



SINTEF

Lavtemperatur geotermisk energi

Undergrunnen som varmekilde og varmelager

Øystein Klemetsdal, Anvendt beregningsvitenskap, SINTEF Digital
Seniorteknologenes høstkonferanse: Energi, 22. oktober 2024, Oslo

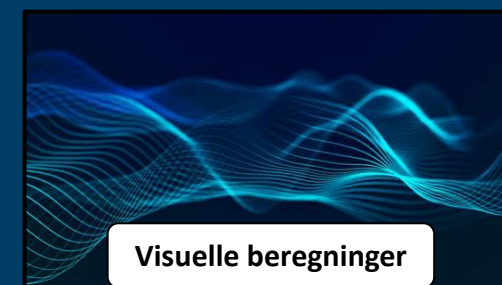
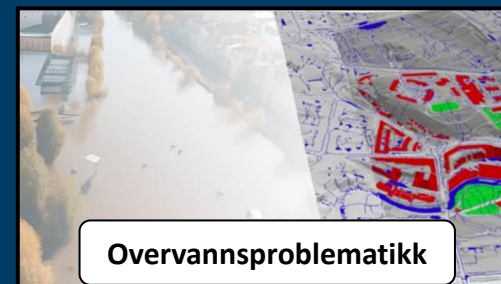
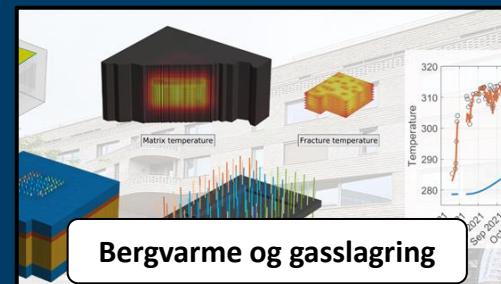
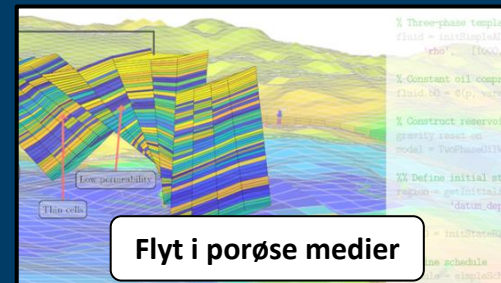
Teknologi for et bedre samfunn

Anvendt beregningvitenskap

SINTEF Digital, Matematikk og kybernetikk

Ekspertise: Utvikling av avanserte, databaserte metoder og algoritmer for modellering av komplekse fysiske systemer

- 19 fast ansatte forskere (PhD i matematikk/fysikk/geofysikk)
 - Flere tilknyttede PhD- og masterstudenter
- 20+ år engasjement innen industriell og akademisk forskning
- Flere publikasjoner i ledende journaler og konferanser årlig
- 15+ års erfaring med utvikling av høykvalitets åpen kildekode med hudrevis av brukere verden over
- 20+ års erfaring med maskinvareakselerasjon (GPU etc.)





SINTEF

Hvorfor bergvarme?





SINTEF

Hvorfor skal vi bry oss om bergvarme?

Alltid på

24/7, 365 dager i året
Uavhengig av vær/vind

Overalt

Kan utvinnes hvor
som helst – ofte rett
under sluttbrukeren

Arealeffektivt¹

STRØMPRODUKSJON
(m²/GWh)

Kull: 3 642
Sol: 3 237
Vind: 1 335
Bergvarme: 404

DIREKTE BRUK

Kan integreres i/under
bygninger

Lavt utslipp²

STRØMPRODUKSJON
(g CO₂/KWh)

Kull: 1000
Gass: 450
Bergvarme: 122

DIREKTE BRUK

Neglisjerbare utslipp

Fornybart

Tilføres varme fra
jordens kjerne
(6000 °C = soloverflaten!)

Opprettholdes av
naturlige radioaktive
prosesser

Øvre del (< 200 m)
varmes primært opp
av sola

¹ GeoVision: Harnessing the heat beneath our feet. No. DOE/EE-1306. US Department of Energy, Washington, DC (United States), 2019

² Bertani and Tahin (2002). Geothermal power generating plant CO2 emission survey. IGA News



SINTEF

Hvorfor varmelagring?

- Norge: > 40% av strømforbruket (140 TWh/år) til oppvarming¹
- Samtidig utgjør årlig spillvarme fra norsk industri ca 20 TWh¹
- Noe benyttes til oppvarming i fjernvarmeanlegg, men på grunn av tidvis stor forskjell mellom tilbud og etterspørsel, fyres det i stor grad for kråka
- Enormt potensiale i å lagre opp denne energien i perioder med lav etterspørsel for senere bruk

¹ HighEFF Centre for an Energy Efficient and Competitive Industry for the Future, Annual report 2021



Teknologi for et bedre samfunn



SINTEF

Hvorfor varmelagring?

- Norge: > 40% av strømforbruket (140 TWh/år) til oppvarming¹
- Samtidig utgjør årlig spillvarme fra norsk industri ca 20 TWh¹
- Noe benyttes til oppvarming i fjernvarmeanlegg, men på grunn av tidvis stor forskjell mellom tilbud og etterspørsel, fyres det i stor grad for kråka
- Enormt potensiale i å lagre opp denne energien i perioder med lav etterspørsel for senere bruk

Mulig løsning: benytte grunnfjellet som termisk batteri

¹ HighEFF Centre for an Energy Efficient and Competitive Industry for the Future, Annual report 2021



Teknologi for et bedre samfunn



SINTEF

Tekniske løsninger

Tre hovedretninger:

1. Lukkede systemer – vann strømmer gjennom rør i bakken
2. Åpne systemer – vann strømmer gjennom geologiske akviferer
3. Forbedrede systemer – vann strømmer gjennom sprekkenettverk laget ved hjelp av hydraulisk stimulering



SINTEF

Tekniske løsninger

Tre hovedretninger:

1. Lukkede systemer – vann strømmer gjennom rør i bakken
2. Åpne systemer – vann strømmer gjennom geologiske akviferer
3. Forbedrede systemer – vann strømmer gjennom sprekkenettverk laget ved hjelp av hydraulisk stimulering

Beste løsning avhenger av en rekke faktorer (størrelse, temperatur, responstid, økonomi, geologi, grunnvannskjemi, osv.) og er **unik for hvert system**



SINTEF

Lukkede systemer

Varmt vann sirkulerer gjennom én eller flere kollektorslanger (U-rør/koaksiale rør)

Indirekte varmeveksling med berget

Moden teknologi, i bruk flere steder i Norge i dag

Full kontroll på fluidet som sirkulerer

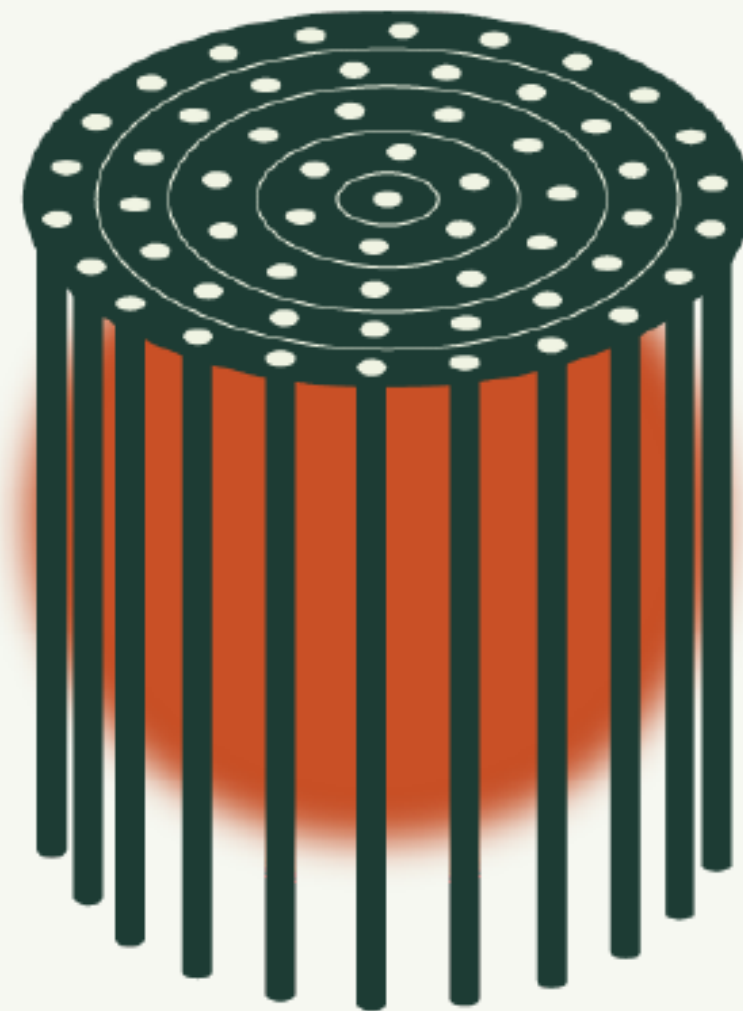
Forutsigbart vedlikehold

Lite effektiv varmeoverføring

$$\frac{Areal}{Volum} = \frac{2\pi rL}{\pi r^2 L} = \frac{2}{r} \quad (L = \text{brønnlengde}, r = \text{radius})$$

→ krever gjerne stort antall brønner (typisk > 100)

Krever rette brønnbaner



Figur: AsplanViak



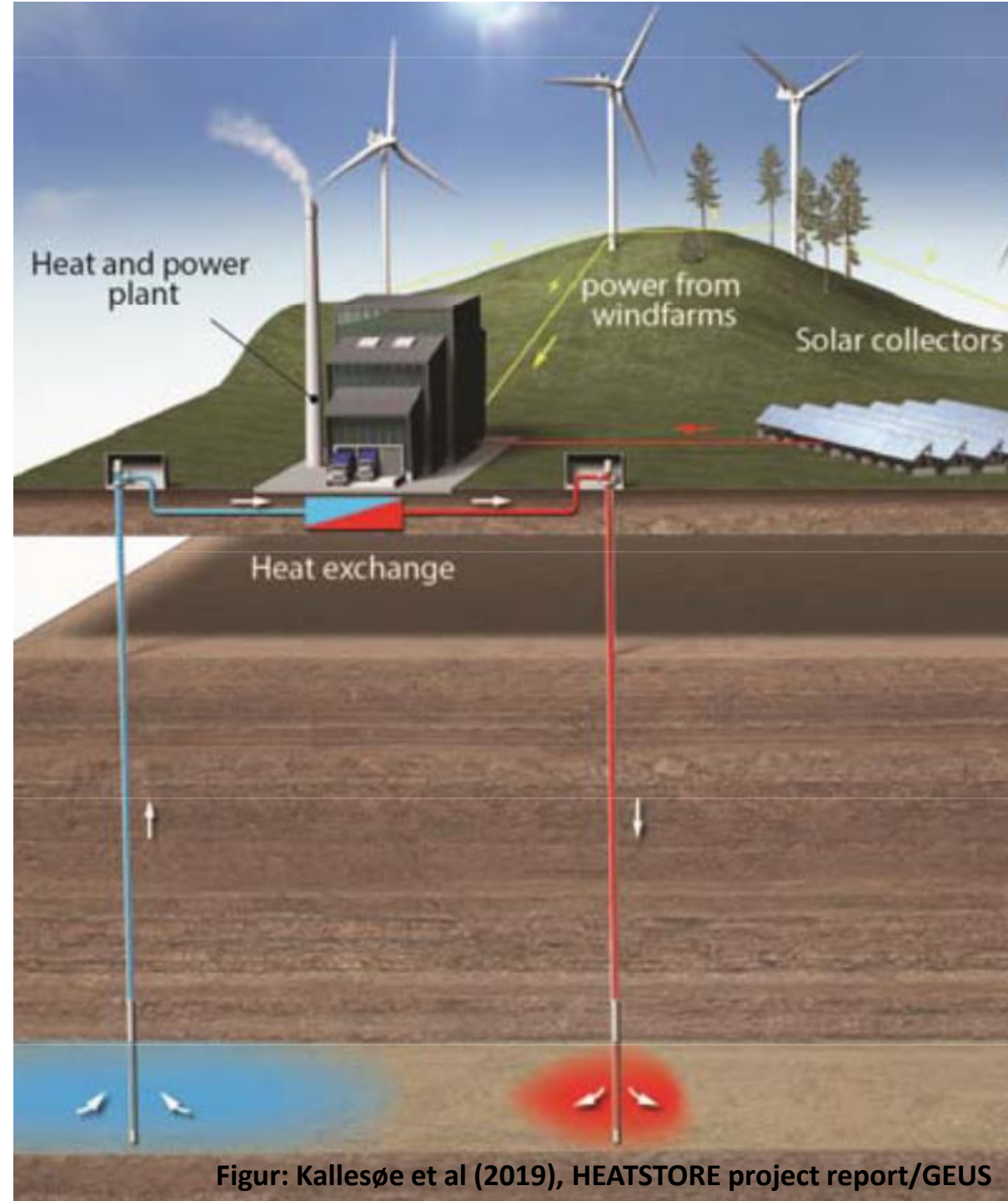
SINTEF

Åpne systemer

Varmt vann produseres direkte fra akviferer
Trykket balanseres ved hjelp av sekundære brønner

