



**STÖDDOKUMENT – FÖRKLARINGAR OCH KOMMENTARER TILL
RIKTLINJER FÖR TERMISK RESPONSTEST (TRT)**

**Svenskt Geoenergicentrum
2015**

FÖRORD

Detta dokument är ett stöddokument med förklaringar och kommentarer till Svenskt Geocentrum riktlinjer för utrustning, utförande, analys och redovisning av Termisk Responstest (TRT) för energibrunnar. Riktlinjerna är uppdelade i två delar:
DEL 1: Riktlinjer för utförande av Termisk Responstest (TRT)
DEL 2: Riktlinjer för analys av data från Termisk Responstest (TRT)

Riktlinjerna kompletteras av följande sidodokument:

- **BILAGA 1 -Förklaringar och kommentarer till Riktlinjer för Termisk Responstest (TRT)**
- BILAGA 2 - Riktlinjer för testborrhål för Termisk Responstest (TRT)
- BILAGA 3 - Mall för redovisning av Termisk Responstest – Utförande
- BILAGA 4 - Mall för redovisning av Termisk Responstest – Analys

Projektet har finansierats av Svenskt Geocentrum och dess intressenter och stödjande företag, Geotec, samt frivilliga arbetsinsatser från branschens aktörer.

Signhild Gehlin
Stockholm 2015-11-13

NOTER DEL 1: RIKTLINJER FÖR UTFÖRANDE AV TERMISK RESPONSTEST (TRT)

1.2.1 Mätintervall

Not D1:2.1.1

Vid ett termiskt responstest är det viktigt att mäta hur mycket energi som tillförs till borrhålets köldbärarkrets. Energi kan exempelvis mätas med en energimängdsmätare där tillförd medeleffekt erhålls genom dividera tillförd energimängd under ett tidsintervall med tidsintervallets varaktighet. Temperaturen mäts (samplas) med en viss frekvens och lagras som ett medelvärde under samma tidsintervall som effektmätningen.

1.2.2 Värme-/kyllast

Not D1:2.2.1

Riktlinjerna rekommenderar en effektlast motsvarande 20-80 W/m borrhål. Detta motsvarar alltså 2-8 kW för ett 100 m djupt borrhål, och är det effektintervall som de flesta geoenergianläggningar belastas med. Den effektiva värmeledningen och det effektiva borrhålmotståndet varierar något med lasten på grund av ändringar i konvektionskoefficienter med varierande temperaturgradienter.

Genom att effekten under TRT är i samma storleksordning som i den tänkta driften, kommer förhållandena under testet att spegla de under drift vilket ger tillförlitliga testresultat. Om lastvariationerna under den tänkta driften förväntas variera mycket kan det vara relevant att göra en längre TRT-mätning där flera effektlaster används. Javed, Spitler och Fahlén (2011) beskriver väl betydelsen av att utföra TRT med samma effektlast som den tänkta driften.

ASHRAE (2001) analyserade effekten av variationer i effektlast och rekommenderar utifrån det att standardavvikelsen från medelvärdet av effektlasten uppgår till högst 1.5% och att maximala variationen för eventuell spikar inte är större än 10% av medeleffekten.

Referenser:

- Javed, S, Spitler, J, Fahlén, P, 2011. An experimental investigation of the accuracy of thermal response tests used to measure ground thermal properties. ASHRAE Transactions, vol. 117(1), pp. 13-21.
- ASHRAE, 2001. ASHRAE 1118-TRP. Investigation of Methods for Determining Soil and Rock Formation Thermal Properties from Short-Term Field Tests.

Not D1:2.2.2

De flesta TRT-utrustningar är försedda med en elektrisk genomströmningsberedare, men det finns även utrustningar med både värme och kyla.

Exempel på utrustningar med endast värme:

- Austin, W.A. 1998. *Development of an in-situ system for measuring ground thermal properties*. Master's thesis. Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma. (Se sid 20-44).

- Gehlin, S. 1998. *Thermal Response Test – In-situ measurements of thermal properties in hard rock*. Licentiate thesis 1998:37. Luleå University of Technology, Sweden. (Tillgänglig via <http://epubl.luth.se/1402-1757/1998/37/LTU-LIC-9837-SE.pdf>). (Se sid 7-8).

Utrustning med endast kyla:

- Mogensen, P. 1983. *Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storages*. Proceedings of the International Conference on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice. Swedish Council for Building Research, Stockholm. June 6-8.

