

“Mit livs dessert”: 100-års jubilæet for Ellen Louise Mertz’ studie af niveauforandringer i Danmark

AF: MARIE W. SVENDSEN, SØREN M. KRISTIANSEN, VIVI K. PEDERSEN
& ANDERS DAMSGAARD

M.W. Svendsen [mariewinthers@gmail.com], S.M. Kristiansen, V.K. Pedersen, Institut for Geoscience, Aarhus Universitet, Høegh-Guldbergs Gade 2, 8000 Aarhus C. A. Damsgaard, Geo, Sødalsparken 12, 8220 Brabrand.

*Svendsen, M.W., Kristiansen, S.M., Pedersen V.K. & Damsgaard, A. 2024: “Mit livs dessert”: 100-års jubilæet for Ellen Louise Mertz’ studie af niveauforandringer i Danmark. *Geologisk Tidsskrift* 2024, pp. 107–119. ISSN 2245-7097, København.*

I denne artikel genbesøger vi Ellen Louise Mertz’ udgivelse af “Oversigt over De sen- og postglaciale Niveauforandringer i Danmark” fra 1924 (Mertz 1924), for at revurdere pålideligheden af det nu 100-år gamle datagrundlag. Dette er vigtigt fordi hendes arbejde igennem årtier har været grundlaget for konklusioner indenfor for eksempel landskabsdannelse og kystprocesser. Hun kaldte selv studiet for “... mit livs dessert”.

Her verificerer vi de ældre strandvoldshøjder benyttet af Mertz (1924) og præsenterer samtidig en ny model for den aktuelle glacio-isostatiske landbevægelse baseret på moderne satellitdata (Sentinel-1 data fra perioden 2015–2021). Ud af en delmængde på 90 repræsentative strandvolde som hun anvendte (ud af i alt 280 strandvolde), kan vi i dag genfinde 66. Herudover er højden hun dengang anvendte $\pm 0,5$ m for 57% af denne delmængde, sammenlignet med Danmarks Digitale Højdemodel. Nutidige landbevægelser i European Ground Motion Service (EGMS) dataene baseret på Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)-målinger fra Sentinel-1 missionen følger generelt Mertz’ isolinjer, med maksimal landhævning i Skagen (+1,4 mm pr. år). De sydlige dele af landet, som Mertz undlod at fortolke dengang på grund af manglede data, ses at synke, med maksimalt 0,7 mm pr. år i Sønderjylland.

Mertz (1924) studie er i dag overhalet af nye og bedre studier, men studiets konklusioner anses for at have været pålidelige og epokegørende, idet hun formåede at samle store mængder feltdata og producere et landsdækkende kort over maksimum havniveau for Littorinahavet. Alt sammen i en tid hvor adgangen til geologiske kort og data var begrænset, og hvor kvinder

var stærkt underrepræsenterede i naturvidenskab og forventeligt mødte ekstra udfordringer – som det til dels stadig er tilfældet i dag.

I dag er det alment accepteret, at jordoverfladen konstant er i bevægelse – hvilket blandt andet resulterer i relative havniveauændringer, der varierer i udstrækning og mægtighed. Disse bevægelser og potentielle resulterende havniveauændringer varierer fra tektoniske fænomener over millioner af år over årstidsvariationer til menneskeskabte effekter relateret til bl.a. grundvandsindvinding og bebyggelse. I dag påvirkes Danmark og store dele af Skandinavien af glacio-isostatiske landbevægelser som følge af bortsmeltning af det Skandinaviske isskjold inden for de seneste ca. 20.000 år. De glacio-isostatiske landbevægelser strækker sig over mange tusinde år og store dele af Skandinavien, herunder Danmark, er fremdeles i isostatisk ubalance efter bortsmeltningen af isskjoldet, på trods af at isen er smeltet bort for ca. 10.000 år siden. Jordoverfladen hæver sig derfor stadig i store områder, hvorimod andre omkring liggende områder oplever indsynkning som et resultat af horisontale bevægelser i Jordens kappe (Steffen *et al.* 2005). Dette havde man også erkendt for 100 år siden, men da man dengang manglede metoder til absolutte aldersdateringer, kendte man ikke hastighederne for landhævningen – kun at kysterne ikke altid havde haft samme placering.

Ellen Louise Mertz var indtil sin død i 1987 en meget kendt geolog og geotekniker, og hun har efterladt sig en fyldig arv af studier og lærebøger. For eksempel hendes første udgivelse ‘Kullejerne paa Spitsbergen’ i 1920 og sidenhen ‘De geologiske forhold i omegnen af den nuværende og den kommende Lillebæltsbro’ fra

1964, samt i alt 11 bøger om geologien i danske købstæder – de såkaldte bygeologier (publiceret 1969–1985; Bahnsen & Frederiksen 1989). Mertz var fra 1916 til 1966 ansat ved Danmarks Geologiske Undersøgelse (DGU) og fast tilknyttet Danmarks Geotekniske Institut og Statsbanernes Geotekniske Laboratorium (Avnstrøm 1989; Hansen 1989a). Mertz blev tidligt i sin karriere udpeget til at udføre de komplekse fundringsundersøgelser ved opførelsen af Lillebæltsbroen, og løste den svære opgave med ‘originalitet og stor kompetence’ (Hansen 1989a). Siden tog hun del i forundersøgelser af adskillige broer. Mertz var med til at etablere og udvikle ingeniørgeologien i Danmark, et felt der i begyndelsen af 1920’erne endnu ikke var begyndt. Hun er med rette blevet omtalt ‘Dansk ingeniørgeologisk moder’ (Lundgren 1989; Sørensen 1989; Larsen 1989). Geologisk set gjorde Mertz sig første gang bemærket i 1924, ved udgivelsen af et landsdækkende overblik over den relative landhævning siden sidste istid (Mertz 1924; Fig. 1). På baggrund af eksisterende geologiske feltmålinger af strandvolde og deres højde, estimerede hun de dengang såkaldte niveauforandringer siden sidste istid. Studiet har siden været hyppigt anvendt og en klassiker i dansk geologisk sammenhæng, og studiet fejrer i år 100-års jubilæum (Larsen 1989; Christensen *et al.* 2008; Hansen *et al.* 2011, Kristiansen *et al.* 2020). Dog er det relevant at Mertz (1924) genbesøges, da fortidige relative land- og havniveauændringer såvel som nutidige og fremtidige, fortsat er aktuelle og den teknologiske udvikling har åbnet nye muligheder. I studie af Jackson *et al.* (2024) præsenteres Mertz’ (1924) data som de forekommer i det oprindelige studie, men i et format, der er mere brugervenligt til moderne analyser. Studiet har ikke til formål at evaluere Mertz’ arbejde, vurdere samtidiges synspunkter eller sammenfatte den nuværende viden om emne. Til forskel fra Jackson *et al.* (2024) verificerer vi Mertz’ datapunkter, og nærværende artikel er derfor en videreudvikling af denne artikel, som har fokus på Mertz’ isolinjer.

Først indenfor de seneste år, har en ny generation af modeller gjort det muligt at forstå landbevægelserne i en glacio-isostatisk kontekst (f.eks. Milne *et al.* 2004; Colgan *et al.* 2019; Vestøl *et al.* 2019; Knudsen *et al.* 2024). Disse studier er dog ikke entydige. I lighed med Mertz (1924) indikerer Milne *et al.* (2004), Colgan *et al.* (2019) og Vestøl *et al.* (2019) baseret på GPS-målinger, geodætiske målinger og geodynamiske modeller, at der foregår både landhævning og indsynkning i det danske område, mens den nylig udgivet model fra DTU Space (Knudsen *et al.* 2024), baseret på præcisionsnivelementer, tidevandsmålere og GNSS-reference stationer, finder landhævning i hele landet. Samtidig er der i dag øget fokus på at udvikle modeller, der kan kvantificere konsekvenser af klimaforandringerne og

føre til mere præcise projektioner af kystpåvirkning under fremtidens ændringer i havniveau; f.eks. ved kortlægning af områder med særlig stor risiko for oversvømmelser som beslutningsgrundlag for klimatilpasningstiltag (SDFE 2020; Nissen *et al.* 2021). Nye modeller for landhævningen kan samtidig være med til at afdække de langsomme landsdækkende glacio-isostatiske bevægelser samt belyse lokale afvigelser. Vertikale bevægelser er f.eks. højst relevante for risikokortlægning i forhold til forekomster af blødbundsaflejringer fra postglacial tid. Der er derfor behov for en præcis landsdækkende model for de aktuelle isostatiske landbevægelser.

