Forkastninger i lagserien

Hvilken betydning har de, hvordan kortlægger vi dem, og hvordan tackler vi dem i den efterfølgende modellering?

Peter B. E. Sandersen

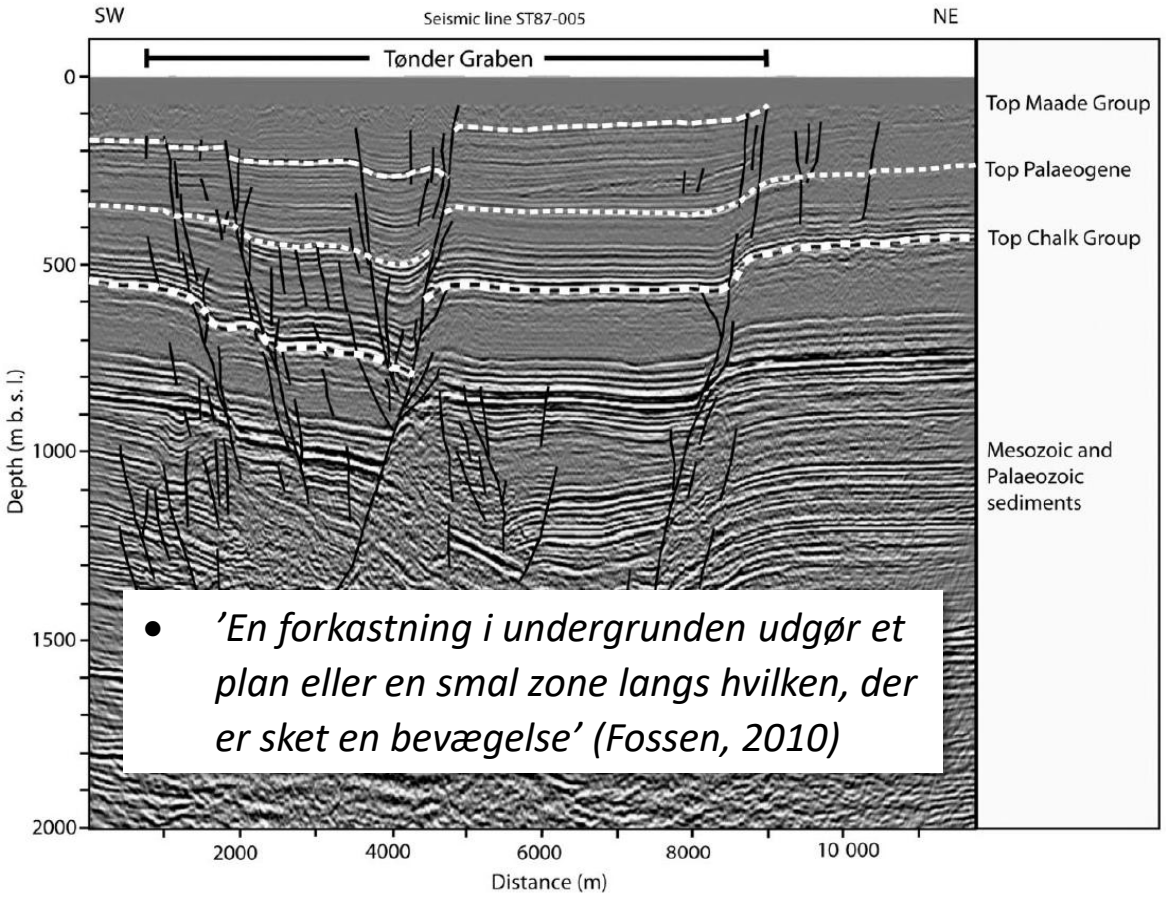
Seniorforsker

Vingsted 2026 – ‘Ny viden og værktøjer i den geologiske værktøjskasse’

G E U S

Indflyvning

- Vores viden om undergrunden øges:
  - mere kortlægning
  - nye og bedre kortlægningsmetoder
- Flere og flere forkastninger i lagseriens overfladenære dele
- Tegn på sammenhæng med dybe forkastninger
- Vores viden om forkastninger stadigvæk begrænset
- Hvis vores fælles vidensgrundlag øges, vil det være gavnligt
- Men hvorfor egentlig det?



- *'En forkastning i undergrunden udgør et plan eller en smal zone langs hvilken, der er sket en bevægelse' (Fossen, 2010)*

Sandersen & Jørgensen (2015)

Hvorfor er viden om forkastninger vigtig?

Geologisk forståelse

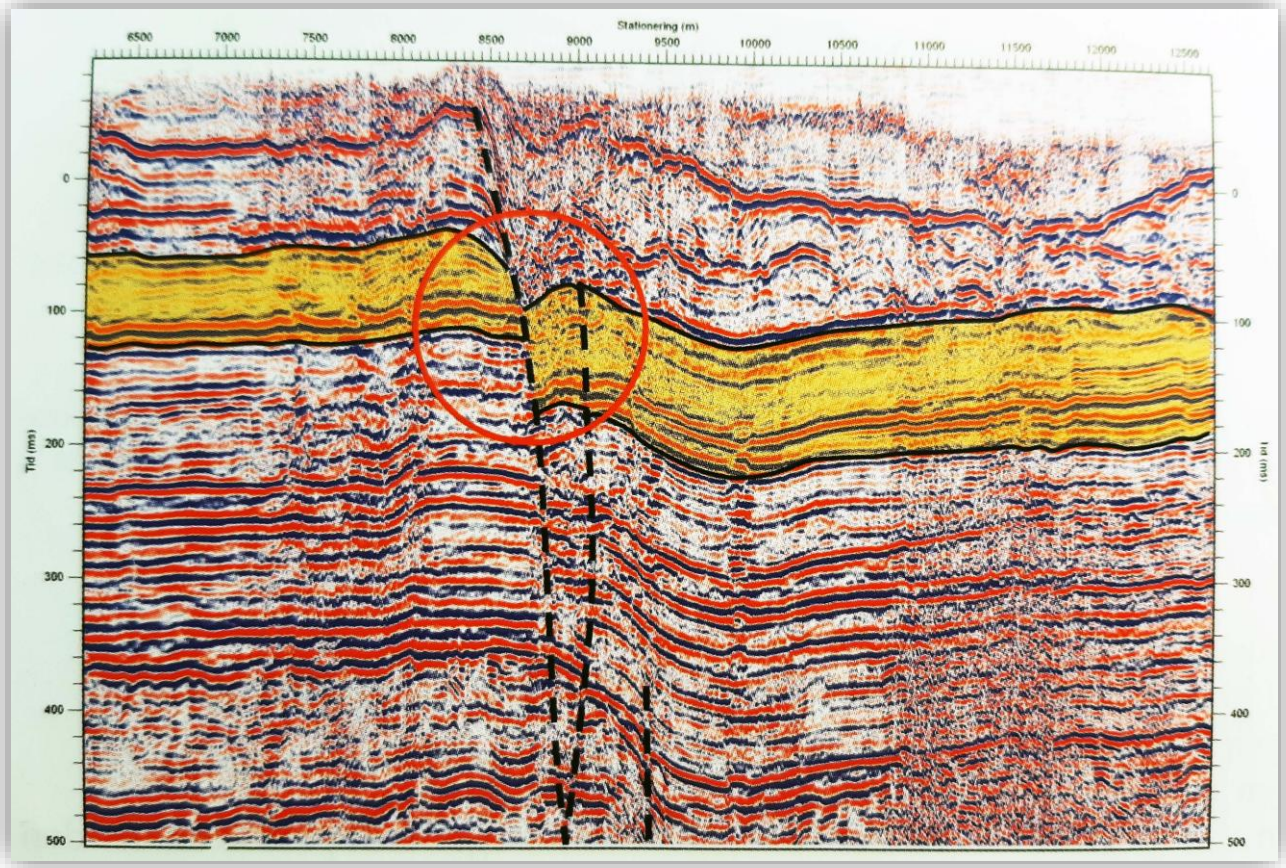
- Strukturelle forhold
- Lagudbredelser
- Indflydelse på erosion og aflejring

Grundvandsindvinding/forureningsspredning

- Magasinudbredelse
- Ændrede hydrauliske egenskaber
- Transportveje (grundvandsstrømning; forureningsspredning)
- Sårbarhed

Større sammenhænge?

- Er der et link til dybe forkastninger?
- Ikke kun en lokal forekomst?



