GEUS

GEOENERGI
Lukkede jordvarmeboringer
-viden, værktøjer og best practice

Afsluttende workshop 13-11-2014, GEUS, Århus

Modellering af strømning og varmeoptag

Anker Lajer Højberg og Per Rasmussen

De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland
Klima- og Energiministeriet

Disposition

- Formål med modellering
- Model
- Gennemførte beregninger
- Resultater
  - Maksimale varmeoptag
  - Øvrige forhold

Formål

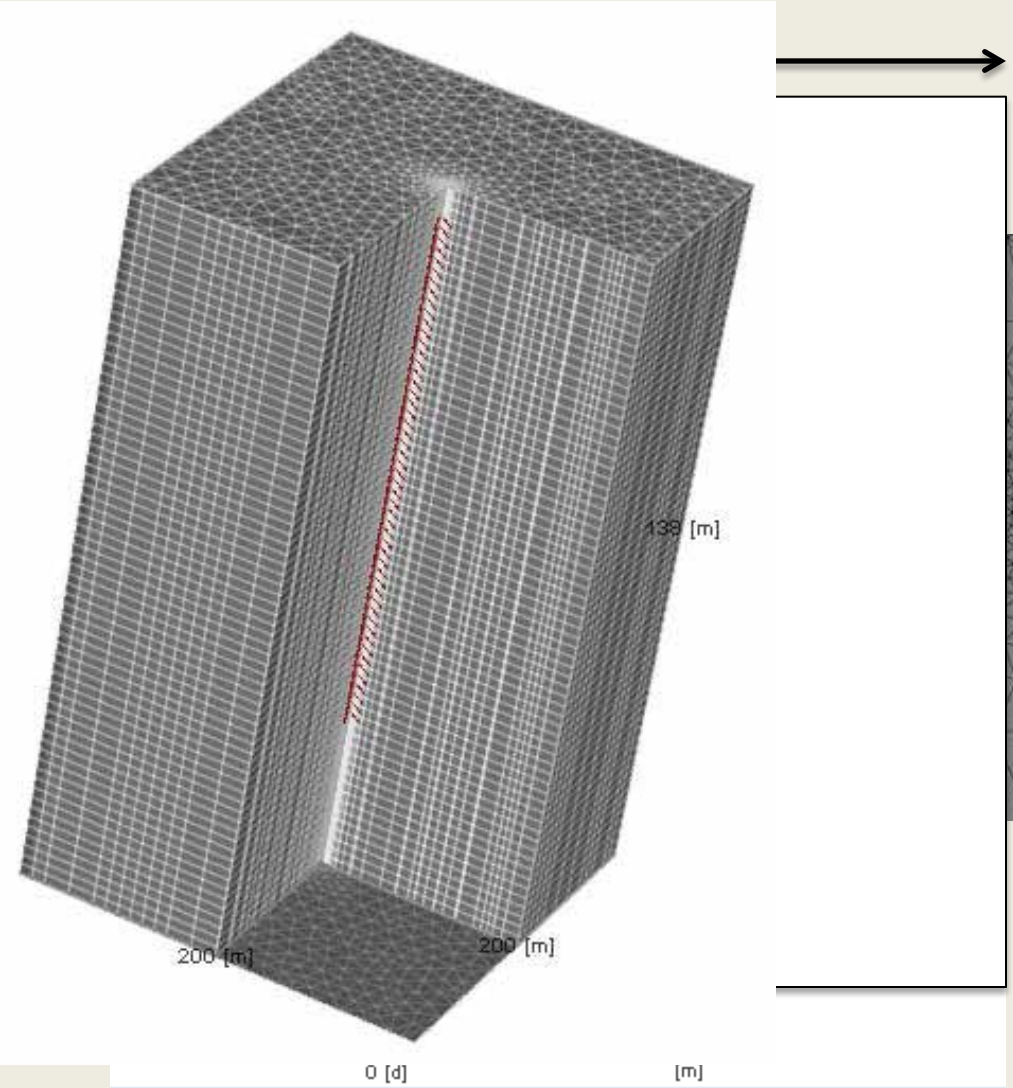
- Undersøge hvilken betydning udvalgt faktorer har for
  - Det maksimale energioptag
  - Temperaturudvikling i undergrunden
- Vurdere temperaturpåvirkningen ved varmelagring

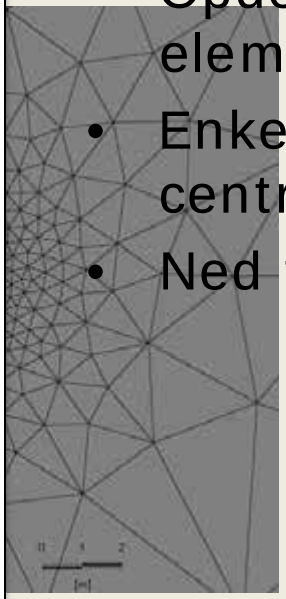
- Supplement til tidligere studier
  - Effekt af grundvandsstrømning
  - Kvantificering i forhold til (maksimalt) varmeoptag

Model

- Modelværktøj: Feflow
  - Numerisk finite element kode
  - Beskrivelse af varmetransport i jordmatrice og ved grundvandstransport
- Kompleks numerisk model
- Der findes en række modelværktøjer der er simplere at anvende og som anvendes rutinemæssigt til dimensionering, men disse er bygget på forskellige antagelser og giver ikke mulighed for at vurdere betydningen af disse antagelser

