

Pilotprojekt om opmåling af flyvesandstykker vha. georadarmålinger i Tisvilde Hegn og på Melby Overdrev

Ingelise Møller, Merete Binderup, Lars Nielsen,
Oliver Søndergaard Rosner & Linnea Morsing Thomasen

Pilotprojekt om opmåling af flyvesandstykker vha. georadarmålinger i Tisvilde Hegn og på Melby Overdrev

Udarbejdet for Nationalpark Kongernes Nordsjælland

Ingelise Møller, Merete Binderup, Lars Nielsen,
Oliver Søndergaard Rosner & Linnea Morsing Thomasen

INDHOLD

1.	Forord	3
2.	Metode	5
3.	Georadarkortlægning	6
3.1	Feltdage.....	6
3.2	GPR-udstyr og -dataindsamlingsparametre	7
3.3	GPR positioneringsdata	8
3.4	Editering og processering	8
3.5	Georadarlinjerne.....	9
3.6	Præsentation af georadarprofiler	12
4.	Tolkning af georadarprofiler	13
4.1	Melby Overdrev	13
4.2	Asserbo Plantage vest for Lerbjerg.....	15
4.3	Lerbjerg og Brantebjerg i Tisvilde Hegn.....	17
4.4	Opsamling på observationer af flyvesand i georadarsektionerne	21
5.	Boringer	23
5.1	Tisvilde Hegn.....	23
5.2	Melby Overdrev	27
5.2.1	Sedimentanalyserne.....	32
6.	Resumé og konklusion	33
7.	Litteratur	35
8.	Bilag	37
8.1	Flyvesand I Nordsjælland – en geologisk tolkning. Bachelorprojekt udarbejdet af Oliver S. Rosner og Linnea M. Thomasen, juni 2023.	37
	Resumé ved Merete Binderup:.....	37
8.2	Analyse af sedimentprøver	39

1. Forord

Nærværende pilotprojekt om opmåling af flyvesandstykker ved hjælp af georadarmålinger i Tisvilde Hegn og på Melby Overdrev er gennemført efter ønske fra Nationalpark Kongernes Nordsjælland.

Projektet blev til, fordi der hersker stor usikkerhed om mængderne af flyvesand, som blæste ind fra kysten og dækkede store dele af Nordsjælland under den lille istid – primært i perioden fra 1500- til 1700-tallet. Jacobsen (2005) skønner, at det var omkring 100 mio. m³ sand, mens Rune (2014) skønner 'over 30 mio. m³ sand. Størrelserne og kilderne er refereret i Binderup (2021) om Klitter og flyvesand i Nordsjælland.

Det har igennem længere tid været kendt, at georadarmetoden kan anvendes til kortlægning af æoliske (flyvesand) og marine sedimenter, se kapitel 2, Metode. Men der herskede tvivl om, hvorvidt det var muligt på georadarprofilerne at adskille de forholdsvis unge flyvesands-aflejringer fra de underliggende sedimenter.

Georadarmålingerne havde således til formål at teste metodens anvendelighed til kortlægning af flyvesandstykker i et område, hvor flyvesandet forventes at overlejre marint sand. Testen havde også til formål at illustrere, at det er muligt at adskille forskellige sedimentære aflejringer (marint sand kontra flyvesand) fra hinanden på georadarprofiler, selv om udgangsmaterialet er det samme.

Nationalpark Kongernes Nordsjællands rådsgruppe foreslog, at Brantebjerg burde være et af de områder, der ville blive undersøgt med georadar. Her var det muligt at køre en linje i et område, hvor flyvesand/klitter overlejrer moræneleret, samt en linje, hvor flyvesandet hviler på marine aflejringer. Herudover foreslog GEUS, at et profil blev lokaliseret på langs og på tværs af de markante strandvolde i Melby Overdrev/Asserbo Plantage, for at sikre, at de to typer aflejringer, hvis materiale er meget ens, var dækket. De ønskede områder blev godt dækket med georadarprofiler, se kapitel 3 og 4, mens tiden ikke tillod at indsamle data i det foreslåede 'ekstra-område' Karsemose. Det skønnes i øvrigt, at data fra Karsemose ikke havde bidraget yderligere til vurderingen af metodens anvendelighed med at skelne flyvesand fra andre aflejringstyper.

Indsamlingen af georadardata skete i et samarbejdsprojekt mellem GEUS og Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning (IGN), KU, hvorfra 2 studerende (Rosner & Thomasen) benyttede georadardata til deres bachelorprojekt, se kort resumé herfra i Bilag 1.

Efter behandling og tolkning af georadardata er der gennemført to borer i hhv. Tisvilde Hegn og på Melby Overdrev for at verificere tolkningen af data. Der er desuden indsamlet og analyseret 4 sedimentprøver fra boringen på Melby Overdrev (se Bilag 2) – ligeledes til hjælp for tolkning af sedimenterne.

Borekernerne er nummererede og opbevares på GEUS Kernemagasin for eventuelt senere brug, se kapitel 5.

2. Metode

Georadarmålinger er gennem de seneste to-tre årtier blevet udviklet meget, og georadar har ved integration med borehulsoplysninger og geomorfologiske observationer (i feltet eller fra kort) vist sig meget nyttig til at kortlægge både æoliske og marine sandaflejringer (Jol, 1995; Møller et al., 2008; Nielsen et al., 2009), og integration med højopløselige dateringsteknikker har tilladt, at den tidlige udvikling af sedimentære processer har kunnet forklares med relativ stor detaljeringsgrad (Bristow & Pucillo, 2006; Clemmensen et al., 2007; Clemmensen et al., 2012). Samtidig tillader georadar-refleksioner fortolkning af forskellige interne facies i de æoliske og marine aflejringer ned til ca. 5-15 m under terræn, afhængigt af sedimenternes elektriske ledningsevne, de anvendte antennefrekvenser og de udsendte signalers styrke (Jol, 1995; Neal, 2004; Nielsen et al., 2017).

Vi anvender her antennefrekvenser med en centerfrekvens på 250 MHz for både sender og modtager. Antennerne er placeret ved siden af hinanden (deres centre er 0.38 m fra hinanden) på en plade af hærdet plastmateriale, som trækkes langs jordoverfladen. Et såkaldt odometer-hjul koblet til opstillingen registrerer løbende den afstand, man har trukket måleopstillingen. Måleopstillingen er koblet til informationer fra odometer-hjulet således, at der foretages en måling med antennerne for hver 0.05 m man har bevæget sig fremad. Ud over registrering af afstand vha. odometer-hjul opmåles geografiske placeringer af de målte linjers placering vha. et differential-GPS-system, som tillader registrering af de tre rumlige koordinater med en præcision på 0.02 m.

De enkelte datapunkter registreres som spor af bølger, hvor tilbagekastede radarsignaler registreres for hver 0.4 nanosekund (ns). De registrerede data udsættes for samme standard-processering, som i væsentlige træk følger fx Nielsen & Clemmensen (2009), Clemmensen & Nielsen (2010) og Nielsen et al. (2017): Først korrigeres de registrerede signalers amplitude for den geometriske spredning og dæmpning, som overvejende skyldes undergrundens elektriske ledningsevne. Derefter påføres evt. frekvensfiltre, som designes til at undertrykke støj, der kan forstyrre identifikation af refleksioner fra laggrænser. Undergrundens radarbølgehastighed bestemmes ved analyse af diffraktionshyperblers krumning, og denne hastighed anvendes til migration og dybdekonvertering af de observerede data således, at lagenes korrekte geometriske form og dybde kan bestemmes. Analyse af de usikkerheder, som indgår i sådanne analyser af 250 MHz-signaler indikerer, at lag med tykkelser på ned til 0.1 m kan skelnes fra hinanden, mens dybder til refleksioner kan bestemmes med sikkerheder på omkring 0.25-0.30 m (Nielsen & Clemmensen, 2009).

3. Georadarkortlægning

3.1 Feltdage

Georadardata er indsamlet på Melby Overdrev, Asserbo Plantage og Tisvilde Hegn over to dage d. 16.-17. marts 2023. Vejret var køligt, tørt og overvejende overskyet. På Melby Overdrev blev data primært indsamlet langs stier i terrænet og enkelte korte linjer er ført gennem lav bevoksning. I Asserbo plantage og i Tisvilde Hegn er data indsamlet på skovveje, dog er enkelte linjer ført gennem en ujævn skovbund. Figur 1 og Figur 2 viser situationer fra feltarbejdet hhv. på Melby Overdrev og i Tisvilde Hegn.



Figur 1: Fotos fra feltarbejdet d. 16. marts 2023 på Melby Overdrev. Fotos øverst er taget midt på Linje 6 (venstre set mod sydøst og højre set mod sydvest); fotos nederst er taget på Linje 10, set mod nord.



Figur 2: Fotos fra feltarbejdet i Tisvilde Hegn d. 17. marts 2023. Foto, øverst til venstre er taget midt på Linje 2; foto øverst i midten langs Linje 3; foto, øverst til højre, på Linje 8, hvor skovvejen skærer sig ned i terrænet; foto nederst til venstre, fra gravhøj ved linje 3 set mod nordvest; foto, nederst til højre ved vestlige ende af Linje 10.

3.2 GPR-udstyr og -dataindsamlingsparametre

Georadarkortlægninger er udført med Sensors and Software pulseEKKO pro system. Systemet tilhører Københavns Universitet. Identifikation af de enkelte moduler i systemet er angivet i Tabel 1.

Tabel 1: Identifikation af de enkelte moduler i georadarsystemet, anvendt til kortlægningen.

Modul	Serie nummer
DVL	0000-3485-0003
Kontrolmodul	00223407-0026
Transmitter	0030-6582-0005
Reciever	0029-6581-0003

Georadarkortlægningen er udført i reflektionsmode ved brug af skærmede antenner med en nominel frekvens på 250 MHz. Parameterindstilling relateret til dataindsamlingen er angivet i Tabel 2.

Tabel 2: Parametre for dataindsamling med georadarsystemet.

Dataindsamlingsparametre	
Antenne nominal frekvens	250 MHz
Antenneafstand	0.38 m
Afstand mellem målinger	0.05 m
Længde på tidsvindue	250 ns
Sampleafstand i tid pr måling	0.4 ns
Antal målinger i stak	8
Transmitterspænding	165 V

3.3 GPR positioneringsdata

Positionen af geordardata er opmålt ved brug af en Trimble GPS med mulighed for at måle positionen med cm-nøjagtighed. Trimble GPS'en kommunikerer via en "mobiltelefons" dataforbindelse med en virtuel differential GPS basisstation i et frekvensområde som forstyrrer georadarmålingerne. Derfor skal der holdes en vis afstand mellem georadarsystemet og GPS'en. Under indsamling af en linje med georadardata markeres start og slut samt tjekpunkter med 100-200 m afstand, hvor georadarpositionen knyttes til et GPS-målepunkt. Udover georadarlinjens tjekpunkter opmåles linjens position og topografi i en række punkter til at beskrive georadarlinjens forløb. I skovområder skygger trækrone for en del af satellitterne, hvorved det ikke er muligt at måle positionen med tilstrækkelig høj nøjagtighed til at bruge koten fra GPS-målingen, men kun placeringen. Kotedata kan trækkes fra en digital højde-model.

GPS-data er processeret i MATLAB. Først er alle GPS-data associeret til de individuelle georadarlinjer identificeret ud fra feltnoter. UTM X and Y koordinater med for stor unøjagtighed filtreres fra. Hvis der derefter mangler positioner til at beskrive linjens forløb, er der tilføjet positioner aflæst i GIS med et ortofoto som baggrund. Da det viste sig, at GPS-punkterne ikke var opmålt tilstrækkelig tæt eller for usikre til at beskrive topografien, er præcise topografiske data udtrukket fra en digital terrænmodel i 0,4 m grid downloadet fra "Dataforsyningen.dk". Data anvendt til den digitale terrænmodel er indsamlet ved en laserskanning fra fly (LiDAR) i 2014-15. Den vertikale nøjagtighed er specificeret til at være 0,05 m.

3.4 Editering og processing

Editering og processing af georadardata er udført ved brug af programmet EKKO view deluxe fra Sensors and Software.

Først er topografidata tilføjet til traceheader til brug i topografikorrektionen. Sempel editering og processing procedurer inkluderer: reorientering af linjer, så alle linjer enten er orienteret fra vestlig til østlig retning eller fra en sydlig til en nordlig retning, "repick" af time-zero,

lowpass filtrering ved 500 MHz for at reducere højfrekvent støj, og "dewow" for at undertrykke lavfrekvent elektromagnetiske induktive signal. Derudover er data migreret med en konstant hastighedsprocedure ved brug af en hastighed på 0,1 m/ns, som anses for at være det bedste valg. Til slut er georadardata skaleret ved brug af proceduren automatisk gain kontrol ved en vinduesbredde svarende til 4 bølglængder og en amplitude på 150 og 300 hhv. for data fra Melby Overdrev og fra Tisvilde Hegn.

Der er lavet en analyse af diffraktionshyperbler på udvalgte linjer. På Melby overdrev er der fundet hastigheder omkring 0,1 m/ns tæt ved terræn. Det er svært at se diffraktionshyperbler i den dybere del af sektionerne, da der er mange diffraktionshyperbler tæt ved terræn. Enkelte med hastigheder omkring 0,08 m/ns er observeret. I Tisvilde Hegn datasættet er der overvejende fundet hastigheder omkring 0,1 m/ns tæt ved terræn, dog nogle steder lavere hastigheder omkring 0,08-0,07 m/ns, mest hvor der er meget lille indtrængningsdybde og de ser ud til at moræner ligger i terræn. I de lidt dybere lag er der fundet hastigheder omkring 0,07 m/ns i overgangen til formodet moræner. Ud fra en samlet vurdering af hastighederne er det valgt at udføre topografikorrektion og tid-dybdekonvertering med en hastighed på 0,1 m/ns.