Olsen et al. (2004)

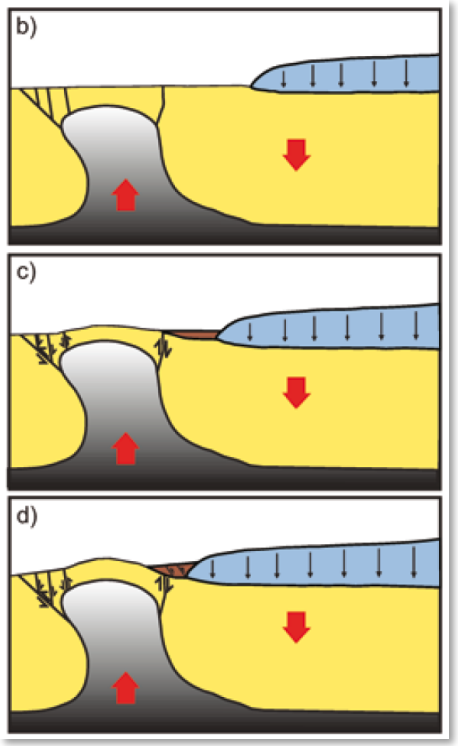
Seismisk profil fra Sørvad

En forkastning på ca. 60 m gennemskærer Bastrupsandet (gult) i den markerede cirkel og skaber en magasinafsnøring

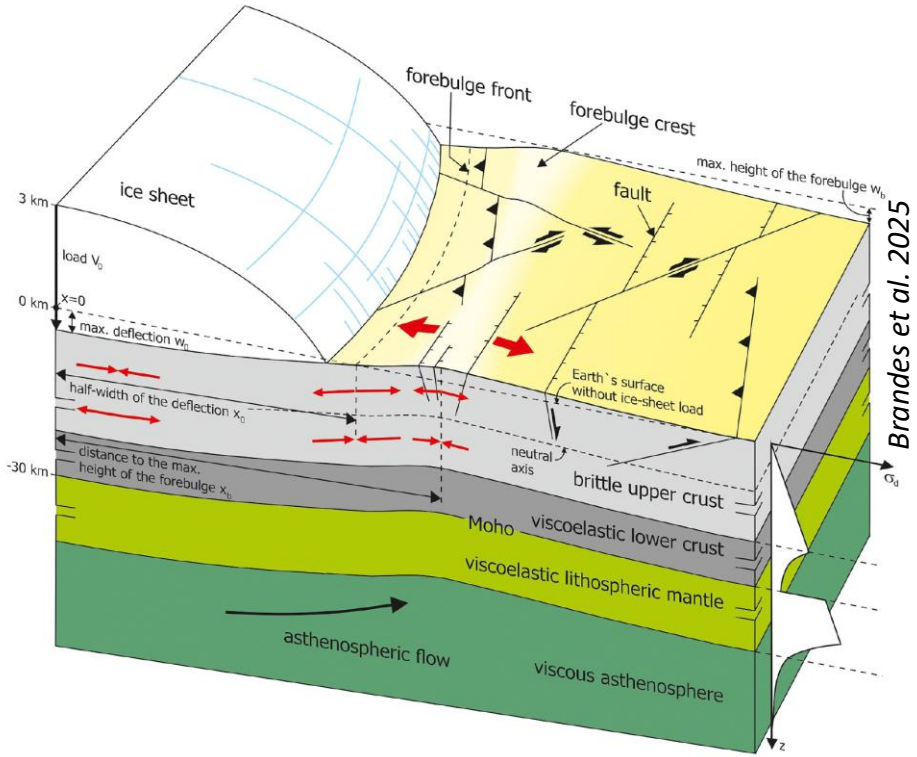
Årsager til forkastninger i undergrunden

1) Pladetektoniske bevægelser
2) Bevægelser i og omkring saltstrukturer
3) Sedimentation/erosion (be-/aflastning)
4) Glacialtektonik
5) Glacialt induceret reaktivering af forkastninger (be-/aflastning fra isen)

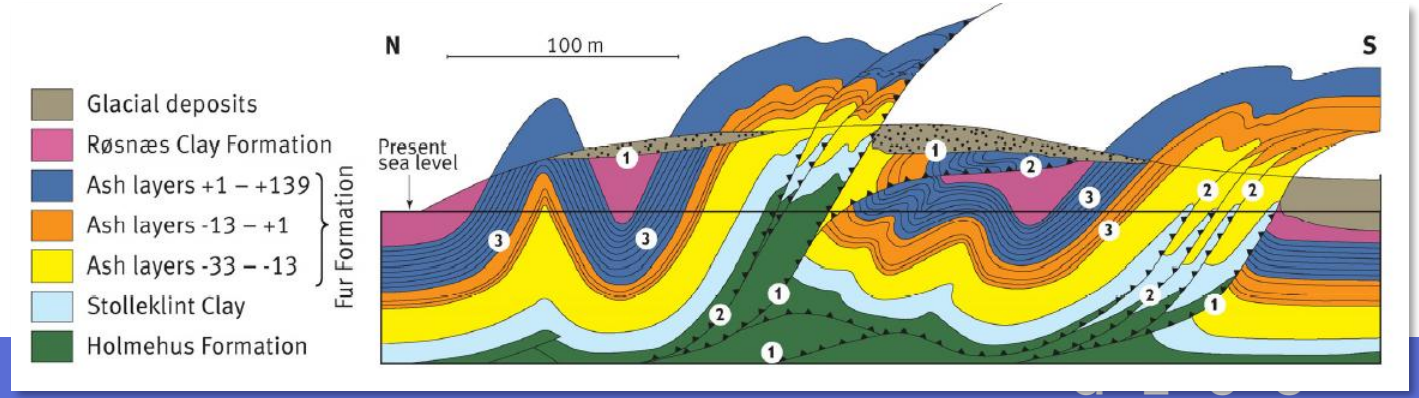
- Andre årsager til forkastningsaktivitet:
  - Kompaktion/swelling af sedimenter
  - Jordskred
  - Råstofindvinding
  - Grundvandsindvinding/grundvands-sænkning
  - Opløsning af lag (kalk, salt)
  - Oppumpning af olie/gas
  - Væskeinjektion i boringer
  - Intrusioner, vulkanisme….
  - osv….



Sirocko et al. (2008)



Brandes et al. 2025



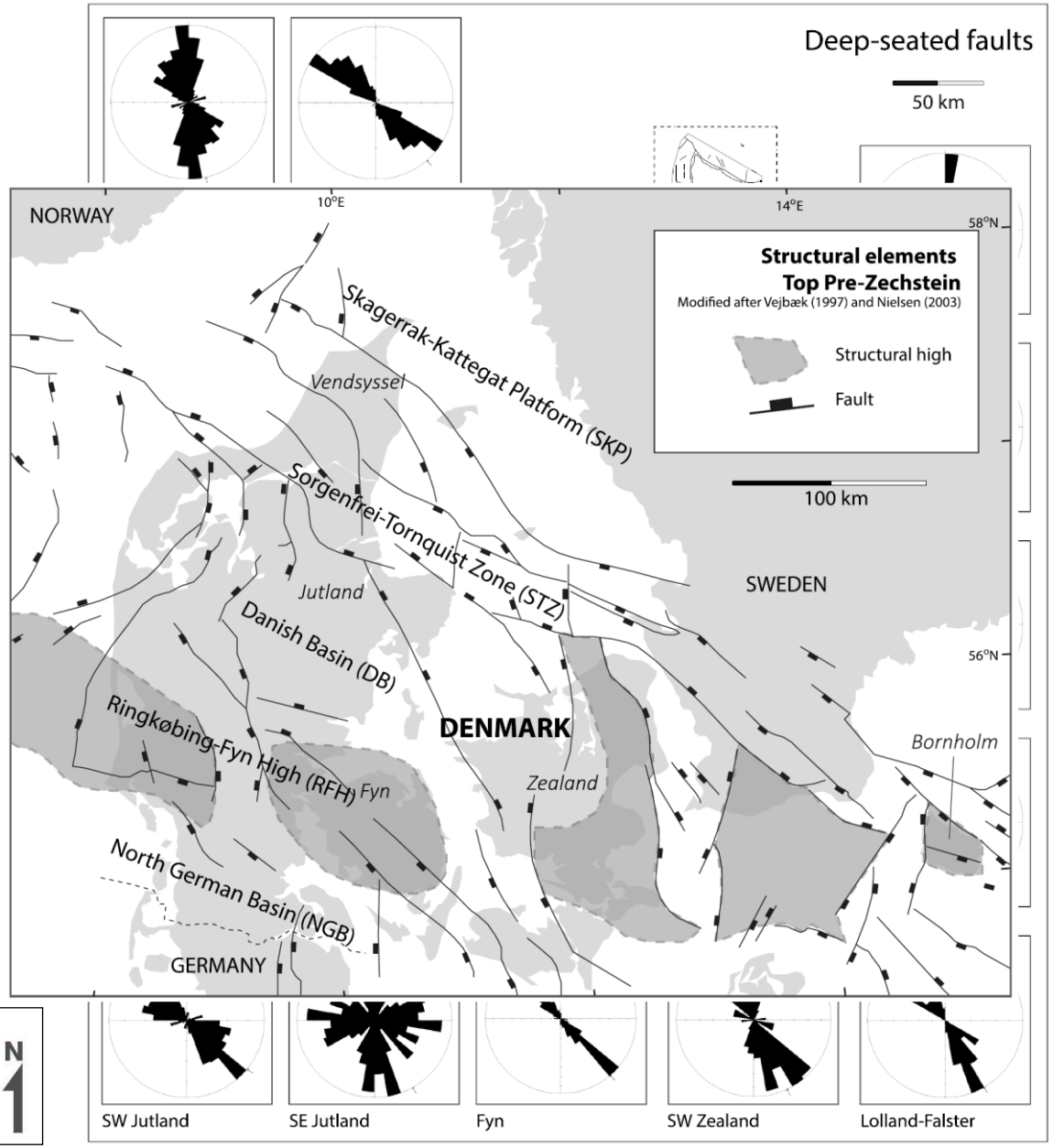
Pedersen (2014)

Eksisterende kortlægninger af forkastninger

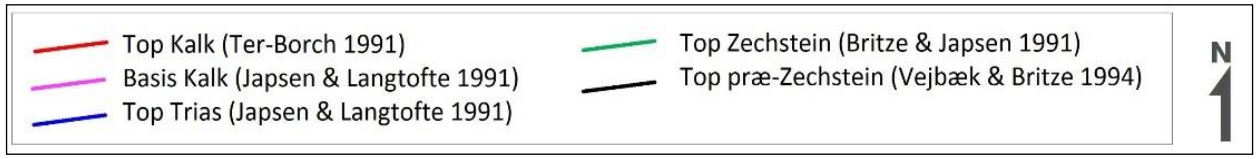
- Dybe forkastninger fra olie- og gasefterforskning
- Seismik og boringer
- Kort i 1:500.000-1:750.000

- Pladetektonik, saltbevægelser mv. i flere millioner år
- De strukturelle rammer for den danske undergrund

- Få kortlægninger af overfladenære forkastninger



Sandersen & Jørgensen (2022)



Hvilke forkastninger er vigtige at kortlægge?

