



RIKTLINJER FÖR TERMISK RESPONSTEST (TRT)

**Svenskt Geoenergi centrum
2015**

FÖRORD

Dessa riktlinjer för utrustning, utförande, analys och redovisning av Termisk Responstest (TRT) för energibrunnar har tagits fram av Svenskt Geoenergicentrum i nära samverkan med geoenergibranschens aktörer inom forskning, entreprenad, konsultverksamhet, fastighetsförvaltning och leverantörer.

Arbetet initierades i samband med Geoenergidagen 2013 och projektledare har varit Signhild Gehlin, Svenskt Geoenergicentrum.

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 Geoenergicentrum och dess intressenter och stödjande företag, Geotec, samt frivilliga arbetsinsatser från branschens aktörer.

Signhild Gehlin
Stockholm 2015-11-13

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

Dessa riktlinjer för utrustning, utförande och redovisning av mätdata för den vanligaste formen av standardmässig TRT med cirkulerande vätska i kollektorn är framtagna genom Svenskt Geocentrum. TRT kan även utföras på andra sätt, till exempel kan värme tillföras med en prob eller värmekabel, och borrhålets temperatur kan mätas på flera punkter utmed hela borrhålsdjupet, t.ex. med en optisk fiber (så kallat Distribuerat TRT, DTRT). Dessa varianter ställer andra krav på utrustning och utförande, som inte behandlas här.

Med vätska i dessa riktlinjer avses köld- eller värmebärare i borrhålskollektorns slangar.

Vid avvikelser från dessa riktlinjer ska avvikelserna anges under rubriken *1.4.4 Övriga uppgifter*.

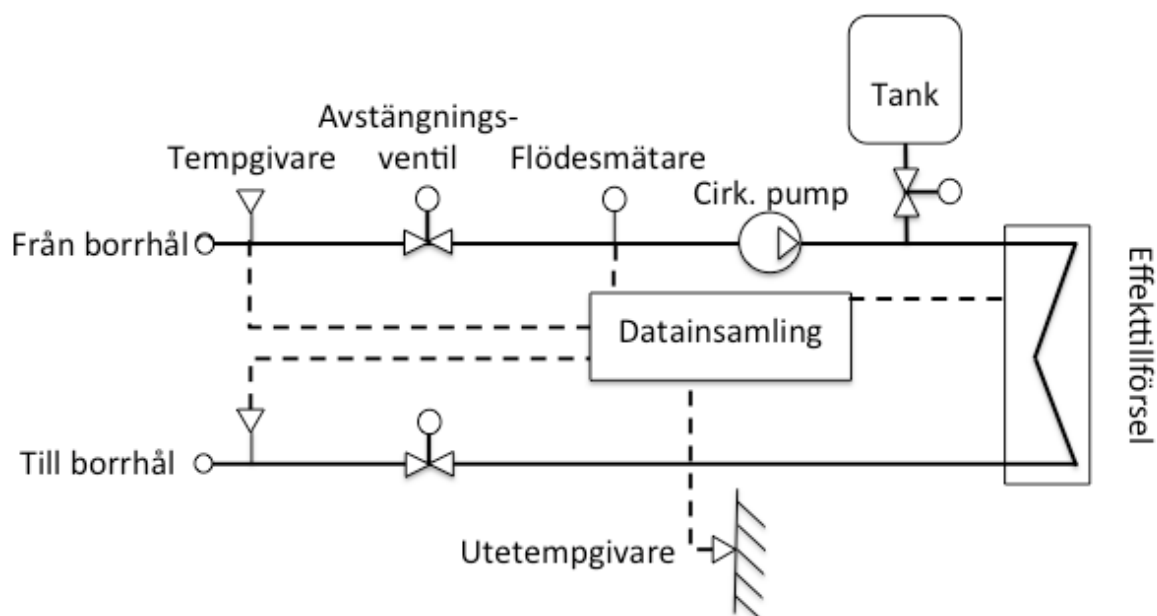
1.1. Termisk Responstest

Termisk Responstest (TRT) används för att bestämma hur en känd tillförsel av värme eller kyla påverkar temperaturen i ett borrhål för geenergi. Denna termiska respons beror av markens och kollektorns termiska egenskaper och ger möjlighet till förutsägelser om borrhålets framtida termiska beteende.