3.5 Georadarlinjerne

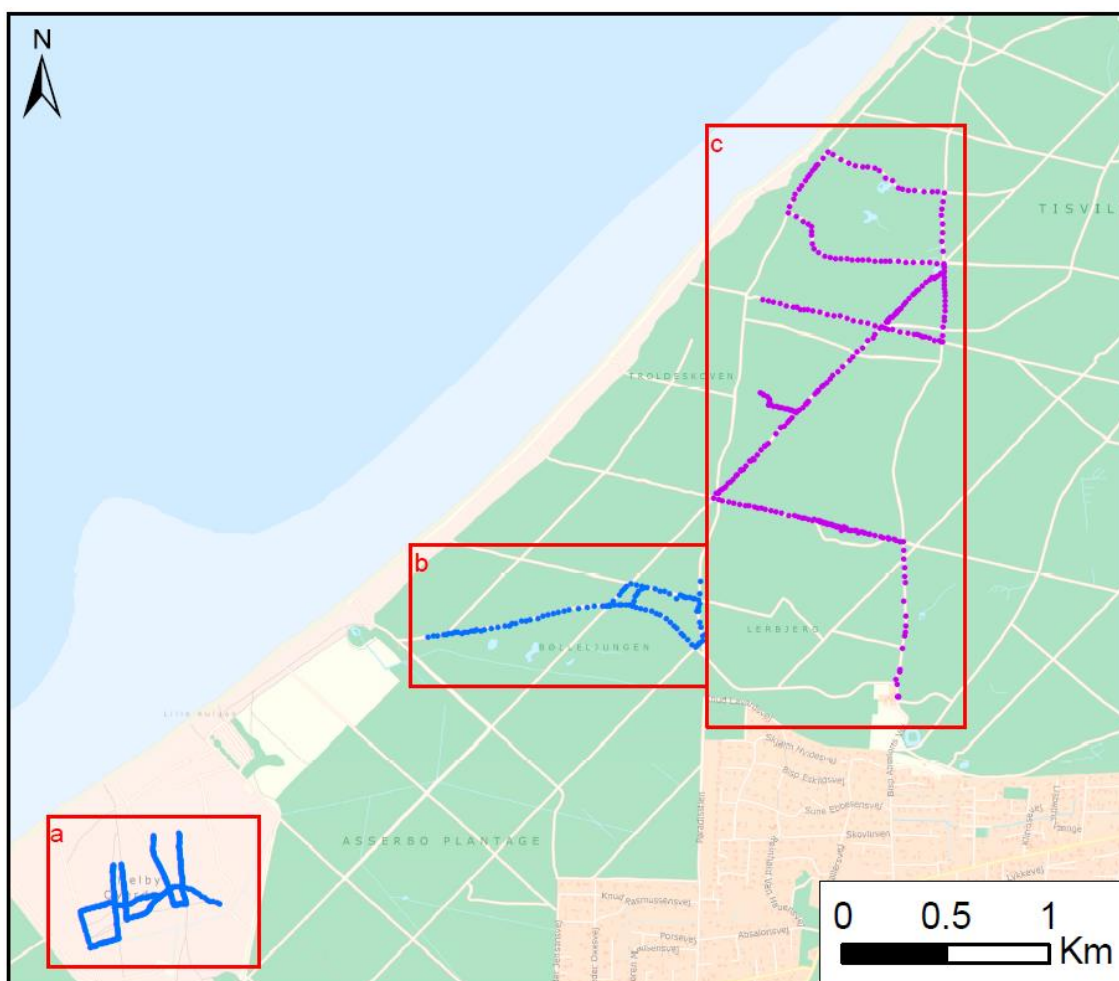
På den første feltdag er der målt 15 linjer, samlet med en længde på 5,02 km, mens der på den anden feltdag er indsamlet 11 linjer med en samlet længde på 6,65 km. Information om linjerne er opsummeret i Tabel 3 og Tabel 4. Placeringen af linjer er vist på oversigtskortet i Figur 3 og med linjenavn i et detaljkort for hvert af områderne (Figur 4, Figur 5 og Figur 6).

Tabel 3: Information om linjer opmålt på Melby Overdrev og i Asserbo plantage d. 16. marts 2023.

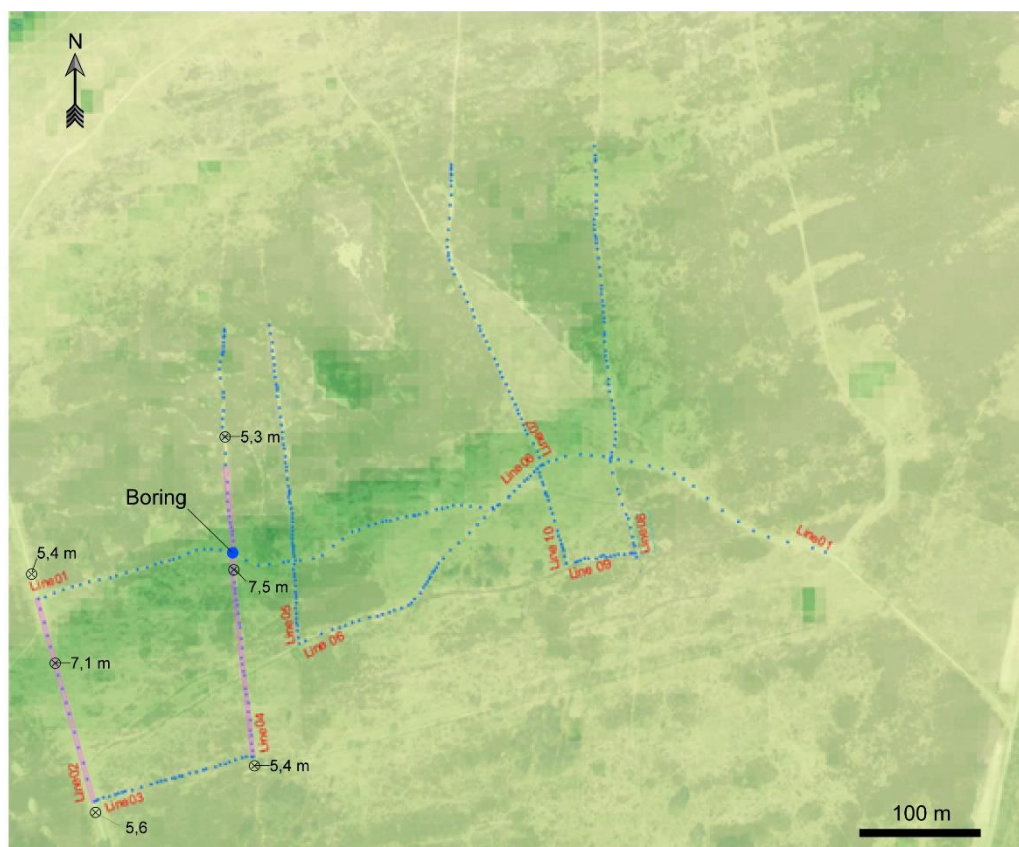
Linje	Orientering	Længde (m)	Terrænforhold
1	NV-SØ	729.55	Melby Overdrev, åbent land, på sti
2	S-N	175.85	Melby Overdrev, åbent land, på sti
3	V-Ø	144.6	Melby Overdrev, åbent land, gennem lav vegetation
4	S-N	358.45	Melby Overdrev, åbent land, på sti
5	S-N	270.8	Melby Overdrev, åbent land, på sti
6	V-Ø	264.65	Melby Overdrev, åbent land, på sti
7	S-N	268.75	Melby Overdrev, åbent land, på sti
8	S-N	350.3	Melby Overdrev, åbent land, på sti
9	V-Ø	61.65	Melby Overdrev, åbent land, gennem lav vegetation
10	S-N	84.9	Melby Overdrev, åbent land, gennem lav vegetation
11	V-Ø	1382.9	Asserbo plantage, skov, på skovvej
12	S-N	337.85	Asserbo plantage, skov, på skovvej
13	V-Ø	336.95	Asserbo plantage, skov, på skovvej
14	S-N	145.65	Asserbo plantage, skov, på skovvej
15	S-N	107.3	Asserbo plantage, skov, gennem skovbunden

Tabel 4: Information om linjer opmålt i Tisvilde Hegn d. 17. marts 2023.

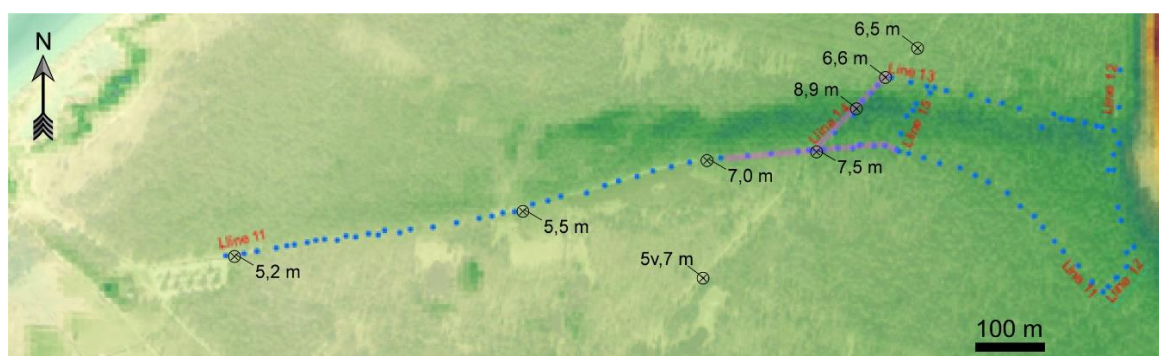
Linje	Orientering	Længde (m)	Terrænforhold
1	S-N	513.75	Tisvilde Hegn, skov, på skovvej
2	V-Ø	947	Tisvilde Hegn, skov, på skovvej/skovsti
3	SV-NØ	1157	Tisvilde Hegn, skov/åbent land, på skovvej
4	SV-NØ	411.45	Tisvilde Hegn, skov, på skovvej
5	S-N	346.35	Tisvilde Hegn, skov, på skovvej
6	V-Ø	620.35	Tisvilde Hegn, skov, på skovvej
7	S-N	355.05	Tisvilde Hegn, skov, på skovvej
8	V-Ø	887.05	Tisvilde Hegn, skov, på skovvej
9	S-N	377.05	Tisvilde Hegn, skov, på skovvej
10	V-Ø	896.1	Tisvilde Hegn, skov, på skovvej
12	V-Ø	136.8	Tisvilde Hegn, skov/åbent land, græsmark



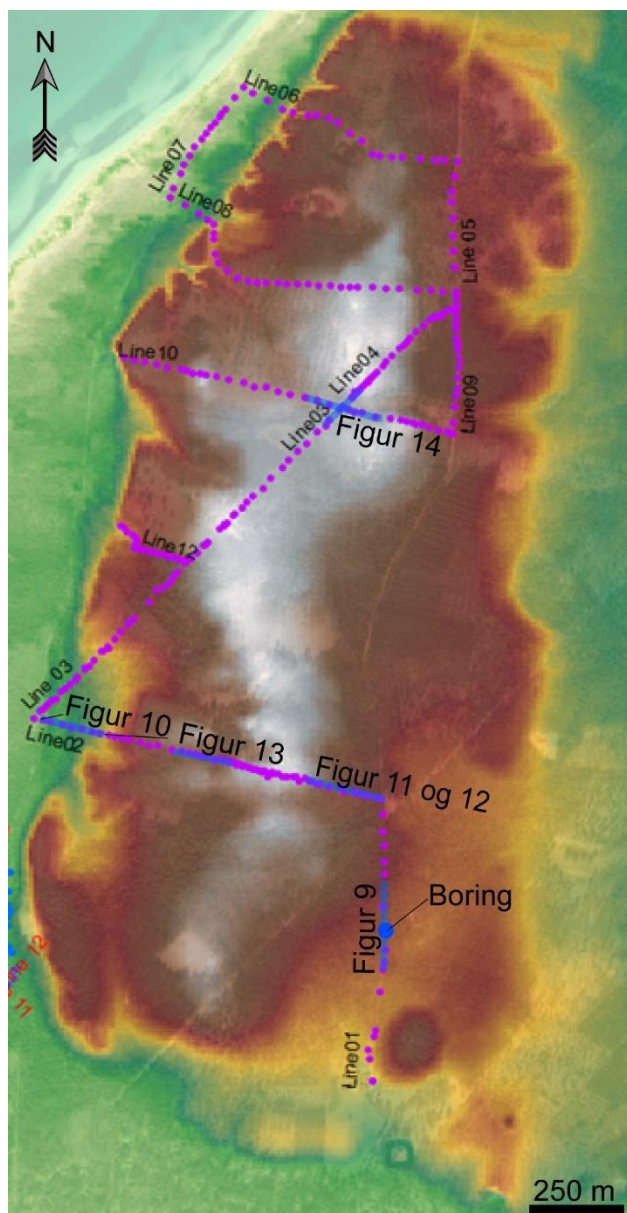
Figur 3: Oversigtskort over tre områder med georadarkortlægning på Melby Overdrev (a), Asserbo Plantage (b) og Tisvilde Hegn (c). Delområderne er vist i de efterfølgende figurer.



Figur 4: Melby Overdrev, georadarlinjerne 1-10. Linjenavn står ved starten af linjen; dog både ved start og slut for linje 1 og 6. Baggrundskort er en kombination af ortofoto og digital terrænmodel. Boring er markeret med blå cirkel. Udvalgte koteniveauer i m o.h. er indsat. Pink markering af de georadarsektioner der vises som eksempler i kapitlet.



Figur 5: Asserbo Plantage, georadarlinjerne 11-15. Linjenavn står ved starten af linjen; dog både ved start og slut for linje 11 og 12. Baggrundskort er en kombination af ortofoto og digital terrænmodel. Udvalgte koteniveauer i m o.h. er indsat. Pink markering af de georadarsektioner der vises som eksempler i kapitlet.



Figur 6: Tisvilde Hegn, georadarlinjerne 1-10 og 12. Linjenavn står ved starten af linjen; dog både ved start og slut for linje 3. Baggrundskort er en kombination af ortofoto og digital terrænmodel. Pink markering af de georadarsektioner der vises som eksempler i kapitlet.

3.6 Præsentation af georadarprofiler

De processerede og topografisk korrigerede georadarprofiler er plottet i samme skala og med en vertikal overhøjning på 4.