Formålet med dette studie er derfor: 1) at kvalitetsvurdere de data der blev benyttet af Mertz (1924) ved at verificere placering og højde af de anvendte strandvolde ved hjælp af moderne højdemodeller, og 2) at vurdere præcisionen af niveauændringerne på landsdækkende kort alene baseret på strandvoldenes koter fundet i 1924 sammenlignet med koter og konturlinjer fremstillet med moderne satellitdata (Sentinel-1).

Metoder

Verificering af data i Mertz (1924)

Ellen Louise Mertz’ arbejde fra 1924 (Oversigt over De sen- og postglaciale Niveauforandringer i Danmark; Mertz 1924) er en sammenstilling af allerede publicerede (og enkelte ikke-publicerede) feltagttagelser og opmålinger af gamle kystlinjer. Data var indsamlet af henholdsvis statsgeolog Axel Jessen, Dr. Victor Madsen, Professor K. Rørdam og statsgeolog M. Milthers. Materialet til oversigten er – med få undtagelser – indsamlet af Danmarks Geologiske Undersøgelse (DGU) og udgivet i DGU’s skrifter, Række I, II og V mellem 1890 og 1923. Studierne Mertz anvender er følgende: Jessen (1897, 1907, 1920), Madsen (1900, 1902a, 1902b), Milthers (1908, 1922), Rørdam (1892, 1899) og Rørdam & Milthers (1900).

Mertz (1924) indeholder tabeller med oplysninger om sen- og postglaciale marine grænser (strandvolde, marine grænse, kystlinje, tørvelag, kulturlag, oldsagsfund m.fl.) i Jylland, på Fyn, Samsø, Sjælland og Bornholm. Derudover indeholder oversigten et kort der blandt andet viser placering og højde af 280 strandvolde fra Littorinafladen, 63 strandvolde fra Yoldiafladen samt tilhørende isobaser. I denne artikel dækker ‘strandvolde’ over alle betegnelser anvendt i Mertz (1924). Der er ikke forsøgt at klassificere efter mere moderne definitioner for strandvoldsdannelser (fx Otvos 2000), da lokaliteterne ikke er genbesøgt.

OVERSIGT OVER SEN- OG POSTGLACIALE NIVEAUFORANDRINGER

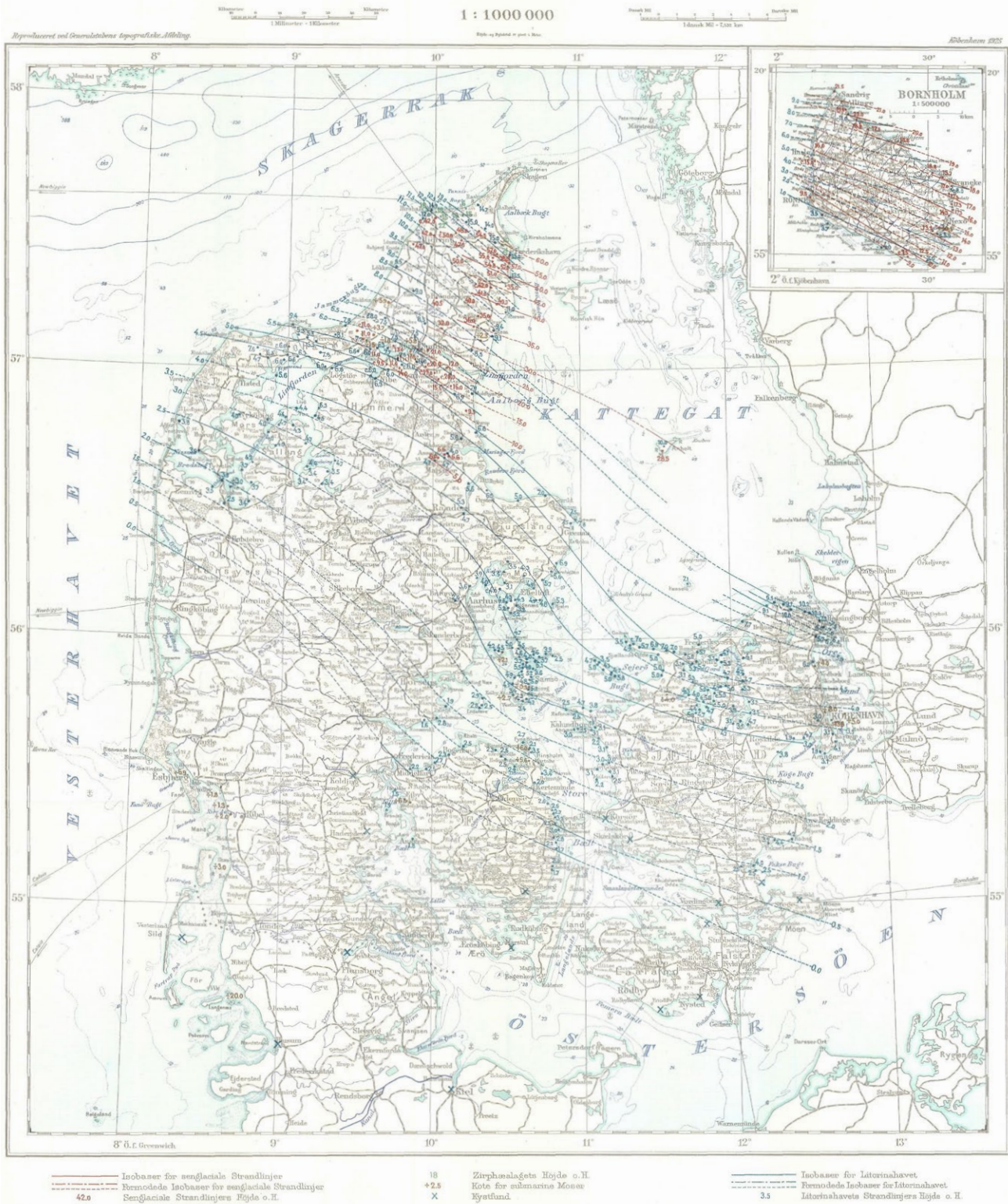


Fig. 1. Oversigt over sen og post-glaciale relative landhævning i Danmark. Kilde: Mertz (1924).

Til de postglaciale isobaser, der angiver landhævningen siden Littorinahavets maksimale udbredelse, forklarer Mertz (1924) at der er taget hensyn til højden af den øverste 'tanglinje', defineret som højden hvortil havet kan kaste strandgrus op (Mertz 1924). Målingerne af de postglaciale strandvolde er således korrigeret ved at fratække denne højde (ca. 1 meter i fjorde og vige og op til ca. 3 meter ved åbne kyster) så de postglaciale isobaser – ifølge Mertz (1924) – indikerer den sande landhævning siden Littorinahavets maksimale udbredelse. Alle målinger i oversigten er angivet i meter ift. datidens vertikale reference Dansk Normal Nul (DNN). Kote forskellen mellem den nutidige vertikale reference, Dansk Vertikal Reference 1990 (DVR90), som Danmarks højdemodel (DHM) er baseret på, og DNN er undersøgt via Kort- og Matrikelstyrelsen, f.eks. da mange af de danske øer havde nul-niveaet fastlagt vha. lokale vandstandsmålinger. Den største variation er i Sønderjylland med 12 cm (Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet 2005). Forskellen i DNN kote til DVR90 er mindre end 10 cm i Mertz' undersøgelsesområde, og vi vælger ikke at kvantificere denne afvigelse yderligere.

GIS software og anvendte korttyper

Datapunkterne fra Mertz (1924) er verificeret i QGIS (version 3.26.2 Buenos Aires) ved hjælp af følgende datasæt:

1. Digitaliseret kort fra Mertz (1924; Geo 2023).

2. Danmarks Højde Model (DHM)_terræn og (DHM/ter1ræn_skygge) 2020 udgave i 0,4 m rumlig opløsning (<https://dataforsyningen.dk/data/930>).
3. Residual Relief Model (RRM), udarbejdet og beskrevet i Stott *et al.* (2019), muliggør visualisering af mindre højdeforskelle i terrænet.
4. Høje (1842–1899) og Lave (1901–1971) Målebordsblade: topografiske kort over Danmark. Særligt benyttet i tilfælde hvor lokaliteternes navne siden er ændret.

