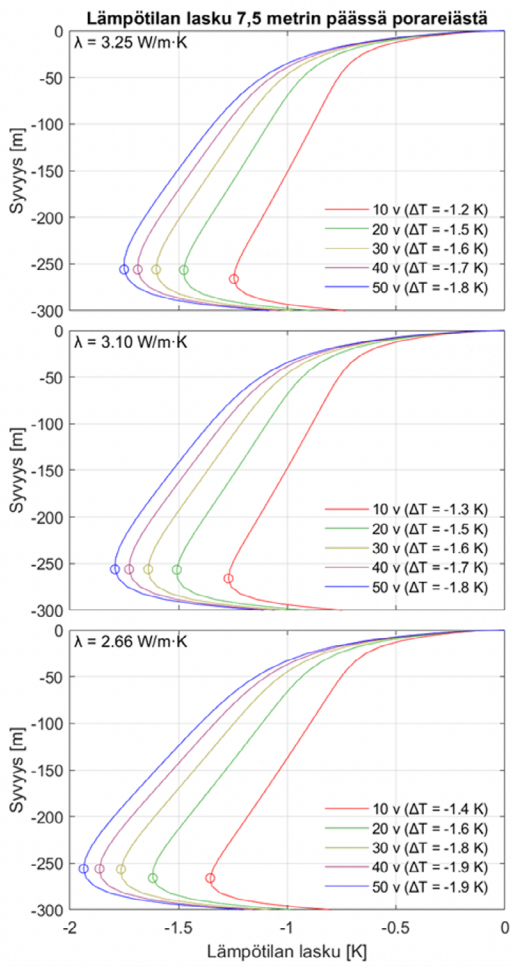
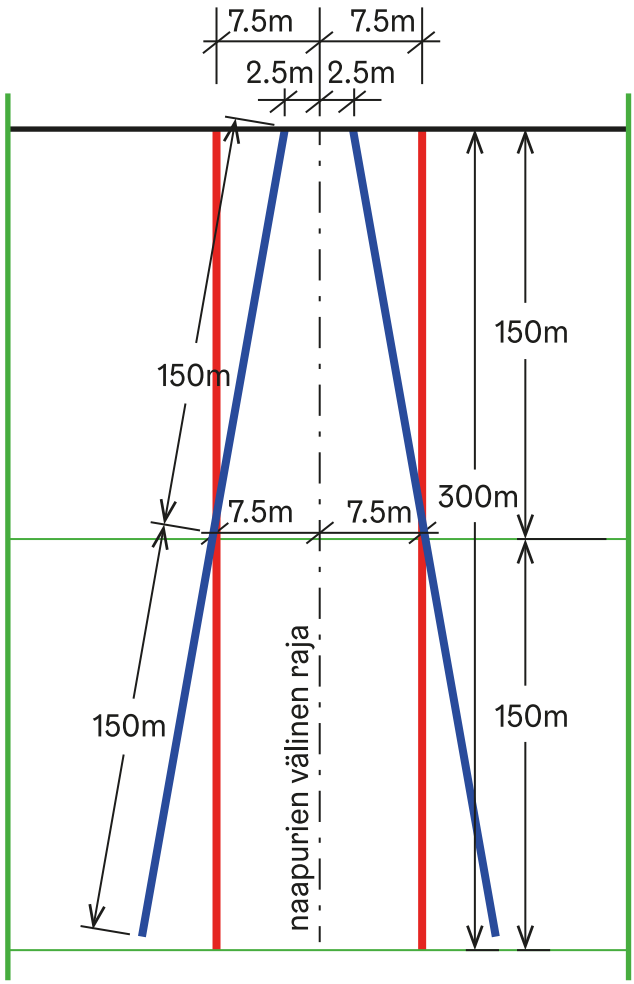
Helsinki

Kaupunkiympäristön aineistoja 2022:6

Energiakaivojen vaikutuksen arviointi

Geologian tutkimuskeskus
Kimmo Korhonen





Helsinki

Sarja: Kaupunkiympäristön aineistoja 2022:6

Julkaisun nimi: Energiakaivojen vaikutuksen arviointi
https://bit.ly/energiakaivot

Julkaisuvuosi: 2022

Taitto: Valve Branding Oy

ISBN: 978-952-386-149-7
ISSN: 2489-4257 (verkkojulkaisu)

Sisällys

1 Esipuhe ... 4

2 Yksittäisen lämpökaivon vaikutuksen arviointi ... 5

2.1 Johdanto ... 5

2.2 Aineisto ja menetelmä ... 5

2.2.1 Lämpökaivot ... 5

2.2.2 Kallioperä ... 7

2.2.3 Lämmönotto ... 7

2.2.4 Maksimaalisen lämmönoton arviointi ... 8

2.2.5 Kaivon vaikutuksen arviointi ... 8

2.3 Tulokset ... 8

2.4 Tulosten arviointia ... 11

3 Kahden 300 metriä syvän lämpökaivon keskinäisen vuorovaikutuksen arviointi ... 13

3.1 Johdanto ... 13

3.2 Laskenta ... 13

3.3 Tulokset ... 16

4 Viitteet ... 20

5 Liitteet ... 21

Liite 1 ... 22

Liite 2 ... 46

1. Esipuhe

Tämä raportti yhdistää kaksi energiakaivoja käsittelevää Helsingin kaupungin tilamaa ja Geologian tutkimuskeskuksen laatimaa tutkimusraporttia:

- Korhonen, K., (2022) Yksittäisen lämpökaivon vaikutuksen arviointi. Geologian tutkimuskeskus, 6.6.2022, GTK/244/03.02/2022,
- Korhonen, K., (2021). Kahden 300 metriä syvän lämpökaivon keskinäisen vuorovaikutuksen arviointi. Geologian tutkimuskeskus, 26.11.2021, GTK/823/03.02/2021.

Tutkimusraportit sisältävät COMSOL Multiphysics® -ohjelmistolla tehtyjen mallinnusten tuloksia, joita on tarvittu energiakaivojen sijoittamisen edellytysten selvittämiseen.

Tuloksia on hyödynnetty kaupunkiympäristön julkaisuissa:

- Kiinteistö-, kortteli- ja aluekohtaiset maalämpöratkaisut Helsingissä, Kaupunkiympäristön julkaisuja 2022:24
- Maalämpökaivot yleisillä alueilla Helsingissä, Kaupunkiympäristön julkaisuja 2021:20.

Edellä mainittujen raporttien keskeisimmät tulokset Helsingin kaupungin maalämpöohjeistuksen osalta ovat:

- Korkeintaan 300 metriä syvän maalämpökaivon (suljettu U-putkikaivo) aiheuttama lämpötilan pudotus eli lämpötilahäviö 7,5 metrin etäisyydellä kaivon keskipisteestä on korkeintaan 2 °C 50 vuodessa.
- Helsingissä maalämpökaivojen keskisyvyys vuonna 2021 oli noin 300 metriä. Kahden asteen lämpötilan pudotus 7,5 metrin etäisyydellä kaivon keskipisteestä on ollut sallittua tähänkin asti, eikä tuota rajaa ole syytä muuttaa.
- Energiakaivot tulee mitoittaa siten, että lämpötilahäviö naapurin vastaisella rajalla ja katualueen keskilinjalla on 50 vuodessa enintään 2 °C.
- Vinoon porattujen eli kallistettujen maalämpökaivojen kohdalla 7,5 metrin vähimmäisetäisyys naapurin vastaisesta rajasta mitataan kaivon keskisyvyyden kohdalta.
- Avoimien eristämättömien energiakaivojen aiheuttama 2 °C lämpötilan pudotus eli lämpötilahäviö 50 vuodessa saattaa ulottua jopa 24 metrin etäisyydelle kaivon keskipisteestä.

Helsingissä 22. elokuuta 2022

Ilkka Vähäaho
Maalämpötyöryhmän puheenjohtaja

2. Yksittäisen lämpökaivon vaikutuksen arviointi

2.1 Johdanto

Tässä työssä arvioidaan sitä, kuinka paljon yksittäinen lämpöä ottava energiakaivo vaikuttaa ympäröivän kallion lämpötilaan Helsingin termogeologisessa ympäristössä. Vaikutuksen mittana käytetään kaivon aiheuttaman lämpötilan laskun suuruutta 7,5 metrin etäisyydellä kaivosta. Arviointi tehdään 150, 300, 500, 1000 ja 2000 metriä syville lämpökaivoille, kun lämpöä on otettu kalliosta 10, 20, 30, 40 ja 50 vuotta.

2.2 Aineisto ja menetelmä

2.2.1 Lämpökaivot

Laskuilla arvioitiin 150, 300, 500 ja 1000 metriä syvien U-putkikaivojen ja 1000 ja 2000 metriä syvien koaksiaalikaivojen vaikutusta. U-putkikaivoissa kollektorin putkimateriaaliksi oletettiin suuritiheyksinen polyeteenimuovi (HDPE eli High Density Polyethylene). Koaksiaalikaivoissa, sen sijaan, kollektoriputkeksi oletettiin tyhjiöeristetty metalliputki (VIT-putki eli Vacuum Insulated Tubing). Laskuihin mukaan otetut lämpökaivotapaukset on lueteltu taulukossa 1.

U-putkikaivot olivat suljettuja järjestelmiä ja lämmönsiirtonesteenä oletettiin käytettäväksi 28-prosenttista etanoli-vesiseosta (Altian Naturet). Koaksiaalikaivot, sen sijaan, oletettiin avoimiksi järjestelmiksi eli koaksiaaliputken ja porareiän seinämän välisessä tilassa alaspäin virtaavan lämmönkeruunesteen oletettiin olevan suorassa kontaktissa kallion kanssa. Ympäristön kontaminaatiovaaran takia lämmönsiirtonesteeksi koaksiaalikaivoissa oletettiin puhdas vesi. Laskuissa oli mukana myös sellaiset koaksiaalikaivotapaukset, joissa kaivon ylimmät 500 metriä oli eristetty kalliosta. Eristys oletettiin tehtäväksi joko HDPE-muoviputkella, polyvinyylikloridimuovista (PVC) valmistetulla putkella, teräsputkella tai betonilla.

Kuva: Ilkka Vähäaho

Taulukko 1. Laskuissa mukana olleet lämpökaivotapaukset. Eristetyissä tapauksissa HDPE-eristeputken seinämän paksuus oli 20 mm, PVC-eristeputken seinämän paksuus oli 30 mm, eristebetonoinnin paksuus oli 30 mm ja eristävän teräsputken seinämän paksuus oli 10 mm.

Kaivon syvyys [m]	Kaivon tyyppi	Putki-materiaali	Putken ulkohalkaisija/ sisähalkaisija [mm]	Porareiän halkaisija [mm]	Porareiän ylimpien 500 metrin eristys	Virtaama [L/s]
150	U-putki	HDPE	40/35,2	140	-	0,6
300	U-putki	HDPE	40/35,2	140	-	0,6
500	U-putki	HDPE	63/51,4	160	-	1,0
1000	U-putki	HDPE	63/51,4	160	-	1,0
1000	Koaksiaali	VIT	114/76	216	-	5,0
1000	Koaksiaali	VIT	114/76	216	HDPE-putki	5,0
1000	Koaksiaali	VIT	114/76	216	PVC-putki	5,0
1000	Koaksiaali	VIT	114/76	216	Betonointi	5,0
1000	Koaksiaali	VIT	114/76	216	Teräsputki	5,0
1000	Koaksiaali	VIT	114/76	216	-	10,0
1000	Koaksiaali	VIT	114/76	216	HDPE-putki	10,0
1000	Koaksiaali	VIT	114/76	216	PVC-putki	10,0
1000	Koaksiaali	VIT	114/76	216	Betonointi	10,0
1000	Koaksiaali	VIT	114/76	216	Teräsputki	10,0
2000	Koaksiaali	VIT	124/76	216	-	5,0
2000	Koaksiaali	VIT	124/76	216	HDPE-putki	5,0
2000	Koaksiaali	VIT	124/76	216	PVC-putki	5,0
2000	Koaksiaali	VIT	124/76	216	Betonointi	5,0
2000	Koaksiaali	VIT	124/76	216	Teräsputki	5,0
2000	Koaksiaali	VIT	124/76	216	-	10,0
2000	Koaksiaali	VIT	124/76	216	HDPE-putki	10,0
2000	Koaksiaali	VIT	124/76	216	PVC-putki	10,0
2000	Koaksiaali	VIT	124/76	216	Betonointi	10,0
2000	Koaksiaali	VIT	124/76	216	Teräsputki	10,0

2.2.2 Kallioperä

Laskuissa maankamaran oletettiin muodostuvan yksinomaan kallioperästä eli maaperää ei huomioitu. Näin siksi, koska maapeite on Helsingissä suurimmalta osin niin ohut (Kallio ja muut, 2019), että sillä ei olisi merkittävää vaikutusta tuloksiin. Kallioperän termogeologisina ominaisuuksina käytettiin Kallion ja muiden (2019) Helsingille esittämiä, jotka on lueteltu taulukossa 2.

Taulukko 2. Laskuissa käytetyt kallioperän termogeologiset ominaisuudet.

Ominaisuus	Arvo
Lämmönjohtavuus (minimi/mediaani/maksimi)	2,66/3,10/3,25 W/m·K
Ominaislämpökapasiteetti	725 J/kg·K
Tiheys	2707 kg/m^3
Maanpinnan lämpötila	6,802 °C
Geotermisen lämpövuon tiheys	40,947 mW/m^2

Koska kallioperän lämmönjohtavuus vaikuttaa oleellisesti lämpökaivojen mitoitukseen ja geoenergian saatavuuteen, suoritettiin kaikki laskut Helsingin kivilajien minimi-, mediaani- ja maksimilämmönjohtavuuksilla. Kivilajien lämmönjohtavuuden vaihteluihin Suomen kallioperässä eniten vaikuttava tekijä on yleensä kvartsipitoisuus, koska kvartsi on yksi parhaiten lämpöä johtavista mineraaleista. Kvartsia esiintyy pääminaraalina vaaleissa graniittisissa kivilajeissa ja sitä on myös paljon vaaleissa liuskeissa (esim. kvartsi-maasälpäliuskeet ja kvartsi-maasälpägneissit).

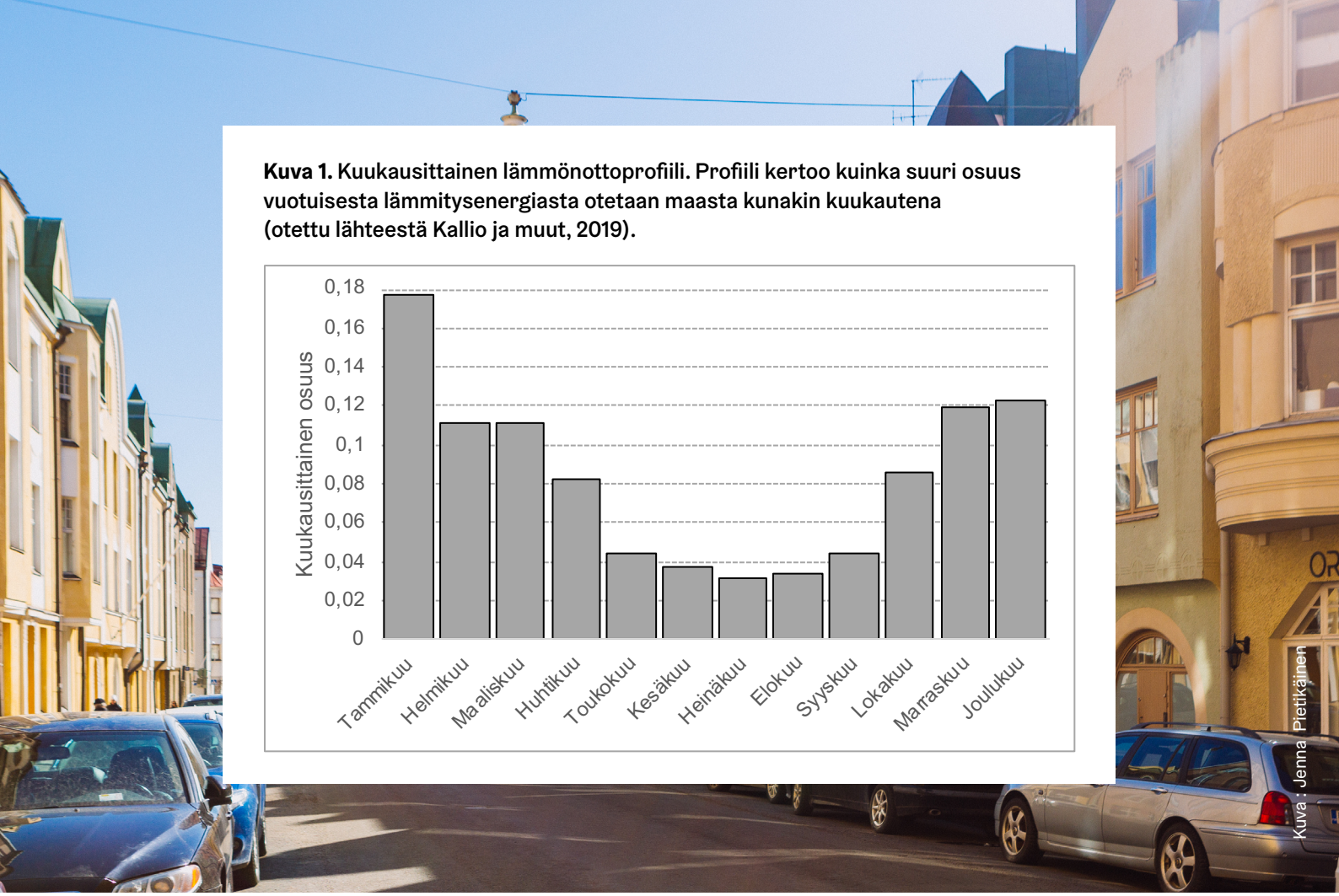
Näillä kivilajeilla tavataan yleensä hyviä lämmönjohtavuuksia, mitä heijastaa myös Suomen graniittien keskimääräinen lämmönjohtavuus, joka on 3,55 W/m·K. Sen sijaan, tummien kivilajien (kuten amfiboliitti) kvartsipitoisuus on vähäistä, mikä ilmenee matalampina lämmönjohtavuuksina. Esimerkiksi Suomalaisten amfiboliittien keskimääräinen lämmönjohtavuus on vain 2,59 W/m·K. (Kallio ja muut, 2019.)

2.2.3 Lämmönotto

Kaivoilla oletettiin kuormitettavan kallioperää maksimaalisesti 50 vuoden ajan, jotta suurin mahdollinen lämpötilan lasku saataisiin arvioitua. Toisin sanoen, kaikki kalliosta saatava lämmitysenergia oletettiin otettavaksi 50 vuoden kuluessa eikä viilennys- tai hukkaenergiaa ladattu kallioon.

U-putkikaivoissa lämmönotto vaihteli kuvassa 1 esitetyn kuukausittaisen profiilin mukaisesti ja se laskettiin kaavalla $E_i = p_i \cdot E_{vuotuinen}$, missä E_i on kuukautena i kallioperästä otettu lämmitysenergia, p_i on kuukausittaisen profiilin arvo kuukautena i ja $E_{vuotuinen}$ on vuosittain kallioperästä otettava lämmitysenergia. Koaksiaalikaivoilla kallioperästä oletettiin otettavan vain tasainen peruskuorma eli lämmönotto pysyi vakiona koko vuoden ajan, ja kunakin kuukautena i, kalliosta otetun lämmitysenergian määrä laskettiin kaavalla $E_i = E_{vuotuinen} / 12$.

Kuva: Ilkka Vähäaho



Kuva 1. Kuukausittainen lämmönottoprofiili. Profiili kertoo kuinka suuri osuus vuotuisesta lämmitysenergiasta otetaan maasta kunakin kuukautena (otettu lähteestä Kallio ja muut, 2019).

2.2.4 Maksimaalisen lämmönoton arviointi

Ensin laskettiin arviot sille, kuinka paljon kussakin taulukon 1 lämpökaivotapauksessa voidaan ottaa kallioperästä geoenergiaa maksimaalisesti vuosittain 50 vuoden ajan (kun kallion lämmönjohtavuudelle annetaan taulukossa 2 esitetyt minimi-, mediaani- ja maksimilämmönjohtavuudet). U-putkikaivojen tapauksessa tämä tehtiin siten, että etsittiin sellainen vuotuinen lämmönotto ($E_{vuotuinen}$), joka laski lämmönsiirtonesteen keskilämpötilan 50. lämmönottovuotena –1,5 celsiusasteeseen. Koaksiaalikaivojen tapauksessa, sen sijaan, etsittiin sellainen vuotuinen lämmönotto ($E_{vuotuinen}$), joka laski lämmönsiirtonesteenä käytetyn veden lämpötilan 50. lämmönottovuotena nollaan celsiusasteeseen.

Laskut toteutettiin käyttäen COMSOL Multiphysics® ja MATLAB® -ohjelmistoja. Kullekin taulukon 1 kaivotapaukselle luotiin COMSOL:illa oma elementtimalli, jota käyttäen simuloitiin kalliosta tehtävää lämmönottoa. MATLAB:ia käyttäen arvioitiin kaikille kaivotapauksille lämmönsiirtonesteen keskilämpötilan ja vuotuisen lämmönoton välinen relaatio, jonka avulla laskettiin kaivosta saatava maksimaalinen geoenergiamäärä.

2.2.5 Kaivon vaikutuksen arviointi

Kun maksimaaliset vuotuiset lämmönotot oli arvioitu, asetettiin ne kaivomalleihin vuotuisiksi lämmönotoiksi. Tämän jälkeen simuloitiin COMSOL:illa lämmönottoa 50 vuotta ja laskettiin lämmönoton aiheuttama pudotus kallion lämpötilassa 7,5 metrin etäisyydellä kaivosta 10, 20, 30, 40 ja 50 vuoden ajanhetkillä.

2.3 Tulokset

Maksimaalisen vuotuisen lämmönoton arviointi tuotti taulukossa 3 esitetyt tulokset. Arviot jokaiselle taulukon 1 kaivotapaukselle tehtiin käyttäen taulukossa 2 esitettyjä Helsingin kallioperän minimi-, mediaani- ja maksimilämmönjohtavuuksia, jotta nähtäisiin se, miten suuri lämmönjohtavuuden vaikutus on tuloksiin.

Taulukko 3. Kaivoista saatavat maksimaaliset vuotuiset geoenergiamäärät. Jokaiselle kaivotapaukselle on kolme tulosta, jotka on saatu olettaen kallion lämmönjohtavuudeksi 2,66, 3,10 ja 3,25 W/m·K.

Kaivotapaus	Lämmönotto minimi/mediaani/ maksimilämmönjohtavuuden tapauksessa [MWh/a]
150-m U-putki	15,7/17,3/17,8
300-m U-putki	33,4/36,1/36,9
500-m U-putki	63,1/66,9/68,1
1000-m U-putki	146/149/149
1000-m koaksiaaliputki (virtaama: 5 L/s)	330/348/355
1000-m koaksiaaliputki (virtaama: 5 L/s, reiän eristys: HDPE-putki)	315/330/335
1000-m koaksiaaliputki (virtaama: 5 L/s, reiän eristys: PVC-putki)	290/301/305
1000-m koaksiaaliputki (virtaama: 5 L/s, reiän eristys: betonointi)	328/345/351
1000-m koaksiaaliputki (virtaama: 5 L/s, reiän eristys: teräsputki)	331/349/355
1000-m koaksiaaliputki (virtaama: 10 L/s)	339/359/366
1000-m koaksiaaliputki (virtaama: 10 L/s, reiän eristys: HDPE-putki)	323/339/345
1000-m koaksiaaliputki (virtaama: 10 L/s, reiän eristys: PVC-putki)	297/309/314
1000-m koaksiaaliputki (virtaama: 10 L/s, reiän eristys: betonointi)	337/356/363
1000-m koaksiaaliputki (virtaama: 10 L/s, reiän eristys: teräsputki)	340/360/367
2000-m koaksiaaliputki (virtaama: 5 L/s)	960/981/988
2000-m koaksiaaliputki (virtaama: 5 L/s, reiän eristys: HDPE-putki)	947/965/971
2000-m koaksiaaliputki (virtaama: 5 L/s, reiän eristys: PVC-putki)	925/940/945
2000-m koaksiaaliputki (virtaama: 5 L/s, reiän eristys: betonointi)	958/978/985
2000-m koaksiaaliputki (virtaama: 5 L/s, reiän eristys: teräsputki)	961/981/988
2000-m koaksiaaliputki (virtaama: 10 L/s)	1008/1038/1049
2000-m koaksiaaliputki (virtaama: 10 L/s, reiän eristys: HDPE-putki)	993/1020/1029
2000-m koaksiaaliputki (virtaama: 10 L/s, reiän eristys: PVC-putki)	969/992/1000
2000-m koaksiaaliputki (virtaama: 10 L/s, reiän eristys: betonointi)	1006/1035/1045
2000-m koaksiaaliputki (virtaama: 10 L/s, reiän eristys: teräsputki)	1009/1039/1049

Taulukon 3 lämmönottoja käyttäen arvioidut maksimaaliset kallion lämpötilan pudotukset 7,5 metrin päässä kaivosta 10, 20, 30, 40 ja 50 vuoden päästä lämmönoton aloittamisesta on esitetty taulukossa 4. Kullekin ajanhetkelle on kolme lukua, jotka vastaavat taulukossa 3 esitetyillä maksimilämmönotoilla laskettuja lämpötilan pudotuksia.

