

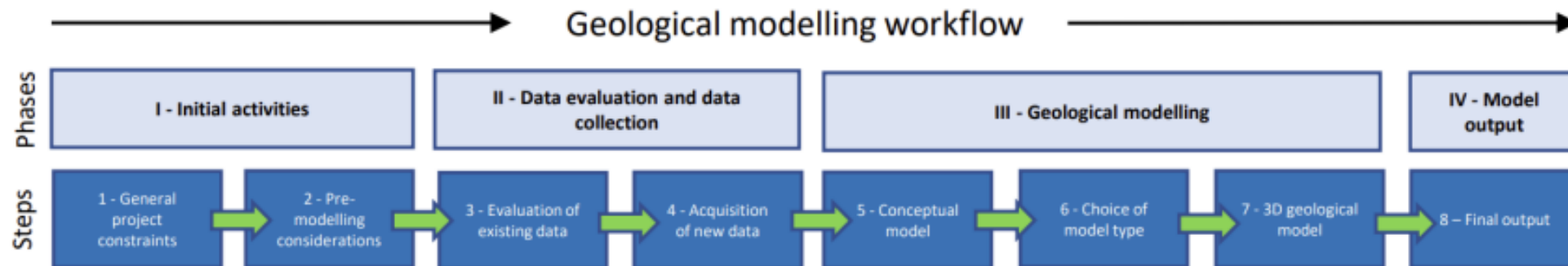
Usikkerhed i geologisk modellering

Anne-Sophie Høyer

Peter Sandersen, Rasmus Bødker Madsen, Ingelise Møller

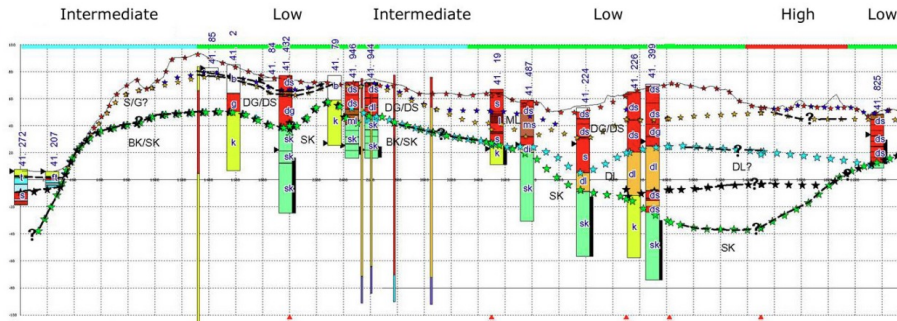
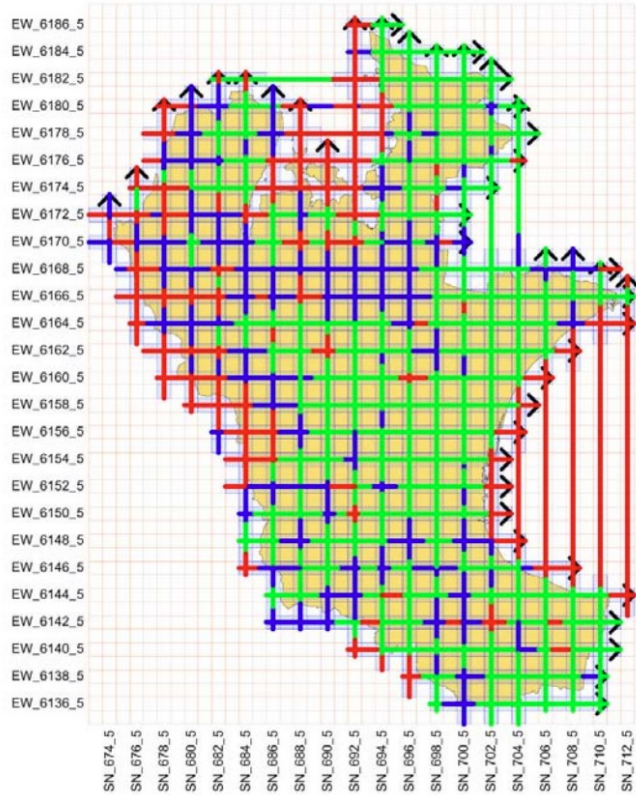
Disposition

1. Generelt om usikkerheder i det geologiske modellerings workflow
2. Forskellige metoder brugt til at håndtere usikkerheder i geologisk modellering siden grundvandskortlægningens start.
3. **Hovedfokus i denne præsentation er den type usikkerhed, der relaterer sig til tolkningsusikkerheden langs laggrænser i en tolket lagmodel. Vist ved 2 eksempler: Egebjerg og på den nationale hydrostratigrafiske model.**
4. Eksempel fra Egebjerg: Usikkerhed på laggrænser i en traditionelt tolket lagmodel med vurderede tolkningsusikkerheder (Trine Enemark viser resultat af grundvandsmodelleringen)
5. Eksempel på opskalering af metoden til national brug på FOHM modellen (Nretentionsprojektet og MSTs pilotprojekt Fyn)



Høyer et al. in review, 2024

Håndtering af usikkerheder i geologiske modeller til brug i grundvandsmodellering



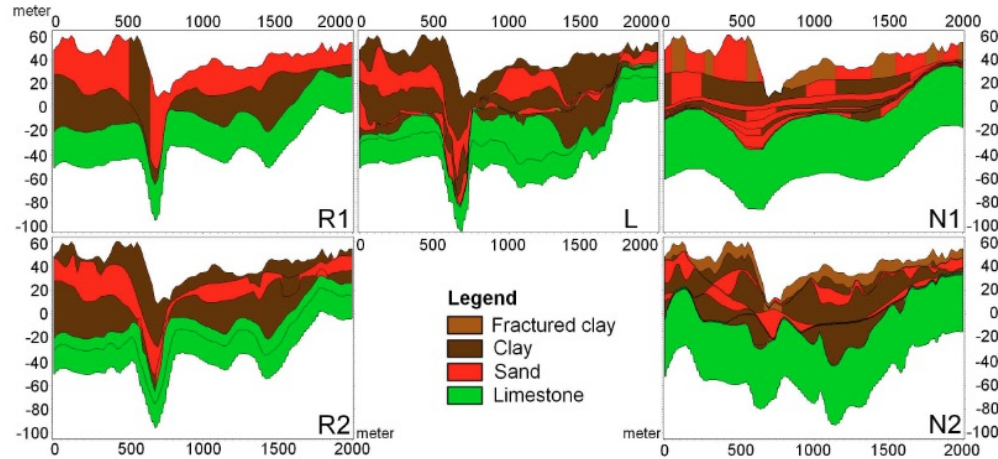
Sandersen, 2008

Jørgensen et al., Geovejledningen, 2008
Kvalitative usikkerhedsvurderinger på tolkninger

2008

2024

Håndtering af usikkerheder i geologiske modeller til brug i grundvandsmodellering



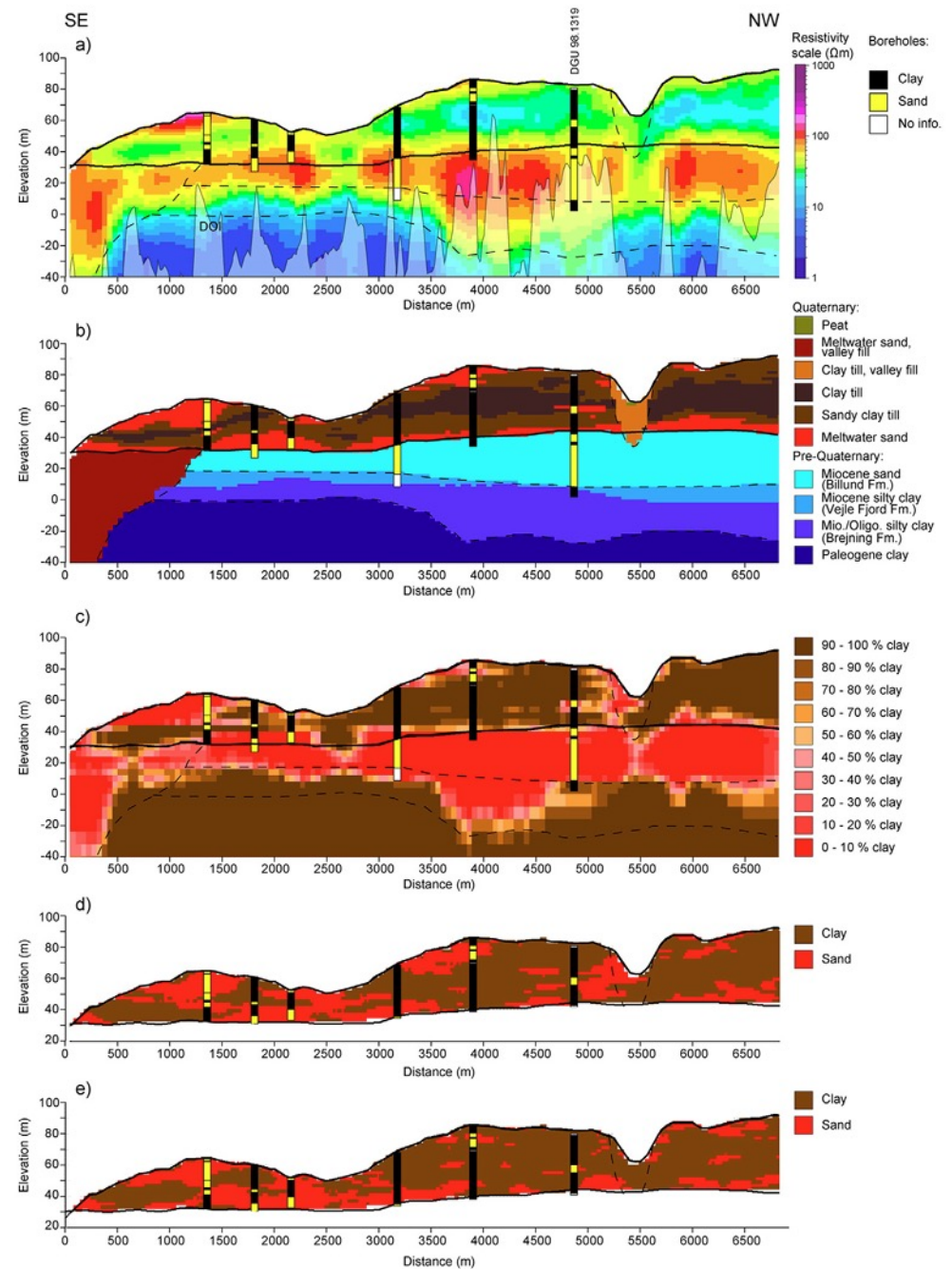
Seifert et al., 2011, Forskning:
Indflydelse fra forskellige konceptuelle geologier

Jørgensen et al., Geovejledningen, 2008
Kvalitative usikkerhedsvurderinger på tolkninger

2008

2024

Håndtering af usikkerheder i geologiske mode



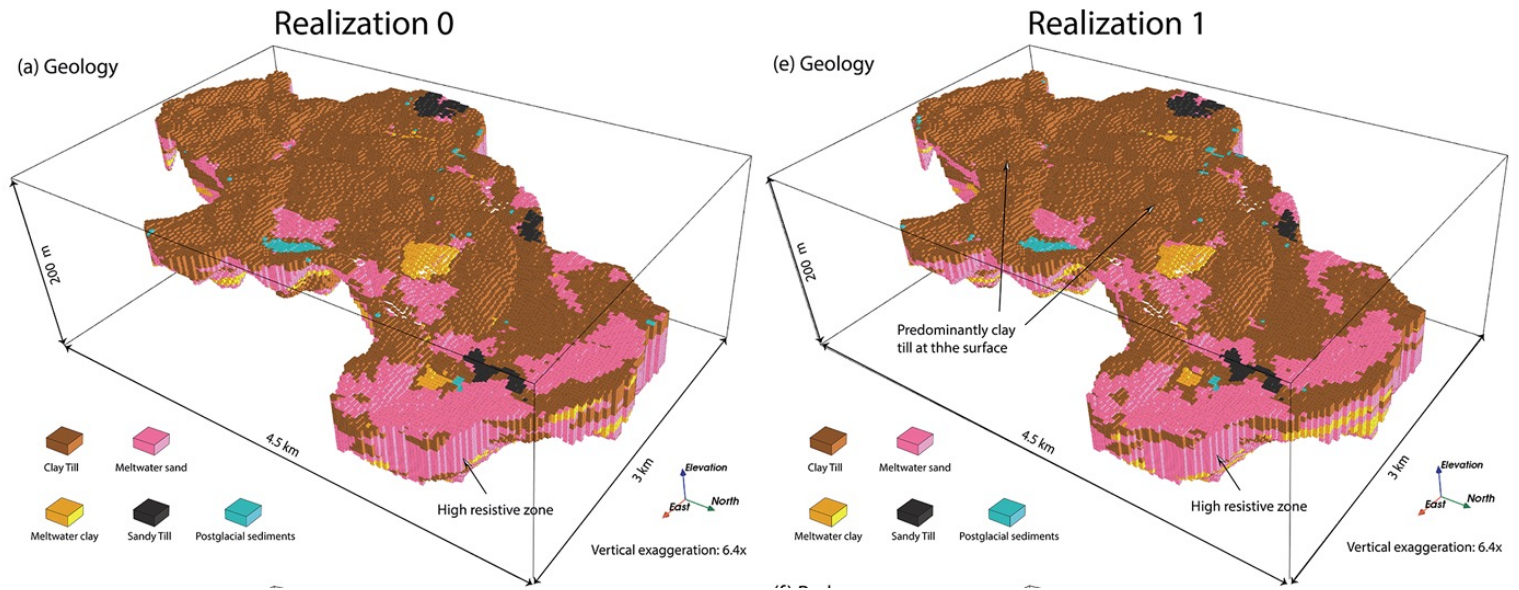
Høyer et al., 2015, Forskning:
Brug af forskellige geologiske modelleringsteknikker