- Alle?
- Men der er grænser for, hvad vi kan opløse
- De dybe forkastninger har typisk været aktive i millioner af år og har store offsets
- De overfladenære forkastninger er unge og har ofte kun offsets på få meter eller mindre

- Alle forkastninger, der kan øge den geologiske forståelse er vigtige – uanset om de ikke umiddelbart kan sættes ind i en større sammenhæng

Små-skala forkastninger ved Nr. Lyngby (højde af billede c. 25 cm)

Hvordan kortlægges de overfladenære forkastninger?

Hvilke data har vi typisk til rådighed?

- Boringer (Jupiterdatabasen)
- Geofysiske undersøgelser (Gerda)
- LiDAR-baserede højdemodeller
- Råstofgrave/kystklinter
- Hydrologiske data (pejlinger, kloridanalyser, prøvepumpninger etc.)

Hvordan skal forkastningen kunne ses?

- Tydeligt forsætte hele/dele af en kendt lagserie
- Offset skal kunne anslås ud fra data
- Forkastningen skal have en orientering i planet (strygning) og kunne tegnes som en streg på et kort

Hvordan kan forkastningen karakteriseres?

- Forkastningsplan/et sæt af forkastninger/en zone/en fleksur
- Dimensioner (længde, min/max dybde, offset)
- Orientering

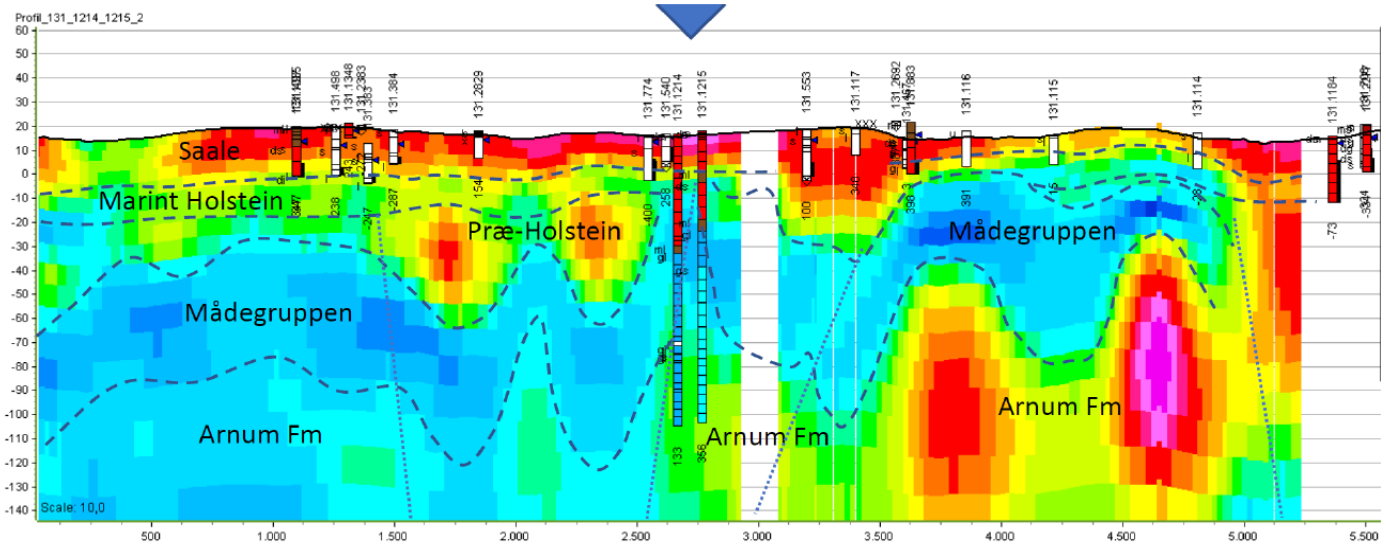
Steffen et al. (2021)

Maze-forkastningen i Lapland (revers forkastning; 9 m offset; længde 42 km) – aktiv så sent som for 330 til 500 år siden.

Kortlægning af forkastninger er ikke nødvendigvis let!

Udfordringer – Kortlægning af forkastninger

- **Boringer**
  - Kræver gode beskrivelser
  - Kræver pålidelige laggrænser i en velbeskrevet lagserie
- **Geofysik**
  - Resistivitetskontraster (EM/DC-metoder)
  - Offset skal være stor nok (EM/DC, seismik)
  - Variationer i opløsning med dybden



Sandersen et al. (2025)

- **Højdemodeller:**
  - Deformationer af terrænet udviskes med tiden
  - Deformationer ses bedst på unge flader – f.eks. sen- og postglaciale marine flader og hedesletter
  - Forkastninger og overskydninger i glacialtektonik ses bedst i unge glaciale landskaber

- **Råstofgrave/klinter:** Få af dem

Udfordringer – Tolkning/modellering

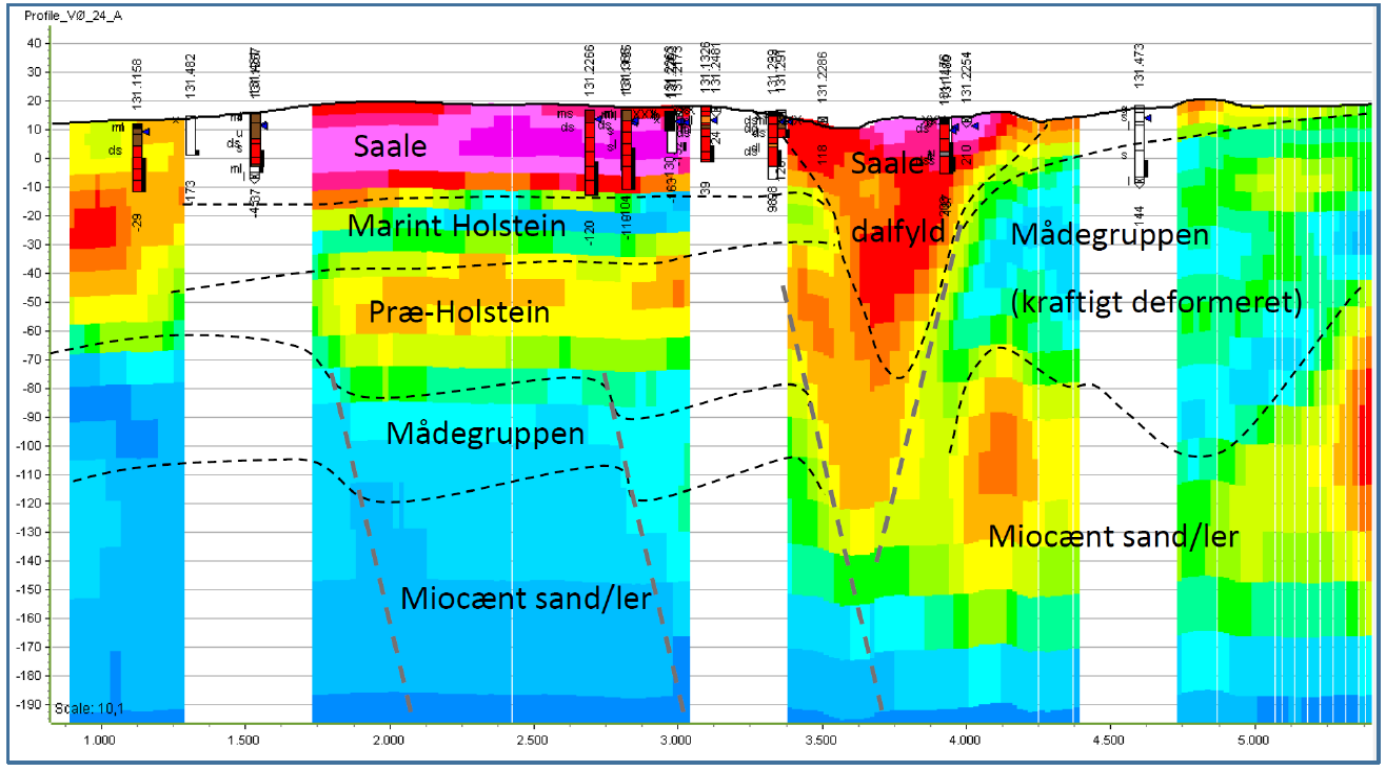
Tolkning

- Forkastning eller noget andet?
- Konsekvenser for den konceptuelle geologiske forståelse
- Er forkastningen en del af 'noget større'?
- Betydning for hændelseskronologien
- Tektonisk model/Arbejdshypotese

Modellering

- Har vi viden nok?
- Kan værktøjerne håndtere forkastninger?
- Afgrænsninger i voxelmodeller
- Fleksurer i lagmodeller