4. Tolkning af georadarprofiler

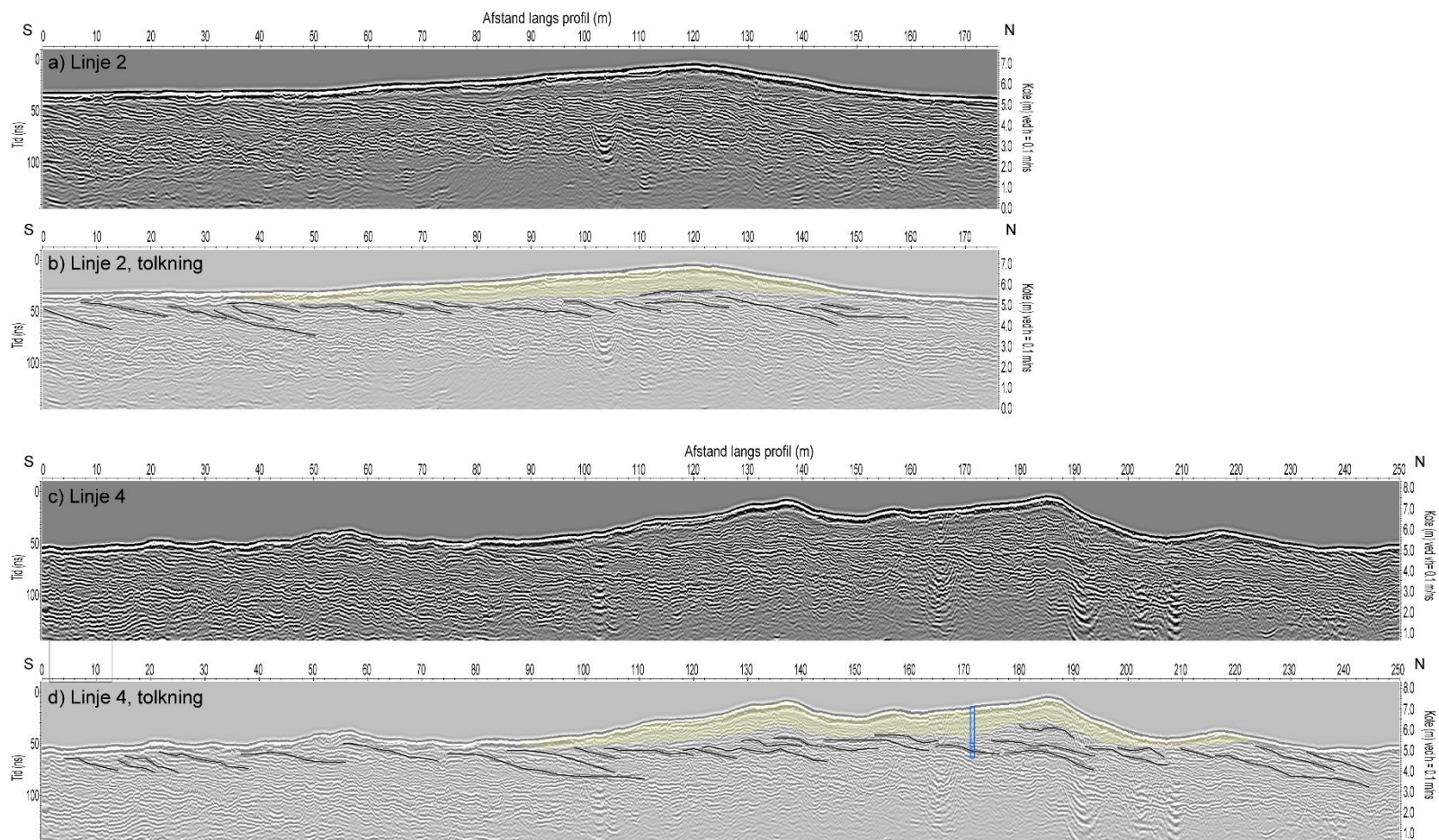
Alle georadarprofiler er gennemgået, vurderet og diskuteret i forhold til, hvorledes reflektionsmønstre i de enkelte sektioner kan tolkes i forhold til aflejningsmiljø og derved skelne mellem aeoliske aflejringer og ældre aflejringer. Tolkningerne af aflejningsmiljøer er understøttet af de to borer, som er lavet i projektet, og af eksempler fra litteraturen relateret til marine kystaflejringer (Nielsen & Clemmensen 2009; Clemmensen et al. 2012) og aeoliske aflejringer (Pedersen & Clemmensen 2005; Clemmensen et al. 2006, Clemmensen et al. 2007). Resultater af tolkningen vises ud fra eksempler fra de tre områder i de følgende afsnit.

4.1 Melby Overdrev

Melby Overdrev er karakteriseret ved en være en hævet marin flade opbygget af en vifteformet strandvoldsslette. Flyvesandet formodes dels at være aflejret som klitter, dels som en flade.

Figur 7 viser eksempler på to parallelt liggende S-N orienterede georadarlinjer, som derved er orienteret vinkelret på strandvoldene og den daværende kystlinje. Linjerne er placeret, så de skærer den V-Ø orienterede klitryg. I begge sektioner ses refleksioner som hælender i nordlig retning (markeret med sorte streger). Hvor terrænet er plant og beliggende i c. 5 m over havniveau (o.h.), starter de hældende refleksioner i terræn, mens de under den langstrakte klit med toppen omkring 7-8 m o.h stopper omkring 5-6 m o.h og dækkes af svagere subhorizontale refleksioner. De hældende refleksioner tolkes som overfladen af bevarede opskylsrygge i strandzonen, eftersom stranden udbyggedes. Det anes at nogle opskylsrygge er lidt højere og tolkes til at være strandvolde (Figur 7a og b, position 10-20 m, og 110-130 m, samt Figur 7c og d position 50-60 m, 130-140 m og 170-190 m). De svagere subhorizontale eller svagt ondulerende refleksioner mellem terræn og toppen af de hældende refleksioner tolkes som flyvesand aflejret i en klitarm (fremhævet med gult i Figur 7b og d).

Tolkningen af flyvesandtykkelsen understøttes af boring (Figur 22) placeret ved profilkoordinat 170 m i Figur 7. Overgangen mellem flyvesand og marint sand er vurderet til at ligge ca. 2.5 m under terræn i forhold til stien, hvor georadarlinjen er optaget. Da der er en usikkerhed omkring hastigheden, hvormed georadarsektionerne er tid-dybde konverteret, er der en usikkerhed på dybden til overgangen mellem refleksioner tolket som flyvesand og refleksioner tolket som marine strandaflejringer. Denne usikkerhed er illustreret ved at markere dybden til overgangen mellem flyvesand og marint sand, som den ville være placeret i georadarsektionen dybdekonverteret med ved hastigheder på hhv. den brugte 0,1 m/ns, (bund af blå boks i Figur 7), 0,12 m/ns (nederste linje i boksen) og 0,14 m/ns (øverste linje i boksen). Det kan ses at en hastighed på 0,14 m/ns er i bedst overensstemmelse med overgangen set i boringen.



Figur 7: Eksempler på S-N orienterede georadarlinjer på Melby Overdrev. Linjerne i a) og c) er gentaget med tolkninger i b) og d). En del af refleksionerne i er fremhævet med sorte streger. Aflejringer tolket som flyvesand er markeret med gult. Boring er markeret med blå. Positioner af geordarsektioner og boring ses i Figur 4.

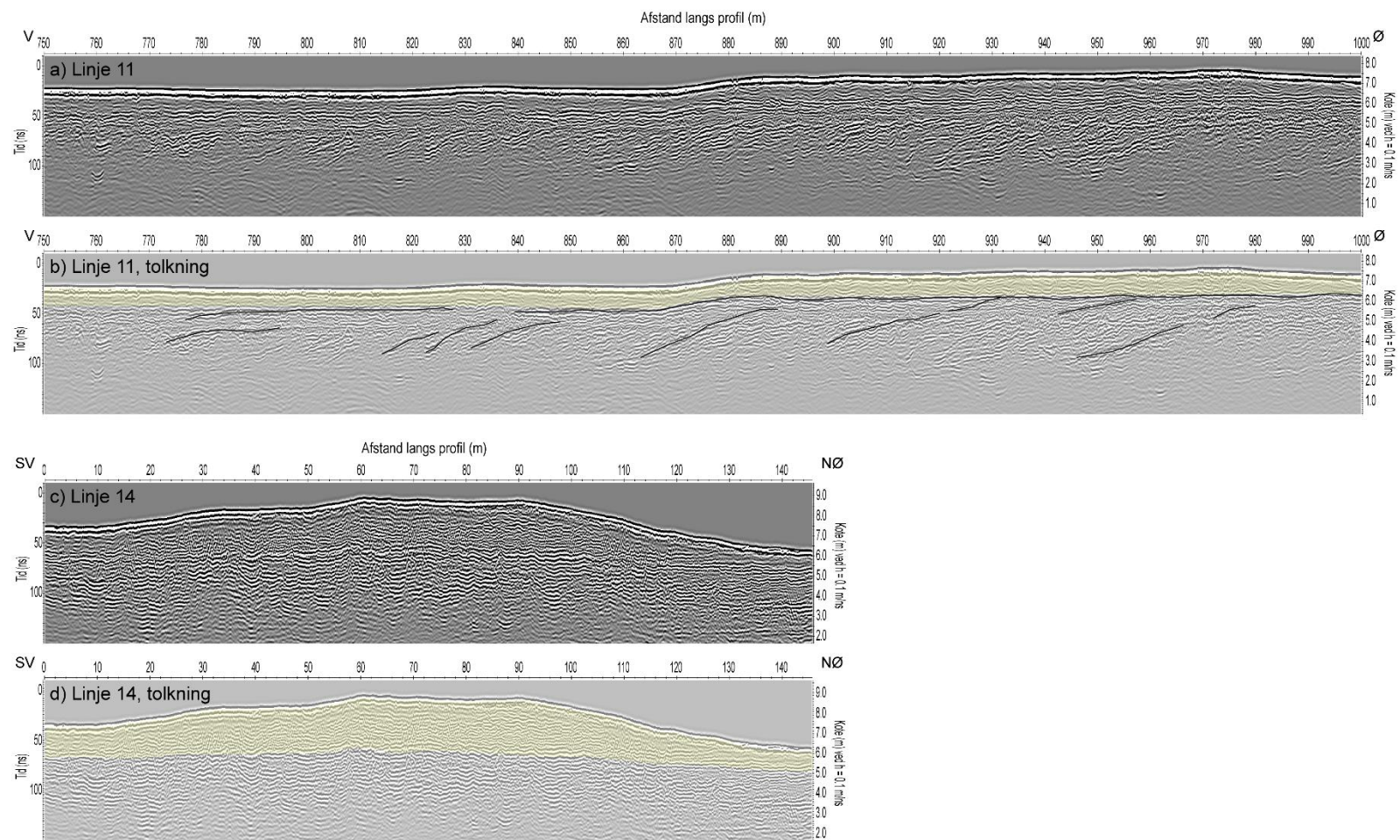
4.2 Asserbo Plantage vest for Lerbjerg

I Asserbo Plantage vest for Lerbjerg findes en langstrakt klitryg, som formodes at være dannet ved gennembrud i klitrækken ved kysten. Klitryggen ligger oven på den marine flade i et område, hvor strandplanet har vokset ved bugtudbygning, så opskylsrygge og strandvolde er parallelle med kysten og derved stort set vinkelrette på klitryggen (Figur 5).

Figur 8a og b viser et eksempel på en georadarsektion, som er optaget på tværs af strandvolde og opskylsrygge, men parallelt med klitryggen. Der ses vestlige hældende refleksioner, overlejret af subhorisontale refleksioner. De hældende refleksioner tolkes som bevarede overflader af opskylsrygge på et strandplan, der er vokset i en vestlig retning. Med udgangspunkt i georadarsektionen og den digitale terrænmodel (Figur 5) vurderes det, at der er ca. 1 m tykt flyvesandslag langs sektionen.

I en georadarsektion, som skærer klitryggen og dermed er parallel med strandvolde og opskylsrygge, ses overvejende subhorisontale refleksioner i den dybeste halvdel under kote 6 m o.h. (Figur 8c og d). I den øverste del af georadarsektionen ses dels brudte subhorisontale og ondulerende refleksioner (Figur 8c og d).

Disse to eksempler i Figur 8 viser, at det er vigtigt at indsamle georadarlinjer, som er placeret parallel med kystudbygningsretningen og vinkelret på strandvoldene, så de hældende strukturer fra opskylsrygge og strandvolde bliver kortlagt, da de er væsentlige for tolkning af de marine aflejringer og dermed opdelingen i hvilke dele af sektionerne, som er marine aflejringer og hvilke, som er flyvesandsaflejringer.

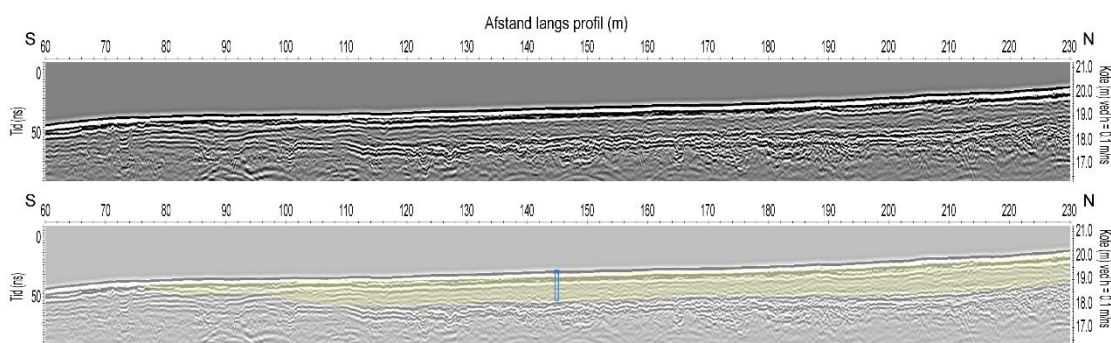


Figur 8: Eksempler på georadarlinjer i Asserbo Plantage vest for Lerbjerg. Linjerne i a) og c) er gentaget med tolkninger i b) og d). En del af reflektionerne er fremhævet med sorte streger. Aflejringer tolket som flyvesand er markeret med gult. Positioner af geodarsektionerne ses i Figur 5.

4.3 Lerbjerg og Brantebjerg i Tisvilde Hegn

Området omkring Lerbjerg og Brantebjerg er en stor bakke bestående af glaciale sedimenter, der ligger som en ø omgivet af den hævede marine flade. De glaciale aflejringer formodes at være dækket af flyvesand. Eksempler fra georadarlinjer beliggende på stødside, toppen og læsiden af bakken vises herunder.

Figur 9 viser et udsnit af georadarlinje 1 omkring boringen i Tisvilde Hegn (Figur 6). På georadarsektionen ses at georadarsignalet dæmpes meget kraftigt, specielt omkring profilkoordinater 60-80 m (Figur 9). Refleksionsmønstrene består af en blanding af sub-horisontale refleksioner og et kaotisk mønster. Over de kaotiske refleksioner ses svage subhorisontale refleksioner eller næsten transparente områder. Områder med kaotisk refleksionsmønster tolkes som moræneaflejringer, og hvor signalet dæmpes meget kraftigt (forsvinder hurtigt), formodes det at være moræneler. Bunden af området med svage subhorisontale refleksioner korrelerer med toppen af den jordbundshorisont, som observeres i boringen og de svage refleksioner er tolket som flyvesandsaflejringer.