Krever få brønner (to kan være tilstrekkelig)
Skalerbart – potensielt enorme volumer tilgjengelig

Bruker grunnvannet direkte – kan påvirkes av geokjemien (korrosjon, tilstopping, osv.)
Avhenger av tilstrekkelig hydraulisk konduktivitet (porøs sandstein/kalk, sprekker/forkastninger, e.l.)
Stor usikkerhet rundt geologi



Figur: Kallesøe et al (2019), HEATSTORE project report/GEUS



SINTEF

Forbedrede systemer

Forbedret konduktivitet ved oppsprekking/reaktivering av eksisterende sprekknnettverk

Vann sirkulerer gjennom sprekknnettverket og utveksler varme med berget – likt vingene på en varmeveksler

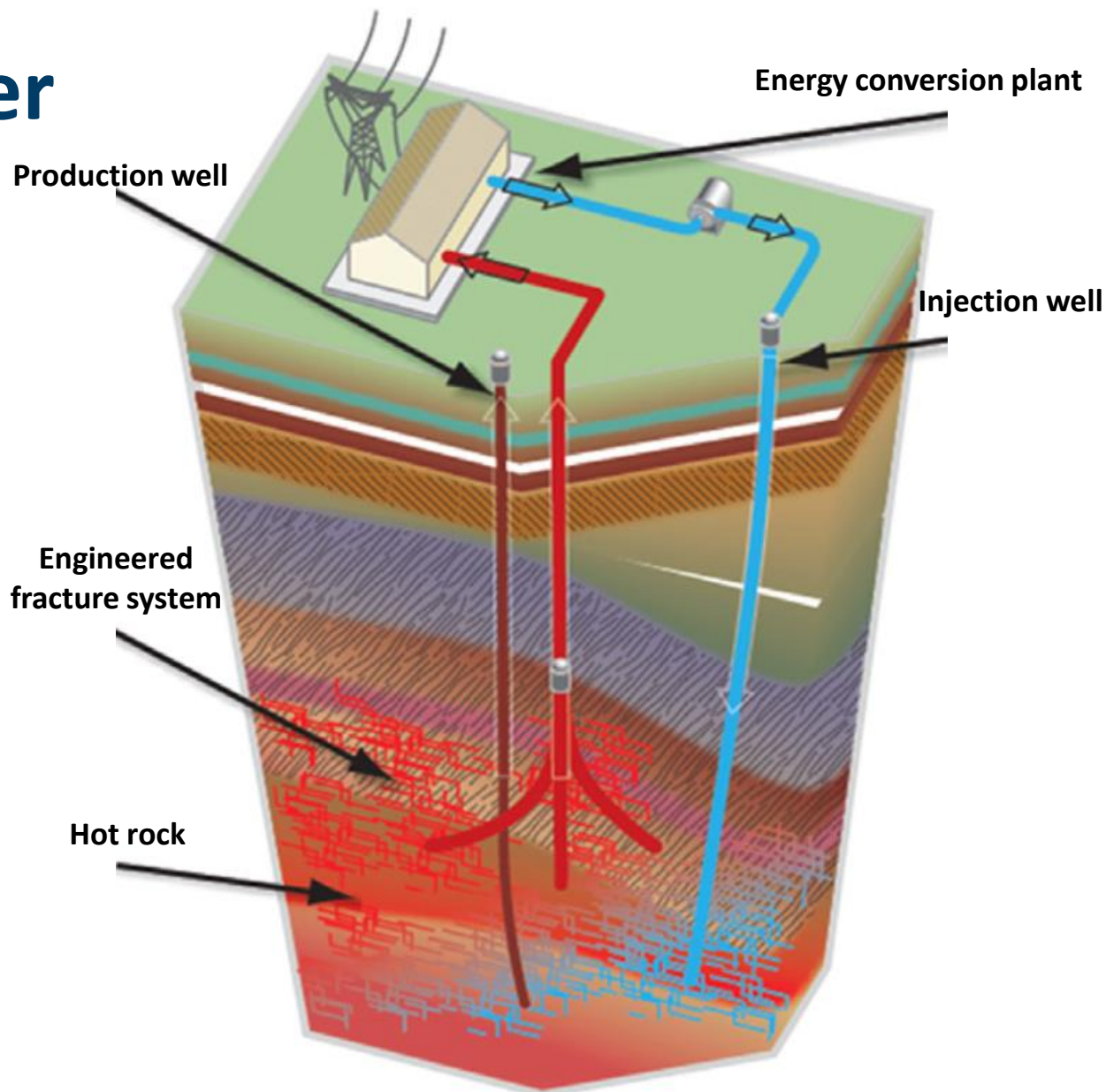
Optimal varmeoverføring

$$\frac{\text{Areal}}{\text{Volum}} = \frac{A_s}{A_s d_s} = \frac{1}{d_s} \quad (A_s = \text{sprekkareal}, d_s = \text{sprekkåpning})$$

Åpner opp for å utnytte bergvarme (nesten) overalt

Deler flere av utfordringene med åpne systemer

Potensielt risikabelt



Bergvarmeanlegg



Fjell skole GeoTermos

Varmelagring fra solvarme

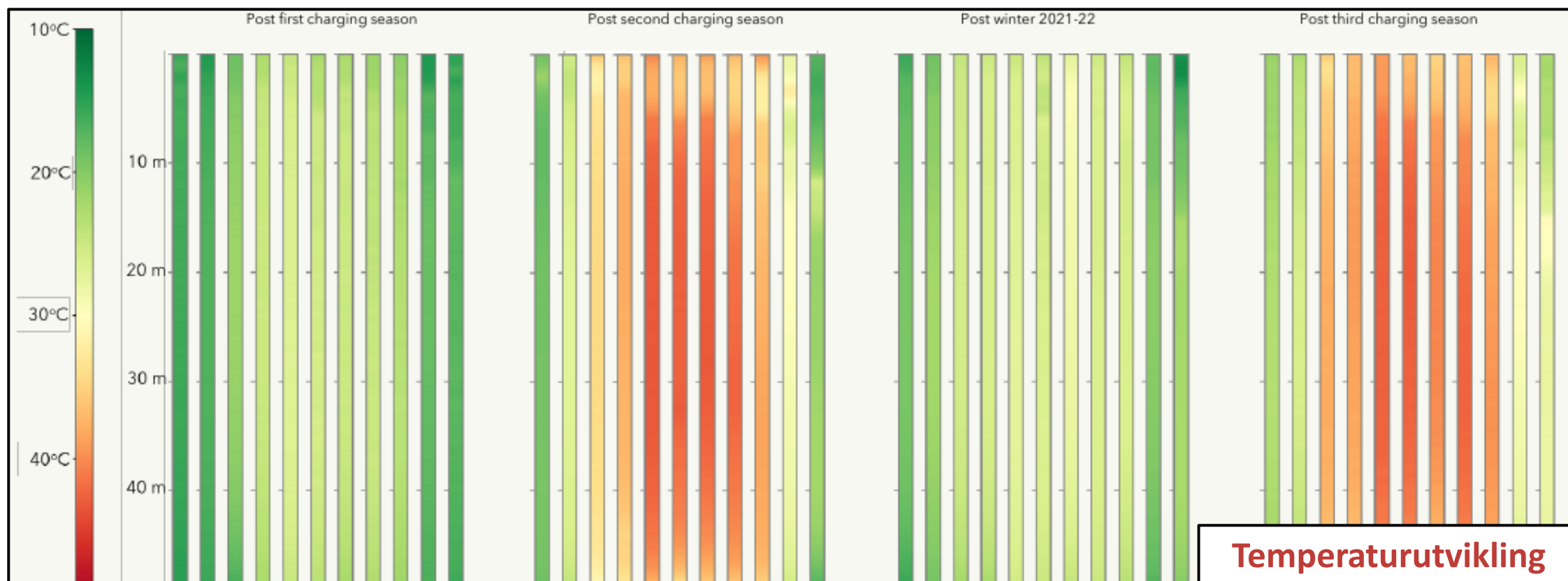
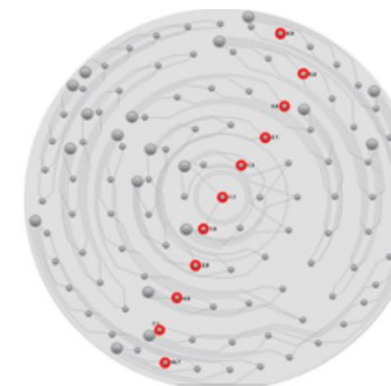
- Fjell skole i Drammen
 - Bygget i 2018/2019, 10 000 m²
- Nøkkelinformasjon
 - Lagring av solvarme (lukket system)
Borehole thermal energy storage (BTES)
 - 100 brønner, dybde: 50 m, avstand: 4 m
 - Prosjektert av AsplanViak, Thermoconsult, Båsum, og Drammen Eiendom
- Produksjonsmål: 350 MWh/år
 - Lav-temperatur gulvvarme: 23-28 °C
 - Varmepumpe kjøres på sommeren for å lagre på tilstrekkelig temperatur



Illus: Drammen Eiendom

Fjell skole GeoTermos

Varmelagring fra solvarme



Figur: AsplanViak

Skattøra varmesentral

Varmelagring fra avfallsforbrenning

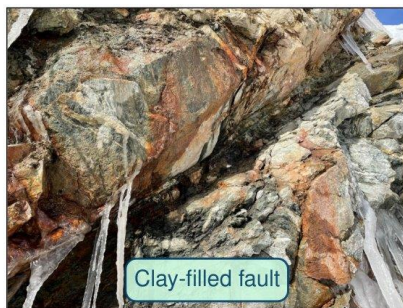
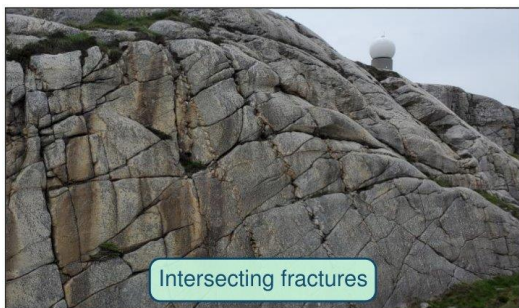
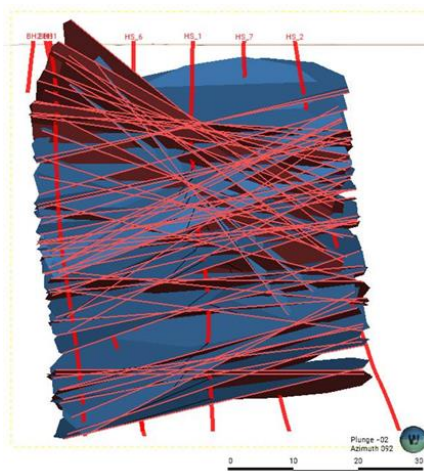
- Avfallsforbrenning på Skattøra i Tromsø
 - Leverer varme til byens fjernvarmenett
- Nøkkelinformasjon
 - Sesonglagring av overskuddsvarme
 - Lagring: 20 GWh/år, minst 100 °C
 - Produksjon: 10 GWh/år, minst 6 MW/65 °C
 - Prosjektert av Ruden AS
- Brønnpark
 - Forbedret system
 - Én sentral injeksjonsbrønn, omkranset av åtte produksjonsbrønner
 - Dybde: 300 m
 - Hydraulisk stimulering for å sprekke opp og reaktivere eksisterende sprekker



Skattøra varmesentral

Varmelagring fra avfallsforbrenning

Svært kompleks geologi med kryssende sprekkenettverk og dels leirefylte sprekker/forkastninger



