



STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE



System för värme och kyla ur mark - Förslag till utvecklingsprogram

BENGT ROSÉN, SGI

ANNA GABRIELSSON, SGI

JAN FALLSVIK, SGI

GÖRAN HELLSTRÖM, LTH

GUNNEL NILSSON, SGI

Varia 516

LINKÖPING 2002

Varia | Statens geotekniska institut (SGI)
581 93 Linköping

Beställning | SGI
Litteratortjänsten
Tel: 013-20 18 04
Fax: 013-20 19 09
E-post: info@swedgeo.se
Internet: www.swedgeo.se

ISSN | 1100-6692
ISRN | SGI-VARIA--02/516--SE

Projektnummer SGI | 10445
Dnr SGI | 1-9905-0340
© | Statens geotekniska institut



STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE

Varia 516

System för värme och kyla ur mark - Förslag till utvecklingsprogram

BENGT ROSÉN, SGI

ANNA GABRIELSSON, SGI

JAN FALLSVIK, SGI

GÖRAN HELLSTRÖM, LTH

GUNNEL NILSSON, SGI

Byggforskningsrådet/Formas
Energimyndigheten
Statens geotekniska institut

Förord

I denna rapport sammanställs bedömd utvecklingspotential för system med markvärmväxlare, med och utan värmepump. Markvärme är en miljövänlig teknik för värme och kyla ur jord, berg och vatten, och kan bidra till att minska elanvändningen inom bebyggelsesektorn.

Före denna rapport har aktuell kunskapsnivå och dokumenterade erfarenheter, i Sverige och utomlands, sammanställts i en nulägesbeskrivning, *State of Art*. Nulägesbeskrivningen behandlar system med mark (jord/berg) som värmekälla till en värmepump och system med frikyla kopplat till mark. Med en internationell överblick beskrivs olika typer av markvärmväxlare med prestanda samt hur de kan installeras och dimensioneras. Nulägesbeskrivningen innehåller också en översiktlig ekonomisk analys, liksom beskrivning av driftserfarenheter och miljöaspekter. Med beskrivningen som underlag formuleras utvecklingspotentialen för markvärmeteknik och inte minst system med frikyla, med fokusering på ytjordvärme, frikyla och slutna system.

I framtida utvecklingsarbete ingår flera tvärvetenskapliga frågeställningar vilket förutsätter samarbete i olika former mellan olika aktörer. Vissa installationstekniker behöver studeras närmare, antingen genom egna praktiska försök eller genom att följa genomförandet i andra sammanhang. Medel har sökts för en kommande etapp där avsikten är att etablera och följa några fullskaleprojekt (villor och kontorsbyggnad) under ett antal driftsår.

Målgrupp för rapporten är myndigheter, företag i branschen, organisationer och personer med intresse för energibesparande och miljövänliga markvärmelösningar.

Förslaget till utvecklingsprogram har sammanställts i samarbete mellan Avdelningen för Matematisk fysik, Lunds tekniska högskola (Göran Hellström), Avdelningen för Miljöteknik (Anna Gabrielsson, Gunnel Nilsson och Bengt Rosén) och Avdelningen för Geokonstruktioner (Jan Fallsvik) vid Statens geotekniska institut. Projektledare har varit Bengt Rosén.

Linköping i januari 2002

Innehållsförteckning

Förord	2
Summary	4
Sammanfattning	5
1. Inledning	6
2. Syfte	6
3. Värme och kyla med och utan värmepump	7
4. Markvärmväxlare	8
4.1 Horisontell och kompakt installation	8
4.2 Vertikal installation	10
5. Geologiska och geotekniska förutsättningar	12
6. Markvärmväxlares termiska prestanda	14
7. Dimensionering	15
8. Drift och underhåll	16
9. Markvärme och miljö	17
10. Ekonomi	19
11. Sammanställning av bedömd utvecklingspotential	20
Referenser	21

Summary

Ground heat systems usually consist of a heat pump, with an evaporator connected to a heat carrier circuit of heat exchangers in the ground, and a condenser connected to the heat distribution system inside the building (radiators, fan convectors, floor heating etc). The heat pump's compressor is connected to the electricity grid. Similar systems without heat pumps are also used, where the excess heat from the building or process is exchanged with the cooler ground solely by circulation of the heat carrier fluid in the ground heat exchangers, so called "free cooling".

The performance of ground heat systems depends on several factors. There is a continuous development of components and their interaction in heating/cooling systems, both in Sweden and abroad. Based on the current state of the art of ground heat systems and the national energy market it is possible to identify the development potential within many areas.

In this report the development potentials for ground heat systems are presented in the following program areas:

- Combined heating/cooling systems with or without heat pumps and improvements of existing systems.
- Horizontal, compact and vertical ground heat exchangers, installation methods.
- Geological prerequisites and geotechnical impact of heating and/or cooling.
- Thermal capacity of all types of ground heat exchangers including moisture transport effects.
- Design specifications for different types of ground heat exchangers and ground conditions.
- Operation and maintenance.
- Environmental impact, e.g. of heat carrier fluids and local government environmental protection requirements.
- Economic optimization based on verified technical performance and cost figures.

Sammanfattning

Markvärmesystem är oftast uppbyggda av en värmepump, med förångare kopplad till en värmebärarkrets bestående av markvärmeväxlare i marken, och kondensor kopplad till byggnadens interna värmedistributionssystem (radiatorer, fläktkonvektorer, golvvärmeslingor m m). Värmepumpens kompressor är ansluten till elnätet. Det finns också system utan värmepump där överskottsvärme från byggnader/processer värmväxlas mot den svalare marken endast genom cirkulation i markvärmeväxlaren, s k frikyla.

Hur väl markvärmesystemen fungerar beror av en rad faktorer. Det pågår en utveckling av ingående komponenter och dessas samverkan i värme/kylsystem, både i Sverige och utomlands. Med ledning av det rådande kunskapsläget på markvärmeområdet och den svenska energimarknaden går det att identifiera en utvecklingspotential inom flera delområden.

