

System för värme och kyla ur mark - En nulägesbeskrivning

BENGT ROSÉN
 ANNA GABRIELSSON
 JAN FALLSVIK
 GÖRAN HELLSTRÖM
 GUNNEL NILSSON



STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE

Varia 511

System för värme och kyla ur mark - En nulägesbeskrivning

BENGT ROSÉN, SGI

ANNA GABRIELSSON, SGI

JAN FALLSVIK, SGI

GÖRAN HELLSTRÖM, LTH

GUNNEL NILSSON, SGI

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--01/511--SE
Projektnummer SGI	10445
Dnr SGI	1-9905-0340
©	Statens geotekniska institut

LÄSANVISNING

För att underlätta läsningen av Nulägesbeskrivningen rekommenderas att läsaren först tar del av förord och sammanfattning.

Nulägesbeskrivningen omfattar följande delar:

- Värme- och kylsystem med och utan värmepump
- Markvärmeväxlarens utformning
- Geologiska och geotekniska förutsättningar
- Installationsmetoder för markvärmeväxlare
- Tekniska prestanda och dimensionering av markvärmeväxlare
- Ekonomisk analys
- Miljöaspekter

I texten är definitioner och förkortningar markerade med skuggning, normalt då begreppen uppträder första gången/gångerna. Begreppen förklaras i kapitel 15. Tillstånd att använda bilder från olika Internet-sidor har erhållits från respektive utgivare.

De viktigaste slutsatserna i Nulägesbeskrivningen är:

- Andelen ytjordvärmesystem bedöms kunna öka och har sin fördel där det finns mäktiga jordlager och där det tillgängliga utrymmet för markvärmeväxlare är begränsat.
- Den intressanta delen av fastighetsmarknaden består av villor och kontorsbyggnader. Efterfrågan på komfortkyla kan med fördel lösas med 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. kompressorkyla, eller i ett system utan värmepump.
- En kombination av värmepumpdrift på vintern och direktkyla 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, räknat på ett helt år, det inte sker något energiuttag ur marken.
- System för värme och kyla ur mark måste anpassas till de geologiska förutsättningarna med avseende på främst jordlagerföljd, kornstorlek, vattenmättnadsgrad, termiska egenskaper och förutsättningar för tjälbildning.
- Installationstekniken för horisontella och vertikala system kan utvecklas. Dikeslängden för horisontella system kan göras väsentligt kortare genom att lägga slangen i spiralform alternativt lägga flera slangar i samma dikesschakt.
- Markvärmeväxlarens termiska prestanda kan bestämmas med en termisk analys med utgångspunkt från bl.a. omgivande temperatur och vattenmättnadsgrad.
- Dimensionering av markvärmesystem kan göras från enkla tumregler till detaljerade simuleringar av energisystemets komponenter och dessas samverkan. En noggrann dimensionering av systemet möjliggör optimal utformning (längd) av markvärmeväxlaren.
- 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

samt bakterietillväxt och buller. Felaktig dimensionering kan ge permafrost, omgivningspåverkan i form av nedsatt biologisk aktivitet och markdeformationer.

- För en normalvilla med totalförbrukning 25 000 kWh/år varav 5 000 kWh hushållsel, beräknas investeringskostnaden för jord- och 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). Årskostnaden över 20 år (kapital och drift) beräknas till ca 16 000 kr (inkl moms). Återbetalningstiden för ett system med berg- eller ytjordvärmepump är normalt 7-10 år. Jämförelser med alternativa system visar att årskostnaden 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, omkring 47 % dyrare än den mest fördelaktiga beräkningen med markvärmepump. Årskostnaden för en ny elpanna, inkl elkostnad, uppskattas bli ca 15 % dyrare jämfört med samma system.
- Markvärmesystem innebär generellt låg miljöbelastning jämfört med andra energikällor. Möjliga miljöbelastningar är termisk förändring i marken, hävning, marksättning, buller från kompressorer och fläktar, byggstörningar, utsläpp av för naturen främmande ämnen (värmebärande fluidens korrosionshämmare 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 mindre miljöbelastning än importerad el producerad i koleldade kondens- och kraftvärmeverk.

Projektets fortsättning

Med denna nulägesbeskrivning som bas kommer projektet inriktas mot att etablera närmare kontakter med branschorganisationer för att hitta samarbetsformer. Vissa installationstekniker 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 följa några fullskaleprojekt (villor och kontorsbyggnad) under etableringen av markvärme och ett antal driftsår.

FÖRORD

Denna nulägesbeskrivning är en delrapport inom projektet ”Effektivare elanvändning med markvärmesystem – Utveckling av ny teknik för värme och kyla”.

I Sverige användes år 2000 ca 37 % av den totala slutliga energianvändningen inom bebyggelse- och servicesektorn. Energianvändningen inom denna sektor utgörs till hälften av el (70 TWh). Cirka hälften av Sveriges elproduktion sker från vattenkraft och den andra hälften från kärnkraft. För att klara en situation med mindre kärnkraftsproducerad el vill regeringen minska och effektivisera elanvändningen. Markvärme är en resurs med stora utvecklingsmöjligheter för effektivare elanvändning, både för värme- och kyländamål.

Nulägesbeskrivningen beskriver system med mark (jord/berg) som värmekälla till en värmepump och system med frikyla kopplat till mark. Dessutom beskrivs vilka förutsättningar som finns i Sverige för att använda sådana. Med en internationell överblick beskrivs olika typer av markvärmeväxlare med prestanda samt hur de kan installeras och dimensioneras. Slutligen tas ekonomiska frågor upp liksom driftsförhållanden och miljöaspekter.

Med beskrivningen som underlag formuleras vilket behov som finns för att förbättra potentialen för markvärmeteknik och inte minst system med frikyla. En fokusering sker på jordvärme, frikyla och slutna system.

Nulägesbeskrivningen kan komma att revideras efterhand som projektet fortsätter under 2002 med förberedande systemstudier inför planerat experimentbyggande i full skala under nästa etapp av projektet.

Målgrupp för publikationen är myndigheter, företag, organisationer och enskilda som efterfrågar konkurrenskraftiga, energibesparande och miljövänliga markvärmelösningar.

Nulägesbeskrivningen 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 december 2001

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

LÄSANVISNING	3
FÖRORD	5
SUMMARY	11
SAMMANFATTNING	20
1. INLEDNING	29
1.1 MARKVÄRME I BEBYGGELSEN.....	29
1.2 SYFTE OCH AVGRÄNSNING	30
1.3 KONVENTIONELLA SYSTEM FÖR UPPVÄRMNING OCH KYLNING	31
2. VÄRME- OCH KYLASYSTEM MED OCH UTAN VÄRMEPUMP	34
3. GEOLOGISKA OCH GEOTEKNISKA FÖRUTSÄTTNINGAR I SVERIGE	38
3.1 JORD- OCH BERGFÖRHÅLLANDEN.....	38
3.1.1 Berggrunden.....	38
3.1.2 Jordtäcket.....	38
3.1.3 Grundvattenförhållanden	40
3.1.4 Markvärme och marktemperatur.....	41
3.1.5 Tjälbildning.....	43
3.1.6 Tjälldjup.....	47
3.2 TERMISKA EGENSKAPER I JORD OCH BERG	53
3.2.1 Termiska egenskaper i jord.....	53
3.2.2 Termiska egenskaper i berg	56
3.2.3 Viktiga faktorer för jords och bergs termiska egenskaper.....	58
3.2.4 Metoder för bestämning av jords och bergs termiska egenskaper.....	59
3.3 GEOTEKNISKA KONSEKVENSER VID TEMPERATURPÅVERKAN	60
3.4 ENERGIGEOLGISK KARTERING.....	61
4. MARKVÄRMEVÄXLARE	63
4.1 UTFORMNING	63
4.2 SLANGMATERIAL.....	68
4.3 KOPPLINGAR	69
4.4 VÄRMEBÄRARVÄTSKA	71
4.4.1 Fysikaliska egenskaper	72
4.4.2 Rekommendationer	73
4.5 TERMISKA PROCESSER NÄRA MARKVÄRMEVÄXLAREN.....	74
5. INSTALLATION HORISONTELLA MARKVÄRMEVÄXLARE	76
5.1 KONVENTIONELL SCHAKTNING MED GRÄVMASKIN	77
5.1.1 Schaktväggars stabilitet.....	77
5.2 HORISONTELL BORRNING	79
5.2.1 Styrd borrning	79
5.2.2 Rörläggning med jordraketen	82
5.3 DIREKTLÄGGNING AV SLANGAR MED PLOG ELLER FRÄS	84
5.3.1 Direktläggning med plog	84
5.3.2 Direktläggning med fräs.....	89
5.3.3 Fördelar med direktläggning.....	91
5.3.4 Planering och projektering av direktläggning – stora system.....	91
5.3.5 Bedömning av grundläggnings- och schaktningsförhållanden.....	92
6. INSTALLATION SPIRALFORMAD MARKVÄRMEVÄXLARE – SLINKY	96
6.1 BAKGRUND	96
6.2 MATERIAL, UTFORMNING OCH KAPACITET.....	98
6.3 INSTALLATION.....	100

6.3.1	Allmänt	100
6.3.2	Installation i diken.....	100
6.3.3	Installation i grunda borrhål	101
6.4	ÅTERFYLLENAD	102
6.5	KOMMENTARER OM PRESTANDA OCH KOSTNADER.....	102
7.	INSTALLATION VERTIKALA MARKVÄRMEVÄXLARE	104
7.1	HÅLTAGNING OCH NEDFÖRING AV SLANGAR I JORD	104
7.2	BORRHÅL I BERG OCH JORD.....	110
7.2.1	Borring och rödrivning genom jordlager	110
7.2.2	Borring i berg.....	112
7.2.3	Slanginstallation i borrhål	117
7.2.4	Tätning och återfyllning av borrhål.....	118
7.3	ENERGIPÅLAR	121
8.	MARKVÄRMEVÄXLARES TERMISKA PRESTANDA	123
8.1	VÄRMEÖVERFÖRING FRÅN FLUID TILL MARK	123
8.2	VÄRMETRANSPORT I MARKEN	125
8.2.1	Konduktiv värmetransport	125
8.2.2	Konvektiv värmetransport.....	125
8.2.3	Fuktinnehåll	125
8.2.4	Fuktvandring.....	126
8.2.5	Värmestrålning.....	126
8.2.6	Fasomvandling – frysning och smältning	127
8.2.7	Förändring av markens termiska egenskaper	127
8.2.8	Återfyllnadsmaterial.....	127
8.2.9	Kontaktmotstånd mellan rör och mark.....	129
8.3	FÖRHÅLLANDEN I MARKEN	129
8.3.1	Markytans temperatur	129
8.3.2	Markens naturliga temperatur	130
8.3.3	Inverkan av snö och regnvatten.....	130
8.4	HORISONTELLA MARKVÄRMEVÄXLARE	131
8.4.1	Principiell utformning.....	131
8.4.2	Värmemotstånd i mark kring en slang	131
8.4.3	Flera slangar.....	135
8.5	VERTIKALA MARKVÄRMEVÄXLARE	136
8.5.1	Principiell utformning.....	136
8.5.2	Värmemotstånd mellan fluid och mark.....	137
8.5.3	Värmeutbyte mellan strömningskanaler.....	139
8.5.4	Effekt av värmekapacitet i fluid och borrhål.....	139
8.6	TERMISK INFLUENS	140
8.7	FÄLTFÖRSÖK MED EN HORISONTELL SLANG	140
8.7.1	Danmarks Geoteknisk Institut 1975-84	140
8.7.2	Surte 1980-83.....	145
8.7.3	University of Tennessee, USA, 1982-84.....	146
8.7.4	Sju svenska ytjordvärmeanläggningar 1976-1987	146
8.8	FÄLTFÖRSÖK MED FLERA HORISONTELLA SLANGAR.....	152
8.8.1	New York State, USA, 1983-84.....	152
8.8.2	Oak Ridge National Laboratory, USA, 1986	152
8.9	FÄLTFÖRSÖK MED VERTIKALA U-RÖR.....	153
8.9.1	Syracuse, USA, 1982-85	153
8.9.2	Ottawa, Kanada, 1985.....	154
8.9.3	Freising, Tyskland, 1986.....	155
8.9.4	Söderköping, 1986	155
8.9.5	Danmarks Tekniska Högskola, 1990	157
8.10	FÄLTFÖRSÖK MED VERTIKAL SPIRALFORMAD SLANG – SLINKY	157
8.10.1	Ottawa, Kanada, 1986-87.....	157

9.	DIMENSIONERING	158
9.1	INTRODUKTION	158
9.1.1	Villkor för värmebärarens temperatur	159
9.1.2	Nyckeltal för dimensionering	159
9.1.3	Effekt- och energitäckning	160
9.2	HORISONTELLA MARKVÄRMEVÄXLARE MED EN SLANG	160
9.2.1	Utländska erfarenheter	161
9.2.2	Svenska erfarenheter	163
9.3	HORISONTELLA MARKVÄRMEVÄXLARE MED FLERA SLANGAR	169
9.3.1	Utländska erfarenheter	170
9.3.2	Svenska erfarenheter	171
9.4	KOMPAKT MARKVÄRMEVÄXLARE - HORISONTELL SLINKY	172
9.4.1	Utländska erfarenheter	172
9.5	DIKESKOLLEKTOR	173
9.5.1	Utländska erfarenheter	173
9.6	VERTIKALA U-RÖR	174
9.6.1	Utländska erfarenheter	174
9.6.2	Svenska erfarenheter	176
9.7	VERTIKALA SLINKY	178
9.7.1	Utländska erfarenheter	178
9.8	ENERGIPÅLAR	179
9.8.1	Utländska erfarenheter	179
9.9	SVENSK DIMENSIONERINGSPRAXIS	180
10.	DRIFT OCH UNDERHÅLL	183
10.1	DRIFTERFARENHETER	183
10.1	UNDERHÅLL OCH SKÖTSEL	186
11.	EKONOMISK ANALYS	188
11.1	SMÅ SYSTEM MED MARKVÄRMEPUMP FÖR EN VILLA	190
11.1.1	Investeringskostnad	190
11.1.2	Kostnad för installation av markvärmepump	191
11.1.3	Kostnad för drift och underhåll	194
11.1.4	Total uppvärmningskostnad	194
11.1.5	Jämförelser mot alternativa uppvärmningssystem	195
11.1.6	Försäkring och garanti	199
11.2	STORA SYSTEM MED MARKVÄRMEPUMP FÖR KONTORSHUS	199
11.2.1	Investeringskostnad	200
11.2.2	Kostnad för installation av markvärmepump	201
11.2.3	Kostnad för drift och underhåll	203
11.2.4	Total kostnad för uppvärmning och komfortkyla	204
12.	MARKVÄRME OCH MILJÖ	205
12.1	NORMER, LAGAR OCH FÖRORDNINGAR	205
12.2	MILJÖASPEKTER	205
12.3	GRUNDVATTENKVALITET	206
12.3.1	Värmebärarvätska	207
12.3.2	Läckage av oljor	211
12.3.3	Korrosionshämmare	212
12.3.4	Termisk påverkan	212
12.4	MARKPÅVERKAN	212
12.4.1	Nivåändringar	212
12.4.2	Påverkan på växtlighet och organismer	212
12.4.3	Spridning av markföroreningar	213
12.5	KÖLDMEDIUM I VÄRMEPUMP	213
12.6	REKOMMENDATIONER	214
12.6.1	Jordvärmesystem	214
12.6.2	Värmebärarvätskor	215

12.7	MARKVÄRME – UR MILJÖSYNPUNKT	215
12.7.1	Energibetraktelse.....	215
12.7.2	Minskad belastning på miljön	216
13.	REFERENSER.....	220
13.1	LITTERATUR.....	220
13.2	WEBBSIDOR.....	231
14.	DEFINITIONER OCH FÖRKORTNINGAR.....	234

SUMMARY

Introduction

Energy systems that use soil, rock, lakes and other watercourses as well as ground water for heating and cooling purposes are becoming increasingly common. More environmentally friendly and resource-efficient electricity use is obtained through conversion from direct electricity to heat exchangers in rock, soil and water. For an electrically heated house this means substantial electrical savings. The total electricity consumption, including domestic supply, is usually reduced by about a half after installation of a ground-coupled heat pump.

Today, new installations consisting of rock-heating systems are predominating while soil-heating systems are still to a lesser degree. The use of soil heat systems is likely to increase. These systems are beneficial where there is limited space for ground heat exchangers and a presence of thick soil layers.

Residential houses and office buildings are especially interesting for this technology. The demand for comfort cooling can advantageously be met by direct heat exchange, without the heat pump, against the cooler ground. The cooling demand in office buildings is increasing because of the need to counteract the buildings own heat generation (computers, lighting). Cooling is also of interest for industry, process cooling, where the heat generating process can be coupled to the ground, in a system with heat pumps/cooling machines (compressor cooling) or in a direct heat exchange system.

Objective

The objective of the project is to develop ground heat technology for more effective electricity use within the building sector whereby state of the art and needs are compiled in this report. The description focuses on Swedish conditions but examples are also given from abroad. Smaller systems for individual houses as well as larger systems for office buildings are treated. The report considers only closed loop systems, where the heat carrier fluid is circulated in a loop system in direct contact with soil or rock.

Systems with and without heat pumps

Ground coupled heat pump systems take advantage of the solar energy that has been stored in the ground. Soil and rock are relatively stable heat sources with near constant temperatures. A heat pump consists of a vaporiser, condenser, expansion valve and a compressor, connected in a closed pipe system with a circulating fluid that alternates between a gaseous and a liquid state. By changing the pressure, the boiling temperature of the working fluid is manipulated, whereby it is possible to take advantage of a low temperature heat source.

In a system based on direct evaporation, the fluid evaporates during circulation in the ground loop. The heat pump only has a condenser; the vaporiser is not integrated in the machine envelope.

The systems are normally used for both space heating and tap water heating. During extreme cold days, auxiliary heat is obtained from an electric cartridge or the existing boiler. Normally, the auxiliary heat enters at an out-door temperature of about -5°C . At this present stage, systems designed for both heating and cooling of the house are less common within the residential sector but the demand for comfort cooling may increase. In cases where there are no water distribution systems, it is possible to use strategically located fan convectors.

There are in principal two types of systems where the ground is used for comfort cooling. One possibility is “free cooling” where excess heat, produced during summer, is heat exchanged against the cooler ground. This way a regeneration of the cold, and in some cases frozen, ground before the next heating period is achieved. The other type is to let a system with heat pumps/cooling machines, compressor cooling, produce cold to the building and dump excess heat in the ground.

By using a combination of heat pump operation during winter and direct cooling in summer an optimised system can be constructed in which winter operation cools the ground and delivers heat while the free cold of the summer operation cools the indoor temperature and heats the ground before the coming winter season. If the system is well designed and heat balanced, it is possible to receive energy flows, which on a yearly basis result in zero heat extraction from the ground.

Geological and geotechnical prerequisites in Sweden

Soil depths

Areas where the bedrock reaches the ground surface are very common in Sweden and the soil layer is mostly relatively limited – normally from a few metres up to tens of metres. The soil depth may vary substantially within a short distance. The largest known soil depth is about 200 metres.

Moraine layers are usually a few metres deep but in some locations they can reach depths of several tens of metres. The thickness of sand and gravel layers in boulder-ridges and larger delta areas is often some tens of metres but not seldom up to 50 metres or more. Sediment layers consisting of sand, silt and partly clay, exist which may be up to 50 metres deep or more.

Frost formation

Systems with ground heat pumps are often designed in such a way that the soil closest to the pipes freeze. Freezing of the soil, because of high heat extraction rates, can cause settlements. In the winter the freeze related problems mostly consist of frost heave/deformations, formation of cracks, freezing of water in pipes and difficulties at excavation works. During spring, when the soil thaws, problems can arise, such as impaired bearing capacity, permanently uplifted constructions and large settlements. Settlements close to or around ground heat exchangers can have an influence on both the heating system and surrounding buildings.

The extent of the freezing process in a natural soil depends on its thermal properties, porosity, moisture content and the temperature in the surroundings, where the moisture content is of greatest importance. Clayey soils have better insulating properties than silty and sandy soils and can retain more moisture. Other factors influencing the frost depth are, insulating snow cover, wind speed, ambient air temperature, solar radiation and precipitation.

Thermal properties

Solid mineral particles are good heat conductors and water is a much better heat conductor than air. In small porosity materials, where the share of pores is small in relation to the total volume, the solids are close to another, which makes the thermal conductivity high. In general, an increase in the water content results in higher thermal conductivity because the pore air is replaced by water with higher thermal conductivity. A reduction of the water content can lead to an increase or a decrease of the thermal conductivity depending on whether the

soil is compressed, with reduced pore volume as a consequence, or if the soil preserves its structure so that pore water is replaced by air. Besides water content and porosity of the soil the thermal conductivity depends on the mineral composition. The quartz content has the greatest influence. Thermal conductivity of a crystalline rock increases by about 0.5 W/m,K for each 10 % of increase of the quartz content.

Coarse-grained soils can be good heat conductors if the soil contains a large portion of water. A dry coarsely grained soil is a far worse heat conductor than a humid one. Fine grained soils conducts heat better than dry coarse-grained soils. The best soils from a heat transmitting point of view are sandy and clayey soil mixtures of sand, clay, silt, and possibly sandy clays. It should be noticed that the ground water level largely influences the heat transmission in sandy soils.

Ground heat exchangers

To extract or store thermal energy in the ground, a ground heat exchanger is installed between the heat pump and the heat source (the ground). The ground heat exchanger normally consists of a plastic pipe, installed in the ground. The pipe encloses a circulating heat carrier fluid that exchanges heat between the house and the surrounding soil and/or rock. The design of the ground heat exchanger varies dependent on where and how it is installed, in soil or rock, horizontally or vertically.

Polyethylene is often used as pipe material (PEM PN6.3). The most common dimensions used in Sweden are 32 and 40 mm in outer diameter. The pipe is filled with a heat carrier fluid, commonly water and ethanol, or other type of frost protection liquid, with freeze protection down to $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. The heat carrier fluid should be able to absorb and emit thermal heat effectively, have good pumping properties, be non-hazardous to the environment and easy to handle.

Available loop lengths of 200-300 metres make it necessary to join pipes at one or more places. The recommended pipe joint methods use welding but certain mechanical couplings are also used.

The water content of the ground conducts the heat flow round a ground heat exchanger. Moisture is transported at pressure differences or during heat transport, in unsaturated soil mostly as gas. At higher moisture content, water flow predominates. When a system with ground-coupled heat pumps is used for summer cooling, heat is released to the ground. The temperature gradient that develops forces the moisture from the ground closest to the ground heat exchanger, which in turn reduces the heat exchange between the loop and the ground. The opposite occurs when the system is used for winter heating. Moisture is transported to the cooler area near the ground heat exchanger and ice lenses can develop, with risks of heaving effects.

Installation of ground heat exchangers

For soil exchange systems, both horizontal and vertical installations of ground heat exchangers may be used, with straight or compact plastic pipes. A compact installation with the pipe in a spiral probably has the same properties as several straight single pipes (about 4 pipes) in a single ditch.

Possible installation methods for ground heat exchangers are, e.g. excavation with an excavator and manually laid out pipes, direct placing of pipes with plows, controlled drilling, soil rocket, vertical pushing with or without flushing/vibration and drilling, to mention the most common methods.

Horizontal Installation

Using an excavator is a standard method that can be used for horizontal pipe installations in most types of soil conditions.

Plows, equipped with a chain of small shovels as well as static/vibrating plows, are competitive for horizontal pipe installation in silt and sand soils, and clay and silt soils, respectively. At installation, the pipe/pipes run through a rectangular box, pulled by the plow, whereby the pipes land on different installation levels. Where possible, pipes may be installed one above the other simultaneously, making the installation process more cost-effective.

Controlled drilling, with its high installation capacity, can be interesting for installations of larger systems. By using a “soil rocket” the ground heat exchanger pipes can be installed in a zig-zag pattern between two parallel ditches. To our knowledge, this method has not previously been applied to ground heat exchanger pipes.

The “Slinky” is a ground heat exchanger system where the ground heat exchanger is laid out in a spiral in ditches, in order to increase the capacity per metre of ditch. The Slinky pipe can either be installed standing up in narrow ditches or laid flat on the bottom of a ditch. The spiral form of the Slinky makes it possible to extend or shorten it, dependent on the required capacity and demands. The length of the ditch is thereby reduced by two thirds down to one third compared with conventional two-pipe horizontal ground heat exchangers.

The Slinky pipe was developed in Canada, at the end of the 1980's, and is used in North America, parts of Europe (England, France, Germany and Italy) and in Asia (India, Malaysia and Japan). The Slinky has never been tested in Sweden, however, large parts of North America have similar climatic and geological conditions as Sweden, which makes it easy to suggest that the Slinky is even suitable for Swedish conditions.

Slinky would increase the possibility to use ground coupled cooling and heating since it requires much less surface than conventional horizontal systems, and possibly is more effective since a denser amount of soil is activated. It is easier to install Slinky compared with 2-pipe or 4-pipe installation in the same ditch. Slinky should attract the market, both for single-family houses and for commercial buildings. The thermal effects of freezing and regeneration with Slinky pipes are areas that first have to be clarified.

Vertical Installation

Methods used for vertical installations of ground heat exchangers can be subdivided in three groups:

- hole-making and down pushing of pipes in soil,
- drilling in rock and soil and
- energy piles.

The applicability of each method depends on the actual soil and rock conditions. In soft clay the pipe can be pushed down directly in the soil. In other, firmer and coarser soils, such as

firm clay, silt and sand, installations with heavy equipment, possibly in combination with flushing and vibration, or in pre-drilled holes may be required.

A method to “sew” the pipe into the ground in long continuous sections has been developed for soft clay. The pipe is placed against an installation tool (wheel) equipped with a recess channel that holds the pipe in place during the down pushing. When the acquired installation depth is reached, the tool is removed and the pipe, now with a U-form, stays in the ground. The installation vehicle may be a geotechnical sounding vehicle or similar machine with a hydraulic drill rig. The installation has to be prepared by trenching through the upper firmer crust.

The method has been adjusted to varved clay. The lower part of the tool was made pointed to improve insertion and a mandrel collar was mounted on the drill rod to hold in the pipe closer to the rod and thereby reduce the pipe friction.

Other methods for pipe insertion are based on different means to protect the pipe during the down pushing, for example in a hollow pile, or to place the pipe in pre-drilled holes. In sandy soils installations have been performed with a vertical, vibrating drill rod supplied with channels and a protective device in the bottom to protect the pipe during pushing, and flush channels that comes out at the end of the drill rod. Installations in clay have also been performed with the pipe protected in a hollow pile, supplied with a bottom plate. At the acquired depth the plate is released and the pipe becomes fixed by the incoming clay.

The majority of the ground heat exchangers in rock are made using “down the hole” hammer drilling, with an air-driven hammer. The drilling through the upper soil layers is performed with casing, down to a couple metres in the bedrock (total casing min 6 m). Vibrations at high frequency generated in direct connection to the drill bit in the bottom of the drill lance makes the drill bit both hit and rotate. In the USA and many other countries it is common to use wet rotary drilling and hollow stem auger both in soil and rock. These methods are considered difficult to adjust to energy drilling in Swedish soils because of the difficulty to maintaining stable boreholes. In Germany and the USA the borehole is always refilled with cut loose material from the drilling or with cement or bentonite based mixtures, to protect the ground water from contaminates and to improve thermal heat transmission between the pipe and the borehole wall.

An energy pile often consists of heat exchanger pipes mounted on the reinforcements of a cast-in concrete pile. Energy piles are only feasible if the heated building need piles in its foundation. Introduction of energy piles, according to the same technique as in Middle Europe, requires an increase in the market for cast-in piles, or that the length of the pile can be decided in advance for the present project. The primary function must also not be reduced.

Thermal capacity of ground heat exchangers

In the section on thermal capacity basic thermal processes and conditions that influence the thermal capacity of a ground heat exchanger are described. Furthermore, a short overview is given of the principal layout of ground heat exchangers as well as experiences from field tests and theoretical studies.

Heat transport outside the pipe takes place, in principal, through heat conduction in a relatively homogenous material. This is relatively well valid by experience gained in rock and

saturated soils. In primarily unsaturated soil and fissured rock significant convective heat transfer can also occur. Water, water steam and air moves in voids/pores in the ground due to pressure differences caused by variations in ground water levels and water temperatures, during heating and cooling supply. Differences in the vapour pressure in an unsaturated soil may also give rise to moisture transport in pores, which influences the heat transmittance in the ground.

The thermal performance of the ground heat exchangers is primarily dependent on the design (material, dimensions and number of pipes in a ditch or a borehole), fluid velocity (laminar or turbulent), thermal resistance, thermal properties of the surrounding ground and possible filling material.

When the ground freezes, the thermal conductivity of the soil increases, and the heat capacity decrease. If the whole area is frozen, from the ground surface down below the pipes, the thermal resistance will decrease. Temperature disturbance because of heat extraction becomes less and reaches its stationary value sooner. However, the influence from variations in the surface temperature will increase on the pipe level. The temperature of the heat carrier fluid then gets a more disadvantageous connection to the temperature on the ground surface. As long as unfrozen soil exists between the ground surface and the pipe level, the transformation from water to ice has a stabilising effect on the temperature of the heat carrier fluid.

A thermal analysis of a sub-surface heat exchanger must incorporate frost formation and effects of snow cover. The total thermal resistance between the fluid and the ground decides the required temperature difference between the fluid and the surrounding ground to transmit a certain amount of heat power per metre of ground heat exchanger. For example for a rock borehole installation, the resistance depends on the layout of the flow channels, the refilling material and thermal properties of affected parts. The thermal resistance should be as low as possible.

System design

The design of ground heat systems should ensure that condition for good technical and economical operation is fulfilled during the entire lifetime of the system. Ground heat systems can be designed with the aid of known rules of thumb, tabulated data, dimensioning programs and detailed simulations of the components in the heating system, and how they interact.

The choice of the degree of energy coverage largely affects the size and operation time of the heat pump. At present, in Sweden, the most economical coverage is assumed within the interval 50-60 % for single-family houses with a ground-coupled heat pump. The heat pump then delivers about 90 % of the energy demand with an operation time of 3,200-4,000 hours per year. For a monovalent system in Europe, the total annual operation time can be as low as 1,800 hours.

The installation depth should be chosen in a way that the heat carrier fluid become as high as possible. However, there is a tendency towards larger volumes of frozen volumes with increasing installation depths, whereby the ground temperature decreases and the risk for permafrost in the ground increases. One studie shows that for peat it is beneficial with pipe installation closer to the surface, at 0.6-1.0 m depth. In the town of Kristianstad (southern part of Sweden) a depth of 1-1.4 m was found more suitable, while a depth of 1.0-1.4 m was more suitable in the town of Luleå (north).

If pipes are densely installed, more energy may be extracted from the ground for the same effective power. The reduction in the temperature becomes higher because of thermal influence between the pipes. Denser pipe installation can therefore result in more frozen ground. Suitable distance between pipes depends on the interaction between energy extraction and the cooling from the ground surface at winter. As long as the natural frost penetration is separated from the frozen soil around the ground heat exchangers, the thermal heat resistance is fairly moderate. How much energy that can be extracted with a dense installation compared with a sparse installation depends on the chosen temperature of the heat carrier fluid, the climate, type of soil and the installation depth. If the pipes are installed at a distance of 0.7 m instead of 1.5 m, and the lowest possible heat carrier temperature is chosen at 5 °C, the increase of the possible heat extraction varies between 20 % and 100 % depending on the climate and the type of soil.

Swedish design practice is based on KYS fact sheets (1999). The maximum heat extraction rate depends on the effective power and energy coverage, total annual operation time of the heat pump and soil type, which is subdivided in three major groups. Maximum extraction rates are commonly 20-30 W per metre of pipe when the outer pipe diameter is 40 mm. The German association VDI has developed a norm for the design of heat pump systems below 30 kW of heat capacity. For larger systems, computer-based design programs, which include effects of thermal influence, are recommended.

The possible amount of heat extracted depends on the design of the ground heat exchanger. Compared with a straight horizontal pipe about 60 % more energy per metre of ditch was received using two pipes, in an American study. IGSHPA (1995), USA, installation manual claims that a compact Slinky pipe reduces the ditch by 2/3 compared with a two pipe system with pipes on 1.2 m and 1.8 m depth. A drawn out Slinky reduces the length by 1/3 compared with the same two-pipe system.

Operation and maintenance

The performance of the heat pump is mainly determined by the temperature of both the heat source (ground) and the heat sink (building). To achieve high effective power and performance factor the heat carrier should have a high temperature and the distribution system of the house should have a low temperature. The positive effects of heating/cooling systems are mainly energy and cost savings. Disturbances in the system operation are mainly connected with halts caused by air/particles in the pipe systems, bacterial growth and noise. Bad design can result in permafrost, influence of the surroundings in the form of impaired biological activity and deformations of the ground.

A correctly designed system should, in principle, have an indefinite operational lifetime with respect to the ability to deliver heat. However, system components require some maintenance and occasional replacement. The system owner should regularly check the required pressure. To enable follow-up of the economical performance it is wise to keep a diary of electrical consumption and temperatures. If the system does not keep promised performance an adjustment of different settings are probably needed.

A compressor normally requires service every second year and need to be replaced after 15-20 years. The heat pump needs service about every third year. The life length of a ground heat exchanger is given to be normally about 100 years.

Economy

Costs for investment and operation of heat pump systems with ground heat exchangers are given for individual houses and office buildings, respectively. Estimated costs for individual houses are compared with costs for alternative systems for heating and comfort cooling, to enable estimations of the competitiveness of the systems and possible potentials for development of different installation methods. Furthermore, present insurance and warranties within the residential sector that is given on the Swedish market, are described.

When planning changes of the energy supply system it is wise to consider and value energy efficiency measures such as the replacement of windows, supplementary insulation, more effective lightning etc. This study only comprises costs for investments and operation of the heating systems. Other aspects, such as the influence on the environment, comfort, security of deliverance and required space also greatly influence the choice of heating and cooling system. The costs for investments were calculated with an annuity of 0.1.

Investment costs for a ground coupled heat pump system in soil or rock were calculated at 90,000 SEK (incl. VAT) for a normal-sized single-family house with a total energy consumption of 25,000 kWh annually, if the house is equipped with a water-based heat distribution system (and 100,000 SEK in case of electric radiators). The costs for a rock-heating system are about the same as the costs for the most beneficial system in soil. Annual costs over 20 years (capital and operation) were calculated at about 16,000 SEK (incl. VAT). Given costs prerequisites that the geological conditions enable installation of the ground heat exchanger as rationally as possible.

With the exception of controlled drilling, the installation cost (pipe included) varies between 8,700-25,800 SEK (exc. VAT). A spiral formed pipe (Slinky) was connected with the lowest installation costs. However, costs for the spiral pipe installation are somewhat uncertain due to the lack of practical experience in Sweden. Somewhat more expensive are: direct pushing of U-pipes in fine-grained soils, installations with excavators and plows, of a single straight horizontal pipe or 2 or 4 pipes on different levels.

Comparisons with alternative systems shows that the lowest annual costs (VAT incl) was calculated for soil-heating system, followed by rock-heating systems (+8 %). Annual costs for district heating and individual use of biofuels are in average 14 % higher. The use of oil is by far the most expensive of these four alternatives, about 47 % more expensive than the most competitive calculation with a ground-coupled heat pump. Annual costs for a new electric boiler, electricity costs included, is about 15 % higher compared with the same system.

Corresponding calculations for larger systems, such as office buildings, include many uncertainties. In practice special solutions are often applied, dependent on the status of the existing system. Investment costs for a ground heat pump system with ground heat exchangers for space heating and tap water heating are in the order of 300 SEK per square metres of the heated building area. The annual operation cost for a 25 kW heat pump is estimated at about 25,000 SEK per 1000 m². Corresponding installation costs for the ground heat exchangers in soil are estimated at about 70,000 SEK (incl VAT). Drilling in rock is between 75 % and 130 % more expensive than installation in soil.

Environmental issues

In Sweden, energy-wells in rock are now a well-established technology based on commercial grounds. One consequence of the increased rate of sales is the attention on a possible threat with respect to negative influence on the natural resource ground water, if precautions are not applied. "Normbrunn 97" (revision yearly) is a compilation of requirements which should be valid to "secure a well functioned energy source to the customer and to minimise influence on the natural resource ground water during installation of an energy well". A similar norm does not exist for installations in soils but some parts in Normbrunn 97 can be used for this type as well, e.g. requirements on material and installation of ground heat exchangers in the ground to minimise the risk for heat carrier leakage and pressure drops in the pipe system.

In report No 4994 from the Swedish Environmental Protection Agency, requirements on permits and reports, valid under the Swedish law Miljöbalken are shortly described, for installation and operation of ground-coupled heat pump systems. In general, ground heat systems are classified as "activities with assumed small environmental impact" and should be reported to the local municipality bureau for environmental issues. Energy drilling should also be reported according to SFS 1985:245, which means that drill protocols should be sent to the national well archive at the Geological Survey of Sweden. The Swedish handbook Brunnsborrarhandboken (Avanti) describes the laws for well drilling as well as an environmental policy and quality assurance with respect to well drilling works.

Environmental impact from ground heat systems comprise thermal changes in the ground, heaving, settlements, noise from compressors and fans, disturbances during construction, emissions of unnatural substances (corrosion inhibitors and non-environmental oils) and the use of resources in the form of material, land and energy. Emissions from electricity production, which the heat pump requires, are largely dependent on how the electricity is produced. Electricity produced in water power stations means less environmental load than imported electricity produced in coal-fired heat power plants. Ground heat systems are in general associated with low environmental load in comparison with many other energy sources.

The drilling of boreholes and ditching constitute a risk for the spreading of liquids between different aquifers, therefore filling of boreholes/ditches is required in many other countries.

Future plans

Some installation methods will be studied more closely, by installation tests or by following the progress of such installations in other situations. Means have been sought for in a following phase of the project where the plan is to follow some full-scale projects (single family houses and office building) during the establishment and a number of years of operation.

SAMMANFATTNING

Inledning

System som utnyttjar jord, berg, sjöar och andra vattendrag samt grundvatten för värme- eller kyländamål blir allt vanligare. Mer miljövänlig och resurseffektiv elanvändning erhålls vid konvertering från direktel till värmeväxlare i berg, jord och vatten. För en elvärmd villa innebär värmeväxling mot berggrunden väsentligt mindre elanvändning. I normalfallet kan man räkna med en halvering av den totala elförbrukningen (inkl. hushållsel) efter installation av en markvärmepump.

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 och där det tillgängliga utrymmet för markvärmeväxlare är begränsat.

Den intressanta delen av fastighetsmarknaden består av villor och kontorsbyggnader. Efterfrågan på komfortkyla kan med fördel lösas med 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. kompressorkyla, eller i ett system utan värmepump.

Syfte

Projektet syftar till att utveckla ny markvärmeteknik för effektivare elanvändning inom byggsektorn där denna nulägesbeskrivning sammanställer teknikläge och behov. Beskrivningen är koncentrerad på svenska förhållanden men exempel på tillämpningar ges även från utlandet. Små system för enskilda villor liksom stora system för kontorshus behandlas. En avgränsning är gjord så att rapporten behandlar slutna system där en vätska cirkulerar i ett slangsystem, som står i kontakt med jord eller berg.

System med och utan värmepump

I ett markvärmepumpsystem tillvaratar man den solenergi som lagrats i marken. Jord och berg är relativt stabila värmekällor ur temperatursynpunkt. Värmepumpens huvudkomponenter utgörs av förångare, kondensor, expansionsventil och kompressor, förbundna i ett slutet rör-system i vilket det cirkulerar en köldbärare, som omväxlande befinner sig i gas- eller vätskeform. Genom att förändra trycket kan man manipulera kokpunkten för vätskan, så att man kan utnyttja en värmekälla (marken) med relativt låg temperatur.

I system baserade på direktförångning förångas köldmediet vid cirkulation genom markslingan. Värmepumpen har endast en kondensordel, d.v.s. förångaren är inte integrerad i apparat-höljet.

Systemen används normalt både för rumsuppvärmning och värmning av tappvarmvatten. Under kalla vinterdagar erhålls spetsvärme från elkassett eller från äldre befintlig panna. I normalfallet går spetsvärmen in vid en utomhustemperatur omkring -5 °C. I dagsläget är det mindre vanligt inom bostadssektorn med system som dimensioneras för både värmning och kylning av huset, men bedömningen är att efterfrågan på komfortkyla kan komma att öka. I det fall att vattenburet distributionssystem saknas distribueras värmen i huset med hjälp av strategiskt utplacerade fläktkonvektorer.

Det finns i princip två typer av system där marken utnyttjas för att erhålla komfortkyla. En möjlighet är frikyla där överskottsvärmen, som produceras under sommarhalvåret, värmeväxlas mot den kallare marken. På så sätt åstadkoms 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, producera kyla till huset och avge överskottsvärme till marken.

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 frikyladrift 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 år inte sker något energiuttag ur marken.

Geologiska och geotekniska förutsättningar i Sverige

Jordmäktighet

Områden där berggrunden går i dagen är mycket vanliga i Sverige och jordtäckets mäktighet är därför oftast 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.

Tjälbildning

System med markvärmepump dimensioneras ofta så att jorden närmast markvärmeväxlarledningarna fryses. Frysning av jorden, på grund av högt värmeuttag, kan medföra sättningar. På vintern utgörs de frysrelaterade problemen främst av tjällyftning/deformationer, sprickbildning, frysning av vatten i ledningar, svårigheter vid 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, porositet, fukttinnehåll och temperaturen i omgivningen, där fukttinnehållet är av störst betydelse. Leriga jordarter har bättre isolerande egenskaper än siltiga och sandiga jordarter och kan hålla mer fukt. Andra faktorer som påverkar djupet för tjälbildning är bl.a. isolerande snötäcke, vindhastighet, lufttemperatur, solinstrålning och nederbörd.

Termiska egenskaper

Kornen (fasta partiklar) leder värme bra och vatten leder värme mycket bättre än luft. Vid t.ex. liten porositet, d.v.s. liten volymandel porer i förhållande till hela volymen, ligger kornen nära varandra vilket gör att värmeledningsförmågan 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 reducering 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.

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. De bästa jordarna ur värmeöverföringssynpunkt 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.

Markvärmväxlare

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

Som slangmaterial används oftast polyetenrör (PEM och tryckklass 6,3). I Sverige är dimensionerna 32 eller 40 mm i ytterdiameter vanligast. Slangen fylls med en värmebärarfluid, vanligen vatten och etanol, eller annat frostskyddsmedel, med frysskydd ner till -10 à -15 °C. Det är viktigt att värmebärarfluiden kan absorbera och avge värme effektivt samt att den har goda pumpegenskaper, är miljövänlig och lätt att hantera.

Tillgängliga slanglängder på 200-300 m gör att det blir nödvändigt att skarva på ett eller flera ställen. Bäst är att skarva med svetsning men mekaniska klämringskopplingar av mässing förekommer också.

Värmeflödet kring markvärmväxlaren styrs av markens vatteninnehåll. Fukt transporteras vid tryckskillnader eller värmetransport, i omättad mark främst i ångfas. Vid högre fuktinnehåll dominerar vätskeströmning som transportsätt. När ett system med markvärmepump 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) och islinser kan bildas med risk för hävningseffekter.

Installation av markvärmväxlare

I jord förekommer horisontella och vertikala installationer av markvärmväxlare med raka eller kompakta slangar. En kompakt installation med slangen lagd i spiralform har förmodligen liknande egenskaper som flera (ca fyra st) raka slangar i samma dike.

Tekniker för att installera markvärmväxlare är, t.ex. schaktning med grävmaskin och manuell läggning av slangar, direktläggning (läggarbox) med plog eller fräs, styrd borrhning, jordrakket, vertikal nedpressning med eller utan spolning/vibrering respektive borrhning för att nämna de vanligaste.

Horisontell och kompakt installation

Schaktning med grävmaskin är en klassisk metod som kan användas vid horisontell installation av slang för flertalet jordförhållanden.

Fräs, typ kedjegrävare, är liksom plog en konkurrenskraftig metod för horisontell slanginstallation i silt- och sandjordar respektive lera- och siltjordar. Slangen/slangarna löper genom en läggbox efter ploget/fräsen och mynnar på ett eller flera avsedda läggningsnivåer. Möjligheten att samtidigt installera flera slangar över varandra är ett sätt att effektivisera installationen.

Styrd borring 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 förmodligen inte använts för markvärme.

Slinky är ett markvärmesystem där markvärmväxlaren läggs som en spiral i diken för att på så sätt öka kapaciteten per dikesmeter. Slinky kan antingen installeras stående i smala diken eller liggandes på dikesbotten. Slinkyns form som en spiral gör att den kan dras ut eller komprimeras beroende på erforderlig kapacitet och behov. Dikeslängden minskar därigenom med 2/3-delar till 1/3-del jämfört med dikeslängden för konventionella 2-slangsystem.

Slinky utvecklades i Kanada i slutet på 1980-talet och används i Nordamerika, delar av Europa (England, Frankrike, Tyskland och Italien) samt i Asien (Indien, Malaysia och Japan). Slinky har veterligen inte testats i Sverige. Stora delar av Nordamerika har liknande förhållanden vad gäller klimat och geologi som Sverige, vilket talar för att Slinky även lämpar sig för svenska förhållanden.

Slinky skulle öka möjligheten till utnyttjande av markvärme/markkylla 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 med slangar över varandra. Slinky borde tilltala marknaden både för små enfamiljshus som för större kommersiella byggnader. Effekterna av frysning och återladdning med Slinky är områden som först bör klarläggas.

Vertikal installation

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

- håltagning och nedföring av slangar i jord,
- borring 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 borrigg. Installationen måste emellertid förberedas genom håltagning eller grävning av en slits genom den översta fasta torrskorpan.

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

Andra metoder för håltagning bygger på att slangen skyddas under neddrivningen, t.ex. i en ihålig påle, 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 skjöts bottenplattan ut och slangarna fixerades av den inträngande leran.

Flertalet bergvärmebrunnar i Sverige utförs med sänkhammarborrning, med luftdriven hammare. Borrningen genom de övre jordlagren och ett par meter ned i berget utförs med foderrör (min. totalt 6 m). 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 s.k. hollow-stem auger genom både jord- och berglagren. Dessa metoder anses svårpassade till energiborrning i svenska jordar beroende svårigheten att erhålla stabila borrhål. I t.ex. Tyskland och USA återfylls alltid borrhålet med t.ex. lösgjort material från borrningen eller cement- eller bentonitbaserade blandningar, bl.a. för att skydda grundvattnet mot föroreningar och för att förbättra den termiska värmeöverföringen mellan slangen och borrhålsväggen.

Energipålen består ofta av värmeväxlarrör monterade på armeringen i en plastgjuten betongpåle. Energipålar är endast intressant om byggnaden som ska värmeförsörjas måste grundläggas på pålar. För att energipålar ska börja användas i Sverige, enligt den teknik som förekommer i Mellaneuropa, krävs att marknaden för in-situgjutna pålar ökar, eller att pålens längd kan bestämmas i förväg för aktuellt objekt. Pålens primära funktion får inte heller försämrats.

Markvärmväxlares termiska prestanda

I kapitlet om termisk prestanda beskrivs grundläggande termiska processer och förhållanden som påverkar markvärmväxlares termiska prestanda. Dessutom ges en kort översikt av markvärmväxlares principiella utförande samt erfarenheter från fältförsök och teoretiska studier.

Värmetransporten utanför slangen sker, i ett förhållandevis homogent material, i huvudsak genom ren värmeledning. Villkoret uppfylls av erfarenhet relativt väl i berg och vattenmättade jordar. I framförallt omättad jord och sprickigt berg kan dessutom konvektiv värmetransport uppstå. Vatten, vattenånga och luft transporteras i hålrum/porer i marken vid tryckskillnader p.g.a 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 påverkar värmeöverföringen i marken.

Markvärmväxlarens termiska prestanda påverkas primärt av utformning (material, dimensioner och antal slangar i ett dike eller borrhål), flödes hastighet (laminärt eller turbulent), kontaktmotstånd, termiska egenskaper för omgivande mark och eventuellt återfyllnadsmaterial.

När marken är frusen är värmeledningsförmågan högre och värmekapaciteten lägre. Om hela området från markytan till en bit under slangarna är fruset medför detta att markvärmemotståndet sjunker. Temperaturstörningen från värmeuttaget blir mindre och når sitt stationära värde snabbare. Däremot ökar temperaturpåverkan från markytans temperaturvariation och den tid det tar för en temperaturändring att slå igenom på slangnivån bli kortare. Värmebärande fluidens temperatur får då en ogynnsam starkare koppling till temperaturen vid markytan. Så länge det finns otjälad mark mellan slang och mark har fasomvandling från vatten till is en gynnsam stabiliserande effekt på värmebärande fluidens temperatur.

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 strömningskanalerna utformas, återfyllnadsmaterial och termiska egenskaper för berörda delar. Motståndet bör vara så lågt som möjligt.

Dimensionering

Syftet med dimensionering av markvärmesystem är att säkerställa att villkor för goda tekniska och ekonomiska driftförhållanden 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 monovalenta system i Mellaneuropa är drifttiderna så låga som 1 800 timmar.

Förläggningsdjupet bör väljas så att så hög värmebärartemperatur som möjligt erhålls. En generell tendens är dock att volymen tjälad mark ökar med förläggningsdjupet, varvid risken för permafrost ökar och marktemperaturen blir lägre. En studie visar t.ex. att i torv är det fördelaktigt med ytlig förläggning på 0,6-1,0 m djup. I Kristianstad visade man att 0,6-1,0 m är att föredra, medan 1,0-1,4 m var lämpligare i Luleå.

Väljs en tätare slangförläggning kan det innebära att en större energimängd tas ur marken vid samma effekt. Temperatursänkningen blir högre p.g.a. termisk influens mellan slangarna. Marken tjälas därför mer med tät slangförläggning. Lämpligt avstånd beror på samspelet mellan energiuttaget och nedkylningen från markytan. Så länge tjälen som tränger ned från markytan och tjälen runt slangen är skilda från varandra är värmemotståndet mellan 0 °C-isotermin och värmebärande fluiden måttligt. Hur mycket energi per m² markyta som kan tas ut med en tät slangförläggning i jämförelse med en gles beror av vald lägsta värmebärartemperatur, klimat, jordart och förläggningsdjup. Läggs slangarna med ett avstånd av 0,7 m istället för 1,5 m och lägsta tillåtna värmebärartemperatur väljs till -5 °C kan ökningen av möjligt uttag bli 20 % till 100 % beroende på klimat och jordart.

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 värmepumpanläggningar under 30 kW värmeeffekt. För större anläggningar rekommenderas datorbaserade dimensioneringsprogram som tar hänsyn till termisk influens.

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. IGSHPA (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.

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. Positiva effekter av värme/kylasystem kopplade till mark är främst energi- och kostnadsbesparingar. Driftstörningar som kan uppstå är t.ex. driftstopp p.g.a. luft/partiklar i rörsystemen, läckage samt bakterietillväxt och buller. Felaktig dimensionering kan ge permafrost, omgivningspåverkan i form av nedsatt biologisk aktivitet och markdeformationer.

Ett korrekt dimensionerat system har i princip obegränsad livslängd med avseende på förmågan 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.

Ekonomi

En genomgång görs av kostnader för investering och drift av värmepumpanläggningar med markvärmeväxlare för enskilda villor respektive kontorshus. Den uppskattade kostnaden för enskilda villor jämförs mot alternativa system för uppvärmning och komfortkyla för att bedöma dels systemens konkurrenskraft, dels möjlig utvecklingspotential för olika installationsmetoder. För villasektorn redogörs dessutom för de försäkringar och garantier, som lämnas på den svenska marknaden.

När man planerar förändringar av husets energiförsörjning kan det vara god idé att också värdera energieffektivitetshöjande åtgärder som byte av fönster, tilläggsisolering, effektivare belysning m.m. Denna studie omfattar dock endast kostnader för investering och drift av värmesystemet. Andra aspekter, som t.ex. miljöpåverkan, bekvämlighet, leveranssäkerhet och utrymmesbehov har också stor betydelse för valet av värme-kylsystem. Investeringskostnaden har beräknats med annuitet 0,1.

För en normalvilla, med total energiförbrukning 25 000 kWh/år varav 5 000 kWh/år 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 markvärmepump 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 av slang samt läggning med grävmaskin, fräs/kedjegrävare eller plog, av rak horisontell slang alternativt slangar på 2 respektive 4 nivåer.

Jämförelser med alternativa system visar att årskostnaden 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, omkring 47 % dyrare än den mest fördelaktiga beräkningen med markvärmepump. Årskostnaden för en ny elpanna, inklusive elkostnad, uppskattas bli ca 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 värmepumpanläggning med markvärmepump för uppvärmning och varmvatten är i storleksordningen 300 kr per kvadratmeter uppvärmd yta. Driftkostnad för en värmepump (25 kW) per 1000 m² uppvärmd yta uppskattas till ca 25 000 kr per år. Installationskostnad för markvärmepump i jord uppskattas till omkring 70 000 kr (exkl moms). Borrhål i berg är mellan 75 % och 130 % dyrare än installation i jord.

Miljöfrågor

I Sverige är energibrunnar, i berg, väl etablerad teknik på kommersiella grunder. En följd av den ökade försäljningen av energibrunnar är uppmärksamheten på ett ökat hot för negativ påverkan på naturresursen grundvatten, om inte försiktighetsåtgärder vidtas. Normbrunn 97 (revideras årsvis) är en sammanställning över de krav som bör gälla för att "säkerställa en väl fungerande energikälla till kunden samt minimera riskerna för påverkan av naturresursen grundvatten vid utförande av en energibrunn". 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 installation av markvärmepump i mark för att minimera risken för värmebärandeläckage och tryckfall i markvärmepumpsystemet.

I Naturvårdsverkets rapport 4994 beskrivs kortfattat tillstånds- och anmälningskrav som gäller enligt miljöbalken för installation och drift av markvärmesystem med värmepump. Generellt gäller att ett markvärmesystem med värmepump klassas som "miljöfarlig verksamhet som kan antas ha liten miljöpåverkan" och skall anmälas till kommunens miljö- och hälsoskyddsområde. Vid energiborrning gäller också uppgiftsskyldighet för anläggning av energibrunnar (SFS 1985:245), vilket innebär att kopia på brunnsprotokoll skall insändas till brunnsarkivet, SGU.

I Brunnsborrhåndboken (Avanti) beskrivs även miljöpolicy och kvalitetssäkring med avseende på brunnsborrningsarbeten.

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 (värmebärarfluidens korrosionshämmare 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. Markvärmesystem är generellt förknippade med låg miljöbelastning i jämförelse med många andra energikällor.

Borrhålsborrnning och dikesupptagning utgör en risk för spridning av vätska mellan olika grundvattenmagasin varför man i många länder tillämpar obligatorisk återfyllnad.

Fortsättning

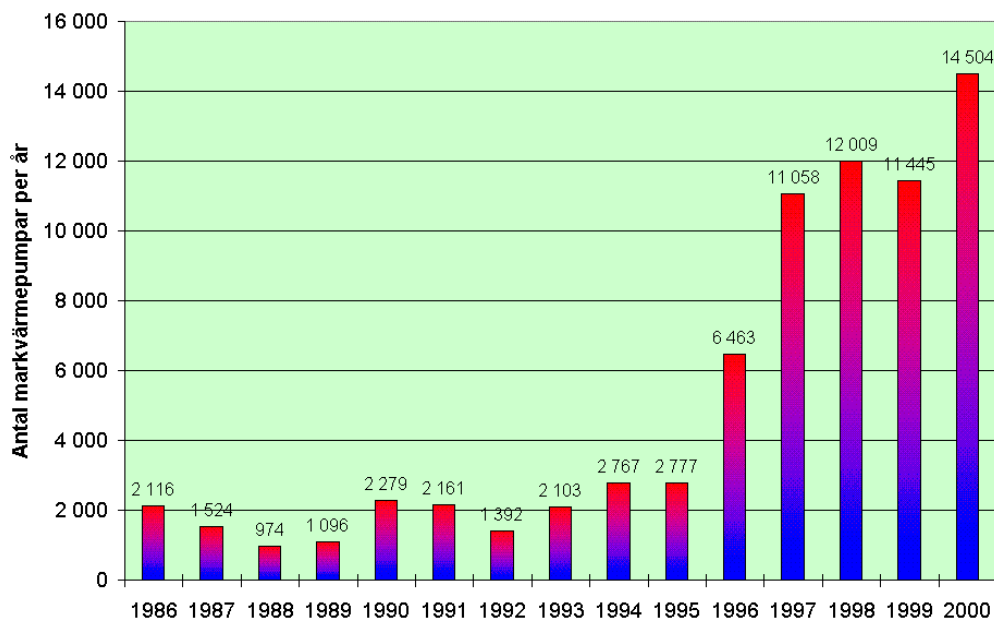
Vissa installationstekniker kommer fortsättningsvis att studeras närmare, antingen genom egna praktiska försök eller genom att följa genomförandet i andra sammanhang. Medel har sökts för en kommande etapp där avsikten är att följa några fullskaleprojekt (villor och kontorsbyggnad) under etableringen av markvärme, och ett antal driftsår.

1. INLEDNING

1.1 Markvärme i bebyggelsen

System som utnyttjar jord, berg, sjöar och andra vattendrag samt grundvatten för uppvärmnings- eller kyländamål blir allt vanligare. Mer miljövänlig och resurseffektiv elanvändning erhålls vid konvertering från direktel till värmeväxlare i berg, jord och vatten. Satsningen på energibrunnar i berg med värmepump har varit framgångsrik de senaste åren och nya anläggningar installeras i ökad takt. År 2000 uppskattas andelen system med markvärmepump inom sektorn för bostadsuppvärmning till ca 1 % (Rybach & Sanner, 2000). För en elvärmd villa innebär värmeväxling mot berggrunden väsentligt mindre elanvändning. Vid tillförsel av en del eleffekt från nätet kan ca tre gånger mer energi produceras av värmepumpen och tillföras huset. I normalfallet kan man räkna med en halvering av den totala elförbrukningen (inkl. hushållsel) efter installation av en markvärmepump.

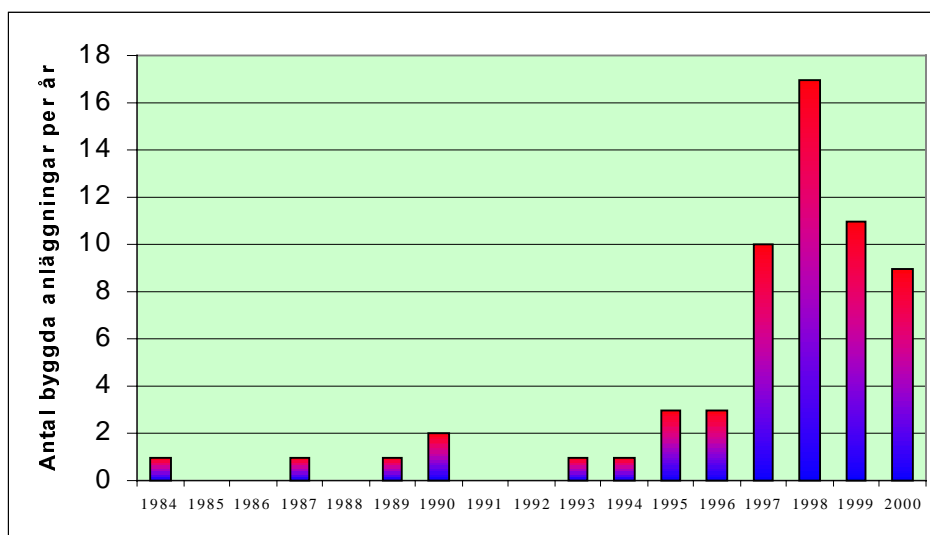
Av de markvärmesystem som installeras idag dominerar bergvärme medan ytjordvärme installeras till mindre del. Bergvärme är väl etablerad teknik på kommersiell grund och antalet anläggningar har ökat markant från slutet av 1990-talet (figur 1.1). Av totalt ca 14 500 nya anläggningar med markvärmepump (berg, jord, ytvatten) år 2000 uppskattas att ca 10 000 av dessa utgörs av värmepump för bergvärme. Energibrunnar i berg är dock begränsade till områden där bergets överyta är belägen relativt nära markytan (mindre än 6-10 m djup). Borrningstekniken mellan markyta och berg är i sammanhanget så dyr att energibrunnens lönsamhet minskar i takt med att jordmäktigheten ökar. I Sverige finns det stora bebyggda arealer där marken består av tiotals meter jord ovanpå berget. Som exempel kan nämnas stora och mäktiga sandformationer i Jönköpingstrakten och mäktiga lerlager i låglänt terräng omkring Mälardalen samt i delar av Göteborg.



Figur 1.1. Statistik över antalet anläggningar med värmepump som utnyttjar berg, ytjord eller ytvatten i Sverige. Antal t.o.m. 1985: 51 217 st. (Källa: Svenska värmepumpföreningens statistik 1986-2000).

Den teknik som används idag för ytjordvärme är att gräva ner en lång slang (markvärmväxlare även kallad kollektor) horisontellt i marken. För en normalvilla behövs 200–400 m slang. Tekniken fungerar väl men kräver relativt stora ytor och erfarenheterna är begränsade till lerjordar. Villafastigheter är ofta så små att man måste kunna installera markvärmväxlare vertikalt för att få tillräckligt värme/kylutbyte med jorden. Ytjordvärme installeras i praktiken nästan uteslutande i samband med nyproduktion eller totalrenovering eftersom tomten till stora delar måste grävas upp vid nedläggning av markvärmväxlaren. Jordvärmesystem skulle få ökad tillämpbarhet om tekniken utvecklas till att passa även för mindre tomter och stora jorddjup.

Den i sammanhanget intressanta delen av fastighetsmarknaden består dels av villor dels av kontorsbyggnader. På villamarknaden har efterfrågan på komfortkyla ökat på senare år, vilket ofta innebär ökad användning av el. System med direktväxling mot den kallare marken, s.k. frikyla, med jordförlagda slangar kan då vara ett fördelaktigt alternativ. Kontorsfastigheter behöver i allt större omfattning komfortkyla för att motverka den värme som avges från lampor, datorer och annan värmealstrande utrustning samt personal. På många håll används idag elenergi för att ventilerar bort överskottsvärme. I dessa system är frikyla från värmväxlare i jord ett intressant alternativ. Antalet anläggningar med frikyla är alltså litet men har ökat de senaste åren (figur 1.2).



Figur 1.2. Statistik över antalet nya markanläggningar med frikyla.
(Källa: Göran Hellström, LTH, 2000).

Förutom komfortkyla i byggnader erfordras ofta kylning i industriella processer och tillämpningar. Behovet av processkyla kan också tillgodoses genom koppling till mark, antingen i ett system tillsammans med värmepump/kylmaskin, s.k. kompressorkyla, eller i ett system utan värmepump, s.k. frikyla eller direktkyla. I Sverige är direktkylning av telekomstationer och TV-sändare den vanligaste tillämpningen av processkyla med koppling till berg.

1.2 Syfte och avgränsning

Nulägesbeskrivningen är en del av ett projekt som syftar till att utveckla ny markvärmeteknik för effektivare elanvändning inom bebyggelsesektorn genom;

- sammanställning av teknikläge och behov,

- förbättring av potentialen för markvärmeteknik inom tätbebyggda områden,
- utveckling av system med frikyla.

Denna rapport avser delen sammanställning av teknikläge och behov.

I rapporten ges en beskrivning över rådande teknikläge i Sverige med exempel från utlandet. Några delar av världen där markvärmetekniken är etablerad och utvecklas är till exempel Nordamerika, Mellanuropa och de nordiska länderna.

Små system för enskilda villor liksom stora system för kontorshus och liknande lokaler behandlas i rapporten. Beskrivningen avgränsas till slutna system, där en vätska cirkulerar i ett slutet slangsystem utan direktkontakt med grundvattnet och där värmekällan utgörs av jord eller berg. Det innebär att övriga etablerade tekniker såsom sjövärmepump, sedimentvärme, värme från uteluft och grundvattenvärme (öppna system) inte beskrivs i rapporten. Anledningen till att endast slutna system beskrivs är att dessa är betydligt vanligare än de öppna. Vid ogynnsamma förhållanden har problem ibland uppstått i de öppna systemen på grund av korrosion, kemisk och biologisk fällning samt igensättning av rör- och filterdelar samtidigt som det finns vissa fördelar. Användningen av slutna system gör anläggningarna mindre sårbara.

1.3 Konventionella system för uppvärmning och kylning

System för värming

Det finns 1 750 000 småhus¹ i Sverige. Drygt en tredjedel av dessa, 35 %, värms med enbart el, enl. SCB:s statistik för 1999 (www.scb.se, 2001). Näst vanligast är uppvärmning med en kombination av el och ved (17 %) och på tredje plats kommer uppvärmning med enbart olja (14 %). Inom småhussektorn ökar uppvärmning med enbart ved, värmepump samt fjärrvärme mest. År 1999 värmdes nära 2 % av småhusen med berg-, jord- eller sjövärmepump. Det är också vanligt att småhus har uppvärmningssystem som bygger på kombinationer av el, olja och ved.

Drygt hälften av alla lokaler, för vård, skolor och kontor m.m., värms med fjärrvärme. På motsvarande sätt som för småhus ökar uppvärmning med värmepump, antingen enskilt eller i kombination med andra värmeproducerande enheter. År 1999 var denna andel 12 %. Många lokaler har också uppvärmningssystem som består av olika kombinationer av el, olja, ved, fjärrvärme och värmepump.

De flesta flerbostadshus är anslutna till fjärrvärme för uppvärmning, 75 % av den uppvärmda ytan enligt SCB:s statistik för 1999.

En villa utanför fjärrvärmeområdet kan få sin värmeförsörjning tillgodosedd på olika sätt. Exempel på små uppvärmningssystem för en enskild villa:

- Pellets eller ved
- El (direktel eller vattenburen el)
- Naturgas (Skåne och Västkusten)
- Olja
- Berg-, jord- eller sjövärmepump
- Kombinationer av el, olja och ved.

¹ I SCB:s statistik för småhus ingår en- och tvåfamiljshus, rad- och kedjehus, helårsbostäder med lokaler samt vart 3:e år (senast 1999) även småhus på jordbruksfastigheter.

Motsvarande gäller för större byggnader som har eget lokalt värmesystem. Exempel på uppvärmningssystem för kontorshus eller större byggnad utanför fjärrvärmeområden:

- Olja
- El
- Naturgas
- Värmepump
- Kombinationer med olja, el, fjärrvärme och värmepump.

I tätortsområden är de centrala systemen ofta väl utbyggda. Exempel på stora anläggningar med värme- och kyladistribution i tätortsområden:

- Fjärrvärmeverk med förbränning av avfall, träbränslen eller olja, eller en mix av dessa bränslen.
- Kraftvärmeverk för el- och värmeproduktion.
- Värmepumpar för fjärrvärmedistribution.
- Blockcentral som använder tjockolja eller lätt eldningsolja.
- Fjärrkyla, t.ex. värmepumpar där värmekällan utgörs av renat avloppsvatten samt direktuttag ur kallt havs- eller sjövattnet.
- Separata kylanläggningar till byggnader;
 - kylmaskin (kompressordriven värmepump),
 - absorptionsvärmepump,
 - frikyla.

System för kylning

Med välisolerade byggnader, ökad användning av värmealstrande utrustning såsom datorer samt ökad personaltäthet och högt ställda arbetsmiljökrav ökar behovet av s.k. komfortkyla i t.ex. kontorshus. I många lokaler finns redan idag kylbehov under mer än 6 månader om året. Komfortkyla är ännu så länge ovanligt i småhus och flerbostadshus, men en framtida marknad inom dessa sektorer är trolig.

Komfortkyla kan framställas med konventionella kylmaskiner, absorptionsvärmepumpar, genom fjärrkyla eller frikyla. Komfortkylan kan distribueras vattenburen eller luftburen, eller som en kombination av dessa två. I stora delar av världen är klimatanläggningar en självklarhet. I USA t.ex. består en standardlösning av en kylpump installerad i husets ventilationssystem.

Majoriteten av dagens kylanläggningar i byggnader utnyttjar principen för kompressorkylprocessen. Kylmaskinen består av en eldriven kompressorvärmepump. Kylan produceras i förångardelen placerad i det utrymme som man avser kyla och den oönskade värmen avges i kondensordelen. Kondensorn är vanligtvis placerad på byggnadens tak, eller på annat sätt i kontakt med uteluften. Det finns också kyl-värmepumpanläggningar för klimathållning vars drift reverseras så att anläggningen kan användas för värmning vintertid. Det finns också anläggningar där överskottsvärmen avges till marken men den typen av anläggningar är ännu så länge relativt få.

Andra etablerade kyltekniker är den värmedrivna absorptionsprocessen. I en absorptionsvärmepump utgörs drivenergin i huvudsak av värme. Kompressorn är ersatt med en absorbator, vätskepump och en kokare. Som arbetsmedium krävs två medier: ett köldmedium och ett ab-

sorptionsmedium, ofta ammoniak respektive vatten. Absorptionsvärmepumpen kräver betydligt mindre mängd elenergi än kompressorvärmepumpen (till vätskepumpen). En nackdel är att den är mer utrymmeskrävande.

Fjärrkyla fungerar ungefär som fjärrvärme, kallt vatten produceras i en större anläggning och distribueras i rör till kunderna. Fjärrkylan produceras ofta med värmepumpar i kombination med värmeproduktion, absorptionsvärmepumpar eller genom direkt värmeväxling mot kallt bottenvatten från hav eller sjö. Ny lovande fjärrkylateknik baseras på kyla utvunnen ur lagrad snö. I t.ex. Sundsvall används tekniken för kylning av Sundsvalls sjukhus. Snö och is har genom sin höga latent energi (isbildningsvärme) goda egenskaper för kylagring.

Större byggnader behöver system för värmning, kylning, ventilation, luftbehandling och el-distribution. Kontorshus kännetecknas av hög luftomsättning och hög intern belastning dagtid, vilket ställer stora krav på styrning och reglering av systemens energiflöden. Vid utformning och dimensionering måste man utgå från en totalsyn avseende verksamhet, byggnad och klimathållning.

Markvärme – fördelar och nackdelar

Några faktorer som avgör valet av uppvärmningssystem är bl.a. energieffektivitet, miljöbelastning (buller, luftföroreningar, avfall m.m.), energipris idag och framtida energiprisutveckling, samhällsaspekter (energipolitik), utrymmeskrav, försörjningstrygghet, driftsäkerhet, kostnader för drift och underhåll samt investering (Moe et al, 1996).

Markvärmesystem förknippas i allmänhet med följande fördelar;

- låga drift- och underhållskostnader,
- mindre buller (jämför t.ex. direktkyla med kompressorkyla),
- liten total miljöbelastning (beroende på hur elen produceras erhålls t.ex. inga luftföroreningar och små utsläpp av klimatstörande gaser),
- förnyelsebar naturresurs (gratisenergi) tas tillvara i form av lagrad solenergi,
- mindre utrymmeskrävande i byggnaden,
- avsaknad av takmonterat kylaggregat vilket i en del sammanhang är gynnsamt ur arkitektonisk synpunkt,
- kan användas för både små och stora installationer (jämför t.ex. fjärrdistributionssystem),
- kan användas för både värme och kyla, eller antingen för värme eller kyla.

Bland nackdelarna kan följande nämnas:

- kräver (beroende på systemstorlek) viss tillgänglig markyta,
- relativt höga investeringskostnader (beroende på systemlösning),
- beroende av kontinuerlig elförsörjning (vid värmepumpkoppling),
- viss miljöbelastning (beror bl.a. på hur elen produceras)
- kräver viss kännedom om markförhållandena,
- kunskapen om systemen varierar bland installatörer och köpare/beställare.

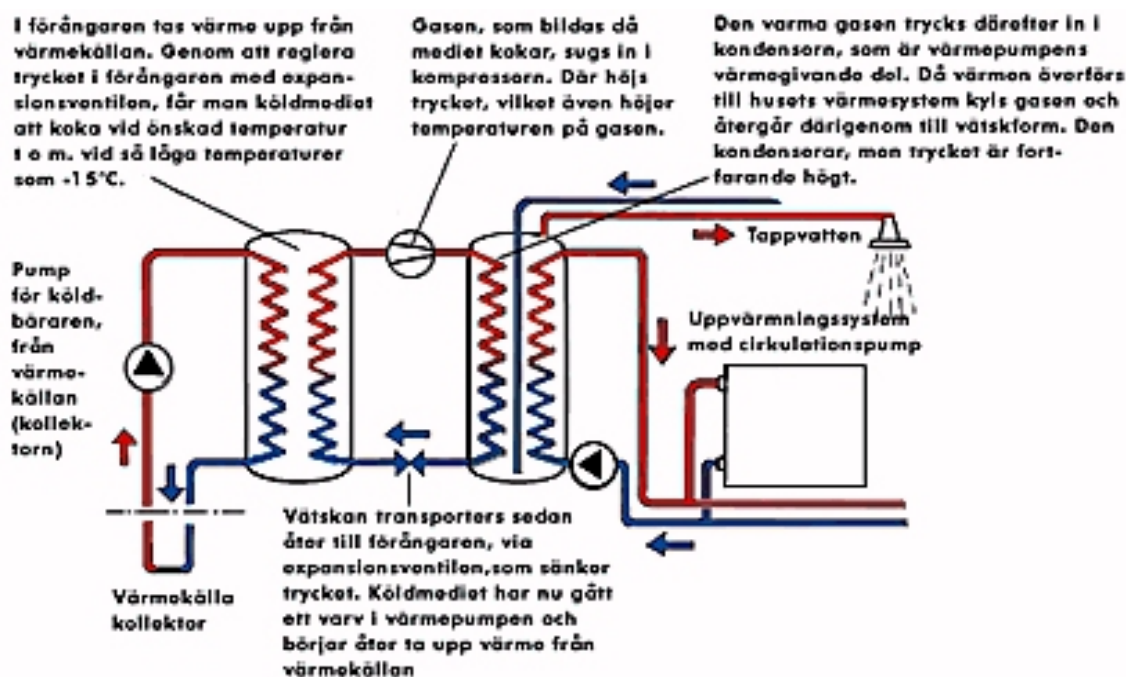
Huruvida ett markvärmesystem är det bästa alternativet beror av en sammanvägning av olika faktorer (se ovan) med hänsyn till lokala geologiska förhållanden och hur systemet står sig i jämförelse med alternativa system.

2. VÄRME- OCH KYLASYSTEM MED OCH UTAN VÄRMEPUMP

I ett markvärmepumpsystem tillvaratar man den solenergi som lagrats i marken. Jord och berg är relativt stabila värmekällor ur temperatursynpunkt.

En värmepump består av fyra huvudkomponenter: förångare, kondensator, expansionsventil (strypventil som minskar trycket) och kompressor som höjer trycket. Dessa är förbundna i ett slutet rörsystem i vilket det cirkulerar en köldbärare, som omväxlande befinner sig i gas- eller vätskeform. Genom att förändra trycket kan man manipulera kokpunkten för vätskan, så att man därmed kan utnyttja en värmekälla med låg temperatur. Den vanligaste typen av kompressor är kolvkompressorn men scrollkompressorn börjar bli vanlig.

Värme tas upp från värmekällan (mark, luft eller vatten) och värmebäraren pumpas till värmepumpens förångardel där den förångar köldmediet, se [figur 2.1](#). Temperaturen är emellertid för låg för att användas för uppvärmning. Köldmediets tryck höjs därför i det efterföljande kompressorsteget, varvid också temperaturen höjs. Köldmediet leds därefter vidare in i kondensorn där det övergår från gas till vätskeform samtidigt som dess värme avges till uppvärmning. För att sluta systemet återförs köldmediet via en expansionsventil som sänker trycket till förångaren och förloppet upprepas. Värmebärarkretsen (värmekällan) ansluts således till värmepumpens förångardel och till dess kondensordel ansluts radiatorsystemet, golvvärmesystemet eller ett system med fläktkonvektorer (luftburen värme). Värmepumpens kompressordel ansluts till elnätet.



Figur 2.1. Principen för en värmepump (www.svep.se, 2000).

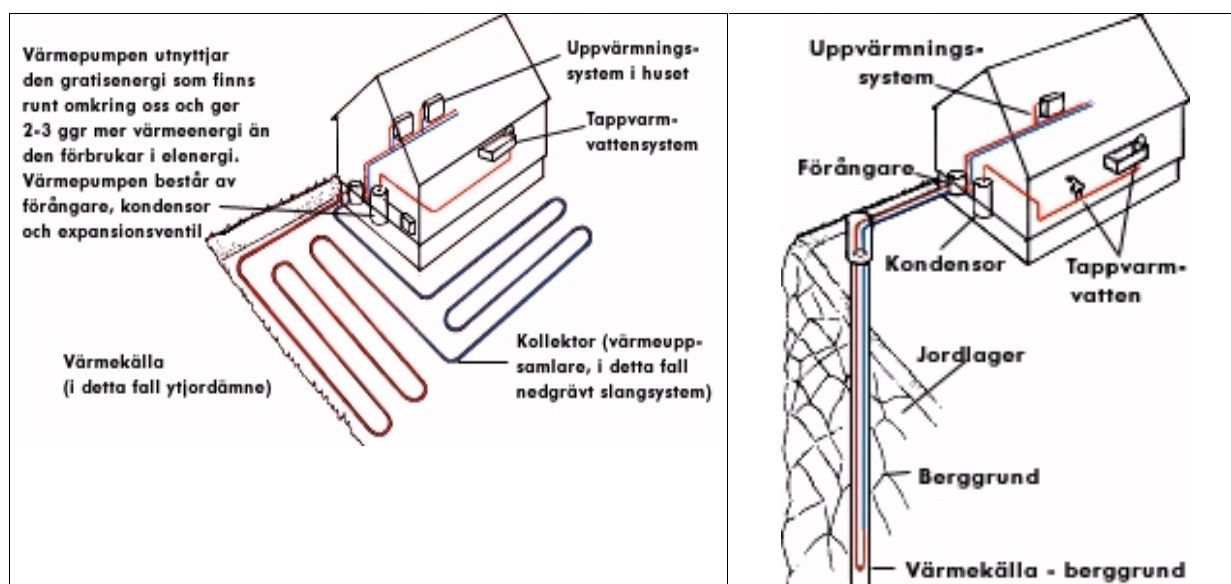
I system baserade på direktförångning förångas köldmediet vid cirkulation genom markslingan. Värmepumpen har ingen förångare inomhus utan endast en kondensordel, dvs. förångaren är inte integrerad i apparathöljet. Jämfört med ett konventionellt indirekt system blir mängden köldmedium större, vilket begränsar direktförångningssystem till mindre installationer (www.svep.se, 2000).

I **figur 2.2** visas en typisk utformning av en värmepumpinstallation till en villa från en svensk tillverkare.



Figur 2.2. Principskiss av en modern villavärmepump inklusive vattenvärmare, elkassett, cirkulationspump samt reglerdator med display (www.nibe.se, 2000).

Systemen används normalt både för rumsuppvärmning och värmning av tappvarmvatten. Under kalla vinterdagar erhålls spetsvärme från elkassett eller från äldre befintlig panna. I normalfallet går spetsvärmen in vid en utomhustemperatur om kring $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. I dagsläget är det mindre vanligt inom bostadssektorn att systemet dimensioneras för både värmning och kylning av huset, men bedömningen är att efterfrågan på komfortkyla kommer att öka. I **figur 2.3** visas värmepumpanläggningar med horisontella slangar i jord respektive borrhål i berg.



Figur 2.3. Värmepump med horisontella slangar i jord respektive borrhål i berg (www.svep.se, 2000).

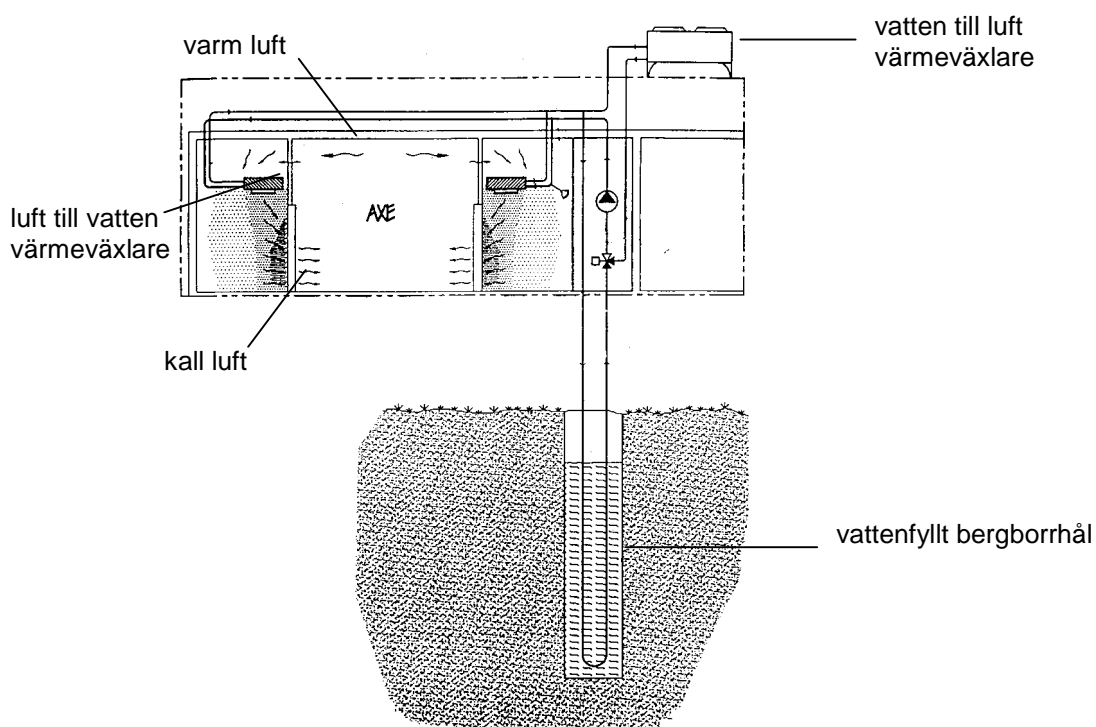
I ett konventionellt system med villavärmepump och energibrunn består värmebärarkretsen av slang, cirkulationspump, slutet expansionskärl, säkerhetsventil, tryckvakt (larmar vid lågt tryck) och manometer (markering lägsta/högsta arbetstryck) och anordning för manuell avluftning (Lindborg, 1999).

I markslingan cirkuleras en vattenblandning med antifrysmedel som överför värme till och från markslingan och omgivande jord eller berg. De värmepumpar som är vanligast i Sverige är s.k. vatten till vatten värmepumpar. I det fall vattenburet distributionssystem saknas är det möjligt att distribuera värmen i huset med hjälp av strategiskt utplacerade fläktkonvektorer. En fläktkonvektor är i princip en vattenradiator med inbyggd fläkt, som blåser värmen från vattenkretsen ut i rummet. I normalfallet får man räkna med upp till ett par grader lägre temperatur i rum utan fläktkonvektor, längst bort från fläktkonvektorn.

Marken kan också utnyttjas till att sänka temperaturen i byggnader, dvs. för att erhålla komfortkyla. Det finns i princip två typer av system. I ett system med frikyla kan den överskottsvärme som produceras under sommarhalvåret på ett kostnadseffektivt sätt värmeväxlas mot den kallare marken. På så sätt åstadkoms 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, producera kyla till byggnaden och avge överskottsvärme till marken.

På många håll i landet kan kylbehovet tillgodoses genom frikyla. Kyla hämtas direkt ur kallt vattendrag, kallt bottenskikt i sjö eller havsvik, sval uteluft eller ur marken. Vid koppling till mark t.ex. i en bergvärmeanläggning pumpar man runt värmebärarvätskan i energibrunnen för att med hjälp av värmeväxlare kyla inomhusluften. En kombination av värmepumpdrift på vintern och direktkyla på sommaren ger teoretiskt sett ett optimalt system, vinterns värmepumpdrift kyler ner marken och levererar värme medan sommarens frikyladrift 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 år inte sker något energiuttag ur marken. Ett sådant system kräver endast liten mängd energi för drift av värmepumpen respektive cirkulationspumpen.

Ett system med frikyla innefattar inte värmepump. Det innebär att energikostnaden endast omfattar viss driftel för cirkulationspumpen. Den cirkulerande värmebärarfluiden transporterar överskottsvärme till marken där denna avges. En typ av frikylasystem som fått stor spridning i Sverige används för kylning av telefonväxelstationer. Systemet, som är ett exempel på processkyla, inkluderar en eller flera markvärmeväxlare i form av borrhål i berg och speciellt utvecklade kylbafflar som kyler luften i stationsutrymmet, se [figur 2.4](#). Med frikylasystemet kan temperaturen hållas lägre än 25 °C i rummet. Vätsketemperaturen ut från borrhålet är maximalt 20 °C.



Figur 2.4. System med frikyla för kylning av en telefonväxelsstation (Hellström och Gehlin, 1997).

3. GEOLOGISKA OCH GEOTEKNISKA FÖRUTSÄTTNINGAR I SVERIGE

3.1 Jord- och bergförhållanden

3.1.1 Berggrunden

Den svenska berggrunden domineras av kristallint urberg som granit och gnejs (Viberg, 1995). Det finns dock även områden med yngre sedimentär berggrund bestående av sandsten, kalksten och skifferar längs hela fjällkedjan samt i Skåne, Småland, Öland, Gotland, Västergötland och Östergötland, Närke och Dalarna.

3.1.2 Jordtäcket

Vid installation av markvärmepåsar är jordtäcket mäktighet och geotekniska egenskaper viktiga såväl ur teknisk som ekonomisk synvinkel. Detta gäller både för bergvärme och yttjordvärme. Vid bergvärme måste ett eventuellt jordtäckes genomborras, medan vid yttjordvärme skall värmepåsarledningarna installeras i jorden.

Jordtäcket bildning

Under den sista istiden (Weichel) var hela Sverige täckt av is. Landisen började retirera från södra Sverige för ca 14 000 år sedan och för ca 8 500 år sedan hade i stort sätt hela istäcket försvunnit. I samband med isavsmältningen var stora delar av landet täckt av söt- och/eller bräckvatten. Den högsta vattennivån – den s.k. högsta kustlinjen (HK) – nåddes vid skilda tillfällen i olika delar av landet. Dessutom fanns avsnörda stora sjöar bestående av smältvatten, som var uppdämda av inlandsisen på en sida (Viberg, 1995).

Ur ett geologiskt perspektiv är med några få undantag det svenska jordtäcket mycket ungt. De nuvarande jordlagren bildades dels i samband med inlandsisens rörelser och under inlandsisens avsmältning (glaciala jordar), dels efter landisens avsmältning (postglaciala jordar). Äldre tiders jordtäckte, som fanns före istiden, är i stort sett helt bortroderat av landisen (Viberg, 1995).

Jordarterna

De glaciala jordarna kan indelas i morän respektive glaciala sediment.

Moränen bildades på två sätt, dels genom avlagring under isen under dennas rörelse mot isfronten (bottenmorän), dels avlagrades den när den smalt fram ur isen vid isfronten (yttmorän). Inom ca 75 % av Sveriges yta utgörs hela jordtäcket av morän. Dessutom underlagras morän normalt andra jordar.

Moränens sammansättning varierar starkt från finkornig lermorän till grovkornig grusmorän. Block är mycket vanliga i morän även om dess förekomst och storlek varierar starkt.

De glaciala sedimenten bildades av rinnande smältvatten som;

- grovkorniga sediment (sand, grus och sten) i åsar och deltan,
- finkorniga sediment (lera och silt) på botten av dåvarande havsområden och vattenfyllda fjärdar utanför isranden.

De postglaciala jordarna kan indelas i omvandlade, omlagrade samt organiska jordar. De flesta av de processer, som beskrivs nedan pågår fortfarande – dock med mindre intensitet.

Vid landhöjningen utsattes de glaciala jordar, som avlagrats på slänter, för svall från havsvåggor. Så kallade svallsediment ”sköljdes” härvid ut ur de glaciala jordarna och transporterades nedför slänterna för att deponeras längre ned. Grövre svallsediment som sand och grus transporterades endast en kort sträcka, medan finare material som silt och lera transporterades en längre sträcka. Normalt är lagermäktigheten för utsvallad grus och sand liten (vanligen någon meter eller mindre), men på vissa platser, särskilt längs rullstensåsar och moränslänter, kan mäktigheten vara större än 5-10 m. Postglacial silt och lera ligger ofta som ett relativt tunt översta jordlager avlagrat ovanpå glacial lera.

Medan landhöjningen pågick eroderades lågt liggande glaciala sediment av stora älvar (som var större än de nuvarande). Stora mängder av på detta sätt fluvialt eroderade sediment (huvudsakligen silt och sand) transporterades nedströms längs vattendragen för att bilda nya (postglaciala) sediment avlagrade ovanpå tidigare avlagrade glaciala sediment. Av speciellt geotekniskt intresse är de markavsnitt där svallat eller fluvialt eroderat grus och sand avlagrats ovanpå lera och silt, längs slänternas nedre del och längs dalbottnar.

Tiden efter isens avsmältning ökade växt- och djurlivet markant, vilket medförde en ökad bildning av organiska jordar som exempelvis torv och gyttja. Torvmossor bildades på många håll i Sverige. Döda och förmultnande växter byggde successivt upp lager av torv i sjöar, bäckar och fjärdar för att slutligen täcka större delen av vattenytan (Viberg, 1995).