Exempel på utrustningar med både värme och kyla:

- Witte H. J. L, A. J. van Gelder, J. D. Spitler. 2002. *In Situ Measurements of Ground Thermal Conductivity: The Dutch Perspective*. ASHRAE Transactions, 108(1):263-272.
- Gustafsson, A-M. 2006. *Thermal response test: numerical simulations and analyses*. Luleå: Licentiate thesis / Luleå University of Technology; Nr 2006:14. (Tillgänglig via <http://pure.ltu.se/portal/files/264826/LTU-LIC-0614-SE.pdf>) (Se sid 11-12)

1.2.3 Flöde och tryck

Not D1:2.3.1

Värmeöverföringen i en borrhålskollektor beror av flödet, där laminärt flöde ger betydligt sämre värmeöverföring från värmebärare till borrhålsvägg än turbulenta flödesförhållanden. Därför är det viktigt att hålla stabila och liknande flödesförhållanden under TRT-mätningen som under den tänkta driften, så att mätresultaten ger en rättvisande bild av markens respons.

Det kan vara av intresse att göra en längre mätning där del av mätningen utförs med ett lägre flöde för att utvärdera responsen vid olika driftfall.

De flesta kommersiella kollektorer förutsätter turbulent flöde i kollektorn men vid TRT-mätning på koaxiala kollektorer blir flödet laminärt. Det är viktigt att flödesförhållandena inte skiftar mellan laminärt och turbulent under pågående mätning. Eftersom köldbärarfluidens termohydrauliska egenskaper varierar med temperaturen kan ett sådant skifte orsakas av temperaturförändringar under pågående mätning.

- Spitler, J. D. S., S. Gehlin. 2015. Thermal response testing for ground source heat pump systems — An historical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 50 (2015) pp. 1125–1137.

Not D1:2.3.2

I dessa riktlinjer ställer vi inga krav på att mäta skillnad i tryck mellan inlopp och utlopp från borrhålet, eftersom detta inte i sig inverkar på mätningen och dess resultat. Vi har däremot valt att rekommendera att man har möjlighet att mäta detta vid TRT, eftersom det är en värdefull upplysning om borrhålskollektorn och dess funktion.

1.2.4 Temperaturmätning

Not D1:2.4.1

Temperaturmätningen av fluidens in- och utloppstemperatur ska göras så nära borrhålet som möjligt för att minimera påverkan från omgivning och TRT-utrustning. Kravet på uteluftsmätare ställs för att det ska vara möjligt att kvalitetssäkra att mätningen inte påverkats av variationer i omgivningstemperatur, och om så ändå är fallet ska man med hjälp av omgivningstemperaturmätningen kunna beräkna inverkan av detta och ta hänsyn vid detta i analysen av data.

Temperaturmätning i borrhålet kan även ske med andra metoder än temperaturgivare vid in- och utlopp. Genom att montera en optisk fiber i eller utanpå kollektorslangen kan temperaturen mätas kontinuerligt utmed hela borrhålsdjupet. Kraven på temperaturmätningens prestanda ska vara samma som för temperaturgivare vid in- och utlopp. Se till exempel Acuña (2013).

ASHRAE (2001) rekommenderar maximal variation från medelvärdet på 0.3°C för temperaturmätning.

Exempel på referenser som tar upp temperaturmätning för TRT:

- Acuña, J. 2013. Distributed thermal response tests – New insights on U-pipe and Coaxial heat exchangers in groundwater-filled boreholes. Doctoral thesis. KTH, Energiteknik.
- ASHRAE, 2001. ASHRAE 1118-TRP. Investigation of Methods for Determining Soil and Rock Formation Thermal Properties from Short-Term Field Tests.
- Beier, R. A. 2011. Vertical temperature profile in ground heat exchanger during in-situ test. *Renewable Energy* 2011; 36:1578–87.
- Marcotte, D., P. Pasquier. 2008. On the estimation of thermal resistance in borehole thermal conductivity test. *Renewable Energy* 2008; 33:2407–15.

1.2.5 Isolering

Not D1:2.5.1

God isolering och strålningsavskärmning av utrustningen är mycket viktig för att minimera påverkan från omgivningens temperatur, vindpåverkan och instrålning/avstrålning.