I denna rapport anges utvecklingspotential för de delar som berör marken, fördelat på följande programområden:

- Kombinerade värme/kylsystem med/utan värmepump, effektivisering av befintliga system.
- Horisontella, kompakta och vertikala markvärmeväxlare, installationsmetoder.
- Geologiska förutsättningar och geoteknisk påverkan vid värmning och/eller kylning.
- Markvärmeväxlars termiska prestanda, för alla typer av markvärmeväxlare och med hänsyn till fukttransport.
- Dimensioneringsanvisningar för olika typer av markvärmeväxlare och markförhållanden.
- Drift och underhåll.
- Miljöpåverkan, t ex värmebärarvätska och kommunalt miljöskydd.
- Ekonomisk optimering baserat på faktiska förhållanden vad beträffar tekniska prestanda och kostnader.

1. Inledning

System som utnyttjar jord, berg, sjöar och andra vattendrag samt grundvatten för uppvärmnings- eller kyländamål blir allt vanligare. För t ex en elvärmd villa innebär värmewäxling mot jorden/berggrunden väsentligt mindre elanvändning. I normalfallet kan man räkna med en halvering av den totala elförbrukningen (inkl. hushållsel) efter installation av en markvärmepump för uppvärmning och varmvatten.

Samtidigt ökar behovet av komfortkyla. Ökad efterfrågan av komfortkyla kan på villamarknaden med fördel lösas genom direktväxling mot den kallare marken, s k frikyla (utan värmepump). Kontorsfastigheter behöver i ökad omfattning komfortkyla för att motverka kontorets egen värmeavgivning. Kylning är också av intresse för industrin, processkyla, där den värmealstrande processen kan kopplas till mark, antingen i ett system tillsammans med värmepump/kylmaskin, s k kompressor-kyla, eller i ett system utan värmepump.

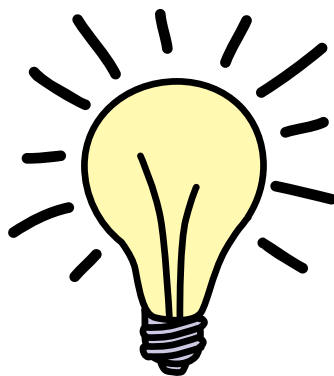
Av de markvärmesystem som installeras idag dominerar bergvärme medan ytjordvärme installeras till mindre del. Andelen ytjordvärmesystem bedöms kunna öka och har sin fördel där det finns mäktiga jordlager. I normalfallet läggs en rak horisontell slang ut i diken på tomten. Från 60 m² upp till 360 m² markyta krävs för en normalstor villa (värmebehov 15 000 kWh) men det finns ytjordvärmesystem anpassade till områden där tillgängligt utrymme för markvärmeväxlaren är begränsat.

Rådande kunskapsläge på markvärmeområdet med erfarenheter inom Sverige och utomlands har sammanställts i en nulägesbeskrivning, med koncentration på slutna system och markvärmeväxlare i jord (Rosén et al, 2001). Med nulägesbeskrivningen som underlag bedöms utvecklingspotentialen. Den bedöms utifrån svenska förhållanden men baseras delvis på erfarenheter och studier från utlandet. En avgränsning är gjord så att rapporten enbart behandlar slutna system, där en vätska cirkulerar i ett slangsystem som står i kontakt med jord eller berg.

2. Syfte

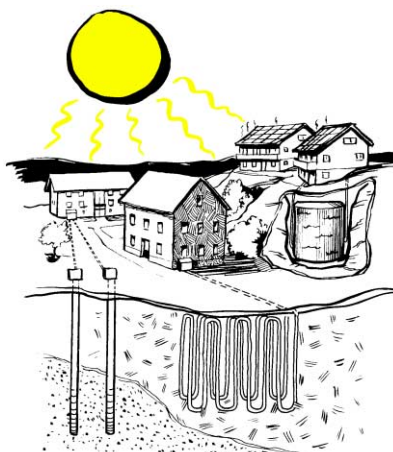
Syftet med denna rapport är att bedöma utvecklingspotential för system med markvärmeväxlare i jord, med och utan värmepump (frikyla).

Det övergripande syftet är att utveckla ny markvärmeteknik för effektivare elanvändning inom bebyggelsesektorn.



3. Värme och kyla med och utan värmepump

I ett markvärmepumpsystem tar man tillvara solenergi lagrad i marken. Jord och berg är relativt stabila värmekällor ur temperatursynpunkt. Marktemperaturen avviker på ett gynnsamt sätt från uteluftens temperatur, vilken ofta styr bostads- och kontorsfastigheters energibehov för klimatisering. Under vintern är markens naturliga temperatur varmare än uteluftens och under sommaren är den kallare.



I värmepumpen cirkulerar en vätska, ett köldmedium. Genom att förändra trycket kan man manipulera (sänka) kokpunkten för vätskan. Temperaturen på den gas som bildas vid förångningen höjs ytterligare genom att öka trycket. I kondensorn avges värmen genom värmeväxling till byggnadens värmedistributionssystem. Genom denna process är det möjligt att utnyttja en värmekälla som har relativt låg temperatur. Vid kyl drift blir processen den omvända.

Det finns i princip två typer av system där marken utnyttjas för att erhålla komfortkyla. En möjlighet är frikyla som innebär att byggnaden kyls genom att överskottsvärmen värmeväxlas mot den kallare marken utan drift av värmepump. På så sätt åstadkoms också en återladdning av den nedkylda, och i vissa fall frysta marken, inför nästa uppvärmningssäsong. Den andra varianten är att i ett system med värmepump/kylmaskin, s k kompressorkyla, avge producerad överskottsvärme till marken. För ett enfamiljshus utgör eventuell installerad komfortkyla en mindre del jämfört med värmebehovet. För ett kontorshus är komfortkylabehovet ofta av samma storleksordning som värmebehovet. Effektbehovet för komfortkyla kan dock vara relativt

stort på grund av att kylbehovet präglas av stundtals hög kortvarig effekt. Det kan vara intressant att komplettera befintliga system, som enbart används för värmning, till att även omfatta frikyla eller kompressorkyla.