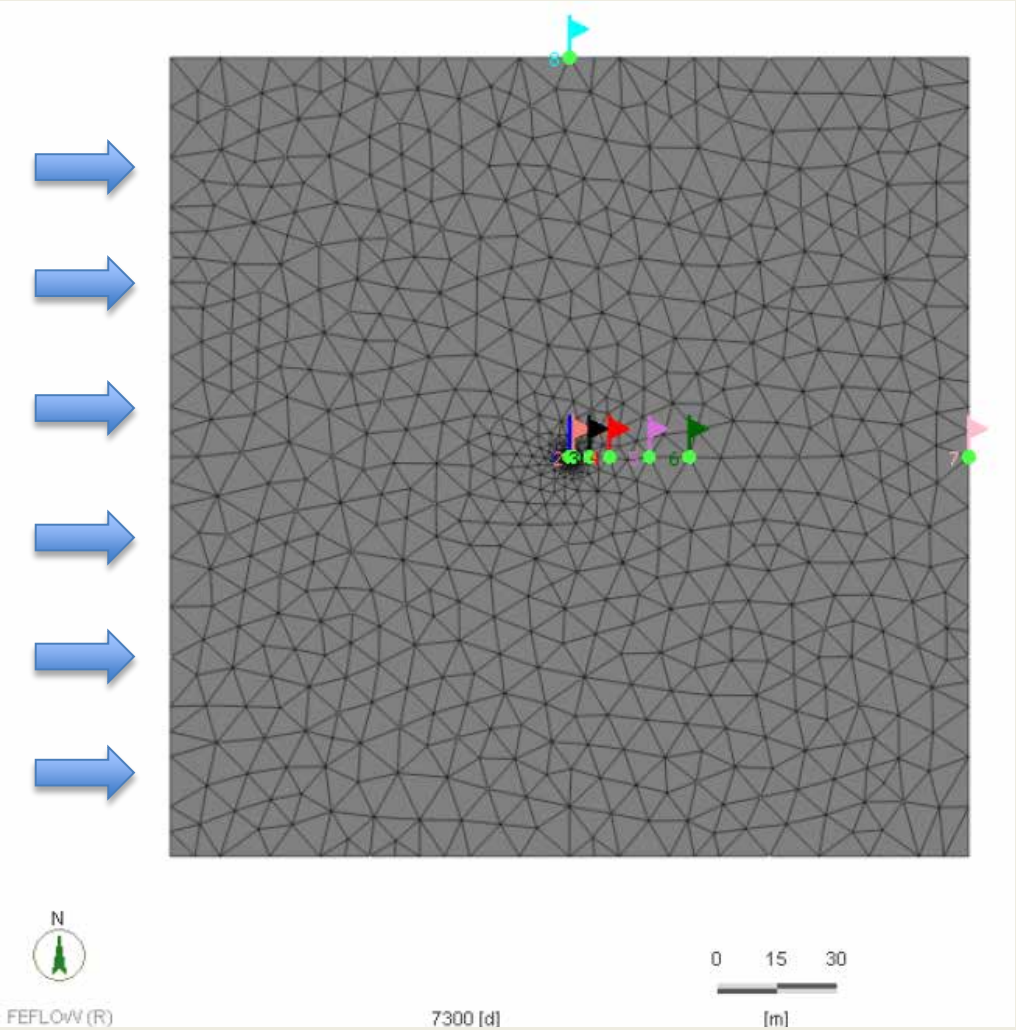
Model





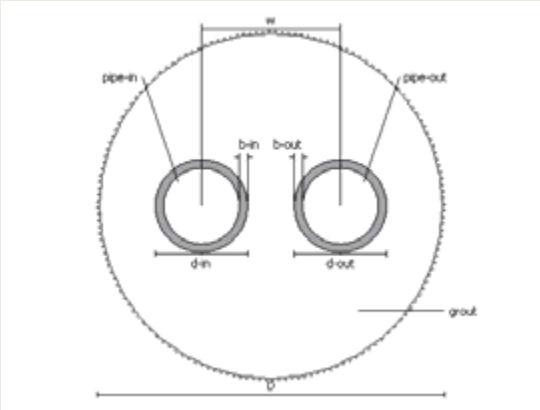
- Areal på 100 m x 100 m
- Opdelt i beregnings-elementer
- Enkelt boring placeret centralt
- Ned til 200 m dybde

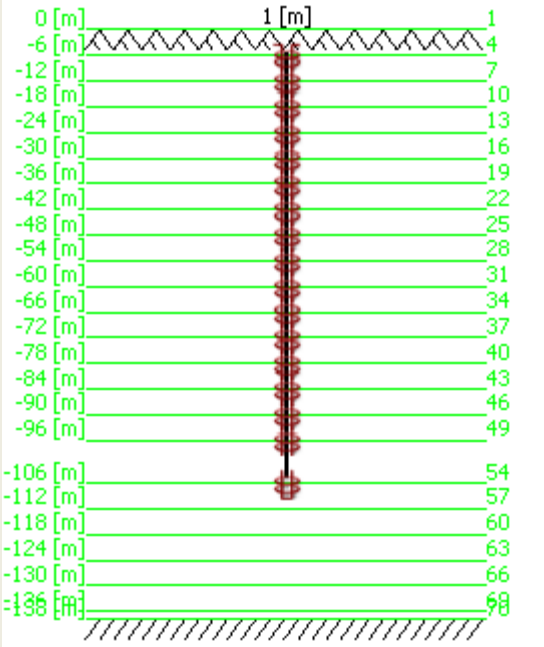
Model



- Areal på 100 m x 100 m
- Opdelt i beregnings-elementer
- Enkelt boring placeret centralt
- Ned til 200 m dybde
- Grundvandsstrømning (vest-øst)
- ”Observationsboringer” til at følge temperatur-udvikling

Model - boring





- Single U-loop
- Specificering af boringskonstruktion

Property	Value
BHE Geometry	Single U-shape
Name	BHE-BL01
Borehole Diameter (D)	0.15 [m]
Pipe Distance (w)	0.06 [m]
Inlet Pipe Diameter (d-in)	0.04 [m]
Inlet Pipe Wall Thickness (b-in)	0.0037 [m]
Outlet Pipe Diameter (d-out)	0.04 [m]
Outlet Pipe Wall Thickness (b-out)	0.0037 [m]
Computational Method	Quasi-stationary (Eskilson & Claesson)
Heat-transfer coefficients	Computed
Inlet Pipe Thermal Conductivity (tc-in)	0.38 [J/m/s/K]
Outlet Pipe Thermal Conductivity (tc-out)	0.38 [J/m/s/K]
Grout volume thermal conductivity (tc-grout)	2.3 [J/m/s/K]
Pipes-in to grout	nan [m s K/J]
Pipes-out to grout	nan [m s K/J]
Grout to grout (1)	nan [m s K/J]
Grout to grout (2)	nan [m s K/J]
Grout to soil	nan [m s K/J]
Refrigerant volumetric heat capacity (Ref. heat cap.)	3.403 [10+6 J/m^3/K]
Refrigerant thermal conductivity (Ref. cond.)	0.6405 [J/m/s/K]
Refrigerant dynamic viscosity (Therm. visc.)	0.5474 [10-3 kg/m/s]
Refrigerant density (Ref. mass dens.)	0.9223 [10+3 kg/m^3]

Analyser

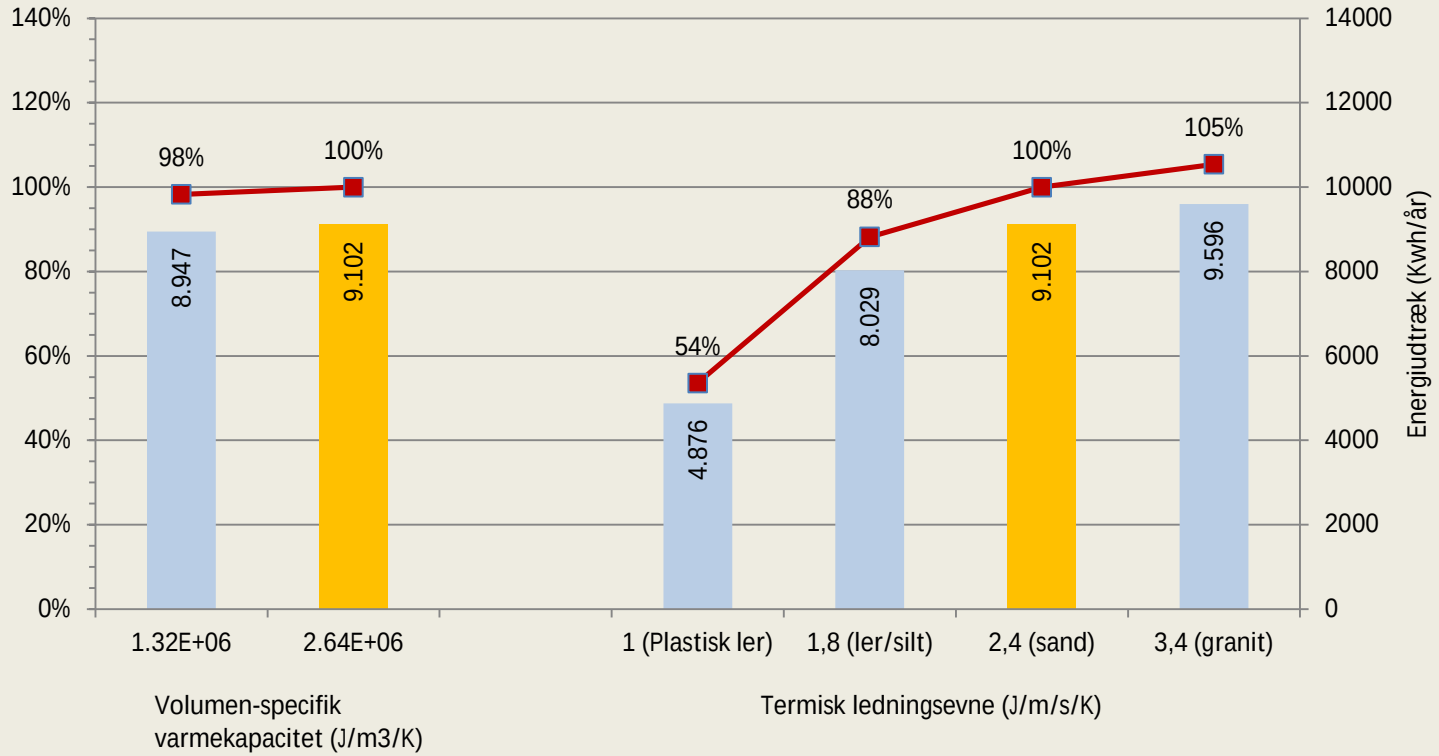
1. Defineret en ”basismodel”
   - Sandet akvifer
   - Temperaturgradient: 3 °C/100 m
   - Grundvandsstrømning: gradient på 3 ‰
   - ”Standard” single loop BHE, 100 m dyb
   - 150 dage drift om året, i hvile resten af året
2. Udvalgte parametre justeres enkeltvist
3. Opgørelse af effekt ved parameterændring
   - Ændring i det maksimale varmeoptag i forhold til basismodel
   - Temperatur i undergrund (tid og sted)