Jordmäktighet

Jordmäktigheten måste alltid utredas vid installation av vertikala markvärmväxlare i mark.

Vid installation av bergvärme bör inte jorddjupet vara alltför stort, eftersom det innebär en tillkommande kostnad att borra genom jordlagren. Erfarenhetsmässigt bör inte jordmäktigheten överstiga 6-10 m om projektet skall vara ekonomiskt lönsamt.

Vid installation av markvärmväxlare i jord krävs det å andra sidan att man har tillräckligt stort jorddjup. Erforderligt jorddjup varierar med hur markvärmväxlarna utformas – vertikalt, horisontellt eller horisontellt i flera nivåer.

Områden där bergrunden går i dagen är mycket vanliga i Sverige och jordtäckets mäktighet är 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.

Moränlagret är vanligtvis några få meter mäktigt 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 meter eller mera.

Lerlagrens mäktighet är vanligen 5-10 m. Mäktiga lerlager, omkring 100 m, finns på västkusten i Göteborgsområdet och på Uppsalaslätten. Sedimentlager bestående av sand, silt och till viss del lera med mäktigheter upp till 50 m eller mera förekommer längs älvdalarna i Värmland och Dalarna samt längs de norrländska älvdalarna (Viberg, 1995). I Jönköpingsområdet finns sandiga och siltiga jordar med upp till ca 200 m djup.

Arealen lera och sand samt lera med minst 10 meters mäktighet har utretts översiktligt för de största tätorterna i Mellansverige (Modin och Wilén, 1980). Vid tidpunkten bodde ca 2,7 miljoner av Sveriges befolkning i dessa områden. Syftet var att bedöma potentialen för vertikala jordvärmesystem i lera, silt och sand. Av totalt undersökt landareal 2 310 km² utgjordes 38 % av lera, varav 9 % med mäktighet större än 10 meter, och 12,5 % utgjordes av sand. Felmarginalen på angivna siffror bedömdes till upp till ± 10 %. Även med hänsyn till att de centrala delarna är bebyggda så finns fortfarande stora outnyttjade områden i anslutning till dessa.

Alla borrningar som utförs för energiborrning måste anmälas till SGU:s brunnsarkiv i Uppsala (Sveriges geologiska undersökningar). Arkivet kan också användas för att med ledning av gjorda borrningar och geologiska kartblad bedöma jorddjup, berggrund, grundvatten m.m. i ett område.

3.1.3 Grundvattenförhållanden

Grundvatten definieras som det vatten som helt fyller hålrum och porer i marken. När nederbörden når markytan avdunstar en stor del och resterande mängd vatten kallas avrinning. Avrinningen delas upp i ytvattenavrinning, som rinner av i vattendrag och sjöar, och i grundvatten, som rinner genom jordlagren eller berggrunden. När nederbörsvatten infiltrerats i markytan passerar det först genom den luftade eller omättade zonen innan det når den mättade zonen. Av den nederbörd som faller över Sverige bildar knappt hälften grundvatten (www.sgu.se, 2001).

Grundvattentytan följer generellt topografin någon eller några meter under markytan men ligger oftast ytligare i lågpunkter och på lite större djup på höjder. I de flesta fall fungerar höjdpunkterna som inströmningsområden till grundvattenmagasin (akviferen) och lågpunkterna som utströmningsområden. Ett grundvattenmagasin utgörs av material med vattengenomsläppligt geologiskt material och som avgränsas hydrauliskt mot omgivningen av material med annan sammansättning. De största grundvattentillgångarna i landet förekommer i de stora sand- och grusavlagringar, som bildades i samband med den senaste nedisningens avsmältningsskede. Även vissa delar av södra Sveriges sandstens- och kalkberggrund innehåller betydande mängder utvinnbart grundvatten.

Grundvattnet rör sig i marken p.g.a. gravitationskraften från områden med högre grundvattennivå till områden med lägre. Skillnaden i grundvattennivå per längdenhet, grundvattenpotentialen (gradienten), är den drivande kraften i grundvattenströmningen. Den viktigaste parametern för grundvattenflödet är jordens eller bergets genomsläpplighet (hydrauliska konduktivitet). Ju grovkornigare jord desto högre genomsläpplighet och desto snabbare transporteras grundvattnet. I kristallint berg, som granit och gnejs, är själva bergmassan oftast tät och har en mycket låg genomsläpplighet. I hela bergvolymen är det därför mängden sprickor och storleken på dessa som är avgörande för den hydrauliska konduktiviteten. Variationer i bergmassan, som sprickzoner eller gångar med tätare bergarter, exempelvis diabas, är av betydelse för grundvattenströmningen.

Grundvattennivåerna, som är ett mått på aktuell magasinbefyllning, varierar med årstiderna. Mönstret är olika för olika delar av Sverige. Grundvattenmagasinen fylls på under perioder när nederbörden är större än avdunstningen, om jorden samtidigt är otjälad, och under snösmältningen. Det innebär att påfyllningen normalt sker under vår och höst.

Jord består av partiklar och porer, som kan vara helt eller delvis fyllda med vatten eller luft. Ju finkornigare jord desto fler och mindre porer. Porstorleken är avgörande för jordens vattenhållande förmåga, förmåga att suga upp vatten (kapillaritet), förmåga att släppa igenom vatten och luft (permeabilitet). Finkorniga sorterade jordar, t.ex. leror, har stor kapillär stighöjd, men suger upp vattnet mycket långsamt. De har dessutom låg permeabilitet, dvs. de är täta och släpper därför igenom vatten långsamt. Grovsilt (kornstorlek 0,06-0,02 mm) är den jordart som suger upp mest vatten per dygn. Den har dessutom förmågan att hålla kvar stora mängder vatten. Detta innebär att leriga och siltiga jordar oftast är närapå vattenmättade även på några meters avstånd ovan grundvattenytan.

Om man i en finkornig jord väljer att installera ytjordvärmeslingan ovan grundvattenytan bör återfyllningen ske med samma material eller material med liknande egenskaper för att inte uttorkning skall uppstå runt slangen. Detta är särskilt viktigt att beakta om systemet dimensioneras för kyla, så att värme tillförs marken sommartid, vilket leder till att den fukt som finns i jorden transporteras bort från slangen.

Grovkorniga sorterade jordarter, t.ex. sand- och grusjordar, är mycket permeabla, d.v.s. de släpper lätt igenom vatten och torkar snabbt. Naturliga variationer i grundvattennivå över året har därför störst påverkan i sand- och grusjordar och betydligt mindre betydelse för en finkornig jord med kapillär sugförmåga. Några decimeter ovan grundvattenytan i en väl sorterad kan det återstå endast 5-10 % vatten. Den kapillära stighöjden i grovkorniga jordar av sand, grus, sten och block är oftast obetydlig.

3.1.4 Markvärme och marktemperatur

Texten i detta avsnitt bygger på Handboken Bygg: Geoteknik (1984), Handboken Plattgrundläggning (Bergdahl et al, 1993) och Svensk Byggnorm (SBN, 1980).

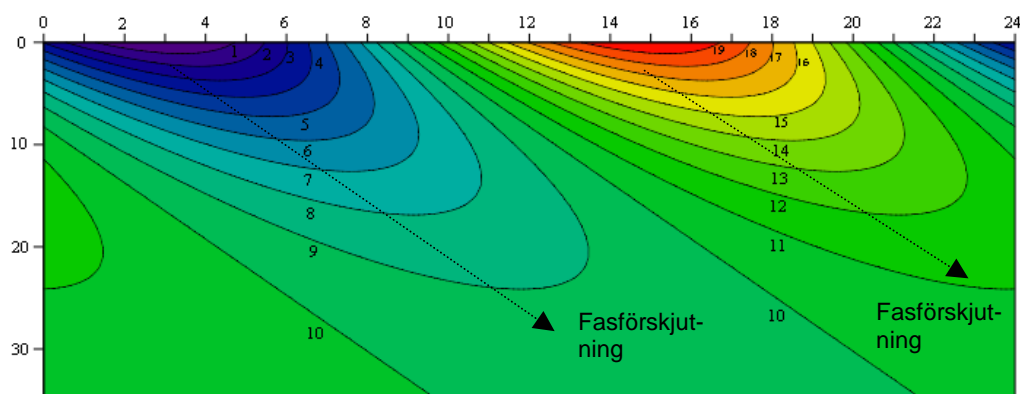
Markvärme

Markvärme är den värmeenergi som finns lagrad i marken. Värmemängden kan beräknas som produkten av marktemperaturen och markens värmekapacitet samt för delvis frusen mark också av den mängd vatten som kan avge eller ta upp energi genom frysning eller smältning (<http://www.ne.se>, 2001).

Med markvärmeteknik (*ofta bara markvärme*) menas system för utvinning och lagring av värme i jord, berg samt yt- och grundvatten .

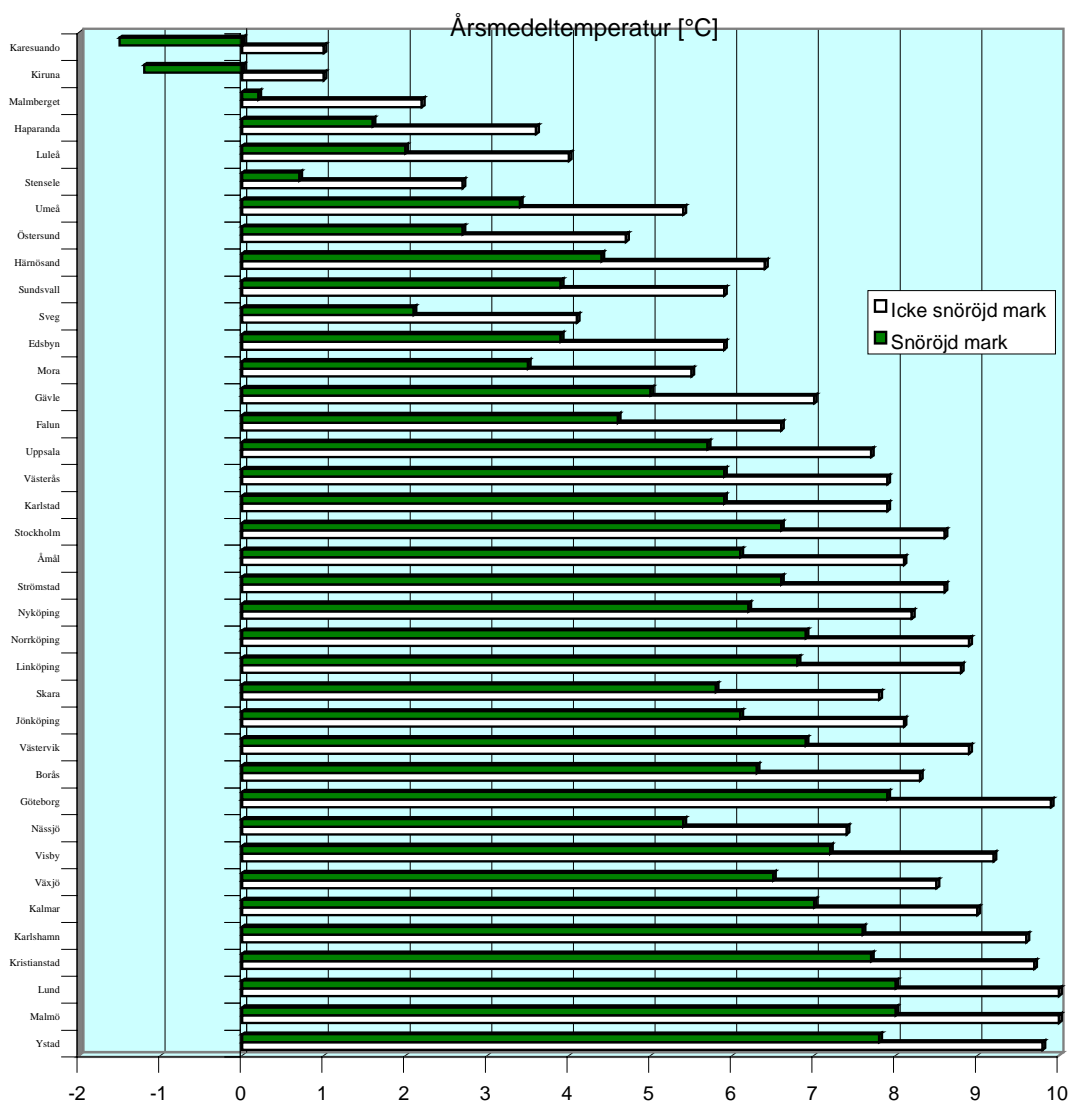
Marktemperatur

Marktemperaturen varierar på ett cykliskt sätt som bestäms av energiutbytet mellan mark och atmosfär och de termiska egenskaperna hos marken (www.ne.se). Temperaturvariationer i marken avtar normalt exponentiellt med djupet och de kan liknas vid harmoniska svängningar som dämpas och fasförskjuts jämfört med variationerna vid markytan. Dämpningen och fasförskjutningen bestäms av kvoten mellan de värmeledande och de värmelagrande egenskaperna hos marken. Ett exempel på hur markens temperatur varierar med djupet framgår av [figur 3.1](#).



Figur 3.1. Beräknade temperaturvariationer under ett dygn i en lerjord där temperaturen varierar från 0-20 °C vid markytan (efter www.ne.se, 2001). Variationerna jämnas ut med djupet samtidigt som de fasförskjuts. På ungefär 10 cm djup återstår bara 37 % av temperaturvariationen. När markytan är som varmast (20 °C), omkring klockan 15, inträffar den lägsta temperaturen (9,4 °C) på 30 cm djup.

Markens naturliga årsmedeltemperatur på olika orter i landet är sammanställd i [figur 3.2](#). (efter Byggboken, 1989).



Figur 3.2. Markens naturliga årsmedeltemperatur i olika delar av landet för icke snöröjd respektive snöröjd mark, schablonvärden (efter Byggboken, 1989).

Grundvattnets temperatur

Grundvattnets temperatur är i södra Sverige i medeltal densamma som uteluftens årsmedeltemperatur, dvs. mellan ca +5 °C och +8 °C. I norra Sverige är grundvattnets temperatur något över densamma, mellan +2 °C och +5 °C (Handboken Bygg: Geoteknik).

3.1.5 Tjälbildning

Tjäle kan bildas omkring markvärmeförläsningsledningarna (kollektorerna) i jorden om tillräckligt stor mängd värmeenergi tas ur marken under vintern. För tjälbildningen har såväl markvärmeförläsningsledningarnas temperatur som lufttemperaturen betydelse, samt även ledningarnas läggningsdjup, förekomst av isolerande snötäcke, jordens värmeledningsförmåga samt grundvatten- och markfuktighetsförhållandena.

Det krävs vatten, antingen som ånga eller vätska, för att marken ska frysa eftersom det är vatten i marken som fryser. Är marken helt torr fryser den inte trots minusgrader. Det har visat

sig att vattnet i marken inte fryser vid samma temperatur, men att olika jordar uppvisar samma frysmönster. Ofruset vatten under 0 °C kan förekomma och består främst av vatten adsorberat till mineralytorna. Adsorbtivt vatten har lägre energinivå än "fritt" vatten och ju lägre energinivå desto lägre temperatur krävs för att vattnet ska frysa (Handboken Bygg: Geoteknik, 1984). Till vilken grad marken fryser beror av dess termiska egenskaper, porositet, fukttinhåll och temperaturen i omgivningen, där fukttinhållet är av störst betydelse.

Jordartens textur har betydelse för hur djupt tjälen tränger ned. Tjäle penetrerar djupare i en siltig och sandig jordart som har glesare textur än i en lera som har tätare textur.

Frysning av jord och bildandet av islinser

Vatten över grundvattenytan, i den omättade zonen, kan vara kapillärt eller adsorbtivt bundet. Det vatten som förekommer adsorbtivt i marken är bundet till mineralkornen genom ytaktiva krafter. Vatten kan även förekomma hygroskopiskt, dvs. inne i mineralkornen.

Den gräns till vilken jorden har tjälats kallas tjälfronten. När lufttemperaturen sjunker mot vintern börjar tjälfronten att penetrera marken. I finkorniga jordar omvandlas då det vatten som finns i marken till is. Närmast tjälfronten uppstår därmed ett undertryck. Tjälfronten tränger ner i marken genom att "iskrystallerna" på undersidan drar till sig vattenmolekyler (connywww.tg.lth.se).

Eftersom kornen strävar efter att bibehålla sitt adsorbtiiva vatten innebär det att mindre fast bundet vatten transporteras från underliggande skikt upp till tjälfronten och islinserna tillväxer. Processen verkar uttorkande. Det vatten som finns i den ofrusna zonen migrerar mot den frusna zonen på samma sätt som fukt migrerar mot ett torrt område. Det undertryck som uppstår i porvattnet vid frysningen (tjälbildning) är i stort sett proportionellt mot den negativa temperaturen i jorden.

Finns vatten tillgängligt och jorden är "gynnsam" för tjälbildning (med andra ord tjälfarlig) kan islinser tillväxa nästan obehindrat. Samtidigt dämpas emellertid tjälfronten från djupare penetration på grund av det s.k. isbildningsvärmets, som frigörs vid omvandlingen av vatten till is. Ändrade förhållanden som exempelvis ökad tillförsel av vatten och/eller mindre tillgång till värme gör att tjälen inte är stationär och att nya islinser kan bildas (www.nrc.ca).

Betydande för islinnsbildning är vinterns intensitet och längd. Milda vintrar ger litet tjäldjup med islinnsbildning nära markytan. Stränga vintrar ger större islinser och islinnsbildning på större djup. Markytan kan också bli islinnsfattig om tjälfronten snabbt passerar markytan så att islinserna inte hinner växa till. Av betydelse för islinns tjocklek har således hastigheten på den penetrerande tjälfronten. En långsam nedträngning medför tjockare islinser än en snabb nedträngning, och de tjockaste islinserna bildas då tjälfronten står stilla.

Tjälfarliga jordar

Vatten som fryser ökar i volym med ca 9 %. Volymen av en jord som fryser ökar till följd av övergången från vatten till is i porer och bildandet av islinser. Hindras denna volymökning uppkommer ett tryck, ett expansionstryck. Tryckets storlek är beroende av vilka rörelsemöjligheter som jorden och markytan kan erbjuda, d.v.s. den frusna och ofrusna jordens permeabilitet och den ofrusna jordens kompressionsegenskaper. Expansionstrycket verkar vinkelrätt mot tjälgränsen, i värmeflödets riktning, och ökar med minskad permeabilitet och minskad temperatur i den frysande jorden. Blir expansionstrycket tillräckligt högt kan det leda till tjäl-

lyftning. Tjällyftning i jorden syns som upphöjningar på markytan. Vid eventuell tjälning kring markvärmväxlarledningarna i ett jordvärmelager kommer tjälfronten att bildas koncentriskt kring ledningarna och expansionsstryck kan således även uppstå i sidled. Det innebär att tjällyftningen blir olika för en punkt ovanför kollektorslanagarna som för en punkt mellan slangarna. I det fallet kan en vågighet uppstå på markytan, framåt vårvintern när tjälningen är som störst (Byggforskningsrådet, 1983). Det är också möjligt att denna vågighet framträder först under tjällossningen. Orsaken är att skikt av frusen jord kan ha bildats tidigt på säsongen, som sedan fungerar som en ”platta”. Markytan kan därmed bibehålla sin jämnhet under längre tid samtidigt som hålrum uppstår under plattan mellan slangarna vid tjällossning.

Viktigt för tjällyftningsprocessen är adsorbitionsskiktet och avståndet till grundvattenytan, där kapillariteten har avgörande betydelse, samt även temperatur och belastningstryck på markytan. Närhet till grundvattenytan innebär stor tillgång på vatten. Kapillariteten är dock av störst betydelse och hänger samman med jordens permeabilitet. Den kapillära stighöjden är högre i finkorniga jordar men för leror är den kapillära stighastigheten så långsam att det knappt hinner uppstå någon kapillärlag stigning under vinterhalvåret. På grund av den ringa tillförseln av vatten i lera kommer färre och tunnare islinser att bildas jämfört med förhållandena i en silt. Tjällyftningen blir därmed mindre i lera än i silt, och leriga jordar klassificeras därmed endast som måttligt tjälfarliga, klass II, se [tabell 3.1](#).

Permeabilitetsegenskaperna i en silt medför däremot hög kapillärlag stighastighet och att vattnet kan stiga betydligt över grundvattenytan, vilket gynnar tjällyftningsprocessen (connywww.tg.lth.se). Siltiga jordar klassificeras därför som mycket tjälfarliga jordar, klass III, se [tabell 3.1](#).

Tabell 3.1. Klassning av jordar efter tjälfarlighet.

<i>Klassning</i>	<i>Kapillärlag stighöjd</i>	<i>Jordart</i>
<i>Klass I, icke tjälfarliga jordarter</i>	–	Grus och grov sand, där tjällyftning och upptining är obetydlig
<i>Klass II, måttligt tjälfarliga jordarter</i>	1 - 1,5 m	Lera samt blandkorniga och finkorniga jordarter med hög lerhalt
<i>Klass III, extremt tjälfarliga jordarter</i>	> 1,5 m	Silt och siltrika jordarter

Referens: <http://connywww.tg.lth.se> 2001-02-06.

Tining av jord i samband med tjällossning

När temperaturen stiger över vattnets fryspunkt börjar islinserna att smälta. Det vatten som sugits ut ur jordens porsystem för att bilda islinser kan inte återgå till porerna utan dräneras bort. Det uppstår en volymminskning i jorden som resulterar i sättningar. I samband med tjällossningen uppstår också en betydande hållfasthetsminskning i de flesta jordar. Detta förlopp är i regel mest markant under de 3-4 första frys- och tiningscyklerna, som en finkornig jord utsätts för. Efter upprepade cykler blir jorden delvis tjälresistent – jämför till exempel en torrskorpelera i markytan med den underliggande opåverkade leran.

Tjälskador

Tjäle kan medföra många problem. På vintern utgörs problemen främst av tjällyftning, deformationer, expansionskrafter, sprickbildning, frysning av vatten i ledningar, svårigheter att utföra schaktningsarbeten etc. På våren när tjälen går ur marken kan problem uppstå som ned-satt bärighet, permanent upplyfta konstruktioner, stora sättningar, ojämna sättningar etc.

Permafrost

I arktiska områden där samtliga jordlager inte hinner tina under den varma årstiden bildas ständig tjäle, s.k. permafrost. Inom permafrostområden tinar under den korta sommaren ofta det översta jordlagret till någon eller några meters djup, men därunder finns tjälen kvar under hela året. I extrema fall, exempelvis på den sibiriska tundran, där det vintertid är mycket kallt och det isolerande snötäcket ofta är tunt, finns kilometerdjup tjäle. Även i den nordligaste delen av Sverige finns områden där permafrost råder.

Det finns fall i Sverige där artificiell ”permafrost” har bildats under konstfrusna skridskobanor och under fryshus med oisolerat golv. På liknande sätt skulle artificiell ”permafrost” kunna uppstå vid värmelagring i mark, förutsatt att mera värmeenergi tas ut ur jorden under flera år än vad som lagras in. I norra Sverige, där den naturliga tjälen går djupt, är det särskilt stor risk för att artificiell ”permafrost” skall uppstå. Emellertid kommer denna att successivt försvinna om driftfallet ändras eller om anläggningen tas ur drift. Om artificiell ”permafrost” bildas, kan stora skador uppstå på grund av deformationer. Samtidigt försämras anläggningens funktion betydligt.

3.1.6 Tjäldjup

En väsentlig faktor vid dimensionering av en ytjordvärmeanläggning är huruvida tjälen kan tränga ner till markvärmeväxlarledningarna. Tjäldjupet beror av följande faktorer:

- Luftens köldmängd
- Vinterns längd
- Jordens termiska egenskaper
- Snödjupet

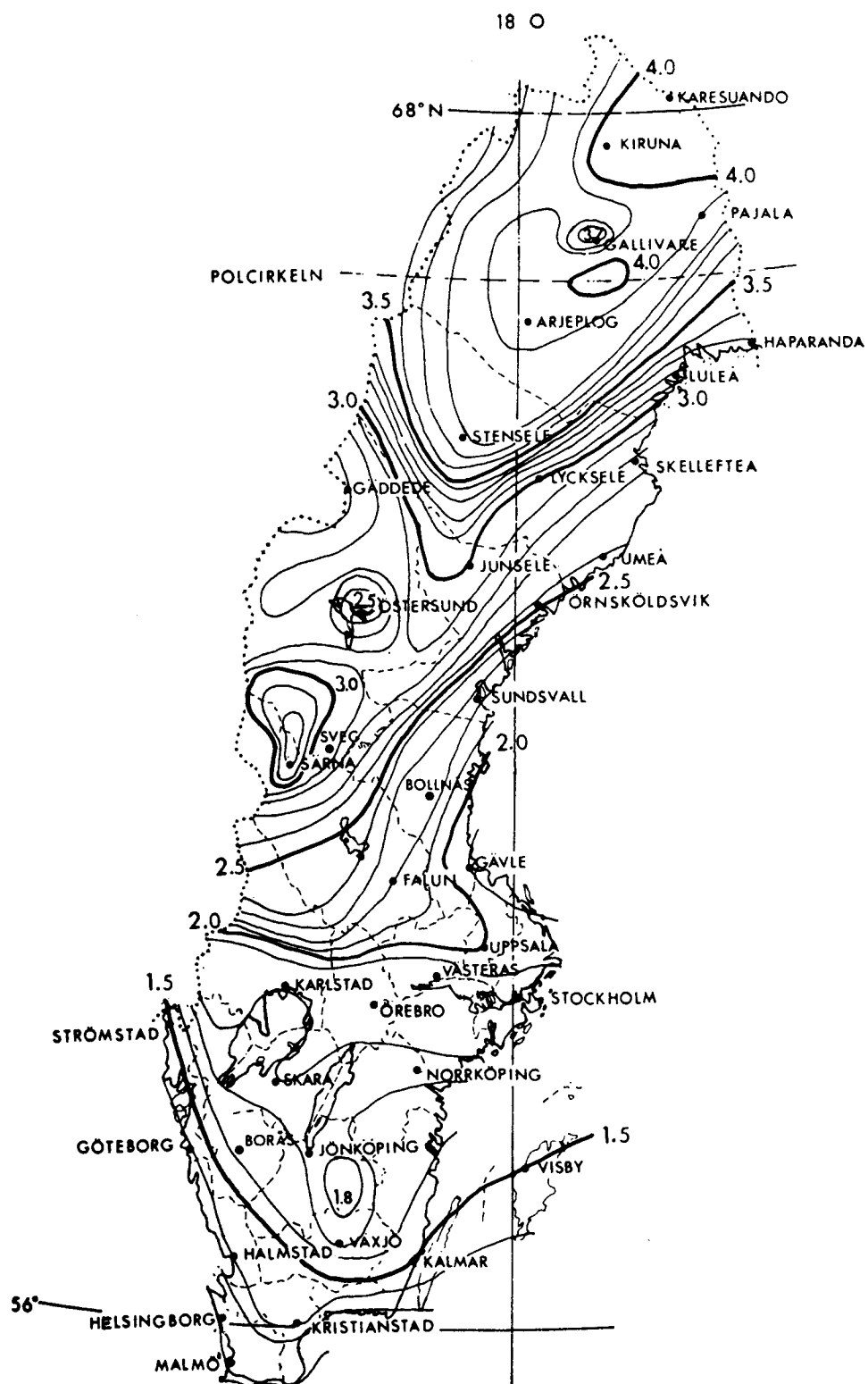
Luftens köldmängd, d.v.s tidsintegralen av vinterns negativa lufttemperatur, varierar över landet.

Vinterns längd räknas från den tidpunkt på hösten då temperaturen stadigvarande är lägre än 0 °C. På samma sätt avslutas vintern då temperaturen stadigvarande är högre än 0 °C. Längden på en normal vinter varierar från ca 60 dygn längst i söder till ca 210 dygn längs i norr.

De för tjälnedträngningen avgörande termiska egenskaperna är jordens värmekapacitet, värmeledningsförmåga och latent värme. Jord är sammansatt av flera olika komponenter av vilka var och en har helt olika termiska egenskaper, t.ex. fasta partiklar, luft, vatten och is. Jämför t.ex. värmeledningsförmågan för vatten (0,60 W/m,°C) med den för luft (0,024 W/m,°C).

Dimensionering av frostfritt djup i snöröjd mark enligt SBN

Tjäleens nedträngningsdjup för snöröjd mark kan enligt Svensk Byggnorm (SBN 1980) beräknas med ledning av [figur 3.3](#) och [tabell 3.2](#).



Figur 3.3 Frostfritt djup i meter för silt i mark som är snöröjd, SBN 1980. Frostfritt djup för andra jordarter bestäms på så sätt att multiplikatorn för den aktuella jordarten enligt tabell 3.2 används i kombination med det på kartan för aktuellt område angivna frostfria djupet.

Tabell 3.2 Korrektionstabell vid beräkning av frostfritt djup (SBN 1980).

Jordart	Multiplikator
Grus	1,7
Sand	1,2
Silt	1,0
Lera	0,6
Lera+silt i kapillärkontakt med grundvatten	0,5
Torv (med hög vattenhalt)	0,3

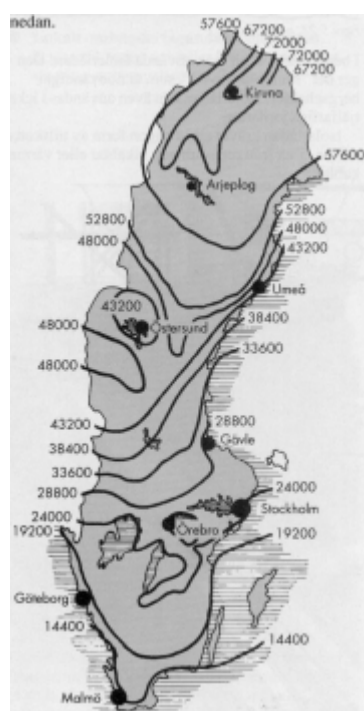
Exempel:

Frostfritt djup för sand i Sundsvall är: $1,2 \cdot 2,2 = 2,6$ m.

Frostfritt djup för lera i Borås är: $0,6 \cdot 1,6 = 0,96$ m.

Dimensionering av frostfritt djup i icke snöröjd mark enligt NBI

Ett poröst snötäckte har god isolerande förmåga. Stort snödjup minskar således tjäldjupet. Rockwool (1989) beskriver en av Norges Byggeforskningsinstitut (NBI) utarbetad beräkningsmetod för tjäldjup, som tar hänsyn till medelsnödjupet. Enligt denna metod, som är avsedd att användas vid dimensionering av isolering för VA-ledningar, bestämmer man först maximal köldmängd med ledning av figur 3.4 och årsmedeltemperaturen i icke snöröjd mark från tabell 3.3. Därefter reduceras maximal köldmängd med hänsyn till medelsnödjupet enligt tabell 3.4 och figur 3.5.



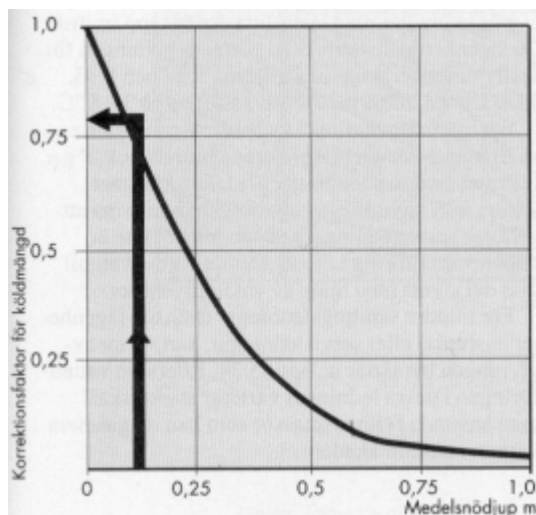
Figur 3.4 Maximal köldmängd [$^{\circ}\text{C h}$] under perioden 1901-1975 (Rockwool Byggboken, 1989).

Tabell 3.3 Årsmedeltemperatur i mark (Rockwool Byggboken, 1989).

Ort	Årsmedeltemperatur [°C] i mark		Ort	Årsmedeltemperatur [°C] i mark	
	icke snöröjd	snöröjd		icke snöröjd	snöröjd
Karesuando	1,0	- 1,5	Åmål	8,1	6,1
Kiruna	1,0	- 1,2	Strömstad	8,6	6,6
Malmberget	2,2	0,2	Nyköping	8,2	6,2
Haparanda	3,6	1,6	Norrköping	8,9	6,9
Luleå	4,0	2,0	Linköping	8,8	6,8
Stensele	2,7	0,7	Skara	7,8	5,8
Umeå	5,4	3,4	Jönköping	8,1	6,1
Östersund	4,7	2,7	Västervik	8,9	6,9
Härnösand	6,4	4,4	Borås	8,3	6,3
Sundsvall	5,9	3,9	Göteborg	9,9	7,9
Sveg	4,1	2,1	Nässjö	7,4	5,4
Edsbyn	5,9	3,9	Visby	9,2	7,2
Mora	5,5	3,5	Växjö	8,5	6,5
Gävle	7,0	5,0	Kalmar	9,0	7,0
Falun	6,6	4,6	Karlshamn	9,6	7,6
Uppsala	7,7	5,7	Kristianstad	9,7	7,7
Västerås	7,9	5,9	Lund	10,0	8,0
Karlstad	7,9	5,9	Malmö	10,0	8,0
Stockholm	8,6	6,6	Ystad	9,8	7,8

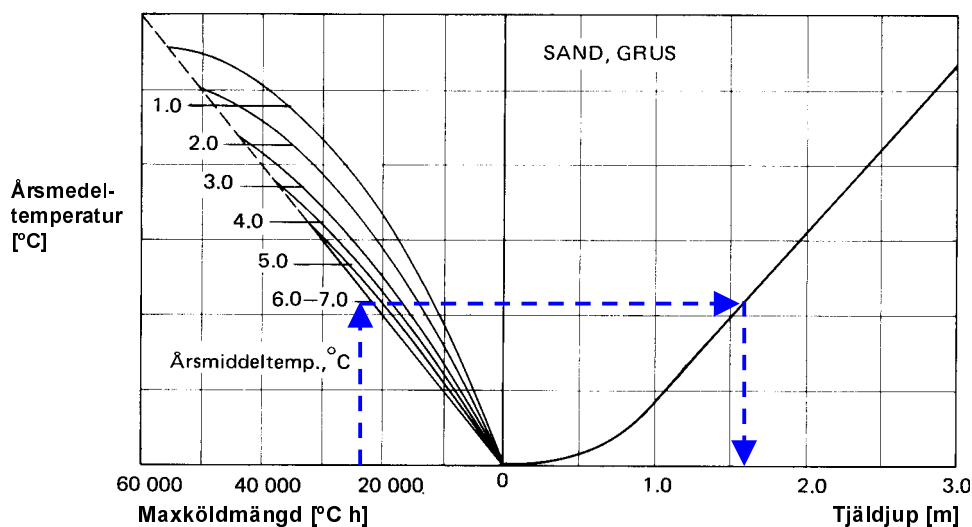
Tabell 3.4 Medelsnödjup i olika svenska orter (Rockwool Byggboken, 1989).

Ort	Medel- snödjup [m]	Ort	Medel- snödjup [m]
Karesuando	0,40	Åmål	0,05
Kiruna	0,40	Strömstad	0,05
Malmberget	0,40	Nyköping	0,07
Haparanda	0,20	Norrköping	0,07
Luleå	0,20	Linköping	0,07
Stensele	0,40	Skara	0,05
Umeå	0,15	Jönköping	0,05
Östersund	0,25	Västervik	0,07
Härnösand	0,15	Borås	0,05
Sundsvall	0,15	Göteborg	0,05
Sveg	0,25	Nässjö	0,10
Edsbyn	0,15	Visby	0,07
Mora	0,15	Växjö	0,10
Gävle	0,10	Kalmar	0,10
Falun	0,15	Karlshamn	0,00
Uppsala	0,10	Kristianstad	0,00
Västerås	0,10	Lund	0,00
Karlstad	0,15	Malmö	0,00
Stockholm	0,10	Ystad	0,00

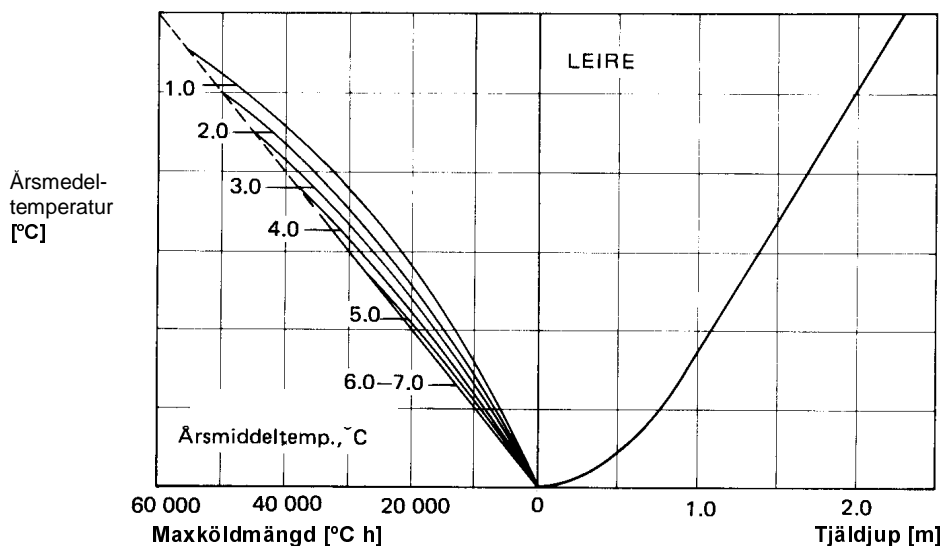


Figur 3.5 Korrektionsfaktor för köldmängd vid olika medelsnödjup (Byggboken, 1989). Medelsnödjupet erhålls ur Tabell 3.2.

Med hjälp av figur 3.6, som gäller för sand och grus, respektive figur 3.7, som gäller för lera, kan tjäldjupet sedan bestämmas. Om jorden inte består av dessa jordarter används figur 3.6 men tjäldjupet korrigeras genom att multiplicera med en korrektionsfaktor, som hämtas från tabell 3.5.



Figur 3.6 Tjäldjup i sand och grus (Frost i Jord, Nr 17). Diagrammet kan användas för andra jordarter än sand och grus (utom lera) om värdet på erhållet tjäldjup korrigeras enligt tabell 3.5.



Figur 3.7 Tjåldjup i lera (Frost i Jord, Nr 17).

Tabell 3.5 Korrektionsfaktor för beståmmande av tjåldjup i olika jordmaterial (NBI). Korrektionen innebår att figur 3.6 kan anvåndas för andra jordarter ån sand och grus. (Observera att denna tabell utgår från jordarterna sand och grus till skillnad från tabell 3.2 enligt SBN 80, som utgår från silt.)

Jordart	Korrektionsfaktor
Sten – makadam, stenigt grus	1,4
Sand och grus	1,0
Silt	0,85
Lera och blandjord	0,7
Torv, bark	0,3

Exempel: Beståmning av frostoffritt djup i icke snöröjd siltjord i Gåvle.

- Enligt figur 3.4 år den maximala köldmångden 28 000 °C h i icke snöröjd mark i Gåvle.
- Enligt tabell 3.3 år årsmiddeltemperaturen 7 °C för icke snöröjd mark i Gåvle.
- Eftersom medelsnödjuget enligt tabell 3.4 år 0,10 m i Gåvle reduceras den verkssamma köldmångden enligt figur 3.5 till ~0,8 × köldmångden i icke snöröjd mark. Den verkssamma köldmångden blir således:

$$0,8 \times 28\,000 \text{ °C h} = 22\,400 \text{ °C h}$$

- Tjåldjuget beråknas först för sand och grus med hjålp av figur 3.6. Med köldmångden 22 400 °C h, korrigerad för medelsnödjuget, och årsmiddeltemperaturen 7 °C erhålls ur detta diagram ett tjåldjup på ca 1,6 m för sand och grus.
- Korrektionsfaktorn för den aktuella jordarten, siltjord, beståms enligt tabell 3.5 till 0,85. Tjåldjuget i silt blir således:

$$0,85 \times 1,6 \text{ m} = \text{ca } 1,4 \text{ m}$$

3.2 Termiska egenskaper i jord och berg

Kännedom om jord och bergs termiska egenskaper är av stor vikt i markvärmesammanhang. Med god kännedom om den aktuella markens egenskaper kan anläggningen dimensioneras med större noggrannhet än om konservativa överslagsvärden används. I begreppet termiska egenskaper ingår normalt:

- Värmeledningsförmåga, som anges i W/mK (transport av energi).
- Värmekapacitet, som anges i kWh/m^3K (lagring av energi).
- Värmediffusivitet, som anges i m^2/s (utjämning av temperaturskillnader).

Mellan dessa storheter råder följande samband:

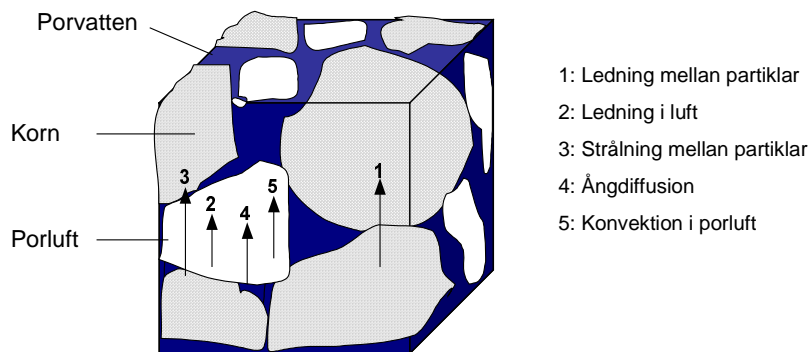
$$\text{värmediffusivitet} = \frac{\text{värmeledningsförmåga}}{\text{värmekapacitet}}$$

Även andra egenskaper, t.ex. jords innehåll av latent värme, har betydelse för värmeöverföringen. Latent värme, eller isbildningsvärme, är den värmemängd som frigörs när jord fryser.

3.2.1 Termiska egenskaper i jord

Värmetransporten i mark kan ske genom ledning, strålning, konvektion och ångdiffusion, se figur 3.8.

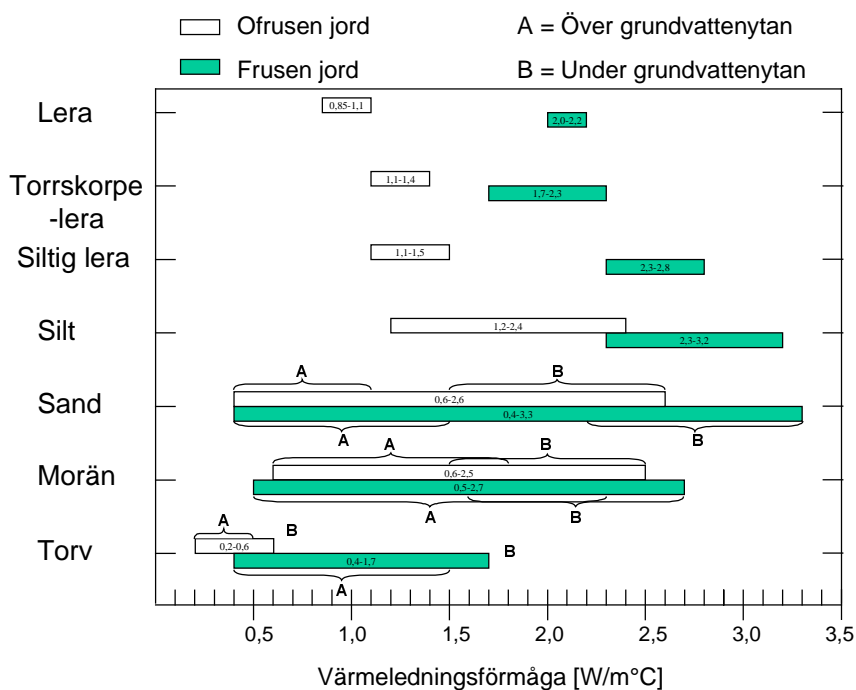
<i>Värmeledning</i>	uppstår vid temperaturskillnader i ett material varvid kinetisk energi överförs genom molekylrörelser från den varmare delen till den kallare.
<i>Konvektion</i>	är värmetransport genom strömning i gaser och vätskor till följd av densitetsskillnader vid olika temperatur och i jord till följd av en grundvattengradient.
<i>Strålning</i>	definieras som värmeöverföring i form av elektromagnetiska vågor, till exempel solstrålning.
<i>Ångdiffusion</i>	sker genom att vattenånga, som bildats vid hög temperatur diffunderar till följd av partialtrycksskillnader i en blandning och i riktning mot fallande tryck.



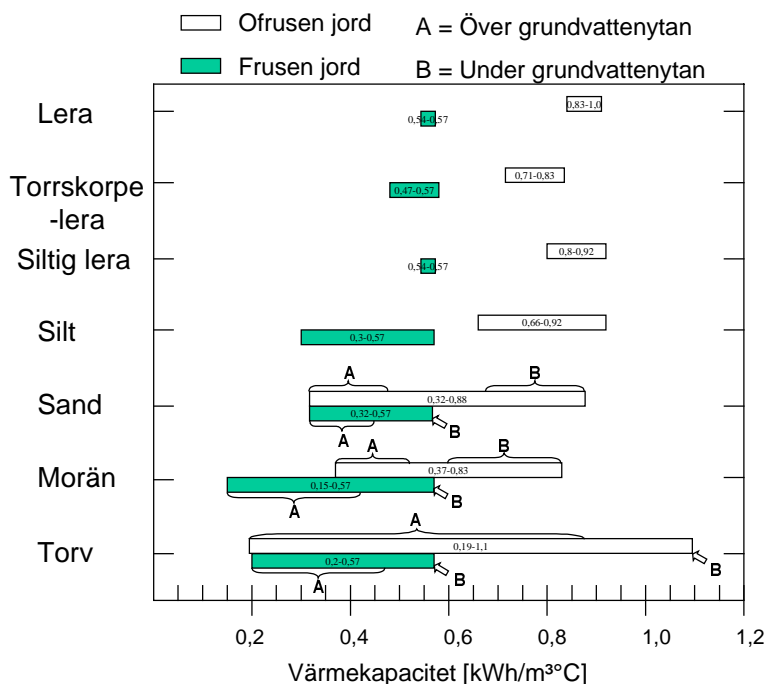
Figur 3.8. Värmetransporterande mekanismer i jord (efter Johansen, 1975).

Värmetransport sker ofta genom en kombination av dessa fenomen. Värmeledning dominerar värmetransporten i jord vid temperaturer mellan 0 och ca 25 °C. Viss värmetransport i permeabelt material kan ske genom konvektion vid höga potentialskillnader (t.ex. vid pumpning) eller vid höga temperaturskillnader. Vid högre temperaturer, mellan ca 25 °C och ca 95 °C sker värmetransporten fortfarande i huvudsak genom värmeledning men med en ökande andel ångdiffusion vid låg och medelhög vattenmättnadsgrad i jorden. För vattenmättade jordar sker värmetransporten genom värmeledning även vid högre temperaturer (Sundberg 1991).

I figur 3.9 visas värmeledningsförmågans variationsområde för olika jordarter vid normal marktemperatur, 5-15 °C, och helt frusen jord. Motsvarande värmekapacitet visas i figur 3.10.



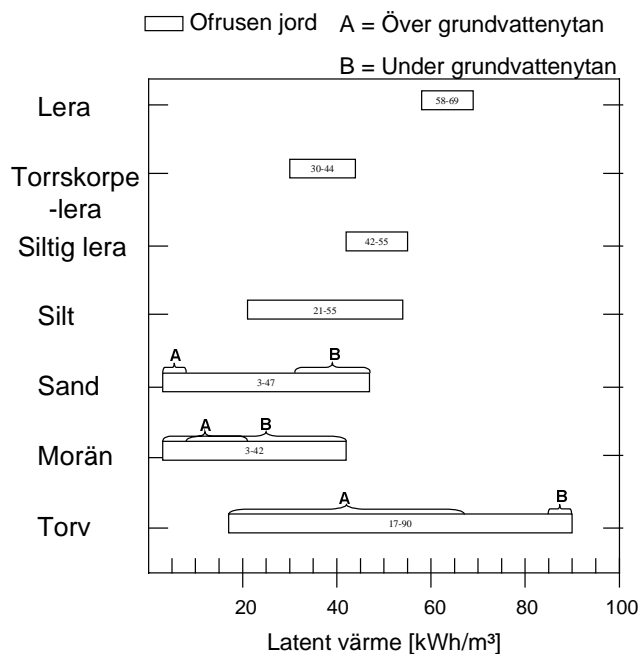
Figur 3.9. Värmeledningsförmåga för olika jordarter i ofruset och fruset tillstånd. För genomsläppliga jordar anges normalt variationsområde ovan (A) respektive under (B) grundvattenytan (efter Sundberg, 1991).



Figur 3.10. Värmekapacitet för olika jordarter i ofrusen och fruset tillstånd. För genomsläppliga jordar anges normalt variationsområde ovan (A) respektive under (B) grundvattenytan (efter Sundberg, 1991).

Sandjordar, som innehåller hög halt av mineral som kvarts, har en hög värmeledningsförmåga om de samtidigt innehåller en viss mängd vatten som ger en god kontakt mellan mineralpartiklarna. Lerjordar har normalt en sämre värmeledningsförmåga eftersom mineralpartiklarna ej har direkt kontakt då de är helt omgärdade av vatten. Värmelagringsförmågan bestäms främst av vattenhalten i jorden, dels genom att vatten har hög värmekapacitet ($4,2 \text{ kJ/kg, } ^\circ\text{C}$), dels genom den stora mängd värme som frigörs vid frysning (334 kJ/kg). I sandjordar kan temperatursvängningarna spridas till djupare nivåer än i lerjordar. Den sämsta spridningen av temperatursvängningar sker i organiska jordar, exempelvis torv och gyttja, som har en dålig värmeledningsförmåga och en god värmelagringsförmåga genom hög vattenhalt (www.ne.se).

I figur 3.11 visas normalt variationsområde för latent värme i jord. I jordar med hög vattenmättnad varierar vanligen den latent värmen mellan $40\text{--}45 \text{ kWh/m}^3$, för att drastiskt minska i permeabla jordar ovan grundvattenytan.



Figur 3.11. Latent värme eller isbildningsvärme i jord. För genomsläppliga jordar anges normalt variationsområde ovan (A) respektive under (B) grundvattenytan (efter Sundberg, 1991).

3.2.2 Termiska egenskaper i berg

Sveriges berggrund indelas i tre bergartsgrupper; sedimentära, magmatiska och metamorfa, med hänsyn till hur bergarterna bildats. Något förenklat så har de sedimentära bergarterna bildats genom kompaktering och cementering av sediment genom tryck. De magmatiska bergarterna bildats ur en stelnde smälta och de metamorfa bergarterna har bildats genom omvandling (tryck och temperatur $>200\text{ °C}$) av de övriga två. Sedimentära bergarter återfinns i första hand i Skåne, på Gotland och Öland samt inom fjällkedjan. De övriga två grupperna kallas med ett gemensamt namn för kristallint berg och dominerar i övriga delar av landet.

I sedimentärt berg varierar värmeledningsförmågan främst med hänsyn till porositet och vattenhalt, men också med hänsyn till mineralsammansättningen. I [tabell 3.6](#) visas värmeledningsförmågans variationer för olika sedimentära bergarter. Mesozoiska bergarter påträffas huvudsakligen i Skåne. Kambrosiluriska (äldre paleozoikum) bildningar finns huvudsakligen på Gotland och Öland och till en mindre del i södra och mellersta Sverige (t.ex. Östgöta- och Närkeslätten). Prekambrisk sandsten är t.ex. vanlig i Dalarna och Härjedalen.

Tabell 3.6. Sedimentära bergarter. Ungefärlig värmeledningsförmåga för några vattenmättade sedimentära bergarter (Sundberg, 1991).

Bergart, bildningsperiod	Värmeledningsförmåga [W/m °C]
Kalksten, mesozoikum ¹	1,5-2,8
äldre paleozoikum ²	1,8-3,3
Skiffer, mesozoikum ¹	1,5-3,0
äldre paleozoikum ²	2,0-3,5
Sandsten, mesozoikum ¹	2,3-4,5
äldre paleozoikum ²	4,0-6,0
prekambrium ³	4,0-6,5

- 1) Ca 230-65 miljoner år sedan. 3) Mer än ca 570 miljoner år sedan.
2) Ca 570-395 miljoner år sedan.

I tabell 3.7 anges värmeledningsförmågans variation för några vanliga kristallina bergarter. Värmeledningsförmågan i kristallint berg beror till största delen på kvartsinnehållet.

Tabell 3.7. Värmeledningsförmågans ungefärliga variation för några kristallina bergarter (Sundberg, 1991).

	Värmeledningsförmåga [W/m°C]	Medelvärde [W/m°C]
<u>Magmatiska bergarter</u>		
Granit	2,9-4,2	3,5
Granodiorit	2,45-4,0	3,15
Syenit	2,15-2,95	2,5
Diorit	1,75-3,15	2,3
Gabbro	2,2-3,35	2,8
<u>Metamorfa bergarter</u>		
Gnejs	2,6-4,7	3,5
Kvartsit ¹	5,4-7,7	6,6
Omvandlade sediment- bergarter	2,4-4,9	3,5
Omvandlade basiska bergarter	2,1-3,2	2,5

- 1) Benämningen kvartsit, som används felaktigt ibland pga. definitionsmässigt för låg kvartsinnehåll, har lägre värmeledningsförmåga; 3,5-6,0 W/m°C.

Värmekapaciteten för de vanligaste kristallina bergarterna brukar anges till ca 0,55 kWh/m³°C (Sundberg, 1991). Värmekapaciteten i vattenmättat sedimentärt berg är i samma storleksordning. För vattenomättat sedimentärt berg med hög porositet (låg densitet) blir värmekapaciteten lägre. Om luft i porer och sprickor i berget ersätts med vatten ökar värmeledningsförmågan eftersom vattnets värmekapacitet, ca 1,16 kWh/m³°C, är högre än den för luft.

3.2.3 Viktiga faktorer för jords och bergs termiska egenskaper

Jord består av mineralpartiklar, porvatten och porgas. Markens termiska egenskaper varierar beroende på:

- vattenhalt,
- porositet,
- mineralsammansättning,
- temperatur,
- anisotropi och inhomogenitet.

Kornen leder värme bra och vatten leder värme bättre än luft. Vid till exempel liten porositet, liten volymandel porer i förhållande till hela volymen, ligger kornen nära varandra vilket gör att värmeledningsförmåga 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. Rent vatten har värmeledningsförmåga ca 0,6 W/m°C och vanlig luft 0,025 W/m°C vid temperaturer omkring 10 °C. En reducering 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. Värmeledningsförmågan för de vanligaste bergartsbildande mineralen är:

Kvarts	7,7 W/m°C
Kalifältspat	2,5 W/m°C
Plagioklas ¹	1,8 W/m°C (1,5-2,3)

1) Beror på kemisk sammansättning.

Halten kvarts har störst betydelse. Värmeledningsförmågan för en kristallin bergart ökar med ca 0,5 W/m°C för varje 10 procentig ökning av kvartshalten (Sundberg, 1991). Kvarts är resistent mot nedbrytning därför innehåller finkorniga jordar i regel mindre mängd kvarts än grovkorniga jordar.

Värmeledningsförmågan för vatten ökar med temperaturen medan resultat redovisade i litteraturen visar på en liten successiv minskning av olika mineralers värmeledningsförmåga. Lera innehåller förhållandevis stor mängd vatten, varför effekten av ökande värmeledningsförmåga hos porvattnet vid ökande temperatur dominerar framför minskande värmeledningsförmåga hos mineralpartiklarna. Värmeledningsförmåga för en lera ökar därför något med temperaturen. Vid ökande temperatur i berg minskar värmeledningsförmågan i kristallint berg med 5-15 % vid en ökning av temperaturen från 0 till 100 °C (Sundberg, 1991).

Sammanfattningsvis kan grovkorniga jordar vara goda värmeledare om jorden innehåller en 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 runt slangen så att luftfickor undviks. Enligt GSHP Manual (www.dep.state.pa.us, 2000) är de bästa jordarna ur värmeöverföringssynpunkt sandiga eller leriga blandjordar av sand, lera och silt och möjligen sandiga leror. Fuktig jord leder alltid värme bättre än torr jord.

3.2.4 Metoder för bestämning av jords och bergs termiska egenskaper

Bestämning av termiska egenskaper kan göras;

- genom att från jord- och bergartsklassificering, t.ex. utifrån geologiska kartblad, använda tabellerade värden (ovan),
- mätning i fält eller på prover i laboratorium med någon fält- eller laboratoriemetod,
- mätning av installerade markvärmeväxlare in situ genom s.k. termiskt responstest,
- beräkning utifrån kännedom om jordens eller bergets sammansättning.

Vilken jord- och bergart som förekommer inom ett område kan bedömas med ledning av SGU:s geologiska kartblad, god lokal kännedom eller genom besök på platsen, varav det sista alternativet torde ge det bästa resultatet. Jordmäktigheten framgår inte av dessa kartblad. Termiska egenskaper för de aktuella jord- och bergarterna hämtas därefter från tabellverk eller liknande. För mindre markvärmeanläggningar, 1-2 familjshus, räcker det i de flesta fall att använda tabellerade värden baserade på en kvalitativ bedömning i fält. Till exempel så bör man skilja på lera och silt. Det är också av stor vikt att uppskatta trycknivå och djupet till grundvattenytan (och fluktuationer) och om de aktuella jordlagren är vattenmättade.

Sondmetoder kan användas för mätning av värmeledningsförmågan i fält och laboratorium (Sundberg, 1985 och 1986). Metoden bygger på att en sond med inbyggd värmespiral förs ned i jorden. Värmespiralen tillförs en konstant effekt och värme sprids i omgivande jord eller berg. Med ledning av temperaturutvecklingen i sonden kan man bestämma omgivningens förmåga att leda (bort) värme. I laboratoriet är det viktigt att provet är representativt och att hänsyn tas till graden av anisotropi (riktningsberoende egenskaper). Alternativa laboratoriemetoder bygger t.ex. på (stationär metod) plattapparatteknik eller (transienta metoder) lasermetod, THS (thermal hot strip), TPS (thermal plane source technique), även kallad hot disk, samt mätning med kalorimeter (Sundberg, 1985 och 1986).

För större markvärmeanläggningar är det motiverat att utföra så kallat termiskt responstest i fält (Eklöf&Gehlin, 1996. Gehlin, 1998). Utrustningen består av en cirkulationspump, värmelement, temperaturgivare och datalogger, se figur 3.12. Mätningen utförs i ett borrhål genom att föra ned en U-slang i borrhålet och mäta temperaturutvecklingen i den cirkulerande vätskan vid konstant värmeeffektillförsel. Mätningen pågår under 60-72 timmar (kan vara kortare). Från insamlade mätdata utvärderas effektiv värmeledningsförmåga i berget runt borrhålet och termiskt motstånd för borrhålet. Detta ger ett bra underlag för att optimera borrhålssystemet och hela markvärmeanläggningen.



Figur 3.12. Utrustning för termisk responstest i borrhål (www.idearc.se/respons.htm, 2001-01-25).

Slutligen kan de termiska egenskaperna också bestämmas genom teoretiska beräkningar baserade på jordens eller bergets sammansättning. Vid beräkning i berg utgår man oftast från bergarternas mineralsammansättning och i jordmaterial från andelen mineralkorn, porgas respektive porvatten, som erhålls vid geoteknisk rutinundersökning (vattenhalt, porvolym, densitet etc.). Det finns datorprogram och formler att tillgå (Sundberg, 1991).

3.3 Geotekniska konsekvenser vid temperaturpåverkan

Temperaturen i markytan varierar med utelufttemperaturen över året. Dessa naturliga säsongsvariationer avtar mot djupet och märks inte på ca 6-8 m djup under markytan. Detta innebär att marklagren kontinuerligt exponeras för naturliga temperaturvariationer utan allvarliga geotekniska konsekvenser. Påverkan på jordars egenskaper av temperaturer i intervallet från en nivå strax över fryspunkten till ca 30 °C bedöms därför som i det närmaste försumbar.

I ett markvärmesystem med värmepump och horisontella slangar i södra och mellersta Sverige varierar vanligen jordtemperaturen närmast markvärmeväxlarna från ca -3 °C, under uppvärmningssäsongen, till ca +14 °C i slutet av sommaren, om återladdning skett naturligt från markytan. Medeltemperaturen över året är i samma storleksordning som jordens naturliga medeltemperatur, omkring 7 °C. I fallet ytjordvärme utsätts jorden för upprepade cykler av frysning och tining och ibland på större djup än det naturliga tjäldjupet. Frysning och tining medför att jordars geotekniska egenskaper förändras. Denna temperaturpåverkan skiljer sig beroende på om jorden är finkornig (lera, silt) respektive blandkornig eller grovkornig (sand, morän etc.). Påverkan på jordars egenskaper minskar också med antalet frys- och tiningscyklerna.

En finkornig jord som exponeras för frysning och tining uppvisar förändringar, varav de mest framträdande är förändringar av volym, omfördelning av vatteninnehåll, hållfasthet och kompressionsegenskaper, som i sin tur kan orsaka deformationer. Vid frysning bildas islinser i den finkorniga jorden. Dessa tillväxer så länge temperaturen understiger jordens fryspunkt och som det uppstår negativa portryck närmast isfronten. Hållfastheten i en frusen jord ökar med minskad temperatur då alltmer vatten i jorden fryser. Efterhand uppstår mikrostrukturella förändringar, sprickor bildas och partiklar omfördelas i jordmassan. När temperaturen sedan stiger över jordens fryspunkt börjar islinserna att smälta. Det vatten som sugits ut ur jordens porsystemet för att bilda islinser ger upphov till en volymminskning när jorden tinar varvid sättningar uppstår. Det smälta vattnet kan inte återgå till porerna utan dräneras bort. Detta förlopp är mer markant under den första frys- och tiningcykeln som den finkorniga jorden utsätts för. Efter upprepade cykler blir jorden delvis tjälresistent, jämför till exempel en torrskorpelera i markytan med den underliggande opåverkade leran.

Om man tänkt frysa underliggande jordlager, som inte tidigare varit fryst, bör man kontrollera jordlagerföljden. Frysning av t.ex. tidigare ofryst lera och andra lösa sedimentjordar leder med stor sannolikhet till stora sättningar i det frysta området vid efterföljande tining. Markens sättningssänslighet minskar dock med antalet fryscyklerna. I en lera sker en kollaps av mikrostruktur, drastisk minskning av hållfasthet, densitet och vatteninnehåll, under tiningförloppet inledningsskede. Med tiden kan leran återfå en mer homogen, tätare och fastare struktur genom rekonsolidering.

I en blandkornig eller grovkornig jord blir de strukturella förändringarna betydligt mindre (Viklander & Knutsson, 2000). Vid upprepad frysning och tining sker påverkan främst genom separering av jorden i finkorniga och grovkorniga partier. Uppluftning av stenar och även

block kan förekomma främst i siltiga moränjordar. I en löst packad grovkornig jord uppstår en minskning av permeabiliteten på grund av att jorden kompakteras under de första frys- och tiningscyklerna, dvs. densitet och porositet minskar (Viklander & Knutsson, 2000). I en fast packad jord har man istället uppmätt en permeabilitetsökning. En uppluckring av den fasta jorden sker under frysningen. Vid en jämförelse mellan den löst och fast packade jorden konstateras att porositeten minskar respektive ökar under de en till tre första cyklerna för att uppnå samma residualvärde efter några cykler (Viklander & Knutsson, 2000). På naturlig väg kan man alltså uppnå en packningseffekt hos löst packat material (jämför återfyllnadsmaterial) vid utelufttemperaturer under nollstrecket. I permeabla jordar självläker uppkomna fryssprickor genom omfördelning av partiklar under inverkan av gravitationen.

Höga temperaturer är inte aktuella i system med markvärmepump men förekommer i lagringssammanhang t.ex. vid säsongslagring av spillvärme eller solvärme. Påverkan av hög temperatur har undersökts i en vanlig svensk lera, både i fält och laboratorium (Gabrielsson et al, 2000 och Moritz, 1995). I denna typ av lera får man räkna med viss termisk påverkan vid höga temperaturer (>50 °C), beroende på temperaturnivå. Försök vid 70-90 °C visade på en hållfasthetsminskning i leran, i inledningsskedet. I sluttande terräng kan en sådan minskning påverka stabiliteten i området negativt. Vid kontinuerligt hög temperatur omkring 85 °C började lerans hållfasthet långsamt att öka och inverkan på stabiliteten minskade därmed. Kontinuerligt hög temperatur ledde till att en konsolideringsprocess startade i leran som resulterade i sättningar. Sättningsutvecklingen följde temperatur- och porositetsutvecklingen. Det av hög temperatur påverkade området bör därför vara placerat på tillräckligt stort avstånd från omgivande byggnader och andra sättningskänsliga konstruktioner. Vid konstant hög temperatur, 80-90 °C, under flera års tid erhöles en långsam minskning av lerans vatteninnehåll. I mer permeabla jordar erhålls sannolikt större uttorkningseffekt och dränering vid hög temperatur samtidigt som det kan ske en betydande värmetransport bort från markvärmeväxlarna genom konvektion.

3.4 Energigeologisk kartering

För många markvärmertilämpningar är det en fördel om geotekniska, geologiska och geohydrologiska förhållanden klargörs tidigt i den kommunala planeringen. Detta för att kunna bedöma tillgängliga markvärmeresurser och potentialen för olika markvärmetekniker. Intressanta områden kan då reserveras för markvärmeutnyttjande i kommunernas utbyggnadsplaner samtidigt som kommunerna kan ge enskilda råd vid val av energisystem. Ett sätt att erhålla den nödvändiga kunskapen är att utföra en s.k. energigeologisk kartering.

En energigeologisk kartering utförs normalt i tre etapper (Magnusson & Sundberg, 1990). Inledningsvis görs en översiktlig kartering av förhållandena med hjälp av geologiska kartblad, flygbilder, geologiska och geotekniska data från tidigare utförda borrhningar, information från brunnar i området samt genom fältkontroll. Resultatet redovisas på en karta med uppgifter om bedömd *utvinningsbar värmeresurs* i jord, berg, grundvatten respektive ytvatten, var de är belägna och deras bruttopotential.

I andra etappen kan, beroende på tekniska och ekonomiska faktorer vissa av resurserna komma att sorteras bort. Den återstående delen utgör en *utvinningsvärd värmeresurs*, eller nettopotential. En värdering görs av resursernas läge och storlek samt en bedömning av vilka markområden som är lämpade för olika områden. Antalet lägenheter/villor som kan försörjas med respektive teknik kan översiktligt bestämmas med hjälp av nyckeltal (Magnusson & Sundberg, 1990). Slutgiltigt val av energisystem (tredje etappen) görs sedan i konkurrens med

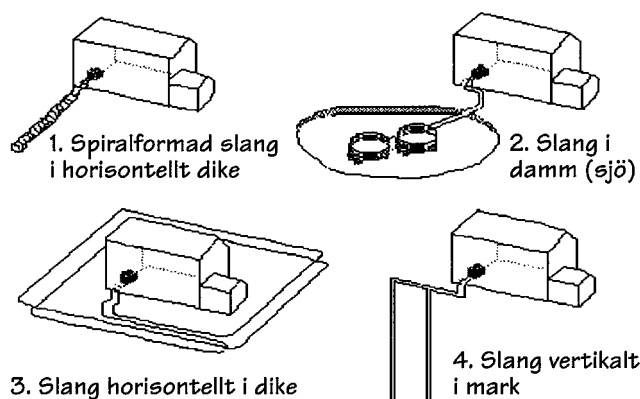
alternativa uppvärmningsformer. Metoden har t.ex. tillämpats för ett samhälle i Linköpings kommun, Sturefors, och även utomlands. En översiktlig energigeologisk kartering har t.ex. utförts för hela Schweiz och i Norge har energipotentialen hos grundvattnet bestämts för några områden.

4. MARKVÄRMEVÄXLARE

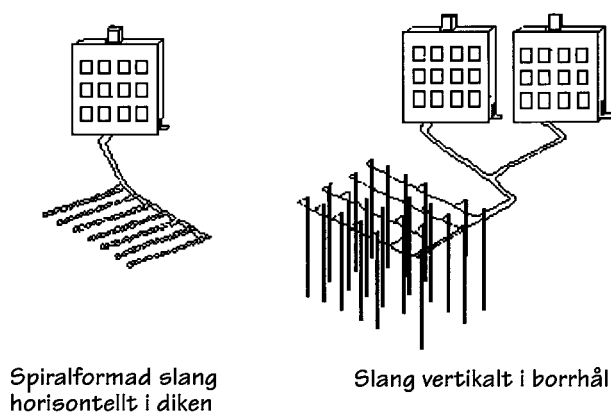
4.1 Utformning

För att utvinna/lagra termisk energi i mark anläggs en markvärmewäxlare mellan värmepumpen och värmekällan (marken). En markvärmewäxlare består av en plastslang med viss hållfasthet som installeras i marken. Ibland betraktas slangens närmaste omgivning, t.ex. återfyllnadsmaterial, som ingående i begreppet markvärmewäxlare. I slangen cirkulerar en vätska, värmebärarfluid, som svarar för värmewäxling mellan huset och omgivande jord eller berg. Utformningen på markvärmewäxlaren varierar beroende på var och hur den installeras, i berg eller jord respektive horisontellt eller vertikalt. I figur 4.1 och 4.2 illustreras olika typer av markvärmewäxlare i jord för mindre och större fastigheter. De markvärmewäxlare som används internationellt för uttag av värme/kyla utgörs av;

- horisontella slangar, utlagda i grävda diken, antingen i full längd eller i spiral (Slinky),
- vertikala slangar i borrhål i berg och jord,
- öppet system i borrhål för uttag och återföring av grundvatten,
- energipålar bestående av värmewäxlarrör ingjutna i betongpålar.



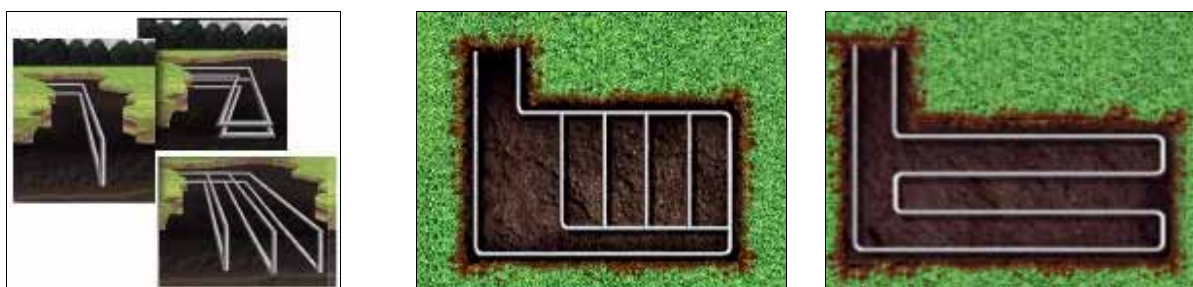
Figur 4.1. Exempel på markvärmewäxlare för mindre enskilda fastigheter (www.dep.state.pa.us, 2000).



Figur 4.2. Exempel på markvärmewäxlare för flerfamiljshus alternativt kommersiella byggnader (www.dep.state.pa.us, 2000).

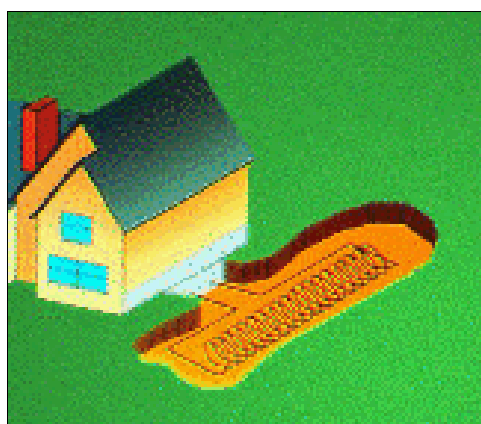
Horisontella slangar i jord

Horisontella slangar i jord läggs i grävda diken, antingen i full längd eller i spiral, **figur 4.3** och **figur 4.4**. Markvärmväxlaren kan läggas som en enda stor slinga över en större tomtyta, som två slingor över varandra eller flera bredvid varandra. Horisontella slangar anläggs vanligen under tjäldjupet. Denna typ av markvärmväxlare är mindre lämplig för små markytor. Horisontell installation av markvärmväxlare (ej spiralformade) beskrivs närmare i kapitel 5.



Figur 4.3. Olika lösningar att anlägga horisontella markvärmväxlare. De två bilderna till höger visar horisontella markvärmväxlare sett ovanifrån (www.alliant-geo.com, 2000).

I framför allt USA och Kanada förekommer spiralformade markvärmväxlare som installeras antingen som utdragna platta spiraler, stående eller liggandes platt i grävda diken, eller som tredimensionella spiraler i brett dike eller vertikalt i hål med stor diameter. Den spiralformade markvärmväxlaren framtogs och utvecklades i slutet av 1980-talet i Kanada. Utformning och installation av spiralformad markvärmväxlare, s.k. Slinky, beskrivs närmare i kapitel 6.



Figur 4.4. Spiralformad markvärmväxlare, "Slinky" (www.alliantgeo.com, 2000).

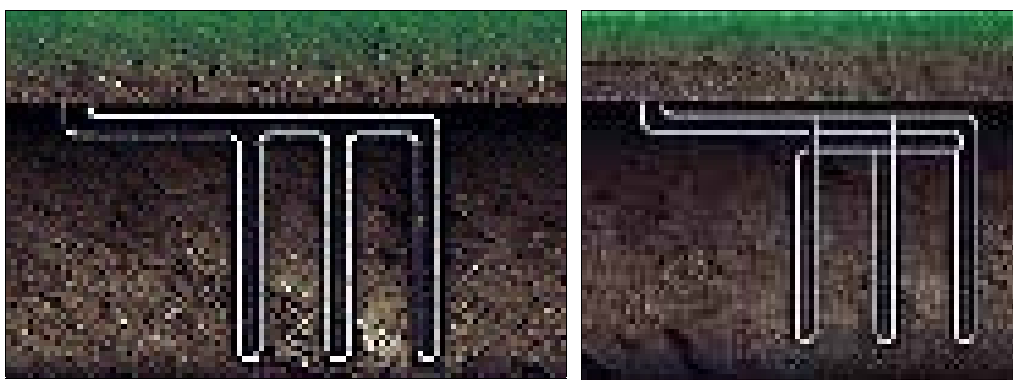
I Österrike har en speciell typ av markvärmväxlare utlagd i diken utvecklats, se **figur 4.5**. Dessa utgörs av PEH-slangar (högdensitetspolyeten), diameter 20 mm, som läggs horisontellt med ca 5 cm mellanrum, mot dikesväggarna i ett 3 m djupt dike. Dikets botten är 1,2 m bred och toppen 2,5 m bred så att en sluttande vägg erhålls. Slangarna sammankopplas i en typ av nedstigningsbrunn för centralt in- och utflöde. År 1986 fanns omkring 500 system med denna typ av dikeskollektor i Österrike (Gerbert, 1986).



Figur 4.5. Dikeskolektor (Gerbert, 1986).

Vertikal installation

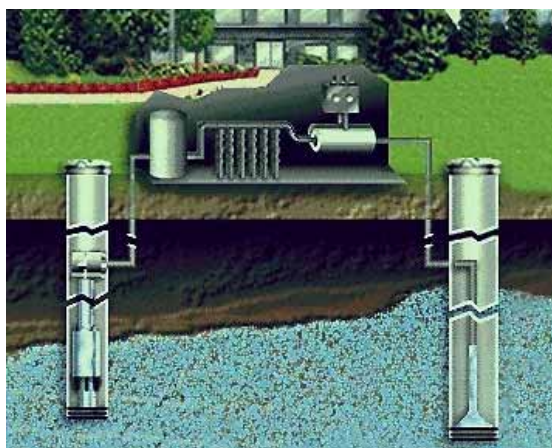
Markvärmväxlare installeras vertikalt i jord där tillräckligt jorddjup finns eller vertikalt i berg. Slangarna är normalt utformade som U-rör eller koaxialrör. I lös jord, vanligen lera, kan U-rör installeras genom direkt nedpressning, dvs. utan förborrning. U-rör i berg eller friktion-sjord kräver någon typ av borring. I figur 4.6 illustreras olika sätt att utforma slangarna vid vertikal installation i jord. Installation av vertikala markvärmväxlare beskrivs närmare i kapitel 7.



Figur 4.6. Olika lösningar att anlägga vertikala markvärmväxlare i jord (www.alliant-geo.com, 2000).

Öppna system

Öppna system utnyttjar grundvattnet för uttag av värme och för kylning. Öppna system består av ett eller flera borrhål i jord eller i berg. I figur 4.7 illustreras ett exempel på hur ett öppet system kan vara utformat. Den ena brunnen betecknas som "kall" och den andra som "varm". Från den varma brunnen pumpas grundvatten för att tillgodose ett värmebehov, varvid grundvattnet kyls ned. Därefter återinfiltreras grundvattnet via den kalla brunnen. Under sommarhalvåret när ett kylbehov föreligger går flödet istället i motsatt riktning, det kalla grundvattnet uttas från den kalla brunnen, värmeväxlas mot husets distributionssystem och återinfiltreras till akviferen via den varma brunnen.



Figur 4.7. Öppet markvärmesystem i jord (www.alliantgeo.com, 2000).

Under ogynnsamma förhållanden kan problem uppstå på grund av korrosion, kemisk och biologisk fällning samt igensättning av rör- och filterdelar. De öppna system är beroende av att grundvattennivån ligger inom några meter under markytan för att de ska kunna bli kostnadseffektiva.

Energipålar

Energipålar utgörs av slangar som inbäddats i platsgjutna betongpålar, vilka installeras för grundläggning av byggnader, figur 4.8. Pålarna placeras med 5-10 meters mellanrum beroende på jordart (Koene & Geelen, 2000). Energipålar togs fram och utvecklades i Schweiz för ca 10 år sedan och har bl.a. provats i Tyskland, Nederländerna (Koene & Geelen, 2000) och Österrike (Rybach & Sanner, 2000). Grundläggning på pålar eller slitsmur är en förutsättning för att energipålar skall kunna bli ekonomiskt försvarbara.



Figur 4.8. Armeringskonstruktion för en slitsmur, med fastmonterade rörledningar för värmeväxling mot omgivande jord (Swiss geothermal programme, 2001, www.geothermal-energy.ch).

Geobag

Geobag är en ny innovativ typ av markvärmväxlare som har utvecklats vid Louisiana State University, USA. Geobag är en lång rektangulär plastsäck med en slang kopplad i var ände för ingående och utgående värmebärande vätska. Geobag läggs i diken (figur 4.9) något vidare än själva säcken och fylls med värmebärande vätska (här vatten) så att säckens höjd blir ca 5 cm. Trycket är lågt, mellan 7-34 kPa, för att endast ta upp vikten från återfyllnadsmaterialet. Det krävs ca 23 kPa per meter jorddjup om jorddensiteten är ca 1,6 ton/m³ (www.alliantgeo.com, 2001). Plastsäcken är gjord av polyeten (PEL) och i försöken har den haft bredden 0,91 m och längden 6 m.

Eftersom Geobag utvecklats i södra USA har kylbehovet dominerat. Testinstallationer har gett indikationer på en dikeslängd som är 1/5-del av horisontella system med 2 slingor eller hälften av en Slinky för samma belastning. Minskad materialkostnad och minskad kostnad för arbetskraft skulle kunna reducera kostnaden för markvärmesystem med 40-50 % enligt de tester som utförts. Geobag har även testats för installation i borrhål ca 60 cm vida och 7,5-12 m djupa. Geobag har då haft samma diameter som borrhålet men varit något kortare än djupet på borrhålet. Vid installation är säcken hopvikt på längden (figur 4.10). När säcken fylls med värmebärande vätska veckas den upp och kommer i direkt kontakt med borrhålets väggar. Markvärmväxlare Geobag är fortfarande under utveckling och fältförsök pågår i USA (www.alliantgeo.com, 2000).



A



B



Figur 4.9. A och B. Geobag, en markvärmväxlare utformad som en lång platt plastsäck med slang för in- och utlopp. Säcken fylls med värmebärarvätska och diket återfylls. (www.alliant-geo.com, 2000).

Figur 4.10. Geobag installeras i borrhål. (www.alliantgeo.com, 2000).

4.2 Slangmaterial

Till markvärmväxlare används oftast polyetenrör. Polyeten är en termoplastisk polymer som framställs genom polymerisation av eten. Genom att variera tillverkningsbetingelserna erhålls polyetenrör med olika egenskaper. De olika kvaliteterna klassificeras efter densiteten enligt;

- PEL (låg densitet) 910-925 kg/m³,
- PEM (medelhög densitet) 926-940 kg/m³,
- PEH (hög densitet) 941-965 kg/m³,
- PEX (förnätad) ca 940 kg/m³.

PE-slang (PEL, PEM och PEH) kan skarvas med mekaniska kopplingar eller svetsas. PEL bör inte utsättas för högre temperatur än ca 20 °C, PEM och PEH inte över 60 °C varken kontinuerligt eller säsongsmässigt (Wilén & Rhén, 1986 och Lindborg, 1999). PEX står för förnätad polyeten. Vid tillverkningen tillsätts peroxid till plastråvara av polyeten med hög densitet, under högt tryck och temperatur, och tvärbindingar uppstår mellan de långa molekylkedjorna. PEX-rör har högre temperaturlåghet och hållfasthet jämfört med de övriga PE-rören. Nackdelen är att PEX-rör inte kan svetsas.

Alla PE-rör har relativt låg värmeledningsförmåga, 0,35-0,5 W/mK, och begränsad täthet mot syreinträngning. Syre i värmebärarsystemet kan förorsaka korrosion och även slam från bakterier, skumning och andra driftstörningar (Lindborg, 1999). Vid en markvärmstillämpning ligger merparten av slangen under markytan omgiven av vattenmättad jord/berg, vilket minimerar syreinträngningen. PE-slang är resistent mot rekommenderade köldmedieblandningar.

I direktförångningssystem, där värmepumpens köldmedium även cirkuleras i markslingan, förekommer kopparrör. Kopparrör är diffusionstäta och har goda värmeöverförande egenskaper.

Borrhålsvärmväxlaren skall enligt Normbrunn 97 bestå av helsvetsade PEM-rör, tryckklass PN 6,3 enligt SIS 3362 eller motsvarande med fabriksstillverkad returböj (www.sgu.se, 2001). För en markvärmväxlare i jord föreskrivs PEM-rör med högre tryckklass, PN 10. Det tryck som råder inuti slangen balanseras delvis av trycket från utsidan. Om avståndet till grundvat-
tenytan är stort ökar påfrestningen på slangen eftersom differensstrycket mellan slangens in- och utsida ökar. Innertrycket ökar dessutom ytterligare i förhållande till yttertrycket vid pumpning. De vanligaste rördimensionerna i Sverige är 32 respektive 40 mm i ytterdiameter, både för ytjordvärme och bergvärme. I tabell 4.1 anges några egenskaper hos vanliga PE-rör och kopparrör samt meterkostnad.

Tabell 4.1. Egenskaper hos några vanliga PE-rör och kopparrör.

Kvalitet	Ytter-dia- meter mm	Gods- tjocklek mm	Temp. °C	Värmeled- ningsförmåga W/mK	Specifik värme kJ/kgK	Minsta böj- ningsradie mm	Anv. områden	Kostnad inkl moms kr/m
PEL	40		till +20		2,3			
PEM PN 6,3 ¹	32	2,0	till +60	0,4	2,2	768	markvärme m m	9-14
PEM PN 6,3 ¹	40	2,4	till +60	0,4	2,2	960	markvärme m m	14-17
PEM PN 10 ²	32	2,9	till +60	0,4	2,2	768	markvärme m m	9-16
PEM PN 10 ²	40	3,7	till +60	0,4	2,2	960	markvärme m m	14-24
PEH ³	90	8,2		0,45	2,1		tryckavlopp m m	ca 80
PEX ⁴	22	3,0	-15 till +70 ⁵	0,38	2,3	125 ⁶	i värmesystem max 0,6 MPa	ca 30
Kopparrör	28	1,2	1083	395	0,385	liten	direkförångning	45+skarvar

- 1) Energibrunnar. Minsta tillåtna böjningsradie angiven till 24xd_y. I praktiken kan röret böjas mera utan att veckas.
- 2) Horisontella slangar i jord. Minsta tillåtna böjningsradie angiven till 24xd_y. I praktiken kan röret böjas mera utan att veckas.
- 3) Minsta röret PEH PN 10 är 90x8,2 mm (Solarec). I Sverige tillverkas endast styva, raka PEH-rör.
- 4) Wirsbo-evalPEX, rör med diffusionsspärr.
- 5) Max kontinuerlig drifttemperatur. Max momentan temperatur anges till 95 °C.
- 6) Vid kallböckning utan fixtur (Wirsbo).

Slangen måste vara tät. Täthetskontroll utförs alltid efter att slangen installerats i marken (borrhålet). Slangen måste också vara ren invändigt så att inte föroreningar orsakar bakterie-tillväxt. Om markvärmväxlaren utgörs av ett U-rör i ett borrhål (energibrunn) skall slangens returböj i botten vara formsprutad och stumsvetsad och försedd med bottenvikt som medger att slingan kan dras upp. Efter installation i marken fylls slangen med värmebärande vätska och kopplas till värmepumpens förångardel. I system med villavärmepump dimensioneras slangen för ett inre övertryck av 600 kPa (Lindborg, 1999).

I det fall att flera slingor i marken skall kopplas till ett eller flera samlingsrör finns speciella samlingsrör med avstick för PE-rör.

4.3 Kopplingar

Slangen levereras normalt i rullar om 200-300 meter. I mindre anläggningar kan slangens längd väljas så att koppling endast blir nödvändigt för anslutning till värmepumpen. För större anläggningar blir det däremot flera kopplingspunkter i marken.

PEL-, PEM-, PEH-rör och polybuten kan kopplas samman med mekaniska kopplingar (kläm-ringskopplingar) av plast eller metall (ofta mässing) eller svetsning (Wilén & Rhén, 1986). Svetsning är att föredra och också vanligast.

Svetsmetoder för PE-rör är muffsvetsning, stumsvetsning och elektromuffsvetsning. Den vanligaste svetsmetoden är stumsvetsning. Fogytorna värms upp med ett värmeelement och

trycks mot varandra under kontrollerade former. Rörens ändar pressas därmed samman. I fogen uppstår en viss förtjockning, s.k. vulst, som framträder både på rörets insida som utsida (Svensk Energi – Swedenergy – AB, 2001). Vid muffsvetsning sker sammanfogning av de båda rören genom värmning och sammanpressning mot en elsvetsmuff. Vid uppvärmning av muff och rörände används en särskild adapter med hon- och handel. Elektromuffsvetsning innebär att muffen har inneslutna elledningar. Värmning åstadkoms genom att ansluta elkablar från ett batteri till muffen. Svetsning kan vara svår att utföra utomhus eftersom det ställs krav på rena ytor. Stark köld kan också göra det svårare att uppnå tillräckligt hög kvalitet på fogningen.

I USA är PEH-rör vanligast. Tillverkningsprocessen är anpassad så att dessa kan göras böjliga. I amerikansk standard rekommenderas PE-rör till markvärmväxlaren (IGSHPA, 1997). Diameter från $\frac{3}{4}$ tum upp till 2 tum, dvs. mellan 19-51 mm, är vanligast (Oklahoma State University, OSU, 1997). PE-material kan sammanfogas genom upphettning (utom PEX), antingen genom att rörändar anbringas direkt mot varandra eller mot en mellanliggande del. PE-materialiets densitet, kvalitet etc. bestämmer om slangen kan sammanfogas med någon av metoderna. Det finns t.ex. högdensitetspolyeten som inte är lämpliga för muffsvetsning (OSU, 1997).

De kopplingsmetoder som rekommenderas i amerikansk standard bygger på sammansmältning av plaströrsmaterial med värme. Plastmaterialens rörändar hettas upp till smältpunkten, anbringas mot varandra, varefter temperaturen tillåts minska och ett homogent material bildas. Följande metoder rekommenderas för sammankoppling av rör under mark, att utföras enligt ASTM-standarder (OSU, 1997);

- muffsvetsning (*socket fusion*, ASTM, D 2610),
- stumsvetsning (*butt fusion*, ASTM, D 2683),
- sammansmältning med värme mot rörvägg (*sidewall fusion*, ASTM, D 2657).

Fördelarna med att använda smältmetoder framför mekanisk koppling är att: en sammansmält skarvpunkt blir starkare än slangen själv genom att slangen blir något tjockare i just den punkten, hela skarvstället utgörs av plast varvid korrosionsproblem undviks och att det finns rekommenderade industristandarder för sammansmältning med värme (OSU, 1997).