Figurer: Eivind Bastesen/Ruden AS



Wesselkvartalet

Kombinert varmelagring og produksjon

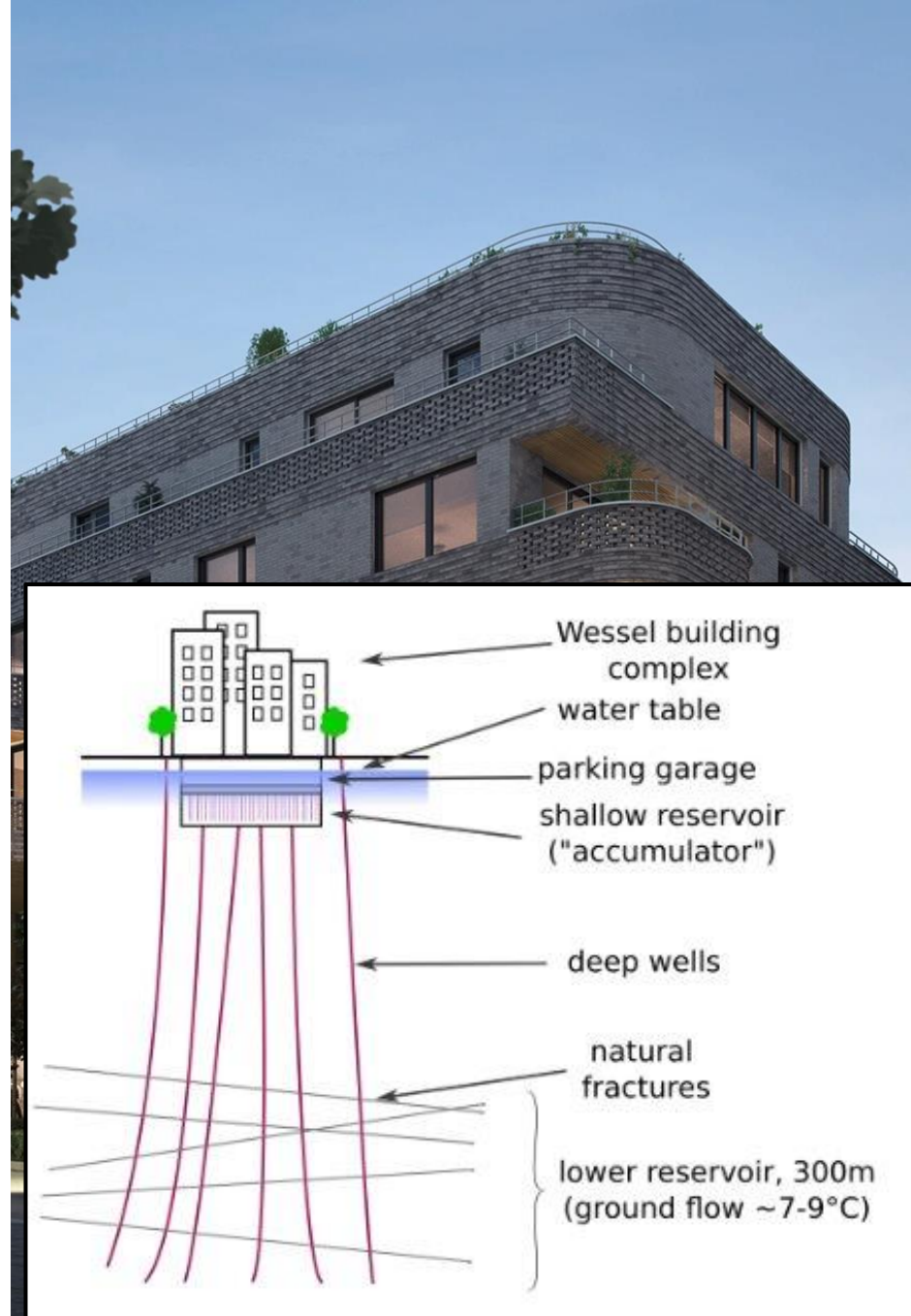
- Kombinert bolig- og næringsbygg i Asker
- Konfigurasjon
 - Åpent system
 - Tre reservoarer: forskjellig dybde, svært ulike egenskaper
 - Mer enn 100 brønner, koblet sammen i grupper
 - Oppvarming: 30 000 m² eiendom
 - Snøsmelting: 30 000 m² vei/gate
- Produksjonsmål (2029/2030)
 - Lagring: vann på ca 40 °C varmet opp fra 20 °C
 - Produksjon: 12 GWh/år, Topplastkapasitet: 13,5 MW
 - Status 2023/2024: 2.5 GWh
(ikke alle sluttbrukere tilkoblet enda)



Wesselkvartalet

Kombinert varmelagring og produksjon

- Kombinert bolig- og næringsbygg i Asker
- Konfigurasjon
 - Åpent system
 - Tre reservoarer: forskjellig dybde, svært ulike egenskaper
 - Mer enn 100 brønner, koblet sammen i grupper
 - Oppvarming: 30 000 m² eiendom
 - Snøsmelting: 30 000 m² vei/gate
- Produksjonsmål (2029/2030)
 - Lagring: vann på ca 40 °C varmet opp fra 20 °C
 - Produksjon: 12 GWh/år, Topplastkapasitet: 13,5 MW
 - Status 2023/2024: 2.5 GWh (ikke alle sluttbrukere tilkoblet enda)



Xylem Water Solutions

Varmelagring fra spillvarme

- Lagring av spillvarme fra Xylem ABs produksjonsanlegg i Emmaboda, Sverige
- Konfigurasjon
 - Lukket system
 - 140 BTES-brønner i rektangulært mønster
 - Dybde: 150 m, avstand: 4 m
 - Ett av de største BTES-anleggene i verden
- Produksjonsmål vs. **faktiske resultater**¹
 - Lagring: 3,6 GWh/år, 60 °C (**2,25 GWh/år, ≤ 44 °C**)
 - Produksjon: 2,5 GWh/år, 55-40 °C (**0,43 GWh/år, 40-30 °C**)
 - Prosjektert gjenvinningsgrad: 70 % (**19 %**)
- Årsak til lav effekt
 - Langt lavere lagringstemperatur enn ventet (16 °C)
 - For lavt for fjernvarmenettet
 - Stor forbedring med varmepumpe (installert i 2018)

¹Nilsson og Rohdin (2019). *Performance evaluation of an industrial borehole thermal energy storage (BTES) project e Experiences from the first seven years of operation*. Renewable Energy. DOI: 10.1016/j.renene.2019.05.020



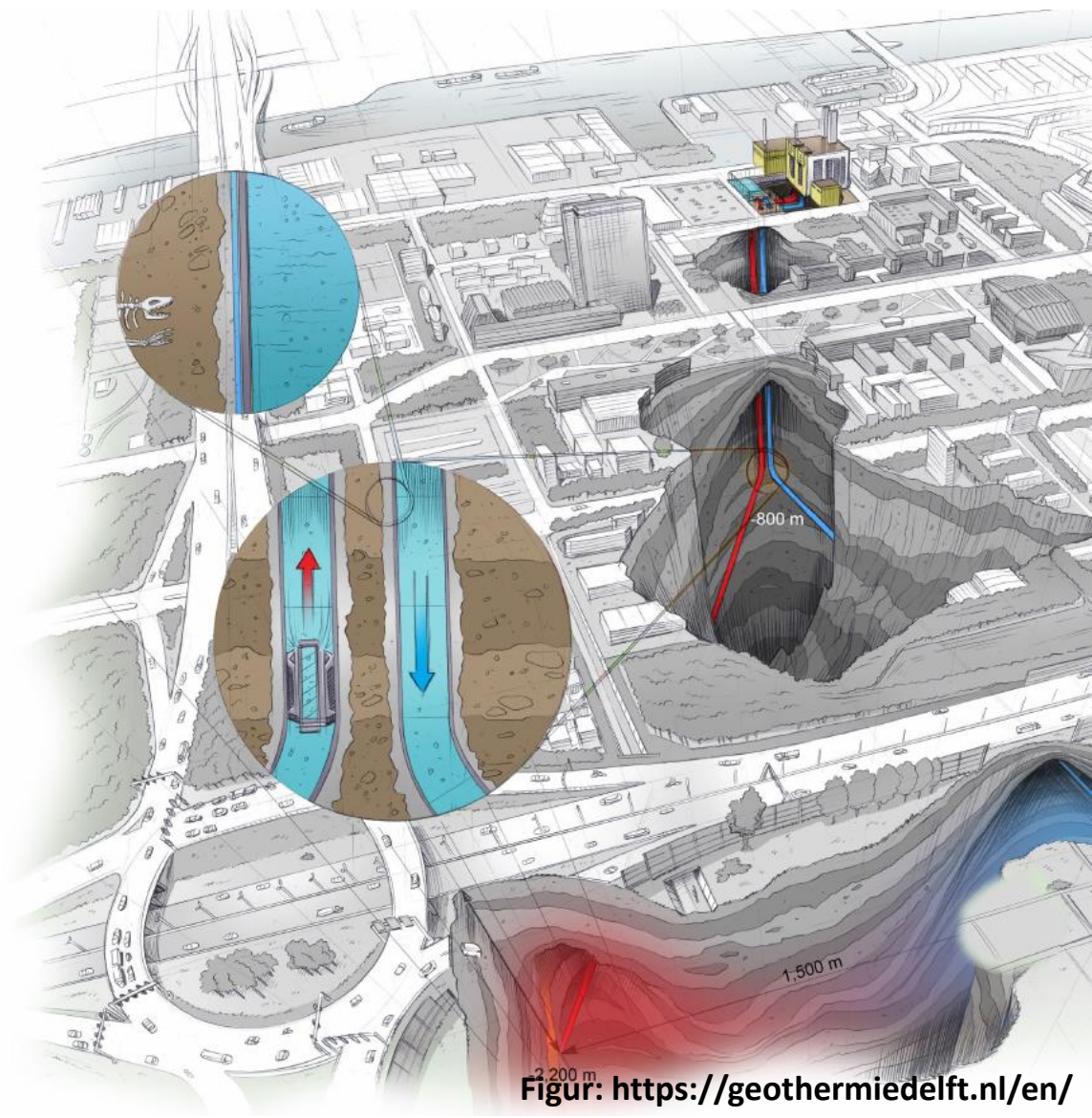
Delft Geothermal Project



Delft Geothermal Project

Varmeproduksjon

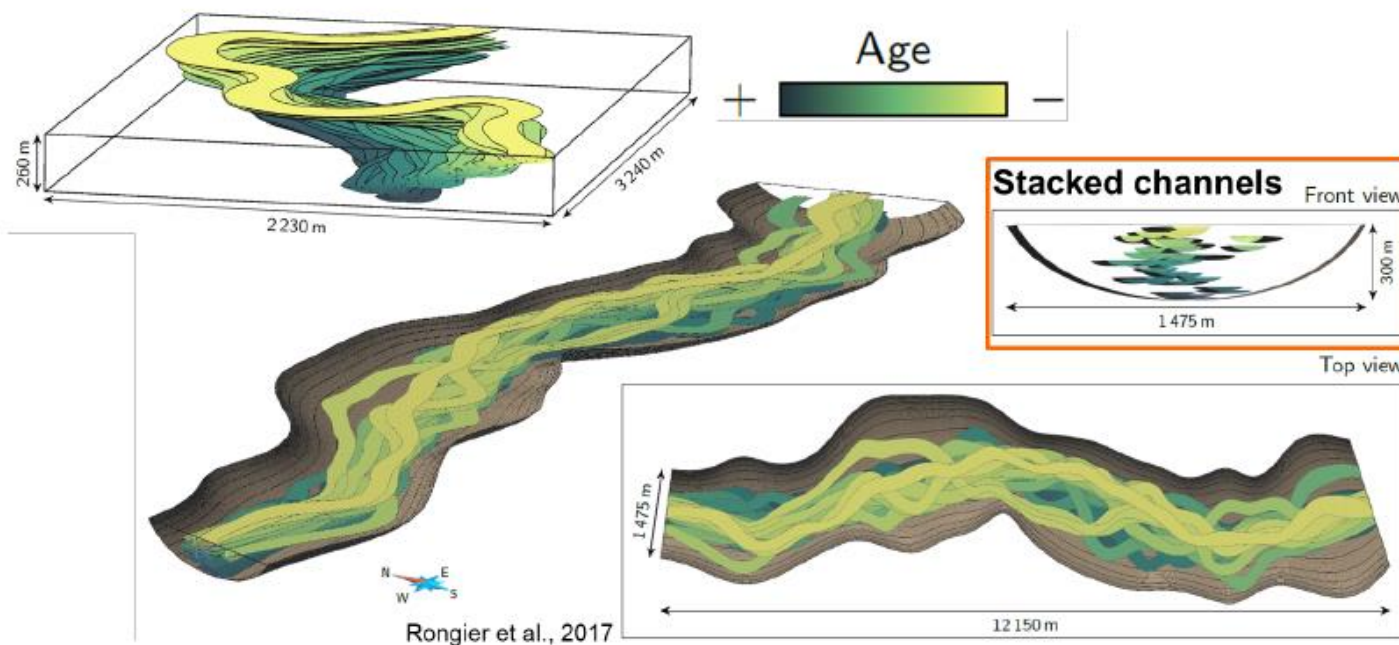
- Produksjonsanlegg for bergvarme på TU Delft campus i Nederland
 - Åpent system med to brønner
 - Dybde: 2200 m, avstand: 1500 m
- Mål 1: energi
 - Oppvarming til campus, studentboliger, og Delft by
- Mål 2: kunnskap
 - Hvor mye energi kan et slikt anlegg levere?
 - Hvordan overvåke bergvarmeanlegg best mulig?
 - Hvordan egner nye materialer seg til utvinning?