Følsomheds-analyse

- 17 parametre udvalgt
- 1-7 alternative værdier for hver parameter
- Ca. 50 forskellige opsætninger

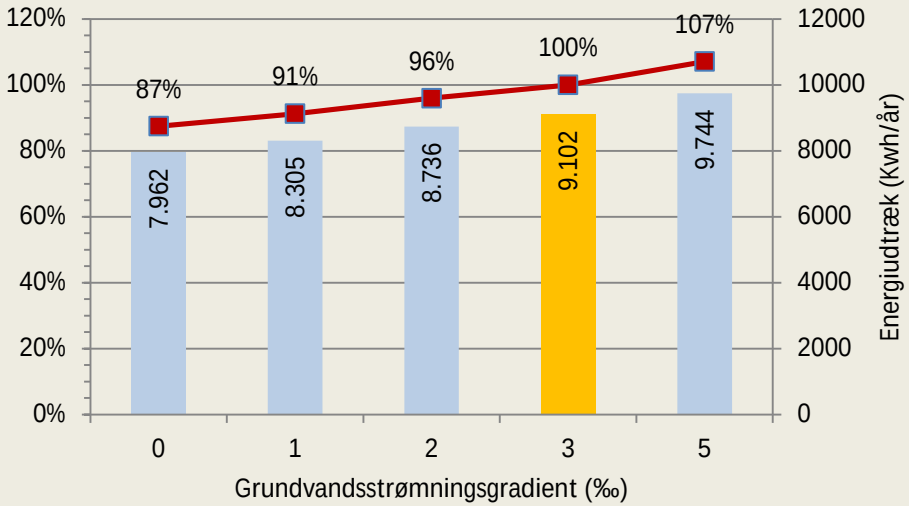
		enhed	Basismodel	Ændringer ved følsomhedsanalyse
Geologiske forhold	*Bjergart*			
	Horisontal hydraulisk ledningsevne (Kx=Ky)	m/s	1,00E-04	7 typegeologier
	Vertikal hydraulisk ledningsevne (Kz)	m/s	1,00E-05	Altid 1/10 af Kx
	Porøsitet	-	0,3	Konstant
	Longitudinal dispersivitet	m	0,2	0.6; 1.8
	Transversal dispersivitet	m	0,02	Altid 1/10 af longitudinal dispersivitet
	Volumen-specifik varmekapacitet	J/m3/K	2,640E+06	7 typegeologier
	Termisk ledningsevne	J/m/s/K	2,4	7 typegeologier
	Anisotropy	-	1	Konstant
	Vand			
	Volumen-specifik varmekapacitet	J/m3/K	4,20E+06	Konstant
	Termisk ledningsevne	J/m/s/K	0,65	Konstant
	Temperatur	C	8,69	Konstant
	Rand			
	Grundvandsstrømningsgradient	promille	3	0; 1; 2; 5
	Temperaturgradient	C/100m	3	1; 2; 3; 4
	Temperatur modelrand, top	C	8,69	Konstant
	Temperatur modelrand, bund	C	12,83	Varierer med temperaturgradient
Boringskonstruktion	*Boring*			
	Boredybde	m	100	50; 76; 110; 120;130
	Diameter	m	0,15	0,2; 0,25; 0,30
	Volumen-specifik varmekapacitet af grout	J/m3/K	2,190E+06	Konstant
	Termisk ledningsevne af grout	J/m/s/K	2,3	1,0; 2,0
	Slanger			
	Ydre diameter	m	0,04	0,03
	Godstykkelse	m	0,0037	0,029
	Afstand mellem slanger (center til center)	m	0,06	0,04; 0,08; 0,10
	Termisk ledningsevne af slanger	J/m/s/K	0,38	Konstant
	Brine			
	Volumen-specifik varmekapacitet	J/m3/K	3,403E+06	Konstant
	Termisk ledningsevne	J/m/s/K	0,6405	1,281
	Dynamisk viskositet	kg/m/s	5,4741E-04	1,0948E-03
	Massefylde	kg/m3	9,2225E+02	1,01E+03
	Drift			
	Indløbstemperatur	C	0	Konstant
	Pumpeydelse	m3/d	30	Konstant
	Pumpetid	d	150	50, 75, 100, 125, 182
	Modelsimuleringstid	år	10	Konstant

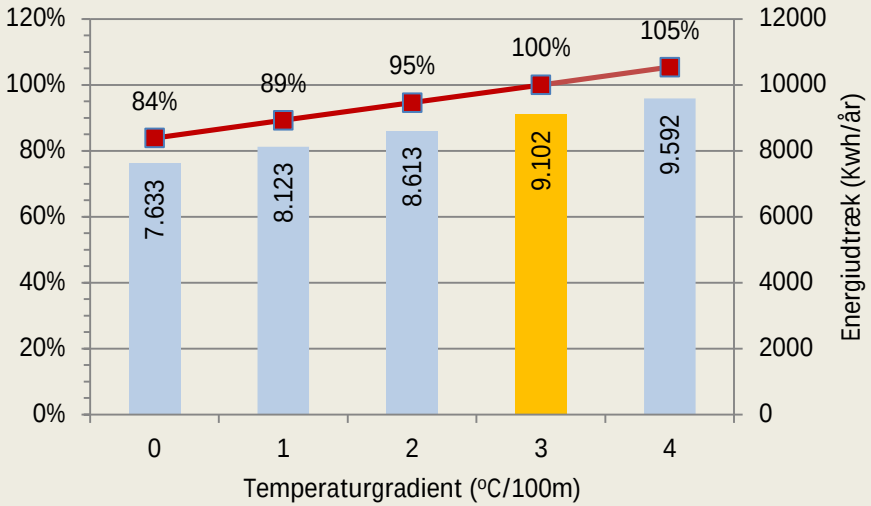
Geologi



- Jordens termiske ledningsevne (jordens evne til at lede varmen) er den mest betydende faktor af alle undersøgte parametre
  - Ca. en faktor 2 fra bedste til værste materiale
- Varmekapacitet (jordens evne til at lagre varme) er mindre betydende