Seifert et al., 2011, Forskning:
Indflydelse fra forskellige konceptuelle geologier

Jørgensen et al. 2008, Geovejledningen, 2008
Kvalitative usikkerhedsvurderinger på tolkninger

2008

Håndtering af usikkerheder i gec



Madsen et al., 2021, Forskning:
Geostatistisk voxelmodellering af geologiske elementer

Høyer et al., 2015, Forskning:
Brug af forskellige geologiske modelleringsteknikker

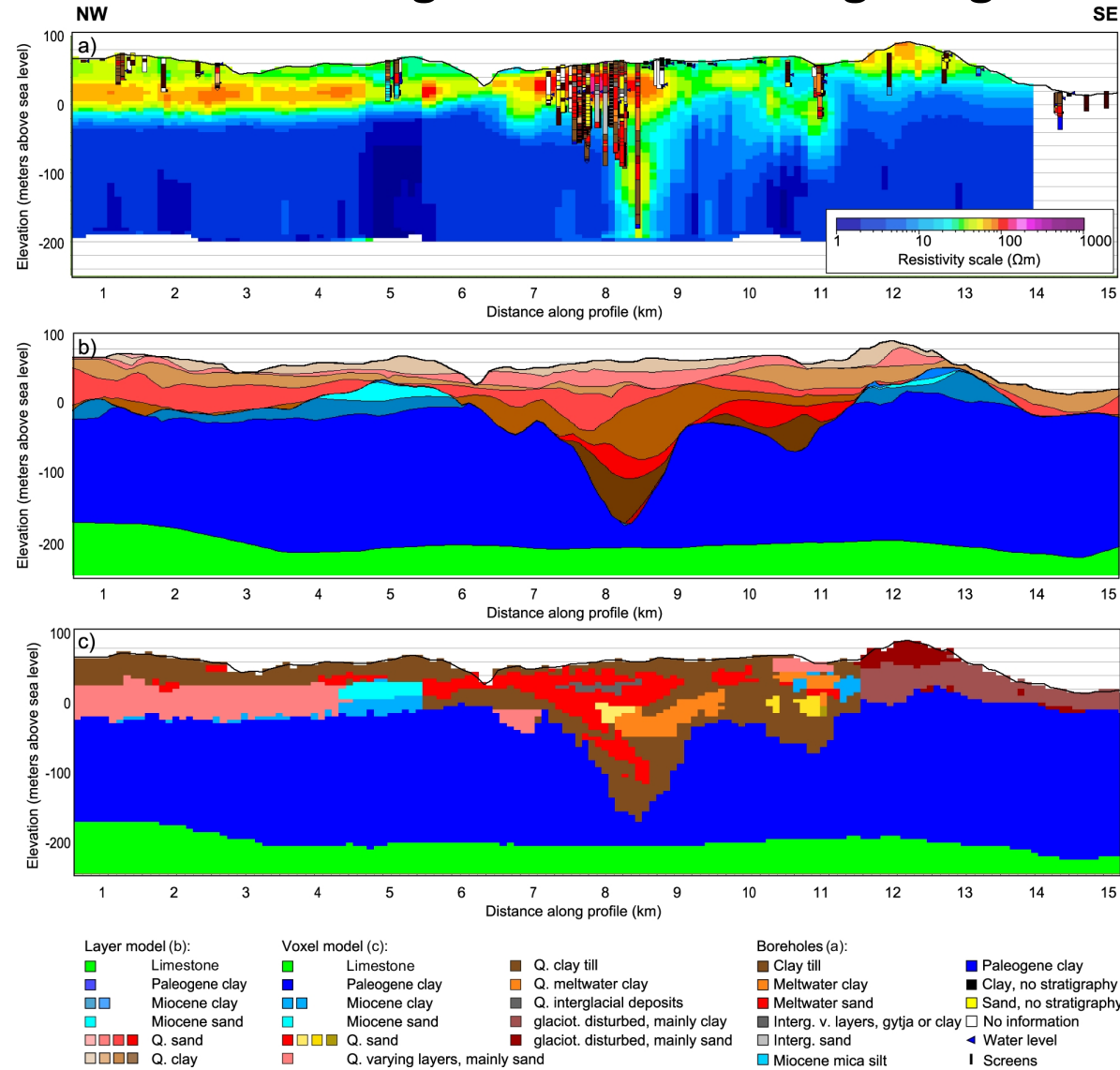
Seifert et al., 2011, Forskning:
Indflydelse fra forskellige konceptuelle geologier

Jørgensen et al. 2008, Geovejledningen, 2008
Kvalitative usikkerhedsvurderinger på tolkninger

2008

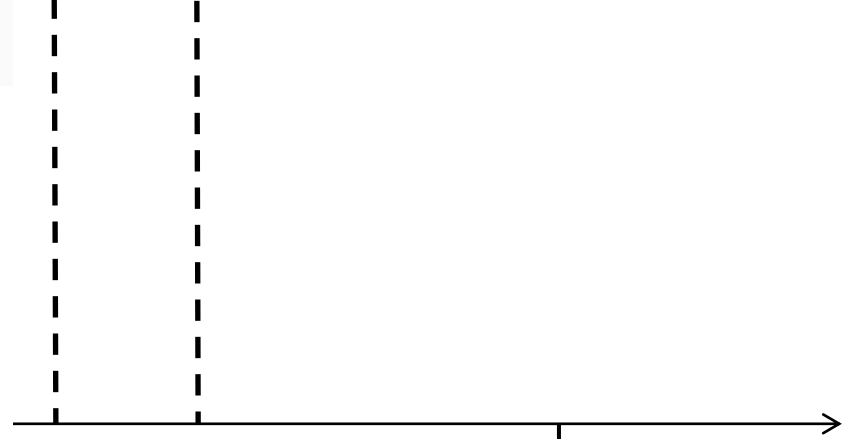
2024

Håndtering af usikkerheder i geologiske modeller til brug i grundvandsmodellering



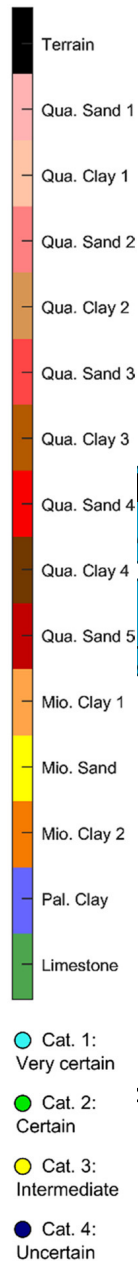
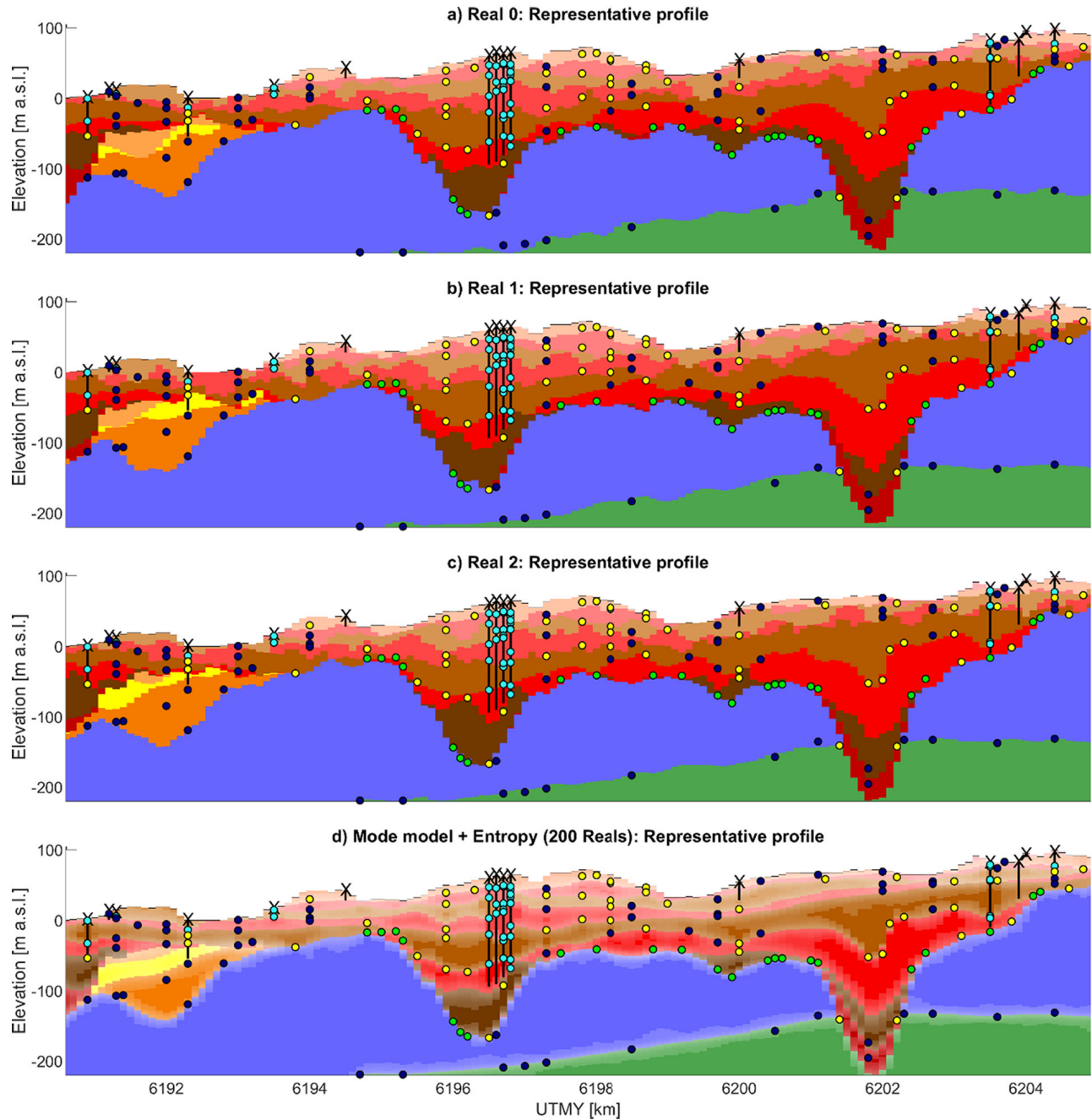
Enemark et al., 2022, Forskning: Indflydelse fra modelleringsteknikker (Voxelmodellering vs. lagmodellering)

Forskning: Modellering af geologiske elementer



2024

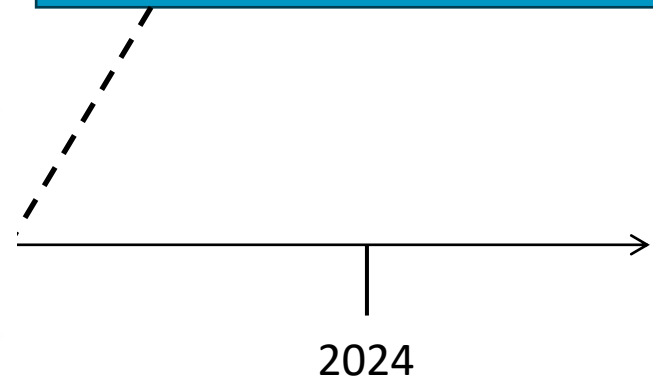
I brug i grundvandsmodellering



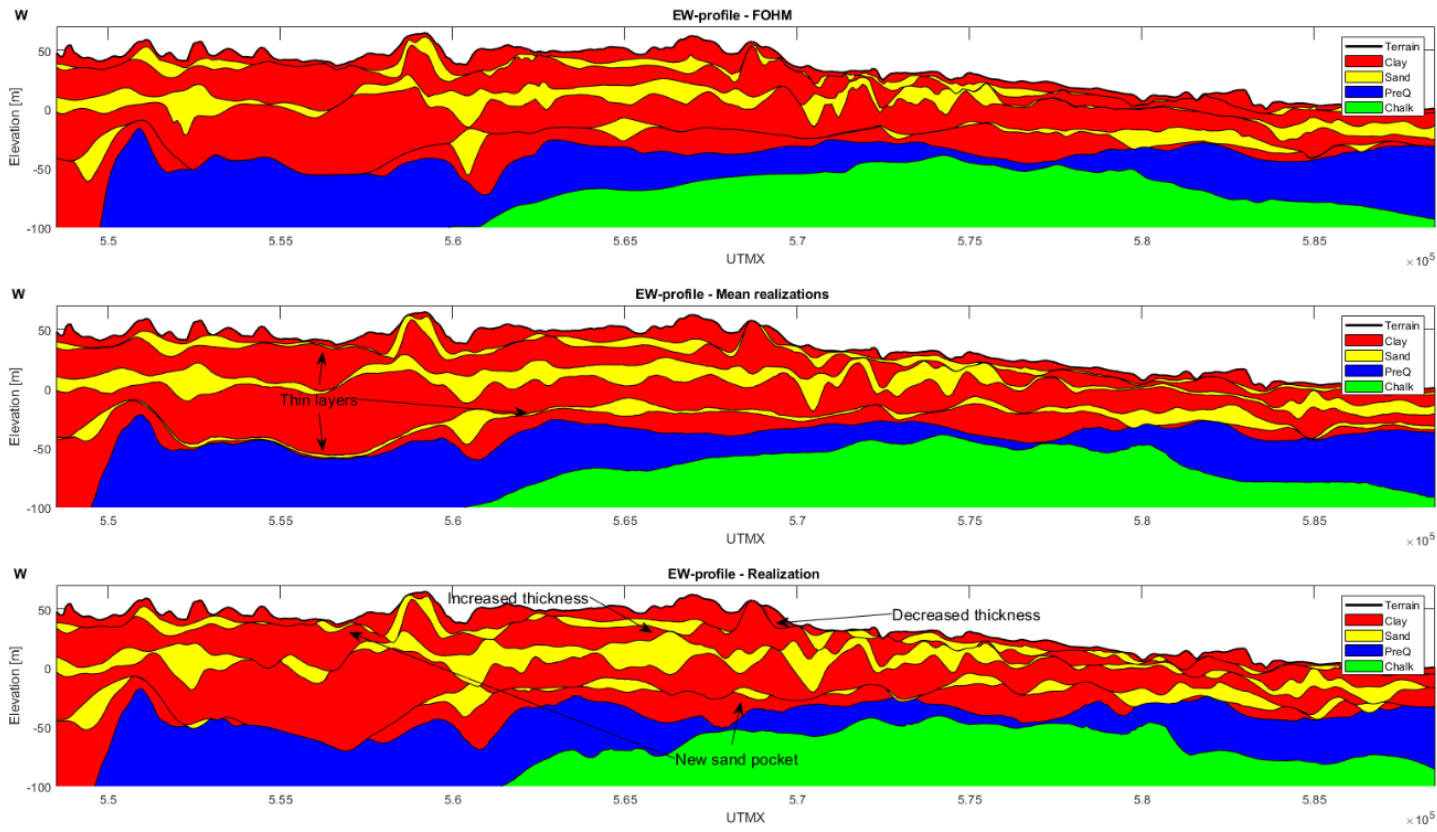
k et al., 2022, Forskning: Indflydelse fra ringsteknikker (Voxelmodellering vs. lagmodellering)

r.: geologiske elementer

Madsen et al., 2022, Forskning: Ny metode: 'GDM' (Geology-Driven-Modelling) Simulering af lagflader indenfor tolkningsusikkerhed