Sammansmältning med värme, användandes en mellandel, utförs genom att smälta samman de två rörändarna mot mellandelen i skarvpunkten. Metoden innebär att uppvärmning måste ske två gånger i varje skarvpunkt. Den andra metoden att sammanfoga två rörändar innebär att dessa anbringas mot varandra, hettas upp samtidigt och smälter samman. Specialmaskiner finns som håller slangens ändar, värmer och för dom samman när de fortfarande befinner sig i plastiskt tillstånd. Sammansmältning med värme rekommenderas också för att foga ett rör mot rörväggen på ett annat rör. Det utförs genom att använda speciell uppvärmningsutrustning, med konkavform för passning mot rörvägg och konvexform för passning mot anslutningsröret. I anslutningspunkten mellan rörvägg och anslutningsrör fastmonteras en skarvdel. Efter utförd sammansmältning görs till sist hålet i rörväggen.

I Holland (Groningen) och Tyskland (Neckarsulm) installerades slang av polybuten i värme-lager för säsongslagring av solvärme. Polybuten valdes till förmån för PEX för att den har samma goda temperatur- och hållfasthetsegenskaper men dessutom är svetsbar. Polybutenrör tillverkas inte i Sverige.

Följande materialegenskaper bör beaktas vid val av kollektorslang: låg kostnad, täta och tåliga mot tryckbelastningar i systemet och mot dragpåkänningar för vissa neddrivningsmetoder. Kopplingsmetoden bör vara enkel och ge helt täta och beständiga anslutningar till låg kostnad. Materialet måste vara beständigt i mark och för aktuella temperaturförhållanden samt ha lågt värmemotstånd (Wilén & Rhén, 1986).

Vid valet av slangdiameter bör man beakta följande: diametern bör vara tillräckligt stor för att hålla ner pumpningskostnaden och samtidigt tillräckligt liten för att strömningen skall bli turbulent inuti röret (OSU, 1997). Turbulent strömning underlättar värmeöverföring mellan värmebärarfluiden och slanggodsets insida. Liten slangdiameter innebär att markvärmeväxlaren blir något längre. Tryckförlusterna blir större i den mindre slangen vilket kan medföra större pumpkostnad. Slang med stor diameter är oftast dyrare, kräver större vätskevolym (frostskyddsmedel) och gör slangen mer svårhanterlig att installera än slang med mindre diameter.

4.4 Värmebärarvätska

Med värmebärarvätska menas den vätska som cirkulerar i markvärmeväxlaren och överför värme från marken till värmepumpens förångare. På marknaden finns ett antal värmebärarvätskor som vanligen utgörs av en frostskyddande glykol-, alkohol- eller saltlösning.

Rent vatten har de bästa termofysikaliska egenskaperna förutom att det har relativt hög fryspunkt. Därför tillsätts en kemikalie som sänker fryspunkten s.k. frostskyddsmedel. En bra värmebärare skall ha följande egenskaper (GSHPM, www.dep.state.pa.us, 2001):

- låg kostnad
- låg toxicitet (>LD50¹ vid 5 g/kg)
- låg viskositet
- låg flyktighet
- låg korrosivitet
- låg flampunkt (minst 90 °C)
- låg fryspunkt (högst -8 °C)
- hög värmeledningsförmåga
- biologiskt nedbrytbar (till minst 90 %)
- lång livslängd

Den mest förekommande värmebärarvätskan är vatten blandat med någon av följande frostskyddsmedel (den Braven, 1998. Granryd & Melinder, 1991. Top & de Lint, 1991):

Organiska vätskor

- etylalkohol/etanol
- etylenglykol
- kaliumacetat
- metylalkohol/metanol
- propylenglykol

Salter

- kaliumkarbonat
- kalciumklorid
- natriumklorid

Koncentrationer av frostskyddsmedel på mellan 18 och 33 % krävs generellt för att sänka fryspunkten till -15 °C (Granryd & Melinder, 1991). I Sverige är det vanligast med en blandning av vatten och etanol i energibrunnar (i berg). Utspädd etanol (sprit), utan hälsofarliga tillsatser, är en miljövänlig produkt och skadar i allmänhet inte miljön omkring borrhålet vid eventuellt läckage (www.geotec.se, 2000).

¹ LD50 = den dos som dödar 50 % av försöksorganismerna.

4.4.1 Fysikaliska egenskaper

Värmebärandevätskans uppgift i ett markvärmesystem är att absorbera markens värme, transportera den och sedan avge den till värmepumpen eller till byggnadens distributionssystem. Vätskan måste därför effektivt kunna absorbera och avge värme, dvs. den måste ha bra termiska transportegenskaper samt ha god pumpbarhet. Eftersom systemet skall verka i flera tiotals år får inte värmebärandevätskan förstöra systemet, dvs. verka korrosivt.

Viktiga faktorer att ta hänsyn till vid en jämförelse mellan olika värmebärandevätskor är fryspunkt, densitet, viskositet, specifik värme och värmeledningsförmåga. Sambandet mellan dessa uttrycks i värmetransportkoefficienten, dvs. mängd värme transporterad per yta för en viss temperaturskillnad. Förenklat kan detta uttryckas i ekvationen (Top & de Lint, 1991):

$$Q = h \cdot A \cdot (\Delta T)$$

$$Q = \text{mängd värme, } J$$

$$h = \text{värmetransportkoefficient, } J/m^2K$$

$$A = \text{vätskans kontaktarea, } m^2$$

$$\Delta T = \text{skillnad i temperatur mellan vätska och rörvägg, } K$$

Vid en minskning av värmetransportkoefficienten måste en motsvarande ökning av antingen arean eller ΔT till för att avge samma mängd värme. På så sätt har värmetransportkoefficienten för vätskan en direkt koppling till storleken och kostnaden för värmebärarkretsen. Vätskans pumpbarhet inverkar också på priset eftersom kostnaden ökar om en större pump erfordras, medan driftkostnaden ökar då mer energi krävs för att pumpa runt vätskan (Top & de Lint, 1991). Av betydelse är även flödesvolymen, värmetransporten från röret och tryckfallet.

Ur ren termodynamisk synpunkt bedöms kalciumklorid, kaliumkarbonat och metylalkohol ha de bästa egenskaperna (Granryd & Melinder, 1991; Top & de Lint, 1991). Då har dock ingen hänsyn tagits till hälso-, miljö-, brand- och korrosionsrisk. I [tabell 4.2](#) ges fysikaliska egenskaper för några vanliga eller rekommenderade frostskyddsmedel i värmebärande fluid.

Tabell 4.2. Fysikaliska egenskaper för några vätskor, som vid blandning med vatten bildar värmebärande fluid.

	Vatten	Metanol	Etanol	Glycerol
Densitet vid 20 °C	998 kg/m ³	793 kg/m ³	791 kg/m ³	1270 kg/m ³
Fryspunkt	0 °C	-98 °C	-114 °C	18 °C
Kokpunkt vid 101,3 kPa	100 °C	65 °C	78 °C	290 °C
Värmekapacitet vid 0-100 °C	4,18 kJ/kgK	2,50 kJ/kgK	2,43 kJ/kgK	2,43 kJ/kgK
Värmeledningsförmåga vid 20 °C	0,60 W/mK	0,21 W/mK	0,18 W/mK	0,28 W/mK
Viskositet vid 20 °C	0,001 Ns/m ²	0,0006 Ns/m ²	0,0012 Ns/m ²	1,49 Ns/m ²
Flampunkt	-	11 °C	12 °C	199

Vatten får sämre termofysikaliska egenskaper med högre andel kemikalie inblandad i vattnet. Därför ska man inte blanda in mer kemikalier än vad som krävs för en sänkning av fryspunkten till -10 à -15 °C (Lindborg, 1999). För att förhindra frysning av värmebärandevätskan skall markvärmväxlaren isoleras närmast markytan och vätskan ständigt cirkulera vid kall årstid. I [tabell 4.3](#) anges några egenskaper för olika blandningar av vatten och kemikalier.

Tabell 4.3. Termofysikaliska egenskaper för värmebärarvätskor, fryspunkt $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ och aktuell temperatur $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Resultat av beräkningprogram baserat på Svenska Kyltekniska Föreningens Handbok Nr 12 (Lindborg, 1999 och Melinder, 1997).

Vattenlösning med kemikalie	Koncentration %	Densitet kg/m^3	Specifik värmekap. J/kgK	Värmeledningsförmåga W/mK	Dyn. viskositet $\text{mPa}\cdot\text{s}$
Etylenglykol	30,5	1046	3665	0,445	4,38
Propylenglykol	32,9	1034	3855	0,417	8,12
Etylalkohol	24,4	972	4288	0,426	5,85
Metylalkohol	19,9	973	4094	0,462	3,26
Glycerin ¹	39,4	1106	3368	0,435	7,69
Ammoniak	10,8	960	4221	0,490	1,93
Kaliumkarbonat	27,0	1274	3026	0,539	3,71
Kalciumklorid	18,0	1165	3146	0,547	2,90
Magnesiumklorid	14,0	1124	3349	0,530	3,57
Natriumklorid	18,8	1146	3414	0,549	2,57
Kaliumacetat	24,0	1130	3359	0,492	3,36

1) Termofysikaliskt jämförbar med glycerol (Lindborg, 1999).

4.4.2 Rekommendationer

Följande egenskaper bör beaktas vid val av värmebärarvätska (www.svepinfo.se):

- Goda transportegenskaper – låg viskositet, dvs. lättflytande.
- Goda värmeöverföringsegenskaper – hög densitet (täthet), hög specifik värme (förmåga att innehålla värme) och hög värmeledningsförmåga.
- Låg korrosivitet så att vätskan ej påverkar material och ger korrosion.
- Ej diffusionsbenägen så att den tränger ut i skarvar och genom packningar.
- Skonsam mot pumpar och kompressorer så att inte packboxar och smörjning av lager skadas.
- Miljövänligt, dvs. icke-toxiskt samt lättnedbrytbart.
- Billig.

I en rapport utgiven av Naturvårdsverket rekommenderas följande frostskyddsmedel: etylenglykol, etylalkohol/etanol, propylenglykol, natriumklorid, kalciumklorid, kaliumkarbonat, kaliumacetat och -formiat samt glycerol av rapsolja (Lindborg, 1999). Se vidare kapitel 12 för en mer utförlig beskrivning m.a.p. miljöaspekter och rekommendationer.

Etylenglykol benämns vanligen enbart glykol och är lättnedbrytbart i naturen. Koncentrerad glykol är något toxiskt.

Utspädd etylalkohol/etanol är biologiskt nedbrytbar och inte hälsoskadlig. Vid stort intag av ren etanol verkar etanolen som ett nervgift. Därför innehåller ren etanol i form av värmebärarvätska en tillsats av denatureringsmedel (kräkmedel). Ibland innehåller den ”rena” etanolen även vissa mängder andra alkoholsorter, t.ex. isopropanol och n-butanol. Etanol klassas som brandfarlig i höga koncentrationer.

Propylenglykol har sämre termofysikaliska egenskaper än övriga frostskyddsmedel men är bättre ur miljösynpunkt.

Natrium- och kalciumpulorid har nackdelen att de kräver korrosionsinhibitorer, som normalt är toxiska.

Kaliumacetat och -formiat är dyra tillsatser och mest lämpliga vid temperaturer under -20 °C.

Glycerol bedöms ej som toxiskt. Se vidare kapitel 12 om miljöpåverkan.

IGSHPA rekommenderar följande värmebärande vätskor: dricksvatten, vatten plus kaliumacetat samt vatten plus propylenglykol. Användandet av värmebärande vätskor upptagna i IGSHPA-standarder eller andra icke-toxiska värmebärare minskar risken för miljöpåverkan vid eventuella läckage (www.dep.state.pa.us, 2000).

4.5 Termiska processer nära markvärmväxlaren

Värmeffödet i vattenomättad mark är beror av fuktinnehållet i marken och av transport av fukt. Fukt transporteras i marken genom tryckskillnader eller med en värmetransport. Värmetransport uppkommer då en temperaturgradient uppstår eller när det uppstår ett undertryck omkring en frusen jord. Fukt i marken och fuktvandring beror bl.a. av kapillaritet, kemisk potential, osmotiska krafter, skillnad i tryck (luft) och höjd. Fukt kan förekomma i markens porer dels som vätska, dels som ånga. Vid lågt fuktinnehåll förekommer fukten osammanhängande i separata fickor och det dominerande transportsättet är via ångfas. Vid högre fuktinnehåll förekommer fukten som en kontinuerlig vattenfilm och vätskeströmning dominerar istället. Transport av fukt i ångfas är speciellt av betydelse under sommarhalvåret då avkylning av byggnaden kan bli aktuellt (Svec, 1993).

Kylning av byggnad under sommarhalvåret

Vid kylning av en byggnad förs överskottsvärme från byggnaden till marken via markvärmväxlaren och den cirkulerande värmebärande vätskan. Den temperaturgradient som uppstår då värme avges från värmebärande vätskan till omgivande mark gör att fukt tvingas att förflytta sig bort från markvärmväxlaren. Detta resulterar i att jordens vattenhalt minskar, vilket leder till lägre värmeledningsförmåga och en ökning av värmemotståndet närmast slangen. Detta medför högre temperatur på värmebäraren, vilket kan påverka kylprocessens prestanda. Värmen transporteras huvudsakligen genom ledning och i fuktiga jordar genom konvektion (strömning i ång- eller vätskefas i markens porer). I gränssnittet mellan slang och jord är ångtrycket som högst och fukt- och värmetransport genom ångdiffusion kommer att ske bort från slangen. När ångan når ett kallare område kondenserar den och latent värme frigörs. Fuktvandring, det vill säga kondenserad ånga, uppkommer vid tryck- och temperaturskillnader i jorden, fukt kommer att vandra från varmare till kallare regioner. Dessa flöden ger upphov till en fuktgradient i marken, vilken samtidigt är den drivande kraften för en eventuell fuktvandring tillbaka till värmekällan (Svec, 1993). I de flesta jordar kan en nettoförlust av fukt att uppstå vilket innebär en minskning av jordens värmeledningsförmåga. Detta gäller under förutsättning att marken endast utnyttjas för kylning.

Värmning av byggnad under vinterhalvåret

Vid uppvärmning av en byggnad tas värme från marken till byggnaden med hjälp av markvärmväxlare. Uttas mycket värme, dvs. den cirkulerande vätskan håller flera minusgrader, kan den fukt som finns i jorden börja frysa vilket skapar en sugpotential (undertryck) ungefär vid isotermin för 0 °C. Fuktvandring uppstår mot det kallare området och tillskottet leder till att islinser tillväxer. Dessa fuktrörelser pågår så länge det råder en temperaturgradient och så länge fukt finns tillgängligt. Tillströmning av fukt och islinsbildning gör att jorden expanderar

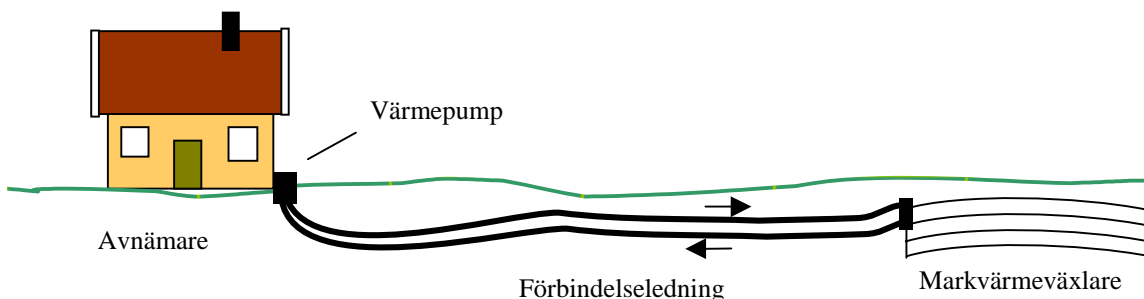
och en hävning uppstår, vilket kan skada markvärmväxlaren och/eller närliggande byggnader. En jord med så liten känslighet för tjällyftning som möjligt är därför att föredra som återfyllnadsmaterial runt markvärmväxlaren. Men, värmeledningsförmågan är högre i frusen än i ofrusen jord, vilket innebär att mängden värme som kan transporteras från marken till markvärmväxlaren ökar.

Fukttinnehållet är av stor betydelse för ett väl fungerande markvärmesystem och följande bör man ha i åtanke vid design av ett markvärmesystem (Svec, 1993);

- a) bestäm jordart vid den aktuella platsen,
- b) uppskatta det totala fukttinnehållet,
- c) ta reda på grundvattenfluktuationer under året,
- d) bestäm det termiska kontaktmotståndet mellan markvärmväxlaren och jorden,
- e) med hänsyn till ovanstående, välj korrekt teknik för design och modellering.

5. INSTALLATION HORIZONTELLA MARKVÄRMEVÄXLARE

Vid anläggning av ett markvärmelager krävs dels markvärmeväxlarledningar i det ”aktiva” området, dels två förbindelseledningar (fram och retur) mellan markvärmeväxlarna och avnämaren, **figur 5.1**. Beroende på förutsättningarna kan installationsmetoden för de olika ledningsslagen vara samma men också olika.



Figur 5.1 Markvärmeanläggning. Förenklad princip.

Installation av horisontella markvärmeväxlare för ytjordvärme är lämpligt där djupet till berg är stort, större än ca 5 m, och där relativt stor öppen markyta finns tillgänglig. Är djupet till berg bara någon/några meter kan bergvärme vara ett lämpligare alternativ och om markytan dessutom är begränsad kan någon typ av vertikal installation krävas (se kap. 7).

Beroende på rådande förutsättningar är en del av installationsmetoderna för ytjordvärme mindre lämpade för små markytor. För en enkelt utlagd horisontell slinga krävs i regel mellan 250-350 m² markyta med minst ett 1,5 m tjockt jordlager.

Vid installation av markvärmeväxlare inom villatomter görs valet av installationsmetod oftast baserat på lokal kännedom om markförhållandena. Om fastighetsägaren saknar sådan kunskap kan den sökas hos kommunen, grannar, lokala borrhöretag eller hos SGU. Svårigheten ligger oftast i att bedöma jordart och tjocklek hos jordlagren. Finns berg i dagen på tomten eller i dess närmaste närhet kan man dra slutsatsen att jordtäcket är begränsat. En kompletterande geoteknisk undersökning kan göras med handburen sticksond.

För stora system gäller att valet av installationsmetoder för markvärmeväxlarledningarna respektive förbindelseledningarna baseras på en geoteknisk utredning – valet baseras på aktuella ledningstyper och jordförhållandena inom det aktuella markområdet respektive utmed förbindelseledningens sträckning. Även vid upphandling och genomförande av entreprenaden kan stöd av geotekniker vara lämpligt. Entreprenaden upphandlas enligt AB med stöd av handlingar upprättade enligt Mark-AMA.

I följande avsnitt redogörs för metoder att installera markvärmeväxlare horisontellt i jord; dels

- konventionell schaktning med grävmaskin,
- dels även de alternativa installationsmetoderna:
- styrd borrhning,
 - rörläggning med jordrakat,
 - direktläggning med plog,
 - direktläggning med fräs.

Det framgår nedan att konventionell schaktning med grävmaskin i många fall kan vara svår att genomföra och därmed kostsam. De alternativa installationsmetoderna är därför intressanta. De olika installationsmetoderna kompletterar varandra.

5.1 Konventionell schaktning med grävmaskin

Schaktning på konventionellt sätt med grävmaskin är den lämpligaste metoden i fast och/eller blockrik morän eller grov fyllningsjord där inte andra lägningsmetoder är praktiskt genomförbara. I andra jordar är konventionell schaktning oftast inte den mest ekonomiska metoden. Schaktning är ofta problematiskt i områden med flytjordsproblem, som uppstår vid schaktning under grundvattennivån i siltiga jordar. Vid större djup i lera och silt uppstår också problem med instabila schaktslänter. Höga grundvattenstryck innebär även problem med bottenuppträckning.

Vid konventionell schaktning med grävmaskin utförs arbetet i tre huvudmoment:

1. schaktning av ledningsgrav
2. nedläggning av rör
3. återfyllning

Först schaktas ledningsgraven till avsett djup varvid de uppschaktade jordmassorna deponeras på markytan vid sidan av ledningsgraven. Schaktbotten rensas om möjligt från eventuella skarpkantande block eller stenar.

Om schaktslänterna vid större schaktdjup är instabila eller vid flytjordsproblem kan spont eller spontslåde användas, som stabiliserar schaktslänten. Om spont inte används bör de uppgrävda schaktmassorna deponeras på ett säkert avstånd från schaktslänten för att inte onödigtvis belasta denna. En annan metod kan vara att gräva schakten endast i kortare etapper. Metoden schaktning under vattenytan i vattenfylld schakt kan tillgripas vid problem med bottenuppträckning.

När schaktningen är klar rullas slangen ut bredvid ledningsgraven och lyfts ned på schaktbotten för hand, med hjälp av grävmaskinen eller annan lämplig maskinutrustning. Om jorden längs schaktbotten innehåller skarpkantat material som bedöms kunna skada slangen utläggs ett skyddslager av sand på schaktbotten och runt slangen.

De uppschaktade jordmassorna återfylls i ledningsgraven och packas så att inte sättningar uppstår efteråt. Efter uppschaktning och återfyllning blir jordmassorna uppblandade med varandra. Detta innebär att matjord blandas med jord från markens urlakningsskikt (alven), vilket inte är önskvärt.

5.1.1 Schaktväggars stabilitet

Innan schaktning utförs måste schaktslänternas stabilitet utredas. Information om hur säker schaktning bör utföras finns i Arbetarskyddsstyrelsens skrift "Gräv säkrare!" (1981).

Vid grävning i jord är schaktens djup, längd och schaktslänternas lutning samt grundvattenförhållandena viktiga faktorer som påverkar risken för att brott skall uppstå. Yttre belastningar i form av byggnader, jordmassor, fordon m.m. i schaktens närhet inverkar också. Som mothåll

mot glidning verkar jordens skjuvhållfasthet, som bestäms direkt på platsen med vingsond eller på upptagna prover i laboratorium.

När man dimensionerar konstruktioner i jord använder man en säkerhetsfaktor. Denna talar om hur stor jordens skjuvhållfasthet är i förhållande till den beräknade skjuvspänningen, som uppstår i jorden vid den aktuella schakten. För schakter är det vanligt att säkerhetsfaktorn väljs mellan 1,2 och 1,5. I de fall då stabilitetsförhållandena är sådana att schakten inte går att utföra med slänt kan spont användas. Spont kan också utnyttjas då man av utrymmesskäl måste göra schaktslätten vertikal.

Schaktning ovanför grundvattennivån

Vertikala schaktväggar är ofta inte stabila ovan grundvattennivån. Helt vertikala schaktväggar får ej utföras om personal skall vistas i ledningsschakten.

Lämplig släntlutning i helt torr sand är 30-40° (1:1,5). Vanligen är sanden ovan grundvattennivån "jordfuktig", vilket innebär att den varken är torr eller mättad med vatten. Fuktheten medför att kornen trycks mot varandra och hållfastheten ökar. Fenomenet kallas falsk kohesion. Där schaktdjupet är mindre än 2 m är lämplig släntlutning i jordfuktig sand 70 - 80° (3:1 till 5:1). Den falska kohesionen försvinner när jorden blir vattenmättad eller helt torr. Man bör därför vara uppmärksam vid schaktning med branta slänter i jordfuktig sand. För att möjliggöra vertikala schaktväggar kan en s.k. schaktsläde (spontsläde) användas. Alternativt kan en läggbox till en statisk plog eller en fräs användas som spontsläde.

I siltiga jordar och i torv är det svårt att på förhand avgöra lämplig släntlutning. Tiden för hur länge schakten står öppen har stor betydelse. Kort tid innebär att brantare släntlutning kan väljas jämfört med lång tid.

Vid schaktning i morän som är blockig väljs släntlutningen med tanke på risken för blocknedfall. Man bör regelbundet se till att sidoblock har fäste i slätten.

Schaktning under grundvattennivån

Vid eventuell schaktning under grundvattennivån finns risk för att flytjordsproblem uppstår vid stor andel silt i jordmaterialet. Även siltig sand och moräner med stort siltinnehåll fungerar i princip som silt i detta avseende. Med flytjordsproblem menas att schaktväggarna lätt faller ihop vid schaktning under grundvattenytan.

Under snösmältningssäsongen och efter perioder med mycket regn brukar grundvattennivån ligga högt. Nivån för inträngande vatten, som kan observeras vid provgrovsgrävning, avspeglar inte alltid grundvattennivån, som kan ligga högre eller lägre. Det tar alltid en viss tid för vattnet att rinna fram i täta jordar och vattnet rinner eller sipprar vanligen fram först i schaktens nedre del. Grundvattennivån bör därför även mätas upp med grundvattenrör eller portrycksmätare. Lämplig metod väljs efter jordartsförhållandena.

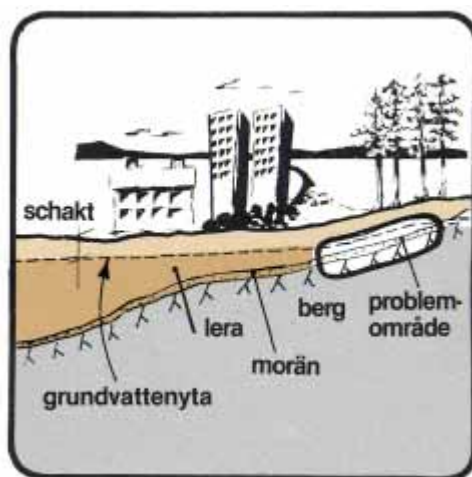
Vid konventionell schaktning undviks vanligen flytjordsproblem genom följande alternativa åtgärder:

- Schaktning med flacka slänter eller schaktning uppdelad i två eller flera mindre slänter i "steg".
- Temporär grundvattensänkning med pumpgröp eller wellpoints.

- Användning av spont.
- Användning av s.k. schaktsläde (spontsläde).

Vid schaktning i lera uppstår svårigheter när lerlagret under schaktbotten blir allt tunnare t.ex. vid övergång från lera till grövre jord. Vattentrycket i den grova jorden vill lyfta schaktbotten. Fenomenet kallas hydraulisk bottenuppträckning och gäller såväl vid spontade schakter som schakter med slänt, se [figur 5.2](#). Det är därför viktigt att hålla reda på grundvattentytans läge vid schaktning i övergång från lera till fast jord eller vid litet djup till fast botten. För att förhindra bottenuppträckning kan exempelvis följande alternativa åtgärder utföras:

- Avsänkning av grundvattentytan exempelvis genom att pumpa i grop eller brunn nedförd till det vattenförande jordlagret.
- Schaktning under vatten, dvs. schakten hålls vattenfylld medan grävning pågår.



Figur 5.2 Område med risk för hydraulisk bottenuppträckning, Gräv säkrare! (1981).

5.2 Horisontell borring

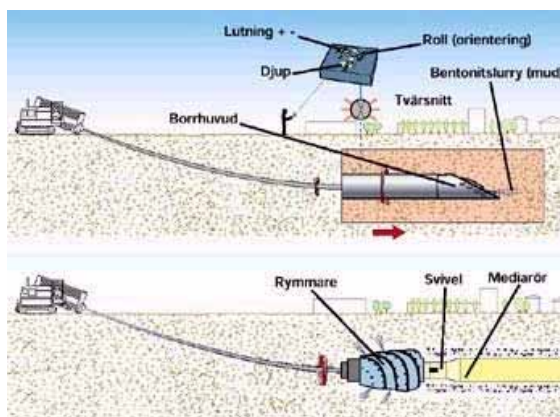
Horisontella markvämeväxlare kan installeras genom horisontell borring. De två metoder som kan vara intressanta är styrd borring respektive installation med s.k. jordrak.

5.2.1 Styrd borring

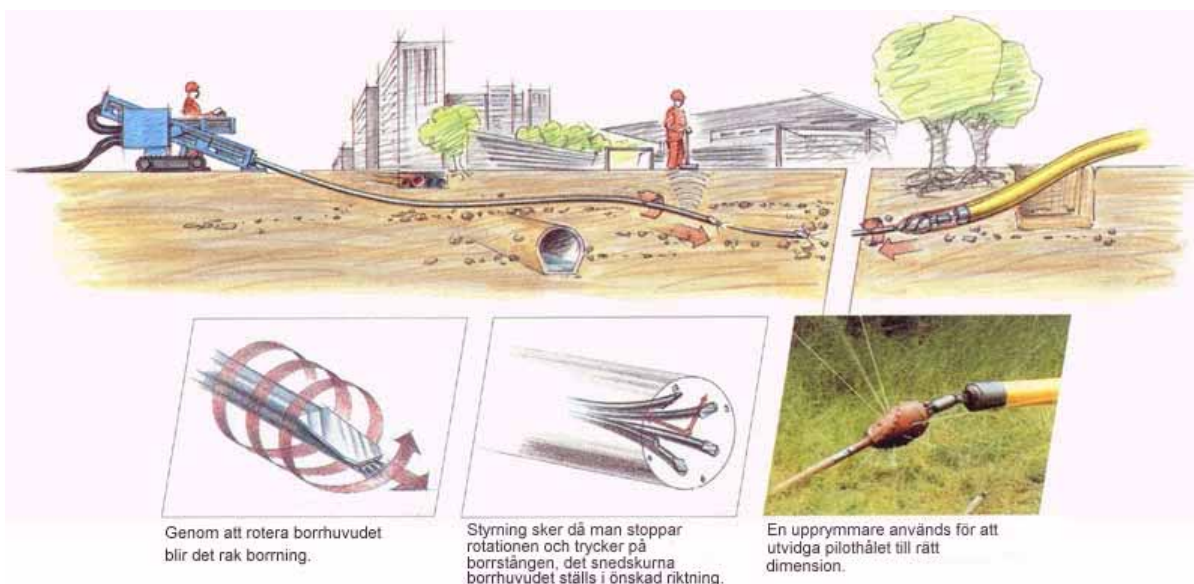
Vid mycket långa hål och för slangdimensioner ända upp till 800 à 1000 mm i diameter eller då tryckstationer nedschaktade i mark (dvs. anfangsgrop/schakt från vilken borring utgår) är opraktiska eller omöjliga, är styrd borring (även kallat bananborring) den mest lämpade borrhållningsmetoden. Metoden bygger på att man arbetar från markytan och styr borrhålets avvikelse med hjälp av elektronik och jetspolning. Styrd borring kan utföras i såväl kohesions- som friktionsjord och även i morän, om denna är blockfattig. Styrd borring används idag för installation av skyddsror eller mediarör för gas, fjärrvärme, el och tele, tryckavlopp, tryckvatten, avlopp, dagvatten samt även självfallsledningar. I [figur 5.3 – 5.5](#) illustreras principen för styrd borring.



Figur 5.3. Styrdd borring ("bananborring") under diverse hinder på och i marken. Principfigur från Styrudd AB (www.styrudd.se, 2000).



Figur 5.4. Styrdd borring ("bananborring"), utrustning. Principfigur från Styrudd AB (www.styrudd.se, 2000).



Figur 5.5. Styrdd borring ("bananborring"). Principfigur från Vretmaskin (www.vretmaskin.se, 2000).

Vid samtliga styrda metoder borrar först ett pilothål som sedan rymms upp i olika steg beroende på önskad slutdimension. Vid mindre slangdimensioner erfordras inte schaktgropar utom vid

hårdgjorda ytor av exempelvis asfalt eller gatusten, som måste avlägsnas vid start- och mottagningspunkterna, [figur 5.6.](#) och [5.7.](#)

Styrhuvudet i pilotrörets front kan positionsbestämmas och styras under framdrivningen. Borrvätska pumpas genom pilotröret och ut genom styrhuvudet. Massorna spolar bakåt utmed pilotrörets utsida till en uppsamlingsgrop vid startpunkten. Borrvätskan består oftast av en blandning av bentonit och vatten.

I styrhuvudet sitter en sond som sänder information om styrhuvudets lutning och rotationsläge kring sin egen axel, upp till en bärbar radiomottagare på markytan. Mottagaren förs till den punkt där signalerna är som starkast och är då placerad rakt över styrhuvudet. Styrhuvudets djup under markytan kan avläsas på mottagaren. Med ledning av informationen kan operatören påverka styrhuvudets riktning och genom att rotera styrhuvudet driva det framåt.

Längst ut på styrhuvudet monteras ett verktyg som bearbetar jorden/berget under framdrivningen. Det vanligaste är att verktyget består av en excentriskt placerad sked, som används vid borrhning i lösa till halvfasta jordar. I fastare material, t.ex. sedimentärt berg består verktyget av en borkrona med hårdmetallskär (Svensk Energi – Swedenergy – AB, 2001).



Figur 5.6. Schaktgrop vid startpunkt för drivning av slang med styrd borrhning. Hårdgjord yta har avlägsnats. Foto ur Styrud AB (www.styrud.se, 2000).



Figur 5.7. Schaktgrop vid mottagningspunkt. Foto ur Vretmaskin (www.vretmaskin.se, 2000).

Efter utförd borrhning, i mottagningspunkten, avlägsnas styrhuvudet. Mellan pilotröret och slangens rymmare och svivel. Sviveln gör att rymmaren kan rotera utan att slangens rymmare roterar. Slangen installeras när borrhningen drar hem rymmare, svivel och pilotrör genom borrhålet.

Vid styrd borrhning används specialbyggda borrhargar. De kan indelas i tre klasser beroende på riggens dragkapacitet, minirigg (<200 kN), midi-rigg (200-400 kN) och maxi-rigg (>400 kN). Andra betydelsefulla egenskaper är vridmoment (stora ledningar) och pumpkapacitet (Svensk Energi – Swedenergy – AB, 2001).

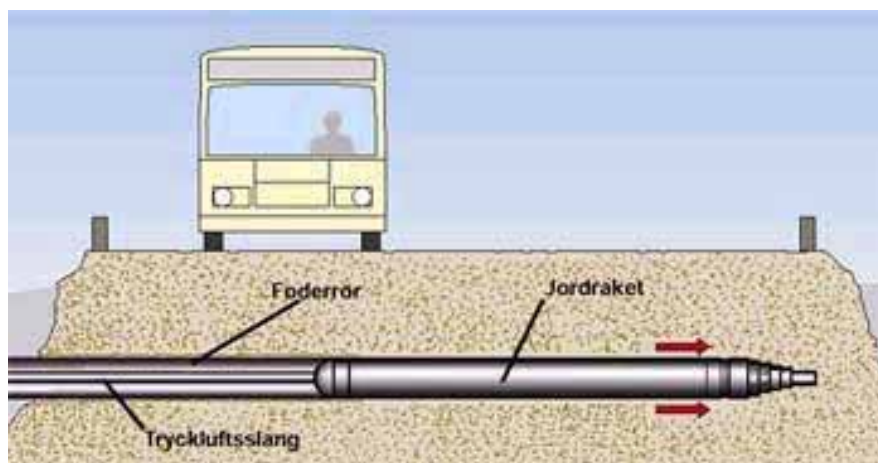
Slangar för ytjordvärme skulle successivt kunna installeras genom att flera borrhinar utförs parallellt efter varandra mot djupet så att två eller flera slangar placeras ovanför varandra. Därefter flyttas utrustningen i sidled varefter en ny sektion med slangar installeras. När avsett antal slangar har installerats, sammanfogas de i ändpunkterna genom skarvning så att en sammanhängande lång slang skapas.

Övervägs styrd borrhina som installationsmetod bör en geoteknisk utredning omfattande jordarts-, skjuvhållfasthets- och grundvattenförhållanden utföras.

5.2.2 Rörläggning med jordraketen

Vid rördrivning av rör med måttliga dimensioner (upp till 110 mm diameter) och lämpliga markförhållanden är jordraketen ett bra alternativ både ekonomiskt och tidsmässigt. Jordraketer används idag främst för dragning av skyddsror för gas-, el-, tele- och tryckvattenledningar i friktionsmaterial och styv lera. Vanliga ledningsmaterial är plast och stål. Ledningsdimensionen kan vara \varnothing 32–110 mm och ledningslängden kan vara upp till mellan 25 à 40 m beroende på metod och fabrikat.

Jordraketer kan vara drivna av såväl hydraulik som tryckluft. Den vanligaste typen av jordraketen är tryckluftdriven och har ett fjädrande huvud för att ge god riktningstabilitet och hög slagkraft. Slaghammaren inuti cylinderkroppen förses med tryckluft från en kompressor placerad i startpunkten. Cylinderkroppen drar högtrycksslangen efter sig under framdrivningen. Det rör som ska installeras är fästad i cylinderns bakre del och omger kompressorslangen. Under framdriften tränger ”raketen” undan jord längs dess väg, ingen jord avlägsnas från borrhålet. Principen för jordraketen illustreras i [figur 5.8](#) och arbetsgången vid utförandet illustreras i [figur 5.9](#).



Figur 5.8. Drivning av ledning under väg med jordraketen. Principbild från Styrud AB (www.styrud.se, 2000).



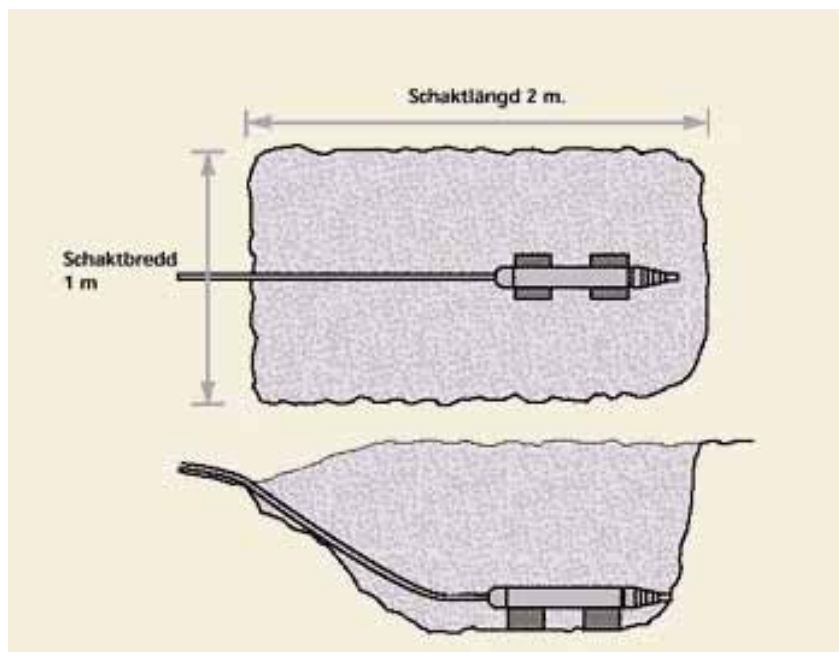
Figur 5.9. Arbetsgång vid borrhning med jordraketen. Principbild från Styrod AB (www.styrod.se, 2000).

På bilden **figur 5.10** har jordraketen använts för att dra en ledning under en väg. Bilden visar jordraketen i mottagningspunkten.



Figur 5.10. Drivning av ledning under väg med jordraketen. Foto från Styrod AB (www.styrod.se, 2000).

Jordraketer fungerar bäst i blockfria material, dock inte i lösa leror eller under grundvattennivån. Något mothåll behövs inte. Utrustningen kräver en 1×2 m stor schaktgrop i start- och mottagningspunkterna (**figur 5.11**). Begränsad geoteknisk utredning erfordras omfattande jordarts- och skjuvhållfasthetsförhållanden.



Figur 5.11. Erforderlig schaktgrop vid rördrivning med jordraketen Principbild ur Styrud AB (www.styrud.se, 2001).

Vid användning av jordraketen skulle slangar för ytjordvärme kunna installeras i "zick-zack" mellan två parallella på förhand uppgrävda diken placerade i vardera änden av det aktuella markområdet.

5.3 Direktläggning av slangar med plog eller fräs

Plog och fräs kan användas för direktläggning av slangar utan föregående schaktning med grävmaskin. I båda fallen används en läggbox som monteras direkt efter plogen eller grävkedjan och som placerar slangen på avsett djup i fåran. Dessa metoder har bl.a. använts för installation av dräneringsledningar i åkermark.

5.3.1 Direktläggning med plog

En plog skapar en fåra i jorden i vilken slangen (för markvärmväxlare en PE-slang) läggs på avsett djup med hjälp av en läggbox. Denna är monterad direkt efter plogsvärdet. När läggboxen har passerat faller plogfåran tillbaka helt eller delvis och jorden sluts kring slangen. Två grundtyper av plogar finns – statiska plogar och vibroplogar.

Statisk plog

En statisk plog krävs vid läggning av ledningar med större diameter än ca 100 mm och ledningar som har en lång s.k. minsta tillåten böjningsradie. Bilderna nedan (figur 5.12-16) visar direktläggning av dräneringsrör för täckdikning med en 35 tons bandgående statisk plog. Jorden består här av torrskorpelera.



Figur 5.12. Plog för direktläggning av dräneringsrör för täckdikning, 35 tons bandgående statisk plog. Laggerbox i upplyft läge. (Foto: Jan Fallsvik, SGI).

Bakom plogmaskinen är en läggerbox monterad (längst till vänster i [figur 5.12](#)) som för ned slangen till önskat djup. Laggerboxen är tillverkad av två parallella stålplåtar med ”distanser” monterade emellan. Med plogsvärdet på bilden kan ca 1,8 m djupa plogfårar skapas. Maskinens kapacitet är dock direkt beroende av jordförhållandena, men ett läggningsdjup ned till ca 1,2 – 1,5 m brukar vara möjligt i svenska jordar. Hinder för plöjning finns dock, exempelvis partier med berg i dagen, grova moräner, områden med allt för dålig bärighet (torvmossor kan dock gå bra), befintliga markförlagda ledningar, korsande vägar, bebyggelse etc.

Laggerboxen dimensioneras efter slangens dimensioner och böjningsegenskaper. Böjliga slangar kan läggas med en kort läggerbox, medan en lång s.k. lägsta tillåten böjningsradie för slangen kräver en lång läggerbox. I fallet PE-slangar för markvärmväxlare är den minsta tillåtna böjningsradien kort (ca max 1 m), varför endast en kort läggerbox erfordras.

Plogar försedda med rörlig arm förekommer också. Laggerboxen har då monterats på en teleskopisk arm så att den kan dras genom jorden med fordonet som mothåll. Alternativt vinschas läggerboxen hem med hjälp av kabel.

Flera slangar (även slangar av olika slag) kan läggas samtidigt på olika djup i plogfåran. Dräneringsgrus eller föreskriven skyddssand kan strilas ned runt slangen (eller slangarna) via en sandficka som är monterad ovanpå läggerboxen. Ovanför den bom på vilken plogen är monterad finns ett laserinstrument monterat (den gula vertikala ”stolpen”, [figur 5.13](#)), med vars hjälp önskat fall för slangen kan åstadkommas under plöjningen.



Figur 5.13. Direktläggning av dräneringsledning med bandgående statisk plog. Plogen har en påmonterad slangvinda. Den åtföljs av en traktordragen flakvagn med påmonterad bandtransportör för kringfyllning av skyddssand. (Foto: Jan Fallsvik, SGI).



Figur 5.14. Direktläggning av dräneringsledning med statisk plog. Sand för kringfyllnad strilas ned via transportbandet i läggboxen och faller ut runt ledningen. (Foto: Jan Fallsvik, SGI).

Samtidigt som slangen läggs ned kan dräneringsgrus strilas ned i plogfåran via en sandficka som är monterad ovanpå läggboxen. På bilden, **figur 5.14**, förs dräneringsgruset till sandfickan via ett transportband, här monterat på en traktordragen grusvagn.



Figur 5.15. Extraplog avsedd för att underlätta plöjning vid besvärliga jordförhållanden. (Foto: Jan Fallsvik, SGI).

Några meter framför plogen finns på denna maskin ytterligare en plog monterad under bandvagnen som är avsedd för förplöjning (**figur 5.15**). Denna extra plog används vid besvärliga jordförhållanden, exempelvis vid plöjning i normalblockig morän. Den kan också användas vid plöjning i exempelvis torrskorpelera för att förhindra att stora jordklumpar bildas längs plogfåran.



Figur 5.16. Direktläggning av flera slangar på olika djup i samma plogfåra, med 18-tons bandgående statisk plog. (Foto: Jan Fallsvik, SGI).

Flera slangar kan läggas samtidigt ovanför varandra på olika djup i samma plogfåra. Denna teknik kan tillämpas om man vill lägga två eller flera markvärmeslangar parallellt ovanför varandra med bestämda inbördes avstånd. De olika slangarna förläggs på avsett djup med hjälp av gummivalsar som placeras ut inuti läggboxen. Systemet är flexibelt – valsarnas läge kan justeras från fall till fall.

Tillvägagångssättet vid ”flerrörsläggning” medför att plogfåran blir djup, vilket erfordrar en relativt stark maskin och/eller att jordlagren inte är alltför fasta. I Motala direktlades en \varnothing 250 mm fjärrvärmeledning med hjälp av en statisk plog (fabrikat HOES, 18 ton, figur 5.16). Under fjärrvärmeledningen lades samtidigt en banddrän (bandformad dränering) och ovanför ledningen en signalkabel och överst ett pågrävningsskydd.

Vibroplog

En vibroplog väger mindre än en statisk plog. Plogen, figur 5.17-18, skapar utrymme för slangen i jorden på så sätt att den genom vibrationer komprimerar jorden i sidled.

Slangar med en diameter på upp till ca 100 mm kan läggas med en vibroplog. Vibroplogen är vanligen monterad på en fyrhjuldriven traktor med gummihjul.

Styvare slangar med lång minsta tillåten böjningsradie kräver en lång läggbox. En lång läggbox alstrar en stor friktion när den dras genom jorden. En traktor som dragfordon kan därför inte dra allt för långa läggboxar. Även om klenare slangar än 100 mm skall läggas är vibroplogen olämplig om slangen har en lång minsta tillåten böjningsradie.

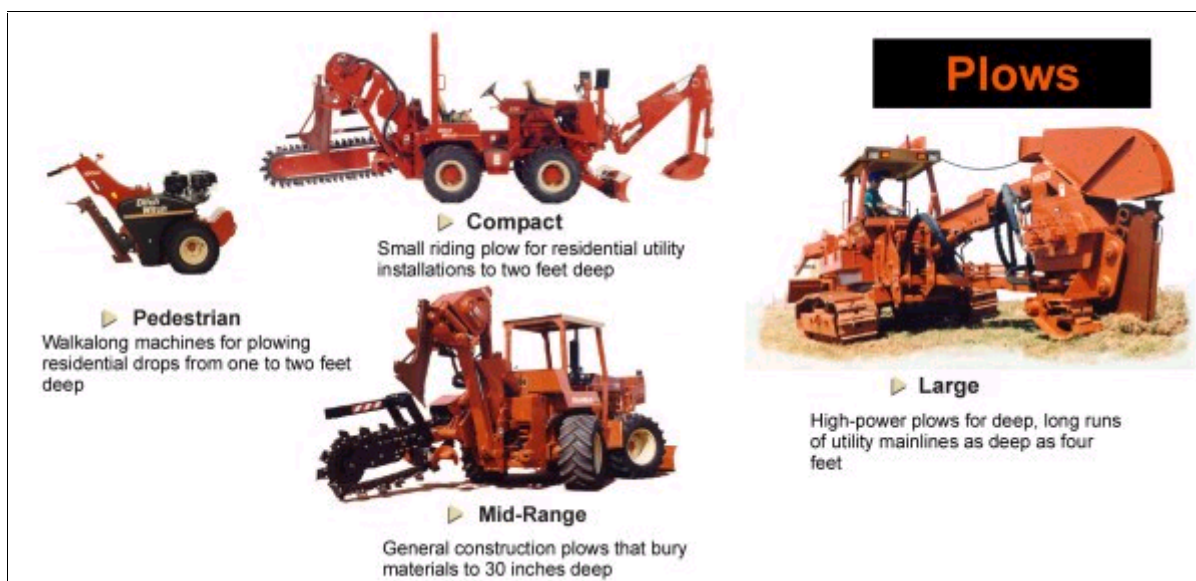


Figur 5.17-18. Vibroplog monterad på en fyrhjulsdriven traktorgrävare. Traktorgrävaren har två armar dels en vibroplog, dels ett grävaggregat. (Foto: SGI).

Vid läggning av många men korta sträckor av klenare slangar med kort minsta tillåten böjningsradie kan betydligt klenare plogutrustning användas. En typ av mindre kabelplog (figur 5.19) skulle kunna användas vid anläggning av horisontella markvärmväxlare, varvid slangarna installeras ”zick-zack” mellan två parallella på förhand grävda diken på vardera sidan av trädgården. I figur 5.20 illustreras olika varianter av plogar och fräsar.



Figur 5.19. Vibrerande kabelplog främst avsedd för anläggning av serviser i trädgårdar, exempel av fabrikat Ditch-Witch 255 sx. Foto: Kjells Traktorgrävningar HB (w1.551.telia.com/~u55102445, 2001).



Figur 5.20. Olika varianter av plogar och fräsar av fabriken Ditch Witch (www.ditch-witch.com, 2001). 1–2 feet \approx 0,3–0,6 m. 30 inches \approx 0,8 m.

5.3.2 Direktläggning med fräs

Bilderna nedan, figur 5.21-23, visar direktläggning av dräneringsrör för täckdikning med en 15 tons bandgående fräs av fabriken Dynapac. Till skillnad mot en plog skapar fräsen en öppen schakt i jorden som sedan måste återfyllas. Fräsning är effektivare än plogning i sandiga och grusiga jordar där friktionen mot läggboxens sidoplåtar blir stor vid plöjning.

I moränjord är fräsen dock olämplig eftersom grävkedjans tänder snabbt slits ut av större stenar och block. Även i allt för leriga jordar är fräsning olämplig eftersom metoden blir ineffektiv. Leran omvandlas lätt till en degliknande massa, som inte fräsens skovelblad får grepp om med konsekvensen att fräsen inte får upp leran till markytan.



Figur 5.21. Direktläggning med fräs. En läggbox är monterad bakom fräsen.
(Foto: Jan Fallsvik, SGI).

Också en fräs brukar vara försedd med en läggbox med påmonterad sandficka. Fräsen i figur 5.21 klarar ca 1,8 m djup schaktning vid goda jordförhållanden. Den runda anordningen,

som är monterad mitt på grävkedjan, är en dubbel skruv som för ut jordmassorna på vardera sidan av schakten.



Figur 5.22. Fräs under drift. (Foto: Jan Fallsvik, SGI).

Den dubbla skruven som för ut den uppschaktade jorden åt sidorna syns mitt i [figur 5.22](#). En vall bildas på vardera sidan av schakten, [figur 5.23](#).



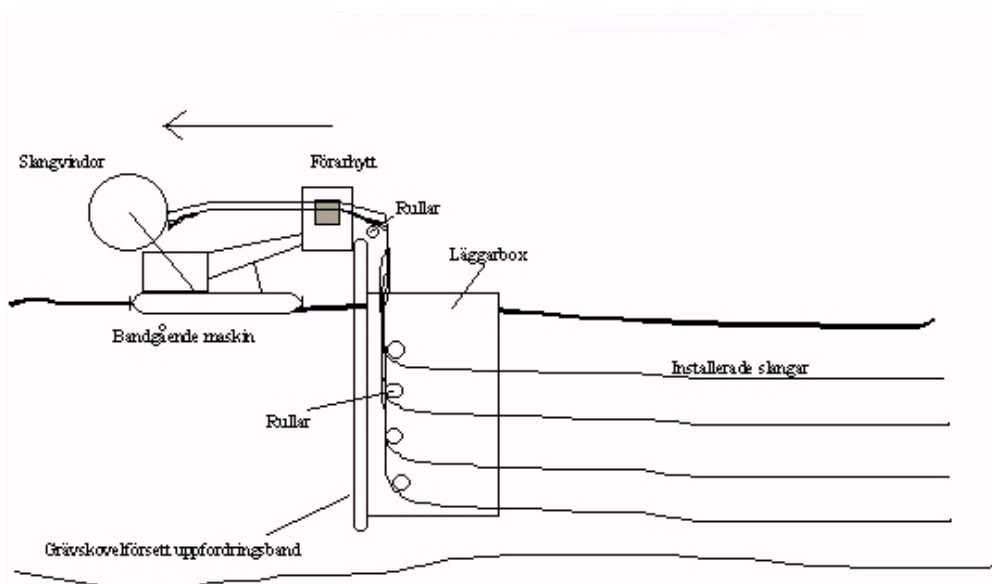
Figur 5.23. Direktläggning med fräs. Sand/dräneringsgrus strilas samtidigt ner och läggs runt ledningen. (Foto: Jan Fallsvik, SGI).

Vid fräsning skapas en öppen smal schakt. Sand eller dräneringsgrus kan strilas ned i schakten runt slangen (eller slangarna) via en ficka monterad på läggboxen. En släde med ”omvända” schaktblad kan även bogseras efter fräsens läggbox och föra ned schaktmassorna i ledningsgraven, [figur 5.24](#).



Figur 5.24. En släde med "omvända" schaktblad bogserad efter läggbox på en fräs. Schaktbladen återfyller schaktmassorna i ledningsgraven. (Källa: Göran Helltröm, LTH).

Även med en fräs kan flera slangar läggas samtidigt utmed samma "fåra", figur 5.25.



Figur 5.25. Princip för en fräs anpassad för läggning av slang på flera nivåer samtidigt.

5.3.3 Fördelar med direktläggning

I jämförelse med konventionell schaktning med grävmaskin medför direktläggning mindre skador på de slangar som läggs.

I jämförelse med traditionell grävning och fräsning medför direktläggning med plog mindre markskador. Anledningen till detta är att schaktning medför att alv (dvs. jordens urlagnings-skikt) uppblandas med matjorden.

5.3.4 Planering och projektering av direktläggning – stora system

I området för markvärmväxlarna

Om slangarna skall installeras genom direktläggning bör följande projekteringsarbete utföras:

1. Genomgång av befintlig geologisk och geoteknisk information om området och dess närhet i form av geologiska kartor och geotekniska utredningar.
2. Fältundersökning omfattande okulärbesiktning, sticksondering samt provgroppsgrävning.
3. Jordförhållanden och eventuella hinder anges.
4. Lämpligaste lägningsmetod för värmelagret bedöms (konventionell schaktning med grävmaskin, plöjning, fräsning, eller borrar).

Handlingarna utformas som ett anbudsunderlag som ansluter till AnläggningsAMA 98.

Förbindelseledningar

Om markvärmväxlarna placeras på avstånd från avnämaren och förbindelseledningar skall projekteras för direktläggning mellan ett värmelager och avnämaren bör den lämpligaste (billigaste) sträckningen för denna metod väljas ut innan sträckningen fastställs.

Projekteringen utförs i flera steg varvid detaljeringsgraden successivt ökas. Först utförs en s.k. geobildtolkning av alternativa sträckningar. Denna består av:

1. Genomgång av befintlig geologisk och geoteknisk information längs sträckningen i form av geologiska kartor och geotekniska utredningar.
2. Flygbildstolkning i stereo.
3. Fältkontroll (okulärbesiktning av delsträckorna samt sticksondering).

Med geobildtolkningen som grund utförs sedan en fältundersökningar längs vald sträckning – huvudsakligen provgroppsgrävning. Sträckningen skall väljas så att områden med så lös jord som möjligt passeras. Den valda sträckningen uppritas på en karta i lämplig skala. Lämpligaste lägningsmetod för de olika delsträckorna längs den valda sträckningen anges. Sträckningen delas upp i delsträckor efter jordförhållanden och eventuella hinder:

Handlingarna utformas som ett anbudsunderlag, som lämpligen ansluter till AnläggningsAMA 98.

5.3.5 Bedömning av grundläggnings- och schaktningsförhållanden

Schaktbarhet

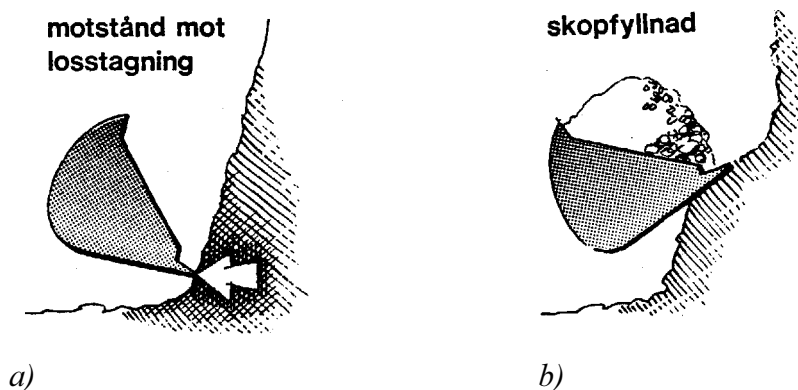
Möjligheterna att schakta i jord benämns schaktbarhet. Denna varierar mellan olika jordförhållanden.

Magnusson och Orre (1985) har utvecklat ett system för klassificering av jordars schaktbarhet. Schaktbarheten bestäms enligt detta klassificeringssystem av jordmaterialets motstånd mot losstagning, som i sin tur är en funktion av i första hand jordmaterialets skrymdensitet och innehåll av sten och block.

Med schaktbarhet avses ett jordmaterials kapacitetspåverkande egenskaper vid anpassning och lastning. Schaktbarheten bestäms av jordmaterialets motstånd mot losstagning och inverkan på skopfyllnad enligt illustration nedan (**figur 5.26**). Schaktbarheten anger inte en schaktslänts stabilitet exempelvis vid flytjordsproblem.

Jordmaterialets ”motstånd mot losstagning” påverkar en grävmaskins (skopa, blad eller rivartand) möjlighet att tränga in i och sönderdela jordmaterialet. Motståndet mot losstagning är betingat av jordmaterialets:

- lagringstäthet,
- kornstorleksfördelning,
- kohesion och cementering,
- (tjäle).



Figur 5.26. Schaktbarhet bestäms av jordmaterialets motstånd mot losstagnning (a) samt skopfyllnad (b) (Magnusson och Orre, 1985).

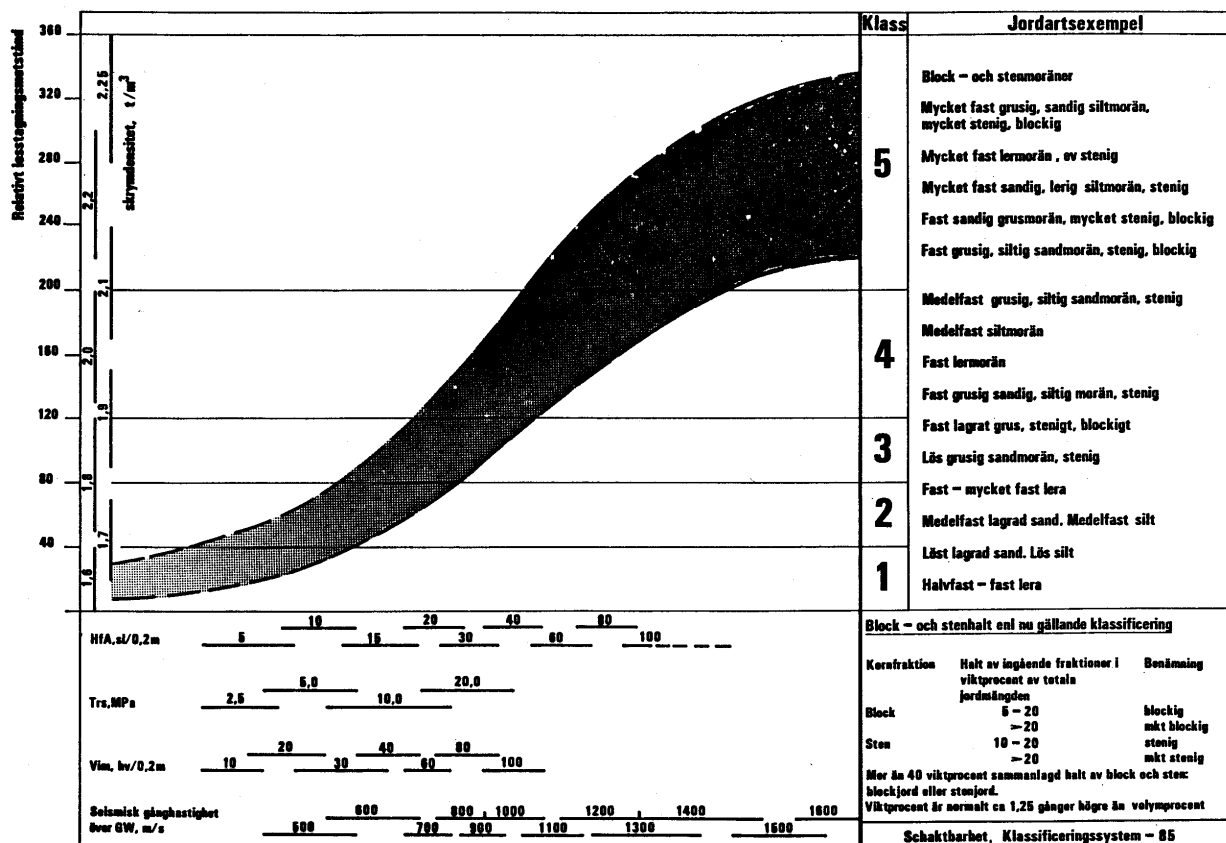
Med skopfyllnad menas utlastad fast volym per skopa. Skopfyllnadsgraden är avhängig materialets volymförändring från fast till löst tillstånd och möjligheten att fylla skopan. Skopfyllnadsgraden beror av jordmaterialets:

- lagringstäthet,
- kornstorleksfördelning,
- blockstorlek i förhållande till skopvolym,
- rasvinkel, kohesion och vattenhalt som påverkar "rågen",
- klibbighet och påfrysning som medför att material kan kvarstanna i skopan,
- schaktets geometriska form.

Schaktbarhetsklasser

Figur 5.27 visar hur schaktbarhetsklass kan bedömas med ledning av sonderingsresultat eller resultat från seismisk undersökning. Schaktbarheten med grävmaskin klassificeras i en skala 1-5, där klass 1 betecknar litet motstånd mot losstagnning och hög skopfyllnadsgrad, och klass 5 stort motstånd. Dvs.

	<u>Schaktbarhetsklass</u>
Mycket lättschaktat - lättschaktat	1
Ganska lättschaktat	2
Medelsvårschaktat	3
Ganska svårschaktat	4
Svårschaktat	5



Figur 5.27 Schaktbarhet, Klassificeringssystem-85 (Magnusson och Orre, 1985).
HfA=hejarsondering, TrS=Spetstrycksondering, Vim=viktsondering. Vid CPT-sondering kan de i diagrammet angivna värdena för spetsmotstånd för TrS tillämpas.

Provgropsgrävning

Vid provgropsgrävning, som bör utföras innan markvärmväxlar- eller förbindelseledningarna installeras, registreras jordartsförhållanden, eventuell grundvattennivå, förekommande stenars form och största tvärsnitt samt schaktbarheten. Eftersom jordartsförhållandena och schaktbarheten varierar mellan olika jordlager bör dess variation mot djupet i provgropen registreras.

Schaktbarheten registrerad i provgropar ger även information om hur andra installationsmetoder kan fungera i det aktuella markområdet, exempelvis plogning och fräsning samt olika metoder av borrhning. Eftersom schaktbarheten varierar mot djupet måste det planerade installationsdjupet beaktas för den valda grundläggningsmetoden. Vid intallationsdjup, som överstiger möjligt djup för provgropsgrävning, måste andra geotekniska och/eller geofysiska undersökningsmetoder användas, exempelvis CPT-sondering, trycksondering, provtagning eller refraktionsseismik.

Vid installation av rörledning (PEH) för deponigasdistribution användes markklasser, som baserades på observationer av jordartsförhållanden och schaktbarhet, i ett antal provgropar, se exempel [tabell 5.1](#).

Tabell 5.1 Indelning av ledningssträckor i markklasser vid plöjning med statisk plog, exempel. Förbindelseledning för deponigasdistribution av PEH-plast (efter Fallsvik (1992)).

Mark-klass	Installationsmetod	Beskrivning
A1	Direktläggning med statisk plog utan föregående förplöjning	De geotekniska förhållandena medger <u>direktläggning med statisk plog</u> till avsett djup (utan förplöjning).
A2	Direktläggning med statisk plog efter föregående förplöjning	De geotekniska förhållandena medger <u>direktläggning med statisk plog</u> till avsett djup men <u>efter förplöjning</u> med plogen utan ansluten läggbox.
A3	Direktläggning med statisk plog samt förankring av ledningen	Ledningssträckor med torv- och/eller djord hämförs till denna markklass. Direktläggning kan utföras <u>med statisk plog</u> (utan förplöjning). För att förhindra att ledningen skadas av skogs- eller jordbruksmaskiner som "kör fast" och "gräver ned sig" i torven eller dyn bör ledningen läggas på rörplogens kapacitetsmässiga maximidjup 1,5 m.
B	Kombinerad plöjning / schaktning	Inom denna markklass, som utgörs av områden med normalmorän, kan ej en säker bedömning göras om plöjning är genomförbar på grund av att moränen kan ha varierande blockighet. Vid längre sträckor för överföringsledningar rekommenderas att <u>plöjning tillämpas där så är möjligt</u> . Plogen <u>bortkopplas dock längs avsnitt med</u> block där den inte längre kan framdrivas och schaktning utförs med grävmaskin.
C	"Konventionell" schaktning	Inom denna markklass kan schaktning utföras med grävmaskin. En säker bedömning finns att plog <u>eller fräs inte kan framdrivas</u> på grund av jordmaterial med stor stenighet och/eller blockförekomst eller p g a andra hinder.
D	Svår schaktning eller sprängning	Inom denna markklass bedöms svår schaktning, sprängning eller möjligen hammarborring behöva tillämpas.

Behov av rörskydd

Om skarpkantat material förekommer i jordlagren kan rörskydd vara nödvändigt. Rörskyddet kan bestå av en kringfyllning av sand, som vid konventionell schaktning kan fyllas i kring ledningen med grävmaskinen eller vid direktläggning via en sandficka monterad på läggboxen. (Alternativt kan röret förses med yttre skyddsror eller förses med ett skydd bestående av ett extruderat skyddsskikt av mjukplast, s.k. coating).

Direktläggning genom plöjning eller fräsning skadar inte ledningen om lämpliga anordningar används för att förhindra repning. Anliggning och nötning av ledningen mot maskindelar kan och skall förhindras. Där den naturliga jorden utgörs av lera, silt, sand eller torv bedöms skyddsskiktet ofta som onödigt. Risken för att omgivande jord skall åstadkomma nötning eller repor på ledningen bedöms som närapå obefintlig.

6. INSTALLATION SPIRALFORMAD MARKVÄRMEVÄXLARE – SLINKY

6.1 Bakgrund

I Kanada utvecklades en spiralformad markvärmewäxlare i slutet av 1980-talet och början av 1990-talet av professor Otto J Svec, verksam vid NRCC i Ontario. Det vetenskapliga namnet för den spiralformade markvärmewäxlaren är ”curtate cycloide”, men i dagligt tal kallas den för ”Slinky” vilket även görs i denna nulägesbeskrivning. I USA och Kanada är Slinky fullt accepterad och etablerad på marknaden. Det finns inga uppgifter på att Slinky har tillämpats i Sverige men goda indikationer i Nordamerika gör att metoden bedöms ha potential även i Sverige.

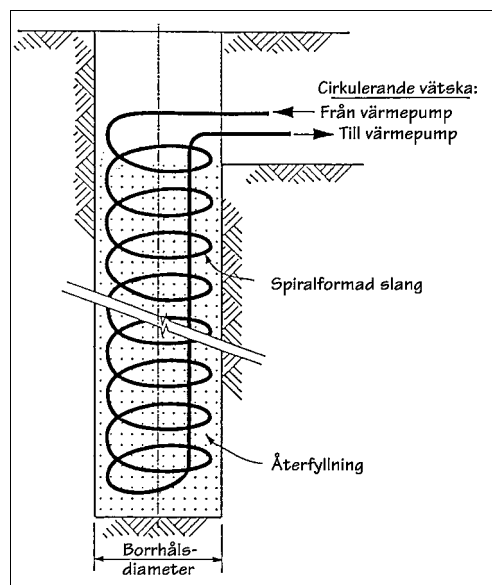
Information om Slinky utanför Svecs arbete har inhämtats från Internet och då främst webbplatsen för Geo Thermal Information Office (www.alliantgeo.com) från vilka vi även har fått tillstånd att använda bilder samt från IGSHPA (www.igshpa.okstate.edu).

Ett antal prototyper togs fram innan den spiralformade markvärmewäxlaren valdes ut för att testas på experimenthus motsvarande enfamiljsvillor. Fördelarna med att använda markvärmewäxlare formade som en spiral (både vertikal och horisontell installation) är flera, enligt Svec (1993):

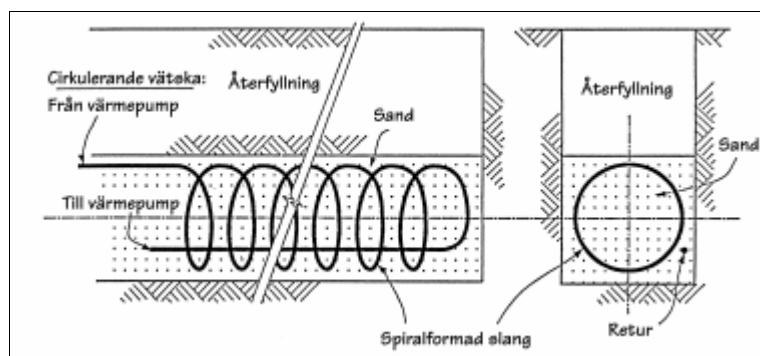
- Nära kontaktyta mot borrhålets/dikets väggar.
- Den värmewäxlande ytan utgörs av borrhålets eller dikets gräns (slang och fyllningsmaterial inräknat) mot omgivande mark, dvs. en större mängd jord kan aktiveras.
- Den totala kontaktytan mot omgivande jord kan lätt justeras genom att ändra spiralens densitet, dvs. trycka ihop eller sträcka ut spiralen.
- Längden på slangen i spiralen är många gånger större jämfört med den raka slangen för retur, vilket medför att termisk inverkan mellan in- och utgående slang blir negligerbart liten.
- Vid vertikal installation i vida borrhål blir så gott som hela utrymmet rent vilket leder till lätt och bra återfyllnad.
- Spiraler är flexibla och kan därför tåla måttliga deformationer.

En nackdel visade sig vara ansamling av luftbubblor på toppen av slingorna vid horisontell installation. Detta undveks genom att försiktigt avlufta systemet och att använda en något överdimensionerad pump då systemet fylldes.

I försöken testades installation av Slinky dels i borrhål i jord och dels i diken ([figur 6.1](#) och [figur 6.2](#)).



Figur 6.1. Vertikal installation av en spiralformad markvärmväxlare i borrhål (Svec, 1993).



Figur 6.2. Horisontell installation av en spiralformad markvärmväxlare i diken (Svec, 1993).

Resultat från flera års forskning i Kanada kring Slinky, med fullskaleprojekt och datorsimuleringar, summeras under följande punkter (Svec, 1993):

- Både vertikala, men speciellt stora horisontella markvärmväxlare kan uppnå flera gånger högre värmeöverföringskapacitet än motsvarande traditionella system.
- Eftersom spiralformen erbjuder hög effektivitet (kortare diken) kan den totala installationskostnaden reduceras med upp till 50 %.
- Minskad installationskostnad kan minska den totala kostnaden med så mycket som 25 %.
- Dataprogrammet G-HEADS (Tarnawsky & Leong, 1990) vidareutvecklas och anpassas att inkludera även spiralform.

I Svecs försök testades både kopparrör och PEH-slang. Kopparrör används inte idag på grund av korrosionsrisk och negativ miljöpåverkan.

Vid horisontell installation installeras Slinky vanligtvis inte tredimensionellt i diken, som i figur 6.2, utan liggande eller stående i diken (figur 6.3) eller flera bredvid varandra liggandes på botten av grunda schakter, speciellt för kommersiella byggnader (figur 6.4). Slinky installeras således både för små och stora byggnader.



Figur 6.3. Installation stående i diken.
(www.alliantgeo.com, 2000).



Figur 6.4. Installation av flera liggande Slinky i grund schakt. Avser främst större kommersiella byggnader.
(www.alliantgeo.com, 2000).

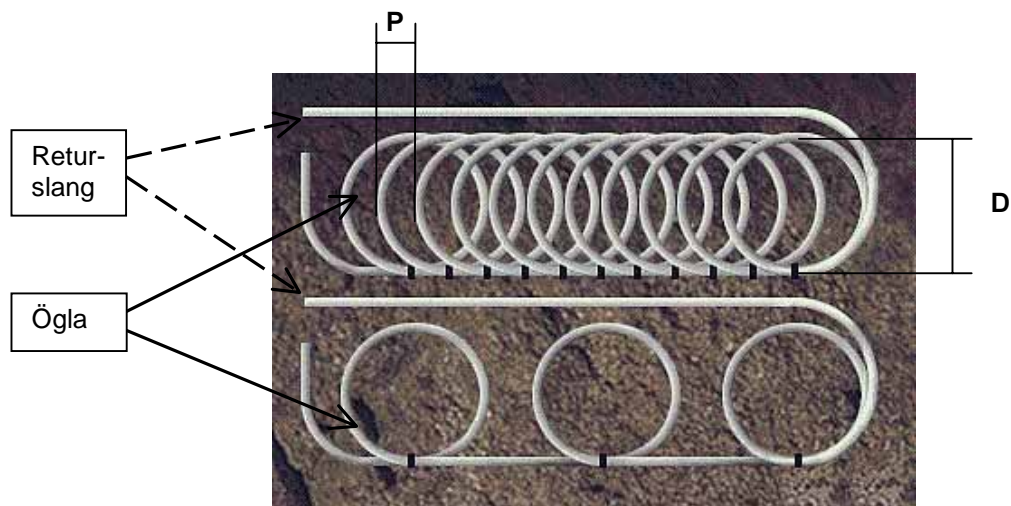
6.2 Material, utformning och kapacitet

Slangmaterialet utgörs av PEH (högdensitetspolyeten) med diameter på 32 mm och godstjocklek på 3,2 mm (Svec, 1993 och IGSHPA, 1994). Se även avsnitt 4.2. Vid tillverkningen viras 150 m slang tätt runt en slangvinda med diametern 50 cm. Slangen får då en diameter på ca 60 cm och väger ca 70 kg. Längd och diameter på slangen kan variera mellan olika tillverkare för att passa deras installationsmetoder. Returslangen är rak och betydligt kortare. Den termiska växelverkan mellan spiralen och den raka slangen i Slinky är minimal, värmeförlusten blir negligerbart liten (Svec, 1993).

I IGSHPA:s installationsguide (IGSHPA, 1994) ges råd och anvisningar för installationsarbetet. I Svecs arbete 1993 angavs en tumregel gällande för ett klimat liknande det i Ontario (kalla vintrar, varma somrar): en Slinky (150 m slang) som dras ut till 20-25 m och installeras tredimensionellt i ett 1,8 m djupt dike med bredden 0,6 m och med samma längd som den utdragna slangen är tillräckligt för en 3,5 kW värmepump. Diket återfylls med sand, om förhållandena är sådana att ett blött eller fuktigt tillstånd av sanden kan uppnås, upp till toppen på Slinky varefter diket återfylls med dikesmaterial upp till markytan.

I USA har dikesdjup på 1,5-2 m använts och ca 3,5 m avstånd mellan dikena (om flera diken) (www.alliantgeo.com, 2000). Vid horisontell installation ska diket vara något vidare än höjden på öglorna (cirkeldiametern). Med motsvarande förhållanden för vertikal installation ska dikesbredden vara ca 7-10 cm bredare än bredden på spiralen (slangdiametern) och med tillräckligt djup för överfyllnad.

På webbplatsen för Geo Thermal Information Office (www.alliantgeo.com, 2000) anges att 225-240 m slang med diameter 19 mm använts och att det för varje tons kapacitet (1 ton motsvarar 3,5 kW kyleffekt till huset) är tillräckligt med ett 30 m långt dike, 0,9 m brett och 1,8 m djupt. Överlappningen mellan öglorna var 42,5 cm ($D-P = 42,5$ cm, se figur 6.5).



Figur 6.5. Överlappande respektive utdragen Slinky (www.alliantgeo.com, 2000).
P = avstånd mellan öglorna (eng. Pitch).
D = diameter på öglorna.

I IGSHPA:s installationsguide (IGSHPA, 1994) rekommenderar Pennsylvania Power & Light Company för horisontell installation att en Slinky med diametern 1 m läggs platt på botten av ett 1 m brett dike som är 2 m djupt och minst 30 m långt. Vidare rekommenderas att Slinky omfattas av ca 250 m slang. Anläggningen omfattar både värme och kyla för en (större) villa. I installationsguiden finns tabeller över IGSHPA:s rekommendationer med avseende på utformning av Slinky, slanglängd, antal öglor, dikeslängd etc.

Slinky kan installeras så att öglorna följer varandra med visst avstånd, figur 6.5. Minimilängden som Slinky bör dras ut till är ca 4,5 m om öglorna ska överlappa varandra och ca 3 m om de ej ska överlappa varandra (www.alliantgeo.com, 2000). Slinky arrangeras på marken innan den läggs i diket så att avsedd längd erhålls för det aktuella objektet, figur 6.6. Geometrin bibehålls automatiskt genom slangens elasticitet och fixeras genom att öglorna binds fast vid skärningspunkterna. Banden som används för fixeringen måste hålla för själva installationen av Slinky i diket. Efter att diket återfyllts fyller banden ingen funktion. Banden kan vara tillverkade av plast, metall eller specialtape för slangar och sätts (manuellt) vanligen med ca 25 cm mellanrum för varje ögla.



Figur 6.6. Slinky levereras i rullar och arrangeras på plats innan den läggs i diket (www.alliantgeo.com, 2000).

Dikena behöver inte vara raka och en krökning mindre eller lika med 90° accepteras i USA (www.alliantgeo.com). Diken för vertikal (stående) installation tas upp med hjälp av plog eller fräs (se kapitel 5). Diken för horisontell (liggande) installation grävs med grävmaskin. Generellt minskar en kompakt Slinky dikeslängden med ca 2/3-delar jämfört med ett 2-slangsystem (2 raka slangar på 1,2 och 1,8 m djup i ett dike), och en utdragen Slinky minskar dikeslängden med ca 1/3-del jämfört med ett 2-slangsystem (IGSHPA, 1994).

6.3 Installation

6.3.1 Allmänt

Slinky fungerar som en fjäder och kan dras ut så att rätt längd erhålls för tillräcklig värmeväxling för det aktuella objektet. Vid installation sträcks den hoprullade Slinky ut, lyfts/välts ner i ett dike som sedan återfylls. Slinky kan installeras vertikalt i smala diken, horisontellt i vida diken eller i jordbrunnar. Erfarna installatörer i USA installerar en Slinky på en halv dag (IGSHPA, 1994). Vad som krävs är god planering, val av rätt metod för dikesgrävning samt val av rätt återfyllnadsteknik. Att återfylla horisontella installationer är betydligt enklare än vertikala diken och man riskerar inte i samma grad att luftfickor bildas. Ytterligare en fördel med horisontell installation i diken är att problem orsakade av förekomst av sten och block, hög grundvattennivå, som gör att Slinky "flyter upp" under installation då det fortfarande är luft i slangen, etc. kan överbryggas (IGSHPA, 1994). Vertikal installation, å andra sidan, kräver mindre markyta och mindre grävarbete och går i vissa fall fortare att gräva.

6.3.2 Installation i diken

Vanligen installeras Slinky stående vertikalt i diken eller liggandes horisontellt på dikesbotten. Beroende på jordens beskaffenhet används plog, fräs eller grävmaskin (se kapitel 5).

Före installationen trycktestas slangen för att säkerställa att inga brott uppkommit under tillverkning eller vid transport. Det tryck den testas vid bör vara minst dubbelt så stort som det

väntade maxvärdet (IGSHPA, 1994). För att underlätta vertikal installation i diken kan Slinky läggas mot den vall som blir av dikesmassorna för att sedan låta Slinky försiktigt glida ner i diket (**figur 6.7**). Vid horisontell installation läggs Slinky på marken bredvid diket och lyfts sedan ner försiktigt och läggs platt på botten av diket (**figur 6.8**).



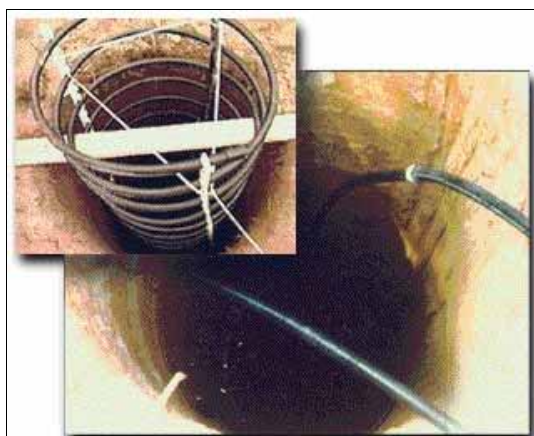
Figur 6.7. Installation av stående Slinky i dike. (www.alliantgeo.com, 2000).



Figur 6.8. Installation av liggande Slinky i dike. (www.alliantgeo.com, 2000).

6.3.3 Installation i grunda borrhål

Exempel finns på att Slinky även installerats i grunda borrhål i jord (www.alliantgeo.com) (**figur 6.9**). Diametern för dessa borrhål är uppskattningsvis 0,6-0,8 m. Djupen har varierat mellan 6-9 m (www.alliantgeo.com). Vid installationen håller plastskenor öglorna på rätt avstånd från varandra (**figur 6.10**). (Se avsnitt 7.2.)



Figur 6.9. Installation av Slinky i borrhål (www.alliantgeo.com, 2000).



Figur 6.10. Fixering inför installation i borrhål (www.alliantgeo.com, 2000).

6.4 Återfyllnad

Tillvägagångssättet för återfyllnad är av stor betydelse eftersom värmeväxlingen är avhängig kontakten mellan slangen och den omgivande marken. Vid horisontell installation föreslår Geo Thermal Information Office (www.alliantgeo.com) att ett 5-10 cm lager sand eller siltig jord läggs under och över Slinky. Vid vertikal installation fylls diket med sand eller siltig jord upp till ovansidan på Slinky. Återfyllning sker vanligen med en hydrauliskt eller elektriskt vibrerande maskin. Sandiga/siltiga jordar som återfyllnadsmaterial rekommenderas dels för att det är lätt att återfylla med, dels för att man med hjälp av dessa kan åstadkomma god värmeöverföring mellan den cirkulerande vätskan i slangen och omgivande mark.

I Svecs arbete (1993) rekommenderas sand under förutsättning att sanden hålls mättad eller fuktig. Kompaktering av sand görs enkelt genom att mätta sanden med vattenjetutrustning eller högtryckspump, eller helt enkelt genom att lämna diket öppet under ett par dagar med regn. För att bibehålla så hög värmeledningsförmåga som möjligt bör sanden hållas blöt eller åtminstone fuktig, eftersom en blöt/fuktig sand vanligen har högre värmeledningsförmåga än den omgivande jorden. Den värmeväxlande ytan utgörs därmed av gränsskiktet mellan sanden och den omgivande orörda jorden (Svec, 1993).

Den naturliga jorden kan användas för återfyllnad om materialet är lätt att återfylla med och har bra termiska egenskaper (sandigt/siltigt). Utgörs återfyllnadsmaterialet av en lerig jord måste jorden behandlas så att eventuella större klumpar sönderdelas för att inte luftfickor ska bildas. Jord som innehåller sten bör undvikas.

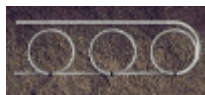
Flytande återfyllnadsmaterial har i en del fall använts, som förenklat återfyllningsarbetet och givit bättre resultat (mindre risk för luftfickor) (www.alliantgeo.com och www.igshpa.ok-state.edu, 2000). Det flytande återfyllnadsmaterialet har bestått av en blandning av cement, vatten, sand och flygaska. Huruvida flygaska kan användas beror dock på dess kemiska sammansättning och risk för negativ miljöpåverkan. I andra fall sker återfyllning med en blandning av enbart sand och vatten. Det flytande återfyllnadsmaterialet hålls i diket upp till ca 15 cm över Slinky varefter diket fylls upp med det ursprungliga dikesmaterialet (IGSHPA, 1994). Flytande återfyllnadsmaterial har främst används där den naturliga jorden inte innehåller tillräckligt med finmaterial, för god värmeväxling, eller om jorden består av lera. Vid Oklahoma State University och South Dakota State University pågår forskning kring bättre återfyllnadsmaterial. En blandning av ungefär 5 % cement, 15 % vatten, 25 % flygaska och 55 % murbrukssand är vanlig (www.igshpa.okstate.edu, 2000).

6.5 Kommentarer om prestanda och kostnader

Erfarenheter från Nordamerika har visat att prestanda är desamma för vertikal och horisontell installation av Slinky i diken men att omsorgsfull återfyllnad har stor betydelse. Horisontell installation, med spiralen lagd platt på marken, är lättare att återfylla.



Kompakterad Slinky med 25,4 cm mellan öglorna motsvarar 3,7 m slang/0,3 m dike, vilket minskar dikeslängden med ca 2/3-delar jämfört med om två horisontella slangar skulle läggas på 1,2 och 1,8 m djup (www.alliantgeo.com, 2000).



Utdragen Slinky med 1,42 m mellan öglorna ger 1,2 m slang/0,3 m dike, vilket minskar dikeslängden med ca 1/3-del jämfört enligt ovan (www.alliantgeo.com, 2000).

Geo Thermal Information Office rekommenderar att max ca 250 m slang används per Slinky (dvs. per dike).

Baserat på kanadensiska experiment är kostnaden för slang och installation drygt hälften av kostnaden för traditionell horisontell installation med raka slingor samt för vertikala U-rör i jord. Den totala kostnaden för systemet reduceras med 25 % mot traditionella system (Svec, 1993).

I insamlad litteratur har det inte funnits några uppgifter på hur Slinky-system fungerar under sommarhalvåret med hänsyn till behovet av återladdning och vad som sker i marken med avseende på värmeöverföring, uttorkning etc. Det finns å andra sidan inga uppgifter som pekar på att det skulle vara ett större problem jämfört med konventionella system. Inga uppgifter har heller hittats om frysning runt Slinky. I de kanadensiska försöken (Svec, 1993) var systemen i drift från december till april vid minusgrader och inkommande värmebärarvätska (vatten och metanol²) hade temperaturer ned till -7°C . Trots den låga temperaturen minskade värmefaktorn (bara) med mindre än 10 %.

Önskvärd utveckling

Slinky har inte testats i Sverige men systemet används i Nordamerika, delar av Europa (England, Frankrike, Tyskland och Italien) samt i Asien, Indien, Malaysia och Japan. Stora delar av Nordamerika (främst Kanada) har liknande förhållanden vad gäller klimat och geologi som i Sverige vilket talar för att Slinky även lämpar sig för svenska förhållanden. Det är möjligt att vissa modifieringar av metoden krävs för anpassning till svenska förhållanden. 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. Slinky borde tilltala marknaden både för små enfamiljshus som för större kommersiella byggnader (affärscentra, industrier, sjukhus etc.). Effekterna av frysning och återladdning med Slinky är områden som först bör klarläggas.

² Metanol rekommenderas ej på grund av hög toxicitet.

7. INSTALLATION VERTIKALA MARKVÄRMEVÄXLARE

I följande avsnitt redogörs för metoder att installera markvärmewäxlare vertikalt genom;

- håltagning och nedföring av slangar i jord,
- borrhning i berg och jord,
- energipålar bestående av värmewäxlarrör ingjutna i betongpålar.

De metoder och maskiner som presenteras i kapitlet kan användas för såväl enskilda villor som för större markvärmearläggningar. Med hänsyn till maskinernas vertikala lans för håltagning/borrhning/installation måste man dock vara uppmärksam på närheten till träd och luftledningar. En del av de presenterade metoderna för installation i jord har endast provats på försök med varierat resultat.

Metodernas användbarhet beror av rådande jord- och bergförhållanden. Det är därför viktigt att bestämma jord- och bergförhållandena, främst jordart och mäktighet, grundvattenytans läge och djupet till berg, så detaljerat som möjligt (se kapitel 3). För att en viss metod ska väljas måste den dessutom vara kostnadseffektiv.

En energibrunn för en villa ska placeras minst 4 m från huset och minst 10 m från tomtgränsen. Detta för att inte riskera att energiuttaget påverkar befintliga eller framtida energibrunnar på grannfastigheten. Avståndet mellan två energibrunnar bör vara minst 20 m från varandra (Rozenberg, 2000). Jämför GSHPM som anger 3 à 7,5 m (www.dep.state.pa.us, 2001).

