling, hvortil er anvendt en anden algoritme til filtrering af punkter. Denne er et resultat af, at markante objekter som kystbeskyttelse mv. manglede i første levering. Analysen af 2. datahandling har, grundet projektets tidsmæssige omfang, ikke været så detaljeret som i første databehandling, men har adresseret flere af de udfordringer ved metoden, som blev identificeret i analysen fra 1. databehandling.

Grundet tidsmæssige udfordringer, hvor scaningsudstyret var optaget til andre formål ifølge oplysningerne til Kystdirektoratet, gik der uforholdsmæssig lang tid fra opmålingen med grøn laser blev bestilt, til den blev gennemført. Her vil tidsperspektivet i udførelsen, samt hvilke årstider, vejrforhold mv, der er optimale, naturligvis skulle adresseres og tænkes ind i relation fremtidige kampagner og deres formål.

Omkostninger til levering af data til projektet udgør ca. 200.000 kr. Udgifterne dækker primært over mobilisering, flyvetid og databehandling. Da der er indkøbt data for en relativ kort strækning, vil kilometerprisen forventeligt kunne reduceres markant i tilfælde af, at der måles over længere strækninger. Dels vil mobiliseringsudgiften være af samme størrelsesorden som ved en kort strækning, og dels vil flyvetid afkortes pr. km, da antal flyvninger er mindre i forhold til antal opmålte kilometer langs de fleste kyststrækninger. På sigt må tiden/omkostninger til databehandling også forventes at blive mindre i takt med, at der udvikles bedre algoritmer til varieret brug af grøn laser opmålinger.

På baggrund af opmålingen med grøn laser er der fremstillet en detaljeret bathymetri, der rækker fra kystlinjen og ud til omkring 7 meters vanddybde. Bathymetrien vurderes at give en udmærket repræsentation af højde-/dybdeforholdene på stranden og i det kystnære profil. Afhængig af brugen ift. maks. eller min. vanddybde, bør dette fremadrettet kunne adresseres og specificeres i databehandlingen og leverance. Nøjagtigheden i dybdeforholdene for en plant skrånende bund er tilfredsstillende. Størstedelen af målinger ligger indenfor de fra leverandøren anslåede 5-10 cen-

timeters nøjagtighed og er beliggende i intervallet 2-12 cm ($7 \text{ cm} \pm 5 \text{ cm}$) i forhold til fladeopmålingen fra multibeam. Generelt ses de største afvigelser på stranden og mod de dybere dele af området opmålt ved scanningen. Laserscanningen er her afhængig af kontrolpunkter til absolut reference, og en del af kontrollen er her sket ved sammenligning med fladeopmåling (samt af en linje opmålt ved sejlads til pilotstrækningen). De overordnede usikkerheder er af samme størrelsesorden som i DHM, som laserscanningen er "sømmet sammen med". Sammenføjningen af de to opmålinger (dog gennemført med års mellemrum og med forskellige metoder) giver store fordele i forhold til at kunne give en sammenhængende, detaljeret præsentation af højdeforholdene langs kysten.

Da de dybere dele af profilet ligger på grænsen af, hvor langt ned i vandsøjlen lasereren kan måle, og der her er færrest målepunkter til rådighed, kan der potentielt ske en optimering af flyvelinjer/repetition af de dybere dele af profilet, hvilket måske vil give en mere sikker dybdebestemmelse.

En stor styrke ved grøn laser er dog, at metoden både formår at måle på meget lave vanddybder og på dybder op til 6-8 meter. Opmåling med multibeam når kun ind til ca. 2-3 meters vanddybde, og selv ved anvendelse af fx vandscooter vil en fladedækkende opmåling være forholdsvis mere omkostningstung og tidskrævende. Omvendt når multibeam opmåling ud til større dybde, og en dækning af bathymetrien fra strand til større vanddybde vil derfor skulle foretages med en kombineret opmåling med grøn laser til at dække det indre profil og multibeam til de ydre dele.

Opmålingsmetoderne skal naturligvis afvejes efter behov og økonomi. Til mange formål vil det være tilstrækkeligt med kystnormale profiler med en vis afstand (fx 200 eller 500 m) eller viden om dybdekurvenes beliggenhed, hvor multibeam opmålingen så kan forlægges langs dybdekurverne.

Alt i alt kan der dog ved grøn laser ses en fordel i at lave samhörende profilopmålinger med en vis afstand til kontrol, samt en kombination af traditionel opmåling og grøn laser ved overgangen fra lav (5 - 6 m) til større vanddybde.