En kombination av värmepumpdrift på vintern och frikyla på sommaren ger teoretiskt sett ett optimalt system, vinterns värmepumpdrift kyler ner marken och levererar värme medan sommarens frikyla sänker

inomhustemperaturen och värmer upp marken inför den kommande vintersäsongen. Väl dimensionerat och balanserat ur värmesynpunkt är det möjligt att få jämvikt i energiflödet så att det, räknat på ett helt normalår, inte sker något energiuttag ur marken. Vertikala markvärmeväxlare kräver ofta någon form av artificiell återladdning för att inte åstadkomma en kontinuerlig drift av marktemperaturen och för att reducera installationskostnaden.

Utvecklingspotential

- Ökad tillämpning av kombinationen värme och kyla för villor och kontorshus.
- Komplettering av befintliga markvärmepumpar till komfortkyla.
- System för kostnadseffektiv återladdning av markvärmeväxlare (med värme eller kyla).

4. Markvärmväxlare

För att utvinna/lagra termisk energi i mark anläggs en markvärmväxlare mellan värmepumpen och värmekällan (marken). Markvärmväxlaren består normalt av en plastslang, som installerats i marken. I slangen cirkulerar en värmebärarvätska, som svarar för värmewäxling mellan huset och omgivande jord eller berg. Utformningen av markvärmväxlaren varierar beroende på var och hur den installeras, i berg eller jord respektive horisontellt eller vertikalt.

Som slangmaterial används oftast polyetenrör (PEM tryckklass 6,3). I Sverige är dimensionerna 32 eller 40 mm ytterdiameter vanligast. Slangen fylls med en värmebärarvätska, vanligen vatten och etanol, eller annat frostskyddsmedel, med frysskydd ner till -10 à -15 °C.

Det finns många sätt att placera en markvärmväxlare i marken. I jord förekommer horisontella och vertikala installationer med raka slangar eller slangar i spiral. En spiralförmad markvärmväxlare har exempelvis liknande egenskaper som flera (fyra st) raka slangar, på olika nivåer, i samma dike.



4.1 Horisontell och kompakt installation

Tekniker för att installera markvärmväxlare *horisontellt* är, t ex schaktning med grävmaskin och manuell läggning av slangar, direktläggning av slang (läggbox) med plog eller fräs, styrd borrhning eller användning av jordraketen. Idag är det vanligast att markvärmväxlare installeras på ca 1 m djup genom schaktning med grävmaskin samt genom plogning.

Schaktning med grävmaskin kan användas vid installation av slang för flertalet jordförhållanden.

Fräs, typ kedjegrävare, är liksom plog en konkurrenskraftig metod för horisontell slanginstallation i silt- och sandjordar respektive ler- och siltjordar. Vid fräsning eller plogning kan en eller flera slangar installeras på avsedda nivåer via läggarrör (eller en läggbox) som dras genom jorden direkt efter fräskedjan eller plogbladet. Möjligheten att samtidigt installera flera slangar över varandra är ett sätt att effektivisera installationen. Flera slangar kan också installeras samtidigt, ovanför varandra, längs fåror mellan två i förväg uppgrävda diken med en läggbox monterad på en teleskopisk arm som i sin tur är monterad på en grävmaskin.

Styrd borrhning kan med sin höga installationskapacitet vara intressant vid installation av större slangsystem.

Vid användning av jordraketen kan markvärmväxlarslangarna installeras i ”zick-zack” mellan två parallella på förhand uppgrävda diken placerade i vardera änden av området för markvärmväxlarna. Metoden har troligen aldrig använts för installation av markvärmväxlare.

Fördelarna med installation av markvärmewäxlar slangar genom direktläggning genom plogning och fräsning samt genom styrd borrhning och jordrakat är att markskadorna blir betydligt mindre än vid konventionell schaktning. Erfarenheter från direktläggning av andra typer av ledningar (elkablar, centralantennskablar samt gasledning) påvisar även att entreprenaden blir billigare.

”Slinky” är varunamnet för en typ av markvärmewäxlare som läggs som en spiral i diken i syfte att öka kapaciteten per dikesmeter. Slinky kan antingen installeras stående vertikalt eller lutande längs diken eller liggande horisontellt längs dikesbotten. Slinkys spiralform gör att den kan dras ut eller komprimeras beroende på kapacitet och behov. Dikeslängden minskar därigenom med 2/3-delar till 1/3-del jämfört med dikeslängden för konventionella 2-nivå system med raka slangar.

Slinky utvecklades i Kanada i slutet på 1980-talet och används i Nordamerika, i delar av Europa (England, Frankrike, Tyskland och Italien) samt i delar av Asien. Slinky har dock inte testats i Sverige. Stora delar av Kanada och norra USA har liknande klimat- och markförhållanden som Sverige, vilket talar för att Slinky även lämpar sig för svenska förhållanden.

Markvärmewäxlare typ ”Slinky” skulle öka möjligheten till utnyttjande av markvärme/markkyla eftersom den kräver betydligt mindre yta än konventionella horisontella system, och möjligen är mer effektiv eftersom större mängd jord aktiveras. Vad gäller installation, är det lättare att installera en Slinky jämfört med att installera 2- eller 4-lager slangar över varandra. ”Slinky” borde kunna bli intressant på marknaden, för såväl små enfamiljshus, skolor som för större kommersiella byggnader (affärscentra, industrier, sjukhus etc). Effekterna av frysning och återladdning med Slinky är frågor som först bör klarläggas.

För stora system kan Slinky läggas ut platt på en större avschaktad yta och därefter jordtäckas med hjälp av bulldozer. Detta kan bli kostnadseffektivt om annan bearbetning av mark-ytan är planerad i området. En annan mer innovativ metod, som ej provats i praktiken, bygger på successiv schaktning, installation av slangen i utdragna spiraler, och återfyllning av material som tas från den efterföljande schakten. Det finns också mer ovanliga entreprenadmaskiner. Möjligen kan Slinky-spiraler installeras med hjälp av en V-formad läggbox/plog. Slinky förs härvid kontinuerligt ned i läggboxen, i det ena av V:ets skänklar.

Utvecklingspotential

- Installationsmetod/utrustning för spiralformad slang i svenska jordar, små och stora objekt.
- Installationsmetod/utrustning för flernivåslangar, små och stora objekt.

4.2 Vertikal installation

De metoder som används för att installera markvärmväxlare *vertikalt* kan indelas i tre grupper:

- håltagning och nedföring av slangar i jord,
- borrhning i berg och jord samt
- energipålar.