Verificering af datapunkter fra Mertz (1924)

Til vurderingen af datakvaliteten af de postglaciale strandvolde fra Mertz (1924) er 90 ud af de 280 strandvolde gennemgået som stikprøve. Strandvoldene er i nærværende studie udvalgt med henblik på at repræsentere hele det kortlagte område samt at repræsentere alle forfattere der har foretaget målinger og observationer. Ved hjælp fra Høje og Lave målebordsblade, historiske kort over Danmark (Møller 2021) er datapunkterne på det digitaliserede kort fra Mertz (1924) matchet med de respektive lokaliteter i tabellen fra Mertz (1924). De nævnte strandvolde er herefter forsøgt genfundet i DHM ved hjælp af beskrivelser i DGU's skrifter. *RRM*, *DHM/terræn* og *DHM/terræn_skygge*, sammenholdt med de Høje Maalebordsblade som Mertz anvendte, er benyttet til at identificere og måle kote på den højeste strandvold i det pågældende område (Fig. 2). De nye målte

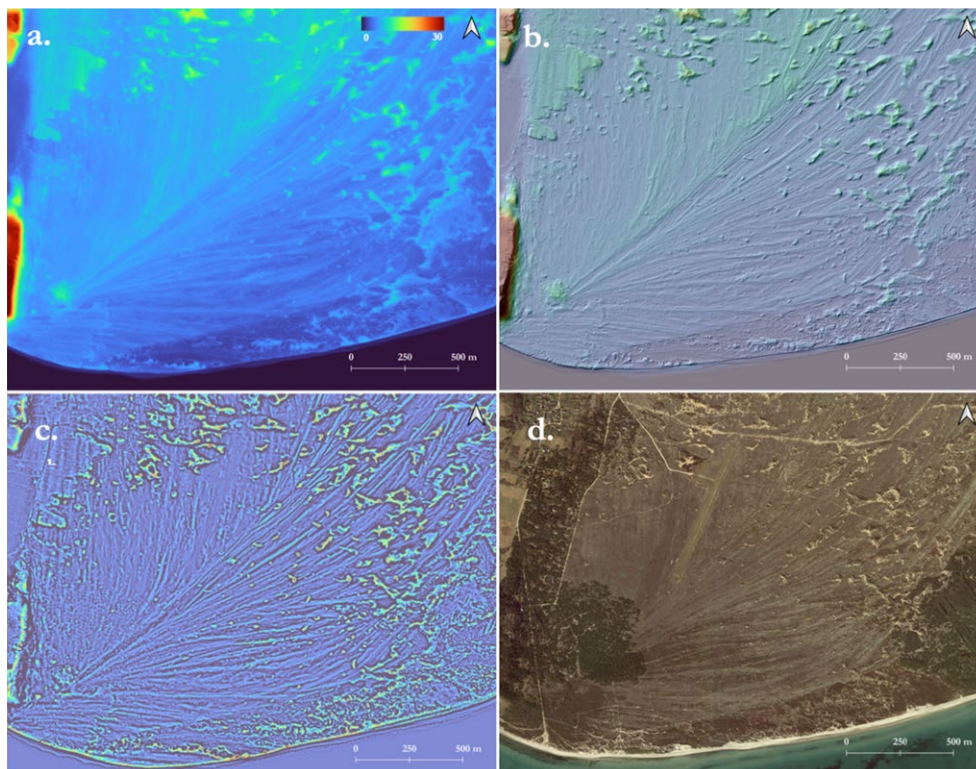


Fig. 2. Eksempel på strandvolde som Mertz (1924) fik koter fra, her på Anholt. **a:** digital højdemodel (DHM/terræn, højdeskala i meter over DVR90), **b:** DHM/terræn_skygge med 70% gennemsigtighed ovenpå DHM/terræn, **c:** Residual Relief Model (RRM), **d:** ortofoto fra forår 2023.

strandvoldshøjder er indsat i tabel SM1 (Supplerende materiale 1) med et tildelt ID-nummer, udvalgte informationer og lokalitetsnavn fra Mertz (1924). Dog er der ved flere lokaliteter tilføjet yderligere oplysning om lokaliteten f.eks. fjord, vig, områdets navn mm. Til selve verificeringen er der fastsat en grænseværdi for afvigelser i højde, således at strandvolde der er 0,5 m højere eller lavere end den målte strandvold i Mertz (1924), er markeret 'afvigende', hvorimod strandvolde der afviger mindre end 0,5 m er markeret 'OK'. Ikke-genfundne strandvolde er markeret på kortet (Fig. 4), og kan af pladshensyn ses i SM1.

En ny model for den aktuelle glacio-isostatiske landbevægelse

For at kvantificere nutidige landbevægelser knyttet til glacio-isostasi benytter vi data fra European Ground Motion Service (EGMS), der er en del af Copernicus' landovervågningstjeneste. EGMS er baseret på Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)-målinger fra Sentinel-1 missionen, der systematisk og kontinuerligt registrerer bevægelser af jordoverfladen over det meste af Europa med millimeterpræcision. Derudover benytter EGMS høj-kvalitets GNSS (Global Navigation Satellite System) modeller, for at etablere en geodætisk referenceramme (Constantini *et al.* 2021). En validering af EGMS-datapunkter i Danmark viser, at der er overensstemmelse mellem tidsserierne og hastighederne mellem præcise kontrolpunkter på overfladen (GNSS) og EGMS-målepunkter omkring GNSS-stationerne (Calero *et al.* 2024). EGMS datasættet opdateres årligt, hvor hver udgivelse indeholder overfladebevægelse over en femårig periode (EGMS 2024). Data til dette studie er hentet fra EGMS d. 15.9.2023 (<https://egms.land.copernicus.eu/>) og dækker perio-

den 2015–2021. Den rumlige opløsning er 5×20 m, og i dette studie benyttes koordinater (*easting, northing*) samt jordoverfladens gennemsnitlige vertikale bevægelse i mm pr. år (*mean-velocity*). Databehandlingen er udført i QGIS (version 3.26.2 Buenos Aires).

I dette studie har vi forsøgt at isolere effekten af de aktuelle regionale glacio-isostatiske landbevægelser. Dette er gjort ved, at ikke-regionale relative landbevægelser (herefter kaldet outliers) er fjernet. Først fjernes de områder der er påvirket af velkendte kystprocesser og menneskeskabte påvirkning. Disse specifikke elementer er f.eks. heder, kyster, større veje eller byer (se SM2 for alle elementer). Uanset hvor både våde og tørre heder fandtes i landet, var her en større indsynkning sammenlignet med omgivelserne, hvorfor alle områder med heder blev fjernet. Årsagen bag denne observation kendes ikke. En buffer på 500 m ind i landet fra alle kyster blev frasorteret, da den indledende dataanalyse viste, at kyster og deres bagland var meget variable på lille skala. Årsagen må være relateret til lokale variationer i erosion og aflejring forårsaget af bølger og sandflugt, men nok også, at store områder med heder findes her. Datapunkter indenfor disse elementer er fjernet ved *Buffer* og *Difference* funktionerne i QGIS. Bufferstørrelsen er vurderet individuelt for hvert element ud fra GIS-temaernes dækningsgrad. Ved funktionen *Difference*, fratrækkes de punkter, der falder indenfor bufferne (Fig. 3), se SM3 for bufferstørrelser. Specifikt er GIS-temaerne *GeoDanmark* version 6.0 2018.11.14, *E-road census 2020* og *Krak Danske Vejnet* benyttet til at identificeret og fjernet outliers. Lignende elementer i de omkringliggende lande (Sverige, Norge, Tyskland og Polen) er ikke fjernet, på baggrund af begrænset tilgang til opdaterede GIS-temaer. Temaerne i tabellen er udelukkende for Danmark, med undtagelse af 'E-veje Sverige'. Herefter er de resterende punkter interpoleret med *Inverse Distance Weighting* (IDW).