Delft Geothermal Project

Varmeproduksjon

Kompleks geologi med fluviale kanaler
– stor usikkerhet knyttet til faktisk utforming



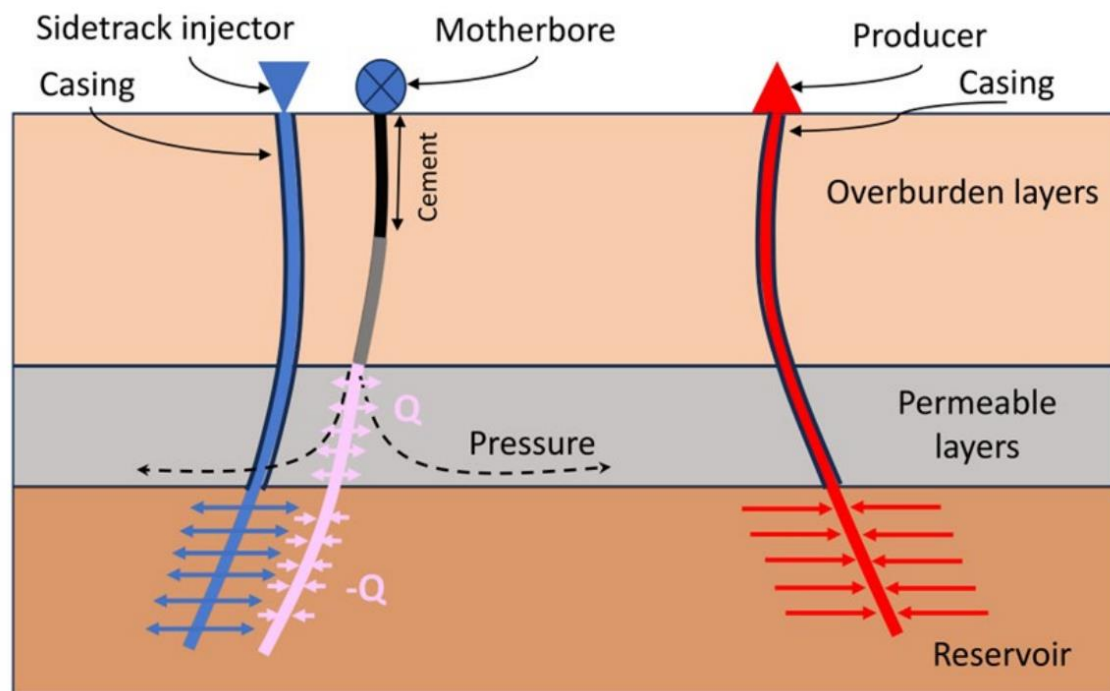
2650.0m

Delft sandstein

Delft Geothermal Project

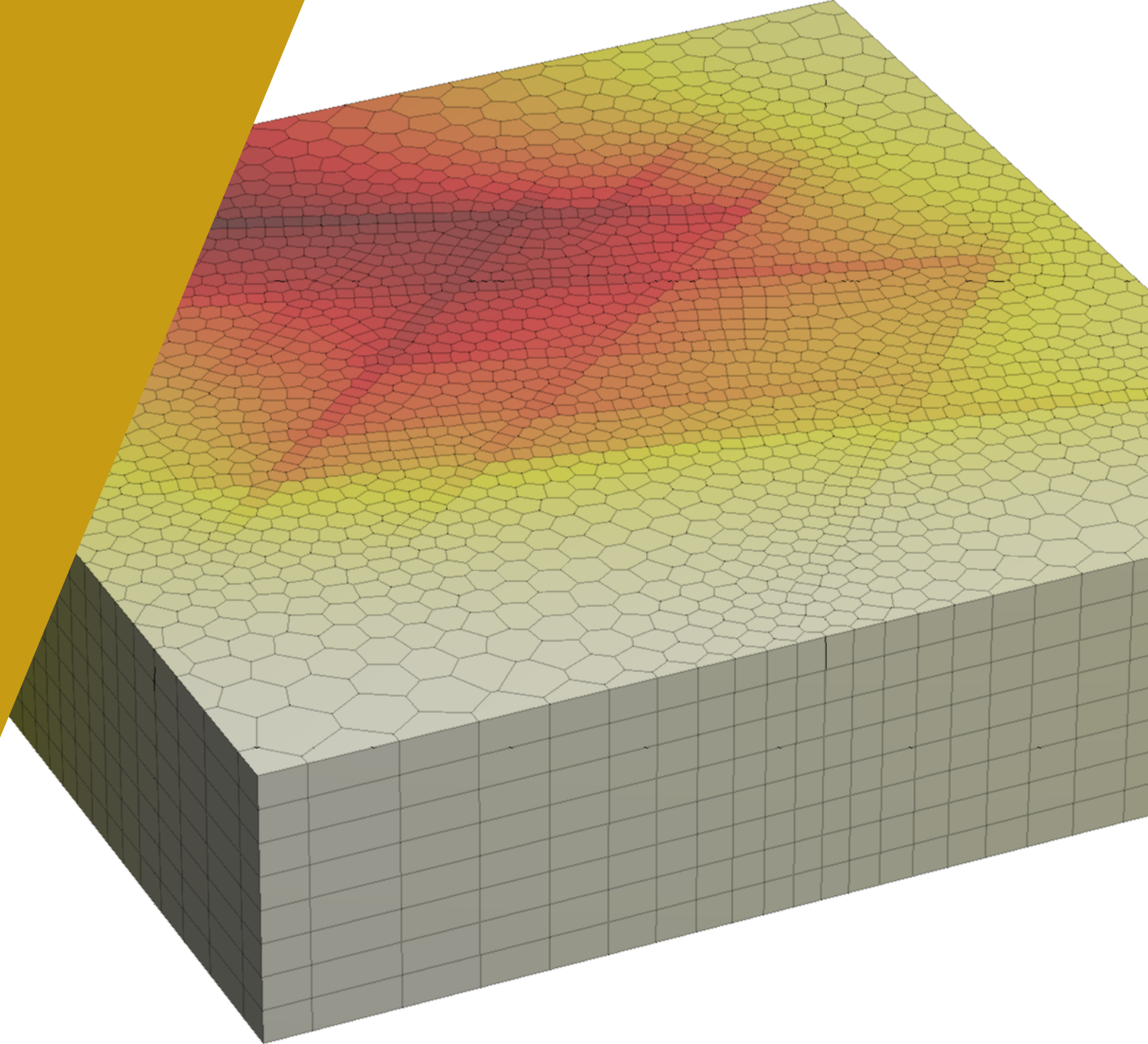
Varmeproduksjon

Tekniske utfordringer ved boring: brønnstrengen knakk, og ny brønn måtte bores



Delft sandstein

Simulering av bergvarme





SINTEF

Skreddersy simuleringsverktøy for olje og gass til geotermi

Mye av den samme fysikken som beskriver
oljereservoarer kan brukes til å beskrive bergvarme

- Vaskestrømning i porøse steinformasjoner (Darcyflyt), petrofysikk



SINTEF

Skreddersy simuleringsverktøy for olje og gass til geotermi

Mye av den samme fysikken som beskriver
oljereservoarer kan brukes til å beskrive bergvarme

- Vaskestrømning i porøse steinformasjoner (Darcyflyt), petrofysikk

... men mye er også ulikt

- Størrelse: oljereservoarer $\gg$ bergvarmeanlegg
- Topologi: oljereservoar = pannekake, bergvarmereservoar = rullekake
- Temperatureffekter: oljereservoarer er typisk termisk inert
→ temperatureffekter er lite interessante
- Vann er først og fremst brydsomt biprodukt i utvinning av olje/gass
→ lite detaljert modellering av vann
- I bergvarme lekker produktet (termisk energi) ut av brønnstrengen
hele veien til toppen
→ må tenke nytt om brønnmodellering

Typisk gittercelle i
oljereservoarmodell



Foto: Sergey Ashmarin (CC-BY-SA-3.0)



SINTEF

Skreddersy simuleringsverktøy for olje og gass til geotermi

Mye av den samme fysikken som beskriver
oljereservoarer kan brukes til å beskrive bergvarme

- Vaskestrømning i porøse steinformasjoner (Darcyflyt), petrofysikk

... men mye er også ulikt

- Størrelse: oljereservoarer $\gg$ bergvarmeanlegg
- Topologi: oljereservoar = pannekake, bergvarmereservoar = rullekake
- Temperatureffekter: oljereservoarer er typisk termisk inert
→ temperatureffekter er lite interessante
- Vann er først og fremst brysomt biprodukt i utvinning av olje/gass
→ lite detaljert modellering av vann
- I bergvarme lekker produktet (termisk energi) ut av brønnstrengen
hele veien til toppen
→ må tenke nytt om brønnmodellering

Et helt bergvarmelager
(potensielt)



Foto: Sergey Ashmarin (CC-BY-SA-3.0)



SINTEF

Skreddersy simuleringsverktøy for olje og gass til geotermi

Mye av den samme fysikken som beskriver
oljereservoarer kan brukes til å beskrive bergvarme

- Vaskestrømning i porøse steinformasjoner (Darcyflyt), petrofysikk

... men mye er også ulikt

- Størrelse: oljereservoarer $\gg$ bergvarmeanlegg
- Topologi: oljereservoar = pannekake, bergvarmereservoar = rullekake
- Temperatureffekter: oljereservoarer er typisk termisk inert
→ temperatureffekter er lite interessante
- Vann er først og fremst brysomt biprodukt i utvinning av olje/gass
→ lite detaljert modellering av vann
- I bergvarme lekker produktet (termisk energi) ut av brønnstrengen
hele veien til toppen
→ må tenke nytt om brønnmodellering



Numeriske metoder for reservoarsimulering

MATLAB Reservoir Simulation Toolbox (MRST)

- Hurtig prototyping av nye modeller/løsningsstrategier for flerfaseflyt i porøse medier
- Objektorientert, fullt deriverbar vha automatisk derivasjon, diskrete matematiske operatorer, osv.

