



Modellering af termisk oprensning

Søren Eriksen og Jesper Holm, Krüger A/S

Indhold

1

Formål med
modellering

2

Varmebalance-
model

3

Cases

4

Nøjagtighed
af model

5

Forbedringer

6

Konklusion

Formål med modeller

Forudsige opvarmningsforløb ud fra
parametre - givne såvel som valgte

Forudsige energiforbrug for tilbudsgivning

Optimere omkostninger til infrastruktur,
boring, udstyr og etablering

Modelresultater

Modellen er ikke et præcisionsinstrument

Men hovedresultaterne skal forudsiges korrekt:

- Energiforbrug
- Eventuelle horisonter/lag der kan give problemer under opvarmning
- Nødvendig varmeeffekt

Varmebalance-model

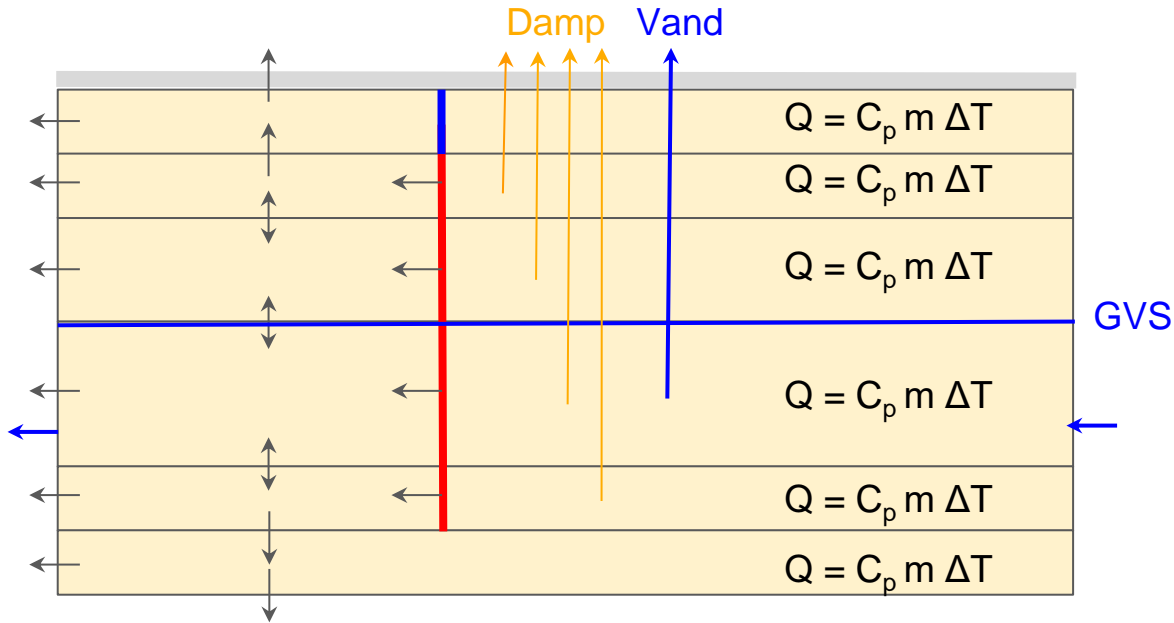
Enkel

Hurtig beregning

Erfaring med brug og tolkning

Varmebalance-model

Tilnærmelse: Termisk ligevægt i hvert lag i hvert tidsstep



Mættet zone skal koge

Parametre

Givne

Forurening:

Kemiske og fysiske egenskaber

Geometri:

Længde, bredde, dybde

Geologi:

Jordtype, vandindhold, permeabilitet, grundvandsstrømning,
varmekapacitet, varmeledningsevne

Oprensningskrav:

Måltemperatur, behandlingstid

Design

Varme-input:

Antal heatere, stick down, effekt, boost

Ventilation:

Luftmængde, ekstraktion af damp

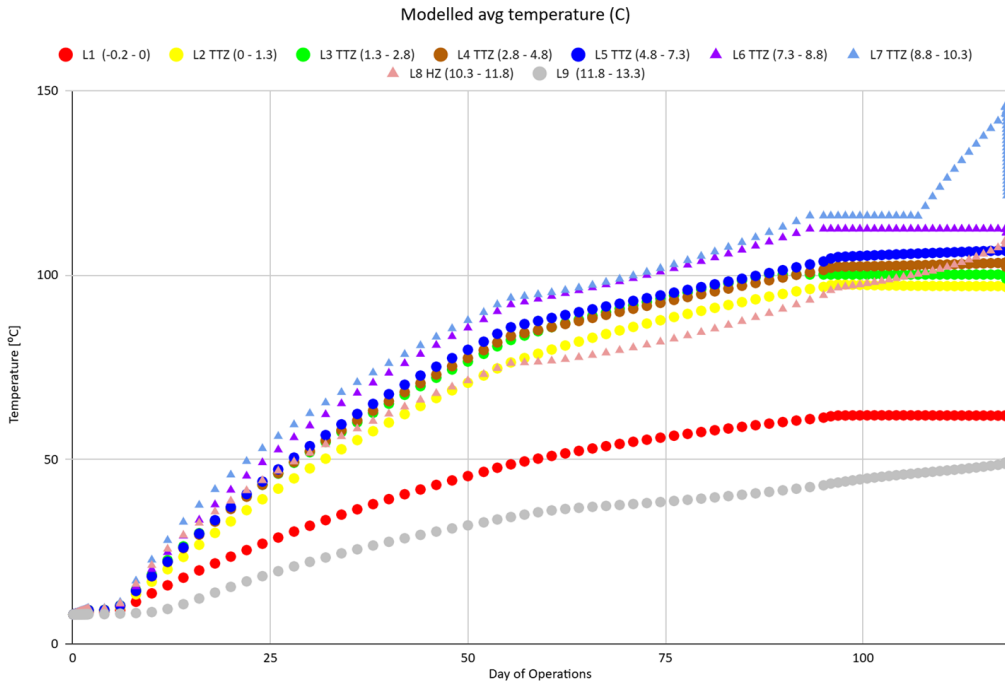
Oppumpning af grundvand

Isolering af overflade

Tid til kogning

Varmebalance-model

Output: Udvikling af gennemsnitstemperatur i hvert lag over tid



Omsætning til design

Varmeeffekt:

