

Artikelförfattare **SAQIB JAVED och PER FAHLÉN**
 Sysselsättning **Doktorand respektive professor, Installationsteknik,
 institutionen för Energi och miljö, Chalmers tekniska högskola**
 Kontakt **saqib.javed@chalmers.se**

Termisk modellering och utvärdering av borrhål

Markvärmesystem med vertikala borrhål blir allt populärare. Optimering baserad på resultat från termisk responstest är en dyr metod, och metoder som förenklar genomförandet och förbättrar noggrannheten är önskvärda. Viktigt är också att välja rätt driftstrategi, bland annat beträffande köldbärarens utloppstemperatur från systemet.

MARKVÄRMESYSTEM MED vertikala borrhål, med eller utan värmepump, blir alltmer populära för värme- och kylapplikationer. Det finns i dagsläget cirka 350 000 markvärmepumpar bara i Sverige och den installerade effekten ökar med 10 procent per år [1]. Avdelningen för Installationsteknik vid Chalmers har under några år drivit ett projekt [3] för att optimera utformning och drift av borrhålssystem. Projektets första fas varade mellan 2007 och 2010 och finansierades via Energimyndighetens program Effsys 2. Fas 2 pågår nu för fullt inom ramen för fortsättningsprogrammet Effsys+.

Bakgrund

Optimering av ett borrhålssystem med värmepump är en mångfacetterad process. Man måste göra en kvalificerad analys av kyl- och värmebehovens variationer såväl under dygnet som säsongsmässigt och att utifrån detta välja lämplig borrhålsgeometri och dimensionering. Lika viktigt är att välja en lämplig driftstrategi för att matcha lastvariationerna i byggnaden mot borrhålssystemet på ett optimalt sätt. I system med många borrhål baseras ofta den exakta borrhålsdimensioneringen på resultat från så kallade termiska responstester (TRT). Ett responstest ger information om markens egenskaper på den plats där borrhålssystemet ska installeras. Ett TRT är relativt kostsamt och metoder som förenklar genomförandet och förbättrar noggrann-

heten för resultaten har stor betydelse för såväl investeringskostnaden som driften av borrhålssystemet.

En nyckelfaktor i optimeringen av borrhålssystem är möjligheten att noggrant kunna modellera köldbärarens utloppstemperatur från systemet. Möjligheten att utnyttja marken för frikyla/gratisvärme beror av denna temperatur och i system som använder värmepump påverkar den direkt både värmefaktor och köldfaktor. Vår forskargrupp på Chalmers arbetar därför med optimering av såväl utformning som drift av borrhålssystemet. En del av arbetet är att utveckla enkla och användarvänliga analytiska lösningar för modellering av köldbärartemperaturen från ett borrhålssystem och därmed förbättra dimensioneringsprocessen.

I denna artikel kommer vi att översiktligt beskriva en del av vår pågående forskning och även ge exempel på nyligen publicerade resultat.

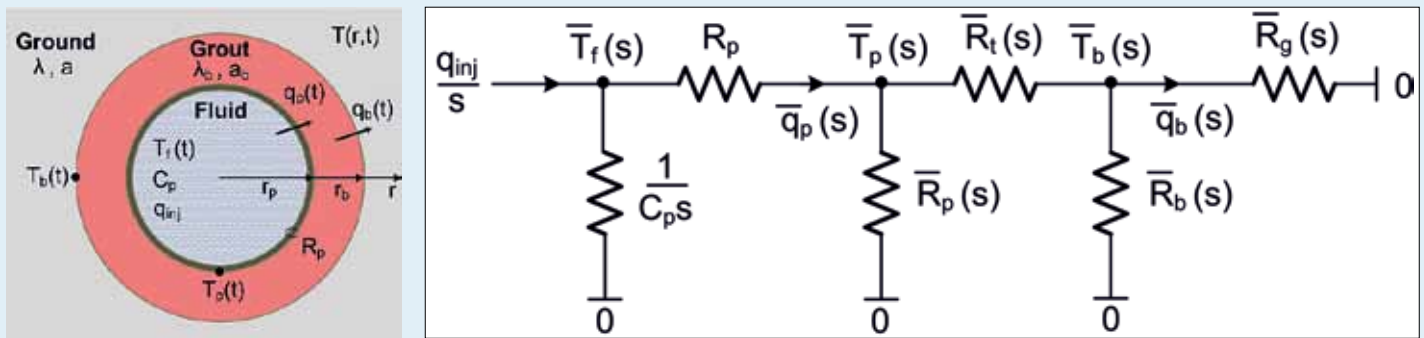
Borrhålsmodellering

Optimering av utformning och drift av borrhålssystem kräver god kunskap om köldbärarens utloppstemperatur från systemet. Denna temperatur beror kortsiktigt i första hand av borrhålet med värmeväxlare och långsiktigt av den omgivande markens egenskaper. Ett borrhåls långsiktiga respons svarar mot hur marktemperaturen bortanför hålets omedelbara omgiv-