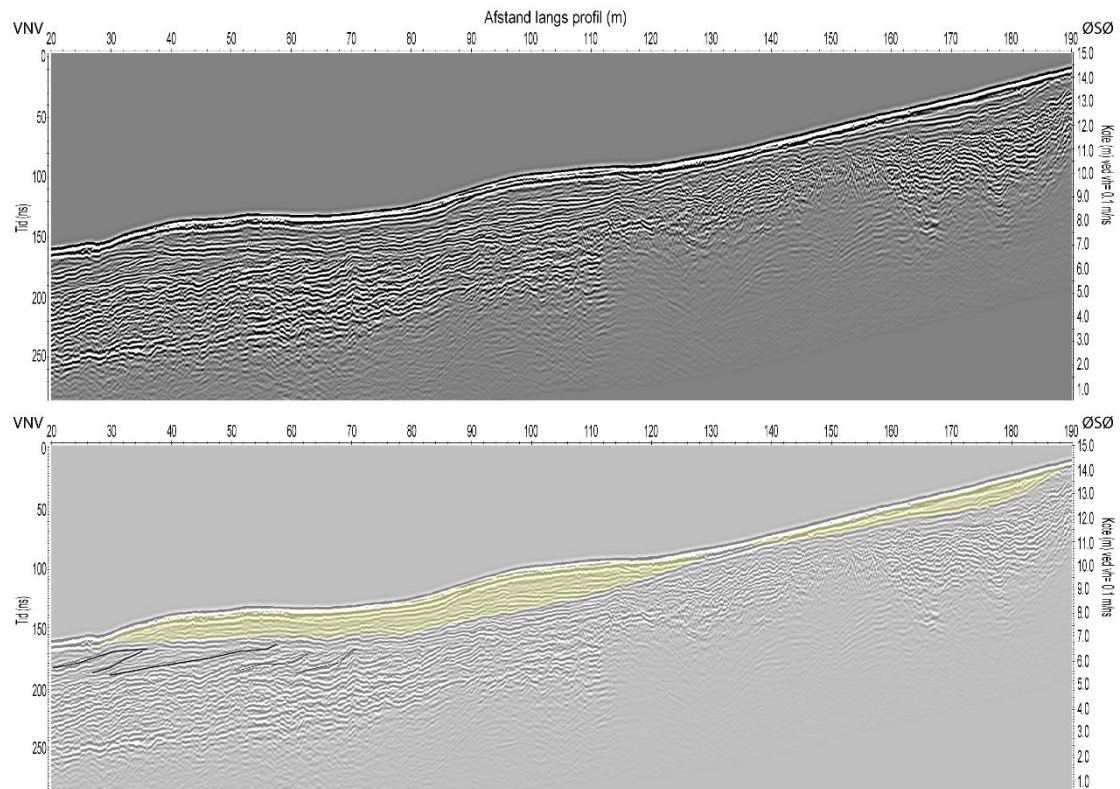


Figur 9: Eksempel på georadarlinje 1 fra østsiden af Lerbjerg, Tisvilde Hegn. Sektionen nederst er en gentagelse af sektionen øverst med tolkning. Aflejringer tolket som flyvesand er markeret med gult. Boring er markeret med blåt, således at bunden af boksen markerer toppen af jordbundshorisont observeret i boringen. Positioner af georadarsektion og boring ses i Figur 6.

Figur 10 viser et eksempel på overgangen af strandplanet til den glaciale bakke. Ved foden af bakken (profilkoordinat 20-90 m) ses en bedre penetration af georadarsignalet end på bakkenskråningen (profilkoordinat 110-190 m). I venstre del af georadarsektionen, hvor der er bedst penetration, ses vestligt hældende refleksioner, der længst til venstre starter ved terræn og ellers starter under en markant refleksion, som er subhorisontal (profilkoordinat 30-70 m) eller subparallel med terrænoverfladen (profilkoordinat 70-90 m). Den markante refleksion fortsætter sit forløb subparallel med terrænoverfladen, til den kiler ud omkring profilkoordinat 130 m og opstår igen mellem profilkoordinat 140-190 m. I højre del af georadarsektionen (profilkoordinat 100-190 m) ses der under den markante refleksion et overvejende kaotisk refleksionsmønster. Over den markante refleksion ses refleksioner, som lapper ind på bakkenskråningen.

Med udgangspunkt i refleksioner og refleksionsmønstre i Figur 10 tolkes den markante refleksion til at være den oprindelige terrænoverflade inden sandflugten, og dermed er aflejringerne mellem terrænoverfladen og den markante refleksion flyvesand. Det er aflejret i op til 1,5- 2 m tykkelse. De vestligt hældende refleksioner (profilkoordinat 20-90 m) tolkes som

opskylsrygge eller strandvolde aflejret i kystzonen, mens kysten er bygget ud i vestlig retning, som indikerer, at kysten er bygget ud fra bakken. De kaotiske refleksioner i højre del indikerer, at bakken her består af glaciale moræneaflejringer, stedvist mere sandede end ved eksemplet vist i Figur 9, da signalet ikke dæmpes lige så kraftigt.



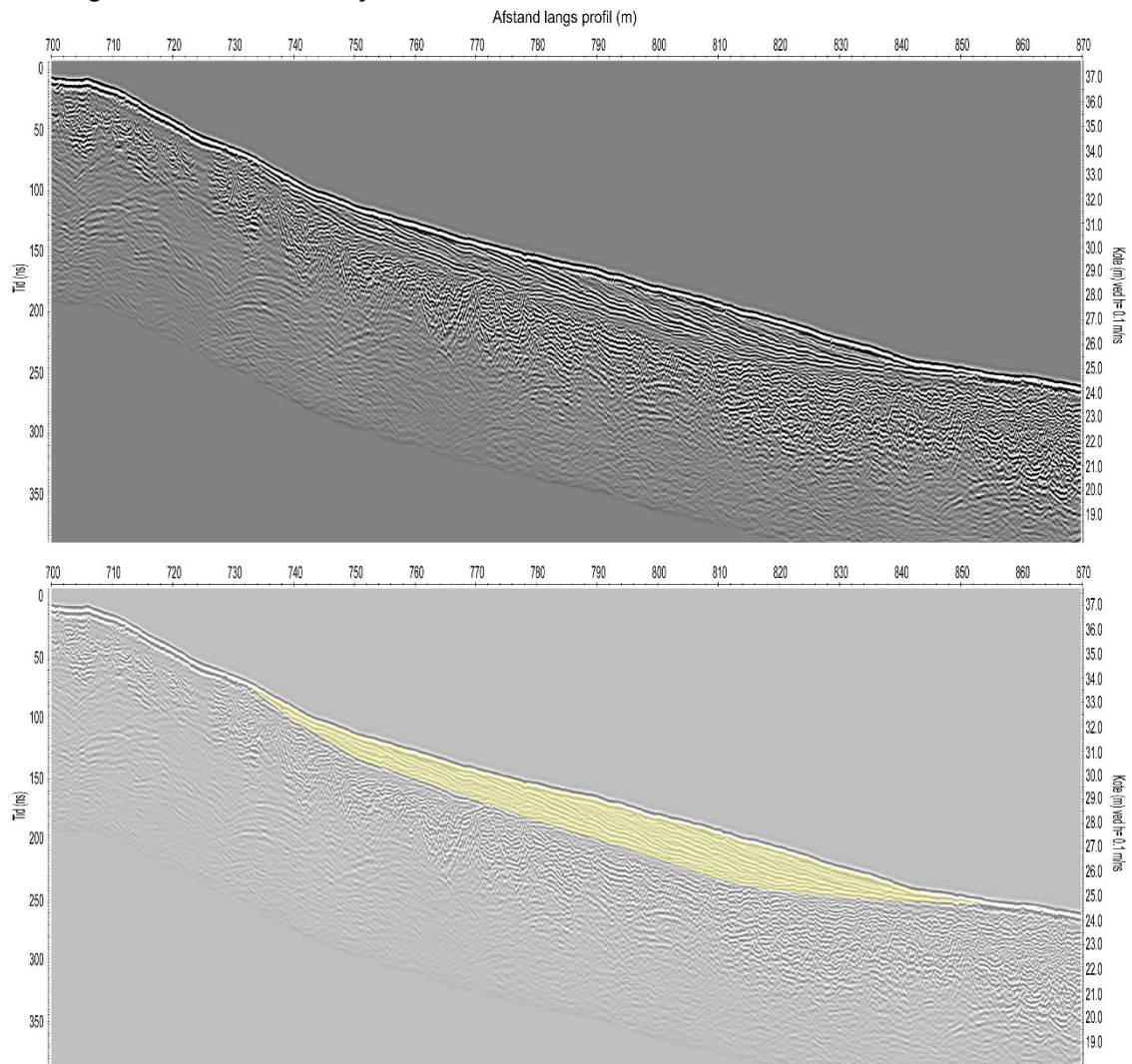
Figur 10: Eksempel på vestlig del af georadarlinje 2 ved vestlig fod af Lerbjerg, Tisvilde Hegn. Sektionen nederst er en gentagelse af sektionen øverst med tolkning. Aflejringer tolket som flyvesand er markeret med gult og sorte streger markerer udvalgte hældende strukturer, tolket som opskylsrygge i strandzonen. Position af georadarsektionen ses i Figur 6.

Figur 11 viser et eksempel fra den østvendte bakkeskråning, som er på læsiden i forhold til vind fra en vestlig retning. Fra profilkoordinat 740-850 m ses en fane af refleksioner, som hælder i en østlig retning ned af bakke. De hældende refleksionerne lapper ned på en markant refleksion, som ligger over et lag med kaotiske refleksioner, der i resten af den viste georadarsektion går til terræn. De hældende refleksioner tolkes som flyvesandsaflejringer, som er afsat på læsiden af bakken og ændrer formen af skråningen fra at være konkav til at være konveks. Hvor flyvesandsfanen er tykkest, når den op på ca. to meters tykkelse. Det kaotiske refleksionsmønster afspejler de glaciale moræneaflejringer.

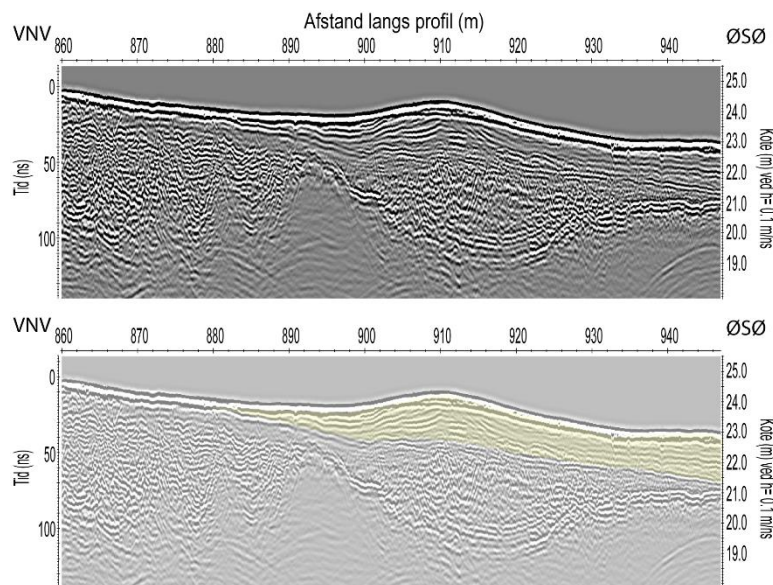
Figur 12 viser forlængelsen i østlig retning af georadarsektionen i Figur 11. Ved profilkoordinat 890-930 m med centrum i 910 m er der en forhøjning i terrænet. Refleksionsmønsteret viser refleksioner, som hælder væk fra centrum af forhøjningen. På den digitale terrænmodel kan forhøjningen følges som et lineament i terrænet. Det tolkes som et risgærde, der er bygget for at dæmme op for sandflugten, og der ses, at sand er aflejret i godt en meter højde på begge sider af gærdet og ligger oven på en flade af flyvesand.

Lignende strukturer fra sandflugtsdiger ses meget tydeligt på et terrænkort fra området med en meget fin opløsning på side 121 i Rune (2014). På grund af copyright er kortet ikke gengivet her.

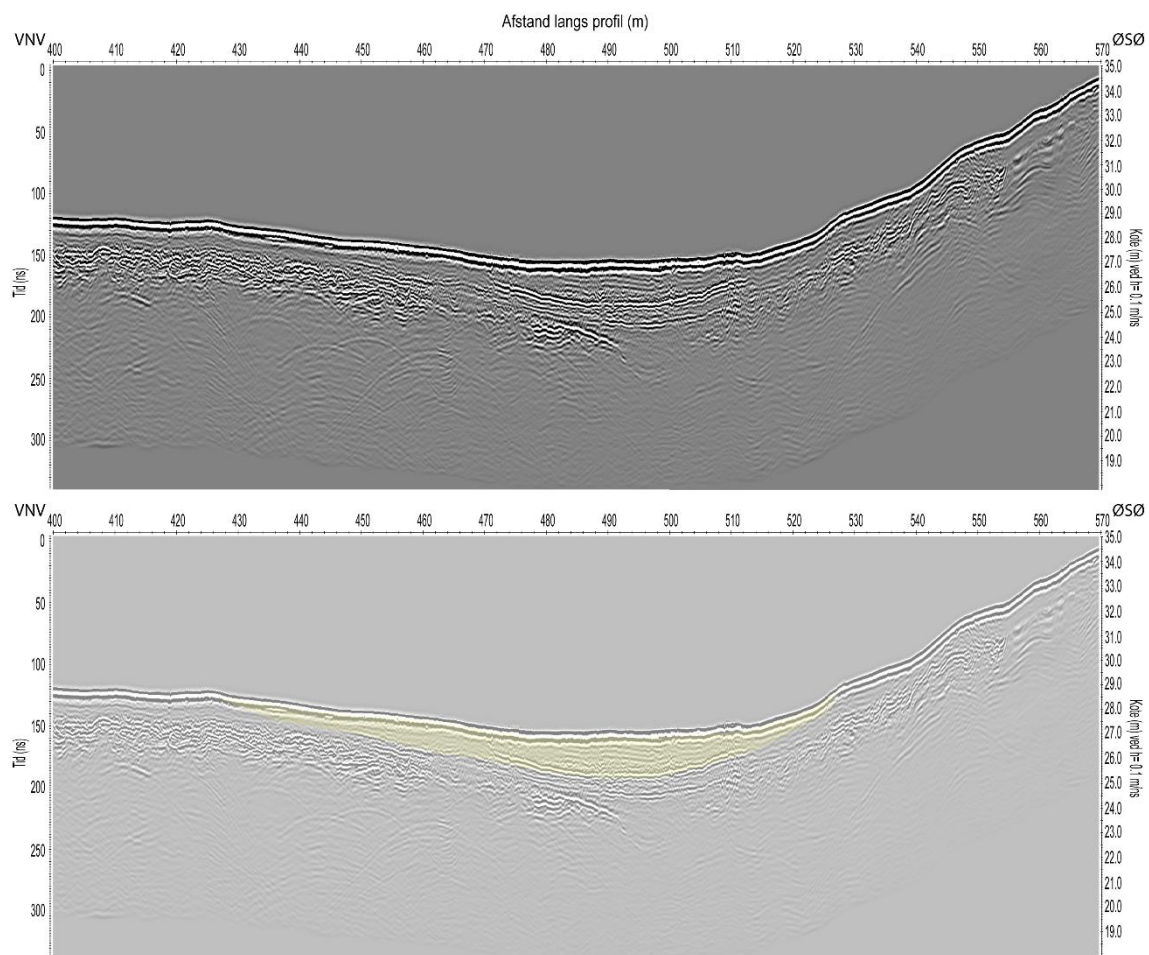
Figur 13 viser en georadarsektion fra toppen af Lerbjerg, hvor der er en lavning i terrænet, som tolkes at være fyldt op med flyvesand. Det er ikke ud fra georadarmålingerne alene muligt at vurdere om hele lavningen er fyldt med flyvesand, eller om den dybeste del af den er smeltevandssand eller senglacialt nedskyssand. Den markante refleksion ved bunden af det område, som er markeret med gult i Figur 13 kunne tolkes som en fossil jordbundshorison og dermed bunden af flyvesandet.