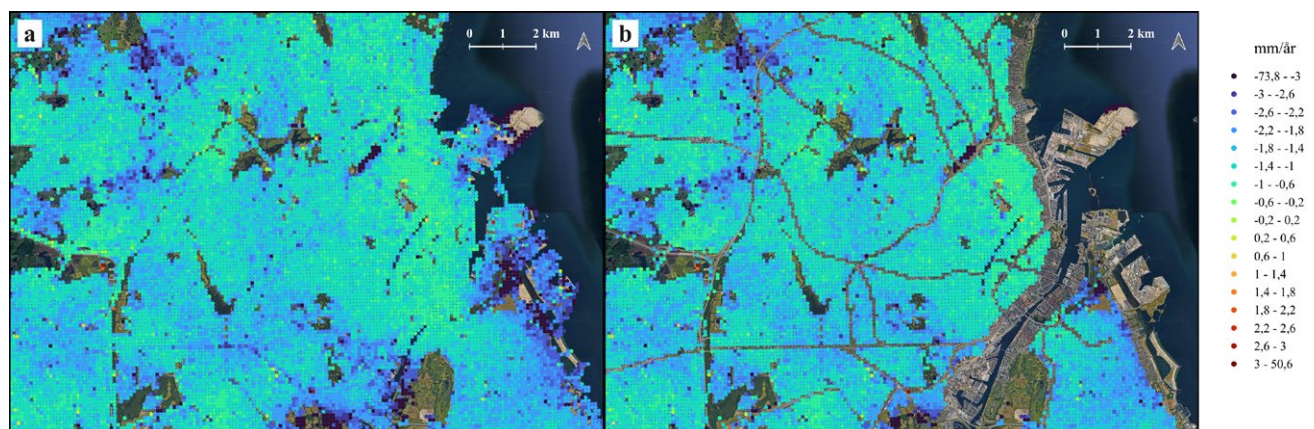


Fig. 3. Punktmålinger over København. a før og b efter fjernelse af punkter i EGMS-dataene (punkter der falder indenfor hhv. Jernbane (bufferstørrelse 50 m) og motorvej (40 m), samt kyster fjernet (500m)). Baggrundskort: ortofoto 2023.

Overstående metode fjerner de mest signifikante outliers i data, dog indeholder data stadigvæk outliers som fjernes ved funktionen *Sample Raster Values*, filter og IDW. Med *Sample Raster Values*, er *mean_velocity* (mm pr. år) celleværdier fra rasterlaget overført til et vektorlag der indeholder *mean_velocity* punktværdier. Filter funktionen frasorterer datapunkter fra vektorlaget hvis værdien afviger mere end 0,1 fra celleværdien fra rasterlaget. De resterende punkter er interpoleret med IDW. Processen gentages seks gange, hvor det nyeste producerede vektor- og rasterlag altid er anvendt. Herefter er enkelte punkter fjernet manuelt og processen er udført en syvende gang. Tabel over antallet af tilbageværende datapunkter, efter hvert trin i databehandlingen, findes i SM2. Det endelige IDW rasterlag er udglattet med *Simple Filter* (Smooth, radius 35). Herefter er konturlinjerne dannet ved funktionen *Contour*. Ækvidistancen er valgt til 0,2 mm pr. år. Se SM4 for detaljeret beskrivelse af arbejdsgangen.

Resultater

Mertz (1924) data

Ud af de 90 udvalgte repræsentative strandvolde kunne 24 strandvolde (27%) ikke genfindes i DHM, primært på grund af bebyggelse, infrastruktur eller havneudvidelse (f.eks. Aarhus; Fig. 4). Øvrige årsager dækker kysterosion (f.eks. Sjællands nordkyst), bortgravning (f.eks. Sjællands Odde), sparsomme lokalitetsbeskrivelserne i DGU's skrifter (f.eks. Sjællands Odde) eller en kombination af overstående. Verificeringen af de resterende 66 strandvolde viser at topkoten på 51 strandvolde (77%) afviger mindre end 0,5 m, hvorimod 15 strandvolde (23%) afviger mere end 0,5 m i forhold til de nye maksimale topkoter målt på DHM.

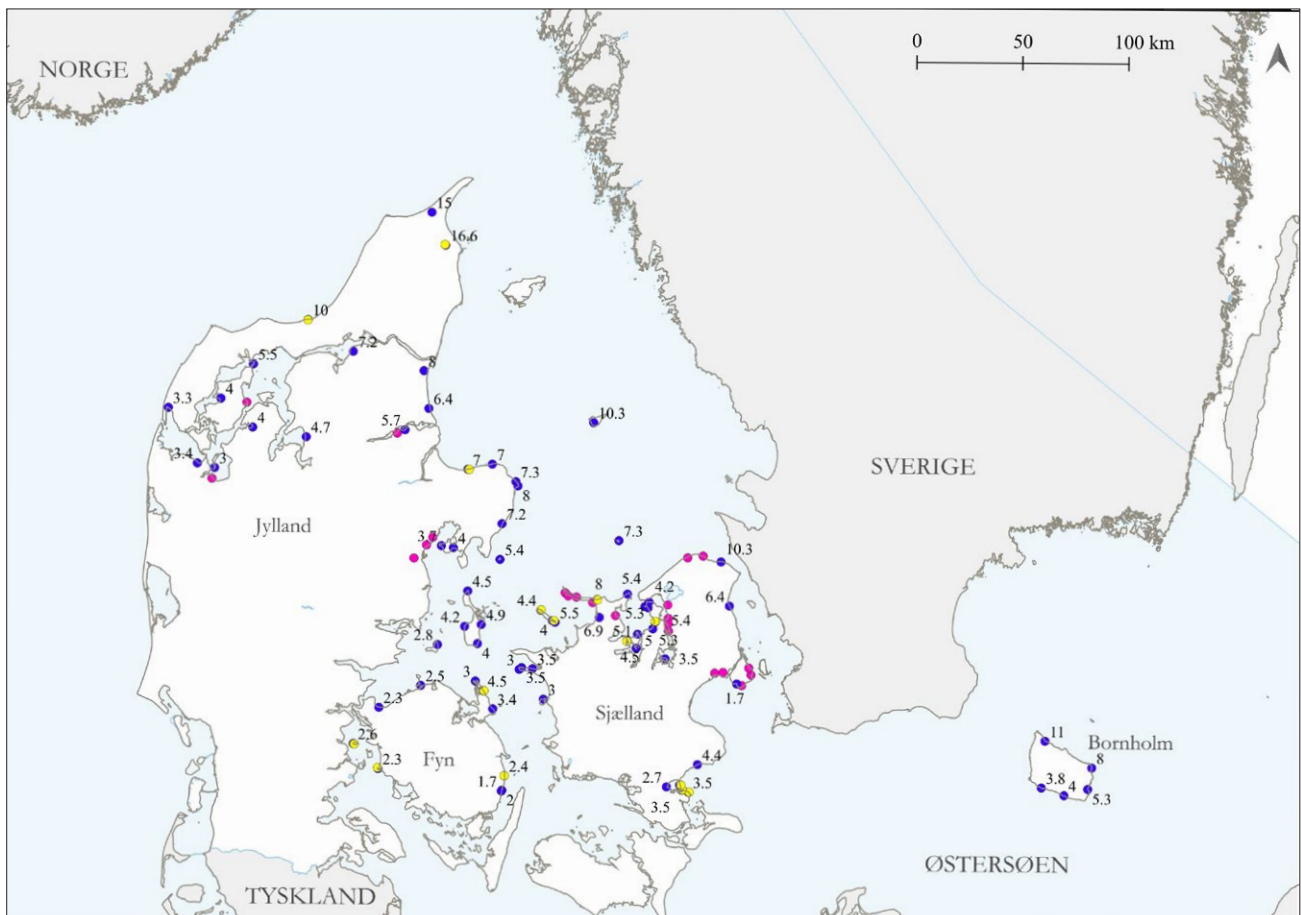


Fig. 4. De 90 undersøgte strandvolde. Strandvolde, hvis højde afviger mere end 0,5 m fra den angivne højde i Mertz (1924) (gul), strandvolde hvis højde afviger mindre end 0,5 m (blå), og strandvolde der ikke kan genfindes (ingen tildelt højdedata) (pink). Nye, maksimale højder er i meter over DVR90.