Jutul og JutulDarcy

- Nyutviklet simulator utviklet i programmeringsspråket Julia
- Basert på samme prinsipper som MRST
- Implementert med fokus på ytelse – signifikant raskere

```
% Three-phase template model
```

```
fluid = initSimpleADIFluid('mu', [1, 5, 0]*  
    'rho', [1000, 700, 0]*kilogram/meter^3
```

```
% Constant oil compressibility
```

```
fl
```

```
%
```

```
gr
```

```
model
```

```
%% Define initial state
```

```
re
```

```
st
```

```
% Define schedule
```

```
schedule = simpleSchedule(timesteps, 'W',
```



MRST
TRANSFORMING RESEARCH



Jutul

Numeriske metoder for reservoarsimulering

Filosofi: åpen kildekode

- Det aller meste av kildekoden er åpent tilgjengelig for alle!
- **Samarbeid** – andre miljøer kan enkelt koble seg på og bidra
- **Synlighet** – stor markedsføringsverdi mot industrien
- **Kredibilitet** – metoder og resultater kan gås etter i sømmene
- Stor, internasjonal brukermasse fra industri og akademia
 - MRST: 200+ MsC/PhD-avhandlinger, 600+ eksterne journal- og konferanseartikler

```
% Three-phase template model
```

```
fluid = initSimpleADIFluid('mu', [1, 5, 0]*  
    'rho', [1000, 700, 0]*kilogram/meter^3
```

```
% Constant oil compressibility
```

```
fl
```

```
%
```

```
gr
```

```
model
```

```
%%
```

```
re
```

```
st
```

```
% Define schedule
```

```
schedule = simpleSchedule(timesteps, 'W', );
```

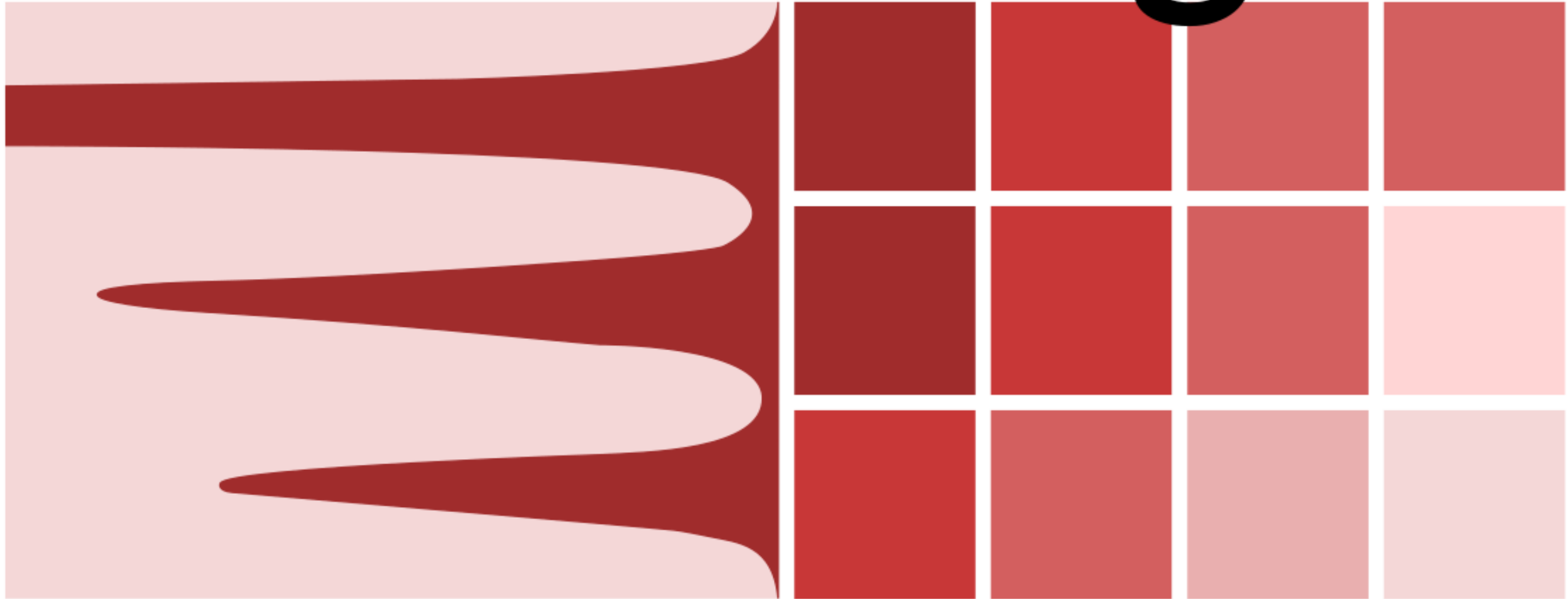


MRST
TRANSFORMING RESEARCH



Jutul

GHOST Digit





Digitale tvillinger for bergvarmelagring

Utvikling digitale tvilling-teknologi for bergvarmelagring

Digital tvilling: virtuell representasjon av et fysisk system, utstyrt med dataintegrasjon og simulatorer for sanntids prediksjon, optimering, overvåkning, og kontroll for å gi et bedre beslutningsgrunnlag¹

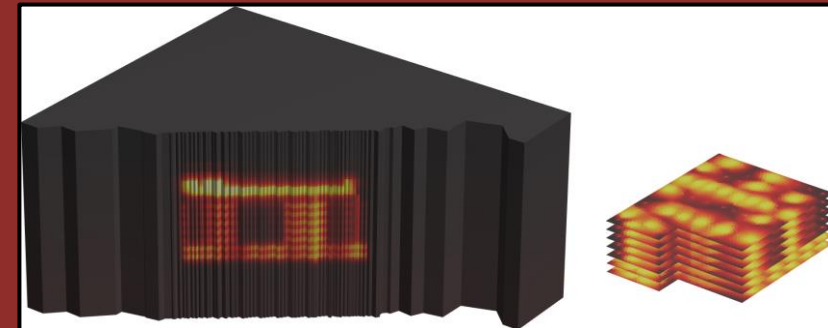
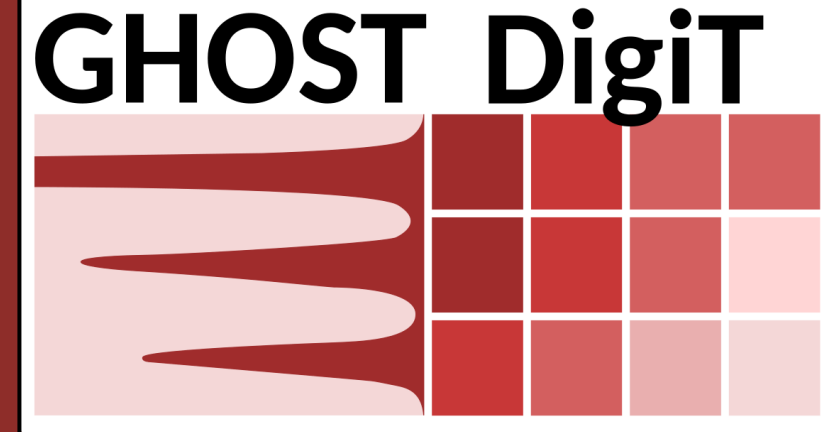
Digital tvilling for bergvarmelagringssystem bør kunne

- **Reprodusere** observert oppførsel
- **Predikere** fremtidig oppførsel
- **Foreskrive** optimal drift
- **Beskrive** de fysiske parameterne

... til sin fysiske tvilling

¹A. Rasheed et al. *Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective*, in IEEE Access, vol. 8, pp. 21980-22012, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2970143

GHOST DigiT: Geological High-temperature Optimized Simulation Technology – Digital Twin

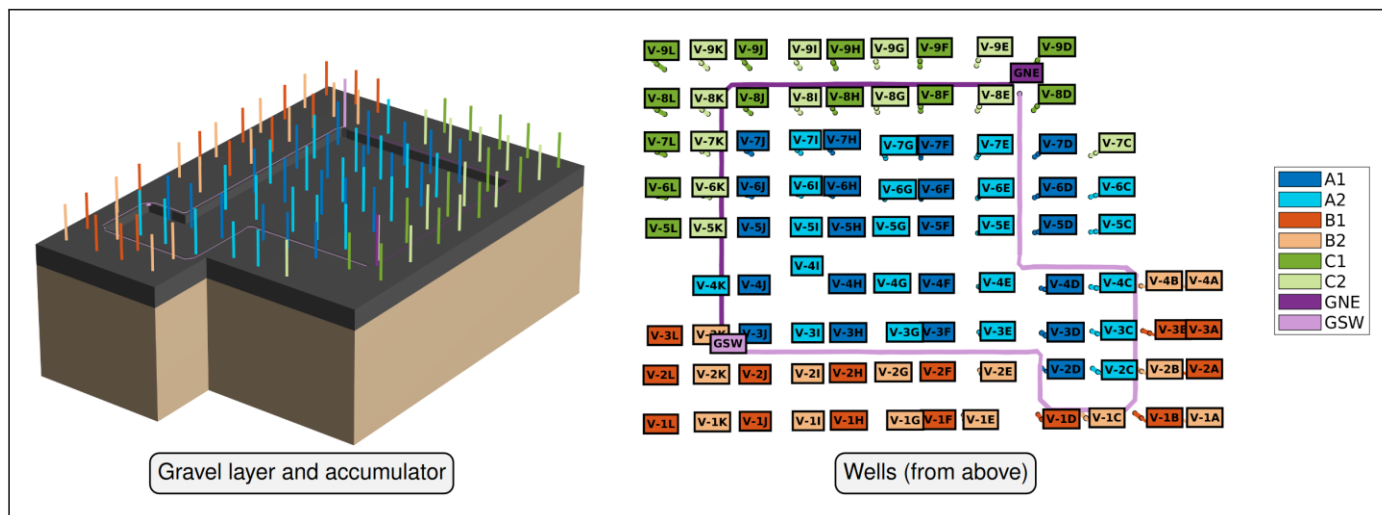


KSP-N: Kompetanse- og samarbeidsprosjekt for næringslivet (Forskningsrådet, No: 344540)

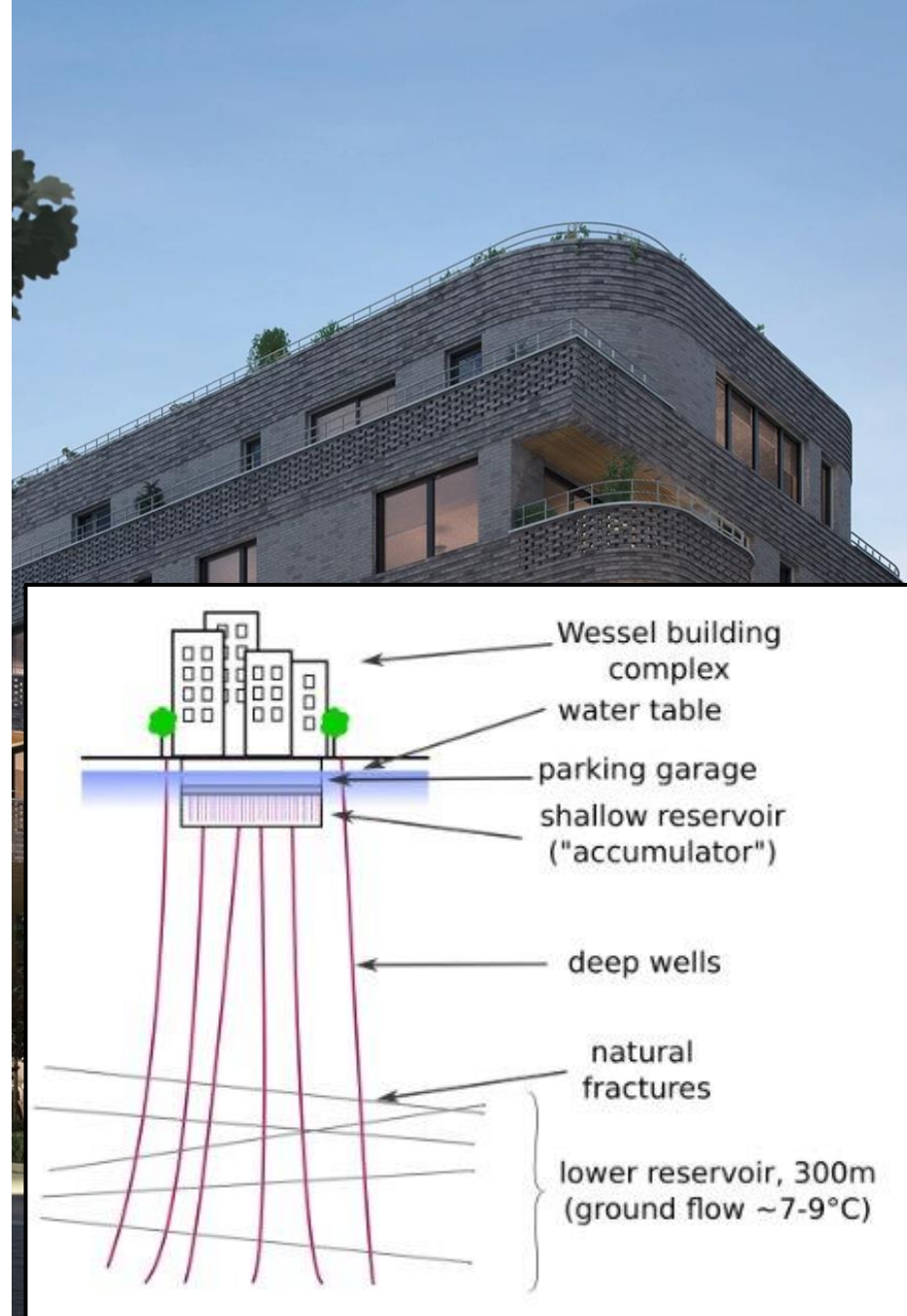
Wesselkvartalet

Kombinert varmelagring og produksjon

- Fokus på de to grunne reservoarene (lagring)
 - Rett under parkeringskjelleren
 - 2 m dypt kultlag (grus/pukk)
 - 18 m dypt reservoar (98 brønner, oppsprukket)
- Simulering av periode med lading og utlading
 - Juli 2021 – April 2022