Metodernas användbarhet beror av rådande jord- och bergförhållanden. I lös lera går det t ex att trycka ned slangen direkt i jorden. I andra fastare och grövre jordar, såsom fast lera, silt och sand, kan det krävas neddrivning med tung utrustning eventuellt i kombination med spolning och vibrering, eller installation av slangen i förborrade hål.

I lös lera finns en metod att ”sy ned” slangen i långa kontinuerliga sektioner. Slangen anbringas mot ett installationsverktyg försett med en infällning som håller slangen på plats under nedpressningen. Vid avsett installationsdjup tas verktyget upp och slangen, som nu har formen av ett U, blir kvar i marken. Installationsfordonet utgörs av ett geotekniskt sonderingsfordon, eller liknande med hydraulisk borrhigg. Verktyget kan inte penetrera den översta fastare jordskorpan, vilket innebär att installation måste förberedas genom håltagning eller grävning av slits genom denna.

Metoden har anpassats till fast varvig lera. Den nedre delen av verktyget formades då spetsig för att underlätta genomträngning och på neddrivningslansen monterades en fixring som håller in slangen närmare lansen så att friktion mot slangen minskar.

Andra metoder för håltagning bygger på att slangen skyddas under neddrivningen, eller att den monteras i förborrade hål. I sandig jord har installation utförts med en vertikal, vibrerande lans försedd med längsgående spår och en skyddssko i botten som skyddar slangen vid neddrivningen, och med spolkanaler som mynnar i botten på lansen. Installation i lera har också utförts med slangen skyddad inuti en ihålig påle, försedd med en bottenplatta.

Vid avsett installationsdjup sköts bottenplattan ut och slangarna fixerades av den inträngande leran.

Flertalet bergvärmehörsbrunnar i Sverige utförs med sänkhammarborrning, med luftdriven hammare. Borrningen genom de övre jordlagren och ett par meter ned i berget utförs med foderrör. Vid sänkhammarborrning alstras stötvågor med hög frekvens i direkt anslutning till borrkronan i botten på borrsträngen, så att borrkronan fås att slå och rotera. I USA m fl länder är det vanligt att använda rotationsborrning med direktspolning eller sk hollow-stem auger genom både jord- och berglagren. Dessa metoder anses svårhanterade till energiborrning i svenska jordar beroende av svårigheten att erhålla stabila borrhål. Det finns exempel på att stående slangspiraler installerats i jord i borrhål med stor diametern, uppskattningsvis 0,6–0,8 m. Borrhållängden har varierat mellan 6–9 meter. I t ex Tyskland och USA återfylls alltid borrhålet med exempelvis lösgjort material från borrhningen eller cement- eller bentonitbaserade blandningar, bl a för att skydda grundvattnet mot föroreningar och för att förbättra den termiska värmeöverföringen mellan slangen och omgivande berg. Borrningsteknik i berg används för närvarande för jämförelser med jordvärmesystem. Det kan finnas utvecklingspotential, vilken inte har bedömts i detta projekt.

Den tredje varianten av vertikal markvärmväxlare som presenteras här, är energipålen. Energipålen kombinerar behovet av pålgrundläggning med behovet av ett värme-kylsystem för en byggnad. Den består ofta av värmväxlarrör monterade på armeringen i en plastgjuten betongpåle. Med energipålens hjälp erhålls värmeväxling mellan byggnadens inomhusklimat och jorden under byggnaden. Energipålar har byggts i många mellaneuropeiska länder. För att energipålar ska börja användas i Sverige, enligt den teknik som förekommer i Mellaneuropa, krävs att marknaden för in-situ gjutna pålar ökar, eller att pålens längd kan bestämmas i förväg för det aktuella objektet. Pålens primära funktion får inte heller försämrast.

Direkt nedpressning av slang har visat god installationskapacitet till relativt låg installationskostnad i lös lera. Fördelarna med denna metod är främst:

- håltagning och nedföring av slang sker i samma moment
- installationen sker kontinuerligt vilket minimerar behovet av kopplingar/kopplingsarbete
- mindre markyta krävs jämfört med om en rak slang läggs horisontellt
- större effektuttag per yta jämfört med en rak horisontell slang

Erfarenhet av metoden i Sverige finns endast i lös lera. Frågan är vilka jordar som sätter gränsen för metodens användande. Nedtryckningskraften fördubblas t ex vid nedpressning i en fast torrskorpa med skjuvhållfastheten 40 kPa jämfört med en normalfast lera med skjuvhållfastheten 20 kPa. Denna nedtryckningskraft kan dock åstadkommas med de flesta borrhögar, men installationsverktyget måste anpassas därefter. I USA har man visat att en fixring som håller in slangen kraftigt reducerar slangfriktionen under neddrivningen. Vidare underlättas genomträngning om installationsverktygets nedre del är spetsig.

Metoden bygger på att nedpressning startar från botten av en grävd slits/borrhål genom den övre fastare torrskorpan. Det är intressant att undersöka möjligheten att komplettera utrustningen så att slitsgrävning med separat grävmaskin undviks.

Samtliga ovan beskrivna metoder för håltagning och nedföring av slang i jord har utförts med slangdiametrar mindre eller lika med 25 mm, och med värmelager i åtanke. I jordvärmesammanhang används vanligen slangdiameter 40 mm, eller i andra hand 32 mm. Enligt svensk standard är minsta böjningsradie $24x d_y$, vilket innebär att den är 960 mm (eller diameter 1,9 m) för en 40 mm slang. I praktiken är dock minsta böjningsradien för en 40 mm slang betydligt lägre, kanske bara 30 % av standardvärdet, vilket

innebär att installationsverktyget behöver vara ca 0,6 m i diameter. Alternativt sammanfogas två slangar i ena änden (botten) på fabrik innan installationen, vilket dock fördyrar markvärmväxlaren.