Grundprincipen är att en känd termisk last appliceras på en borrhålskollektor och temperaturutvecklingen i den cirkulerande vätskan mäts över tiden vid borrhålets in- och utlopp. I berg med hög värmeledningsförmåga ändras temperaturen långsammare än i berg med låg värmeledningsförmåga. Utrustningen är ofta mobil för mätning av borrhål i fält.

1.2. Utrustning

Utrustningen består i sitt enklaste utförande av en enhet för stabil värme- eller kyllest (vanligtvis värme), en cirkulationspump som ger stabilt vätskeflöde, noggrann flödesmätning och noggranna temperaturgivare, samt ventiler för avstängning. Minimikrav för en kvalitetssäkrad TRT utrustning ges i detta avsnitt.



Figur 1. Schematisk figur av Termisk Responstestutrustning.

1.2.1 Mätintervall

Datainsamlingen ska ske med högst 30 sekunders intervall, och sedan sammanställas till medelvärden över högst 5 minuters intervall under förcirkulation och hela testperioden från det att effektlasten slås på.

Se Noter D1:2.1.1 och D1:2.1.2 i Stöddokument – Förklaringar och kommentarer

1.2.2 Värme-/kyllast

Mätutrustningen måste kunna hålla en stabil värme- eller kyllast och ha god mätnoggrannhet. Vanligen utgörs lasten av en värmelast från en genomströmningsvärmeberedare, men lasten kan även utgöras av en kyllast, applicerad genom en noggrant kontrollerad värmepump. Lasten skall kunna tillåta fler än ett effektsteg så att en last liknande den som den färdiga anläggningen kommer att ha kan appliceras, normalt inom intervallet 20-80 W/m borrhål.

Se Noter D1:2.2.1 D1:2.2.2 i Stöddokument – Förklaringar och kommentarer

- Den sammanlagda stabiliteten för lasten ska vara $\pm 2\%$ av medelvärdet för mätningen baserat på 5 minuters mätintervall enligt 1.2.1 Mätintervall.
- Onoggrannheten för mätningen av värme- eller kyllast skall ej överskrida $\pm 2\%$.

1.2.3 Flöde och tryck

Cirkulationspumpen ska ge ett stabilt flöde och möjlighet ska finnas att justera flödet så att man kan erhålla liknande flödesförhållanden som under den tänkta driften för anläggningen.

För vanligt förekommande kollektorer innebär detta att man säkerställer turbulent flöde ($Re > 3000$) under hela mätningen. Man kan dock även vara intresserad av effektagivning vid lågt ej turbulent flöde

Se Noter D1:2.3.1 och D1:2.3.2 i Stöddokument – Förklaringar och kommentarer

Utrustningen ska vara försedd med noggranna flödesmätare samt utrustning för avluftning och expansion.

- Den sammanlagda flödesstabiliteten ska vara $\pm 1\%$ av medelvärdet för mätningen baserat på 5 minuters mätintervall enligt 1.2.1 Mätintervall.
- Onoggrannheten för flödesmätaren ska vara högst $\pm 2\%$.

Det kan även vara lämpligt att mäta tryckskillnaden mellan inlopp och utlopp. Detta påverkar inte den termiska responsen men kan vara användbart för mätning av det totala tryckfallet över kollektorn, vid olika flöden.

1.2.4 Temperaturmätning

Vätskans in- och utloppstemperatur ska mätas så nära borrhålet som möjligt. Onoggrannheten för vardera temperaturgivare ska vara högst ± 0.1 K.

Temperaturmätning kan även utföras längs med borrhålsdjupet. Temperatursensorerna ska då uppfylla samma noggrannhetskrav som ovan.

Mätutrustningen ska även innehålla utelufttemperaturmätare som registrerar och lagrar omgivningens temperatur för att kunna spåra och analysera effekterna av eventuell påverkan på mätningen

Se Not D1:2.4.1 i Stöddokument – Förklaringar och kommentarer

1.2.5 Isolering

Utrustningen ska vara innesluten i någon form av skyddande hölje med god isolering för att minimera påverkan från solstrålning och utetemperatur

Se Not D1:2.5.1 i Stöddokument – Förklaringar och kommentarer

1.2.6 Säkerhetsutrustning

Mätutrustningen rekommenderas vara försedd med viss säkerhetsutrustning för att eliminera risk för att utrustningen eller omgivning skadas. Exempel på sådan nödvändig skyddsutrustning är temperaturvakt som slår av vid överhettning.