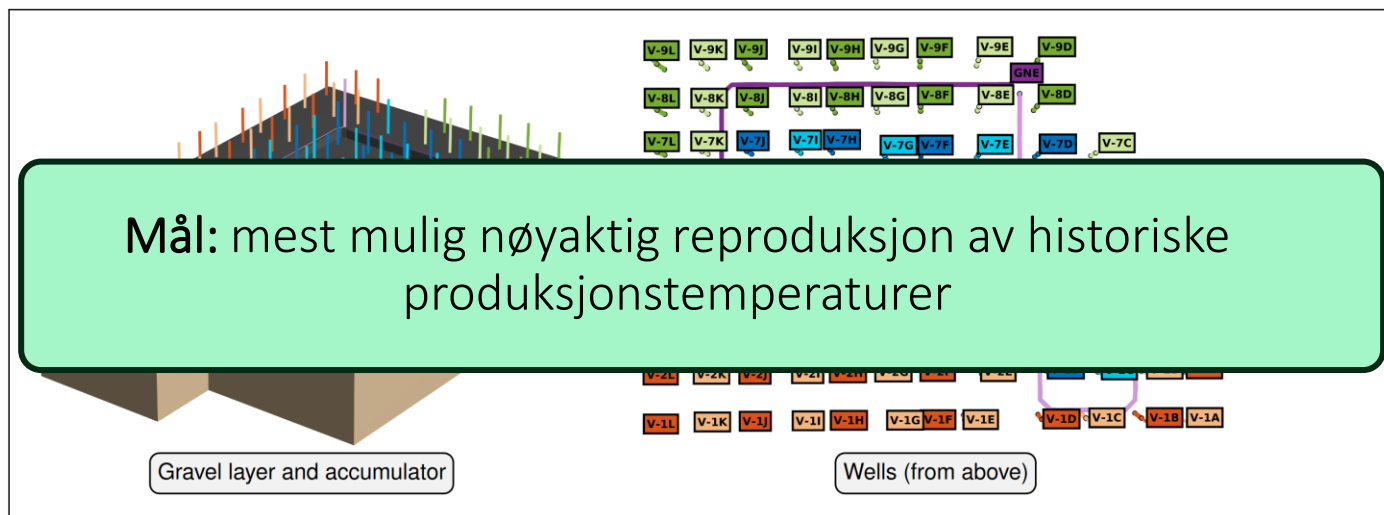
Klemetsdal et al. (2023). *Modelling and optimization of shallow underground thermal energy storage*. *Geoenery*. DOI: 10.1144/geoenery2023-005



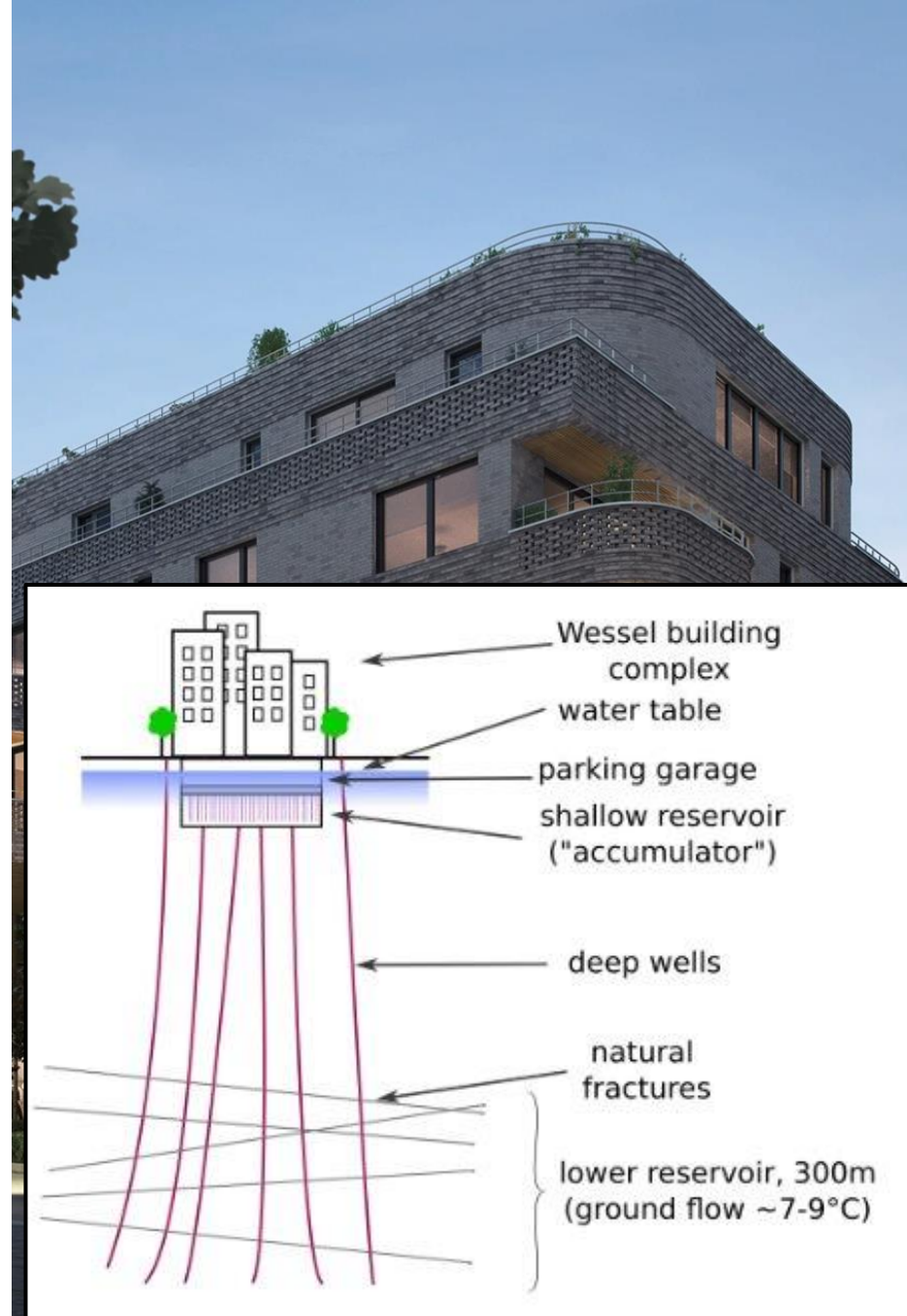
Wesselkvartalet

Kombinert varmelagring og produksjon

- Fokus på de to grunne reservoarene (lagring)
 - Rett under parkeringskjelleren
 - 2 m dypt kultlag (grus/pukk)
 - 18 m dypt reservoar (98 brønner, oppsprukket)
- Simulering av periode med lading og utlading
 - Juli 2021 – April 2022



Klemetsdal et al. (2023). *Modelling and optimization of shallow underground thermal energy storage*. *Geoenergy*. DOI: 10.1144/geoenergy2023-005

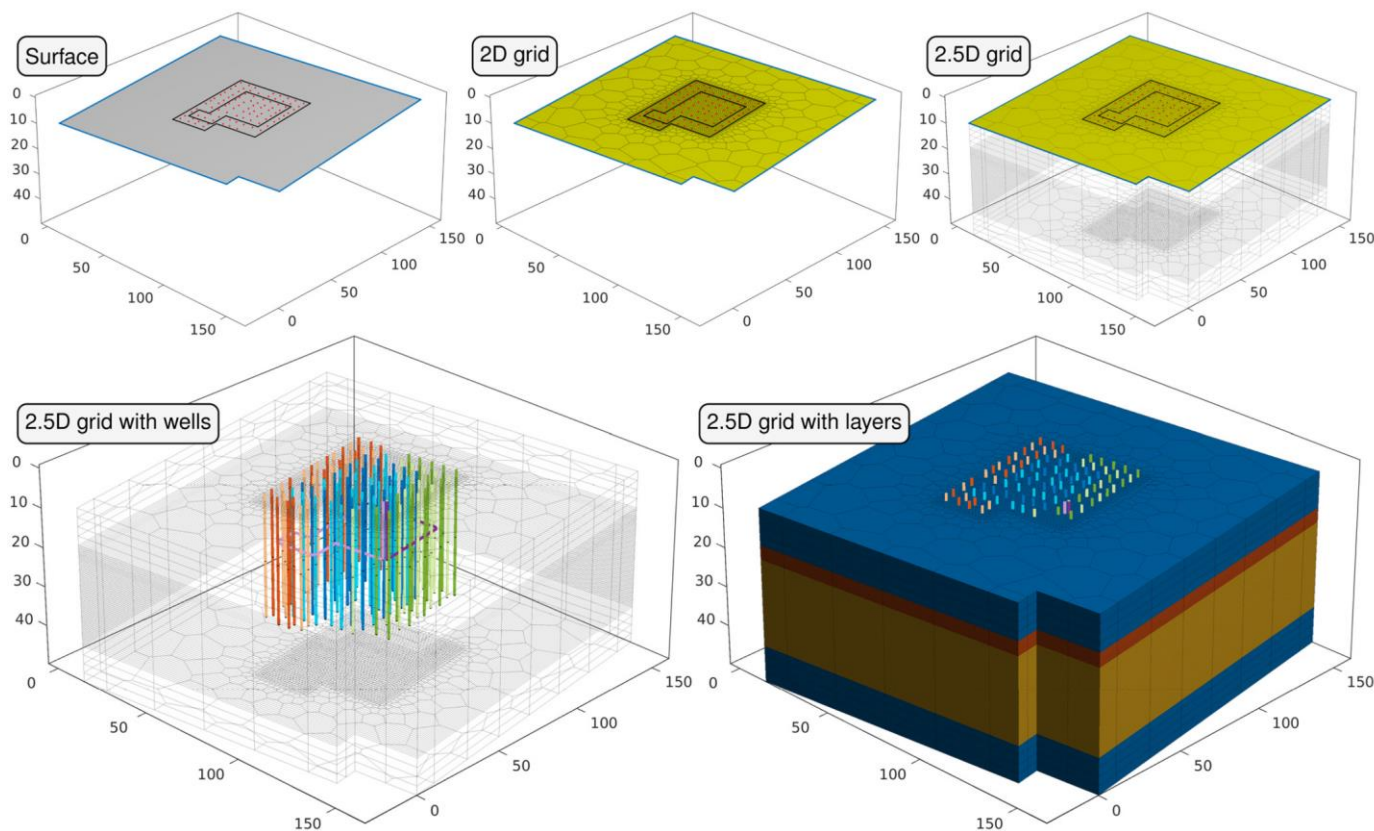


Wesselkvartalet

Kombinert varmelagring og produksjon

Steg 1: Konstruksjon av gitter for numeriske simuleringer

Algoritmer for høykvalitets gitter som tilpasses brønnbaner og interne grenser



Klemetsdal et al. (2023). *Modelling and optimization of shallow underground thermal energy storage*. *Geoenery*. DOI: 10.1144/geoenery2023-005