Taulukko 4. Yksittäisen kaivon aiheuttama lämpötilan lasku 7,5 metrin etäisyydellä kaivosta 10, 20, 30, 40 ja 50 vuoden päästä lämmönoton aloittamisesta. Arvioita on kolme jokaiselle ajanhetkelle ja ne on laskettu olettaen kallioperän lämmönjohtavuudeksi 2,66, 3,10 ja 3,25 W/m·K.

	Lämpötilan pudotus [K]				
Kaivotapaus	**10 v**	**20 v**	**30 v**	**40 v**	**50 v**
150-m U-putki	−1,1/−1,0/−1,0	−1,3/−1,2/−1,2	−1,4/−1,3/−1,3	−1,5/−1,4/−1,4	−1,5/−1,4/−1,4
300-m U-putki	−1,4/−1,3/−1,2	−1,6/−1,5/−1,5	−1,8/−1,6/−1,6	−1,9/−1,7/−1,7	−1,9/−1,8/−1,8
500-m U-putki	−1,8/−1,6/−1,6	−2,2/−2,0/−1,9	−2,3/−2,1/−2,1	−2,5/−2,2/−2,2	−2,6/−2,3/−2,3
1000-m U-putki	−2,6/−2,3/−2,2	−3,1/−2,7/−2,6	−3,4/−3,0/−2,9	−3,6/−3,1/−3,0	−3,8/−3,3/−3,1
1000-m koaksiaaliputki (virtaama: 5 L/s)	−4,7/−4,3/−4,2	−5,6/−5,2/−5,0	−6,2/−5,6/−5,5	−6,5/−5,9/−5,8	−6,8/−6,2/−6,0
1000-m koaksiaaliputki (virtaama: 5 L/s, reiän eristys: HDPE-putki)	−4,8/−4,4/−4,3	−5,8/−5,3/−5,2	−6,3/−5,8/−5,6	−6,7/−6,1/−6,0	−7,0/−6,4/−6,2
1000-m koaksiaaliputki (virtaama: 5 L/s, reiän eristys: PVC-putki)	−4,9/−4,5/−4,4	−5,8/−5,4/−5,2	−6,4/−5,9/−5,7	−6,8/−6,2/−6,0	−7,1/−6,4/−6,3
1000-m koaksiaaliputki (virtaama: 5 L/s, reiän eristys: betonointi)	−4,8/−4,4/−4,3	−5,8/−5,3/−5,1	−6,3/−5,8/−5,6	−6,7/−6,1/−5,9	−7,0/−6,3/−6,2
1000-m koaksiaaliputki (virtaama: 5 L/s, reiän eristys: teräsputki)	−4,8/−4,4/−4,3	−5,8/−5,3/−5,1	−6,3/−5,8/−5,6	−6,7/−6,1/−5,9	−7,0/−6,3/−6,1
1000-m koaksiaaliputki (virtaama: 10 L/s)	−4,9/−4,6/−4,4	−5,9/−5,4/−5,3	−6,4/−5,9/−5,7	−6,8/−6,2/−6,1	−7,1/−6,5/−6,3
1000-m koaksiaaliputki (virtaama: 10 L/s, reiän eristys: HDPE-putki)	−5,0/−4,7/−4,6	−6,0/−5,6/−5,4	−6,6/−6,1/−5,9	−7,0/−6,4/−6,2	−7,3/−6,7/−6,5
1000-m koaksiaaliputki (virtaama: 10 L/s, reiän eristys: PVC-putki)	−5,0/−4,7/−4,6	−6,1/−5,6/−5,5	−6,6/−6,1/−5,9	−7,0/−6,4/−6,3	−7,3/−6,7/−6,5
1000-m koaksiaaliputki (virtaama: 10 L/s, reiän eristys: betonointi)	−5,0/−4,6/−4,5	−6,0/−5,5/−5,4	−6,6/−6,0/−5,9	−7,0/−6,4/−6,2	−7,3/−6,6/−6,5
1000-m koaksiaaliputki (virtaama: 10 L/s, reiän eristys: teräsputki)	−5,0/−4,6/−4,5	−6,0/−5,5/−5,4	−6,6/−6,0/−5,9	−7,0/−6,4/−6,2	−7,3/−6,6/−6,5
2000-m koaksiaaliputki (virtaama: 5 L/s)	−7,5/−6,7/−6,5	−9,1/−8,0/−7,7	−10,0/−8,8/−8,5	−10,6/−9,3/−8,9	−11,0/−9,7/−9,3
2000-m koaksiaaliputki (virtaama: 5 L/s, reiän eristys: HDPE-putki)	−7,6/−6,8/−6,5	−9,1/−8,1/−7,8	−10,0/−8,8/−8,5	−10,6/−9,3/−9,0	−11,1/−9,7/−9,4
2000-m koaksiaaliputki (virtaama: 5 L/s, reiän eristys: PVC-putki)	−7,6/−6,8/−6,6	−9,2/−8,1/−7,8	−10,0/−8,9/−8,5	−10,6/−9,4/−9,0	−11,1/−9,8/−9,4
2000-m koaksiaaliputki (virtaama: 5 L/s, reiän eristys: betonointi)	−7,6/−6,8/−6,5	−9,1/−8,1/−7,8	−10,0/−8,8/−8,5	−10,6/−9,3/−9,0	−11,0/−9,7/−9,3
2000-m koaksiaaliputki (virtaama: 5 L/s, reiän eristys: teräsputki)	−7,6/−6,8/−6,5	−9,1/−8,1/−7,8	−10,0/−8,8/−8,5	−10,6/−9,3/−9,0	−11,0/−9,7/−9,3
2000-m koaksiaaliputki (virtaama: 10 L/s)	−8,2/−7,4/−7,1	−9,8/−8,8/−8,5	−10,7/−9,6/−9,2	−11,3/−10,1/−9,8	−11,8/−10,5/−10,2
2000-m koaksiaaliputki (virtaama: 10 L/s, reiän eristys: HDPE-putki)	−8,2/−7,4/−7,2	−9,8/−8,8/−8,5	−10,8/−9,6/−9,3	−11,4/−10,2/−9,8	−11,9/−10,6/−10,2
2000-m koaksiaaliputki (virtaama: 10 L/s, reiän eristys: PVC-putki)	−8,2/−7,4/−7,2	−9,8/−8,8/−8,5	−10,8/−9,6/−9,3	−11,4/−10,2/−9,8	−11,9/−10,6/−10,2
2000-m koaksiaaliputki (virtaama: 10 L/s, reiän eristys: betonointi)	−8,2/−7,4/−7,2	−9,8/−8,8/−8,5	−10,7/−9,6/−9,3	−11,4/−10,1/−9,8	−11,9/−10,6/−10,2
2000-m koaksiaaliputki (virtaama: 10 L/s, reiän eristys: teräsputki)	−8,2/−7,4/−7,2	−9,8/−8,8/−8,5	−10,7/−9,6/−9,3	−11,4/−10,1/−9,8	−11,9/−10,6/−10,2

Liitteessä 1 on kuvat, joissa on esitetty:

1. Lämmönoton aiheuttama lämpötilan lasku 7,5 metrin päässä kaivosta syvyyden funktiona 10, 20, 30, 40 ja 50 vuoden päästä lämmönoton aloittamisesta. Kuvissa avoin ympyrä osoittaa maksimaalista lämpötilan pudotusta.
2. Lämpötilan laskun tasa-arvokäyrät (rintamat) 0,5, 1 ja 2 asteen pudotuksille 50 vuoden päästä lämmönoton aloittamisesta. Jokaiseen kuvaan on myös merkitty punaisella −2 asteen rintaman maksimietäisyys (r) ja syvyys, jolla se ilmenee (z). Lisäksi U-putkikaivojen tapauksessa kuviin on merkitty punaisella se syvyys (z), jolla −2 asteen rintama on 7,5 metrin etäisyydellä kaivosta (r = 7,5 m), ja koaksiaaliputkikaivojen tapauksissa kuviin on merkitty punaisella se etäisyys (r), jolla −2 asteen rintama on 300 metrin syvyydellä (z = 300 m).
3. Kahden asteen lämpötilan laskun rintaman etäisyys kaivosta ajan funktiona.

Kuvissa ΔT on lämpötilan laskun suuruus, λ ilmaisee lämmönjohtavuutta, r on etäisyys kaivosta ja z on syvyys.

2.4 Tulosten arviointia

Edellä esitetyt tulokset ilmentävät pahinta mahdollista tilannetta, koska lämpöä on otettu kaivoilla maksimaalinen määrä kallioperästä, jolloin myös kaivojen aiheuttamat lämpötilan pudotukset ovat maksimaaliset. Lämmönoton aiheuttamaa lämpötilan laskua voidaan pienentää ottamalla kalliosta geoenergiaa alle maksimaalisen määrän tai tekemällä lämpökaivoista syvempiä kuin mitä tarvittaisiin (eli ylimitoittamalla kalliolämpöjärjestelmä). Toinen tapa pienentää lämpötilan laskua on ladata kallioon viilennys-, hukka- ja/tai aurinkoenergiaa. Tämä tapa toimii kuitenkin paremmin kaivokentillä kuin yksittäisillä lämpökaivoilla, koska suurin osa yksittäisellä kaivolla kallioon ladatusta lämmöstä karkaa pois kaivon lähiympäristöstä.

Tulosten perusteella suurin lämmönoton aiheuttama lämpötilan pudotus tapahtuu ensimmäisten 10 vuoden aikana. Tämän jälkeen lämpötilan laskunopeus hidastuu oleellisesti.

Kallion lämmönjohtavuuden vaikutus kaivon aiheuttamaan lämpötilan pudotukseen on riippuvainen kaivon syvyydestä. Korkeintaan 500 metriä syvien kaivojen tapauksessa kallion lämmönjohtavuudella on vain pieni vaikutus lämpötilan pudotuksen suuruuteen (lämmönjohtavuuden aiheuttama vaihtelu lämpötilan pudotuksessa on maksimissaan 0,3 astetta). Sen sijaan, 1000–2000 m syvien kaivojen tapauksessa pienempi kallion lämmönjohtavuus voi pahentaa tilannetta jopa 1,7 astetta verrattuna parempiin lämmönjohtavuuksiin, koska korvaavaa lämpöä ei virtaa kaivon ympäriltä yhtä nopeasti kuin jos lämmönjohtavuus olisi suurempi.

Tulokset osoittavat, että 1000 ja 2000 metriä syvien koaksiaalisten kaivojen tapauksessa lämpötilan pudotus 7,5 metrin etäisyydellä kaivosta on jo ensimmäisten 10 vuoden jälkeen noin 4–8 astetta. Sen sijaan, 150 ja 300 metriä syvien U-putkikaivojen tapauksessa lämpötilan pudotus ei edes 50 vuoden päästä ole kahta astetta suurempi. Lämpökaivon aiheuttaman lämpötilan pudotuksen rajoittaminen kahteen asteeseen 7,5 metrin päässä 150 ja 300 metriä syvistä U-putkilämpökaivoista lienee ongelmatonta. Sen sijaan, 1000 ja 2000 metriä syvien koaksiaalisten lämpökaivojen tapauksessa rajoitus kahden asteen lämpötilan pudotukseen olisi hyvin radikaali, eikä siihen päästäisi todennäköisesti edes lämmön lataamisella kallioon.

Tulosten perusteella 500 metriä syvät U-putkikaivot pudottavat maankamaran lämpötilaa 7,5 metrin päässä kaivoista 2,3–2,6 astetta ja 1000 metriä syvät vastaavasti 3,1–3,8 astetta 50 vuoden aikana. Jos näiden kaivojen lämpötilan pudotus rajoitetaan 2 asteeseen, saadaan liitteessä 2 esitetyt tulokset. Tämä rajoitus vaatisi sen, että 500 metriä syvän U-putkikaivon tuotto rajoitettaisiin 67–84 prosenttiin sen maksimaalisesta tuotosta. Vastaavasti 1000 metriä syvän U-putkikaivon tapauksessa kahden asteen rajoitus johtaisi siihen, että kaivon tuottoa täytyisi rajoittaa 10–34 prosenttiin kaivon maksimaalisesta tuotosta.

Vähintään 1000 m syvien kaivojen tuotto-odotukset ovat oleellisesti suuremmat kuin korkeintaan 500 m syvien kaivojen. Vähintään 1000 m syvillä kaivoilla saadaan kalliosta otettua enemmän geoenergiaa lämmityskäyttöön, jolloin myös kallioon aiheutuu suurempi lämpötilan lasku kuin korkeintaan 500 metriä syvien kaivojen tapauksessa. Tämän mahdollistavat syvemmällä olevat korkeammat lämpötilat. Jos vähintään 1000 m syvien kaivojen tapauksessa lämpötilan lasku rajoitettaisiin 2 asteeseen 7,5 metrin päässä kaivosta, rajoittaisi se kaivojen tuottoa niin radikaalisti, että se ei liene tarkoituksenmukaista.

Tässä esitetyt tulokset osoittavat sen, että yksittäisellä lämpökaivolla saatetaan hyödyntää naapuritontin geoenergiavarantoa, jos kaivo porataan liian lähelle

tontin rajaa. Helsingissä varoetäisyytenä on pidetty 7,5 metriä tontin rajalta. Korkeintaan 300 metriä syvällä U-putkikaivoilla aiheutettu lämpötilan lasku 7,5 metrin päässä kaivosta ei ylitä 2:ta astetta. Jos lämpökaivon aiheuttama lämpötilan lasku naapuritontilla halutaan rajoittaa 2 asteeseen, täytyy yli 300 metriä syvillä energiakaivoilla olla suuremmat varoetäisyydet. Tulosten perusteella 500 metriä syvien U-putkikaivojen tapauksessa varoetäisyyden tulisi olla 13 metriä tontin reunalta ja 1000 metriä syvien U-putkikaivojen varoetäisyyden 22 metriä.

Koaksiaalikaivoilla, jotka ovat 1000 ja 2000 metriä syviä, tulisi varoetäisyyden olla vieläkin suurempi, jos lämpötilan lasku naapurin tontilla halutaan rajoittaa 2 asteeseen. Kilometrin syvyisen koaksiaalikaivon varoetäisyyden tulisi olla 41 metriä tontin rajasta ja 2 kilometriä syvän koaksiaalikaivon varoetäisyyden 57 metriä.

Liitteen 1 tuloksista nähdään, että lämpökaivolla aiheutetun lämpötilan laskun suuruus kasvaa syvemmälle mentäessä ja saavuttaa maksimin lähellä kaivon pohjaa. Kahden asteen lämpötilan pudotus 150 ja 300 metriä syvien U-putkikaivojen tapauksessa ei ole ehtinyt 7,5 metrin päähän 50 vuodessa. Sen sijaan 500 metriä syvien U-putkikaivojen tapauksessa 2 asteen lämpötilan pudotus 7,5 metrin päässä kaivosta aiheutuu 290–340 metrin syvyydellä ja 1000 metriä syvien U-putkikaivojen tapauksessa 470–550 metrin syvyydellä.

Koaksiaaliset 1000 ja 2000 metriä syvät lämpökaivot ottavat geoenergiaa huomattavan tehokkaasti myös ylemmistä maankamaran kerroksista. Koaksiaalisten kaivojen tapauksessa 2 asteen lämpötilan pudotus on ehtinyt 50 vuodessa 22–24 metrin etäisyydelle kaivosta 300 metrin syvyydellä. Jos koaksiaalisen kaivon ylimmät 500 metriä putkitetaan HDPE-muovilla, voidaan 2 asteen lämpötilapudotuksen rintaman etenemistä 300 metrin syvyydellä rajoittaa 18–20 metriin. PVC-muovin käyttäminen putkitukseen rajoittaisi 2 asteen lämpötilan pudotuksen rintaman etenemistä 300 metrin syvyydellä jo 10–12 metriin. Teräksen tai betonin käyttäminen ylimpien 500 metrin putkitukseen ei tulosten perusteella vaikuttanut lämpötilan pudotukseen oleellisesti.

Syvien ja matalien kaivojen voidaan ajatella hyödyntävän eri syvyyksillä olevia geoenergiaresursseja. Näin ollen, syviä ja matalia kaivoja voitaisiin mahdollisesti tuoda lähemmäs toisiaan kuin mitä edellä esitetyt 2 asteen pudotuksen varoetäisyydet sallisivat. Tämä voisi tulla kyseeseen erityisesti, jos koaksiaalisten kaivojen ylimmät osat putkitettaisiin lämpöä huonosti johtavalla materiaalilla (esim. PVC-muovi).

Kuva: Maija Astikainen

3. Kahden 300 metriä syvän lämpökaivon keskinäisen vuorovaikutuksen arviointi

3.1 Johdanto

Tässä työssä tarkasteltiin kahden 300 metriä syvän lämpökaivon keskinäistä vuorovaikutusta. Keskinäisen vuorovaikutuksen mittana käsitetään tässä työssä se, kuinka paljon toinen kaivo heikentää kahden kaivon systeemissä geoenergian tuottoa verrattuna yhden kaivon systeemiin. Tähän kysymykseen vastattiin elementtimallinnuksen ja -simulointien avulla.

Tarkastellut tapaukset olivat mm:

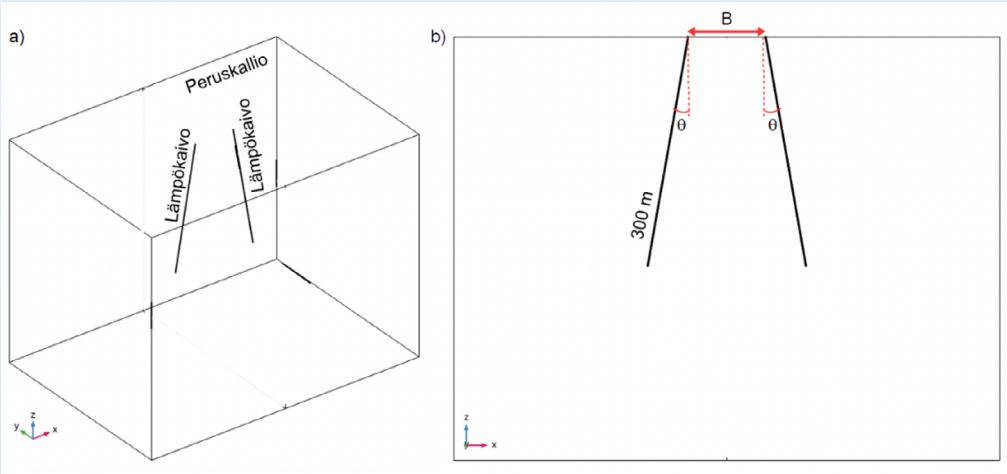
- Kaksi pystysuoraa 300 metriä syvää kaivoa, jotka ovat 5, 10 ja 15 m etäisyydellä toisistaan.
- Kaksi 300 metriä pitkää kaivoa, jotka on porattu vinoon, toisistaan poispäin 5° ja 10° kallistuskulmissa, ja jotka ovat 5, 10 ja 15 m etäisyydellä toisistaan maanpinnalla.

3.2 Laskenta

Lämpökaivojen toimintaa kuvaavat laskennat suoritettiin COMSOL Multiphysics® -ohjelmistolla, joka on elementtimenetelmään perustuva mallinnus ja simulointiohjelmisto. Kaivojen välisten vuorovaikutusten laskenta suoritettiin käyttäen MATLAB® -ohjelmistoa.

Simulaatioissa käytetty laskentamalli muodostui peruskalliota kuvaavasta lohkosta ja siihen sijoitetuista lämpökaivoja kuvaavista malleista (kuva 2).

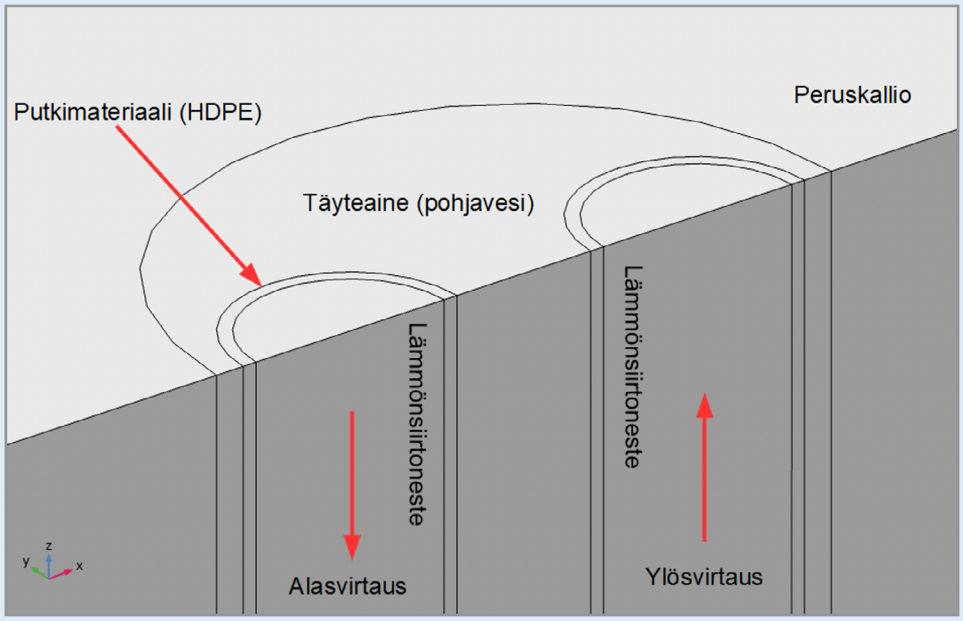
Kuva 2. Laskentamallin geometria. a) Malli koostui peruskalliota kuvaavasta lohkosta ja siihen sijoitetuista lämpökaivomalleista. b) Lämpökaivojen pituudet olivat 300 metriä, kallistuskulmat (θ) olivat 0, 5 ja 10 astetta ja kaivojen väliset etäisyydet maanpinnalla (B) olivat 5, 10 ja 15 metriä.



Peruskallioon sijoitetut lämpökaivomallit (kuva 3) sisälsivät mallin tavanomaisesta U-putkilämpökaivosta, jossa oli:

- HDPE-muovinen U-putki, jossa lämmönkeruuneste virtasi toista haaraa pitkin alas ja toista ylös. Lämmönkeruuneste oli 28-painoprosenttista etanoli-vesiseosta.
- U-putken ja kaivon seinämän väliä täyttävä täyteaine, joka oli pohjavettä.

Kuva 3. Lämpökaivomalli, joka sisälsi HDPE-muovisen U-putken, jonka haaroissa virtasi lämmönkeruuneste, sekä täyteaineena käytetty pohjavesi.



Mallin tärkeimmille parametreille annettiin taulukossa 5 esitetyt arvot. Peruskallion lämpöominaisuuksina käytettiin Helsingin keskimääräisiä arvoja (Kallio et al., 2019).