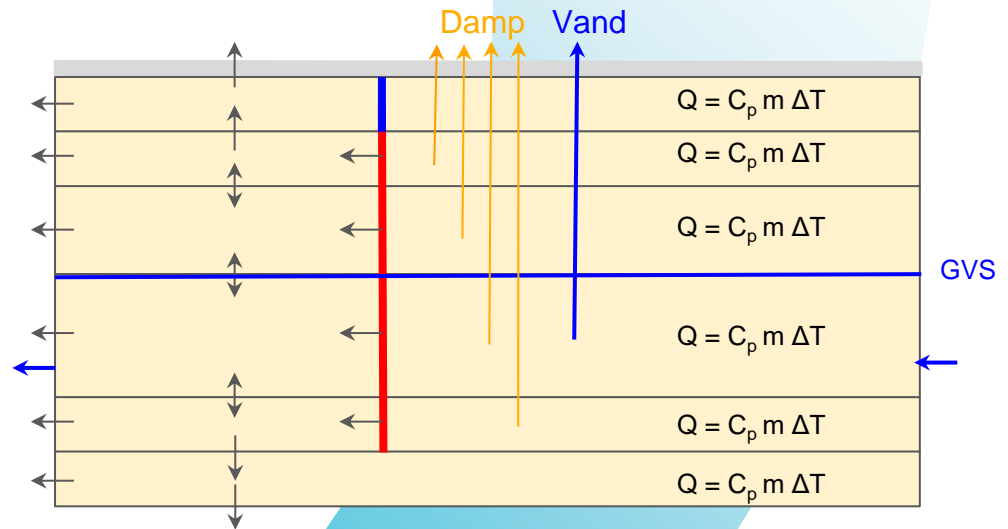
Antal varmeelementer ↔ effekttæthed

Stickdown og boost

Dækning af varmetab langs kant

Dampestraktionsstrategi

Pumpestrategi



Cases

WATER TECHNOLOGIES

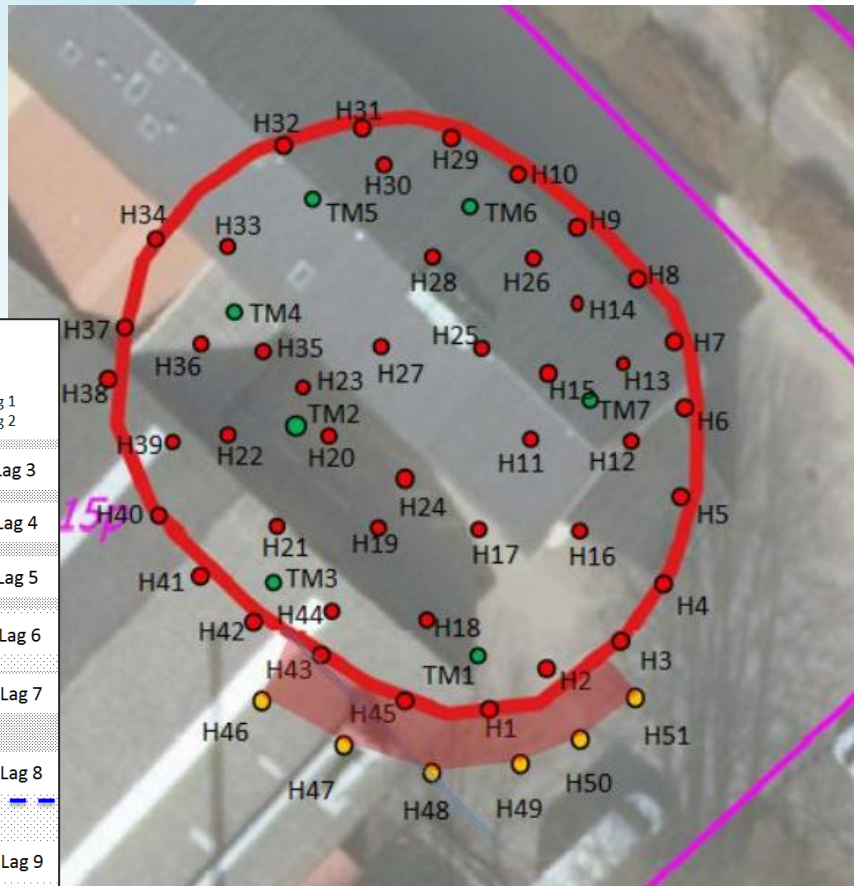
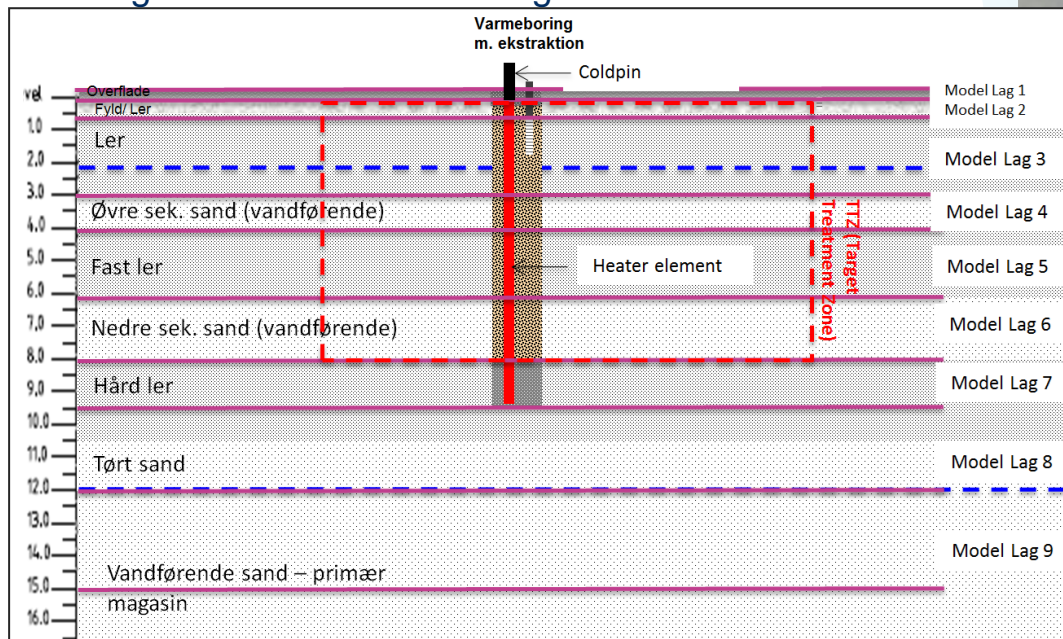
KRÜGER  VEOLIA