ning påverkas av den totala in- och utmatningen av värme i hålet, vilket är en mycket långsam process. Eftersom den omgivande markens termiska massa är stor kommer fjärrfältets temperaturändringar att vara långsamma. Dessa långsiktiga ändringar kan beräknas med ganska bra noggrannhet med enkla analytiska modeller, exempelvis "linjekällor" och "cylinderkällor". Detta kontrasterar mot borrhålsvärmeväxlarens och närfältets förhållandevis snabba temperatursvar på laständringar, vilket beror av att förhållandet mellan värmeflödestäthet och termisk massa är betydligt högre i dessa delar av systemet.

Ett vanligt förfarande vid beräkning av borrhålssystem är att köldbärarens utloppstemperatur beräknas genom att överlagra effekten av en kort effekttopp på det långsiktiga medelvärdet av in- och utmatning av värme. För enstaka borrhål kan detta hanteras analytiskt men för borrhålssystem krävs i dagsläget komplicerade och tidskrävande numeriska modeller. Det finns därför ett stort behov av analytiska modeller även för denna tillämpning, vilket diskuteras i projektbeskrivningen [3].

Javed [8] och Claesson har utvecklat en ny analytisk lösning för att beräkna borrhålets korttidssvar. I lösningen modelleras borrhålsvärmeväxlaren, till exempel ett U-rör, som en cylinder med ekvivalent diameter och med ett ekvivalent medelvärde för köldbärarens in- och utloppstempera-

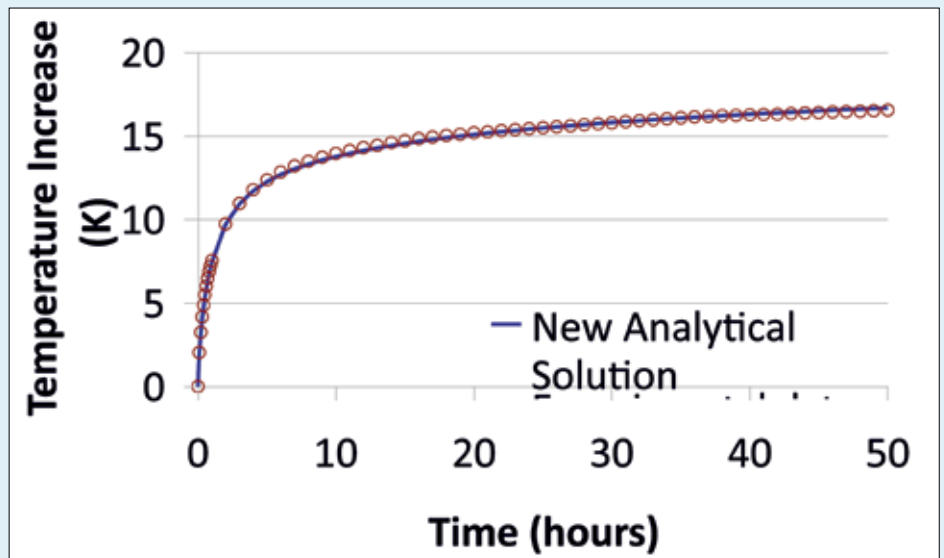


Figur 1 (a): Geometri, temperaturer, värmeflöden och termiska egenskaper för borrhålet. (b): Termiskt nätverk för det Laplacetransformerade radiella flödet från ett borrhål (i frekvensplanet).

tur. Det resulterande radiella värmetransportproblemet illustreras i figur 1 [8]. Värmeflödet q_{inj} injiceras i det cirkulerande flödet med temperaturen $T_f(t)$. Fluiden har en specifik värmekapacitet C_p , rörets värmemotstånd är R_p och rörets yttemperatur är $T_p(t)$. Värmeflödet $q_p(t)$ går genom rörväggen till borrhålsfyllningen ("grout" på engelska, i Sverige vanligtvis grundvatten). Fyllningens värmekonduktivitet och värmediffusivitet betecknas λ_b och a_b . Värmeflödet $q_b(t)$ strömmar genom borrhålets yttermantel, som har temperaturen $T_b(t)$, och ut till den omgivande marken. Markens värmeledningsförmåga och värmediffusivitet betecknas λ och a . Värmetransportproblemet, som visas i figur 1a, analyseras med hjälp av det termiska nätverk som visas i figur 1b. Nätverket består av en sekvens av sammansatta resistanser. En av de viktigaste innovationerna i denna modell är att resistansnätet skapas i frekvensplanet. Därmed kan både värmekapacitanser och värmemotstånd behandlas på samma sätt.