Exempel på referenser som tar upp betydelsen av god isolering:

- Sanner, B., G. Hellström, J. Spitler, S. Gehlin. 2005. Thermal Response Test – Current Status and World-Wide Application. Proceedings of World Geothermal Congress 2005. Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.
- Spitler, J. D. S., S. Gehlin. 2015. Thermal response testing for ground source heat pump systems — An historical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 50 (2015) pp. 1125–1137.

1.3.1 Tid efter borrning

Not D1:3.1.1

I ASHRAE (2001) rekommenderas en vilotid av minst tre dygn efter borrning för mark med hög konduktivitet och minst fem dygn för mark med låg konduktivitet. Noteras bör att denna amerikanska rekommendation som bygger på temperaturmätningar i borrhål efter borrning, utgår ifrån återfyllda borrhål, som även är betydligt grundare än våra svenska borrhål.

Vid användning av cementbaserade återfyllnadsmaterial sker en viss värmeavgivning i samband med härdningsprocessen. Värmeavgivnings storlek och varaktighet beror på vilken typ av cement som används. Sådana fyllnadsmaterial kan därför kräva en längre vilotid.

- ASHRAE, 2001. ASHRAE 1118-TRP. Investigation of Methods for Determining Soil and Rock Formation Thermal Properties from Short-Term Field Tests.

1.3.2 Ostörd marktemperatur

Not D1:3.2.1

Den ostörda marktemperaturen är viktig både för bestämningen av borrhålet termiska motstånd och som designparameter för anläggningen. En noggrann bestämning av ostörd marktemperatur är därför nödvändig. Bestämning av borrhålstemperaturen genom tät temperaturloggning av den cirkulerande vätskan i kollektorn under det initiala skedet är en metod som är känslig för flera felkällor, såsom pumpeffekt, isolering av utrustning och kopplings slangar, mm, och bör därför kompletteras med loggning av borrhålet på flera djup. Temperaturloggning av hela borrhålsprofilen kan även ske med optisk fiber.

Exempel på referenser som tar upp temperaturmätning för TRT:

- Acuña, J. 2013. Distributed thermal response tests – New insights on U-pipe and Coaxial heat exchangers in groundwater-filled boreholes. Doctoral thesis. KTH, Energiteknik.
- ASHRAE, 2001. ASHRAE 1118-TRP. Investigation of Methods for Determining Soil and Rock Formation Thermal Properties from Short-Term Field Tests.
- Beier, R. A. 2011. Vertical temperature profile in ground heat exchanger during in-situ test. *Renewable Energy* 2011; 36:1578–87.
- Gehlin S.E.A., B. Nordell. 2003. Determining undisturbed ground temperature for thermal response test. *ASHRAE Trans* 2003; 109:151–6.
- Marcotte, D., P. Pasquier. 2008. On the estimation of thermal resistance in borehole thermal conductivity test. *Renewable Energy* 2008; 33:2407–15.
- Spitler, J. D. S., S. Gehlin. 2015. Thermal response testing for ground source heat pump systems — An historical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 50 (2015) pp. 1125–1137.

1.3.3 Borrhål och kollektor

Not D1:3.3.1

Värmeöverföringen i en borrhålskollektor beror av flödet, där laminärt flöde ger betydligt sämre värmeöverföring från värmebärare till borrhålsvägg än turbulenta flödesförhållanden. Därför är det viktigt att hålla stabila och liknande flödesförhållanden under TRT-mätningen som under den tänkta driften, så att mätresultaten ger en rättvisande bild av markens respons. Det innebär i sin tur att man bör ha samma geometri och material för borrhål och kollektor under responstest som man förväntas ha under drift.

- Spitler, J. D. S., S. Gehlin. 2015. Thermal response testing for ground source heat pump systems — An historical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 50 (2015) pp. 1125–1137.

1.3.4 Inkoppling

Not D1:3.4.1

Korta anslutningsslangar mellan TRT-utrustning och borrhålskollektor är viktigt av två skäl; det ena är för att minimera påverkan av omgivningens temperatur, vind och instrålning/avstrålning (se Not D1:2.4.1 och Not D1:2.5.1 samt Not D1:3.6.1), och det andra är för att underlätta avluftning. Om luftbubblor fångas i slangen och inte kan luftas av kommer temperaturstörningar att uppstå varje gång luftbubblorna passerar temperaturgivarna. Erfarenhet säger att man bör sträva efter att anslutningsslangarna inte behöver vara längre än ca 1.25 m för att minimera problem med avluftning och omgivningspåverkan.