7.1 Håltagning och nedföring av slangar i jord

Val av metod för vertikal installation av slang beror främst av jordlagerförhållandena. I lös lera kan slangen tryckas ned direkt medan installation i friktionsjord förutsätter förborrade hål eller neddrivning med tung utrustning, eventuellt i kombination med spolning och vibrering. Nedan ges exempel på fyra principiellt olika sätt att installera slang vertikalt i jord;

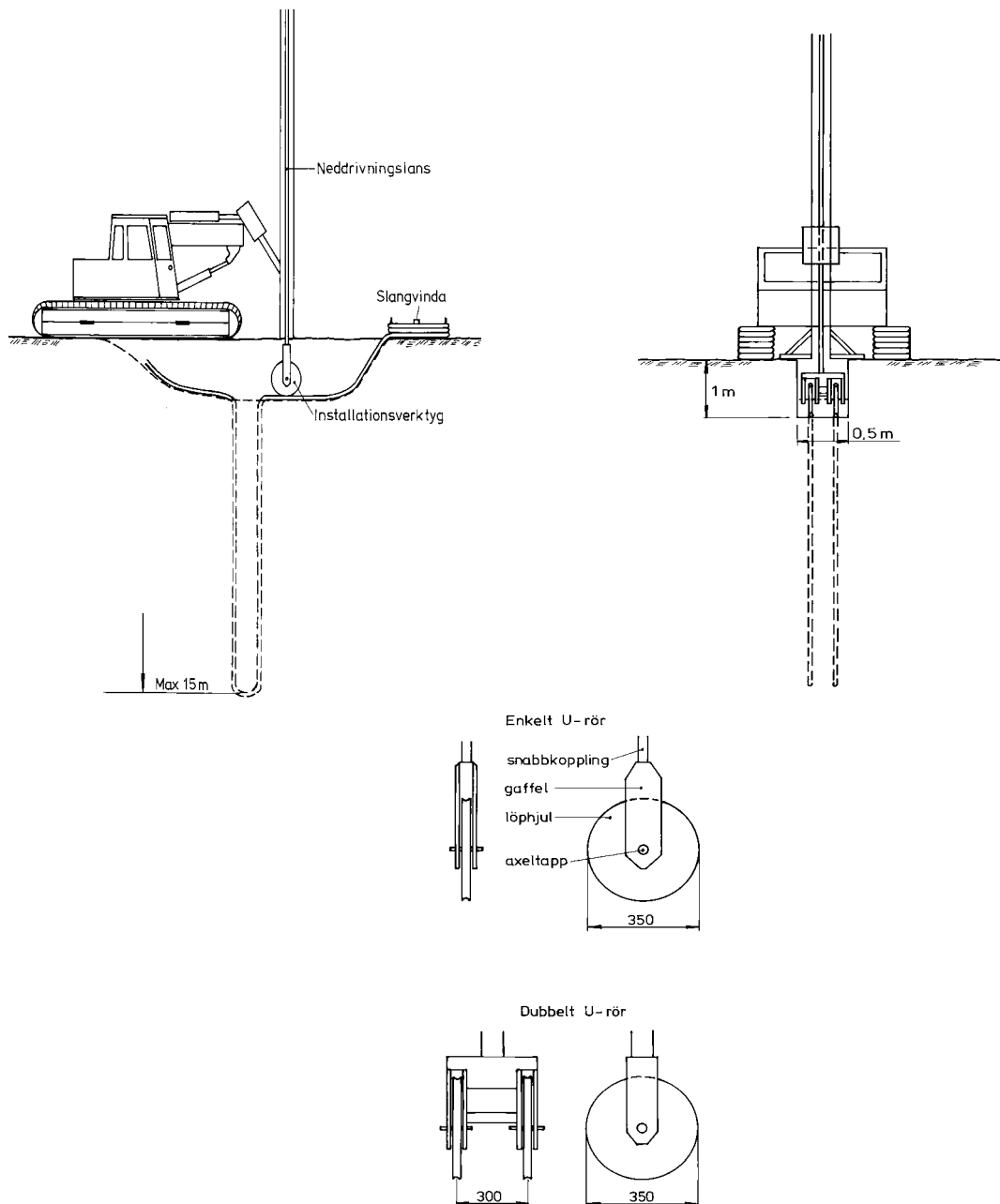
- a) direkt nedpressning av slangen,
- b) slangen installerad med samtidigt vattenspolning och vibrering,
- c) installation med slang i foderrör under neddrivningen,
- d) borrhning/håltagning följt av slanginstallation i öppet hål.

a) Direkt nedpressning av slangen

I lös lera har en metod utvecklats som innebär att slangen ”sys” ned kontinuerligt i långa slangsektioner genom jordlagren (Lehtmetts, 1993). Kopplingar blir nödvändiga endast mellan var tredje upp till var tionde markvärmewäxlare (U-rör), beroende på installationsdjup och för anslutning till huvudledningar.

För neddrivningen används en lämplig installationsmaskin utrustad med vertikal neddrivningsanordning. På neddrivningsanordningen monteras ett verktyg som enkelt uttryckt består av ett hjul fastsatt på en gaffel. Längs hjulets omkrets finns en infälld skåra som håller slangen på plats under nedpressningen. Verktyg finns med ett eller två parallella hjul för installation av enkla respektive dubbla U-rör, se [figur 7.1](#). De installationer som utförts har gjorts med slang PEX, diameter 20x2,0 mm respektive 25x2,3 mm (siffran 2,0 respektive 2,3 avser godstjockleken).

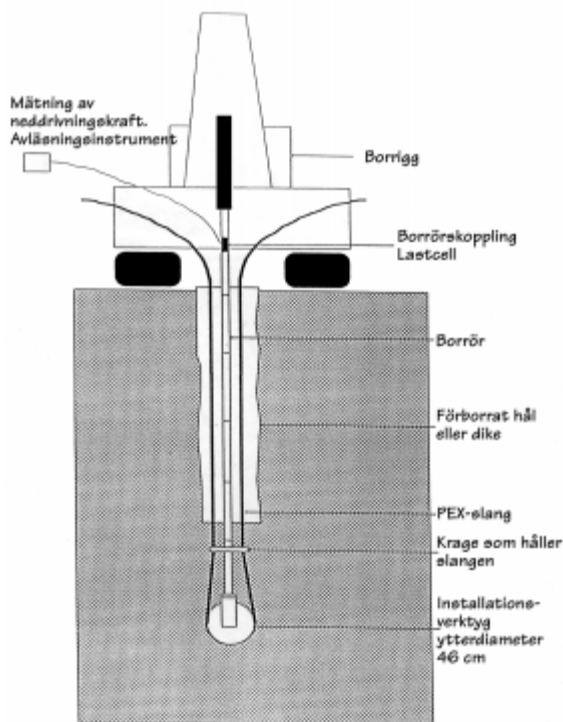
Slangen har installerats med en geoteknisk sonderingsmaskin och med en kalkpelarmaskin. Båda maskinerna fungerar så att de trycker ned verktyg och slang hydrauliskt. Inledningsvis grävs en slits genom den övre betydligt fastare torrskorpan. Därefter installeras slangen utgåendes från botten av slitsen. Med den geotekniska sonderingsmaskinen installeras enkla U-rör, till installationsdjupet 10 m, på knappt 15 minuter inkl förflyttning av maskinen. Kalkpelarmaskinen medger installation av dubbla U-rör ned till 15 m djup. Varje dubbelt U-rör tar maximalt 10 minuter att installera inkl förflyttning. 500 m slang installeras på mindre än en timme. Installationen kan utföras med maximal lutning 10° mot lodlinjen med båda maskinerna. Installationsmetoden har t.ex. användts vid byggandet av försöksfältet för högttemperaturlagring i lera, i Linköping (Gabrielsson et al, 1997).



Figur 7.1. Installation av plastslang i lera med hjälp av kalkpelarmaskin. Verktåg för enkelt och dubbelt U-rör (Lehtmetts, 1993).

Metoden har modifierats för att möjliggöra installation i fastare typ av lera (varvig), av Breger med flera (1994). I samband med förprojektering av värmelager för en solvärmeanläggning utfördes installationsförsök i en varvig lera. Installationsverktyget utgjordes av ett fritt roterande hjul, diameter 0,46 m, med infällning för slangen längs hjulets omkrets, se figur 7.2. Neddrivningslansens nedre del var formad spetsig för att underlätta neddrivningen. En maskin och borrhög, med erforderlig vikt, hydraulisk tryckförmåga och med god framkomlighet i terräng användes vid försöken.

Det konstaterades att friktionen mot slangen under neddrivningen var förhöjd. Friktion mot omgivande jord och dragpåkänningar på slangen kunde avsevärt reduceras genom att använda en slags fixring för slangen, se figur 7.2. Fixringen, som monterades någon meter över själva installationshjulet, håller in slangen närmare lansens under nedpressningen. Nedpressning av ett enkelt U-rör till ca 21 m djup tog 15 minuter, exkl tid att skarva borrhjäl. Den totala tiden att installera ett enkelt U-rör uppskattades till ungefär en timme. Med effektivare installationsfordon försedd med längre neddrivningslans, bedömdes att man skulle kunna reducera installationstiden betydligt. Den använda installationsmetoden och utrustningen kunde inte penetrera ett siltskikt på drygt 21 m djup.



Figur 7.2. Principskiss, installation av U-rör i lera (Breger et al, 1994).

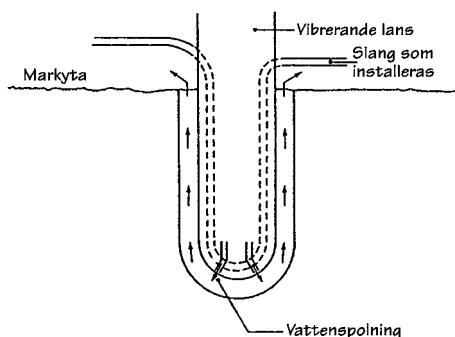
Gemensamt för denna utrustning och den som testats i Linköping är att den övre fastare torrskorpan måste penetreras med annan anordning, t.ex. genom grävning av slits eller håltagning med någon typ av sonderingsverktyg.

Installation med gott resultat har också utförts genom att pressa ned en I-balk med påkran tillsammans med en specialtillverkad spets (Wilén et al, 1988). Dessa försök utfördes i lera. Spetsen med slang hölls fast mot balkens spets. Under neddrivningen löpte slangen längs bal-

ken, innanför och skyddad av balkens flänsar. Efter nedpressningen till cirka 10 meters djup drogs balken upp och slang (och spets) lämnades kvar i marken. Skänkelavståndet motsvarade avståndet mellan flänsaren, knappt 0,3 m. Slangen utsattes för viss töjning under neddrivningen, dock utan att skador uppstod.

b) Slang installerad med samtidig vattenspolning och vibrering

I grövre jordar än lera kan inte de förhållandevis enkla metoderna beskrivna i a) användas. I Groningen i Holland anlades ett värmelager med vertikala U-rör i friktionsjord, huvudsakligen sandig jord (Wijsman & den Ouden, 1983). Neddrivningen av U-rören möjliggjordes genom en kombination av vertikalt tryck, vattenspolning och vibrering. Neddrivningen ned till 20 m djup utfördes med pålmaskin med en ombyggd I-balk som neddrivningslans. Den ombyggda lansens har spår där slangen löper och en skyddssko, som skyddar slangen vid neddrivningen, se [figur 7.3](#). Skyddsskon följer med lansen tillbaka till markytan vid upptagningen och slangen lämnas kvar i marken. U-rören bestod av polybuten med ytterdiameter 20 mm.



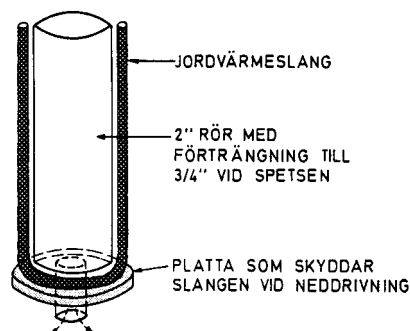
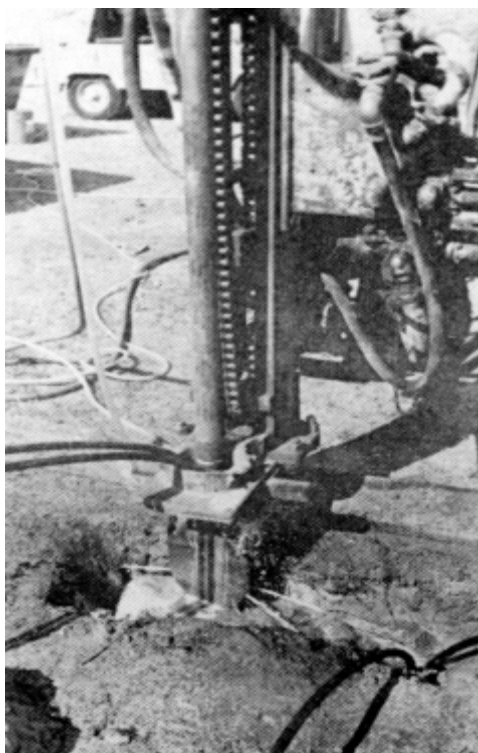
Figur 7.3. Neddrivningslans använd i Groningen, Holland (Wijsman & den Ouden, 1983).

Spolningen vid spetsen skedde via fyra spolrör som löpte utmed neddrivningslansen. Spolflödet var 8-15 l/s. Nedpressning av ett enkelt U-rör till 20 m djup utfördes på 3-6 minuter och med åtgång av 3 000 l vatten. Vibrering åstadkoms med hjälp av en stor motorvibrator monterad direkt på neddrivningslansen.

Neddrivningsförsök i friktionsjord enligt samma principer har också utförts i Sverige (Rhén & Wilén, 1984). På försöksområdet bestod marken av sand med inslag av silt. Installationen utfördes med en bergborrigg försedd med topphammare och med två olika spetsar. I försöken användes bergborrighgen enbart för neddrivning med kedjematarn. Den ena spetsen liknade de installationsverktyg som används vid neddrivning i lera men kompletterad med kanaler för vattenspolning. Den andra spetsen utgjordes av en platta, som samtidigt skyddar slangen, i änden av neddrivningsröret, se [figur 7.4](#). Vissa problem erhöles med den första spetsen genom att material samlades ovanpå spetsen och försvårade upptagningen.

På 3 m djup påträffades ett fastare skikt som inte kunde penetreras med den använda utrustningen. Huvudanledningen till att försöken inte kunde göras djupare var att den använda borrhiggen och vibratoren var för små. En större bergborrigg, som kan påföra en vertikal belastning av 10-15 ton, eller en pålkran, bedömdes som nödvändig för rationell neddrivning till 10-30 m djup.

Spolningen skedde inuti borrhstålet med ca 3 l/s. Tryckförlusten från markytan ned till spetsen uppskattades till 60 %. Spolvattnet kunde inte tränga in i fastare jordlager.



Figur 7.4. Två typer av spetsar som användes vid installationsförsök i friktionsjord (Rhen & Wilén, 1984).

c) Installation med slang inuti foderrör under neddrivningen

I Söderköping finns ett värmelager i lera bestående av 382 st dubbla U-rör (Magnusson et al, 1992). Neddrivningen av U-rör utfördes med en pålkran och ett specialtillverkat foderrör, figur 7.5. Foderrörets tvärsnitt hade formen av ett kryss. Längst ut på krysset löpte fyra skyddsror längs hela foderrörets längd. I dessa skyddsror monterades två U-formade slangar, som därmed skyddades under neddrivningen.

Före neddrivningen skarvades två 20 meters längder av slangen ihop på fabrik till ett U-rör. Två sådana U-rör (dubbelt U-rör) fördes in i foderröret nedifrån och najades fast mot en skyddsplåt av plattjärn i botten. Därefter pressades foderröret ned i leran till 18 m djup, de första 6-10 metrarna enbart av dess egenvikt och därefter med tioalet slag med hejaren. Bottenplattan trycktes bort med tryckluft så att lera kunde tränga in och fixera U-rören i botten. Foderröret drogs därefter upp medan U-rören stannade kvar i marken. Skänkelavståndet, d.v.s. avståndet mellan U-rörets två vertikala parter, var 0,5 m från början minskade till 0,4 m efter installationen. I Söderköping användes slang av polyeten, PEM, 25 mm i ytterdiameter. De installerade U-rören svetsades ihop i markytan. Installationskapaciteten var i genomsnitt 25 dubbla U-rör per dag.



Figur 7.5. Installation av dubbla U-rör för värmelagret i Söderköping (Magnusson et al, 1992).

I Lindälvsskolan i Kungsbacka anlades ett värmelager i lera med en pålkran och en ihålig påle med rektangulärt tvärsnitt som foderrör (Gräslund, 1986 och Wilén & Rhén, 1986). Samma metod användes vid byggandet av ett värmelager i lera för ett bostadshus i Kullavik (Olsson, 1986 och Wilén & Rhén, 1986).

Först pressades den ihåliga pålen ned till önskat installationsdjup, som för Lindälvsskolan var 35 m. En platta tätade i botten på pålen under neddrivningen. Därefter fördes ett förtillverkat enkelt U-rör ned i pålen med hjälp av ett lod. Slangen vattenfylldes varefter bottenplattan sköts ut med tryckluft så att lera kunde tränga in och låsa fast U-röret i bottenläget. Pålen drogs upp och lodet följde med samtidigt som U-rörets skänklar hölls isär. Avståndet mellan skänklarna blev 0,1-0,2 m. Installationskapaciteten var i genomsnitt 15-20 nedstick per dag (en pålkran med kranförare och två man).

d) Borrning/håltagning och därefter slanginstallation

Metoden förutsätter att hålet står öppet den tid det tar att installera slangen och detta är knappast realistiskt för svenska förhållanden.

I USA tillämpas t.ex. rotationsborrning med samtidig renspolning av borrhålet med mudd, som beroende på jordförhållandena kan medge att borrhålet står öppet tiden det tar att installera slangen, se vidare avsnitt 7.2.2. Förutom att hålet måste stå öppet den tid det tar att installera slangen så får det inte kollapsa när slangen förs ned.

7.2 Borrhål i berg och jord

7.2.1 Borrning och rördrivning genom jordlager

De vanligt förekommande metoderna för bergborrning kan också användas i de flesta jordar. För svenska förhållanden kan man emellertid behöva tillgripa någon metod att stabilisera borrhålsväggen. Två metoder kommer att behandlas i detta avsnitt;

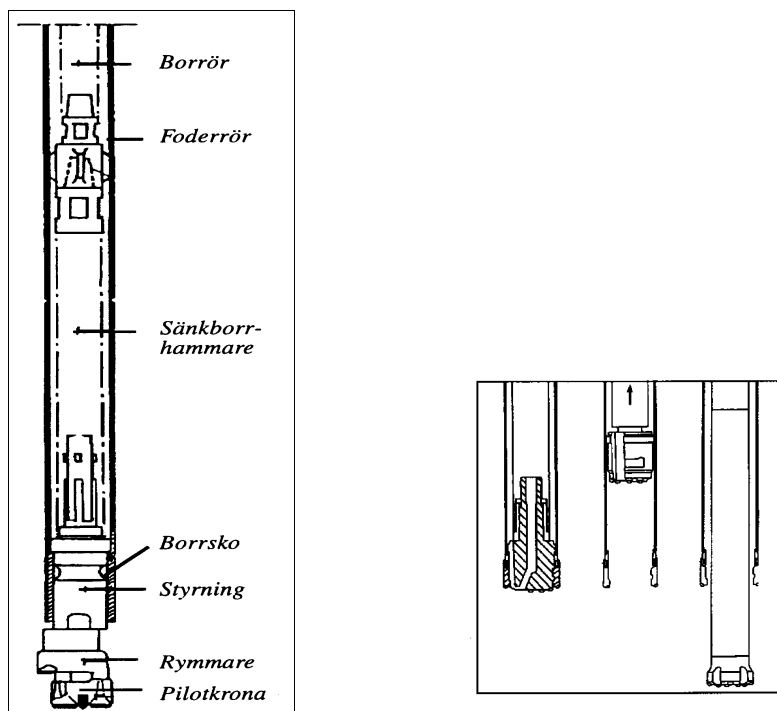
1. foderrörborrning,
2. skruvborrning/augerborrning.

Foderrörborrning

I Sverige utförs borring i jord med foderrör som förhindrar att borrhålet rasar in, enligt metoderna Odex (www.geologicinc.com), Tubex (www.aquiferdrilling.com) eller No-X. Jordborring genom de övre jordlagren utförs alltid med hjälp av dessa metoder vid anläggande av energibrunn. Ex-ändelsen innebär att borringen sker med excenterborrkrona, som består av en pilotkrona och rymmare samt styrdel. Vid rördrivning med Odex och Tubex svänger borkronans rymmare ut och borrar ett hål som är något större än foderrörets diameter. Foderröret följer med, genom tryck eller slag, under neddrivningen, utan att rotera. När installationsdjupet för foderröret nås fälls rymmaren in och borringen fortsätter i berget men med en mindre krondimension. Vid No-X används en ringborrkrona i spetsen på foderröret, med samma omkrets som röret. Ringborrkronan lämnas kvar i marken, medan styrningsrör och pilotkrona dras upp, se [figur 7.6](#).

Under borringen sker spolning med luft eller skum. Spolmediet tillförs borrhålet via utloppskanaler i såväl pilotkrona som rymmare och kaxet borttransporteras mellan borrhör och foderrör (Andersson, 1981).

Foderrören är av stål och kommer vanligtvis i längder om 3 och 6 m. Dessa svetsas samman i samband med borringen, t.ex. med elektrosvets. Foderrör i plast används ännu så länge i liten skala. Plaströren skarvas genom att trycka ihop dessa med en relativt ny patenterad metod (Avanti, 1996). Foderrören av plast medger rördrivning enligt Odex/Tubex-metoden. I Normbrunn 97, rekommendationer för anläggande av energibrunn, anges rekommenderade dimensioner för stålfoderrör. Dessa är ytterdiameter 139,7, 168,3 och 193,7 mm med en godstjocklek på mellan 5-6 mm, varav 5 mm är absolut minimum. Stålkvalitet och toleranser förutsätts enligt DIN 1626 eller motsvarande.



Figur 7.6 Rördrivning med Odex/Tubex och No-x (efter Avanti, Brunnsborrarhandbok 1996).

Skrubborrning/augerborrning

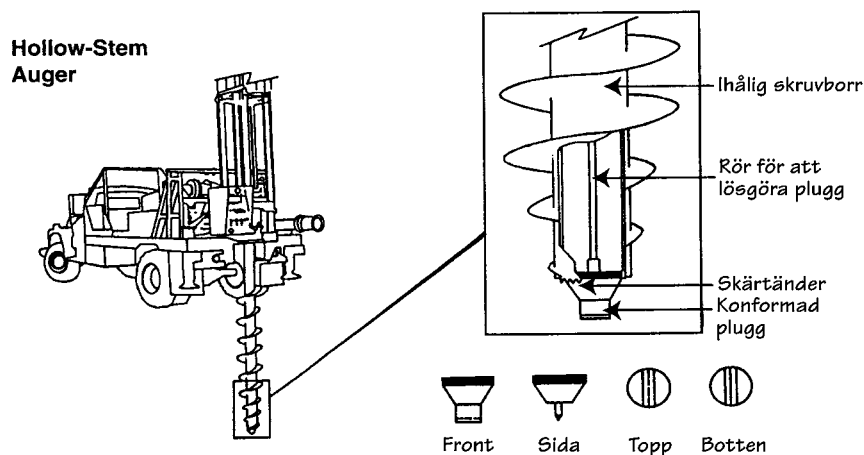
Skrubborrning kan tillämpas i jord men vid borring i sten- och blockrika jordar, liksom under grundvattenytan i vattenförande lösa sediment kan problem uppstå. Samma typ av borrar kan i princip användas vid skrubborrning som vid rotationsborrning (borring med borrkrona). Skrubborrning görs normalt med en skrubborr med diameter 25-90 mm och inte djupare än 10-15 meter (Andersson, 1981).

Skrubborrning i större skala, med tyngre maskiner benämns augerborrning. Augerborrning kan användas i de flesta geologiska formationer av sedimentärt ursprung. Metodens användbarhet i sten- och blockrika jordar är starkt begränsad. Problem kan också uppstå vid borring under grundvattenytan. Den kontinuerliga uppmatningen fungerar inte vid borring genom flytbenägna eller lösa grövre vattenförande sediment. Borrhålet riskerar också att kollapsa när borren dras upp på grund av att borrhållsväggen inte är stabiliserad.

Den cylinder som skjuvas av när augerborren dras upp är vanligen från diameter 2" och uppåt. Utrustningar för augerborrning måste ha stor lyftkapacitet och stort vridmoment, medan rotationshastigheten skall vara liten.

I bl.a. USA utförs skrubborrning/augerborrning med ett ihåligt skrubborr (hollow stem auger), försett med skärtänder runt röränden och en löstagbar tillfällig spets, se [figur 7.7](#) (OSU, 1997). Vid neddrivning av skrubborren lägger sig jorden på borrens flänsar. Huvuddelen av materialet transporteras upp till ytan medan en mindre del trycks in i borrhållsväggen. När skrubborren nått installationsdjupet frigörs bottenpetsen, slangen installeras inuti det ihåliga borrhålet och skrubborren dras, eller skruvas, därefter upp. Metoden kan användas i ett begränsat antal jordar, främst friktionsjord, och inte i lera eller jord med viss vidhäftande för-

måga och inte i berg. Metoden är långsammare än rotationsborrning, med luft eller mudd, i fuktiga jordar (OSU, 1997).



Figur 7.7 Utrustning för skruvborrning/augerborrning enligt s.k. Hollow-Stem Auger (OSU, 1997).

7.2.2 Borrning i berg

Idag är det vanligast att installera en U-formad slang i en borrad brunn för uttag av bergvärme. Den borrningsteknik som då är aktuell är främst:

- sänkhammarborrning,
- topphammarborrning och
- rotationsborrning med direktspolning.

Vid hammarborrning sker upptagning av borrhålet genom att en topphammare eller sänkhammare alstrar stötvågor med hög frekvens. Frekvensen är normalt mellan 1000-2000 slag per minut. Vid topphammarborrning fortlplantas stötvågorna via borrhörens ned till borrhörens krona. Vid sänkhammarborrning alstras tryckvågorna omedelbart i anslutning till borrhörens krona. Borrhörens roterar en viss vinkel efter varje stötvåg, med rotationshastighet mellan 20-40 varv per minut, och bearbetar därmed en ny yta i botten på borrhålet.

Borrningen utförs med borrhörens krona, i regel försedd med stift eller skärande egg i hårdmetall. Hårdmetallen består av en sintrad blandning av volframkarbid och kobolt. Volframkarbid ger metallen dess hårdhet och slitstyrka, medan kobolt ger den seghet (Sandvik Rock Tools, Handbok i bergborrning, 1989). Standardborrhörens kronor för energiborrning finns i dimensionerna 115, 140 och 165 mm, varav diametern 115 mm är vanligast. Borrhörens kronans stift nöts och kräver återkommande slipning för att inte borrhörens slitage skall bli för långsam.

Vid hammarborrning används både tryckluftsdrivna och hydrauldrivna borrhörens kronor. De äldre tryckluftsdrivna borrhörens kronorna har lägre verkningsgrad än de hydrauldrivna, vilket bland annat medför högre driftskostnader. Hydrauldrivna borrhörens kronor är bättre anpassade för stora borrhörens djup och grövre borrhörens dimensioner. Nackdelen med hydrauldrivna borrhörens kronor är främst att de är dyra i inköp och underhåll. Den sammanlagda erforderliga mängden luft (5-35 m³/min) samt arbetstrycket (0,5-2 MPa) styr valet av kompressor.

All borring förutsätter att nedkrossat berg (borrkax) transporteras ut ur borrhålet under borringen. Detta kan t.ex. göras genom spolning med luft, vatten eller skum. Spolmedlet tillförs kronfronten genom ett spolrör i centrum av borrhålet och sen ut genom spolkåp i borrhålkronan. Borrkax blandat med spolmedium transporteras upp till markytan mellan borrhålssträngen och borrhålsväggen. Vattenspolning används vid borring och uppsamling av fuktigt borrkax. Fördelen med vattenspolning är att den effektivt binder det damm, som uppstår vid borringen. Vid luftspolning samlas dammet upp med en typ av dammsugare. Skum tjänar både som medium för borttransport av borrkax samtidigt som det har en tätande och smörjande effekt på borrhålsväggen. Skum används främst vid borring i jord och löst berg. Spolblandningens hastighet regleras genom att variera spoltrycket. Lämplig hastighet beror förutom på typ av spolmedel också på bergets densitet. Används luft är en minsta hastighet av ca 15-20 m/s nödvändig. Stabilisering med mudd kan endast användas vid topphammarborring (Andersson, 1981).

Under tiden borringen pågår är det möjligt att provta borrkax och vatten samt kontinuerligt utföra mätningar (MWD = measurements while drilling). Beroende på borrhålsmetod är det möjligt att mäta hydraulisk trycknivå, förlust av borrhålsvätska, vattenkapacitet, nedsjunkningshastighet, matningstryck, moment, rotationshastighet, lufttryck och vätsketryck (Andersson & Andersson, 2000). I urberg skall alltid provtagning av kloridhalt eller konduktivitet utföras under borringen, enligt Normbrunn 97. Om höga kloridhalter påträffas kan det medföra saltvattenpåverkan på närliggande vattenbrunnar. På brunnsprotokollet skall noteras eventuell förhöjd kloridhalt (>100 mg/l) och nivå för saltvattnets inträngande.

Sänkhammarborring har normalt högre kapacitet med anledning av den högre energiförlusten som uppstår vid topphammarborring. En del av slagenergin går förlorad under transporten via borrhölen.

Sänkhammarborring med luftdriven hammare

Flertalet energibrunnar i Sverige utförs med s.k. sänkhammarborring, med luftdriven hammare. Vid sänkhammarborring sitter slagverket nederst på borrhålssträngen i botten av borrhålet, vid borrhålskronan (Wilén & Rhén, 1986). Slagverket slår då direkt på borrhålskronan. Rotationsenheten är placerad på borrhålssträngens övre ände (Schunnesson, 1985). Samtidigt som borrhålskronan roterar påverkas den att slå med omkring 1000 slag per minut (Avanti, 1996). Bergmaterialet närmast borrhålskronans stift krossas därmed till ett fint pulver. Kontakt mellan krona och botten upprätthålls genom ett kontinuerligt matningstryck på borrhålskronan. Matningstrycket hålls normalt mellan 500-1000 kg/cm² (Andersson, 1981). Uppspräckningen av berget går lättare vid hög belastning, med en borrhålskrona i god kondition och vassa stift.

Slagverket drivs med tryckluft som leds ner till hammaren genom borrhölen. Returluften går ut genom borrhålskronan med högt tryck som spillluft och tar med sig nedkrossat berg och vatten upp till markytan. Det lufttryck som normalt används vid borring i hårt kristallint berg är ca 2 MPa vilket motsvarar 200 meter vattenpelare. Följdaktligen har sänkhammarborring med luftdriven hammare sin begränsning i berg med högt vatteninnehåll, då det kan uppstå problem med att rensola borrhålet. I sprickigt berg med högt vatteninnehåll kan i regel borrhålet inte göras djupare än 150 meter, med den kompressorstorleken (Nordell et al, 1998).

Vid sänkhammarborring minskar inte borrhålsjunkningen med djupet i samma omfattning som vid topphammarborring och hålavvikelsen blir normalt mindre. Styrningen av borrhålet un-

derlättas av att tyngdpunkten ligger nära hålbotten. Nackdelar är relativt låg initialborrsjunkning och hög energikonsumtion (Wilén & Rhén, 1986).

Hydraulisk sänkhammarborrning

Hydraulisk sänkhammarborrning innebär att hammaren drivs med vatten under stort tryck. Hydraulisk sänkhammarborrning är en relativt ny metod under utveckling (Tuomas, 2000).

Det är känt att konventionell luftdriven sänkhammarborrning fungerar mindre bra i berg med stort vatteninnehåll. Problem uppstår framförallt med att renskola borrhålet under borringen. Därför har en sänkhammare utvecklats som drivs med vatten som bormedium istället för luft, se **figur 7.8**. Det finns också mudd-drivna sänkhammare på marknaden.



Figur 7.8. Vattendriven ITH-hammare Wassara™ W200 (G-Drill AB, 2000. www.wassara.com).

Skillnaden mot luftdriven borring är främst att luftkompressorn bytts ut mot en högtryckspump för vattentillförsel. Vattendrift förutsätter god tillgång till vatten, t.ex. från något närliggande vattendrag. För närvarande utvecklas tekniken för att lösa problemet med begränsad tillgång till färskvatten/sötvatten och för att finna effektiva system för omhändertagande av partikelförorenat returvatten och behandla detta för en återcirkulation i borrhålet.

Om flera borrhål är planerade kan det, om vattentillgången är god, vara möjligt att ta vatten från det första hålet för borring av de övriga hålen. Det finns också lösningar som innebär att man återanvänder vattnet sedan det passerat en reningsanläggning. I samband med reningen reduceras mängden partiklar i borrhåtskan. Ett lovande system består av en sedimentationstank kombinerat med en vattencentrifug med vilken man kan reducera partikelmängden till mindre än 0,1 % viktandel (Tuomas, 2000).

Försök utförda i LKAB:s gruva i Malmberget och för energiborrning för kylning av telefonväxlar visar på följande fördelar jämfört med konventionell sänkhammarborrning (Nordell et al, 1998):

- Borrdjupet är i princip obegränsat och oberoende av vattenförhållandena i berget.
- Förbättrad arbetsmiljö, inget damm produceras och ingen olja för smörjning av borkronan.
- Nedsjunkningshastigheten är mer än två gånger högre.

- Energikonsumtionen reduceras till en tredjedel.
- Hålens rakhet förbättras.

Några nackdelar är att borrarbortmetoden kräver mycket vatten, mellan 200-300 l/min. Vattnet måste vara fritt från partiklar större än 50 mikromillimeter och koncentrationen mindre än 50 mg/l. Den stötvåg som uppstår under borrarbortningen resulterar i stor lastpåkänning på rotationsenhet och borrarör. Hammarkostnaden är hög, 40 kr/m borrarbortning jämfört med 6 kr/m för konventionell lufthammare (Nordel et al, 1998).

Toppshammarsbortning

Vid toppshammarsbortning sitter slagverket ovan mark. Både rotationsenhet och slagverk är alltså samlade på markytan. Slagenergin överförs via borrarstänger till borrarbortkronan i botten på hålet. Jämfört med sänkshammarsbortning sker en viss energiförlust från tillslaget i toppen ned till borrarbortkronan. Hastigheten på borrarbortjunkningen minskar också med ökande djup av samma anledning. Grundvattentillströmningen till borrarborthållet under borrarbortningen har betydelse för borrarbortjunkningen. Ju mer vatten som tillströmmar ju större del av arbetstrycket går åt till att lyfta vattnet ur hålet med följden att borrarbortjunkningen minskar (Andersson, 1981).

Borrarbortning med toppshammare är en relativt snabb metod, 30-40 m borrarbortas normalt på 4-5 timmar. Metoden har dock sin begränsning i mycket hårt berg. Ibland går det inte att borrarbort djupare än 70-80 m djup (Avanti, 1996). Borrarbortning med tillslag på borrarstänger innebär i regel större svårigheter att borrarbort rakt. En annan nackdel är att tekniken att slå med toppshammare ger en sämre arbetsmiljö än när hammaren är placerad nere i borrarborthållet.

Rotationsbortning med direktspolning

Rotationsbortning med direktspolning (roterande krossande borrarbortning) är speciellt utvecklad för borrarbortning i sedimentärt berg men fungerar även i lösa jordlager (Wilén & Rhén, 1986). Borrarbortning i block- och stenrika jordar, t.ex. åsmaterial, kan emellertid medföra problem och vara direkt olämplig. Direktspolning innebär att spolvätskan förs ned i borrarborthållet direkt genom borrarbortröret och ut genom spolkanaler i borrarbortkronan. På tillbakavägen, mellan borrarbortrör och borrarborthållsvägg, tar spolvätskan med sig nedkrossat material vid borrarbortkronan upp till markytan. Borrarbortkax borttransporteras kontinuerligt från hålbotten.

Under borrarbortningen roterar borrarbortkronan samtidigt som den trycks mot berget med stor kraft. Vid medelhårda och hårda formationer används rullkronor (figur 7.9) och vid lösare formationer skärkronor (Wilén & Rhén, 1986). I lösa formationer, såsom jord och sedimentärt berg, kan borrarbortning ske utan foderrör genom att använda mudd (spolvätska/borrarborthållsvätska). Vid denna typ av borrarbortning begränsas minsta håldimension av hållfastheten hos rullarnas lager. I lösa formationer kan krondimensioner ned till 3,5" användas (Wilén & Rhén, 1986). I hårt berg varierar dimensionen från 6" upp till 20-30". De i Sverige vanligt förekommande håldimensionerna 4½", 5½" och 6½" gör denna metod mindre attraktiv för borrarbortning av energibrunnar i hårt berg (Schunnesson, 1985).



Figur 7.9. Exempel på en rullborrkrona (här upp och ner) (Sandvik Rock Tools AB, 2000, www.sandvik.com).

Som spolmedel används vätska (vanligen vatten), luft, skum (ofta tvållösning), eller mudd. Genom att tillsätta olika kemikalier till vatten erhålls spolvätska benämnd mudd. Spolvätskan återcirkuleras, efter borttagande av borrhax, med hjälp av högtryckspump.

Om rent vatten används som spolvätska är lämplig hastighet mellan 40-60 meter per minut för att spolvätskan skall kunna lyfta borrhaxet upp till markytan. Nackdelen med att använda enbart luft uppstår ibland vid borrning genom vattenhållande jordlager, som har en tendens att flyta ut och bilda pluggar. Borrning med luft/skum är lämpligt genom sprickrikt sedimentärt berg där man kan förvänta sig problem med spolförluster (Andersson, 1981).

Spolvätskans funktion är att åstadkomma kylning och i viss mån smörjning av borrhkrona, borrhör och pump. Samtidigt skapas ett hydrauliskt övertryck i borrhålet som gör att hålet kan stå öppet även i okonsoliderade lösa formationer (Andersson, 1981).

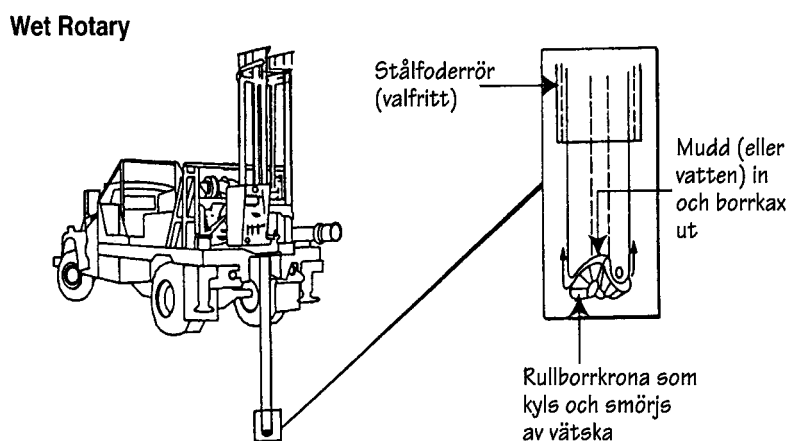
Geotec har låtit sammanställa förekommande mudd och även återfyllnadsmaterial på världsmarknaden, hur dessa tillämpas och huruvida de är livsmedelsgodkända enligt svensk lag (luktfri och, för människan, giftfri) (Åkesson, 1998). De olika typerna av mudd kan primärt delas in i fyra grupper: bentonit-, polymer- och saltbaserad mudd samt skum. Bentonit är en lera och består således av naturliga lermineral. Det finns flera bentoniter som är helt ofarliga att använda ur miljö- och livsmedelshänseende. De vanligaste polymererna i sammanhanget består av biologiskt nedbrytbara produkter av cellulosa eller stärkelse (polysackarid) och flera av dessa är livsmedelsgodkända. Saltbaserad mudd består ofta av en kaliumkloridmättad lösning. Den typen av lösning har goda borrningstekniska egenskaper och är, totalt sett, miljövänlig enligt Åkesson (1998). Skum består av en tvållösning som bildas under högt och turbulent lufttryck i borrhålet. Skummet har goda borrningstekniska egenskaper, borrsjunkning blir snabbare, spolförluster och slitage mindre samt att borrhax snabbt förs bort från hålbotten vilket ökar borrhkronans livslängd.

Vid borrning i grundvatten skall muddblandningen alltid vara vattenbaserad (Åkesson, 1998). Fördelen med att använda mudd jämfört med traditionell Odexborrning är att rördrivning undviks, slitaget på borrhörutrustningen i hålet minskar och materialtransporten förbättras (Åkesson, 1998).

Vid användandet av mudd erhålls en stabilisering av borrhålet (Andersson, 1981). Mudden tränger ut i sprickor och porer utmed borrhålets diameter. Om bentonit används gelar denna när rörelser upphör och bildar en muddkaka mot borrhålsväggen. Därmed förhindras att spolvätska försvinner via sprickförande lager. Om spolförlusterna är så stora att det hydrostatiska trycket i borrhålet sänks kraftigt kan det få till följd att borrhålet kollapsar. Nackdelen med att

en muddkaka bildas är att den kan begränsa tillströmning till energibrunnen. Mudd baserad på cellulosa eller stärkelse kan brytas ned genom tillsats av enzymer och kemikalier (Andersson, 1981).

I bl.a. USA tillämpas borrar metoden (mud/air rotary drilling), se figur 7.10. Vatten, luft eller mudd skickas ned med högt tryck i centrum av borraröret där det fungerar som smörjning och kylning av borrar kronan samt transporterar upp lösgjort material längs utsidan på borraröret. Upptransporterat material samlas runt hålet på markytan och kan läggas tillbaka i hålet efter slutförd borrning (OSU, 1997). Mudd med anpassad viskositet cirkulerar i borrarhålet och stabiliserar borrarhålväggen under borrarningen. Mudden hjälper också till att lyfta det lösgjorda materialet till markytan.



Figur 7.10. Utrustning för rotationsbörning s.k. Wet Rotary (OSU, 1997).

Internationell jämförelse

Viss anpassning av borrar metoder sker i olika länder med hänsyn till de geologiska förhållandena. I t.ex. Holland används i huvudsak följande metoder för installation av vertikala markvärmeväxlare: vibrering med/utan foderrör, pulsborrning, sprut- och spolborrning samt skruvbörning (Snijders et al, 1998). I USA är rotationsbörning med mudd/luft, skruvbörning/augerbörning och hammarbörning vanliga vid energibörning.

7.2.3 Slanginstallation i borrarhål

I Normbrunn 97 anges krav på slangmaterial och utformning av U-rör samt hur installation av slang i borrarhål skall ske. Se avsnitt 4.2 för beskrivning av materialkrav.

Normbrunn 97 omfattar således en installationsanvisning för slangen (kollektorslangen) till en energibrunn. Slangen skall inspekteras med avseende på eventuella transportskador och/eller provtryckas innan den förs ned i borrarhålet. Två parallella slangändar kopplas samman med en påsvetsad returböj, som förses med lagom tung bottenvikt så att slangen kan föras ned och vid behov tas upp ur borrarhålet. Svetsning av plaströrskopplingar skall utföras med godkänt material och svetsutrustning. Slangen måste också vara ren invändigt så att inte eventuella föroreningar orsakar en bakterietillväxt.

Före nedsättning av markvärmeväxlarens slang rekommenderas desinficering av borrarhålet. Desinficering innebär att någon deciliter klor tillsätts borrarhålet för att förhindra spridning av bakterier och mikroorganismer, som finns på marken ner i borrarhålet (Geotec, 2000).

Tätthetskontroll utförs alltid efter att slangen installerats i marken (borrhålet). Provtryckningen bör ske i samband med provkörning av anläggningen, enligt Normbrunn 97. Efter installation fylls slangen med värmebärarvätska och kopplas till värmepumpens förångardel (Lindborg, 1999). Mindre anläggningar kräver normalt kopplingar endast för anslutning till värmepumpen. I större anläggningar blir det oftast aktuellt med flera kopplingspunkter i marken, t.ex. genom att anlägga kopplingsbrunnar för anslutning av separata delslangor till huvudledningar. En uppdelning av stora slangsystem förenklar service och felsökning vid läckage.

Vidare anges i Normbrunn 97 att slangar i marken (jorden) skall isoleras med markbeständigt material genom husvägg och 0,5 m utanför husvägg. Slutligen skall energibrunnens läge anges med bricka på väl synlig plats, t.ex. på husgrund. Noggrannheten för lägesbestämningen skall vara $\pm 0,1$ m.

Energibrunnen förses med ett lock ovan markytan. Detta lock skall enligt Normbrunn 97 vara fast förankrat i foderröret för att förhindra att slangen skjuter upp vid eventuell isbildning på slangen. Det skall vara tättslutande mot inträngning av ytvatten och upptryckande artesiskt vatten, där detta förekommer.

Som en jämförelse anges t.ex. följande arbetsmoment i den amerikanska manualen *Ground Source Heat Pump Manual* (www.dep.state.pa.us, 2001):

1. Spola slangen ren invändigt från partiklar, efter installation i diket alternativet borrhålet.
2. Lufta slangen genom att cirkulera vatten tills dess att inga luftbubblor finns i systemet. Spolvattnets hastighet måste vara minst 0,6 m per sekund.
3. Tätthetskontrollera slangen genom att cirkulera vatten med motsvarande kommunalt vattentryck.
4. Fyll slangen med värmebärarvätska, vilket innebär att vattnet i slangen skall ersättas med värmebärarvätska.

Ett alternativt sätt att tätthetskontrollera PE-slang (pkt 3) är att fylla den med vatten och därefter lägga på ett lufttryck i två steg. PE-materialet är flexibel varför slangen omedelbart sväller vid fyllning och därefter långsamt komprimeras. Detta kan lätt feltolkas som ett läckage. Först används komprimerad luft med trycket 690 kPa i minst två timmar och samtidigt inspekteras slangen visuellt. Därefter utsätts slangen för samma tryck under 12 timmar. För att slangen ska klassas som tät skall tryckminskningen under den tiden vara högst 3 % (Caneta Research Inc., 2001).

7.2.4 Tätning och återfyllning av borrhål

I Sverige skall tätning alltid ske mellan foderrör och berg för att förhindra att föroreningar sprids till grundvattnet via borrhålet. I Normbrunn 97 rekommenderas tätning genom cementering. Foderröret skall drivas minst 2 m ned i berget och minst 6 meter från markytan. När foderröret nått avsedd nivå utförs tätningen. Foderröret lyfts något och borrhålets botten tas upp, varefter cementblandningen förs ned. Cementblandningen trycks framför foderröret, som samtidigt slås ned mot hålets botten och dikt an mot berget (Avanti, 1996). Därefter fortsätter borrhålets sedan cementblandningen brunnit färdigt. Tillverkarna anger bränningstider till mellan 1-12 timmar.

En ren bentonitblandning med 25-30 % bentonithalt ger också ett gott skydd enligt Åkesson (1998). I Sverige används dock främst rena cementblandningar som tätningsmaterial, med den nackdelen att cementen kräver viss brinntid innan man kan fortsätta borrhningen. Foderrören, som är av stål, skall ha täta svetsskarvar och vara hållfasta mot arbetstryck, enligt Normbrunn 97.

Det finns inga krav på återfyllning av energibrunnar i Sverige. I t.ex. USA och Tyskland återfylls alltid borrhålet i enlighet med nationella krav och rekommendationer. Anledningen är att förbättra förutsättningarna för en god termisk värmeöverföring mellan slangen i borrhålet och omgivande berg (se vidare avsnitt 8.2.8) samt att skydda grundvattnet mot föroreningar och oönskade förändringar av grundvattenförhållandena. Föroreningar i markytan kan spridas via borrhålet ned till grundvattnet. Borrhålet kan också öppna för en spridningsväg för (förorenat) grundvatten från en akvifer till en annan. För det tredje är det lämpligt att återfylla borrhålet där artesiskt grundvatten förekommer. Utsläpp av artesiskt grundvatten kan leda till att markytan översvämmas och eroderas samt till skador på byggnader. Det kan också finnas ytligt liggande grundvattenmagasin med kända föroreningar och att man av det skälet behöver täta av magasinerna.

Svenska borrhål fylls, helt eller delvis beroende på grundvattennivå, på naturlig väg med inträngande vatten från omgivande berg. Ur värmesynpunkt är vatten sämre än geologiska material, men betydligt bättre än luft. Om borrhålet mot förmodan är torrt måste hålet återfyllas med lämpligt material.

I flera svenska kommuner godkänns inte energibrunnar inom det yttre skyddsområdet för vattentäkt med hänsyn till risk för förorenings spridning. Om återfyllning av energibrunnen med miljögodkänt material leder till att risken blir försumbar skulle sådana anläggningar kunna tillåtas i dessa områden.

Återfyllnadsmaterialet bör ha gynnsamma tätande egenskaper såväl som goda värmeöverförande egenskaper (IGSHPA, 1991). Det bör ha låg permeabilitet för att förhindra genomströmning av vätskor samt lagom hög viskositet så att inte t.ex. luftfickor/kanaler uppstår vid fyllningen och det får inte krympa. Det bör ha goda värmeöverförande egenskaper och god förmåga att täta runt slang och mot borrhålsväggen, vara kemiskt inert och icke-reaktivt med det grundvatten och de geologiska formationer det kommer i kontakt med. Ur praktisk synpunkt måste det vara lätt att blanda och pumpa återfyllnadsmaterialet samt att rengöra utrustning efter utfört arbete. Återfyllnadsmaterialet får inte ha en tendens att spridas och uttunnas via permeabla zoner och det måste vara säkert ur miljö- och hälsoskyddssynpunkt.

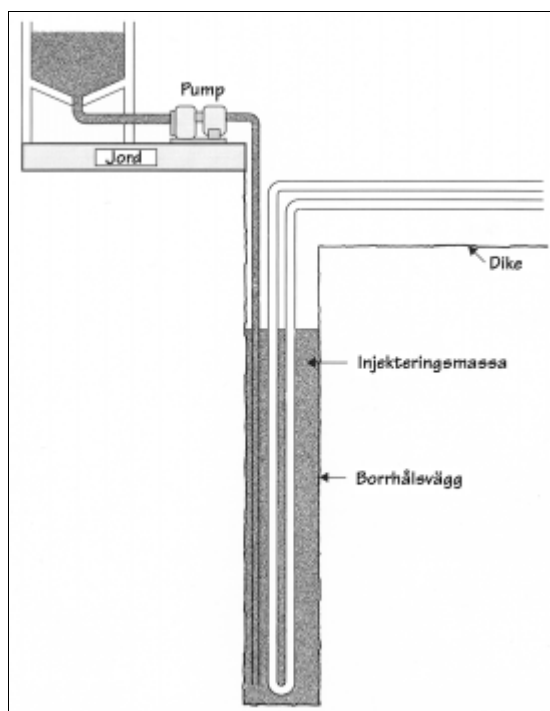
God tätning förutsätter att återfyllnadsmaterialets permeabilitet inte är högre än omgivande material. Enligt IGSHPA (1991) bör återfyllnadsmaterialets permeabilitet vara maximalt 10^{-9} m/s för att fördröja genomströmning av vätskor. En bentonit-vattenblandning som innehåller minst 20 viktsprocent bentonit krävs för att åstadkomma den permeabiliteten.

Exempel på återfyllnadsmaterial är grus, sand, lösgjort material från borrhningen och cement- eller bentonitbaserade blandningar (McCray, 2000). Det är ibland önskvärt att blanda in material med högre värmeledningsförmåga, t.ex. kvartssand, för att ytterligare förbättra värmeöverföringen mellan slangens utsida och borrhålsväggen. Enligt IGSHPA är inblandning med bentonit (klassad ”grout”) att föredra framför cementinblandning. Bentonit-materialet består av naturliga lermineral och har, beroende på kemisk sammansättning, olika svällningsegen-

skaper (vattenabsorberande förmåga). Naturliga material har oftast för hög permeabilitet för att vara tillräckligt tätande. Borrvätska eller mudd innehåller inte tillräcklig mängd bentonit för att täta hålet och skydda grundvattnet på längre sikt.

Här ges en beskrivning över den procedur som föreskrivs och tillämpas i USA för att fylla borrhålet med injekteringsmassa s.k. *grout* (IGSHPA, 1991). Fyllning skall alltid ske från botten av borrhålet upp till toppen (markytan). Fyllning av borrhålet från markytan är inte en tillförlitlig metod. Innan fyllningsarbetet startar måste borrhålet rensas från lösgjort material. Detta kan göras genom att cirkulera borrhållsvätska eller rent vatten i borrhålet. Det finns pumpar som kan användas både för att blanda och pumpa ner materialet i borrhålet. Vid blandningen får endast färskvatten med dricksvattenkvalitet användas. Om borrhålet förväntas stå öppet begränsad tid provtrycks U-slangen innan borrhållningen startar. Provtryckning utförs med vatten hellre än luft (OSU, 1997).

Efter utförd borrhållning installeras markslingan. Distanser som håller ihop slangens båda skänk- lar underlättar nedförel i borrhålet. Med U-röret följer ett plaströr (*tremie pipe*), som senare används för att fylla ut borrhålet. Injekteringsmassa pumpas via plaströret ned till botten av borrhålet, se [figur 7.11](#). Röret dras sedan successivt upp i takt med att borrhålet fylls. I början rinner injekteringsmassan relativt enkelt ut i hålet. När plaströret delvis dragits upp och lagts ut på markytan krävs mer pumpkraft för att trycka ut injekteringsmassan, som därmed behö- ver vara lätt att pumpa. Röret kan bestå av galvaniserat stål, PVC eller en flexibel hög- trycksslang, normalt med diameter 1-1¼". Mindre rördimensioner än så resulterar i för stora friktionsförluster vid pumpningen (IGSHPA, 1991).



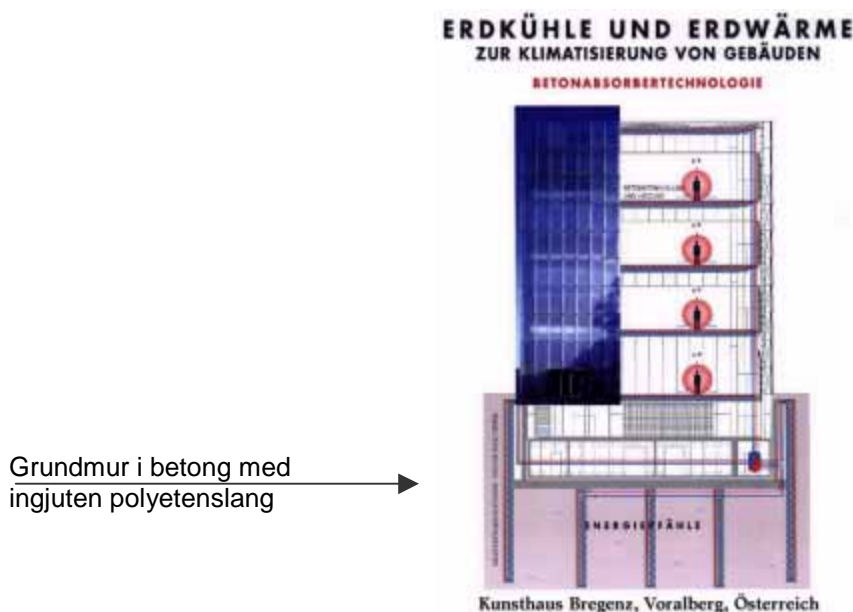
Figur 7.11. Återfyllning av borrhål genom pumpning (IGSHPA, 1991).

7.3 Energipålar

Energipålar är en relativt ny teknik som kombinerar behovet av grundläggning med behovet av ett värme-kylsystem. Med energipålens hjälp erhålls värmeväxling mellan husets inneklimat och jorden under byggnaden, se figur 7.12. En annan variant av energipåle är en ”djup grundmur” (*trench wall*). Konstmuseet i Bregenz, Österrike, är grundlagt på 120 m långa och 28 m djupa betongmurar med 24 000 m inbäddad polyetenslang för värmeväxling. Byggnadens olika delar, tak, golv och innerväggar, är speciellt anpassade och isoleringen i ytterväggarna har optimerats tillsammans med värme-kylsystemet.

I bland annat Schweiz, Tyskland, Österrike och Holland har flera kommersiella byggnader byggts grundlagda på energipålar. En energipåle består oftast av en platsgjuten betongpåle där armeringen kopplats ihop med slangar för värmeväxling mot omgivande jord under byggnaden. Påldiametern varierar vanligen från ca 0,4 meter upp till över 1 meter. Slangen kan bestå av enkla eller dubbla U-rör (PE), eller vara koncentriska. Det extra värmeöverföringsmotståndet i betongen är försumbart.

En förutsättning för att ett system med energipålar skall komma ifråga är att byggnaden måste grundläggas på pålar. Endast genom att kombinera behovet av pålgrundläggning med energiförsörjning kan man uppnå kostnadseffektivitet. En uppenbar fördel hos systemet är att markvärmeväxlaren inte upptar egen yta.



Figur 7.12. Byggnad med ingjuten polyetenslang i grundmurar, för värme- och kylförsörjning av Konstmuseet i Bregenz, Voralberg, Österrike (Geothermal Networks, www.geothermie.de, 2001).

För att inte åstadkomma en gradvis förskjutning av jordens naturliga temperatur bör systemet utformas för lika stora delar värmning och kylning. Detta innebär ofta att byggnadens värmebehov måste reduceras, genom till exempel extra isolering, värmeåtervinning ur ventilationsluften och genom att använda lågtemperatursystem. Systemet dimensioneras så att temperaturen runt pålen inte understiger jordens fryspunkt. Pålen kan då förlora en del av kontakten

mot omgivande jord vid efterföljande tining och därmed en del av sin bärförmåga (gäller mantelburna pålar). Funktionen hos spetsburna pålar till berg påverkas inte av eventuell frysing runt pålen. För kraftig värmeutvinning leder också till höga temperaturskillnader vilket innebär att den cirkulerande värmebärarvätskans temperatur minskar och följdaktligen också värmepumpens värmefaktor. I normalfallet varierar temperaturen runt pålen mellan ca +3 °C och +15 °C.

Systemet dimensioneras bland annat utifrån pållängd och jordegenskaper. Detta innebär att man ofta i förväg vet den exakta pållängden, normalt avståndet till berg, och antalet energipålar. Ovan jord tillverkas betongpårens skelett av armering och U-rör eller annan typ av rör för värmeväxling monteras fast på armeringen. Hela konstruktionen förs därefter ned i förborrade hål i jorden och ingjuts med betong.

En ny terminalbyggnad vid Zürich flygplats kommer att grundläggas på betongpålar, varav en del är försedda med U-rör för värmeväxling mot omgivande jord. Jordlagren består av 30 m sjösediment ovanpå morän. Pålarne, 1-1,5 m i diameter, kommer att gjutas på plats och skall vila på moränlagret. Varje påle förses med fyra U-rör. Vintertid hämtas värme ur marken via energipålarne och uppgraderas med värmepump. Detta innebär att marken kyls, vilket är en fördel sommartid då systemet kommer att utnyttjas för direktkylning. Samtidigt fås också en termisk återställning inför nästa vintersäsong. Dimensioneringen har gjorts med kravet att pålarne inte får frysa eftersom pårens mekaniska egenskaper då försämras.

Flera av de holländska systemen är också så dimensionerade att värme under vinterhalvåret tas från marken och uppgraderas med hjälp av värmepump. Kylning sommartid sker genom direktväxling, det vill säga utan hjälp av värmepump (Koene, 2000).

Energipålar har ännu så länge inte använts i Sverige. Den in situ-gjutna pålen har en nästan försumbar andel av den svenska marknaden. De vanligaste påltyperna är istället prefabricerade betongpålar och stålålar. Statistik visar att totalt drygt 1 miljon meter pålar installerades under 1999 (www.byggforum.com/pk/, 2001).

Prefabricerade betongpålar gjuts på fabrik och är normalt fyrkantiga. Pålen görs normalt med kantlängd 235, 270 eller 275 mm. Betongpålen slås ned till bergytan eller till jord med erforderlig bärförmåga. De svenska grundförhållandena, med t.ex. lutande bergytan under lösa jordlager, innebär att pålarnas nedslagningslängder ofta varierar för samma objekt.

Bland stålålarne dominerar röpålar, med ytterdiameter mindre än 0,1 m och godstjocklek 5-7 mm. Efter installation i jorden fylls pålen med cementbruk. I Sverige förekommer till mindre del även grävålar. Grävålen utförs genom grävning inuti ett foderrör med diameter mellan 0,8-1,5 m. Djupet till fast botten bestämmer dess längd. Armeringen placeras och foderröret fylls med cement samtidigt som det successivt dras upp under gjutningen.

För att energipålar ska börja användas i Sverige, enligt den teknik som förekommer i Mellan-europa, krävs att intresset och marknaden för in situ-gjutna pålar ökar eller att pållängden kan bestämmas i förväg för det aktuella objektet. Ett alternativ vore att utveckla tekniken för den svenska marknaden och t.ex. installera värmeväxlarrör i grävålar, röpålar av stål samt i betongplintar och slitsmurar. Det är en fördel om energipålen kan prefabriceras, med armering och fastmonterade värmeväxlarrör, i de längder som motsvarar djupet till fast botten. Detta för att undvika extra kopplingsarbete.

8. MARKVÄRMEVÄXLARES TERMISKA PRESTANDA

Markvärmesystemens fördelar utgörs bl.a. av dess möjligheter att fungera som källa för värme och kyla. Markens möjlighet att lagra värme och kyla bygger på att markens temperatur på ett gynnsamt avviker från uteluftens temperatur, vilken ofta styr bostads- och kontorsfastigheters energibehov för klimatisering. Under vintern är markens naturliga temperatur varmare än uteluften och under sommaren är den kallare.

Uttag och tillförsel av värme till marken sker via en markvärmeväxlare, vilken vanligtvis består av ytligt förlagda horisontella slangar av polyeten eller vertikala slangar placerade i borrhål. En värmebärande fluid cirkuleras genom detta slangsystem, varvid värme upptas om värmebärande fluiden är kallare än omgivande mark och värme avges om fluiden är varmare än omgivande mark.

Utformningen av markvärmeväxlaren och hur den placeras i marken beror på hur systemet avser att utnyttja marken, som värmekälla/värme-sänka eller som ett energilag. För enfamiljshus och andra småskaliga tillämpningar är syftet med markvärmeväxlaren att utnyttja den naturliga marktemperaturen som en värmekälla under uppvärmningssäsongen och eventuellt som en värme-sänka under perioder med kylbehov. Ändringen av marktemperaturen kring markvärmeväxlaren bör vara så liten som möjligt för att undvika nedsatt effektivitet hos systemet. Man eftersträvar maximalt termisk utbyte med omgivningen, så att temperaturstörningen kring markvärmeväxlarna kan motverkas. Marken kan också användas för lagring av värme och kyla. För detta ändamål utnyttjas en begränsad markvolym i vilken man placerar ett antal markvärmeväxlare. I detta fall eftersträvas maximalt termisk utbyte med lagervolymen, men minimalt utbyte mellan lagret och den mark som omger lagret.

I detta kapitel beskrivs först grundläggande termiska processer och förhållanden som påverkar markvärmeväxlares termiska prestanda. Därefter ges en kort översikt av markvärmeväxlares principiella utförande. I de avslutande avsnitten redovisas erfarenheter från fältförsök och teoretiska studier. Erfarenheter som huvudsakligen berör dimensionering av markvärmeväxlare behandlas i kapitel 9.

8.1 Värmeöverföring från fluid till mark

Med en enkel beskrivning sker värmetransporten utanför slangen genom ren värmeledning i ett förhållandevis homogent material. Sådana villkor uppfylls av erfarenhet relativt väl i berg och vattenmättade jordar. Vid uttag av värme ur jord är det vanligt att vattnet i marken närmast slangen fryser, vilket ur energisynpunkt är önskvärt eftersom det ökar markens energitäthet och förhindrar att värmebärande fluidens temperatur sjunker alltför mycket.

Värmeöverföringen mellan fluid och mark kräver en viss temperaturdifferens. Temperaturdifferensen, som väsentligen är proportionell mot tillförd/uttagen värmeeffekt per meter slang (eller borrhål), beror på samverkan av ingående komponenters värmeöverförande egenskaper, såsom:

1. Konvektiv värmeöverföringskoefficient mellan värmebärande fluidens bulktemperatur och slangens (rörens) insida.
2. Värmemotstånd i slangväggen.
3. Kontaktmotstånd mellan slangens yttervägg och omgivande material.
4. Värmemotstånd i omgivande material. Detta material utgörs av mark eller en kombination av återfyllnadsmaterial i slangens närmaste omgivning och därutöver omgivande mark.

Möjligheterna att beräkna prestanda utifrån en sådan enkel modell är goda av följande skäl:

1. Konvektiv värmeöverföringskoefficient mellan värmebärande fluidens bulktemperatur och slangens insida kan beräknas utgående från väletablerade semi-empiriska formler. Beräkningen kräver kännedom om slangens dimensioner, flödes hastighet samt värmebärande termohydrauliska egenskaper. Dessa egenskaper är i allmänhet kända. Låg flödes hastighet kan medföra laminära strömningsförhållanden, vilket vid vanligt förekommande utformningar av markvärmväxlaren kan ge avsevärt försämrade värmeöverföring.
2. Värmemotståndet i slangväggen kan beräknas från slangens dimensioner och dess värmeledningsförmåga, vilka normalt tillhandahålls i slangtillverkarnas produktblad.
3. Kontaktmotståndet mellan slangens yttervägg och omgivande material är den mest osäkra faktorn. Mätningar (som redovisas nedan) visar att den beror på jordart, slangens material och dimension. Enligt svenska erfarenheter är dock inverkan av detta motstånd litet.
4. Värmemotståndet i omgivande material beror av termiska egenskaper såsom värmeledningsförmåga och värmekapacitet. Dessa egenskaper beror av mineralsammansättning, densitet, porvolym och vattenmättnadsgrad. Värmekapaciteten kan ofta uppskattas tillräckligt väl med kännedom från dessa parametrar, emedan ett mer tillförlitligt värde på värmeledningsförmågan kräver direkt mätning med t.ex. termisk sond i jord eller genom ett inledande termiskt responstest (se avsnitt 3.2.4). Vid användning av återfyllnadsmaterial är det viktigt att uppskatta packningsgrad (densitet), vilket i vattenmättat tillstånd kan vara tillräckligt för en god uppskattning av värmekapacitet, värmeledningsförmåga och innehåll av latent värme vid frysning.

Markvärmväxlarens termiska prestanda påverkas således primärt av utformning (material, dimensioner och antal slangar i ett dike eller borrhål), flödes hastighet (laminärt eller turbulent), kontaktmotstånd, termiska egenskaper för omgivande mark och eventuellt återfyllnadsmaterial.

Energitransporten i marken kan under vissa förutsättningar påverkas av grundvattenflöde och fuktvandring. De termiska egenskaperna kan även ändras av driftsförhållanden, som t.ex. kan medföra frysning eller uttorkning runt slangerna. Dimensionering av markvärmväxlare beror ytterst på en avvägning mellan initierade anläggningskostnader (borrning, grävning, material o.d) och termiska prestanda, vilka inverkar på rörliga kostnader vid drift. Valet av markvärmväxlare beror även på geotekniska förutsättningar och det värde som den producerande energin har i systemet.

Genom uttag eller tillförsel av värme ändras markens temperatur. I ett system med enbart uttag av värme från marken, så kommer temperaturen efterhand att sjunka i markvärmväxlarens omgivning. Vid enbart tillförsel av värme så stiger marktemperaturen. Detta gör att systemets termiska effektivitet på lång sikt kan utvecklas negativt. Storleken och inverkan av denna temperaturändring beror på markvärmväxlarens utformning och energisystemets egenskaper. I system som används för värme på vintern och kyla på sommaren utnyttjas markens värmelagringsförmåga. Under vintern medför värmeuttaget att markens temperatur sänks, vilket är gynnsamt för kylbehovet under sommar drift. Värmetillförseln under sommaren skapar också gynnsamma förutsättningar för vinterdriften.

8.2 Värmetransport i marken

Värmetransporten i marken sker huvudsakligen genom värmeledning. I grova jordarter kan grundvattenrörelser bidra genom konduktiv värmetransport. Under omättade förhållanden är markens termiska egenskaper starkt beroende av vattenmättnadsgraden, vilken kan förändras genom fukttransport om värme tillförs eller avges. Frysning av vattnet i marken runt slangarna är en viktig process för markvärmeväxlares termiska prestanda.

8.2.1 Konduktiv värmetransport

I ett fast material sker värmetransporten genom värmeledning (värmekonduktivitet). Värme­flödets storlek (W/m^2) är då proportionellt mot temperaturgradienten (K/m) och materialets värmeledningsförmåga λ ($W/m,K$). När värme tillförs till en volym ökar dess temperatur beroende på materialets värmekapacitet ($J/(m^3K)$). Man kan uttrycka det så att värmekapaciteten är ett mått på materialets energitäthet. Ju högre värmekapacitet, desto lägre temperaturhöjning för samma tillförda värmemängd.

För system där man eftersträvar maximalt utbyte med omgivande mark är det gynnsamt om värmeledningsförmågan är så hög som möjligt. Det krävs då en kortare markvärmeväxlare. En hög värmekapacitet är alltid gynnsamt eftersom det innebär lägre temperaturändring.

Även för energilagring är en hög värmekapacitet gynnsamt. Vad beträffar värmelednings­förmågan så påverkar den två motstridiga värme­flöden. Värmeöverföringen mellan fluid och lagervolym gynnas av hög värmeledningsförmåga, emedan värme­flödet genom lagervoly­mens randyta till omgivande mark gynnas av låg värmeledningsförmåga. Den relativa värme­förlusten från lagervoly­men avtar med lagrets storlek och ökar med temperaturskillnaden mellan lager och omgivning. En hög värmeledningsförmåga är därför ogynnsamt för små energilager med hög temperaturskillnad mellan lager och omgivande mark.

8.2.2 Konvektiv värmetransport

Marken består dels av fast material och dels av hålrum, såsom sprickor och porer. I kristallint berg är andelen hålrum i berget högst någon procent medan andelen porer i vissa leror kan uppgå till 70 %. Dessa hålrum kan vara helt eller delvis fyllda av vatten eller luft. Vanligen bildar olika sprickor och porer ett sammanhängande hålrum, som möjliggör transport av vatten, vattenånga och luft. Drivkrafter för vattenflöde är tryckskillnader p.g.a. varierande grundvattennivåer (hydraulisk gradient) och vattentemperaturer (densitet) vid tillförsel av värme och kyla (naturlig konvektion). Markens genomsläpplighet för vatten ges av dess permeabilitet. Denna beror av storlek och utbredning på porer och sprickor. Finkorniga jordarter såsom lera har låg permeabilitet, medan grov sand och grus är exempel på jordarter med mycket hög permeabilitet. Framförallt i vattenmättade jordar med hög permeabilitet kan värmetransporten, förutom via konduktiv värmeledning, få ett stort bidrag från sådan konvektiv värmeöverföring.

8.2.3 Fuktinnehåll

I jordar med hög porositet medför låg vattenmättnad att såväl värmeledningsförmågan som möjligheterna för konvektiv värmetransport är ogynnsamma. När fukthalten ökar i relativt torra material skapar fukten först en termisk brygga över luftgapet mellan olika partiklar, vilket leder till en kraftig ökning i värmeledningsförmåga genom att den effektiva kontaktytan mellan olika partiklar ökar. När fukthalten ökas ytterligare blir marginaleffekten av ökningen av den effektiva kontaktytan allt mindre. Vid hög vattenmättnad fyller vätskan porerna, ut-

rymnet mellan jordpartiklarna, och skapar ett kontinuerligt medium med goda förutsättningar för effektiv värmeöverföring. Fukttinnehållet i marken påverkas av grundvattennivå, nederbörd, förångning, kondensation och vegetation. I områden där grundvattenytan sjunker under vinterhalvåret kan skillnader i ångtryck i området nära slangen bidra till att relativt god vattenmättnad bibehålls runt slangen. Vid frysning kan kapillära krafter medverka till bildning av islinser och förhöjd vattenmättnad runt slangen.

Fukthalten måste beaktas särskilt i sandiga områden och på höjder där uttorkning kan ske sommartid (Sanner et al, 1999). Förekomsten av en omättad zon eller uttorkning i skikt ovanför ett markenergilagrar kan vara en fördel eftersom det till viss del isolerar lagret från markytan.

I Norrland sjunker grundvattennivån normalt under vintern då fallande nederbörd bibehålls som snö. Vid snösmältningen sker en kraftig höjning. I södra Sverige uppvisar grundvattenytan en mindre utpräglad säsongsvariation. Här kan långtidstrender ge fluktuationer av samma storleksordning.

8.2.4 Fuktvandring

Uttag eller tillförsel av värme i marken leder till temperaturändringar, vilket medför skillnader i ångtryck i en omättad jord. Den därmed förknippade fukttransporten beror av möjligheten för fukten att rör sig i porerna. Vid hög mättnadsgrad är mobiliteten låg och vid låg mättnadsgrad är fukttinnehållet begränsat, varför störst effekt normalt kan iakttas vid måttliga mättnadsgrader omkring 30 %. Fuktvandringen har en annan mycket viktig effekt därigenom att den kan bidra till ändrade fuktförhållanden, vilket påverkar markens termiska egenskaper. Med fukttransport sker också en viss värmetransport.

Om värme tillförs till marken, kan vatten successivt förångas nära värmekällan och kondensera i kallare områden. Det finns, å andra sidan, kapillära krafter som i vätskefas motverkar transporten av vattenånga från värmekällan och som strävar mot en jämn fuktfördelningen i marken runt röret. När vattenmättnaden sjunker under ca 20-25 % sker en snabb försämring av värmeledningsförmågan, vilket i sin tur leder till högre gradienter av temperatur och ångtryck runt värmekällan (Tarnawski et al, 1990 och Leong et al, 1998). Därmed påskyndas uttorkningen runt värmekällan. Förändringar vid vattenmättnad över 50 % har relativt obetydlig inverkan. Beroende på sådana faktorer som jordtyp, densitet, kornfördelning och vattenmättnad, så påverkas den del av porutrymmet som är tillgängligt för ångtransport och den del som är tillgänglig för kapillärt återflöde i vätskefas. Ångfastransporten verkar dominera i fuktig sand medan vätskefilmtransporten är mer betydelsefull i kompakt silt/lera. Begrepp som termisk stabilitet används ibland för att beskriva dessa fenomen. Över en viss vattenmättnad leder små ändringar i fukthalt till små ändringar i värmeledningsförmåga (värmertilförseln ger här en viss omfördelning av fukt), under denna gränsen leder värmertilförseln till uttorkning.

Vid uttag av värme medför fuktvandring till den kalla slangen att vattenmättnadsgraden runt slangen lokalt kan höjas till en sådan nivå att värmeövergångsförhållandena väsentligen blir desamma som för den fullt mättade jorden (Porsvig, 1986).

8.2.5 Värmestrålning

I luftfyllda porer kan även värmestrålning få betydelse. Särskilt i anslutning till rör med liten diameter där det normalt förekommer stora temperaturgradienter (Porsvig, 1986). Den all-

männan uppfattningen är att värmestrålning i normalfallet ger ett väldigt litet bidrag till värmetransporten i mark.

8.2.6 Fasomvandling – frysning och smältning

När värme tas ur mark är det under svenska förhållanden vanligt att den vattenmättade marken runt ytjordvärmekollektorer eller att vattnet i grundvattenfyllda bergvärmebrunnar fryser. När vatten fryser till is erhålls en värmemängd motsvarande 92,5 kWh per m³ vatten. Fritt och rent vatten fryser vid 0 °C. I jordar bidrar kapillära krafter och lösta mineral i vattnet till att fryspunkten sjunker. Det kan därför finnas ofruset vatten även vid flera minusgrader. Fasomvandlingsenergin utgör en viktig del vid dimensionering av ytjordvärmesystem, där tjälningen även har en betydande stabiliserande effekt på värmebärartemperaturen. För bergvärmebrunnar är betydelsen av det frysta borrhållsvattnet ringa, men kan i vissa fall verka som en viss buffert vid höga effektpulser.

Tjälprocessen runt slangar i lera kan leda till mycket kraftiga förändringar av lerans geotekniska egenskaper (se avsnitt 3.1.5).

Stora energiuttag från en ytjordvärmekollektor kan ge upphov till en tjälad zon som inte tinar under sommarhalvåret. Fortvarig drift under sådana villkor kan då leda till utveckling av permafrost under ytjordvärmekollektorn.

8.2.7 Förändring av markens termiska egenskaper

Ytterligare en komplikation vid uppskattning av termisk prestanda och värmetransport är att marken vid installation av markvärmeväxlare blir störd, så att de termiska egenskaper i slangens närhet förändras. Vid installation av horisontella slangar sker vanligtvis en kraftig omrörning genom grävning, fräsning o.d. Här finns möjlighet att marken i slangens närhet antingen blir mer kompakt eller lösare packad än före installationen och därmed avviker från omgivande orörd mark. Även vertikal neddrivning kan ge upphov till sådana effekter. Dessa kan till en viss del behandlas som ett kontaktmotstånd vid värmeberäkningar.

8.2.8 Återfyllnadsmaterial

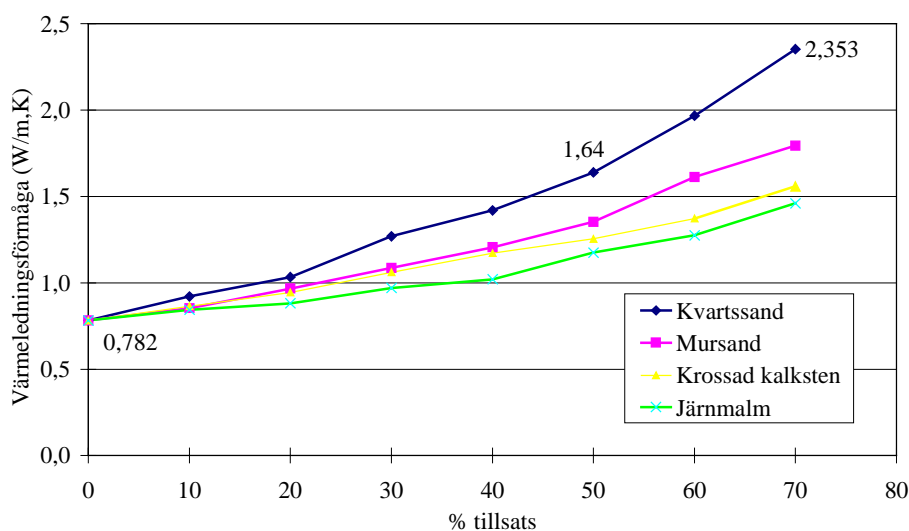
För jordar med låg värmeledningsförmåga är det gynnsamt om området närmast röret, där stora temperaturgradienter förekommer, kan återfyllas med material med högre värmeledningsförmåga t.ex. sand med högt kvartsinnehåll. Värmeledningsförmåga för några vanligt förekommande återfyllnadsmaterial ges i [tabell 8.1](#).

När värme tillförs bör man se till att valet av återfyllnadsmaterial ej ökar risken för uttorkning. Vid sjunkande vattenmättnadsgrad är det en fördel om återfyllnadsmaterialet har varierande kornstorlek för att minska porvolymen (mer fast material och mer kapillärt bundet vatten) och därigenom förbättra värmeledningsförmågan (Balstrup, 1977). För system där man utnyttjar den latent värmen runt röret är det vid vattenmättade förhållanden bättre med en sand som har en jämn kornstorleksfördelning, vilket ger högre porositet och därmed större latent värmeinnehåll och mindre tjälhåvningsrisk.

Tabell 8.1. Värmeledningsförmåga för några vanliga återfyllnadsmaterial.

Återfyllnadsmaterial	Värmeledningsförmåga (W/(m,K))
Sand, grus - torr	0,4
Vatten (stillastående)	0,6
Bentonit 10 %, vatten	0,7
Bentonit/cement/sand, 9/9/20 %, vatten	0,7-0,8
Sand, fuktig	1,0
Bentonit 10 %, frusen	1,4
Bentonit/kvartssand, 12/50 %, vatten	1,5
Sand, vattenmättad	1,5-2,6
Grus, vattenmättad	1,8
Is	2,3
Cement/sand, 27 %/58 %, vatten	2,4
Kvartssand, vattenmättad	2,4-2,7

För markvärmeväxlare med vertikala borrhål är det ibland önskvärt att återfylla med ett material som förhindrar vertikala vattenrörelser i borrhålet. Ett vanligt skäl är att förhindra att föroreningar sprids till grundvattenförande skikt som används för dricksvatten. Det kan också vara fråga om att motverka dränering av ytliga markskikt. Ett ofta använt material i sådana sammanhang är bentonit, vilket ger mycket låg hydraulisk konduktivitet. Nackdelar med bentonit som återfyllnadsmaterial är att den har låg värmeledningsförmåga (0,7-0,8 W/(m,K)) och ej tål att frysas (Müller, 1985). Med lämplig inblandning av cement och kvartssand kan en frysbeständig blandning uppnås samtidigt som värmeledningsförmågan kan ökas med 15-35 % (Wagner, 1991; Reuss et al, 1990). Remund och Lund (1993) undersökte bentonitblandningars värmeledningsförmåga för olika tillsatsmaterial och blandningsförhållanden (utan krav på frysbeständighet). Se **figur 8.1**.



Figur 8.1. Bentonitblandningars värmeledningsförmåga för olika tillsatsmaterial och blandningsförhållanden (Remund och Lund, 1993).

Inblandning av kvartsand gav den största förbättring av värmeledningsförmågan. Blandningar med kvartsinnehåll över 50 % bedömdes ej vara möjliga att pumpa ned i borrhål p.g.a. för hög friktion i injektionsslangen. En användbar bentonit/kvartsandblandning kan därför ge en högsta värmeledningsförmåga på ca 1,5-1,7 W/(m,K). (Metod för återfyllning av borrhål behandlas i avsnitt 7.2.4.)

Kavanaugh och Allen (1999) fann att blandningar baserade på cement och sand gav högre värmeledningsförmåga än konventionella blandningar av bentonit, bentonit/sand och bentonit/cement. För en blandning med 27 % cement, 15 % vatten, 58 % sand och en 0,5 % mjukgörare (*superplasticizer*) uppmättes en värmeledningsförmåga på 2,4 W/(m,K), vilket kan jämföras med ett värde på 2,7 W/(m,K) för vattenmättad sand (1760 kg/m³). Vid detta försök undersöktes inte blandningarnas permeabilitet eller pumpbarhet.

8.2.9 Kontaktmotstånd mellan rör och mark

I kontaktytan mellan två olika material uppstår förhållanden som avviker från en ideal termisk kontakt där det ena materialet kontinuerligt övergår i det andra. Avvikelsen kan beskrivas som ett extra värmemotstånd i kontaktytan. Vissa försök i Kanada (Svec och Palmer, 1983) och Danmark (Porsvig, 1986) har visat att det finns sådana kontaktmotstånd mellan slang och omgivande mark som inte kan försummas. En anledning anses vara att jordpartiklarnas kontaktpunkter mot slangväggen minskar p.g.a. att slangens diameter varierar något med temperatursvängningarna. Denna cykliska rörelse skulle då förskjuta jordpartiklarna bort från röret så att utrymmet fylls med luft eller vatten, som har lägre värmeledningsförmåga. Något klart samband mellan vattenmättnadsgrad, jordart, densitet, rörtyp har inte framträtt under försöken. Svec och Palmer (1983) menar att deras laboratoriemätningar visar att kontaktmotståndet är ett mindre problem i sand än i lera. Porsvig (1986) framför dock följande synpunkter: I fullständigt torr jord sker värmeöverföringen som strålning, konvektiva luftrörelser eller konduktion vid kontaktpunkterna mellan kornen. Relativt små övergångsmotstånd uppträder särskilt vid små rördiametrar beroende på att porvolymen i det närmaste skiktet kring röret är större än i den omgivande jorden. De relativt stora temperaturgradienterna kring dessa små rör skulle då öka betydelsen av värmetransport genom strålning.

Praktiska erfarenheter från fältmätningar på svenska ytjordvärmekollektorer tyder på att kontaktmotståndet är litet (Ahlkrona och Mogensen, 1987). I kohesionsjordar, såsom styva leror med låg fukthalt, är det ofta svårt att undvika hålrum vid återfyllning. Att det trots detta inte uppstår något som kan betecknas som kontaktmotstånd kan eventuellt bero på anrikning av fukt i hålrummen. Även utvärderingen av värmelagret i Söderköping (Magnusson m.fl., 1992), där vertikala U-rörsslanger pressades ned i lera, tyder på att kontaktmotståndet är mycket litet.

8.3 Förhållanden i marken

8.3.1 Markytans temperatur

Temperaturen vid markytan är ett resultat av nettoflödet för olika komponenter i värmeutbytet mellan mark och atmosfär, såsom: konduktivt/konvektivt värmeutbyte mellan luft och mark; värmestrålningsbalans mellan markyta, himmel (moln) och sol; inverkan av nederbörd i form av regn och snö. Värmemotstånd och strålningsutbyte beror på förhållanden vid markytan, som t.ex. vegetation och snötäcke. Den årliga medeltemperaturen vid markytan bestäms huvudsakligen av luftens årsmedeltemperatur och snötäckets varaktighet. Man har funnit att markytans årsmedeltemperatur är ca 1,5 °C högre än luftens årsmedeltemperatur för varje

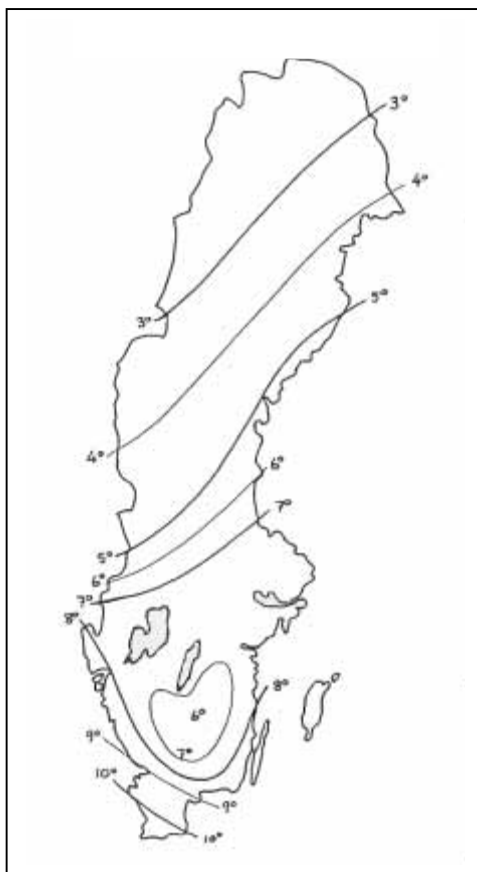
100 dagar med snötäcke (Ångström, 1974). Detta motsvarar 3-4 °C i norra Sverige och något mindre än 1 °C i sydligaste Sverige.

Det är inte bara värmeuttag som inverkar på temperaturförhållandena i marken. Mätningar av marktemperaturen och tjäldjup vid fältförsöken i Eda och Umeå indikerade att variationer inom tomten av skuggighet, vegetation och markegenskaper påverkar temperatur- och energiförhållanden ungefär lika mycket, i alla fall under perioden från vår till höst (Ahlkrona och Mogensen, 1987). Även närheten till hus, asfalterade och snöröjda ytor har betydelse.

8.3.2 Markens naturliga temperatur

När värme uttas eller tillförs marken ger detta en temperaturändring i förhållande till markens naturliga temperaturnivå. Den effekt som kan uttas eller avges är väsentligen proportionell mot temperaturskillnaden mellan ostörd mark och dimensionerande temperatur för värmebärrarfluiden i markvärmexlaren.

Temperaturen i de översta markskiktet ned till 0,3-0,4 m djup kan påverkas kraftigt av dygnsvariationer och kortare perioder med ovanlig värme och kyla i luften. Inverkan av temperatursvängningar vid markytan avtar med djupet. Fältmätningar för typiska svenska villkor visar att en årsamplitud på 20 °C vid markytan är reducerad till 12 °C vid 1 m djup, 7 °C vid 2 m djup och 4 °C vid 3 m djup. Amplituden är mindre än 1 °C under djupet 6 m. Avgörande för marktemperaturen på dessa djup är huvudsakligen lufttemperaturens årsvariation samt snötäckets tjocklek och varaktighet (se avsnitt 8.3.3). **Figur 8.2** visar uppskattad marktemperatur på djupet 100 meter, vilket kan användas som riktvärde för djupa bergvärmebrunnar. Den naturliga vertikala temperaturgradienten ger en ökning med ca 10-17 °C per km i kristallint berg och 20-30 °C per km i sedimentär berggrund. Typiska ytjordvärmeanläggningar kan inte tillgodoräkna sig något väsentligt bidrag från geotermiskt värme flöde från jordens inre. Nettouttaget från kollektorerna är i storleksordning 10-20 W/m² medan det geotermiska värme flödet är ca 0,06 W/m².



Figur 8.2. Uppskattad marktemperatur på djupet 100 meter.

8.3.3 Inverkan av snö och regnvatten

Ett tjockt snötäcke förefaller, speciellt om det lägger sig tidigt, ha en klart positiv betydelse för energibalansen vid ytjordvärmeställningar (Ahlkrona och Mogensen, 1987). Det naturliga tjäldjupet minskar, tjälsäsongen blir kortare och värmebärartemperaturen under vintern ökar. Man erhåller en stabil värmebärartemperatur under vintern om marken åtminstone ovanför den varmare till huset inkommande delen av markslingan i huvudsak är otjälad. Att tjälen

kring slangen inte är sammanvuxen med den uppifrån genomträngande naturliga tjälen medför att värmebärartemperaturen blir mindre känslig för fluktuationer i utetemperatur och snödjup. Särskilt i södra och mellersta Sverige finns det ett samband mellan kalla vintrar och stort snödjup. Den positiva inverkan av ett tjockt snötäcke mildrar under sådana vintrar förhållanden för yttjordvärmekollektorn.

Infiltration av regnvatten kan öka vattenmättnaden i och kring den frysta zonen som omger slangen, vilket är särskilt betydelsefullt i grovkorniga jordarter (Jansson och Lundin, 1984).