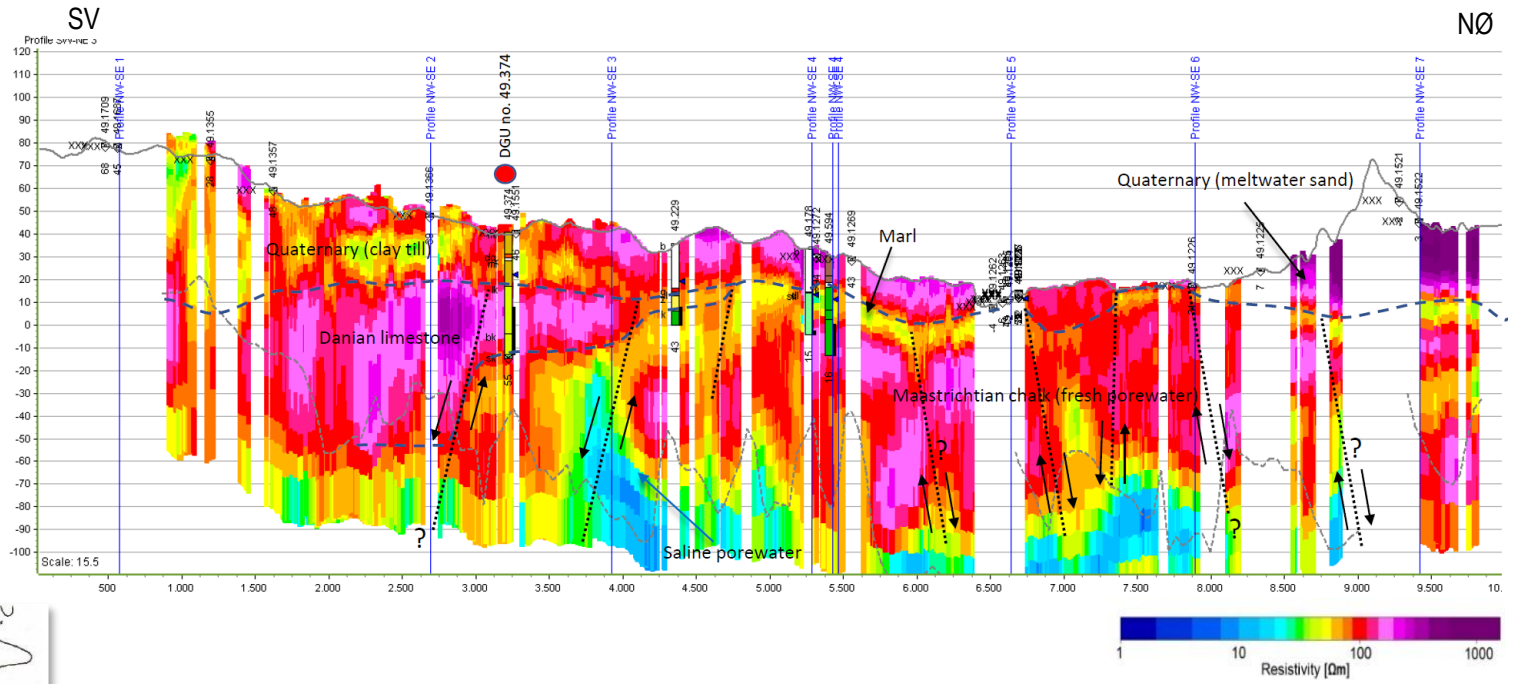
Kortlægningseksempler

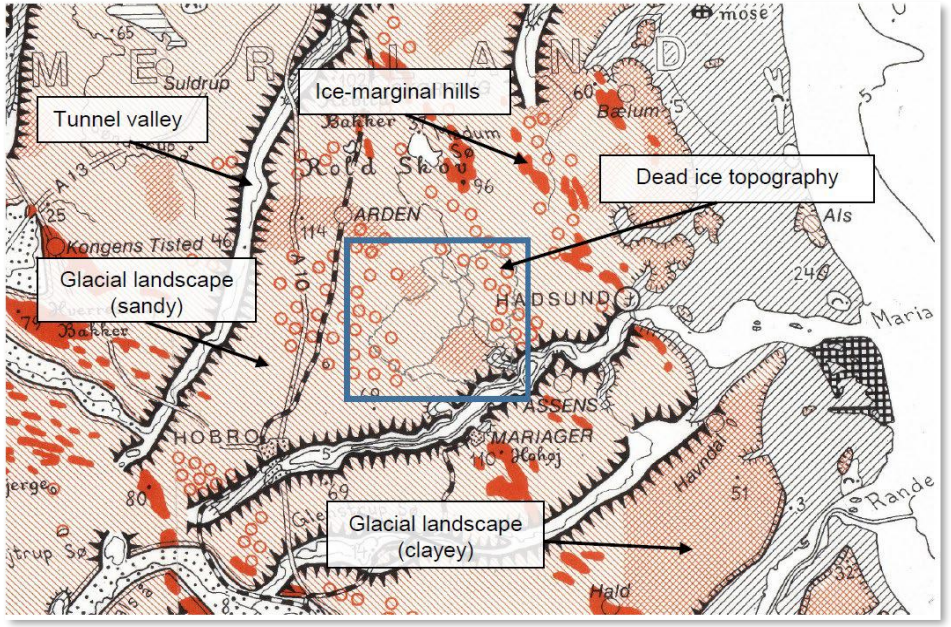


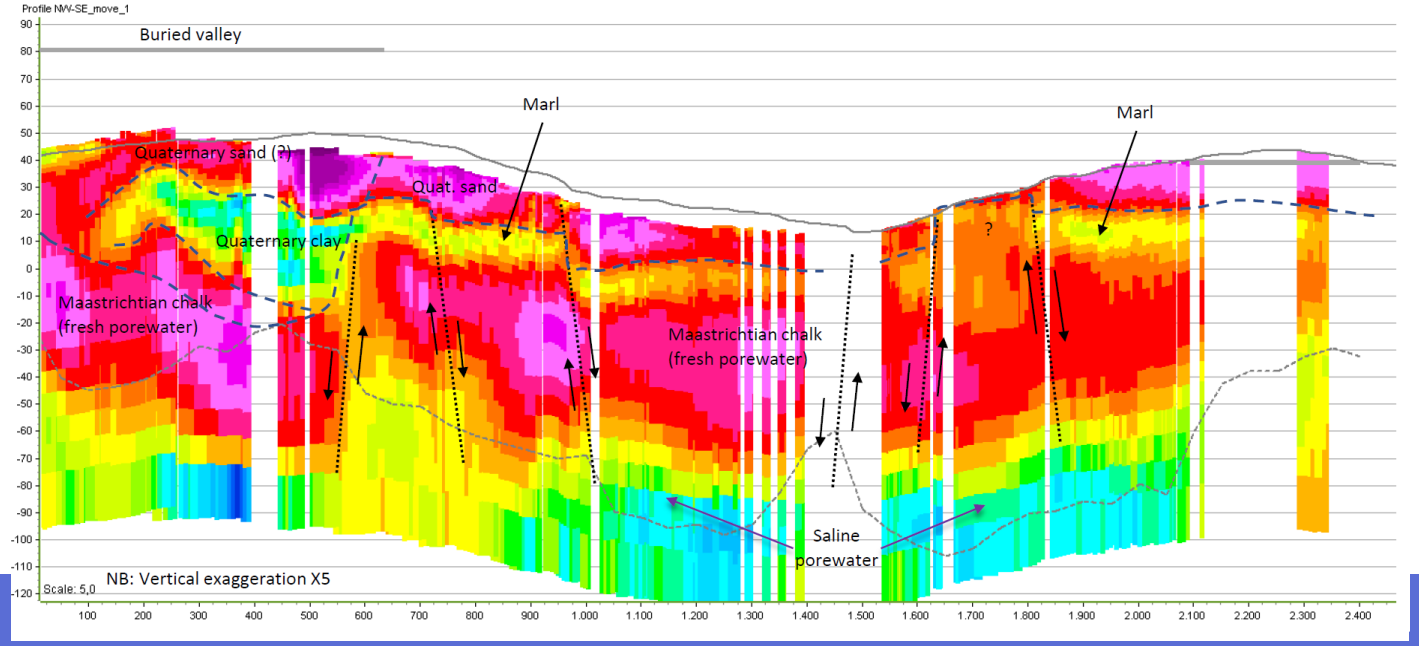
Sandersen et al. (2025)

Villestrup

- tTEM kortlægning
- Danienkalk over Skrivekridt
- Begrænsede kontraster
- Mergellag og salt porevand
- Forkastninger i prækvartæret (STZ)
- Separate blokke/Magasinopdeling