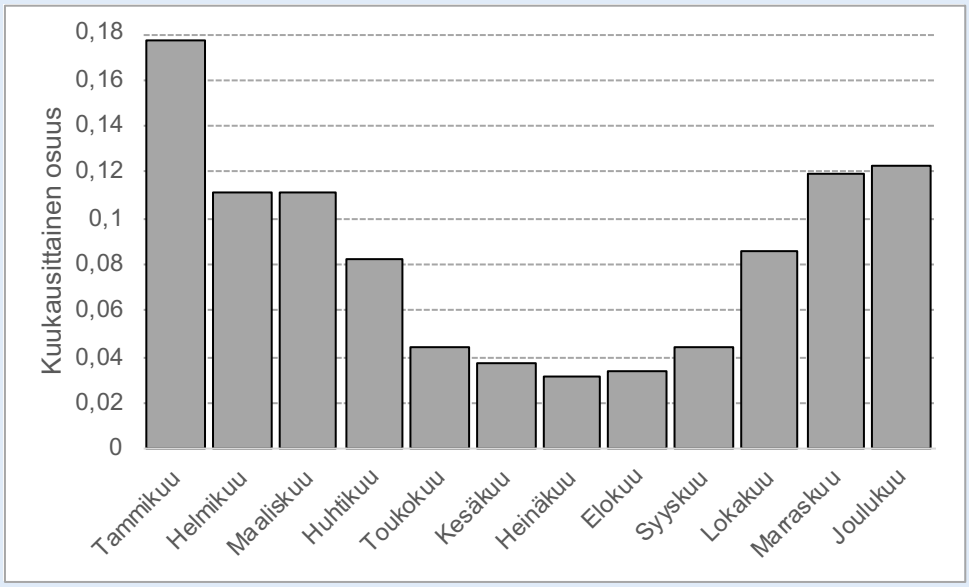
Kuva: Ilkka Vähäaho

Taulukko 5. Tärkeimpien mallissa käytettyjen parametrien arvot.

Parametri	Arvo
Kaivon kallistuskulma	0°, 5° ja 10°
Kaivojen välimatka	5, 10 ja 15 m
Kaivon pituus	300 m
Kaivon halkaisija	115 mm
U-putken ulkohalkaisija	40 mm
U-putken sisähalkaisija	35,2 mm
U-putken haarojen etäisyys	65 mm
Peruskallion lämmönjohtavuus	3.01 W/m·K
Peruskallion ominaislämpökapasiteetti	725 J/kg·K
Peruskallion tiheys	2719 kg/m^3
Maanpinnan lämpötila	6,82 °C
Maankamaran lämpövuo	41.04 mW/m^2
Lämmönkeruunesteen virtaama	0,6 L/s

Edellä esitetyllä mallilla simuloitiin lämmönottoa peruskalliosta 50 vuotta eteenpäin. Lämmönoton oletettiin olevan kuukausittain vaihteleva ja kuukausittainen lämmönotto laskettiin kertomalla vuotuinen lämmönotto kuukausiprofiilin (kuva 4) arvolla (Kallio et al., 2019).

Kuva 4. Lämmönoton kuukausiprofiili. Profiili kertoo sen, kuinka suuri osuus vuotuisesta lämmönotosta otetaan kunakin kuukautena.



Lämpökaivon toiminnan simulointi tapahtui siten, että ensin laskettiin kaivosta ulostulevan nesteen lämpötila (T_{outlet}), josta otettiin geoenergiaa pudottamalla nesteen lämpötilaa oheisen kaavan mukainen määrä

$$\Delta T = \frac{E_{\text{annual}} \cdot p_i}{730{,}485} \cdot \frac{1}{\rho C_p \dot{V}},$$

jossa E_{annual} on vuotuinen lämmönotto, p_i on kuukauden i osuus vuotuisesta lämmönotosta (kuva 4), 730,485 on kuukauden sisältämän tuntien lukumäärä, ja ρ, C_p ja $\dot{V}$ ovat lämmönkeruunesteen tiheys, ominaislämpökapasiteetti ja virtaama. Lämpökaivoon sisään syötettävän nesteen lämpötila T_{inlet} laskettiin kaavalla

$$T_{\text{inlet}} = T_{\text{outlet}} - \Delta T.$$

Jokaiselle tutkittavalle tapaukselle etsittiin sellainen vuotuinen lämmöntuotto (E_{annual}), joka tuotti viimeisen simulaatiovuoden tammikuussa (simulaation kylmin kuukausi) keskimääräiseksi lämmönkeruunesteen lämpötilaksi −1,5 °C.

3.3 Tulokset

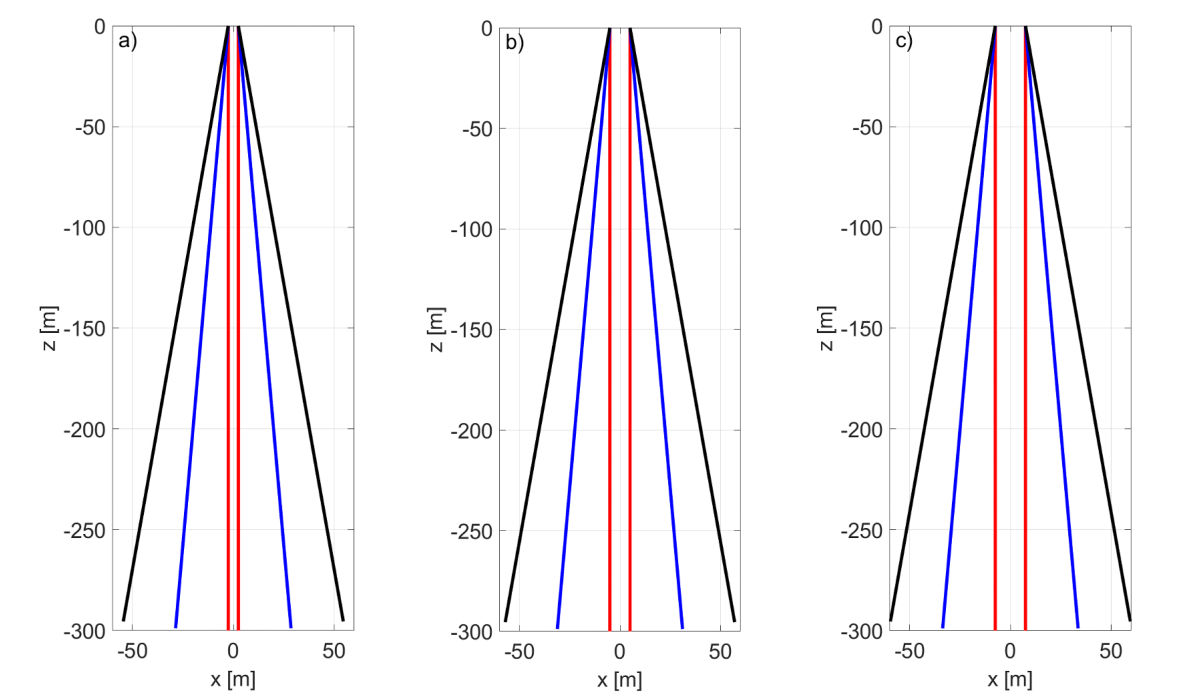
Taulukko 6 esittää tuloksia laskuista, joissa kaivot porataan maan pinnalta 5, 10 ja 15 m välein. Tulokset osoittavat sen, että mitä suuremmaksi kaivojen välimatkaa kasvatetaan, sitä pienempi on niiden keskinäinen vuorovaikutus. Tulokset osoittavat myös sen, että mitä enemmän kaivoja kallistetaan poispäin toisistaan, sitä pienempi on kaivojen keskinäinen vuorovaikutus.

Taulukko 6. Laskennan tulokset.

Porareikien kallistuskulma θ[°]	Porareikien etäisyys maanpinnalla *B* [m]	Vuotuinen lämpöenergian tuotto E_{annual} [MWh]	Keskinäinen vuorovaikutus [%]
0	5	33,741	−17
0	10	35,648	−12
0	15	36,542	−10
0	yksi kaivo	40,472	
5	5	38,026	−6
5	10	38,484	−5
5	15	38,825	−4
5	yksi kaivo	40,503	
10	5	39,148	−3
10	10	39,337	−3
10	15	39,502	−2
10	yksi kaivo	40,405	

Taulukon 6 tuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon se, miten kaivot on ajateltu porattavaksi maanpinnalta (kuva 5). Mitä suurempi kallistus on, sitä etäämmäksi kaivot erkanevat toisistaan alaspäin mentäessä, ja sitä vähemmän ne myös vaikuttavat toisiinsa.

Kuva 5. Taulukossa 6 tarkastellut tapaukset. Kaivojen poraaminen on aloitettu maanpinnalta a) 5, b) 10 ja c) 15 metrin etäisyydeltä toisistaan. Punaiset viivat esittävät pystyjen kaivojen tapauksia. Siniset viivat esittävät 5 asteen kallistuksella ja mustat 10 asteen kallistuksella porattujen kaivojen tapauksia.

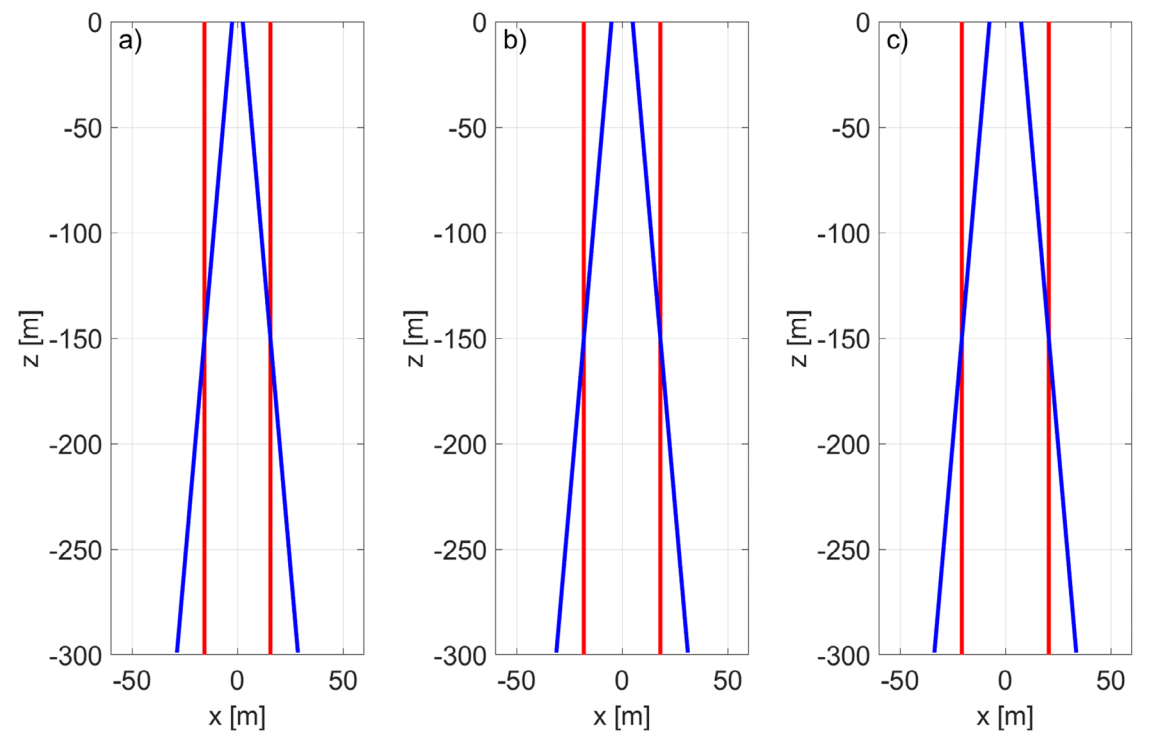


Taulukko 7 esittää tuloksia laskuista, joissa verrataan pystyyn porattuja kaivoja 5 asteen kallistuksella porattuihin kaivoihin (maanpinnalla 5, 10 ja 15 m etäisyydellä toisistaan), mutta nyt pystyt kaivot on porattu siten, että ne ovat keskimäärin yhtä etäällä toisistaan kuin kallistetusti poratut kaivot.
Kuva 6 esittää taulukon 7 tapauksia.

Taulukko 7. Tulokset laskuista, joissa verrattiin pystyjä kaivoja 5 astetta kallistettuihin kaivoihin, jotka olivat keskimäärin yhtä etäällä toisistaan.

Kaivojen keskimääräinen etäisyys toisistaan [m]	Pystyt reiät E_{annual} [MWh]	5° kallistetut reiät E_{annual} [MWh]	Kallistettujen reikien ero pystyihin reikiin
31,2	38,233	38,026	−0,5 %
36,2	38,566	38,484	−0,2 %
41,2	38,856	38,825	−0,1 %

Kuva 6. Taulukossa 7 tarkastellut tapaukset. Viisi astetta kallistettujen kaivojen poraaminen on aloitettu maanpinnalta a) 5, b) 10 ja c) 15 metrin etäisyydeltä ja pystyjen kaivojen a) 31,2, b) 36,2 ja c) 41,2 metrin etäisyydeltä. Punaiset viivat esittävät pystyjen kaivojen tapausta ja siniset viivat 5 asteen kallistuksella porattujen kaivojen tapausta.

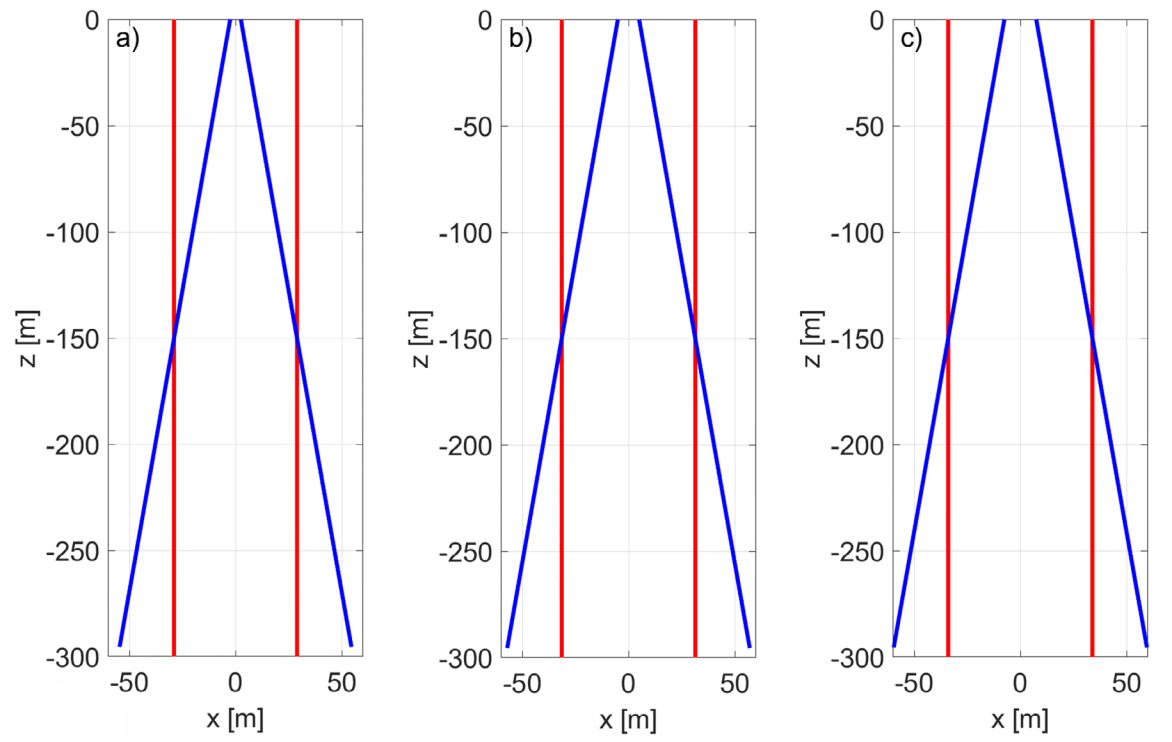


Ja lopuksi taulukko 8 esittää tuloksia laskuista, joissa verrataan pystyyn porattuja kaivoja 10 asteen kallistuksella porattuihin kaivoihin (maanpinnalla 5, 10 ja 15 m etäisyydellä toisistaan). Tässäkin tapauksessa pystyt kaivot on porattu siten, että ne ovat keskimäärin yhtä etäällä toisistaan kuin kallistetusti poratut kaivot. Kuva 7 esittää taulukon 8 tapauksia.

Taulukko 8. Tulokset laskuista, joissa verrattiin pystyjä kaivoja 10-astettua kallistettuihin kaivoihin, jotka olivat keskimäärin yhtä etäällä toisistaan.

Kaivojen keskimääräinen etäisyys toisistaan [m]	Pystyt reiät E_{annual} [MWh]	10° kallistetut reiät E_{annual} [MWh]	Kallistettujen reikien ero pystyihin reikiin
57,9	39,554	39,148	−1,0 %
62,9	39,639	39,337	−0,8 %
67,9	39,816	39,502	−0,8 %

Kuva 7. Taulukossa 8 tarkastellut tapaukset. Kymmenen astetta kallistettujen kaivojen poraaminen on aloitettu maanpinnalta a) 5, b) 10 ja c) 15 metrin etäisyydeltä ja pystyjen kaivojen a) 57,9, b) 62,9 ja c) 67,9 metrin etäisyydeltä. Punaiset viivat esittävät pystyjen kaivojen tapausta ja siniset viivat 10 asteen kallistuksella porattujen kaivojen tapausta.



Taulukkojen 7 ja 8 esittämistä tuloksista nähdään se, että pystyt kaivot ja kallistetut kaivot tuottavat käytännössä saman määrän geoenergiaa, kunhan kaivot ovat keskimäärin yhtä etäällä toisistaan. Kallistetut kaivot ovat kuitenkin lähempänä toisiaan kaivojen yläpäässä kuin pystyyn poratut kaivot, joten kallio viilenee läheltä maanpintaa enemmän, mikä näkyy hieman kallistettujen kaivojen tuotoissa.

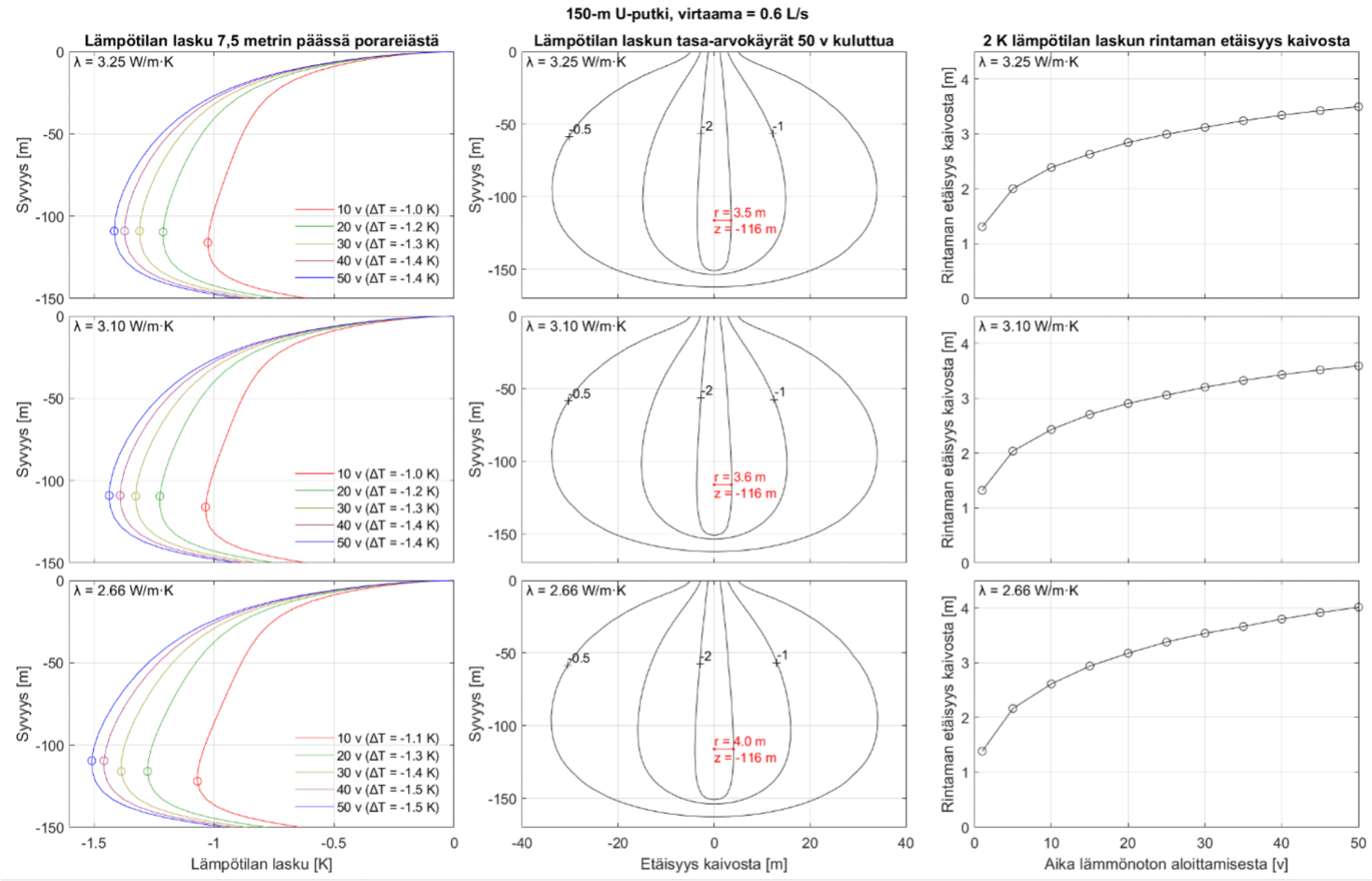
Taulukosta 6 nähdään se, että jos pystyjen kaivojen ja vinoon porattujen kaivojen poraaminen aloitetaan yhtä etäältä maan pinnalta, niin silloin vinoon, toisistaan poispäin poratut kaivot ovat selvästi parempi vaihtoehto kuin pystyyn poratut kaivot. Taulukosta 6 nähdään esimerkiksi se, että jos halutaan pitää kaivojen keskinäinen vuorovaikutus kymmenessä prosentissa tai sen alapuolella, niin silloin pystyjen kaivojen pitää olla vähintään 15 metrin päässä toisistaan. Sen sijaan viiden ja kymmenen asteen kulmiin toisistaan poispäin poratut kaivot voivat olla maanpinnalla 5 metrin päässä toisistaan ja silti kaivojen keskinäiset vuorovaikutukset pysyvät alle kymmenessä prosentissa.