Ny model for landbevægelse baseret på EGMS data

Fig. 5a viser interpolationen af EGMS-datapunkter før fjernelse af outliers, mens Fig. 5b præsenterer den nye model for den glacio-isostatiske landbevægelse, efter fjernelse af outliers. Den nye model viser, at der foregår landhævning nord for en zone med 0 mm pr. år (herefter kaldet nul-linjen), der kan følges

fra Ringkøbing Fjord, til Horsens Fjord, over Sjælland igennem Kalundborg og Greve, og som ender i Østersøen (Fig. 6a). Syd for nul-linjen ses indsynkning. Landhævningen er størst i Skagen med 1,4 mm pr. år, mens indsynkningen er størst i Sønderjylland med 0,7 mm pr. år. Det Sydfynske Øhav og den sydlige del af Lolland og Falster oplever indsynkning på omkring 0,4 mm pr. år. Derudover viser resultaterne, at de medtagne polske og tyske områder generelt op-

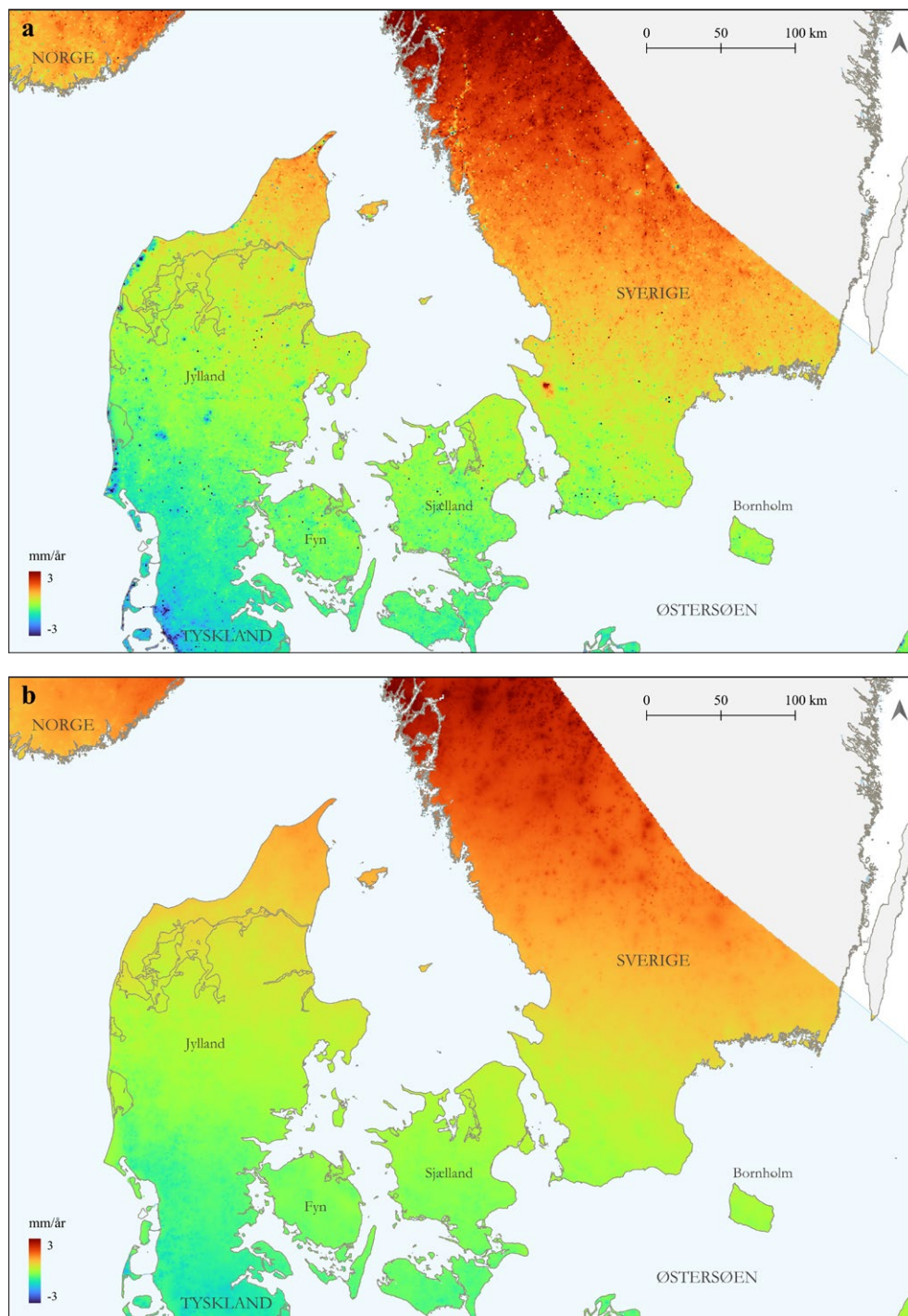


Fig. 5. Landbevægelsen i mm pr. år. **a:** Resultatet af interpolation af 4,6 mio. EGMS datapunkter, efter datamængde er reduceret. **b:** resultatet af interpolation af 530.200 EGMS-datapunkter, efter outliers er fjernet. Rumlig opløsning er 1 × 1 km.

lever indsynkning, mens Sverige og Norge generelt oplever landhævning. Resultaterne afslører, at landbevægelser er komplekse og at den glacio-isostatiske landbevægelse er forstyrret af mange lokale effekter og ekstreme observationer (her kaldet outliers), som også fundet af Calero *et al.* (2024).

Konturlinjer genereret ud fra EGMS-data (landbevægelse i mm pr. år; Fig. 6a) og isobaser fra Mertz (1924; relativ landbevægelse i meter siden sidste istid; Fig. 6b) viser en overvejende overensstemmelse, med større landhævning mod nord og gradvist aftager landhævning mod syd. Generelt har isobaserne retning NV-SØ og konturlinjerne VNV-ØSØ. Flere steder har isobaser og konturlinjer samme retning, f.eks. nord for København, hen over Fyn, i Vendsyssel og omkring Samsø. Dog er der flere større afvigelser mellem isobaserne og konturlinjerne. Isobase 0 m ligger generelt længere mod syd end konturlinje 0 mm pr. år. Afstanden mellem de to varierer, og på Sjælland observeres den største afstand til omkring 85 km. Det bør bemærkes, at konturlinjerne fra EGMS-data repræsenterer et øjebliksbillede af landhævningen i dag (2015–2021), hvorimod isobaserne fra Mertz (1924) repræsenterer det maksimale Littorina havniveau, som var næsten stationært i op til 2000 til 3000 år (Sander *et al.* 2016; Bennike *et al.* 2019) og derfor kan afspejle sjældne, ekstreme stormbegivenheder. De to datasæt forventes derfor ikke at være fuldstændig sammenlignelige (se SM5 for sammenligning).

Diskussion

Datagrundlaget i Mertz (1924)

Data til Mertz (1924)'s oversigt over landhævningen er primært indsamlet fra DGU's skrifter og består af mere end 100 år gamle målinger og observationer. Gennemgangen af kildematerialet afslører at Mertz – med få udtagelser – har inkluderet alle tilgængelige oplysninger om strandvoldene fra skrifterne. Mertz (1924) påpeger selv visse usikkerheder forbundet med de ældre data. For eksempel, at nogle målinger var angivet i fod, hvorved meter-angivelserne kan være noget afrundede, og derfor skal benyttet med en vis varsomhed da selv mindre lokale højdeforskelle kan forårsage store forskydninger i det overordnede billede (Mertz 1924). I DGU-skrifterne er beskrivelserne af strandvoldenes lokalitet ofte sparsomme og nogle gange misvisende. Det er derfor sandsynligt at Mertz har placeret enkelte punkter på kortet forkert (op til flere km), hvilket kan have påvirket isobasernes forløb. Derudover er det sandsynligt, at Mertz' metode har overvurderet det gennemsnitlige havniveau, da

flere af strandvoldene muligvis indikerer havniveauet under ekstreme stormbegivenheder, og ikke det gennemsnitlige havniveau på dannelsesstidspunktet. Vores tilgang giver ikke mulighed for at kvantificere denne usikkerhed, da vi ikke har de nødvendige data eller information til præcist at bestemme højden af denne faktor.

Mertz (1924) vurderer isobaserne til oversigten (Mertz 1924) ud fra den øverste tanglinje, som er angivet af Mertz til at variere fra 1 m i fjorde og vige til 3 m ved åbne kyster. For langt de fleste strandvolde er tanglinjens højde ikke angivet i oversigten, og Mertz understreger, at enkelt målte tanglinjer fra kildematerialet sandsynligvis ikke svarer til bølgeslagets højde, hvilket muligvis forklarer hvorfor nogle isobaser ikke bestemmes ud fra de enkelte anførte tanglinjer. De fleste af isobaserne i Mertz' studie er såkaldte 'formodede' isobaser, og er baseret på usikre observationer eller andre isobaser de steder, hvor der ikke ligger observationer til grund for isobasen. Der foreligger kun begrænset information om hvordan Mertz subjektivt udarbejdede isobasernes forløb, og der er derfor større uvisheder forbundet med tilblivelsen af disse.