Håndtering af usikkerheder i geologiske modeller til brug i grundvandsmodellering



I., 2022, Forskning: Indflydelse fra teknikker (Voxelmodellering vs. lagmodellering)

geologiske elementer

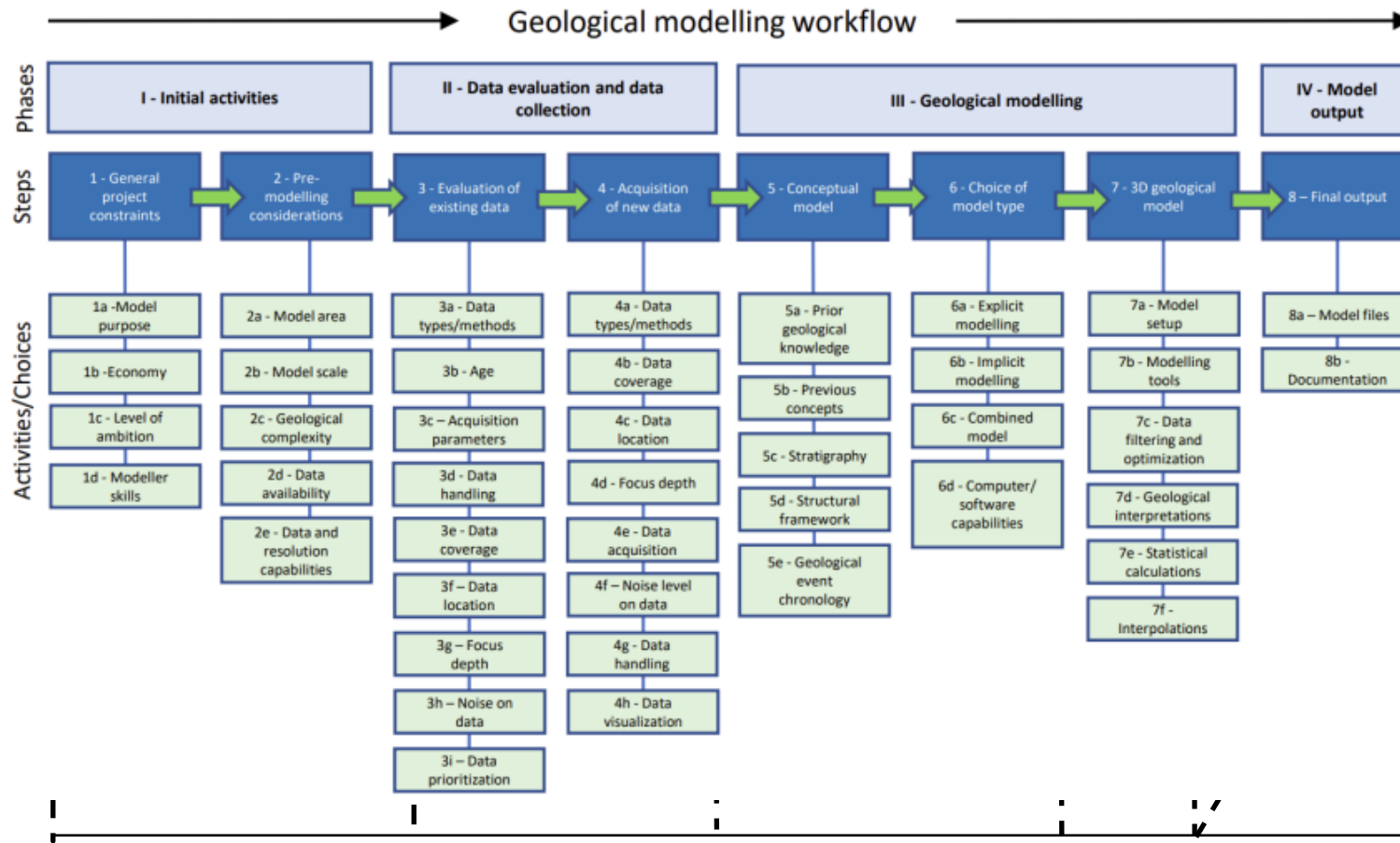
Madsen et al., 2022, Forskning: Ny metode: 'GDM' (Geology-Driven-Modelling) med regulering af lagflader indenfor tolkningsusikkerhed

Madsen et al., 2024, MST Rapport: Opskalering af GDM til brug på FOHM model

2008

2024

Håndtering af usikkerheder i geologiske modeller til brug i grundvandsmodellering



Forskning: Indflydelse fra (Voxelmodellering vs. lagmodellering)

menter

al., 2022, Forskning: Ny metode: 'GDM' (given-Modelling) af lagflader indenfor tolkningsusikkerhed

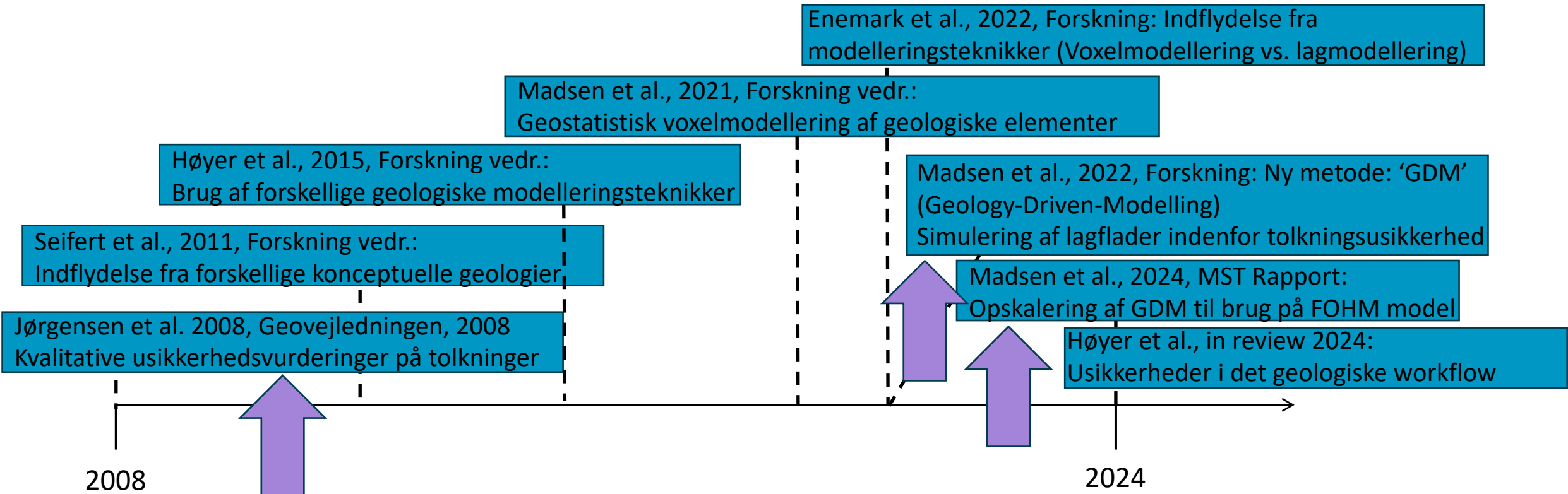
n et al., 2024, MST Rapport: ering af GDM til brug på FOHM model

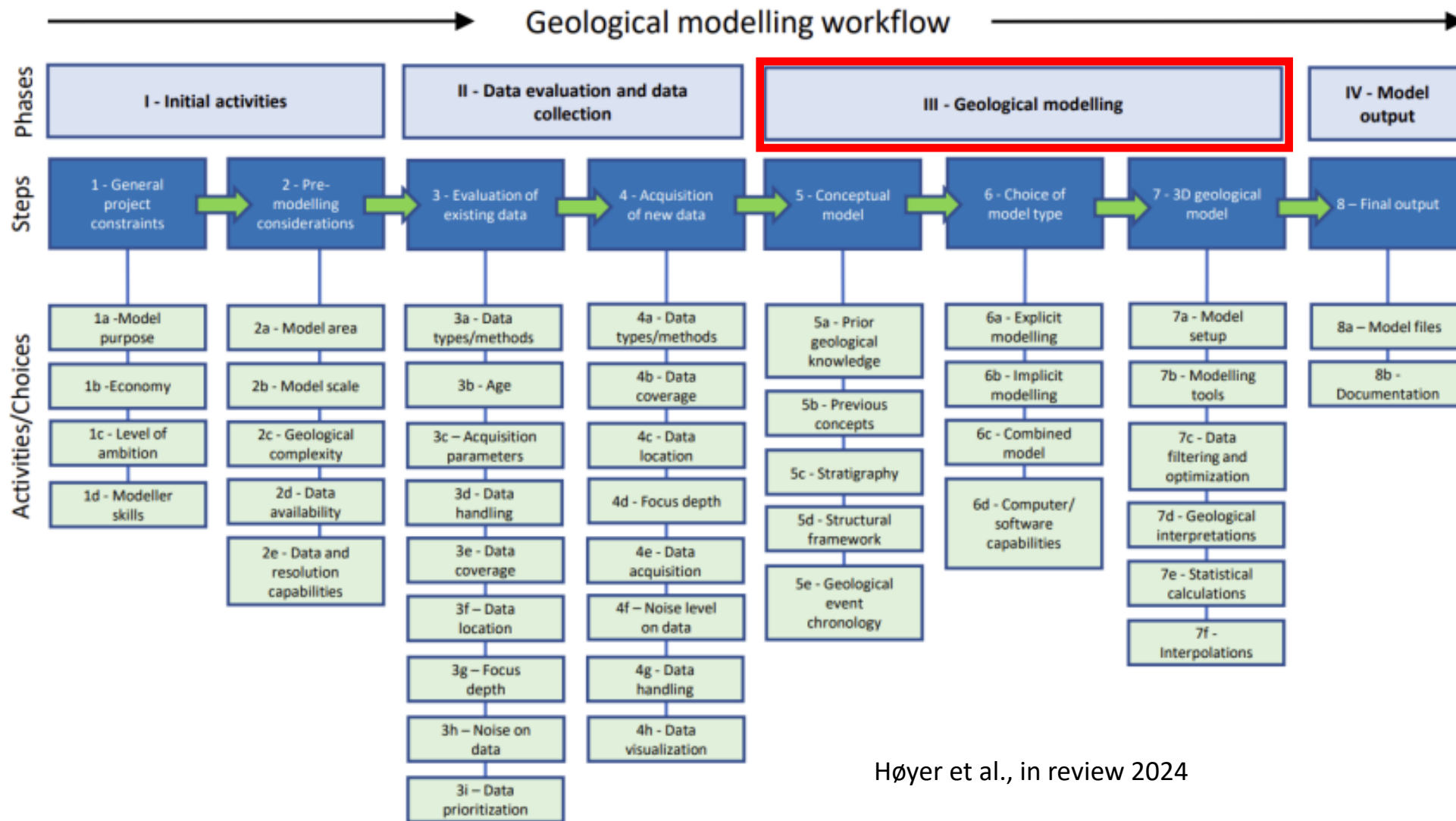
Høyer et al., in review 2024: Usikkerheder i det geologiske workflow

2008

2024

Håndtering af usikkerheder i geologiske modeller til brug i grundvandsmodellering





Høyer et al., in review 2024

Typisk datagrundlag

'Direkte' data:

Boringer

(1 – 4000 m)

Blotninger

(2 – 40 m)

Jordartskort

(1 – 2 m)

'Indirekte' data:

Geofysisk (resistivitets) information

(3 – 300 m)