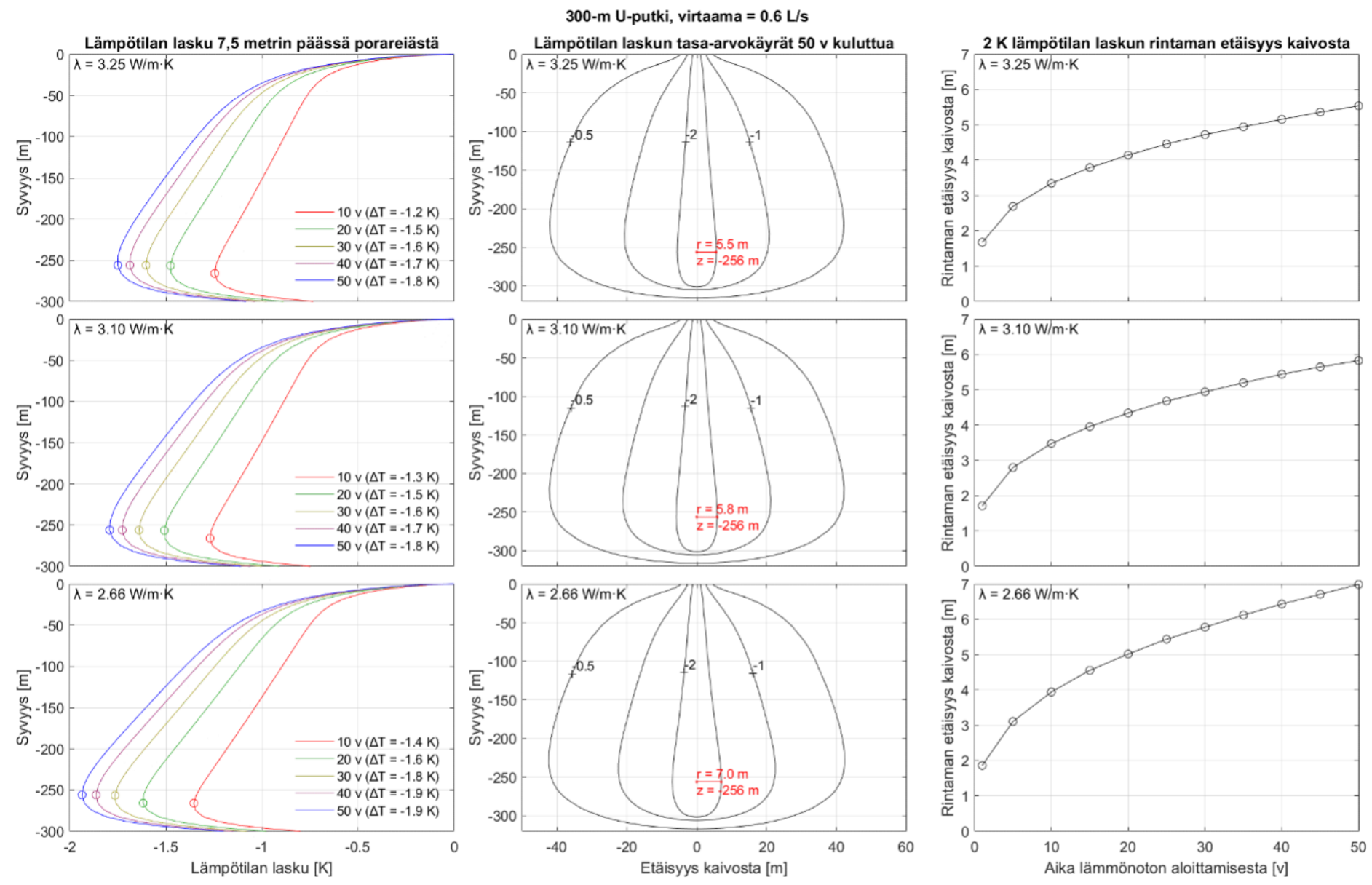
4. Viitteet

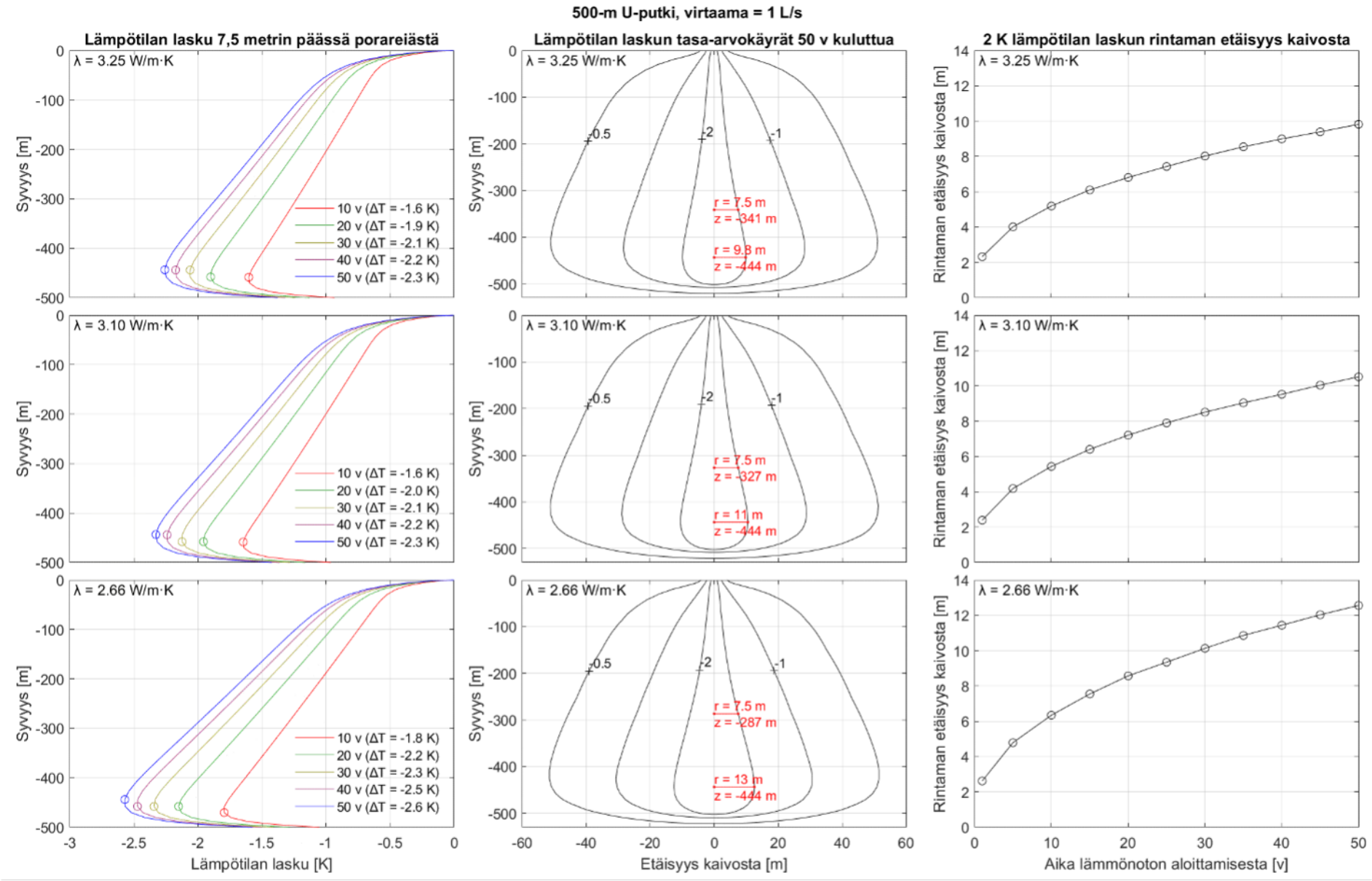
Kallio, J., Korhonen, K., Wennerström, M., Sallasmaa, O., and Witick, I., 2019. Helsingin geoenergiapotentiaali. Kaupunkiympäristön julkaisuja 2019:25, Helsingin kaupunki, Helsinki, [**https://bit.ly/helsingin-geoenergiapotentiaali**]

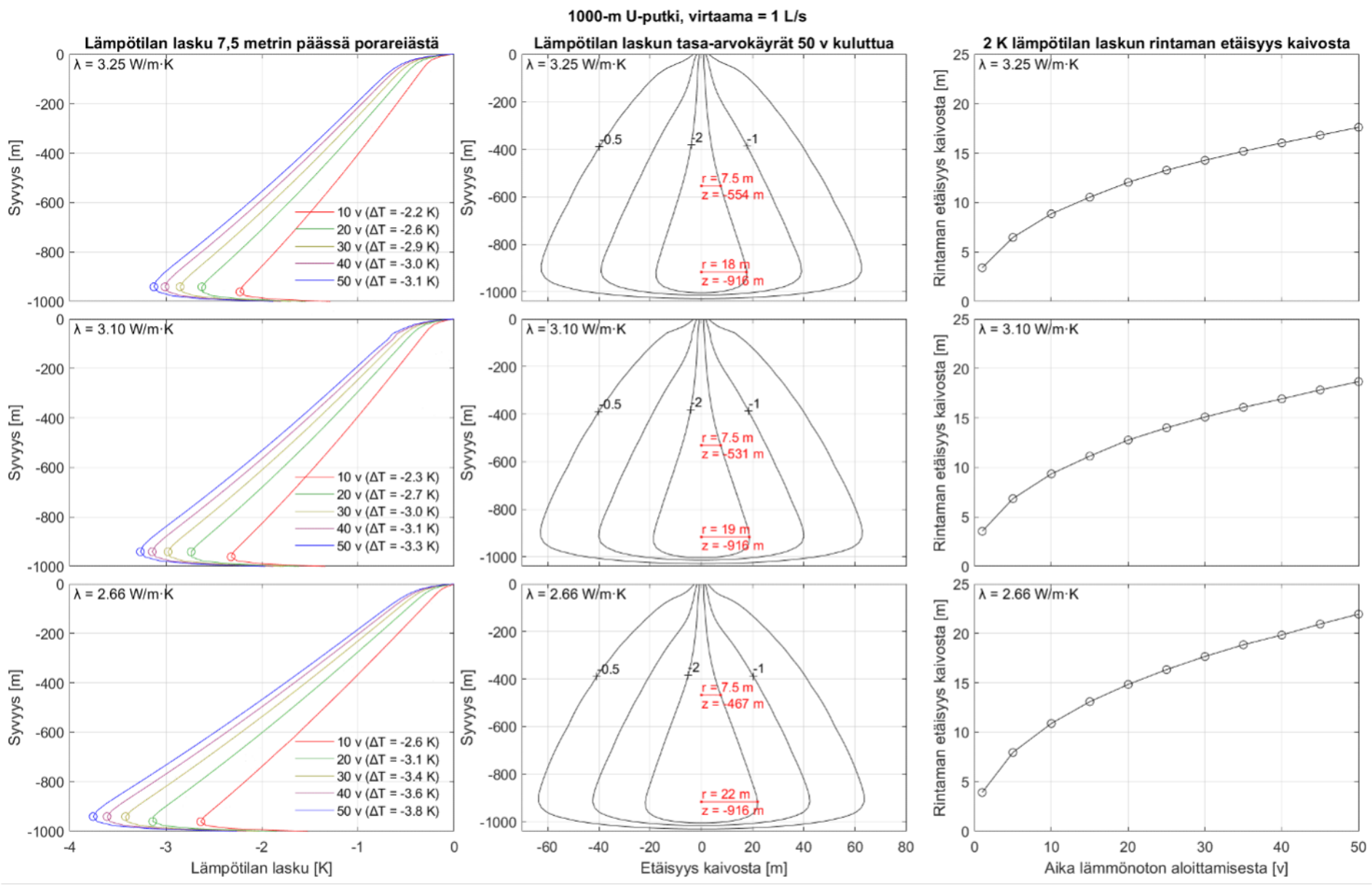
5. Liitteet

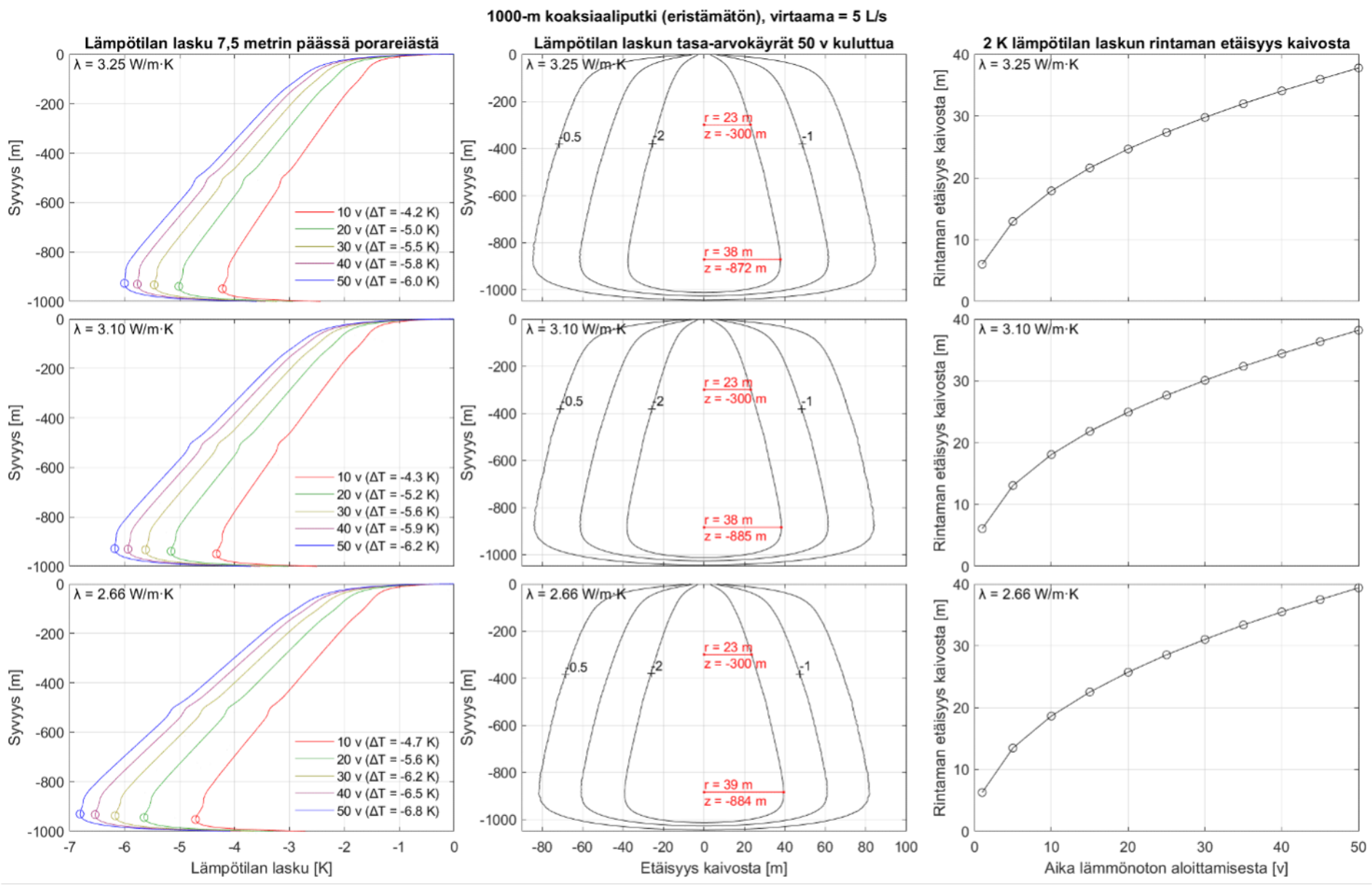
Liite 1

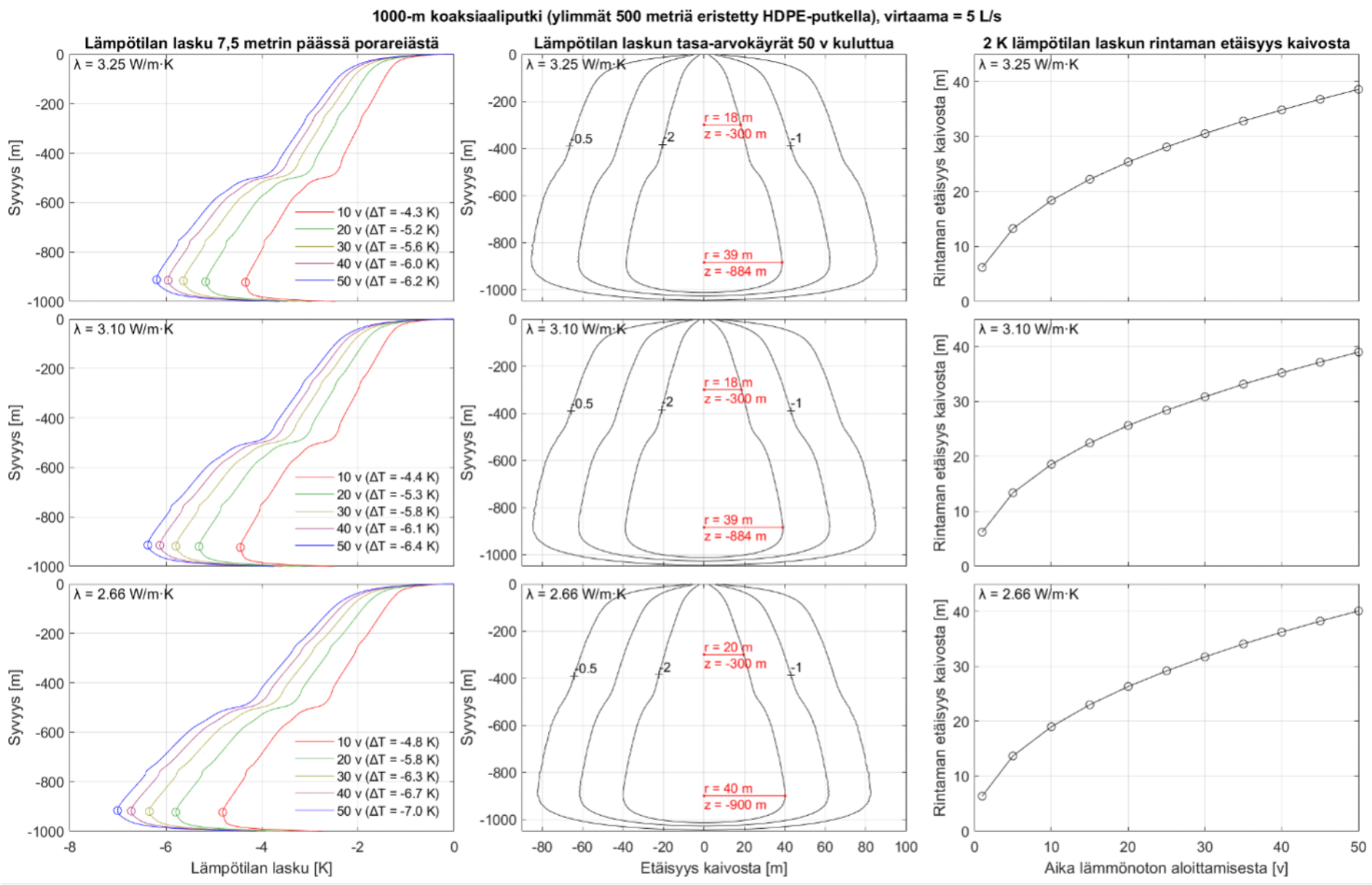

150-m U-putki, virtaama = 0.6 L/s
Lämpötilan lasku 7,5 metrin päässä porareiästä
Lämpötilan laskun tasa-arvokäyrät 50 v kuluttua
2 K lämpötilan laskun rintaman etäisyys kaivosta
λ = 3.25 W/m·K
λ = 3.10 W/m·K
λ = 2.66 W/m·K
10 v (ΔT = -1.0 K)
20 v (ΔT = -1.2 K)
30 v (ΔT = -1.3 K)
40 v (ΔT = -1.4 K)
50 v (ΔT = -1.4 K)
10 v (ΔT = -1.1 K)
20 v (ΔT = -1.3 K)
30 v (ΔT = -1.4 K)
40 v (ΔT = -1.5 K)
50 v (ΔT = -1.5 K)
r = 3.5 m
z = -116 m
r = 3.6 m
z = -116 m
r = 4.0 m
z = -116 m
Syvyys [m]
Rintaman etäisyys kaivosta [m]
Lämpötilan lasku [K]
Etäisyys kaivosta [m]
Aika lämmönoton aloittamisesta [v]

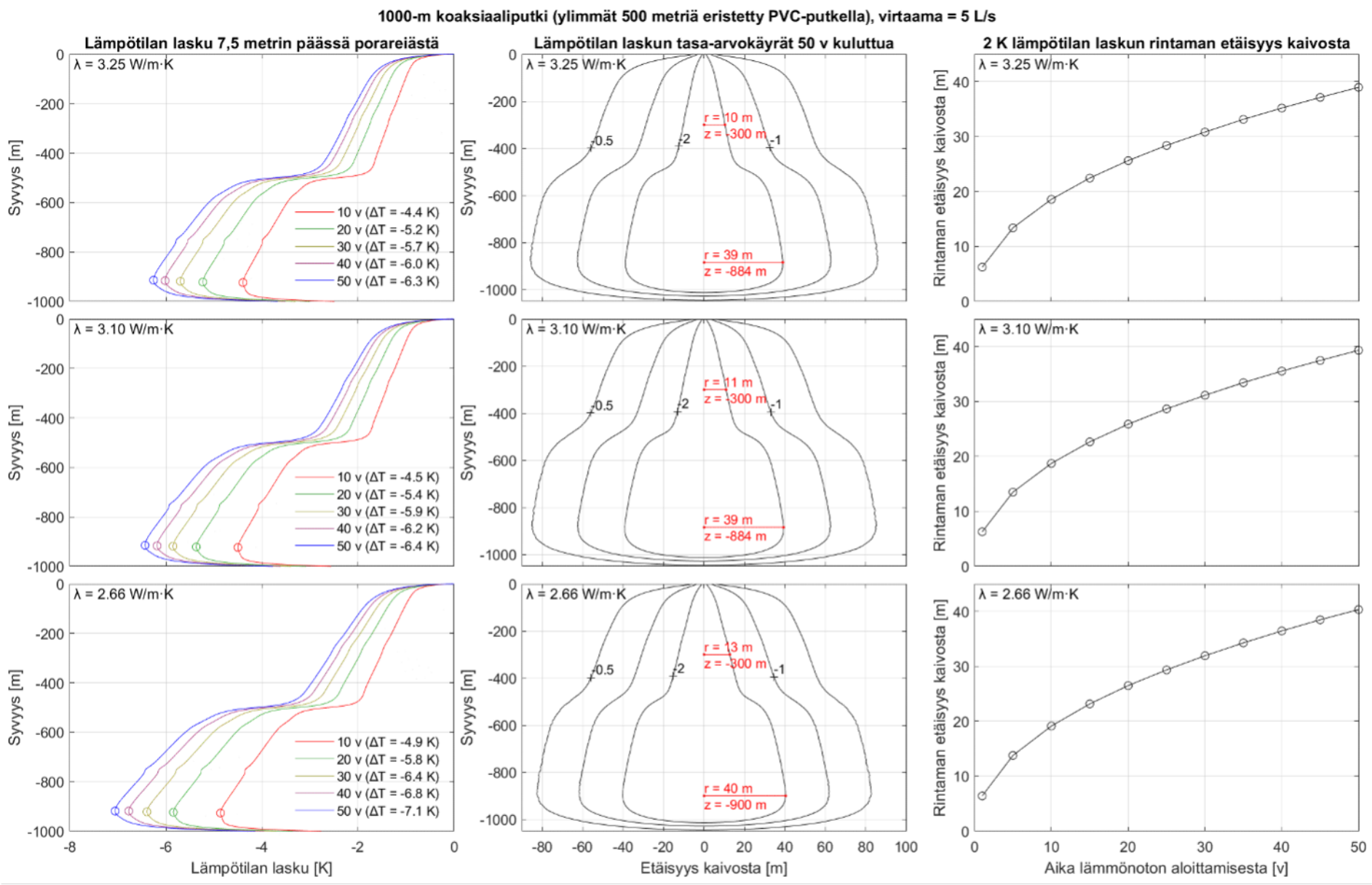

300-m U-putki, virtaama = 0.6 L/s
Lämpötilan lasku 7,5 metrin päässä porareiästä
Lämpötilan laskun tasa-arvokäyrät 50 v kuluttua
2 K lämpötilan laskun rintaman etäisyys kaivosta
λ = 3.25 W/m·K
λ = 3.10 W/m·K
λ = 2.66 W/m·K
10 v (ΔT = -1.2 K)
20 v (ΔT = -1.5 K)
30 v (ΔT = -1.6 K)
40 v (ΔT = -1.7 K)
50 v (ΔT = -1.8 K)
10 v (ΔT = -1.3 K)
20 v (ΔT = -1.5 K)
30 v (ΔT = -1.6 K)
40 v (ΔT = -1.7 K)
50 v (ΔT = -1.8 K)
10 v (ΔT = -1.4 K)
20 v (ΔT = -1.6 K)
30 v (ΔT = -1.8 K)
40 v (ΔT = -1.9 K)
50 v (ΔT = -1.9 K)
r = 5.5 m
z = -256 m
r = 5.8 m
z = -256 m
r = 7.0 m
z = -256 m
Syvyys [m]
Lämpötilan lasku [K]
Etäisyys kaivosta [m]
Rintaman etäisyys kaivosta [m]
Aika lämmönoton aloittamisesta [v]