Lös lera bör inte frysas för att undvika de stora sättningar som uppstår i samband med tining. Detta är särskilt viktigt att beakta vid användning av energipålar, eftersom redan små sättningar får stora konsekvenser. Är det möjligt att uppnå ett kostnadseffektivt system som inte förutsätter fryssning av omgivande mark? Vid vertikal installation av markvärmväxlaren försvåras den naturliga återladdningen från markytan, efter uppvärmningssäsongen, av jorden runt markvärmväxlarna. Det är en fördel om systemet utformas för både värme och kyla. Återladdning av marken under sommarhalvåret sker genom att överskottsvärme från byggnaden tillförs den kallare marken.

Utvecklingspotential

- Metod för direkt nedpressning i andra jordar än lera.
- Anpassning av metod direkt nedpressning till 32/40 mm PEM-slang.
- Boringsteknik med stor diameter i jord.
- Energipålar. Anpassning för svenska förhållanden.
- Metoder för återfyllning, som medel att stärka miljöskyddet.

5. Geologiska och geotekniska förutsättningar

Jordmäktighet

Områden där berggrunden går i dagen är mycket vanliga i Sverige och jordtäckets mäktighet är totalt sett därför relativt blygsamt – normalt från några få meter upp till ett tiotal meter. Jordmäktigheten kan variera snabbt inom ett kort avstånd. Det största kända jorddjupet är ca 200 m.

Moränlager är vanligtvis några få meter men kan på vissa platser ha mäktigheter på upp till åtskilliga tiotals meter. Sand- och gruslagrens mäktighet i rullstensåsar och större deltaområden är ofta några tiotals meter men inte sällan upp till 50 m eller mera. Mäktigheten hos lerlager är vanligen 5-10 m men kan uppgå till omkring 100 m. Sedimentlager bestående av sand, silt och till viss del lera förekommer med mäktigheter upp till 50 m eller mera.

De flesta bebyggelsecentra är belägna på slättområden, längs kuster och älvdalar där jordmäktigheten kan vara åtskilliga meter.

Termiska egenskaper

Kornen (fasta partiklar) leder värme bra och vatten leder värme bättre än luft. Vid t ex liten porositet, dvs liten volymandel porer i förhållande till hela volymen, ligger kornen nära varandra vilket gör att värmeförledningsförmågan blir hög. En ökning av vattenhalten leder i regel till en



ökning av värmeledningsförmågan eftersom vatten med relativt högre värmeledningsförmåga ersätter luft med sämre värmeledningsförmåga i porerna. En reduktion av vattenhalten kan leda till en ökning eller minskning av värmeledningsförmågan beroende på om jorden komprimeras, med reducerad porvolym som följd, respektive om jorden behåller sin struktur så att porvattnet ersätts med luft. Förutom vattenhalt och porositet beror värmeledningsförmågan på mineralsammansättningen. Halten kvarts har störst betydelse. Värmeledningsförmågan för en kristallin bergart ökar med ca 0,5 W/m,K för varje 10-procentig ökning av kvartshalten (Sundberg, 1991).

Grovkorniga jordar kan vara goda värmeledare om jorden innehåller stor andel vatten. En torr grovkornig jord leder värme betydligt sämre än en fuktig. Finkorniga jordar leder värme bättre än torra grovkorniga jordar. Om det lätt bildas klumpar av den finkorniga jorden kan det däremot innebära att man måste fylla med annan jord med lägre finkornighet runt slangen så att luftfickor undviks. De bästa jordarna ur värmeöverförings synpunkt är sandiga eller leriga blandjordar av sand/lera/silt, och möjligen sandiga leror. Man bör dock vara observant på att värmeöverföringen i sandiga jordar är starkt beroende av grundvattenytans läge. Fuktig jord leder alltid värme bättre än torr jord.

Bestämning av jords och bergs termiska egenskaper kan ske genom att:

- från jord- och bergartsklassificering (geologiska kartblad, utförda borrhinar) använda tabellerade värden,
- beräkna egenskaperna med kännedom om jordens eller bergets sammansättning,
- mäta i fält eller laboratorium med någon fält eller laboratoriemetod,
- utföra termiskt responstest av markvärmeväxlare in situ.

Tjälbildning

System med markvärmepump dimensioneras ofta så att jorden närmast markvärmeväxlarledningarna fryses. Frysning av marken på grund av för högt uttag av värme kan medföra sättningar. På vintern utgörs problemen främst av tjällyftning/deformationer, sprickbildning, frysning av vatten i ledningar, svårigheter med schaktningsarbeten etc. På våren när tjälen går ur marken kan problem uppstå som nedsatt bärlighet, permanent lyfta konstruktioner, stora sättningar, ojämna sättningar etc. Sättningar vid eller omkring markvärmesystemet kan ge effekter både på systemet och på närliggande byggnader.

Till vilken grad en naturlig mark fryser är beroende av dess termiska egenskaper, fuktinnehåll och temperaturen i omgivningen, där fuktinnehållet är av störst betydelse. Leriga jordarter har större isolerande (värme)egenskaper än siltiga och sandiga jordarter och kan hålla mer fukt. Vid bildning av tjäle och islinser fryser vattnet i porsystemet, vilket leder till att undertryck i porerna uppstår i närheten av frysfronten. När vatten fryser ökar dess volym vilket leder till tjällyftning. När tjälen går ur marken, när islinser börjar smälta, kommer det vatten som sugits ut ur jordens porsystem ge upphov till en volymminskning, sättningar uppstår. I samband med tjällossningen uppstår också en betydande hållfasthetsminskning i de flesta jordar.

Det här förloppet med både volymökning och volymminskning är mest markant under de första frys- och tiningscyklerna som en finkornig jord utsätts för. Efter upprepade cykler blir jorden delvis tjälresistent. Det finns inga modeller för i vilken grad dessa skador och deformationer förändras med tiden, eller i vilken grad hållfastheten förändras med tiden. Det finns ett behov av ökad kunskap inom detta område för att förebygga problem.

Beroende på markvärmeväxlarens utformning och installationsmetod kan marken uppträda olika vad gäller frysning och tining. Påverkan på markvärmeväxlarens varierar därmed. Vid

värmedrift tas som bekant värme från marken, vid kyldrift sker det omvända, dvs. värme förs från byggnaden till marken. Avkylning kan även ske genom naturkyla, vilket innebär att värmen i marken, som normalt inte är varmare än +4 °C till +6 °C, distribueras ut i byggnaden utan föregående kompression och temperaturökning i värmepumpen. Oavsett typ av system uppkommer fuktvandring i marken som vid uppvärmning kan bidra till att islinser bildas vid och kring markvärmeväxlarna, och som vid avkylning kan bidra till att jorden kring markvärmeväxlarna torkar ut. I båda fallen finns risk för deformationer.

