



SINTEF

PREDIKTIVE DIGITALE TVILLINGER FOR OPTIMAL DRIFT AV GEOTERMOS

Øystein Klemetsdal, Odd Andersen, Stein Krogstad, Olav Møyner; (SINTEF Digital)

GeoTermos-festivalen, Trondheim, 22. mai 2025



Anvendt beregningvitenskap

SINTEF Digital, Matematikk og kybernetikk

19 fast ansatte forskere (PhD i matematikk/fysikk/geofysikk), flere tilknyttede PhD- og masterstudenter

Ekspertise: Utvikling av avanserte beregningsmetoder og algoritmer i effektiv, pålitelig og robust vitenskapelig programvare for komplekse modellerings- og simulering utfordringer

Forskning og industri i samspill

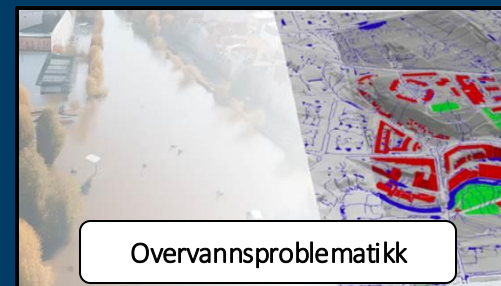
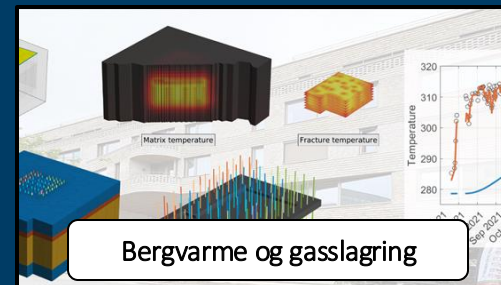
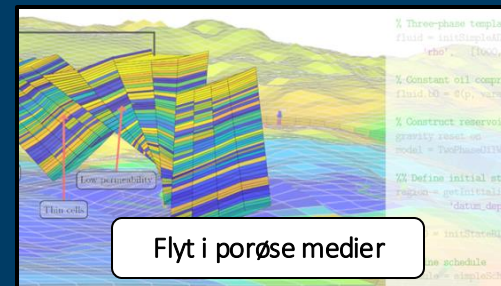
Vi kombinerer akademisk dybde med praktisk forståelse for industrielle behov

Åpen kildekode og reell påvirkning

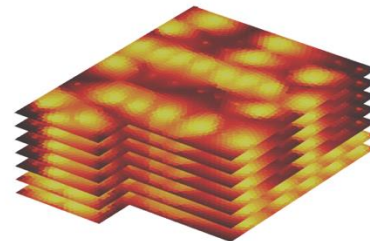
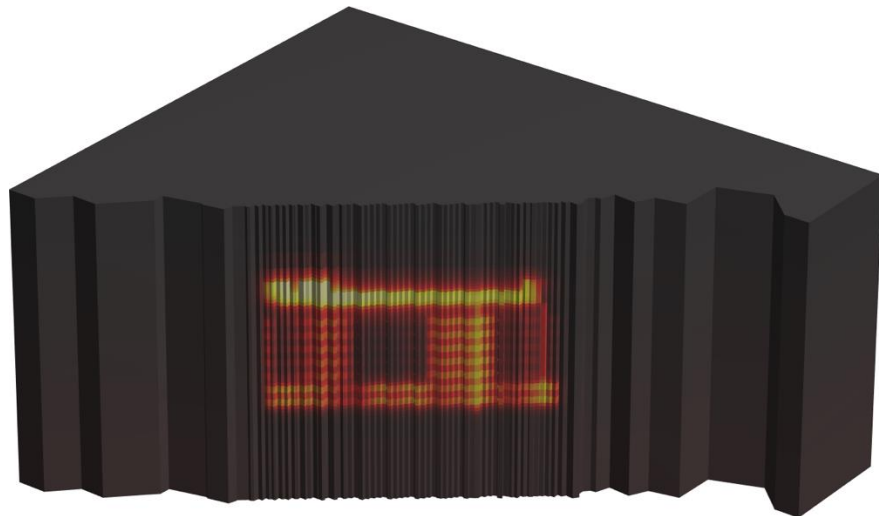
Våre verktøy brukes globalt – [OPM Flow](#) er i operativ bruk, og [MRST](#) har blitt brukt i over 180 MSc og PhD-avhandlinger og 400 vitenskapelige publikasjoner

Strategisk innovasjon

Vi forsker på fremtidens simuleringverktøy, inkludert datadrevne metoder og KI, deriverbare simulatorer og kvantedatabehandling



GHOST DigiT



Geological High-temperature Optimized
Simulation Technology – Digital Twin

KSP-N: Kompetanse- og samarbeidsprosjekt for næringslivet
(Forskningsrådet, 344540)

“GHOST DigiT sikter på å utvikle digital tvilling-teknologi for sanntidsovervåking og prediksjon av undergrunnen for å muliggjøre optimal design, drift og forvaltning av bergvarmelagere i et dynamisk energisystem.”

 **SINTEF** Wessel Energi

 Seabrokers
Geoenergi

 **KVITEBJØRN**
VARME

asplan
viak



Ruden AS



SINTEF

— 75 years —

Digitale tvillinger for bergvarmelagring – ønskeliste

En digital tvilling for et bergvarmelager bør kunne

REPRODUSERE observert oppførsel

Eksempel: produsert effekt/total termisk energi

PREDIKERE fremtidig oppførsel

Eksempel: produsert effekt/total termisk energi ved en gitt strategi

BESKRIVE dynamikk og parametere

Eksempler: bevaring av masse/energi, PVT, rørflyt, geologi

FORESKRIVE optimale kontroller for et gitt objektiv

Eksempel: optimal lading/utlading for å minimere oppvarmingskostnader

... til sin fysiske motpart¹

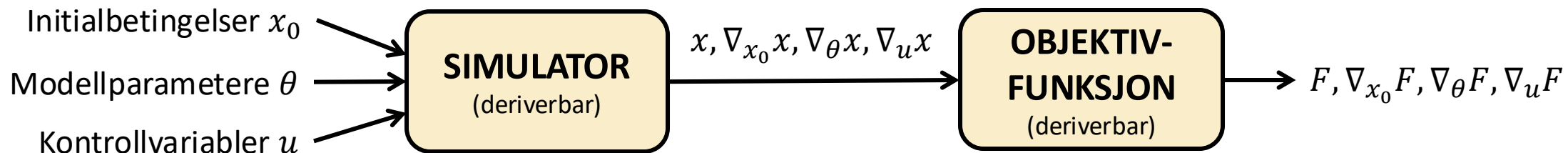


SINTEF

Deriverbar simulator

Muliggjørende teknologi for digitale tvillinger

En deriverbar simulator er en simulator som (i prinsippet) kan regne sensitiviteter for alle utdata med hensyn på alle inndata – kan betraktes som en ende-til-ende deriverbar operator