Figur 11: Eksempel på østlig del af georadarlinje 2 i læsiden på østlige flanke af Lerbjerg, Tisvilde Hegn. Sektionen nederst er en gentagelse af sektionen øverst med tolkning. Aflejringer tolket som flyvesand er markeret med gult. Position af georadarsektionen ses i Figur 6.



Figur 12: Eksempel på østlig del af georadarlinje 2 i læsiden på østlige flanke af Lerbjerg, Tisvilde Hegn. Sektionen nederst er en gentagelse af sektionen øverst med tolkning. Aflejringer tolket som flyvesand er markeret med gult. Position af georadarsektionen ses i Figur 6.



Figur 13: Eksempel på central del af georadarlinje 2 på toppen af bakken vest for den højeste del af Lerbjerg, Tisvilde Hegn. Sektionen nederst er en gentagelse af sektionen øverst med tolkning. Aflejringer tolket som flyvesand er markeret med gult. Position af georadarsektionen ses i Figur 6.

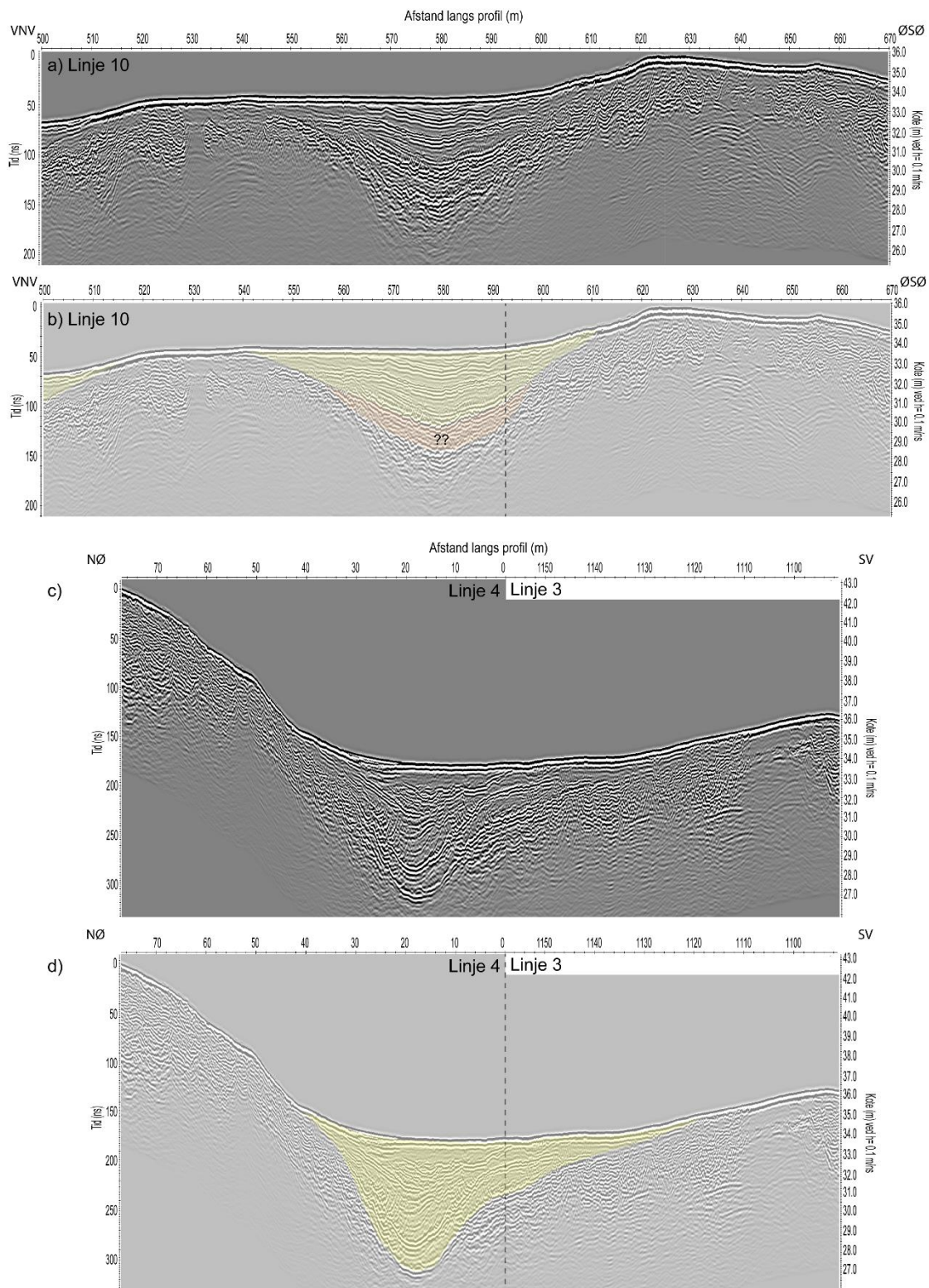
Figur 14 viser georadarsektioner fra to orienteringer, som skærer et dalstrøg mellem to bakketoppe. Georadarlinje 10 (Figur 14a og b) skærer dalstrøget med en spids vinkel, mens Linje 3 og 4 (Figur 14c og d) skærer dalstrøget næsten vinkelret. Mellem hhv. profilkoordinat 540-610 m, Linje 10 og profilkoordinater 40-0 og 1157-1120 m, Linje 4/3 ses en udfyldning af den dybere del af lavningen bestående af konforme, næsten kontinuerte refleksioner. Flere af disse refleksioner er markante med et næsten transparent refleksionsmønster. Under udfyldningen med konforme refleksioner ses et kaotisk refleksionsmønster, som også ses lige under terræn i de højereliggende dele af dalsiderne uden for udfyldningen.

Områderne med kaotisk refleksionsmønster tolkes som glaciale moræneaflejringer. Udfyldningen består af sandede aflejringer. Da refleksionerne er konforme med underlaget, indikerer det, at aflejringerne ikke er afsat af strømmende vand og kan derfor ikke være smeltevandsaflejringer. Vindaflejret sand vil kunne give konforme refleksioner. Det er kun muligt at afklare om lavningen er udfyldt med flyvesand ved at udføre en boring på stedet.

4.4 Opsamling på observationer af flyvesand i georadarsektionerne

Observationer omkring mulighederne for kortlægning af flyvesand i området omkring Melby Overdrev, Asserbo Plantage og Tisvilde Hegn er summeret op:

- På Melby Overdrev og i Asserbo Plantage er flyvesand dels aflejret på et hævet strandplan ovenpå strandvolde, som parabelklitter og langstrakte klitrygge skabt af gennembrud i klitterne ved kysten. Når georadarlinjer placeres vinkelret på strandvoldes længderetning og kystretningen ses karakteristiske kystværts hældende refleksioner i de marine aflejringer. Hvor der er aflejringer med andre karakteristika, som overlejrer disse marine aflejringer, tolkes de til at være flyvesandsaflejringer. Det er dermed muligt at skelne flyvesand fra marint sand ved brug af georadar.
- I området ved Lerbjerg og Brantebjerg kan flyvesandsaflejringer adskilles fra underliggende glaciale moræneaflejringer ud fra refleksionsmønstre, som illustreret med eksemplerne i Figur 9, Figur 10, Figur 11, Figur 12 og Figur 13. Det er vanskeligere at adskille flyvesand, hvis det er smeltevandsaflejringer eller andre vandaflejrede sedimenter, som overlejres af flyvesand. Dog er der refleksionsmønstre, som er mere karakteristiske for vindaflejringer sammenholdt med sedimenter aflejret af strømmende vand, se Figur 14.
- I området ved Lerbjerg og Brantebjerg er der observeret flyvesand ved foden af bakkerne mod vest overlejrende marine aflejringer.
- I området ved Lerbjerg og Brantebjerg er der observeret flyvesand, som fylder lavninger ud i terrænet på toppen af bakkerne.
- I området ved Lerbjerg og Brantebjerg er der observeret flyvesand på de østvendte skrånninger i læsiden af bakkerne.
- Hvor der er udviklet og bevaret en fossil jordbundshorisont ved den oprindelige terrænoverflade, vil denne kunne ses som en markant refleksion og vil dermed markere bunden af flyvesandsaflejringerne.
- For at gøre tolkningerne af georadarprofilerne så sikre som muligt er det nødvendigt at verificere tolkningerne med boringer på udvalgte positioner, fx hvor der kan være smeltevandsaflejringer eller andre vandaflejrede sedimenter, som kan have refleksionsmønstre med karakteristika lignende flyvesandsaflejringer.



Figur 14: Eksempel på en langstrakt lavning i Tisvilde Hegn mellem toppene af Lerbjerg og Brantebjerg, hvor lavningen er fyldt op med sandede aflejringer. Linjerne i a) og c) er gentaget med tolkninger i b) og d). Skæringspunktet mellem Linje 10 og Linje 3/4 er markeret med stiplede linjer i b) og d). Linje 4 er en forlængelse af Linje 3. Aflejringer som mest sandsynligt kan tolkes som flyvesand er markeret med gult og aflejringer hvor det er mere usikkert om det kan være flyvesand er markeret med orange. Positioner af georadar-sektionerne ses i Figur 6.

5. Boringer

Boringerne blev gennemført med GEUS' boremaskine, en **NordmeyerGeotool Drilling Rig GTB 2000 MF**.

Færdsel med biler og gennemførelse af boringer i Tisvilde Hegn og på Melby Overdrev fandt sted med tilladelse fra Naturstyrelsen.

Tirsdag d. 3. oktober 2023 blev der boret i Tisvilde Hegn.

Der blev først boret i Melby Overdrev 2 dage senere, d. 5. oktober. Melby Overdrev er et gammelt militært skydeterræn, hvorfor det var nødvendigt at afsøge borepositionen for eventuelle ueksploderede granater, inden boringen blev gennemført.

Tolkningen af sedimenter i boringerne – både i felten og da kernerne blev skåret op i boreprøvelaboratoriet – blev assisteret af geolog Henrik J. Granat, GEUS' boreprøvelaboratorium.

5.1 Tisvilde Hegn

Boreposition:

56°1.8820'N 12°3.1610'Ø // 6.213.338,8 m N; 316.355,1 m Ø i UTM-zone 33.

<http://maps.google.com/maps?q=56.03138%2C12.05269>

Boret i terræn med meget svag klittopografi.

I felten blev noteret følgende for hver meter kerne, der blev boret:

Kerne 1.1: 1 m boret, komprimeret til 56 cm. Bund målt fra morlags top til bund af kerne sort prop 1 m under terræn

Kerne 1.2: 1 m boret, komprimeret til 76 cm. Sand over 26 cm muld.

Kerne 1.3: 1 m boret, komprimeret til 61 cm. Sand i 3 m. Mellemkornet, velsorteret.

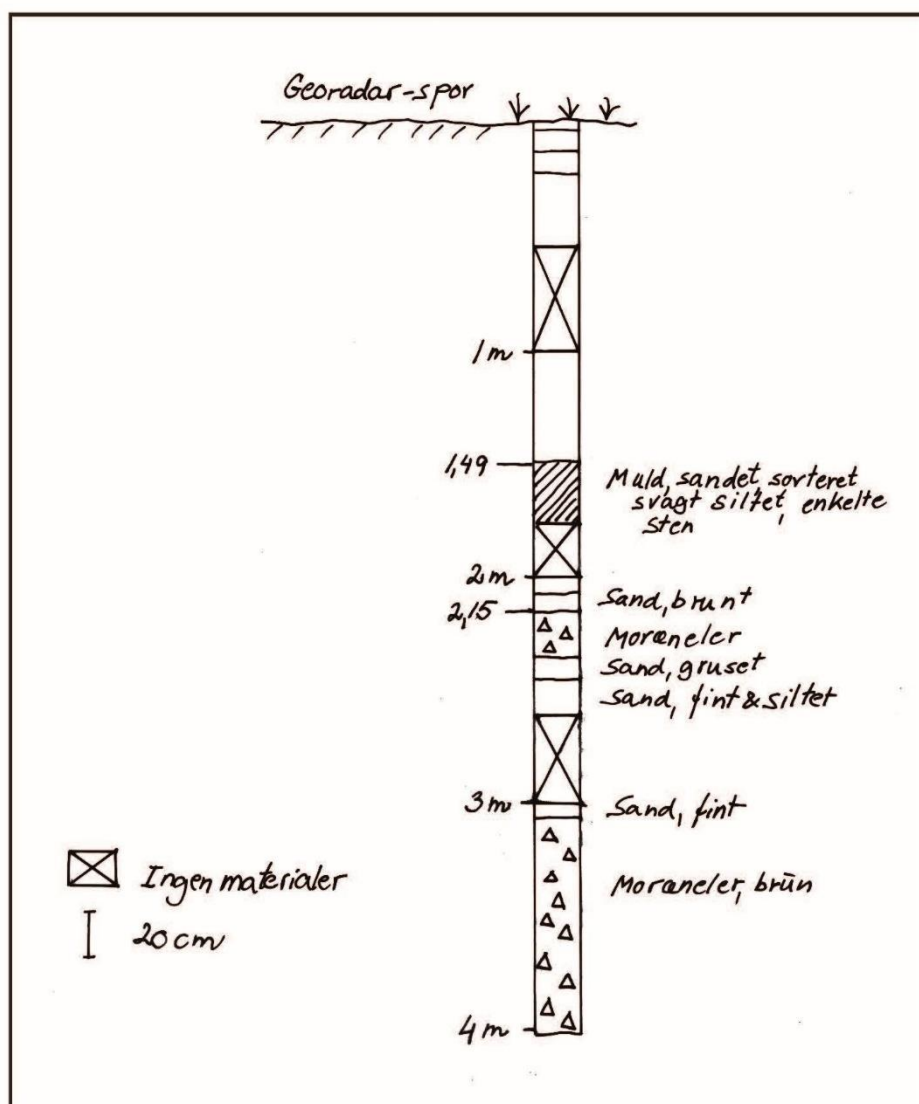
Kerne 1.4: 1 m boret, og fuld kerne op. Ikke komprimeret. Mellemkornet sand med et enkelt gruskorn i top og moræneler i bund.

Boringen har fået nummer: **DGU 186.1302**.

Kernerne opbevares på GEUS Kernemagasin, Hørsvinget 1, 2630 Taastrup.



Figur 15: Boring i Tisvilde Hegn. Øverst: En kerne er ved at blive trukket op. Der bores 1 meter ad gangen. Nederst til venstre: 1 meter/kerne nr. 2 møder vi overgangen mellem muldlaget (brunt) og flyvesandet (lysere), der fæg ind på markerne og efterhånden umuliggjorde dyrkning af noget som helst. Nederst til højre: nærbillede af overgang mellem muld og flyvesand.



