

Udviklingen af en lavenergi strandvoldsslette undersøgt med georadar og OSL-dateringer, Mellem til Sen Holocæn, Femø, Danmark

CASPER NIELSEN



Nielsen, C. 2006–12–12: Udviklingen af en lavenergi strandvoldsslette undersøgt med georadar og OSL-dateringer, Mellem til Sen Holocæn, Femø, Danmark. *Geologisk Tidsskrift* 2006, hæfte 2, pp. 5–10, København.

En strandvoldsslette langs en lavenergi, mikrotidal kyststrækning nord for Femø Havn på øen Femø i Smålandsfarvandet repræsenterer en kystudbygning på op til 500 m i et område med et nuværende fald i relativt havniveau. Strandvoldssletten er undersøgt med georadar, OSL-dateringer (Optisk Stimuleret Luminescens), sedimentologiske undersøgelser, samt kort- og flyfoto-tolkninger. Strandvoldende er generelt 10–20 cm høje og sedimentologiske undersøgelser viser, at strandvoldssletten er domineret af to kornstørrelser: mellemkornet sand og groft grus. Den ældste strandvold er skabt for 4450 ± 260 år siden og der er erkendt to faser af udbygning med udbygningshastigheder på ca. 5 cm/år for den ældste og op til 57 cm/år for den yngste, adskilt af en markant erosionshændelse for ca. 1200 år siden. På georadarprofilerne adskiller erosionshændelsen en indre del med aggraderende reflektorer og en ydre del med prograderende reflektorer, repræsenterende et betydeligt skift til et mere dynamisk miljø. Den prograderende ydre del af georadarprofilerne består af øvre og nedre stejlt hældende lag aflejret under stormhændelser, adskilt af subhorizontale lag aflejret under rolige vejrforhold. Den markante erosionshændelse kan erkendes på georadarprofiler, OSL-dateringer, topografiske målinger, såvel som på flyfotos. Det er konkluderet, at strandvoldssletten er dannet som følge af kraftige vinde fra vest, klint erosion og kystparallel sedimenttransport. Det er sandsynligt, at et fluktuerende havniveau, anlæggelsen af havnen, råstofindvinding, samt placering af hofder langs kyststrækningen har præget geomorfologien af strandvoldssletten.

Casper Nielsen, *Grønjordskollegiet 4 st. 4112, 2300 København S, e-post: pingeling@sol.dk*

Femø har et areal på 11,39 km² og er beliggende i det mikrotidale Smålandsfarvandet mellem Lolland og Sjælland (Fig. 1). Flere steder langs Femøs kyst findes mindre områder af grovklastisk marint forland. På sydvestkysten af øen, umiddelbart nord for Femø Havn, findes marint forland i form af en strandvoldsslette bestående af lave strandvolde, der primært har orientering VNV–ØSØ. Strandvoldssletten er denne afhandlings undersøgelsesområde og har et areal på ca. 0,28 km² med en ca. 1200 m lang kystlinie, der er udbygget op til 500 m. Grænsen mellem strandvoldsslettens grovklastiske materiale og de omkringliggende lerede og langt ældre moræneaflejringer udgøres af en langstrakt mose, som formodes at repræsentere strandvoldsslettens initiale kystlinie. Dele af strandvoldssletten er bevokset med tætplantede fyrretræer, men to græsarealer, som er udlagt til festivalplads, er denne afhandlings undersøgelsesområde. Flere steder langs kysten, bl.a. umiddelbart nord og syd for undersøgelsesområdet, har erosionsprocesser skabt op til 5 m høje klinter i morænebakkerne.

Debatten omkring genesen af strandvolde er vedholdende: er det stormhændelser eller tilvækst under rolige forhold, der står for opbygningen af strandvolde? Stormhændelser har stor erosiv effekt på strandplanet, men vil ofte føre grovklastisk materiale højt op på bagstranden. Opbygningen af strandplanet menes at skabes under roligere vejrforhold (Taylor & Stone, 1996). Parametre, der menes at have indflydelse på strandvoldsdannelse er: 1) mængden af tilført sediment, 2) bølgestørrelse, 3) vegetation og 4) hældning af strandplanet (Taylor & Stone 1996; Woodroffe 2003). Ofte bruges strandvolde som indikatorer på palæohavniveau (bl.a. Clemmensen *et al.* 2001).