Udvælgelse af punkter til kort

Tabellen i Mertz (1924) indeholder både kortlagte og ikke-kortlagte strandvolde. Der er ingen oplysninger vedrørende fordelingen, og der observeres ingen tydelig systematik i hvilke strandvolde, der er udvalgt til det endelige niveauforandringskort (Mertz 1924). Mertz bemærker dog, at isobaserne er bestemt ud fra 'sikre' observationer, og at de formodede isobaser (stiplede linjer) bl.a. er bestemt ud fra 'usikre' observationer. Der er ikke oplyst hvilke observationer, der klassificeres som 'sikre' eller 'usikre' eller hvilke kriterier der anvendes til vurderingen. Det virker i dag sandsynligt, at strandvolde udvalgt og markeret på Mertz' kort, er baseret på 'sikre' observationer, mens placeringen af de 'usikre' observationer er udeladt fra kortet. Processen bag Mertz' udvælgelsen af strandvolde der fremgår af kortet, samt vurdering af tanglinjernes højde og isobasernes forløb, kan ikke fastslås, da der ikke fremgår beskrivelser der forklarer de valg der er taget. Det ligger ligeledes uden for formålet med nærværende studie at undersøge, i hvor høj grad de observerede strandvolde afspejler gennemsnitlige havniveauer, da dette bl.a. kræver undersøgelser af lokale palæo-hydrografier.

Usikkerheder ved data og metode i ny model

Det er igennem databehandling af EGMS-data lykkedes at præsentere en landsdækkende model for den

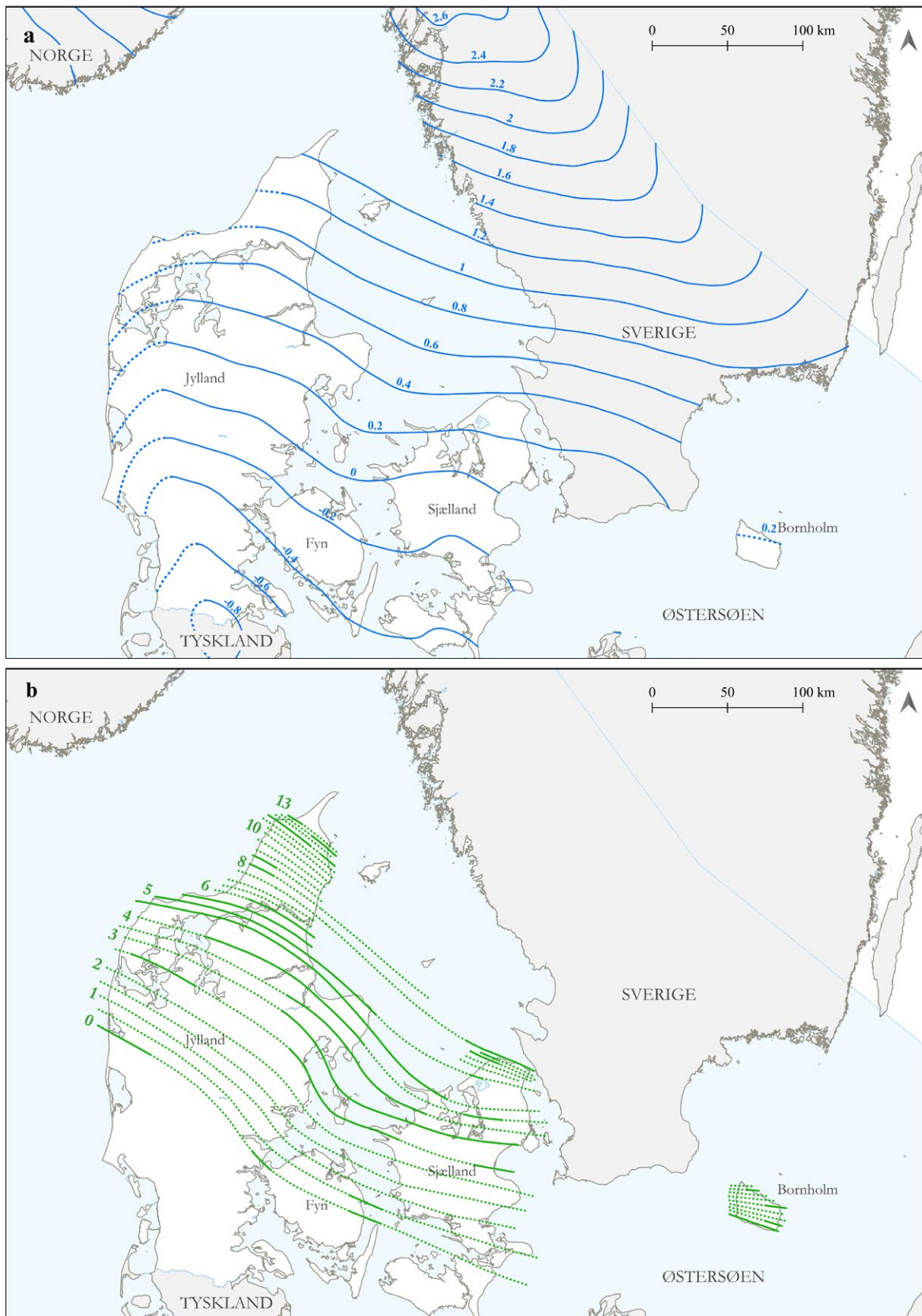


Fig. 6. a: Nutidige landbevægelser i Danmark hvor konturlinjer (blå) for den nutidige landbevægelse i mm pr. år er genereret ud fra interpolerede EGMS-data. Hvor den blå linje er stiplede, er der ingen eller et meget begrænset antal datapunkter til at interpolere isolinjen. Konturlinjerne er genereret ud fra radiusstørrelse 35 (se SM4 for yderligere forklaring). **b:** Mertz' 1924 isobaser (grøn) og formodede isobaser (stiplede grøn) for den relative landbevægelse, siden Littorinahavets maksimale udbredelse i meter over DNN. Ækvidistancen for konturlinjer er 0,2 mm pr. år, og for isobaser er den 0,5 m.

glacio-isostatisk landbevægelse. Efter databehandling af områder med kendte effekter som kyster, vej og byer, observeres der stadig ikke-regionale outliers i data. Dette kan for eksempel skyldes, at datapunkterne efter databehandling ikke er ligeligt fordelt. Konturlinjerne er derfor genereret ud fra en udglattet model, hvor radiussens størrelse bestemmer graden af udglatning. Flere radier blev afprøvet med det formål at generere en model, hvor konturlinjerne afspejler en overordnet trend for de vertikale landbevægelser (se SM6 for konturlinjer ud fra forskellige radier). Lokale forhold kan derfor ikke bedømmes ud fra konturlinjerne i Fig. 6a, som alene viser konturlinjernes forløb ved anvendelse af radiusstørrelse 35. Konturlinjerne, genereret ud fra modellen, følger ikke den forventede trend langs den jyske vestkyst. Her er der opstået et artefakt, da konturlinjerne 'knækker' og skifter retning ud mod Vesterhavet. Dette skyldes sandsynligvis manglende EMGS data. Ligeledes er der på Bornholm et begrænset antal datapunkter til interpolationen, hvilket medfører usikkerheder i modellen.

Den største indsynkning observeres i Sønderjylland og Nordtyskland, op til 0,7 mm pr. år. Dette støttes af observationer i dele af området af koter på arkæologiske fund af fortidsminder (Jessen 1926) og sedimenter (Szkornik *et al.* 2008), lige som andre studier tyder på deglaciation-indsynkning i undergrunden omkring Tønder Graben (Sandersen & Jørgensen 2014). Hvorvidt den her observerede høje indsynkningsrate i Sønderjylland og Nordtyskland alene skyldes glacio-isostatisk bevægelse bør dog undersøges nærmere. Effekter af sætninger i jordbunden forårsaget af 1900-tallets omfattende landvindinger og dræninger, kan også spille ind, da 0,5–2 cm/år sætninger i områdets udbredte lavbundslande (Hansen 1989b) påvirker InSAR data baseret på få års målinger mere end studier baseret på langtidsmåleserier som Knudsen *et al.* (2024), mens studier baseret på geologiske data som Vink *et al.* (2007) ikke påvirkes.

Hvorfor var Mertz' data brugbare i 100 år?

Mertz' arbejde var epokegørende da hun som den første præsenterede en landsdækkende analyse over niveauforskelle siden sidste istid – i en tid hvor tilgangen til kort og data var begrænset. Til trods for usikkerheder i hendes data og på trods af den mangelfulde beskrivelse af de anvendte kriterier og udvælgelsesmetoder, så giver vores verificering empirisk evidens for, at data fra Mertz (1924) forsat udgør en pålidelig kilde. Det må erkendes at Mertz' studie er et imponerende stykke arbejde. Selv kaldte hun beskedent blot studiet for "...sit livs dessert" (Sørensen 1989), men i næsten 100 år har dette studie dannet grundlag for mange efterfølgende studier (Larsen 1989; Christensen *et al.*

2008; Hansen *et al.* 2012). I dag bringer udviklingen af nye og mere avancerede metoder og teknologier os dog videre end hendes oprindelige arbejde tillod.