Grundvandsstrømning og temperaturgradient

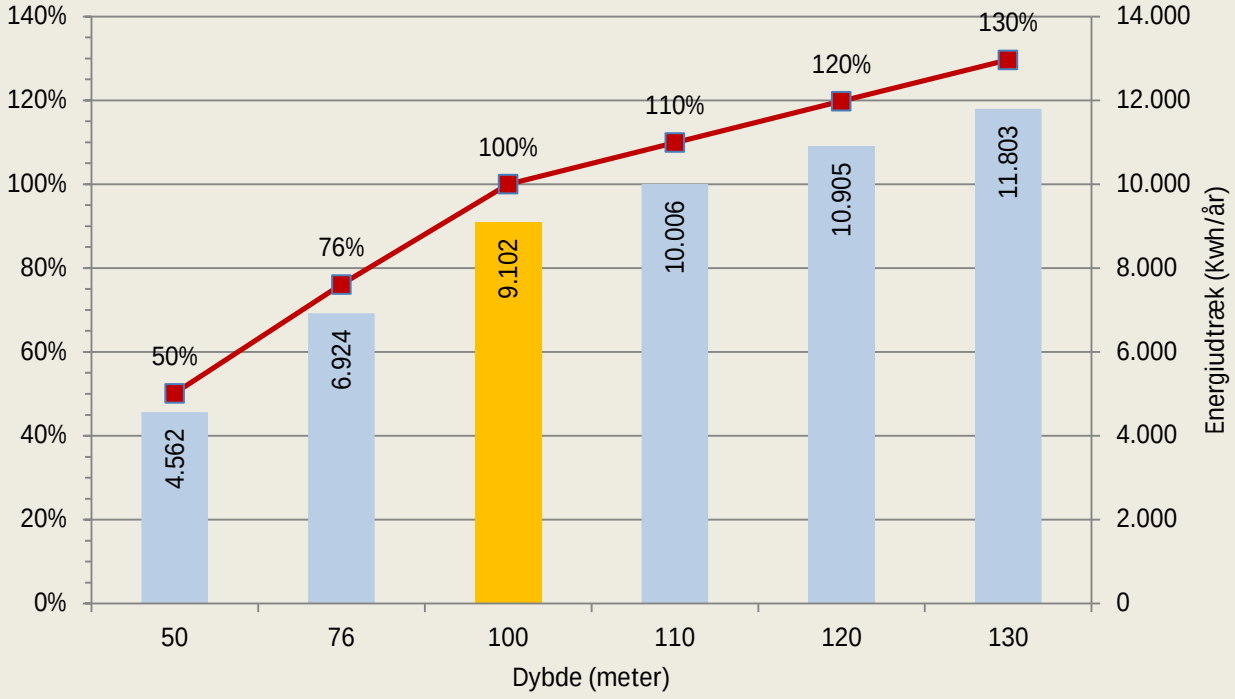




Grundvandsstrømning i sandakvifer ved forskellige hydrauliske gradienter

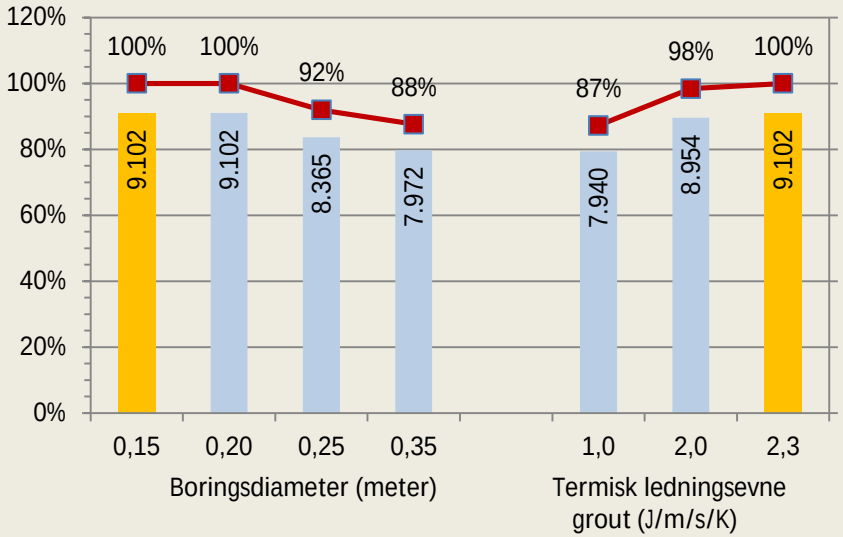
- Grundvandsstrømning og temperaturgradient har sammenlignelig effekt på varmeoptag

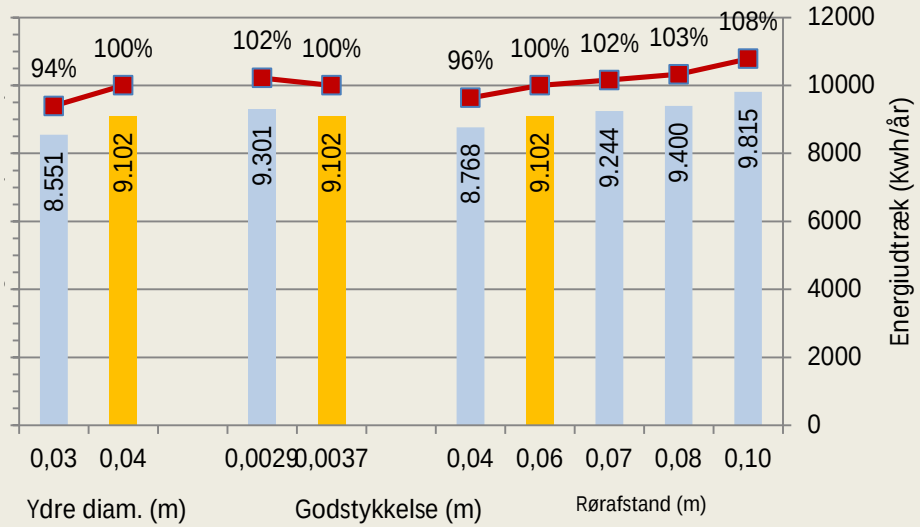
Boringsdybde



- For de undersøgte boringsdybder i basisopsætningen ses en (lineær) stigning af varmeoptaget

Boringskonstruktion





- Varmeoptag øges des bedre kontakten er med jordmatricen og des mindre interferens der er mellem ind- og udløbsslange

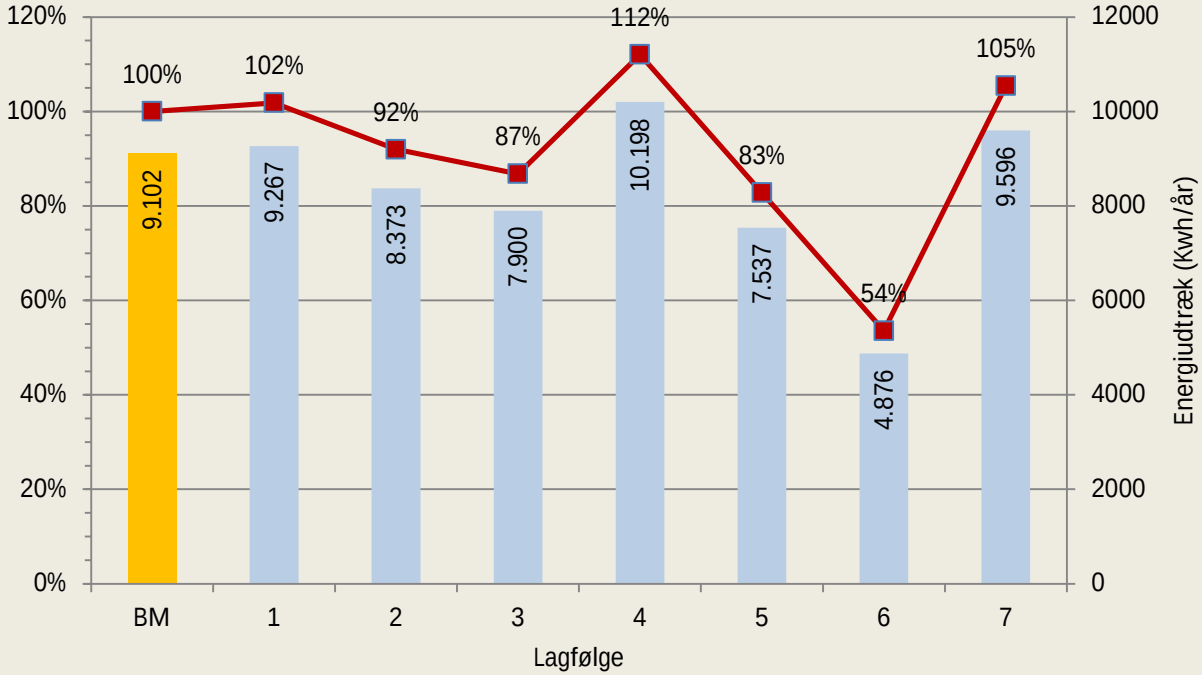
Type geologier

Geologisk type	Geologisk lagfølge	Lokalitetstype
BM	smeltevandssand: 0-138 m	
1	smeltevandssand: 0-50 m; granit: 50-138 m	Bornholm
2	smeltevandssand: 0-78 m; kalk: 78-138 m	Øst Danmark, Norddjurs og Limfjorden
3	smeltevandssand: 0-78 m; ler: 50-138 m	Vestsjælland, Fyn, Østjylland og Vendsyssels
4	smeltevandssand: 0-50 m; ler: 50-76 m; kvartssand: 76-138 m	Vestjylland
5	ler: 0-30 m; smeltevandssand: 30-60 m; kalk: 60-138 m	Øst Danmark
6	plastisk ler: 0-138 m	
7	granit: 0-138 m	