Målet med undersøgelsen er at give et indblik i strandvoldenes interne strukturer, samt få et overblik over den geomorfologiske udvikling af strandvoldssletten. OSL-dateringerne gør det muligt at vurdere kystudbygningens start, strandvoldsslettens udbygningshastigheder og tillader en tidsbestemmelse af de enkelte palæokystlinier.

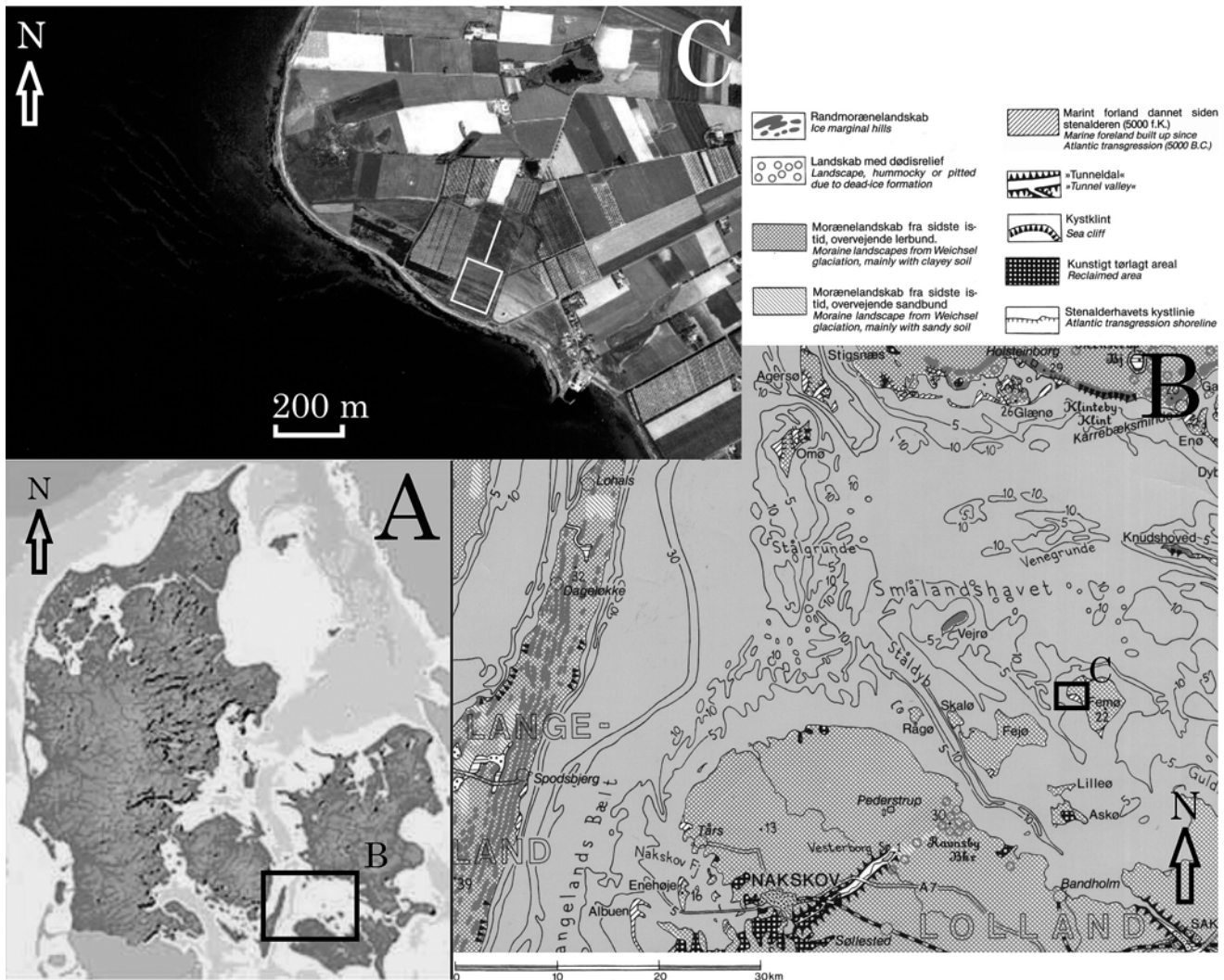


Fig. 1. Lokalisering af undersøgellesområdet. A. Topografisk kort over Danmark (© Kort & Matrikelstyrelsen, G. 03-06). B. Udsnit af landskabskort over Smålandsfarvandet, signaturforklaring ovenfor (fra Smed 1981). C. Flyfoto fra 1967 med angivelse af 2D-georadar-net (hvid ramme) og georadarlinien på det nordlige græsareal (hvid linie mod NNØ).

Undersøgellesmetoder

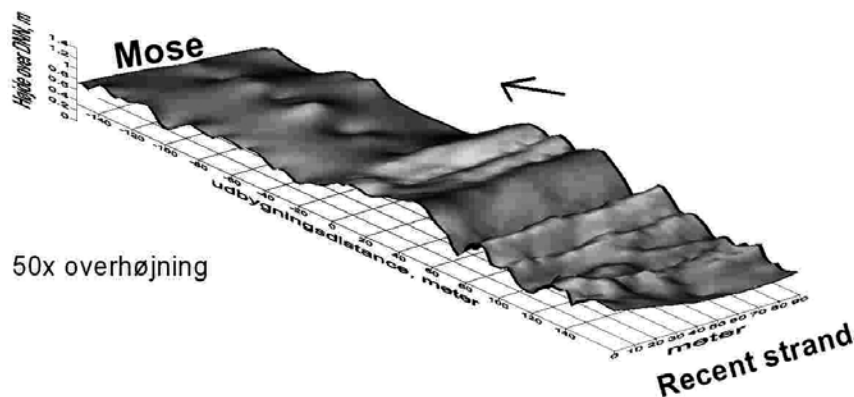
På græsarealerne er udført georadarundersøgelser, udtaget prøver til OSL-dateringer og gravet et par grøfter til undersøgelse af de sedimentære facies. Endvidere er informationer fra flyfotos og gamle landkort, samt diverse feltobservationer inddraget.

Georadarmetoden er en geofysisk undersøgelsesmetode, der er baseret på elektromagnetiske bølgers passage gennem de overfladenære jordlag. De forskellige fysiske egenskaber af jordlagene betyder, at en del af georadarsignalet, der fra jordoverfladen via en senderantenne sendes ned i jorden, vil reflekteres af laggrænser, således, at det igen kan registreres af en modtagerantenne på jordoverfladen. Hermed kan skabes et pseudo-profil af de overfladenære jordlag.