8.4 Horisontella markvärmeväxlare

8.4.1 Principiell utformning

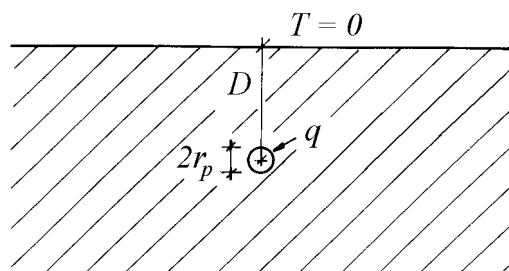
Horisontella markvärmeväxlare är huvudsakligen utformade m.h.t. att marken på mellan 0,5 m och 3 m djup skall användas som värmekälla för uppvärmning samt vid behov som värme-sänka för kyla. Eftersom horisontella markvärmeväxlare vanligtvis har en relativt platt och exponerad geometri, så är de mindre lämpliga som energilagrar. När marken endast används som värmekälla för värmepumpen under vintern är förläggningsdjupet en kompromiss mellan att undvika naturlig tjälning från markytan under vintern och att erhålla en snabb regenerering från markytan av det nedkylda området under våren. Om marken även används som värme-sänka under sommaren eftersträvas att en stor del av regenereringen sker med kyllasten, vilket innebär att markvärmeväxlaren bör ligga djupare och möjligen kan vara mer kompakt.

Termisk analys av yttjordvärmeväxlare med hänsyn till tjälbildning och snötäcke kräver numeriska datorsimuleringar. För fall utan tjälbildning reduceras antalet parametrar och mer generella resultat för ren värmeledning kan användas. I det följande diskuteras faktorer som påverkar prestanda för horisontella markvärmeväxlare bestående av ett eller flera parallella rör belägna i mark med homogena termiska egenskaper. Temperaturen i marken kan då behandlas som summan av den naturliga ostörda marktemperaturen och en överlagrad temperaturändring orsakad av tillförsel eller uttag av värme från rören (Claesson och Dunand, 1980; Claesson m.fl., 1985).

8.4.2 Värmemotstånd i mark kring en slang

Temperaturen i marken kring ett ytligt beläget rör kan genom s.k. superpositionsprincip uppdelas i två grundläggande komponenter: den ostörda naturliga marktemperaturen som styrs av randvillkoren vid markytan och därmed varierar i tid och med djup, samt den temperaturstörning som åstadkoms genom värmeutbytet med slangen.

Den mest grundläggande processen för analys av temperaturstörningen från en slang på djupet D under markytan är att betrakta en stegändring i effektuttag, q . Se [figur 8.3](#).

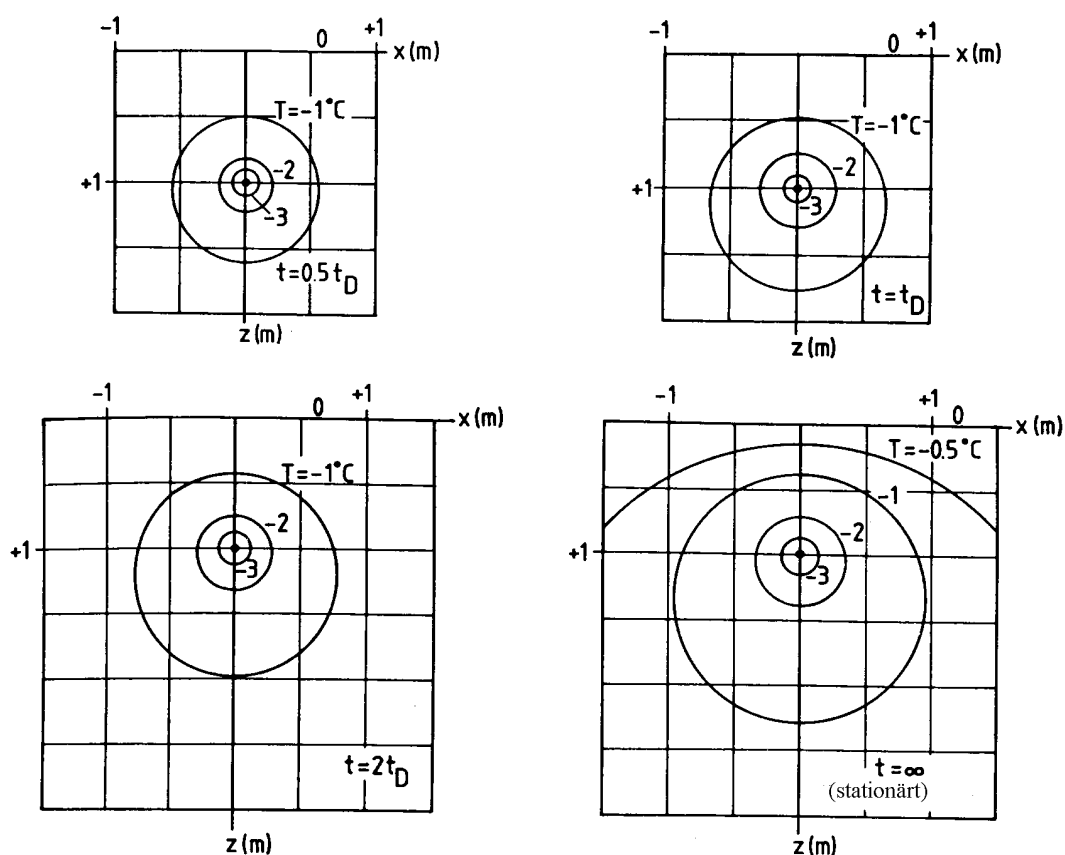


Figur 8.3. Horisontell slang med radien r_p på djupet D .

Först sker en snabb temperatursänkning av värmebärarfluiden, därefter tas alltmer av energin från omgivande mark. Under en första fas påverkas inte värmebärarfluidens temperatur av närheten till markytan. Inverkan av markytan tilltar, för att i ett senare skede fixera temperaturstörningen till ett konstant värde. En karakteristisk tidsskala $t_D = 2D^2/a$ kan anges för denna process. Här är a markens värmediffusivitet, vilket är kvoten mellan markens värmeledningsförmåga λ (W/(m,K)) och dess volumetriska värmekapacitet C (J/(m³,K)).

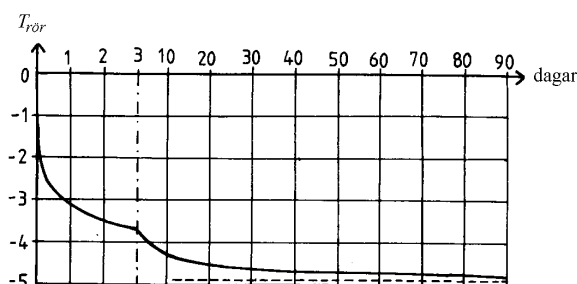
Basdata för exempel:
 Förläggingsdjup $D = 1$ m
 Slangdiameter $2r_p = 0,04$ m
 Värmeledningsförmåga $\lambda = 1,5$ W/(m,K)
 Volumetrisk värmekapacitet $C = 3,0$ MJ/(m³,K)
 Specifikt effektuttag $q = 10$ W/m
 Markens utgångstemperatur = 0 °C

Med basdata enligt ovan erhålls en karakteristisk tidsskala $t_D = 1$ månad. Före denna tid är temperaturstörningen vid röret oberoende av avståndet D till markytan. Efter ca $1,8 t_D$, vilket för detta exempel är knapp 2 månader, har temperaturstörningen väsentligen nått sitt maximala konstanta värde. **Figur 8.4** visar temperaturstörningen vid olika tidpunkter.



Figur 8.4. Temperaturstörning vid olika tidpunkter för renodlat effektuttag. Data enligt exempel i texten.

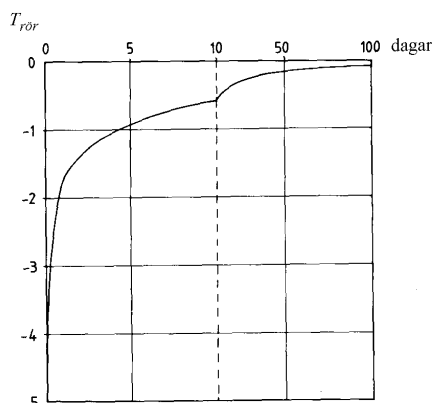
Temperaturstörningen i marken omedelbart utanför slangen är av särskilt intresse, eftersom den är direkt relaterad till värmebärartemperaturen i slangen. För det aktuella exemplet visas denna temperatur i **figur 8.5**.



Figur 8.5. Temperatur $T_{rör}$ i marken omedelbart utanför slangen för renodlat effektuttag. Data enligt exempel i texten.

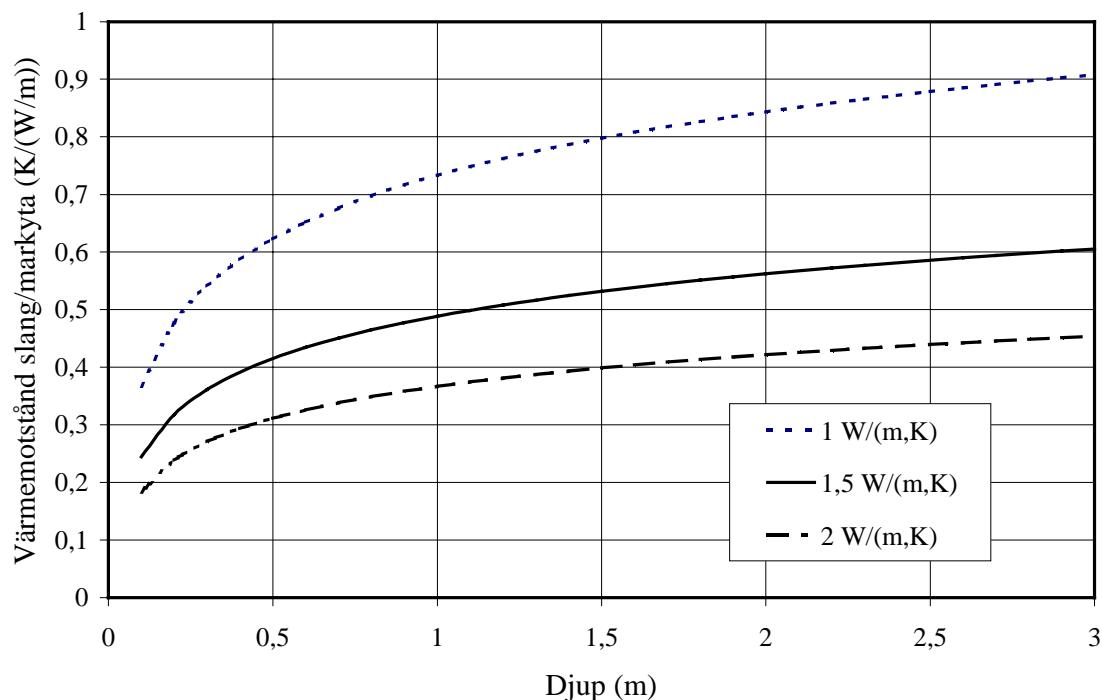
Värmebärarens medeltemperatur kommer att ligga ca $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ lägre än marktemperaturen omedelbart utanför slangen, p.g.a. temperaturskillnaden mellan fluid och mark orsakad av slangens värmemotstånd. Om effektuttaget 10 W/m bibehålls fortvarigt i en knapp månad bör således värmebäraren i slangen vara ca $5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ kallare än naturlig temperatur på denna nivå. Med en temperaturdifferens på $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ mellan in- och utlopp för värmebäraren samt en lägsta naturlig marktemperatur på $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ på djupet 1 m erhålls en lägsta framledningstemperatur till ytjordvärmepumpen på $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (för exemplet i texten). Temperaturen i figur 8.4 är framtagen under förutsättning att ingen tjalning sker i marken. Detta villkor är inte uppfyllt i detta fall. Tjalningsprocessen och den ökade värmeledningsförmågan i det frysta området kommer att samverka till en något varmare värmebärartemperatur. Vi noterar dock att temperaturen faller mycket snabbt när uttaget börjar. Efter 3 dagar har temperaturstörningen utanför slangen nått 75 % av sitt slutvärde.

Då värmeuttaget upphör återgår marktemperaturen efterhand till ostörda förhållanden. **Figur 8.6** visar hur temperaturstörningen omedelbart utanför slangen avklingar efter en lång effektpuls. Efter en dag har denna temperatur sjunkit med 64 %. Efter 10 dagar återstår endast 10 %. Detta exempel illustrerar svårigheten att med en ytjordvärmeanläggning försöka skapa en uppvärmd zon under sommartid som sedan kan utnyttjas under vintern (eller tvärtom). Efter det att värmeförseln (alt. värmeuttaget) upphört återgår marktemperaturen snabbt till nära naturliga nivåer.



Figur 8.6. Avklingning av temperaturstörning, $T_{rör}$ i marken omedelbart utanför slangen efter en lång effektpuls.

Det konstanta stationära tillstånd som temperaturstörningen ΔT uppnår efter en viss tid med konstant värmeuttag q kan beskrivas som ett tidsberoende värmemotstånd $R_g = \Delta T / q$ mellan slang och markyta. I figur 8.7 visas värmemotståndet i marken mellan slang och markyta för olika värmeledningsförmåga på marken. Värmemotståndet ökar med djupet och minskar med värmeledningsförmågan. När marken är frusen är värmeledningsförmågan högre och värmekapaciteten lägre. Om hela området från markytan till en bit under röret är fruset medför detta att den karakteristiska tidskalan blir kortare och att värmemotståndet sjunker. Temperaturstörningen från värmeuttaget blir mindre och når sitt stationära värde snabbare. Däremot ökar temperaturpåverkan från markytans temperaturvariation och den tid det tar för en temperaturändring att slå igenom på slangnivån bli kortare. Värmebärande fluidens temperatur får då en ogynnsam och starkare koppling till temperaturen vid markytan. Så länge det finns otjälad mark mellan slang och mark har fasomvandling från vatten till is en gynnsam stabiliserande effekt på värmebärande fluidens temperatur.

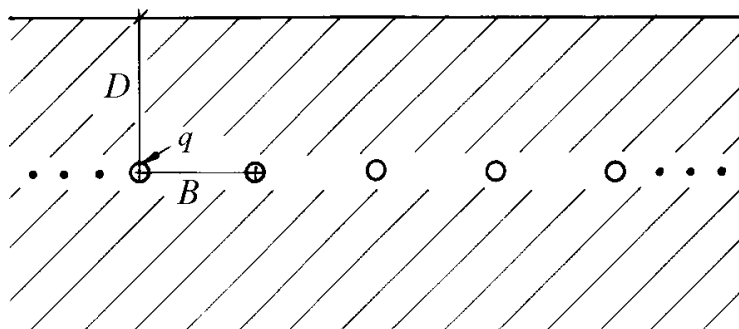


Figur 8.7. Värmemotståndet i marken mellan slangens yttervägg och markytan för olika värmeledningsförmåga på marken. Slangens ytterdiameter är 40 mm.

Markvärmemotståndet och därmed temperaturstörningen tilltar således med djupet medan den naturliga marktemperaturändringen vid tiden för hög värme- eller kylbelastning normalt minskar. Denna förenklade betraktelse kan dock inte besvara frågan om optimalt förläggningsdjup. Viktiga faktorer att beakta är särskilt värmeledningsförmåga, innehåll av latent värme i slangens närhet och utsträckning av naturlig tjälning i tillämpningar med värmeuttag. Då värme tillförs är det framförallt viktigt med hög värmeledningsförmåga i slangens närhet.

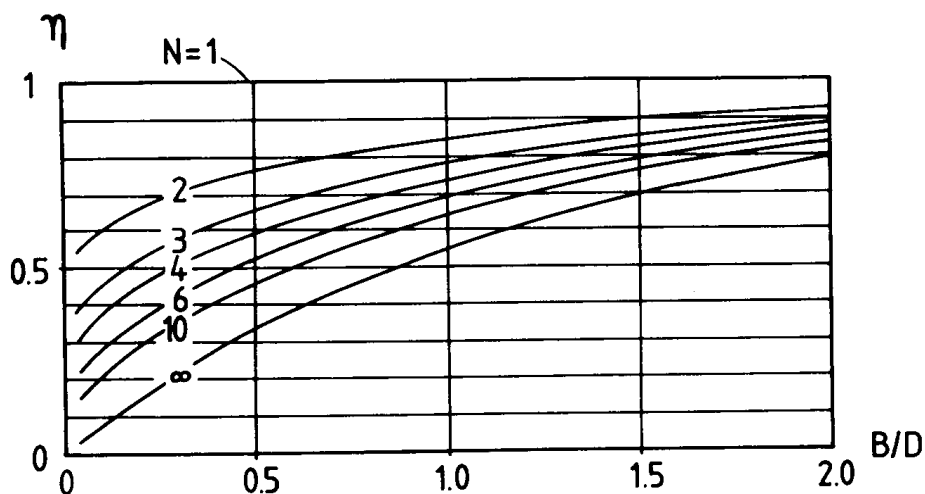
8.4.3 Flera slangar

När flera slangar placeras nära varandra uppstår termisk influens mellan slangarna. Vi betraktar ett fall med N st näraliggande, parallella slangar på djupet D med ett inbördes avstånd B . Situationen framgår av [figur 8.8](#).



Figur 8.8. Markvärmekollektor med N st näraliggande, parallella slangar på djupet D med ett inbördes avstånd B .

Om det specifika effektuttaget per meter slang inte anpassas till att beakta influensen, så kommer värmebärarfluidens temperatur att bli lägre än om slangarna ligger långt ifrån varandra. För att värmebärarens temperatur ska bli densamma för de två fallen, så måste effektuttaget reduceras då slangarna ligger nära varandra. Det kan uttryckas så att markvärmemotståndet för näraliggande slangar är högre. Kvoten av det stationära markvärmemotståndet mellan oberoende slangar och flera näraliggande slangar kan användas som ett mått på det relativa värmeuttaget η , vilket i ett homogent material enbart är en funktion av kvoten B/D . I [figur 8.9](#) visas det relativa uttaget för N st näraliggande slangar.



Figur 8.9. Relativt värmeuttag för N st näraliggande, parallella slangar på djupet D med ett inbördes avstånd B jämfört med N st termiskt oberoende slangar.

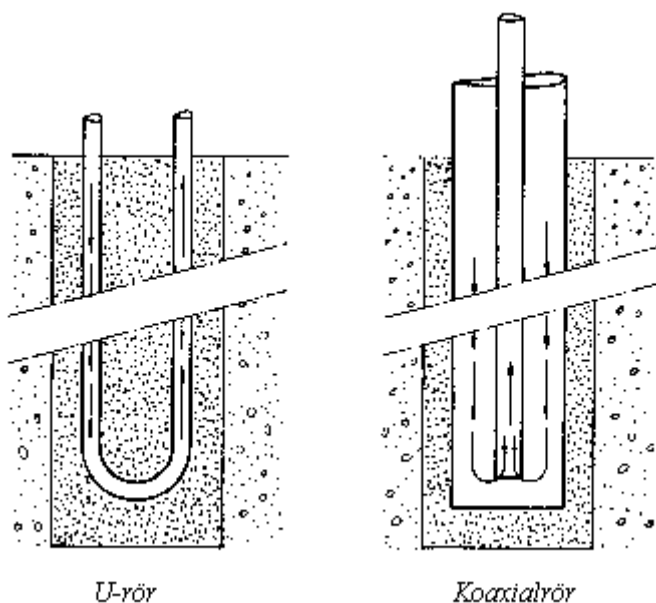
Enligt figur 8.9 är influensen kraftig för $B < 0,5D$ och liten för $B > 2D$. För effektvariationer med kort varaktighet är influensen försumbar och de näraliggande slangarna har då samma effektivitet ($\eta=1$) som oberoende slangar. Beroende på hur värmelasten varierar (baslast eller topplast) så kommer markvärmeväxlarens effektivitet att ligga någonstans mellan ett värde i figur 8.9 och 1 (under förutsättning att marken är homogen och inverkan av tjälning kan försummas).

För att öka värmeöverföringen kan man använda flera slangar i samma dike. Man bör eftersträva att separera slangarna så mycket som möjligt för att undvika termisk influens. En jämförelse kan göras av det stationära markmotståndet för två slangar på djupet D med ett inbördes avstånd B mot en enkel slang på detta djup. Effektiviteten för de två slangarna är då 120 % för $B/D=0,04$, 130 % för $B/D=0,1$, 140 % för $B/D=0,2$, och 150 % för $B/D=0,3$. Dessa värden gäller då produkten $\lambda \cdot R_p = 0,15$ (λ är markens värmeledningsförmåga och R_p är slangens värmemotstånd). Med normal polyetenslang kan ett dike med två slangar på 0,3 meters inbördes avstånd förlagda på 1 meters djup dimensioneras för minst 50 % högre effekt per meter dike än ett dike med endast en slang på samma nivå.

8.5 Vertikala markvärmeväxlare

8.5.1 Principiell utformning

Det finns två principiellt olika typer av vertikala markvärmeväxlare. Se figur 8.10. Den ena typen använder både uppåt- och nedåtgående strömningskanal för värmebärarfluiden för värmeväxling med omgivande mark. Ett exempel är de vanligt förekommande U-rören. I den andra typen används antingen uppåt- eller nedåtgående strömningskanal för värmeväxling, medan den andra strömningskanalen värmeisoleras för att undvika termisk kortslutning med den värmeväxlande strömningskanalen. Detta kan utformas som ett koaxialrör där den yttre kanalen används för värmeväxling mot marken och den inre kanalen leder värmebäraren till eller från markvärmeväxlarens botten.



Figur 8.10. De två grundtyperna av vertikala markvärmeväxlare – U-rör och koaxialrör.

8.5.2 Värmemotstånd mellan fluid och mark

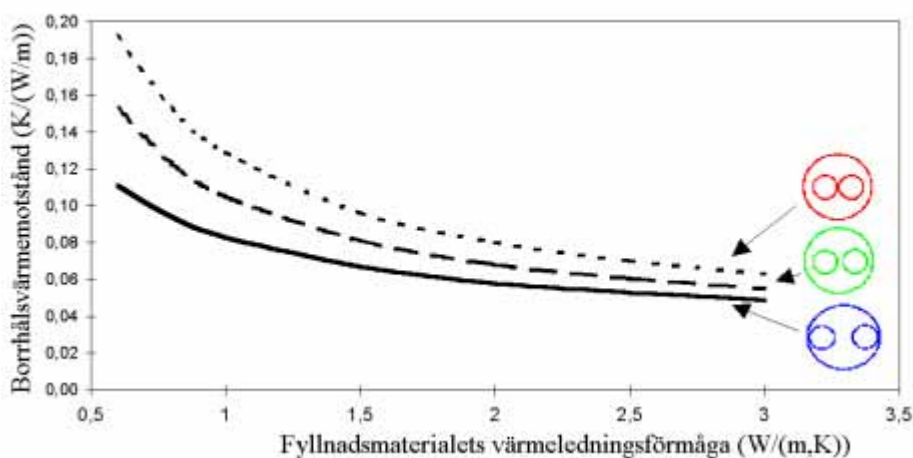
Den temperaturdifferens som krävs mellan fluid och omgivande mark för att överföra en viss värmeeffekt per meter markvärmeväxlare bestäms av det totala värmemotståndet mellan fluid och mark (se avsnitt 8.1). Valet av referenstemperatur för omgivande mark beror på om markvärmeväxlaren avser att utnyttja marken som värmekälla/värmesänka eller som ett energilagrar. Då marken används som värmekälla/värmesänka väljs markens ostörda temperatur, medan lagrets medeltemperatur är lämpligare när det gäller energilagring.

Det totala värmemotståndet mellan fluid och omgivande mark kan uppdelas i två komponenter. För en vertikal markvärmeväxlare som installeras i ett borrhål kallas värmemotståndet mellan fluid och borrhålsvägg ofta för borrhålsvärmemotståndet. Den andra komponenten utgörs då av värmemotståndet i omgivande mark.

Borrhålsvärmemotstånd

En särskilt viktig faktor vid dimensionering av vertikala markvärmeväxlare i borrhål är värmemotståndet mellan värmebärande fluiden och borrhålsväggen. Borrhålsvärmemotståndet R_b (K/(W/m)) bestämmer skillnaden (temperaturfallet) mellan värmebärande fluidens temperatur T_f och borrhåls-väggens temperatur T_b för en given specifik värmeeffekt q (W/m): $T_f - T_b = R_b \cdot q$.

Borrhålsmotståndet beror på hur strömningskanalerna utformas (material, antal, placering), återfyllnadsmaterial och de termiska egenskaperna för berörda delar. I internationella fältförsök har värden från 0,01 K/(W/m) för öppna koaxialrör i berg (värmebärande fluiden i direkt kontakt med berget) till 0,25 K/(W/m) för enkla U-rör i bentonitfyllda borrhål observerats. För en typisk specifik värmeeffekt på 50 W/m i berg innebär detta en temperaturdifferens på 0,5 °C till 12,5 °C. Normalvärden för svenska bergvärmebrunnar med enkla U-rör av polyeten (PEMDN40PN6) i grundvattenfyllda borrhål är ca 0,10 K/(W/m) för ofruset borrhålsvatten och ca 0,06 K/(W/m) för fruset borrhålsvatten, vilket ger temperaturdifferenser på ca 2-4 °C under normal drift. I detta fall ger själva polyetenslangen ett värmemotstånd på ca 0,03 K/(W/m). Borrhålsmotståndets beroende av fyllnadsmaterialets värmeledningsförmåga och placeringen av U-rörets skänklar i borrhålet visas i figur 8.11. U-rörets skänklar skall helst placeras så långt ifrån varandra som möjligt i borrhålet.

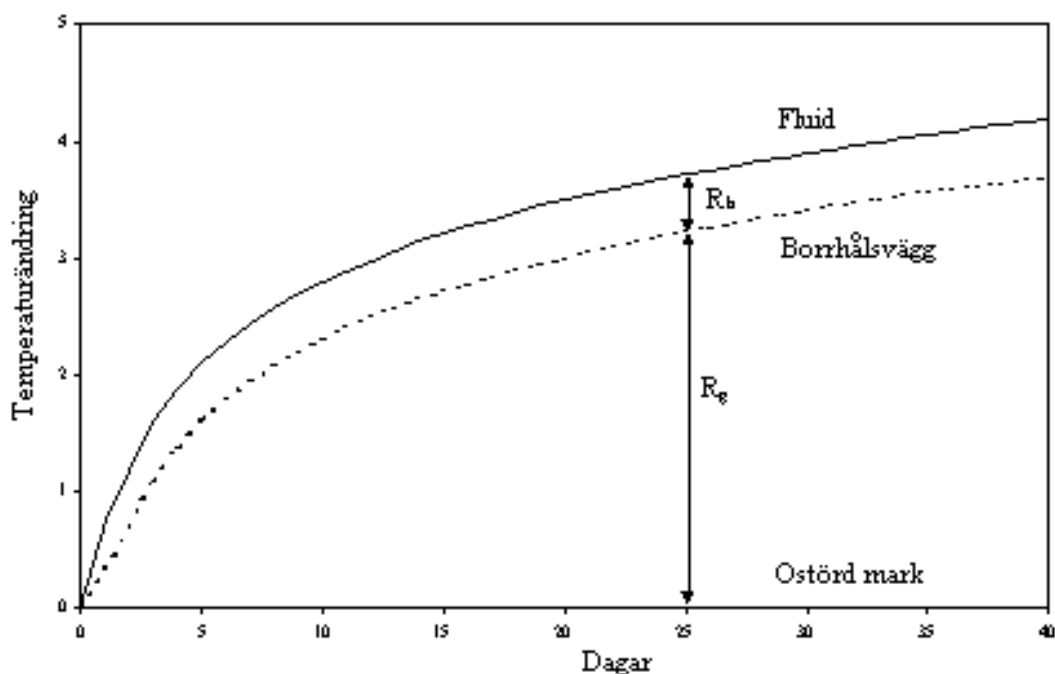


Figur 8.11. Borrhålsmotstånd som funktion av fyllnadsmaterialets värmeledningsförmåga och placeringen av U-rörets skänklar i borrhålet.

Borrhålsvärmemotståndet kan ha en betydande inverkan på systemets termiska prestanda och bör hållas så litet som möjligt. En markvärmesänkarens termiska prestanda beror inte bara på borrhålsvärmemotståndet utan även på det transienta värmemotståndet i marken och på termisk influens från andra näraliggande markvärmesänkare. Den relativa inverkan av borrhålsmotståndet kan därför variera.

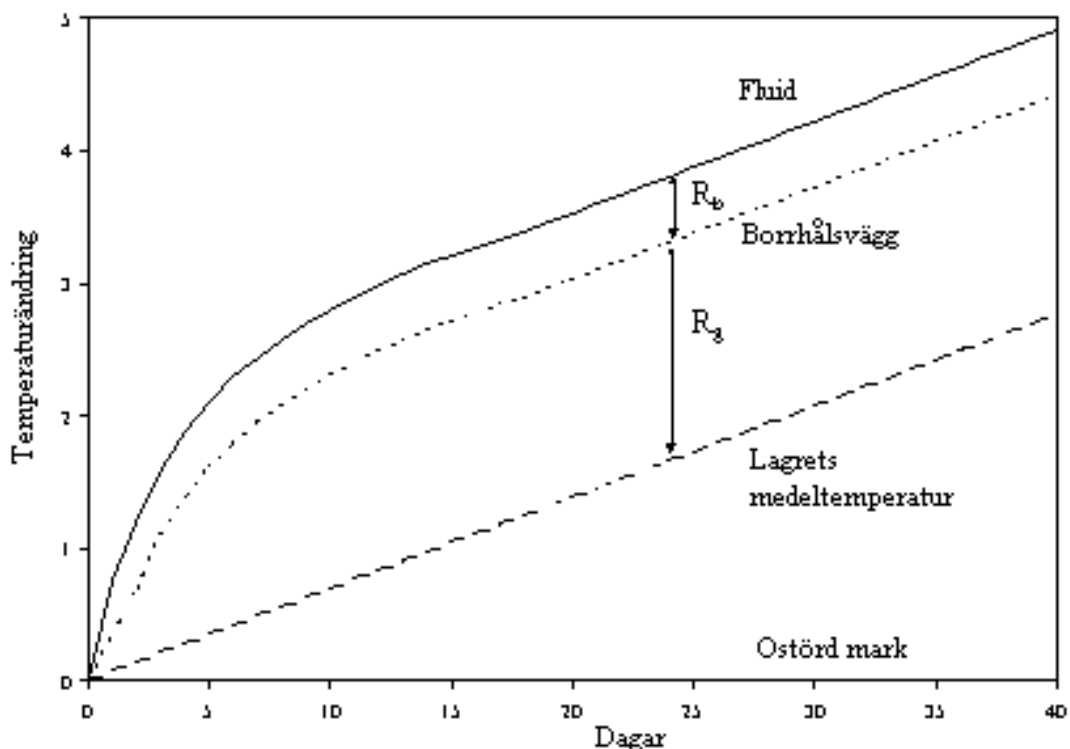
Värmemotstånd i mark

Värmemotståndet i omgivande mark omfattar marken från borrhålsväggen till en lämplig referenstemperatur. Då marken används som värmekälla/värmesänka väljs markens ostörda temperatur T_0 som referenstemperatur. Värmelasten kan antas bestå av en kontinuerlig svit av effektpulser med viss varaktighet. Vi betraktar därför den termiska responsen vid en stegändring i tillförd värmeeffekt q (W/m) per meter markvärmesänkare och kopplar utvecklingen av temperaturen T_b på borrhålsväggen med ett tidsberoende värmemotstånd R_g för marken, så att $T_b - T_0 = q R_g$. Enheten för markens värmemotstånd R_g blir då K/(W/m), se figur 8.12.



Figur 8.12. Markvärmesänkare för system som använder marken som värmesänka/värmekälla. Temperatutveckling vid stegändring i tillförd effekt. Ostörd marktemperatur används som referens.

Vid energilagring används ofta ett stort antal markvärmesänkare som är regelbundet placerade i lagervolymer. Varje markvärmesänkare kan då tillskrivas en del av lagervolymer som sitt närområde. Temperaturen i detta närområde kommer att variera med avståndet till markvärmesänkaren och beroende på driftvillkoren. Närområdets momentana medeltemperatur T_m används som referens för bestämning av markens motstånd. Värmemotståndet R_g mellan temperaturen T_b på borrhålsväggen och närområdets medeltemperatur ges då av $T_b - T_m = q R_g$. Vid effektpulser med en varaktighet på ca 1 vecka utvecklas den termiska influensen med andra näraliggande markvärmesänkare så att temperaturskillnaden blir konstant. Se figur 8.13. En jämförelse med figur 8.12 visar att borrhålsmotståndet kan vara av större relativ betydelse för lagertillämpningar än då marken används som värmekälla/värmesänka.



Figur 8.13. Markvärmesväxlare för system som använder marken som energilager. Temperaturutveckling vid stegändring i tillförd effekt. Lagrets medeltemperatur används som referens.

8.5.3 Värmeutbyte mellan strömningskanaler

Värmebärartemperaturen längs strömningskanalerna varierar beroende på energibalansen mellan konvektiv värmetransport i kanalen och värmeutbytet med omgivningen. Temperaturskillnaden mellan uppåt- och nedåtgående kanal kan bli stor, särskilt vid låga flödeshastigheter. Det värmeutbyte som då uppstår mellan kanalerna kan vara av sådan storlek att det märkbart påverkar markvärmesväxlarens effektivitet. För konventionella bergvärmebrunnar med enkla U-rör blir den termiska kortslutningen betydelsefull när flödet är laminärt eller djupet överstiger 200 m (Hellström, 1991).

8.5.4 Effekt av värmekapacitet i fluid och borrhål

Vid en stegändring i tillförd värmeeffekt (t.ex när en värmepump startar) leder detta till en snabb temperaturökning av värmebärartemperaturen. En stor andel av den tillförda värmen absorberas till att börja med i värmebäraren och därefter i andra material i borrhålet. Ökningen av borrhålstemperaturen avtar med tiden och en allt större del av energin avges till omgivande mark. Efter en inledande period kan de kapacitiva effekterna i själva borrhålet försummas. De kapacitiva effekterna är av stor betydelse vid snabba effektvariationer och de tilltar i betydelse med grövre slangar och borrhål. För ett borrhål (diameter 115 mm) med enkelt U-rör (diameter 40 mm) och återfyllt med bentonit är de kapacitiva effekterna betydelsefulla i upp till 10-15 timmar. Man bör under sådana förhållanden ta hänsyn till den totala volymen värmebärare i systemet.

8.6 Termisk influens

Värmeuttag från en markvärmväxlare medför att temperaturen sänks i den omgivande marken. Temperatursänkningen karaktär då värme strömmar från det ursprungligen varma omgivande marken till den kalla markvärmväxlaren är mycket lik den avsänkning som erhålls då vatten strömmar till en vattenbrunn i ett grundvattenförande skikt. Temperatursänkningen är störst närmast markvärmväxlaren och avtar med avståndet. Värmeledningen är dock en relativt långsam process, vilket medför att temperatursänkningen räckvidd, området för *termisk influens*, blir betydligt mindre. I svenskt urberg är räckvidden i storleksordningen ca 10 meter efter ett år, ca 20 meter efter 5 år, o.s.v. För mark med lägre värmeledningsförmåga blir räckvidden kortare. Om en markvärmväxlare ligger inom området för termisk influens från en eller flera andra markvärmväxlare resulterar detta i en lägre värmebärartemperatur än om den varit opåverkad. Hur stor sänkningen blir beror huvudsakligen på omgivande markvärmväxlarens årliga energiuttag per meter markvärmväxlare och på avståndet till dessa. Om man vid dimensionering inte tar hänsyn till termisk influens, så kommer värmebärartemperaturen till värmepumpen att bli lägre än förväntat. Värmepumpen får då en lägre värmefaktor och förbrukar därmed mer energi (högre driftskostnad). För att erhålla samma dimensionerande lägsta värmebärartemperatur måste den totala längden markvärmväxlare ökas då termisk influens förekommer (Eskilson, 1987).

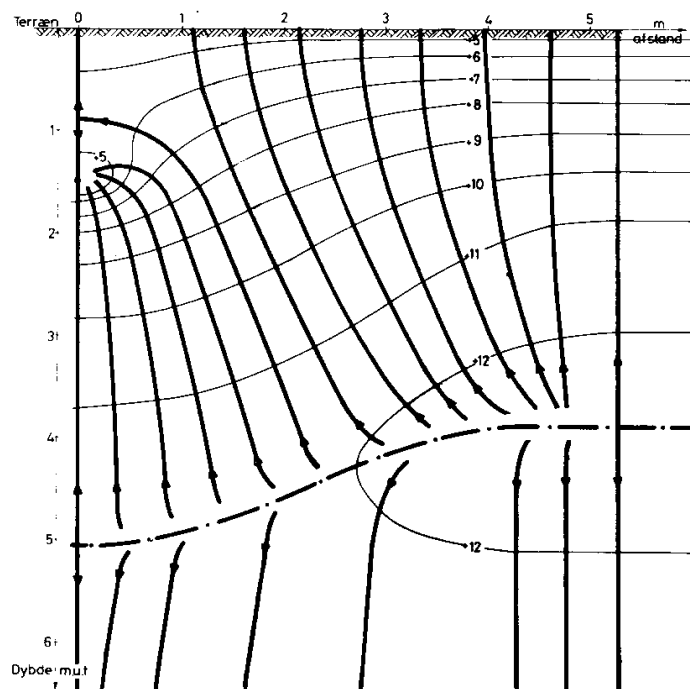
8.7 Fältförsök med en horisontell slang

8.7.1 Danmarks Geoteknisk Institut 1975-84

Mätning av värmetransport i mark har genomförts vid en försöksanläggning i Lyngby (Balstrup, 1977). Marken, som består av glaciala avlagringar, anses representativ för 75 % av de danska ytjordskikten. Två 10 meters slangar av PEL DN40PN6 (diameter 40 mm/32,6 mm) användes. Den ena var placerad horisontellt på 1,5 meters djup, medan den andra sträckte vertikalt från 0,5 till 10,5 meters djup. Värmebärarfluiden utgjordes av 16 % metylalkohol. Värmeöverföringen skedde genom koaxial strömning i slangarna med mätning av flöde, temperaturnivå och temperaturdifferens mellan inlopp och utlopp. Mätperioden sträckte sig från maj 1975 till maj 1976. Temperaturen i omgivande mark mättes med ett stort antal temperaturgivare. Den naturliga marktemperaturens variation var 0-20 °C på 0,5 m djup, 8-12 °C på 6 m djup, och 8-10 °C på 12 m djup. Årsmedeltemperaturen i marken uppmättes till 9,6 °C. En sänkning av marktemperaturen p.g.a värmeuttag förväntades öka ackumuleringen av global instrålning i de ytliga jordskikten. Värmeledningsförmågan för ofrusen och frusen moränlera uppskattades till 1,85 W/m,K respektive 2,70 W/m,K vid full vattenmättnad, vilket antas gälla under ca 1 meters djup. Vid frysning konstaterades bildning av islinser p.g.a kapillärsugning av vatten från omgivande ofrusen mark. Vid långsam frysning av moränleran under flera år anges att man har kunnat påvisa en ökning av vatteninnehållet med ca 2,5 %. Detta bör inte påverka värmeledningsförmågan med mer än 1 %.

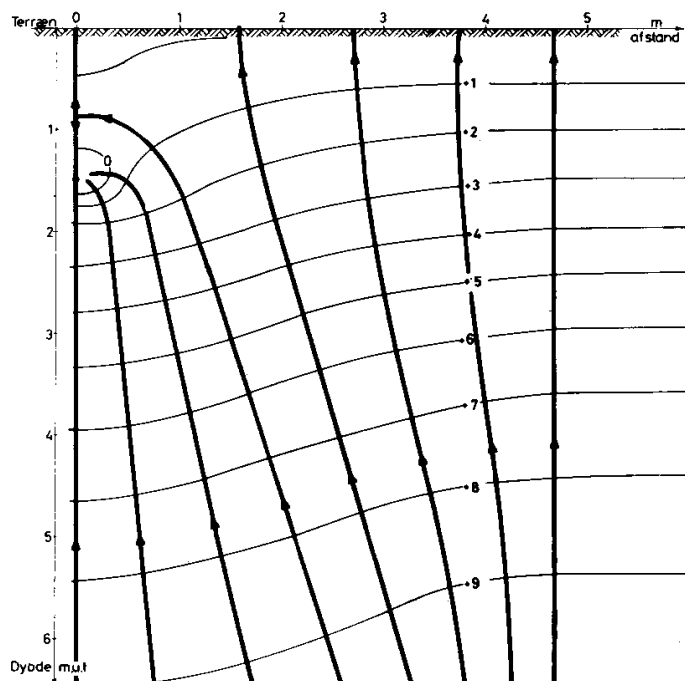
Värmeuttaget i det horisontella systemet var ca 30,7 W/m från juli till november och föll sedan till 20,8 W/m fram till början av maj. För det vertikala systemet var motsvarande värden 20,2 W/m respektive 17,2 W/m. Temperaturen på slangens yttervägg var ca -3 °C. Rapporten (Balstrup, 1977) visar en unik rekonstruktion av marktemperaturer och värmeflöden i en svit med figurer, som täcker hela mätperioden. Ett urval av dessa visas i figur 8.14-17. Tjälning av marken runt röret startade i november 1975 med maximalt frusen markcylinder runt det horisontella röret i april 1976, med en medeldiameter på 0,6 meter. Under perioden 1976-05-10 till 1976-08-11 regenererades marktemperaturen väsentligen till djupet 6 meter, emedan en svag temperatursänkning återstod på större djup. På 0,5 till 1,0 meters djup var regenereringen

tämligen god redan i april innan värmeuttaget hade avslutats, vilket är angeläget eftersom detta djup utgör en väsentlig del av växtzonen för gräs och buskar.



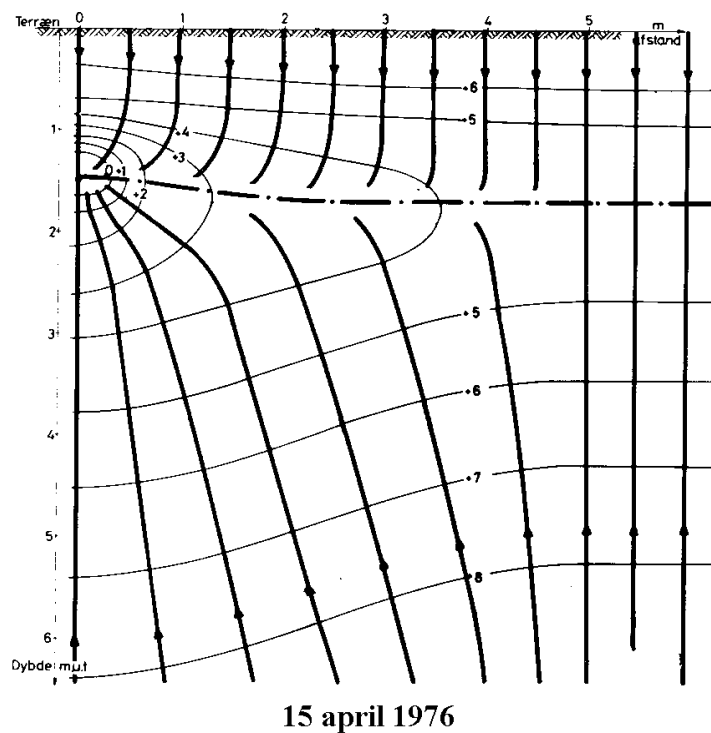
15 november 1975

Figur 8.14. Horisontellt rör på 1,5 m djup, Lyngby, Danmark. Uppmätta marktemperaturer och beräknade strömlinjer för värme, 15 november 1975 (Balstrup, 1977).

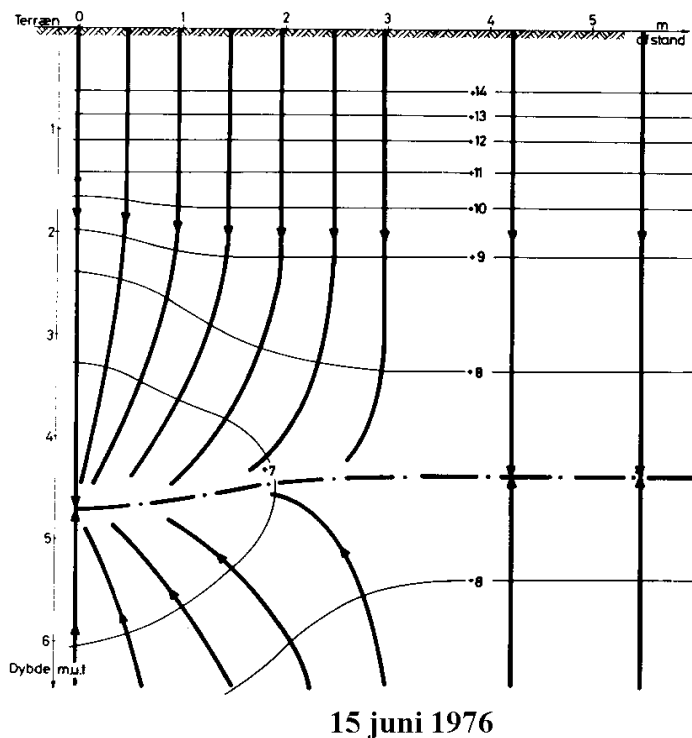


15 mars 1976

Figur 8.15. Horisontellt rör på 1,5 m djup, Lyngby, Danmark. Uppmätta marktemperaturer och beräknade strömlinjer för värme, 15 mars 1976 (Balstrup, 1977).



Figur 8.16. Horisontellt rör på 1,5 m djup, Lyngby, Danmark. Uppmätta marktemperaturer och beräknade strömlinjer för värme, 15 april 1976. Tidpunkt för maximal tjälning (Balstrup, 1977).



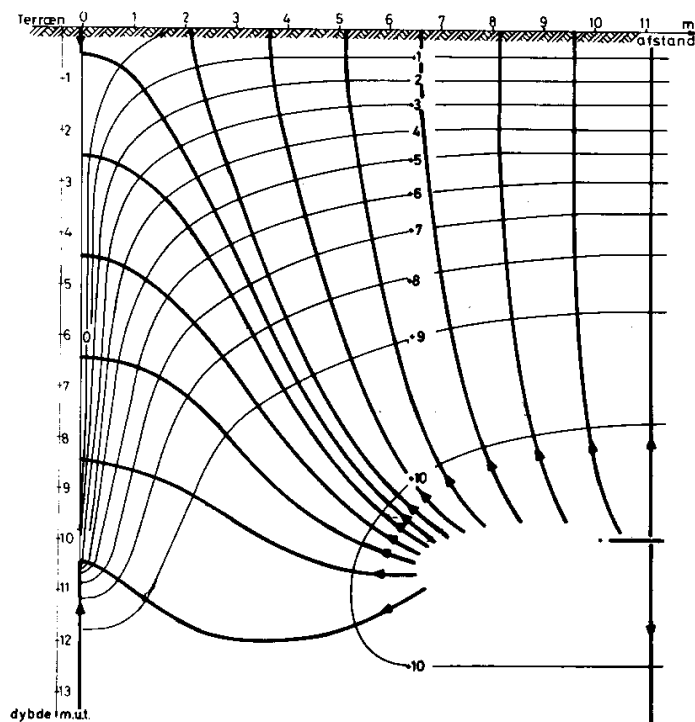
Figur 8.17. Horisontellt rör på 1,5 m djup, Lyngby, Danmark. Uppmätta marktemperaturer och beräknade strömlinjer för värme, 15 juni 1976 (Balstrup, 1977). Tidpunkt efter viss regenerering av marken.

För den vertikala slangen nådde temperaturavvikelsen 1 °C ifrån ostörd marktemperatur maximalt ett avstånd på 5,5 meter från rörelsen och maximalt 2 meter under rörets botten under hela värmeuttagsperioden och den efterföljande regenereringsfasen. Tjälning runt röret började redan i juli 1975, efter ett par månaders värmeuttag. I mars inträffade maximal tjälning med en diameter på ca 2 meter alldeles under markytan. Se figur 8.18. I april försvann den ytliga tjälningen medan tjälningen längre ned runt röret nådde sitt maximum med en diameter på ca 0,5 meter. Regenereringen för det vertikala systemet gick långsammare. Temperaturer och värmeflöden för 15 juni 1976 visas i figur 8.19. Vid sommarens slut återstod fortfarande en temperaturavvikelse på ca 1-1,5 °C.

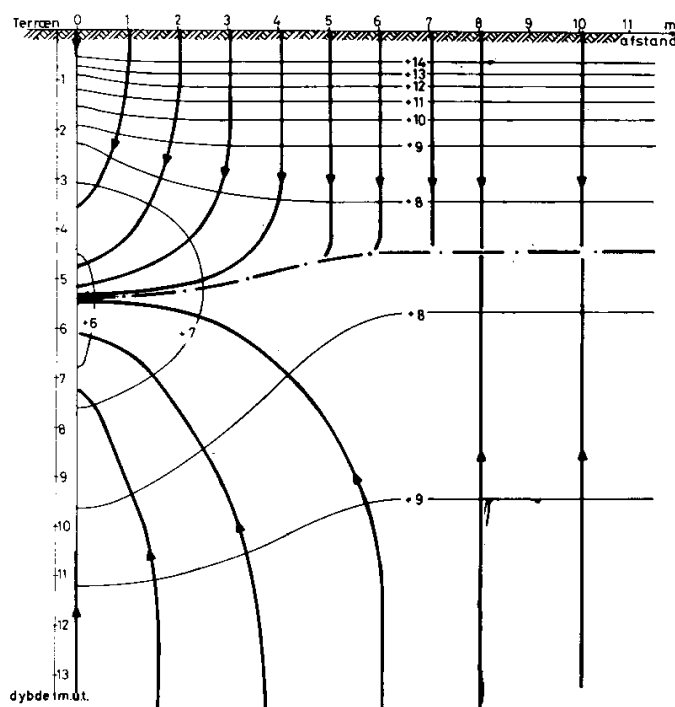
I en annan nyetablerad ytjordvärmeanläggning i Farum utfördes detaljerade mätningar från november 1975 till april 1976. Fyra slingor, tre med 32 mm PEL (DN32PN4) och en med 40 mm PEL (DN40PN4), grävdes ned på 1,5 meters djup med ett inbördes avstånd på 2 meter. Under 157 dygn motsvarande ca 82 % av den totala värmelasten uttogs 45 kWh per meter slang, vilket ger ett medeluttag på 12 W/m och ett maximalt uttag på 15 W/m. Värmebärartemperaturen sjönk från ca -2,5 °C i december till -4 °C i mars. Temperaturdifferensen mellan inlopp och utlopp ökade från 2 °C till ca 3 °C. Från november till mars strömmade värmen till rören från jordskiktet under 0,5 meters djup. Från och med början av april kom värmen väsentligen från markytan. Temperaturavvikelsen 1 °C från ostörd temperatur nådde maximalt upp till 0,5 meter under markytan och ned till 6 meter under markytan. Systemet utnyttjades för produktion av varmvatten under sommaren. I slutet av sommaren fanns därför ett temperaturunderskott på ca 1-2 °C i hela mätområdet ned till 6 meters djup.

Sammanfattningsvis rekommenderas att jordartsprover tas ned till 6 meters djup vid denna ytjordvärmetillämpning. Provtagningen kan också ge en vägledning om huruvida grundvattenrörelser kan påverka värmeuttaget. För att förbättra värmetransporten rekommenderas att diket återfylls med kvartssand. Om slangarna ligger ovanför grundvattenytan föreslås att diketets botten och sidoväggarnas nedre del täcks med ett tunt, tätt plastmembran för att garantera god vattenmättnad i sandfyllningen.

Porsvig (1986) redovisar erfarenheter från fortsatta mätningar från anläggningarna i Lyngby och Farum, samt dessutom från tre andra anläggningar med ytjordvärme. Försöken visar bl.a. att det finns ett kontaktmotstånd mellan slangarnas yttervägg och den omedelbart omgivande marken. Detta kan vara av samma storleksordning som värmemotståndet i plastslangen. Sammanfattningsvis tyder försöken på att kontaktmotståndet under fältförhållanden för polyeten-slangar kan förväntas ha följande värmeövergångstal α (W/(m²,K)): $30 < \alpha < 150$ W/(m²,K) för partiellt mättad sand (mättnadsgrad = 0,2), $30 < \alpha < 250$ W/(m²,K) för vattenmättad sand och moränlera. Sammanfattas samtliga försök med hänsyn taget till rördiameter och uttryckt som värmemotstånd R_c ligger de uppmätta värden i intervallet $0,04 < R_c < 0,10 - 0,20$ K/(W/m). Jämförelse med försök i Kanada visar att man där för PVC- och PEL-rör i vattenmättad lera funnit α mellan 190 och 272 W/(m²,K), vilket ger kontaktmotstånd på 0,11 respektive 0,035 K/(W/m).



Figur 8.18. Vertikalt rör till 10,5 m djup, Lyngby, Danmark. Uppmätta marktemperaturer och beräknade strömlinjer för värme, 15 mars 1976 (Balstrup, 1977).



15 juni 1976

Figur 8.19. Vertikalt rör till 10,5 m djup, Lyngby, Danmark. Uppmätta marktemperaturer och beräknade strömlinjer för värme, 15 juni 1976 (Balstrup, 1977).

Vid ett annat fältförsök studerades fuktförhållandena kring två ytjordvärmeslangar i lerjord. Jordlagren består av ett övre skikt sandig lera med inslag av mull ned till 1,2 m, och därunder

finkornig moränlera. För ändamålet grävdes ett 0,2 meter brett dike ned till 0,75+0,1 meters djup och ett 0,5 meter brett dike till djupet 1,5+0,1 meter. Efter grävningen återfylldes båda dikena med 0,1 m sand i botten. Därefter nedlades slang och ytterligare + 0,1 m sand fylldes på. Det sammanlagda sandskiktet har en tjocklek på 0,15-0,2 meter. Sandskikten genomvattades och installationen avslutades med att dikena fylldes till markytan med jord. Mätningar av fukttinnehållet på vintern visade på nära vattenmättade (80 %) förhållanden från djupet 0,75 m och nedåt, samt att sandskiktet kring slangen på djupet 0,75 m hade en vattenmättnad av 90-100 %. Under sommaren sjönk vattenmättnaden nära markytan. Vattenmättnaden i leran ökade med djupet till 70 % på djup större än 1,2 m. Denna uttorkningsprocessen bestäms dels av solinstrålning och dels av jordtypen. I sandskiktet omkring slangen på 0,75 m djup var nu vattenmättnaden endast 30 %. Sandlagret uttorkades således kraftigare än omgivande lerjord, vilket förklaras av att sandskiktet dräneras av lerjordens negativa portrycksmiljö (kapillärkrafter). Vattenmättnadsgraden kring slangen på 1,5 m djup minskade från 80 % till 70 %.

Porsvig (1986) ger följande redovisning: Temperaturen på 0,75 meters djup är under vintern ca 2 °C lägre än vid 1,5 m och tvärtom på sommaren. Fuktförhållanden på djupet 0,75 m i lerjord varierar med årstiden, men variationen är så liten att värmeledningsförmågan i leran reduceras med endast ca 10 till 20 % under sommaren. På 1,5 meters djup är variationen mindre och vattenmättnaden högre, så försämringen av värmeledningsförmågan är mindre än 5 %. Om slangarna ligger under grundvattenytan förblir de termiska egenskaperna oförändrade under hela året. För sand ovan grundvattenytan blir variationen i vattenmättnad betydligt större, från 20 % till 60 %, vilket motsvarar en sänkningen av värmeledningsförmågan från vinterförhållanden till sommarförhållanden på 30-40 %. Sammanfattningsvis framhävs att de termiska egenskaperna är gynnsammare på 1,5 m djup än på 0,75 m djup.

Skälet till att lägga slangen ytligt är bl.a att nå en snabbare regenerering av temperaturförhållandena under våren. Om anläggningen används för värme under vintern och kyla under sommaren är denna fråga inte lika viktig. Dessutom är det viktigt att värme återförs i vattenmättad markmiljö för att undvika uttorkning och därmed försämrade värmeöverföringsegenskaper i omgivande skikt. Dessa skäl talar för att slangen vid kombinerad värme/kyla bör förläggas djupare än vid rena värmeapplikationer.

Väljs alternativet att omge slangen med sand har detta liknande effekt som att öka slangdimensionen. Detta förutsätter dock att sanden är vattenmättad, eftersom torr eller partiellt omättad sand har sämre värmeledningsförmåga än omgivande jord. En rekommendation är att lägga ned ett dräneringsrör så att sandskiktet kan vattenmättas innan belastning med värmeförsel sker under sommarhalvåret. Detta gäller endast i lerjord, eftersom ett extra sandskikt i partiellt mättad sand inte förbättrar förhållanden och tillfört vatten sannolikt dräneras bort.

8.7.2 Surte 1980-83

Under 1980-81 anlades horisontella slangar i ett villaområde i Surte (i det gamla skredområdet) på 0,8-1,0 m djup med ett horisontellt c/c-avtsånd på 1,0-1,5 m (Wilén, 1983). Slanglängden var 300 m för varje villavärmepump, av vilka två stycken detaljstuderades under den stränga vintern 1981-82. Marken utgjordes av torrsorpelera med värmeledningsförmågan 1,2 W/m·K och värmekapaciteten 3,0 MJ/m³K. Endast en liten zon runt slangarna tjälades under vintern. Man kunde dock observera en markant vattenrörelse mot fryszonen. Vattenkvoten var ca 90 % för frusen lera mot endast ca 40 % för ofrusen lera. Medeleffektuttaget för de två värmepumparna under drift för vintermånaderna januari-mars 1982 var ca 17,5 W/m och värmebärartemperaturen ca -1,0 °C. Värmepumparnas relativa gångtid var 30-45 %. Anlägg-

ningarna ansågs vara försiktigt dimensionerade, samtidigt som husens energibehov var lägre än beräknat. Energiuttagen var endast ca 20 kWh/m² och år. Mätningar genomfördes under tre år. Vegetationssäsongen (varaktig temperatur över +5 °C på djupet 25 cm) för marken ovan ytjordvärmekollektorn var 20, 15 respektive 7 dygn kortare under 1981, 1982 respektive 1983. I stort sett hela skillnaden infaller på våren. Viss slangrörelse observerades under perioder med frysning. Ingen påverkan på markytan kunde registreras.

8.7.3 University of Tennessee, USA, 1982-84

Johnson et al (1985) studerade ett system för både värme och kyla där värmepumpen kopplades till en 206 meter lång markslinga på 1,2 m djup i lera. Under det första året fungerade anläggningen tillfredsställande för värmeuttag, men dåligt vid kyllost då återfyllnadsmaterialet av lera runt slangarna torkade ut. Man hade även haft problem med att leran klumpade ihop sig och skapade hålrum vid återfyllningen. Det uppges att vattenmättnaden i leran på 1,2 m djup sjönk från 100 % till 70 % under sommaren. Värmeledningsförmågan sjönk från 1,6 W/(m,K) på vintern till 0,5 W/(m,K) under sommaren, vilket medförde att markslingans värmeöverföringskapacitet halverades. Inför den andra säsongen byttes återfyllnaden ut till fin sand. Vattenmättnaden i sanden var 80 % i början av sommaren och höll sedan en relativt hög nivå fram till september, då den snabbt torkade till en vattenmättnad av 10 %. Anläggningen fungerade bättre under den andra sommaren, men eftersom kylbehovet då var mindre, så är det inte säkert att problemet med uttorkning löstes med sandåterfyllnaden.

8.7.4 Sju svenska ytjordvärmeanläggningar 1976-1987

Ahlkrona och Mogensen (1987) redovisar fältmätningar av sju ytjordvärmeanläggningar för småhus. Orter och basdata för ytjordvärmekollektorns utformning och driftsvillkor framgår av [tabell 8.2](#). Uppföljningarna har pågått mellan tre och sju år. Energiuttaget från ytjordvärmekollektorerna har varierat mellan 25 och 73 kWh/m/år.

Tabell 8.2. Basdata för utvärdering av sju svenska ytjordvärmeanläggningar (efter Ahlkrona och Mogensen, 1987).

Ort	Årsmedel lufttemp.	Slanglängd (m)	Slangdjup (m)	Energiuttag/m (normalår) (kWh/m)	Effektuttag under vintern (W/m)	I drift datum
Kungälv	7,2	483	1,8	29	11	07.76
Djursholm	6,6	280	0,6	73	16	11.77
Karlstad	5,9	490	0,9	45	9	11.77
Arvika	5,6	319	0,8	28	15	05.78
Eda	4,8	575	1,0	29	9	08.78
Umeå	3,2	480	0,9	25	9	09.77
Luleå	2,0	500	1,0	28	10	11.78

Ytjordvärmekollektorerna består av PEL-slang 40/35 mm. I Arvika har slangens plöjts ned. För de övriga anläggningarna har slangens grävts ned med skopa eller kedja. Det kan påpekas att slangdjupet i Kungälv (1,8 m) är betydligt större än för de övriga anläggningarna (0,6-1,0 m). Det horisontella avståndet mellan slangarna är mellan 1 och 2 m, förutom i Kungälv där det är 5 m. Cirkulationspumparna har en axeleffekt på 480 W och 320 W och ger ett flöde på 35 till 55 liter/min med turbulenta strömningsförhållanden för etylenglykol (15-25 % vikt).

Värmepumparna klarar av att täcka hela värmebehovet för samtliga hus utom i Karlstad, som har en effekttäckning på ca 50 %. Angivna värden för effekttutttag under vintern avser effekttutttag från markslingan då värmepumpen är i drift vid tiden för maximalt effektbehov för huset. Uppmätta energiuttag har korrigerats till normalår.

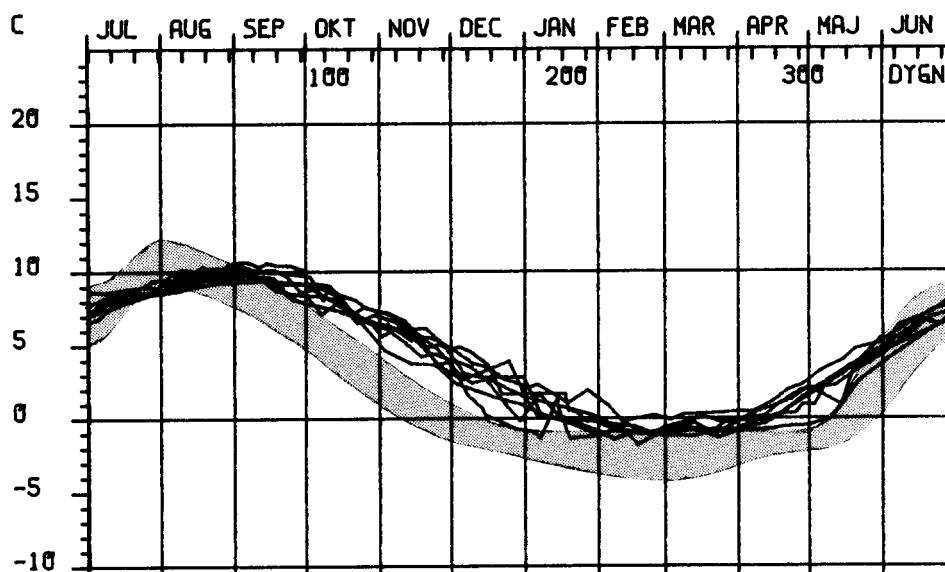
Markens egenskaper vid de sju anläggningarna ges i **tabell 8.3**. Uppgifterna i tabellen är baserade på provtagningar utförda under oktober-november.

Tabell 8.3. *Sammanställning av markens egenskaper för de olika ytjordvärmeanläggningarna (efter Ahlkrona och Mogensen, 1987).*

Ort	Jordarter	Grundvat- tennivå (m)	Värmeledningsförmåga, ofrusen			
			Vid slang	Ovan slang	Bredvid slang	Ovan och bredvid slang
Kungälv	Mellanlera, styv lera	0,5				
Djursholm	0-2,5 m mellanlera, styv lera, sedan friktionsjord	1,0	1,3	1,3	1,8	
Karlstad	0-3m siltig finsand 3 - m grövre sand	3,0	1,5	1,3		1,4
Arvika	0-2 m lerig silt 2-5 m siltskiktad lera	1,0				
Eda	Torr mellansand	6,0	1,0	1,2		1,2
Umeå	Friktionsjord, dytorv	1,0	2,3	1,9		1,2
Luleå	0-2 m finsand 2- m gyttjig silt	1,5	1,3	1,1		1,0

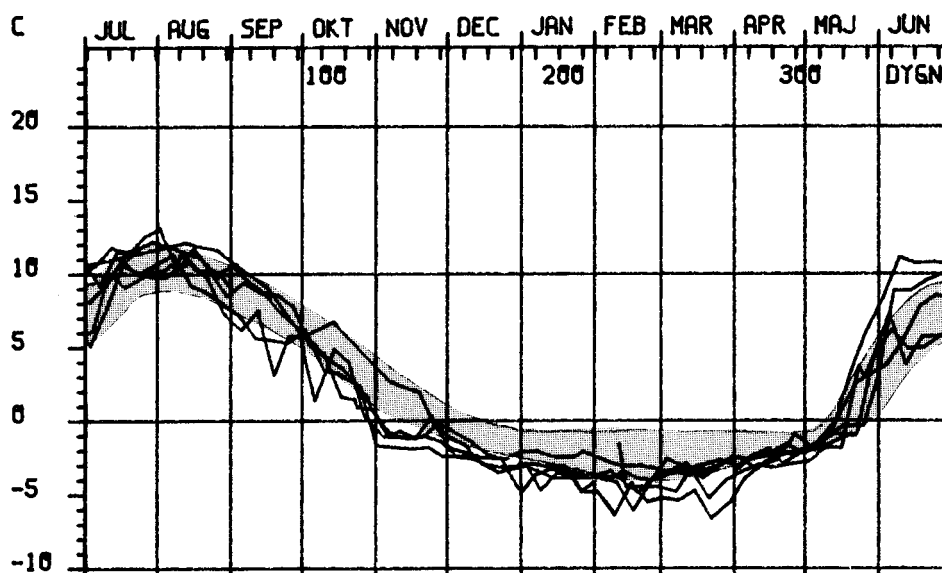
I Kungälv bestod översta markskiktet, 0-1 m, av torrskorpelera med torrdensitet 1 200 kg/m³ och vattenkvot 40 % (viktsprocent). Under detta skikt följde mellanlera med torrdensitet 830 kg/m³ och vattenkvot 90 %. I Djursholm hade den styva leran en torrdensitet av 1 577 kg/m³ och en vattenkvot på 28 %. I Karlstad hade den siltiga finsanden en torrdensitet på 1 400 kg/m³ och vattenkvoten 15 %. Under våren uppmättes en vattenkvot på ca 10 % vid slangarna. I Eda fann man att det runt slangen bildades ett område med hård tjäle och högre vattenmättnad, vilket medförde lokalt högre värmeledningsförmåga. Sanden var finare runt slangen varför det är svårt att säga om vattenhaltsökningen beror på bättre vattenhållande förmåga eller på fuktvandring till det kalla området. I Umeå låg det ett några decimeter tjockt skikt med torv och matjord ovanpå 0,6 m sandig jord med vattenkvot 19 %. Djupare ned övergick jorden till sandig silt med vattenkvoten 12 %. På 2,3 m djup påträffades morän. I Luleå uppmättes i maj/juni 1978 en vattenkvot på 10 % på slangnivån innan ytjordvärmslangen hade installerats. I oktober 1982 uppmättes vattenkvoten 19 %. Torrdensiteten för tre prover varierade mellan 1 490-1 640 kg/m³.

I **figurerna 8.20-25** ges mätresultat och kommentarer angående värmebärartemperaturen för några av de sju anläggningarna. Den visade temperaturen avser medelvärde mellan in- och utgående värmebärare uppmätt 3-4 min efter att värmepumpen har startat. Antalet kurvor i diagrammet motsvarar antalet mätsäsonger. För att underlätta jämförelsen mellan anläggningarna är variationen av medeltemperaturen för fem av anläggningarna (Djursholm, Arvika, Eda, Umeå och Luleå) inlagda som en skuggad yta.



Figur 8.20. Kungälv. Värmebärartemperatur 1976/77 - 1983/84 samt 1986/87 (Ahlkrona och Mogensen, 1987).

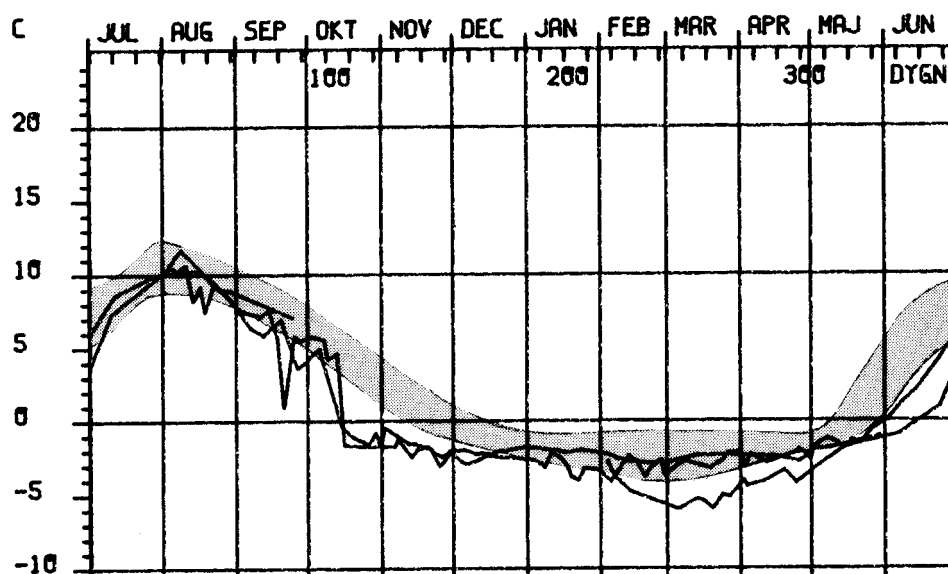
Kungälv. Variationen av värmebärarfluidens temperatur är märkbart fasförskjuten i förhållande till de andra anläggningarna p.g.a. den djupare förläggningen av slangen (figur 8.20). Liten volym fryst mark noterades runt slangen (några cm runt utgående slang). Ingen märkbar långsiktig nedkylning av mark kunde konstateras trots långsam regenerering på slangnivån.



Figur 8.21. Djursholm. Värmebärartemperatur 1977/78 - 1983/84 (Ahlkrona och Mogensen, 1987).

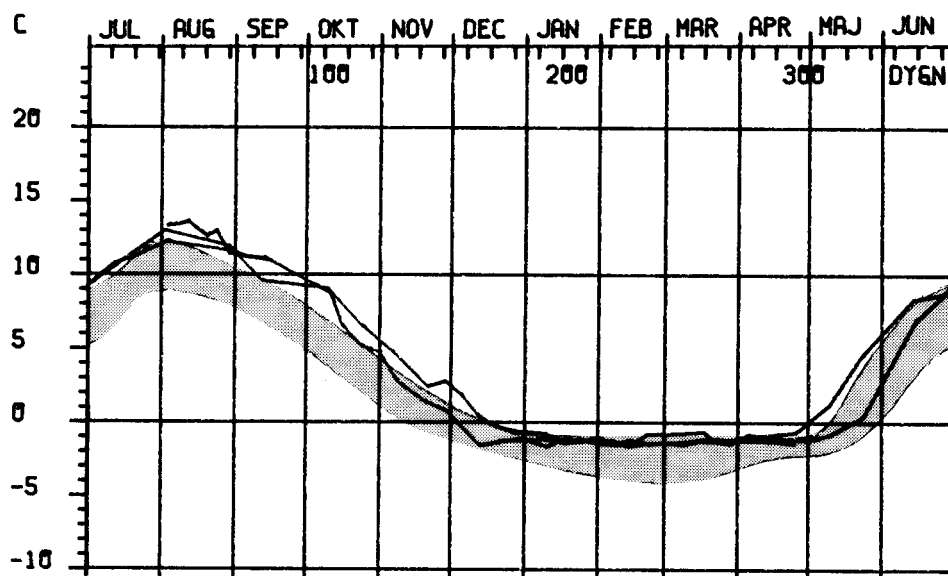
Djursholm. Denna anläggning har den största effekt- och energibelastningen. Värmebärartemperaturen under vintern är därför låg (figur 8.21). Tillgängligt latent värmeinnehåll runt

slangen bedömdes vara litet och anses förklara varför kurvans utplaning under vintern är svag. Regenereringen under våren är mycket snabb beroende på ytlig förläggning av slangen.



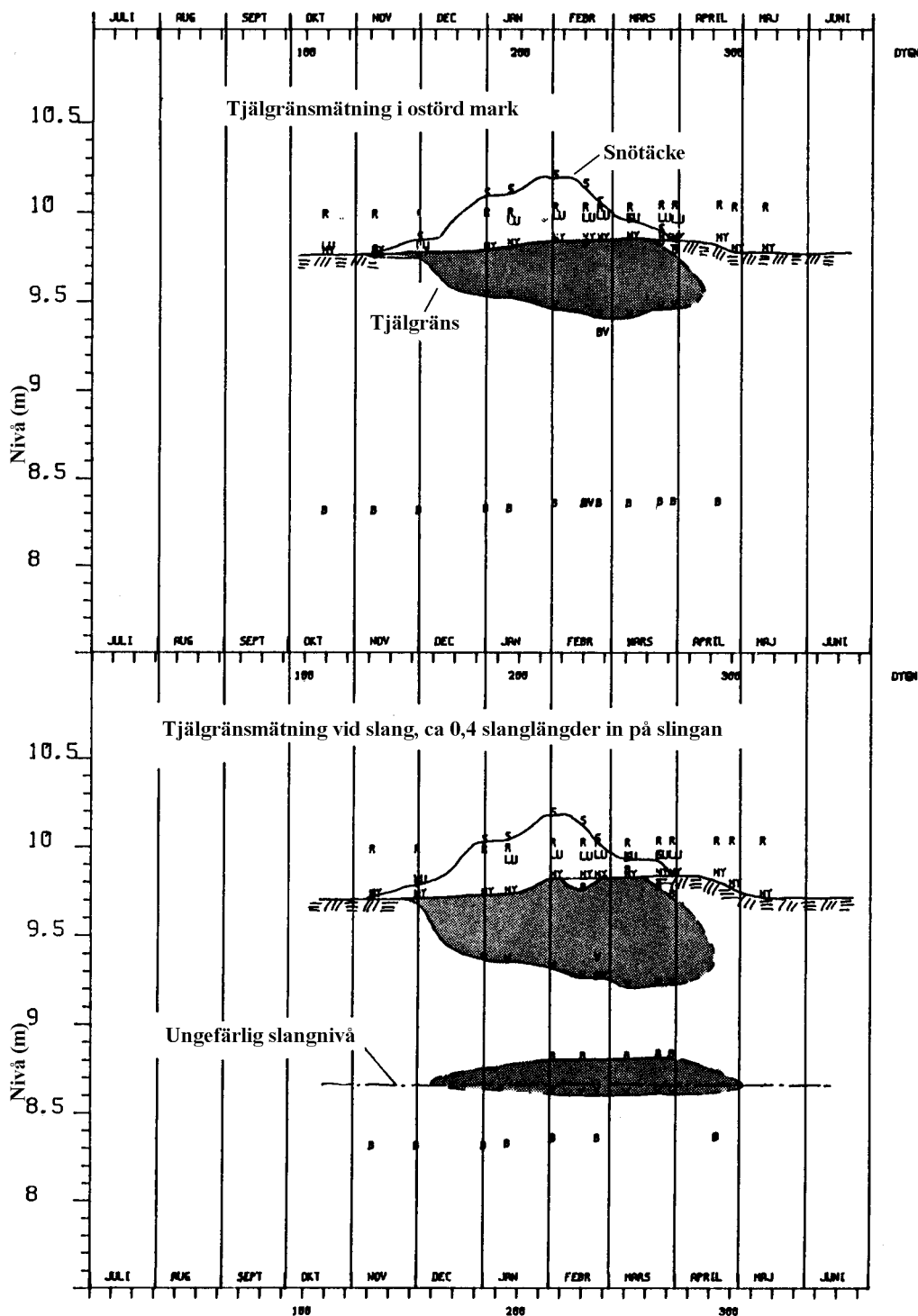
Figur 8.22. Karlstad. Värmebärartemperatur 1980/81 - 1983/84 (Ahlkrona och Mogensen, 1987).

Karlstad. Temperaturkurvan avspeglar att värmelasten för värmepumpen här har mer av baslastkaraktär (effekttäckning 50 %) än vid de andra anläggningarna (figur 8.22). Under en lång period ligger värmebärartemperaturen stabilt strax under 0 °C. Den avvikande kurvan med lägre värmebärartemperatur under vårvintern hänför sig till en längre period med kall väderlek och ringa snötäcke.

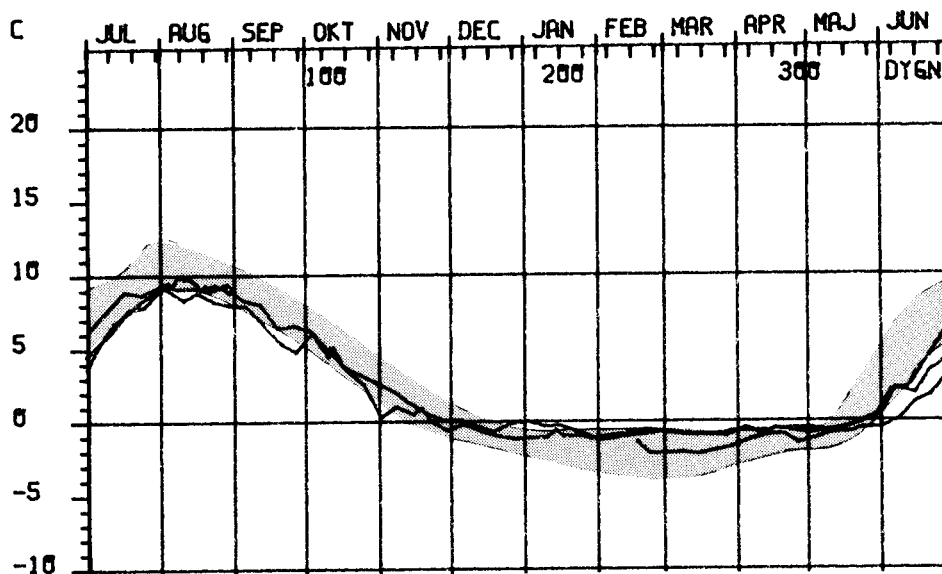


Figur 8.23. Arvika. Värmebärartemperatur 1980/81 - 1983/84 (Ahlkrona och Mogensen, 1987).

Arvika, Slangarna är här förlagda i silt med god vattenmättnadsgrad och därmed stort latent värmeinnehåll. Runt slangarna erhöles en begränsad tjälning, vilken ej växte ihop med den naturliga tjälen under markytan. Detta bedömdes ge goda driftsförhållanden. Temperaturkurvan är mycket plan under vintern (figur 8.23). Figur 8.24 visar tjäle, snödjup och markrörelser för ostörd mark och vid ytjordvärmekollektorn i en punkt ca 40 % in på slanglängden under året 1981/82.



Figur 8.24. Arvika 1981/82. Tjälgräns, snötäcke och markytans nivå (Ahlkrona och Mogensén, 1987). Tjälolat område är markerat svart i figuren.



Figur 8.25. Luleå. Värmebärartemperatur 1980/81 - 1983/84 (Ahlkrona och Mogensen, 1987).

Luleå. Denna anläggning visar också relativt hög och plan temperaturkurva under vintern (figur 8.25). Det förmodas att vattenhalten antingen är eller blir relativt hög runt slangen under vintern. Jorden fryser mellan rör och markyta.

Anläggningen i Eda bedömdes ha de sämsta markförhållandena (sand med låg grundvattenyta) för värmeupptagning. Trots måttligt energi- och effektuttag sjunker värmebärartemperaturen till $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ under vintern. Det låga vatteninnehållet medför litet latent värmeinnehåll och dålig utplaning av temperaturkurvan under vintern. I Umeå är anläggningen lika hårt belastad som i Eda, men värmebärartemperaturen runt slangen är stabil omkring $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ under vintern. Mätningar visade att det knappt bildades någon tjäle runt slangen. Orsaken till den höga värmebärartemperaturen antas bero på den vattenmättade moränlerans höga värmeledningsförmåga och en möjlig påverkan av grundvattenflöde.

Ahlkrona och Mogensen (1987) gör följande övergripande kommentarer till mätresultaten. Diagrammen över värmebärartemperaturen indikerar knappast någon långsiktig variation. Variationer mellan åren förklaras med variationer i utetemperatur, snödjup och värmeuttag. Datorsimuleringar indikerar att insvängning till fortvarighetstillstånd tar två till tre säsonger vid identiska uppvärmningssäsonger. Farhågor att värmeuttaget skulle förändra markens fysikaliska egenskaper så att värmebärartemperaturen påverkas verkar överdrivna. Snötäckets positiva inverkan påpekas (se avsnitt 8.3.2).

Resultaten visar också att de anläggningar som dimensionerats så att de kring slangen får en begränsad tjälkropp som är skild från den naturliga tjälbildningen från markytan erhåller den stabilaste värmebärartemperaturen. Värmebärartemperaturen är då förhållandevis okänslig för variationer av snödjup och utetemperatur under vintern och dessutom är variationen mellan olika vintrar liten. Dessa anläggningar karaktäriseras av ett litet energiuttag i förhållande till tillgängligt latent värme runt slangen. Anläggningar med större energiuttag erhåller en sam-

manhängande tjälkropp från markytan och ner till området kring slangarna och får en betydligt mer varierande värmebärartemperatur.

Två av anläggningarna, Djursholm och Arvika, rapporterade tjälpåverkan i form av vågig och sprickig markyta. I Djursholm är markkollektorn hårt belastad och grunt förlagd. Marken utgörs av mellanlera och styv lera på friktionsjord/berg. I Arvika ligger kollektorn på normalt djup i en tjälaktiv silt. Däremot noterades ingen ytpåverkan från slangar i relativt styv lera med djup förläggning i Kungälv.

8.8 Fältförsök med flera horisontella slangar

8.8.1 New York State, USA, 1983-84

Hughes (1985) jämförde markvärmväxlare med en respektive två horisontella slangar i samma dike. Enkel rak slang anbringades på 1,5 meters djup i ett 90 m långt dike och två slangar på djupet 0,9 m och 1,5 m i ett annat 90 m långt dike. De två slangorna belastades med samma inloppstemperatur och flöde. Inloppstemperaturen var som lägst $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mätningarna av värmeupptagning visade att diket med två slangar gav ungefär dubbelt så mycket energi som diket med en slang fram till mitten mars. Vid denna tidpunkt sjönk kvoten till 156 % p.g.a. termisk influens mellan slangarna. Om denna faktor kan antas gälla kan ett 120 meter dike med enkel slang konverteras till ett 75 meter långt dike med två slangar. Ingen inverkan av fuktvandring kunde påvisas. Marktemperaturen återställdes fullständigt till början av juni.

I ett annat försök jämfördes tre vertikala och sex horisontella (1,05 till 1,5 m djup) markvärmesystem. Man fann väldigt liten skillnad mellan vertikala och horisontella markvärmväxlare vad beträffar karaktären av värmebärartemperaturens utveckling under året. Horisontella kollektorer gav något stabilare temperatur under vintern p.g.a. av större slanglängd och utnyttjande av latent värme. De var dock stabila vid en lägre temperatur än de vertikala. Vertikala system är omgivna av högre temperaturer, men det är ändå fördelaktigt att dimensionera systemen så att liknande temperaturer uppnås. Valet mellan horisontell och vertikal installation anses därför kunna göras baserat på installationskostnad och tillgänglig markyta.

Passiv kylning vid vertikal installation hade en marginell kapacitet på eftermiddagen under varma dagar, men var tillgänglig under hela säsongen. Man fann för detta system lägre prestanda än för kompressorkyla på grund av låg kapacitet, långa driftstider för fläktar och hög energiförbrukning hos cirkulationspumpen i markslingan. Passiv kylning från de horisontella slangorna hade otillräcklig kapacitet redan efter en veckas drift p.g.a. regenerering av marktemperaturen från markytan.

En stor osäkerhetsfaktor ekonomiskt ansågs installationskostnaden vara p.g.a. mycket varierande markförhållanden. De främsta möjligheterna till kostnadsänkningar ansågs vara effektiviserad funktion för värme/varmvattenproduktion och förkortning av dikeslängden genom att installera fler slangar per meter dike.

8.8.2 Oak Ridge National Laboratory, USA, 1986

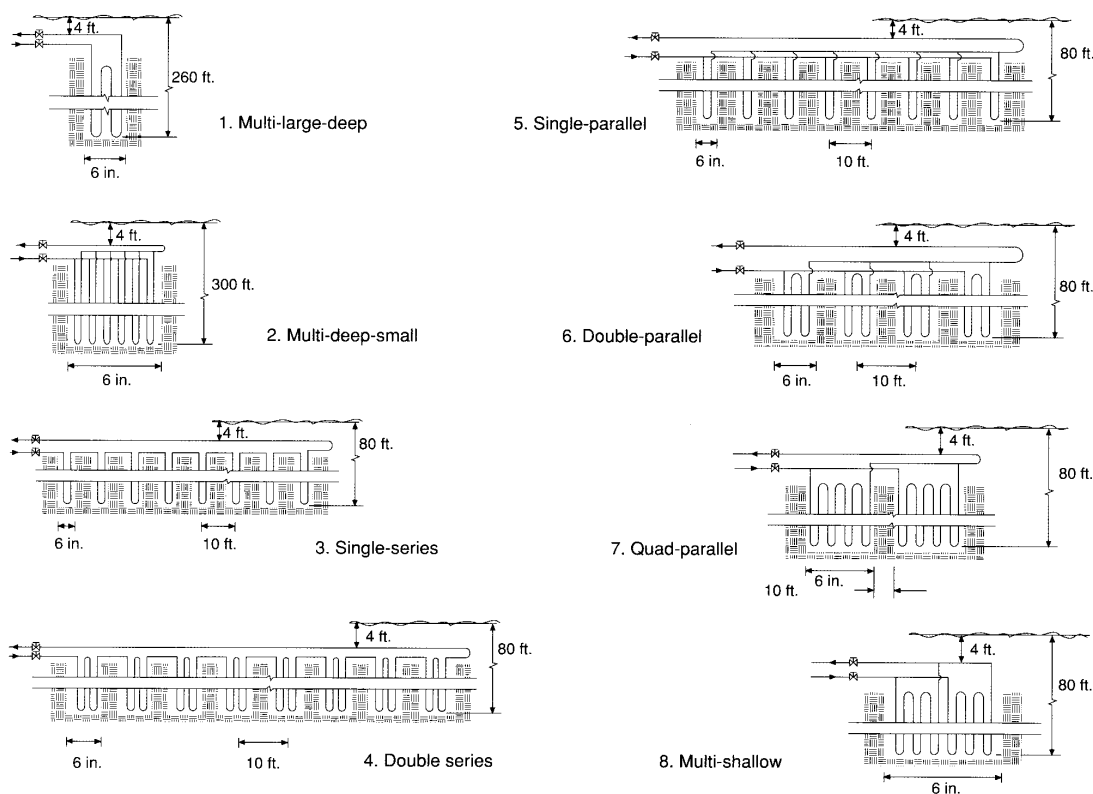
Mei (1986) jämförde horisontella markvärmväxlare med en slang på djupet 1,5 m respektive två slangar på djupet 1,2 m och 1,8 m (in- och utgående slinga i samma dike). Markens värmeledningsförmåga var $2,2\text{ W}/(\text{m},\text{K})$. Termisk influens mellan de två slangarna kunde konstateras. Efter 28 dagars drift under likartade förhållanden upptogs 60 % mer energi per meter dike från de två slangarna jämfört med en slang. Värdet förväntas sjunka något vid längre

drift. Man bedömer att två slangar vid verklig drift bör ge 50 till 60 % mer energi än en slang för samma dikeslängd. För systemet med två slangar undersöktes om värmebärarfluidens inlopp skulle ske till den övre eller undre delen av slingan. Absorberad energi minskade med 25 % om inloppet flyttades från den övre till den undre slingan.

8.9 Fältförsök med vertikala U-rör

8.9.1 Syracuse, USA, 1982-85

Under 1982-85 genomfördes ett fältförsök med markvärmepumpar för mindre kontorsfastigheter i Syracuse, New York, USA (Fleming och Huse, 1985; Hughes och Hackner, 1988). Åtta olika utformningar av vertikala markvärmeväxlare med ett eller flera U-rör undersöktes under två år, se [figur 8.26](#). Värmefaktorn uppmättes till mellan 2,7 och 2,9 och kylfaktorn till mellan 2,9 och 3,1. Den lägsta värmebärartemperaturen till värmepumpen var 1,7 °C på en ort med 3780 graddagar och ostörd markttemperatur 10 °C. Högsta värmebärartemperatur till värmepumpen under kyla-säsongen var 26,7 °C.