En deriverbar simulator er svært nyttig for

- Å kombinere ulike fysiske modeller for å danne store, koblede multifysikksystemer
- Kalibrering av modeller med hensyn på initialbetingelser x_0 og/eller modellparametere θ
- Gradient-basert optimering av et objektiv med hensyn på kontrollvariabler u

BESKRIVE

REPRODUSERE

PREDIKERE

FORESKRIVE



Deriverbar simulator

Muliggjørende teknologi for digitale tvillinger

JutulDarcy.jl – Nylig utviklet, åpent tilgjengelig Julia-pakke for simulering av flyt i porøse medier¹

- Ikke-blandbar flyt, **geotermi**, black-oil og tilstandsligninger eller K-verdi komposisjonell flyt, spesifikke CO₂ modeller
- Fullt deriverbar: Gradienter med hensyn på alle parametere
 - Automatisk derivasjon
 - Adjoint-metoden²
- MPI parallell med BoomerAMG og tråder
- GPU-støtte gjennom CUDA + AMGX
- Åpen kildekode (MIT License)
 - <https://github.com/sintefmath/JutulDarcy.jl>
 - Installasjon på alle operativsystemer (Julia 1.8+)

¹Møyner (2024) DOI: [10.3997/2214-4609.202437111](https://doi.org/10.3997/2214-4609.202437111)

²Bradley (2024), [PDE-constrained optimization and the adjoint method](#)



Ekperimentelt Julia-rammeverk for deriverbare multifysikk-simulatorer basert på implisitte volummetoder med automatisk derivasjon

```
Using Pkg; Pkg.add("Jutul")
```



Høy-ytelses simulator for Darcy-flyt og primær demonstrator for Jutul

```
Using Pkg; Pkg.add("JutulDarcy")
```

FJELL SKOLE GEOTERMOS

OPPSETT

Under parkeringsplass

Antall brønner: 100, dybde: 50 m, avstand: 4 m

DRIFT

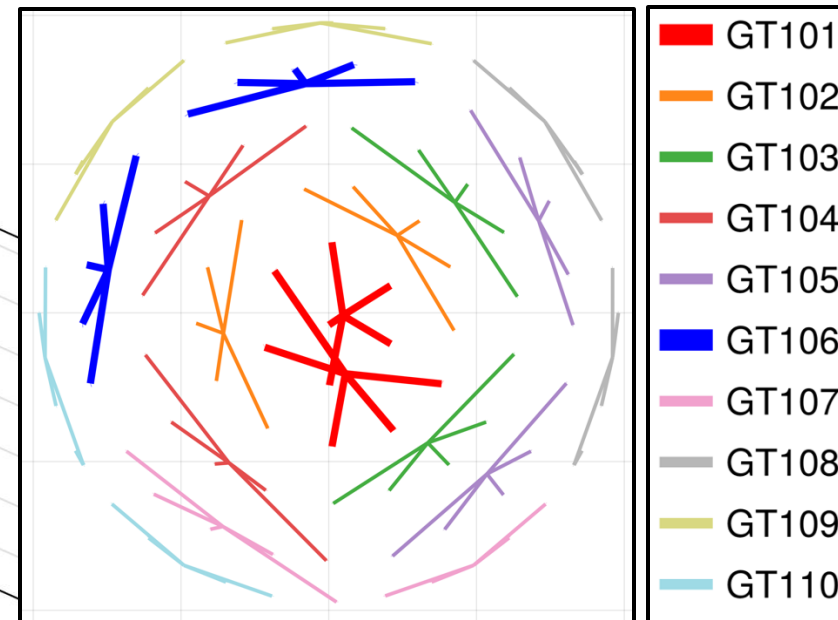
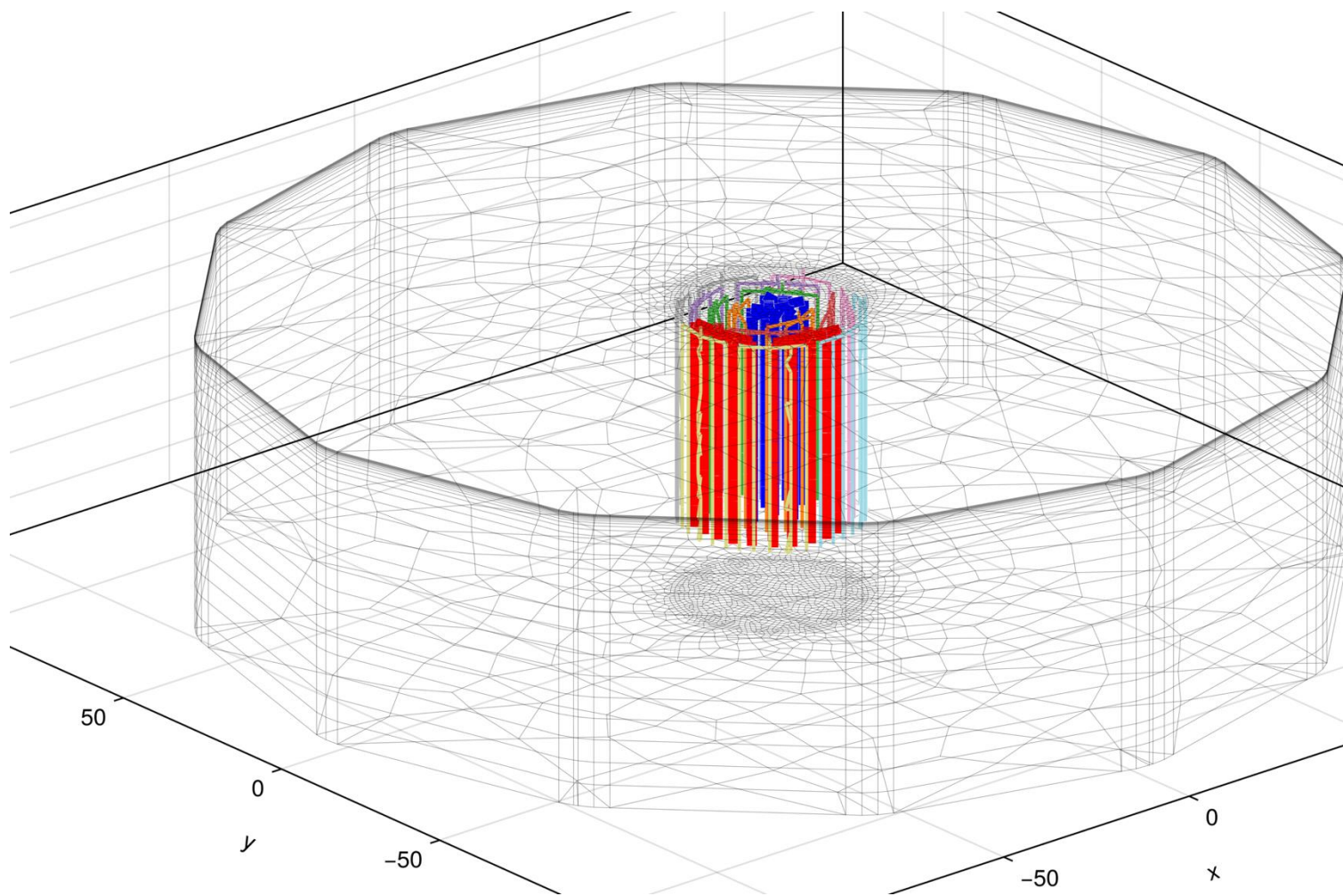
Vannbåren varme til skolebygg (10 000 m²)