Høj-opløselige seismiske data

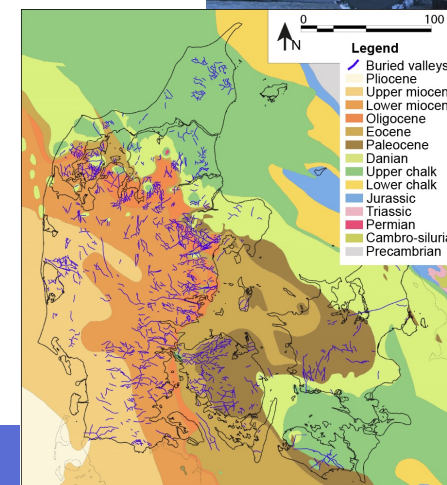
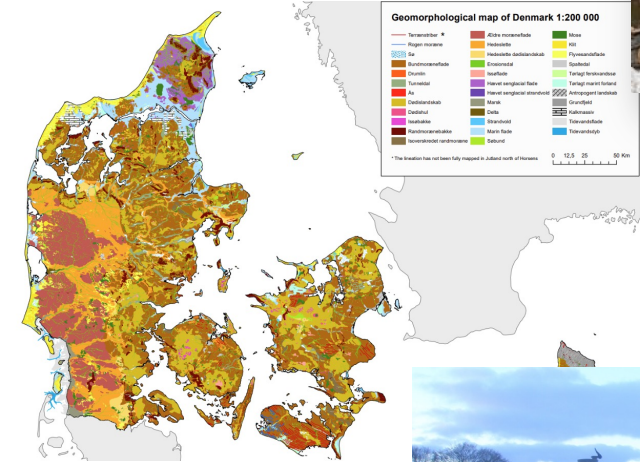
(10 – 5000 m)

Geologiske kort

(afhængigt af tema)

Geokemiske & hydrologiske data

(afhængig af boringer)



Typisk datagrundlag

'Direkte' data:

Boringer (1 – 4000 m)

Blotninger (2 – 40 m)

Jordartskort (1 – 2 m)

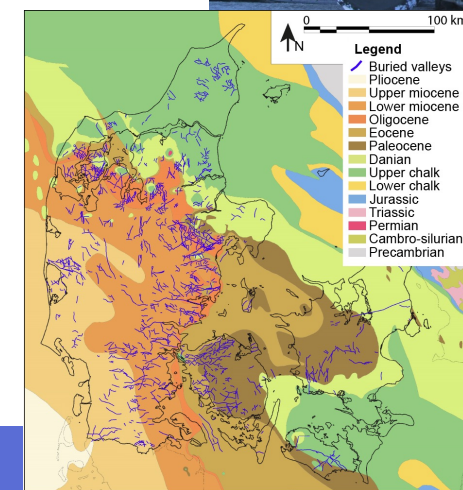
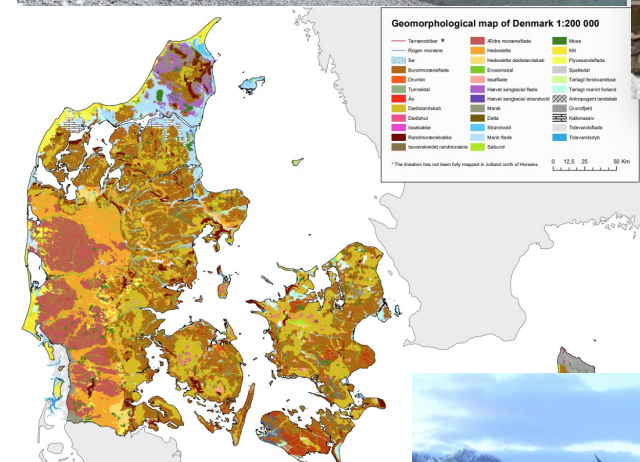
'Indirekte' data:

Geofysisk (resistivitets) information (3 – 300 m)

Høj-opløselige seismiske data (10 – 5000 m)

Geologiske kort (afhængigt af tema)

Geokemiske & hydrologiske data (afhængig af boringer)



Usikkerheder/begrænsninger ved tolkning og modellering af boringsdata

- > 400.000 boringer i Jupiter lavet over en periode på mere end >100 år til forskellige formål
- Stor forskel på kvalitet af boringsprøver fra forskellige boremetoder
- Stor forskel i hvor grundigt beskrivelserne er lavet
- Boringsdata er altid punktinformation!
- => Metodekendskab er vigtigt!



Figur 1.3a.
Prøve udtaget med snegl.



Figur 1.3b.
Prøve løsboret med vingemejsel i lufthæveboring.



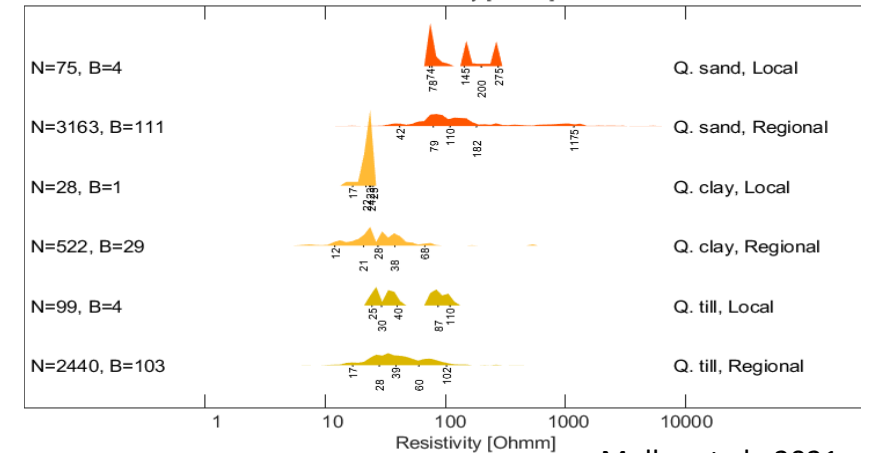
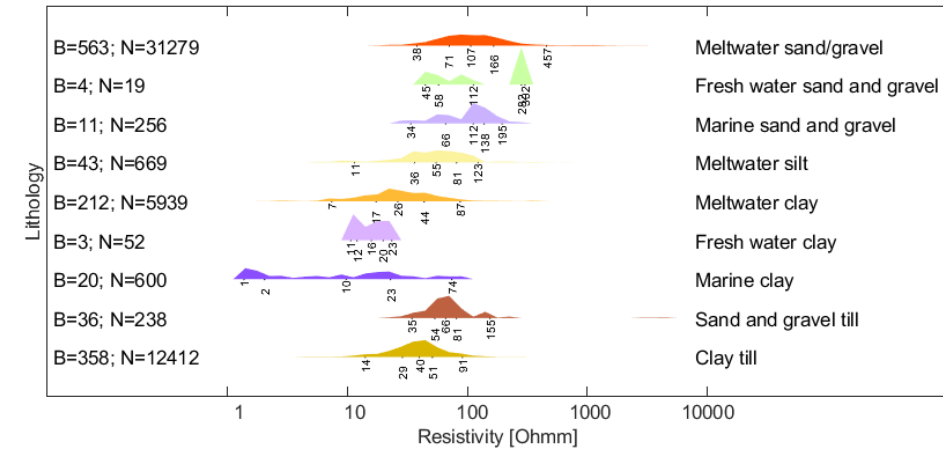
Figur 1.3c.
Prøve løsboret med rullemejsel i lufthæveboring.



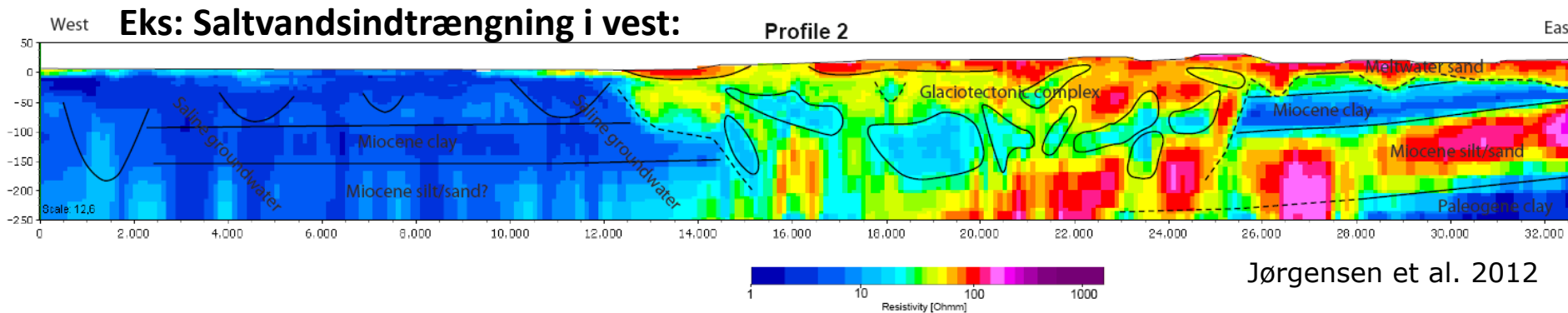
Ditlefsen et al. 2008,
(Geovejledningen, 2008)
Jordprøver fra
grundvandsboringer

Usikkerhedskilder/begrænsninger ved tolkning og modellering af resistivitetsdata

- Den geofysiske model er én model af flere, der kan fitte data!
 - Vertikal og horisontal opløselighed (stiger med dybden)
 - Ikke entydigt resistivitets-litologiforhold
 - Ionindholdet i porevandet har stor betydning
 - Dårlig opløselighed af høj-resistive lag
 - Mulig tilstedeværelse af koblede eller støjfyldte data
 - Mulige artefakter i 1D inversion pga. 3D effekter
- => Metodekendskab er vigtigt!