Grøn lasers evne til at opløse objekter på stranden og ude i vandet kan forbedres. Udover selve planlægningen og eksekvering af opmålingen, foreligger der et stort arbejde med datafiltrering

og databehandling. I den først modtagne databehandling "forsvandt" mange detailformer; herunder hele bølgebrydere og høfder mv. Den anden databehandling gav en bedre opløsning af større objekter, mens enkeltliggende sten op til 2 * 2 * 2 meter ikke kunne erkendes i resultaterne. Endvidere er der set på et større område med sten og tang, der ikke er opmålt i laserscanningen. Fremadrettet er det derfor en udfordring at forbedre datafiltrering og tolkning yderligere, fx i relation til udpegningen af enkeltobjekter, der kan have betydning for sejladsikkerhed, geologiske vurderinger af bundforhold eller miljømonitoring.

I udpegning af områder med sten og/eller tang og ålegræs udgør sammenligning af grøn laser med simultant optagne detaljerede luftfotos (opløsning ned til 5 cm) et stærkt værktøj, og hvor der evt. fremadrettet kan arbejdes med digitaliseringsmetoder til sammenligning af grøn laser og fotos.

I det undersøgte område fremtræder bunden generelt lys som følge af, at der er sand på bunden. Ved mere finkornet sedimentsammensætning vil bunden fremtræde mørkere, hvilket formentlig vil betyde, at grøn laser ikke kan måle på så store dybder, som tilfældet er her, samt at der vil være flere områder, hvorfra der ikke kan produceres data.

Sandformer på bunden i pilotområdet ses tydeligt, og grøn laser udgør en god metode til at identificere bundformer og til herigennem indirekte at vurdere dynamikken på en given kyststrækning i forhold til mængden af mobilt sand. På kyststrækninger med medium til stor dynamisk påvirkning vil en kortlægning med grøn laser derfor have stor værdi i kysttekniske sammenhænge. Selvom bundformer i stor udstrækning kan erkendes ud fra luftfotos, vil opmåling med grøn laser, for eksempel med nogle års mellemrum, give et detaljeret billede af ændringer i profilet og i mængden af mobilt sand.

Grafisk giver grøn laser fremragende visualiseringer af bundforhold, enten i form af 2D-visualisering med skyggeeffekter eller i 3D, hvor der kan foretages "flyvninger" i grafikken. Her giver kombinationen af grøn laser og fotos i høj opløsning en visuel formidlingsmæssig styrke. Samtidig giver sammenkoblingen med DHM visuelt en forbedret opfattelse af de landskabelige sammenhænge. En sådan 3D-flyvning er under udarbejdelse i samarbejde mellem NIRAS og Kystdirektoratet.

Det kan konkluderes, at det er lykkedes at opmåle en dansk kyststrækning med grøn laser i en god kvalitet. Opmålingen giver en detaljeret beskrivelse af bathymetrien af en generelt set tilfredsstillende kvalitet og nøjagtighed. Der er dog stadig udfordringer i forhold til databehandling og tolkning af især opløsning af objekter på bunden og områder med mørk bund. Endvidere er afgrænsningen udadtil ujævn, og der er identificeret flere emner, der fremadrettet bør adresseres ift. opmåling, databehandling og tolkning.

Grøn laser vurderes samlet at være et godt alternativ til traditionelle opmålinger i områder, hvor der ud fra en kystteknisk synsvinkel er behov for en detaljeret viden om dybder og bundforhold. I pilotprojektet er der endvidere identificeret problemstillinger, der bør gøres til genstand for yderligere undersøgelser; herunder vurdering af brug i andre sammenhænge indenfor forskellige videnskabelige discipliner; alene eller i sammenhæng med andre målemetoder.

Endelig er resultaterne, ud fra et rent formidlingsmæssigt synspunkt, særdeles velegnede til at lave visualiseringer over dybdeforhold og landskabsudvikling i 2D og 3D, fx ved at kunne samle opmålinger på land og ude i vandet i én præsentation.



5. Perspektivering

En undersøgelse af grøn laser til opmåling af dybdeforhold er med succes foretaget for en pilotstrækning på Nordsjællands kyst. Projektet har primært haft fokus på metodens anvendelse i kysttekniske sammenhænge. Selvom metodens anvendelighed afhænger af kystens udformning og egenskaber (profil, sedimentsammensætning mv.), forventes grøn laser fremadrettet at kunne give et mere detaljeret billede af dybde- og bundforhold langs landets kyster. Ligeledes forventes grøn laser at kunne anvendes i andre kysttekniske sammenhænge, ligesom grøn laser kan anvendes i andre faglige sammenhænge.

Her vil databehandlingen kunne justeres i forhold til de resultater, der ønskes at fokusere på, og hvor metoden i sammenhæng med fotos i høj opløsning vil kunne finde flere anvendelsesområder.