Metoden giver kontinuerte profiler med en opløselighed på ca. 0,3 m ved brug af de anvendte 200 MHz antenner. (Reynolds 1997; Andreasen 2000; Neal 2004).

OSL (Optisk Stimuleret Luminescens) er en dateringsmetode, som anslår tiden, der er gået siden begravede sediment sidst var eksponeret for dagslys, altså aflejringstidspunktet. Metoden bygger på det faktum, at sediment modtager og lagrer stråling fra omgivelserne, samt at dette lagrede signal nulstilles ved eksponering for sollys eller varme. Sedimentets lagrede signal og den naturlige radioaktivitet måles i laboratoriet og med en værdi for baggrundsstrålingen er det muligt at beregne en alder for begravelsen af sedimentet (bl.a. Murray & Olley 2002). OSL-dateringerne blev lavet på Nordisk

Fig. 2. 3D-illustration af topografien af de to græsarealer. 0-værdien på akse 'udbygningsdistance' refererer til grænsen mellem de to græsarealer. Illustrationen viser tydeligt de markante strandvolde på den yderste del af strandvoldssletten og den indre del, der har langt mindre relief.



Laboratorium for Luminescens Datering på Risø Nationale Laboratorium i Roskilde.

Kort og flyfoto-informationer er tolket på baggrund af adskillige kort, det ældste fra 1889, og flyfotos primært fra 1967, 1989 og 2004. Strandvoldsslettens topografi er opmålt i et antal profiler med et elektronisk nivelleringsinstrument, TopCon.