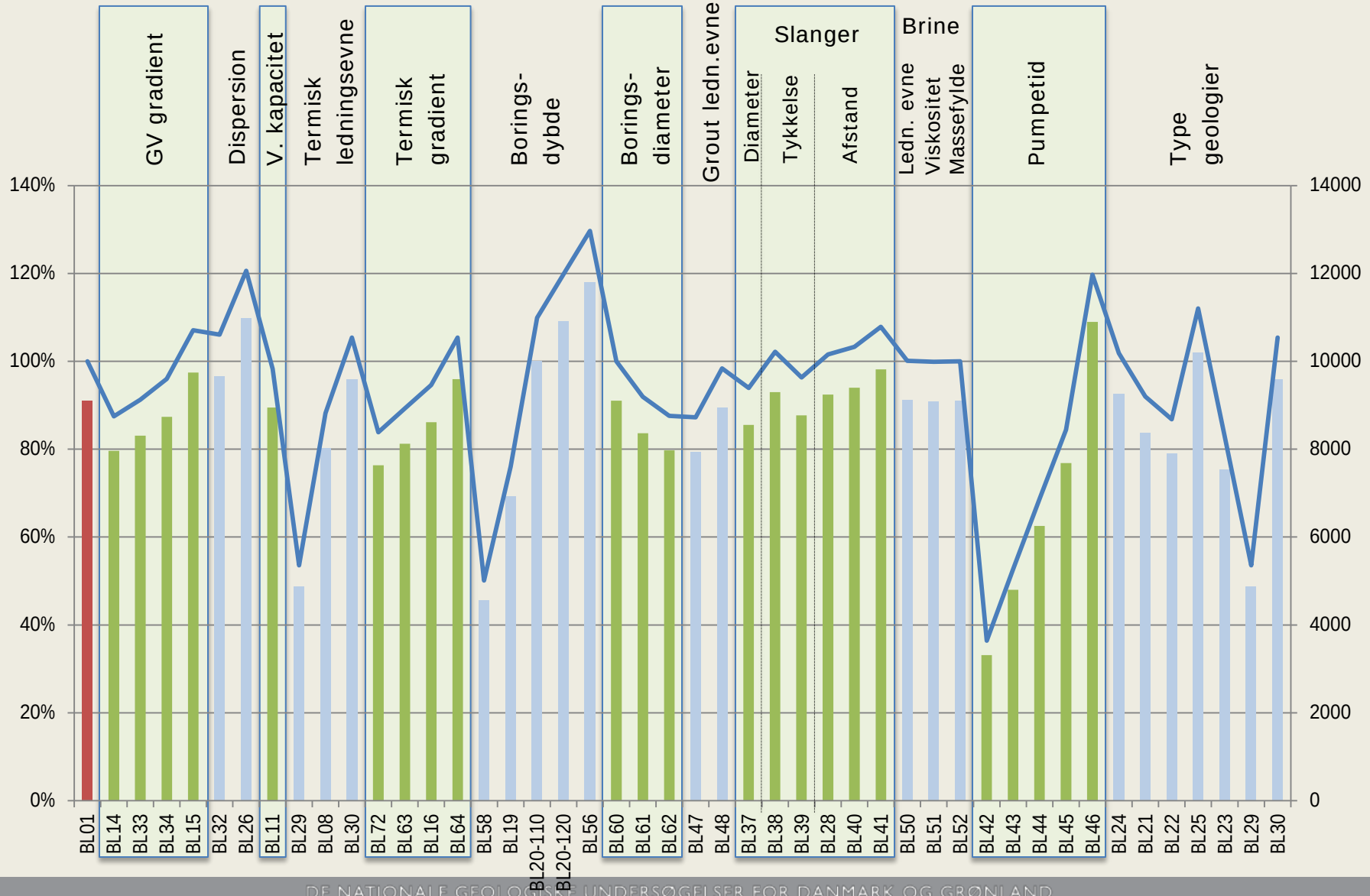
Karakterisering af type geologier repræsen-terende typiske forhold forskellige steder i landet

Maksimale varmeoptag ved samme borings-konstruktion og drift i forskellige type geologier

Grundvandsstrømning ved gradient på 3 ‰ i alle beregninger



Samlet

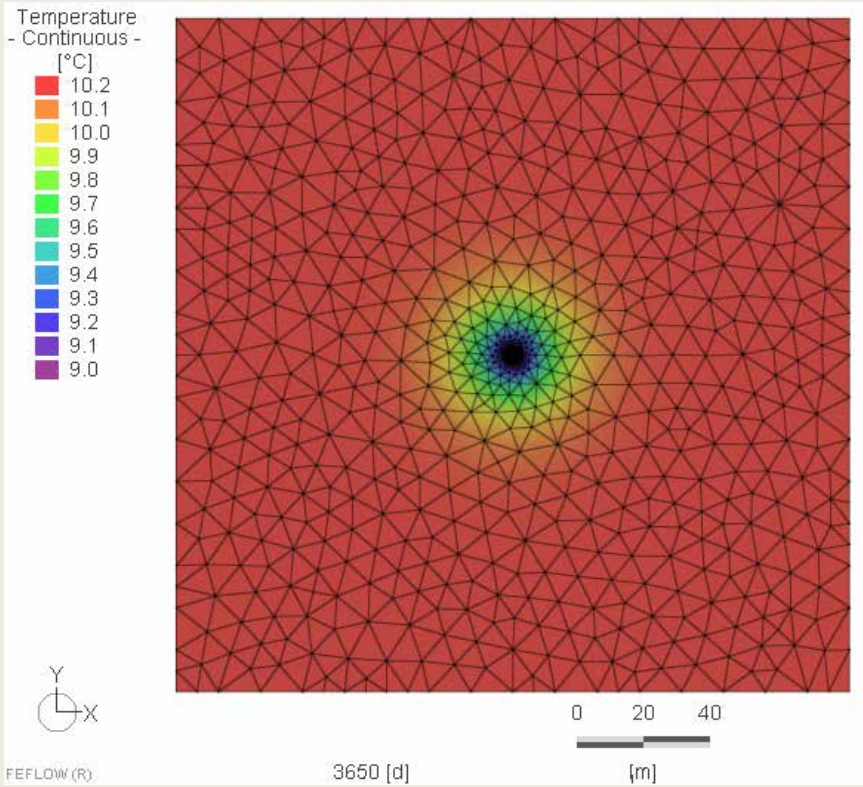

GV gradient
Dispersion
V. kapacitet
Termisk ledningsevne
Termisk gradient
Borings-dybde
Borings-diameter
Grout ledn.evne
Slanger
Diameter
Tykkelse
Afstand
Brine
Ledn. evne
Viskositet
Massefylde
Pumpetid
Type geologier
140%
120%
100%
80%
60%
40%
20%
0%
14000
12000
10000
8000
6000
4000
2000
0
BL01
BL14
BL33
BL34
BL15
BL32
BL26
BL11
BL29
BL08
BL30
BL72
BL63
BL16
BL64
BL58
BL19
BL20-110
BL20-120
BL56
BL60
BL61
BL62
BL47
BL48
BL37
BL38
BL39
BL28
BL40
BL41
BL50
BL51
BL52
BL42
BL43
BL44
BL45
BL46
BL24
BL21
BL22
BL25
BL23
BL29
BL30