Utvecklingspotential

- Bestämning av termiska egenskaper vid stora objekt.
- Klassificering av jordar ur markvärmesynpunkt.
- Förändring av jordars egenskaper vid upprepade frysning och tining av tjälfarliga jordar.
- Påverkan på fuktvandring vid värme och kyla.

6. Markvärmväxlarens termiska prestanda

Uttag och tillförsel av värme till marken sker via en markvärmväxlare, vilken vanligtvis består av ytligt förlagda horisontella slangar eller vertikala slangar placerade i borrhål.

Värmeöverföringen mellan den cirkulerande fluiden i markvärmväxlaren och omgivande mark kräver en viss temperaturdifferens. Denna temperaturdifferens beror på samverkan av ingående komponenters värmeöverförande egenskaper, t ex värmeöverföring mellan fluid och slangens insida, värmemotstånd i slangväggen, kontaktmotstånd mellan slangens yttervägg och omgivande material, och i omgivande material.

Värmetransporten utanför slangen sker, i ett förhållandevis homogent material, i huvudsak genom ren värmeledning. Villkoret uppfylls av erfarenhet relativt väl i berg och vattenmätade jordar. I framförallt omättad jord och sprickigt berg kan dessutom konvektiv värmetransport uppstå. Vatten, vattenånga och luft transporteras då i hålrum/porer i marken vid tryckskillnader på grund av varierande grundvattennivåer och vattentemperaturer, vid tillförsel av värme och kyla. Skillnader i ångtryck i en omättad jord kan även ge upphov till fukttransport i porerna, vilket även påverkar värmeöverföringen i marken.

En termisk analys av ytjordvärmväxlare bör utföras med hänsyn till tjälbildning och snötäcke. Den temperaturdifferens som krävs mellan fluid och omgivande mark för att överföra en viss värmeeffekt per meter markvärmväxlare bestäms av det totala värmemotståndet mellan fluid och mark. För t ex ett borrhål i berg beror motståndet på hur strömningsskanalerna utformas, återfyllnadsmaterial och termiska egenskaper för berörda delar. Motståndet bör vara så lågt som möjligt.

Värmeflödet kring markvärmväxlaren styrs av markens vatteninnehåll. Fukt transporteras vid tryckskillnader eller värmetransport, i omättad mark främst i ångfas. Vid högre fuktinnehåll dominerar vätskeströmning i grövre jordar som transportsätt. När systemet används för kylning (sommaren) avgår värme till marken. Den temperaturgradient som uppstår gör att fukt tvingas bort från marken närmast markvärmväxlaren så att värmeutbytet mellan markvärmväxlare och mark blir sämre. Det omvända inträffar när systemet används för uppvärmning (vintern). Fukt transporteras mot det kallare området (markvärmväxlaren) med risk för att islinser bildas och hävningseffekter.

Utvecklingspotential

- Fukttransport i jord kring markvärmväxlaren och påverkan på värmeutbytet.
- Utveckling av simuleringsmodell för spiralformad markvärmväxlare – Slinky.

7. Dimensionering

Syftet med dimensionering av markvärmesystem är att säkerställa att villkor för goda tekniska och ekonomiska driftsförhållanden är uppfyllda under systemets livstid. Markvärmesystem dimensioneras m.h.a. enkla tumregler, tabeller, dimensioneringsprogram eller detaljerade simuleringar av energisystemens komponenter och dessas samverkan.

Valet av effekttäckningsgrad påverkar i hög grad värmepumpens storlek och dess drifttid. Den ur ett ekonomiskt perspektiv mest lämpliga effekttäckningsgraden anses för närvarande ligga i intervallet 50 – 60 % för svenska enfamiljshus med markvärmepump. Värmepumpen levererar då ca 90 % av energibehov med en drifttid på 3 200 – 4 000 timmar per år. För system där värmepumpen täcker hela effektbehovet (monovalent system), vilket är vanligt i Mellaneuropa är drifttiderna så låga som 1 800 timmar.

Svensk dimensioneringspraxis utgår från KYS faktablad (1999). Maximalt värmeuttag per meter slang beror av effekt- och energitäckning, värmepumpens drifttid och jordtyp, vilken är indelad i tre huvudtyper. Möjlig utvunnen värmeeffekt är vanligen 20 – 30 W per meter slang då slangens diameter är 40 mm utvändigt. Tyska VDI har tagit fram en dimensioneringsnorm för värmepumpinstalleringar under 30 kW värmeeffekt. För större anläggningar rekommenderas datorbaserade dimensioneringsprogram som tar hänsyn till termisk influens. Om en markvärmeväxlare ligger inom området för termisk influens från en eller flera andra markvärmeväxlare resulterar detta i en lägre värmebärartemperatur än om den varit opåverkad.

Möjlig utvunnen värmeeffekt (W/m) beror på hur markvärmeväxlaren är utformad. Jämfört med en rak slang erhöles t ex 60 % mer energi per meter dike från ett tvåslangssystem, i en amerikansk studie. IGSHA⁽¹⁾ (1995), USA, anger i sin installationsmanual att en kompakt Slinky reducerar dikeslängden med ca 2/3 jämfört med ett tvåslangssystem med slang på 1,2 m och 1,8 m djup. En utdragen Slinky reducerar längden med ca 1/3 jämfört med ett sådant tvåslangssystem.

Utvecklingspotential

- Dimensioneringsanvisningar för kompakta markvärmeväxlare för svenska förhållanden.
- Tydligare dimensioneringsanvisningar med avseende på olika jordars termiska egenskaper.



⁽¹⁾ International Ground Source Heat Pump Association

8. Drift och underhåll

Värmepumpens kapacitet är starkt beroende av temperaturen hos värmekällan (mark) och värmesänkan (byggnaden). För att uppnå hög effekt och värmefaktor skall värmebäraren ha hög temperatur och husets distributionssystem låg temperatur. För att uppnå god kylfaktor är det däremot viktigt att distributionssystemet för kyla håller hög temperatur. Positiva effekter av värme-/kylsystem är främst energi- och kostnadsbesparingar.