Geologisk baggrund

Femø domineres af let kuperede bakker, der udgøres af en leret, kvartsfattig moræne afsat af det såkaldte baltisk isfremstød ca. 15 000 BP (Pedersen & Rasmussen 2000). Samspillet mellem isostasi og eustasi førte til en hastig havniveaustigning, Den Atlantiske Transgression, i perioden ca. 9000–8000 BP (Mathiassen 1997). Transgressionen førte havniveau op til nær det nuværende, dog med efterfølgende fluktuationer på op til 1 m (Christensen, 1998),

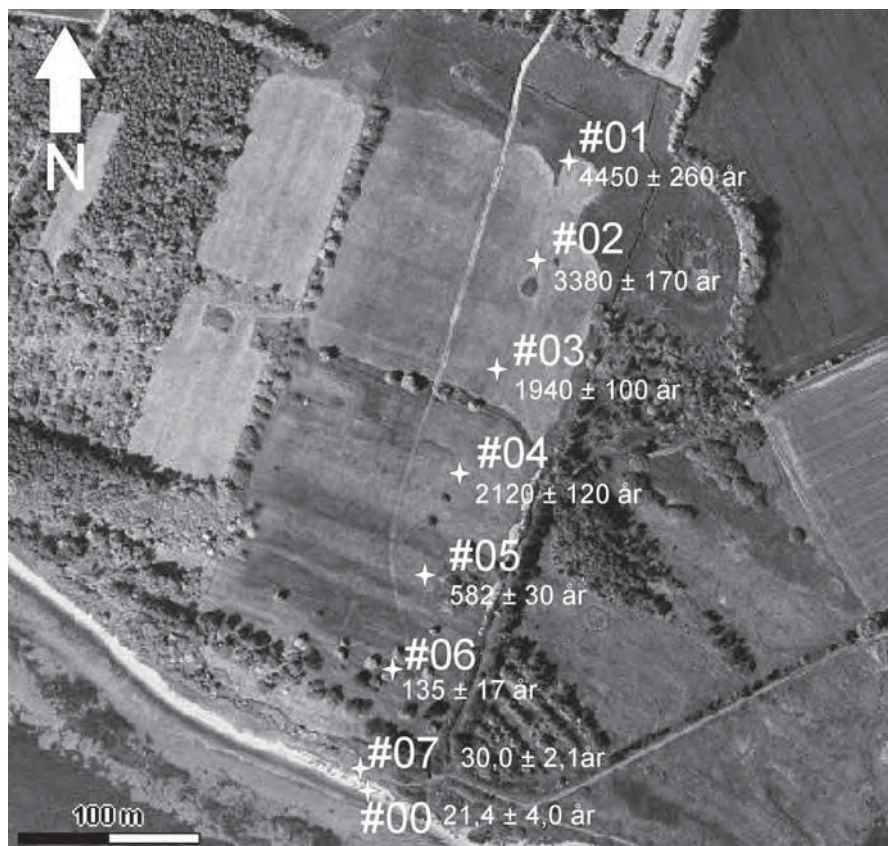


Fig. 3. Flyfoto med geografisk position og alder af OSL-prøverne (markeret med stjerner). Bemærk farveforskellene på flyfotoet, der afspejler den varierede vegetation mellem toppen af strandvoldene og dalene mellem strandvoldene. Flyfoto fra 2004 (gis.stam.dk).