Øvrige forhold

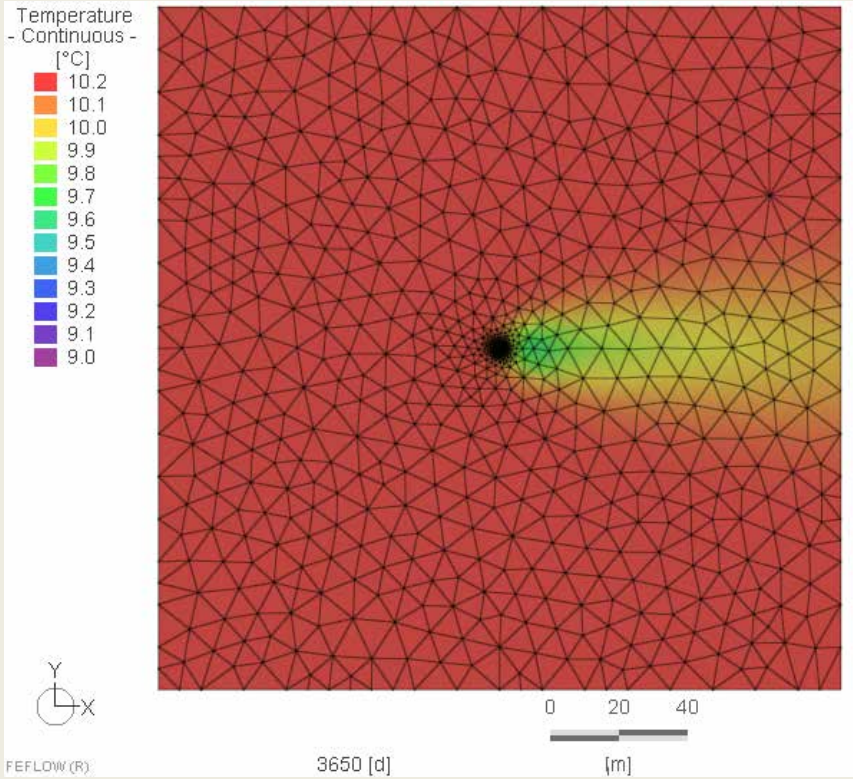
- Energi balance
- Boringsdybde

Grundvandsstrømning

Ingen grundvandsstrømning



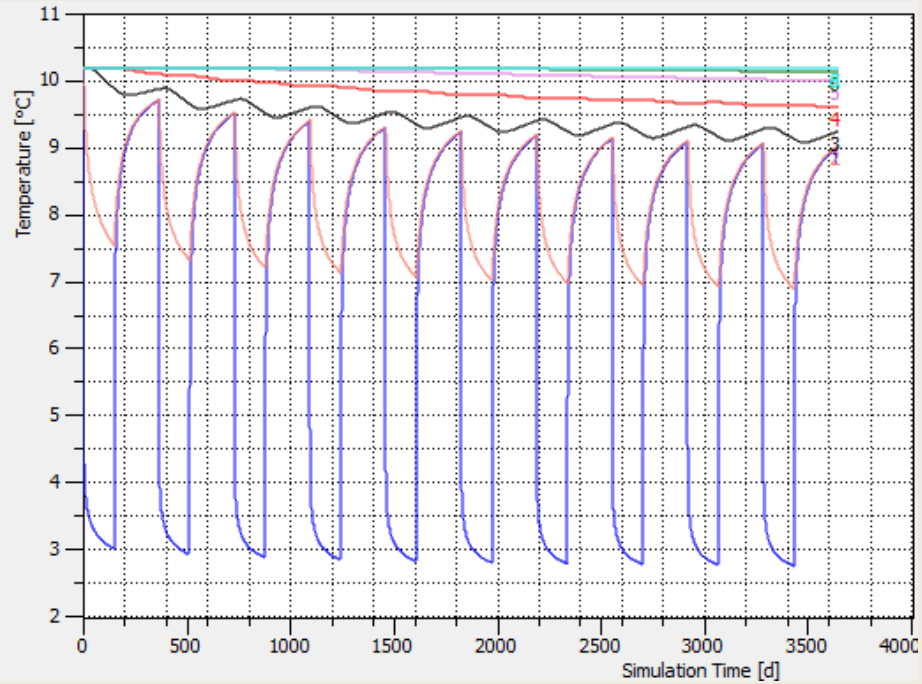
Med grundvandsstrømning



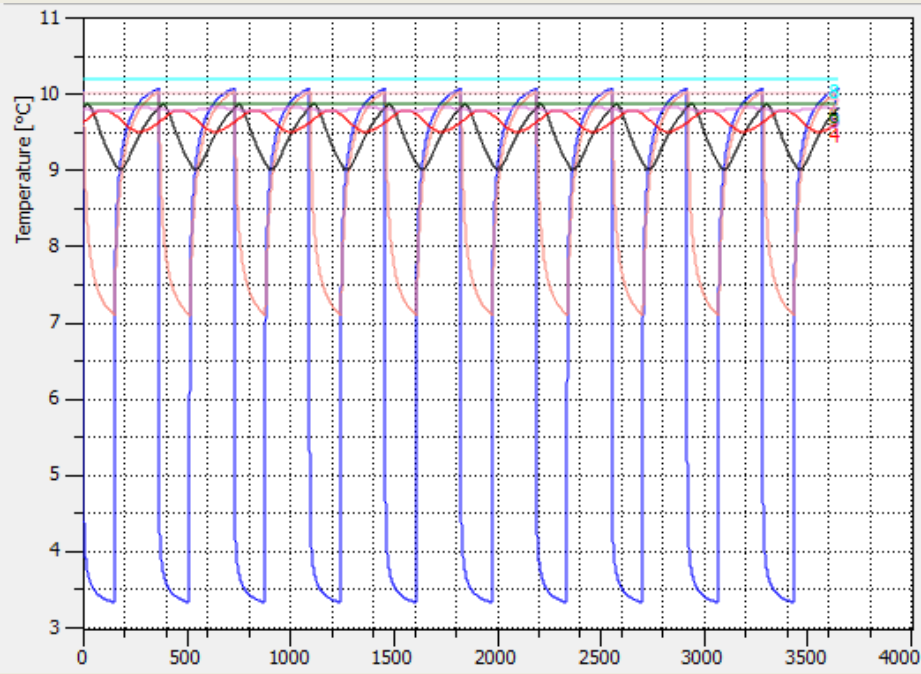
- Ved grundevandsstrømning tilføres boringen konstant grundvand med baggrundstemperatur
  - Ved anvendelse af boring udelukkende til varmeoptag, vil der hele tiden tilføres ny energi til systemet

Energi balance

Ingen grundvandsstrømning

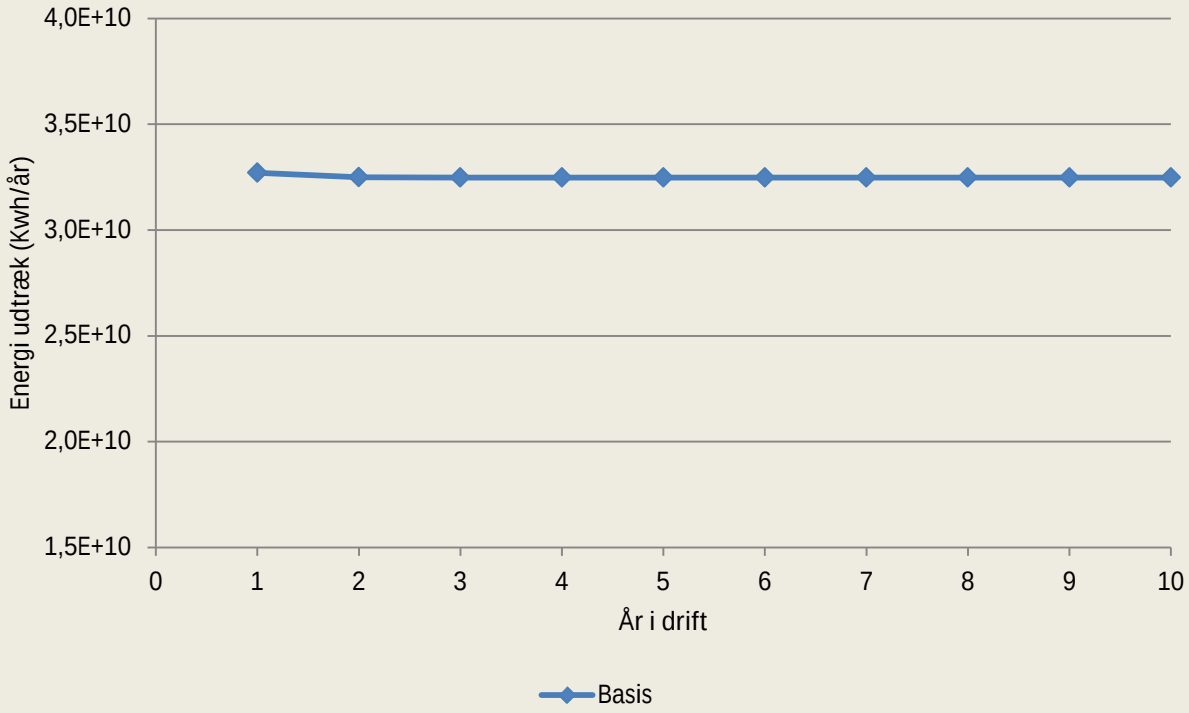


Med grundvandsstrømning



- Ved grundevandsstrømning tilføres boringen konstant grundvand med baggrundstemperatur
  - Ved anvendelse af boring udelukkende til varmeoptag, vil der hele tiden tilføres ny energi til systemet