Rekommenderat är även tryckvakt som slår av vid för högt eller för lågt tryck, samt att datainsamlingen skall ske med distansövervakning så att mätningens förlopp kan följas och eventuella driftstörningar snarast åtgärdas.

1.3. Mätförfarande

1.3.1 Tid efter borrning

Borrhålet ska ha vilat minst 3 dygn efter slutförd borrning och eventuell återfyllning så att påverkan från borrhålsarbetet och eventuell återfyllning hinner avklinga. Om markens termiska konduktivitet på förhand bedöms vara lägre än 3 W/m, K är det lämpligt att vänta ytterligare 1-2 dygn innan TRT-mätningen påbörjas

Se Not D1:3.1.1 i Stöddokument – Förklaringar och kommentarer

1.3.2 Ostörd marktemperatur

Ostörd marktemperatur uppmäts före TRT genom att sänka ner en temperaturmätare i borrhålet eller kollektorslangen och mäta på minst tre ställen (topp, mitten och botten) utmed borrhålets profil och därefter beräkna ett medelvärde. Man kan även sänka ned en temperaturmätare som kan mäta temperaturen utmed hela längden samtidigt. I bebyggt område är det viktigt att mäta på minst 5 punkter utmed de översta 100 metrarna för att få med effekten av ovanliggande byggnaders värmeläckage. En inledande cirkulationsperiod skall göras för att jämna ut temperaturskillnader utmed borrhålet och vätskan som tillförts från utrustningen. Detta görs genom att cirkulera vätskan utan effekttillförsel och registrera in- och utloppstemperatur med kort tidsintervall (5 sekunder) till dess att stabil nivå uppnås (± 0.1 K, d v s stabil med hänsyn till mätnoggrannhet, se 1.2.4 Temperaturmätning). Observera att värme (pumpeffekt som omvandlas till friktionsvärme) tillförs borrhålet under denna inledande cirkulationsperiod och denna värmeeffekt måste vara känd eftersom denna effekt måste beaktas vid utvärderingen

Se Not D1:3.2.1 i Stöddokument – Förklaringar och kommentarer

1.3.3 Borrhål och kollektor

Borrhålet ska i första hand om möjligt vara utformat på samma sätt och utrustat med samma typ av kollektor som den färdiga anläggningens borrhål i detta skede planeras vara utformade, för att efterlikna verklig drift

Se Not D1:3.3.1 i Stöddokument – Förklaringar och kommentarer

1.3.4 Inkoppling

Inkoppling mellan mätutrustning och borrhål ska ske med så korta anslutningsslangar som möjligt

Se Not D1:3.4.1 i Stöddokument – Förklaringar och kommentarer

1.3.5 Avluftning

Direkt efter inkoppling ska anslutningsslangarna fyllas med samma vätska som kollektorslangarna och därefter noggrant avluftas

Se Not D1:3.5.1 i Stöddokument – Förklaringar och kommentarer

1.3.6 Isolering

Anslutnings slangarna ska vara väl isolerade hela vägen från mätutrustning till borrhål, och eventuellt förses med strålningskydd vid direkt solljus, för att minimera påverkan från omgivningen.

Se Not D1:3.6.1 i Stöddokument – Förklaringar och kommentarer

1.3.7 Värme-/kyllast

Värme- eller kyllasten skall i möjligaste mån efterlikna den last som den färdiga anläggningen förväntas ha, normalt inom intervallet 20-80 W/m borrhål. Olika laster kan testas vid behov.

Se Not D1:3.7.1 i Stöddokument – Förklaringar och kommentarer

1.3.8 Flöde

Flödet ska efterlikna det flöde som den färdiga anläggningen förväntas ha. Normalt innebär detta att turbulenta förhållanden ($Re > 3000$) ska råda under hela mätningen, om inte annat påkallas. Olika flöden kan dock testas vid behov.

Se Not D1:3.8.1 i Stöddokument – Förklaringar och kommentarer

1.3.9 Mätparametrar

Följande mätparametrar är minimikrav för TRT:

- Inloppstemperatur, borrhål
- Utloppstemperatur, borrhål
- Referensmätning av omgivningstemperatur
- Tillförd värme-/kyllast
- Vätskeflöde

Utöver dessa minimikrav rekommenderas för en god kvalitetssäkring även mätning av tryckskillnad mellan in- och utlopp.