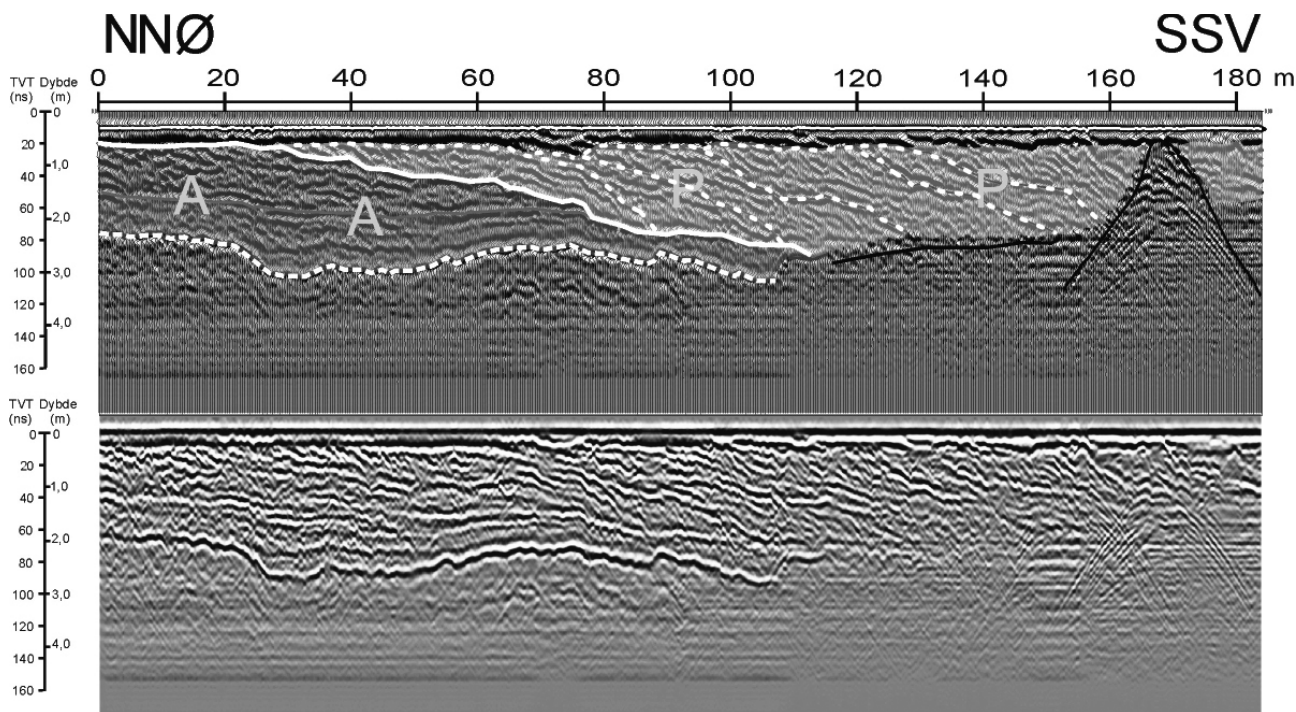


Fig. 4. 200 Mhz georadarprofil fra den centrale del af det sydlige græsareal. Den recente strand er mod SSV. Bemærk den hvide, fuldt optrukne horisont, der markerer det betydeligt skift i aflejningsdynamik. Moræneoverfladen (kort stiplede) kan ikke erkendes tæt på kysten på grund af saltvandsindtrængen. Diffractionshyperblerne i position 170 m skyldes 'støj' fra store træer. A: aggraderende system, P: prograderende system.

og skabte samtidig mulighed for dannelsen af marint forland flere steder i Smålandsfarvandet.

Mertz' (1924) klassiske undersøgelser af strandlinieförändringar i Danmark vidner om at Syd-danmark er under indsynkning. Dette understøttes af, at fikspunktkoten på Femø Kirke blev nedjusteret med 7,2 cm fra 1953 til 2004 (KMS 2005), svarende til en relativ havspejlsstigning på 1,4 mm pr. år i denne periode. Desuden findes stenalderbopladsler i Smålandsfarvandet på op til 10 m (recent) havdybde (Fischer 1993).

Resultater og tolkninger

De topografiske målinger af de to undersøgte græsarealer (Fig. 2) viser, at den indre del af strandvoldssletten består af lave (<10 cm), svært detekterbare strandvolde, mens man kystnært finder tydelige, 10–60 cm høje, kystparallelle strandvolde. Strandvoldssletten når sit højeste punkt i den centrale del, 1,4 m over DNN.

Gravede render til brug i sedimentologiske undersøgelser mødte grundvandsspejlet i ca. en meters dybde. Den øverste meter af strandvoldssletten består af mellemkornet sand ($\phi = 1-1\frac{1}{2}$) og groft grus

($\phi = \text{ca. } -2$) med sporadiske sten (<12 cm) under strandvoldens havværts hældende stødside. Strandvoldssletten har i den nordlige og ældste del adskillige indslag af ca. 10 cm tykke, sorte organiske lag, tolket som aflejret i en mose under højt havniveau. I den sydlige og yngre del er få lyse organiske indslag af ca. 2 cm's tykkelse tolket som ålegræs aflejret under storm. Det overordnede indtryk er, at sedimentet, der opbygger strandvoldssletten, generelt bliver grovere tættest på den recente strand.