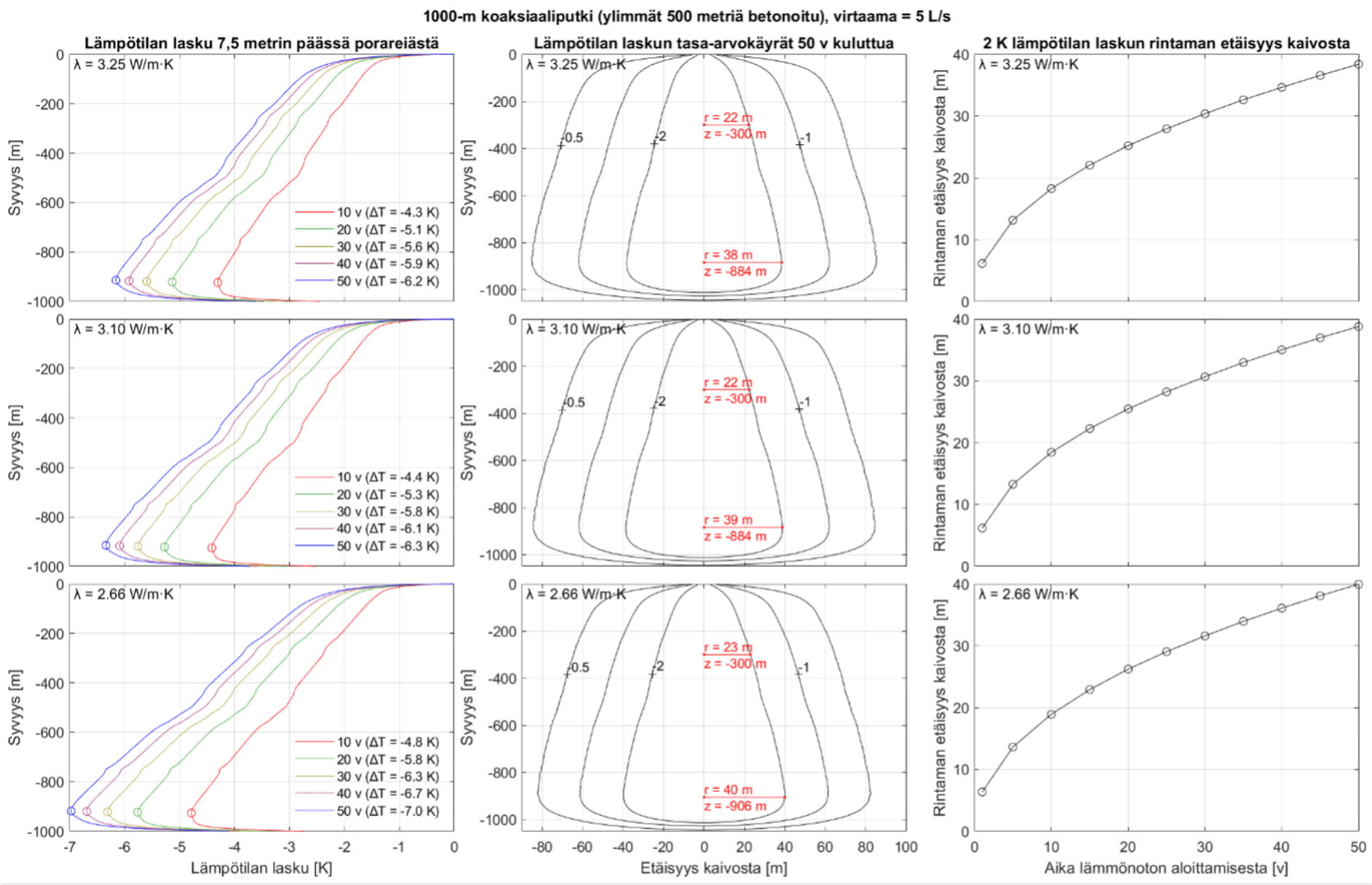

500-m U-putki, virtaama = 1 L/s
Lämpötilan lasku 7,5 metrin päässä porareiästä
Lämpötilan laskun tasa-arvokäyrät 50 v kuluttua
2 K lämpötilan laskun rintaman etäisyys kaivosta
λ = 3.25 W/m·K
λ = 3.10 W/m·K
λ = 2.66 W/m·K
10 v (ΔT = -1.6 K)
20 v (ΔT = -1.9 K)
30 v (ΔT = -2.1 K)
40 v (ΔT = -2.2 K)
50 v (ΔT = -2.3 K)
10 v (ΔT = -2.0 K)
10 v (ΔT = -1.8 K)
20 v (ΔT = -2.2 K)
30 v (ΔT = -2.3 K)
40 v (ΔT = -2.5 K)
50 v (ΔT = -2.6 K)
r = 7.5 m
z = -341 m
r = 9.3 m
z = -444 m
r = 7.5 m
z = -327 m
r = 11 m
z = -444 m
r = 7.5 m
z = -287 m
r = 13 m
z = -444 m
Syvyys [m]
Lämpötilan lasku [K]
Etäisyys kaivosta [m]
Rintaman etäisyys kaivosta [m]
Aika lämmönoton aloittamisesta [v]

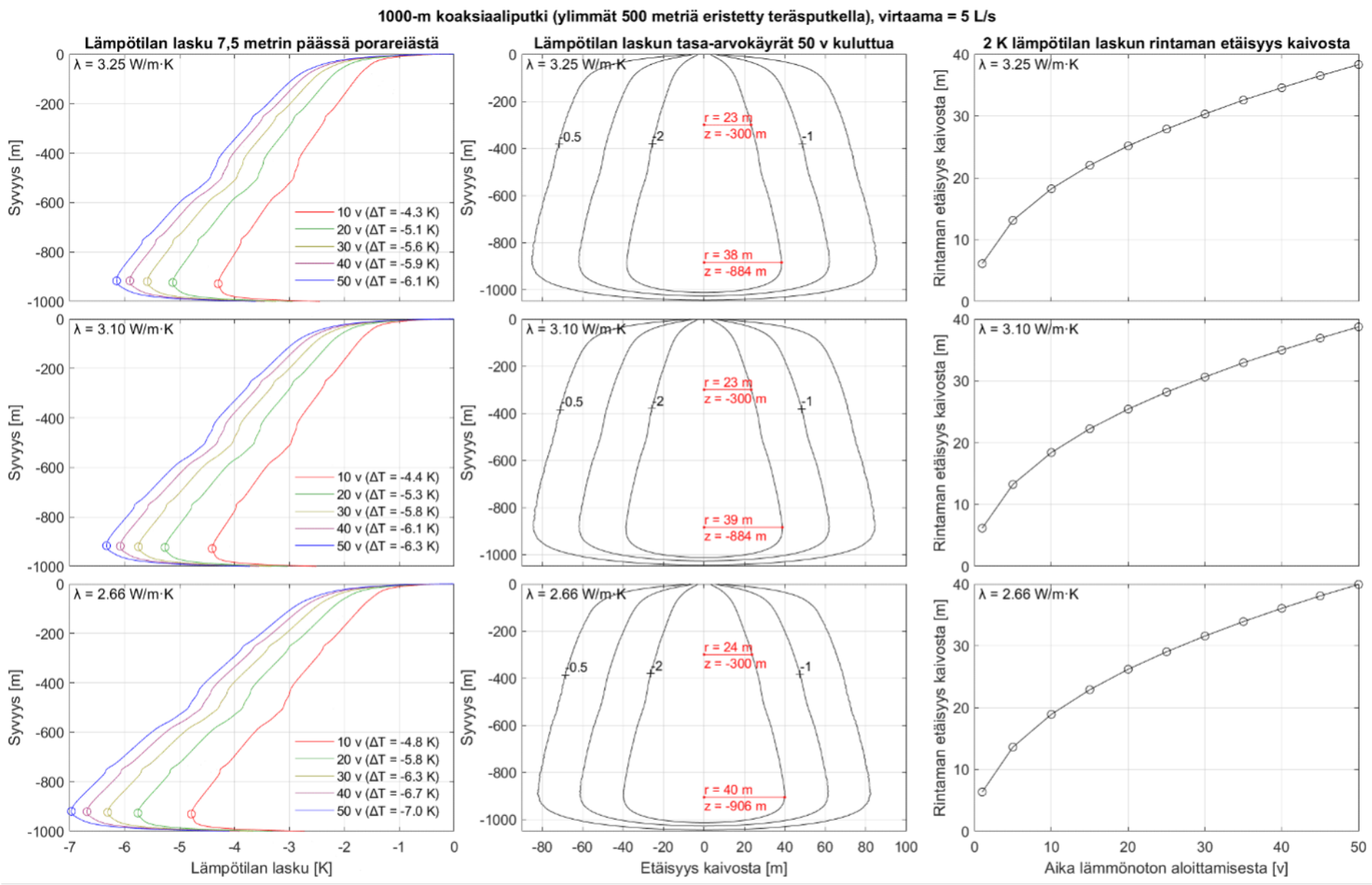

1000-m U-putki, virtaama = 1 L/s
Lämpötilan lasku 7,5 metrin päässä porareiästä
Lämpötilan laskun tasa-arvokäyrät 50 v kuluttua
2 K lämpötilan laskun rintaman etäisyys kaivosta
λ = 3.25 W/m·K
10 v (ΔT = -2.2 K)
20 v (ΔT = -2.6 K)
30 v (ΔT = -2.9 K)
40 v (ΔT = -3.0 K)
50 v (ΔT = -3.1 K)
r = 7.5 m
z = -554 m
r = 18 m
z = -916 m
λ = 3.10 W/m·K
10 v (ΔT = -2.3 K)
20 v (ΔT = -2.7 K)
30 v (ΔT = -3.0 K)
40 v (ΔT = -3.1 K)
50 v (ΔT = -3.3 K)
r = 7.5 m
z = -531 m
r = 19 m
z = -916 m
λ = 2.66 W/m·K
10 v (ΔT = -2.6 K)
20 v (ΔT = -3.1 K)
30 v (ΔT = -3.4 K)
40 v (ΔT = -3.6 K)
50 v (ΔT = -3.8 K)
r = 7.5 m
z = -467 m
r = 22 m
z = -916 m
Syvyys [m]
Lämpötilan lasku [K]
Etäisyys kaivosta [m]
Rintaman etäisyys kaivosta [m]
Aika lämmönoton aloittamisesta [v]

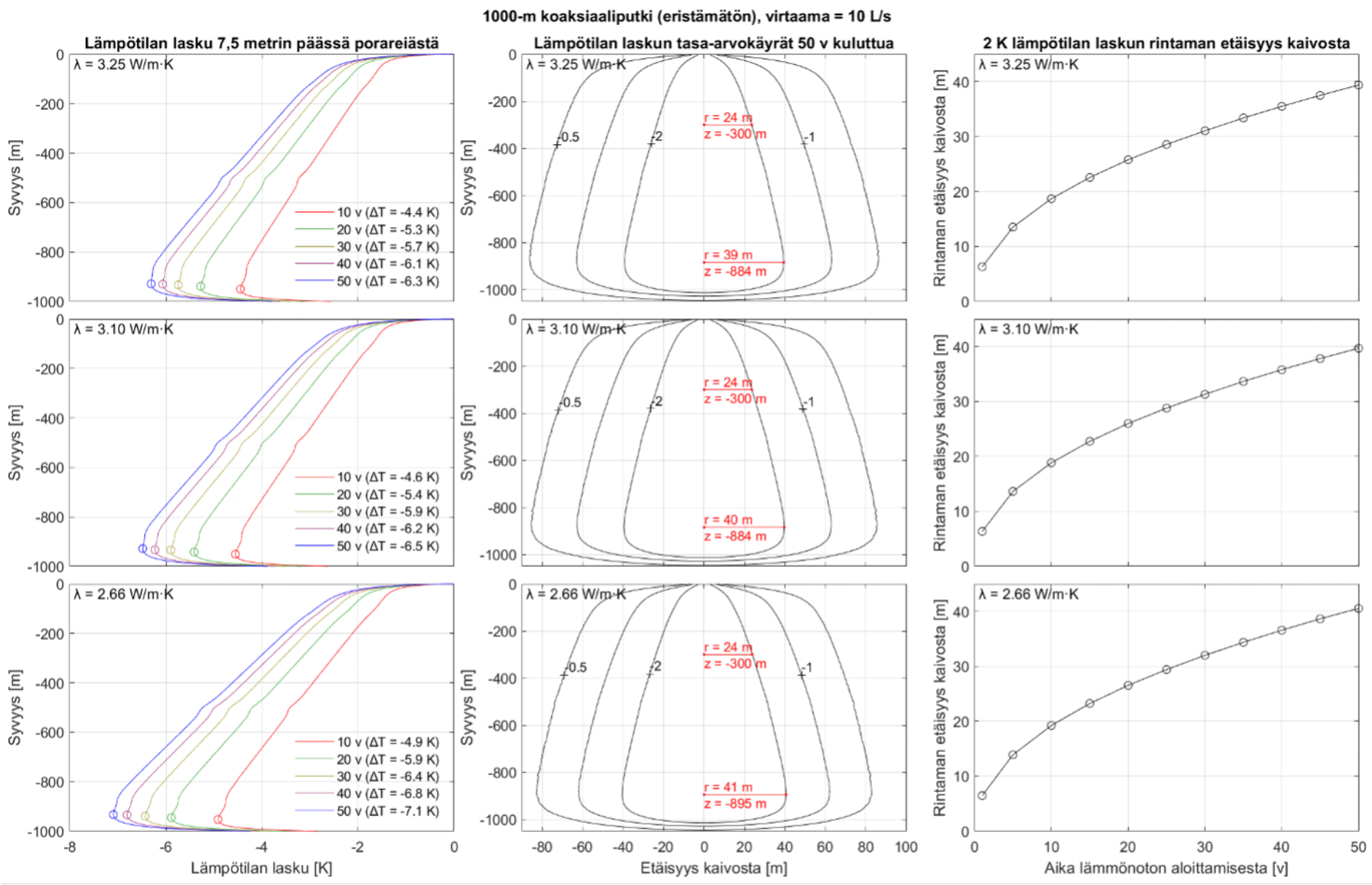

1000-m koaksiaaliputki (eristämätön), virtaama = 5 L/s
Lämpötilan lasku 7,5 metrin päässä porareiästä
Lämpötilan laskun tasa-arvokäyrät 50 v kuluttua
2 K lämpötilan laskun rintaman etäisyys kaivosta
λ = 3.25 W/m·K
10 v (ΔT = -4.2 K)
20 v (ΔT = -5.0 K)
30 v (ΔT = -5.5 K)
40 v (ΔT = -5.8 K)
50 v (ΔT = -6.0 K)
r = 23 m
z = -300 m
r = 38 m
z = -872 m
λ = 3.10 W/m·K
10 v (ΔT = -4.3 K)
20 v (ΔT = -5.2 K)
30 v (ΔT = -5.6 K)
40 v (ΔT = -5.9 K)
50 v (ΔT = -6.2 K)
r = 38 m
z = -885 m
λ = 2.66 W/m·K
10 v (ΔT = -4.7 K)
20 v (ΔT = -5.6 K)
30 v (ΔT = -6.2 K)
40 v (ΔT = -6.5 K)
50 v (ΔT = -6.8 K)
r = 39 m
z = -884 m
Syvyys [m]
Lämpötilan lasku [K]
Etäisyys kaivosta [m]
Rintaman etäisyys kaivosta [m]
Aika lämmönoton aloittamisesta [v]

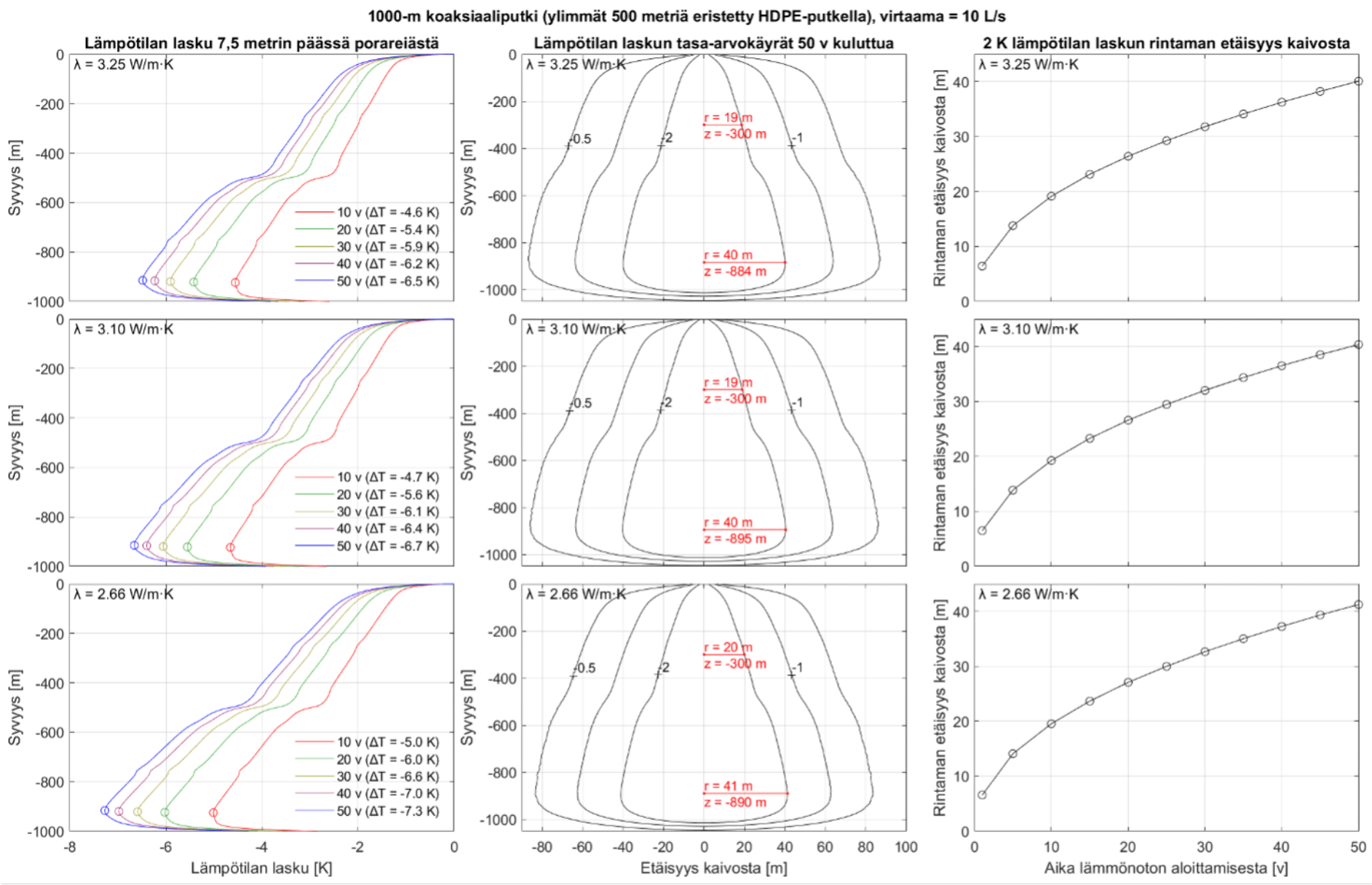

1000-m koaksiaaliputki (ylimmät 500 metriä eristetty HDPE-putkella), virtaama = 5 L/s
Lämpötilan lasku 7,5 metrin päässä porareiästä
Lämpötilan laskun tasa-arvokäyrät 50 v kuluttua
2 K lämpötilan laskun rintaman etäisyys kaivosta
λ = 3.25 W/m·K
10 v (ΔT = -4.3 K)
20 v (ΔT = -5.2 K)
30 v (ΔT = -5.6 K)
40 v (ΔT = -6.0 K)
50 v (ΔT = -6.2 K)
r = 18 m
z = -300 m
r = 39 m
z = -884 m
λ = 3.10 W/m·K
10 v (ΔT = -4.4 K)
20 v (ΔT = -5.3 K)
30 v (ΔT = -5.8 K)
40 v (ΔT = -6.1 K)
50 v (ΔT = -6.4 K)
r = 18 m
z = -300 m
r = 39 m
z = -884 m
λ = 2.66 W/m·K
10 v (ΔT = -4.8 K)
20 v (ΔT = -5.8 K)
30 v (ΔT = -6.3 K)
40 v (ΔT = -6.7 K)
50 v (ΔT = -7.0 K)
r = 20 m
z = -300 m
r = 40 m
z = -900 m
Syvyys [m]
Lämpötilan lasku [K]
Etäisyys kaivosta [m]
Rintaman etäisyys kaivosta [m]
Aika lämmönoton aloittamisesta [v]

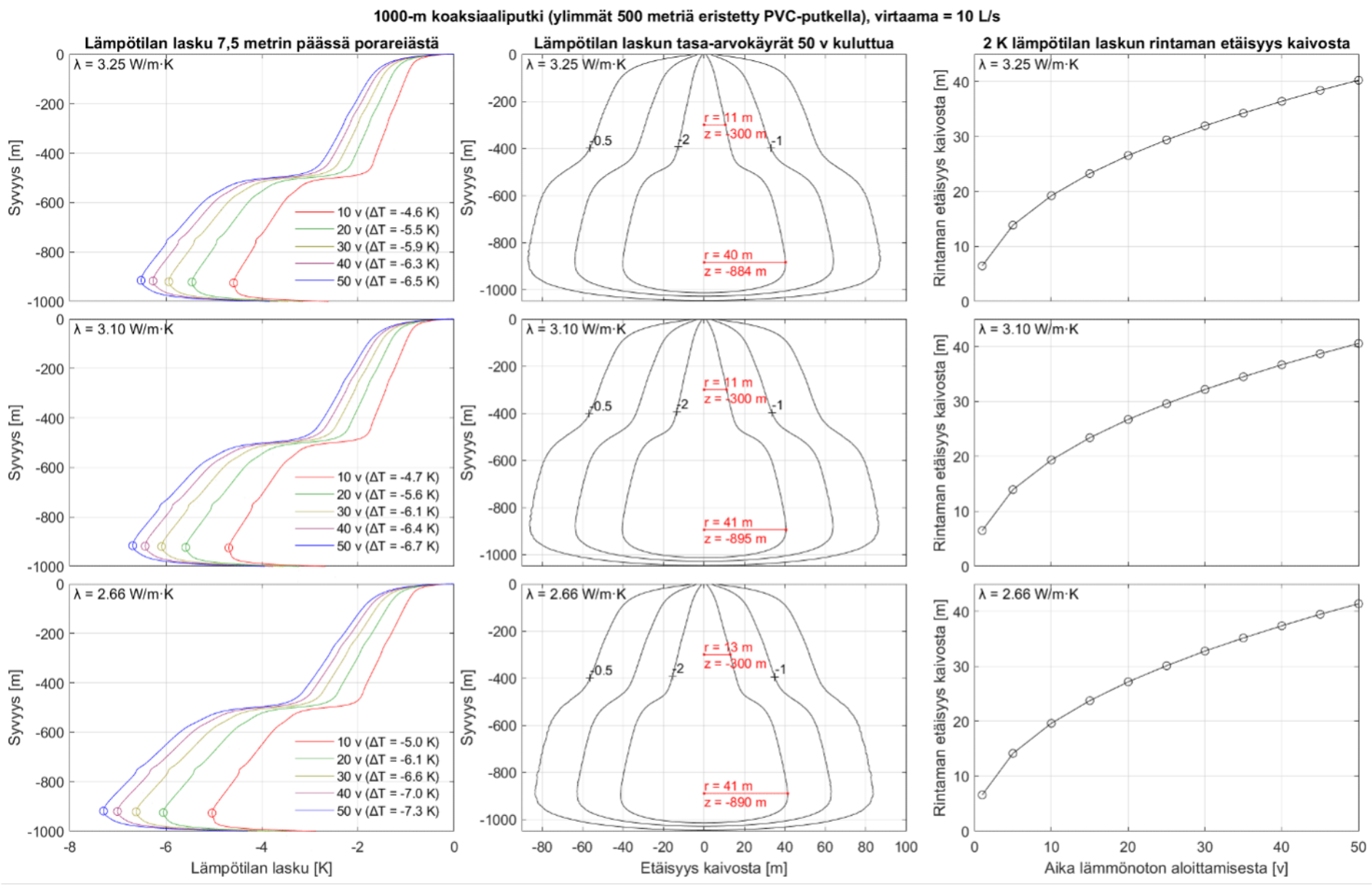

1000-m koaksiaaliputki (ylimmät 500 metriä eristetty PVC-putkella), virtaama = 5 L/s
Lämpötilan lasku 7,5 metrin päässä porareiästä
Lämpötilan laskun tasa-arvokäyrät 50 v kuluttua
2 K lämpötilan laskun rintaman etäisyys kaivosta
λ = 3.25 W/m·K
λ = 3.10 W/m·K
λ = 2.66 W/m·K
10 v (ΔT = -4.4 K)
20 v (ΔT = -5.2 K)
30 v (ΔT = -5.7 K)
40 v (ΔT = -6.0 K)
50 v (ΔT = -6.3 K)
10 v (ΔT = -4.5 K)
20 v (ΔT = -5.4 K)
30 v (ΔT = -5.9 K)
40 v (ΔT = -6.2 K)
50 v (ΔT = -6.4 K)
10 v (ΔT = -4.9 K)
20 v (ΔT = -5.8 K)
30 v (ΔT = -6.4 K)
40 v (ΔT = -6.8 K)
50 v (ΔT = -7.1 K)
r = 10 m
z = -300 m
r = 39 m
z = -884 m
r = 11 m
z = -300 m
r = 39 m
z = -884 m
r = 13 m
z = -300 m
r = 40 m
z = -900 m
0.5
2
1
Syvyys [m]
Lämpötilan lasku [K]
Etäisyys kaivosta [m]
Rintaman etäisyys kaivosta [m]
Aika lämmönoton aloittamisesta [v]