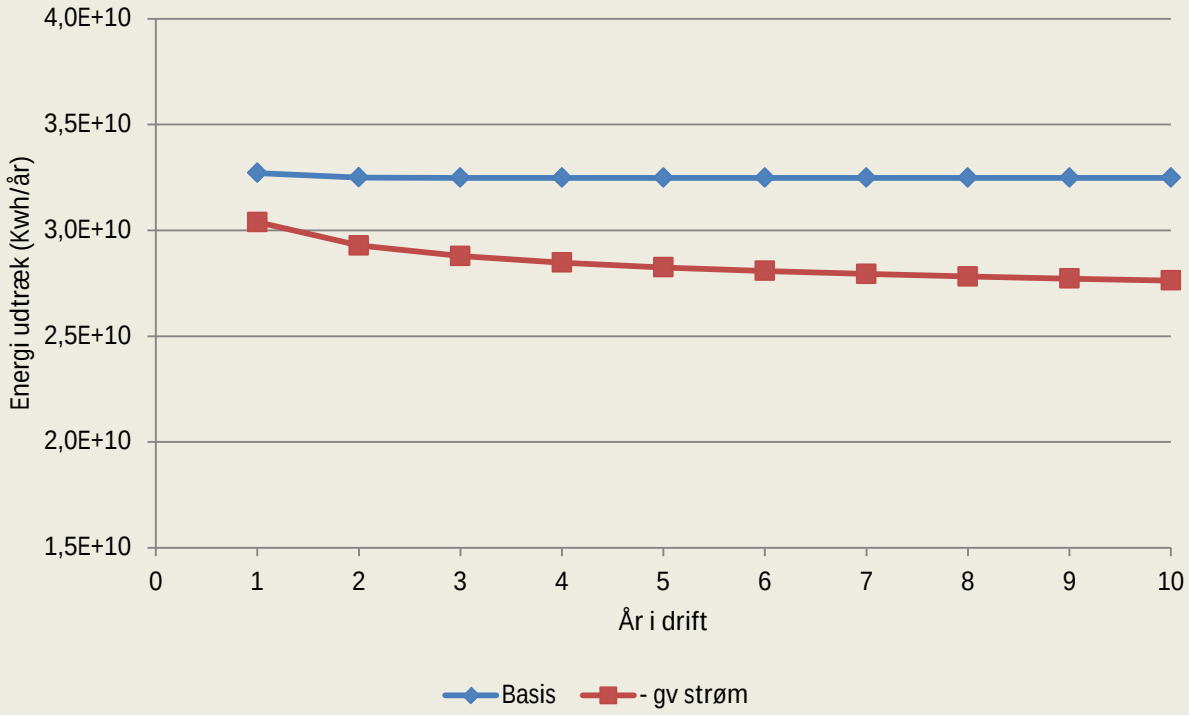
Energi balance



Basis model har samme energiudtræk over de 10 år anvendt i simulering

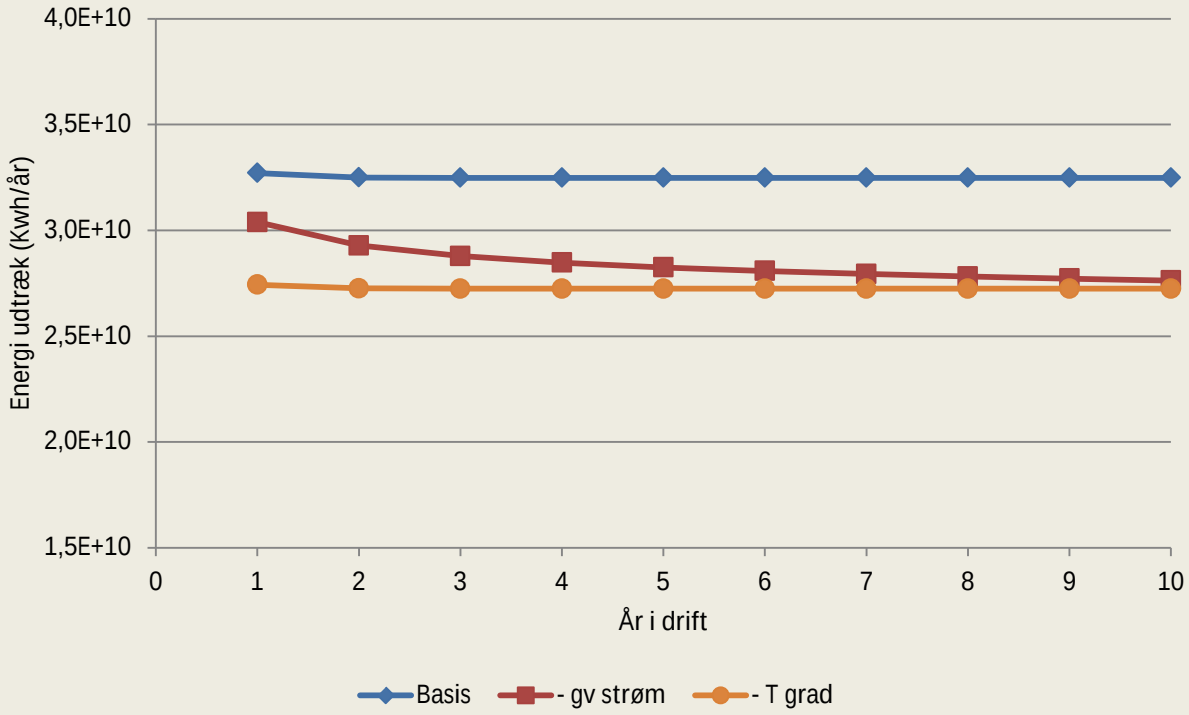
- Sandet akvifer
- Grundvandsgradient 3 ‰
- Pumpetid 150 dage/år
- 100 m boring

Energi balance



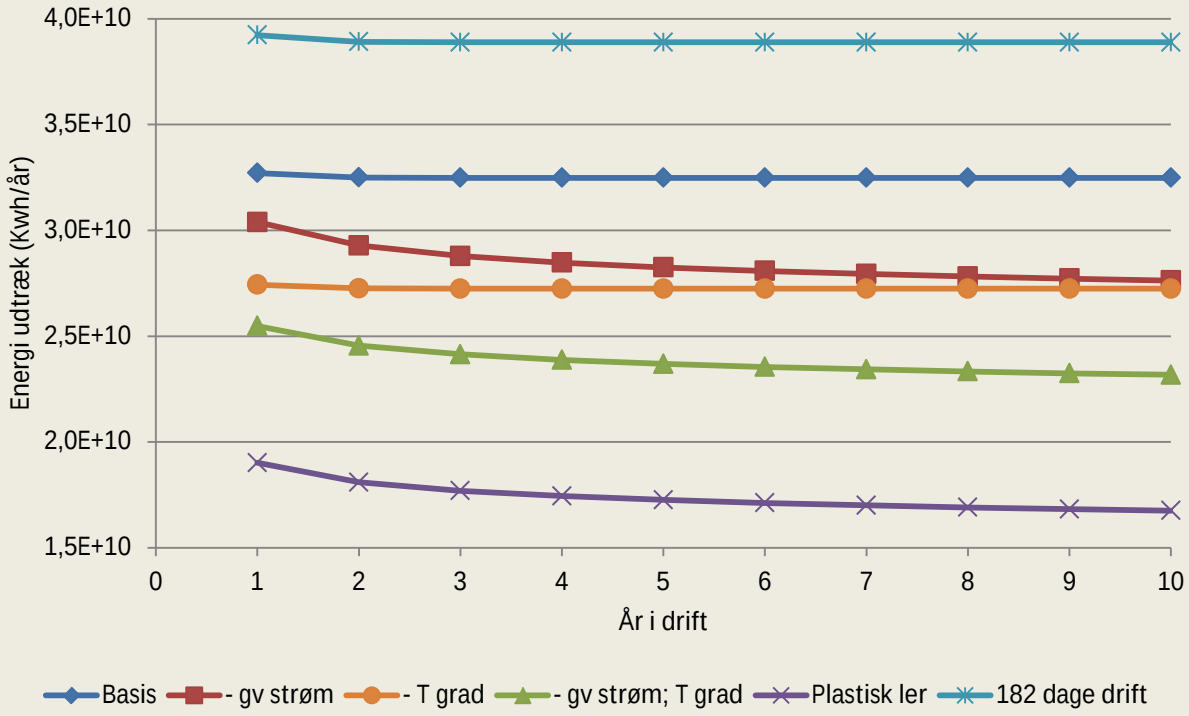
Uden grundvandsstrømning sker der en løbende nedkøling af undergrunden