Der blev indsamlet otte prøver af strandvoldskomplekset til OSL-datering. En prøve (#01) blev indsamlet på grænsen til mosens i nord, resten (#02,#03,#04,#05 og #06) blev indsamlet med 60 meters mellemrum i en linie vinkelret på strandvoldene. To prøver blev indsamlet på den recente strand; en af det recente strandsand (#00) og en på stedet hvor vegetationen starter (#07). Prøverne blev i lystæt beholder ført til Risøs laboratorier, hvor de blev behandlet efter normal procedure for OSL-dateringer. Fig. 3 viser et flyfoto af de 8 OSL-prøvers position og den beregnede alder. Aldrene bliver yngre mod den recente strand, eneste uregelmæssighed er #03 og #04, der dog ligger indenfor fejlmarginen. Desuden skal det bemærkes, at prøven af det recente strandsand giver en alder på $21,4 \pm 4,0$ år. Dette er

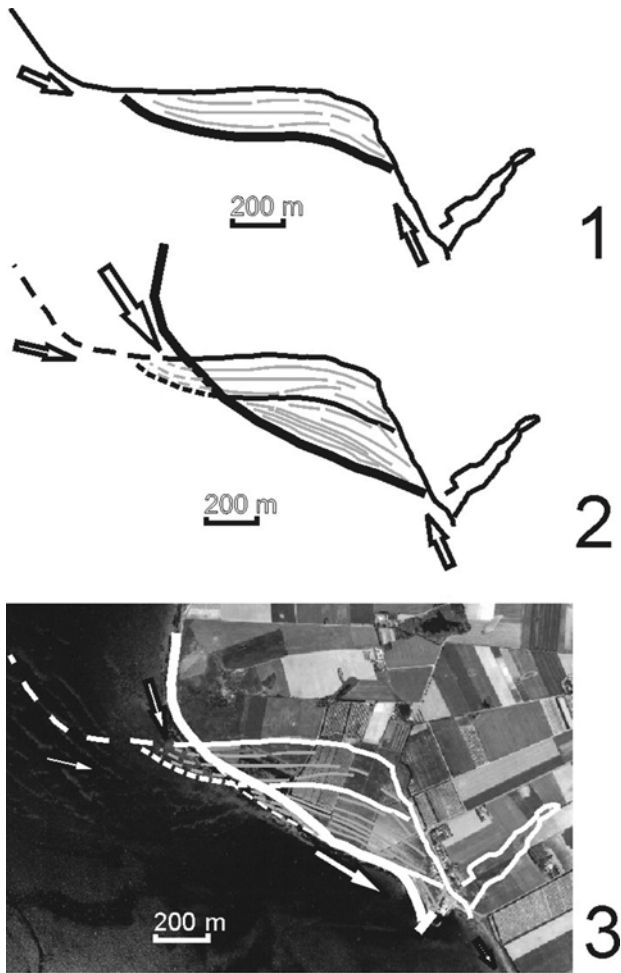


Fig. 5. Geomorfologisk udvikling af strandvoldssletten. Pile angiver sedimenttransportretning, størrelsen af pilen er proportional med den anslåede transporterede mængde sediment. Tykke linier er de aktive kystlinier i de tre situationer. Bortrøderede tidligere morfologiske elementer er stiplede.

definitivt en for høj alder, tydende på et ikke nulstillet OSL-signal, hvilket er hyppigt forekommende blandt helt unge sedimenter. Uafhængig alderskontrol af OSL-dateringerne var begrænset, dog kunne de yngste prøver sammenlignes med kortinformationer og den ældste prøve kunne sammenholdes med fluktuationer på eksisterende havniveaukurver. OSL-dateringerne blev på baggrund af ovenstående vurderet som i stor overensstemmelse med den uafhængige alderskontrol.