Vi har med god grund brugt Mertz' data i de sidste ca. 100 år, og senere studier som baserer sig på dette epokegørende studie, har haft pålidelige data og konklusioner. Mertz formåede med dette bidrag også at forme og berige et ellers mandsdomineret forskningsfelt (Skytt-Larsen *et al.* 2023) – i en tid hvor anerkendelse til kvindelige forskere ikke var en selvfølge, og hvor kvinders bidrag ofte enten gik tabt i historien eller blev tilskrevet mænd (Rossiter 1993; Rapoport 2002; Romano & Chiocci 2020). Ellen Louise Mertz var en kvindelig forsker, der trods disse udfordringer i sin tid opnåede anerkendelse, blandt andet ved modtagelsen af DTU's guldmedalje i 1974 (Vincent 2020).

I vores forsøg på at lave en model for den aktuelle glacio-isostatisk bevægelse, står vi over for samme udfordring som Mertz: få eller ingen datapunkter på den jyske vestkyst. Mertz kom med et kvalificeret gæt på isobasernes forløb, mens vi her har ladet dataene og interpolationen styre konturlinjerne, uden at integrere med andre datatyper. For at opnå en mere realistisk repræsentation af landhævningen, er det nødvendigt at indsamle flere datapunkter, f.eks. fra Nordsøen, der kan lede algoritmen de steder, hvor det går galt i ekstrapolationen, og hvor der er opstået artefakter. Modellen kan yderligere forbedres ved at afprøve forskellige interpolationsmetoder samt ved at øge præciseringen og detaljegraden af det interpolerede lag ved øget opløsning. Derudover kan fremtidigt arbejde inkludere kombination af forskellige modeller og data, som gjort af f.eks. Sørensen *et al.* (2016).

Bedre modeller for de regionale landbevægelser kan anvendes til at forstå hvorvidt flere lokalområder i og omkring de større danske kystbyer, i lighed med nye observationer fra Nordamerikas østkyst (Ohenhen *et al.* 2024), synker relativt i forhold til de regionale tendenser. Det bør bemærkes, at de frasorterede outliers i dette studie kan være værdifulde i lokale sammenhænge, og alene her er fravalgt for at beskrive de regionale tendenser i landbevægelsen.

Konklusion

Vi har her forsøgt at verificere 90 ud af 280 strandvolde fra Mertz (1924), hvoraf 66 (73%) kunne genfindes i Danmarks digitale højdemodel. Den rapporterede højde af disse 66 genfundne strandvolde fra Mertz (1924) afviger for 51 af dem (77%) mindre end 0,5 m fra nutidens digitale højdemodel. Mertz' data og den landsdækkende oversigt over niveauforskelle siden Littorinahavets maksimale udbredelse var altså ac-

ceptabel sammenlignet med moderne højdemodeller på både landsdækkende og regionalt niveau. Dog kunne vi ikke verificere Bornholm og det vestligste Jylland.

På grundlag af InSAR data fra EGMS er det lykkedes at fremstille en model for den glacio-isostatiske landbevægelse i mm pr. år i perioden 2015 til 2021. Modellen viser, i lighed med Mertz' resultater, at det danske område både oplever landhævning nord for en nutidig nul-linje fra Ringkøbing Fjord, Horsens fjord, over Sjælland igennem Kalundborg og Greve, og som ender i Østersøen. Dette moderne estimat af en nul-linje ligger længere mod nord end Mertz' nul-linje, der alene var baseret på maksimum højder af Littorinahavets strandvolde, men nul-linjerne har stort set samme orientering. Landhævningen vi finder i dag, er størst i Skagen (1,4 mm pr. år), mens indsynkningen er størst i Sønderjylland (0,7 mm pr. år).

Med EGMS-data er det lykkedes at præsentere en landsdækkende model for den glacio-isostatiske landbevægelse, men også at identificere en række uoverensstemmelser med eksisterende modeller og nuværende forståelser for landskabers udvikling. Nærværende studie bør derfor således alene ses som et indledende forsøg på at belyse muligheder og begrænsninger i EMGS-dataene.

Tak

Der skal rettes stor tak til tidsskriftets fagfællebedømmere Mikkel Fruergaard og Carlo Sørensen, for konstruktive kommentarer og forslag til forbedringer af en tidligere version af manuskriptet. Anders Damsgaards bidrag til artiklen er støttet af Geo (GUU-90210.10).

Open access til GIS data

Det interpolerede lag med vertikal landbevægelse for Danmark, vist i Fig. 6a, kan downloades fra DOI: 10.5281/zenodo.13734354

Referencer

- Avnstrøm, P. 1989: Fru Mertz og DSB. I: Bahnson, H., & Kærgaard Frederiksen, J. (red.): Ellen Louise Mertz 20.7.1896 – 29.12.1987. Danmarks Geologiske Undersøgelse.
- Bahnson, H. & Frederiksen, J. K (red.) 1989: Ellen Louise Mertz 20.7.1896 – 29.12.1987. Danmarks Geologiske Undersøgelse.
- Bennike, O., Nørgaard-Pedersen, N., Jensen, J.B. Andresen, K.J. & Seidenkrantz, M.-S. 2019: Development of the western Limfjord, Denmark, after the last deglaciation: a review with new data. *Bulletin of the Geological Society of Denmark* 67, 53–73.
- Calero, J. S., Vöge, M., Martins, J. E., Raucoules, D., de Michelle, M., Vradi, A. & Vecchiotti, F. 2024: EGMS Validation Report 2018–2022 update. Version 2.0, Copernicus Land Monitoring Service. European Environment Agency's (EEA). <https://land.copernicus.eu/en/technical-library/validation-report-2018-2022-dataset/@@download/file>
- Christensen, C. & Nielsen, A. 2008: Dating Littorina sea shore levels in Denmark on the basis of data from a mesolithic coastal settlement on Skagens Odde, Northern Jutland. *Polish Geological Institute Special Papers* 23, 27–38. <https://www.pgi.gov.pl/en/dokumenty-przegladarka/publikacje-2/special-papers/23/1552-sp23-christensen/file.html>
- Colgan, W., Box, J.E., Ribeiro, S. & Kjeldsen, K.K. 2019: Sea-level rise in Denmark: Bridging local reconstructions and global projections. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin* 43, e2019430101. <https://doi.org/10.34194/GEUSB-201943-01-01>
- Costantini, M., Minati, F., Trillo, F., Ferretti, A., Novali, F., Passera, E., Dehls, J., Larsen, Y., Marinkovic, P., Eineder, M., Brcic, R., Siegmund, R., Kotzerke, P., Probeck, M., Kenyeres, A., Proietti, S., Solari, L. & Andersen, H. 2021: European ground motion service (EGMS) IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, Brussels, Belgium, 2021, 3293–3296. <https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9553562>
- EGMS 2024: European Ground Motion Service – Technical Summary. <https://land.copernicus.eu/en/products/european-ground-motion-service>
- Geo 2023: GeoAtlas live manual, Version 3.1 (GUI), revisionsdato 2023-10-12. https://wgn.geo.dk/geodata/geoatlaslive_manual.pdf
- Hansen, B. 1989a: Ellen Louise Mertz in memoriam. I: Bahnson, H., & Kærgaard Frederiksen, J. (red.): Ellen Louise Mertz 20.7.1896 – 29.12.1987. Danmarks Geologiske Undersøgelse
- Hansen, B. 1989b: Sætning efter afvanding og drænsystemers funktionstid på organogen jord. Hedeselskabets Forskningsvirksomhed Beretning 42, 62 s. Viborg.
- Hansen, J.M., Aagaard, T. & Binderup, M. 2012: Absolute sea levels and isostatic changes of the eastern North Sea to central Baltic region during the last 900 years. *Boreas* 41, 180–208. https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2011.00229.xopen_in_new
- Jackson, S.P., Svennevig, K. & Kjeldsen, K.K. 2024: A new digital database of Ellen Louise Mertz's 1924 'Overview of late- and postglacial elevation changes in Denmark'. *GEUS Bulletin* 57, 8339. <https://doi/10.34194/geusb.v57.8339>
- Jessen, A. 1897: Kortbladende Læsø og Anholt. Danmarks Geologiske Undersøgelse I. Række, nr. 4, 48 s. <https://doi.org/10.34194/raekke2.v35.6821>
- Jessen, A. 1916: Marsken ved Ribe. Danmarks geologiske Undersøgelse II. Række, nr. 27, 66 s. <https://doi.org/10.34194/raekke2.v27.6812>