Figur 16: Rente­gning af boring i Tisvilde Hegn, baseret på noter fra felten og observationer i forbindelse med opskæring af kernerne. De opskårne kerner kan ses i Figur 17 og 18.



Figur 17: De opskårne kerner fra boringen i Tisvilde Hegn. Øverst til venstre i det øverste foto er terrænoverfladen og kernen længst til højre er moræneleret nederst i boringen. På det nederste foto peges der på overgangen mellem muldlaget og flyvesandsdækket. Den samme overgang, men set lidt tættere på, udpeges på foto, Figur 18.



Figur 18: Den opskårne kerne fra boringen i Tisvilde Hegn, hvor den skarpe grænse mellem muldlaget og flyvesandsdækket træder tydeligt frem.

5.2 Melby Overdrev

Boreposition:

56°1.0900'N 11°59.4160'Ø // 6.212.148,5 m N; 686.371,5 m Ø i UTM-zone 33

<http://maps.google.com/maps?q=56.01818%2C11.99028>

Borepositionen blev sat ca. 1,5 meter fra grusstien, hvor der var kørt med georadar – ovenpå en klit, i stedet for nede på grusstien – for at sikre, at vi kunne registrere en flyvesandsaflejring. Toppen af klitten (på top af strandvold) var 70 cm over det terræn, georadaren havde kørt på.

Melby Overdrev har i mere end 120 år (indtil 2003) været anvendt som militært skydeterræn. For ikke at risikere at bore ned i en eventuel ueksploderet granat eller lignende, havde vi en EOD-ekspert (Explosive Ordnance Disposal /rydning af eksplosiv ammunition) fra firmaet Damasec til at sikre, at vi kunne gennemføre boringen risikofrit. Det foregik ved, at der blev boret med et håndbor på en position maks. 40 cm fra den egentlige boreposition. For hver maks. 80 cm, håndboret kom ned under terræn, målte EOD-eksperten vha. geomagnetisme, om der kunne registreres jern. Da vi var sikkert nede i 2,4 meters dybde, uden at der var registreret jern, kunne den egentlige boring gennemføres.

I felten blev noteret følgende for hver meter kerne, der blev boret:

Kerne 2.1. 1 m boret, komprimeret til 39 cm.
Kerne 2.2. 1 m boret, komprimeret til 62 cm.
Kerne 2.3. 1 m boret, komprimeret til 66 cm.
Kerne 2.4. 1 m boret, komprimeret til 63 cm. Groft sand i bund.
Kerne 2.5. 1 m boret, komprimeret til 75 cm. Grus i top. Mellemkornet sand i bund.
Casing hævet 22 cm, sediment presset op i casing. Boring går meget langsomt

Boringen har fået nummer: **DGU 186.1303.**

Kernerne opbevares på GEUS Kernemagasin, Hørsvinget 1, 2630 Taastrup.



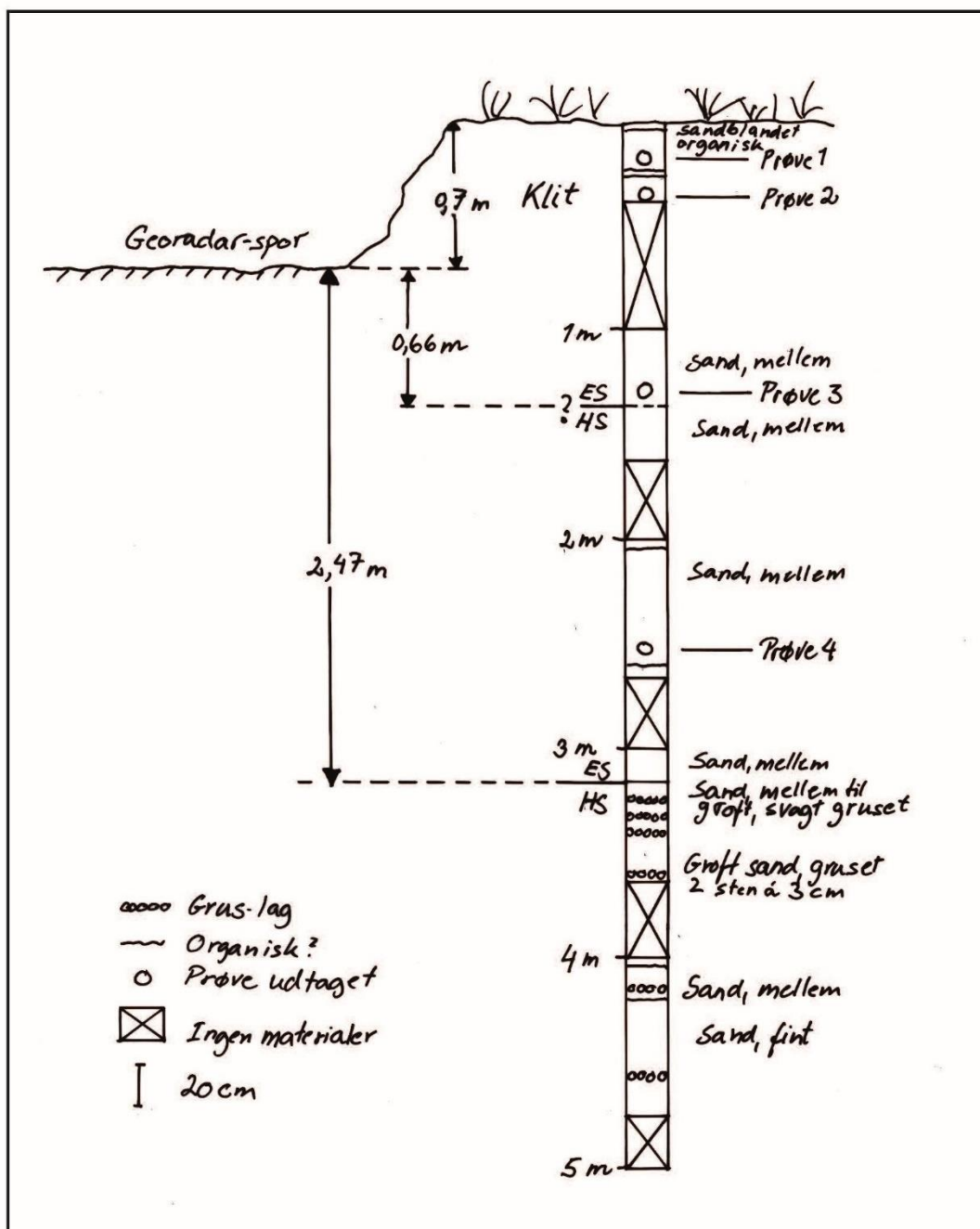
Figur 19: På grund af fare for ueksploderede granater i jorden var det nødvendigt at få hjælp til at sikre, at vi kunne bore risikofrit.



Figur 20: Melby Overdrev. Boring er påbegyndt gennem klit lige ved siden af det spor, georadaren kørte i, markeret ved skovlen til venstre.



Figur 21: Kernerne fra Melby Overdrev. Hvide propper er opad, sorte nedad. Til højre: øverste del af boringen. Til venstre: nederste del af boringen.



Figur 22: Rentegning af boring på Melby Overdrev, baseret på noter fra felten og observationer i forbindelse med opskæring af kernerne. Dybde for og numre på de 4 sedimentprøver, der blev udtaget til analyse af kornstørrelsesfordeling og statistik, er angivet på figuren. Se også afsnit 5.2.1 og Bilag 8.2. De opskårne kerne kan ses i Figur 23.



Figur 23: De opskårne kerner fra boringen på Melby Overdrev. Øverst til venstre er terrænoverfladen og kernen længst til højre er marint sand nederst i boringen.

5.2.1 Sedimentanalyserne

De 4 sedimentprøver er vasket og analyseret på GEUS sedimentlaboratorium efter Dansk Standard:

Totalprøven er tørret og sigtet gennem en sigtesøjle fra 32 mm ned til 0,063 mm med $\frac{1}{2}$ phi intervaller, hvilket svarer til 16 sigter. Metoden er tillempet i forhold til DS 405.9 DS/EN 933-1 idet der er indføjet flere sigter, end der beskrives i denne standard. Herved opnås en mere nøjagtig statistik og et endnu finere billede af kornkurven.

Alle 4 sedimentprøver har en middeldkornstørrelse på mellem 0,28 og 0,36 mm, er velsorterede og har en meget stejl kornkurve, se Bilag 8.2. Kvarts er langt det dominerende mineral men i alle 4 prøver er der også bittesmå brudstykker af skaller.

Alle 4 prøver er tolket som flyvesand. Uden tvivl.

6. Resumé og konklusion

De indsamlede og tolkede georadardata har vist, at det er muligt at adskille flyvesandsdækket fra de underliggende sedimenter, hvor disse består af moræneler eller marine dannelser. De tolkede georadardata er for disse to aflejringstyper verificeret vha. boringer og sedimentanalyser for at gøre tolkningen af georadardata så sikker som muligt. Man kan ikke med samme sikkerhed adskille flyvesandsdækket fra smeltevandsaflejringer eller andre vandaflejrede sedimenter, som kan have refleksionsmønstre med karakteristika lignende flyvesandsaflejringer, hvorfor verificering med boringer kan øge sikkerheden.

- På Melby Overdrev og i Asserbo Plantage er flyvesand aflejret på hhv. strandvolde, parabelklitter og langstrakte klitrygge. Placeres georadarlinjer vinkelret på strandvoldes længderetning og kystretningen, ses karakteristiske kystværts hældende refleksioner i de marine aflejringer. Hvor der er aflejringer med andre karakteristika, som overlejrer disse marine aflejringer, tolkes de til at være flyvesandsaflejringer. Det er dermed muligt at skelne flyvesand fra marint sand.
- I området ved Lerbjerg og Brantebjerg kan flyvesandsaflejringer adskilles fra underliggende glaciale moræneaflejringer ud fra refleksionsmønstre. Det er vanskeligere at adskille flyvesand, hvis det er smeltevandsaflejringer eller andre vandaflejrede sedimenter, som overlejres af flyvesand, specielt hvis flyvesandsdækket er klitdannelser.
- Ved Lerbjerg og Brantebjerg er der observeret flyvesand ved foden af bakkerne mod vest overlejrende marine aflejringer; der er observeret flyvesand, som fylder lavninger ud i terrænet på toppen af bakkerne, og der er observeret flyvesand på de østvendte skråninger i læsiden af bakkerne.
- Hvor der er udviklet og bevaret en fossil jordbundshorisont ved den oprindelige terrænoverflade, vil denne kunne ses som en markant refleksion og vil dermed markere bunden af flyvesandsaflejringerne.

I rapporten om Klitter og flyvesand – sandflugtens historie i Nordsjælland (Binderup 2021) – stilles der spørgsmål ved, hvorfor der (endnu) ikke er registreret flyvesand fra sandflugtsperioder ældre end den lille istid i Nordsjælland, som det ellers kendes fra adskillige steder i Vestjylland. I nærværende rapport er der i profillinje 3-4 og 10, mellem toppene af Lerbjerg og Brantebjerg registreret en langstrakt lavning, hvori aflejringerne mest sandsynligt kan tolkes som flyvesand. Dette kunne være et sted, hvor ældre flyvesandaflejringer kunne være bevaret.

Ved at udføre supplerende kortlægning med georadar og enkelte boringer vil det være muligt at opstille en model for mægtighederne af flyvesandsdækket i hele Tisvilde Hegn. På Melby Overdrev og i de dele af Asserbo Plantage, som ligger på den gamle strandslette, vil det ud fra de nuværende og enkelte nye georadarlinjer samt den digitale højdemodel være muligt at estimere flyvesandstykkelserne med en stor sikkerhed. I morænelandskabet med Lerbjerg og Brantebjerg mod vest til Tibirke bakker øst for Tisvilde Hegn vil en supplerende georadar-kortlægning sammen med den eksisterende kortlægning og enkelte boringer kunne give et

relativt sikkert estimat for flyvesandsmægtighederne langs georadarlinjerne, mens en interpolation mellem linjerne vil give estimerer med noget større usikkerheder, da der i morænelandskabet ikke er samme regelmæssighed i det oprindelige terræn, som der er på strandsletten. Resultatet af den nuværende kortlægning indikerer, at man kan opstille en række regler for estimering af flyvesandsdækket, da det er observeret, at der aflejres flyvesand, hvor topografien skaber læ fra en vestlig retning. Et udvidet kortlægningsområde mod øst vil vise, om det bekræfter disse aflejringsregler og evt. tilføjer nogle flere typer. Den digitale terrænmodel vil blive taget i betragtning i forbindelse med placeringen af nye georadarlinjer, så forskellige terrænformer bliver kortlagt. Tætheden i georadarlinjer er afgørende for sikkerheden i estimering af flyvesandsmægtighederne.

7. Litteratur

- Binderup, M., 2021: Klitter og flyvesand. Sandflugtens historie i Nordsjælland. Udarbejdet for Nationalpark Kongernes Nordsjælland. GEUS Rapport 2021/75. 44 sider.
- Bristow, C.S., Pucillo, K., 2006, Quantifying rates of coastal progradation from sediment volume using GPR and OSL: the Holocene fill of Quichen Bay, south-east South Australia, *Sedimentology* 53, 769-788.
- Clemmensen, L. B., Pedersen, K., Murray, A., & Heinemeier, J. (2006). A 7000-year record of coastal evolution, Vejers, SW Jutland, Denmark. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 53(1–2), 1–22. doi: 10.37570/bgsd-2006-53-01
- Clemmensen, L.B., Bjørnsen, M., Murray, A., Pedersen, K., 2007, Formation of aeolian dunes on Anholt, Denmark since AD 1560: A record of deforestation and increased storminess, *Sedimentary Geology* 199, 171-187.
- Clemmensen, L.B., Nielsen, L., 2010, Internal architecture of a raised beach ridge system (Anholt, Denmark) resolved by ground-penetrating radar, *Sedimentary Geology* 223, 281-290.
- Clemmensen, L.B., Murray, A., Nielsen, L., 2012, Quantitative constraints on the sea-level fall that terminated the Littorina Sea Stage, southern Scandinavia, *Quaternary Science Reviews* 40, 54-63.
- Clemmensen, L. B., Nielsen, L., Bendixen, M., & Murray, A. (2012). Morphology and sedimentary architecture of a beach-ridge system (Anholt, the Kattegat sea): A record of punctuated coastal progradation and sea-level change over the past ~1000 years. *Boreas*, 41(3), 422–434. doi: 10.1111/j.1502-3885.2012.00250.x
- Jol, H., 1995, Ground penetrating antennae frequencies and transmitter powers compared for penetration depth, resolution and reflection continuity, *Geophysical Prospecting* 43, 693-709.
- Møller, I., Nielsen, L., Johannessen, P.N., Nielsen, L.H., Pejrup, M., Andersen, T.J., Korshøj, J., 2008, Creating the framework sedimentary architecture of a barrier island in the Danish Wadden Sea, *Proceedings of the 12th International Conference on Ground Penetrating Radar*, 8 pp.
- Neal, A., 2004, Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress, *Earth-Science Reviews* 66, 261-330.
- Nielsen, L., Clemmensen, L.B., 2009, Sea-level markers identified in ground-penetrating radar data collected across a modern beach ridge system in a microtidal regime, *Terra Nova* 21, 474-479, DOI: 10.1111/j.1365-3121.2009.00904.x.