Case 1 - baggrund

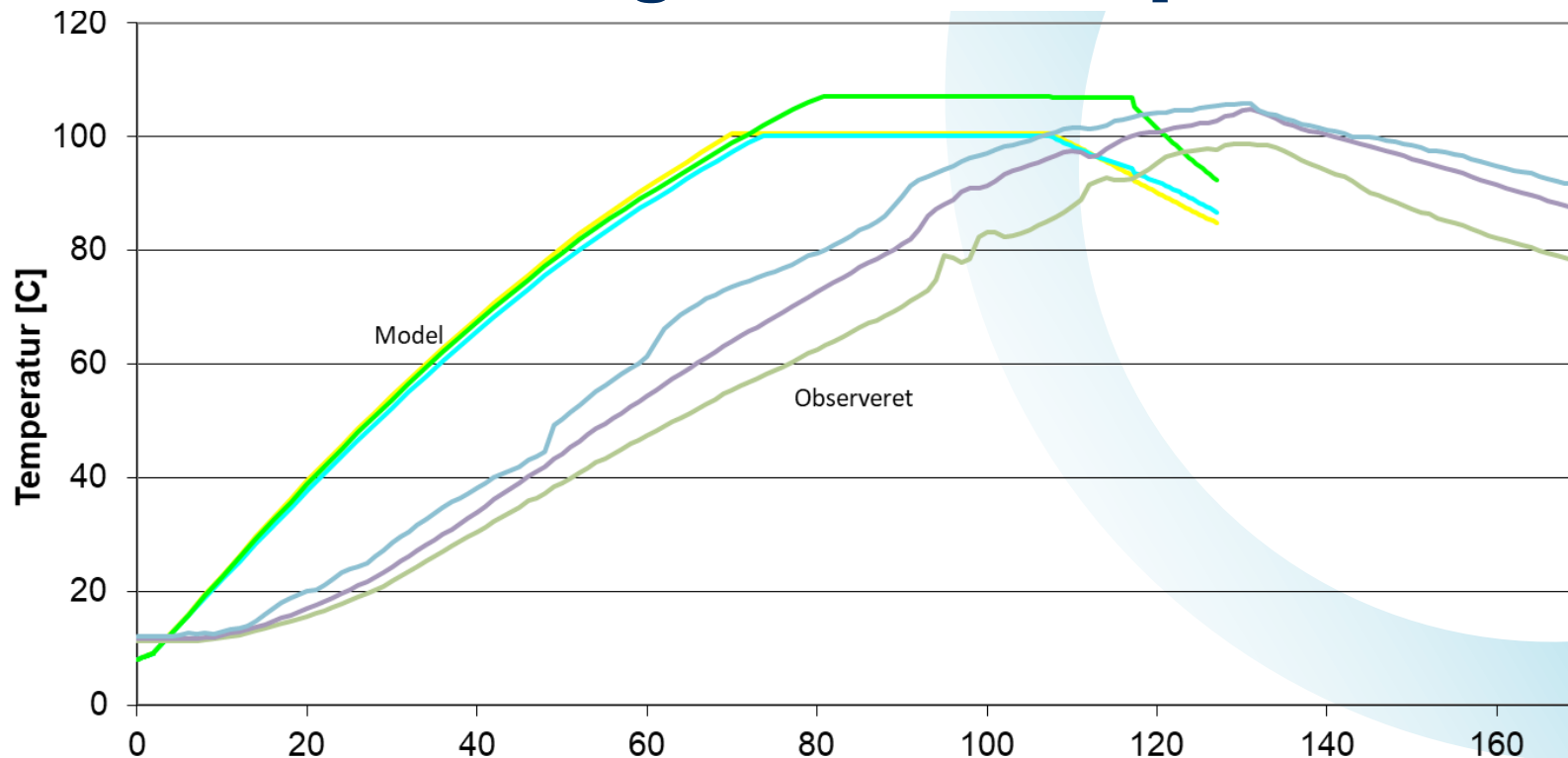
Areal: 525 m², 0-8 mut.

Volumen: 4200 m³

Ler og to vandførende sandlag



Case 1 - Model og faktiske temperaturer

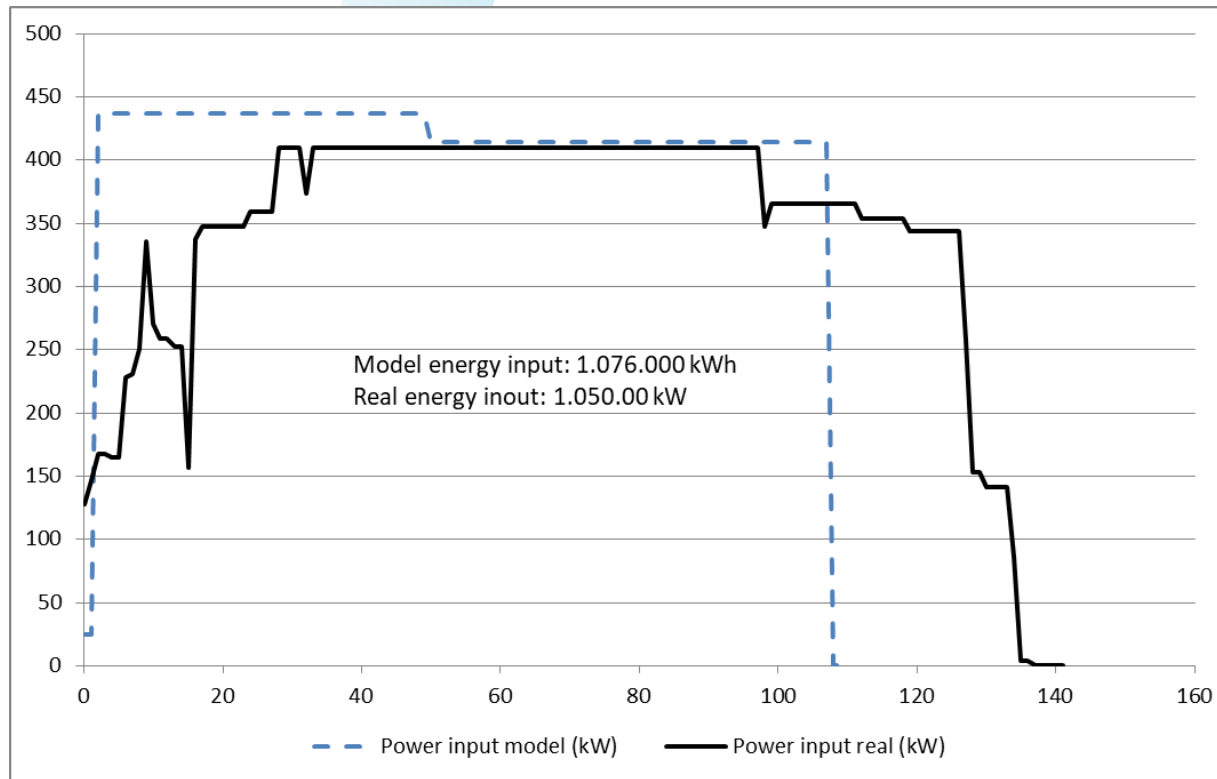


Case 1 - Model og faktisk energiforbrug

Model med højt energi input fra start som reguleres ned når kogning nås. I praksis startes lidt mere forsigtig ud.

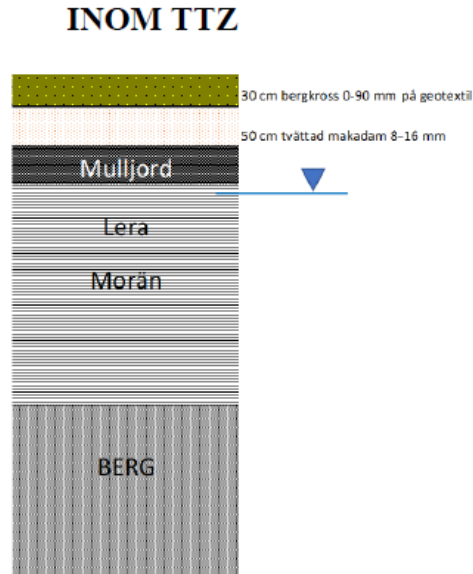
Model estimerer middeltemp i lag. I felten måles de laveste temperaturer i længst fra varmelegemerne.

Totalforbrug forudsiges korrekt i model.