1.3.5 Avluftning

Not D1:3.5.1

Vi rekommenderar att samma vätska som den som kollektorslangarna är fyllda med används för att fylla på TRT-utrustning och anslutningsslangar i samband med TRT-mätning. Skälet till detta är att den nypåfyllda vätskan kommer att cirkulera som ett pluggflöde med mycket begränsad omblandning under testet, och om en vätska med andra termiska egenskaper används för påfyllning kan detta ge utslag i temperaturmätningarna varje gång pluggflödet passerar temperaturgivarna, på likande vis som luftbubblor kan göra (se Not D1:3.4.1).

1.3.6 Isolering

Not D1:3.6.1

Såsom nämnts i Not D1:2.4.1 och Not D1:2.5.1 är det viktigt att uppmätt in- och utloppstemperatur är desamma som fluidens temperaturer vid borrhålets topp och att temperaturpåverkan från omgivning och utrustning elimineras. Oisolerade slangar påverkas av både omgivningstemperatur och instrålning/avstrålning, vilket måste undvikas.

1.3.7 Värme-/kyllast

Not D1:3.7.1

Se Not D1:2.2.1

1.3.8 Flöde

Not D1:3.8.1

Se Not D1:2.3.1

1.3.9 Mätparametrar

Not D1:3.9.1

Se Not D1.2.3.2

1.3.10 Testlängd

Not D1:3.10.1

Det finns flera undersökningar om hur lång mätning som behövs för att en TRT-mätning ska vara tillförlitlig. Baserat på dessa finns idag en konsensus att minst 50 timmars mätning behövs för att få tillförlitliga resultat. ASHRAE (2001) anger 36-48 timmars mätning som minimum, där den längre mättiden gäller för geologier med högre värmeledning, såsom kristallin berggrund. De första 12 timmarnas mätning kan inte användas för utvärderingen eftersom värmepulsen innan dess inte har nått tillräckligt långt från borrhålet för att markens egenskaper ska kunna utvärderas. De första 12 timmarnas mätning speglar främst värmeledningen i själva borrhålet.

Vid mätningar med flera effektsteg bör varje effektsteg mätas under minst 50 timmar. Utvärdering kan då inte göras med den enkla linjekällexapproximationen utan någon form av analys med parameterbestämning måste användas. Detta gäller även vid avbrott i mätningen.

Referenser om testlängd:

- Austin, W.A. 1998. *Development of an in-situ system for measuring ground thermal properties*. Master's thesis. Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma. (Se sid 20-44).
- Gehlin S. and G. Hellström. 2003. Comparison of four models for Thermal Response Test Evaluation. ASHRAE Transactions 2003, vol. 109 (1).
- Beier, R. A. and M. D. Smith. 2003. *Minimum Duration of in-Situ Tests on Vertical Boreholes*. ASHRAE Transactions. 109(2):475-486.
- Javed, S, Spitler, J, Fahlén, P, 2011. An experimental investigation of the accuracy of thermal response tests used to measure ground thermal properties. ASHRAE Transactions, vol. 117(1), pp. 13-21.
- ASHRAE, 2001. ASHRAE 1118-TRP. Investigation of Methods for Determining Soil and Rock Formation Thermal Properties from Short-Term Field Tests.

Referenser om TRT med flera effektsteg:

- Gustafsson, A. M. and L. Westerlund. 2010. *Multi-injection rate thermal response test in groundwater filled borehole heat exchanger*. *Renewable Energy* 35(5):1061-1070.
- Liebel, H. T., S. Javed and G. Vistnes. 2012. *Multi-injection rate thermal response test with forced convection in a groundwater-filled borehole in hard rock*. *Renewable Energy* 48(0):263-268.

1.3.11 Borrning i närheten

Not D1:3.11.1

Borrningen i närheten av mätborrhålet kan leda till störningar i grundvattenflödet om det finns någon form av hydraulisk kontakt mellan de två borrhålen. För grundvattenfyllda borrhål finns det risk för att grundvattnet rör sig vertikalt i borrhål mellan olika permeabla zoner, vilket innebär en ökad energitransport. Detta kan medföra kraftigt förhöjda värden på utvärderad effektiv värmeledningsförmåga. Det finns även exempel på att borrning i närheten medfört att en stor del av borrhålet tömts på vatten, vilket kraftigt minskat aktiv borrhålslängd.