Møller et al., 2021

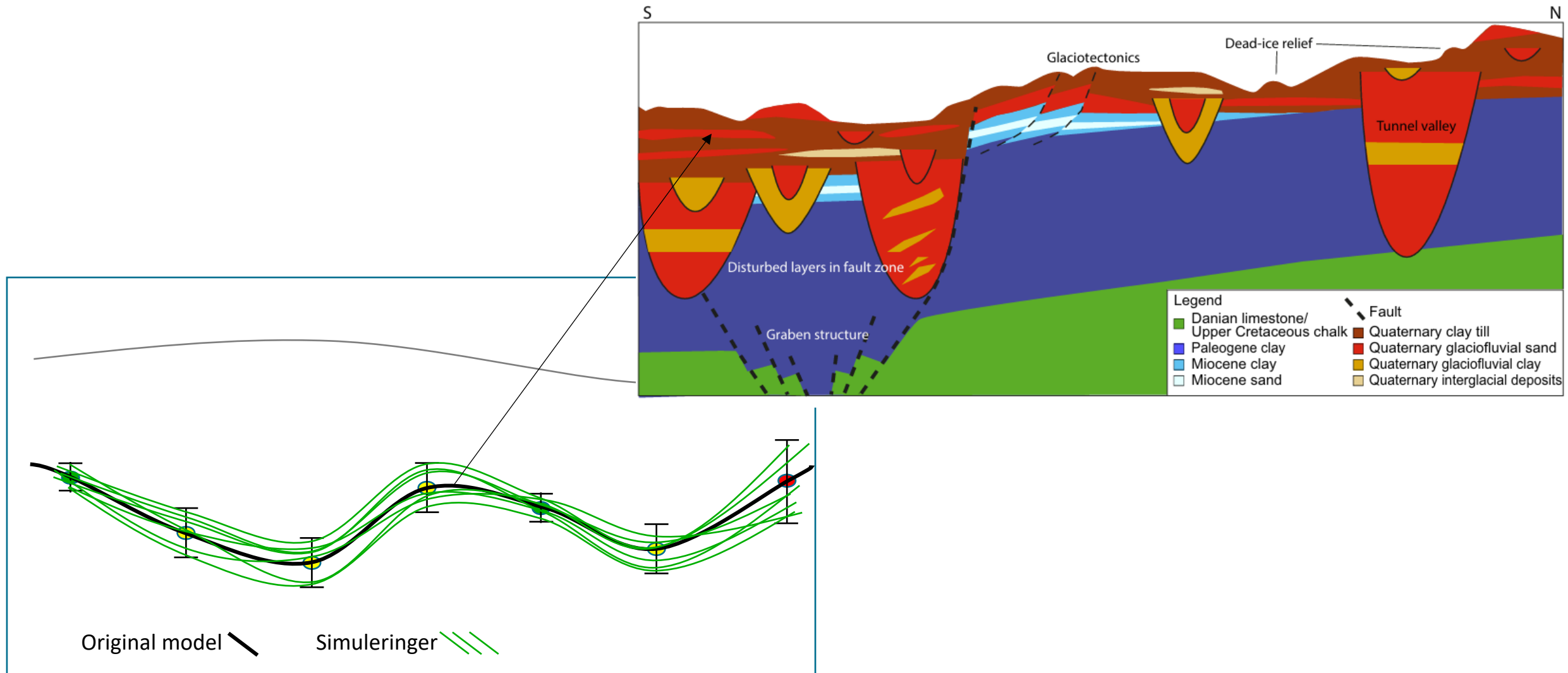


Jørgensen et al. 2012

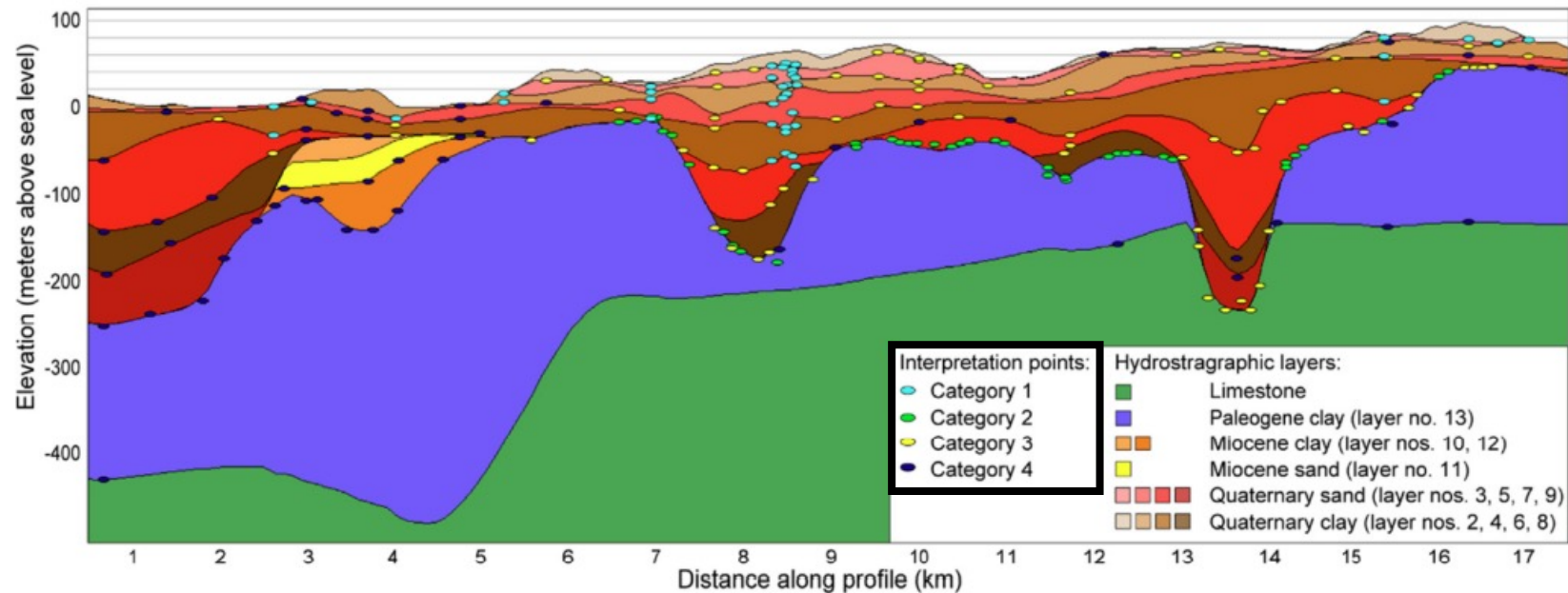
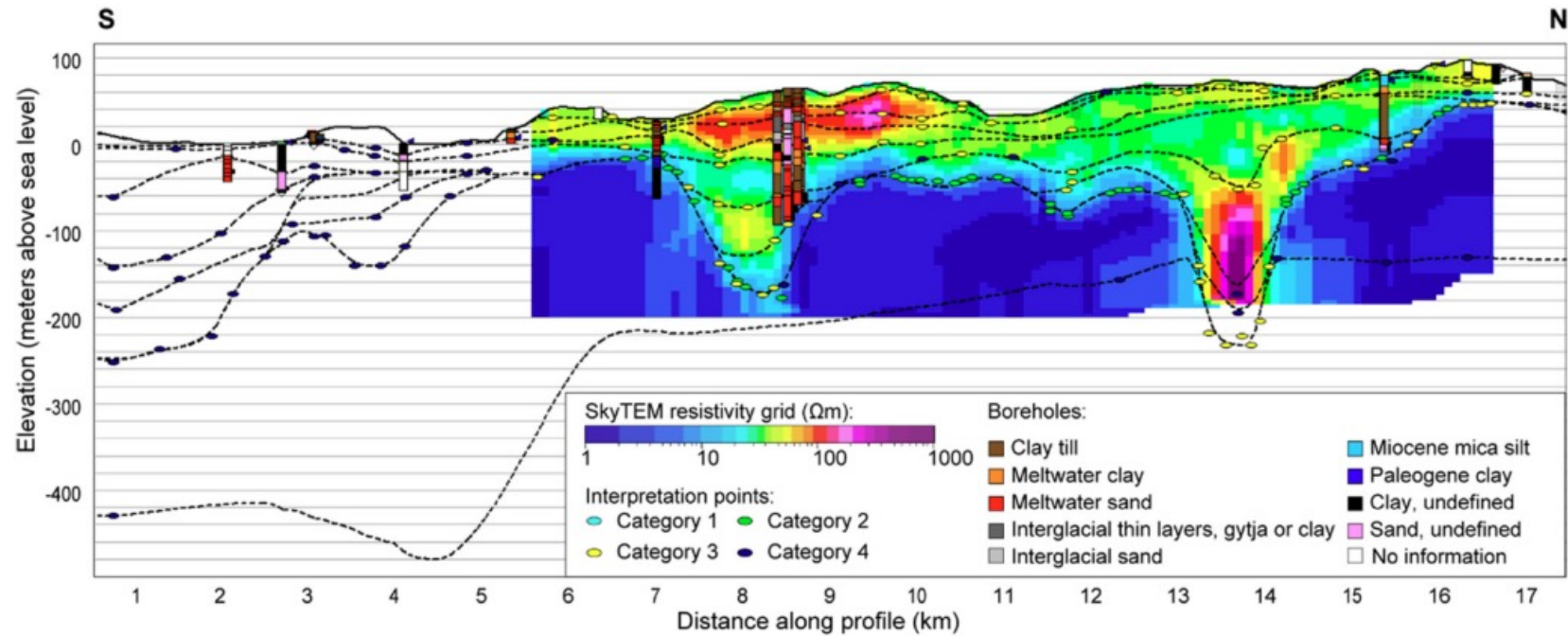
Eksempel fra Egebjerg

(Grundvandsoplandsniveau)

Simuleringer af lag indenfor estimerede usikkerheder



Usikkerheder jf. Geovejledningen (kategori 1-4)



Kvantificering

- 'Bedste approksimation' svarer til:
- Kategori 1: 10 % af dybden
- Kategori 2: Tykkelsen af laget i den geofysiske model i en given dybde
- Kategori 3: 1.5*Tykkelsen af laget i den geofysiske model i en given dybde
- Kategori 4: 3*Tykkelsen af laget i den geofysiske model i en given dybde
- Lavet 3 scenarier (lav, medium, høj usikkerhed), svarende til 3 gange mindre og 3 gange mere usikkerhed

Table 1

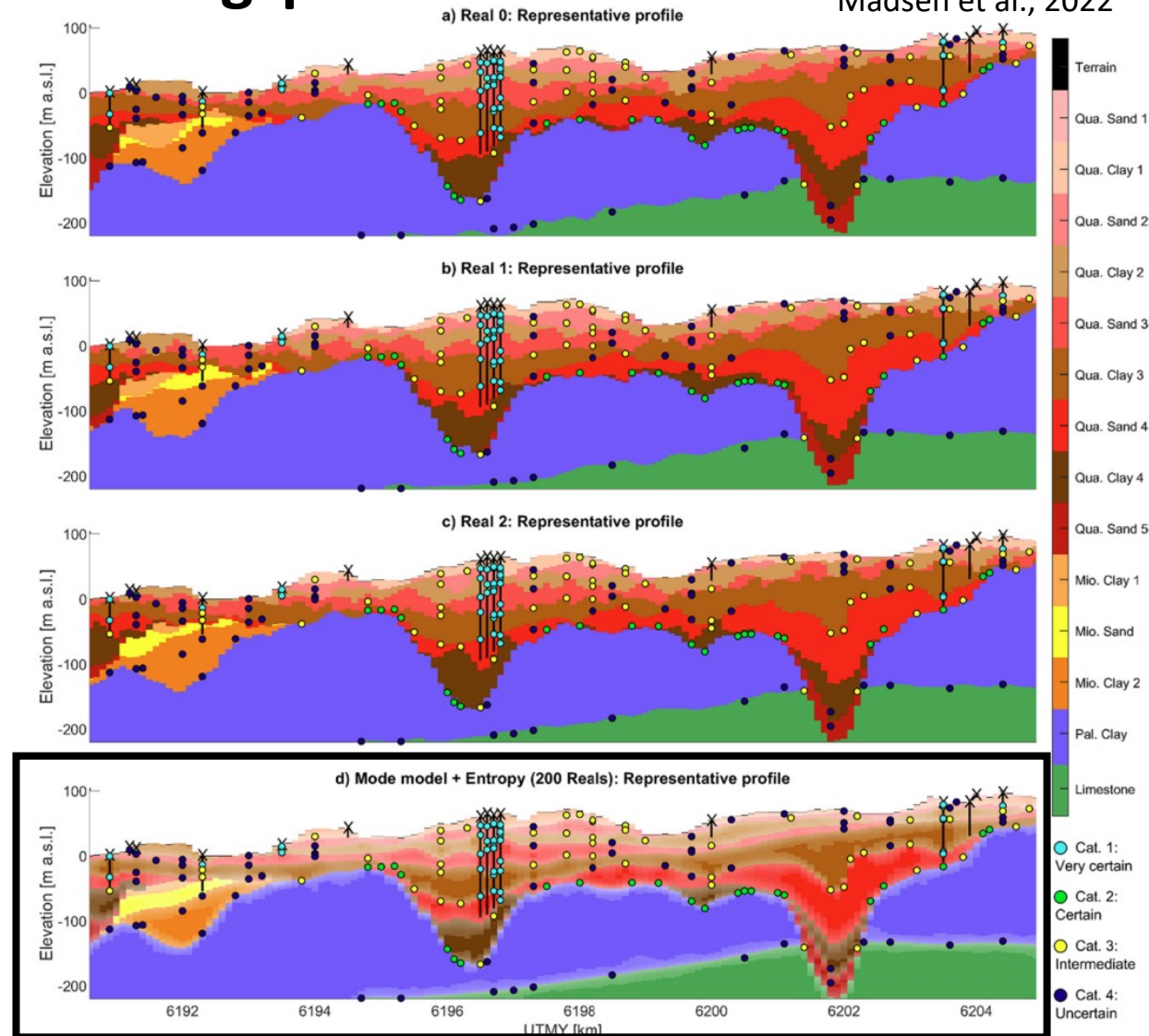
Description of the layers in the hydrostratigraphic model with quantified uncertainties for all layer boundaries. The average bottom boundary depth below terrain (ABD) is shown alongside 2xSTD for the four categories, the density of the interpretation points inside the simulation zone.

Name	Layer no.	Hydrostratigraphy	Lithology	Occurrence	Thickness layers in resistivity model	ABD	2xSTD: Quality 1	2xSTD: Quality 2	2xSTD: Quality 3	2xSTD: Quality 4	Points per km ²
Quaternary Sand 1	1	Aquifer	Quaternary meltwater sand	Mainly in northwestern part of the study area	5.0 m	8 m	0.8 m	5.0 m	7.5 m	15.0 m	1.7
Quaternary Clay 1	2	Aquitard	Quaternary, clay till	Mainly in the north	6.0 m	12 m	1.2 m	6.0 m	9.0 m	18.0 m	3.4
Quaternary Sand 2	3	Aquifer	Quaternary, meltwater sand and gravel	Mainly in the plateaus in the northern part	6.0 m	19 m	1.9 m	6.0 m	9.0 m	18.0 m	3.4
Quaternary Clay 2	4	Aquitard	Quaternary clays, such as till, meltwater clay and interglacial diatomaceous lake sediments.	Plateaus	7.0 m	29 m	2.9 m	7.0 m	10.5 m	21.0 m	4.0
Quaternary Sand 3	5	Aquifer	Quaternary glaciofluvial sand, interglacial and post glacial sand	Plateaus and shallow part of buried valleys	7.0 m	29 m	2.9 m	7.0 m	10.5 m	21.0 m	4.3
Quaternary Clay 3	6	Aquitard	Quaternary clayey till and meltwater clay	Plateaus and shallow part of buried valleys	10.0 m	62 m	6.2 m	10.0 m	15.0 m	30.0 m	6.7
Quaternary Sand 4	7	Aquifer	Quaternary meltwater sand	Buried valleys	12.5 m	96 m	9.6 m	12.5 m	18.8 m	37.5 m	6.0
Quaternary Clay 4	8	Aquitard	Quaternary meltwater clay and clay till	Buried valleys	16.0 m	129 m	12.9 m	16.0 m	24.0 m	48.0 m	9.1
Quaternary Sand 5	9	Aquifer	Quaternary varying layers, primarily sand	Buried valleys	19.0 m	167 m	16.7 m	19.0 m	28.5 m	57.0 m	9.8
Miocene Clay 1	10	Aquitard	Miocene mica clay	Erosional remnants mainly in the south and west	8.0 m	43 m	4.3 m	8.0 m	12.0 m	24.0 m	3.3
Miocene Sand 1	11	Aquifer	Miocene delta sand	Erosional remnants mainly in the south and west	10.0 m	57 m	5.7 m	10.0 m	15.0 m	30.0 m	3.4
Miocene Clay 2	12	Aquitard	Miocene mica clay	Erosional remnants mainly in the south and west	12.5 m	90 m	9.0 m	12.5 m	18.8 m	37.5 m	10.1
Paleogene Clay	13	Aquitard	Paleogene clays and marls	Regional, except one place where a buried valley has eroded down through the Paleogene.	20.0 m	291 m	16.7 m	20.0 m	30.0 m	60.0 m	2.1
Limestone	14		Danian limestone/ upper cretaceous chalk	Entire modeling area							