Den Laplacetransformerade fluidtemperaturen beräknas med hjälp av det termiska nätverket. Om man startar från höger i figur 1b ligger resistanserna $\bar{R}_b(s)$ och $\bar{R}_g(s)$ parallellt och deras inverser (det vill säga konduktanserna) $\bar{K}_b(s)$ and $\bar{K}_g(s)$ kan adderas. Inversen av den resulterande sammansatta konduktansen adderas till resistansen $\bar{R}_t(s)$. Denna sammansatta resistans ligger parallellt med $\bar{R}_p(s)$ och deras inverser summeras. Vi har nu en ny sammansatt resistans i serie med rörväggens resistans R_p . Den totala sammansatta resistansen från R_p och högerut ligger parallellt med den termiska konduktansen $C_p \cdot s$. Därmed kan den Laplacetransformerade fluidtemperaturen uttryckas som:

$$\bar{T}_f(s) = \frac{q_{inj}}{s} \cdot \frac{1}{C_p \cdot s + \frac{1}{R_p + \frac{1}{\bar{K}_p(s) + \frac{1}{\bar{R}_t(s) + \frac{1}{\bar{K}_b(s) + \bar{K}_g(s)}}}}}$$



Figur 2: Jämförelse [8] av fluidtemperaturer som beräknats med den nya analytiska modellen och experimentella data.

Motsvarande fluidtemperatur i tidsplanet, det vill säga vår normala verklighet, får vi genom att tillämpa Laplaceteorins inversionsformel på $\bar{T}_f(s)$. Ytterligare detaljer om lösningsmetodiken ges i en artikel av Javed [8] och Claesson. Vår analytiska korttidslösning har validerats mot andra, numeriska modeller och mot experimentella resultat [9]. Figur 2 presenterar resultat från modellen (heldragen linje) och resultat från experiment (cirklar). Den maximala skillnad som vi noterat mellan värden beräknade med den nya modellen och andra modeller är 0,2 K.

Termiska responstester (TRT)

Termiska responstester genomförs i medelstora och stora system för att bestämma viktiga markegenskaper som värmeledningsförmåga, borrhålsresistans och mar-

kens ostörda temperatur. God kunskap om dessa parametrar är väsentlig när man ska dimensionera borrhålssystem och marklager, med eller utan värmepump. Chalmers laboratorium [4, 7] har nio 80 meter djupa borrhål i en rektangulär konfiguration och anläggningen lämpar sig utmärkt för olika typer av responstester. Flödet kan styras individuellt för varje borrhål med hjälp av separata, varvtalsstyrda pumpar, en för varje hål (se figur 3).

I en första fas testades alla nio borrhål under liknande förhållanden. I enlighet med Ashraes rekommendationer [2] användes en värmeeffekt av cirka 55 W/m. Tabell 1 redovisar resultaten för samtliga nio borrhål.

Tabellen visar att uppskattningarna av värmekonduktiviteten för de nio borrhålen varierar mellan extremvärdena 2,81 och 3,2 W/(m•K) medan uppskattningarna av borrhålsresistansen varierar mellan 0,049 och 0,074 (m•K)/W. Medelvärdet för de nio borrhålens värmeledningsförmåga är 3,01 W/(m•K) ±7% och medelvärdet för borrhålsresistansen är 0,062 (m•K)/W ± 20 procent. Resultaten indikerar att även vid noggrant genomförda responstester kan osäkerheten i värdet för värmekonduktivitet röra sig om 5–10 procent, medan osäkerheten för borrhålsresistansen kan vara

Tabell 1

Markens värmekonduktivitet och borrhålens termiska resistans för Chalmers experimentanläggning.

Borrhål	Värme-konduktivitet [W/(m·K)]	Borrhåls-resistans [W/(m·K)]
1	2,88	0,059
2	3,06	0,064
3	3,04	0,074
4	2,81	0,049
5	2,98	0,064
6	2,89	0,063
7	3,19	0,064
8	3,20	0,065
9	3,12	0,069

den dubbla. Variationerna i resultaten från responstesterna orsakas av lokala inhomogeniteter i berget, borrhålens skick, tillfälliga variationer på grund av ofullkomligheter i testernas genomförande och utvärdering (till exempel ingångsvärden för vissa parametrar).