Case 2 - baggrund

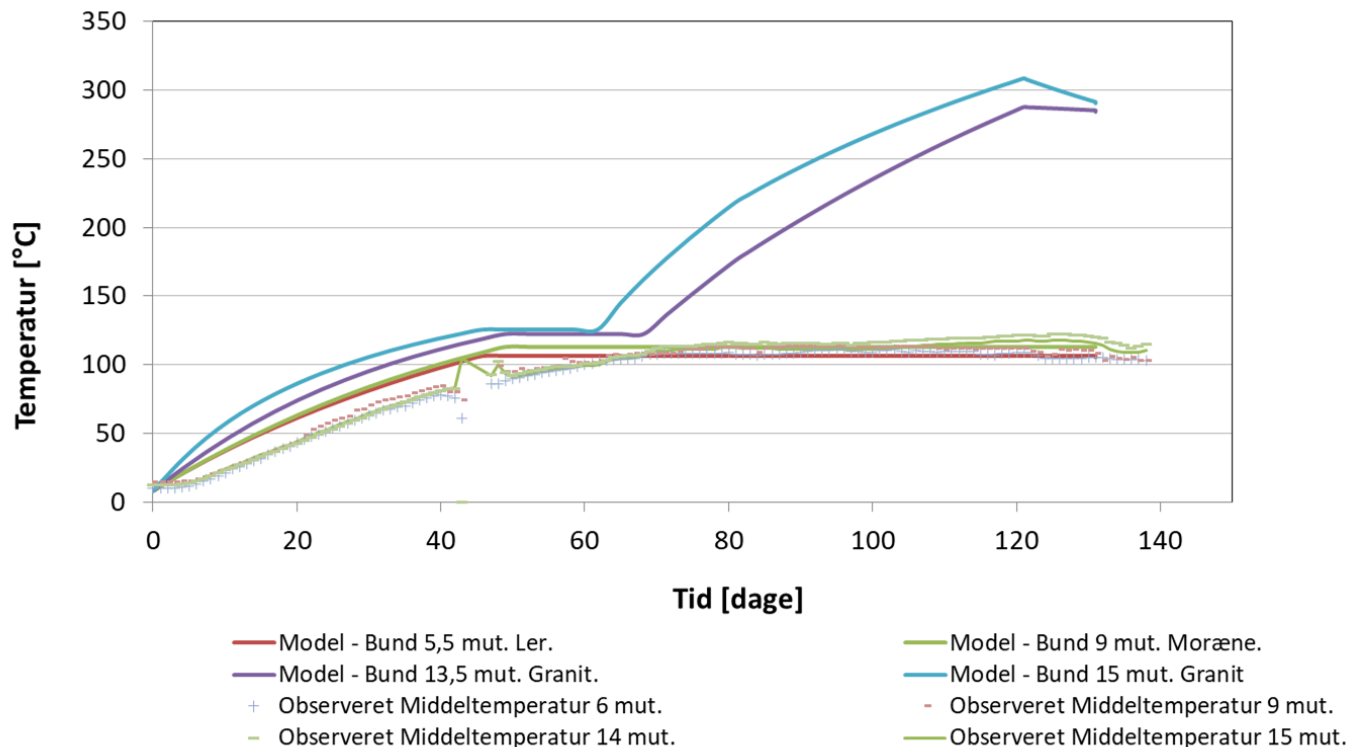
Areal: 300 + 750 m², 0-8 og 0-15 mut.
Volumen: 10500 m³
Ler, moræne og bjerg



Case 2 - Model og faktiske temperaturer

I modellen opnås udtørring af granit lag 9-15 m.u.t.

Udtørring ses ikke af målte temperaturer, som ikke overstiger vands kogepunkt



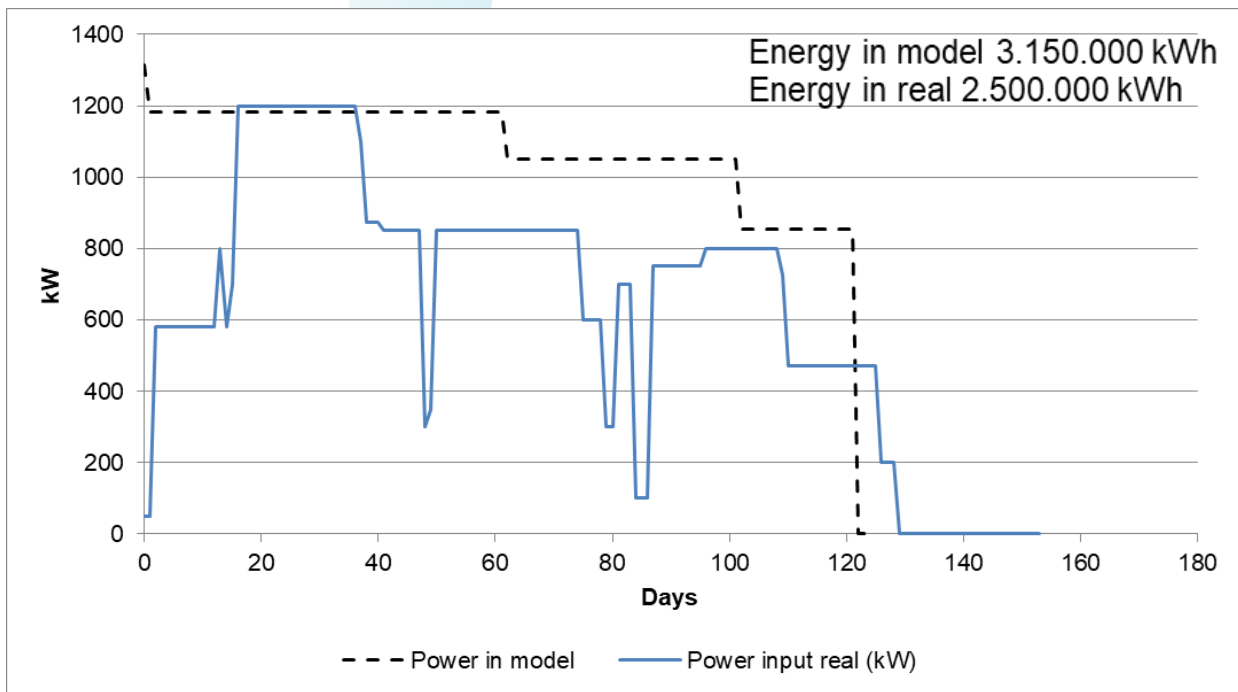
Case 2 - Model og faktisk energiforbrug

Tilført effekt er lavere end i model gennem projektet.

Samlet energiforbrug er 20 % under det beregnede.

Forskel tilskrives mindre strømning af grundvand.

Undergrunden har høj varmetransport grundet højt vandindhold og høj permeabilitet (både konvention og varmeledning)



Case 3 - baggrund

Areal:

Omr 1: 450 m², 2-7 mut.