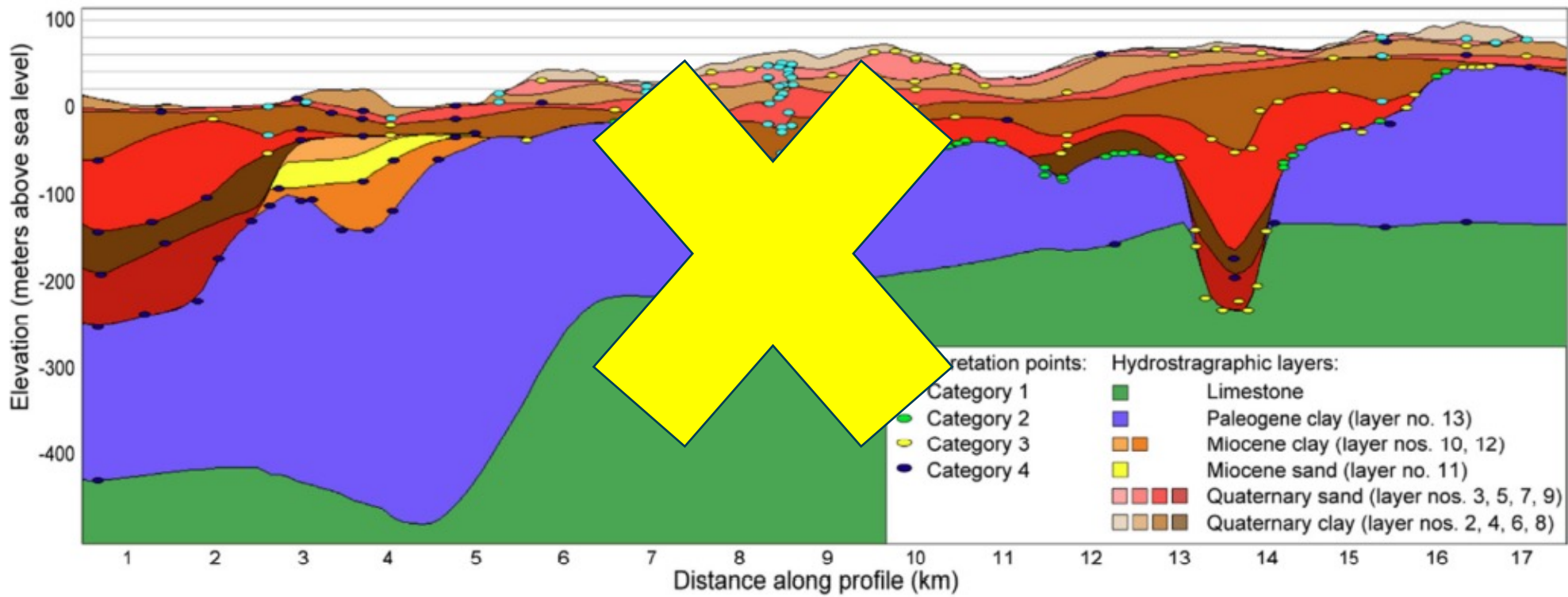
Simulere lag indenfor usikkerhed på tolkningspunkterne

Madsen et al., 2022

- Gaussisk simulering for hvert lag indenfor de kvantificerede usikkerheder
- Lagene er lavet til en 3D model ved brug af de samme regler for lagkorektion som den originale model
- Mode modellen for 200 realisationer viser usikkerhedsbæltet langs laggrænserne (svage farver)



Eksempel fra den nationale model (FOHM modellen)



Kvantificerede usikkerheder: Nationalt koncept

Geologisk kompleksitet (Sandersen, 2021)

- Hvor langt væk kan vi ekstrapolere data?

Geofysiske data

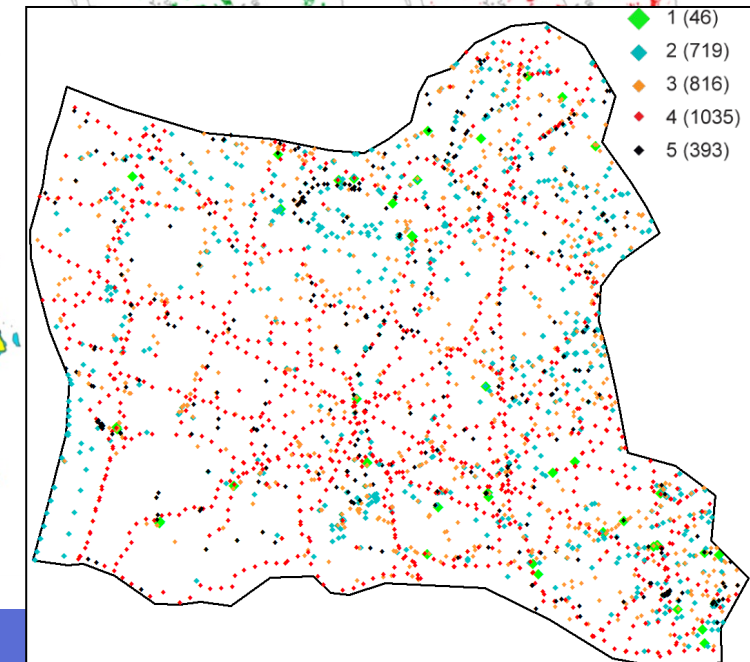
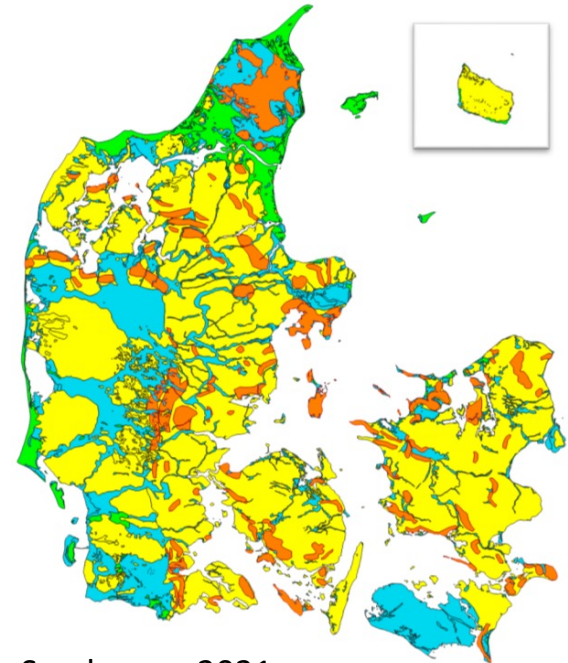
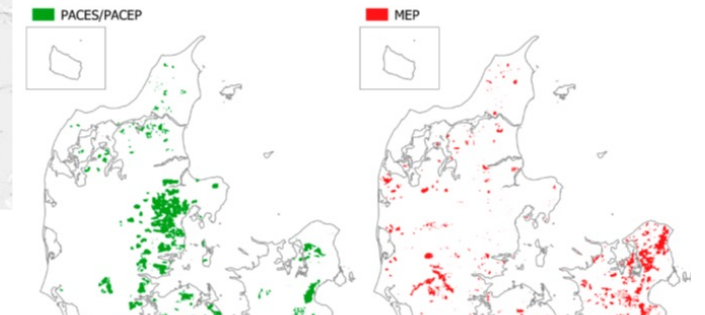
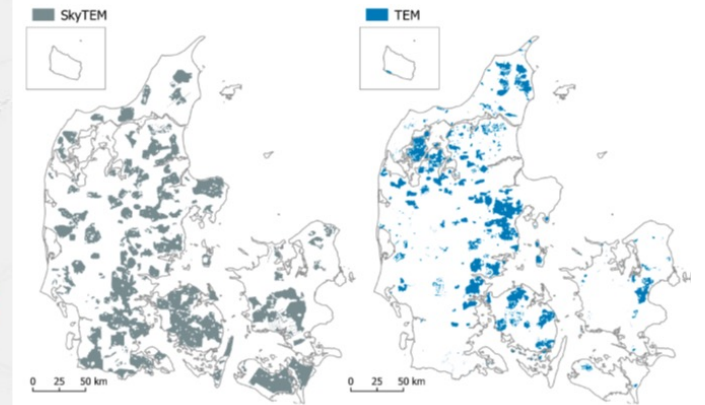
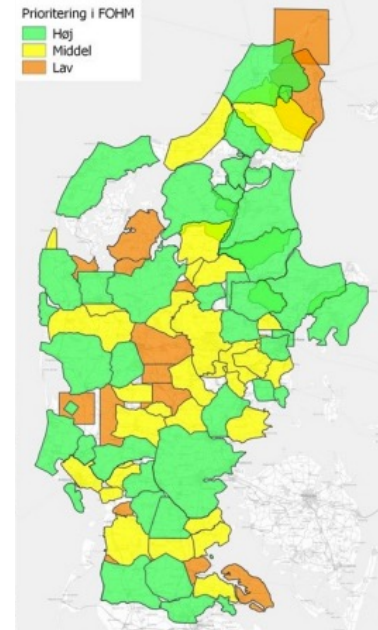
- Hvilke typer geofysik er der brugt i modelleringen (timing af data ift. Model)
- Hvad er DOI, typisk opløselighed af lag etc.
- Vægtning af usikkerheden ift. typisk tykkelse af inverterede lag

Borings data (snapping og kvalitet af data)

- Vægtning af usikkerhed som funktion af dybde og boringsrating (MST's)
- Dybde af laggrænse ift. boring

Kvalitet af den originale model

- Skalering af usikkerheder ud fra MST's vurderinger af de originale modeller



Kvantificerede usikkerheder: Nationalt koncept

Boringer – usikkerhed stiger med dybden:

- Kvalitet 1 : 3%
- Kvalitet 2: 5%
- Kvalitet 3: 9%
- Kvalitet 4: 15%

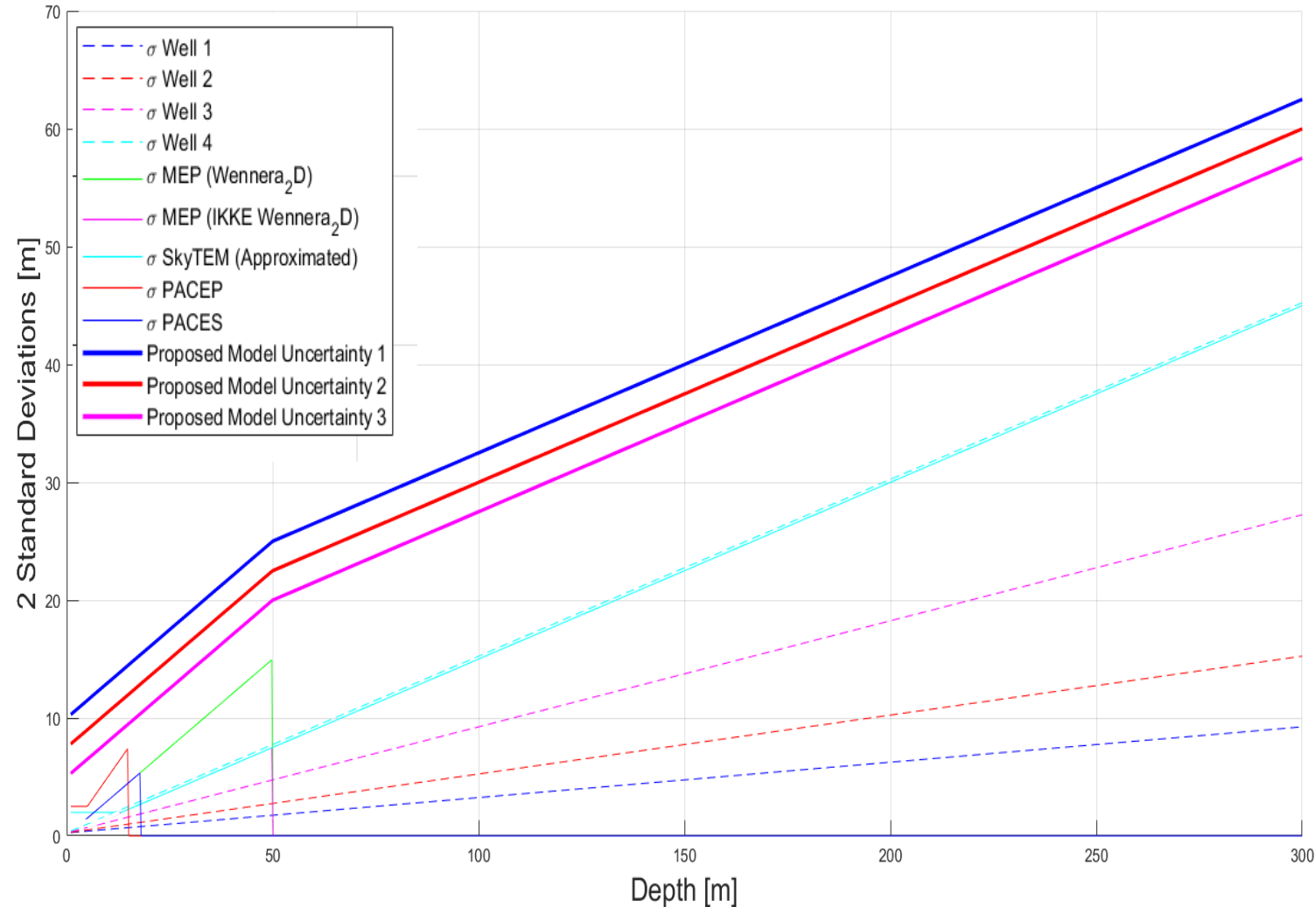
Geofysik:

SkyTEM ~ svarer omtrent til de mest usikre boringer

MEP → giver information til ca. 50 m

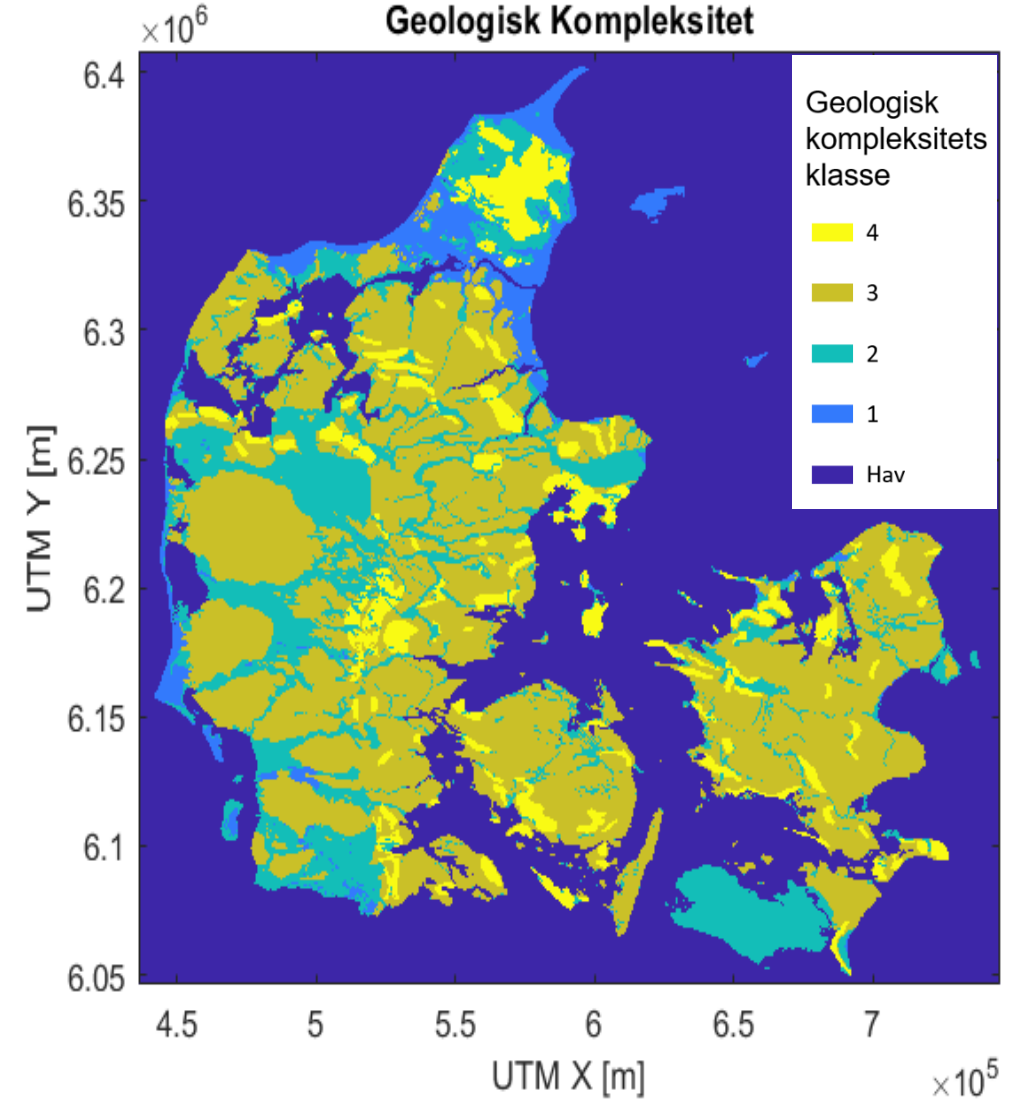
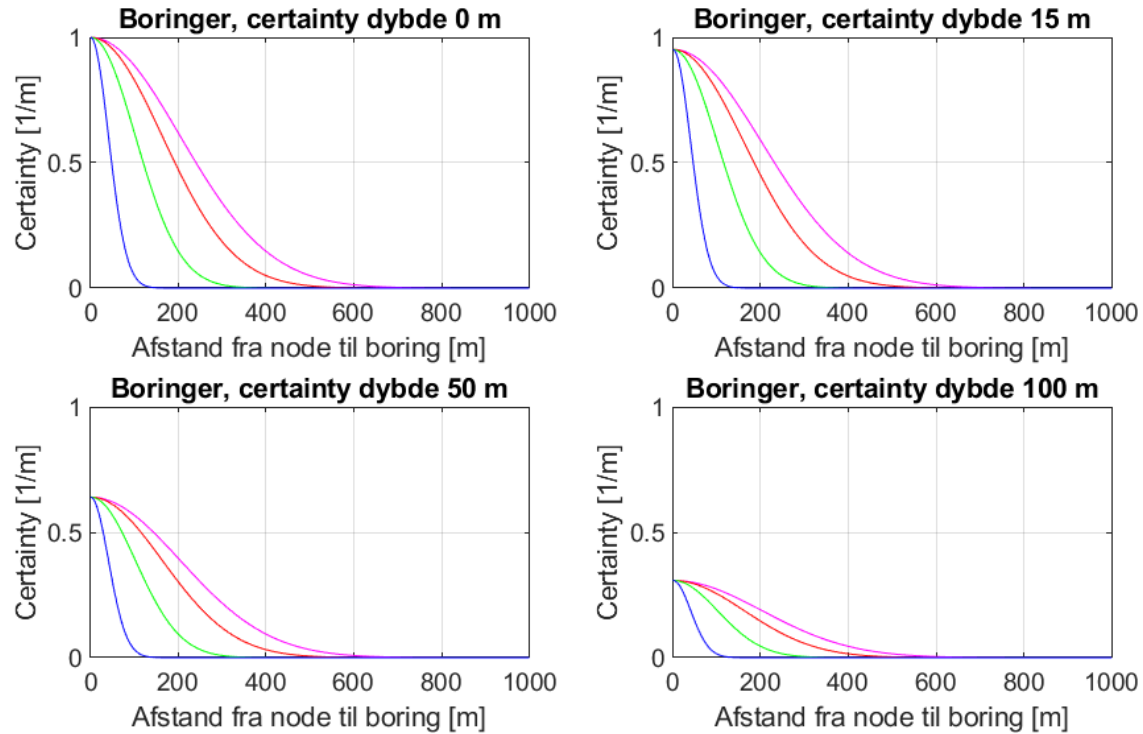
PACES/PACEP → giver information til ca. 20 m

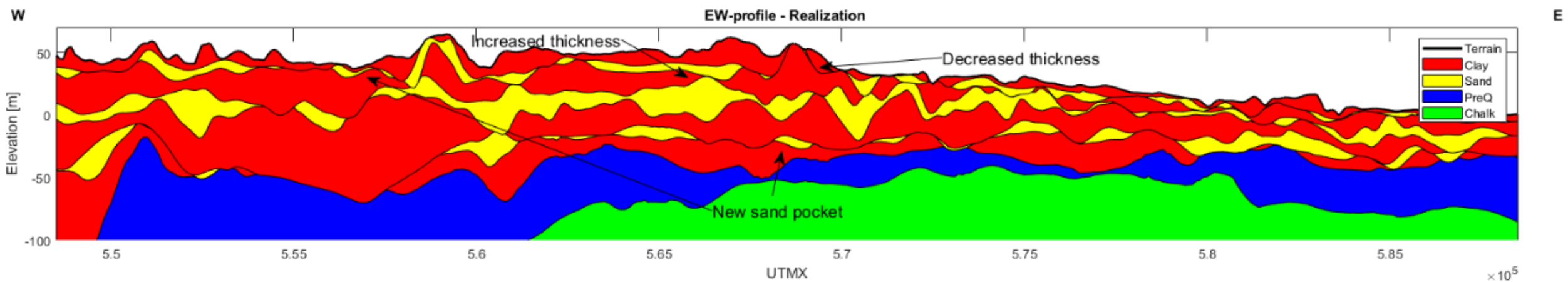
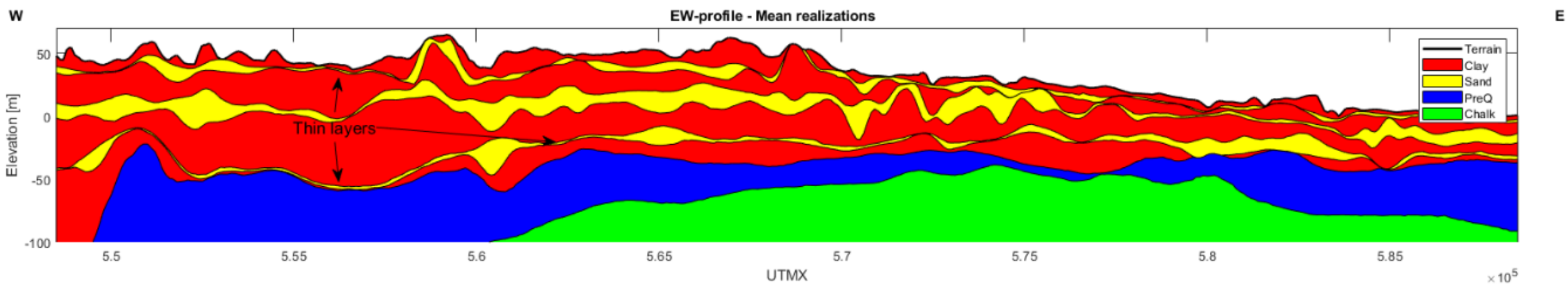
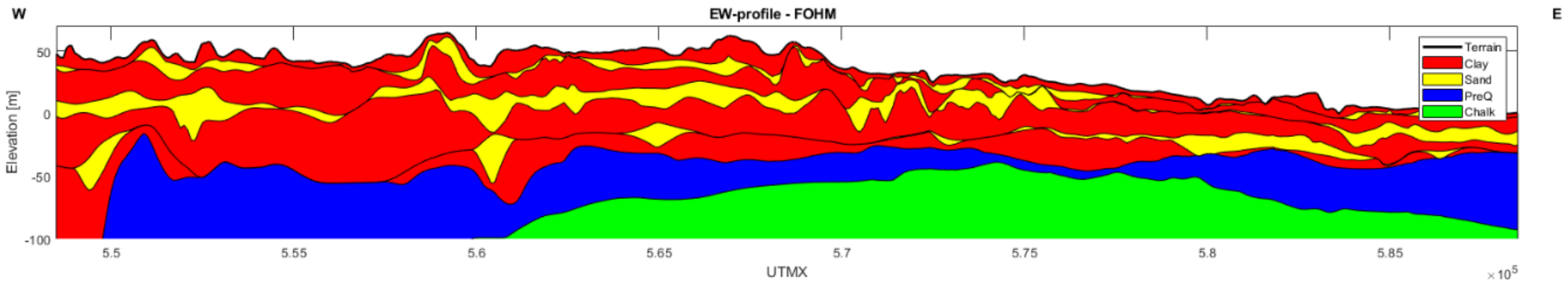
Modelusikkerheden angiver et maks for usikkerheden baseret på pålidelighed af modellen



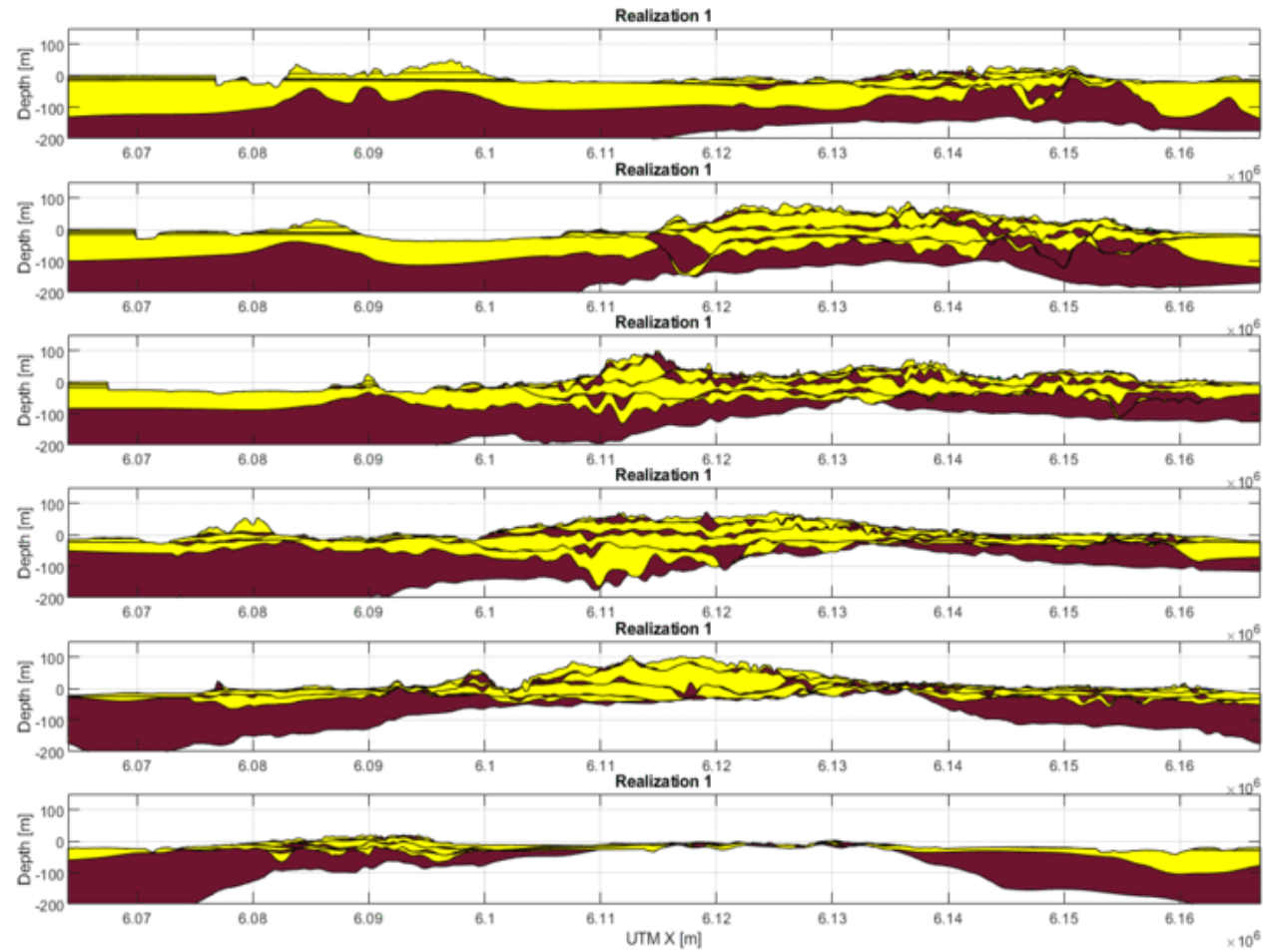
Kvantificerede usikkerheder – lateral udbredelse