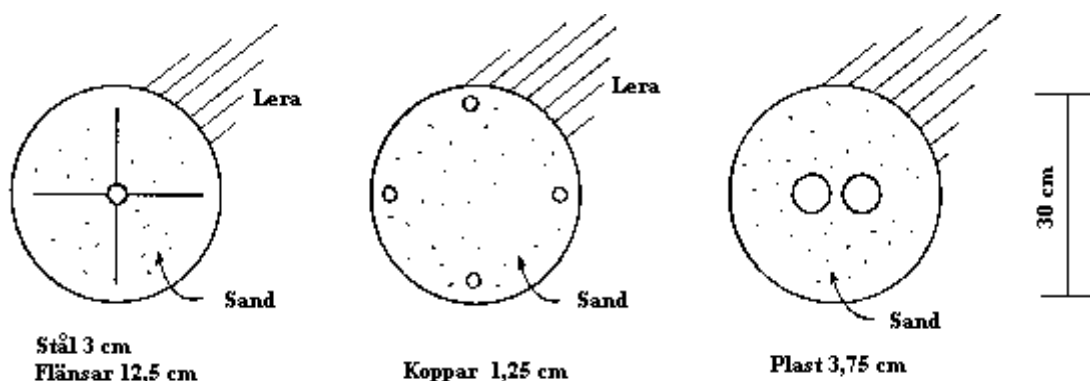
Figur 8.26. Åtta olika vertikala markvärmeväxlare använda vid fältförsök i Syracuse, New York, USA (10 feet = 3,05 m, 1 inch = 2,54 cm) (Hughes och Hackner, 1988).

Man fann att de horisontella förbindelserören från markvärmeväxlarna till byggnaden hade en avsevärd inverkan på värmebärartemperaturen. Under uppvärmningssäsongen motverkades värmeupptagningen i markvärmeväxlarna av värmeflödet från de horisontella förbindelserören, dvs. returflödet från markvärmeväxlarna kylde under passagen genom förbindelseröret till byggnaden. Under kyla-säsongen förekom både tillskott och förlust av värme från förbindelserören. Det rekommenderas att horisontella rör isoleras i områden med stora behov av värme eller kyla. Man fann att parallellkopplade markvärmeväxlare kunde bestå av klenare rör än

seriekopplade, vilket reducerar materialkostnaden. Slangar med mindre diameter var också lättare att installera. Den mest kostnadseffektiva markvärmväxlaren använde sex U-rör med slangdiameter 16 mm. System med parallellkopplade markvärmväxlare var 30 % billigare än seriekopplade.

8.9.2 Ottawa, Kanada, 1985

Svec (1985) utvärderade termisk prestanda för markvärmväxlare som använder borrhål med stor diameter i lera. Tre grundläggande typer studerades: enkelt U-rör av plast, fyra perifera rör av koppar med central returledning och ett stålrör med vertikala längsgående flänsar. Värmväxlarna antogs vara installerade i ett borrhål med diametern 30 cm återfyllt med antingen lera ($\lambda=0,85 \text{ W/(m,K)}$) eller sand ($\lambda=2,5 \text{ W/(m,K)}$). Se figur 8.27. Plaströrens värmeledningsförmåga antogs vara $0,25 \text{ W/(m,K)}$.



Figur 8.27. Tre typer av vertikala markvärmväxlare utvärderade av Svec (1985): stålrör med vertikala flänsar, fyra perifera rör med central returledning och ett enkelt U-rör.

Den stationära temperaturfördelningen från värmebärarfluiden till marken vid radien 1 m från markvärmväxlarens centrum beräknades med en finita elementmodell (FEM). De viktigaste parametrarna var värmeledningsförmågorna hos mark, rör och återfyllnadsmaterial. Borrhålsmotstånden för olika fall sammanfattas i tabell 8.4. (De exakta lägena av rören anges inte i artikeln, men det verkar som om U-rörens skänklar är placerade nära varandra i mitten av borrhålet, medan de fyra perifera rören är nära borrhålsväggen).

Tabell 8.4. Borrhålsmotstånd R_b ($K/(W/m)$) beräknade med numerisk modell (Svec, 1985).

Värmväxlare	Återfyllnad	R_b – plaströr	R_b – kopparrör
Koaxialrör Diameter 7,5 cm	Lera	0,352	0,215
	Sand	0,198	0,062
U-rör Diameter 3,75 cm	Lera	0,447	0,260
	Sand	0,256	0,077
Fyra perifera rör diameter 1,25 cm	Lera	0,165	0,088
	Sand	0,065	0,021
Rör med flänsar	Lera	0,150*	0,062
	Sand	0,069*	0,014

* Stål

Resultaten visar att om flera tunna rör placeras symmetriskt i ett borrhål med stor diameter där återfyllnadsmaterialet har hög värmeledningsförmåga (t.ex. vattenmättad sand), så kan en sådan värmeväxlare uppföra sig som ett rör med stor diameter. Analysen utvidgades sedan till att omfatta även transienta villkor. Två prototyper, en med fyra perifera kopparrör och en med flänsat stålrör, testades sedan i ett fältexperiment. En fluid med konstant temperatur cirkulerades genom markvärmeväxlarna under 24 timmar. Bland resultaten ges inte termiska motstånd, men de förbättrade termiska prestanda hos prototyperna jämfört med U-röret var uppenbara.

De flänsade rören bedömdes vara alltför dyra för praktisk användning. Med utgångspunkt från dessa resultat utvecklades en vertikal spiralvärmeväxlare efter samma principer. Svec (1985) anser att fördelen med spiralutformningen är att kontaktytan ligger nära borrhålsväggen, spiralen är flexibel (tål deformation), slangtäteten (stighöjden) kan lätt varieras, borrhålet kan lätt återfyllas och det raka returröret är mycket kortare än spiralslingan vilket minskar risken för termisk kortslutning mellan uppåt- och nedåtgående strömningskanal. Se vidare försök i avsnitt 8.10.1.

8.9.3 Freising, Tyskland, 1986

Vid ett fältförsök i Freising, Tyskland, undersöktes inverkan av att införa en isolering mellan uppåtgående och nedåtgående skänkel för ett enkelt U-rör placerat i ett borrhål med diametern 150 mm (Müller et al, 1986). U-röret använde en korrugerad polypropylenslang med ytterdiameter 25 mm, innerdiameter 20 mm, väggtjocklek 0,9 mm och värmeledningsförmågan 0,22 W/(m,K). Mellan U-rörets två skänklar placerades en 4x12 cm tjock skumisolering av polystyrol. Borrhålet återfylldes med en bentonitblandning. Vid relativt låga värmebärrflöden (laminär strömning, Re 600-1700) noterades en förbättring i värmeöverföringsförmåga på ca 50 % vid laddning och ca 25 % vid urladdning jämfört med värmeväxlare utan sådan isolering. Vid turbulent flöde blev effekten avsevärt mindre.

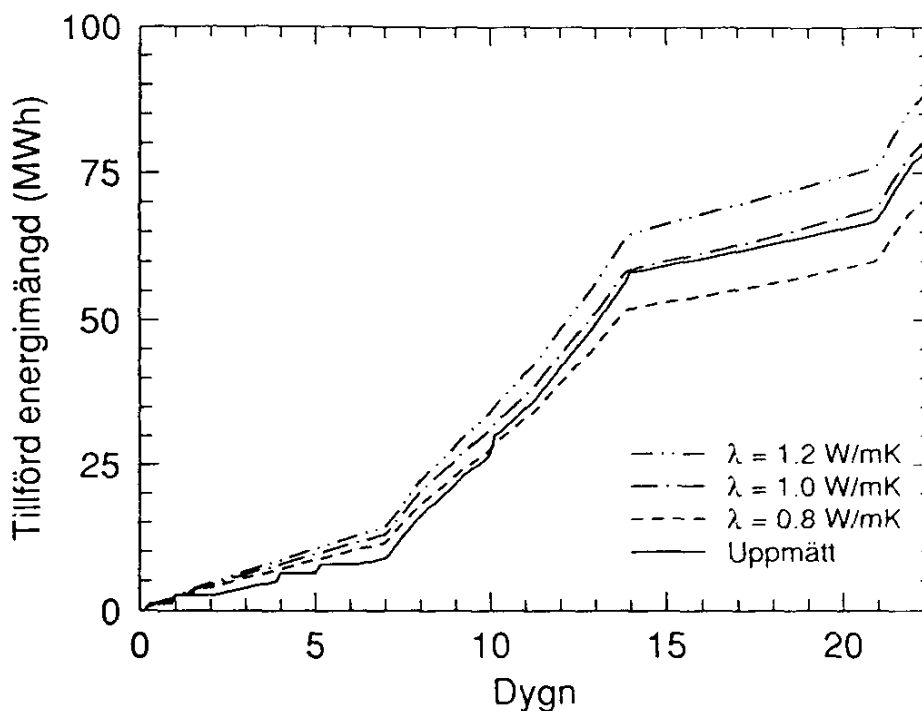
8.9.4 Söderköping, 1986

I Söderköping byggdes 1987 en värmepumpsanläggning med uteluftkylare och markvärmelager i lera med volymen 36.000 m³. Värmeväxlingen mellan värmebärrfluid och mark sker via 384 dubbla U-rör, vilka når ett djup av 18 m. Det dubbla U-röret består av fyra vertikala slangar som är parvis sammankopplade i botten. Slangen har diametern 25 mm och är gjord av polyeten med medeldensitet (PEM, PN6,3, väggtjocklek 2 mm, värmeledningsförmåga 0,36 W/(m,K). Skänkelavståndet, d.v.s. avståndet mellan två sammankopplade plaströr, var 0,5 m vid neddrivningen. Stickprovsmätningar har visat att skänkelavståndet varierar i lagret med ett medelvärde kring 0,40-0,45 m. De dubbla U-rören är placerade i ett kvadratisk gitter om 16 x 24 st, så att avståndet mellan närliggande nedstick blir 2,4 m.

Lagervolymen penetrerar väsentligen två skikt med olika material. Det övre skiktet, mellan 0 och 12 m, består av lera. Det undre skiktet, mellan 12 och 18 m, utgörs av siltig lera. Vattenkvoten bestämdes i det övre skiktet till ca 65 % och i det undre skiktet till ca 55 % (dvs. troligen nära full vattenmättnad). Enligt Sundberg (1986) bör värmeledningsförmågan i det övre skiktet ligga nära 1,0 W/(m,K), emedan värmeledningsförmågan i det undre skiktet med något större osäkerhet bedöms vara 1,25 W/(m,K). Den volumetriska värmekapaciteten uppskattas till 3,4 MJ/(m³,K) för det övre skiktet och till 3,3 MJ/(m³,K) för det undre skiktet. Värmemotståndet mellan fluid och marken omedelbart utanför plastslangen uppskattas till 0,09 K/(W/m). Lagrets begynnelsestemperatur bedömdes vara ca 13,5 °C.

För att uppskatta markvärmväxlarens värmeöverföringskapacitet utfördes ett inledande termisk responstest (Magnusson m.fl, 1992). Under de första 7 dygnen tillfördes en medeleffekt på ca 53 kW (7,7 W/m markvärmväxlare). Därefter höjdes medeleffekten till ca 294 kW (42,5 W/m) under 7 dygn för att sedan följas av 7 dygn med medeleffekten 54 kW (7,8 W/m). Efter denna period ökades åter effekten. Då mätningarna avslutades efter 22,5 dagar hade 79,3 MWh tillförts lagret.

Responstestet utvärderades med en detaljerad simuleringsmodell. Laddningsvillkoren utgörs av uppmätta värden på inloppstemperatur och fluidflöde. Simuleringsmodellen beräknar utloppstemperatur och värmebalans. Modellen användes för att göra en känslighetsanalys. **Figur 8.28** visar ackumulerad tillförd energi under responstestet vid variation av markens värmeledningsförmåga, λ . Markens värmemotstånd minskar då värmeledningsförmågan ökar. Drivande temperaturdifferens är proportionell mot skillnaden mellan inloppstemperatur och markens begynnelsestemperatur. Ett minskat värmemotstånd i marken medför därför att tillförd energimängd ökar. En osäkerhet i uppskattningen av värmeledningsförmågan på 10 % ger en osäkerhet i uppskattad tillförd energimängd vid responstestens slut på 5 MWh (8 %).



Figur 8.28. Söderköping. Uppmätt och beräknad tillförd energimängd i MWh som funktion av antalet dygn sedan responstestens start. Variation av markens värmeledningsförmåga λ W/(m,K) (Magnusson m.fl., 1992).

Känslighetsanalysen visar att osäkerheten i värmeledningsförmåga, begynnelsestemperatur och skänkelavstånd har störst betydelse. Osäkerheten vad beträffar volumetrisk värmekapacitet och värmemotståndet mellan värmebärarfluid och mark har liten betydelse.

8.9.5 Danmarks Tekniska Högskola, 1990

Berg m.fl. (1990) beskriver ett laborietest där ett trippelt U-rör av förstärkt polyetenslang (PEX) med en ytterdiameter 12 mm och en vägg tjocklek på 2 mm placerades i en betong- eller sandcylinder med diametern 0,3 m och höjden 1,8 m. Skänkelavståndet var 0,178 m. Mätningar utfördes för både torr och vattenmättad sand. Varmt vatten med konstant temperatur cirkulerades genom slangarna. Stationära förhållanden uppnåddes efter ca 8 timmar. Borrhålmotstånden utvärderades med hjälp av känd värmeeffekt och uppmätt temperaturskillnad mellan fluid och utsidan på betong- eller sandcylindern. Resultaten i **tabell 8.5** visar att sand med låg vattenmättnadsgrad ger dålig värmeöverföring (högt borrhålmotstånd) och bör undvikas.

Tabell 8.5. Uppmätta borrhålmotstånd (R_b) för trippelt U-rör (Berg m.fl., 1990).

Fyllnads-material	Vattentemperatur (°C)		Pumpflöde (kg/s)	Yttemperatur (°C)	R_b (K/(W/m))
	Inlopp	Utlopp			
Betong	74,6	72,4	0,056	48,9	0,088
Torr sand	73,7	72,0	0,032	41,3	0,256
Våt sand	49,7	47,7	0,030	38,2	0,078

8.10 Fältförsök med vertikal spiralformad slang – Slinky

8.10.1 Ottawa, Kanada, 1986-87

Ett fältförsök med två, 15 m djupa, vertikala kopparspiraler har utförts i Ottawa, Kanada (Svec, 1988; Mei et al, 1993). Spiralerna, som har en diameter av 28 cm och en stighöjd på 15-18 cm, består av kopparrör med diametern 22 mm. Ett rakt plaströr med diameter 25 mm används som returrör. Spiralvärmväxlarna är nedförda i borrhål i lera, med diameter 30 cm. Sand användes som återfyllnadsmaterial. Den effektiva borrhåls längden för de två borrhålen är 28 m och inbördes avstånd 6 m. Markvärmväxlarna är kopplade till en värmepump med 7 kW värmeeffekt. Jämfört med konventionella U-rör i plast minskas den totala borrhåls längden med 60-65 % (tre gånger effektivare).

Mätningar utfördes under vintern 1986-87. Medeluttaget under perioden oktober-april var 117 W/m (uttagen energi från borrhål). Uttagen energimängd var 4000 kWh, varav 865 kWh i januari. Driftstiden för värmepumpen var 1252 timmar (januari 274 timmar). Under den kallaste tiden på vintern varierade returtemperaturen från borrhålen mellan -2 °C och -4 °C i januari och mellan -3 °C och -5 °C i februari. Problem med sättningar förekom då leran närmast borrhålen frös och tinade under den första cykeln. Detta är vanligt för leror med högt vatteninnehåll.

9. DIMENSIONERING

Syftet med dimensionering av markvärmesystem är att säkerställa att villkor för goda tekniska och ekonomiska driftsförhållanden är uppfyllda under systemets livstid. Energikostnaden bör vara tillräckligt låg för att kunna konkurrera med andra alternativa energikällor.

I detta kapitel ges först en kort introduktion med sammanställning av förutsättningar och kriterier för dimensionering. Därefter redovisas erfarenheter, som i huvudsak berör dimensioneringen av horisontella, kompakta och vertikala markvärmeväxlare, från fältförsök och teoretiska studier.

9.1 Introduktion

Dimensionering av markvärmekollektorn beror på vissa förutsättningar:

- Fastighetens behov av värme och kyla
- Energisystemets temperaturkrav (golvvärme, radiatorer, luftburet, etc)
- Jordart (termiska egenskaper, fuktförhållanden, uttorkningsrisk, tjälhävningrisk)
- Markens ostörda temperatur
- Ortens klimat (snötäcket tjocklek och lufttemperaturens medelvärde och variation under året påverkar naturliga temperaturförhållanden och tjälning nära markytan).
- Kostnader för installation av markvärmeväxlaren
- Materialkostnader

Vid dimensioneringen bestäms följande parametrar:

- Markvärmeväxlartyp
 - Horisontell: t.ex. antal slangar per dike, dikeslängd, förläggningsdjup, avstånd mellan slangar, rördiameter, rörmaterial, återfyllnadsmaterial
 - Vertikal: t.ex. borrhålsdjup, antal slangar per borrhål, rördiameter, rörmaterial, återfyllnadsmaterial
- Installationsmetod (borrning, grävning, plöjning, etc.)
- Effekt- och energitäckning (energilastens karaktär: baslast eller topplast)
- Värmepumpens prestanda (värmeeffekt)

Det finns mer, och mindre, noggranna dimensioneringsmetoder:

- Enkla tumregler
- Riktlinjer (mer utförliga tumregler, tabeller, nomogram, etc.)
- Dimensioneringsprogram (anpassade för lättillgänglig och snabb hantering)
- Simuleringsprogram (med kapacitet för detaljerad simulering av energisystems komponenter och dessas samverkan)

Dimensioneringskriterier:

- Lägsta energikostnad
- Goda tekniska driftsförhållanden till låg energikostnad
- Acceptabel markpåverkan

Få dimensioneringsmetoder (tumregler eller datorprogram) avser att i första hand minimera energikostnaden för energisystemet. Exempel på sådana studier är bl.a. Cube (1980) och Berntsson (1980). De flesta dimensioneringsregler utgår istället från villkor beträffande acceptabla minimi- och maximivärden på värmebärarens temperatur.

9.1.1 Villkor för värmebärarens temperatur

Vid värmelast medför en lägre värmebärartemperatur att tillgänglig temperaturskillnad mellan värmebärare och ostörd mark ökar. Detta ökar möjligt specifikt värmeuttag per meter markvärmeväxlare. Markvärmeväxlaren kan då göras kortare och anläggningskostnaden reduceras. En lägre värmebärartemperatur ger dock lägre värmefaktor för värmepumpen och något ökad pumpenergi p.g.a. högre viskositet i värmebäraren. Den rörliga energikostnaden blir därmed högre. Även andra faktorer påverkar valet av värmebärartemperatur. För t.ex. ytjordvärmesystem kan ett högt specifikt värmeuttag (och låg värmebärartemperatur) leda till bildandet av permafrost. En avvägning mellan dessa faktorer har lett till tumregler för acceptabel minimitemperatur på värmebäraren för att säkerställa en säker och ekonomisk drift.

Frikyllning med markvärmeväxlare ställer starka krav på temperaturnivå eftersom tillgänglig temperaturdifferens direkt avgör vilken kylkapacitet som är tillgänglig. Om marken används för kylning av värmepumpens kondensor gäller, på motsvarande sätt som för värmelast, att kylfaktorn minskar med ökande temperaturdifferens mellan värmebärare och ostörd mark. Då värmepumpen används både för uppvärmning under vintern och kyla under sommaren (reverserad värmepump) ställs tekniska krav på värmepumpen, som kan begränsa acceptabelt temperaturintervall under drift.

Dimensioneringskriterierna är av dessa anledningar ofta utformade som villkor på värmebärartemperaturen. Villkoren ges som riktvärden för värmebärarens minimi- och maximitemperatur till värmepumpen eller värmeväxlare. Dessa extremvärden kan avse momentanvärden, veckomedelvärden, eller medelvärden under värme- eller kyla-säsongen.

9.1.2 Nyckeltal för dimensionering

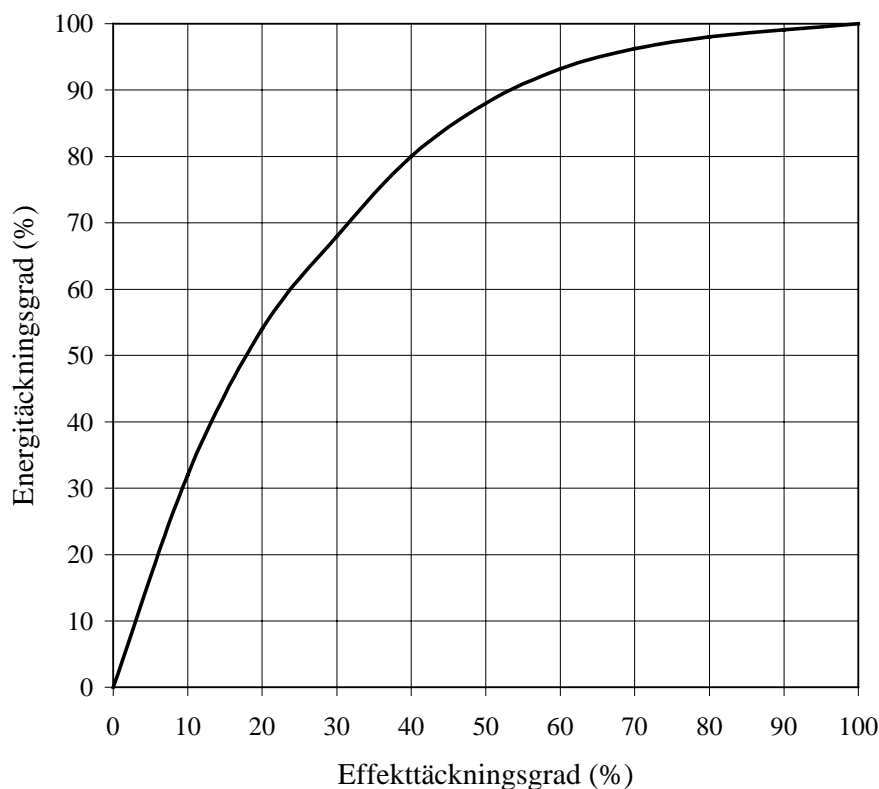
Dimensioneringsregler för markvärmeväxlare uttrycks ofta som nyckeltal m.a.p. specifik effekt (W/m eller W/m^2) eller specifik energimängd ($kWh/m/år$ eller $kWh/m^2/år$). Det är emellertid ofta lämpligast att uttrycka detta som den effekt eller energi som uttas eller tillförs marken per meter markvärmeväxlare. Ibland hänför sig nyckeltal för specifik effekt (eller energi) till värmepumpens värmeeffekt (under vinterdrift) eller dess kyleffekt (under sommar-drift). Man bör observera att detta innebär en väsentlig skillnad vad avser värmeutbytet med marken. Om man som exempel betraktar en värmepump med värmeeffekt 3 kW och värmefaktor 3, så tas värmeeffekten 2 kW från marken via värmepumpens förångare, 1 kW tillförs som kompressorarbete och hela sammanlagda effekten 3 kW avges sedan till uppvärmningssystemet i huset. Gäller det å andra sidan en kylmaskin med kyleffekten 3 kW och kylfaktorn 3, så kyls värmeeffekten 3 kW bort från huset, 1 kW tillförs processen av kompressorn och den sammanlagda effekten 4 kW tillförs sedan marken.

Förutsättningar (enligt avsnitt 9.1) för dimensionering kan variera avsevärt. De nyckeltal som anges är därför relativt grova instrument. Detta bör särskilt observeras när man jämför dimensioneringsregler i olika länder. Det kan finnas grundläggande skillnader som gör att nyckeltalen är olika.

9.1.3 Effekt- och energitäckning

I Mellaneuropa är det vanligt att markkopplade värmepumpar dimensioneras för 100 % effekttäckning (monovalenta system). I USA är det vanligt att den markkopplade värmepumpen i första hand dimensioneras för att klara hela kylbehovet och att någon form av elvärme används som komplement. I Sverige anses det mest lönsamt att installera ett system där värmepumpen kompletteras med elpatron eller befintlig oljepanna (bivalent system) som topplast.

Valet av effekttäckningsgrad påverkar värmepumpens storlek och dess drifttid. I figur 9.1 visas samband mellan effekttäckningsgrad och energitäckningsgrad för bostäder där värmebehovet väsentligen styrs av lufttemperaturen. Den ur ett ekonomiskt perspektiv mest lämpliga effekttäckningsgraden anses för närvarande ligga i intervallet 50-60 % för svenska enfamiljs-hus med markvärmepump. Värmepumpen levererar då ca 90 % av energibehovet med en drifttid på 3 200-4 000 timmar per år. För monovalenta system i Mellaneuropa blir drifttiderna så låga som 1 800 timmar. För värmeuttag av baslastkaraktär (låg effekttäckning) är energi-uttaget relativt stort jämfört med fall där uttaget har hög effekttäckning.



Figur 9.1. Samband mellan effekttäckningsgrad och energitäckningsgrad för svenska bostäder där värmebehovet väsentligen styrs av lufttemperaturen.

9.2 Horisontella markvärmväxlare med en slang

I detta avsnitt redovisas erfarenheter av dimensionering för horisontella markvärmväxlare med en slang. Observera att förutsättningarna (enligt avsnitt 9.1) för dimensionering kan variera avsevärt mellan olika länder.

9.2.1 Utländska erfarenheter

Cube (1980), Tyskland, genomförde tidigt en detaljerad studie av system med en horisontell slang. En numerisk simuleringsmodell verifierades först mot ett fältförsök. Modellen användes sedan för kostnadsoptimering av olika anläggningsparametrar, såsom förläggningsdjup, röravstånd, rördiameter och värmeuttagstäthet (W/m^2) för olika jordarter. Man fann ett relativt svagt beroende av förläggningsdjupet. En ökning av djupet från 0,5 m till 2,4 m gav en minskning av värmepumpens värmefaktor med 7 %. För djupt förlagda slangar sker regenereringen långsammare, så att kalla skikt ligger kvar och blir med tiden mer utbredda. För förläggningsdjup under 1,5 m tar regenereringen av marktemperaturen mer än ett år. Med hänsyn till vegetationen (rotsystemet) bör djupet vara minst 0,8 m. Avståndet mellan närliggande parallella rör bör vara minst 1 m (motsvarar $17 W/m^2$). Ett riktvärde anges till $20 W/m^2$ som årsmedelvärde ($40 W/m^2$ vid maxlast). För slangens diameter fann man ett optimum i området 32-38 mm. Lämpligt pumpflöde anses vara $0,5 m^3/timme$ per kW, vilket ger en temperaturdifferens mellan in- och utlopp på ca $2 ^\circ C$.

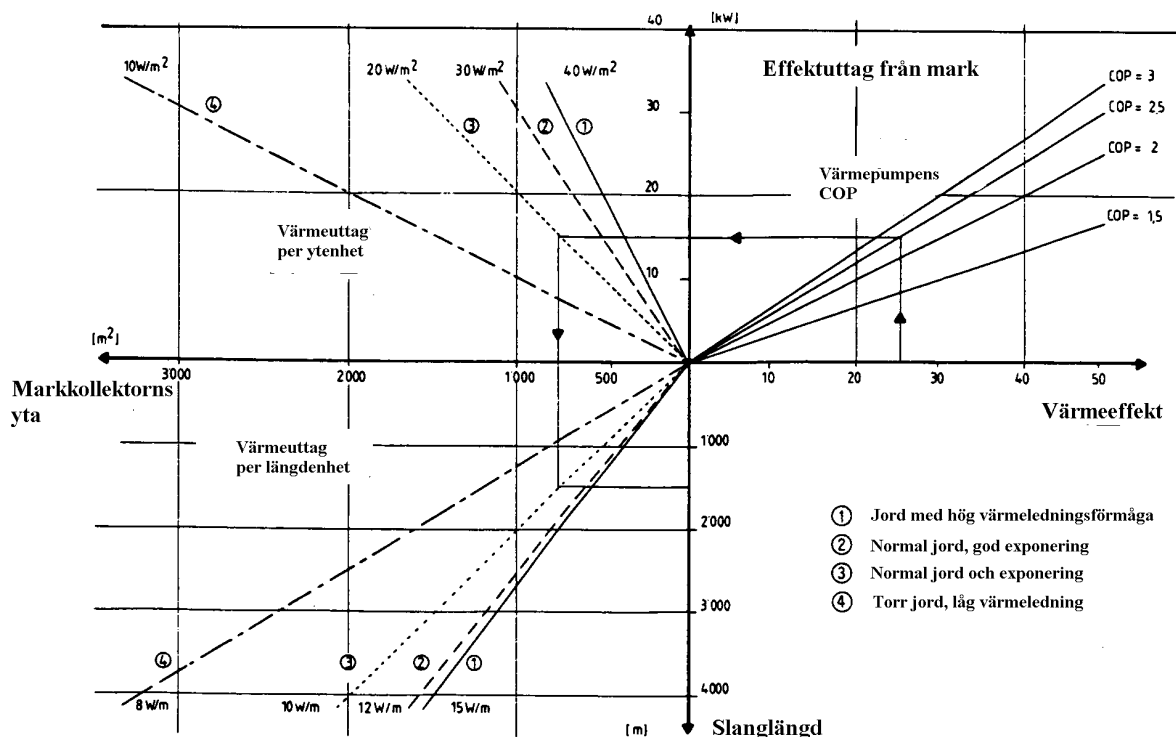
Auer m.fl. (1983), USA, anger att amerikanska erfarenhetsbaserade tumregler ger ett förläggningsdjup på 1,3 m för kylbehov och 0,5-0,8 m utan kylbehov. Röravståndet bör vara 1,3-1,6 m.

Johnson m.fl. (1985), USA, fann att en horisontell slang på 1,2 m djup i lera fungerade bra vid värmeuttag. Under värmeförsel under sommaren torkade leran runt slangen ut, vilket antogs bero på dålig återfyllning av lera (håligheter). Ny återfyllning med fin sand resulterade i förbättrad värmeöverföring, men problemet med uttorkning kvarstod delvis.

Hughes (1985), USA, uppger att normal amerikansk dimensionering för bostadshus och mindre kontorsfastigheter anvisar en värmeeffekt på ca 35 W per m slang (värmeuttag från mark ca $20 W/m$). Vid ett fältförsök fann man att horisontella slangar hade otillräcklig kapacitet för frikylning redan efter en veckas drift under våren. De främsta möjligheterna till kostnadsänkningar ansågs vara effektiviserad funktion av kombinerad produktion av värme och varmvatten samt förkortning av dikeslängd genom att installera fler slangar per meter dike. I (Hughes 1986) har nyckeltalen för specifik värmeeffekt ändrats till ca $30 W/m$ för normala jordar och ca $15 W/m$ för torra jordar med låg densitet. Värmebärande fluidens temperatur skall ej understiga $-4 ^\circ C$.

Matthey (1990), Schweiz, anvisar ett förläggningsdjup på mellan 1 och 1,5 m. Vid större djup finns risk för ofullständig regenerering. För mindre djup nås fryspunkten för snabbt. Riktlinjer för schweiziska förhållanden (2 200 driftstimmar, ostörd marktemperatur $10 ^\circ C$) är: $40 W/m^2$ för jordar med hög värmeledningsförmåga; $30 W/m^2$ för normala jordar med god exponering (sydsluttningar); $20 W/m^2$ för normal jord och exponering; samt $10 W/m^2$ för torr jord med låg värmeledningsförmåga.

Schweiziska ingenjör- och arkitektföreningen (SIA) har publicerat ”Riktlinjer för dimensionering av system som utnyttjar markvärme vid låga temperaturer” (SIA 1988). Här ges ett nomogram för dimensionering av ytjordvärmsystem. Se [figur 9.2](#).



Figur 9.2. Nomogram för dimensionering av yttjordvärmekollektor (SIA 1988).

Zaugg (1991), Tyskland, anger att riktlinjer för enfamiljshus är: 20 W/m² i jordarter med låg värmeledningsförmåga ($\lambda=1,5$ W/(m,K)) och vattenhalt (15 %); 35 W/m² i jordarter med hög värmeledningsförmåga ($\lambda=2,4$ W/(m,K)) och vattenhalt (30 %).

Sanner (1992), Tyskland, jämförde termiska prestanda för europeiska och nordamerikanska anläggningar. Mellaneuropeiska anläggningar använder ofta monovalenta system (där värmepumpen täcker 100 % av värmeeffekten) med driftstider på 1 400-2 000 timmar. I USA är driftstiderna ofta ännu kortare – från 700 till lite mer än 1 000. Bivalenta system där värmepumpen kompletteras med elvärme är vanligt. En tumregel för Europa är att erforderlig yta för markvärmeväxlaren är ca 2-3 gånger större än uppvärmd bostadsyta. Medelvärde för de europeiska anläggningarna avseende värmeeffekt per meter slang är 19 W/m (specifikt värmeuttag ur mark ca 13 W/m). I USA är specifik värmeeffekt något högre, 25-29 W/m, beroende på att systemen vanligtvis används för både värme och kyla, vilket gör att risken för en långsiktig nedkylningen inte är lika stor. Man har även accepterat en lägre årsvärmefaktor för värmepumpen. Andelen energi som tas ur marken blir då lägre. Uttryckt i värmeeffekt per ytenhet av markvärmeväxlare fås värdet 27 W/m².

Mei m.fl. (1993), Kanada: En normal installation använder en polyetenslang med innerdiameter 32 mm på ett djup av 1-1,5 m. Man erhåller en värmeeffekt på ca 30 W/m. Prestanda för horisontella system påverkas kraftigt av fuktrörelser, regn, jordart och grundvattenyta. Dessa faktorer är särskilt kritiska under sommarsäsongen. Med riktig dimensionering uppstår vanligtvis inga problem. Erfarenheter visar att förhållandena är gynnsamma på ca 1 m djup för horisontella system i de flesta tätbebyggda områden.

Nagano m.fl. (1997), Japan: Rekommenderat förläggningsdjup i Sapporo är 1,2-1,8 m.

Faninger (1997), Österrike: Horisontella enslangssystem förläggs på djupet 0,8-1,5 m med ett avstånd på 0,3-0,5 m till näraliggande diken. Dimensioneringen avser en värmeeffekt på 45-55 W per m² markyta för markvärmväxlaren. Årsvärmefaktorn anges till 2,8-4,0.

Den tyska ingenjörsgesellschaften "Verein Deutscher Ingenieure" (VDI) har utgivit en serie med riktlinjer för utnyttjande av markvärme (VDI 2001). Dessa riktlinjer har blivit normgivande och flera tyska förbundsstater kräver vid tillståndsprövning att dessa riktlinjer följs.

För horisontella system med en slang gäller som tumregel att 20-30 W/m² kan tas från marken. Detta avser system för enbart värmeuttag med en drifttid på maximalt 1 800 timmar/år. Används värmepumpen för uppvärmning av tappvarmvatten får man ta hänsyn till att drifttiden blir längre. I **tabell 9.1** anges riktlinjer för värmeuttag från mark för olika jordarter.

Tabell 9.1. Riktlinjer för dimensionering av värmeuttag från horisontell markvärmväxlare med en slang enligt VDI (2001). SPF avser årsvärmefaktor.

Jordart	Specifik last (W/m ²) 1 800 timmar	Specifik last (W/m ²) 2 400 timmar	Area för markvärmväxlare per kW topplast (m ²) 1800 timmar	
			SPF=3,0	SPF=3,5
Sandig jord, torr	10	8	66	72
Siltig jord, fuktig	20-30	16-24	22-33	24-36
Sandig jord, vattenmättad	40	32	17	18

Markegenskaper: sandig jord, torr 0,4 W/(m,K) (0,27-0,7 W/(m,K)), siltig jord, fuktig 1,8 W/(m,K) (1,0-2,3 W/(m,K)), sandig jord, vattenmättad 2,4 W/(m,K) (1,73-5,02 W/(m,K)).

Vid längre driftstider bör man även beakta det specifika årliga energiuttaget från marken eftersom det bestämmer det långsiktiga förloppet (nedkylningen). Värdet bör inte överstiga 50-70 kWh/m²/år vid enbart uttag av värme. Vidare anges att skillnaden mellan värmebärarfluidens returtemperatur från markvärmväxlaren och ostörd marktemperatur ej bör överstiga 12 °C som veckomedelvärde. Vid kortvarig spetslast sätts detta temperaturvillkor till 18 °C.

VDI (2001) rekommenderar att förläggningsdjupet är minst 1,2 m och maximalt 1,5 m. Marken kan tjälas naturligt ned till 1 m djup. På 2 m djup ligger den lägsta temperaturen under året på ca 5 °C (tyskt klimat). Under vintersäsongen stiger marktemperaturen med ökande djup, men å andra sidan avtar den värmemängd som tillströmmar från markytan under sommarhalvåret till den nedkylda regionen. En upptining av det nedkylda området kan inte säkerställas om djupet är för stort. Avståndet mellan rören bör väljas så att isbildningen runt rören inte sammanväxer (0,3-0,8 m). Den specifika lasten enligt tabellen får inte överskridas. Markvärmväxlarledningar bör placeras minst 0,7 m från andra vattenledningar.

9.2.2 Svenska erfarenheter

Wilén (1983): Två villavärmepumpar i Surte med vardera 300 m horisontell slang i lera ($\lambda=1,2$ W/(m,K)), förläggningsdjup 0,8-1,0 m och dikesavstånd 1,0-1,5 m, detaljstuderades under vintern 1981/82. Systemen ansågs försiktigt dimensionerade med ett medeleffektuttag under vinterdriften på ca 17,5 W/m och ett energiuttag på ca 20 kWh/m²/år. Värmebärartemperaturen var ca -1,0 °C. Endast en liten zon runt slangarna tjälades under vintern.

Ahlkrona och Johansson (1983): i Sverige har 5 000 system med horisontella markvärmewäxlare installerats. Förläggingsdjupet är vanligen 0,6-1,1 m djup med ett röravstånd på 1-2 m. Installationer med dubbla nivåer med slang har utförts. Den översta nivån förläggs då på 0,5-1,0 m djup, medan den undre nivån placeras 0,2-0,5 m under den övre. Dikesavståndet för tvåslangskollektorer är 1-2,5 m.

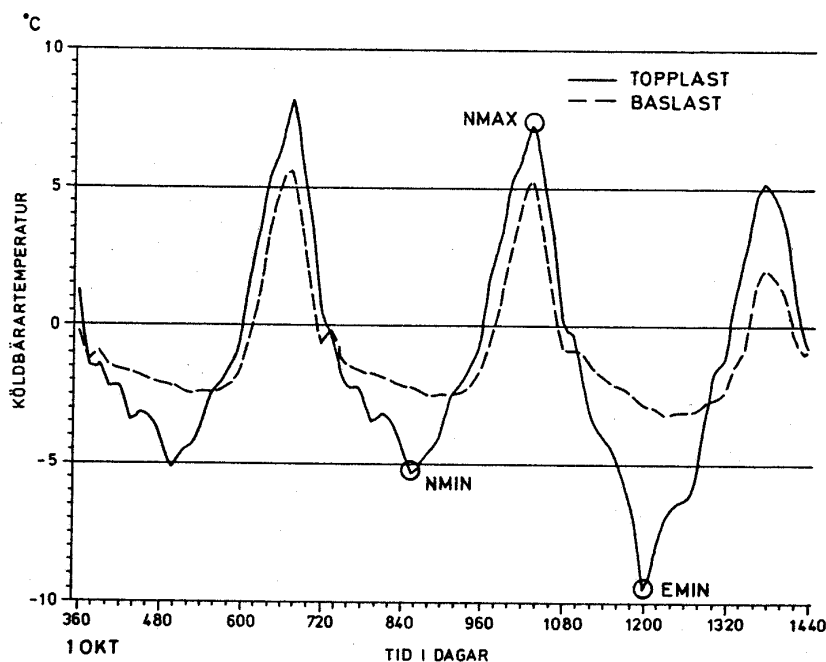
Jansson och Lundin (1984): Värmekollektorns förläggingsdjup är normalt 0,8 m. Ytligare slangar kan ge lägre anläggningskostnad, men innebär större påverkan (tjälhävning) på ytliga markskikt. Djupare slangförläggning ger större påverkan i djupare marklager, djupare tjäle och senare upptining.

Rhen m.fl. (1986) genomförde en omfattande studie för att ta fram dimensioneringsregler. Studien utgår från en numerisk modell utvecklad av Markvärmegruppen i Lund. Tre olika orter studerades: Luleå, Uppsala och Kristianstad. För Luleå användes nio olika förenklade, homogena jordtyper och för de övriga orterna användes fem jordtyper. Simuleringarna omfattade:

- Två olika förläggingsdjup och fyra olika dikesavstånd.
- Energiuttaget varierades från 16 kWh/m²/år till 125 kWh/m²/år. Energiuttaget fördelades över året med hänsyn till framförallt lufttemperatur, eller jämnt över året som en baslast.
- Simuleringarna sammanfattades i diagram där normalårets minsta, högsta, viktat medelvärde samt extremårets lägsta, värmebärartemperatur kan utläsas beroende av energiuttag per m² och år.
- Tre på varandra följande normalår och därefter ett extremår med ovanligt kallt klimat.

Resultaten visar att framförallt jordart och klimat är viktiga parametrar för att bestämma möjligt energiuttag. Även avståndet mellan diken påverkar möjligt energiuttag, emedan förläggingsdjup spelar mindre roll. Snötäcket har stor betydelse. Snöröjd mark försämrar möjligt effektuttag, särskilt i jordar med låg vattenhalt. Här bör energiuttaget minskas och förläggingsdjupet ökas. Grundvattenytans läge är mycket viktig för dimensioneringen i grovkorniga jordarter.

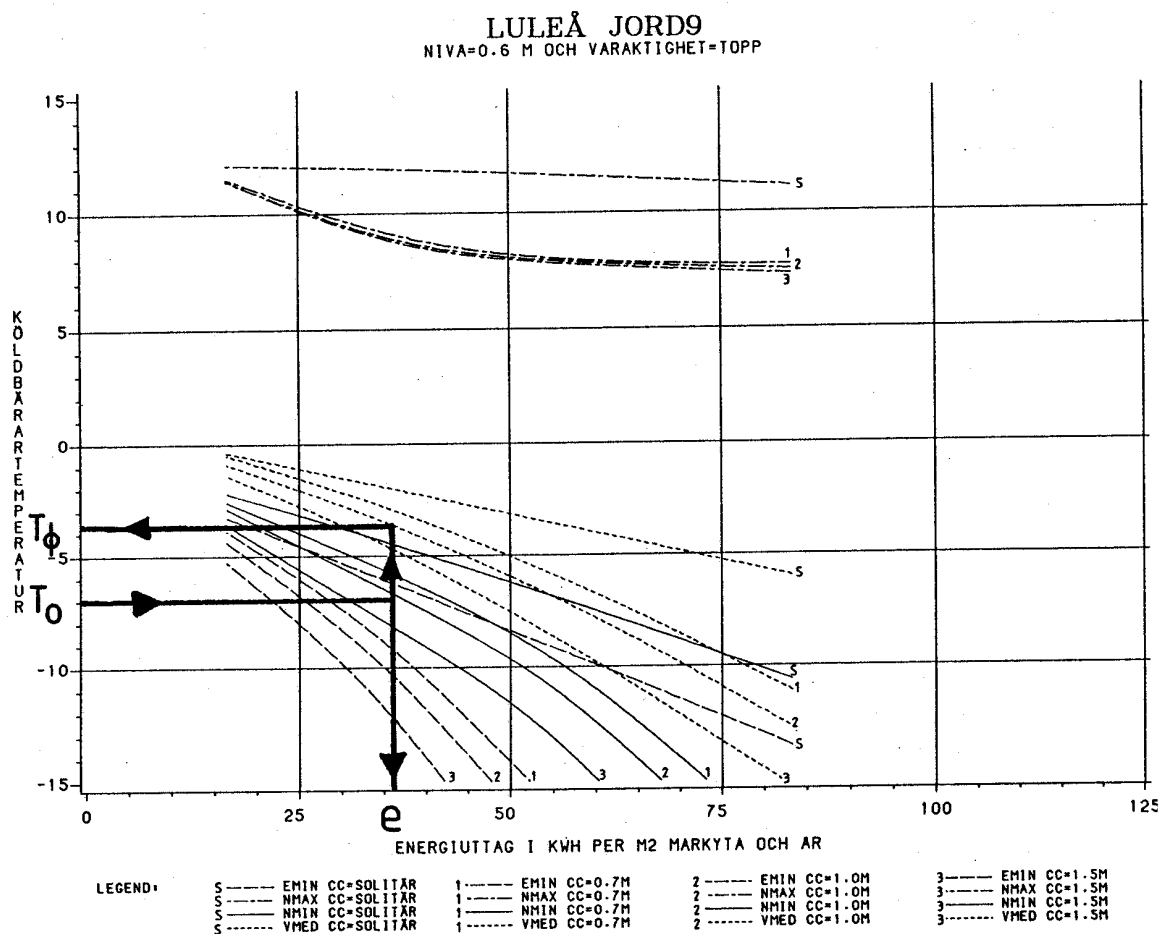
Figur 9.3 visar ett exempel på värmebärarens temperaturvariation.



Figur 9.3. Värmebärartemperaturens variation från oktober tredje normalåret till oktober för extremåret. Topplast och baslast har samma energiuttag/m²/år. Maximal värmebärartemperatur under tredje normalåret betecknas NMAX, minimitemperaturen betecknas NMIN, och EMIN är minimal temperatur under extremåret (Rhen m.fl., 1986).

Simuleringsresultaten finns sammanfattade i drygt 50 diagram. Ur dessa diagram kan lägsta och högsta värde samt viktat medelvärde på värmebärarens temperatur avläsas för tredje normalårets lastvariation. Dessutom anges extremårets lägsta värmebärartemperatur. Ett exempel ges i figur 9.4: här väljs värmebärarens minimitemperatur T_0 till -7 °C under extremåret. Ett årligt värmeuttag e på $36\text{ kWh/m}^2/\text{år}$ kan avläsas på den horisontella axeln och motsvarande årsmedelvärde T_ϕ för värmebärarens temperatur på den lodräta axeln. Detta värde kan med hjälp av värmepumpsprestanda användas för att uppskatta årsvärmefaktorn.

Om lägsta tillåtna värmebärartemperatur är -5 °C och topp- respektive baseffektuttag har de varaktigheter som beskrivs i rapporten varierar möjligt energiuttag enligt tabell 9.2. Vid toppeffektuttag erhålls det lägsta värdet i intervallet för klimat motsvarande Luleå med ett dikesavstånd på 1,5 m, medan det högsta värdet motsvarar klimat för Kristianstad med dikesavstånd på 0,7 m. Förlägningsdjupet är 0,6 m eller 1,4 m. För baseffektuttag är dikesavståndet 1 m och förlägningsdjupet 0,9 m.

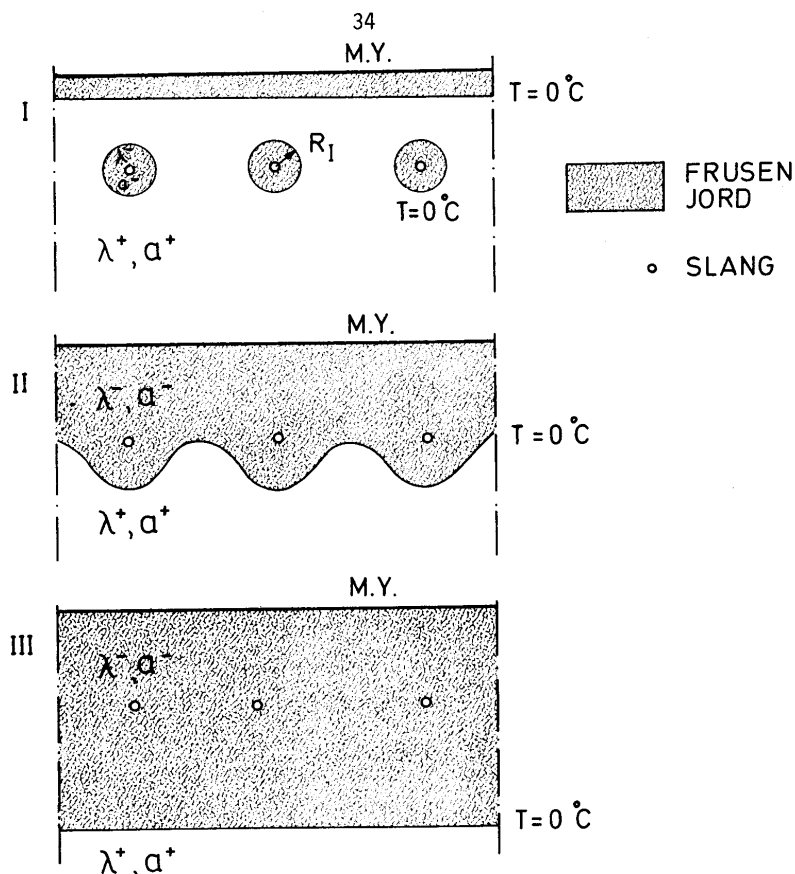


Figur 9.4. Dimensioneringsdiagram för Luleå, jord 9, slangnivå 0,6 m och toppeffektbelastning. Värmebärartemperatur (benämns köldbärartemp. i fig.) som funktion av årligt värmeuttag. Kurvorna avser olika slangavstånd (cc), högsta (NMAX) och lägsta (NMIN) värmebärartemperatur under normalår, lägsta (EMIN) värmebärartemperatur under extrem-år, samt viktat årsmedelvärde (VMED) (Rhen m.fl., 1986).

Tabell 9.2. Möjligt energiuttag för olika jordarter vid lägsta tillåtna värmebärartemperatur $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jordartens värmeledningsförmåga ($W/(m,K)$) betecknas λ^+ (ofruset) och λ^- (fruset). Värmekapaciteten ($MJ/(m^3,K)$) betecknas C^+ (ofruset) och C^- (fruset). S_r är jordens vattenmättnadsgrad (%) (Rhen m.fl., 1986).

Jord	Ung. motsv. jordart	λ^+	λ^-	C^+	C^-	S_r	Toppeffekt $kWh/m^2/\text{år}$	Baseffekt $kWh/m^2/\text{år}$
1	Torv	0,5	2,0	4,0	2,0	-	35-85	85-100
2	Lera	0,9	2,4	3,5	2,0	100	40-80	80-100
5	Torr sand	0,7	0,9	1,4	1,1	20	0-30	15-45
9	Fuktig sand/silt	1,25	2,0	2,0	1,4	50	20-60	50-90
6	Vattenmättad sand	1,7	3,6	3,1	2,0	100	50-100	100-150

Klimat effekter slår igenom tydligast i jordar med låg vattenhalt, dvs. för jord 5 och 9. Detta beror på att det vatten som ligger ovan slangarna också fungerar som en form av dynamisk isolering vid frysning. Vid frysfronten är temperaturen nära $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Under inledande tjälning runt slangen utvecklas ett fryst skikt med relativt lågt värmemotstånd mellan värmebärarfluid och frysfront. Se situation I i figur 9.5. När frysfronten långsamt rör sig utåt förblir värmebärarfluidens temperatur relativt stabil. Nedkyllningen från markytan fördröjs tills dess att ett sammanhängande fruset område (situation II i figur 9.5) bildas mellan slang och markyta. I torra jordarter är denna fördröjningsförmåga låg.

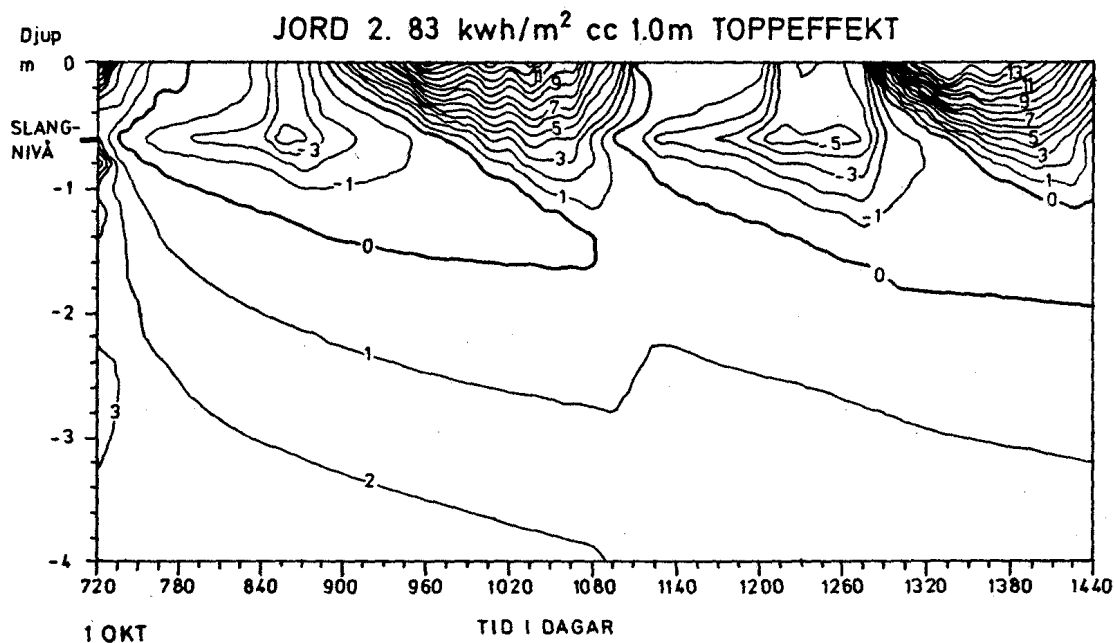


Figur 9.5. Nollistotermens läge i ett vertikalt tvärsnitt genom marken vinkelrätt mot yjordvärmeslangarnas utsträckning. Situation I-III kan dels representera markens tillstånd vid senhöst, vinter resp. vårvinter, dels den maximala frysningen vid lågt, mellan och högt energiuttag (Rhen m.fl. 1986).

Förläggningsdjupet bör väljas så att så hög värmebärartemperatur som möjligt erhålls. En generell tendens är dock att volymen tjälad mark ökar med förläggningsdjupet varvid marktemperaturen blir lägre och risken för permafrost ökar. Skillnaderna mellan olika djup är dock inte så stora, så det kan ofta väljas med hänsyn till praktiska omständigheter. I torv förefaller det vara fördelaktigt med ytlig förläggning på 0,6-1,0 m djup. I Kristianstad är 0,6-1,0 m att föredra, medan 1,0-1,4 m är lämpligare i Luleå.

Väljs en tätare slangförläggning kan det innebära att en större energimängd tas ur marken vid samma effekt. Temperatursänkningen blir högre p.g.a. termisk influens mellan slangarna. Marken tjälas därför mer med tät slangförläggning. Lämpligt avstånd beror på samspelet

mellan energiuttaget och nedkylningen från markytan. Så länge tjälren som tränger ned från markytan och tjälren runt slangerna är skilda från varandra är värmemotståndet mellan 0 °C-isotermin och värmebärarfluiden måttligt. När marken är tjälad från markytan ned under slangarna är detta motstånd relativt stort. Hur mycket energi per m² markyta som kan tas ut med en tät slangförläggning i jämförelse med en gles beror av vald lägsta värmebärartemperatur, klimat, jordart och förläggningsdjup. Läggs slangarna med ett avstånd av 0,7 m istället för 1,5 m och lägsta tillåtna värmebärartemperatur väljs till -5 °C kan ökningen av möjligt uttag bli 20 % till 100 % beroende på klimat och jordart (jämför med avsnitt 8.4.3). Ökningen är större i Kristianstad än i Luleå och större för jordar med hög vattenhalt än jordar med låg vattenhalt. **Figur 9.6** visar temperaturändringen längs en vertikal linje från markytan genom slangnivån, för jordtyp lera och Uppsalaklimat. Värmeuttaget är toppeffektlast med årligt uttag på 83 kWh/m²/år när dikesavståndet är 1,0 m. Enligt simuleringsmodellen fryser vattnet i marken i temperaturintervallet mellan 0 °C och -1 °C. I slanglägen är jorden frusen från markytan ned till ca 0,4 m under slangnivån medan jorden mellan slangarna är helt ofrusen.



Figur 9.6. Beräknad temperaturändring längs en vertikal linje från markytan genom slangnivån 0,6 m djup, vid toppeffektlast. Jordtyp lera och klimat för Uppsala. Värmeuttaget är 83 kWh/m²/år med dikesavståndet 1,0 m (Rhen m.fl., 1986).

Ahlkrona och Mogensen (1987) redovisar en omfattande fältmätning av sju ytjordvärmeanläggningar för småhus med mellan tre och sju års uppföljning. Se utförlig beskrivning i avsnitt 8.7.4. Energiuttaget varierar mellan 25 och 73 kWh/m²/år. Effektuttaget under vintern ligger mellan 9 och 16 W/m. Sex av värmepumpsanläggningarna ger full täckning av husens effektbehov. Erfarenheterna från dessa fältmätningar kan sammanfattas i följande punkter:

- Snötäcket har stor betydelse för värmebärartemperatur och tjäldjup, särskilt om det lägger sig tidigt på säsongen. Tjäldjupen minskar, tjälsäsongen blir kortare och värmebärartemperaturen blir högre.

- Värmebärarfluidens temperatur är stabil under vintern om marken mellan slang och markyta förblir otjälad ovanför den varmare, inkommande, delen av markslingan. Värmebäraren är då mindre känslig för variationer i lufttemperatur och snödjup.

Anläggningar med begränsad tjälning runt slangarna karaktäriseras av ett litet energiuttag i förhållande till det tillgängliga latent värmet runt slangarna.

Anläggningarna simulerades med programmet YJSIMUL. Simuleringsmodellen använder följande förenklingar: isoterm slang (-), kontinuerlig drift (-), inget kontaktmotstånd (-), markvattnet rör sig utan att medföra värme (+), ingen fuktvandring mot slangerna (+) och ändeffekter försummas (++). Beteckningarna + eller - avser att indikera om verkligheten förmodas höja eller sänka värmebärartemperaturen jämfört med simulerat värde. Man fann att simuleringsprogrammet var konservativt, så att beräknade värmebärartemperaturer blev något lägre än i verkligheten. Snötäckets isolerande förmåga underskattades och simuleringarna gav en senare temperaturstegring under våren jämfört med mätningarna. Dimensioneringskriterier i form av tumregler för specifik effekt eller energi måste ta hänsyn till slangens dimensioner. Svårigheten med allmänna riktvärden är att det finns en stor variation i systemutformning, last, jordart och andra förutsättningar. Rent allmänt kommenteras att anläggningar som dimensionerats med nuvarande dimensioneringsregler fungerar tillfredställande och arbetar med värmebärartemperaturer som ej underskrider föreskrivet minimivärde på $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (avser medeltemperaturen mellan inlopp och utlopp till från markvärmeväxlaren).

Sanner (1992) redovisar termiska prestanda för fyra svenska anläggningar i en internationell översikt. Se **tabell 9.3**. Prestanda avser värmeuttag från mark. Högst prestanda/värmeuttag, räknat i W/m^2 , redovisas för Surte ($17,1\text{ W}/\text{m}^2$).

Tabell 9.3. Termiska prestanda för yjordvärmeanläggningarna i Grövelsjön, Vansbro, Surte och Orsa. Värmepumpens driftstid var 4 080, 1 380, 1 400 resp 2 400 timmar (Sanner, 1992).

Ort	Värmelast		Kollektor		Prestanda				
	kW	MWh/år	m	m^2	W/m	W/m^2	kWh/m/år	kWh/ m^2 /år	COP
Grövelsjön	229	935	9 400	11 000	15,9	13,6	59	50	2,5
Vansbro	170	324	10 800	7 200	9,3	13,9	13	20	2,6
Surte	10	14	300	340	19,7	17,1	27	20	2,3
Orsa	10	24	400	-	14,5	-	35	-	2,2

9.3 Horisontella markvärmeväxlare med flera slangar

De svenska erfarenheterna av horisontella markvärmeväxlare med flera slangar i samma dike är odokumenterade. Detta avsnitt behandlar därför enbart utländska studier och anläggningar. Observera att de amerikanska anläggningarna ofta har stora kylbehov där energilasten har mer utpräglad korttidsvariation och relativt låg energiomsättning under året (kort driftstid för värmepumpen). Detta minskar betydelsen av termisk influens mellan näraliggande slangar och långsiktiga temperaturförändringar i marken. Den relativa prestandaförbättring av flera slangar i samma dike jämfört med enslangssystem kan under sådana omständigheter då vara högre än för svenska bivalenta anläggningar med värmeuttag av baslastkaraktär.

9.3.1 Utländska erfarenheter

Bose m.fl. (1985), USA: Markvärmepumpar med flera slangar i samma dike och rör med större diameter ger högre prestanda i torra jordar. Båda dessa utformningar leder till lägre värme-flöde per ytenhet, lägre temperaturgradienter och därmed lägre gradienter i ångtryck vid slangens yttervägg.

Hughes (1985), USA, fann i en jämförelse mellan markvärmepumpar med en slang (djup 1,5 m) och två slangar (djup 0,9 m och 1,5 m) per dike att tvåslangssystemet bör dimensioneras för 56 % högre effekt per meter dike. Se avsnitt 8.8.1. Betydande termisk influens mellan de två slangarna uppträdde inte förrän i slutet av vintern. Innan dess gav tvåslangssystemet dubbelt så mycket effekt/energi per meter dike som enslangssystemet. Installation av flera slangar i samma dike sågs som en av de främsta möjligheterna för kostnadsänkningar.

Hughes och Hackner (1986), USA: Vid ett fältförsök fann man att en optimerad markvärmepump (värme och kyla) kunde dimensioneras för en värmelast på 40 W/m för en slang per dike och 62,5 W/m för två slangar per dike. Med en värmefaktor på 2,9 motsvarar detta 26 W/m (en slang) resp. 41 W/m (två slangar).

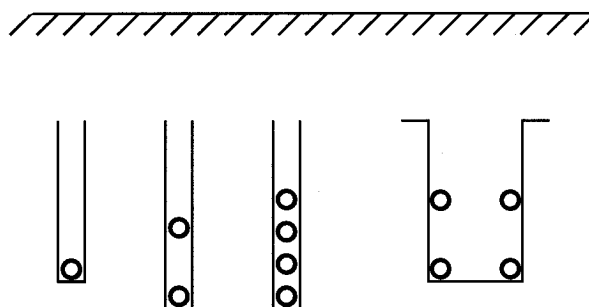
Hughes (1986), USA, ger riktlinjer för bostäder och mindre kontorsbyggnader i norra USA. Här anges att två slangar per dike kan reducera dikeslängden till 62 % av längden för en slang. För fyra slangar per dike förkortas dikeslängden till 42 %.

Statt (1986), USA: En teknisk-ekonomisk uppskattning av markkopplade värmepumpar med horisontell markvärmepumpar fann att tvåslangssystem hade en återbetalningstid som var 25-30 % lägre än för enslangssystem.

Mei (1986), USA, studerade värmeuttag som ledde till tjälning för markvärmepumpar med en slang (djup 1,5 m) och två slangar (djup 1,2 och 1,8 m). Markens värmeledningsförmåga var 2,2 W/(m,K). Tydlig inverkan av termisk influens fanns mellan de två slangarna. Under en 28-dagars period erhöles 60 % mer energi per meter dike från tvåslangssystemet. Detta värde förväntas sjunka vid längre drift. För tvåslangssystemet (egentligen en slinga med in- och utgående flöde på två olika nivåer i samma dike) kontrollerades om värmebärarens inlopp skulle vara i den övre eller undre slingan. Uttagen energi minskade med 25 % om inloppet flyttades från den övre till den undre slingan. Valet av återfyllnadsmaterial ansågs väldigt viktigt för att minimera kontaktmotståndet och bibehålla en hög värmeledningsförmåga även under omättade (torra) förhållanden.

Nackdelarna med flerslangssystem anses vara större volym värmebärarfluid, högre rörkostnad per meter dike, ökad installationskostnad per meter dike, begränsningar i längd p.g.a tryckförluster. Dimensioneringsdiagram visar ett möjligt värmeuttag på 23-33 W/m för en slang (djup 1,2-1,8 m) per dike och 38-55 W/m för två slangar (1,2 och 1,8 m) per dike. Tvåslangssystemet bedöms därmed ge 60 % mer per meter dike.

Följande exempel, [figur 9.7](#) och [tabell 9.4](#), visar erforderlig dikeslängd, rörlängd och förläggningsdjup för markvärmepumpar med en slang, två och fyra slangar i samma dike.



Figur 9.7. Horisontell markvärmväxlare med 1-4 slangar per dike (efter Bose, 1988).

Tabell 9.4. Motsvarande dikeslängd, rörlängd och förläggningsdjup för markvärmväxlare med en slang, två och fyra slangar i samma dike (efter Bose, 1988).

Antal rör	Dikeslängd/Rörlängd	Djup (m)	Dikesavstånd (m)
1	150/150	1,5	1,2
2	82,5/165	1,2 1,8	1,8
4	67,5/270	0,9 1,2 1,5 1,8	3,6

Ett likvärdigt alternativ till fyra slangar på olika nivåer är en fyrkantsplacering med två slangar på djupet 1,2 m och två slangar på djupet 1,5 m med 0,6 m avstånd dem emellan. Exemplet visar att dikeslängden kan förkortas avsevärt genom att använda flera slangar i samma dike.

Federal Energy Management Program (FEMP 1995), U.S. Department of Energy (DOE), anger prestanda för horisontella markvärmväxlare med 1-6 rör i varje dike. Flera slangar i samma dike sparar ofta markyta, ger mindre dikesgrävning och kostar mindre än en slang per dike. Prestanda varierar mellan 29 och 115 W värmeeffekt per m dike beroende på marktyp och antal slangar. Dikets djup är 1,2 -3,0 m och avstånden mellan närliggande slangar är 1,8-3,6 m. Det finns en risk för uttorkning i sandiga jordar och på höjder.

Schweiziska ingenjör- och arkitektföreningen (SIA) ger i "Riktlinjer för dimensionering av system som utnyttjar markvärme vid låga temperaturer" (SIA 1988) uppgifter om prestanda för fyra slangar i samma dike. Slangarna är placerade i fyrkant, se figur 9.7, på nivåerna 1,4m och 1,8 m med ett horisontellt avstånd på 0,8 m. Denna konfiguration bör ge ett möjligt uttag om 75 W/m, vilket motsvarar 30 W/m² med dikesavståndet 2,5 m.

9.3.2 Svenska erfarenheter

Sundberg och Ledskog (1989) datorsimulerade olika markvärmväxlare vid olika belastningar och klimatzoner. Dessa är flernivåsystem och jordvärmebrunnar, vilket liknas vid en bergvärmebrunn i jord. I modellen kan hänsyn tas till fasomvandling vid frysning, effekt av snötäcke och återladdning av markvärmväxlare. Flernivåsystemet består av slangar PEM med ytterdiameter 25 mm, förlagda på 3 nivåer (0,75 m, 1,0 m och 1,25 m djup). Jämförelser görs med 1- och 2-nivåsystem. Grundvattenytan ansätts på 0,75 m djup under markytan och jordtypen är lera respektive sand. I simuleringarna fryser jorden i temperaturintervallet 0 °C till -1,5 °C.

För flernivåsystemet är det möjligt att ta ut ca 90-110 kWh/m² utan artificiell återladdning, vid en lägsta värmebärartemperatur på -5 °C. Återladdning med ca 50 kWh/m² medför att ca

20 % högre energimängder kan tas ut. Om värmepumpen täcker ca 50 % av topeffektbehovet innebär erhållet värmeuttag att det krävs ca 10-15 m² markyta per kW (topeffekt).

9.4 Kompakt markvärmväxlare - horisontell Slinky

Markvärmväxlare med horisontell spiralformad markvärmväxlare, Slinky, har utvecklats i Nordamerika. Det finns inga europeiska erfarenheter att redovisa.

9.4.1 Utländska erfarenheter

Mei m.fl. (1993), USA: Preliminär dimensionering för 3,5 kW värmepump med horisontell Slinky leder till en spiral med 150 m slang sträckt till 20-25 m längd och installerad i 1,8 m djupt dike. Spiralens diameter är 0,6 m. Ett fältförsök med ett något underdimensionerat system gav 125 W/m (plastslang) och 150 W/m (kopparrör) per meter dike. Plastslang med diametern 32 till 40 mm ansågs mest ekonomiskt. När Slinkyn lagts på plats i diket återfylls diket med sand, så att Slinkyn täcks. Packning av sanden kan ske med vattenspolning, samtidigt som sanden då vattenmätts. Det är viktigt att sanden kan bibehålla fuktigheten under driften.

Svec (1994), Kanada, utvärderade en stor markvärmeanläggning för en skola i Ontario. Dimensioneringen av Slinky-värmväxlaren baserades på tidigare erfarenheter. För en värmelast på 3,5 kW krävs en 160 m plastslangsspiral sträckt till en längd av 25 m som läggs i ett 1,8-2,1 m djupt dike. Spiraldiametern är 0,6 m. Skolan hade en värmelast på 462 kW, vilket krävde 132 Slinky-värmväxlare. En grundlig utvärdering av anläggningen och jämförelse med fem andra skolor i området visade att Slinkyn gav likvärdig eller bättre prestanda än bergvärme till en lägre kostnad. Kostnaden för Slinky-värmväxlaren uppgick till 230 000 CAD (1 CAD = 6,7 kr). Man uppskattade att denna första stora installation skulle kunna reduceras med 5 % till ca 220 000 CAD. Kostnaden för en motsvarande bergvärmeanläggning uppskattades till 270 000 CAD med utgångspunkt från de andra skolprojekten. Anläggningen med Slinky-värmväxlare var således ca 20 % billigare.

Federal Energy Management Program (FEMP 1995), U.S. Department of Energy (DOE): En Slinky-värmväxlare använder 43,3-86,6 m rör per kW värmelast. Om grävningen är dyr, så kan Slinky vara ett sätt att minska installationskostnaden (förkortar dikeslängden).

IGSHPA (1995), USA, anger i sin installationsmanual att en kompakt Slinky reducerar dikeslängden med ca 2/3 jämfört med ett tvåslangssystem installerat på nivåerna 1,2 m och 1,8 m. En utdragen Slinky reducerar längden med ca 1/3 jämfört med ett sådant tvåslangssystem. Horisontell och vertikal Slinky har ungefär samma prestanda om de är installerade till samma djup. Man bör beakta risken för uttorkning. Problem med återfyllning har rapporterats för vertikala Slinkys.

Enligt avsnitt 9.3 så reducerar ett tvåslangssystem dikeslängden med ca 1/3 jämfört med ett enslangssystem. En kompakt Slinky behöver då knappt 25 % och en utdragen ca 45 % av dikeslängden för ett enslangssystem.

Dimensioneringsförfarandet enl. IGSHPA görs på följande sätt. Utgå från dominerande energilast (värme eller kyla). Dimensionera för en slang per dike genom att använda ekvivalent diameter motsvarande två rör, vilket ger total ekvivalent dikeslängd för en slang. Dela denna längd med 75 m för att få antalet Slinkydiken. För en kompakt Slinky är dikeslängden 25 m och för en utdragen Slinky dike är den ca 40 m. Dikeslängden beror delvis på belastningens

varaktighet. Manualen rekommenderar att en spiral med diametern 0,9 m läggs platt på botten i ett 1,8 m djupt dike.

Sanner m.fl. (1999), Tyskland, nämner i en översikt av Nordamerikanska erfarenheter att återfyllning av vertikala Slinky-värmeväxlare har varit ett problem. De flesta kommersiella installationer använder horisontella Slinky. Denna typ av markvärmeväxlare kräver störst slanglängd och högst pumpenergi per kW. Horisontella installationer används sällan i projekt större än 90 kW (Caneta Research 1995).

9.5 Dikeskollektor

9.5.1 Utländska erfarenheter

Mellan 1979 och 1984 installerades ungefär 300 dikeskollektorer i Österrike, Tyskland och Schweiz (Bruck och Gerbert 1985). Diket, som är 3 m djupt, utformas så att det har en bredd på 1,2 m vid basen och 2,5 m vid markytan. På dikets sluttande väggar placeras först ett skikt återfyllnadsmaterial med hög värmeledningsförmåga. Därefter anbringas ett stort antal, tätt liggande horisontella värmeväxlarrör med liten diameter (polyeten 20 mm i ytterdiameter och godstjocklek 2 mm), så att de bildar ett ”galler” med två meters höjd från dikets botten. I den ursprungliga utformningen användes 20 rör per meter dikeshöjd på vardera sidan av diket, vilket kräver 80 meter slang per meter dike. Rören täcks med ett skikt av återfyllnadsmaterialet, varefter diket återfylls med jord.

Värmeväxlaren är dimensionerad så att 1 m² ger 140 W termisk effekt (värmeeffekt från värmepumpen) vid 0 °C på inkommande värmebärare och 45 °C på den varma sidan. Denna dimensionering har visat sig fungera i de flesta jordar förutom i torra, sandiga jordar, lera och stenig mark. Maximalt värmeuttag från marken är 360-400 W per m dike. En värmeeffekt på 28 kW kräver ett dike på 50 m. Om värmeeffekten är högre görs fler diken. Centeravståndet mellan dikena bör då vara minst 5 m för att undvika termisk influens. I (Bruck och Gerbert 1985) redovisas verifierade effektuttag från fyra anläggningar: Dengler, Tyskland, värmeeffekt 9,2 kW, 25 m dike, 370 W/m; Werner, Tyskland, 18,4 kW, 33 m dike, 550 W/m; Endres, Tyskland, 29 kW, 50 m, 380 W/m; samt Lechner, Österrike, 18 kW, 33 m, 540 W/m. Temperaturen i kollektorerna låg mellan ca +2 till -5 °C. Återbetalningstiden anges till 3 år.

Gerbert (1986), Österrike, anger att 500 system har installerats i Österrike, Tyskland och Schweiz. Dikeskollektorn anses lämplig för uppvärmningssystem med maximal temperatur på 45 °C och kan användas som monovalent system. Alla jordarter är lämpliga utom sand och grus med hänsyn till rasvinkeln.

Fördelarna med dikeskollektorn är lågt flödesmotstånd, liten grävvolym och liten markyta (Gerbert 1991). Som jämförelse kräver en värmelast på 17,6 kW en dikeskollektor på 33 m (530 W/m), en horisontell enkelslang på 533 m (33 W/m), eller 319 m (55 w/m) tvåslangsvärmeväxlare. I ett försök användes under vintrarna 1985/86 och 1986/87 en dikeskollektor med en slangtäthet på 20 rör per meter: Under 1987/88 och 1988/89 konverterats denna kollektor till en slangtäthet på 10 rör per meter. Man fann ingen nämnvärd försämring av systemets termiska prestanda på grund av denna ändring.

I riktlinjer från ett statligt österrikiskt forskningsprogram (Faninger 1997) anges förläggningsdjup till 0,8-3,0 m, dikeslängd upp till 25 m och prestanda till 1,7-2,0 m dike per 1 kW värmelast (500-580 W/m). Värmepumpens årsvärmefaktor med dikeskollektor anges till 2,6-3,0.

9.6 Vertikala U-rör

För markvärmesystem med borrhål är vertikala U-rör den fullständigt dominerande typen. I Nordamerika används enkla U-rör i återfyllda borrhål som standard. I Mellanuropa är det vanligt med dubbla U-rör i återfyllda borrhål. I nordiska bergvärmesystem används enkla U-rör i grundvattenfyllda borrhål. Vid tillämpningar med frikyla förekommer även dubbla U-rör.

9.6.1 Utländska erfarenheter

Hughes (1985), USA, uppger att tumregeln för amerikanska installatörer är 75 W värmelast per m borrhål. Vid utvärdering (se även avsnitt 8.8.1) av ett antal anläggningar med horisontella och vertikala markvärmesystem fann man att passiv kylning med vertikal installation hade marginell kapacitet på eftermiddagen under varma dagar, men var tillgänglig under hela säsongen. Frikylning hade lägre årskylfaktor än kompressorkyla p.g.a. låg kapacitet, långa körtider för fläktar och cirkulationspumpen i markslingan.

Fleming (1987), USA: I ett fältförsök vid en kontorsbyggnad i Syracuse, New York, testades sju olika markvärmesystem (se även avsnitt 8.9.1). Byggnadens effektbehov för värme och kyla var 56 kW respektive 51 kW. Värmepumpen användes både för produktion av värme och kyla. Årsvärmefaktorn låg mellan 2,7 och 2,9 med en lägsta värmebärartemperatur till värmepumpen på 1,7 °C. Årskylfaktorn varierade mellan 2,9 och 3,1 med en högsta värmebärartemperatur på 26,7 °C. Ostörd marktemperatur är 10 °C. Med erfarenhet av försöken ges tumregler för markvärmesystemens dimensionering enligt [tabell 9.5](#).

Tabell 9.5. *Sammanfattning av tumregler för dimensionering av markvärmesystem baserade på fältförsöket i Syracuse, New York, USA (Fleming, 1987).*

Markvärmesystem	Värmelast per meter borrhål (W/m)		
	Marktyp		
	Hårt berg	Normalt berg	Hård betong
En	82	75	68
Två	89	81	71
Fyra	114	101	87
Sex	149	125	104

Matthey (1990), Schweiz: Enligt schweiziska erfarenheter bör man inte ta ut mer än 75 W/m i bergvärmesystem med ett borrhål. Man har inte observerat problem vid någon anläggning som tar ut maximalt 65 W/m baserat på en drifttid på 2 200 timmar. Värmeuttag bör ej överstiga 140 kWh/m/år i gynnsam mark (hög värmeledningsförmåga) eller 90-100 kWh/m/år i ogynnsam mark med låg värmeledningsförmåga. Detta gäller system utan återladdning av värme under sommaren. Optimal flödes hastighet för värmebäraren i slangarna anges till 1,5-2 m/s. För bergvärmesystem med flera borrhål bör avståndet mellan borrhålen vara minst 8-10 m.

Sanner (1992), Tyskland, fann vid en genomgång av driftsdata för utförda bergvärmesystem ett medelvärde på 100 W värmelast per meter borrhål i USA och Mellanuropa. Detta motsvarar ett uttag på 60-70 W/m från marken. I Europa var medelenergiuttaget

150 kWh/m/år. Detta gäller för anläggningar med 1 600-2 400 timmars drifttid. Medelvärdet för specifikt uttagen energi var 62 W/m med en tendens till ökande uttag under perioden 1980-1990, vilket anses bero på höga säkerhetsmarginaler i början av utvecklingen. Baserat på uppgifter från 12 anläggningar kan ingen korrelation mellan värmepumpens årsvärmefaktor och specifikt värmeuttag (W/m) konstateras, medan en negativ trend kan ses för korrelationen mellan årsvärmefaktor och specifikt uttagen energimängd (kWh/m/år). Här sjunker årsvärmefaktorn från ca 2,7 vid 60 kWh/m/år till 2,5 vid 150 kWh/m/år.

Mei m.fl. (1993), Kanada, redovisar att tumregeln för bergvärme i Kanada är ett värmeuttag av 38 W/m för enkelt U-rör (slangens innerdiameter 38 mm).

Breger m.fl. (1994), USA, utförde simuleringar med finita element metod avseende prestanda för U-rör (PEX ytterdiameter 18 mm) i lera ($\lambda=1,22$ W/(m,K)) med olika skänkelavstånd. Resultaten visade en kraftig förbättring i prestanda för dyngspulser då skänkelavståndet ökades från 0,1 m till 0,2 m.

SIA (1996), Schweiz, ger ett nomogram för dimensionering av markvärmväxlare med borrhål. Ingångsvärden till diagrammet är årligt energibehov (MWh/år), årlig energiförbrukning (MWh/år) för cirkulationspumpar, årsvärmefaktor, värmeeffekt (kW), höjd över havet (väsentlig klimatfaktor i Schweiz) och markens värmeledningsförmåga (W/(m,K)). Ur nomogrammet kan sedan utläsas erforderlig aktiv borrhålsdjup för en eller två borrhål.

Faninger (1997), Österrike: Vertikala markvärmväxlare kan dimensioneras för en värmelast på 80-100 W per meter borrhål, vilket motsvarar ett värmeuttag på 55-60 W/m vid en årsvärmefaktor på 2,6-3,2. Tumregler för maximalt specifikt värmeuttag ur mark för olika marktyper ges i [tabell 9.6](#).

Tabell 9.6. *Maximalt värmeuttag (W/m) ur mark vid en tillgänglig temperaturskillnad på 10 °C mellan värmebärarfluid och ostörd marktemperatur (Faninger, 1997).*

<i>Marktyp</i>	<i>Maximalt värmeuttag ur mark (W/m)</i>
Grus, torr	30
Grus, vattenförande	65
Lera, silt	35-45
Kalksten (massiv)	45-60
Sedimentära bergarter (sandsten)	60-65
Granit	65-70

Sanner m.fl. (1999), Tyskland: Schweizisk tumregel för en bergvärmebrunn är 50 W/m uttagen värme ur mark för installation med dubbla U-rör, enbart värme och 1 800 timmars drifttid. En vanlig regel i Schweiz, Tyskland och Österrike är att lägga till 20 % fler borrhål om systemet även användas för produktion av tappvarmvatten. Avståndet mellan närliggande borrhål bör vara minst 5 m vid 40-50 m borrhålsdjup och minst 6 m vid 50-100 m borrhålsdjup.

Verein Deutscher Ingenieure (VDI, 2001), Tyskland: Anläggningar med markkopplade värmepumpar där värmeeffekten understiger 30 kW kan dimensioneras med utgångspunkt från riktlinjer enligt tabell 9.7. För större anläggningar rekommenderas datorbaserade dimensioneringsprogram som tar hänsyn till termisk influens mellan närliggande borrhål. [Tabell 9.7](#)

gäller för värmeuttag (inkl. tappvarmvatten) för driftstider på 1 800 och 2 400 timmar. Vid längre driftstider bör man även beakta specifikt energiuttag. Detta värde bör ligga mellan 100 och 150 kWh/m/år. Om värme återladdas under sommaren kan dessa värden eventuellt justeras uppåt. Avståndet mellan närliggande borrhål bör vara minst 6 m. Riktlinjerna förutsätter även att veckomedelvärdet för skillnaden mellan ostörd marktemperatur och värmebärande fluidens temperatur från mark till värmepump ej skall överstiga 11 °C. Vid topplast bör denna temperaturskillnad ej överstiga 17 °C.

Tabell 9.7. Maximalt värmeuttag (W/m) för olika marktyper. Driftstider på 1 800 och 2 400 timmar per år (VDI 2001).

Mark	Specifikt värmeuttag W/m drifttid	
	1 800 timmar per år	2 400 timmar per år
Allmänna riktvärden:		
Låg värmeledningsförmåga (torra sediment) $\lambda < 1,5$ W/m,K	25	20
Normal värmeledningsförmåga (urberg och vattenmättade sediment) $\lambda = 1,5-3,0$ W/m,K	60	50
Hög värmeledningsförmåga (visst urberg) $\lambda > 3,0$ W/m,K	84	70
Enskilda jord- och bergarter:		
Grus, sand, torr	< 25	< 20
Grus, sand, vattenmättad	65-80	55-65
Silt, lera, fuktig	35-50	30-40
Kalksten (massiv)	55-70	45-60
Sandsten	65-80	55-65
Granit	65-85	55-70
Basalt	40-65	35-55
Gnejs	70-85	60-70
Undantag:		
Grus, sand, med stark grundvattenström		80-100

9.6.2 Svenska erfarenheter

Wilén (1984) utvärderade driften av en försöksanläggning i Alingsås med en villavärmepump kopplad till ett värmelager i lera. Värmelagret använde 28 st vertikala U-rör (PEM slang med diameter 28 mm) till 16 m djup, vilket innebar totalt 436 m markvärmeväxlare. Avståndet mellan U-rörets skänklar var 0,15 m. Leran hade värmeledningsförmågan 1,1 W/(m,K) och värmekapaciteten 3,96 MJ/m³K. Värmepumpen gav 100 % energi- och effekttäckning för enfamiljshuset med 200 m² bostadsyta och ett uppvärmningsbehov på 265 W/K (motsvarande husets k-värde). Utvärdering av driften för perioden 1981-83 visade att uttagen energimängd under vintern ej översteg 3000 kWh/månad, vilket motsvarar en medeffekt av uttagen värme på 4 kW (ca 10 W/m markvärmeväxlare). Man observerade viss frysning under en vinter. Värmepumpens årsvärmefaktor var 2,2.

Från den 30 april till den 15 oktober återladdades värmelagret med hjälp av en vindkonvektor. Total drifttid för återladdningen var 2 150 timmar med en medeleffekt på 8 kW. Erforderlig pumpenergi uppgick till 1 200 kWh (pumpeffekt 0,6 kW). Pumpen bedömdes dock vara onödigt stor. Återladdningen under en dag utfördes mellan kl. 08-22. Under denna tid sjönk tillförd effekt från 15 kW till 5 kW p.g.a. lerans termiska tröghet. Temperaturhöjningen i U-rörens omedelbara omgivning ledde till en ökande temperatur på värmebäraren, vilket reducerade luftkonvektorns effektivitet. Lagrets medeltemperatur varierade från 2-3 °C under vintern till 13-14 °C på sensommaren. Återbetalningstiden för systemet uppskattades till 10 år. Wilén (1984) anger att det hade varit fördelaktigare att dimensionera markvärmväxlaren för uttag av värme (istället för värmelagring) genom att placera U-rören glesare och mer exponerat i två parallella rader.

Rhen och Wilén (1984) utförde en projektering av ett värmelager för en panncentral i Göteborg med ett värmebehov på 1 100 MWh. Energiförbehovet skulle täckas till 80 % av värmepump/vindkonvektor och till 20 % med oljepanna. En jämförelse mellan förläggning i lera och sand/silt indikerade att det behövdes 36 (6 × 6) U-rör med inbördes avstånd 2 m i lera och 25 (5 × 5) U-rör med inbördes avstånd 2,5 m i sand/silt. Kostnaden för U-rör i lera uppskattades till 60 kr/m i lera och till 80 kr/m i sand/silt, vilket indikerar likartad eller möjligen något högre kostnader för värmelagret i lera.

Hellström m.fl. (1988) genomförde en teknisk och ekonomisk utvärdering av vertikala U-rör i lera. Markvärmväxlare med 1-3 U-rör per nedstick, med och utan återfyllning av sand, jämfördes med avseende på installationskostnad för likvärdiga termisk prestanda avseende långvariga effektpulser i samband med värmelagring (tätt placerade markvärmväxlare). Antalet erforderliga nedstick beror på de olika markvärmväxlarnas utförande och effektivitet. Termisk prestanda angavs här som värmeöverföring per lagervolymenhet och tillgänglig temperaturdifferens mellan värmebärare och lagrets medeltemperatur. Denna volumetriska värmeöverföringsförmåga har enheten $W/(m^3, K)$ och ökar för: kortare avstånd mellan näraliggande markvärmväxlare; större skänkelavstånd (mindre termisk influens mellan U-rörets skänklar); högre värmeledningsförmåga i marken samt lägre värmemotstånd mellan värmebärare och omedelbart omgivande mark (rörets värmemotstånd och kontaktmotstånd). För det betraktade värmelagret fann man att dubbla U-rör utan sandåterfyllnad gav lägst total installationskostnaden för ett skänkelavstånd nära 0,5 m. För kortare skänkelavstånd gav enkelt U-rör utan sandåterfyllnad lägst kostnad. Vid högre volumetrisk värmeöverföringsförmåga var dubbla U-rör billigare för skänkelavstånd över 0,3 m. Om geotekniska hänsyn kräver sandåterfyllnad för att reducera portrycksvariationer i leran bör man i första överväga ett enkelt U-rör med skänkelavstånd 0,2-0,3 m. Den totala installationskostnaden för U-rör utan sandåterfyllnad minskade med ökande skänkelavstånd (i det undersökta intervallet från 0,1-0,5 m).

Sundberg och Ledskog (1989) datorsimulerade olika markvärmväxlare vid olika belastningar och klimatzoner. Dessa är flernivåsystem och jordvärmebrunnar, vilket liknas vid en bergvärmebrunn i jord. I modellen kan hänsyn tas till fasomvandling vid frysning, effekt av snötäcke och återladdning av markvärmväxlare. Simuleringarna utfördes med en något mer utvecklade modell än för flernivåsystemen. Simuleringsprogrammet var skrivet för koaxiala rör. För att efterlikna 15 m djupa U-formade slangar, placerade med inbördes avstånd 2 meter på en linje, ansattes större diameter m.h.t. att U-röret har bättre värmeöverförande egenskaper.

För jordvärmebrunnen i lera är energiuttag på ca 10 W/m vertikalt nedstick möjliga utan återladdning. Återladdning medför att energiuttaget kan ökas till 15-20 W/m beroende på

återladdningens storlek. Vid ett jorddjup av 20 m innebär detta att 7-15 nedstick på en linje med inbördes avstånd 2 meter är nödvändigt för att försörja ett enfamiljshus med toppeffekt-behov 10 kW. Värmepumpen motsvarar 50 % effektäckning.

Sanner (1992) redovisar två svenska projekt i en internationell sammanställning över termiska prestanda för bergvärmeprojekt. Se **tabell 9.8**. I Järfälla återladdades 8 MWh under sommaren. Täby använder ett bivalent system, så att toppeffekten täcks med annan energikälla.

Tabell 9.8. Termiska prestanda för bergvärmeanläggningar i Järfälla och Täby. Värmepumpens driftstid var 4000 respektive 5190 timmar (efter Sanner, 1992).