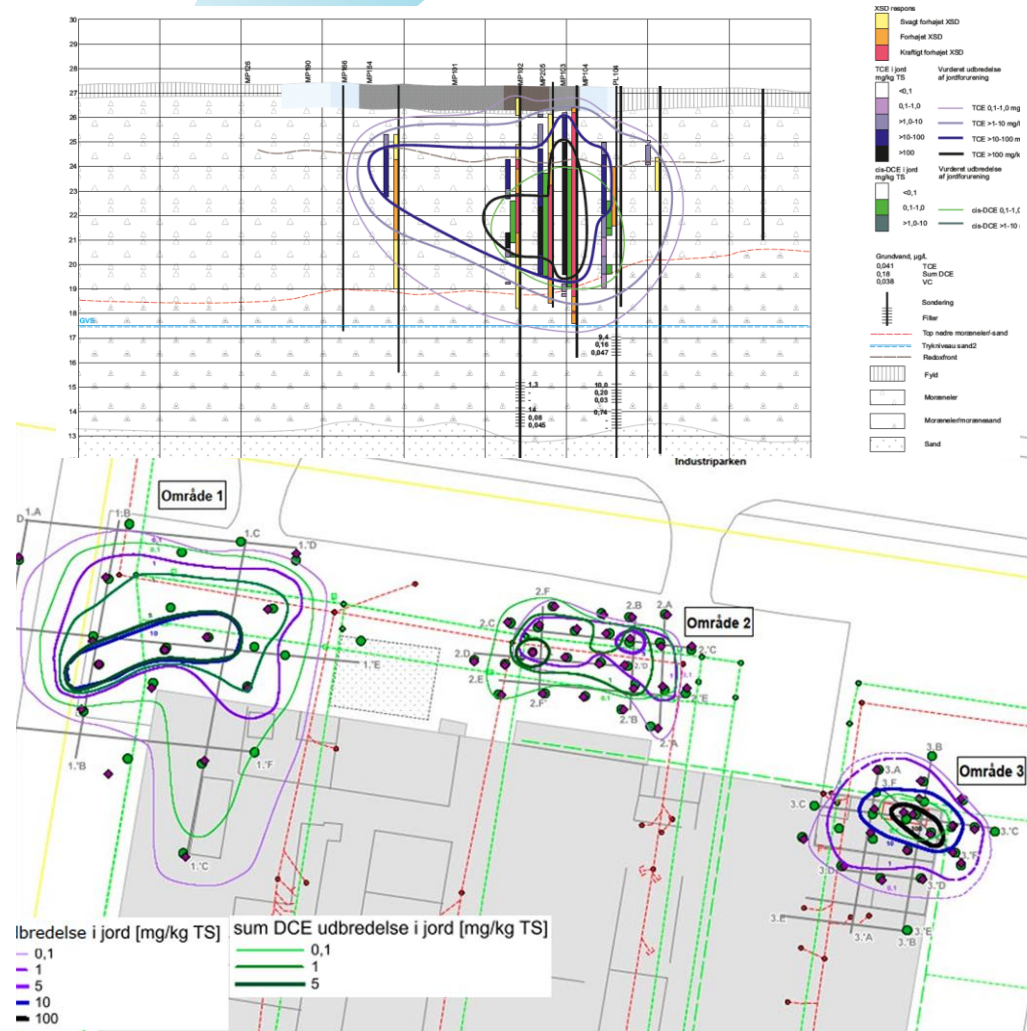
Omr 2: 150 m², 2-10,5 mut.

Omr 3: 200 m², 0,5-8,5 mut.

Volumen: 5125 m³

Moræneler, morænesand

Overvejende umættet zone



!-2. Forureningsudbredelse af TCE og DCE i jorden /1/.

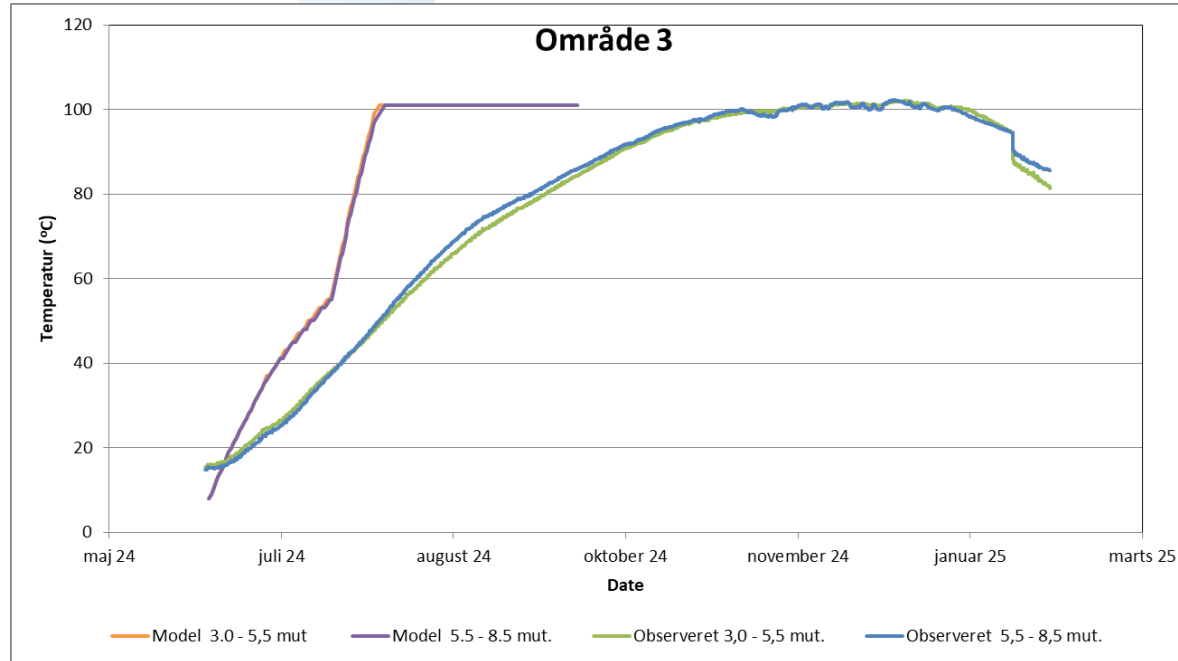
Case 3 - Model og faktiske temperaturer

Modelberegning er modificeret til at anvende det reelle power input over perioden maj-juni.

Temperaturudviklingen er stadig betydeligt langsommere end forudsagt.