- Produksjonsmål: 350 MWh/år
- Lav-temperatur gulvarme: 23-28 °C



Fjell GeoTermos digital tvilling

Numerisk modell



NUMERISK SIMULERING MED VOLUM-METODEN

Styrende ligninger: bevaring av masse og termisk energi

Kontrollvolumer i rom

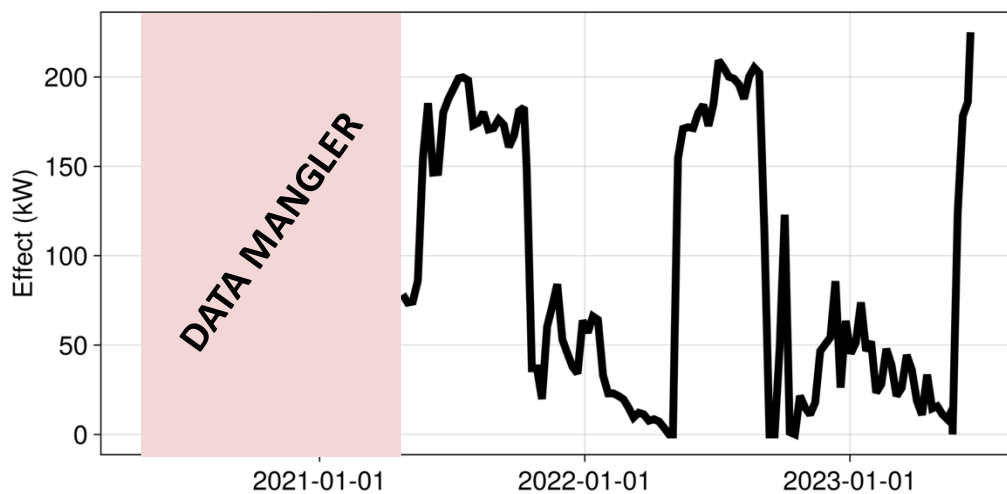
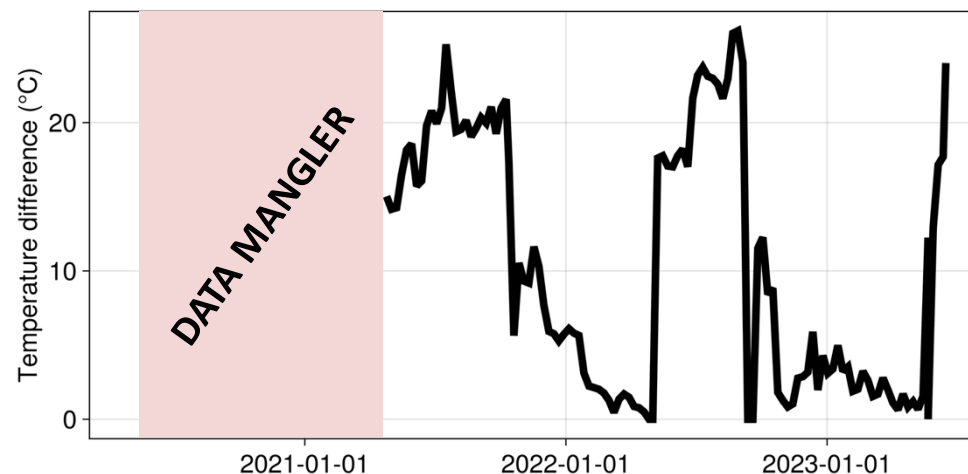
- Topunktsapprokimasjon
massefluks (Darcys lov) og varmekuflux (Fouriers lov)
- En-punkts oppstrømsvekting

Implisitt baklengs Euler i tid

Robust og stabilt over vidt spenn av parametere og tidssteg






Fjell GeoTermos digital tvilling

Data fra det fysiske anlegget



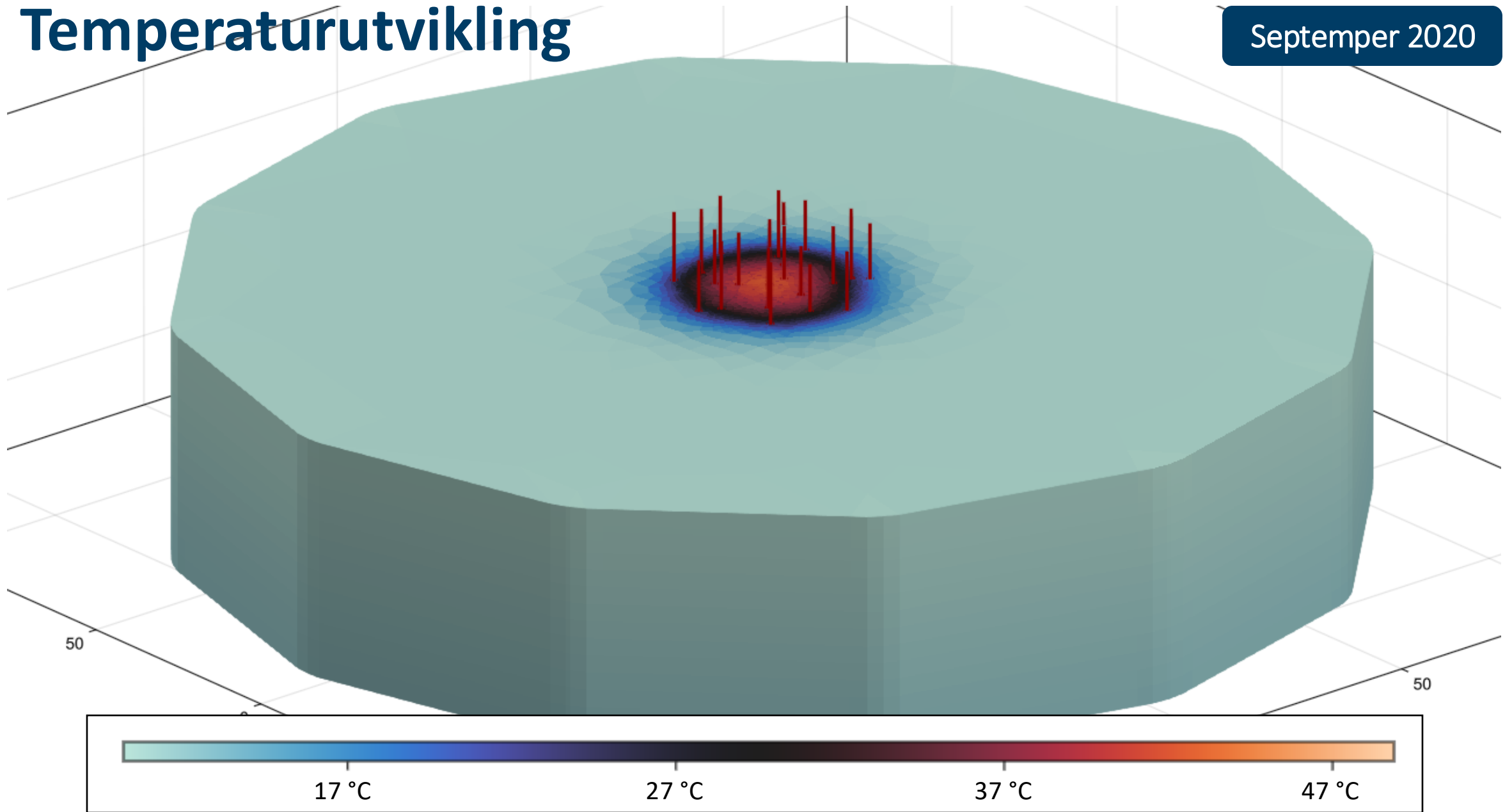
For å simulere oppførselen til GeoTermosen trenger vi flytrater r , injeksjonstemperaturer T_{in} , og informasjon om hvilke brønner som har vært aktive