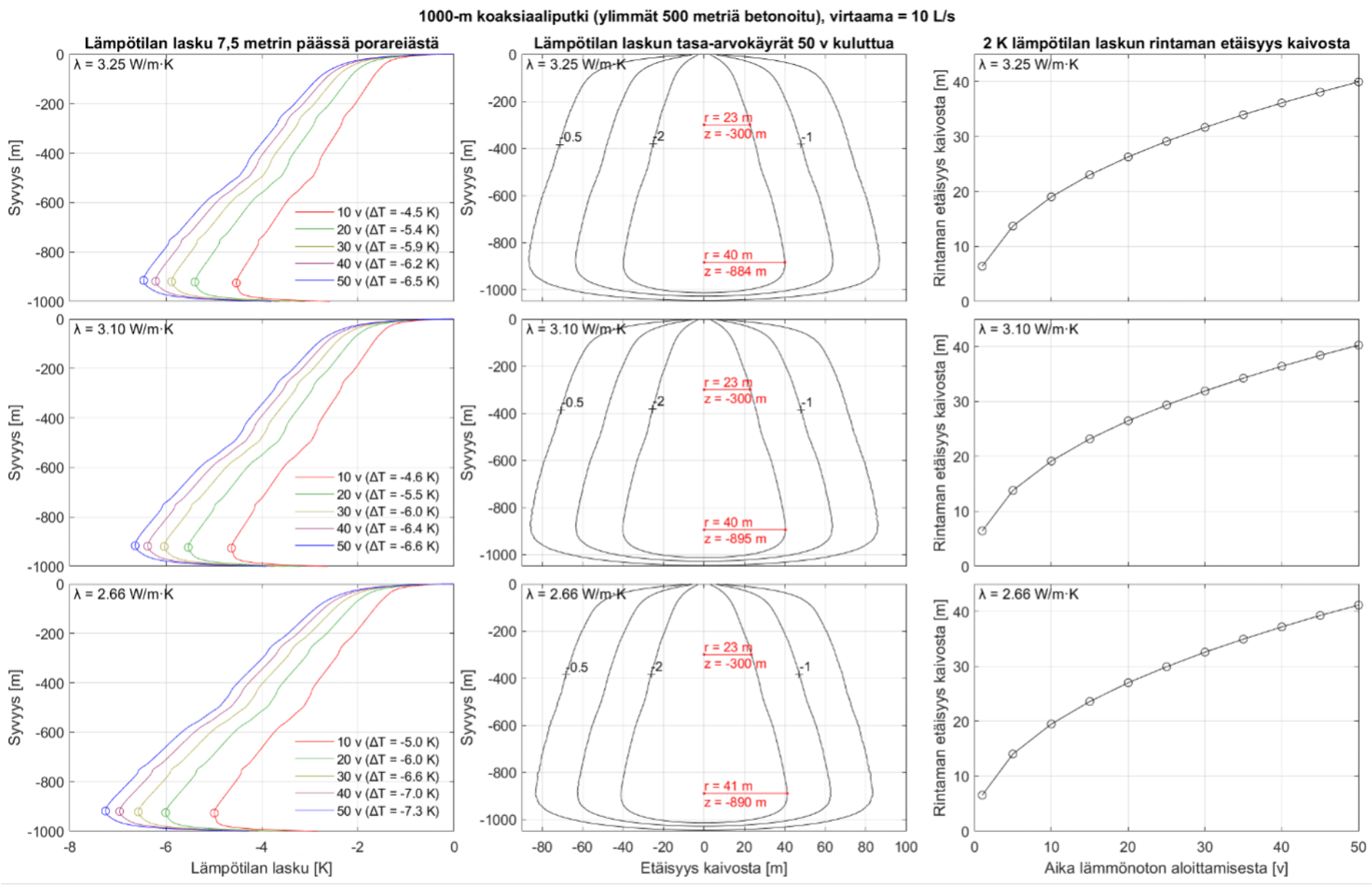

1000-m koaksiaaliputki (ylimmät 500 metriä betonoitu), virtaama = 5 L/s
Lämpötilan lasku 7,5 metrin päässä porareiästä
Lämpötilan laskun tasa-arvokäyrät 50 v kuluttua
2 K lämpötilan laskun rintaman etäisyys kaivosta
λ = 3.25 W/m·K
10 v (ΔT = -4.3 K)
20 v (ΔT = -5.1 K)
30 v (ΔT = -5.6 K)
40 v (ΔT = -5.9 K)
50 v (ΔT = -6.2 K)
r = 22 m
z = -300 m
r = 38 m
z = -884 m
λ = 3.10 W/m·K
10 v (ΔT = -4.4 K)
20 v (ΔT = -5.3 K)
30 v (ΔT = -5.8 K)
40 v (ΔT = -6.1 K)
50 v (ΔT = -6.3 K)
r = 22 m
z = -300 m
r = 39 m
z = -884 m
λ = 2.66 W/m·K
10 v (ΔT = -4.8 K)
20 v (ΔT = -5.8 K)
30 v (ΔT = -6.3 K)
40 v (ΔT = -6.7 K)
50 v (ΔT = -7.0 K)
r = 23 m
z = -300 m
r = 40 m
z = -906 m
Syvyys [m]
Lämpötilan lasku [K]
Etäisyys kaivosta [m]
Rintaman etäisyys kaivosta [m]
Aika lämmönoton aloittamisesta [v]

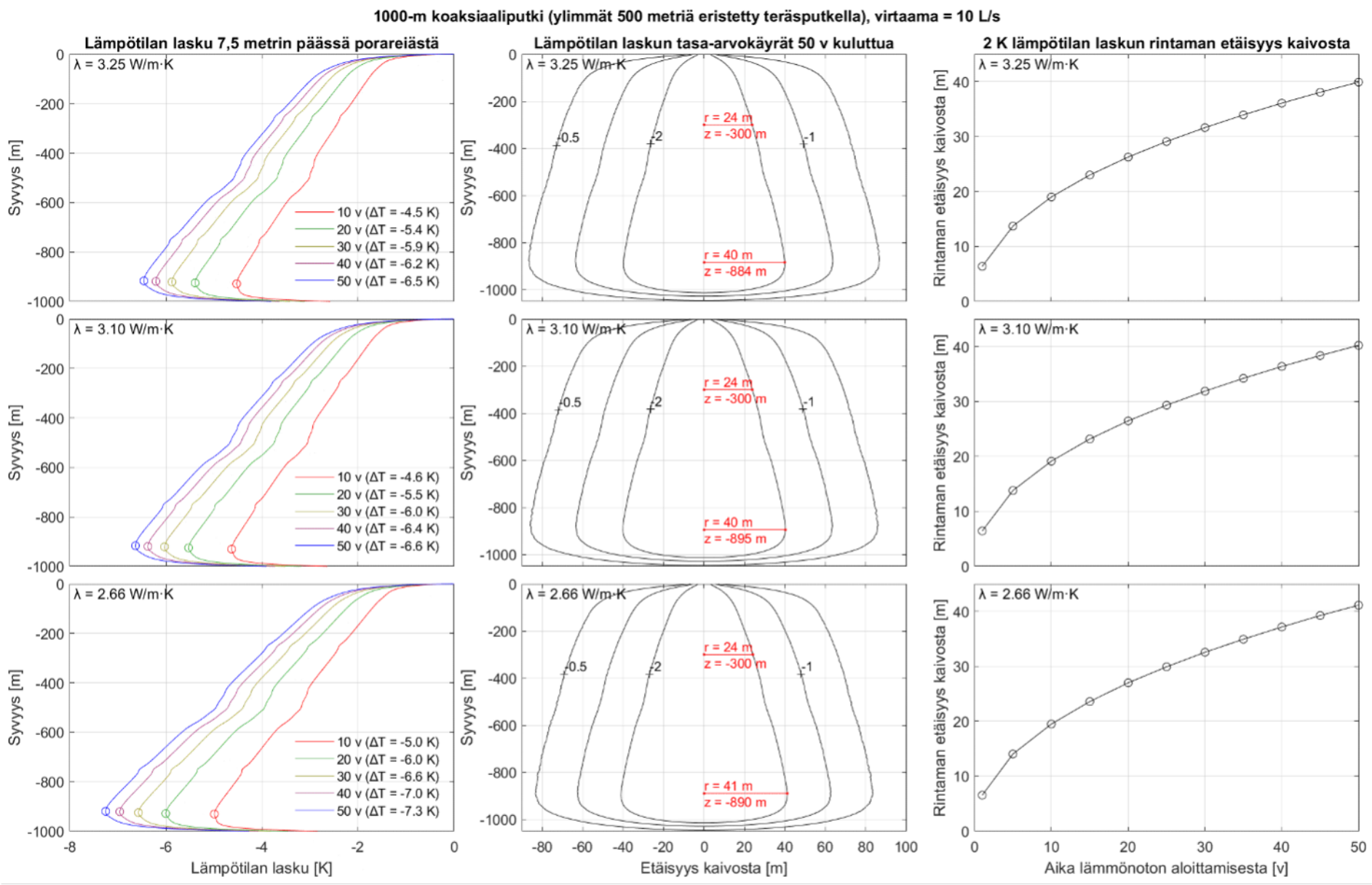

1000-m koaksiaaliputki (ylimmät 500 metriä eristetty teräsputkella), virtaama = 5 L/s
Lämpötilan lasku 7,5 metrin päässä porareiästä
Lämpötilan laskun tasa-arvokäyrät 50 v kuluttua
2 K lämpötilan laskun rintaman etäisyys kaivosta
λ = 3.25 W/m·K
10 v (ΔT = -4.3 K)
20 v (ΔT = -5.1 K)
30 v (ΔT = -5.6 K)
40 v (ΔT = -5.9 K)
50 v (ΔT = -6.1 K)
r = 23 m
z = -300 m
r = 38 m
z = -884 m
λ = 3.10 W/m·K
10 v (ΔT = -4.4 K)
20 v (ΔT = -5.3 K)
30 v (ΔT = -5.8 K)
40 v (ΔT = -6.1 K)
50 v (ΔT = -6.3 K)
r = 23 m
z = -300 m
r = 39 m
z = -884 m
λ = 2.66 W/m·K
10 v (ΔT = -4.8 K)
20 v (ΔT = -5.8 K)
30 v (ΔT = -6.3 K)
40 v (ΔT = -6.7 K)
50 v (ΔT = -7.0 K)
r = 24 m
z = -300 m
r = 40 m
z = -906 m
Syvyys [m]
Rintaman etäisyys kaivosta [m]
Lämpötilan lasku [K]
Etäisyys kaivosta [m]
Aika lämmönoton aloittamisesta [v]

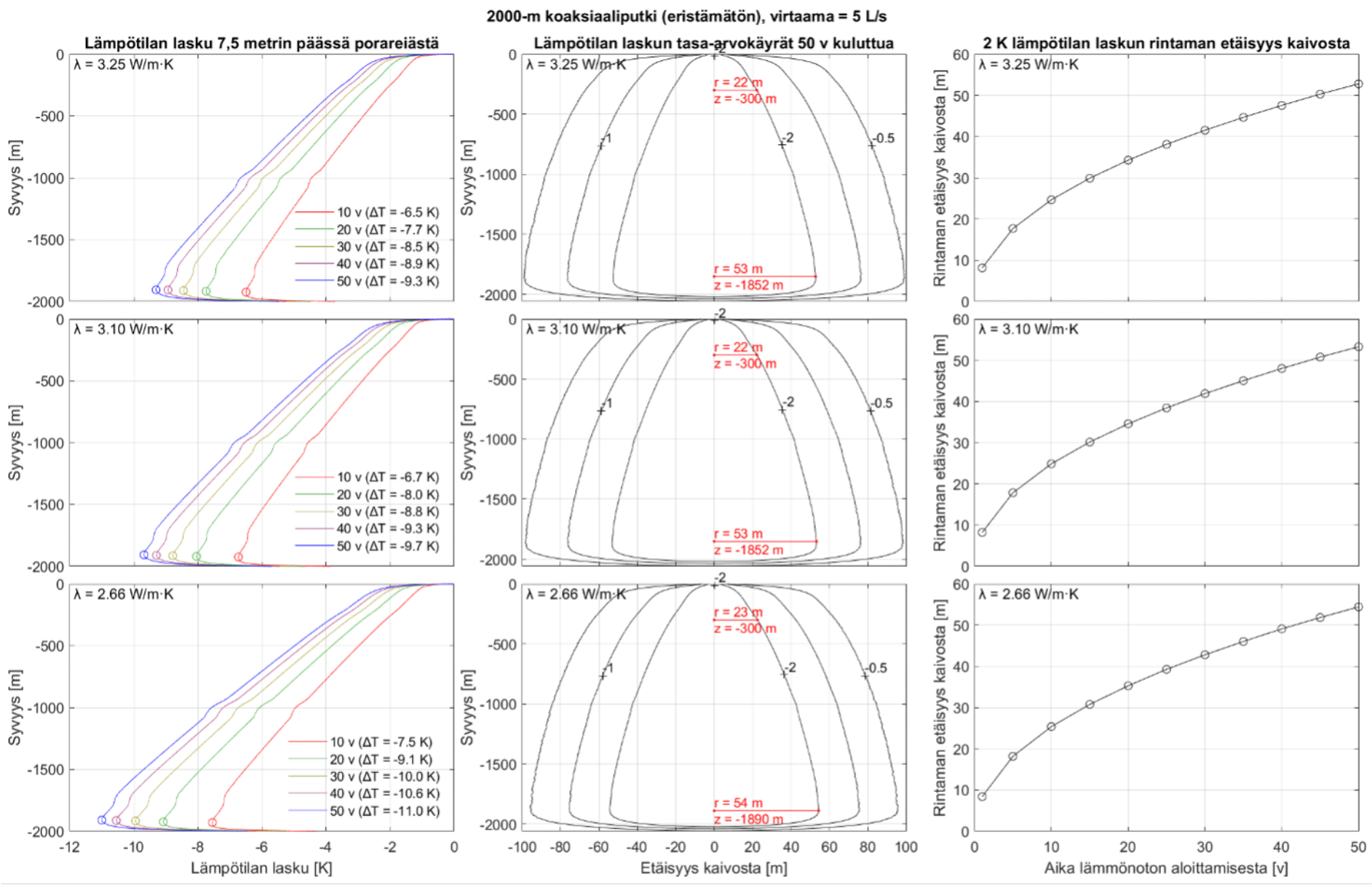

1000-m koaksiaaliputki (eristämätön), virtaama = 10 L/s
Lämpötilan lasku 7,5 metrin päässä porareiästä
Lämpötilan laskun tasa-arvokäyrät 50 v kuluttua
2 K lämpötilan laskun rintaman etäisyys kaivosta
λ = 3.25 W/m·K
λ = 3.10 W/m·K
λ = 2.66 W/m·K
10 v (ΔT = -4.4 K)
20 v (ΔT = -5.3 K)
30 v (ΔT = -5.7 K)
40 v (ΔT = -6.1 K)
50 v (ΔT = -6.3 K)
10 v (ΔT = -4.6 K)
20 v (ΔT = -5.4 K)
30 v (ΔT = -5.9 K)
40 v (ΔT = -6.2 K)
50 v (ΔT = -6.5 K)
10 v (ΔT = -4.9 K)
20 v (ΔT = -5.9 K)
30 v (ΔT = -6.4 K)
40 v (ΔT = -6.8 K)
50 v (ΔT = -7.1 K)
r = 24 m
z = -300 m
r = 39 m
z = -884 m
r = 40 m
z = -884 m
r = 41 m
z = -895 m
0.5
2
1
Syvyys [m]
Lämpötilan lasku [K]
Etäisyys kaivosta [m]
Rintaman etäisyys kaivosta [m]
Aika lämmönoton aloittamisesta [v]

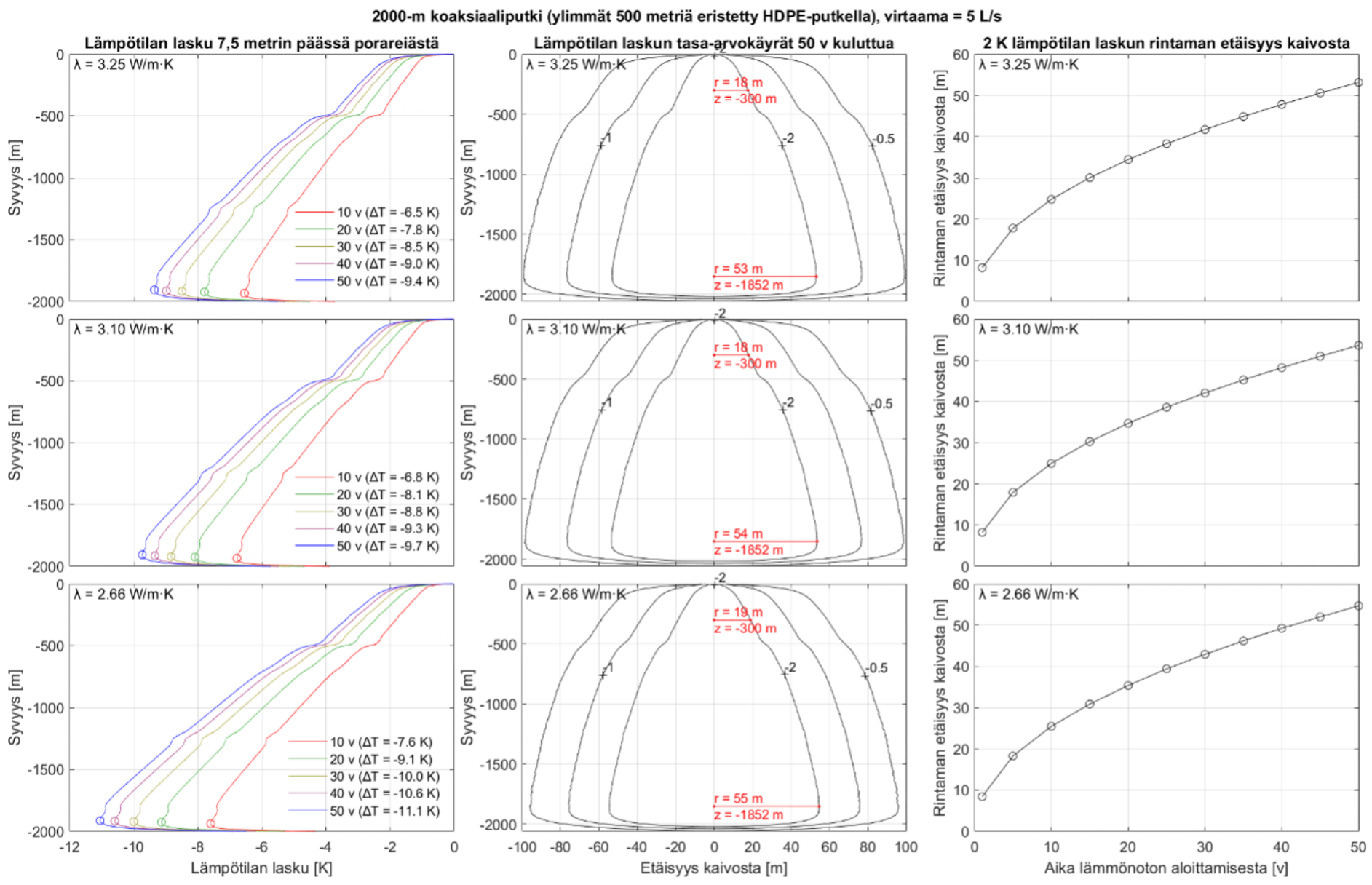

1000-m koaksiaaliputki (ylimmät 500 metriä eristetty HDPE-putkella), virtaama = 10 L/s
Lämpötilan lasku 7,5 metrin päässä porareiästä
Lämpötilan laskun tasa-arvokäyrät 50 v kuluttua
2 K lämpötilan laskun rintaman etäisyys kaivosta
λ = 3.25 W/m·K
10 v (ΔT = -4.6 K)
20 v (ΔT = -5.4 K)
30 v (ΔT = -5.9 K)
40 v (ΔT = -6.2 K)
50 v (ΔT = -6.5 K)
r = 19 m
z = -300 m
r = 40 m
z = -884 m
λ = 3.10 W/m·K
10 v (ΔT = -4.7 K)
20 v (ΔT = -5.6 K)
30 v (ΔT = -6.1 K)
40 v (ΔT = -6.4 K)
50 v (ΔT = -6.7 K)
r = 19 m
z = -300 m
r = 40 m
z = -895 m
λ = 2.66 W/m·K
10 v (ΔT = -5.0 K)
20 v (ΔT = -6.0 K)
30 v (ΔT = -6.6 K)
40 v (ΔT = -7.0 K)
50 v (ΔT = -7.3 K)
r = 20 m
z = -300 m
r = 41 m
z = -890 m
Syvyys [m]
Lämpötilan lasku [K]
Etäisyys kaivosta [m]
Rintaman etäisyys kaivosta [m]
Aika lämmönoton aloittamisesta [v]