Ort	Värmelast		Borrhålsdjup (m)	Termiska prestanda		
	kW	MWh		W/m	KWh/m/år	COP
Järfälla	10	40	216	30	119	2,2
Täby	81	420	1050	50	257	2,1

Magnusson m.fl. (1992) utvärderade ett termiskt responstest för ett värmelager i lera i Söderköping. Värmelagret använder 382 st dubbla U-rör (PEM diameter 25 mm) till 18 m djup. Avståndet mellan U-rörens skänklar uppskattas till 0,4 m. Jämförelse mellan teoretisk beräkningsmodell baserad på ren värmeledning och mätvärden visade god överensstämmelse. Den mest betydelsefulla osäkerheten för dimensioneringen befanns vara lerans värmeledningsförmåga och U-rörens skänkelavstånd. Vid drift var effekten vid värmeuttag och värmeförsörjning ca 400 kW, dvs ca 60 W/m markvärmväxlare eller 15 W/m slang.

9.7 Vertikala Slinky

9.7.1 Utländska erfarenheter

Mei m.fl. (1993), Kanada, utförde först försök med en typ av vertikal sanddrän bestående av fyra perifera kopparrör (diameter 12,5 mm) i ett sandfyllt borrhål med diameter 0,3 m. Denna markvärmväxlare gav 3 gånger bättre värmeöverföring än en konventionellt utförd markvärmväxlare med ett enkelt vertikalt U-rör av polyeten. Med utgångspunkt från dessa erfarenheter installerades sedan en s.k. vertikal Slinky. Vid fältförsöket kopplades en markvärmepump med värmeeffekten 7 kW till ett experimenthus, 85 m² bostadsyta, med ett uppvärmningsbehov av 58,5 W/K. Två st 15 m djupa borrhål med 6 m inbördes avstånd utrustades med en vertikal spiral av kopparrör. Spiralens diameter var 28 cm med 15-18 cm stighöjd mellan gängorna. Jämfört med ett konventionellt U-rör i plast kunde totalt djup reduceras med 60-65 %. Säsongsmedelvärdet för uttagen effekt ur marken var 117 W/m, vilket anges vara tre gånger högre än konventionellt U-rör. Ett problem under detta försök var sättningar i samband med att leran närmast borrhålet frös under den första vintersäsongen.

Kavanaugh (1999), USA, rapporterade om en typ av markvärmväxlare som har stora likheter med vertikala Slinky (se ovan). Dessa s.k. "large-diameter bore-coils" har en diameter på 0,9 m och ett djup på 15 m. Spiralslingan består av polyetenslang med innerdiameter mellan 17 till 27 mm. Distanselement används för att fixera stighöjden i spiralen. Borrhålet återfylls med material som har hög värmeledningsförmåga. Uppskattad termisk prestanda för enkla U-rör och "large-diameter bore coils" ges i **tabell 9.9**. Borrhålskonfigurationen avser borrhålens placering i markytan, 5 × 6 avser kompakt placering och 1 × 30 avser gles, exponerad placering.

Tabell 9.9. Uppskattade termiska prestanda för enkelt U-rör och "large-diameter bore-coils" (efter Kavanaugh, 1999).

Enkelt U-rör, borrhålsdiameter 125 mm, slangdiameter 35 mm			
Borrhålskonfiguration	Borrhåls-avstånd (m)	Maximal värmelast per m markvärmväxlare	
		År 1	År 10
5 × 6	6	61	52
1 × 30	6	62	57
1 × 30	12		
"Large-diameter bore-coils", borrhålsdiameter 0,9 m, slangdiameter 27 mm			
Borrhålskonfiguration	Borrhåls-avstånd (m)	Maximal värmelast per m markvärmväxlare	
		År 1	År 10
5 × 6	6	214	101
1 × 30	6	245	175
1 × 30	12	275	226

"Large-diameter bore-coils" uppskattas kunna reducera erforderlig markvärmväxlarlängd med 50 % för tät placering (år 10), 66 % vid exponerad placering och 75 % med exponerad och gles placering. Vad beträffar installationskostnaden påpekas särskilt den relativt stora volymen återfyllnadsmaterial som krävs.

9.8 Energipålar

9.8.1 Utländska erfarenheter

Fromentin och Pahud (1997), Schweiz: Pålar för grundläggning kan utan stora kostnader omvandlas till energipålar. Under de senaste 10 åren har ett antal projekt genomförts och utvärderats i Schweiz. Erfarenheterna har använts för att validera ett simuleringsprogram (TRNSYS) för energipålar. Detta program har sedan utnyttjats för att ta fram dimensioneringsregler för lokaler med stora ytor (industri- och kontorsfastigheter). Man har funnit att marken normalt måste återladdas med 70-90 % av uttagen energimängd för att undvika långsiktig nedkylning med risk för frysning av marken. Dimensioneringsreglerna för detta fall sammanfattas i [tabell 9.10](#) och är baserade på ett monovalent system med årligt värmebehov av 200 MWh och värmepumpar med ca 100 kW värmeeffekt. Energipålar har en diameter på 0,35 m och ett inbördes avstånd av 4 m. Två till fyra U-rör av polyetenslang är ingjutna i varje energipåle bestående av betong (värmeledningsförmåga 1,8 W/(m,K)). För detta referenssystem så kan 1,5-2 m² golvyta uppvärmas med 1 m energipåle. Om marken återladdas till mer än 90 % finns risk för uppvärmning av marken, vilket motverkar möjligheten att använda den under vintern nedkylda marken för frikyllning under sommarhalvåret.

Tabell 9.10. Dimensionering av energipålar avseende värmeeffekt från mark och årligt energiuttag beräknat per meter energipåle för mark med värmeledningsförmåga 1,3 respektive 2,3 W/(m,K). Marken återladdas med energi motsvarande 70-90 % av uttagen energimängd (Fromentin och Pahud, 1997).

Markens värmeledningsförmåga (W/(m,K))	Värmeeffekt från mark (W/m)	Årligt energiuttag ur mark (kWh/m/år)
1,3	25-30	60-65
2,3	30-35	65-80

Återladdningen bör ske med maximalt 30 W/m och 20-60 kWh/m/år för att erhålla en långsiktig balansering av energiflödet till och från den termiskt aktiva markvolymen. På grund av att den pålade markvolymen får en något lägre temperatur än omgivande ostörd mark, så sker en viss regenerering genom värmeledning från varmare omgivande mark.

Om det förekommer ett starkt grundvattenflöde i det aktuella markskiktet har detta en gynnsam effekt på systemets termiska prestanda. Ett grundvattenflöde överstigande 0,5-1 m/s (avser s.k. Darcy-hastighet) leder till ett betydande konvektivt tillflöde av värme under perioder med värmeuttag. Marktemperaturen blir väsentligen återställd både efter perioden med värmeuttag som efter perioden med värmeförsel. Värmeuttaget kan ökas till mer än 50 W/m och uttagen energimängd till mer än 100 kWh/m/år om det finns en stark grundvattenström i jorden. Frikylningen kan ökas till mer än 30 W/m och mer än 80 kWh/m/år.

Returtemperaturen från värmepumpen får ej understiga 0 °C eftersom frysning vid kontaktytan mellan jord och energipåle kan påverka bärigheten. Inte bara friktionspålar, utan även spetsburna pålar, som vilar på ett fast markskikt eller berg, kan påverkas negativt genom frys-skador på betongen. Cirkulationspumpens effekt bör ej överstiga 10 % av värmepumpens värmeeffekt. Årsvärmefaktor utan frikyla anges till 3,1. Med frikyla stiger det kombinerade arbetstalet (mängd nyttig energi (värme och kyla till hus) dividerat med tillförd primär energi) för värme och kyla till 4,9.

Koene m.fl. (2000), Nederländerna: Typiska värden för möjligt värmeuttag (per meter energipåle) i olika jordar är: mindre än 20 W/m i torr sand, 55-65 W/m i vattenmättad sand och 30-40 W/m i fuktig lera. Avståndet mellan olika pålar antas vara 5 m. En kostnadseffektiv användning av värmepumpen förutsätter en driftstid på 3 000-4 000 timmar per år, vilket ger 70-90 % av värmebehovet. Flera projekt har genomförts i Holland. Antalet pålar har uppgått till mellan 24 och 150 stycken. Ett värmeuttag av 20-25 W/m har erhållits med lägsta värmebärarterperaturer kring 3-4 °C.

9.9 Svensk dimensioneringspraxis

I mitten av 1980-talet utvecklade Svenska Värmepumpföreningen tillsammans med Sveriges Avanti-borrare förening och Statens Vattenfallsverk en lathund (SVEP, 1985) för energidimensionering av en bergvärmebrunn. Underlaget härrör från mätningar och utvärderingar av termiska prestanda för 10-20 bergvärmeinstallationer, samt jämförelser mot simuleringsmodeller utvecklade av Markvärmegruppen i Lund. Denna lathund används fortfarande i ett väsentligen oförändrat skick enligt det faktablad som utgavs 1999 av Kylbranschens Samarbetsstiftelse (KYS, 1999). Detta faktablad kan betraktas som aktuella riktlinjer för dimensionering av bergvärme i Sverige. Faktabladet innehåller även anvisningar för dimensionering av yttjordvärme. Riktlinjerna enligt faktabladet beskrivs nedan.

Sverige indelas i fyra zoner bestämda av ostörd marktemperatur enligt figur 8.2. Denna marktemperatur ger inte bara förutsättningar för markvärmväxlarens möjliga prestanda, utan återspeglar även till viss del det styrande klimatet (lufttemperaturens medelvärde) för värmelasten. Klimatet påverkar uppvärmningssäsongens längd (värmepumpens totala drifttid) och andelen tappvarmvatten i förhållande till hela värmebehovet. Zonindelningen omfattar i huvuddrag följande regioner:

- Zon I: Götalands kustland, Skåne, Öland och Gotland.

- Zon II: Södra Svealand, inre Götaland.
- Zon III: Södra Norrlands kustland, södra Dalarna, mellersta Värmland.
- Zon IV: Norrland (förutom södra Norrlands kustland), norra Dalarna, nordligaste Värmland.

Riktlinjerna anges som värmeuttag per meter slang eller borrhål beräknade för en lägsta inkommande värmebärartemperatur till värmepumpen på $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Eftersom pumpflödet normalt är konstant under året, så kommer temperaturdifferensen över värmepumpen att variera med uttagen värmeeffekt. Värmeeffektens storlek är beroende av värmebärarens temperatur. Riktlinjer för ytjordvärme och bergvärme ges i [tabell 9.11](#) respektive [tabell 9.12](#).

Tabell 9.11. Riktlinjer för dimensionering av ytjordvärmesystem i zon II enligt KYS (1999) avseende maximalt värmeuttag per meter slang (W/m) under förutsättning att inkommande värmebärartemperatur till värmepumpen ej understiger $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ och att maximalt uttagen energimängd under året ej överstiger 50 kWh/m.

Effekt-täckning (%)	Energi-täckning (%)	Drifttid VP (timmar)	Maximalt värmeuttag per m slang (W/m)		
			Normal torr jord	Fuktig moränjord	Mycket fuktig jord
30	68	5000	8	10	12
40	80	4450	8,5	10,5	13
50	88	3950	9,5	12	14
60	93	3500	10	13	15,5
70	96	3100	11	14	17,5
80	98	2800	12	15,5	20
90	99	2550	13	17	23
100	100	2400	14	18	25

Korrigerings av slanglängd: Zon I -5% , Zon II 0% , Zon III $+15\%$, Zon IV $+25\%$.

Tabell 9.12. Riktlinjer för dimensionering av bergvärmesystem i zon II enligt KYS (1999) avseende maximalt värmeuttag per meter aktivt borrhål (W/m) under förutsättning att inkommande värmebärartemperatur till värmepumpen ej understiger $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ och att maximalt uttagen energimängd under året ej överstiger 150 kWh/m.

Effekt-täckning (%)	Energi-täckning (%)	Drifttid VP (timmar)	Maximalt värmeuttag per meter borrhål		
			$\lambda=2,5$ W/(m,K)	$\lambda=3,0$ W/(m,K)	$\lambda=3,5$ W/(m,K)
30	68	5000	29	34	38,5
40	80	4450	29,5	34,5	39
50	88	3950	30	35	39,5
60	93	3500	32,5	37	42
70	96	3100	35,5	40,5	46
80	98	2800	38,5	44,5	50
90	99	2550	43	49	55
100	100	2400	47	54	60

Korrigerings av aktivt borrhålsdjup: Zon I -5% , Zon II 0% , Zon III $+15\%$, Zon IV $+25\%$.

Vad beträffar ytjordvärme anger Svenska Värmepumpföreningen (SVEP, 1998) att slingorna kan förläggas på 0,6-1,5 m djup. Vanligt djup är 0,8-1,0 m, men djupet bör vara större längre norrut i Sverige. Avståndet mellan slingorna är normalt ca 1,5 m, men får ej vara mindre än 1,2 m eftersom det anses leda ett tillstånd där fryst mark förhindrar avrinning. Möjlig utvunnen värmeeffekt är 20-30 W per meter slang då slangens diameter är 40 mm utvändigt.

Om energiuttaget från ytjordvärmekollektorn blir för stort kan det leda till att permafrost utvecklas. Jansson och Lundin (1984) anger ungefärliga gränser för värmeuttaget i sand och torv enligt tabell 9.13. Grundvattenytan antas vara belägen på 1,5 m djup under markytan. Slangarna ligger på djupet 0,8 m. Om slangarna läggs djupare inträder permafrost vid lägre energiuttag än de som redovisas i [tabell 9.13](#).

Figur 9.13. Ungefärlig gräns för årligt energiuttag då permafrost inträder. Slangar på djupet 0,8 m och grundvattenytan på djupet 1,5 m (Jansson och Lundin, 1984).

Jordart	Årligt energiuttag (kWh/m ² /år) då permafrost uppstår		
	Luleå	Uppsala	Kristianstad
Torv	35	55	70
Sand	90	110	130

10. DRIFT OCH UNDERHÅLL

De uppgifter som presenteras i detta avsnitt avser i huvudsak mindre värmepumpsystem för villor. Uppgifterna kommer delvis från tillverkare och andra intressenter i branschen, som trots goda föresatser företräder ett partsintresse.

10.1 Drifterfarenheter

Hur väl ett system med markvärmepump fungerar beror på kvaliteten i installationen, speciellt hur väl markvärmepumpen är inkopplad med befintliga system för värme och kyla.

Värmepumpens kapacitet är starkt beroende av temperaturen hos värmekällan och värmesänkan. Generellt gäller för att uppnå hög effekt och värmefaktor att värmekällan (värmebäraren) skall ha hög temperatur och värmesänkan (husets distributionssystem) skall ha låg temperatur (Andersson, 1996). Styr- och reglerutrustning måste vara avsedd för värmepumpdrift. Värmepumpen arbetar med styrd framledningstemperatur i husets uppvärmningssystem och skall aldrig producera varmare vatten än systemet kräver.

De aspekter som rör driften är främst:

- varmvattentemperaturer (bakterietillväxt),
- returtemperatur (verkningsgrad),
- luft/partiklar i rörsystem samt läckage av värmebärarvätska (värmepumpen stannar),
- marktemperatur (nedsatt biologisk aktivitet "försenad vår" och markdeformationer),
- dimensionering (återladdning – risk för permafrost),
- ljudnivå (buller),
- energi- och kostnadsbesparing.

Varmvattentemperatur

I Boverkets byggregler föreskrivs en varmvattentemperatur på lägst 50 °C för att undvika att legionellabakterier förökar sig. Legionellabakterier trivs bäst i temperaturer mellan 15-45 °C. En värmepump producerar varmvatten i intervallet 50-55 °C. Om varmvattnet förbrukas under dygnet är risk för farlig bakterietillväxt liten eftersom problemet främst uppstår om vattnet blir stillastående en längre tid. I många system går en elpatron in och höjer temperaturen vid kraftig tappning. Man kan också använda s.k. varmvattenspets för att döda de bakterier som kan förekomma i en varmvattenberedare. Varmvattenspets innebär upphettning till 65 °C, förslagsvis med 1-2 veckors mellanrum (www.vet.se, 2000).

Returtemperatur

I ett hus med vattenburen värme bör returtemperaturen vara lägre än +48 °C och helst så låg som möjligt (STEM, 2000). I normala fall stannar värmepumpar om temperaturen är högre än +48 °C. Ju lägre returtemperatur desto högre verkningsgrad får värmepumpen.

Om det finns en elpanna (el/olja) kan denna utnyttjas för att höja framledningstemperaturen efter värmepumpen, under kalla vinterdagar. Pannan kan också användas för att värma tappvatten under sommaren.

Luft/partiklar samt läckage

Den cirkulerande värmebärarvätskan (värmekällan) skall vara fri från luft och vara under ständigt övertryck. Detta för att undvika rost. Ett system med övertryck kan ge larm om sys-

temet skulle läcka (Naturvårdsverket, 1999). Värmesänkan (i huset) måste också vara fri från luft, annars kan värmepumpen stanna på grund av driftstörning (Andersson, 1996). Partiklar får inte heller förekomma eftersom det då finns risk för igensättning av förångare och kondensator. Rörsystemet inomhus kan spolats rent med högtrycksutrustning innan värmepumpen kopplas på eller sedan värmepumpen kopplats förbi.

Brunnsbörarrorganisationen Geotec anger att sannolikheten för grundvattenförorening för slutna markvärmesystem generellt är mycket liten och att läckage av värmebärarvätskor är mycket sällsynta (www.geotec.se, 2000). I de fall läckage har förekommit har mängden utläckt värmebärarvätska sällan överstigit 10 liter. Konsekvenserna av ett läckage är beroende av vilken vätska som används och av omgivningen.

Ahlkrona och Johansson uppger i en sammanställning från 1983 att 5000 system med horisontella markvärmeväxlare hade installerats i Sverige. Läckage av värmebärarfluid observerades i 130 av de 5000 anläggningarna. I 90 % av fallen rörde det sig om 2-3 liter. Den vanligaste orsaken var läckande kopplingar.

Läckage orsakas nästan uteslutande genom att själva installationen varit dåligt utförd, att luft släppts in eller att undermåligt material eller materialkombinationer använts (www.geotec.se och Svensson et al., 1990). Enligt Naturvårdsverkets rapport 4994 (Lindborg, 1999) ska systemet installeras med övertryck och en tryckvakt som larmar vid tryckfall (läckage). Värmepumpen är i de flesta fall utformade så att om det uppkommer en läcka på markvärmeväxlaren stängs den pump som används för att cirkulera värmebärarvätskan automatiskt av p.g.a. det tryckfall som uppstår. Detta samt att ett undertryck uppstår i systemet medför att utpumpningen av värmebärarvätska till omgivande mark upphör.

Läckage av värmebärarvätskor kan innebära krav på sanering om värmebärarvätskan innehåller toxiska ämnen, som t.ex. metanol (www.dep.state.pa.us). Värmebärarvätskor som är biologiskt nedbrytbara är att föredra. I Sverige rekommenderas bl.a. etanol, etylenglykol och glycerol av rapsolja (Lindborg, 1999) och i USA rekommenderas kaliumacetat eller propylenglykol (www.dep.state.pa.us, 2000).

Marktemperatur

På tomter där markvärmeväxlare för ytjordvärme installerats har ibland problem uppstått med störd växtlighet, långvarig tjäle och tjälskjutning på tomten. Orsaken kan vara att slangarna i marken ligger för tätt eller för ytligt, eller att värmeuttaget varit för stort. Vid stora värmeuttag kan ett tillstånd av permafrost uppstå om marken inte hinner tina mellan uppvärmningssäsongerna. Permafrost på djupet förhindrar också nedträngning av nederbördsvatten, som därmed kan ansamlas på markytan. Upp till en veckas försening av våren får dock betraktas som normalt. Problemet kan undvikas helt genom att inte ta ut så mycket värme att jorden fryser runt markvärmeväxlarna. Markvärmeväxlaren kan också vara för liten för att kunna tillgodose det aktuella värmebehovet.

Sättning och andra ojämnheter som kan uppstå när tjälen går ur marken åtgärdas genom uppfyllning med mindre sättningskänslig jord. Effekter i jord av frysning minskar dock med tiden, efter några få upprejade frys- och tiningscyklar.

Ett tjockt snötäcke har en positiv betydelse för energibalansen i jorden eftersom det verkar isolerande mot den kalla utomhusluften. Tjälldjupen minskar, tjälsäsongen blir kortare och

värmebärrävsans temperatur ökar. Om systemet dimensionerats så att tjälen runt slangarna blir relativt begränsad och slangarna ligger avskilda från den naturliga tjälen i markytan erhålls relativt stabil värmebärartemperatur året om. Om tjälen runt slangarna och i markytan bildar en sammanhängande kropp varierar värmebärartemperaturen mera, särskilt under vintern (Ahlkrona & Mogensen, 1987). Utvärdering av sju ytjordvärmeanläggningar i Sverige, från norr till söder, visade att energiuttaget under ett normalår var mellan ca 25 kWh/m (Umeå) och ca 73 kWh/m (Djursholm, Danderyd) (Ahlkrona & Mogensen, 1987). Som en jämförelse anges den värme som kan utvinnas vid ytjordvärme till ca 30 kWh per meter slang och år (www.energiinfo.nu/varmahuset.htm). Motsvarande siffra vid bergvärme anges till 145 kWh per meter borrhål och år.

Marktemperaturens variationer beror förutom av värmeuttaget också på utetemperaturen, skuggighet, typ av ytskikt, vegetation och markens termiska egenskaper, speciellt under vårsommar-höst (Ahlkrona & Mogensen, 1987).

Dimensionering

Markvärmväxlarna dimensioneras för aktuella värme- och effektbehov. I markvärmesystem med slangar i jord förutsätts ibland att jorden närmast slangarna fryser. Detta för att få tillgång till det så kallade "frysvarmet". Om inte marken får möjlighet att återhämta sig kan frysningen bli bestående eller leda till en kontinuerlig minskning av medelmarktemperaturen från år till år.

Olika jordar är olika känsliga mot frysning/tining, se vidare kapitel 3. Frysning av tidigare ofrusen lera bör t.ex. undvikas eftersom mycket stora sättningar uppstår vid tining. Det är då risk att slangar och anslutningar skadas. I samband med frysningen expanderar jordvolymen när porvatten fryser till is och det bildas islinser. Tjällyftningens storlek beror främst av hur mycket vatten leran innehåller. I samband med tining kollapsar jordstrukturen. Det synliga resultatet är att vatten separeras från de fasta partiklarna och ansamlas i övre delen av de hål som bildas, medan partiklar sedimenterar ned till de lägre delarna. Detta vatten sjunker med tiden undan men viss ojämnhet på markytan kvarstår. Med tiden blir jorden alltmer tjälresistent.

Ljud

Ljud från en markvärmepumps kompressor eller från fläktar till en uteluftvärmepump kan upplevas som störande. Var värmepumpen installeras, och även typ av golv och anslutning till värmesystemet påverkar ljudnivån. Buller från värmepumpen kan t.ex. minskas genom att ställa den på fjädrande "fötter" och/eller förse den med ljudhuv eller dylikt. Större värmepumpar är ibland försedda med s.k. scrollkompressor av ljudskäl.

Energi- och kostnadsbesparing

I ett hus på omkring 125 m² som förbrukar 20 000 kWh/år för värme och varmvatten sparar man cirka 9 000 kWh per år genom att installera en markvärmepump. Denna besparing motsvarar, med ett elpris på 60 öre/kWh, 5 400 kr/år (STEM, 2000).

Flödes hastigheten i markslingan bör vara låg. Visserligen minskar värmepumpens elförbrukning vid ett högre flöde men denna besparing motverkas av ökad elförbrukning för cirkulationspumpen.

Svenska Värmepumpföreningen (SVEP) rekommenderar att man åtminstone första driftåret för dagbok över avläst elförbrukning, ute- och innetemperatur och andra anläggningsspecifika värden. På så vis går det att jämföra elförbrukningen mot de i offerten angivna. Ifall avvikelser är stora kan anläggningen behöva justeras.

Svensk enkätundersökning av felfrekvens

Senare hälften av 1980-talet intervjuades ett hundratal värmepumpägare i Danderyds kommun för att ta reda på hur värmepumpen fungerar efter några års drift (Melinder, 1992). Intervjuerna gjordes i form av enkäter vid sammanlagt 4 undersökningsomgångar. De undersökta anläggningarna hade varit i drift mellan 1 till 9 år. Något fler fel erhöles i anläggningar med luftvärmepump än motsvarande med berg eller jord som värmekälla. Vid den senaste undersökningsomgången (1990/91) uppvisade majoriteten av anläggningarna inget fel (65 %) och ingen anläggning hade fler än två fel. Antalet fel avtog också med antalet driftsår.

Internationell jämförelse

I en nordamerikansk studie har 31 stycken markvärmearläggningar studerats med avseende på systemutformning, kostnader, värmeteknisk funktion (*performance*), driftsvårigheter och konsumenttillfredsställelse (Cane 1996). Antalet driftsproblem var generellt få. Bland rapporterade driftstörningar fanns felaktigt inställda flöden, läckage i värmebärarkretsen, tjällyftning i marken, otillräcklig värmeväxling mot marken samt buller. Intervjuer visade att huvuddelen av fastighetsägarna, 10 av totalt 14 intervjuade, hade mycket positiva erfarenheter av anläggningarna. Fyra fastighetsägare var mindre nöjda främst p.g.a. problem i inledningsskedet, vilka senare rättades till.

10.1 Underhåll och skötsel

Värmepumpen kräver normalt lite skötsel. Alla inställningar utförs i samband med installationen. Moderna anläggningar har koppling till dator för styrning så att rätt fördelning erhålls mellan värmepump och tillsatsvärmekälla, som t.ex. kan utgöras av direktel eller befintlig panna. Villaägaren ställer in värme samt temperatur på varmvattnet. Dessa uppgifter har också redan använts i samband med dimensioneringen av anläggningen.

För ett korrekt dimensionerat system har markvärmearlare i berg och jord i princip obegränsad livslängd med avseende på förmågan att leverera värme (www.geotec.se, 2000). De olika komponenter som ingår i installationen har däremot olika livslängd. Livslängden hos stålfoderrören och markvärmearlarens slang uppskattas till ca 100 år (www.geotec.se, 2000). Om rekommenderade stålfoderrör enligt Normbrunn 97 används är enligt samma norm livslängden för dessa 96 år under normala förhållanden. Efter omkring 15-20 år kan det i normalfallet bli aktuellt att byta eller renovera kompressorn. Ett kompressorbyte kostar ca 10 000 kr samt tillkommer vartannat år kostnader för service.

Det är ovanligt att läckage av köldbärare sker i moderna värmepumpanläggningar men värmepumpen bör ses över och servas vart tredje år (www.svep.se). Vissa typer kräver tätare serviceintervaller. För att förebygga läckage till omgivningen bör ägaren kontrollera att värmebärarsystemet alltid har föreskrivet övertryck genom avläsning av manometer (Lindborg, 1999). Trycket varierar inom ett bestämt intervall beroende på medeltemperaturen i kretsen. Tryckvakten skall vara så inställd att den ger larm vid för lågt tryck. Vid larm tillkallas servicepersonal för läcksökning. Efter tätning av läckan rensas slangen, återfylls med värmebärarvätska, följt av avluftning och återställning av driftstrycket.

Internationell jämförelse

I en amerikansk artikel rekommenderas för kommersiella anläggningar att cirkulationspumpar genomgår rutinunderhåll och att mätning av temperatur, tryck, flöde och koncentration av frostskyddsmedel utförs rutinmässigt i det slutna markvärmesystemet.

11. EKONOMISK ANALYS

I kapitlet presenteras kostnader för investering och drift av värmepumpinstalleringar med markvärmepump för enskilda villor respektive kontorshus. Den uppskattade kostnaden för villasystemen jämförs mot alternativa system för uppvärmning, dels för att bedöma systemens konkurrenskraft, dels möjlig utvecklingspotential för olika installationsmetoder. För villasektorn redogörs också för de försäkringar och garantier, som lämnas på den svenska marknaden.

En bedömning av möjliga installationsmetoder med utgångspunkt från tomtarea, jorddjup och kostnadseffektivitet görs i **tabell 11.1**. Vid en första bedömning är den fysiskt tillgängliga ytan av stor betydelse. Mycket talar för att kompakta horisontella installationer är fördelaktiga även när det finns tillgång till stora ytor.

Tabell 11.1. Vanliga installationsmetoder m.h.t. tomtarea, jorddjup och kostnadseffektivitet.

Tillgänglig tomtarea	Jorddjup	Borrhål i berg	Vertikal installation i jord	Horisontell läggning av rak slang	Kompakta slangar i jord
<i>liten:</i> <250 m ²	<4-5 m djup, <i>litet</i>	X			X
	5-15 m djup, <i>medel</i>	X			X
	>15 m djup, <i>stort</i>		X		X
<i>medel:</i> 250-400 m ²	<4-5 m djup, <i>litet</i>	X		X	
	5-15 m djup, <i>medel</i>	X		X	
	>15 m djup, <i>stort</i>		X	X	
<i>stor:</i> >400 m ²	<4-5 m djup, <i>litet</i>	X		X	
	5-15 m djup, <i>medel</i>	X		X	
	>15 m djup, <i>stort</i>		X	X	

I **tabell 11.2** finns en sammanställning över vilken/vilka installationsmetod(er) som är att föredra vid olika geologiska förutsättningar med hänsyn till installationskapacitet och kostnad för markvärmepump till ett villasystem. Kostnaden anges per meter markvärmepump och inkluderar materialkostnad och installation av slangen i det vertikala hålet eller i diket. Om t.ex. markvärmepump består av en U-formad slang blir markvärmepumpens längd lika med halva slanglängden.

Följande är av vikt att tänka på för kostnadseffektiv installation av markvärmepump: foderör/slang skall helst, eller så långt som möjligt, vara i en längd för att undvika kopplingar och minimera tiden för skarvning. Det kan vara en fördel att installera slangen i samma moment som upptagning av dike, slits eller vertikalt hål. Vid direkt nedpressning i grövre jordar är det nödvändigt att minska/forcera friktionsmotståndet genom t.ex. vattenspolning och/eller vibration.

För spiralformad slang har samma prestanda antagits för vertikal och horisontell läggning i diken. Omsorgsfull återfyllnad har stor betydelse. En horisontellt utlagd spiral är lättare att återfylla än en stående spiral (vilket kan påverka kostnaden).

Vi reserverar oss för att uppgifterna kan vara ofullständiga, inaktuella eller felaktigt uppräknade till svenska förhållanden år 2001. Uppräkning av kostnader har utförts med hjälp av konsumentprisindex (www.iaps.scb.se/KpiLathund/SilverStream/Pages/pgBerakning.html).

Tabell 11.2. Sammanställning av tänkbara och innovativa metoder för installation av markvärmexlare bestående av PE-rör med diameter mindre än 100 mm. Arbetskostnad avser installation av markvärmexlare till ett villasystem.

Metod	Installationsdjup	Möjlighet till kringfyllning	Jordart							Berg	Främmande ledningar i marken	Installationskapacitet	Arbetskostnad exkl. moms
			Lera	Silt	Sand	Grus	Torv	Mn nbl	Mn rbl				
Schaktning	++	+++	++	+++ ¹	++	++	+	++	++	-	+++	100-200 m/dag	20-40 kr/m
Fräs	+	++	-	++	+++	-	-	-	-	-	+	300-400 m/dag	20-25 kr/m
Plog – vibro	+	++	+++	+++	+	-	+ ²	+	-	-	-		
Plog – statisk	+	++	+++	+++	+++	+	++	++	-	-	-	300-400 m/dag	20-25 kr/m
Plog – vinschad	+	++	+++	++	+	-	+++	+?	-	-	-		
Vertikalgrävare ³	+++	+?	+?	++	+++	-	-	-	-	-	+		
Styrd borrhning	+++	-	+++	+++	+++	+	++	+	-	-	+++ ⁴	100-150 m/tim	400 kr/m
Direkt nedpressning ⁵	15-20 m	-	+++	+?	-	-	-	-	-	-	-	30x20 m U-rör/dag	37 kr/m
Direkt kalkpelarmaskin med spolning+vibrering	15-20 m	-	+++	+?	-	-	-	-	-	-	-	80x20 m U-rör/dag	47 kr/m
Pålkran och foderrör	18 och 35 m utfört	-	+++	+++	+++	-	++	-	-	-	-	400-500 m/dag	36-81 kr/m
Sänkhammarborrning	60-170 m	++	+	+	++	++	-	++	+++	+++	-	65 m/dag	175-200 kr/m
Energipålar ⁶	30 m utfört	-	+++	+++	+	-	-	-	-	-	-		

1/ Schaktning under grundvattenytan är inte möjlig.

2/ Risk för att den hjuldrivna dragtraktorn sjunker ned i torven.

3/ Vid installationsdjup >2 m.

4/ Vid installation under de främmande ledningarna.

5/ Med geotekniskt fordon (borrbandvagn).

6/ Om samtidigt grundläggning av byggnad.

+ Tänkbar metod

++ Möjlig metod


+++ Lämplig metod


- Omöjlig metod


? Ej tillräckligt utredd metod


Mn nbl Blockfattig till normalblockig morän

Mn rbl Rikblockig morän

 Bästa horisontella metod (prisivärd) för respektive jordartsförhållande

 Näst bästa horisontella metod –”–

 Bästa vertikala metod för respektive jordartsförhållande

 Näst bästa vertikala metod –”–

11.1 Små system med markvärmepump för en villa

För en normalstor villa antas följande energibehov per år:

15 000 kWh	värme
5 000 kWh	tappvarmvatten samt
<u>5 000 kWh</u>	<u>hushållsel</u>
25 000 kWh	totalt energibehov

En värmepump med en värmeeffekt av 3,2 kW erfordras för 50 % effekttäckning (baserat på 110 000 gradtimmar motsvarande Stockholm, dimensionerande utetemperatur, DUT, lika med -20 °C och inomhustemperatur +20 °C). Värmepumpen ger då 80-90 procent av årsenergibehovet för uppvärmning och varmvatten. De övriga 10-20 procenten erhålls ifrån elkassett eller befintlig el- eller oljepanna.

11.1.1 Investeringskostnad

I skriften "Villavärmepumpar" (Energimyndigheten, 2001) anges kostnader inkl. moms för markvärmepumpar fördelade på värmepumpen, borrhningen och installationen. Kostnaden för värmepumpen baseras på uppgifter från tillverkarna och kostnader för borrhning och installation är uppskattningar.

För ett hus med ett värmebehov på 20 000 kWh/år (exkl. hushållsel) anges investeringskostnaden för en värmepump till ca 30 tkr inkl moms (medianvärde, intervall 26-40 tkr). I kostnaden ingår inte eventuell varmvattenberedare och elkassett. Under kalla vinterdagar då värmepumpen inte ensam klarar värmebehovet kopplas befintlig panna in för att höja framledningstemperaturen efter värmepumpen. Om den befintliga pannan istället skall bytas ut kan den ersättas med varmvattenberedare och elkassett. Kostnaden för varmvattenberedare och elkassett är cirka 20 tkr. Kostnaden för installation av värmepumpen uppskattas till mellan 10-20 tkr.

Total investeringskostnad för en markvärmepumpänläggning till en villa fördelar sig uppskattningsvis på på värmepump ca 50 %, borrhning ca 30 % och installation ca 20 % (Energimyndigheten, 2000).

Energibesparingen uppskattas till omkring 9 000 kWh/år, som med elpriset 60 öre/kWh motsvarar 5 400 kr. Återbetalningstiden för ett system med berg- eller ytjordvärmepump är normalt 7-10 år (STEM, 2000).

I villor med direktverkande elvärme som därmed saknar vattenburet värmesystem kan värmepumpen kopplas till en eller flera fläktkonvektorer som fördelar värmen i huset. En fläktkonvektor inklusive installation kostar från 5 tkr och uppåt (STEM, 2001). Det är en fördel att välja en fläktkonvektor med hög kapacitet eftersom vattentemperaturen ut från värmepumpen då blir lägre. Om vattentemperaturen kan sänkas med 1 °C, ökar värmepumpens värmeeffekt med 1 % och elbehovet sänks med ca 2 %. En större fläkt behöver inte heller gå på maximalt varvtal, vilket innebär lägre ljudnivå.

Om systemet utformas så att det under de varmaste månaderna kan leverera kyla (direktkyla) påverkas systemutformningen och därmed kostnaden till väldigt liten del. Detta beroende på att kylbehovet för en villa under svenska förhållanden är litet i förhållande till värmebehovet.

Överskottsvärme från villan värmeväxlas mot den cirkulerande värmebäraren i markslingan. Värmen hos värmebäraren avges till omgivande mark. Genom installation av luft-vätska värmeväxlare i ett fläktdrivet ventilationssystem, kan inomhusluften kylas ner och värmeöverskottet återförs via kollektorslangarna till marken. Systemet drivs inte av värmepumpen utan av en relativt enkel cirkulationspump (www.geotec.se, 2001).

Internationella erfarenheter

I en kanadensisk studie har system med markvärmepump jämförts med luftvärmepump, oljepanna och direktverkande elvärme med avseende på kostnaderna för investering och drift. Studien som är baserad på kanadensiska förhållanden visade att system med markvärmepump är billigast att äga och driva för värmning och kylning av bostäder (Healy & Ugursal, 1997).

I USA uppskattar man att en värmepump installeras i 26 % av alla nyproducerade enfamiljs-hus (www.ari.org). I en amerikansk studie jämfördes investeringskostnaden för värmepump-anläggning med kyleffekt 10,5 kW (3 ton systems) med olika typer av markvärmeväxlare. Totalkostnaden beräknades till ca 77 tkr (8 100 USD) för ett system med horisontella markvärmeväxlare, 82 tkr (ca 8600 USD) med spiralformad markvärmeväxlare och 86 tkr (9 000 USD) med vertikala markvärmeväxlare (Rafferty, 1997). Kostnaden inkluderar värmepumpar, installation, tillhörande systemkomponenter och markslingan. Det amerikanska systemet har relativt stor värmepump för att klara kyleffektbehovet.

11.1.2 Kostnad för installation av markvärmeväxlare

I avsnittet redovisas kostnaden för att installera markvärmeväxlare för en villa med total energiförbrukning på 25 000 kWh/år (inkl. hushållsel), se **tabell 11.3**. I kostnads kalkylen förutsätts en slang- och dikeslängd på 300 m om slangen läggs rak i diket och en dikeslängd på 60 m om en spiralformad slang (Slinky) alternativt 120 m om 4 raka flernivåslangor installeras i diket. Vid vertikal installation i jord förutsätts 8-11 st 15-20 m djupa enkla U-rör och vid installation i berg ett 95 m djupt borrhål (vanligt borrhål för Stockholm enligt www.stem.se, 2000).

Kalkylen är indelad i kostnader för att installera markvärmeväxlarna i jorden/berget, ”arbetskostnad”, och i materialkostnad.

I arbetskostnaden ingår:

- personalkostnad (installation, provtryckning, fyllning och inkoppling fram till husvägg)
- maskintid inkl etablering

Materialkostnaden avser:

- slang,
- returböj med bottenvikt (i borrhål)
- kopplingar
- värmebärandevätska

Således ingår inte kostnader för projektering, eventuella förberedelser och efterarbete samt kostnader för bygglov/anmälan till kommun och myndigheter.

Tabell 11.3. Installationskapacitet och kostnad, exkl. moms, för olika typer av markvärmewäxlare för en villa med konventionell uppvärmning 21 000 kWh/år. Totalkostnaden omfattar personal, maskiner och material. Övriga kostnader anges i kr per meter dikeslängd, vertikal hållängd eller per meter borrhål.

Metod	Installationskapacitet	Arbetskostnad dike/hål (kr/m)	Dikeslängd/hållängd (m)	Materialkostnad för markvärmewäxlare (kr/m slang)	Slang (m)	Total kostnad (kr)
Horisontella slangar						
- grävmaskin	200 m/dag	20-40	300	20	300	12 000-18 000
- fräs / kedjegrävare	300-400 m/dag	20-25	300	20	300	12 000-13 500
- plog	300-400 m/dag	20-25	300	20	300	12 000-13 500
- raka slangar, 2 nivåer	100-200 m/dag	35	180	20	360	13 500
- raka slangar, 4 nivåer	100-200 m/dag	40	120	20	480	14 400
Styrd borrhning¹	100-150 m/tim	400	180	20	360	79 200
Spiralformad slang²						
- stående i diken, kedjegr.	300-400 m/dag	25	60	20	360	8 700
- liggande, grävmaskin	100 m/dag	40	60	20	360	9 600
Nedpressning av U-rör i lera						
- geotekniskt sonderingsfordon ³	30x20 m djupa U-rör/dag	37	160	20	320	12 320
- kalkpelarmaskin ³	80x20 m djupa U-rör/dag	47	160	20	320	13 900
Pålkran U-rör i foderrör						
- U-rör installeras efter håltagning ⁴	400-500 m/dag	36-52	160	20	320	12 160-16 720
- U-rör följer med vid håltagning ⁵	400-500 m/dag	81	160	20	320	19 360
Hammarborrning, enkelt U-rör						
- sänkhammare ⁶ (luftdriven)	65 m/dag	175-200	95	20	190	20 430-22 800
- sänkhammare (vattendriven)	ca 65 m/dag	200	95	20	190	22 800

1) En dubbel slang installeras i samma pilothål.

2) Inkluderar en uppskattning av kostnaden för slangläggning.

3) Metod enl. SGI (Lehtnets 1993). Kostnad för värmelager 40 000 m³, lagerdjup 20 m och 100 slingor à 5 enkla U-rör (23 kr/m resp. 22 kr/m exkl moms).

4) Metod enligt Lindälvs skolan i Kungsbacka (Wilén & Rhén, 1986). Kostnad för enkelt U-rör (10-20 kr/m sannolikt exkl moms).

5) Metod enl. Söderköping (Magnusson et al, 1992, och Lehtnets & Magnusson, 1991). Kostnad för dubbelt U-rör (ca 50 kr/m exkl moms).

6) Inkluderar rördrivning med excenterkrona 10 m ned till berget samt etablering och avetablering.

En enkätundersökning till landets samtliga kommuner, som genomförts av SVEP, visar att avgiften för bygglov vid anläggandet av energibrunn varierar från 0 till 2 400 kr. De flesta

kommuner tar ut en avgift på mellan 500-700 kr. Handläggningstiden varierar i kommunerna, från 1 timme upp till 4 veckor (Löf, 2001).

Kostnaden (inkl moms) för PEM-rör Ø 40 mm PN 10 är ca 20 kr/m. Påsvetsad returböj, med fäste för bottenvikt, och bottenvikt (12 kg) kostar 700-800 kr. Värmebärandevätska av etanol kostar omkring 10 kr/l. Om värmebäraren görs med 20 % inblandning av etanol i en 300 meter slinga blir kostnaden ca 750 kr.

Med undantag för styrd borrning med jämförelsevis höga maskinkostnader varierar installationskostnaden (inkl slang) mellan 8 700-25 800 kr (exkl moms). Lägsta installationskostnaden beräknas för spiralformad slang. Kostnadsberäkningarna för arbete med spiralformad slang är emellertid osäkra eftersom praktisk erfarenhet saknas i Sverige. På platser där det är svårgrävt kan det vara fördelaktigt att korta dikeslängden och samtidigt kompensera för detta genom att lägga fler slangar/tätare med slang, i samma dike. Förkortning av dikeslängd, utan att termisk prestanda försämras, kan vara den enskilt viktigaste parametern för att minska installationskostnaden. 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.

Internationella erfarenheter

Schweiz är det land som kan visa på störst spridning av värmepumpstekniken räknat per invånare. Hittills har omkring 50 000 värmepumpar installerats för uppvärmning och värmning av varmvatten, varav 40 % med koppling till mark som värmekälla (Rybach & Sanner, 2000). Energibrunnar i berg, inklusive borrning och installation av slang, kostar omkring 400 kr/m borrhål i Schweiz.

I Holland har borrhningskostnaden angetts till 120-240 kr per meter borrhål beroende på metod (Snijders 1998). Denna kostnad omfattade sannolikt ej installation av slangen.

En amerikansk studie visar att investeringskostnaden för värmeanläggningens markdel är:

- ca 2 110 kr/kW (741 USD/ton) för horisontella markvärmväxlare,
- ca 2 580 kr/kW (904 USD/ton) för spiralformade markvärmväxlare,
- ca 2 930 kr/kW (1 028 USD/ton) för vertikala markvärmväxlare (Rafferty, 1997).

Kostnaden inkluderar grävning alternativt borrning, slanginstallation och rördragning till huset. Vid omräkning från effekt (kW) till energiförbrukning (kWh/år) kan man överslagsmässigt anta att markvärmväxlaren är i bruk 2000 timmar per år. Villasystemets energibehov 25 000 kWh/år motsvarar då 12,5 kW.

EPA, den amerikanska motsvarigheten till Naturvårdsverket, anger kostnaden för horisontella markvärmväxlare inom bostadssektorn till mellan 1000-1 420 kr/kW (100-142 USD/kW) (Lienau, 1997) och för vertikala markvärmväxlare till mellan 2 000-2 840 kr/kW (200-284 USD/kW). Den lägre kostnaden hänför sig till erfarna borrhfirmor, innovativa lösningar (t.ex. spiralformad markvärmväxlare) och till de skalfördelar som stora system kan ge. Dessa kostnader ligger något lägre än Raffertys resultat ovan. Återbetalningstiden för villasystem är mellan 2-6,8 år med ett medelvärde på 4,3 år, enligt samma studie. För svenska förhållanden anger Energimyndigheten återbetalningstiden till vanligtvis 7-10 år (www.stem.se, 2000). En jämförelse mellan amerikanska och svenska kostnader visar att beräkningarna för spiralformade markvärmväxlare i Sverige kan vara för låga.

11.1.3 Kostnad för drift och underhåll

Drift

En markvärmepump för ett enfamiljshus (installerad effekt 3-4 kW) förbrukar nästan 7 000 kWh/år för drift av kompressorn. Med ett genomsnittligt elpris på 60 öre/kWh blir elkostnaden för värmepumpens drift ca 4 000 kr per år.

Underhåll

Underhållskostnaden för ett markvärmepumpsystem är i regel låg. Under en 20-års period bör man dock räkna med att byta/renovera kompressorn, kostnad ca 10 000 kr, samt service vartannat år (VET nr 1 1999, www.vet.se).

11.1.4 Total uppvärmningskostnad

I tabell 11.4 anges kostnaden för en värmepumpanläggning (investering och drift) till en villa med de värmebehov som angetts i inledningen till avsnitt 11.1. Kalkylen avser konvertering av en elvärd villa med direktel respektive vattenburen el och 20 års användning. Det förutsätts att befintlig el- eller oljepanna kan användas för att täcka delar av värmebehovet kalla vinterdagar. I fallet med vattenburen elvärme förutsätts att varmvattenberedaren inte behöver bytas ut. Det förutsätts att investeringen betalas med banklån med 7 % ränta och återbetalningstid över 20 år, d.v.s. kapitalkostnaden beräknas som annuitet.

Tabell 11.4. Totalkostnad, inkl moms, för en värmepumpanläggning till en villa med direktel respektive vattenburen elvärme. Kostnaden (ungefärlig) anges för tre typer av markvärmeväxlare i olika geologier.

	Villa, direktel			Villa, vattenburen el		
Investering						
Värmepump ¹ , median	30 500			30 500		
Installation ¹ , median	15 000			15 000		
Vertikal installation lös lera	15 400	-	-	15 400	-	-
Horisontell installation jord ²	-	12 000	-	-	12 000	-
Borrning i berg	-	-	25 540	-	-	25 540
Varmvattenberedare och elkassett ¹	20 000			-		
Fläktkonvektor ¹ 2 st	10 000			-		
Kompressorbyte exkl service ³	10 000 per 20 år			10 000 per 20 år		
Summa (medel)	100 900	97 500	111 040	70 900	67 500	81 040
Drift						
El för drift av värmepump	4 000 per år			4 000 per år		
El för tillsatsvärme	1 800 per år			1 800 per år		
Hushållsel	3 000 per år			3 000 per år		
Summa per år	8 800			8 800		
Årskostnad för inv ⁴ . och drift	18 900	18 600	19 900	15 900	15 600	16 900

1) www.stem.se, 2001.

2) Avser spiralformad slang i dike.

3) VET Aktuellt nr 1 1999 samt www.vet.se, 2000.

4) Annuitetsfaktor 0,1.

Årskostnaden (kapitalkostnad och driftskostnad) uppskattas till mellan ca 18 och 20 tkr för en villa med direktel, som installerar värmepumpanläggning. Detta motsvarar en total energikostnad per kWh nyttiggjord energi på i medeltal 77 öre/kWh. Motsvarande kostnad för en

villa med vattenburen elvärme uppskattas till mellan ca 15 och 17 tkr, vilket i medeltal motsvarar en total energikostnad på 65 öre/kWh. Lägst kostnad beräknas för ett system med en spiralformad slang horisontellt lagd i dike.

Om spetsvärme tas från elkassett eller elpanna blir kostnaden för den elen i medeltal 1 800 kr/år (15 % täckning av 20 000 kWh/år för uppvärmning och varmvatten, med en el-kostnad på 60 öre/kWh).

Att byta från direktel till ett vattenburet värmesystem kostar ca 4 000 kr per radiator eller ca 35 000-40 000 kr för ett ordinärt småhus (www.energiinfo.nu/varmahuset.htm, 2000). Fördelen med ett vattenburet system är att många alternativ för uppvärmning kan väljas: fjärrvärme, elpanna, olja, pellets, solvärme, värmepump med flera. Det är också möjligt att delkonvertera så att delar av befintliga elradiatorer behålls och används som kallrasskydd medan det i utvalda delar av huset installeras fläktkonvektorer. Det kan räcka med ett fläktele-ment men antalet beror av husets planlösning, som helst bör vara öppen. I kalkylen ovan förutsätts att två fläktkonvektorer installeras i den tidigare direktelvärmda villan.

11.1.5 Jämförelser mot alternativa uppvärmningssystem

I avsnittet belyses följande alternativ till att installera värmepump i den elvärmda villan:

- fjärrvärme,
- pelletseldning respektive,
- oljeeldning.

De presenterade alternativen är inte de enda tänkbara. Det finns många alternativ och kombinationer av värmekällor som kan vara kostnadseffektiva för varje enskilt fall. Andra alternativ är t.ex. solvärme, ved, gas och luftvärmepump. Den villaägare som tänker förändra sitt energiförsörjningssystem kan få gratis rådgivning av kommunens energirådgivare. Örebro kommun har t.ex. lagt ut en checklista inför inköp av värmepump (www.orebro.se/energiradgivning/vp.htm, 2000). Användbara tips kan också hämtas från Energimyndigheten (www.stem.se) och Konsumentverket (www.konsumentverket.se).

Jämförelsen nedan omfattar endast husets värme-kylsystem och inte energieffektivitetshöjande åtgärder som byte av fönster, tilläggsisolering och effektivare belysning m.m., vilket också bör värderas när man planerar förändringar av husets energisystem. I de kostnadsuppgifter som tidigare publicerats i litteraturen och på Internet omfattar värmesystemen för villor endast en värmefunktion. En kylfunktion ingår normalt inte i systemen.

Nedanstående jämförelse omfattar endast kostnader för investering och drift. Andra aspekter som t.ex. miljöpåverkan, bekvämlighet, leveranssäkerhet och utrymmesbehov har också stor betydelse i valet av värme-kylsystem. Kapitalkostnaden för investeringen har beräknats med annuitetsfaktor 0,1. Investeringskostnaden omfattar ej system för värmedistribution i huset eller eventuell demontering av utjämt utrustning.

Fjärrvärme

Fjärrvärme kan endast bli aktuellt om fjärrvärmeledningar finns nära huset eller om en utbyggnad är planerad i bostadsområdet (**figur 11.1**). Kostnaden för att installera fjärrvärme till villan är mellan 30 000-60 000 kr inkl moms, abonnentcentral och anslutningsavgift (www.lidingo.se/sbk/eupp_1.htm, 2001). Årsmedelverkningsgraden för fjärrvärme är ca

98 %. För en villa med ett värmebehov av 20 000 kWh/år för uppvärmning och varmvatten är kostnaden för fjärrvärme 10 300 kr per år, både rörlig och fast kostnad (www.tekniskaverken.se, 2001). Därutöver tillkommer kostnaden för hushållsel, ca 3 000 kr/år.



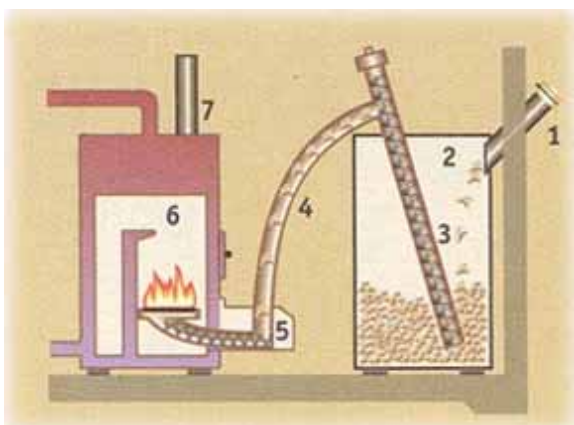
Figur 11.1. Principen för fjärrvärme (www.tekniskaverken.se, 2001).

Det innebär att total årskostnad inkl moms och avskrivning blir mellan 16 300-19 300 kr per år, vilket motsvarar en total energikostnad på i medeltal 71 öre/kWh.

Pelletseldning

Pellets är hårdförpackat träspill. Det tillverkas av trärester, sågspån, kutterspån, bark eller liknande från träindustrins restprodukter. Efter torkning och malning komprimeras massan till små, stavformiga bränslestycken. För villakunder lämpar sig pellets med diameter 6 eller 8 mm och längden 1-2 cm bäst. Pellets har ett värmevärde mellan 4,7-5,2 kWh per kilo. 2,1 ton pellets, eller ca 3 m³, kan ge samma värme som en kubikmeter villaolja. Vid samma lagervolym blir det ca tre gånger så många leveranser per år jämfört med olja. Pellets har betydligt lägre fukthalt än ved och därmed högre energivärde.

I figur 11.2 visas ett system för pelletseldning. För närvarande är värmelagring i ackumulatortank inte nödvändig, men finns ackumulatortank så används den. Både pelletsbrännare och pelletskaminer styrs via termostat som reglerar luft- och bränsletillförsel. Den kontrollerade förbränningen ger normalt en årsmedelverkningsgrad för en pelletsbrännare i en ny panna på 70-85 %. Årsmedelverkningsgraden för en pelletspanna är mellan 80-90 %.



Pelletsbrännare 2 - 30 kW

1. Inmatning till förråd
2. Pelletsförråd
3. Matarskruv
4. Fallschakt till brännare
5. Brännare
6. Panna
7. Skorsten

Figur 11.2. Pelletssystem i en villa (www.lycenergi.se/produkter/pellets/ivilla/panna/, 2001).

En ny pelletspanna med brännare kostar mellan 30 000-40 000 kr (Köhler, 2001). Över en

20-årsperiod kan det bli aktuellt att byta ut brännaren. En ny pelletsbrännare med förvaringsbehållare för pellets och installation kostar omkring 25 000 kr. Om skorsten inte redan finns tillkommer en kostnad på ca 10 000 kr för denna.

Pellets kostar mellan 26-32 öre/kWh, beroende på leveransform (Svenska bioenergiföreningen, 1998). Det motsvarar en bränslekostnad på 6 500-8 000 kr per år för vår normalvilla (20 000 kWh, årsmedelverkningsgrad 0,8). Därutöver tillkommer sotning ca 800 kr/år och hushållsel ca 3 000 kr/år.

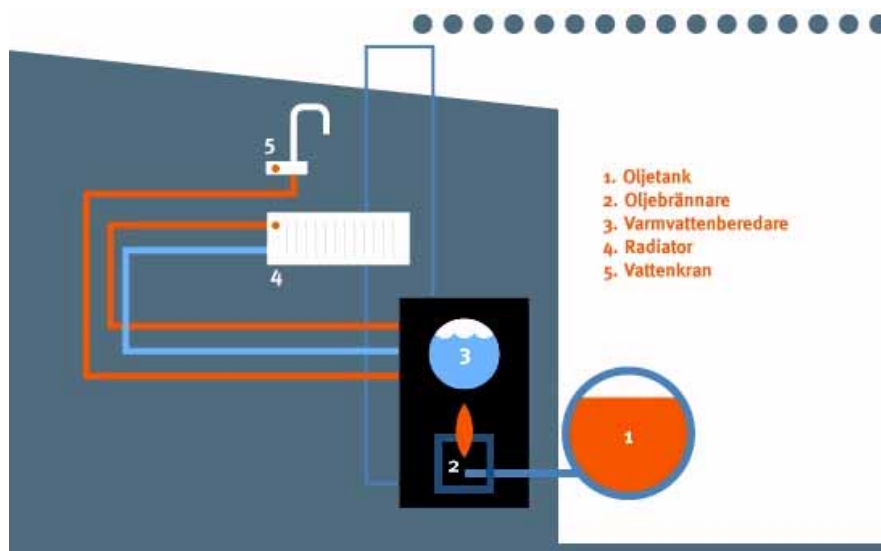
Det innebär att total årskostnad inkl moms och avskrivning blir mellan 16 800-19 300 kr per år, vilket motsvarar en total energikostnad på i medeltal 72 öre/kWh.

Ägaren till en genomsnittlig villa sparar ca 10 000 kr per år genom att byta från olja till pellets, vilket betyder att en brännare tjänas in på 2-3 år och en panna med brännare på 3-4 år (Köhler, 2001).

Oljeeldning

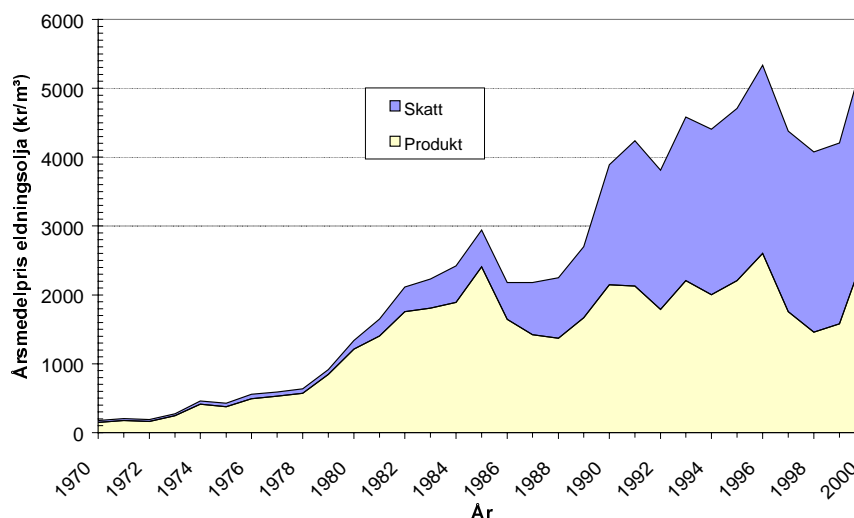
Principen för ett system med oljeeldning visa i [figur 11.3](#). En oljeeldningsanläggning består av värmepanna, oljebrännare, eldningsautomatik, oljetank, expansionskärl och skorsten.

För en ny panna och oljebrännare är investeringskostnaden, inkl. installation och oljetank, i storleksordningen 38 000-43 000 kr. En oljepanna har en årsmedelverkningsgrad på 80-90 % och livslängden är normalt 15-25 år. Brännaren får man räkna med att byta ut efter 10 år och denna kostar ca 8 000 kr, inkl. installation. Om skorsten inte redan finns tillkommer en kostnad på ca 10 000 kr. 1 m³ eldningsolja motsvarar ca 10 000 kWh (www.spi.se, 2001). Med ett oljepris på 5 500 kr/m³ (se [figur 11.4](#)) blir bränslekostnaden ca 12 940 kr om året för vår normalvilla. Utöver dessa kostnader tillkommer kostnader för sotning, service och reservdelar ca 1 150 kr/år (www.spi.se, 2001) samt hushållsel ca 3 000 kr/år.



Figur 11.3. System för oljeeldning (www.spi.se, 2001).

Det innebär att total årskostnad inkl moms och avskrivning under 20 år blir mellan 21 950-22 450 kr per år, vilket motsvarar en total energikostnad på i medeltal 89 öre/kWh.



Figur 11.4. Årsmedelpris på eldningsolja (löpande priser), Eo 1, i kr/m³. Källa: Eo 1 villa, SCB.

Sammanställning

Tabell 11.5 visar en sammanställning över årskostnaden exkl moms för värmepumpanläggning och alternativa värmesystem för en villa. Jämförelsen inkluderar räntekostnader men inte uppräkningsbidrag för inflation, effekter av möjlig skattereduktion eller eventuella konverteringsbidrag.

Tabell 11.5. Årskostnad (kr/år) inkl moms för uppvärmning och hushållsel för en villa under 20 år. Fjärrvärme, pelletspanna, oljepanna respektive värmepumpanläggning (berg resp. jord). Det förutsätts att vattenburet system finns men inte skorsten.

	Investering	Drift	Summa
Fjärrvärme	3 000-6 000	13 300	16 300-19 300
Pelletseldning	6 500-7 500	10 300-11 800	16 800-19 300
Oljeeldning	5 600-6 100	16 350	22 700-23 200
Bergvärmepump ¹	8 100	8 800	16 900
Jordvärmepump ¹	från 6 750	8 800	från 15 600

1) Se avsnitt 11.1.4.

Jämförelsen visar att årskostnaden 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, omkring 47 % dyrare än den mest fördelaktiga beräkningen med markvärmepump.

Ovanstående kan jämföras med vad det kostar att installera en elpanna och även fortsättningsvis basera husets värmesystem på elvärme. Kostnaden för en elpanna uppskattas till mellan 30-35 tkr, inkl. installation. Driftskostnaden för samma normalvilla som tidigare uppskattas till ca 15 000 kr per år. Total årskostnad för ett system med elpanna uppskattas därmed till i storleksordningen 18 000 kr/år.

För en villa som övergår från direktel till annan form av uppvärmning kan husets värmedistributionssystem behöva bytas ut. Fjärrvärme och oljeeldning kräver i regel att värmen distribueras vattenburen. I sådana fall blir en markvärmepumpanläggning med fläktkonvektorer för värmedistribution det mest ekonomiska alternativet i en villa som förut värmdes med direktel.

11.1.6 Försäkring och garanti

SVEP (www.svepinfo.se) erbjuder ett trygghetspaket som innehåller skötselanvisning, två-årig garanti och en femårig trygghetsförsäkring. Den två-åriga garantin ges till alla privatpersoner som köper värmepump av återförsäljare godkända av SVEP. Trygghetsförsäkringen kompletterar villa/hemförsäkringen genom att den ersätter kundens självrisk upp till 3 000 kr och gjorda avskrivningar, vid en ersättningsbar maskinskada. Detta innebär att villa/hemförsäkringen måste inkludera ett maskinskademoment. Mindre maskinskador under den egna försäkringens självrisk upp till 3 000 kr ersätts inte. Försäkring kan förlängas till att omfatta år 6-10.

VET-Gruppen (www.vet.se) har liknande garantivillkor. Gruppen erbjuder ett försäkringskydd som omfattar 10 års kompressorförsäkring inklusive arbete samt 6 års försäkring på hela värmepumpanläggningen. Försäkringen förutsätter att försäkringstagaren har en hemförsäkring med maximal självrisk 3 000 kr. I det fall reparationer överstiger denna kostnaden täcker trygghetsförsäkringen hela kostnaden. I annat fall betalar försäkringstagaren via sin hemförsäkring. Det är alltid bra att kontrollera med sitt försäkringsbolag vad som händer vid ett eventuellt haveri.

Enligt konsumentlagstiftningen har man rätt att klaga på produkten eller installationen efter upp till 2 respektive 10 år från köpdatumet.

Efter slutförd borrning och installation av slangen skall borrentreprenören överlämna borrhörningsprotokoll till konsumenten, med uppgifter om bl.a. djup, dimension, antal meter foderrör och grundvattennivå. Borrentreprenören måste enligt lag anmäla energibrunnen till SGU. Konsumenten bör också kräva att borrhålets läge fastställs på fastigheten, på en skiss, och att distansskylt monteras på lämplig plats. Protokoll från provtryckning av slangen i samband med installationen skall också överlämnas till konsumenten (www.geotec.se, 2000).

Som en jämförelse kan nämnas att amerikanska värmepumptillverkare erbjuder mellan 1-5 års värmepumpgaranti mot tillverkningsfel. Ibland erbjuder tillverkare en garantiförlängning på upp till 10 år (www.pnl.gov).

11.2 Stora system med markvärmepump för kontorshus

I avsnittet anges ungefärliga årliga kostnader för uppvärmning och komfortkyla för ett typiskt kontorshus med följande uppskattade behov av köpt energi per 1000 m²:

100 000 kWh	värme och tappvarmvatten
60 000 kWh	kyla
60 000 kWh	<u>el till belysning och kontorsutrustning</u>
220 000 kWh	totalt energibehov

Utgångsläget:

- 1) Kontorshuset har värmepumpanläggning för uppvärmning och kompressorkyla.
- 2) Kontorshuset har olja för uppvärmning och kompressorkyla.

I det första fallet får ett system med direktkyla ersätta kompressorkylan. Den varma inomhusluften värmväxlas mot den kallare cirkulerande vätskan i markvärmväxlarna vars närmaste omgivning är förhållandevis kall efter uppvärmningsäsongen. Tillämpningen medför att marken delvis återladdas.

I det andra fallet får ett system med värmepump stå för både uppvärmning och kylning, genom direktkyla, och därmed helt ersätta en befintlig anläggning.

Samtliga kostnader anges exklusive moms.

11.2.1 Investeringskostnad

Kostnaden för att ersätta kompressorkyla i ett kontorshus, som har markvärmepump, med ett system med direktkyla betalar sig normalt på mindre än 5 år, räknat per 1 000 m². Motsvarande årlig besparing uppskattas till mellan 10 000-20 000 kWh per år för utebliven drift till kompressoraggregaten. Med ett elpris av 50 öre/kWh motsvarar detta mellan 5 000 kr och 10 000 kr per år.

Investeringskostnad för en värmepumpinstallation med markvärmväxlare för uppvärmning och kylning (direktkyla) av ett kontorshus uppskattas till i storleksordningen 300 kr/m² uppvärmd yta.

Internationell jämförelse

I en amerikansk studie undersöktes tolv kommersiella markvärmepumpinstallationer i USA och Kanada med avseende på systemutformning, kostnader, värmeteknisk funktion (performance), driftstörningar och konsumenttillfredsställelse (Cane et al, 1996). Anläggningarna innefattade främst skolor och kontor men även ett konstmuseum och en ishall. Installerad värmepumpkapacitet varierade mellan 35 och 168 kW per 1 000 m² (0,92 och 4,44 ton per 1000 ft² där 1 ton = 3,51 kW, 1 foot = 0,305 m). Investeringskostnaden för de olika anläggningarna låg mellan 280 och 1 550 kr per kvadratmeter golvyta (2,62 och 14,43 USD/ft², 1 USD=10 SEK, 2001) och för majoriteten av anläggningarna var kostnaden lägre än 1 075 kr/m² (10 USD/ft²).

Investeringskostnaden för markvärmväxlarna, borrning, dikesupptagning, återfyllning, slangmaterial, kopplingar och arbetskostnad utgjorde 20-60 % och i medeltal 37 % av hela investeringen för värme-kylsystemet. För majoriteten av systemen låg kostnaden för markvärmväxlarna mellan 640-3 700 kr/kW installerad kyleffekt (225-1 300 USD per ton).

Studien utvidgades senare till att omfatta ytterligare 19 anläggningar. Motsvarande investeringskostnad för dessa anläggningar anges till 1 020 kr per kvadratmeter golvyta (9-10 USD/ft²), varav markvärmväxlarna utgjorde ca 33 % av totalkostnaden. Total driftenergi-kostnad för de olika byggnaderna var i medeltal drygt 100 kr per m² och år (drygt 1 USD/ft²,år) vilket innebär att dessa system kunde vara konkurrenskraftiga vid jämförelser mot konventionella värme-kylsystem på den nordamerikanska marknaden (Cane et al, 1996).

Samma studie visade, i ett senare skede, på stora möjligheter att minska energiåtgång för cirkulationspumpning. De aktuella pumparna hade en medelstorlek på 15 hp/100 ton installerad kylkapacitet hos värmepumpen (1 hk = 746 W). Emellertid borde det för god pumpfunktion vara tillräckligt med 10 W per kW installerad värmepumpeffekt (högst 5 hp per 100 ton) (Cane et al, 1998).

Bose (1988), USA: Erfarenheter har visat att grävkostnaden är större än rörkostnaden per meter dike. Många system använder därför flera slangar i samma dike. Installationsmetoder för automatisk läggning och återfyllning av flera slangar har därför blivit mer intressanta.

11.2.2 Kostnad för installation av markvärmepåsar

I avsnittet redovisas kostnader för att installera markvärmepåsar till en kontorsfastighet, se **tabell 11.6**. I kostnadskalkylen förutsätts en total slang- och dikeslängd på 1500-2000 m per 1000 m² kontorsyta om slangen läggs rak i diken eller totalt 300-400 m långt dike om spiralformad slang (Slinky) installeras i diken. Om rak slang installeras samtidigt på 2 nivåer eller 4 nivåer antas total dikeslängd 900-1200 m respektive 600-800 m. Vid vertikal installation i jord förutsätts 41-57 st 15-20 m djupa enkla U-rör och vid installation i berg 9-11 st 95 m djupa borrhål.

Kalkylen är indelad i kostnader för att installera markvärmepåsarna i jorden/berget, ”arbetskostnad”, och i materialkostnader.

I arbetskostnaden ingår:

- personalkostnad (installation, provtryckning, fyllning och inkoppling fram till husvägg)
- maskintid inkl etablering

Materialkostnaden avser:

- slang,
- returböj med bottenvikt (i borrhål)
- kopplingar
- värmebärarvätska

Således ingår inte kostnader för projektering, eventuella förberedelser och efterarbete samt kostnader för bygglov/anmälan till kommunen och myndigheter.

Tabell 11.6. Installationskostnad, exkl moms, för olika typer av markvärmväxlare per 1000 m² kontorsyta (motsvarande 160 000 kWh/år i konventionell uppvärmning). Totalkostnaden omfattar personal, maskiner och material. Övriga kostnader anges i kr/m dikeslängd, kr/m vertikal hållängd eller i kr/m borrhål.

Metod	Installationskapacitet	Arbetskostnad dike/hål (kr/m)	Dikeslängd/hållängd (m)	Materialkostnad för markvärmväxlare (kr/m slang)	Slang (m)	Totalkostnad (kr)
Horisontella slangar						
- grävmaskin	200 m/dag	30	1500-2000	20	1500-2000	75 000-100 000
- fräs / kedjegrävare	300-400 m/dag	25	1500-2000	20	1500-2000	67 500-90 000
- plog	300-400 m/dag	25	1500-2000	20	1500-2000	67 500-90 000
- raka slangar, 2 nivåer	100-200 m/dag	35	900-1200		1500-2000	61 500-82 000
- raka slangar, 4 nivåer	100-200 m/dag	40	600-800	20	1500-2000	54 000-72 000
Styrd borrhning¹	100-150 m/tim	400	1500-2000	20	1500-2000	630 000-840 000
Spiralformad slang²						
- stående i diken, kedjegr.	300-400 m/dag	25	300-400	20	1500-2000	37 500-50 000
- liggande, grävmaskin	100 m/dag	40	300-400	20	1500-2000	42 000-56 000
Nedpressning av U-rör i lera						
- geotekniskt sonderingsfordon ³	30x20 m djupa U-rör/dag	26	800-1100	20	1600-2200	52 800-72 600
- kalkpelarmaskin ³	80x20 m djupa U-rör/dag	25	800-1100	20	1600-2200	52 000-71 500
Pålkran med U-rör i fodderrör						
- U-rör efter håltagning ⁴	400-500 m/dag	33	800-1100	20	1600-2200	58 400-80 300
- U-rör följer med vid håltagning ⁵	400-500 m/dag	57	800-1100	20	1600-2200	77 600-106 700
Hammarborrning, enkelt U-rör						
- sänkhammare ⁶ (luftdriven)	65 m/dag	175-200	500-600	20	1000-1200	123 500-163 200
- sänkhammare (vattendriven)	ca 65 m/dag	200	500-600	20	1000-1200	136 000-163 200

1) En dubbel slang installeras i samma pilothål.

2) Inkluderar en uppskattning av kostnaden för slangläggning.

3) Metod enl. SGI (Lehtmets 1993). Kostnad för värmelager 40 000 m³, lagerdjup 20 m och 100 slingor à 5 enkla U-rör (23 kr/m resp. 22 kr/m exkl moms).

4) Metod enligt Lindälvs-skolan i Kungsbacka (Wilén & Rhén, 1986). Kostnad för enkelt U-rör (10-20 kr/m sannolikt exkl moms).

5) Metod enl. Söderköping (Magnusson et al, 1992, och Lehtmets & Magnusson, 1991). Kostnad för dubbelt U-rör (ca 50 kr/m exkl moms).

6) Inkluderar rördrivning med excenterkrona 10 m ned till berget samt etablering och avetablering.

Installationskostnaden varierar mellan 37 500-840 000 kr för 1000 m² kontorsyta med ett vanligt intervall runt 70 000 kr. Borrhål i berg är mellan 75 % och 130 % dyrare än installation i jord. Fördelningen av totalpris mellan metoderna är ungefär densamma som för villor (tabell 11.3). Sannolikt kan priset påverkas väsentligt genom rationalisering av arbetsmetoderna för de relativt långa diken som behövs för kontorsbyggnader.

11.2.3 Kostnad för drift och underhåll

Drift och underhållskostnaden för ett kontorshus värme-kylsystem omfattar:

- Elenergi
- Service (extern) på komponenter
- Kontinuerligt underhåll (intern)
- Reparationer

Det finns väldigt få redovisade uppgifter om drift- och underhållskostnader för den här typen av anläggningar i svensk litteratur. Kunskapen ligger till största delen hos anläggningsägarna.

En större fastighet, t.ex. ett kontorshus som har markvärmepump, där kompressorkyla ersätts av ett system med direktkyla får inte högre driftskostnader. Om anläggningen samtidigt utnyttjas för kylning förbättras i regel värmepumpens värmefaktor.

Driftskostnaden för en 25 kW markvärmepump (i storleksordningen 1000 m² uppvärmd yta) är med ett elpris av 50 öre/kWh ca 25 tkr per år. Energikostnaden för en anläggning med värmepump är därmed ungefär hälften så stor som för en motsvarande anläggning med oljepanna. Årskostnad för el till belysning m m uppskattas till 30 tkr per år för angivet kontorshus.

Internationell jämförelse

I en amerikansk studie undersöktes 217 markvärmeanläggningar i skolor, bostäder och kommersiella byggnader och jämfördes mot system med naturgas och olja (Lienau, 1997). Anläggningarna var spridda över hela USA och omfattade olika sorters klimat. Inom bostadssektorn redovisades den årliga driftskostnaden till i medeltal 7 000 kr/år (700 USD/år). Energibesparing i skolor jämfört med andra elbaserade energisystem uppskattades till mellan 3 000-27 000 kr (300-2 700 USD) i månaden.

I en annan liknande studie jämfördes markvärmeanläggningar mot konventionella system för uppvärmning och kylning av skolor i Nebraska (Martin et al, 1999). Systemet kylde minst 70 % av skolornas totala golvarea. Fyra skolor med markvärmesystem visade sig ha den lägsta underhållskostnaden för årliga reparationer, service och underhåll, jämfört med 16 skolor med konventionella system för värme, ventilation och kyla (HVAC). Underhållskostnaden inkluderade både material- och arbetskostnad och uppskattades till i medeltal 2,3 kr per m² och år (2,13 cent/ft², år). De konventionella systemen utgjordes av luftkyld kylare tillsammans med gaseldad hetvattenpanna, vattenkyld kylare med gaseldad ångpanna respektive vattenkyld kylare med gaseldad hetvattenpanna. Medelkostnaden för dessa system, i tidigare nämnd ordning, var 2,88, 3,73 respektive 6,07 cent/ft² och år, alltså 35-285 % högre än för markvärmesystemen.

I en nordamerikansk studie undersöktes 25 kommersiella byggnader med markvärmesystem med avseende på underhållskostnad (Cane et al, 1998). De flesta byggnaderna utgjordes av skolor men också äldre hem, kontor, lagerlokaler och restauranger ingick i studien. Årlig un-

derhållskostnad (studiens senaste år) var i medeltal 8 kr och 12 kr per m² golvarea för underhåll utfört av egen personal respektive kontrakterat underhåll (7,32/10,95 USD/100 ft²), se [tabell 11.7](#).

Tabell 11.7. Underhållskostnad för några nordamerikanska markvärmeanläggningar, sett över anläggningarnas totala drifttid (Cane et al, 1998). Kostnaden anges i USD per 100 ft² golvarea (1 USD/100 ft² = 1,08 kr/m² om 1 USD = 10 SEK).

	Antal byggnader	Underhållskostnad medel	min	median	max
Alla byggnader	25	6,50	0,44	5,28	17,20
Skolor	15	4,69	0,82	3,34	14,47
Kontor	3	10,81	3,51	11,74	17,20
Bostäder/äldrehem	4	10,51	5,59	11,11	14,23
Annat	3	5,87	0,44	1,44	15,74

I samma studie undersöktes vad i systemet som föranlett någon form av underhåll eller reparationer, såväl schemalagda som förebyggande. De vanligast förekommande underhållen förknippades med kompressorn, köldmedieläckage, pumpmotorn eller styr- och reglerutrustningen.

11.2.4 Total kostnad för uppvärmning och komfortkyla

Kostnaden för att byta ut kompressorkyla till direktkyla i ett värme-kylsystem med markvärmepump för ett kontorshus bedöms betala sig på mindre än 5 år. Årlig besparing på grund av utebliven el till kompressoraggregaten, uppskattas till upp till 10 000 kr/år.

Årskostnaden för ett markvärmesystem för uppvärmning och kylning (komfortkyla) av ett kontorshus uppskattas, per 1000 m², till:

- ca 30 tkr för investeringen (annuitet 0,1),
- ca 25 tkr för el till värmepump,
- ca 30 tkr för el till belysning och kontorsutrustning och
- ca 10 tkr för underhåll (med ledning av amerikansk undersökning, se avsnitt 11.2.3).

Detta resulterar i en grov uppskattning av den totala årskostnaden till omkring 95 tkr/år.

12. MARKVÄRME OCH MILJÖ

12.1 Normer, lagar och förordningar

I Sverige är energibrunnar, i berg, väl etablerad teknik på kommersiella grunder. Ett led i den ökade försäljningen av energibrunnar är ett ökat hot för negativ påverkan på naturresursen grundvatten, om inte vissa försiktighetsåtgärder vidtas. Normbrunn 97 (SGU, 1997) är en sammanställning över de krav som bör gälla för att ”säkerställa en väl fungerande energikälla till kunden samt minimera riskerna för påverkan av naturresursen grundvatten vid utförande av en energibrunn”. Normbrunn 97 är framtagen av SGU på uppdrag av brunnborrnarnas branschorganisationer Geotec och Avanti samt SVEP. Normbrunn 97 revideras årsvis. Någon motsvarande norm finns inte för installation i jord, men det som är direkt överförbart från Normbrunn 97 till installationer i jord är bl.a. kraven på material och installation av markvärmväxlare i mark för att minimera risken för läckage av värmebärare och för tryckfall i markvärmväxlarsystemet, se även avsnitt 12.8.

Geotec bedriver för övrigt ett antal projekt med miljöförankring där ett par av de drivande frågorna bl.a. rör certifieringsutbildning av borrar (samarbete med SVEP), fortsatt utveckling av Normbrunn 97 (samarbete med SGU), få fram bättre och miljövänliga värmebärarvätskor med garanterade kvaliteter och som är tillverkade av förnyelsebara råvaror (www.geotec.se, 2000). Med avseende på certifieringsutbildning finns det i Sverige idag ingen central myndighet som ansvarar för vatten- och energiuttag ur mark vilket har försvarat för Geotec att få frågan förankrad hos någon statlig myndighet.

I Naturvårdsverkets rapport 4994 (Lindborg, 1999) beskrivs kortfattat tillstånds- och anmälningskrav som gäller enligt miljöbalken för installation och drift av markvärmesystem med värmepump. Generellt gäller att ett markvärmesystem med värmepump klassas som ”miljöfarlig verksamhet som kan antas ha liten miljöpåverkan” och skall anmälas till kommunens miljö- och hälsoskyddsområde. Vid energiborrning gäller också uppgiftsskyldighet för anläggning av energibrunnar (SFS 1985:245), vilket innebär att kopia på brunnprotokoll skall insändas till brunnarkivet, SGU.

Brunnsbollarhandboken (www.avantisystem.se) beskriver i kapitel 3 de lagar och förordningar som man bör känna till vid brunnborrningsarbeten. Kapitel 17 i brunnborrningshandboken beskriver miljöpolicy och kvalitetssäkring med avseende på brunnborrningsarbeten. Under miljöpolicy nämns termer som miljöaspekter, miljöhänsyn, miljöfaktorer men det anges inte vad som ligger i dessa begrepp. Det behövs en närmare beskrivning av vilka miljöaspekter som avses, vilken miljöhänsyn som ska tas och vilka miljöfaktorer som omfattas av ett energibrunnssystem.

12.2 Miljöaspekter

I september 1990 utkom Bygghälsorådet med skriften Miljökonsekvenser av ny energiteknik (Svensson et. al., 1990) som behandlar solvärme, värmelager och värmepumpar. I tabell 7 i nämnda skrift har sju olika typer av miljöbelastning identifierats m.a.p. värmepump-teknik:

- Termisk belastning genom avkylning (frysning).
- Utsläpp och spridning av främmande ämnen som CFC, HCFC m.fl. (freoner som köldmedium i nya värmepumpar är inte tillåtet), frostskyddsblandningar, olja, salt- eller järnhaltigt grundvatten.

- Buller från kompressorer och fläktar.
- Materialanvändning; metaller från ytbehandling, plastmaterial (främst polyeten) i slangsystemet etc.
- Markanvändning med påverkan på undermark, yt- och grundvatten.
- Byggnad som kan ge upphov till markskador, grumling av ytvatten, buller etc.
- Energianvändning, dvs. el till drift av kompressorer, fläktar och pumpar.

Dessa miljöaspekter samt effekterna från dem har relaterats till de olika delarna av energiomvandlingen: värmepumpen genom värmepumpprocessen, värmekällan genom upptagning och tillförsel av lågtempererad värme samt anläggningar för produktion och tillförsel av drivenergi.

Ytterligare information om miljöaspekter kopplade till markvärmesystem i jord har inhämtats från webbplatsen för Commonwealth of Pennsylvania, Department of Environmental Protection, Ground Source Heat Pump Manual (GSHPM) (www.dep.state.pa.us). Manualen har förankring i IGSHPA (International Ground Source Heat Pump Association). I manualen finns ett avsnitt som behandlar miljöaspekter och där är det främst tre aspekter som associeras med installation och drift av system med markvärmepump:

- Vattenkvalitet genom läckage av värmebärarvätska, temperaturförändring i marken, migration av förorening och turbiditetseffekter associerade med borrhålsborrning och dikesgrävning.
- Vattenkvantitet. Gäller främst grundvattenvärme med öppet system genom okontrollerad grundvattenbildning. ***Öppna system behandlas ej i denna rapport.***
- Geologisk risk genom att sättningar kan uppstå som ett led i att ytdränerande förhållanden skapas eller att marken fryser (volymtillväxt) p.g.a. för högt värmeuttag. Effekterna kan bli skador på systemet eller skador på byggnader.

Byggeforskningsrådets skrift och GSHPM tar således upp samma problemställningar. GSHPM behandlar enbart markmiljö, medan Byggeforskningsrådets skrift dessutom behandlar värmepumpen som maskin och process liksom aspekter m.a.p. arbetsmiljö.

12.3 Grundvattenkvalitet

Förändringar av grundvattenkvaliteten kan orsakas av värmebärläckage, temperaturförändringar i marken, migration av föroreningar och turbiditetseffekter associerade med borrhålsborrning och dikesgrävning. Förändringar i grundvattenkvaliteten kan mätas genom analys av pH, konduktivitet, temperatur, halt lösta ämnen, bakterier etc. I anslutning till stora system, omfattande flera hundra markvärmeväxlare, kan referensbrunn och kontrollbrunnar anläggas för att mäta eventuell påverkan på grundvattenkvaliteten.

Markvärmesystem med borrhål, brunnar eller diken ändrar generellt inte mängden tillgängligt grundvatten. Grundvattenkvaliteten kan däremot påverkas, främst av två anledningar (www.dep.state.pa.us, 2000):

- Ökad potential för migration av eventuella föroreningar. Borrning kan medföra att föroreningar sprids från ett förorenat område till omgivningen, särskilt då tätande lager perforeras. Utförs t.ex. inte korrekt tätning vid borrning kan förorenat vatten (yt- eller grundvatten) spridas vertikalt genom borrhålet mellan olika akviferer. Diken där grus eller annat grövre material har lagts i botten under rören kan fungera som dränering eller kanal för

förorenings spridning. Detta kan förebyggas genom att kringgå eller täta mot eventuella föroreningskällor i installationsområdet.

- Störning av markförhållandena. Borning i berg kan medföra suspendering av fast material eller finmaterial i grundvattnet, speciellt om bergarten utgörs av kalksten eller dolomit. Även dikesgrävning kan orsaka turbiditet av grundvattnet. Detta kan orsaka problem med igensättning av närliggande pumpbrunnar för grundvatten.

12.3.1 Värmebärandevätska

Ett jordvärmesystem är ett slutet system där värme från omgivningen utvinns genom att en värmebärare innehållande vatten med fryspunktsnedsättande medel anläggs mellan värmepumpen och värmekällan (marken). Värme leds från markvärmeväxlaren till värmepumpens förångare i värmeväxlarkretsen (Svensson et al., 1990). Värmeväxlarkretsen består av ett slutet slang- eller rörsystem innehållande den frostskyddande värmebärandevätskan, vanligen en glykol-, alkohol- eller saltlösning med tillsatser för att förhindra korrosion och bakterie- och alg tillväxt (Svensson et al., 1990) (se även kapitel 4). Enbart vatten fungerar i varma klimat men i kalla klimat krävs tillsatser av frostskyddsmedel för att sänka fryspunkten på vätskan och möjliggöra utnyttjande av en lågtempererad värmekälla.

Eftersom den vätskehållande slangen installeras i marken kan man inte utesluta risken för läckage eller spill till mark, grundvatten eller ytvatten. En del frostskyddsmedel i värmebärandevätskan är toxiska för människa och djur, andra är brandfarliga. Ytterligare ett problem är risken för korrosion främst på metalldelar i värmebärandekretsen, eftersom detta dels reducerar värmetransporten (www.geoexchange.org, 2000), dels ökar risken för att värmebärandevätska läcker ut. För att förhindra korrosion tillsätts ibland korrosionsinhibitorer. Sådana är i många fall toxiska och bör undvikas (www.geotec.se, 2000), se även avsnitt 12.4.3.

I **tabell 12.1** jämförs olika frostskyddsmedel med avseende på korrosivitet, toxicitet och miljöpåverkan. I tabellen jämförs också värmetransportkoefficient och erforderlig pumpenergi för de olika frostskyddsmedlen i förhållande till metanol. Metanol har goda termofysikaliska egenskaper men är mycket toxiskt. Metanol användes tidigare som frostskyddsmedel men har tagits bort p.g.a. dess höga toxicitet.

Tabell 12.1. Jämförelse mellan olika frostskyddsmedel (i koncentration) relativt metanol. Modifierad efter Cane (1991). Metanol var vanligt på 1980-talet men används inte idag p.g.a. dess toxicitet. Etanol och etylenglykol har lagts till tabellen varför inget värde anges för värmetransportkoefficient och pumpenergi.

Frostskyddsmedel	Värmetransportkoefficient relativt metanol¹⁾	Pumpenergi relativt metanol¹⁾	Korrosivitet	Toxicitet	Miljöpåverkan
Etanol (sprit)	-	-	Problem med korrosion på järn- och kopparmaterial ³⁾	Ögonirriterande. Intag av större mängd etanol påverkar nervsystemet ⁴⁾ .	Biologiskt nedbrytbart till CO ₂ och H ₂ O ⁴⁾ .
Etylenglykol	-	-	Ej korrosivt ⁵⁾	Ögonirriterande. I koncentrat bedömt som hälsoskadligt ²⁾ . Intag av större mängd etylenglykol påverkar nervsystemet ⁶⁾ .	Biologiskt nedbrytbart till CO ₂ och H ₂ O.
Propylenglykol	60 %	135 %	Acceptabel för koppar och mäsing. Inhibitorer behövs för gjutjärn och lödd aluminium.	Hud- och ögonirriterande ²⁾ . Bedömt som icke-toxiskt.	Biologisk nedbrytbart till CO ₂ och H ₂ O. Spill på mark avdunstar ej.
Kalciumklorid	120 %	140 %	Oacceptabelt för rostfritt stål, aluminium och mjukt kolstål.	Hud- och ögonirriterande ²⁾ . Toxiska doser ej sannolikt.	Påverkan på grundvattenkvaliteten.
Kaliumacetat	85 %	120 %	Inhibitorer behövs bl. a. för aluminium och kolstål.	Handhavande inget problem. Lösning rekommenderas, ej koncentrerat. Högt oralt intag kan vara toxiskt.	Biologiskt nedbrytbart till CO ₂ och H ₂ O.
Kaliumkarbonat	120 %	130 %	Oacceptabelt med aluminium, koppar, brons och zink. Inhibitorer krävs.	Hud- och ögonirriterande. Mer toxiskt än salt p.g.a. kaustisk natur.	Karbonat kommer fällas ut, höjer pH. Anses ej vara ett miljöproblem.
Natriumklorid	110 %	120 %	Inhibitorer krävs för stål, koppar och aluminium. Finns inga som är tillräckligt bra.	Hud- och ögonirriterande. Toxiska doser inte sannolikt.	Påverkan på grundvattenkvaliteten.