Har tidsserier for flytrater r og effekt q

- Mangler data for første lading (April – Sept 2020) 
- Har nøkkeltall (ca injeksjonstemperatur og rate) 
- Mangler informasjon om aktive brønner 
- Mangler injeksjonstemperaturer T_{in} 
- ... men kan estimere $\Delta T = T_{in} - T_{ut}$ fra $q = r\rho C_p \Delta T$ 

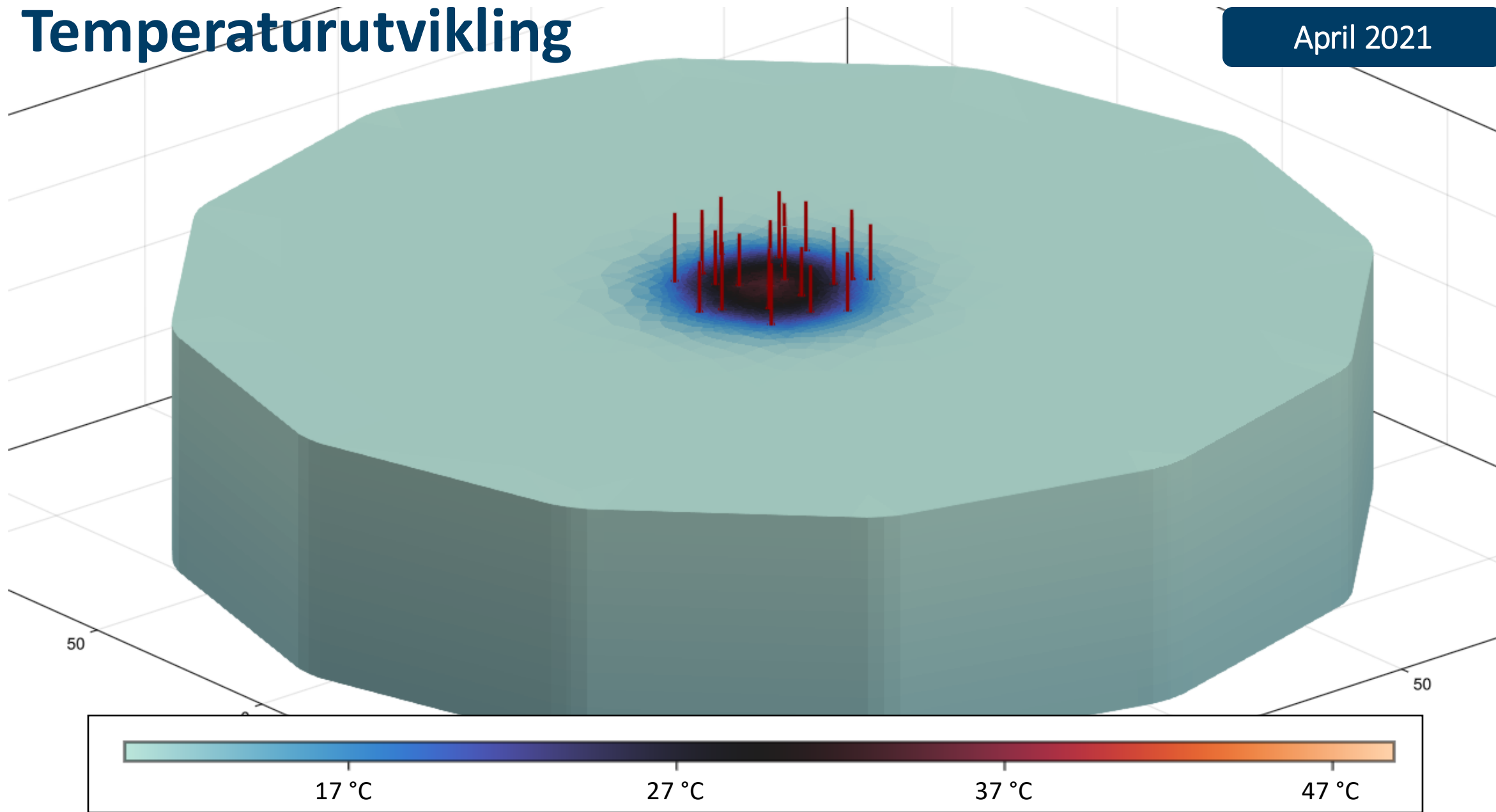
Temperaturutvikling

September 2020



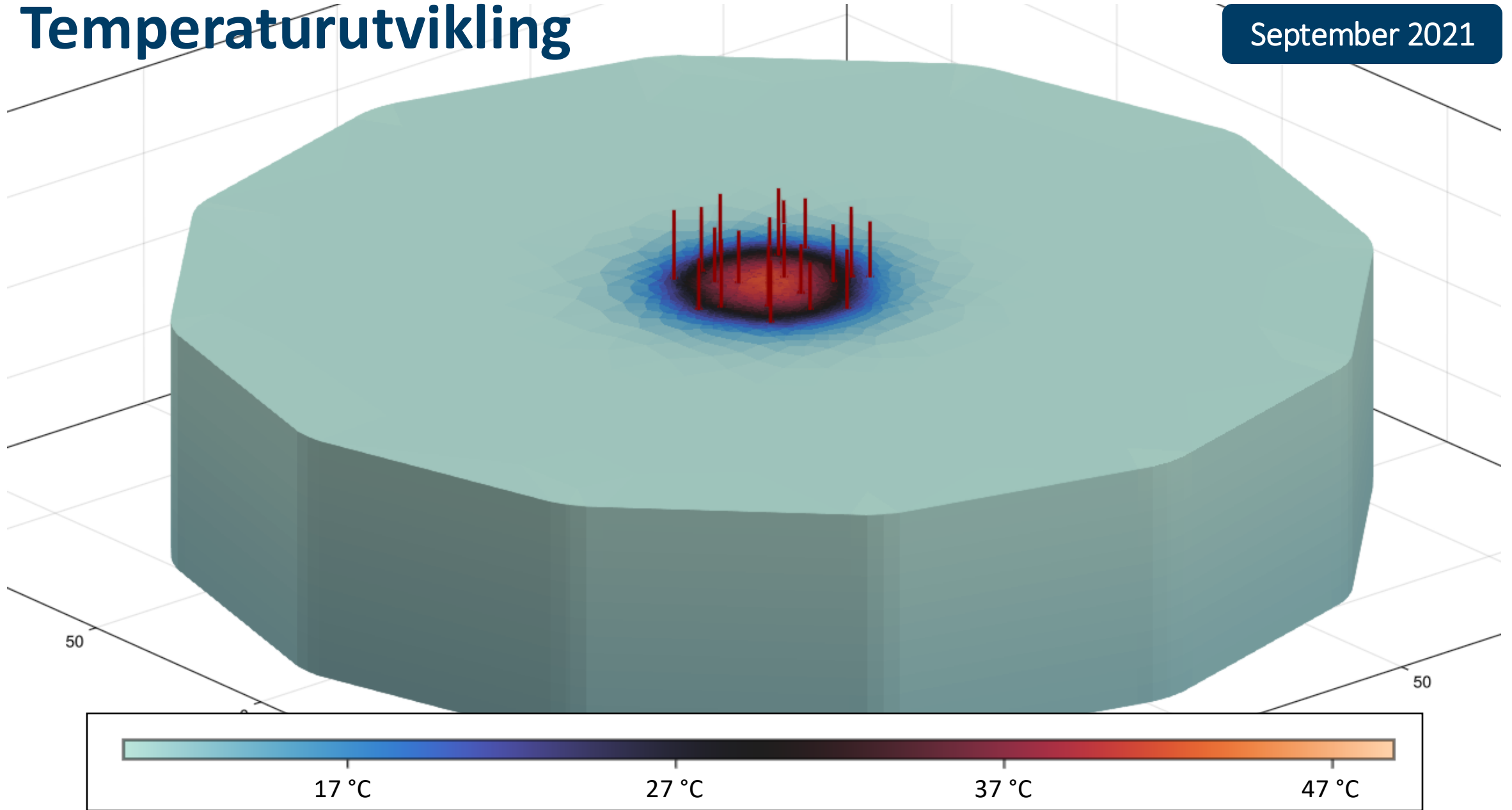
Temperaturutvikling

April 2021



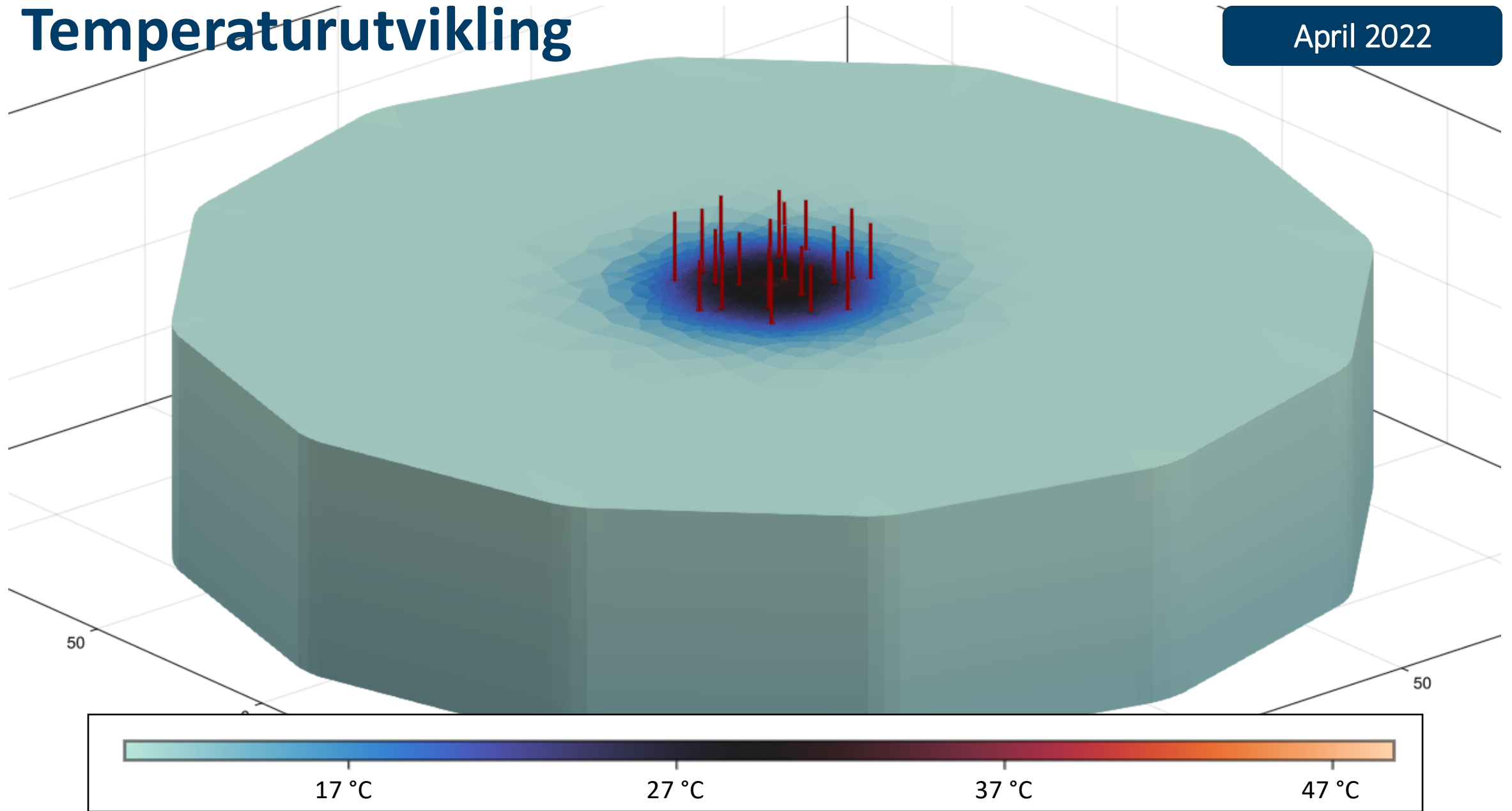
Temperaturutvikling

September 2021



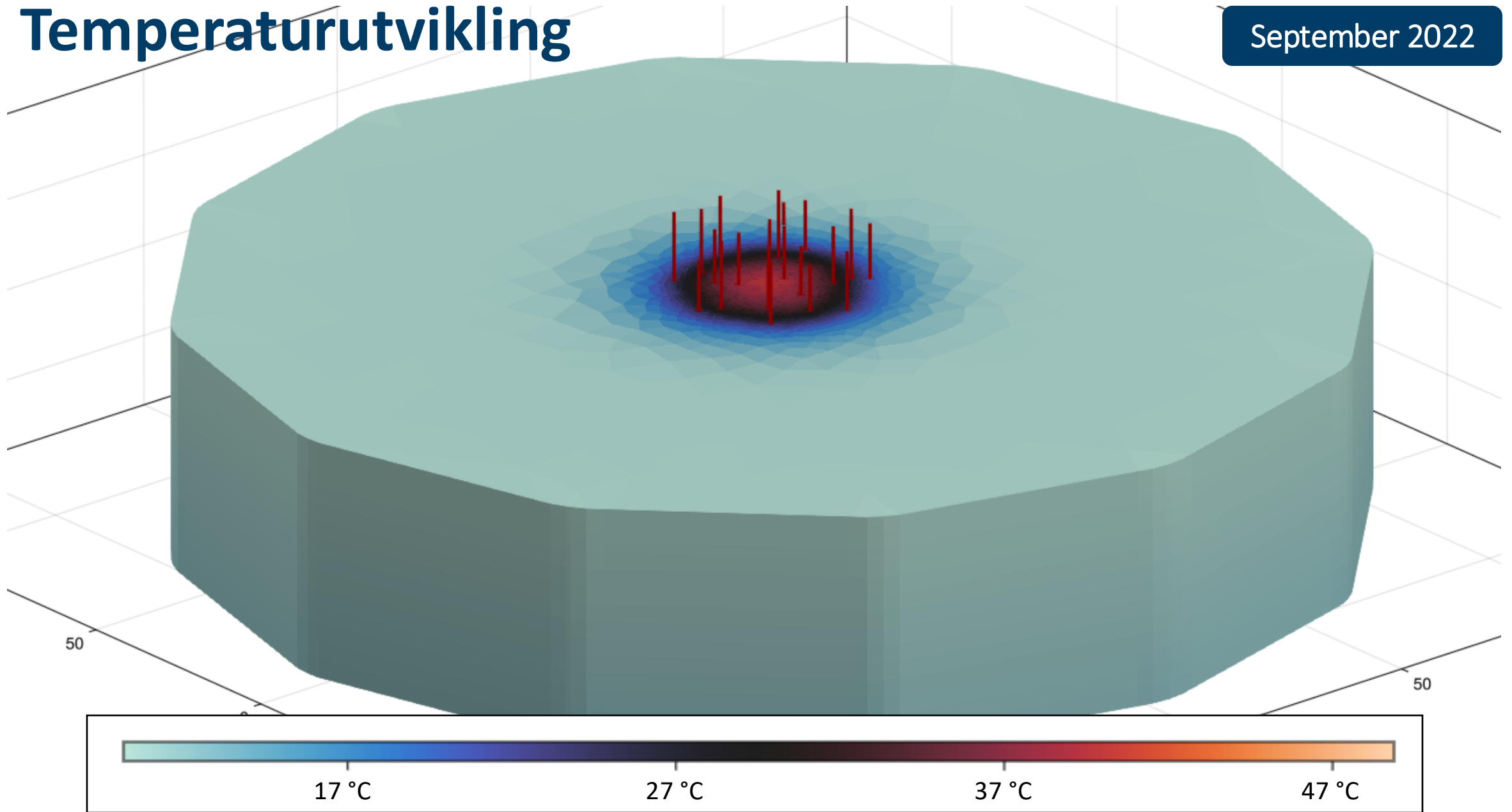