I forhold til rent kysttekniske forhold vil grøn laser kunne medvirke til at dokumentere ændringer i profilet som følge af sandfodring. Dette kan fx tænkes ind i forhold til bypass, hvor sand ledes forbi en havn, og hvor profiludviklingen nedstrøms

havnen afhænger af det tilførte sand. Her vil gentagne opmålinger kunne dokumentere variationer i profil og i de fremherskende bundforhold.

Endvidere kan metoden tænkes ind i andre sammenhænge i det kystnære i forhold til planlægning på søterritoriet, ligesom grøn laser vil kunne finde anvendelse fremadrettet i monitoringsopgaver af kyst- og havmiljømæssig karakter. Dette kan både være i forhold til "nu og her" opgaver og ved en mere langsigtet beskrivelse af udviklingen, hvor der for eksempel foretages opmåling hvert tiende år til dokumentation af ændringerne i den mellemliggende periode.

Der kan derfor anbefales videre analyser af anvendelsesmuligheder for grøn laser i Danmark. Analyserne vil mere detaljeret kunne beskrive tilgang til data og anvendelsen af grøn laser i kombination med andre målemetoder til brug i forskellige sammenhænge. Endvidere bør perspektiverne for grøn laser ses i sammenhæng med andre traditionelle og satellitbårne metoder, herunder økonomisk, ift. anvendelsen.

6. Referencer

- Guenther, G.C., Cunningham, A.G., LaRocque, P.E. og Reid, D.J. (2000). Meeting the accuracy challenge in airborne lidar bathymetry. *Proceedings of EARSeL-SIG-Workshop LIDAR, Dresden/FRG, June 16 – 17, 2000.*
- Hawa, M.N., Knudsen, T., Kokkendorff, S.L., Olsen, B.P. og Rosenkranz, B.C. (2011). Horizontal accuracy of digital elevation models. *Technical Report Series no. 10, National Survey and Cadastre (KMS), Copenhagen, Denmark,*
- Jensen, P. (2012). Bølgeklima for 40 lokaliteter i danske farvande med vurdering af klimaeffekter for udvalgte lokaliteter. *Rapport udarbejdet af DHI for Kystdirektoratet. 27. august 2012.*
- Kystdirektoratet (1995). Målenøjagtighed ved fladedækkende opmåling. *Internt notat (09.06.1995). KDI-Menu, Vestkystsystemet. Kystinspektoratet, Lemvig.*
- Kystdirektoratet (2012). Bølgeklimateatlas. <http://kysterne.kyst.dk/boelgeklimateatlas.html>
- Mandlbürger, G., Pfennigbauer, M., Steinbacher, F. og Pfeifer, N. (2011). Airborne Hydrographic LiDAR Mapping – Potential of a new technique for capturing shallow water bodies. *19th International Congress on Modeling and Simulation, Perth, Australia, 12–16 December 2011. http://mssanz.org.au/modsim2011.*
- Mandlbürger, G., Pfennigbauer, M. og Steinbacher, F. (2012). Potential of a novel airborne hydrographic laser scanner for capturing shallow water bodies. *EGU, General Assembly 2012, Vienna, Austria, 22 - 27 April 2012.*
- Mandlbürger, G., Pfennigbauer, M. og Pfeifer, N. (2013). Analyzing near water surface penetration in laser bathymetry – a case study at the river Pielach. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-5/W2, 2013. ISPRS Workshop Laser Scanning 2013, 11 - 13 November 2013, Antalya, Turkey.*
- Quadros, N.D. (2013). Investigating shallow water bathymetry acquisition technologies, survey considerations and strategies. *Report prepared for the Commonwealth Government of Australia, Department of Climate Change and Energy Efficiency by CRCSI.*
- RIEGL (2013a). Principle of operation. *RIEGL Laser Measurement Systems. http://www.riegl.com/nc/products/airborne-scanning/*
- RIEGL (2013b). Datasheet RIEGL VQ-820-G. *RIEGL Laser Measurement Systems. http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/DataSheet_VQ-820-G_23-09-2013.pdf*
- Rosenkranz, B. og Frederiksen, P. (2011). Quality assessment of the Danish Elevation Model (DK-DEM). *Technical Report Series no. 12. National Survey and Cadastre (KMS), Copenhagen, Denmark.*
- Rosenkranz, B., Kokkendorff, S.L. og Thommesen, S.S. (2011). Rettelse af typefejl på diger i Danmarks højdemodel. *Technical Report Series no. 11, National Survey and Cadastre (KMS), Copenhagen, Denmark.*
- Steinbacher, F., Pfennigbauer, M., Aufleger, M. og Ullrich, A. (2012). High resolution airborne shallow water mapping. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B1, 2012. XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia.*