I borrhål som återfyllts med tätande fyllnadsmaterial ses påverkan främst genom förhöjda grundvattenrörelser och ökad konvektiv energitransport i borrhålets närhet. Vid mindre påverkan resulterar detta i något förhöjd effektiv värmeledningsförmåga. Vid större påverkan blir resultaten mycket svåra att utvärdera och skapar en osäkerhet som kan göra testet obrukbart.

- Gehlin, S. 1998. *Thermal Response Test – In-situ measurements of thermal properties in hard rock*. Licentiate thesis 1998:37. Luleå University of Technology, Sweden. (Tillgänglig via <http://epubl.luth.se/1402-1757/1998/37/LTU-LIC-9837-SE.pdf>). (Se sid 7-8).
- H.J.L. Witte, Geothermal response test with heat extraction and heat injection: examples of application in research and design of geothermal heat exchangers, Workshop Lausanne, October 2001.

3.12 Upprepad mätning

Not D1:3.12.1

Vid upprepad mätning kan denna störas av att markens temperatur fortfarande är påverkad av tidigare mätning. Se figur i nedanstående exempel. Efter en mätning sjunker temperaturen tillbaka mot ostörd naturlig marktemperatur. Om en ny mätning startas tätt in på den föregående, så kan det vara nödvändigt att kompensera för den bakomliggande sänkningen av "ostörd" temperatur under mätningen.

ASHRAE (2001) anger att man bör vänta 11 dygn efter en avbruten mätning innan man gör en ny mätning, för att inte den nya mätningen ska vara påverkad av tidigare mätning.

- ASHRAE, 2001. ASHRAE 1118-TRP. Investigation of Methods for Determining Soil and Rock Formation Thermal Properties from Short-Term Field Tests.

Exempel:

I detta fall antas att ett termisk responstest med varaktighet 3 dygn (72 timmar) följs av 11 dygns vila innan en upprepad mätning med varaktighet 3 dygn genomförs.

Temperaturkurvorna är genererade genom superponering av linjekällor.

Värmeledningsförmåga 3.5 W/m,K

Värmekapacitet 2.5 MJ/m³K

Borrhålsdiameter 115 mm

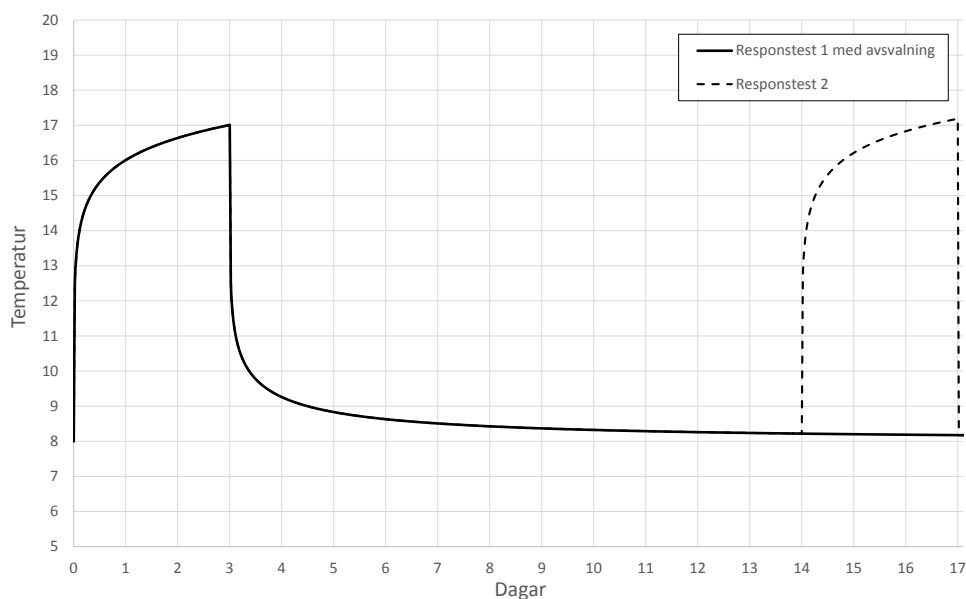
Borrhålsmotstånd 0.1 K/(W/m)

Ostörd marktemperatur 8.0°C

Tillförd specifik värmeeffekt 40 W/m

”Ostörd” marktemperatur vid start av test 2 blir 8.22°C

I detta fall med typiska värden för svenska förhållanden blir utvärderad effektiv värmeledningsförmågan 3.59 W/m,K, vilket är ca 2.5 % högre för test 2 om ej hänsyn tas till avsvälning.