Driftstörningar som kan uppstå är t ex driftstopp på grund av luft/partiklar i rörsystemen, bakterietillväxt och buller. Felaktig dimensionering kan ge permafrost, omgivningspåverkan genom nedsatt biologisk aktivitet och markdeformationer.

Ett korrekt dimensionerat system har i princip obegränsad livslängd med avseende på att leverera värme. Ingående komponenter kräver dock skötsel och efterhand utbyte. Systemägaren bör regelbundet kontrollera att anläggningen har föreskrivet övertryck. För att ha kontroll på systemets ekonomi är det klokt att föra dagbok över bl a elförbrukning och temperaturer. Om systemet inte håller utlovade prestanda behövs förmodligen en justering av olika inställningar.

En kompressor behöver normalt service vartannat år och byte efter 15 – 20 år. Även värmepumpen i övrigt behöver service ca vart tredje år. Livslängden på markvärmeväxlaren uppges normalt vara ca 100 år. Generellt finns få studier av markvärmesystems behov av underhåll.

Utvecklingspotential

- Övervakningssystem för automatisk registrering av el och temperatur, inkl larmfunktion.
- Metod för att förebygga, finna och åtgärda läckage/veck på markvärmeväxlare.

9. Markvärme och miljö

En följd av den ökade försäljningen av energibrunnar är uppmärksamheten på möjlig negativ påverkan på grundvattnet, om inte vissa försiktighetsåtgärder vidtas. Normbrunn 97 (revideras årsvis) är en sammanställning över de krav som bör uppfyllas för att ”säkerställa en väl fungerande energikälla till kunden samt minimera riskerna för påverkan av naturresursen grundvatten vid utförande av en energibrunn” (www.sgu.se, 2001). Någon motsvarande norm finns inte för installation i jord, men direkt överförbart från Normbrunn 97 till installationer i jord är bl.a. kraven på material och installationsutförande med syfte att minimera risken för läckage av värmebärande och tryckfall i markvärmväxlersystemet. Borrhålsborrning och dikesgrävning utgör en risk för spridning av vätska mellan olika grundvattenmagasin varför tätning kan bli aktuellt.

I Naturvårdsverkets rapport 4994 beskrivs kortfattat tillstånds- och anmälningsskrav som gäller enligt Miljöbalken för installation och drift av värmesystem med värmepump (Lindborg, 1999). I Brunnsborrarhandboken (Avanti, 1996) beskrivs lagar och förordningar som man bör känna till vid brunnsborrning liksom miljöpolicy och kvalitetssäkring med avseende på brunnsborrningsarbeten. Markvärmesystem med värmepump skall anmälas till kommunens miljö- och hälsoskyddsområde. Vid energiborrning gäller också uppgiftsskyldighet till SGU:s brunnsarkiv.

Den miljöbelastning som markvärmesystem kan medföra omfattar termisk förändring i marken, hävning, marksättning, buller från kompressorer och fläktar, byggstörningar, utsläpp av för naturen främmande ämnen (frostskyddsmedel och korrosionshämmare i



värmebärandevätskan, och icke miljöanpassade oljor), samt resursanvändning i form av material, mark och energi. Emissioner från den elproduktion som krävs för drift av värmepumpen är starkt beroende av hur elen produceras. El producerad i vattenkraftverk innebär t ex mindre miljöbelastning än importerad el producerad i koleldade kondens- och kraftvärmeverk. Det pågår en utveckling av metoder med syftet att kunna jämföra olika värmesystems miljöpåverkan. I allmänhet förknippas markvärmesystem med låg miljöbelastning.

Utveckling har skett och sker vad gäller t ex frostskyddsmedel. Tidigare användes det mycket toxiska metanolet på grund av dess fördelaktiga termiska egenskaper. I Sverige rekommenderas för närvarande naturligt framställd etanol, men forskning pågår för att få fram ännu bättre frostskyddsmedel, som samtidigt är miljövänliga.

Tidigare har freoner används som köldmedium i själva värmepumpen. Freoner är dock förbjudet på grund av dess effekt på ozonlagret, och har i flertalet fall ersatts av olika typer av fluorhaltiga kolväten (HFC). HFC har inte någon effekt på ozonlagret men kan påverka växthuseffekten. Det satsas i Sverige och i övriga Europa på att utveckla naturliga köldmedier som inte ska ge någon miljöbelastning alls.

Minsta möjliga miljöbelastning bör eftersträvas. Hydrauloljor som är biologiskt nedbrytbara bör användas i installationsmaskiner (Svensk standard 15 54 34, Hydraulvätskor – Krav och provningsmetoder). Borrhålsborring och dikesupptagning utgör en risk för spridning av vätska mellan olika grundvattenmagasin varför man i många länder tillämpar obligatorisk återfyllnad.

Utvecklingspotential

- Omgivningspåverkan, geoteknisk och termisk, på grannfastigheter.
- Rekommendationer för enhetligt miljöskydd i kommunerna vid behandling av anläggningar med markvärmepump.
- Värmebärandevätska som kan accepteras fullt ut ur miljösynpunkt och klarar rimliga tekniska prestanda.

10. Ekonomi

För en normalvilla, med total energiförbrukning 25 000 kWh varav 5 000 kWh hushållsel, beräknas investeringskostnaden för jord- eller bergvärme med värmepump till i storleksordningen 70 000 kr (inkl. moms) om villan har ett vattenburet system (och i storleksordningen 100 000 kr med utgångspunkt direktverkande elradiatorer). Kostnaden för bergvärme är i samma storleksordning som det mest fördelaktiga alternativet med ytjordvärme. Årskostnaden över 20 år (kapital och drift) beräknas till ca 16 000 kr (inkl. moms). Angivna kostnader förutsätter att de geologiska förhållanden är sådana att installation av markvärmesväxlaren kan utföras så rationellt som möjligt.