Energi balance



Temperatur gradient ændre det maksimale energioptag, men sikre ikke energi balance

Energi balance

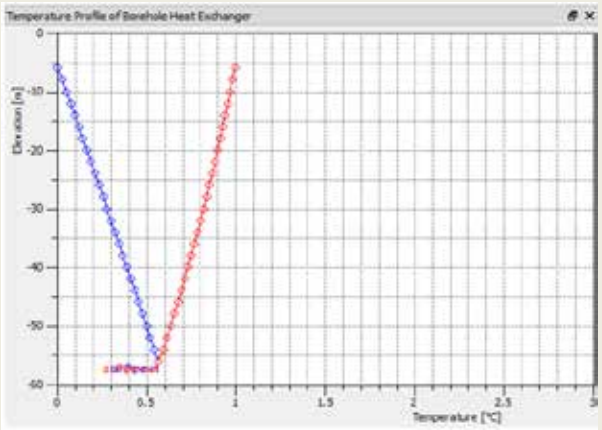


- Grundvandsstrømning sikre energibalance
- Temperatur gradient øger maksimalt varmeoptag, men sikre ikke energi balance

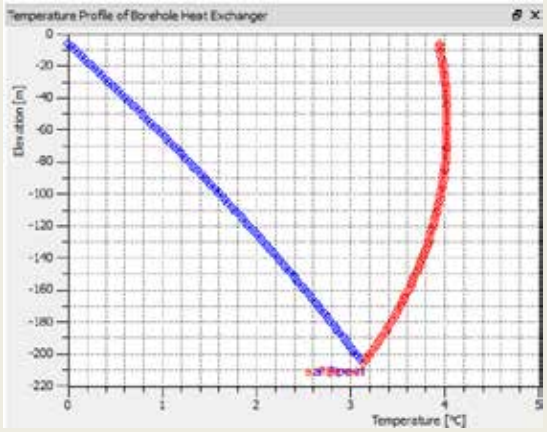
Boringsdybde

Temperatur profil i jordvarmeboring

50 m dyb boring

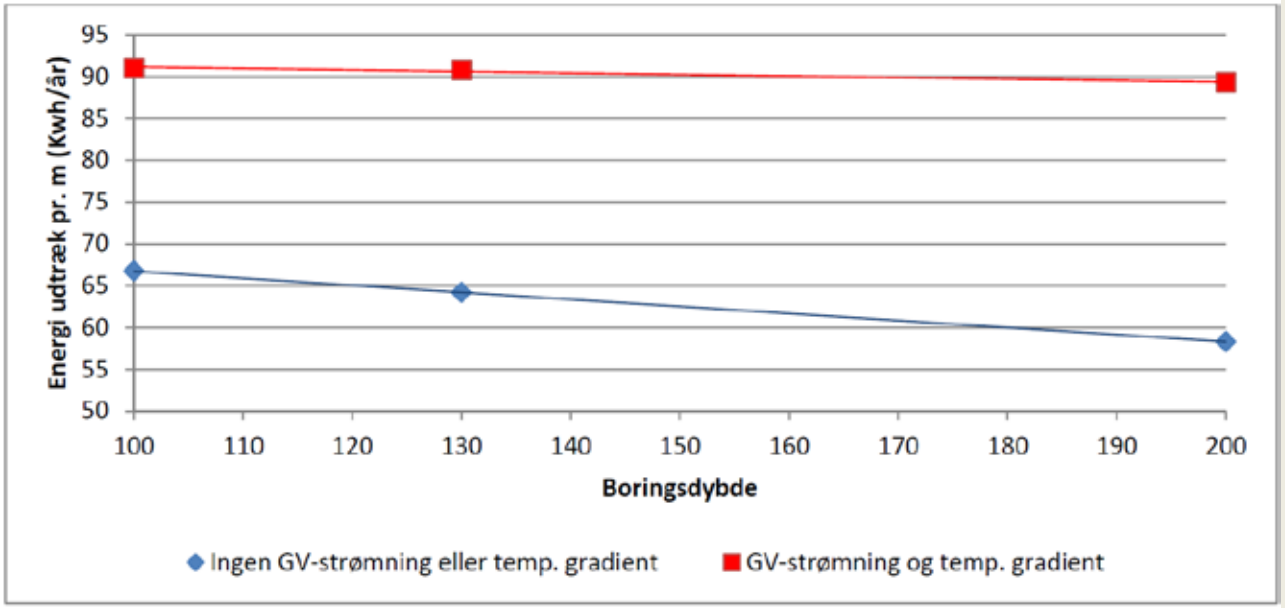


200 m dyb boring



- Ved øget boredybde reduceres det specifikke varmeoptag (varmeoptag pr. m.) i udløbsslange pga. interferens mellem slangerne

Boringsdybde

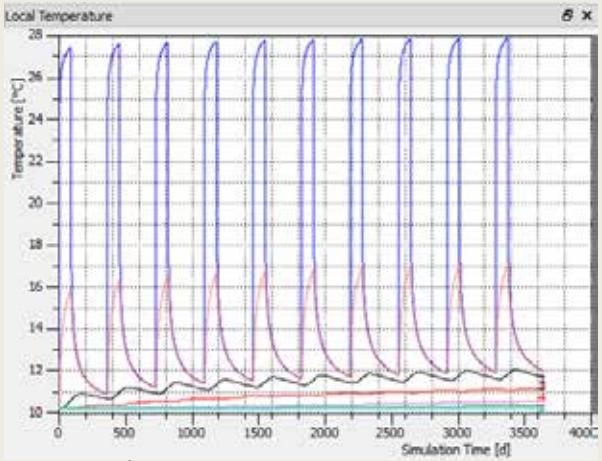


- Ved øget boredybde reduceres det specifikke varmeoptag (varmeoptag pr. m.) i udløbsslange pga. interferens mellem slangerne
- Ved temperaturgradient på 3 ° C/100 m og grundvandsstrømning ved 3 ‰ opvejes faldet i specifik varmeoptag af højere temperatur med dybden
- Uden temperaturgradient falder det specifikke varmeoptag for større boringsdybde
  - 130 m vs. 100 m boring: fald på 4,5 %
  - 200 m vs. 100 m boring: fald på 13 %

Varmelagring

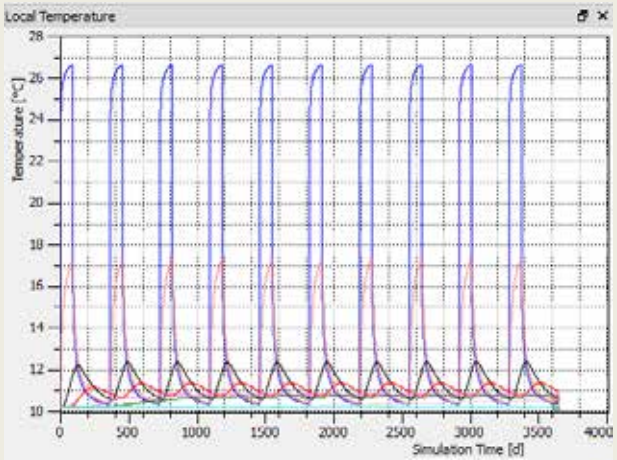
Sce.	T_{ind} (°C)	Gradient grundvand (‰)
Basis	0	3
1	20	3
2	35	3
3	35	3
4	35	0
5	35	3

Uden grundvandsstrømning



Scenarie 4

Med grundvandsstrømning



Scenarie 3

- Uden grundvandsstrømning sker der en langsom opvarmning af undergrund
- Påvirkningen er meget lille
  - 1,1 ° C; 10 m nedstrøms (35 ° C indløb)
  - 0,3 ° C; 100 m nedstrøms (35 ° C indløb)

Konklusioner

- Rangeret betydning af fysiske forhold jf. simuleringer
  1. Jordens varmeledningsevne
  2. Grundvandsstrømning og temperaturgradienter har sammenlignelig betydning
  3. Boringskonstruktion, specielt varmeledningsevne af grout og slangers kontakt (med hinanden og jordmatricen)
- Grundvandsstrømning kan være med til at opretholde energibalance i systemet
- Ved stadig større boringsdybde falder det specifikke varmeoptag – kan blive negativ hvis der ikke er temperaturgradient
- Simulering viser meget begrænset varmepåvirkning fra boring anvendt til varmelagring