Figur 1: Termisk responstest med efterföljande avsvälning. Streckad linjen visar en upprepad responstest

NOTER DEL 2: RIKTLINJER FÖR ANALYS AV DATA FRÅN TERMISK RESPONSTEST (TRT)

2.1.1 Linjekällemetoden

Not D2:1.1.1

Den enkla linjekälleapproximationen för analys av TRT-data är frekvent använd men är känslig för störningar i mätvärden och av grundvatten. Exempel på litteratur som beskriver den enkla linjekälleapproximationen:

- Mogensen, P. 1983. *Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storages*. Proceedings of the International Conference on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice. Swedish Council for Building Research, Stockholm. June 6-8.
- Austin, W.A. 1998. *Development of an in-situ system for measuring ground thermal properties*. Master's thesis. Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma.
- Eklöf, C., and S. Gehlin. 1996. *TED — A mobile equipment for thermal response test*. Master's thesis 1996:198E, Luleå University of Technology, Sweden. (Available at http://pure.ltu.se/portal/files/43952049/HLU_EX_1996198E_SE.pdf)
- Gehlin, S. 1998. *Thermal Response Test – In-situ measurements of thermal properties in hard rock*. Licentiate thesis 1998:37. Luleå University of Technology, Sweden. (Available at <http://epubl.luth.se/1402-1757/1998/37/LTU-LIC-9837-SE.pdf>)
- Gehlin S. and G. Hellström. 2003. Comparison of four models for Thermal Response Test Evaluation. ASHRAE Transactions 2003, vol. 109 (1).

Not D2:1.1.2

I dessa riktlinjer ställer vi krav på att analysresultaten från TRT-data ska konvergera mot ett stabilt värde för markens effektiva termiska konduktivitet och borrhålets effektiva termiska motstånd. Detta är en kvalitetssäkring för att visa att mätningen varat under tillräckligt lång tid och att analysresultaten inte är påverkade av andra faktorer samt att mätresultaten är tillförlitliga för att ge en bild av hur marken svarar på en given effektlast.

Exempel på referenser som visar hur konduktivitet och termiskt motstånd konvergerar är:

- Beier, R. A. and M. D. Smith. 2003. *Minimum Duration of in-Situ Tests on Vertical Boreholes*. ASHRAE Transactions. 109(2):475-486.
- Javed, S, Spitler, J, Fahlén, P, 2011. An experimental investigation of the accuracy of thermal response tests used to measure ground thermal properties. ASHRAE Transactions, vol. 117(1), pp. 13-21.

2.1.2 Analys med andra metoder än linjekälleapproximationen

Not D2:1.2.1

Det finns ett flertal publikationer som beskriver TRT-analys med andra verktyg än den enkla linjekälleapproximationen. Här ges några exempel:

Fullständig linjekälla:

- Gehlin S. and G. Hellström. 2003. Comparison of four models for Thermal Response Test Evaluation. ASHRAE Transactions 2003, vol. 109 (1).

Cylinderkälla:

- Gehlin S. and G. Hellström. 2003. Comparison of four models for Thermal Response Test Evaluation. ASHRAE Transactions 2003, vol. 109 (1).
- Austin, W.A. 1998. *Development of an in-situ system for measuring ground thermal properties*. Master's thesis. Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma.

Numeriska modeller:

1D:

- Gehlin S. and G. Hellström. 2003. Comparison of four models for Thermal Response Test Evaluation. ASHRAE Transactions 2003, vol. 109 (1).
- Shonder J. A., J. V. Beck (2000). Field Test of a New Method for Determining Soil Formation Thermal Conductivity and Borehole Resistance. *ASHRAE Transactions 2000. Vol. 106*.
- Gustafsson, A.-M. and L Westerlund. 2011. Heat extraction thermal response test in groundwater-filled borehole heat exchanger–Investigation of the borehole thermal resistance. *Renewable Energy*, vol. 36(9), pp. 2388–2394.

2D:

- Wagner R., and Clauser C. Evaluating thermal response tests using parameter estimation for thermal conductivity and thermal capacity. *Journal of Geophysical Engineering* 2005. Vol 2, pp 349-356.