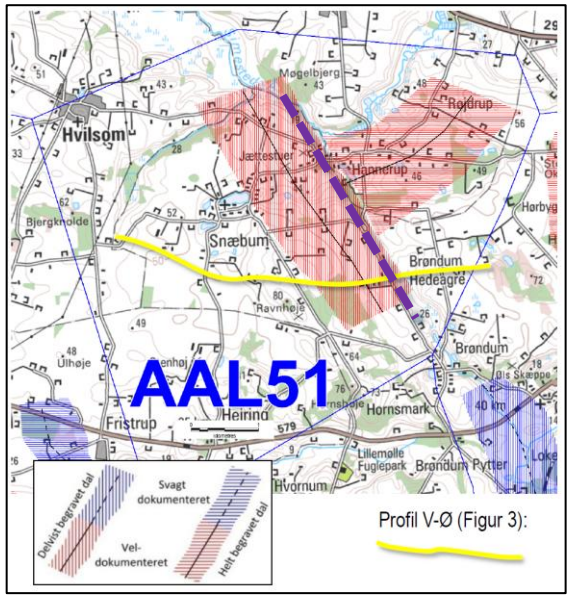


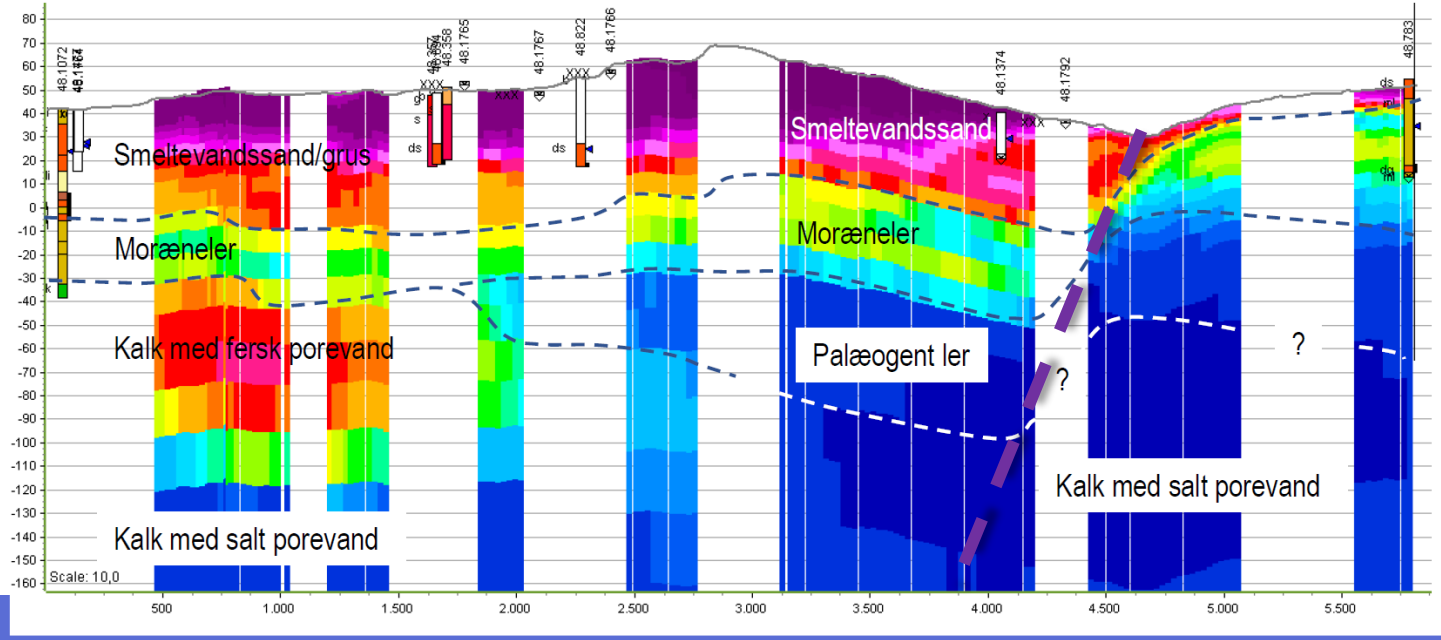


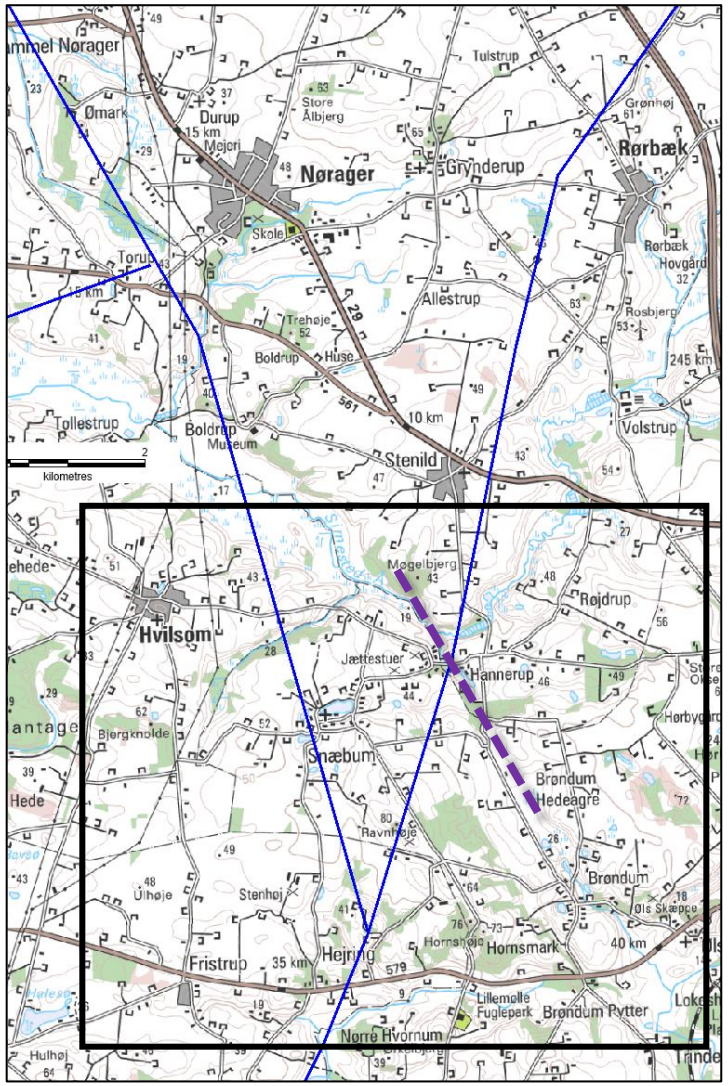
Sandersen (2023)

Snæbum

- Nord for Hvornum saltstruktur
- SkyTEM
- Forkastning/fleksur ved Snæbum
- Dybe forkastninger i top præ-Zechstein
- Nedforkastet sand – ikke en tunneldal

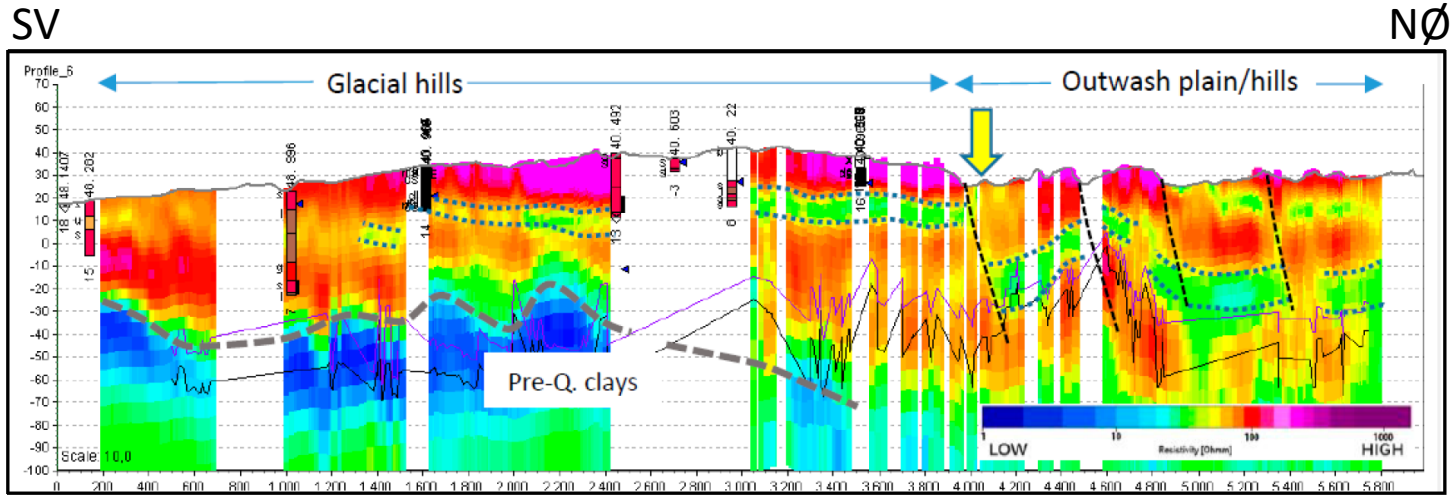






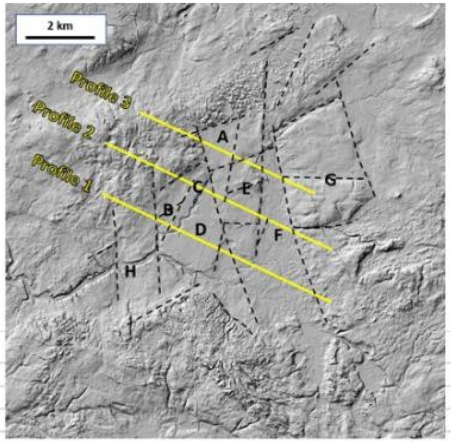
Sydvest for Aars

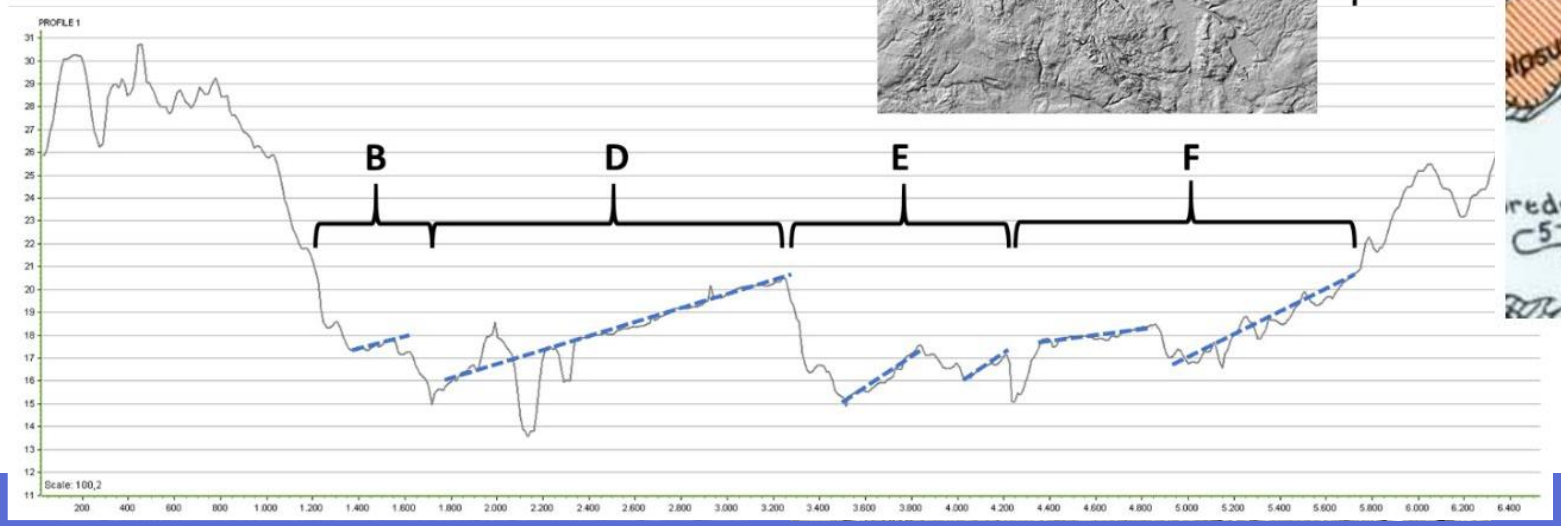
- Hedeslette omgivet af glacialt landskab
- tTEM-kortlægning og topografi
- Mange N-S/NNV-SSØ lineamenter i det nuværende terræn
- Dybtliggende forkastning NNV-SSØ