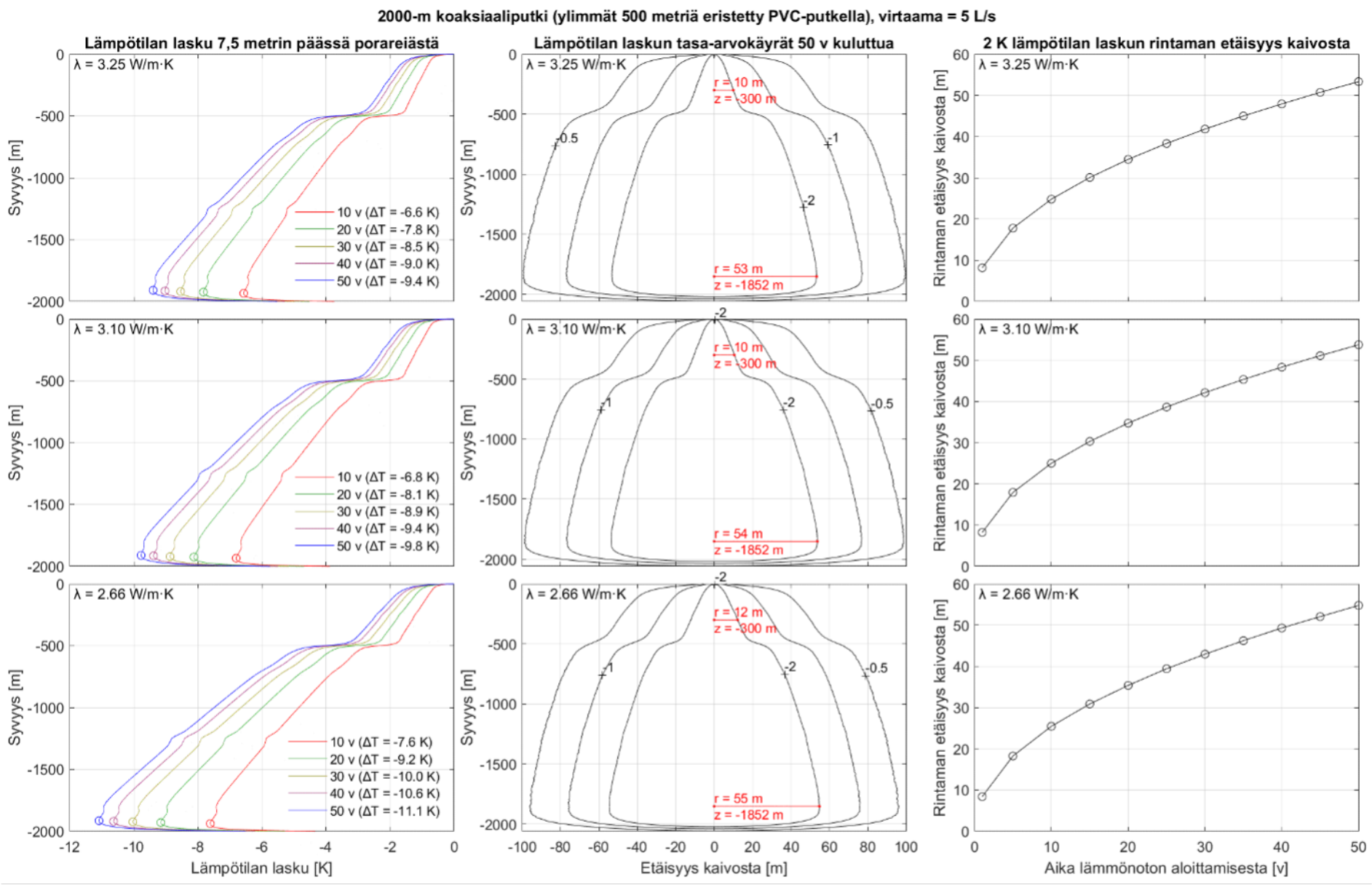

1000-m koaksiaaliputki (ylimmät 500 metriä eristetty PVC-putkella), virtaama = 10 L/s
Lämpötilan lasku 7,5 metrin päässä porareiästä
Lämpötilan laskun tasa-arvokäyrät 50 v kuluttua
2 K lämpötilan laskun rintaman etäisyys kaivosta
λ = 3.25 W/m·K
10 v (ΔT = -4.6 K)
20 v (ΔT = -5.5 K)
30 v (ΔT = -5.9 K)
40 v (ΔT = -6.3 K)
50 v (ΔT = -6.5 K)
r = 11 m
z = -300 m
r = 40 m
z = -884 m
λ = 3.10 W/m·K
10 v (ΔT = -4.7 K)
20 v (ΔT = -5.6 K)
30 v (ΔT = -6.1 K)
40 v (ΔT = -6.4 K)
50 v (ΔT = -6.7 K)
r = 11 m
z = -300 m
r = 41 m
z = -895 m
λ = 2.66 W/m·K
10 v (ΔT = -5.0 K)
20 v (ΔT = -6.1 K)
30 v (ΔT = -6.6 K)
40 v (ΔT = -7.0 K)
50 v (ΔT = -7.3 K)
r = 13 m
z = -300 m
r = 41 m
z = -890 m
Syvyys [m]
Lämpötilan lasku [K]
Etäisyys kaivosta [m]
Rintaman etäisyys kaivosta [m]
Aika lämmönoton aloittamisesta [v]

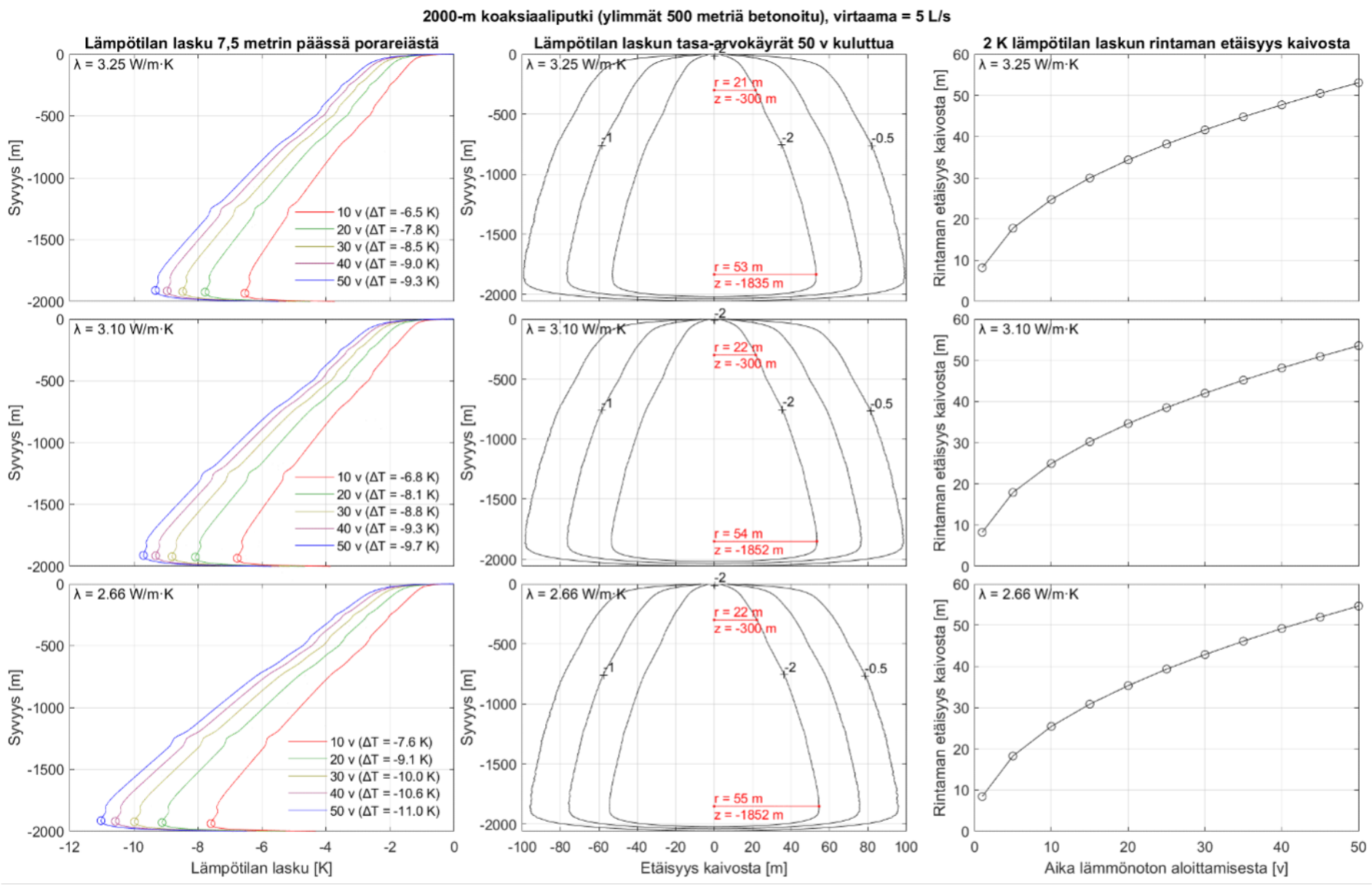

1000-m koaksiaaliputki (ylimmät 500 metriä betonoitu), virtaama = 10 L/s
Lämpötilan lasku 7,5 metrin päässä porareiästä
Lämpötilan laskun tasa-arvokäyrät 50 v kuluttua
2 K lämpötilan laskun rintaman etäisyys kaivosta
λ = 3.25 W/m·K
λ = 3.10 W/m·K
λ = 2.66 W/m·K
10 v (ΔT = -4.5 K)
20 v (ΔT = -5.4 K)
30 v (ΔT = -5.9 K)
40 v (ΔT = -6.2 K)
50 v (ΔT = -6.5 K)
10 v (ΔT = -4.6 K)
20 v (ΔT = -5.5 K)
30 v (ΔT = -6.0 K)
40 v (ΔT = -6.4 K)
50 v (ΔT = -6.6 K)
10 v (ΔT = -5.0 K)
20 v (ΔT = -6.0 K)
30 v (ΔT = -6.6 K)
40 v (ΔT = -7.0 K)
50 v (ΔT = -7.3 K)
r = 23 m
z = -300 m
r = 40 m
z = -884 m
r = 40 m
z = -895 m
r = 41 m
z = -890 m
0.5
2
1
Syvyys [m]
Lämpötilan lasku [K]
Etäisyys kaivosta [m]
Rintaman etäisyys kaivosta [m]
Aika lämmönoton aloittamisesta [v]

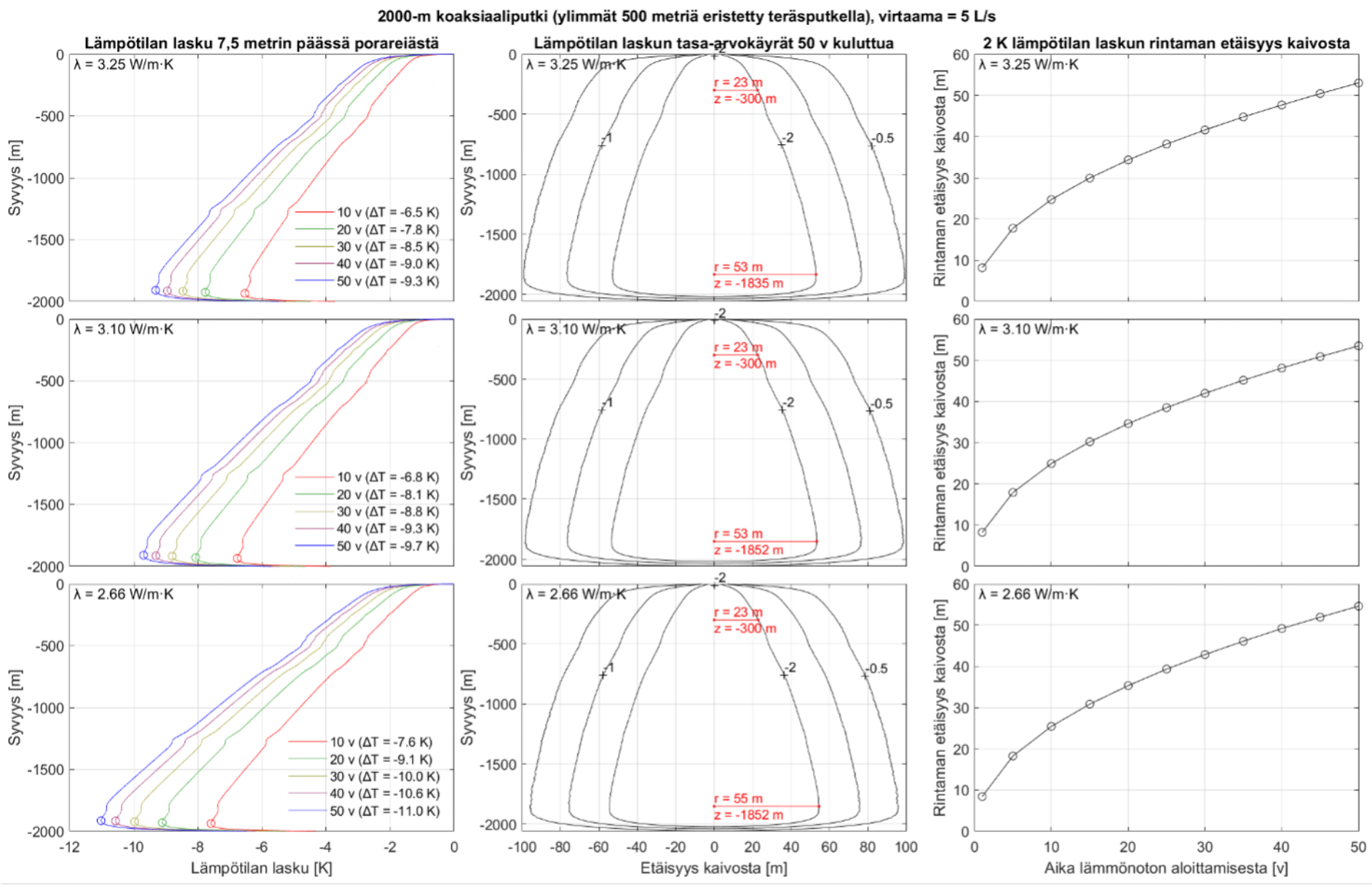

1000-m koaksiaaliputki (ylimmät 500 metriä eristetty teräsputkella), virtaama = 10 L/s
Lämpötilan lasku 7,5 metrin päässä porareiästä
Lämpötilan laskun tasa-arvokäyrät 50 v kuluttua
2 K lämpötilan laskun rintaman etäisyys kaivosta
λ = 3.25 W/m·K
10 v (ΔT = -4.5 K)
20 v (ΔT = -5.4 K)
30 v (ΔT = -5.9 K)
40 v (ΔT = -6.2 K)
50 v (ΔT = -6.5 K)
r = 24 m
z = -300 m
r = 40 m
z = -884 m
λ = 3.10 W/m·K
10 v (ΔT = -4.6 K)
20 v (ΔT = -5.5 K)
30 v (ΔT = -6.0 K)
40 v (ΔT = -6.4 K)
50 v (ΔT = -6.6 K)
r = 40 m
z = -895 m
λ = 2.66 W/m·K
10 v (ΔT = -5.0 K)
20 v (ΔT = -6.0 K)
30 v (ΔT = -6.6 K)
40 v (ΔT = -7.0 K)
50 v (ΔT = -7.3 K)
r = 41 m
z = -890 m
Syvyys [m]
Lämpötilan lasku [K]
Etäisyys kaivosta [m]
Rintaman etäisyys kaivosta [m]
Aika lämmönoton aloittamisesta [v]

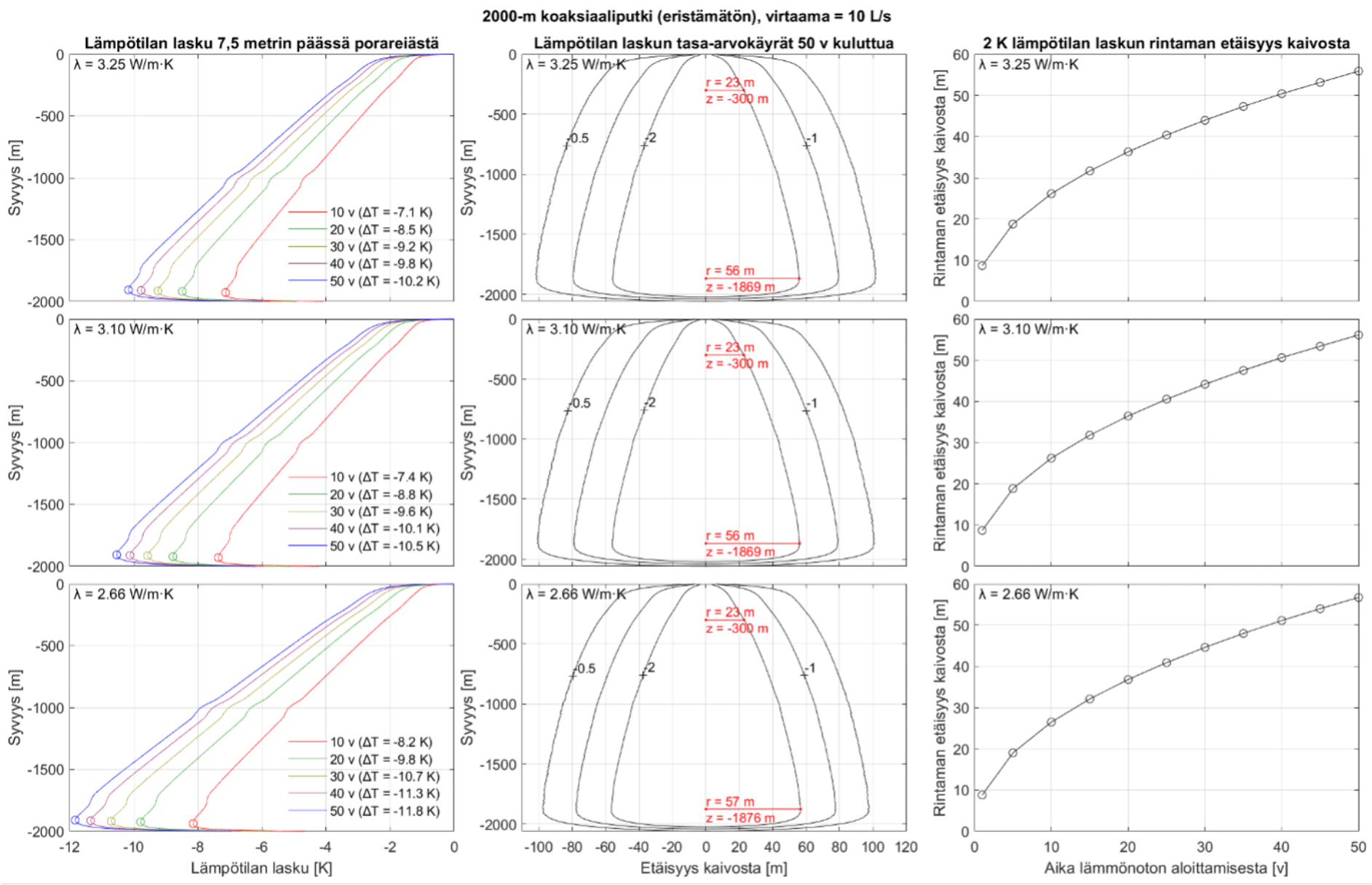

2000-m koaksiaaliputki (eristämätön), virtaama = 5 L/s
Lämpötilan lasku 7,5 metrin päässä porareiästä
Lämpötilan laskun tasa-arvokäyrät 50 v kuluttua
2 K lämpötilan laskun rintaman etäisyys kaivosta
λ = 3.25 W/m·K
10 v (ΔT = -6.5 K)
20 v (ΔT = -7.7 K)
30 v (ΔT = -8.5 K)
40 v (ΔT = -8.9 K)
50 v (ΔT = -9.3 K)
r = 22 m
z = -300 m
r = 53 m
z = -1852 m
λ = 3.10 W/m·K
10 v (ΔT = -6.7 K)
20 v (ΔT = -8.0 K)
30 v (ΔT = -8.8 K)
40 v (ΔT = -9.3 K)
50 v (ΔT = -9.7 K)
λ = 2.66 W/m·K
10 v (ΔT = -7.5 K)
20 v (ΔT = -9.1 K)
30 v (ΔT = -10.0 K)
40 v (ΔT = -10.6 K)
50 v (ΔT = -11.0 K)
r = 23 m
z = -300 m
r = 54 m
z = -1890 m
Syvyys [m]
Lämpötilan lasku [K]
Etäisyys kaivosta [m]
Rintaman etäisyys kaivosta [m]
Aika lämmönoton aloittamisesta [v]

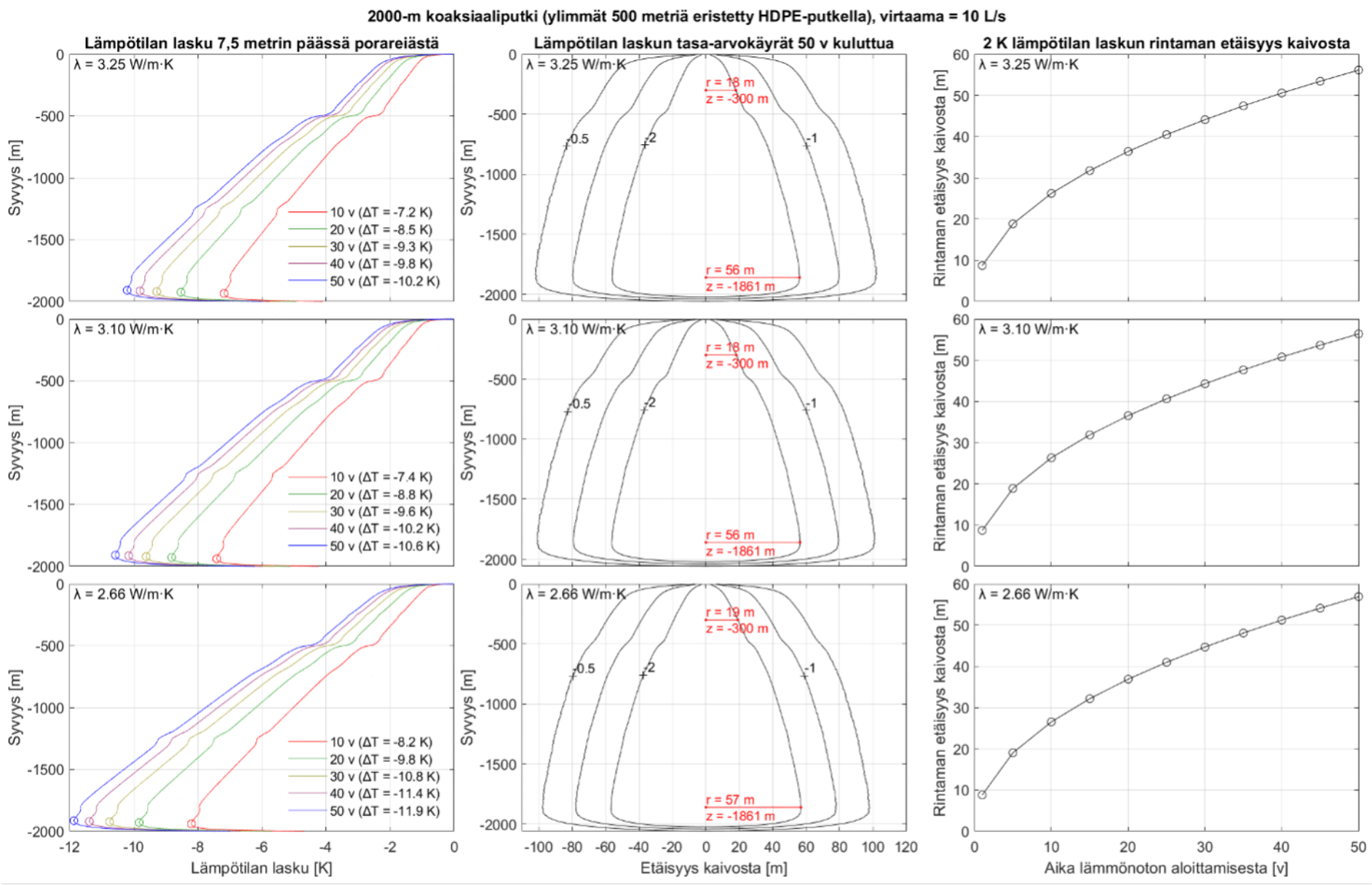

2000-m koaksiaaliputki (ylimmät 500 metriä eristetty HDPE-putkella), virtaama = 5 L/s
Lämpötilan lasku 7,5 metrin päässä porareiästä
Lämpötilan laskun tasa-arvokäyrät 50 v kuluttua
2 K lämpötilan laskun rintaman etäisyys kaivosta
λ = 3.25 W/m·K
10 v (ΔT = -6.5 K)
20 v (ΔT = -7.8 K)
30 v (ΔT = -8.5 K)
40 v (ΔT = -9.0 K)
50 v (ΔT = -9.4 K)
r = 18 m
z = -300 m
r = 53 m
z = -1852 m
λ = 3.10 W/m·K
10 v (ΔT = -6.8 K)
20 v (ΔT = -8.1 K)
30 v (ΔT = -8.8 K)
40 v (ΔT = -9.3 K)
50 v (ΔT = -9.7 K)
r = 18 m
z = -300 m
r = 54 m
z = -1852 m
λ = 2.66 W/m·K
10 v (ΔT = -7.6 K)
20 v (ΔT = -9.1 K)
30 v (ΔT = -10.0 K)
40 v (ΔT = -10.6 K)
50 v (ΔT = -11.1 K)
r = 19 m
z = -300 m
r = 55 m
z = -1852 m
Syvyys [m]
Lämpötilan lasku [K]
Etäisyys kaivosta [m]
Rintaman etäisyys kaivosta [m]
Aika lämmönoton aloittamisesta [v]