Undergrunden har betydeligt lavere varmetransport end tilsvarende projekter

Den reducerede effekt og udstrakte opvarmningstid øger følsomheden for varmetab



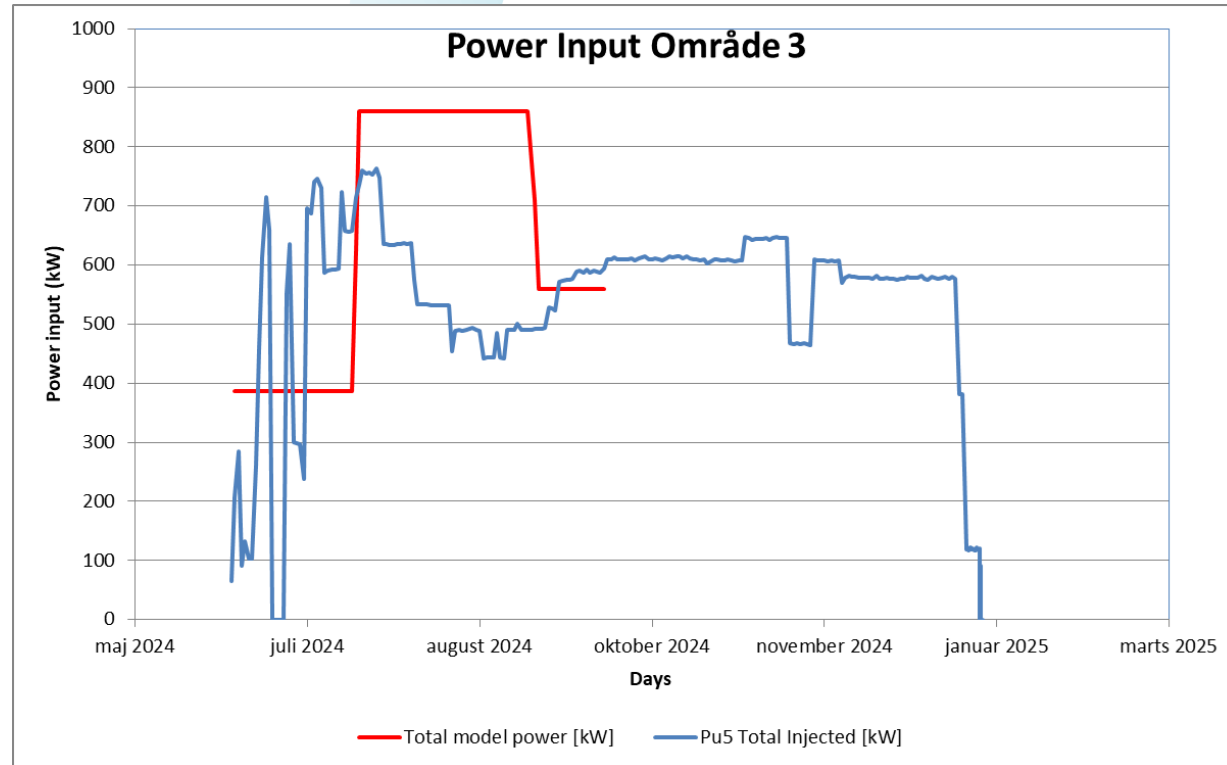
Case 3 - Model og faktisk energiforbrug

Varmeeffekt i model er tilpasset den faktiske effekt i maj og juni.

Omkring juli/aug opdagede vi at lavere energiinput gav stort set samme temperaturudvikling

Reelt input er løbende tilpasset varmelegemernes temperatur og den målte temperaturudvikling.

Samlet energi input overskrider modelberegning



Nøjagtighed af model

Kan man regne med det beregnede opvarmningsforløb?

Udfordringer

Nøjagtighed af model input

Varmetab:

Grundvandsstrømning

Indtrængende overfladevand

Ekstraheret damp og oppumpet vand

Effekttæthed:

Varmetransport

Varmeledningsevne

Konvektion

Oprensningskrav:

Behov for dampgennemskylning ved kogepunktet for at nå lave koncentrationer

Praktiske løsninger

Følsomhedsanalyse

Varmetab

Varmeeffekt

Ekstra oprensningstid ved kogning

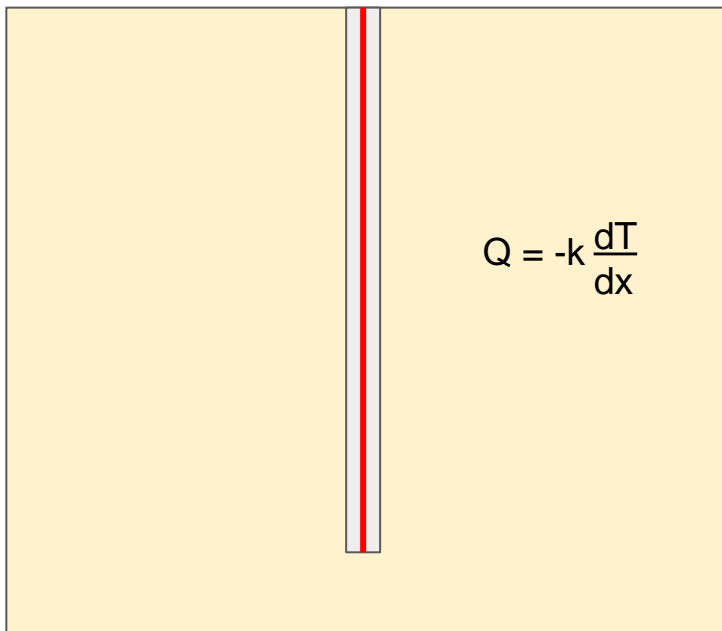
Forbedringer

Udvidelser og alternativer

WATER TECHNOLOGIES

KRÜGER  VEOLIA

Varmetransport ved termisk oprensning

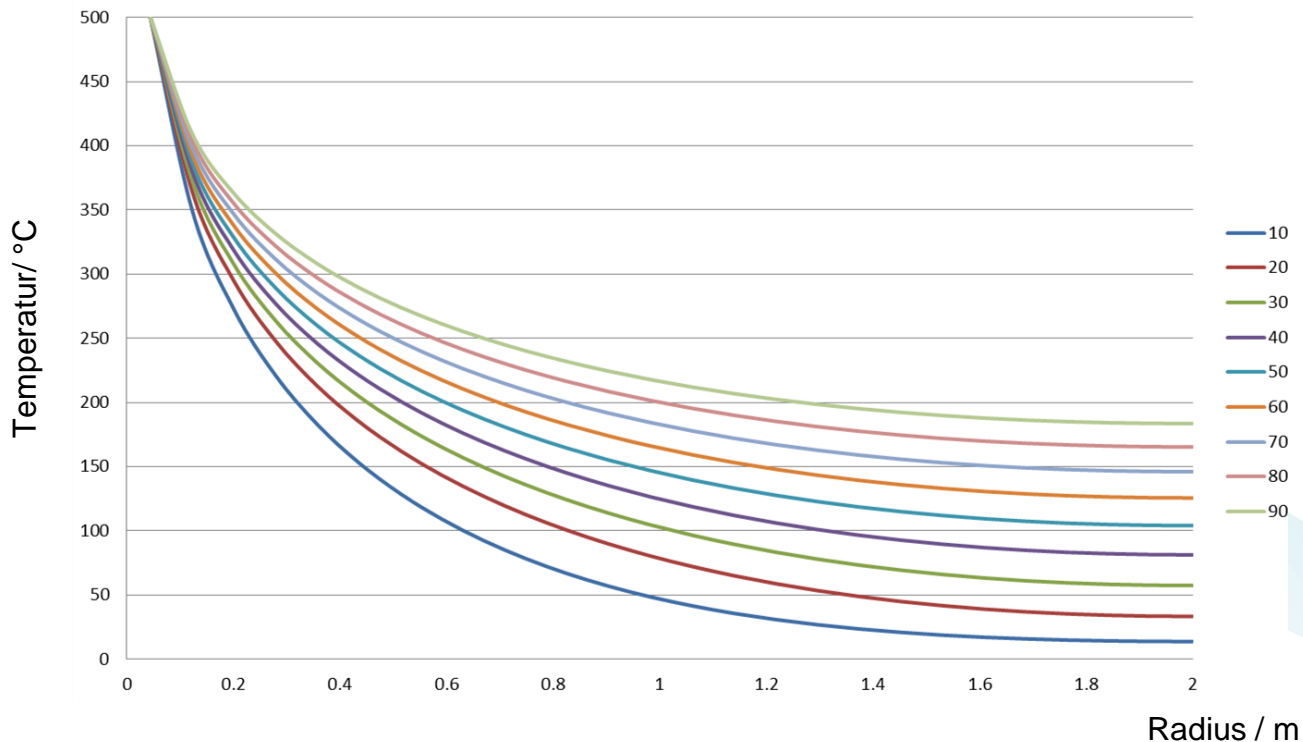


Varmeledning:
Udbredelse af varme i jord

Varmestråling:
Varmelegeme til heater can

Begrænsning:
Heater can i sort stål max ca. 500°C
Varmelegeme i rustfri max ca. 800°C

Varmetransport ved termisk oprensning



Tør jord:

$$d_{\text{HC}} = 0.0889 \text{ m}$$

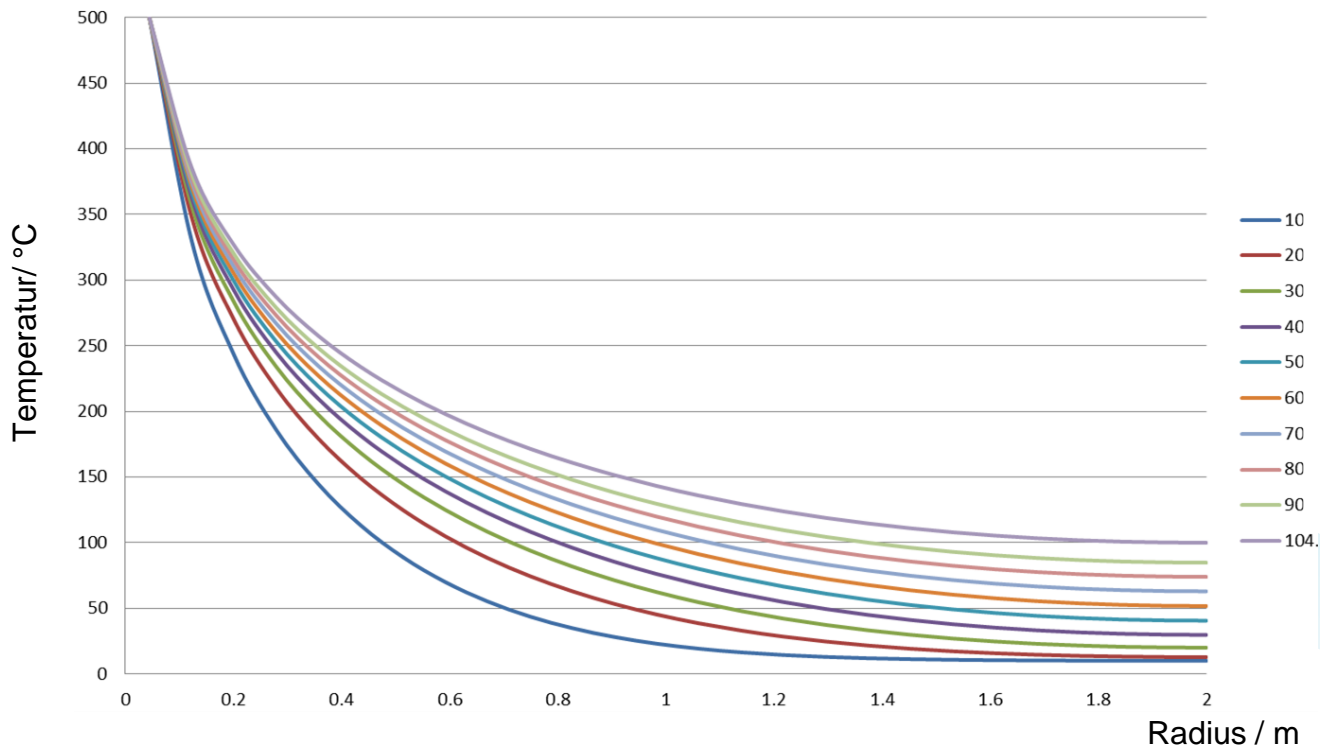
$$T_{\text{HC}} = 500^\circ$$

$$k = 0.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$$

$$\rho_{\text{soil}} = 1600 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$c_{p, \text{soil}} = 800 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$

Varmetransport ved termisk oprensning



Våd jord:

$$d_{HC} = 0.0889 \text{ m}$$

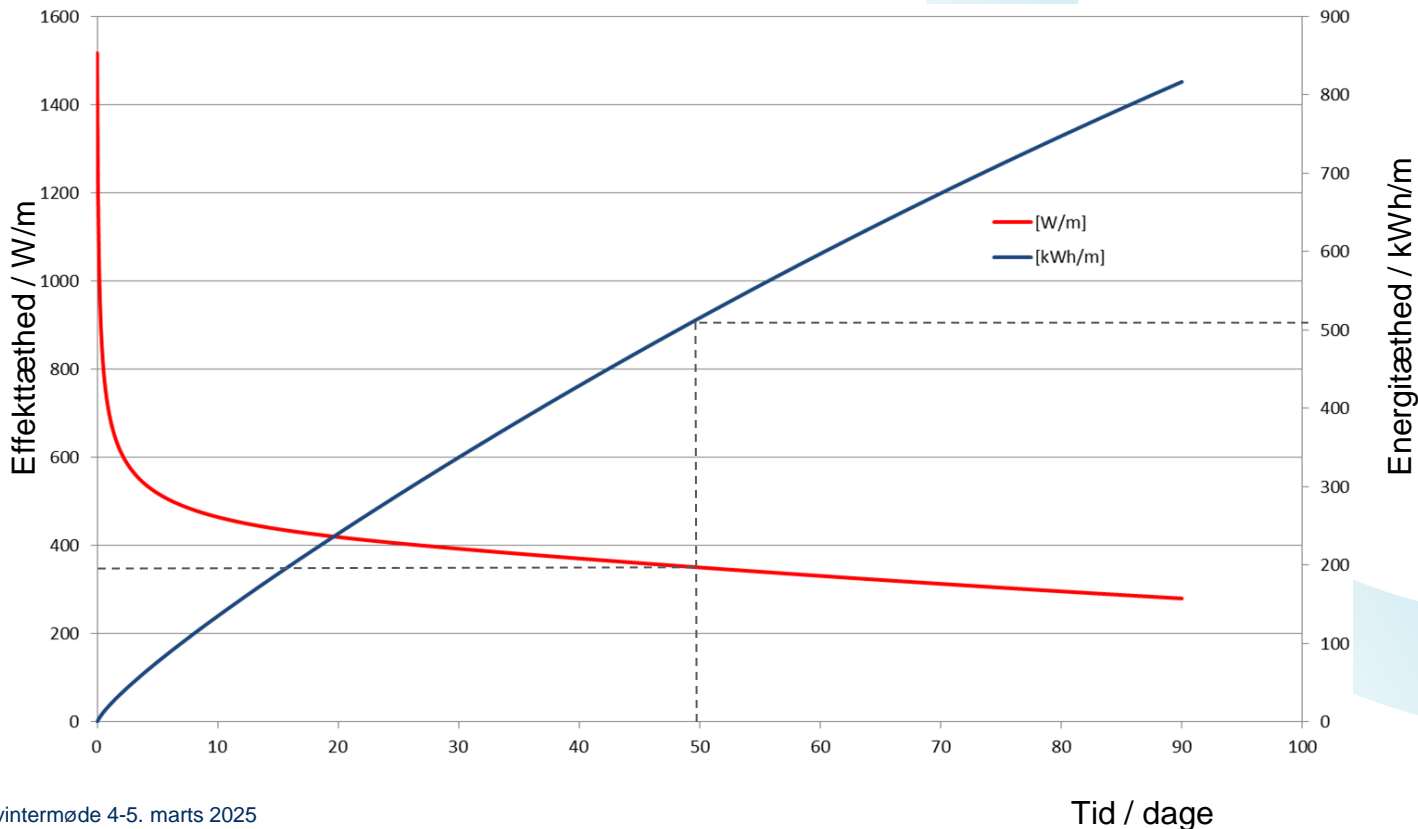
$$T_{HC} = 500^\circ$$

$$k = 0.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$$

$$\rho_{\text{soil}} = 1850 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$c_{p, \text{soil}} = 1500 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$

Varmetransport ved termisk oprensning



Tør jord:

$$d_{HC} = 0.0889 \text{ m}$$

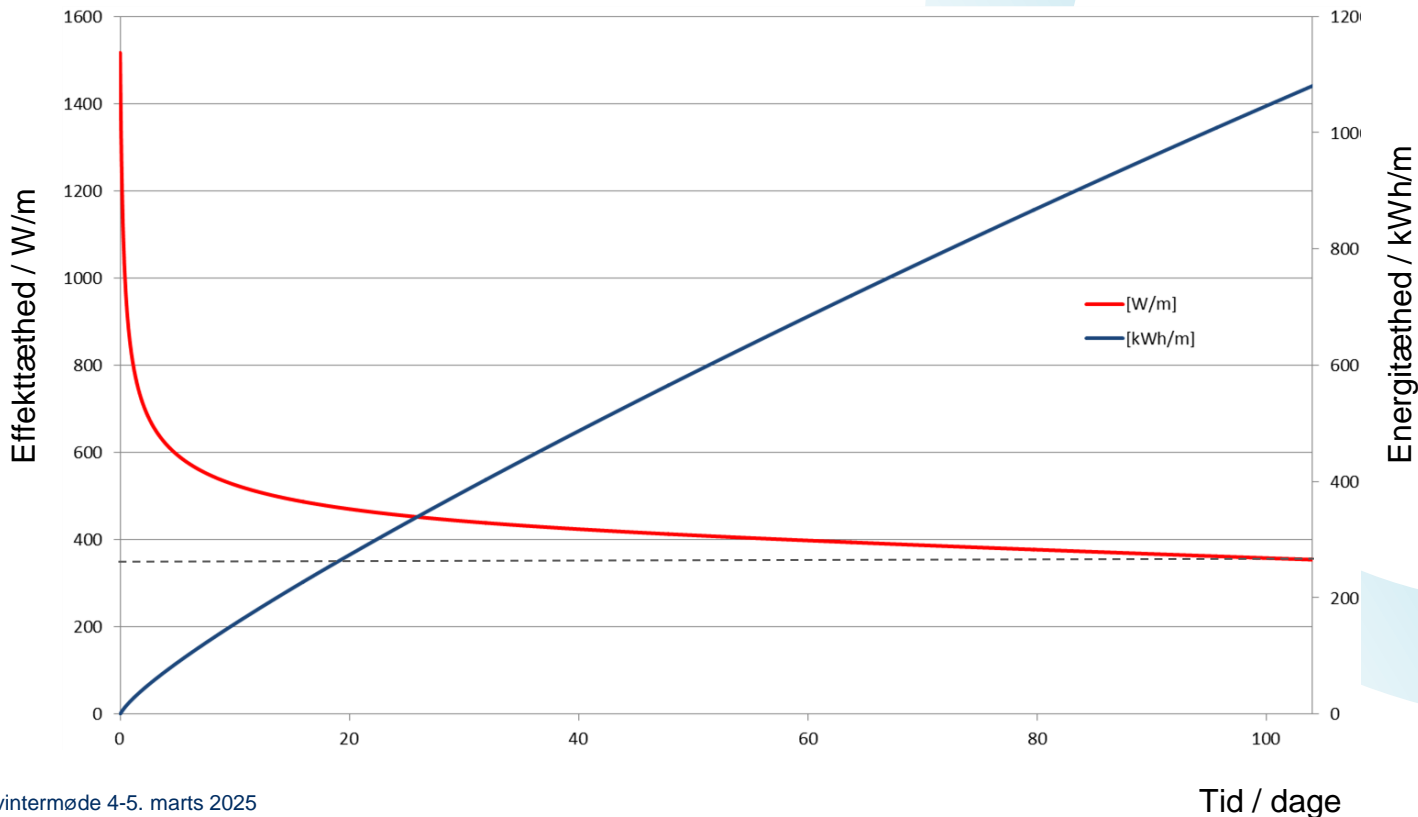
$$T_{HC} = 500^{\circ}$$

$$k = 0.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$$

$$\rho_{\text{soil}} = 1600 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$c_{p, \text{soil}} = 800 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$

Varmetransport ved termisk oprensning



Våd jord:

$$d_{HC} = 0.0889 \text{ m}$$

$$T_{HC} = 500^{\circ}$$

$$k = 0.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$$

$$\rho_{\text{soil}} = 1850 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$c_{p, \text{soil}} = 1500 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$

Validering af model input

Borejournaler

CSM

Erfaringsdata

Pilotforsøg

Løbende sammenligning af model og målte data under udførelse

Alternativer

Finite element analyse

AI-overbygning på numerisk model

Konklusion

WATER TECHNOLOGIES

KRÜGER  VEOLIA

Konklusion

Termisk oprensning er ubønhørligt: Succes eller fiasko

- Grundvand koger eller koger ikke
- Tilført effekt er større eller mindre end varmetab

Projekter er afhængig af (tilstrækkeligt) præcis model

- Økonomi
- Oprensningskrav

En varmebalancemodel er i langt de fleste tilfælde tilstrækkelig

- Efterprøv forudsætninger
- Reager hvis udførsel afviger fra model

Hvor snævert kan en termisk oprensning designes?

Spørgsmål?



Project Manager
In Situ Thermal Solutions
soe@kruger.dk
+45 6037 0738