Temperaturutvikling

April 2022



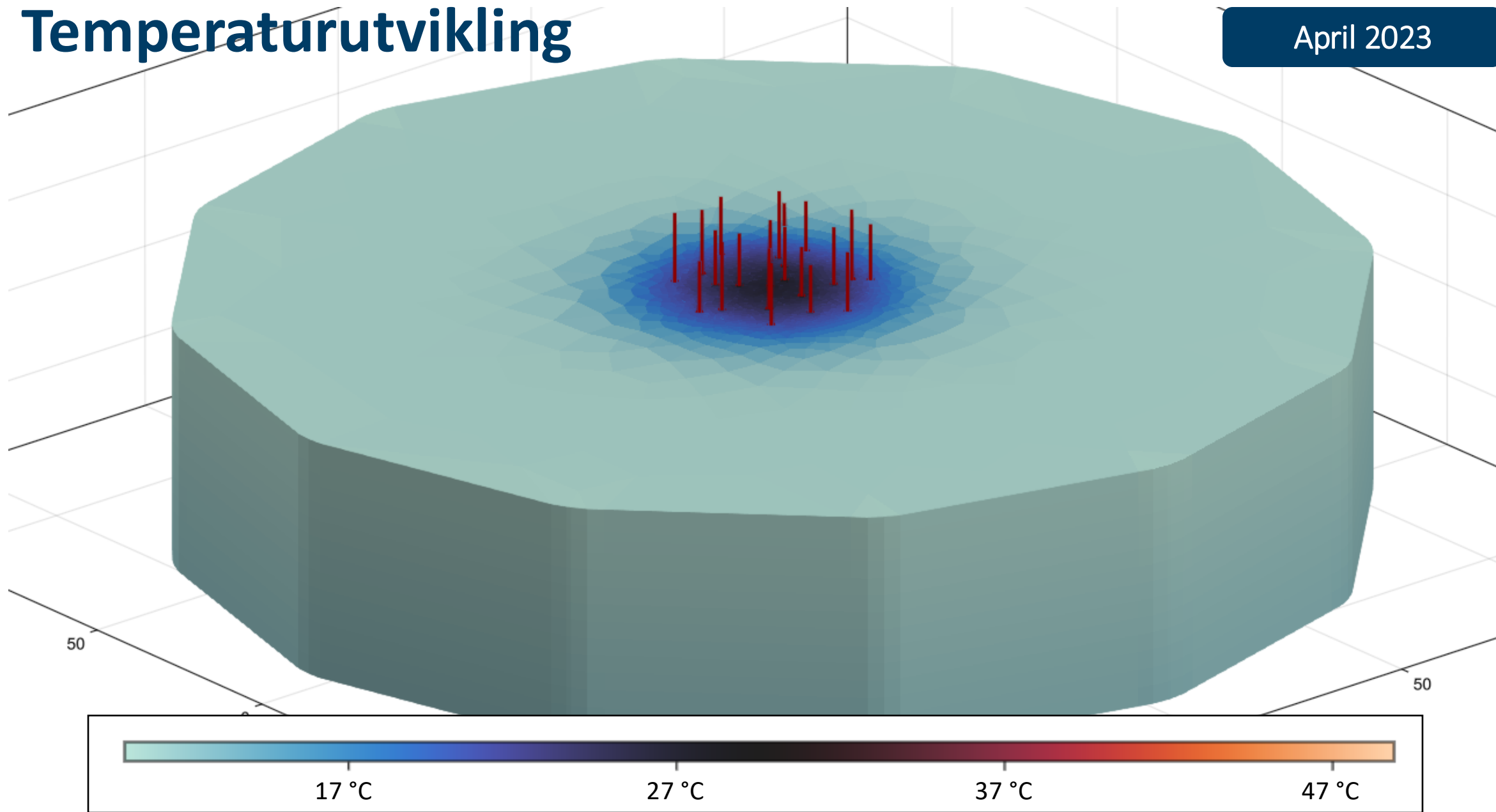
Temperaturutvikling

September 2022



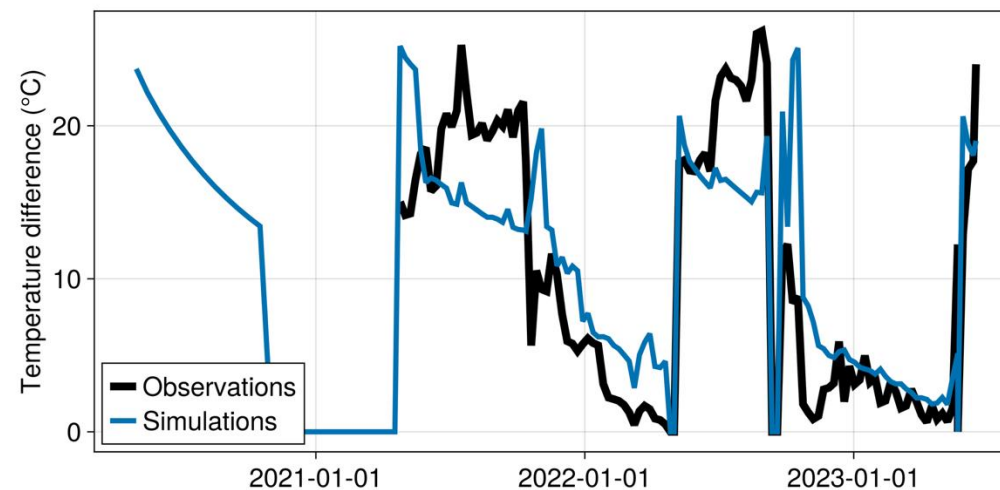
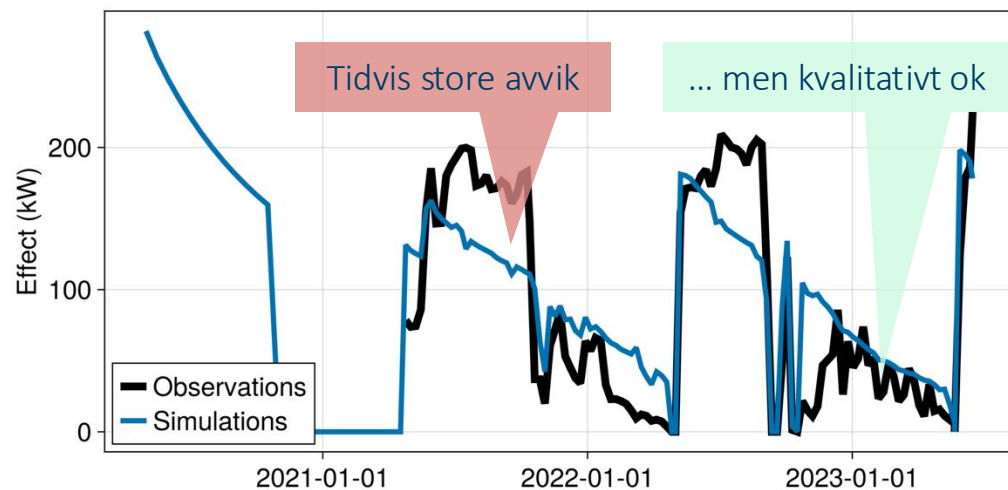
Temperaturutvikling

April 2023



Fjell GeoTermos digital tvilling