Se Not D1:3.9.1 i Stöddokument – Förklaringar och kommentarer

1.3.10 Testlängd

Mätningen ska genomföras med stabil värme- eller kyllast under minst 50 timmar, rekommenderat är 60-72 timmar. Observera att om mätning sker med fler än en lastnivå skall varje lastnivå mätas under minst 50 timmar.

Se Not D1:3.10.1 i Stöddokument – Förklaringar och kommentarer

1.3.11 Borrning i närheten

Borrning i närheten av testborrhålet skall inte ske under pågående TRT-mätning, då störningar i grundvattenflöden kan orsakas, vilket påverkar mätresultaten avsevärt och kan göra mätningen oanvändbar.

Se Not D1:3.11.1 i Stöddokument – Förklaringar och kommentarer

1.3.12 Upprepad mätning

Skulle en ny mätning behöva göras på samma borrhål måste temperaturen i borrhålet ha återhämtat sig till högst 0.3 K skillnad från den ursprungligt uppmätta ostörda marktemperaturen. Tiden motsvarar ca 3 gånger varaktigheten på utförd mätning. Alternativt kan den nya mätningen utvärderas med hänsyn tagen till effektlasterna från det första testet. Detta innebär att den enkla linjekällemetoden inte kan användas för utvärdering.

Se Not D1:3.12.1 i Stöddokument – Förklaringar och kommentarer

1.4. Redovisning av mätning

Redovisning av genomförd TRT-mätning ska innehålla nedanstående uppgifter för att skapa förutsättningar för en kvalitetsmässig tolkning av förhållandena vid mätning samt resultatanalys:

1.4.1 Uppgifter om uppdragsgivare och utförare av mätning

- (Företags)namn på uppdragsgivare. Övriga kontaktuppgifter är frivilliga.
- Namn och kontaktuppgifter till utförare av TRT

1.4.2 Uppgifter om borrhålet och dess kollektor

- Uppgifter om borrhålet (t ex kopia av borrhållande):
 - Namn och kontaktuppgifter till borrentreprenör
 - Borrhålets uppmätta djup och diameter
 - Djup till fast berg, längd av rörborrning och grundvattenyta
 - Observationer om bergart och vattenförande sprickzoner
 - Datum för borrnings avslutande
 - Borrhålets lokalisering
 - Borrprotokollnummer till SGUs brunnsarkiv (om möjligt)
- Kollektortyp (Enkelt U-rör, dubbelt U-rör, coaxial etc)
- Kollektorlängd exklusive bottenvikt nedanför u-böj
- Uppgifter om kollektorslangar (material, typ och dimension)
- Uppgifter om vätskan i kollektorn och dess sammansättning
- Uppgifter om borrhålsfyllning (grundvatten alternativt fyllnadsmaterial)

1.4.3 Uppgifter om mätningen och uppmätta värden

- Uppgift om metod för mätning av ostörd marktemperatur samt erhållet värde
- Datum och tid för mätstart
- Datum och tid för avslutad mätning
- Uppgift om värme-/kyllast (medelvärde, standardavvikelse) samt graf med lämplig skala, över tillförd last under testperioden
- Uppgift om flöde (medelvärde, standardavvikelse), graf med lämplig skala
- Värden och graf med lämplig skala, av uppmätt in- och utloppstemperatur över testperioden
- Värden och graf med lämplig skala, av omgivningstemperatur över testperioden

1.4.4 Övriga uppgifter

- Anteckningar om eventuella avvikelser från riktlinjerna

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

Dessa riktlinjer för analys och redovisning av data för den vanligaste formen av standardmässig TRT med cirkulerande vätska i kollektorn är framtagna genom Svenskt Geocentrum. TRT-data kan även erhållas från TRT utförda på andra sätt. Vid avvikelser från dessa riktlinjer ska avvikelserna anges under rubriken 2.2.5 *Övriga uppgifter*.

2.1. Analys

Huvudprincipen för analys av TRT-data utgår från homogen och rent konduktiv värmetransport i marken och tar därför inte hänsyn till eventuella inhomogeniteter utmed borrhålets profil, eller konvektiv värmetransport i marken, såsom grundvattenflöde.