Nielsen, L., Bendixen, M., Kroon, A., Hede, M.U., Clemmensen, L.B., Wessling, R., Elberling, B., 2017, Sea-level proxies in Holocene raised beach ridge deposits (Greenland) revealed by ground-penetrating radar, Scientific Reports, DOI: 10.1038/srep46460.

Nielsen, L., Møller, I., Nielsen, L.H., Johannessen, P.N., Pejrup, M., Andersen, T.J., Korshøj, J.S., 2009, Integrating ground-penetrating radar and borehole data from a Wadden Sea barrier island, Journal of Applied Geophysics 68, 47-59.

Pedersen, K., & Clemmensen, L. B. (2005). Unveiling past aeolian landscapes: A ground-penetrating radar survey of a Holocene coastal dunefield system, Thy, Denmark. Sedimentary Geology, 177(1–2), 57–86. doi: 10.1016/j.sedgeo.2005.02.001

Rosner, O.S. og L.M. Thomasen, 2023: 'Flyvesand i Nordsjælland – en geologisk tolkning'. Upubliceret bachelorrapport, ved IGN, KU. 68 (?) sider.

Rune, F., 2014: Tisvilde Hegn. Bind 1 (317 s.) og 2 (285 s.). Udgivet af forlaget 'Esrum Sø' v. Niels Richter-Friis. Redaktionskomité: J. B. Christensen; J. B. Jepsen; S. Frandsen; C. Friis; N. Richter-Friis; F. Rune; L. Toksvig og S. Widding.

8. Bilag

8.1 Flyvesand i Nordsjælland – en geologisk tolkning. Bachelorprojekt udarbejdet af Oliver S. Rosner og Linnea M. Thomasen, juni 2023.

Resumé ved Merete Binderup:

Opgavens formål er at undersøge, om det på basis af georadardata kan estimeres, hvor meget flyvesand, der er kommet til Nordsjælland og det vurderes om flyvesandskatastrofer i fremtiden er en risiko. På basis af en geologiske tolkning af landskabet og af georaddata diskuteres det, hvor det kunne være interessant at lave geotekniske borer for at opnå en større viden om området og flyvesandet.

Opgaven indeholder en beskrivelse af den geologiske udvikling i området samt en gennemgang af bølgeteori mv., som knytter sig til arbejdet med georadar, GPR (ground penetration radar) og tolkningen af georadardata. Derefter følger nogle afsnit om klitdannelse og dateringsmetode.

Disse afsnit vil ikke blive kommenteret yderligere her.

Georadardata blev indsamlet d. 16. og 17. marts 2023 fra 3 forskellige lokaliteter, som var udvalgt efter aftale med Nationalpark Kongernes Nordsjælland. De tre områder var:

- 1) På toppen af Lerbjerg – Brantebjerg moræneryggen,
- 2) På den vest – øst-orienterede klitrimme, der ligger vest for den sydlige del af Lerbjerg – Brantebjerg-ryggen,
- 3) På Melby Overdrev, ca. 1,5 km ØNØ for Liseleje.

Valget af de 3 lokaliteter gjorde det muligt at teste metoden på 3 forskellige landskabselementer, og således også på 3 forskellige sedimenttyper.

På 1) Lerbjerg – Brantebjerg forventede vi at kunne finde en klar grænse mellem morænelejet og flyvesandet på georadarprofilerne. På 2) klitrimmen håbede vi at kunne identificere en grænse mellem det flyvesand, som den gamle klitrimme var bygget af og det nyere flyvesand, som havde lagt sig ovenpå. Der ville formentlig ikke være den store forskel i materialerne, eftersom begge dele er flyvesand, der stammer fra den samme kilde. Alligevel håbede vi, at begroninger af klitrimmen inden den blev dækket af flyvesand ville fremtræde som en horisont på georadarprofilerne, og således give et bud på flyvesandstykkelserne i dette område. På 3) Melby Overdrev, var georadarprofilerne udlagt på langs og på tværs af et smalt, langt landskabselement, der er kendt som en strandvold og altså af marin oprindelse. Her var det forventeligt, at strandvolden var dækket af et beskedent lag af flyvesand, samt at vegetati-

onshorisonter, forskelle i kornstørrelser i hhv. det marine og det æoliske sand samt sedimentære strukturer – særligt i strandvolden – ville adskille strandvolden fra det overliggende flyvesand.

Georadardata blev indsamlet med en georadar af mærket PulseEKKO™ fra Sencor&Software Inc. Med en 165 V transmitter og en antennefrekvens på 250 MHz, udlånt af Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, KU. Data blev indsamlet af Ingelise Møller (GEUS) med assistance af Oliver S. Rosner og Linnea M. Thomasen. Der blev indsamlet i alt 28 GPR-profiler. Sideløbende hermed blev der indsamlet GPS-data til kalibrering af GPR-data, til geolokalisering samt til bestemmelse af koten som supplement til den digitale terrænmodel. Der blev anvendt en GPS fra Trimble Navigation Ltd. En Trimble R8s modtager blev kombineret med en Trimble TSC3 controller og blev koblet op til RTK (Real Time Kinematic positioning) netværket. Under optimale forhold skulle dette give en horisontal og vertikal præcision på 1-5 cm. For yderligere data vedr. positionering henvises til Rosner og Thomasen, 2023.

Udtræk fra konklusionen:

.

"Ud fra de tre lokaliteter og fra de viste udsnit kan vi se, at tykkelsen af flyvesandslaget varierer meget. Ved Melby Overdrev er tykkelsen af flyvesandslaget 0,5 til 3 meter. Vest for Asserbo, over parabelarmen, når flyvesandslaget en tykkelse på 1,5 meter. På Lerbjerg/Brantebjerg er der stor forskel på læ- og stødsiden. På stødsiden observeres der flere steder ingen sand. Dog er et gennemsnit vurderet til mellem 0 og 0,5 meter. På læsiden når tykkelsen af flyvesandslaget et gennemsnit på mellem 1 og 1,5 meter. Ud fra disse estimer, er en vurdering på minimum 1 meter sand ikke misvisende. Det undersøgte område har et areal på 10,7 km².

Flyvesandslaget har derfor en estimeret volumen på minimum 10.700.000 m³ m sand. Det skal understreges, at det undersøgte område ikke dækker det totale areal med flyvesandsdække. Den fulde mængde af sand der er kommet til området under sandflugten, menes derfor at være markant højere"

8.2 Analyse af sedimentprøver

Grain Size Distribution Geotechnical

Sample Id: MB prøve 1
Lab. Id: 230558
Projekt: Flyvesand Melby
Subject: 0
Date: 06-11-2023
Executed: PS
Remarks:



Total Weight 36,026 g

Size Fractions

Sieve Analysis

Size	Size	Weight	Weight	Cumulated amount passing
mm	Φ	g	%	%
16,00	-4,00	0,00	0,00	100,00
8,00	-3,00	0,00	0,00	100,00
4,00	-2,00	0,00	0,00	100,00
2,80	-1,49	0,00	0,00	100,00
2,00	-1,00	0,00	0,00	100,00
1,40	-0,49	0,00	0,00	100,00
1,00	0,00	0,03	0,08	99,92
0,710	0,49	0,23	0,63	99,29
0,500	1,00	1,82	5,06	94,23
0,355	1,49	6,69	18,56	75,66
0,250	2,00	13,74	38,14	37,52
0,180	2,47	11,40	31,63	5,89
0,125	3,00	1,64	4,55	1,34
0,090	3,47	0,27	0,76	0,58
0,075	3,74	0,05	0,13	0,45
0,063	3,99	0,03	0,07	0,38
< 0,063	> 3,99	0,14	0,38	0,00

Size Classes (DGF-Bulletin 1 1988)

	Weight %
Silt and clay (< 0,063 mm):	0,38
Sand, fine (0,063 mm - 0,200 mm):	14,55
Sand, medium (0,2 mm - 0,6 mm):	81,71
Sand, coarse (0,6 mm - 2 mm):	3,36
Gravel (> 2 mm):	0,00
Sum:	100,00

Moments Measures (Folk and Wards)

Percentile	Percentile	d(mm)	Φ
Amount in sieve	Amount passing		
5%	95%	0,53	0,91
16%	84%	0,42	1,25
25%	75%	0,35	1,50
40%	60%	0,31	1,68
Median 50%	50%	0,28	1,81
75%	25%	0,22	2,17
84%	16%	0,20	2,30
90%	10%	0,19	2,40
95%	5%	0,17	2,56

Moments Statistics

Mean	1,79
Sorting	0,51
Skewness	-0,08
Kurtosis	1,01
Uniformity Coefficient	1,65

The analysis is executed according to DS 405.9 extended by sieves to the 1/2 phi scale

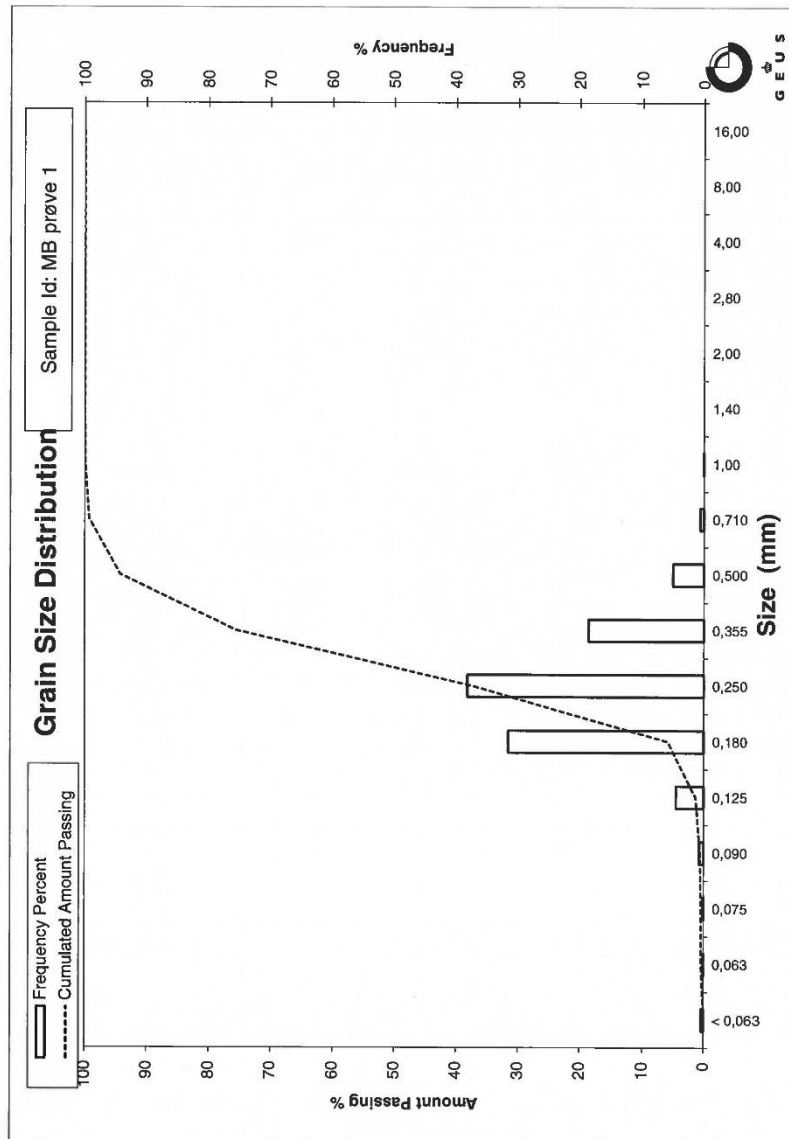
Size Classes and Percentiles are found by linear interpolation

Formulas

Mean $(\phi_{16\%} + \phi_{84\%} + \phi_{50\%}) / 3$ (Folk and Ward 1957)
Sorting $(\phi_{84\%} - \phi_{16\%}) / 4 + (\phi_{95\%} - \phi_{5\%}) / 6,6$ (Folk and Ward 1957)
Kurtosis $(\phi_{95\%} - \phi_{5\%}) / (2,44 * (\phi_{75\%} - \phi_{25\%}))$ (Folk and Ward 1957)
Skewness $(\phi_{16\%} + \phi_{84\%} - 2 * \phi_{50\%}) / (2 * (\phi_{84\%} - \phi_{16\%})) + (\phi_{5\%} + \phi_{95\%} - 2 * \phi_{50\%}) / (2 * (\phi_{95\%} - \phi_{5\%}))$ (Folk and Ward 1957)
Uniformity Coefficient $(d_{60\%} / d_{10\%})$ (dgf-Bulletin 1988)

Mean, sorting, skewness and kurtosis are based on "Amount in sieve". Uniformity coefficient is based on "Amount passing".