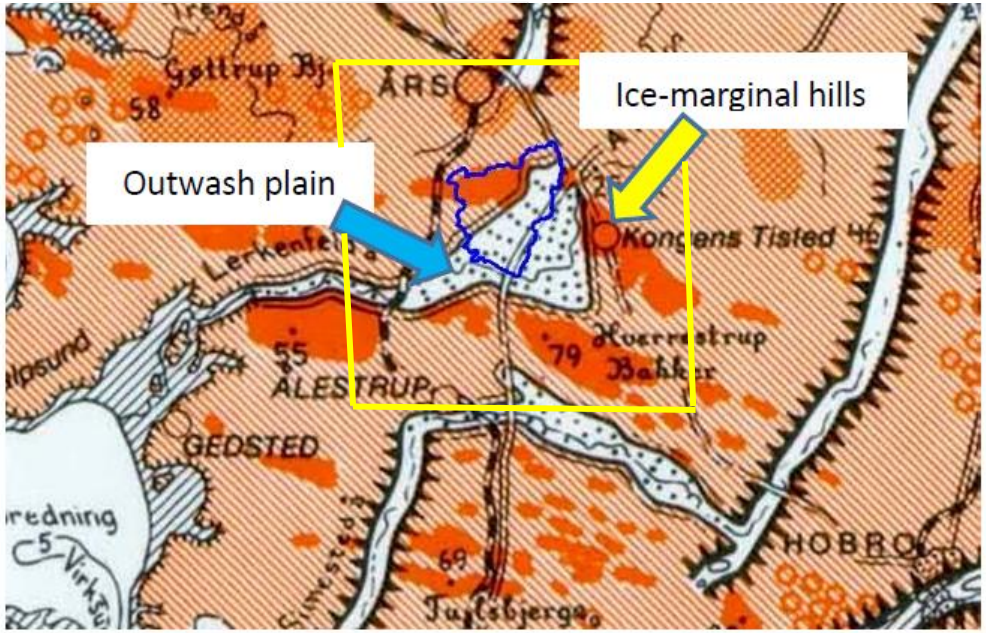


Sandersen & Kallesøe (2021)

Profil 1 (NV-SØ)

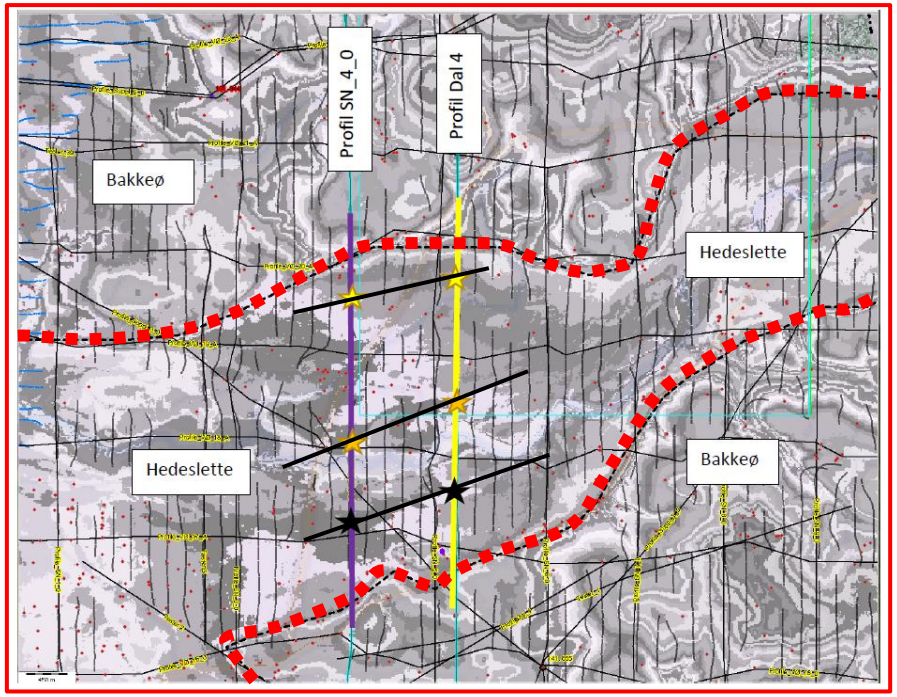


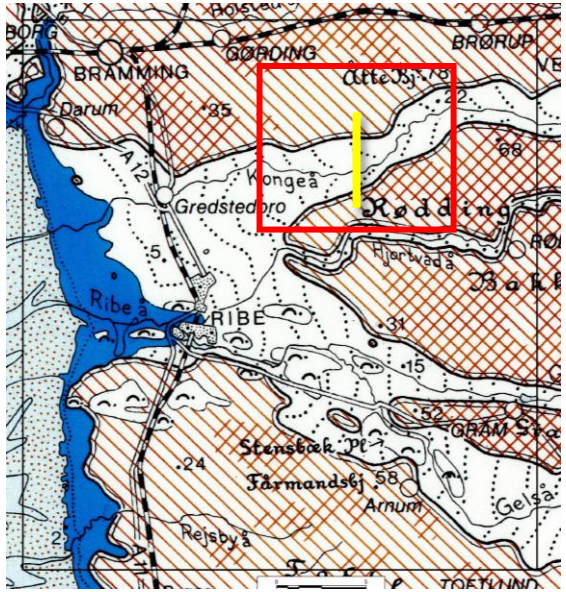


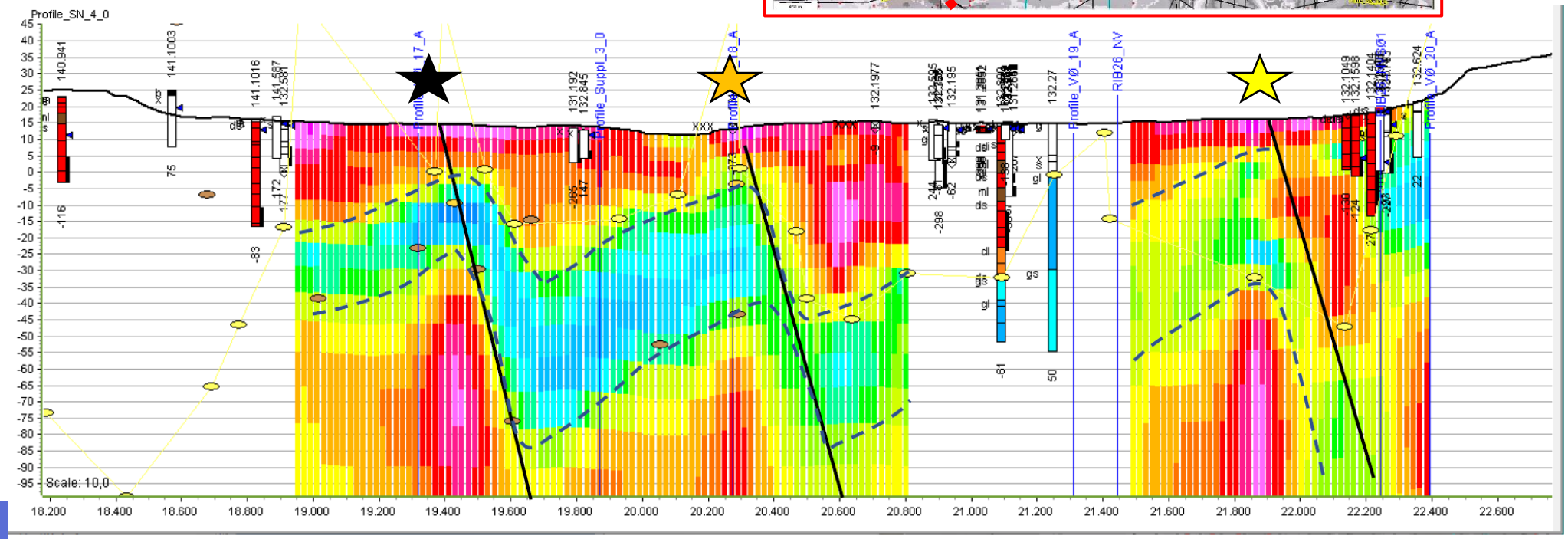


Hedesletten NØ for Ribe

- Forkastninger i miocænt Mådegruppe-ler (Gram/Hodde/Ørnhøj Fm…)
- Orienteringen af forkastningerne kan indtegnes
- Parallelle med hedeslettens orientering
- Hedeslettens topografi er forstyrret