Dessa riktlinjer för analys och redovisning av resultat från TRT-mätning är framtagna genom Svenskt Geocentrum.

2.1.1 Linjekällemetoden

Den enklaste metoden för utvärdering av TRT-data är linjekälleapproximationen. Kollektorvätskans temperatur vid tiden t efter värmeförselns start tecknas enligt ekvation (1):

$$T_f(t) = T_0 + \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left(\ln \left(\frac{4 \cdot \alpha}{r_b^2} t \right) - 0.5772 \right) + q \cdot R_b^* \quad (1)$$

$$\text{där ekvationen är giltig för } t > 5 \cdot \frac{r_b^2}{\alpha} \quad (2)$$

T_f = Medeltemperatur i kollektorns vätska (°C)

T_0 = Ostörd marktemperatur (°C)

q = Specifik värmelast (W/m)

λ = Effektiv termisk konduktivitet (W/(m, K))

c = Markens specifika värmekapacitet (J/(kg, K))

α = Termisk diffusivitet = $\lambda/(\rho c)$ (m²/s), där ρ = markens densitet (kg/m³)

r_b = Borrhålsradie (m)

t = Tid från teststart (s)

R_b^* = Effektivt termiskt borrhålsmotstånd (K/(W, m))

För att linjekälleapproximationen ska vara applicerbar för analys av uppmätta TRT-data, krävs att temperaturkurvan efter en inledande tidsperiod uppvisar en rät linje som funktion av logaritmisk tid (ekvation 3) och att mätperioden är >50 timmar. Den inledande tidsperioden är av storleken 10-15 timmar (ekvation 2).

$$T_f(t) = k \cdot \ln(t) + m \quad (3)$$

där k är kurvans lutning och m är kurvans intercept. Den effektiva termiska konduktiviteten fås genom att bestämma lutningen k för kurvan och därefter använda ekvation (4):

$$\lambda = \frac{q}{k \cdot 4 \cdot \pi} \quad (4)$$

Det erhållna värdet på termisk konduktivitet används för att bestämma det effektiva termiska motståndet i borrhålskollektorn enligt ekvation (5):

$$R_b^* = \frac{T_f - T_0}{q} - \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left(\ln(t) + \ln\left(\frac{4 \cdot \alpha}{r_b^2}\right) - 0.5772 \right) \quad (5)$$

för tidskriteriet enligt ekvation (2).

Se Not D2:1.1.1 i Stöddokument – Förklaringar och kommentarer

Linjekälleapproximationen kan endast användas när alla mätparametrar har mycket god noggrannhet och värme-/kyllasten är dokumenterat mycket stabil. Vid förekommande grundvattenflöde, blir temperaturkurvan flackare över tiden, och då ger denna enkla analysmetod inte ett tillförlitligt resultat. Indikationer på grundvattenflöde och annan störning kan fås från dokumentationen vid borrningen.

Felkällor vid analys med linjekälleapproximationen är den begränsade möjligheten att behandla variationer i värme-/kyllast. Särskilt besvärligt är det om effekten ökar eller avtar med tiden p g a förändringar i t ex nätspänning eller värmeutbyte ovan mark. Utvärderingen försvåras även av kraftig grundvattenströmning, och kan omöjliggöras vid påtagligt vertikalt vattenflöde i borrhålet, exempelvis mellan två vattenförande spricksystem.

De beräknade värdena för termisk konduktivitet och termiskt motstånd i borrhålskollektorn ska vara oberoende av mätperiodens längd, d v s konvergera mot ett stabilt värde. Detta visas genom att redovisa beräkningar av värdena för olika avsnitt av mätperioden

Se Not D2:1.1.2 i Stöddokument – Förklaringar och kommentarer

2.1.2 Analys med andra metoder än linjekälleapproximationen

I de fall då förutsättningarna för linjekälleapproximationen inte uppfylls (se 2.1.1 *Linjekällemetoden*), krävs mer avancerade metoder för en kvalitetsmässig analys och tolkning av mätresultaten.

Ekvationen för en linjekälla (ekvation 6) eller cylinderkälla (ekvation 7) kan tillämpas på varje tidssteg i mätningen, och medeleffekten i varje intervall mellan två mättidpunkter betraktas som en stegpuls. Markens värmekonduktivitet och borrhålsmotståndet R_b^* ansätts då och motsvarande temperaturkurva beräknas. De värden på värmekonduktiviteten och R_b^* , som ger bäst överensstämmelse mellan denna kurva och den uppmätta temperaturkurvan, beräknas med minsta kvadratmetod.