Øster Voldgade 10 1350 København K
Tel.: +45 38 14 20 00 Telefax: +45 38 14 20 50
Email: GEUS@geus.dk
www.geus.dk



Grain Size Distribution

Geotechnical

Sample Id: MB prøve 2
Lab. Id: 230559
Projekt: Flyvesand Melby
Subject: 0
Date: 06-11-2023
Executed: PS
Remarks:



Total Weight 33,225 g

Size Fractions

Size	Size	Weight	Weight	Cumulated amount passing
mm	φ	g	%	%
16,00	-4,00	0,00	0,00	100,00
8,00	-3,00	0,00	0,00	100,00
4,00	-2,00	0,00	0,00	100,00
2,80	-1,49	0,00	0,00	100,00
2,00	-1,00	0,00	0,00	100,00
1,40	-0,49	0,00	0,00	100,00
1,00	0,00	0,10	0,29	99,71
0,710	0,49	1,32	3,98	95,73
0,500	1,00	5,56	16,74	78,99
0,355	1,49	9,93	29,88	49,11
0,250	2,00	9,88	29,75	19,36
0,180	2,47	4,63	13,94	5,43
0,125	3,00	1,16	3,49	1,93
0,090	3,47	0,14	0,43	1,50
0,075	3,74	0,04	0,12	1,38
0,063	3,99	0,02	0,07	1,31
< 0,063	> 3,99	0,44	1,31	0,00

Sieve Analysis

Gravel

Sand

Size Classes (DGF-Bulletin 1 1988)

	Weight %
Silt and clay (< 0,063 mm):	1,31
Sand, fine (0,063 mm - 0,200 mm):	8,10
Sand, medium (0,2 mm - 0,6 mm):	77,55
Sand, coarse (0,6 mm - 2 mm):	13,04
Gravel (> 2 mm):	0,00
Sum:	100,00

Moments Measures (Folk and Wards)

Percentile	Percentile	d(mm)	φ
Amount in sieve	Amount passing		
5%	95%	0,70	0,51
16%	84%	0,56	0,83
25%	75%	0,48	1,06
40%	60%	0,41	1,29
Median 50%	50%	0,36	1,48
75%	25%	0,27	1,89
84%	16%	0,23	2,10
90%	10%	0,20	2,30
95%	5%	0,17	2,53

Moments Statistics

Mean	1,47
Sorting	0,62
Skewness	0,01
Kurtosis	0,99
Uniformity Coefficient	2,01

The analysis is executed according to DS 405.9 extended by sieves to the 1/2 phi scale

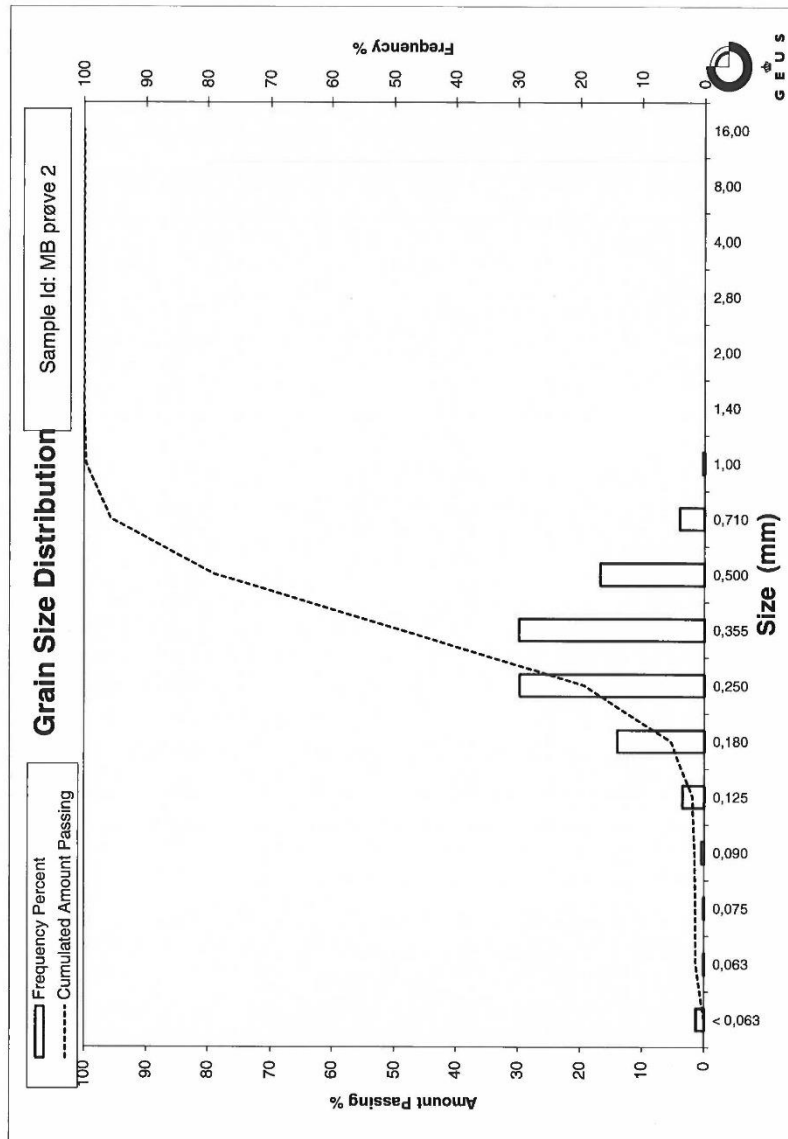
Formulas

Mean $(\phi_{16\%} + \phi_{84\%} + \phi_{50\%}) / 3$ (Folk and Ward 1957)
 Sorting $(\phi_{84\%} - \phi_{16\%}) / 4 + (\phi_{95\%} - \phi_{5\%}) / 6,6$ (Folk and Ward 1957)
 Kurtosis $(\phi_{95\%} - \phi_{5\%}) / (2,44 * (\phi_{75\%} - \phi_{25\%}))$ (Folk and Ward 1957)
 Skewness $(\phi_{16\%} + \phi_{84\%} - 2 * \phi_{50\%}) / (2 * (\phi_{84\%} - \phi_{16\%})) + (\phi_{5\%} + \phi_{95\%} - 2 * \phi_{50\%}) / (2 * (\phi_{95\%} - \phi_{5\%}))$ (Folk and Ward 1957)
 Uniformity Coefficient $(d_{60\%} / d_{10\%})$ (dgf-Bulletin 1988)

Mean, sorting, skewness and kurtosis are based on "Amount in sieve". Uniformity coefficient is based on "Amount passing".

Size Classes and Percentiles are found by linear interpolation

Øster Voldgade 10 1350 København K
 Tel.: +45 38 14 20 00 Telefax: +45 38 14 20 50
 Email: GEUS@geus.dk
 www.geus.dk



Grain Size Distribution

Geotechnical

Sample Id: MB prøve 3
Lab. Id: 230560
Projekt: Flyvesand Melby
Subject: 0
Date: 06-11-2023
Executed: PS
Remarks:



Total Weight 36,335 g

Size Fractions

Size	Size	Weight	Weight	Cumulated amount passing
mm	Φ	g	%	%
16,00	-4,00	0,00	0,00	100,00
8,00	-3,00	0,00	0,00	100,00
4,00	-2,00	0,00	0,00	100,00
2,80	-1,49	0,00	0,00	100,00
2,00	-1,00	0,00	0,00	100,00
1,40	-0,49	0,03	0,07	99,93
1,00	0,00	0,05	0,13	99,80
0,710	0,49	0,43	1,18	98,62
0,500	1,00	2,86	7,86	90,76
0,355	1,49	8,79	24,19	66,57
0,250	2,00	15,63	43,02	23,54
0,180	2,47	6,76	18,61	4,93
0,125	3,00	1,30	3,59	1,35
0,090	3,47	0,14	0,38	0,96
0,075	3,74	0,04	0,11	0,86
0,063	3,99	0,02	0,06	0,80
< 0,063	> 3,99	0,29	0,80	0,00

Sieve Analysis

Gravel

Sand

Size Classes (DGF-Bulletin 1 1988)

	Weight %
Silt and clay (< 0,063 mm):	0,80
Sand, fine (0,063 mm - 0,200 mm):	9,45
Sand, medium (0,2 mm - 0,6 mm):	84,25
Sand, coarse (0,6 mm - 2 mm):	5,50
Gravel (> 2 mm):	0,00
Sum:	100,00

Moments Measures (Folk and Wards)

Percentile	Percentile	d(mm)	Φ
Amount in sieve	Amount passing		
5%	95%	0,61	0,71
16%	84%	0,46	1,12
25%	75%	0,41	1,30
40%	60%	0,34	1,56
Median 50%	50%	0,31	1,67
75%	25%	0,25	1,98
84%	16%	0,22	2,17
90%	10%	0,20	2,33
95%	5%	0,18	2,47

Moments Statistics

Mean	1,65
Sorting	0,53
Skewness	-0,07
Kurtosis	1,07
Uniformity Coefficient	1,70

The analysis is executed according to DS 405.9 extended by sieves to the 1/2 phi scale

Formulas

Mean $(\phi_{16} + \phi_{84} + \phi_{50}) / 3$ (Folk and Ward 1957)

Sorting $(\phi_{84} - \phi_{16}) / 4 + (\phi_{95} - \phi_{5}) / 6,6$ (Folk and Ward 1957)

Kurtosis $(\phi_{95} - \phi_{5}) / (2,44 * (\phi_{75} - \phi_{25}))$ (Folk and Ward 1957)

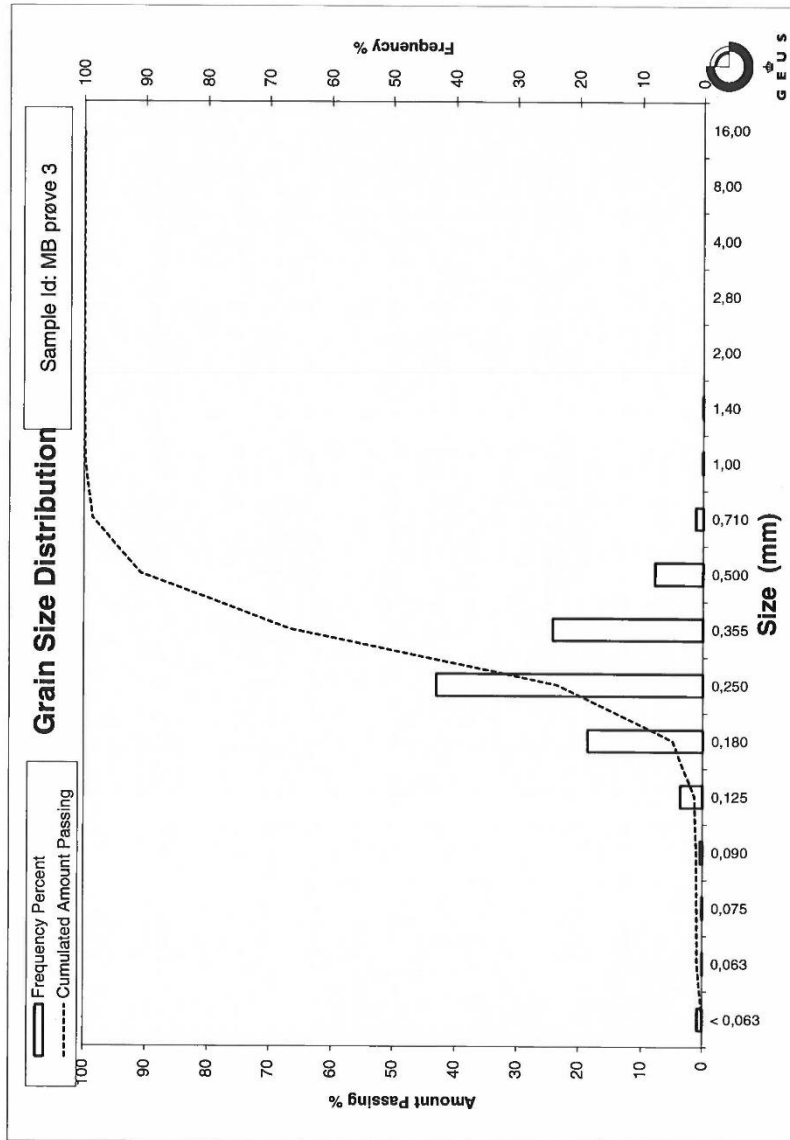
Skewness $(\phi_{16} + \phi_{84} - 2 * \phi_{50}) / (2 * (\phi_{84} - \phi_{16})) + (\phi_{5} + \phi_{95} - 2 * \phi_{50}) / (2 * (\phi_{95} - \phi_{5}))$ (Folk and Ward 1957)

Uniformity Coefficient (d_{60} / d_{10}) (dgl-Bulletin 1988)

Mean, sorting, skewness and kurtosis are based on "Amount in sieve". Uniformity coefficient is based on "Amount passing".

Size Classes and Percentiles are found by linear interpolation

Øster Voldgade 10 1350 København K
 Tel.: +45 38 14 20 00 Telefax: +45 38 14 20 50
 Email: GEUS@geus.dk
 www.geus.dk



Grain Size Distribution

Geotechnical

Sample Id: MB prøve 4
Lab. Id: 230561
Projekt: Flyvesand Melby
Subject: 0
Date: 06-11-2023
Executed: PS
Remarks:



Total Weight 29,032 g

Size Fractions

	Size	Size	Weight	Weight	Cumulated amount passing
	mm	φ	g	%	%
Gravel	16,00	-4,00	0,00	0,00	100,00
	8,00	-3,00	0,00	0,00	100,00
	4,00	-2,00	0,00	0,00	100,00
	2,80	-1,49	0,00	0,00	100,00
	2,00	-1,00	0,00	0,00	100,00
	1,40	-0,49	0,00	0,00	100,00
	1,00	0,00	0,05	0,17	99,83
	0,710	0,49	0,12	0,42	99,42
	0,500	1,00	1,00	3,45	95,97
	0,355	1,49	6,43	22,16	73,80
Sand	0,250	2,00	13,18	45,40	28,41
	0,180	2,47	7,44	25,64	2,77
	0,125	3,00	0,64	2,21	0,55
	0,090	3,47	0,10	0,33	0,23
	0,075	3,74	0,03	0,10	0,12
	0,063	3,99	0,02	0,07	0,05
	< 0,063	> 3,99	0,02	0,05	0,00

Size Classes (DGF-Bulletin 1 1988)

	Weight %
Silt and clay (< 0,063 mm):	0,05
Sand, fine (0,063 mm - 0,200 mm):	10,04
Sand, medium (0,2 mm - 0,6 mm):	87,52
Sand, coarse (0,6 mm - 2 mm):	2,39
Gravel (> 2 mm):	0,00
Sum:	100,00

Moments Measures (Folk and Wards)

Percentile	Percentile	d(mm)	φ
Amount in sieve	Amount passing		
5%	95%	0,49	1,02
16%	84%	0,42	1,25
25%	75%	0,36	1,46
40%	60%	0,32	1,63
Median 50%	50%	0,30	1,74
75%	25%	0,24	2,05
84%	16%	0,22	2,21
90%	10%	0,20	2,32
95%	5%	0,19	2,43

Moments Statistics

Mean	1,73
Sorting	0,45
Skewness	-0,02
Kurtosis	0,97
Uniformity Coefficient	1,62

The analysis is executed according to DS 405.9 extended by sieves to the 1/2 phi scale

Formulas

Mean $(\phi_{16\%} + \phi_{84\%} + \phi_{50\%}) / 3$ (Folk and Ward 1957)
 Sorting $(\phi_{84\%} - \phi_{16\%}) / 4 + (\phi_{95\%} - \phi_{5\%}) / 6,6$ (Folk and Ward 1957)
 Kurtosis $(\phi_{95\%} - \phi_{5\%}) / (2,44 * (\phi_{75\%} - \phi_{25\%}))$ (Folk and Ward 1957)
 Skewness $(\phi_{16\%} + \phi_{84\%} - 2 * \phi_{50\%}) / (2 * (\phi_{84\%} - \phi_{16\%})) + (\phi_{5\%} + \phi_{95\%} - 2 * \phi_{50\%}) / (2 * (\phi_{95\%} - \phi_{5\%}))$ (Folk and Ward 1957)
 Uniformity Coefficient $(d_{60\%} / d_{10\%})$ (dgi-Bulletin 1988)

Mean, sorting, skewness and kurtosis are based on "Amount in sieve". Uniformity coefficient is based on "Amount passing".

Size Classes and Percentiles are found by linear interpolation

Øster Voldgade 10 1350 København K
 Tel.: +45 38 14 20 00 Telefax: +45 38 14 20 50
 Email: GEUS@geus.dk
 www.geus.dk