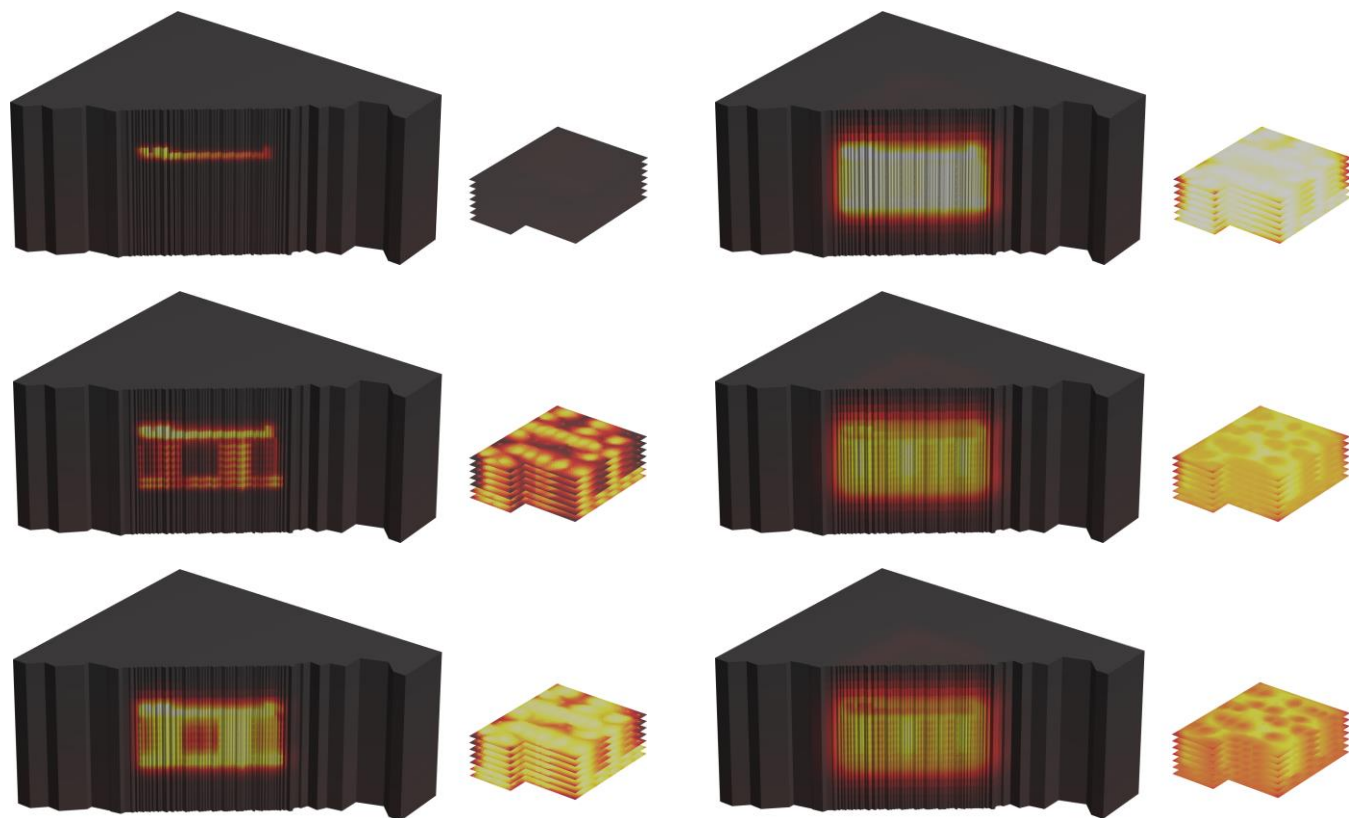


Wesselkvartalet

Kombinert varmelagring og produksjon

Steg 2: Simulering av lading og utlading fra Juli 2021 til April 2022

Løsning av bevaringsligninger for masse og termisk energi i stein/sprekknettverk



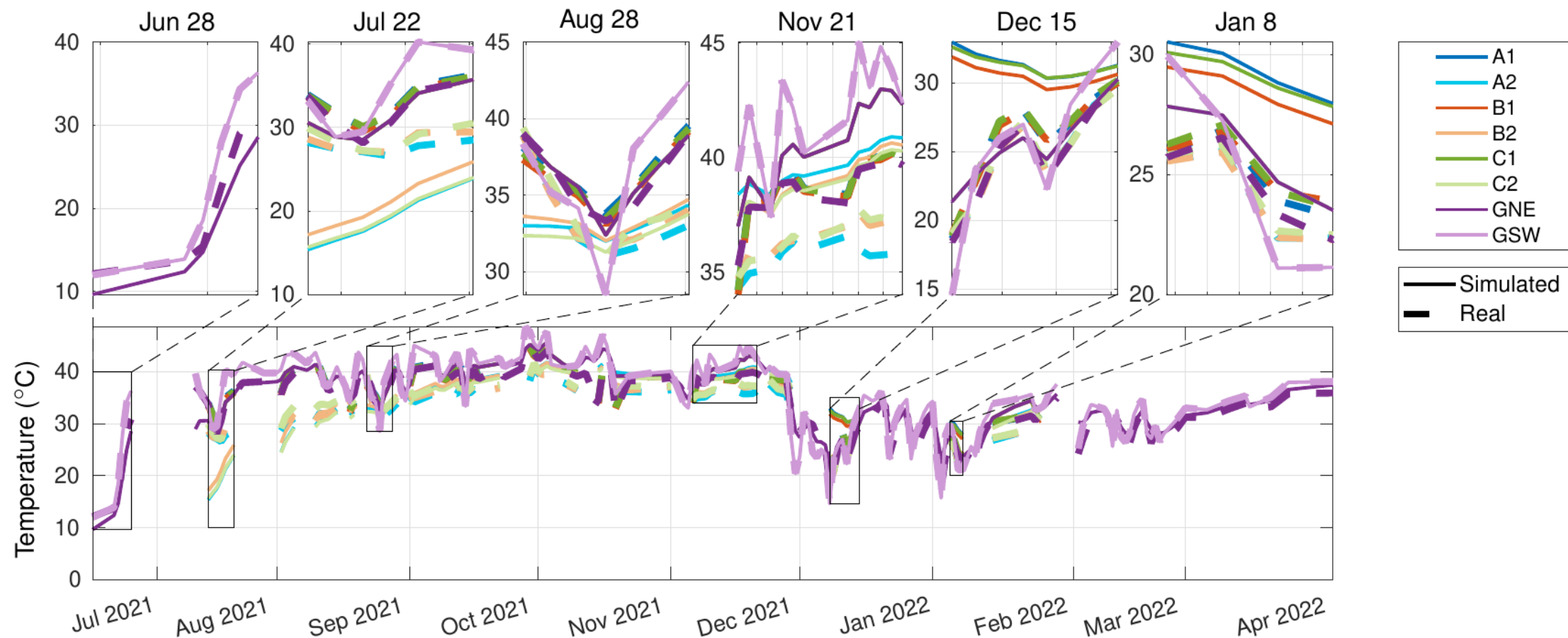


SINTEF

Wesselkvartalet

Kombinert varmelagring og produksjon

Steg 3: Sammenligning med historiske observasjoner



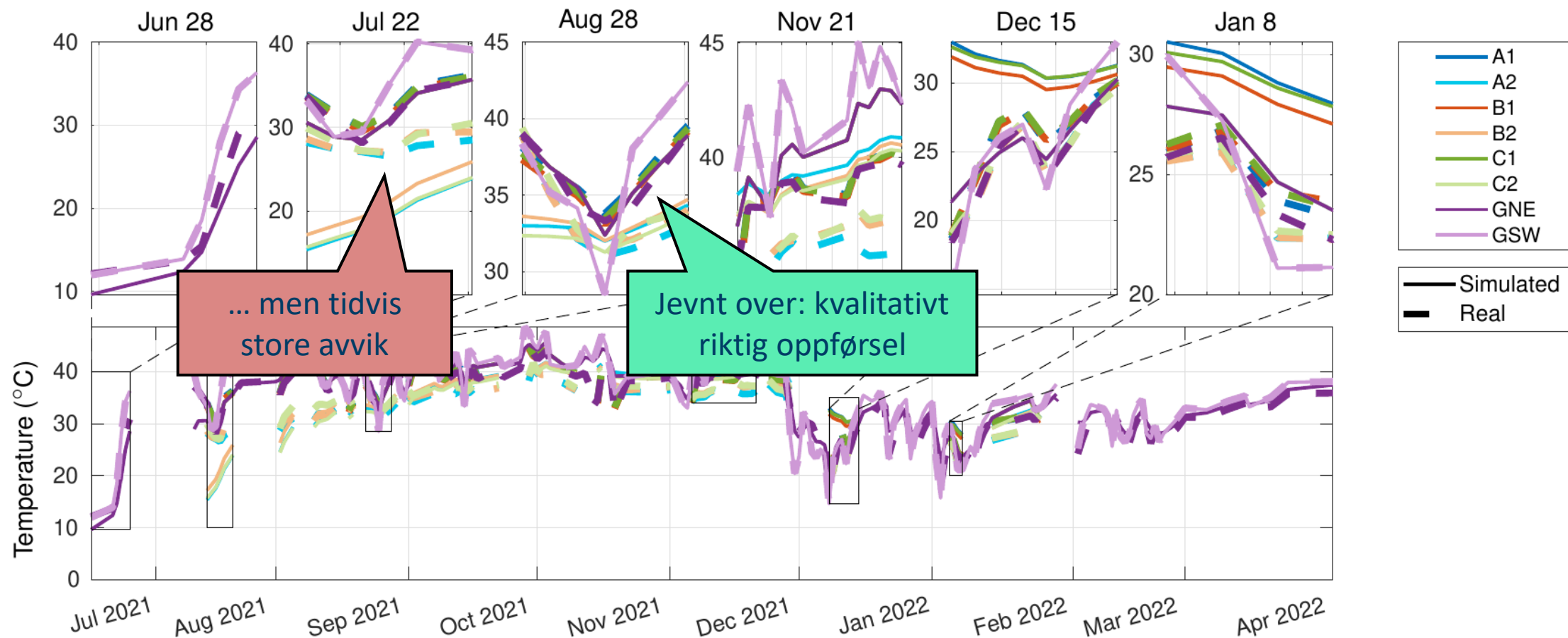


SINTEF

Wesselkvartalet

Kombinert varmelagring og produksjon

Steg 3: Sammenligning med historiske observasjoner



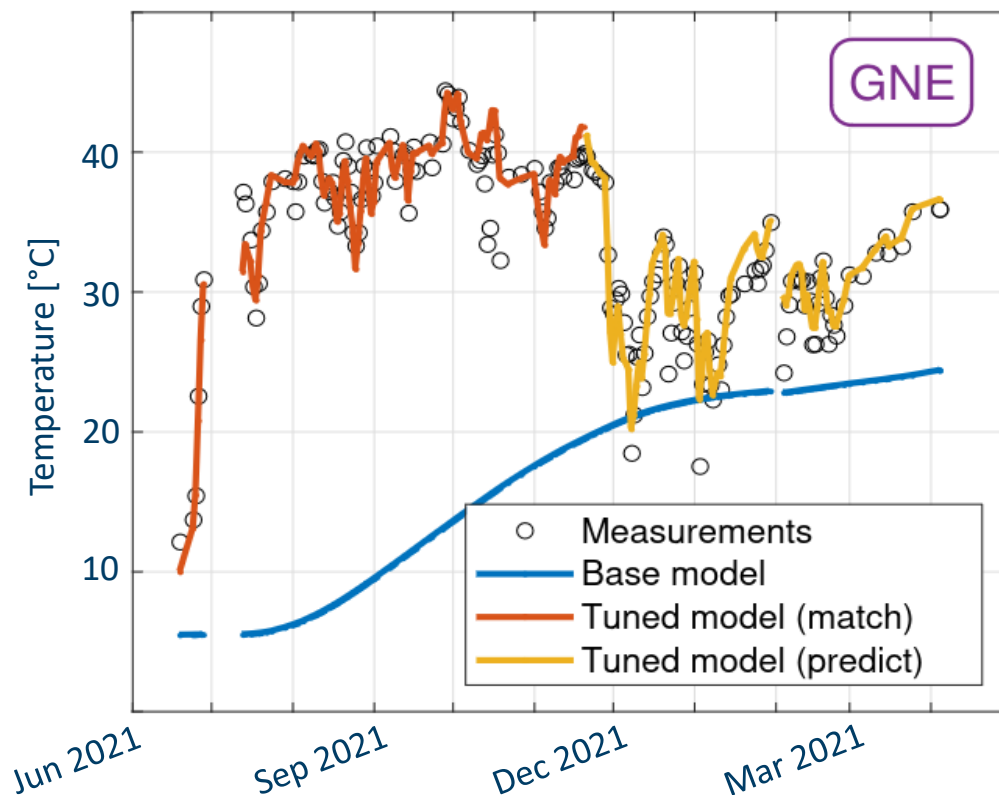


SINTEF

Wesselkvartalet

Kombinert varmelagring og produksjon

Steg 4: Modellkalibrering – Bruk av gradient-basert optimering for å kalibrere parametere slik at simulerte temperatur samsvarer med observasjoner



Skattøra varmesentral

Varmelagring fra avfallsforbrenning

- Simuleringsstudie inspirert av varmelageret på Skattøra
 - Samme dimensjoner, temperaturer og flytrater
- Modellforenklinger
 - Horisontale sprekker, ingen bakgrunnsflyt, ingen varmetap ut av domenet

Hvor mye må bergrunnen sprekkes opp for å få tilstrekkelig hydraulisk konduktivitet?