På basis af OSL-dateringerne er strandvoldsudbygningen startet for 4450 ± 260 år siden på stedet hvor der i dag er mose. Udbygningsraten er for den indre del ca. 5 cm/år og for den ydre del med markante strandvolde mellem 4 og 57 cm/år med de største udbygningsrater for de yngste aflejringer.

Georadarundersøgelserne blev primært udført på

det sydlige græsareal, hvor de bedste resultater blev opnået. De filtrerede og migrerede 200 MHz georadarprofiler domineres af subhorizontale og op til 15° havværts hældende reflektorer (Fig. 4). I 80–120 nanosekunders dybde (ca. 2,5–3,5 m) træffes den kuperede moræneoverflade (hvid, stiplede horisont), som en reflektor med meget høj amplitude, der i havværts retning ikke kan identificeres pga. det indtrængende saltvands meget kraftige dæmpning af georadarsignalet. Under moræneoverfladen er signalet kaotisk. Georadarprofilerne viser en generel ændring i reflektorenes hældning, idet de ældre lag ses som subhorizontale reflektorer, mens de yngre lag danner stejle ($<15^\circ$) havværts hældende reflektorer (Fig. 4). Hvid Horisont tolkes som værende en markant erosionsflade, der repræsenterer en lakune, som på basis af OSL-dateringer er beregnet til 1200 år. Ligeledes repræsenterer denne horisont antageligt et markant skift i vinddynamik. Georadarprofilerne er inddelt i radarpakker, som indbyrdes ligner hinanden, men dog ikke er identiske. Særligt radarpakkerne havværts for Hvid Horisont er interessante. De viser at kystliniens progradering ikke er en simpel tilvækst af parallelle reflektorer, men at hver radarpakke er opbygget af hældende lag øverst, subhorizontale lag i midten og hældende lag nederst. Dette indikerer, at prograderingen sker gennem aflejring på den øverste del af bagstranden under storm, på den nedre del ved aflejring fra kystparallelle strømme samt af tilbagestrømning under storm, mens de mellemliggende subhorizontale, aggraderende aflejringer tolkes som aflejret på forstranden og den nedre del af bagstranden under rolige vejrforhold (Reading 1996; Taylor & Stone 1996; Woodroffe 2003; Davis & Fitzgerald 2004).

Den geomorfologiske udvikling af strandvoldssletten på baggrund af flyfoto og feltobservationer viser tre stadier af strandvoldsudbygning (Fig. 5). Under dannelsen af strandvoldssletten forrykkes hovedeksponeringsretningen antageligt fra syd over sydvest til omtrent vestlig, tolket på baggrund af justeringen af strandvoldenes orientering. De læggenvede forhold ændres som resultat af erosion af landområder, der bl.a. ses via kannibalisering af ældre strandvolde i den nordlige del af strandvoldssletten. Yderligere har anlæggelsen af Femø Havn, samt evt. et skift i dominerende vindretning, ændret forholdene, der har præget den geomorfologiske udvikling.

Konklusion

Det undersøgte område nord for Femø Havn er en lavenergi strandvoldsslette med to udbygningsfaser adskilt af en erosionsflade, der ligeledes er markant på OSL-dateringer, topografiske målinger og flyfotos. Aflejringen af strandvolde er sket som opfyldning af en palæobugt, hvor materialet er skabt via erosion af nærliggende klinger og submarine flak.

Det konkluderes, at for den undersøgte strandvoldsslette er de vigtigste strandvoldsofbyggende parametre: en stor vinddynamik fra vest, et fluktuerende havniveau og et svagt faldende havniveau, mens et stigende havniveau menes at føre til erosion. Foruden de parametre, har isostatisk indsynkning, klingerose, anlæggelsen af havnen, råstofindvinding i nærliggende områder og anlæggelse af højder sat morfologiske præg på strandvoldssletten.

Tak

Ovenstående artikel er udarbejdet på baggrund af cand. scient. afhandling i geologi med samme titel, august, 2006, Geologisk Institut, København Universitet. Tak til vejlederne Gunver K. Pedersen og Lars Nielsen. Tak til Risø, der gav mulighed for at lave OSL-dateringer.