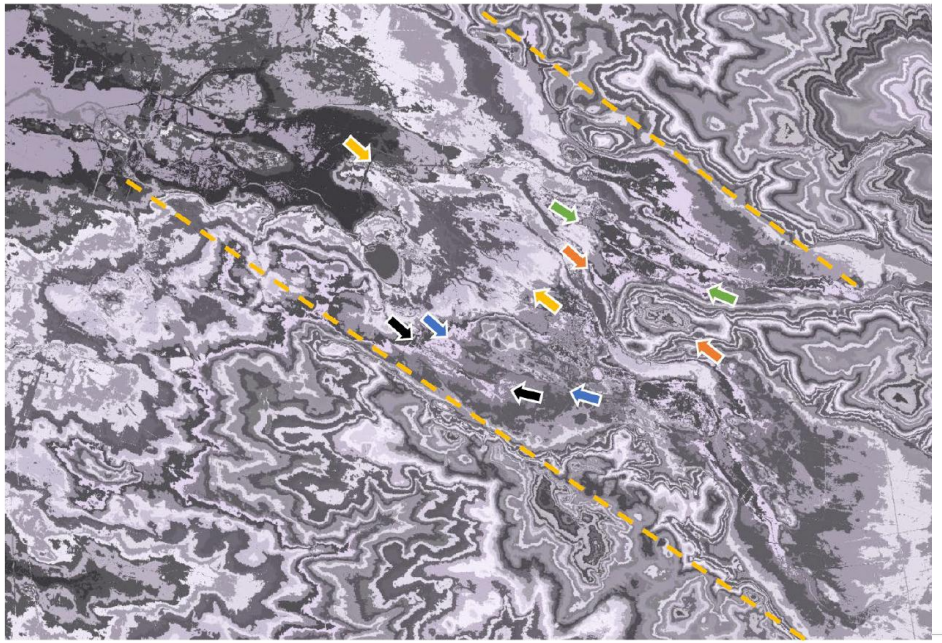


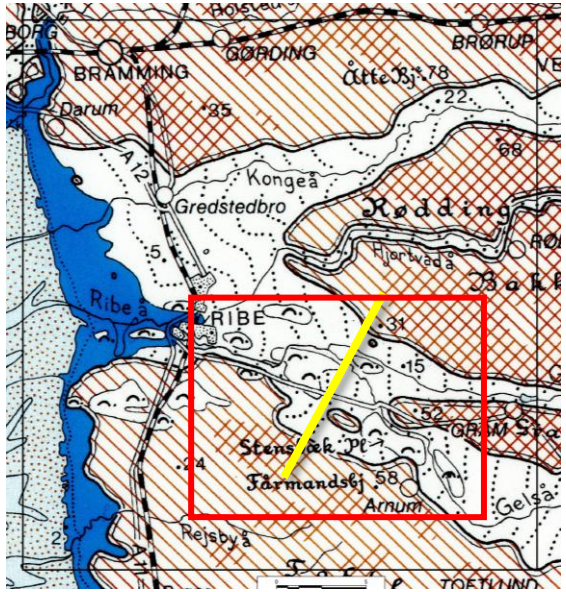


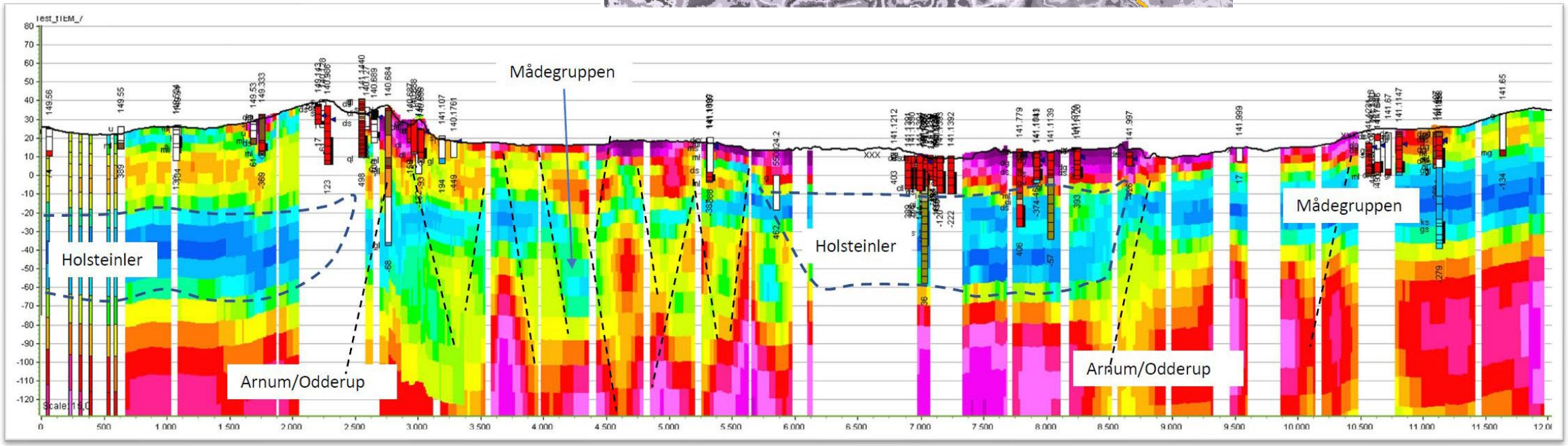
Sandersen et al. (2025)

Hedesletten SØ for Ribe

- Forkastninger i miocænt Mådegruppe-ler
- Forkastningszone med deformeret Mådegruppe
- Hedeslettens topografi er forstyrret
- Tydelige lineamenter



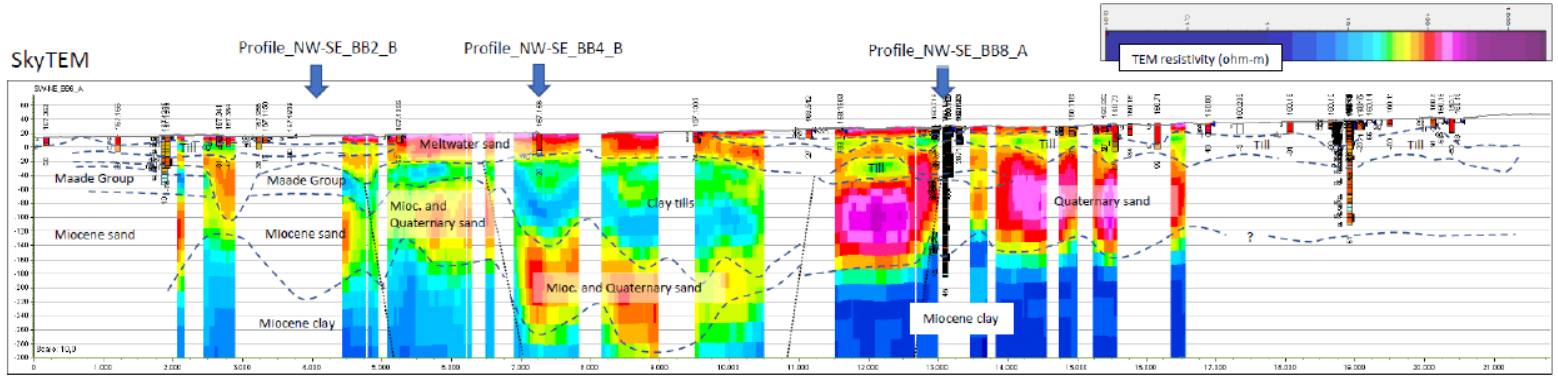


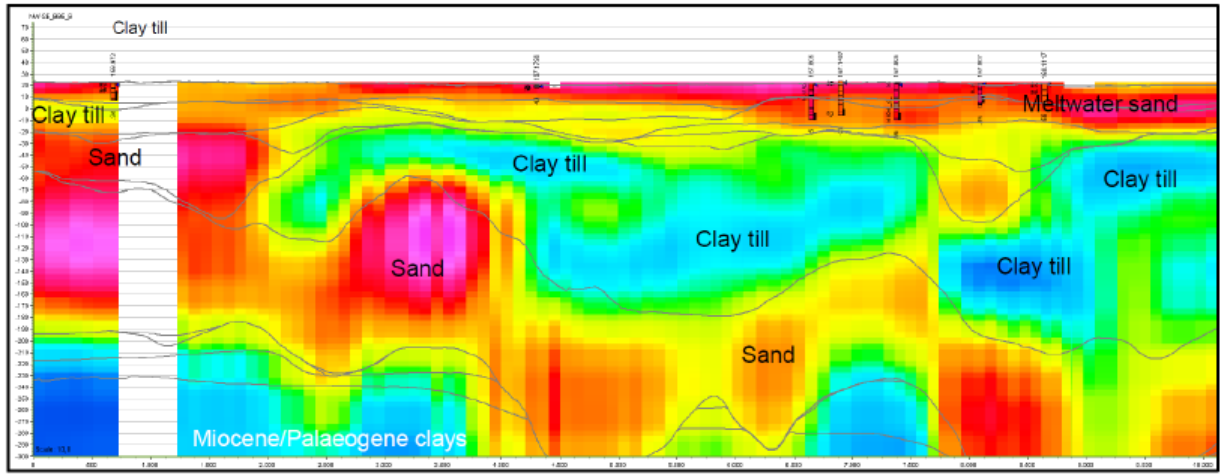


Sandersen et al. (2025)

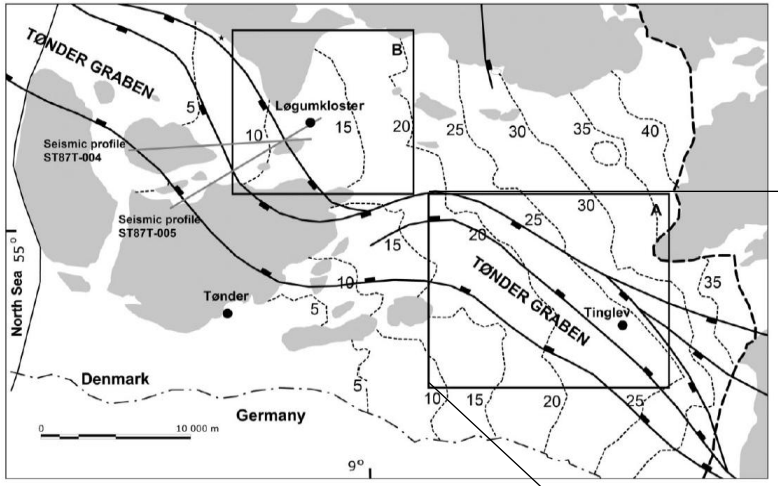
Tøndergraven

- Hedeslette-topografien forstyrret
- Tegn på mange forkastninger
- Tidlig postglacial reaktiveringer af dybe forkastninger
- Storskala glacialtektonik fokuseret langs Tøndergraven