- Sikkerheden aftager afstanden til datapunktet – hurtigst i områder med stor geologisk kompleksitet (blå kurve)



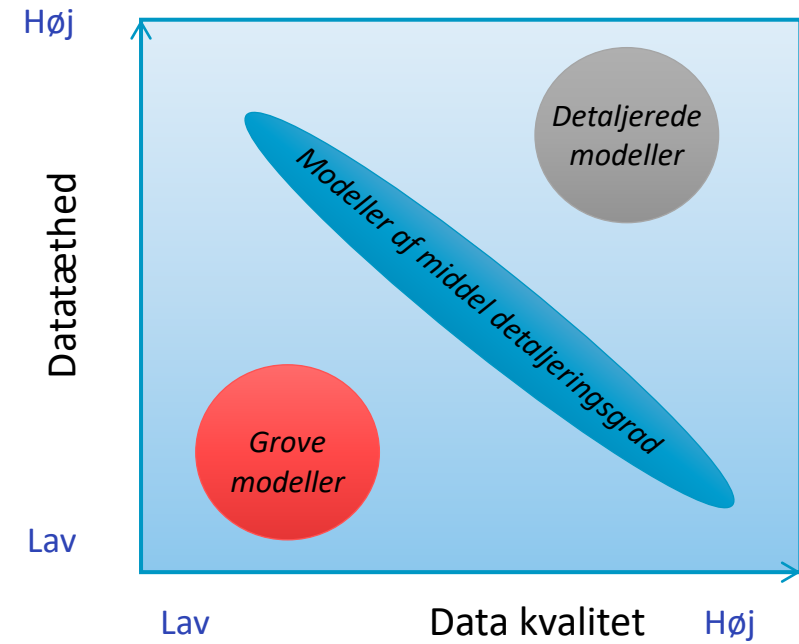
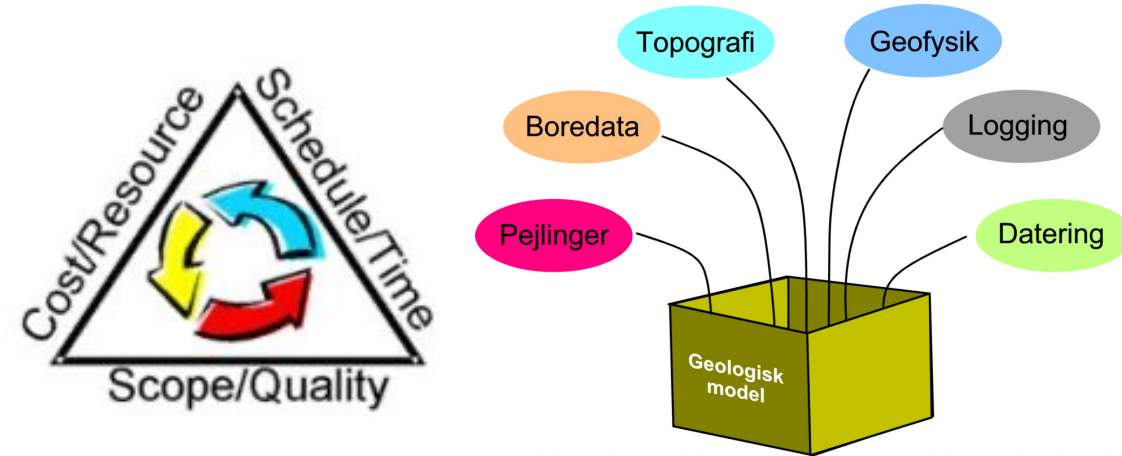


Mange modeller...på Fyn

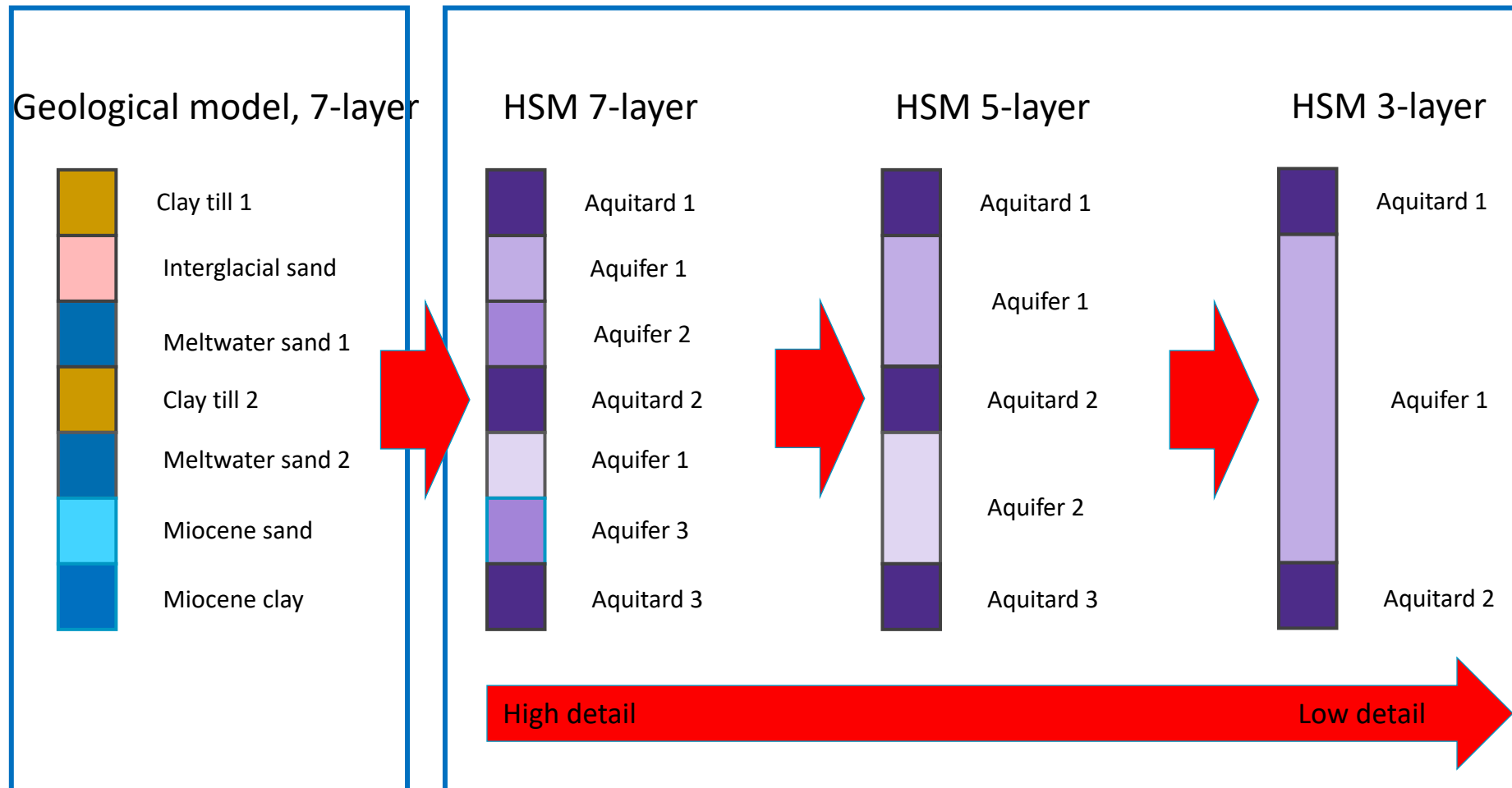


Opsummering:

- Usikkerheden af en geologisk model kommer fra rigtig mange valg i det geologiske modellerings workflow
- Det er vigtigt at identificere og prioritere usikkerhederne i workflowet
- Det er umuligt at lave en fuldstændig kvantificering af usikkerheden i en geologisk model
- Geologisk usikkerhed kan vurderes og anvendes i grundvandsmodellering vha. geostatistisk modellering
- Usikkerheden relaterer sig dog til en konkret type usikkerhed f.eks. usikkerheden på laggrænsers placering med udgangspunkt i en bestemt konceptuel model

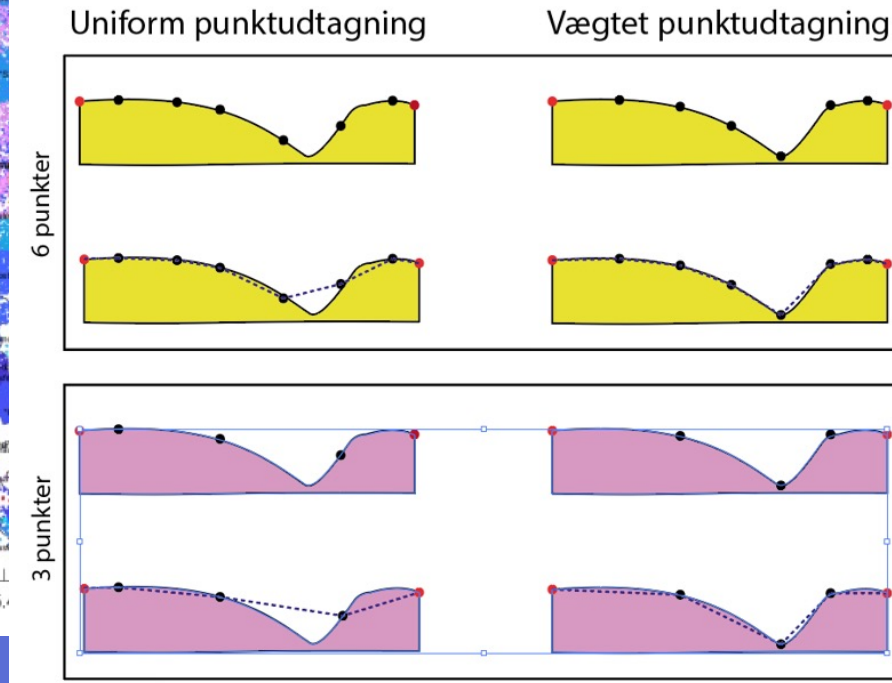
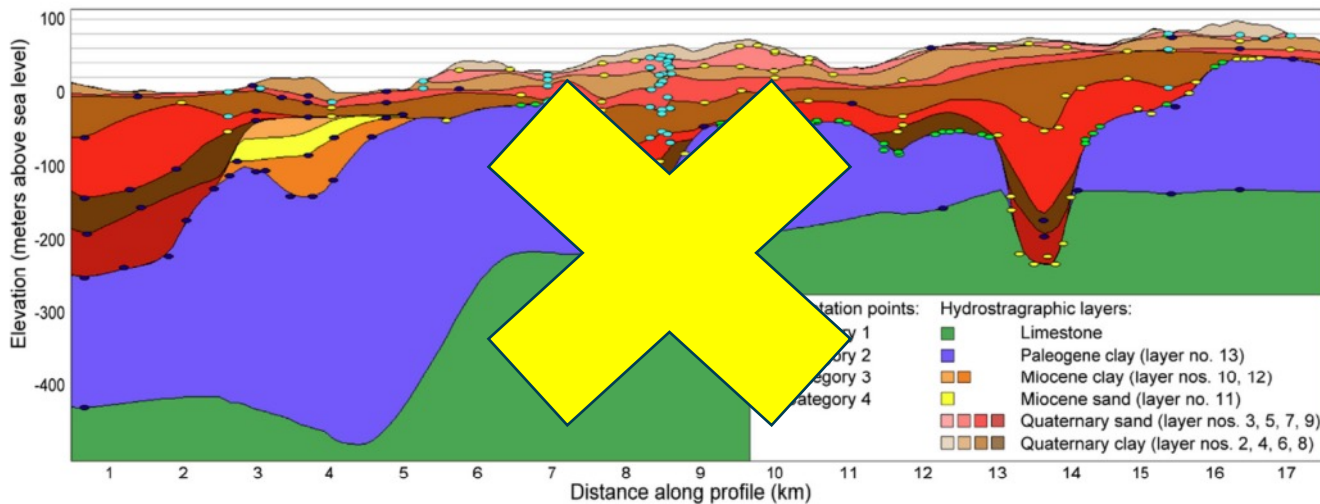


Perspektivering – simplificering af geologiske modeller ved brug i grundvandsmodellering



Heterogen punktsætning i FOHM – krævede alternativ strategi

- FOHM modellen består oprindeligt af mere end 150 forskellige modeller, hvor tolkningsusikkerheder typisk er tabt. Forskellig tolkningsstrategi og deraf punkttæthed.
- Derfor behov for at udtage punkter fra fladen for bedst at simulere den endelige model.
- Vægtet punktudtagning for at fremelske geologiske strukturer



MST borings- kvalitetskode	GEUS borings- kvalitetskode	Beskrivelse af kriterier til forespørgsel
3	4	Der findes en litologisk beskrivelse, ikke DAPCO boring
4	3	+ Litologisk beskrivelse fra GEUS jordprøvelab
5	3	+ boringsdybde registreret
6	2	+ mindst prøve per 2 m
7	1	+ boremetode er snegl