Referencer

- Andreasen, F. 2000: Anvendelse af georadar til undersøgelse af kystnære sedimentære miljøer. Upubliceret Ph.D. afhandling. Institut for Geologi og Geoteknik, Grundvandscentret, Danmarks Tekniske Universitet, 249 pp
- Christensen, C. 1998: Spodsbjerg – en yngre stenalder boplads på Langeland. I: Sørensen, H. (red.) Spodsbjerg: A younger Stone Age settlement on Langeland, Rudkøbing, 7–27. Langeland Museum.
- Clemmensen, L.B., Richard, N. & Andersen, C. 2001: Holocene sea-level variation and spit development: data from Skagen Odde, Denmark. *The Holocene* 11, 323–331.
- Davis, R.A. & Fitzgerald, D.M. 2004: *Beaches and coasts*. Blackwell Publishing, 419 pp.
- Fischer, A., 1993: Stenalderboplads i Smålandsfarvandet. Skov- og Naturstyrelsen. København, 139 pp..
- KMS 2005: Fikspunktbeskrivelser, Femø Kirke. Kort & Matrikelstyrelsen.
- Mathiassen, D. R., 1997. Storebælts skiftende landskaber fra isen forsvandt, til havet trængte ind. I: Pedersen, L., Fischer, A. & Aaby, B. (red.) Storebælt i 10.000 år. Mennesket, havet og skoven, 22–28. København: A/S Storebæltsforbindelsen.
- Mertz, E. L., 1924: Oversigt over de sen – og postglaciale Niveauforandringer i Danmark. *Danmarks Geologiske Undersøgelse II Række* 41, 49 pp.
- Murray, A.S. & Olley, J.M. 2002: Precision and accuracy in the optically stimulated luminescence dating of sedimentary

- quartz: a status review. *Geochronometria* 21, 1–16.
- Neal, A., 2004: Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth Science Reviews* 66, 261–330.
- Pedersen, S.A.S. & Rasmussen, L.Aa. 2000: Geological map of Denmark 1:50 000. Saksøbing. Copenhagen: Geological Survey of Denmark and Greenland.
- Reading, H.G. & Collinson, J.D. 1996: *Clastic coasts*. I: Reading, H.G. (red.). *Sedimentary environments*, 154– 231. Blackwell Science Ltd .
- Reynolds, J.M. 1997: *An introduction to applied and environmental geophysics*. Wiley, 806 pp.
- Smed, P. 1981: Landskabskort over Danmark. Blad 4, Sjælland, Lolland, Falster og Bornholm. Geografforbundet.
- Taylor, M. & Stone, G.W. 1996: Beach-ridges: a review. *Journal of Coastal Research* 12, 612–621.
- Woodroffe, C. D. 2002: *Coasts: form, process and evolution*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 623 pp.

English summary

A beach ridge plain at a low energy, micro-tidal southern coast of Femø in Smålandsfarvandet, southern Denmark, represents nearly 500 m of coastal progradation in an area with a recent relative sea level rise. The beach ridge plain is examined with ground penetrating radar (GPR), OSL dating, sedimentological investigations, and map- and aerial photo- information. The beach ridges are mostly 10–20 cm high and sedimentological investigations of the beach ridge plain show two dominant grain sizes; medium sand and coarse gravel with some sporadic cobbles (< 12 cm). The oldest beach ridges formed 4450 ± 260 years ago and two phases of progradation are recognised with progradation rates of ~5 cm/year for the oldest and up to 57 cm/year for the youngest, separated by a pronounced erosional event c. 1200 years ago. On the GPR profiles this horizon (white horizon in Fig. 4) separates the inner beach ridge plain with aggrading reflectors and the outer plain with prograding reflectors representing a change to a more dynamic environment. The GPR data indicate that the prograding depositional units comprise an upper prograding part and a lower prograding part both deposited during storm events and separated by sub-horizontal to gently seaward dipping strata deposited during calm weather conditions. The erosional event (White Horizon, Fig. 4) is recognized on the GPR profiles, in the OSL datings, and in topographic measurements as well as on aerial photos. It is concluded that the beach ridge built in response to strong winds from the west, cliff erosion and shore parallel sediment transport. It is likely that a fluctuating sea level, the building of the harbour, raw material extraction and placing of groynes at the coast affected the morphology of the beach ridge plain.