3D:

- Marcotte D. and P. Pasquier. 2008. On the estimation of thermal resistance in borehole thermal conductivity test. *Renewable Energy* 2008. vol. 33, pp. 2407–2415.
- Lamarche L, S. Kajl, B. Beauchamp. 2010. A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat-pump systems. *Geothermics* 2010. Vol 39, pp. 187–200.
- Lee, C. K. 2011. Effects of multiple ground layers on thermal response test analysis and ground-source heat pump simulation. *Applied Energy* 2011. Vol. 88, pp. 4405–4410.
- Bozzoli F, G. Pagliarini, S. Rainieri, L. Schiavi. 2011. Estimation of soil and grout thermal properties through a TSPEP (two-step parameter estimation procedure) applied to TRT (thermal response test) data. *Energy* 2011. Vol. 36, pp. 839–46.

2.1.3 Beaktande av grundvattenflöde

Not D2:1.3.1

Borrhålsmotståndet i grundvattenfyllda borrhål påverkas naturlig konvektion i grundvattnet mellan kollektorslang och borrhålsvägg. Drivkraft för konvektionen är skillnaden i densitet mellan vätska nära slangen och vätska nära borrhålsväggen som uppstår pga temperaturskillnaden vid värmeöverföring. Motståndet ges av

grundvattnets viskositet som ökar med sjunkande temperatur. Det resulterande borrhålsmotståndet blir därför något högre vid värmeuttag kring 0°C än vid värmeförsel vid högre temperaturer (vanligtvis > 10°C).

Erfarenheter från fältmätningar och teoretiska beräkningar visar att det kan vara lämpligt att korrigera mätvärden uppmätta vid TRT med värmeförsel genom att lägga till 0.02-0.03 K/(W/m) för att erhålla ett lämpligt värde för värmeuttag kring 0°C.

Vid värmeuttag med medelfluidtemperaturer under -2°C är grundvattnet i borrhålet vanligtvis helt fruset. Då is har relativt hög värmeledningsförmåga (2,1 W/m,K) blir borrhålsmotståndet vanligtvis gynnsammare än vid värmeuttag från ofrusna borrhål kring 0°C. En rimlig uppskattning kan vara att anta att borrhålsmotståndet då är lika med det som uppmättes vid värmeförsel.

Notera att erfarenheterna avseende hur naturlig konvektion påverkar borrhålsmotståndet utgår från borrhålsvärmexchangers av typen enkla och dubbla U-rör.

- Gustafsson, A.-M. and L Westerlund. 2011. Heat extraction thermal response test in groundwater-filled borehole heat exchanger–Investigation of the borehole thermal resistance. *Renewable Energy*, vol. 36(9), pp. 2388-2394.

Not D2:1.3.2

Det finns flera studier, både teoretiska och fältförsök, som visar att den ökade värmetransporten till följd av grundvattenrörelser i sprickor, sprickzoner och i hydrauliskt permeabla formationer i förekommande fall påverkar resultaten av ett termiskt responstest. Det finns idag ingen bra metod för att kvantifiera grundvattenflödet på ett rättvisande sätt så att man kan ta hänsyn till dess effekt för dels responstestet och dels vid drift.

Exempel på referenser om grundvattenflödes inverkan på termisk responstest_

- Gehlin, S., G. Hellström. 2003. Influence on thermal response test by groundwater flow in vertical fractures in hard rock. *Renewable Energy* 2003; 28:2221-38.
- Liebel, H. T., S. Javed, G. Vistnes. 2012. Multi-injectionrate thermal response test with forced convection in a groundwater-filled borehole in hard rock. *Renewable Energy* 2012; 37:263-8.
- Raymond, J., R. Therrien, L. Gosselin, R. Lefevre. 2011. Numerical analysis of thermal response tests with a groundwater flow and heat transfer model. *Renewable Energy* 2011; 36(1):315-24.
- Signorelli, S., S. Bassetti, D. Pahud, D. Kohl, T. 2007. Numerical evaluation of thermal response tests. *Geothermics* 2007;36:141-66.
- Witte, H. J. L., A. J. van Gelder. 2006. Geothermal response test using controlled multi- power level heating and cooling pulses (MPL-HCP): quantifying ground water effects on heat transport around a borehole heat exchanger. *Proceedings of the 10th international conference on thermal energy storage, Ecostock 2006*. The Richard Stockton College of New Jersey.