¹⁾ Se även avsnitt 4.3.

²⁾ Verifierat m.h.a. Kemikalieinspektionens databas Riskline, www.kemi.se.

³⁾ www.geoexchange.org

⁴⁾ www.ethanol.org

⁵⁾ www.lahega.se

⁶⁾ www.epa.gov

Miljö- och hälsopåverkan

I ett arbete utfört på universitetet i New Mexico (www.geoexchange.org) undersöktes några frostskyddsmedel m.a.p. miljö- och hälsopåverkan³, brandfara, korrosion och läckage, livscykelkostnad samt potentiella framtida regleringar. I undersökningen testades metanol, etanol, propylenglykol, kaliumacetat, CMA (kalciummagnesiumacetatlösning) och urea. Det framgår inte helt tydligt vad som ligger i begreppet risk men resultatet från undersökningen visade att det mest lämpade frostskyddsmedlet var propylenglykol med låg risk inom nästan samtliga områden, dock var livscykelkostnaden relativt hög.

Undersökning av CMA, med låg hälso-, miljö- och brandrisk, visade på hög risk för läckage och hög livscykelkostnad. Kaliumacetat visade på låg brandfara, hög läckagerisk och låg till medelhög risk för övriga områden. Problem med läckage av kaliumacetat upptäcktes för en del bostads- och kontorsbyggnader. Urea visade på låg hälso-, miljö- och brandrisk men hög korrosionspåverkan på koppar samt hög läckagerisk. Etanol hade låg till medelhög risk inom samtliga områden utom för brand där brandrisken är hög och den bör därför tillsättas i lösning och hanteras där ventilationen är god. Etanol visade på vissa korrosionsproblem för järn- och kopparmaterial. Motsvarande gäller för metanol som dock har betydligt högre hälsorisk.

Metanol betraktas som mycket toxiskt och kan påverka vissa legeringar korrosivt (Bruck & Gerbert (1985). Kontinuerlig exponering av metanol kan leda till huvudvärk, magsjuka, blindhet, påverkan på nervsystemet och även dödsfall. För att uppnå 50 %-ig dödlighetsnivå behöver dock en installatör på 70 kg inta 0,5 kg metanol. Propylenglykol har låg toxicitet men långvarig hudkontakt med propylenglykol kan verka hudirriterande. Tester har visat påverkan på det centrala nervsystemet vid intag av 4-8 g/dag (www.kemi.se), ett intag som dock bedöms osannolikt i sammanhanget med installation av markvärmesystem. För kroniska effekter (cancerogent, mutagent etc.) visade sig metanol ha hög risk vid intag och inandning. De flesta frostskyddsmedel kan dock bedömas som toxiska om tillräckliga doser tillsätts (Top & de Lint, 1991).

Etylenglykol som används/har använts i Sverige och bl.a. rekommenderas i värmebärarblandningar av Naturvårdsverket (1999) klassas som hälsoskadligt enligt Kemikalieinspektionen (www.kemi.se) och distributör Solarec har betecknat det som giftigt i sin produktinformation (www.solarec.se). Som nämnts ovan är metanol och etanol som koncentrat mycket brandfarligt och bör av den anledningen spädas innan de tillsätts systemet (Top & de Lint, 1991). Propylenglykol är bra ur miljösynpunkt men har något sämre termofysikaliska egenskaper jämfört med andra värmebärarvätskor (Lindborg, 1999), se vidare **tabell 12.2**.

I ett nyhetsbrev publicerat 2000-09-29 på SVEP:s webbplats (www.svepinfo.se) informeras om att Geotec har gjort en förfrågan till Naturvårdsverket och SGU beträffande etanol som värmebärare i bergvärmesystem. Följande svar står att läsa: "*Naturvårdsverket svarar bl.a. att etanol är ett lämpligt medium som värmebärare med hänsyn till miljöaspekter. Förutsättningen skall vara att etanol innehåller sådana denatureringsmedel som Läkemedelsverket föreskriver samt att installation av etanol i slutna köldbärarsystem i energibrunnar med energi ur mark eller berg ska utföras enligt Normbrunn 97 eller senaste revidering därav. SGU:s uppfattning är densamma men med tillägget att i ett kretsloppssamhälle bör det även beaktas om möjlighet finns att utnyttja etanol som är framställd av förnyelsebara råvaror*".

³ Hälsorisen m.a.p. metanol och propylenglykol verifierad genom sökning i Kemikalieinspektionens databas Riskline, www.kemi.se.

Miljösäkerhet

Sannolikheten för grundvattenförorening för slutna markvärmesystem är generellt mycket liten och läckage av värmebärande vätskor är mycket sällsynta (www.geotec.se). I de fall läckage har förekommit har mängden utläckt värmebärande vätska sällan överstigit 10 liter (www.geotec.se, 2000). Konsekvenserna av ett läckage är beroende av vilken vätska som används och av omgivningen.

Ahlkrona och Johansson uppger i en sammanställning från 1983 att 5000 system med horisontella markvärmesystem hade installerats i Sverige (Byggnadsrådet, 1983). Läckage av värmebärande fluid observerades i 130 av de 5000 anläggningarna. I 90 % av fallen rörde det sig om 2-3 liter. De vanligaste orsakerna var läckande kopplingar och sprickor vid veck.

Läckage orsakas nästan uteslutande genom att själva installationen varit dåligt utförd, att luft släppts in eller att undermåligt material eller materialkombinationer använts (www.geotec.se och Svensson et al, 1990). Enligt Naturvårdsverkets rapport 4994 (Lindborg, 1999) ska systemet installeras med övertryck och en tryckvakt som larmar vid tryckfall (läckage). Värmepumpen är i de flesta fall utformade så att om det uppkommer en läcka på markvärmesystemet stängs den pump som används för att cirkulera värmebärande vätskan automatiskt av p.g.a. det tryckfall som uppstår. Detta samt att ett undertryck uppstår i systemet medför att utpumpning av värmebärande vätska till omgivande mark upphör.

Uppkommer trots allt ett läckage kan värmebärande vätskan spridas i omgivande mark med grundvattentransport och genom diffusion. Grundvattenströmningen påverkar spridning och utspädning av föroreningen. Jordart och dess jordstruktur samt närvaro av mikroorganismer påverkar adsorption och immobilisering av föroreningen. Finns vattentäkter i närheten kan dessa bli förorenade då nedbrytning och adsorption av de ingående kemikalierna i värmebärande vätskan sker långsamt, särskilt om temperaturen är låg och syretillgången är liten (beror också på typ av ingående kemikalier). Redoxpotential, pH, biologisk nedbrytbarhet och hydrolys påverkar reaktion och destruktion av föroreningen. Ovanstående är mycket platsspecifikt och miljöpåverkan kan därför bli olika, allt från förändring av vattenkvalitet, förändring av jordkarakteristika, plantdöd, döda organismer (speciellt på akvatiskt liv), till att bli ett hot mot människan (Top & de Lint, 1991).

Läckage av värmebärande vätskor kan innebära krav på sanering om värmebärande vätskan innehåller toxiska ämnen som metanol. Värmebärande vätskor som är biologiskt nedbrytbara är att föredra och i USA rekommenderas kaliumacetat eller propylenglykol (www.dep.state.pa.us, 2000) och i Sverige rekommenderas bl.a. etanol, etylenglykol och glycerol av rapsolja (Lindborg, 1999).

Sanering av mark

Sanering av förorenad mark kan bli aktuellt i samband med läckage som medför att värmebärande vätskan läcker ut i marken. Orsaken kan exempelvis vara att markvärmesystemet grävs av. Behovet av efterbehandling för den förorenade marken beror på vilken typ av värmebärande vätska som använts, mängden och potentiella receptorer (vanligen syre) (www.dep.state.pa.us, 2000). Generellt ska inte biologiskt nedbrytbara värmebärande vätskor behöva medföra någon efterbehandlingsåtgärd.

Sammanfattning

I **tabell 12.2** sammanfattas några vanliga värmebärarvätskors egenskaper med avseende på miljö och toxicitet samt de termodynamiska egenskaperna.

Tabell 12.2. Några vanliga värmebärarvätskors toxiska och termodynamiska egenskaper.

Värmebärarvätska	Toxiska egenskaper	Termodynamiska egenskaper samt korrosivitet
Metanol och vatten	Mycket flyktigt, mycket brandfarligt och mycket toxiskt. Biologisk nedbrytbart.	Lågt friktionellt tryckfall, relativt hög värmeledningsförmåga, relativt låg viskositet ¹⁾ . Metanol har lägre densitet än vatten.
Etanol och vatten	Mindre toxiskt och mindre brandfarligt än metanolvatten men en dock brandfarligt. Lätt biologiskt nedbrytbart. Tillsats av denatureringsmedel och eventuellt korrosionsinhibitorer.	Högre viskositet än metanol, större tryckfall och lägre värmeledningsförmåga än för metanol ¹⁾ . Korrosivt på järn- och kopparmaterial. Etanol har lägre densitet än vatten.
Etylenglykol och vatten	Låg flyktighet, låg brandfara. Biologisk nedbrytbart. Något toxiskt och måste förvaras och hanteras varsamt. Har begränsad livslängd och pH måste kontrolleras årligen. Förbrukad blandning byts ut.	Lägre värmeledningsförmåga än metanol men högre än etanolvattenblandning. Högre viskositet än metanol men lägre än etanol. Viskositeten tenderar att öka med minskad temperatur ¹⁾ . Rätt utfört och tillsatt har det låg korrosivitet.
Propylenglykol och vatten	Mindre toxiskt än etylenglykol.	Sämlre termodynamiska egenskaper än övriga (Lindborg, 1999). Hög viskositet som ökar kraftigt vid extremt kalla temperaturer (frys punkt $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$) vilket resulterar i hög pumpkostnad ¹⁾ .
Kaliumacetat och vatten	Ej toxiskt, ej brandfarligt. Ej biologiskt nedbrytbart.	Hög värmeledningsförmåga men låg specifik värmekoefficient. Låg viskositet. Icke-korrosivt. Hög läckagerisk.
Kalcium-/natriumklorid och vatten	Låg toxicitet men kräver tillsats av korrosionsinhibitorer som kan vara toxiska. Ej brandfarligt. Ej biologiskt nedbrytbara.	Något lägre viskositet än metanol. Korrosivt och utspätt i lösning mer korrosivt än i koncentrat. För att minska korrosion ska pH ligga mellan 7,5 och 8 ¹⁾ . Kräver periodiskt underhåll och kontroll.

¹⁾ <http://www.aep.com/residential/geo/gdceflu.asp>, 2001-02-01. American Electric Power.

12.3.2 Läckage av oljor

Förutom risk för läckage av värmebärarvätskor och köldmedier kan även läckage av oljor förekomma från entreprenadmaskiner vid anläggandet av ett markvärmesystem (www.geotec.se, 2000). Det är sällsynt med större läckage från maskinerna och om det förekommer läckage sker det främst i form av dropp. Oljor förekommer som smörjoljor och drivoljor i entreprenadmaskiner (plog-, borrh-, fräs-, grävmaskin etc.). Smörjmedel används främst till förbränningsmotorer, kompressorer och borrhstänger. Drivoljor används främst till borrhstänger (avser borrhstänger).

I dag ställs allt högre krav på att dessa oljor ska vara miljöanpassade och nedbrytbara samt önskemål om att de ska vara livsmedelsgodkända (luftfri och, för människan, giftfri). Ett problem med de miljövänliga smörjoljorna är att de inte alltid uppfyller de tekniska kraven som entreprenören ställer (www.geotec.se, 2000). Idag finns det inga miljöanpassade smörjoljor till förbränningsmotorer. Vid borrhning kommer dock inte sådan olja i kontakt med borrhålet

(www.geotec.se, 2000). Enligt Geotec finns det två typer av miljöanpassade drivmedel till hydrauliken för borrhågsdrivningen, vegetabiliskt baserade oljor (främst rapsolja) och syntetiska oljor (www.geotec.se, 2000). Den vegetabiliska oljan har visat sig ha sämre oxidationsegenskaper än den syntetiska. Vidare har den gett negativ påverkan på packningar och slangar vilket ofta medfört oljeläckage. Krav på hydraulolja specificeras enligt svensk standard (SS155434).

12.3.3 Korrosionshämmare

Korrosionsinhibitorer tillsätts värmebärarvätskor för att förhindra korrosion på ledningsmaterial och därmed förhindra läckage med miljöskada, personskada och produktskada som följd. En förutsättning för korrosion på insidan av systemet är tillgång på syre. Syrehalten kan minimeras genom avgasning och pH-justering av systemet. Vanliga PE-material anses inte helt diffusionstäta, men slutna system som utförs med övertryck (svaga övertryck i hela systemet) minskar behovet av korrosionsinhibitorer eftersom det förhindrar syre från att tränga in (Lindborg, 1999). Enligt branschtidningen Borrsvängen (1998) innehåller merparten av de värmebärarvätskor som används korrosionsinhibitorer, av vilka de flesta kan anses mycket toxiska. Se även avsnitt 12.4.1.

12.3.4 Termisk påverkan

Forskning om effekterna på grundvattenkvalitet av stora markvärmesystem med slutna slangsystem, som antingen tillför eller uttar värme ur marken, har endast bedrivits i begränsad omfattning. Kunskapen är relativt begränsad om förändringar i grundvattenkvaliteten som en följd av temperaturförändringar. Enligt GSHPM (www.dep.state.pa.us, 2000) är s.k. ”termisk förorening” i markvärmesystem näst intill obefintlig. I regel utjämnas påverkan från uppvärmning och kylning av marken om systemet används hela året.

I en del svenska kommuner förekommer restriktioner mot anläggandet av energianläggningar som orsakar temperaturförhöjning i grundvattnet, speciellt i och nära dricksvattentäkter.

12.4 Markpåverkan

12.4.1 Nivåändringar

Ingrepp nära markytan, som markvärmesystem innebär, kan leda till att ytdränerande förhållanden skapas. Sättningar vid eller omkring markvärmesystemet kan ge effekter både på systemet och på närliggande byggnader. Frysning av marken på grund av för högt uttag av värme kan medföra hävning (se avsnitten 3.1.6 och 3.3). Underdimensionering av borrhål i leror med hög vattenhalt har t.ex. resulterat i att marken runt borrhålet frusit vilket haft till följd att leran sammanpressats då vattnet separerats från leran i samband med tjällossningen. Detta kan främst väntas förekomma i områden under högsta kustlinjen (www.geotec.se, 2000) (avsnitt 3.1).

12.4.2 Påverkan på växtlighet och organismer

Vid värmeuttag har det för ytjordvärme konstaterats att mängden dagmaskar och aktiviteten hos mikroorganismer minskat påtaligt över markvärmeväxlaren. Utförda odlingsexperiment har visat att arter väl anpassade till växtplatsen klarar sig bra medan mindre härdiga växter påverkas mera genom försenad vårblomning eller att blomning helt uteblir. Effekterna på växtligheten är främst begränsade till ytan för markvärmeväxlaren och mest av betydelse för markägaren (Svensson et al., 1990).

Vertikal installation av markvärmesväxlare är gynnsammare än horisontell och bedöms ge endast obetydlig inverkan på temperaturen i rotzonen. Effekter på vegetationen är inte särskilt sannolik såvida inte flera uttagshål placeras nära varandra som skulle kunna resultera i en långsiktig nedkyllning av jordmassan (Svensson et al., 1990).

12.4.3 Spridning av markföroreningar

Installation av markvärmesväxlare kan medföra spridning av föroreningar om det uppstår över-skottsmassor av förorenad mark. Sådana förorenade massor måste tas omhand på ett miljöräktsamt sätt i enlighet med tillsynsmyndighetens anvisningar. Även omgrävning av förorenade massor kan medföra att föroreningar lakar ut lättare.

12.5 Köldmedium i värmepump

En rad internationella överenskommelser har slutits för att minska utsläppen av klimatstörande köldmedier.

Användandet av CFC som köldmedium/arbetsmedium i värmepumpar är förbjudet enligt SNFS (1992:16) med ändring 1997:3, se faktarutan nedan. CFC har främst ersatts av olika fluoridhaltiga kolväten, även benämnda HFC (väte, fluor och kol). De mest förekommande köldmedierna i Sverige är:

- R407C blandning av R32: difluormetan, R125: pentafluoretan och R134a: tetrafluoretan,
- R404 blandning av R125: pentafluoretan, R134a: tetrafluoretan, R143a: trifluoretan,
- R134a tetrafluoretan,
- R290 propan.

Nämnda köldmedier anses lämpliga ersättare ur miljösynpunkt. Samtliga, utom R290, utgörs av fluoridhaltiga kolväten. Fluoridhaltiga ämnen som HFC:er och andra av människan framställda ämnen tillhör de nya växthusgaserna som påverkar växthuseffekten om de tillförs atmosfären (www.environ.se, 2000). Tekniskt sett är R290 -propan ett mycket bra köldmedium som medför god driftsekonomi och tillförlitlighet men säkerhetsbestämmelserna är omfattande p.g.a. att propan är extremt brandfarligt inom vissa blandningsförhållanden med luft (www.geotec.se, www.kemi.se, 2000). Säkerhetsproblemen kan klaras med olika typer av åtgärder, t.ex. minskad fyllnadsmängd.

Faktaruta

Köldmediekungörelsen SNFS (1992:16) 7§ med senast införd ändring 1997:3: Anläggningar med CFC, övriga CFC, haloner eller HCFC som köldbärare (värmebärare) får inte användas. Anläggningar med CFC, haloner eller övriga CFC som köldmedium och där köldmedieledningar är förlagda i mark, sjö eller vattendrag får inte användas (**SNFS 1997:3**).

Not: En förteckning över köldmedier finns på Naturvårdsverket. Förteckningen med klassificering av medierna finns även på www.environ.se/dokument/teknik/koldmed/kmedie.htm.

Olika köldmediers klimatpåverkan brukar uttrycks i begreppen ODP (Ozone Depletion Potential) och GWP (Global Warming Potential). ODP beskriver påverkan m.a.p. uttuning av ozonskiktet i förhållande till den påverkan köldmediet R11 (CFC) har och GWP beskriver den påverkan på global uppvärmning i relation till koldioxid. I **tabell 12.3** anges ODP och GWP

för några vanliga köldmedier. Av tabellen framgår att HFC, som varken innehåller klor eller brom, har någon ODP påverkan.

Läckage av köldmedium kan framförallt uppstå vid haverier, allmän hantering av köldmediet och vid skrotning av maskinen (Nilsson, 2001).

Tabell 12.3. ODP och GWP för några vanliga köldmedier i markvärmepumpar (Nilsson, 2001).

Köldmedium	Kategori	ODP	GWP
R11	CFC	1	4000
R22	HCFC	0,055	1700
R407C	HFC	0	1600
R404A	HFC	0	3260
R134a	HFC	0	1300
R290	-	0	3

Det pågår forskning inom och utanför Sverige med syfte att ta fram naturliga köldmedier som inte ger någon negativ miljöpåverkan (www.stem.se).

12.6 Rekommendationer

12.6.1 Jordvärmesystem

Nedan specificeras några av de krav som ställs i Sverige genom Normbrunn 97 för att bl.a. undvika negativa effekter på markmiljön. Som jämförelse anges amerikanska rekommendationer genom GSHPM (www.dep.state.pa.us), där de avviker från de svenska:

- Helsvetsade plaströr (PEM PN 10) enligt SIS 3362. "Plaströr/tryckrör av PE till kallvattenledningar", eller motsvarande (Normbrunn 97). Slangmaterial i slutna GSHP-system bör vara tillverkade av PEH eller PB (www.dep.state.pa.us).
- Inspektion av markvärmeväxlar slang efter eventuella transportsador och/eller provtryckning innan installation (Normbrunn 97).
- Svetsning av plaströrskopplingar med godkänt material och svetsutrustning med invändig stödhylsa vid mekaniska kopplingar (Normbrunn 97).
- Återfyllnad med lämpligt material som ej kan skada slangen (Normbrunn 97).
- Isolering av markvärmeväxlar slang i mark med markbeständigt material genom husvägg och vidare 0,5 m utanför husvägg (Normbrunn 97).
- Provtryckning efter installation, bör ske i samband med provkörning av värmepump (Normbrunn 97). Innan diken eller borrhål fylls igen ska systemet spolats igenom och tryckkontrolleras. Även om slangarna ska hålla decennier kommer med tiden läckor att uppstå. Det är därför av avsevärd vikt att biologiskt nedbrytbara, icke toxiska medier används som värmebärarvätska (www.dep.state.pa.us).
- Markering av energibrunnens läge på fastigheten med bricka på husgrund eller annan väl synlig plats. Noggrannhet $\pm 0,1$ m (Normbrunn 97).
- För borrhål och öppna system, undvik borrhål i berggrund där karstlandskap förekommer, för att undvika slukhål (www.dep.state.pa.us).
- Utförs borrhålsborring genom en akvifer skall tätning utföras riktigt och noggrant så att inte akviferens tillstånd ändras (www.dep.state.pa.us).

Hydrogeologisk undersökning kan vara nödvändig för att bl.a. kunna bedöma hur och vem som eventuellt kan komma att påverkas vid installation av ett markvärmesystem. Detta gäller främst om grundvattnet kan komma att påverkas och om det finns en vattentäkt inom rimligt avstånd nedströms markvärmeområdet (www.dep.state.pa.us).

Enligt Geotec (www.geotec.se) bör även följande uppmärksammas:

- Avluftning av värmebärare. Ingen luft får finnas kvar i systemet vid drifttagning eftersom det kan leda till driftstörning/stopp av värmepumpen.
- Partiklar får inte förekomma i markvärmeväxlaren, i radiatorsystemet eller i andra värme-sänkor, som kan leda till igensättning av förångare och/eller kondensor.
- Inga kloridhaltiga fryspunktnerödsättande tillsatser (typ natriumklorid, kalciumklorid) får användas med hänsyn till de värmeväxlare som används i värmesystemen idag (vanligen hellödda plattvärmeväxlare).
- När värmepumpen är i drift ska alltid ett konstant flöde hållas över både förångare och kondensor. Kan detta inte ske, som när värmepumpen arbetar mot förbrukarkretsar, ska en arbetstank eller en översvämningventil installeras. Det är viktigt att uppmärksamma aggregatets arbetsområde eftersom avvikelser kan förkorta aggregatets livslängd avsevärt.

12.6.2 Värmebärarvätskor

Rekommendationer, nationellt och internationellt, med avseende på värmebärarvätskor bestående av vatten med tillsats av frostskyddsmedel:

- Naturvårdsverket (Lindborg, 1999) rekommenderar som frostskyddsmedel: etylenglykol, etylalkohol/etanol, propylenglykol, natriumklorid, kalciumklorid, kalciumkarbonat, kaliumacetat och -formiat samt glycerol av rapsolja (se även kapitel 4).
- SVEP och GEOTEC rekommenderar som frostskyddsmedel ren etanol tillverkad av förnyelsebara råvaror (ej syntetiskt framställt) och med tillsats av denatureringsmedel föreskrivna av Läkemiddelsverket (Borrsvängen 4/2000).
- IGSHA-standarder på värmebärarvätskor rekommenderar: dricksvatten, vatten plus kaliumacetat, eller vatten plus propylenglykol (www.dep.state.pa.us) (se även kapitel 4).

12.7 Markvärme – ur miljösynpunkt

12.7.1 Energibetraktelse

Med energi inom fysiken menas kapaciteten att utföra ett arbete. Alla processer på jorden drivs av energi. Energi kan förekomma i olika former: kinetisk, potentiell, termisk, elektrisk, nukleär etc. Energiformerna kan omvandlas och förbrukas men själva energin kan aldrig förbrukas. Varje gång energin omvandlas förlorar den i kvalitet, dvs. omvandlas till en energiform av lägre kvalitet. Exergi är ett kvalitetsmått och beskriver hur stor del av energimängden som kan utnyttjas (hur stor del av energin som kan omvandlas till mekaniskt arbete). Det är exergin som förbrukas.

Elektrisk energi har den högsta kvalitén, dvs. elektricitet är den energiform ur vilken vi kan få ut störst energimängd. Man säger att elektrisk energi har exergivärdet 100 % vilket teoretiskt innebär att 1 kWh el kan utföra ett arbete på 1 kWh. Att t.ex. använda ett antal kWh 100-procentig energi till att skapa lika stort antal kWh 3-procentig energi innebär att 97 procent av exergin slösas bort (www.snf.se, 2001).

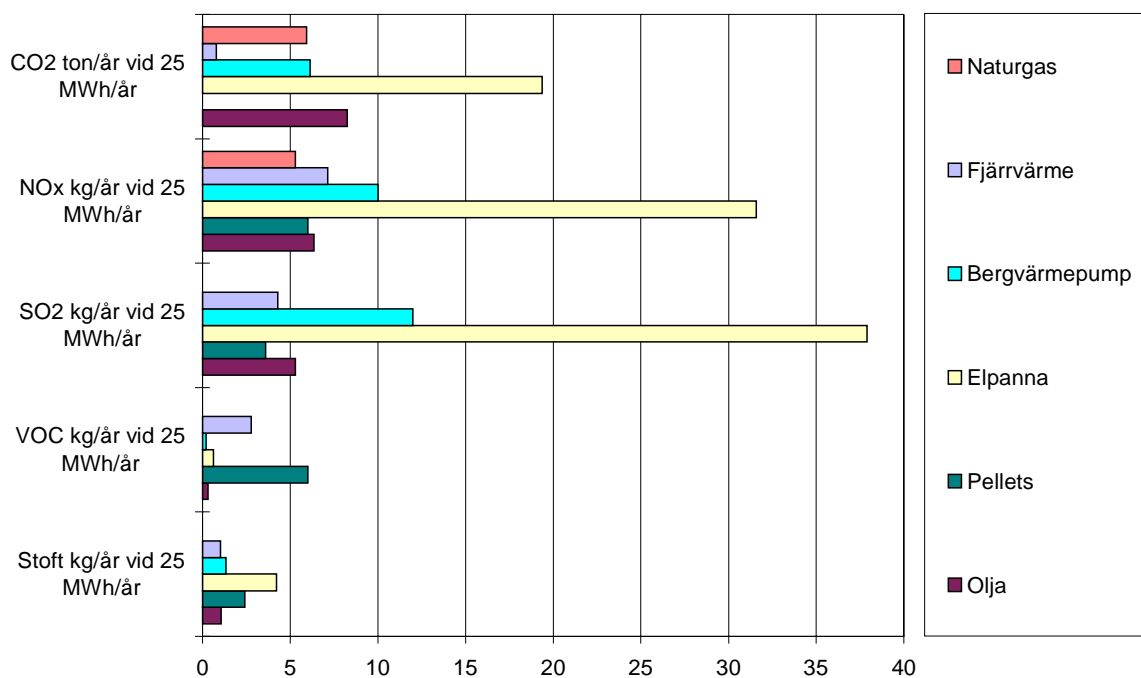
Värmeenergi har låg kvalitet och att använda el till uppvärmning är således en form av slöseri. El som producerats genom vattenkraft utgörs av rörelseenergi som omvandlats till elektrisk energi för att sedan omvandlas till värmeenergi. El från kärnkraftverk utgörs av nukleär energi som omvandlats till värme som sedan omvandlats till el för att därefter omvandlas till värme igen. Under vägen förlorar energin i kvalitet. En värmepump utnyttjar el till drift av själva värmepumpen men ger tillbaka 3-4 kWh per insatt kWh. Genom att använda värmepump kan högkvalitativ elenergi sparas för andra ändamål.

12.7.2 Minskad belastning på miljön

Markvärmesystem utnyttjar naturvärme för uppvärmning och avkylning av byggnader. Marken i och omkring markvärmeväxlarna värms upp under sommarhalvåret och på vintern tas värme från marken för uppvärmning. På sommaren kan komfortkyla erhållas genom att värme förs från byggnaden till marken vilket även bidrar till effektiv återladdning av marklagret. Naturvärme är till skillnad från olja och kärnkraft en förnyelsebar energikälla och förnyelsebara energikällor är en av förutsättningarna för hållbar utveckling. Med markvärmesystem kan behovet av andra icke-förnybara energikällor minskas. Innehållet i avsnittet är delvis hämtat från organisationer med visst partsintresse.

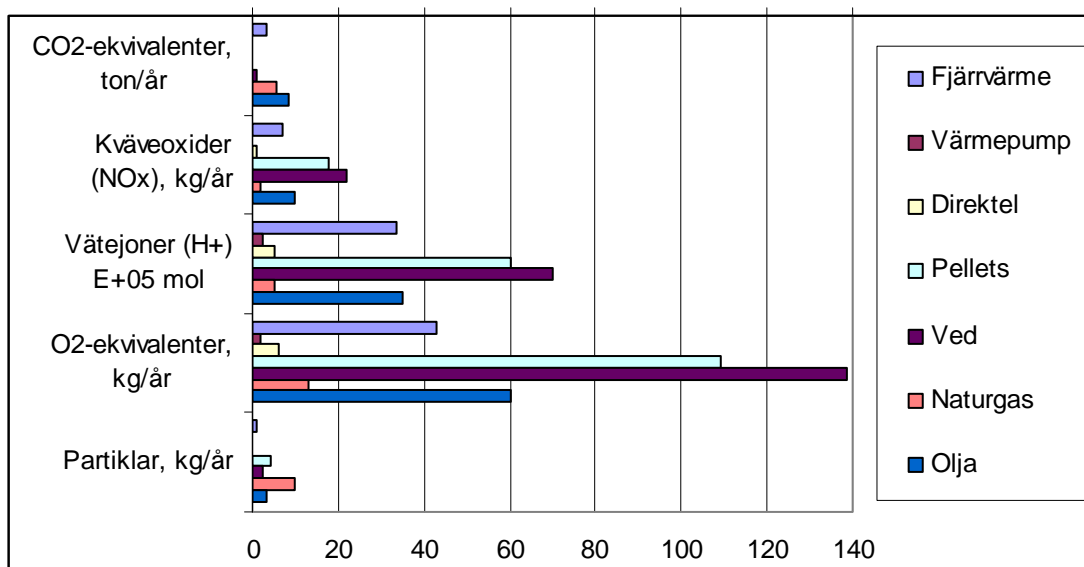
Emissioner

En jämförelse av emissioner från små värmeanläggningar (0,5-10 MW) och sex olika energislag redovisas av Energimyndigheten (www.stem.se, källa: Naturvårdsverket, 1998) och återges i **figur 12.1**. För bergvärme redovisas att emissioner i form koldioxid, nitroxa gaser och svaveldioxid visserligen är ca 3 gånger lägre än för elpannan men relativt höga jämfört med andra energislag. Det förutsätts då att den el som används utgörs till 100 % av importerad ("smutsig") el producerad i koleldade kondens- och kraftvärmeverk.



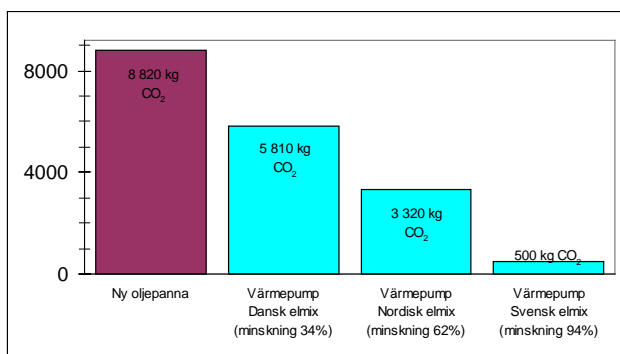
Figur 12.1. Jämförelse av utsläpp från olika värmeanläggningar (EKMIL 985, www.stem.se, 2001-07-02). Verkningsgraden är justerad för olja från 70 till 85 % och för värmepump från 280 till 300 %. Använd el förutsätts vara producerad i koleldade kondens- och kraftvärmeverk.

I en studie undersöktes miljöpåverkan från byggnaders uppvärmningssystem (Ettapp 1), inom ramen för forskningsprogrammet Effektiv (Wahlström et al, 2000). Studiens första etapp omfattade emissioner, indelade i följande kategorier av miljöpåverkan: växthuseffekt, försurning, bidrag till bildning av marknära ozon och övergödning. I arbetet utgick man från livscykelanalyser (LCA) eller livscykelinventeringar (LCI). Miljöpåverkan av värmepumpar uppskattades med hänsyn till köldmedieläckage och den mix som elen till värmepumpen antogs vara producerad med. I figur 12.2 visas uppskattad miljöpåverkan för olika uppvärmningssystem till en villa med värmebehov 25 000 kWh/år. Elanvändningen betraktas som en Sverigemix (1998). För värmesystem med värmepump noteras en liten miljöbelastning, med avseende på växthuseffekt (CO₂-ekvivalenter), försurning (H⁺) och övergödning (O₂-ekvivalenter), jämfört med övriga system.



Figur 12.2. Miljöbelastning baserat på emissioner från olika värmeanläggningar för ett värmebehov på 25 000 kWh/år (efter Wahlström et al, 2000). Använd el förutsetts vara till 100 % svenskproducerad.

En undersökning utförd av VET-gruppen, se figur 12.3 (jämför också med figur 12.1 och 12.2) visar att en värmepumpanläggning reducerar koldioxidutsläppen med mellan 34-94 % jämfört med oljeeldning, beroende av hur elen till värmepumpen produceras. Störst reduktion erhöles för s.k. svensk elmix (vattenkraftsproducerad el etc) och lägst reduktion för s.k. dansk elmix (kolkondens). Pelletseldning ger däremot inget nettotillskott av koldioxid till atmosfären.



Figur 12.3. Reduktion av koldioxidutsläpp från värmepumpanläggning jämfört med oljeeldning (verkningsgrad 85 %) och hur elen till värmepumpen produceras. VET-aktuellt (2000).

Köldmedium

Den dominerande miljöfrågan inom markvärmesystem var tidigare risken för läckage av värmepumpens köldmedium i form av CFC- och HCFC-föreningar (freoner), som påverkar ozonskiktet i atmosfären och bidrar till global uppvärmning. CFC och HCFC som köldmedium är förbjudet sedan januari 1995 respektive januari 1998. I befintliga anläggningar får påfyllning av HCFC (t.ex. R22) ske fram till 1 januari 2002. Freoner som köldmedium i värmepumpar har ersatts av olika fluorhaltiga kolväten (HFC) eller rena kolväten. Läckage av HFC har inte någon effekt på ozonlagret, däremot påverkar det växthuseffekten. Det satsas i Sverige och i övriga Europa på att utveckla naturliga köldmedier som inte ska ge någon miljöbelastning alls. Energimyndigheten finansierar tillsammans med svenskt näringsliv forskningsprogram som syftar till energieffektiva lösningar inom kyl- och värmeområdet och som är miljömässigt och ekonomiskt hållbara.

Värmebärrätskor

Den dominerande miljöfrågan har därefter mer fokuserats på läckage av systemets värmebärrätska som utgörs av vatten med fryspunktsnedsättande tillsats av glykol-, alkohol-, eller salt (se vidare avsnitt 12.3.1). Läckage av värmebärrätska kan orsaka förorening av mark och grundvatten men erfarenheter från branschen visar att få markvärmväxlare gått sönder med läckage som följd. Slangen måste hanteras varsamt under transport och installation, samt att den ska vara felfri. Eftersom slangen inte utsätts för solljus när den ligger i marken går åldrandet mycket långsamt och beständigheten för PE-plast (slangmaterialet) är 50-100 år (Lindborg, 1999).

Slangen ska installeras med ett övertryck och med en tryckvakt som larmar om ett läckage uppstår (tryckfall). Trycket av värmebärrätskan i slangen balanseras av trycket på utsidan genom vattnet i marken. Används en värmebärrätska med lägre densitet än omgivande vatten innebär det att ett undertryck skapas vid läckage och att läckaget snarare blir från utsidan till insidan (www.svepinfo.se, 2000). Uppstår ett läckage är utläckt mängd liten, dvs. någon eller några liter, och miljöpåverkan liten då halten frostskyddsmedel är låg, mellan 15-30 %. Enligt Naturvårdsverket (Lindborg, 1999) ska markvärmesystem hålla övertryck vilket även förhindrar förekomst av syre som är en förutsättning för korrosion. Därmed minskas även behovet av inblandning av korrosionsinhibitorer.

Risk

Risk har definierats som sannolikhet gånger konsekvens. Sannolikheten för utläckage av värmebärarvätska är enligt branschen låg. (Det finns ännu ingen statistik i Sverige eller någon officiell rapport på objekt där läckage har förekommit.) Konsekvensen av utläckage av värmebärarvätska beror dels av typ av frostskyddsmedel och eventuell inblandning av inhibitorer, dels av markens beskaffenhet. Mängden värmebärarvätska som möjligen kan läcka ut vid ett eventuellt läckage är enligt branschen liten, en till ett par liter, och av dessa liter utgör ca $\frac{3}{4}$ -delar vatten och $\frac{1}{4}$ -del frostskyddsmedel.

Drivenergi

Drivenergi till värmepumpen utgörs, förutsatt att elen produceras inom landet, i huvudsak av elektricitet från vatten- eller kärnkraft. Notera att för varje tillförd effekt (kW) fås minst tre gånger tillbaka. Konvertering från uppvärmning med direktel till markvärmesystem med värmepump innebär i regel minskad elanvändning. Om elanvändningen för värmepumpar ryms inom ramen för befintlig elproduktionskapacitet ger konvertering från andra uppvärmningsformer, t.ex. fossila bränslen, inget tillskott till miljöbelastningen (Svensson et al., 1990).

Markekologi

Utnyttjandet av naturvärme kan ge lokala ekologiska effekter men generellt kan markvärmesystem väl kombineras med fungerande ekosystem (Svensson et al., 1990).

Konvertering till markvärmesystem med värmepump

Det är möjligt att konvertera till eller komplettera med ett markvärmesystem oavsett vilket värmesystem (direktelvärme, vattenburen el eller oljepanna) som tidigare finns installerat. Det är oftast både ekonomiskt och miljömässigt bättre att byta från en gammal oljepanna till en värmepump än att byta till en ny oljepanna. Enligt uppgift från VET-gruppens webbplats (värme energi teknik, www.vet.se, 2000), kan energikostnaden i ett sådant fall halveras. Koldioxidutsläppen reduceras i olika omfattning beroende på hur elen till värmepumpen produceras. Om man enbart använder dansk kolkraft, reduceras koldioxidutsläppen med ca 34 procent. Om man istället skulle använda en mix från alla de nordiska länderna reducerar man utsläppen med ca 62 procent och med enbart svensk elmix med 94 procent. I uppvärmningskostnad för ett hus som förbrukar 15 000 kWh kan en värmepump spara från 5 000 kr om året (www.stem.se, 2000). Att bygga om direktelvärmdda småhus till fjärrvärme är idag dyrt, både för fjärrvärmeföretaget och husägaren och det krävs minst en årsförbrukning av 27 000 kWh för att det ska bli lönsamt (www.stem.se, 2000).

13. REFERENSER

13.1 Litteratur

Kap 1

Healy, P F and Ugursal, V I. (1997). *Performance and economic feasibility of ground source heat pumps in cold climate*. Int. Journal of Energy Research, Vol. 21. pp 857-870. John Wiley & Sons Ltd. USA.

Moe, N, Öfverholm, E, Froste, H (1996). *Miljöanpassad effektiv uppvärmning – 20 °C inomhus, men hur?. Supplement till Milen och Nya grepp om ekonomi, energi och miljö på lokal nivå*. NUTEK B 1996:4 alt. Naturvårdsverket Rapport 4526. NUTEK och Naturvårdsverket, Stockholm.

Rybach, L, Sanner, B (2000). *Ground-Source Heat Pump Systems –The European Experience*. GHC Bulletin, March 2000, pp 16-26. Geo Heat Center, Oregon Institute of Technology, USA.

Kap 2

Hellström, G & Gehlin, S. (1997). *Direct Cooling of Telephone Switching Stations using a Borehole Heat Exchanger*. Proceedings 7th International Conference on Thermal Energy Storage, Megastock '97, Sapporo, Japan, June 18 – 21, 1997. Proceedings, Volume 1, pp 235-240.

Kap 3

Bergdahl, U, Ottosson, E & Malmberg, BS. (1993). *Plattgrundläggning*. Statens geotekniska institut (Svensk Byggtjänst), Solna.

Byggboken (1989), *Boken om isolering*, Reklamgruppen Rockwool, ISBN 91-970690-1-9, Skara.

Byggforskningsrådet. (1983). *Ytjordvärme – markkollektorer*. BFR-seminarium mars 1982. R37:1983. Sammanställt av P. Mogensen. Statens råd för byggforskning, Stockholm.

Eklöf, C, Gehlin, S. (1996). *Säkrare värmefakta med termisk responstest*. Borrsvängen nr 3/96.

Frost i Jord, Sikring mot Teleskader (1976), Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Forskningsråd og Statens Vegvesens Utvalg NR. 17, Oslo, Sætersdal, R. red., s. 244

Gabrielsson, A., Bergdahl, U. & Moritz, L. (2000). *Försöksfält för värmelagring i lera (max 90 °C). Utvärdering av geotekniska och värmetekniska resultat från driften 1992-1999*. Varia 493. Statens geotekniska institut, Linköping.

Gehlin, S. (1998). *Thermal Response Test. In-Situ Measurements of Thermal Properties in Hard Rock*. Lic. Thesis. 1998:37. Dept. of Environmental Engineering, Div. of Water Resources Engineering, Luleå University of Technology, Luleå.

Handboken Bygg: Geoteknik (1984). S. Avén, huvudred. LiberFörlag, Stockholm. ISBN 91-38-06077-9.

Johansen, Ø. (1975). *Varmeledningsevne av jordarter*. Institutt for kjøleteknikk, 7034 Trondheim-NTH, Norge.

- Magnusson, C & Sundberg, J. (1990). *Markvärmeteknik.Handledning för planering och projektering*. T6:1990. Byggeforskningsrådet, Stockholm.
- Modin, B & Wilén, P. (1980). *Byggnadsuppvärmning med jordvärmepump. Geologiska förutsättningar för värmelagring i lera inom större tätorter i Mellansverige*. R88:1980. Byggeforskningsrådet, Stockholm.
- Moritz, L. (1995). *Geotechnical Properties of Clay at Elevated Temperatures*. Report 47. Statens geotekniska institut, Linköping.
- Sundberg, J. (1991). *Termiska egenskaper i jord och berg*. SGI Information 12. Statens geotekniska institut, Linköping.
- Sundberg, J. (1986). *Värmeöverförande egenskaper i svenska jordarter. Värmeledning, specifik värmekapacitet och latent värme*. R104:1986. Byggeforskningsrådet, Stockholm.
- Sundberg, J. (1985). *Värmeöverförande egenskaper i svensk berggrund*. R97:1985. Byggeforskningsrådet, Stockholm.
- Svensk Byggnorm, SBN 1980* (1980). Statens planverks författningssamling, PFS 1980:1, LiberFörlag, Stockholm.
- Viberg, L. (1995). *Brief geological description of Sweden*. In: International symposium on cone penetration testing, CPT'95, Linköping, Oct. 1995. Proceedings, vol. 1. Swedish Geotechnical Society. SGF Report 3:95
- Viklander, P & Knutsson, S. (2000). *Hur påverkas jord av frysning och tining?*. Bygg & teknik 1/00.

Kap 4

- den Braven K. (1998). *Survey of Geothermal Heat Pump Regulations in the United States*. The Second Stockton International Geothermal Conference, March 1998. Se <http://www.geojournal.stockton.edu/table.html>.
- Bruck M & Gerbert H. (1985). *Experiences with vertical "Trench ground-heat-exchangers": Thermal performance and economic analysis*. Austrian Solar and Space Agency (ASSA) och Ingenierbüro für Energietechnik FRG.
- Cane R L D. (1991). *Research in support of the Canadian ground-source heat pump installation standard*. Caneta Research Inc., Mississauga, Ontario. HPC workshop on ground source heat pumps, Montreal, August 1991. Proceedings.
- Gerbert H. (1986). *The Trench Collector*. Workshop on ground source heat pumps, Albany NY, October 1986. Proceedings.
- Granryd E & Melinder Å. (1991). *A comparison of thermodynamic properties of secondary refrigerants for heat pumps*. HPC workshop on ground source heat pumps, Montreal, August 1991. Proceedings.
- Koene F & Geelen Ch. (2000). *Energy piles as an efficient way to store heat*. CADDET Energy Efficiency (www.caddet-ee.org).
- Lindborg, A. (1999). *Villavärmepumpar med energi från ytjord/energibrunn*. Rapport 4994. Naturvårdsverket Förlag, Stockholm.
- Melinder, Å. (1997). *Svenska Kyltekniska Föreningens Handbok Nr 12. Termofysikaliska Egenskaper för Köldbärarvätskor, Diagram och Tabeller*. Svenska Kyltekniska Föreningen.

Oklahoma State University (OSU), Division of Engineering Technology. (1997). *Geothermal Heat Pumps – Introductory Guide*. National Rural Electric Cooperative Association, Electric Power Research Institute, Oklahoma State University and Int. Ground Source Heat Pump Association (distribution). Oklahoma State University, USA.

Rybach L & Sanner B. (2000). *Ground-source heat pump systems the European experience*. GHC Bulletin, March 2000. pp 16-26.

SGU (1997). *Normbrunn 97*. Utarbetat av Göran Risberg. Finns på <http://www.geotec.se>, <http://www.svepinfo.se> och <http://www.avantisystem.se>.

Svensk Energi – Swedenergy – AB (2001). *Schaktningsfri kabelförläggning*. B 15:01. EBR, Svensk Energi – Swedenergy – AB.

Top P & de Lint N. (1991). *Investigation of antifreeze agent for ground source heat pumps*. RTOECH International, Mississauga, Ontario, Canada. HPC workshop on ground source heat pumps, Montreal, August 1991. Proceedings.

Wilén, P, Rhén, I. (1986). *Metoder och kostnader för anläggande av värmelager i mark med vertikala rör. Förstudie*. Rapport nr 21. Jordvärmegruppen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

[Kap 5](#)

Fallsvik, J. (1992). *Direktläggning av deponigasledning mellan Hult och Jönköping*. Geoteknisk utredning. Jönköpings kommun, Statens geotekniska institut, SGI Dnr. 2-291/92.

Gräv säkrare! (1981). *Tips om hur jord fungerar*. Arbetskyddsstyrelsen och Statens geotekniska institut, Beställningsnummer H7.

Magnusson, O, Orre, B. (1985), *Schaktbarhet Klassificeringssystem-85*. Byggforskningsrådet, Rapport R130:1985, ISBN 91-540-4484-7, Svensk Byggtjänst, Stockholm

[Kap 6](#)

IGSHPA. (1994). *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.

Svec O J. (1988). *Spiral heat exchangers. Demonstration of a new ground source heat pump technology*. International conference on energy storage for building heating and cooling, 4, Jigastock 88, 18-21 October 1988, Versailles. Communications/Proceedings, Vol. 1-2.

Svec O J. (1992). *Spiral heat exchangers for ground source heat pumps*. Construction Canada 34(4), July 1992, p. 25-26. Även på http://www.nrc.ca/irc/practice/gen2_E.thml.

Svec O J. et al. (1993). *Advanced in ground heat exchange technology for heat pump systems*. International Energy Agency, Advanced Heat Pumps, Annex VIII. Draft – Final Report.

Tarnawsky & Leong. (1990). *Computer simulation of ground coupled heat pump systems*. Contract Report to the National Research Council of Canada, March 30, 1990.

[Kap 7](#)

Andersson, B och Andersson, O. (2000). *Collection of Geodata for UTES-applications by the use of Test Drilling*. Proceedings 8th International Conference on Thermal Energy Storage, Terrastock 2000, Stuttgart, Germany, August 28 – September 1, 2000. pp 117-122. Stuttgart University. Institute of Thermodynamics and Thermal Engineering.

- Avanti. (1996). *BrunnsbörRARhandboken 1996-11-15*. Sveriges AvantibörRARare Förening.
- Breger, D S, Sunderland, J E., El Hasnaoui, H & Hubbell, J E. (1994). *Final engineering and design analysis of the central solar heating plant with seasonal storage at the University of Massachusetts / Amherst*. Dept of Mechanical Engineering, University of Massachusetts.
- Caneta Research Inc., (2001). Design and Installation of Underground Thermal Energy Storage Systems. Draft Design and Installation Standard. (Revised January 23, 2001). Caneta Research Inc., Ontario, Kanada.
- Gabrielsson, A, Lehtmetts, M, Moritz, L och Bergdahl, U. (1997) *Heat storage in soft clay. Field tests with heating (70 °C) and freezing of the soil*. Report 53, Statens geotekniska institut, Linköping.
- Gräslund, J, Hultmark, G, Olsson, S. (1986). *Sunclay-projektet. Utvärdering av Sunclay-systemet Andra generationens systemlösning*. R84:1986. BygghöRSkningsrådet, Stockholm.
- International Ground Source Heat Pump Association, Oklahoma State University (1991). *Grouting Procedures for Ground-Source Heat Pump Systems*. Ground Source Heat Pump Publications, Oklahoma State University, USA.
- International Ground Source Heat Pump Association (IGSHPA), Oklahoma State University (1997). *Closed-Loop/Geothermal Heat Pump Systems. Design and Installation Standards 1997*. IGSHPA, Oklahoma State University, USA.
- Koene, F G H. (2000). *Energy piles as cost effective ground heat exchangers*. Proceedings 8th International Conference on Thermal Energy Storage, Terrastock 2000, Stuttgart, Germany, August 28 – September 1, 2000. pp 227-232. Stuttgart University. Institute of Thermodynamics and Thermal Engineering.
- Lehtmetts, M. (1993) *Markvärmelager i lös jord. Förbättrad installationsteknik för markvärmväxlare*. R4:1993. BygghöRSkningsrådet, Stockholm.
- Magnusson, C. m.fl. (1992). *Värmelager i lera. Utvärdering Söderköping*. R22:1990. BygghöRSkningsrådet, Stockholm.
- McCray, K B. (2000). *Guidelines for the Construction of Vertical Boreholes for Closed Loop Heat Pump Systems*. Proceedings 8th International Conference on Thermal Energy Storage, Terrastock 2000, Stuttgart, Germany, August 28 – September 1, 2000. pp 459-465. Stuttgart University. Institute of Thermodynamics and Thermal Engineering.
- Nordell, B, Fjällström, K & Öderyd, L. (1998). *Water Driven Down-The-Hole Well Drilling Equipment For Hard Rock*. Stockton Conf. 1998.
- Oklahoma State University (OSU), Division of Engineering Technology (1997). *Geothermal Heat Pumps –Introductory Guide*. National Rural Electric Cooperative Association, Electric Power Research Institute, Oklahoma State University and Int. Ground Source Heat Pump Association (distribution). Oklahoma State University, USA.
- Olsson, S. (1986). *Solvärmelagring med höga temperaturer i lera för flerfamiljshus i Kullavik –Utvärdering*. R105:1986. BygghöRSkningsrådet, Stockholm.
- Rhén, I. och Wilén, P. (1984). *Vertikala rörsystem för värmelagring i sand och silt. Förstudie*. Rapport nr 14. Jordvärmegruppen, Chalmers tekniska höRSkola.
- Rozenberg, H. (2000). Geotec-nytt. Borrsvängen 4/2000.
- Sandvik Rock Tools (1989). *Handbok i bergbörRning*. Sandvik Rock Tools.

Schunnesson, H. (1985). *Borrning av värmelager. Teknik för produktionsborrning av långa grova hål för borrhålsvärmelagring i berg. Förstudie.* Teknisk Rapport 1985:24T. Avd. för Bergmaskinteknik, Luleå tekniska högskola.

Snijders et al, (1998). *Vertikale bodemwarmtewisselaars voor warmtepompen. Deel 1: Energetische aspecten.* Overdruk uit: Verwarming & Ventilatie November 1997, nr 11. IF Technology.

Tuomas, G. (2000). *Down-Hole Water Driven Hammer Drilling for BTES Applications.* Proceedings 8th International Conference on Thermal Energy Storage, Terrastock 2000, Stuttgart, Germany, August 28 – September 1, 2000. pp 503-508. Stuttgart University. Institute of Thermodynamics and Thermal Engineering.

Wijsman och den Ouden, (1983). *Groningen - A group of 96 solar houses with seasonal heat storage in the soil.* National report IEA

Wilén, P. (1981). *Grundvatten som värmekälla för husuppvärmning med värmepump. Litteraturstudie, system och ekonomi.* Rapport nr 1. Jordvärmegruppen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg

Wilén, P., Johansson, A. och Rhén, I. (1988). *Teknikutveckling för värmelagring med vertikala rör i jord och berg.* R33:1988. Byggforskningsrådet, Stockholm.

Wilén, P. och Rhén, I. (1986). *Metoder och kostnader för anläggande av värmelager i mark med vertikala rör. Förstudie.* Rapport 21. Jordvärmegruppen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

Åkesson, M. (1998). *Mudd och återfyllnadsmaterial vid borrning - vad, när och hur.* Borrsvängen nr 2/98. Geotec.

Kap 8

Ahlkrona D, Mogensen P. (1987). *Sju ytjordvärmeanläggningar. Del I. Fältmätning och datorsimulering.* Byggforskningsrådet Rapport R81:1987, Svensk Byggtjänst, Stockholm.

Balstrup T. (1977). *Värmepumpanlägg. Varmeovergangsforhold i jord.* Geoteknisk Institut - DGI, Lyngby, Danmark.

Berg P, Svendsen SA, Ussing V. (1990). *Duct System Test Storage - Design, Construction, Operation, Laboratory Measurements and Simulations.* Zeitschrift für angewandte Geowissenschaften, Heft 9, 1990, pp. 57-70.

Claesson J, Dunand A. (1983). *Heat extraction from the ground by horizontal pipes. A mathematical analysis.* Document D1:1983, Byggforskningsrådet.

Claesson J, Efring B, Eskilson P, Hellström G. (1985). *Markvärme - En handbok om termiska analyser,* Byggforskningsrådet, T-skrift T16-18:1985, Svensk Byggtjänst, 171 88 Solna

Eskilson P. (1987). *Thermal Analyses of Heat Extraction Boreholes.* Doktorsavhandling, Matematisk fysik, Lunds Tekniska Högskola, Box 118, 221 00 Lund.

Fleming W S, Huse W. (1991). *Ground-Source Heat Pump Demonstration for Commercial Building Applications.* IEA Heat Pump Centre Newsletter, Vol. 9, No. 1, March 1991.

Hellström G. (1991). *Ground Heat Storage, Thermal Analyses of Duct Storage Systems, Part I: Theory.* Doktorsavhandling, Matematisk fysik, Lunds Tekniska Högskola, Box 118, 221 00 Lund.

- Hughes, P. (1985). *Residential earth-coupled heat pump demonstration*. Final report prepared for Niagara Mohawk Power Corporation, New York State Energy Research and Development Authority, and Rochester Gas and Electric Company by W.S. Fleming and Associates Inc, Syracuse, New York.
- Hughes, P, Hackner R J. (1988). *Field Performance Validation of an Advanced Design Earth-Coupled Heat Pump System*. Report ORNL/Sub/85-22035/1 prepared by W.S. Fleming and Associates, Inc., Syracuse, New York, USA.
- Jansson, P E, Lundin, L C. (1984). *Fysikaliska effekter av ytjordvärmeuttag. Simulerade uttag för olika marker och klimat*. BFR-rapport R50:1984, Svensk Byggtjänst, Stockholm.
- Johnson, W S, McGraw, B A, Baugh, R N, Griffith, W A. (1985). *Horizontal-coil ground coupled heat pump-measured system performance*. Proc. of Second Workshop on Solar-Assisted Heat Pumps with Ground-Coupled Storage, Vienna, Austria, 8-10 May, 1985.
- Kavanaugh, S P, Allan, M L (1999). *Testing of thermally enhanced cement ground heat exchanger grouts*. ASHRAE Transactions: Symposia 1999, CH-99-2-2.
- Leong, W H, Tarnawski, V R, Aittomäke, A. (1998). *Effect of soil type and moisture content on ground heat pump performance*. Int. J. Refrig., Vol. 21, No. 8, pp.595-606, 1998.
- Magnusson, C m.fl. (1992). *Värmelager i lera. Utvärdering Söderköping*. BFR-rapport R21:1992, Svensk Byggtjänst, Stockholm.
- Mei, V, Sanner, B, Hopkirk, R, Svec, O J. (1993). *Advanced In-Ground Heat Exchange Technology for Heat Pump Systems*, International Energy Agency, Advanced Heat Pumps, Annex VIII.
- Mei, V C. (1986). *Horizontal Ground-Coil Heat Exchanger Theoretical and Experimental Analysis*. Oak Ridge National Laboratory, ORNL/CON-193, Oak Ridge, Tennessee, USA.
- Müller, R, Reuss, M, Schmalschläger, T, Schulz, H. (1986). *Vergleichende Untersuchungen an Erdsonden*. Zeitschrift für angewandte Geowissenschaften, Heft 7, 1986, Giessen, Germany.
- Müller, R. (1985). *Experimentelle und theoretische Untersuchungen an vertikalen Wärmetauschersonden für Speicherung von Wärme im Erdboden*. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Lehrstuhl Physik, Weihenstephan, TU München.
- Porsvig, M. (1986). *Varmeovergangsforhold omkring jordslanger*. Energiministeriets varmpumpeforskningsprogram EFP-80, Projekt 4.1.2, Rapport nr 33, Teknologisk Instituts Forlag.
- Remund, C P, Lund, J T. (1993). *Thermal Enhancement of Bentonite Grouts for Vertical GSHP Systems*, AES-Vol., 29, Heat pump and Refrigeration Systems, Design, Analysis, and Applications, ASME.
- Reuss, M, Schulz, H, and Wagner, B. (1990). *Solar-Assisted Heat Pump with Duct Storage in Donauwörth*, Proc. of the Workshop on Seasonal Energy Storage in Duct Systems, Landtechnik Weihenstephan, Universität Munchen, Germany.
- Sanner, B, Beck, F, Boissavy, C, Toureille, A, Iaplaige, P, Eugster W. (1999). *European and North American Ground-Source Heat Pump Technology State-of-the-Art*. GSHP Thermie B - Project DIS/1348/7-FR, Task 1.
- Sundberg J. (1986). *Värmeöverförande egenskaper i svenska jordarter. Värmekonduktivitet, specifik värmekapacitet och latent värme*. Rapport R104:106, Byggforskningsrådet.

Svec OJ, Palmer JHL. (1983). *A heat exchanger for in-ground heat storage*. Proc. of Int. Conf. On Subsurface Heat Storage in theory and practice, Stockholm, June 6-8, 1983, Report D16:1983, Swedish Council for Building Research.

Svec OJ. (1985). *Potential for improvement between ground and heat pump energy exchange*. Proc. of the Second Workshop on Solar-Assisted Heat Pumps with Ground-Coupled Storage, Vienna, Austria, May 1985.

Svec OJ. (1988). *Spiral heat exchangers. Demonstration of a new ground source heat pump technology*. Proc. of JIGASTOCK '88, 4th International Conference on Energy Storage for Building Heating and Cooling, October 18-21, 1988, Versailles, France.

Tarnawski VR, Leong WH, Wagner B, Reuss M, and Schulz H. (1990). *Heat and Moisture Migration in High Temperature Ground Heat Storage*, Proc. of the Workshop on Seasonal Energy Storage in Duct Systems, Landtechnik Weihenstephan, Universität München, Germany.

Wagner B. (1991). *Bodenphysikalische, ingenieur- und hydrogeologische Untersuchungen zur Speicherung und zum Entzug von Niedertemperaturwärme in der wasserungssättigten Bodenzone mit vertikalen Wärmetauschern*. Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorgrades der Fakultät für Geowissenschaften der Ludwig-Maximilians Universität München.

Wilén P. (1983). *Ytjordvärmesystem i lera för 88 enbostadshus i Surte. Markpåverkan*. JVG-rapport 12:1983, Jordvärmegruppen, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.

Ångström A. (1974). *Sveriges klimat*. 3:e upplagan, Generalstabens Litografiska Anstalts förlag, Stockholm.

[Kap 9](#)

Ahlkrona D & Johansson I. (1983). *Experience of Shallow Pipe Grids in Soil as Heat Source for Heat Pumps*. Proc. of Int. Conf. On Subsurface Heat Storage in theory and practice, Stockholm, June 6-8, 1983, Report D16:1983, Swedish Council for Building Research.

Ahlkrona D & Mogensen P. (1987). *Sju ytjordvärmeanläggningar. Del I. Fältmätning och datorsimulering*. Byggeforskningsrådet Rapport R81:1987, Svensk Byggtjänst, Stockholm.

Auer F, Ball DA, Fischer RD & Hodgett DL. (1983). *Design Methods for ground-source heat pumps*. Proc. of Int. Conf. On Subsurface Heat Storage in theory and practice, Stockholm, June 6-8, 1983, Report D16:1983, Swedish Council for Building Research.

Balstrup T. (1977). *Varmepumpanlæg. Varmeovergangsforhold i jord*. Geoteknisk Institut - DGI, Lyngby, Danmark.

Berntsson T. (1980). *Dimensionering av jordvärmesystem. Teknik och ekonomi*, Byggeforskningsrådet Rapport R53:1980, Svensk Byggtjänst, Stockholm.

Bose J. (1988). *Closed-Loop/Ground-Source Heat Pump Systems: Installation Guide*. International Ground Source Heat Pump Association, P.O.Box 1688, Stillwater, Oklahoma, USA.

Bose JE, Parker JD & McQuiston FC. (1985). *Design/data Manual for Closed-Loop Ground-Coupled Heat Pump Systems*. ASHRAE.

Breger DS, Sunderland JE, El Hasnaoui H & Hubbell JA. (1994). *Final Engineering and Design Analysis of the Central Solar Heating Plant with Seasonal Storage at the University of Massachusetts/Amherst*. Final report, PNL-10051, UC-202, Dept. of Mechanical Engineering, University of Massachusetts at Amherst.

- Bruck M, Gerbert H. (1985). *Experiences with vertical "Trench ground-heat-exchangers". Thermal performance and economic analysis*. Proc. of Second Workshop on Solar Assisted Heat Pumps with Ground Coupled Storage, Vienna, Austria, 8-10 May, 1985, p. 81-95.
- Caneta Research Inc. (1995). *Commercial/Institutional Ground-Source Heat Pump Engineering Manual*. ASHRAE, Atlanta.
- von Cube HL, Ludwig E, Sattlegger J, Rohde J. (1980). *Erarbeitung eines Optimierungsverfahrens für die Auslegung von Erdbodenrohrschlangen als Wärmequelle für Wärmepumpe*. Forschungsbericht T 80-121, Technologische Forschung und Entwicklung, Bundesministerium für Forschung und Technologie.
- Faninger G. (1997). *Die Wärmepumpentechnik in Österreich: Marktsituation und Betriebserfahrungen, energetische und ökologische Bewertung*. 3. Symposium Erdgekoppelte Wärmepumpen - Systeme zum Heizen und Kühlen. 20-22 November 1997, Schloss Rauschholzhausen, IZW-Berichte 2/97, Germany.
- FEMP. (1995). *Ground-Source Heat Pumps Applied to Commercial Facilities*. Federal Energy Management Program, U.S. Department of Energy (DOE).
- Fleming WS & Huse W. (1991). *Ground-Source Heat Pump Demonstration for Commercial Building Applications*. IEA Heat Pump Centre Newsletter, Vol. 9, No. 1, March 1991.
- Fromentin A & Pahud D. (1997). *Recommendations pour la réalisation d'installations avec pieux échangeurs*. Rapport final, École Polytechnique Fédérale Lausanne, LASEN, 1015 Lausanne, Switzerland.
- Gerbert H. (1991). *Vergleich verschiedener horizontaler Erdkollektor-Systeme*. Symposium Erdgekoppelte Wärmepumpen, 7-9 Oktober, 1991, IZW-Berichte 3/91.
- Hellström G, Palmgren C & Rydell B. (1988). *Heat Storage in Clay. A Technical and Economical Evaluation of Vertical Earth Heat Exchangers*. Proc. of JIGASTOCK'88, Paris 18-21 October 1988, Paris, France.
- Hughes, P. (1985). *Residential earth-coupled heat pump demonstration*. Final report prepared for Niagara Mohawk Power Corporation, New York State Energy Research and Development Authority, and Rochester Gas and Electric Company by W.S. Fleming and Associates Inc, Syracuse, New York.
- Hughes, P. (1986). *Manual of Acceptable Practices for Installation of Residential Earth-Coupled Heat Pump Systems*. Niagara Mohawk Corporation.
- Hughes, P & Hackner RJ. (1988). *Field Performance Validation of an Advanced Design Earth-Coupled Heat Pump System*. Report ORNL/Sub/85-22035/1 prepared by W.S. Fleming and Associates, Inc., Syracuse, New York, USA..
- 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.
- Jansson PE & Lundin LC. (1984). *Fysikaliska effekter av yttjordvärmeuttag. Simulerade uttag för olika marker och klimat*. BFR-rapport R50:1984, Svensk Byggtjänst, Stockholm..
- Johnson WS, McGraw BA, Baugh RN & Griffith WA. (1985). *Horizontal-coil ground coupled heat pump-measured system performance*. Proc. of Second Workshop on Solar-Assisted Heat Pumps with Ground-Coupled Storage, Vienna, Austria, 8-10 May, 1985.

- Kavanaugh S. (1999). *Large diameter bore coils*. Outside the Loop, Vol 2, No 2, 1999, The University of Alabama, ME Dept., Box 870276, Tuscaloosa, Alabama, USA.
- Koene FGH, van Helden WGJ, Römer JC. (2000). *Energy piles as cost effective ground heat exchangers*. Proc. of 8th International Conf. On Thermal Energy Storage, Vol. 1, Inst. of Thermodynamics and Thermal Engineering, University of Stuttgart, Pfaffenwaldring 6, D-70550 Stuttgart, Germany.
- KYS – Kylbranschens Samarbetsstiftelse. (1999). *Energieffektiva kyl- och värmepumpsanläggningar, Faktablad 2: Värmepumpinstallationer*. (Utgåva april 1999). KYS, Rosenlundsgatan 40, Box 17537, 118 91 Stockholm.
- Magnusson C m.fl. (1992). *Värmelager i lera. Utvärdering Söderköping*. BFR-rapport R21:1992, Svensk Byggtjänst, Stockholm.
- Matthey B. (1990). *A handbook to design heat pumps systems using earth heat, edited by the federal office of energy (Switzerland)*. Third Workshop on Solar-Assisted Heat Pumps with Seasonal Storage, Porcodeedings, CIT, Energiteknisk analys, 1990:3, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.
- Mei V, Sanner B, Hopkirk R & Svec OJ. (1993). *Advanced In-Ground Heat Exchange Technology for Heat Pump Systems*, International Energy Agency, Advanced Heat Pumps, Annex VIII.
- Mei VC. (1986). *Horizontal Ground-Coil Heat Exchanger Theoretical and Experimental Analysis*. Oak Ridge National Laboratory, ORNL/CON-193, Oak Ridge, Tennessee, USA.
- Nagano K, Ochifuji K, Nakamura M & Hamada Y. (1997). *Study on the Ground Heat Extraction Utilizing Horizontal Earth Coils*. Proc. of Megastock.
- Rhen I, Sundberg J, Modin BO. (1986). *Dimensionering av yttjordvärmekollektor. Beräkning med simuleringsmodell*. JVG-rapport 13:1986, Göteborg.
- Rhen I, Wilén P. (1984). *Vertikala rörsystem för värmelagring i and och silt. Förstudie*. Rapport nr 14, Jordvärmegruppen, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.
- Sanner B. (1992). *Erdgekoppelte Wärmepumpen: Geschichte, Systeme, Auslegung, Installation*. IZW-Berichte 2/92, Karlsruhe.
- Sanner B, Beck F, Boissavy C, Tourelle A, Iaplaige P, Eugster W. (1999). *European and North American Ground-Source Heat Pump Technology State-of-the-Art*. GSHP Thermie B - Project DIS/1348/7-FR, Task 1.
- SIA. (1988). *Base de dimensionnement des systèmes exploitant la chaleur du sol à basse température*. Documentation D025, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Office fédéral de l'énergie, Zürich, Schweiz.
- SIA. (1996). *Grundlage für Nutzung der untiefen Erdwärme für Heizsysteme*. Dokument D0136, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Bundesamt für Energiewirtschaft, Zürich, Schweiz.
- Sundberg, J, Ledskog, L. (1989). *Markvärmeteknik för uppvärmning samt kombinerad värme och kyla. Små marktytor*. BFR-rapport R33:1989. Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm.

Svec O, di Rezze G, Mancini R. (1994). *Erdgekoppelte Wärmepumpe mit horizontalem Spiral-Wärmetauscher zur Versorgung eines Elementarschulgebäudes*. 2. Symposium Erdgekoppelte Wärmepumpen, 17-19 Oktober 1994, Schloss Rauischholzhausen, IZW-Berichte 1/94, Germany.

SVEP. (1985). *Lathund för energidimensionering av ett-hålssystem*. Beräkningssystem framtagna i samarbete mellan Svenska Värmepumpföreningen (SVEP), Sveriges Avanti-borrare förening och Statens Vattenfallsverk.

SVEP. (1998). *Fakta om ytjordvärme*. Svenska Värmepumpföreningen (SVEP), Stockholm.

Wilén P. (1983). *Ytjordvärmesystem i lera för 88 enbostadshus i Surte. Markpåverkan*. JVG-rapport 12:1983, Jordvärmegruppen, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.

Wilén P. (1984). *Jordvärmelager i lera för småhus i Alingsås. Mätning och utvärdering*. Rapport nr 15, Jordvärmegruppen, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.

Zaugg J. (1991). *Erdgekoppelte Wärmepumpen in Deutschland*. Symposium Erdgekoppelte Wärmepumpen, 7-9 Oktober 1991, Schloss Rauischholzhausen, IZW-Berichte 3/91, Germany.

Kap 10

Ahlkrona D., Mogensen P. (1987). *Sju ytjordvärmeanläggningar. Del 1 Fältmätning och datorsimulering*. R81:1987. Byggeforskningsrådet, Stockholm.

Andersson T. (1996). *Värmepumpar – dimensionering och egenskaper*. Borrsvängen nr 4/96. Geotec.

Healy P.F., Ugursal V.I. (1997). *Performance and economic feasibility of ground source heat pumps in cold climate*. Int. Journal of Energy Research, Vol. 21. pp 857-870 (1997). John Wiley & Sons Ltd. USA.

Lindborg, A. (1999). *Villavärmepumpar med energi från ytjord/energibrunn*. Rapport 4994. Naturvårdsverket Förlag, Stockholm.

Melinder, Å. (1992). *Enkätundersökning av villavärmepumpar i Danderyds kommun*. Rapport till BFR, ISRN KTH/REF/R-92/5-SE, Stockholm.

Kap 11

Cane, D., Clemes, B. & Morrison, A. (1996). *Operating Experience with Commercial Ground-Source Heat Pumps – Part 1*. ASHRAE Transactions: Symposia. AT-96-15-1.

Cane, D., Clemes, B. & Ireland, C. (1998). *Operating Experience with Commercial Ground-Source Heat Pumps – Part 2*. ASHRAE Transactions: Symposia. TO-98-7-1 (RP-863).

Cane, D., Morrison, A. & Ireland, C. (1998). *Maintenance and Service Costs of Commercial Building Ground-Source Heat Pump Systems*. ASHRAE Transactions: Symposia. TO-98-7-4.

Energimyndigheten (2001). *Villavärmepumpar*. Energimyndigheten, Eskilstuna.

Energimyndigheten (2000). *Villavärmepumpar*. Energimyndigheten, Eskilstuna.

Healy, P. F. & Ugursal, V. I. (1997). *Performance and economic feasibility of ground source heat pumps in cold climate*. Int. Journal of Energy Research, Vol. 21. pp 857-870 (1997).

Köhler, N (2001). *Rekordförsäljning av brännare för träpellets*. NY Teknik, 010214.

- Lehtmets, M, Magnusson, C. (1991). *Markvärmväxlare för högttemperaturlager i lera*. R37:1991. Byggeforskningsrådet, Stockholm.
- Lehtmets, M. (1993). *Markvärmelager i lös jord. Förbättrad installationsteknik*. R4:1993. Byggeforskningsrådet, Stockholm.
- Lienau, P. J. (1997). *Geothermal Heat Pump Performance and Utility Programs in the United States*. Energy Sources, 19:1-8, 1997. Copyright 1997 Taylor & Francis 0090-8312/97.
- Lööf, J. (2001). *Intryck från en enig värmepumpbransch: Marknaden mot rekordnivåer*. VVS Forum Nr 1, januari 2001, pp 69-72.
- Martin, M. A., Durfee, J. & Hughes, P. J. (1999). *Comparing Maintenance Costs of Geothermal Heat Pump Systems with Other HVAC Systems in Lincoln Public Schools: Repair, Service and Corrective Actions*. ASHRAE Transactions: Symposia. SE-99-20-04.
- Rafferty, K. (1997). *An Information Survival Kit for the Prospective Residential Geothermal Heat Pump Owner*. GHC Bulletin, April 1997, pp 1-11. Geo-Heat Center, Oregon Institute of Technology, USA.
- Rybach, L, Sanner, B (2000). *Ground-Source Heat Pump Systems –The European Experience*. GHC Bulletin, March 2000, pp 16-26. Geo Heat Center, Oregon Institute of Technology, USA.
- Snijders A. L., Wennekes R. G. A. & van Gelder A. J. (1998). *Vertikale bodemwarmtewisselaars voor warmtepompen. Deel 2: Uitvoeringswijze en kosten*. Overdruk uit: Verwarming & Ventilatie februari 1998. IF Technology.
- Svenska bioenergiföreningen (1998). Faktablad *Möt Bioenergin!*, Svebio 4/98. Finns på www.svebio.se. Svenska bioenergiföreningen.

Kap 12

- den Braven K. (1998). *Survey of Geothermal Heat Pump Regulations in the United States*. The Second Stockton International Geothermal Conference. March 1998. <http://www.geojournal.stockton.edu/table.html>.
- Bruck, M. & Gerbert, H. (1985). *Experiences with vertical "Trench ground-heat-exchangers": Thermal performance and economic analysis*. Austrian Solar and Space Agency (ASSA) och Ingenierbüro für Energietechnik FRG.
- Byggeforskningsrådet. (1983). *Ytjordvärme – markkollektorer*. BFR-seminarium mars 1982. R37:1983. Sammanställt av P. Mogensen. Statens råd för byggeforskning, Stockholm.
- Cane R.L.D. (1991). *Research in support of the Canadian ground-source heat pump installation standard*. Caneta Research Inc., Mississauga, Ontario. HPC workshop on ground source heat pumps, Montreal, August 1991. Proceedings.
- Geotec. (2000). Borrsvängen nr 4/2000. En branschtidning från svenska brunnsborrares branschorganisation.
- Granryd E., Melinder Å. (1991). *A comparison of thermodynamic properties of secondary refrigerants for heat pumps*. HPC workshop on ground source heat pumps, Montreal, August 1991. Proceedings.
- Lindborg A. (1999). *Villavärmepumpar med energi från ytjord/energibrunn*. Naturvårdsverket, rapport 4994, ISBN 91-620-4994-1.

Naturvårdsverket (1998). *Miljöanpassad effektiv uppvärmning och elanvändning*. En bok i Milenserien. Naturvårdsverket, Rapport 4526, Stockholm.

Nilsson, P-E (2001). *Köldmedier*. Rapport Effektiv 2001:02, ISBN 91-7848-845-1. Forskningsprogram Effektiv, c/o Sveriges Provnings- och forskningsinstitut, Borås. Finns även på <http://www.aktiv.org>.

SGU (1997). *Normbrunn 97*. Utarbetat av Göran Risberg. Finns även på <http://www.geotec.se>, <http://www.svepinfo.se> och <http://www.avantisystem.se>.

Top P., de Lint N. (1991). *Investigation of antifreeze agents for ground source heat pumps*. RTOECH International, Mississauga, Ontario, Canada. HPC workshop on ground source heat pumps, Montreal, August 1991. Proceedings.

VET-aktuellt (2000). *Värmepump är alltid miljövänligare än olja för uppvärmning*. Nr 2.

Wahlström, Å, Olsson-Jonsson, A, Ekberg, L. (2001). *Miljöpåverkan från byggnaders uppvärmningssystem*. Rapport Effektiv 2000:01, ISBN 91-7848-824-9. Forskningsprogram Effektiv, c/o Sveriges Provnings- och forskningsinstitut, Borås. Finns även på <http://www.aktiv.org>.

13.2 Websidor

Kap 2

<http://www.nibe.se> (2000). Nibe industrier AB.

<http://www.svep.se> (2000). Svenska Värmepumpföreningen.

Kap 3

<http://www.dep.state.pa.us> (2000). GSHP Manual.

<http://www.idearc.se/respons.htm> (2001). Idé Arktica Innovationscentrum, Övertorneå. Ideell förening med koppling till Luleå tekniska universitet.

<http://www.ne.se> (2001). Nationalencyklopedin.

<http://www.nrc.ca/irc/cbd/cbd026e.html> (2001-02-06). National Research Council of Canada, Institute for Research in Construction.

<http://connywww.tg.lth.se> (2001-02-06). Conny Svenssons ingenjörsgelogiska exkursion, Lunds tekniska högskola.

Kap 4

<http://www.dep.state.pa.us> (2000-11-01). GSHPM, Pennsylvania: Commonwealth of Pennsylvania, Department of Environmental Protection, Ground Source Heat Pump Manual.

<http://www.geoexchange.org/dsgntool/anti%2Dfreeze.htm> (2000-12-19). Geo Thermal Heat Pump Consortium. Assessment of anti-freeze solutions for ground source heat pump systems. Heinonen, E. W., Tapscott, R. E., Wildin M. W. & Beall, A. N.

<http://www.geoterhmal-energy.ch> (2001-01-19). *Swiss geothermal programme*.

<http://www.kemi.se> (2000-12-21). Kemikalieinspektionen. Sökning i databasen Riskline.

Kap 5

<http://www.ditchwitch.com> (2001-02-09). Ditch Witch, maskintillverkare.

<http://www.styrud.se> (2001-02-09). Styrud Ingenjörfirma AB, Herrljunga.

<http://www.vretmaskin.se> (2001-02-09). Vretmaskin AB, Sundbyberg.

<http://w1.551.telia.com/~u55102445> (2001-02-09). Kjells traktorgrävningar HB, Gullspång.

Kap 6

<http://www.alliantgeo.com> (2000-12-13). Geo Thermal Information Office.

<http://www.igshpa.okstate.edu> (2000-12-13). International Ground Source Heat Pump Association.

Kap 7

<http://www.aquiferdrilling.com> (2000). Aquifer Drilling & Testing, Inc.

<http://www.byggforum.com/pk/> (2001-01-24). Pålkommisionen.

<http://www.geologicinc.com> (2000). Geo Logic, Inc.

<http://www.geothermie.de> (2001-01-19). Geothermal Networks.

<http://www.sandvik.com> (2000). Sandvik Rock Tools AB.

<http://www.wassara.com> (2000). G-drill AB.

Kap 8

Kap 9

Kap 10

<http://www.geotec.se/energib/vbfos.htm> (2000). Frågor och svar om energiborring och värmepumpar. Svenska brunnsborrares branschorganisation.

<http://www.pnl.gov> (2000). US DOE, Ground-Source Heat Pumps Applied to Commercial Facilities. Federal Technology Alerts.

Kap 11

<http://www.stem.se> (2000). Energimyndigheten.

<http://www.orebro.se/energiradgivning/vp.htm> (2001). Örebro kommun, energirådgivning.

<http://www.ari.org> (2001). Air-Conditioning and Refrigeration Institute, USA.

<http://www.energiinfo.nu/varmahuset.htm> (2000). STOSEB, Stor-Stockholms Energi AB, energirådgivning.

<http://www.kils-energi.se/energirad/pellets.htm> (2001). Kils Energi AB.

<http://www.lycenergi.se/produkter/pellets/ivilla/panna/> (2001). Lycksele Energi.

<http://www.pnl.gov> (2000). US DOE, Ground-Source Heat Pumps Applied to Commercial Facilities. Federal Technology Alerts.

<http://www.spi.se> (2001). Svenska petroleuminstitutet.

<http://www.tekniskaverken.se> (2001). Tekniska Verken i Linköping AB.

<http://www.varma-europa.se> (2001). Värma företagens webbplats. Produkter, prislista.

<http://www.vet.se> (2000). VET Aktuellt nr 1 1999. VET-Gruppen, organisation för värme-pumptillverkare och installatörer.

Kap 12

<http://www.avantisystem.se> (2000-12-22). Avanti, system för brunnsborring.

<http://www.dep.state.pa.us> (2000-11-01). Commonwealth of Pennsylvania, Department of Environmental Protection, Ground Source Heat Pump Manual.

<http://www.environ.se/dokument/teknik/koldmed/kmedie.htm> (2000-11-01). Naturvårdsverket, köldmedieförteckning.

<http://www.environ.se/dokument/lagar/foreskri/snfstext/192-16.htm> (2000-11-01). Naturvårdsverket, SNFS (1992:16).

<http://www.epa.org> (2001-01-08). United States Environmental Protection Agency.

<http://www.ethanol.org> (2001-01-08). American coalition for Ethanol.

<http://www.geoexchange.org/dsgntool/anti%2Dfreeze.htm> (2000-12-19). Geo Thermal Heat Pump Consortium. Assessment of anti-freeze solutions for ground source heat pump systems. Heinonen, E. W., Tapscott, R. E., Wildin M. W. & Beall, A. N.

<http://www.geotec.se/borrsv> (2000-11-01). Svenska brunnsborrares branschorganisation. Tidsskriften Borrsvängen nr 4/99, nr 3/99, nr 2/98, nr 1/98, nr 4/96.

<http://www.ivt.se> (2001-01-31). Värmepumptillverkare IVT.

<http://www.kemi.se> (2000-12-22). Kemikalieinspektionen.

<http://www.lahega.se> (2001-01-08). Lahega Kemi AB.

<http://www.snf.se> (2001-01-29). Svenska naturskyddsföreningen.

<http://www.solarec.se/energi.shtml> (2000-12-21). Solarec lågenergiteknik AB, energikollektorer.

<http://www.stem.se> (2001-07.02). Energimyndigheten. Energiberäkningsmodeller, Energikosken.

<http://www.svepinfo.se/nyheter/nyheter09.shtml> (2000-12-21). Svenska värmepumpföreningen, nyheter.

14. DEFINITIONER OCH FÖRKORTNINGAR

AB	Allmänna bestämmelser
AnläggningsAMA 98	Allmän material- och arbetsbeskrivning för anläggningsarbeten. 1999. AB Svensk Byggtjänst.
Avanti	System för brunnsborrning, branschorganisation.
Btu	<i>British Thermal Unit</i> . Den värmemängd som behövs för att höja temperaturen hos ett pund vatten (454 gram) en grad Fahrenheit vid en specificerad temperatur. 1 Btu = 1055,056 J = 0,00029 kWh.
Densitet	<i>Täthet</i> . Fysikalisk term som anger massa per volymenhet (kg/m ³).
Direktförångning	System där förångning av köldmediet sker vid värmekällan, t.ex. i marken.
Direktkyla	Se frikyla.
Energipåle	Platsgjuten betongpåle med rörledningar för värmeväxling monterade på armeringen. Energipålar används <u>både</u> för grundläggning och värmning/kylning av byggnaden.
Frikyla	System för värmeutbyte med mark, uteluft eller vatten utan värmepump/kylmaskin.
Förbindelseledning	Fram- och returledning mellan avnämare och markvärmelager
Förångare	Värmeväxlare i vilken köldmediet förångas under värmeupptagning från det medium som kyls. För en markvärmepump är detta medium värmebäraren i slangsystemet i jord eller berg.
Geotec	Svenska brunnsborrares branschorganisation.
GSHPM	Ground Source Heat Pump Manual (www.dep.state.pa.us).
Hydrolys	Kemisk reaktion vid vilken en bindning spjälkas genom reaktion med vatten.
IGSHPA	International Ground Source Heat Pump Association.
Inhibitor	<i>Hämmare</i> . Inom kemin ett ämne som minskar kemisk reaktionshastighet eller helt förhindrar att reaktionen äger rum. Exempel, korrosionsinhibitorer motverkar korrosion.
Islins	Skikt av ren is som bildas i den frusna tjälfarliga jorden. Tjocklek från några mm till flera cm. Utbredning i plan från några cm till flera dm (Handboken Bygg: Geoteknik, 1984).
Kapillaritet	Den egenskap som medför att vatten i ett kapillär rör eller i ett kornuppbyggt jordmaterial genom inverkan av ytspänning kan stiga eller hållas kvar ovanför en fri vattenyta eller grundvattenyta, dvs. ovanför den nivå där vattentrycket är lika med atmosfärstrycket.
Kapillär stighöjd	Mått på kapillariteten och motsvarar den höjd vattnet kan stiga räknat från en teoretisk fri grundvattenyta. Den kapillära stighöjden betecknas oftast med hc.
Kapillär stighastighet	Den tid det tar för vattnet att nå sin maximala stighöjd.
Kaustisk	<i>Etsande</i> , från grek. kaustiko's "brännande", "frätande".
Kondensor	Värmeväxlare i vilken köldmediet kondenserar under avgivande av värme till kylmediet. För villavärmepumpen är kylmediet radiatorvatten eller den luft i huset, som skall värmas.
Kollektor	Se markvärmväxlare.
Komfortkyla	Den kyla som krävs för god komfort i byggnader, med hänsyn till mänskliga behov.

Köldmedium	Arbetsmedium i en värmepump. Köldmediet upptar värme vid låg temperatur och lågt tryck och avger värme vid högre temperatur och högre tryck genom tillståndsförändring (vätska till gas och gas till vätska).
Monovalenta system	Markkopplade värmepumpar dimensionerade för 100 % effekt-täckning.
Livsmedelsgodkänd Markkyla	Innebär att en produkt är luktfri och, för människan, giftfri. Se frikyla.
Markvärmväxlare	Anläggs i mark eller yt- och grundvatten för utvinning eller lagring av värme. Kallas även kollektor. Består vanligen av en plastslang med viss hållfasthet installerad i marken. Ibland inkluderas även slangens närmaste omgivning, t.ex. återfyllnadsmaterialet.
NRCC	National Research Council Canada.
OSU	Oklahoma State University.
PE	Polyeten.
PB	Polyisobuten.
Processkyla	Kyla som utnyttjas i industriella processer.
Redoxpotential	Den elektrodpotential som kan uppmätas i en cell där den ena halvcellen består av en inert elektrod (vanligen av platina) i kontakt med något redoxpar och den där andra halvcellen är en normalvätskelektrod.
SGU	Sveriges geologiska undersökning.
Slinky	Markvärmväxlare (se ovan) bestående av spiralformad slang.
SVEP	Svenska värmepumpföreningen.
Textur	Inom geologi; den allmänna fysiska karaktären hos en bergart eller en lös avlagring. Inom marklära avses med textur en jordarts kornstorleksfördelning.
Tjäldjup	Definieras som läget för 0 °C-isotermen vid en given tidpunkt (Handboken Bygg: Geoteknik, 1984). Maximalt tjäldjup är 0 °C-isotermens största utbredning under en vinter.
Ton	Amerikansk term <i>Ton of Refrigeration</i> . Mått på levererad kyleffekt från en värmepumpänläggning eller något annat luftkonditioneringsystem motsvarande 12 000 Btu per timme (3,51 kW).
Toxicitet	Giftighet, uttrycks vanligen som LD50 dvs. den dos som dödar 50 % av försöksorganismerna. Anges i mg/kg kroppsvikt.
Turbiditet	Grumlighet hos en gas eller vätska orsakad av ljusets spridning på svävande partiklar.
VET-Gruppen	Organisation för värmepumptillverkare och installatörer.
Viskositet	<i>Seghet</i> , egenskap hos vätskor och gaser som beror av inre friktion. T.ex. sirap har högre viskositet än vatten. Anges i kg/m·s eller Pa·s.
Värmebärrarfluid	Se värmebärrarvätska.
Värmebärrarvätska	Den vätska som cirkulerar i markvärmväxlaren och överför lågvärdig värme från värmekällan till värmepumpens förångare.
Värmefaktor	Värmefaktor betecknar andel producerad värme (eller kyla) från värmepumpen i förhållande till tillförd energi för att driva värmepumpen. (På eng. COP, <i>Coefficient of Performance</i> .)
Värmekapacitet	Mått på hur mycket energi ett material kan ta upp och lagra, anges i kWh/m ³ °C.

Värmeledningsförmåga	Mått på hur väl värme transporteras i ett material. Värmeledningsförmågan anges i W/m,K och definieras som den mängd energi som på en sekund passerar genom 1 m ² av en 1 m tjock platta av ett visst ämne när temperaturskillnaden mellan sidoytorna är 1 °K.
Värmetransportkoefficient	I detta sammanhang den värmemängd som transporteras av en värmebärare per kvadratmeter kontaktarea och grad temperaturskillnad (Top & de Lint, 1991).
Årsmedelverkningsgrad	Andel av tillförd energi som blivit nyttig värme och varmvatten räknat över ett år.



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