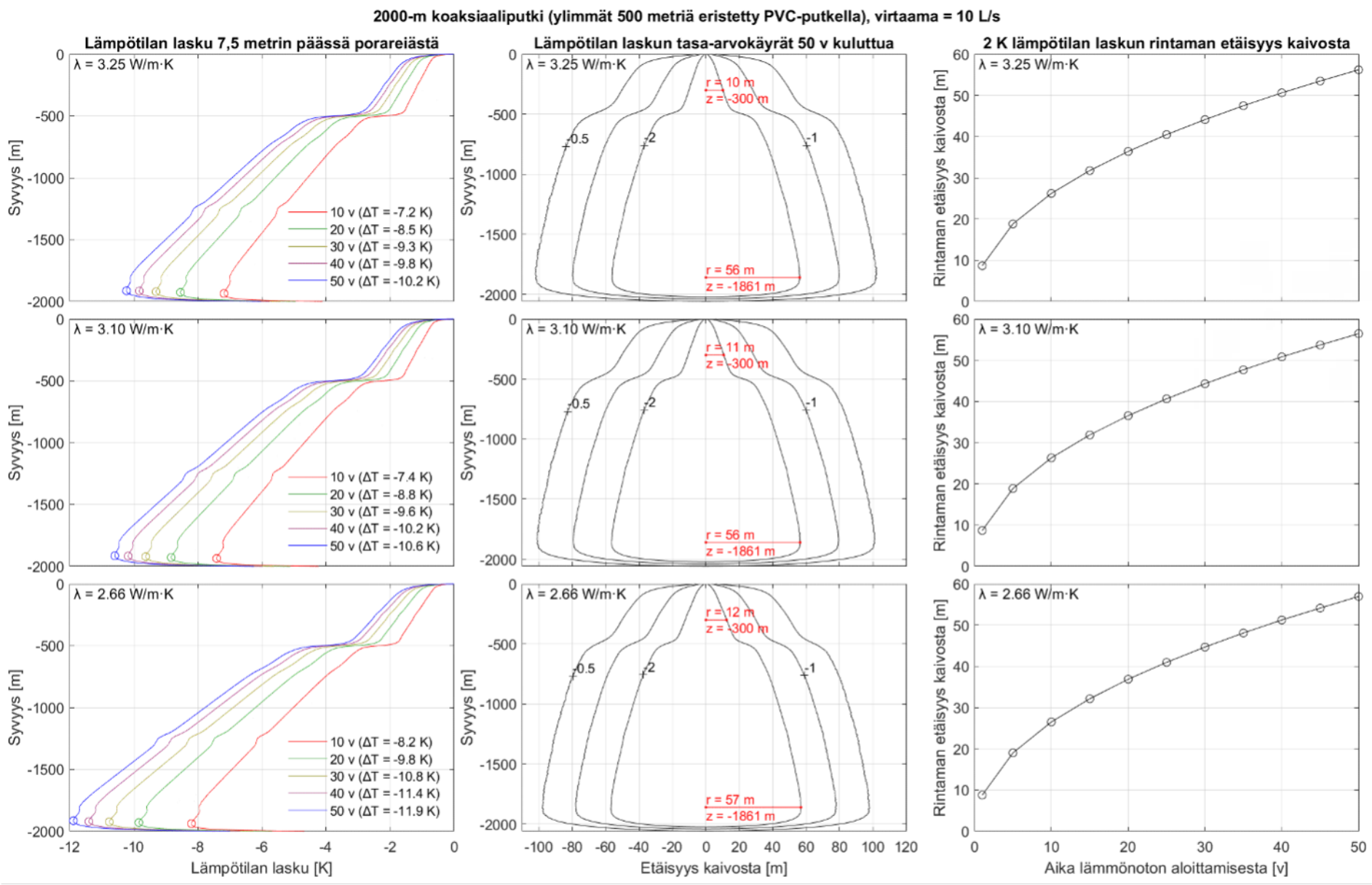

2000-m koaksiaaliputki (ylimmät 500 metriä eristetty PVC-putkella), virtaama = 5 L/s
Lämpötilan lasku 7,5 metrin päässä porareiästä
Lämpötilan laskun tasa-arvokäyrät 50 v kuluttua
2 K lämpötilan laskun rintaman etäisyys kaivosta
λ = 3.25 W/m·K
10 v (ΔT = -6.6 K)
20 v (ΔT = -7.8 K)
30 v (ΔT = -8.5 K)
40 v (ΔT = -9.0 K)
50 v (ΔT = -9.4 K)
r = 10 m
z = -300 m
r = 53 m
z = -1852 m
λ = 3.10 W/m·K
10 v (ΔT = -6.8 K)
20 v (ΔT = -8.1 K)
30 v (ΔT = -8.9 K)
40 v (ΔT = -9.4 K)
50 v (ΔT = -9.8 K)
r = 10 m
z = -300 m
r = 54 m
z = -1852 m
λ = 2.66 W/m·K
10 v (ΔT = -7.6 K)
20 v (ΔT = -9.2 K)
30 v (ΔT = -10.0 K)
40 v (ΔT = -10.6 K)
50 v (ΔT = -11.1 K)
r = 12 m
z = -300 m
r = 55 m
z = -1852 m
Syvyys [m]
Lämpötilan lasku [K]
Etäisyys kaivosta [m]
Rintaman etäisyys kaivosta [m]
Aika lämmönoton aloittamisesta [v]

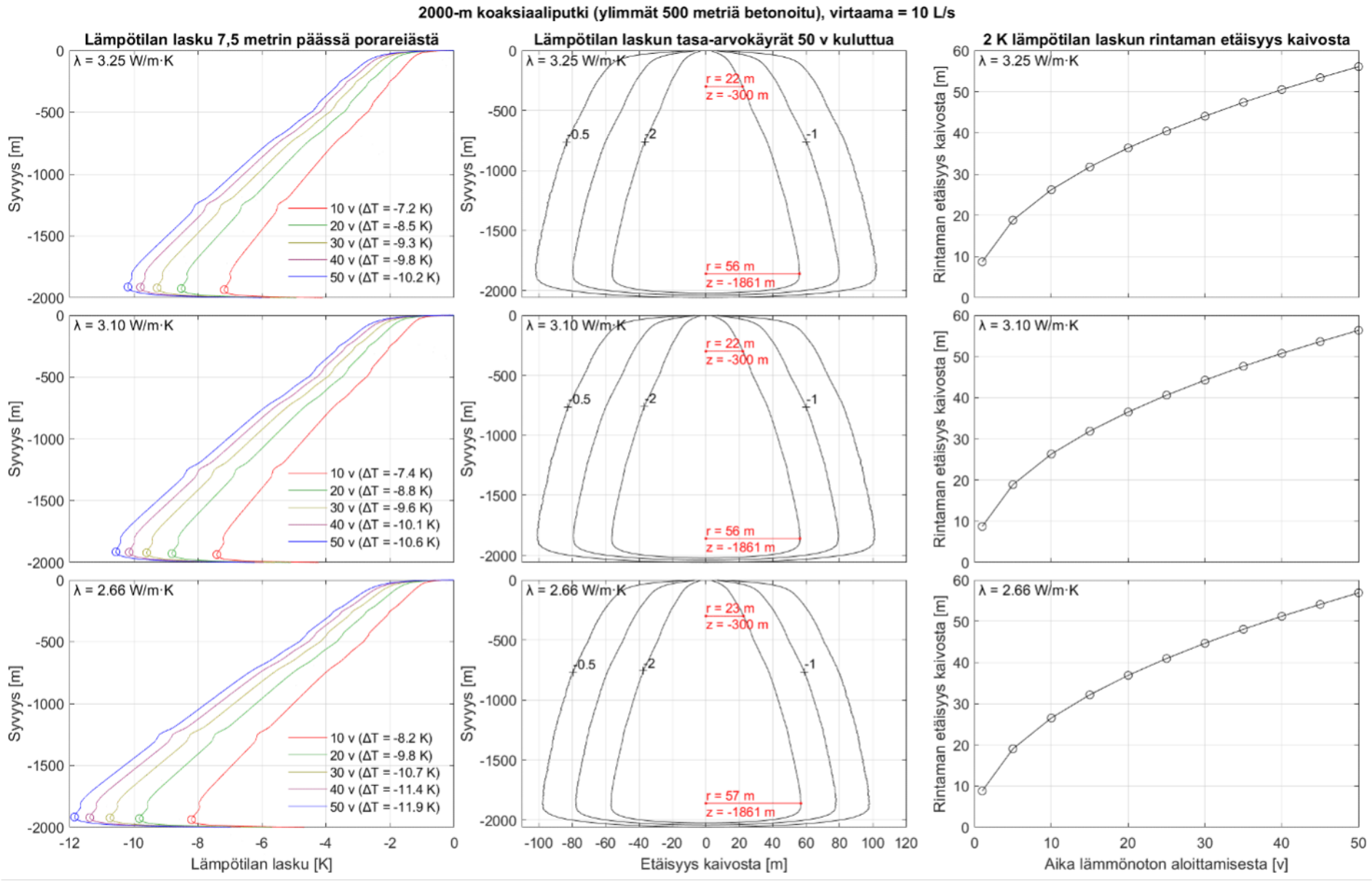

2000-m koaksiaaliputki (ylimmät 500 metriä betonoitu), virtaama = 5 L/s
Lämpötilan lasku 7,5 metrin päässä porareiästä
Lämpötilan laskun tasa-arvokäyrät 50 v kuluttua
2 K lämpötilan laskun rintaman etäisyys kaivosta
λ = 3.25 W/m·K
10 v (ΔT = -6.5 K)
20 v (ΔT = -7.8 K)
30 v (ΔT = -8.5 K)
40 v (ΔT = -9.0 K)
50 v (ΔT = -9.3 K)
r = 21 m
z = -300 m
r = 53 m
z = -1835 m
λ = 3.10 W/m·K
10 v (ΔT = -6.8 K)
20 v (ΔT = -8.1 K)
30 v (ΔT = -8.8 K)
40 v (ΔT = -9.3 K)
50 v (ΔT = -9.7 K)
r = 22 m
z = -300 m
r = 54 m
z = -1852 m
λ = 2.66 W/m·K
10 v (ΔT = -7.6 K)
20 v (ΔT = -9.1 K)
30 v (ΔT = -10.0 K)
40 v (ΔT = -10.6 K)
50 v (ΔT = -11.0 K)
r = 22 m
z = -300 m
r = 55 m
z = -1852 m
Syvyys [m]
Lämpötilan lasku [K]
Etäisyys kaivosta [m]
Rintaman etäisyys kaivosta [m]
Aika lämmönoton aloittamisesta [v]

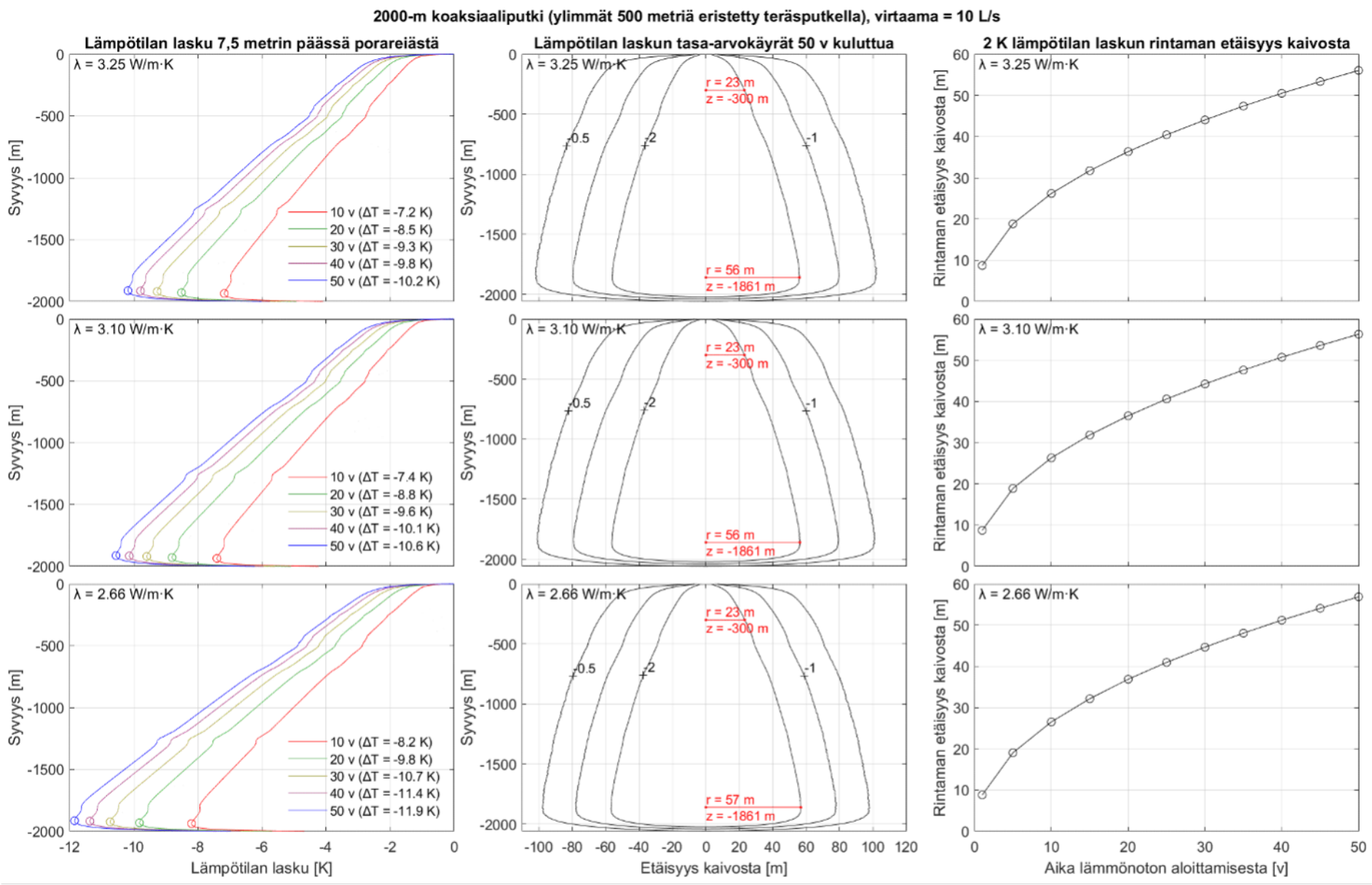

2000-m koaksiaaliputki (ylimmät 500 metriä eristetty teräsputkella), virtaama = 5 L/s
Lämpötilan lasku 7,5 metrin päässä porareiästä
Lämpötilan laskun tasa-arvokäyrät 50 v kuluttua
2 K lämpötilan laskun rintaman etäisyys kaivosta
λ = 3.25 W/m·K
10 v (ΔT = -6.5 K)
20 v (ΔT = -7.8 K)
30 v (ΔT = -8.5 K)
40 v (ΔT = -9.0 K)
50 v (ΔT = -9.3 K)
r = 23 m
z = -300 m
r = 53 m
z = -1835 m
λ = 3.10 W/m·K
10 v (ΔT = -6.8 K)
20 v (ΔT = -8.1 K)
30 v (ΔT = -8.8 K)
40 v (ΔT = -9.3 K)
50 v (ΔT = -9.7 K)
r = 53 m
z = -1852 m
λ = 2.66 W/m·K
10 v (ΔT = -7.6 K)
20 v (ΔT = -9.1 K)
30 v (ΔT = -10.0 K)
40 v (ΔT = -10.6 K)
50 v (ΔT = -11.0 K)
r = 55 m
z = -1852 m
Syvyys [m]
Rintaman etäisyys kaivosta [m]
Lämpötilan lasku [K]
Etäisyys kaivosta [m]
Aika lämmönoton aloittamisesta [v]


2000-m koaksiaaliputki (eristämätön), virtaama = 10 L/s
Lämpötilan lasku 7,5 metrin päässä porareiästä
Lämpötilan laskun tasa-arvokäyrät 50 v kuluttua
2 K lämpötilan laskun rintaman etäisyys kaivosta
λ = 3.25 W/m·K
10 v (ΔT = -7.1 K)
20 v (ΔT = -8.5 K)
30 v (ΔT = -9.2 K)
40 v (ΔT = -9.8 K)
50 v (ΔT = -10.2 K)
λ = 3.10 W/m·K
10 v (ΔT = -7.4 K)
20 v (ΔT = -8.8 K)
30 v (ΔT = -9.6 K)
40 v (ΔT = -10.1 K)
50 v (ΔT = -10.5 K)
λ = 2.66 W/m·K
10 v (ΔT = -8.2 K)
20 v (ΔT = -9.8 K)
30 v (ΔT = -10.7 K)
40 v (ΔT = -11.3 K)
50 v (ΔT = -11.8 K)
r = 23 m
z = -300 m
r = 56 m
z = -1869 m
r = 57 m
z = -1876 m
0.5
2
1
Syvyys [m]
Lämpötilan lasku [K]
Etäisyys kaivosta [m]
Rintaman etäisyys kaivosta [m]
Aika lämmönoton aloittamisesta [v]


2000-m koaksiaaliputki (ylimmät 500 metriä eristetty HDPE-putkella), virtaama = 10 L/s
Lämpötilan lasku 7,5 metrin päässä porareiästä
Lämpötilan laskun tasa-arvokäyrät 50 v kuluttua
2 K lämpötilan laskun rintaman etäisyys kaivosta
λ = 3.25 W/m·K
λ = 3.10 W/m·K
λ = 2.66 W/m·K
10 v (ΔT = -7.2 K)
20 v (ΔT = -8.5 K)
30 v (ΔT = -9.3 K)
40 v (ΔT = -9.8 K)
50 v (ΔT = -10.2 K)
10 v (ΔT = -7.4 K)
20 v (ΔT = -8.8 K)
30 v (ΔT = -9.6 K)
40 v (ΔT = -10.2 K)
50 v (ΔT = -10.6 K)
10 v (ΔT = -8.2 K)
20 v (ΔT = -9.8 K)
30 v (ΔT = -10.8 K)
40 v (ΔT = -11.4 K)
50 v (ΔT = -11.9 K)
r = 18 m
z = -300 m
r = 56 m
z = -1861 m
r = 19 m
z = -300 m
r = 57 m
z = -1861 m
0.5
2
1
Syvyys [m]
Lämpötilan lasku [K]
Etäisyys kaivosta [m]
Rintaman etäisyys kaivosta [m]
Aika lämmönoton aloittamisesta [v]


2000-m koaksiaaliputki (ylimmät 500 metriä eristetty PVC-putkella), virtaama = 10 L/s
Lämpötilan lasku 7,5 metrin päässä porareiästä
Lämpötilan laskun tasa-arvokäyrät 50 v kuluttua
2 K lämpötilan laskun rintaman etäisyys kaivosta
λ = 3.25 W/m·K
10 v (ΔT = -7.2 K)
20 v (ΔT = -8.5 K)
30 v (ΔT = -9.3 K)
40 v (ΔT = -9.8 K)
50 v (ΔT = -10.2 K)
r = 10 m
z = -300 m
r = 56 m
z = -1861 m
λ = 3.10 W/m·K
10 v (ΔT = -7.4 K)
20 v (ΔT = -8.8 K)
30 v (ΔT = -9.6 K)
40 v (ΔT = -10.2 K)
50 v (ΔT = -10.6 K)
r = 11 m
z = -300 m
r = 56 m
z = -1861 m
λ = 2.66 W/m·K
10 v (ΔT = -8.2 K)
20 v (ΔT = -9.8 K)
30 v (ΔT = -10.8 K)
40 v (ΔT = -11.4 K)
50 v (ΔT = -11.9 K)
r = 12 m
z = -300 m
r = 57 m
z = -1861 m
Syvyys [m]
Lämpötilan lasku [K]
Etäisyys kaivosta [m]
Rintaman etäisyys kaivosta [m]
Aika lämmönoton aloittamisesta [v]


2000-m koaksiaaliputki (ylimmät 500 metriä betonoitu), virtaama = 10 L/s
Lämpötilan lasku 7,5 metrin päässä porareiästä
Lämpötilan laskun tasa-arvokäyrät 50 v kuluttua
2 K lämpötilan laskun rintaman etäisyys kaivosta
λ = 3.25 W/m·K
10 v (ΔT = -7.2 K)
20 v (ΔT = -8.5 K)
30 v (ΔT = -9.3 K)
40 v (ΔT = -9.8 K)
50 v (ΔT = -10.2 K)
r = 22 m
z = -300 m
r = 56 m
z = -1861 m
λ = 3.10 W/m·K
10 v (ΔT = -7.4 K)
20 v (ΔT = -8.8 K)
30 v (ΔT = -9.6 K)
40 v (ΔT = -10.1 K)
50 v (ΔT = -10.6 K)
λ = 2.66 W/m·K
10 v (ΔT = -8.2 K)
20 v (ΔT = -9.8 K)
30 v (ΔT = -10.7 K)
40 v (ΔT = -11.4 K)
50 v (ΔT = -11.9 K)
r = 23 m
z = -300 m
r = 57 m
z = -1861 m
Syvyys [m]
Lämpötilan lasku [K]
Etäisyys kaivosta [m]
Rintaman etäisyys kaivosta [m]
Aika lämmönoton aloittamisesta [v]


2000-m koaksiaaliputki (ylimmät 500 metriä eristetty teräsputkella), virtaama = 10 L/s
Lämpötilan lasku 7,5 metrin päässä porareiästä
Lämpötilan laskun tasa-arvokäyrät 50 v kuluttua
2 K lämpötilan laskun rintaman etäisyys kaivosta
λ = 3.25 W/m·K
λ = 3.10 W/m·K
λ = 2.66 W/m·K
10 v (ΔT = -7.2 K)
20 v (ΔT = -8.5 K)
30 v (ΔT = -9.3 K)
40 v (ΔT = -9.8 K)
50 v (ΔT = -10.2 K)
10 v (ΔT = -7.4 K)
20 v (ΔT = -8.8 K)
30 v (ΔT = -9.6 K)
40 v (ΔT = -10.1 K)
50 v (ΔT = -10.6 K)
10 v (ΔT = -8.2 K)
20 v (ΔT = -9.8 K)
30 v (ΔT = -10.7 K)
40 v (ΔT = -11.4 K)
50 v (ΔT = -11.9 K)
r = 23 m
z = -300 m
r = 56 m
z = -1861 m
r = 57 m
z = -1861 m
0.5
2
1
Syvyys [m]
Lämpötilan lasku [K]
Etäisyys kaivosta [m]
Rintaman etäisyys kaivosta [m]
Aika lämmönoton aloittamisesta [v]

Liite 2

Taulukosta 4 nähdään, että 500 metriä syvien U-putkikaivojen aiheuttamat lämpötilan pudotukset 7,5 metrin päässä kaivoista ovat 50 vuoden päästä 2,3–2,6 astetta ja 1000 metriä syvien vastaavasti 3,1–3,8 astetta. Kun etsitään sellaiset vuotuiset lämmönotot, joilla 500 ja 1000 metriä syvien U-putkikaivojen aiheuttamat lämpötilan pudotukset 50 vuoden päästä eivät ylitä kahta astetta, saadaan taulukon 9 tulokset.

Taulukko 9. **Vuotuiset lämmönotot, joilla 500 ja 1000 metriä syvien U-putkikaivojen aiheuttamat lämpötilan pudotukset 7,5 metrin päässä kaivosta eivät ylitä kahta astetta. Suluissa esitetyt prosenttiluvut kertovat kuinka monta prosenttia rajoitettu lämmönotto on taulukossa 4 esitetystä maksimaalisesta lämmönotosta.**

			Lämpötilan pudotus [K]				
Kaivotapaus	Lämmönjohtavuus [W/m·K]	Lämmönotto [MWh/v]	10 v	20 v	30 v	40 v	50 v
500-m U-putki	2,66	42,4 (67 %)	−1,4	−1,7	−1,8	−1,9	−2,0
500-m U-putki	3,10	53,5 (80 %)	−1,4	−1,7	−1,8	−1,9	−2,0
500-m U-putki	3,25	57,2 (84 %)	−1,4	−1,7	−1,8	−1,9	−2,0
1000-m U-putki	2,66	15,1 (10 %)	−1,5	−1,7	−1,9	−1,9	−2,0
1000-m U-putki	3,10	41,4 (28 %)	−1,5	−1,7	−1,9	−1,9	−2,0
1000-m U-putki	3,25	50,2 (34 %)	−1,5	−1,7	−1,9	−1,9	−2,0

Helsinki