- Jessen, A. 1907: Kortbladet Skamlingsbanke. Danmarks Geologiske Undersøgelse I. Række, nr. 12, 99 s. <https://geusjournals.org/index.php/raekke1/issue/view/636>
- Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet 2005: Vejledning om højdesystemet. Retsinformationen VEJ nr 2 af 10/01/2005. Klima-, Energi, Forsyningen. <https://www.retsinformation.dk/eli/mt/2005/2>
- Knudsen, P., Engsager, K. & Khan, S.A. 2024: The DKup24 uplift model for Denmark.. Technical University of Denmark. Dataset. <https://doi.org/10.11583/DTU.27277848.v1>
- Kristiansen, S.M., Ljungberg, T., Christiansen, T.T., Dalsgaard, K., Haue, N., Greve, M.H. & Nielsen, B.H. 2020: Meadow, marsh and lagoon: consequences of Late Holocene coastal changes on human-environment interactions in northern Denmark. *Boreas* 50, 279–293. doi.org/10.1111/bor.12487
- Larsen, G. 1989: Om fru Mertz's betydnung for geologien. I: Bahnson, H., & Kærgaard Frederiksen, J. (red.): *Ellen Louise Mertz 20.7.1896 – 29.12.1987*. Danmarks Geologiske Undersøgelse
- Lundgren, H. 1989: Ellen Louise Mertz og ingeniørgeologien. I: Bahnson, H., & Kærgaard Frederiksen, J. (red.): *Ellen Louise Mertz 20.7.1896 – 29.12.1987*. Danmarks Geologiske Undersøgelse
- Madsen, V. 1900: Kortbladet Bogense. Danmarks Geologiske Undersøgelse I. Række, nr. 7, 112 s. <https://doi.org/10.34194/raekke1.v7.6760>
- Madsen, V. 1902a: Kortbladet Nyborg. Danmarks Geologiske Undersøgelse I. Række, nr. 9, 182 s. <https://doi.org/10.34194/raekke1.v9.6762>
- Madsen, V. 1902b: Kortbladet Samsø. Danmarks Geologiske Undersøgelse I. Række, nr. 5, 87 s. <https://geusjournals.org/index.php/raekke1/issue/view/629>
- Mertz, E.L. 1924: Oversigt over de sen- og postglaciale niveauforandringer i Danmark. Danmarks Geologiske Undersøgelse II. Række, 41, 49 s. <https://doi.org/10.34194/raekke2.v41.6827>
- Milne, G.A., Mitrovica, J.X., Scherneck, H.-G., Davis, J.L., Johansson, J.M., Koivula, H. & Vermeer, M. 2004: Continuous GPS measurements of postglacial adjustment in Fennoscandia: 2. Modeling results. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B2), 1–19. <https://doi.org/10.1029/2003jb002619>
- Milthers, V. 1922: Nordøstsjællands Geologi, første udgave. Danmarks Geologiske Undersøgelse V. Række, nr. 3, 192 s.
- Milthers, V. 1908: Kortbladene Faxø og Stevns Klint. Danmarks Geologiske Undersøgelse I. Række, nr. 11, 291 s. <https://doi.org/10.34194/raekke1.v11.6764>
- Mulkal, M. & Wandl, R. 2019: Inverse distance weight spatial interpolation for topographic surface 3D modelling. *TECHSI - Jurnal Teknik Informatika* 11, 385. <https://doi.org/10.29103/techsi.v11i3.1934>
- Møller, P.G. 2021: Brugen af historiske kort i landskabshistorie og landbrugshistorie. *Geoforum perspektiv* 20, 1–16. <https://doi.org/10.5278/ojs.perspektiv.v20i38.6591>
- Nissen, M., Larsen, G.L., Eggers, O., Klitgaard, A.B. & Pedersen, L. T. 2021: Danske anvendelser af Copernicus. 50 Anvendelser af jordobservationer fra satellitter. SDFE. <https://sdfe.dk/media/2920240/danske-anvendelser-af-copernicus.pdf>
- Ohenhen, L.O., Shirzaei, M., Ojha, O., Sherpa, S.H. & Nicholls, R.J. 2024: Disappearing cities on US coasts. *Nature* 627, 8002, 108–115. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07038-3>
- Otvos, E.G. 2000: Beach ridges – definitions and significance. *Geomorphology* 32, 83–108.
- Rapoport, S. 2002: Rosalind Franklin: Unsung hero of the DNA revolution. *The History Teacher*, 36, 116–127. <https://doi.org/10.2307/1512499>
- Romano, M. & Chiocci, F.L. 2020: Celebrating Marie Tharp. *Science* 370, 1415–1416. [doi:10.1126/science.abe7084](https://doi.org/10.1126/science.abe7084)
- Rossiter, M. W. 1993: The Matthew Matilda effect in science. *Social Studies of Science* 23, 325–341.
- Rørdam, K. 1892: Saltvandsalluviet det nordøstlige Sjælland. Danmarks Geologiske Undersøgelse II. Række, nr. 2, 151 s. <https://geusjournals.org/index.php/raekke2/issue/view/655>
- Rørdam, K. 1899: Kortbladene Kjøbenhavn og Roskilde. Danmarks Geologiske Undersøgelse I. Række, nr. 6, 107 s. <https://geusjournals.org/index.php/raekke2/issue/view/659>
- Rørdam, K. & Milthers, V. 1900: Kortbladene Sejro, Nykjøbing, Kalundborg og Holbæk. Danmarks Geologiske Undersøgelse I. Række, nr. 8, 143 s. <https://geusjournals.org/index.php/raekke1/issue/view/632>
- Sander, L., Hede, M.U., Fruergaard, M., Nielsen L., Clemmensen, L.B. Kroon, A., Johannessen, P.N., Nielsen, L.H. & Pejrup, M. 2016: Coastal lagoons and beach ridges as complementary sedimentary archives for the reconstruction of Holocene relative sea-level changes. *Terra Nova* 28, 43–49. DOI: 10.1111/ter.12187
- SDFE 2020: Introduktion til kortlægning af landbevaegelser fra satellit. Landbevægelse fra satellit. Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering.
- Sørensen, C., Broge, N. H., Molgaard, M. R., Schow, C. S., Thomsen, P., Vogensen, K., & Knudsen, P. 2016: Assessing future flood hazards for adaptation planning in a northern European coastal community. *Frontiers in Marine Science* 3, 181753. <https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00069>
- Sørensen, J.L. 1989: Ellen Louise Mertz og DGI. I: Bahnson, H., & Kærgaard Frederiksen, J. (red.): *Ellen Louise Mertz 20.7.1896 – 29.12.1987*. Danmarks Geologiske Undersøgelse.
- Steffen, H. & Kaufmann, G. 2005: Glacial isostatic adjustment of Scandinavia and northwestern Europe and the radial viscosity structure of the Earth's mantle. *Geophysical Journal International* 163, 801–812. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02740.x>
- Stott, D., Kristiansen, S.M., & Sindbæk, S.M. 2019: Searching for Viking Age fortresses with automatic landscape classification and feature detection. *Remote Sensing* 11, 1881. <https://doi.org/10.3390/rs11161881>
- Szkornik, K., Gehrels W.R. & Murray, A.S. 2007: Aeolian sand movement and relative sea-level rise in Ho Bugt, western Denmark, during the 'Little Ice Age'. *The Holocene* 18, 951–965

- Vincent, A. 2020: Reclaiming the memory of pioneer female geologists 1800–1929, *Advances in Geoscience*, 53, 129–154. <https://doi.org/10.5194/adgeo-53-129-2020>
- Vink, A., Steffen, H., Reinhardt, L. & Kaufmann, G. 2007: Holocene relative sea-level change, isostatic subsidence and the radial viscosity structure of the mantle of northwest Europe (Belgium, the Netherlands, Germany, southern North Sea). *Quaternary Science Reviews* 26, 3249–3275.
- Vognsen, K., Sonne, I. B., Broge, N. H., Knudsen, P. & Sørensen, C.S. 2013: Metode til fremskrivning af oversvømmelsesomfang ved stormflod. Danish Geodata Agency, Technical Report Series 16. https://sdfi.dk/media/7020/gst_technical_report_16.pdf