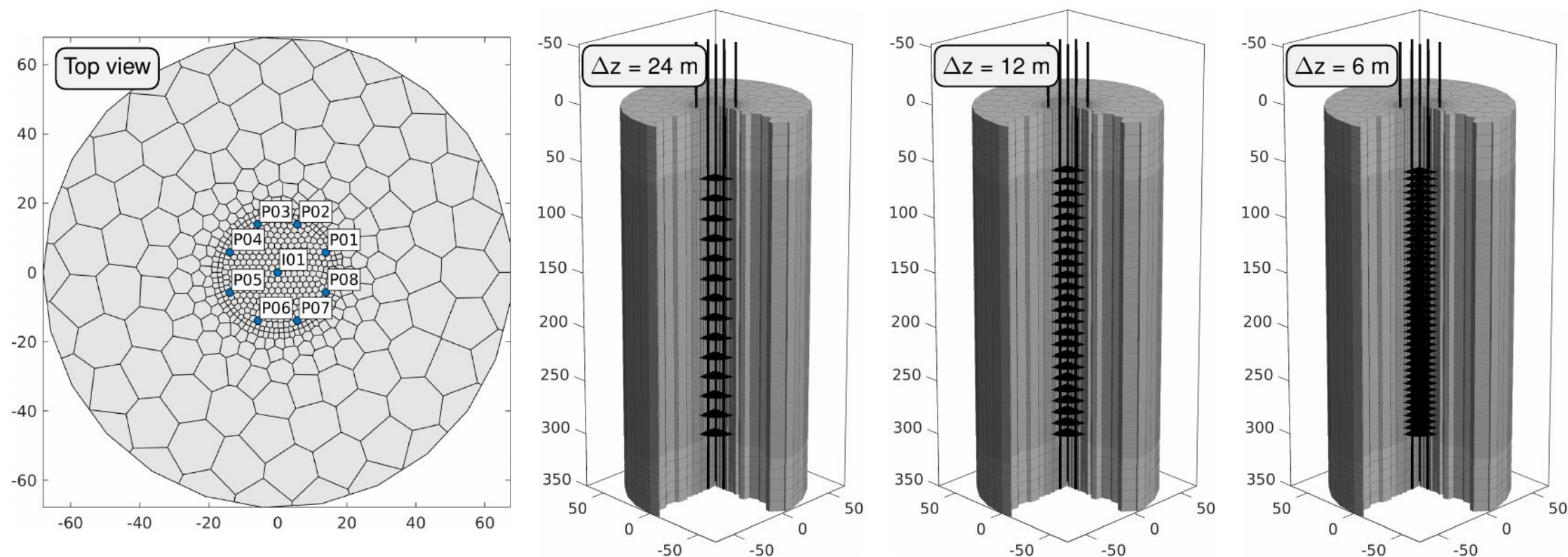


Skattøra varmesentral

Varmelagring fra avfallsforbrenning

Steg 1: Konstruksjon av gitter for numeriske simuleringer

Algoritmer for høykvalitets gitter som tilpasses brønnbaner og interne grenser. Tre scenarioer med lav, middels og høy sprekketetthet

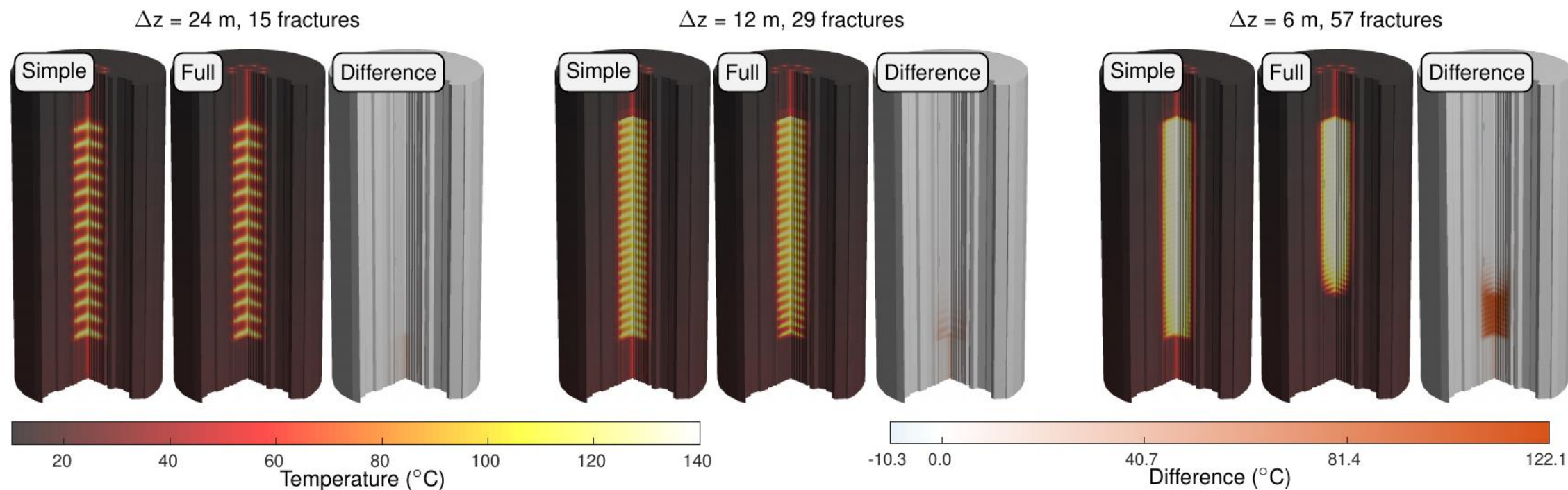


Skattøra varmesentral

Varmelagring fra avfallsforbrenning

Steg 2: Simulering av et halvt år med lading etterfulgt av et halvt år med utlading

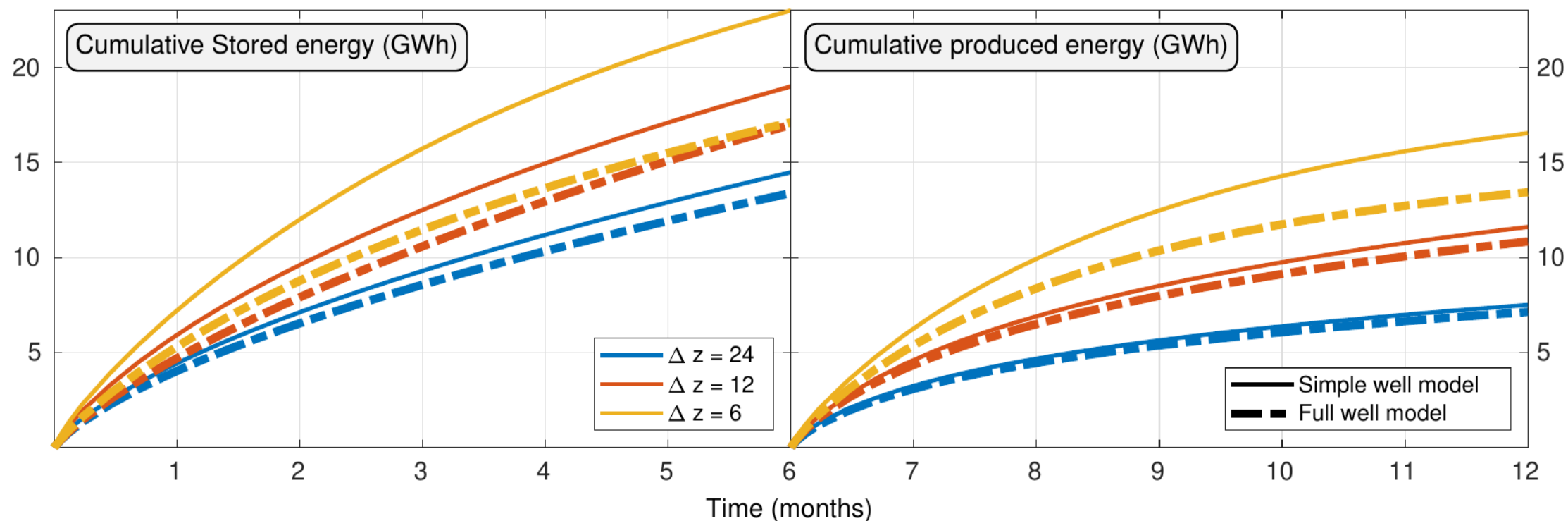
Sammenligning av to ulike brønnmodeller (enkel og kompleks) for de tre scenarioene – store forskjeller



Skattøra varmesentral

Varmelagring fra avfallsforbrenning

Steg 3: Analyse av simuleringresultatene
Forenklet modell viser svært god gjenvinningsgrad

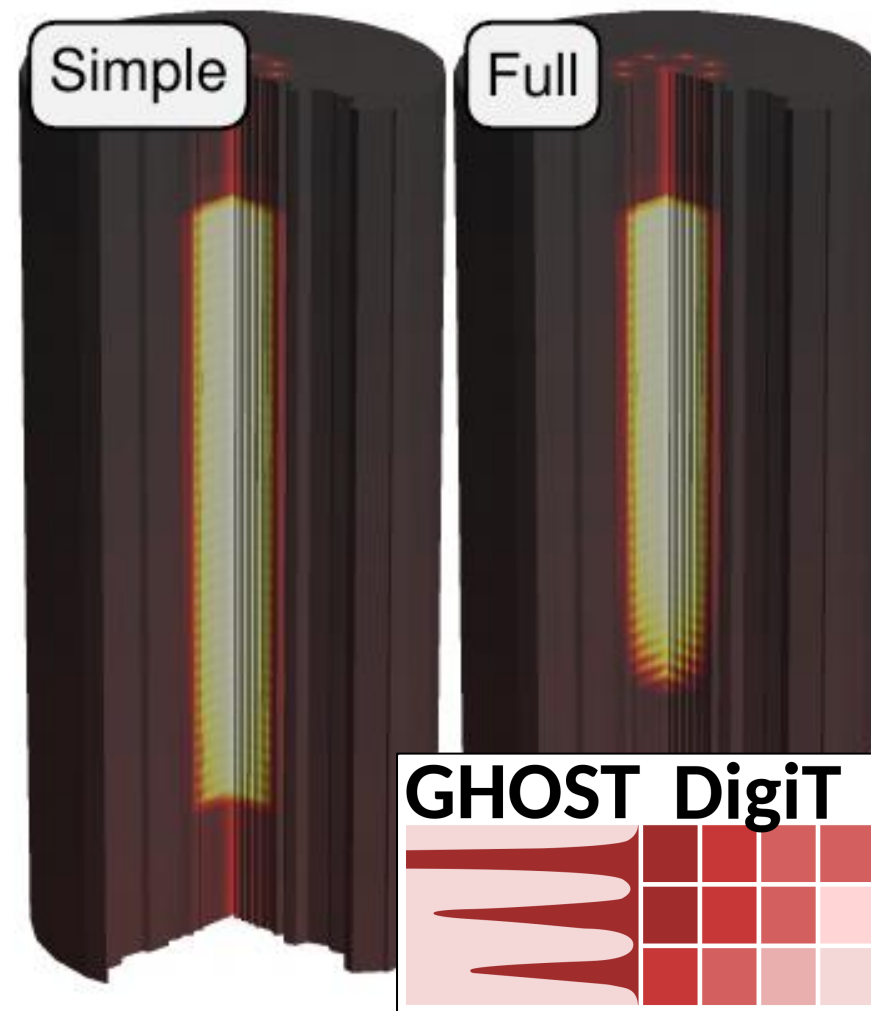




SINTEF

Oppsummering

- Grunn geotermisk energi er en svært attraktivt som energikilde og varmelager
 - Alltid på, overalt, arealeffektivt, lavt utslipp, fornybart
- Ulike behov krever ulike løsninger
 - Åpne og lukkede systemer har fordeler og ulemper, men kan begge utløse stort potensiale om de utformes riktig
- Stor usikkerhet rundt geologi kan gjøre planlegging og drift svært krevende
 - Robuste og fleksible simuleringstøys gjør det mulig å predikere fremtidig oppførsel og foreskrive optimal drift



Takk til partnere i GHOST-DigiT og til Sebastian Geiger (TU Delft) for tillatelse til å dele data og bilder



SINTEF

Wessel
Energi

asplan
viak



Seabrokers
Geoenergi



KVITEBJØRN
VARME



Ruden AS

Denne forskningen er finansiert av Forskningsrådet, prosjektnummer 344540 og 309651



SINTEF

Teknologi for et bedre samfunn