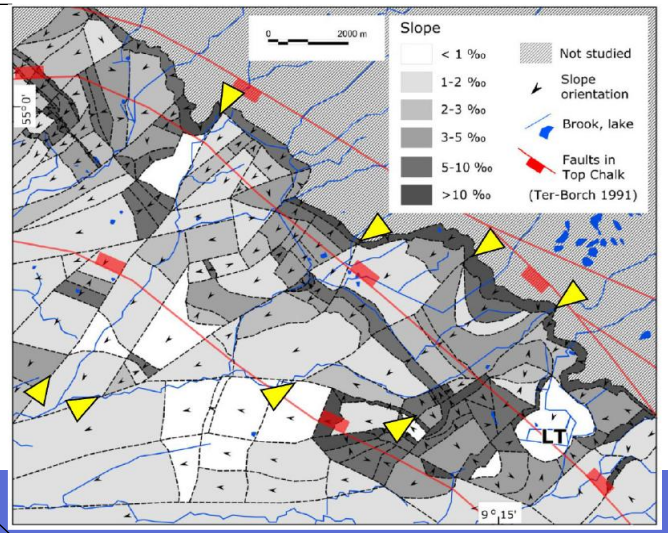




Sandersen et al. (2026)



Sandersen & Jørgensen (2015)



- Kompliceret samspil mellem dyb tektonik og glacialtektonik
- Forkastninger og overskydninger

Hvordan tager vi forkastningerne videre?

Den geologiske model:

- Brug forkastningerne i den konceptuelle geologiske forståelse
- Lav en 'hændelseskronologi'
- Overvej inddeling af området i tektoniske zoner til brug i den hydrologiske model

Den hydrologiske model:

- Snak med hydrologerne om den mulige påvirkning af grundvandsstrømningen (anisotropi, barrierer, ændringer i ledningsevne…..)
- Vurder om forkastningerne er godt repræsenteret i den hydrologiske model

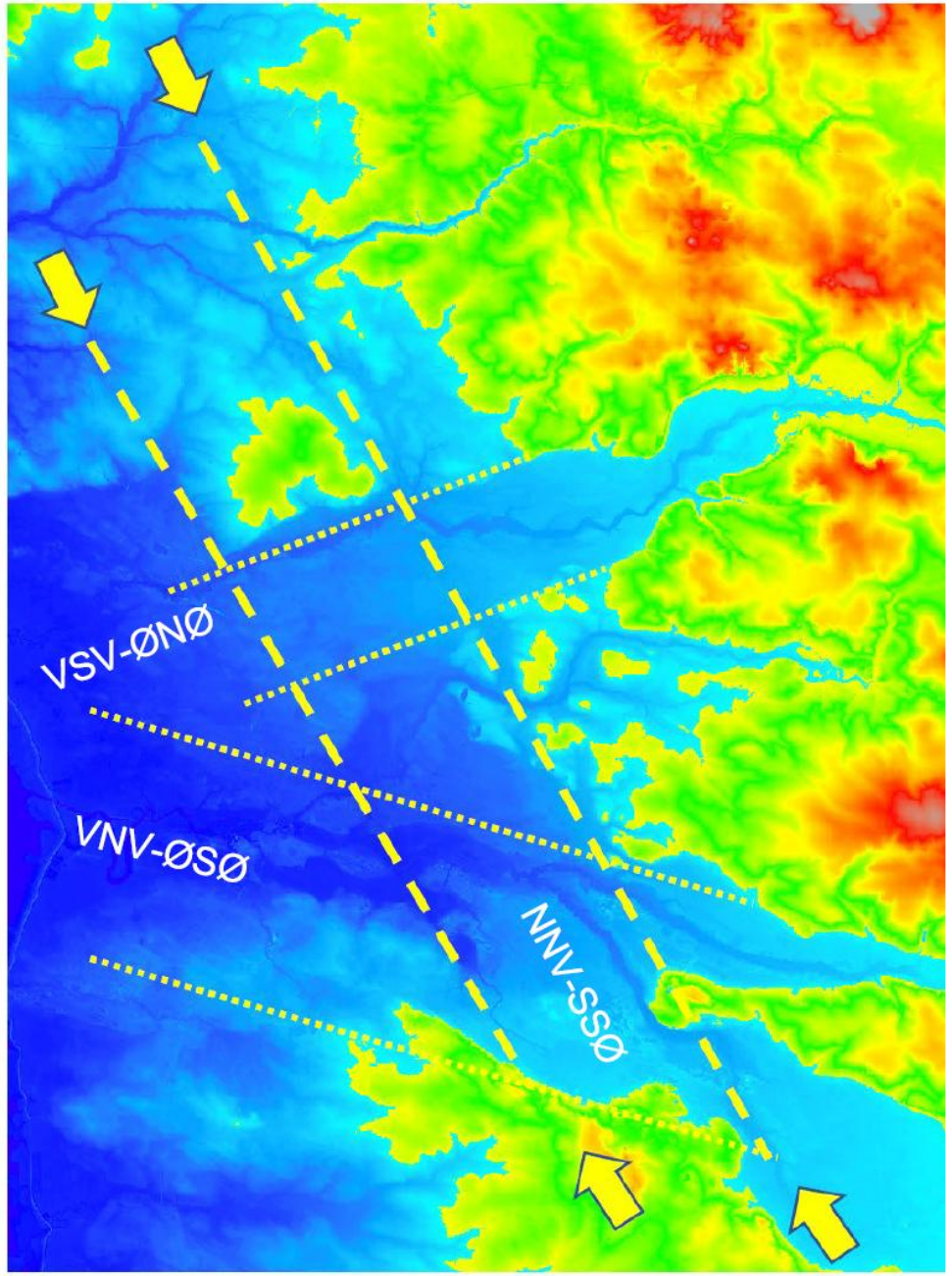
Inddeling i ’tektoniske zoner’

- Et eksempel fra Ribe-kortlægningen (Din Forsyning)
- Forkastninger påvirker hele lagserien
- Forskellig orientering af forkastninger i delområder
- Et forsøg på at videregive den strukturelle viden til den hydrologiske modellering

- Tektoniske zoner på baggrund af forkastningsorienteringer og grad af deformation:
  - *Klasse 1: Kraftig deformation (TZ 1, 3 og 7)*
  - *Klasse 2: Moderat deformation (TZ2 og 10)*
  - *Klasse 3: Begrænset deformation (TZ 4, 5, 6, 8 og 9)*

- Vurdering af anisotropi for den hydrauliske ledningsevne

- En success?



Sandersen et al. (2025)

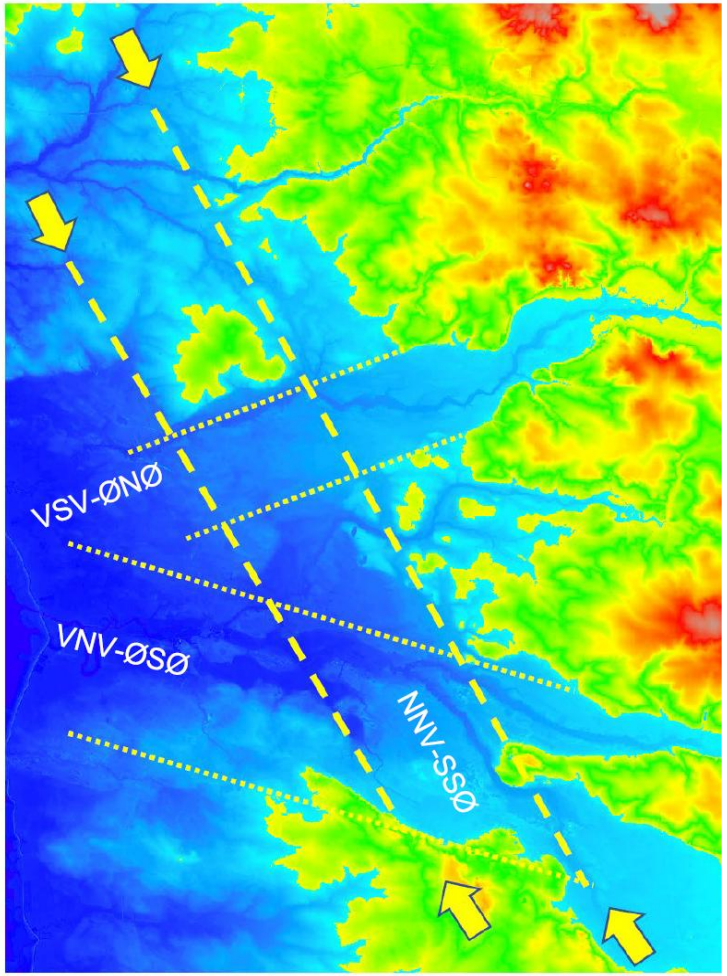
Perspektiver

Forkastningsparametre

- Samarbejde med Miljøstyrelsen om fastlæggelse af parametre, der kendetegner en forkastning og som har betydning i grundvandssammenhæng
- En ramme for fremtidig håndtering af nye, kortlagte forkastninger

Forkastningsdatabase

- GEUS arbejder på etablering en database, som skal kunne indeholde kortlagte dybe forkastninger (olie/gas, CCS, forskning) og nye overfladenære forkastninger
- Skal helst være relevant for flere faggrupper og flere interessenter
- Løbende opdatering
- Frit tilgængelige GIS-data



Sandersen et al. (2025)

Det er ikke let……Men med fælles indsats kan vi komme et godt stykke videre….

Tak for opmærksomheden!