Sammenligning og modellkalibrering



De største kildene til avvik er trolig manglende informasjon om injeksjonstemperaturer og aktive brønner



SINTEF

Fjell GeoTermos digital tvilling

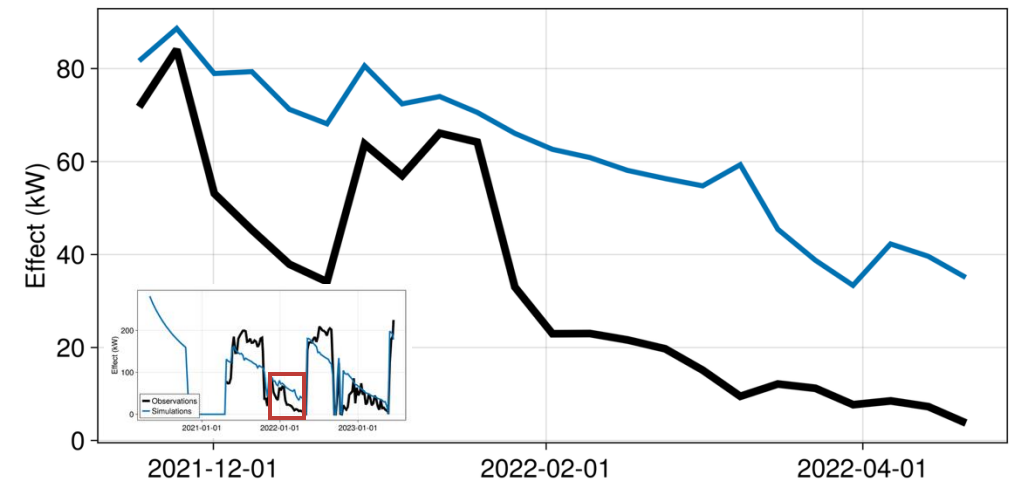
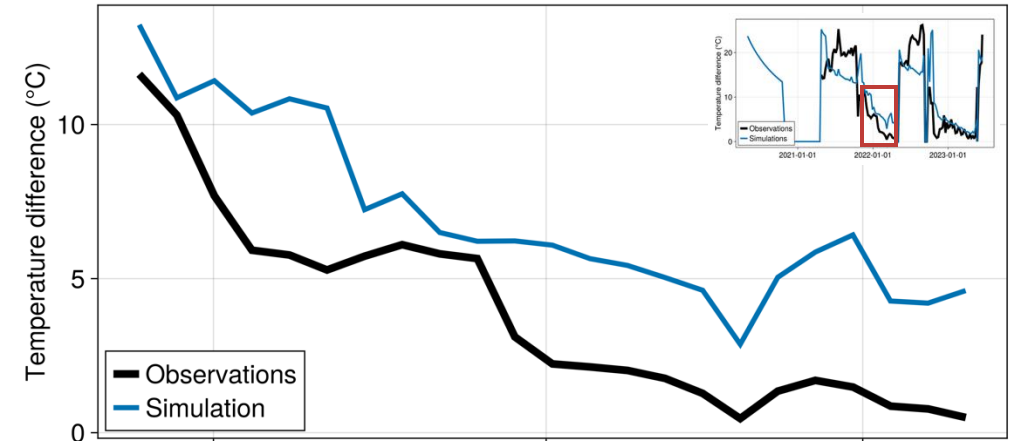
Sammenligning og modellkalibrering