Med undantag för metoden styrd borrning varierar installationskostnaden (inkl. slang) mellan 8 700 – 25 800 kr (exkl. moms). Lägsta installationskostnaden beräknas för en spiralformad slang. Kostnadsberäkningarna för arbete med spiralformad slang är emellertid osäkra eftersom praktisk erfarenhet saknas i Sverige. Något dyrare blir det med vertikal nedpressning samt läggning med grävmaskin, fräs/kedjegrävare eller plog, av rak horisontell slang alternativt slangar på 2 respektive 4 nivåer.



Jämförelser mot alternativa system visar att årskostnaden (inkl. moms) är lägst för jordvärme, följt av bergvärme (+8 %). Därefter följer värmesystem baserat på fjärrvärme respektive pelletseldning (i medeltal +14 %). Oljeeldning är det i särklass dyraste systemet av de fyra alternativen, ca 47 % dyrare än den mest fördelaktiga beräkningen med markvärmepump. Årskostnaden för en ny elpanna, inkl. elkostnad uppskattas bli omkring 15 % dyrare jämfört med samma system.

Motsvarande beräkningar för större system (kontorshus) innehåller många osäkerheter. I praktiken tillämpas ofta speciallösningar bl.a. beroende på hur mycket av det gamla systemet som kan tas till vara. Investeringskostnaden för en värmepumpinstallation med markvärmesväxlare för uppvärmning och varmvatten är i storleksordningen 300 kr per kvadratmeter uppvärmd yta. Driftskostnad för en värmepump (25 kW) per 1000 m² uppvärmd yta uppskattas till ca 25 000 kr per år. Motsvarande installationskostnad för markvärmesväxlare i jord uppskattas till omkring 70 000 kr (exkl. moms). Markvärmesväxlare av typ borrhål i berg är mellan 75 % och 130 % dyrare än installation i jord.

Utvecklingspotential

- Ekonomisk optimering av markvärmesystem med anpassning till energilast och geologiska förutsättningar.

11. Sammanställning av bedömd utvecklingspotential

Samtliga utvecklingsmöjligheter redovisade i föregående avsnitt är sammanställda i tabellen nedan. Utvecklingsmöjligheter inom varje programområde anges inte i någon särskild prioriteringsordning.

Programområde	Utvecklingspotential
1. Värme och kyla med och utan värmepump	1.1. Ökad tillämpning av kombinationen värme och kyla för villor och kontorshus. 1.2. Komplettering av befintliga markvärmepumpar för komfortkyla. 1.3. System för kostnadseffektiv återladdning av markvärmeväxlare (med värme eller kyla).
2. Horisontella och kompakta markvärmeväxlare	3.1. Installationsmetod/utrustning för spiralformad slang i svenska jordar, små och stora objekt. 3.2. Installationsmetod/utrustning för flernivåslangar, små och stora objekt.
3. Vertikala markvärmeväxlare	3.1. Metod för direkt nedpressning i andra jordar än lera. 3.2. Anpassning av metod direkt nedpressning till 32/40 mm PEM-slang. 3.3. Utveckling av borrhningsteknik i jord, med stor diameter, för markvärme. 3.4. Energipålar. Anpassning för svenska förhållanden. 3.5. Metoder för återfyllning, som medel att stärka miljöskyddet.
4. Geologiska förutsättningar och geoteknisk påverkan	4.1. Bestämning av termiska egenskaper vid stora objekt. 4.2. Klassificering av jordar ur värmesynpunkt. 4.3. Förändring av jordars egenskaper vid upprepad frysning av tjälfarliga jordar. 4.4. Påverkan på fuktvandring vid värme och kyla.
5. Markvärmeväxlarens termiska prestanda	5.1. Fuktkransport i jorden kring markvärmeväxlaren och påverkan på värmeutbytet. 5.2. Utveckling av simuleringsmodell för spiralformad markvärmeväxlare – Slinky.
6. Dimensionering	6.1. Dimensioneringsanvisningar för kompakta markvärmeväxlare för svenska förhållanden. 6.2. Tydligare dimensioneringsanvisningar m.a.p. olika jordars termiska egenskaper.
7. Drift och underhåll	7.1. Övervakningssystem för automatisk registrering av elförbrukning och temperatur, inkl larmfunktion. 7.2. Metod för att förebygga, finna och åtgärda läckage/veck på markvärmeväxlare.
8. Markvärme och miljö	8.1. Omgivningspåverkan, geoteknisk och termisk, på grannfastigheter. 8.2. Rekommendationer för enhetligt miljöskydd i kommunerna vid behandling av anläggningar med markvärmepump. 8.3. Värmebärandevätska som kan accepteras fullt ut ur miljösynpunkt och som klarar rimliga tekniska prestanda.
9. Ekonomi	9.1. Ekonomisk optimering av markvärmesystem, med anpassning till energilast och geologiska förutsättningar.

Referenser

- Avanti (1996).** *BrunnsbörRARhandboken 1996–11–15*. Sveriges AvantibörRARare Förening.
- IGSHPA (1995).** *Closed-Loop Geothermal Systems. Slinky Installation Guide*. National Rural Electric Cooperative Association, Oklahoma State University, International Ground Source Heat Pump Association, Electric Power Research Institute.
- KYS – Kylbranschens Samarbetsstiftelse (1999).** *Energieffektiva kyl- och värmepumpsanläggningar, Faktablad 2: Värmepumpsanläggningar*. (Utgåva april 1999). KYS, Rosenlundsgatan 40, Box 17537, 118 91 Stockholm.
- Lindborg, A. (1999).** *Villavärmepumpar med energi från ytjord/energibrunn*. Rapport 4994. Naturvårdsverket Förlag, Stockholm.
- Rosén, B, Gabrielsson, A., Fallsvik, J, Hellström, G & Nilsson, G. (2001).** *System för värme och kyla ur mark. -En nulägesbeskrivning*. Varia 511. Statens geotekniska institut, Linköping.
- Sundberg, J. (1991).** *Termiska egenskaper i jord och berg*. SGI Information 12. Statens geotekniska institut, Linköping.



Statens geotekniska institut
Swedish Geotechnical Institute

SE-581 93 Linköping, Sweden

Tel: 013-20 18 00, Int + 46 13 201800

Fax: 013-20 19 14, Int + 46 13 201914

E-mail: sgi@swedgeo.se Internet: www.swedgeo.se