I fas 2 av responstesterna undersöktes effekterna av provens varaktighet och inmatad värmeeffekt på uppskattningarna av värmeledningsförmåga och borrhålsmotstånd. För att testa metodens känslighet för varierande varaktighet för den värmepuls som matas in i borrhålet gjordes tester med varaktigheter mellan 24 och 260 h. Resultaten redovisas i *tabell 2*. De uppskattade värdena på ledningsförmåga och resistans konvergerar efter cirka 100 timmar och därefter kan man inte se några signifikanta ändringar av värdena. Vid varaktigheter mellan 50 och 100 timmar visar resultaten på skillnader upp till 4 procent för ledningsförmågan och 8 procent för motståndet. Väsentligt högre avvikelser får man vid varaktigheter under 50 h, 14 respektive 13 procent vid en 30 timmars test.

I Sverige fylls borrhål i allmänhet med grundvatten. Värmetransporten mellan köldbäraren i borrhålsvärmväxlaren och den omgivande marken sker i denna typ av hål dels genom värmeledning i vattnet, dels genom egenkonvektion. Vattnet har låg värmeledningsförmåga och borrhållets värmemotstånd påverkas därför i hög grad av om det uppstår egenkonvektion. Egenkonvektionen påverkas både av effekt och riktning på värmepulsen (värmning eller kylning). Lämplig effekt för responstestet är 50–80 W/m vilket motsvarar typiska dimensioneringsvärden för borrhål [2]. Ofta sker emellertid tester i praktiken med effekter utanför detta område. För att undersöka osäkerheten i resulterande värden för ledningsförmåga och borrhålsmotstånd gjordes en serie omtester på ett borrhål. *Figur 4* visar resultat från dessa prov. Försöken gjordes med fyra olika värmeeffekter mellan 25 och 150 W/m.

Som framgår av *figur 4* resulterar en hög

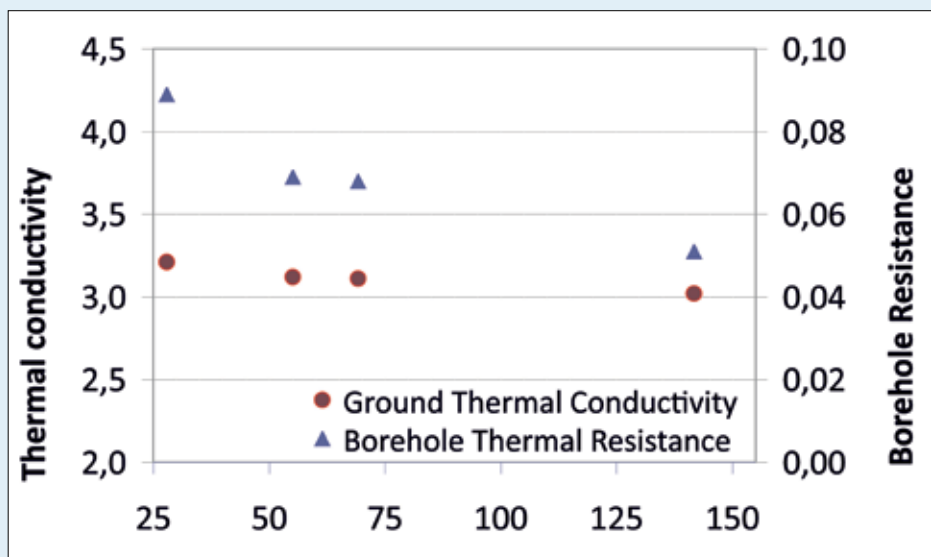


Figur 3: Individuella, varvtalsstyrda pumpar för samtliga nio borrhål.

Tabell 2

Uppskattad värmeledningsförmåga och borrhålsresistans som funktion av responstets varaktighet.