Modellkalibrering

Kalibrering av termisk konduktivitet λ

- I grunnfjell og vann
- Mellom brønnvegg og grunnfjell
- Tillater ulike verdier i alle kontrollvolumer

$$\text{OBJEKTIV: } \min_{\lambda} \sum_n [\Delta T_n^{obs} - \Delta T_n^{sim}(\lambda)]^2$$



Fjell GeoTermos digital tvilling

Sammenligning og modellkalibrering

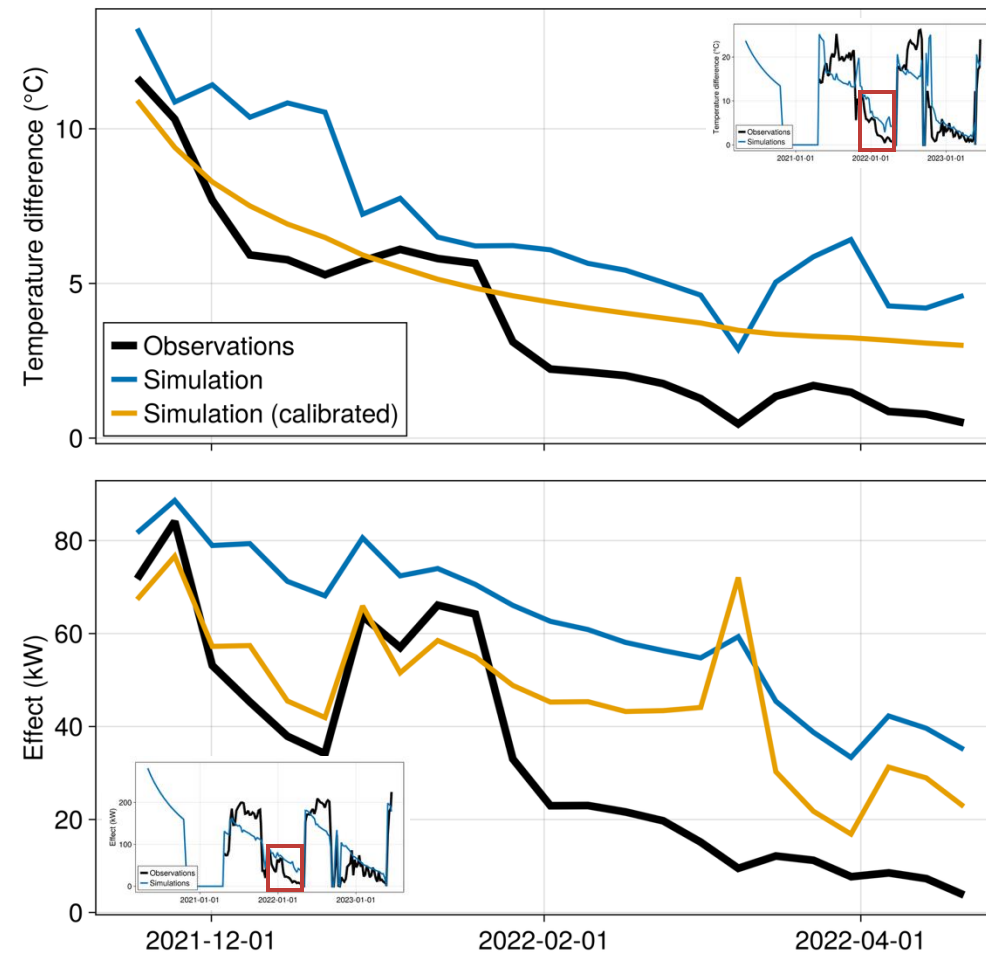
Modellkalibrering

Kalibrering av termisk konduktivitet λ

- I grunnfjell og vann
- Mellom brønnvegg og grunnfjell
- Tillater ulike verdier i alle kontrollvolumer

$$\text{OBJEKTIV: } \min_{\lambda} \sum_n [\Delta T_n^{obs} - \Delta T_n^{sim}(\lambda)]^2$$

Kalibrering av termisk konduktivitet gir riktigere oppførsel, men vi trenger mer informasjon for å forbedre modellen ytterligere





SINTEF

Oppsummering og videre arbeid

Første steg mot en digital tvilling for Fjell GeoTermos

- Implementert i JutulDarcy – *fleksibel og robust deriverbar simulator*
- Kvalitativt riktig oppførsel med initielle modellparametere
- Kalibrering av termisk konduktivitet gir bedre tilpasning til observerte data
 - Ytterligere forbedringer avhenger av mer informasjon (injeksjonstemperaturer og aktive brønner)
- Bygget med *generisk funksjonalitet* – kan brukes til å simulere andre GeoTermos-konfigurasjoner
- God ytelse – detaljert simulering av tre års drift tar ~ 8 min
 - MacBook Pro/Apple M4 Pro CPU/24 GB RAM

BESKRIVE*

REPRODUSERE

Videre arbeid

- Predikere fremtidig oppførsel ved en gitt strategi
 - Eksempel: predikere produsert effekt ved gitt planlagt lading/utlading per uke
- Foreskrive optimale kontroller (kontrolloptimering)
 - Eksempel: optimal lading/utlading gitt varme tilgjengelig og forventet oppvarmingsbehov per uke
- Undersøke hvor mye parameterne i en kalibrert digital tvilling kan si om det fysiske systemet
 - Eksempel: er den digitale tvillingens termiske konduktivitet lik konduktivitet i den fysiske modellen?

BESKRIVE

PREDIKERE

FORESKRIVE

TAKK TIL PARTNERNE I GHOST DIGIT

Geological High-Temperature Optimized Storage Technology – Digital Twins



**Wessel
Energi**

**asplan
viak**



**KVITEBJØRN
VARME**



Ruden AS

Denne forskningen er finansiert av Forskningsrådet, prosjekt nr. 344540



SINTEF

Teknologi for et bedre samfunn