Ekvation för kollektorvätskans temperatur med linjekälla:

$$T_f(t) = T_0 + \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot E_1\left(\frac{r_b^2}{4\alpha t}\right) + q \cdot R_b^* \quad (6)$$

där E_1 är exponentialintegralen.

Ekvation för kollektorvätskans temperatur med cylinderkälla:

$$T_f(t) = T_0 + \frac{q}{\pi^2 \cdot \lambda} \cdot \int_0^\infty \left(e^{-\frac{\alpha t \beta^2}{r_b^2}} - 1 \right) \cdot \frac{(J_0(\beta)Y_1(\beta) - Y_0(\beta)J_1(\beta))}{\beta^2 [J_1^2(\beta) + Y_1^2(\beta)]} d\beta + q \cdot R_b^* \quad (7)$$

där J_0 , J_1 , Y_0 och Y_1 är Besselfunktioner av första och andra ordningen.

Olika numeriska metoder kan också användas för analys av TRT-data. Fördelen med dessa är att de kan ta hänsyn till värmekapaciteten i fyllnadsmaterial och vätskan i kollektorn samt beskriva värmeöverföringsegenskaperna i själva borrhålet på ett mer korrekt sätt.

Se Not D2:1.2.1 i Stöddokument – Förklaringar och kommentarer

2.1.3 Beaktande av grundvattenflöde

De utvärderingsmetoder för TRT som normalt används antar att värmetransporten i marken enbart sker genom konduktiv värmeledning. Den som analyserar TRT-data måste därför vara uppmärksam på tecken på bidrag till värmetransporten genom grundvattenrörelser i marken och längs borrhålet. Finns skäl att misstänka att så är fallet, måste hänsyn tas till det i analys och redovisning av TRT. Fyllda borrhål är generellt mindre utsatta för störningar från grundvattenflöde.

Det uppmätta borrhålsmotståndet vid värmetillförsel skall korrigeras till ett något högre värde vid värmeuttag, eftersom lokal naturlig konvektion ger större bidrag till värmeöverföringen vid värmetillförsel än vid ett värmeuttag av samma storlek. Detta beror på ändringar i grundvattnets densitet och viskositet med temperatur. Värdet uppmätt vid normalt förekommande värmetillförseffekter korrigeras med ett tillägg på 0.01-0.02 K/(W/m) för att gälla vid värmeuttag.

Se Not D2:1.3.1 i Stöddokument – Förklaringar och kommentarer

Kraftigt regionalt grundvattenflöde, artesiskt flöde, kortslutna vattenförande sprickzoner eller akviferer, samt termosifoneffekter, är svåra att hantera p g a osäkerhet kring grundvattenflödets stabilitet och storlek under mätningen. I sådana fall kan linjekälleapproximationen (se 2.1.1 Linjekällemetoden) inte användas för analys

Se Not D2:1.3.2 i Stöddokument – Förklaringar och kommentarer

2.2. Redovisning av TRT-analys

Redovisning av TRT-analys ska innehålla nedanstående uppgifter:

2.2.1 Uppgifter om uppdragsgivare och analysutförare samt om mätning

- (Företags)namn på uppdragsgivare. Övriga kontaktuppgifter är frivilliga.
- Namn och kontaktuppgifter till utförare av analys
- Rapport från TRT-mätningens genomförande enligt DEL 1: RIKTLINJER FÖR UTFÖRANDE AV TERMISK RESPONSTEST (TRT)

2.2.4 Uppgifter om analys och testresultat

- Uppgift om använd analysmetod (linjekälleapproximation, linjekälla, cylinderkälla, beskrivning av numerisk metod etc)
- Erhållet värde för markens effektiva termiska konduktivitet
- Erhållet värde för kollektorns effektiva termiska motstånd
- Graf som visar mätvärdenas konvergens mot stabilt värde och oberoende av testperiodens längd
- Kommentarer om mätningens genomförande, felkällor, grundvattenobservationer etc.

2.2.5 Övriga uppgifter

- Anteckningar om eventuella avvikelser från riktlinjerna