Varaktighet [timmar]	Värmeledningsförmåga [W/(m·K)]	Avvikelse [%]	Borrhålsresistans [W/(m·K)]	Avvikelse [%]
30	3,47	13,77	0,083	12,16
40	2,87	5,90	0,066	10,81
50	2,99	1,97	0,071	4,05
60	2,93	3,93	0,068	8,11
70	2,95	3,28	0,069	6,76
80	2,98	2,30	0,070	5,41
90	2,96	2,95	0,070	5,41
100	3,05	0,00	0,073	1,35
125	3,08	0,98	0,075	1,35
150	3,08	0,98	0,075	1,35
175	3,07	0,66	0,074	0,00
200	3,05	0,00	0,074	0,00
250	3,05	0,00	0,074	0,00




Figur 4: Uppskattningar av hur markens värmekonduktivitet och borrhålsresistansen varierar med tillförd värmeeffekt.

effekt, runt 140 W/m, i en underskattning av borrhålsmotståndet med cirka 25 procent i förhållande till standardtestet (en hög effekt ökar egenkonvektionen vilket minskar värmemotståndet). Å andra sidan överskattar prov med låg effekt, cirka 30 W/m, borrhålsresistansen med omkring 30 procent. Den uppskattade värmeledningsförmågan i marken påverkas i båda fallen ganska lite (mindre än tre procent). Resultaten diskuteras mer ingående i en artikel av Javed [9], Fahlén och Spitler.

Sammanfattning, fortsatt arbete

Projektet har som övergripande syfte att utveckla modeller och beräkningsmetodik som möjliggör dynamisk simulering av ett komplett system med byggnad, tekniska installationer, värmepump och borrhåls-system. Detta är nödvändigt för att kunna optimera både utformning och drift av moderna system med starkt varierande kyl- och värmebehov. För att beräkningarna ska kunna genomföras på rimlig tid och med vanliga datorresurser krävs analytiska samband eller enkla numeriska modeller utan tidsödande iterationer. Därför har huvuddelen av insatserna ägnats åt denna model-

lering inom projektets del 1 och vi har lyckats få fram både en analytisk modell och en enkel, numerisk modell. Dessa modeller möjliggör beräkning av köldbärandens temperatur med tidsskalor från minuter till tiotals år. Javed har presenterat huvuddelen av arbetet i fas 1 i en licentiatuppsats [6] och en sammanfattning finns i vår slutrapport [5] till Effsys.

Inom ramen för projektet har vår analytiska och vår numeriska modell först validerats mot varandra och därefter mot existerande modeller. Därefter har modellerna validerats mot experiment i ett kontrollerat, horisontellt hål vid Oklahoma State University och provats i praktisk utvärdering av responstester. Modellerna används nu tillsammans med experimentella resultat från vår laboratorieanläggning för att utforma nya rekommendationer för utförande och utvärdering av termiska responstester. Arbetet i fas 2 av projektet går nu vidare mot mer systeminriktad modellering och utvärdering (Chalmers laboratorium är utrustat för att kunna genomföra prov med alla tänkbara systemlösningar och styrstrategier för värmning, kylning och ventilation av byggnader). 

Referenser

- 1 Andersson, O, 2009. Ground source heating and cooling in Sweden. IEA Heat pump centre Newsletter, vol 27, nr 2, 2010-04, sid 19–22 (IEA).
- 2 Ashrae, 2007. Ashrae handbook – Applications. (Ashrae) Atlanta, Georgia, USA.
- 3 Fahlén, P, 2006. Optimering av marklageranslutna värmepumpsystem för klimativering av byggnader. Research application: Effsys II, (Building Services Engineering, Chalmers University of Technology.) Gothenburg, Sweden.
- 4 Fahlén, P, 2009. Installationstekniks försöksfall – Centrala försörjningssystem. Rapport R2009:01, (Building Services Engineering) Göteborg.
- 5 Fahlén, P, Javed, S, Claesson, J, 2010. Optimering av marklageranslutna värmepumpsystem för klimativering av byggnader. Rapport R2010:2, Slu-trapport, 24 sidor. (Building Services Engineering, Chalmers University of Technology) Gothenburg, Sweden.
- 6 Javed, S, 2010. Design of ground source heat pump systems – Thermal modeling and evaluation of boreholes. Building Services Engineering, Thesis for Lic Eng, D2010:02, 126 sidor. (Chalmers University of Technology) Göteborg.
- 7 Javed, S, Fahlén, P, 2010. Development and planned operation of a ground source heat pump test facility. IEA Heat pump centre Newsletter, vol 28, nr 1, 2010–04, (IEA).
- 8 Javed, S, Claesson, J, (Fahlén, P, presenter), 2011. New Analytical and Numerical Solutions for the Short-term Analysis of Vertical Ground Heat Exchangers. Ashrae Winter Conference, Las Vegas, NV, USA, 2011-01-29–02-02. (Ashrae).
- 9 Javed, S, Fahlén, P, Spitler, J D, 2011. An experimental investigation of the accuracy of thermal response tests used to measure ground thermal properties. Ashrae Winter Conference, Las Vegas, NV, USA, 2011-01-29–02-02. (Ashrae).