



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



Rapport

R51:1986

Tjälproblem vid fjärrvärme- ledningarna i gator

**Teoretisk simulering vid
olika isoleringsformer**

Lars-Eric Janson

INSTITUTET FÖR BYGGDOKUMENTATION
Accnr
Plac <i>ser</i>

*K/0
A*

Byggeforskningsrådet

R51:1986

TJÄLPROBLEM VID FJÄRRÄRMELEDNINGAR I GATOR

Teoretisk simulering vid
olika isoleringsformer

Lars-Eric Janson

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 840270-1
från Statens råd för byggnadsforskning till VBB AB,
Stockholm.

SAMMANFATTNING

Värmeavgivningen från fjärrvärmeledningar medför ett minskat tjäldjup över ledningen, vilket lokalt kan reducera eventuell tjällyftning. Höjdskillnader på mer än 20 cm kan därvid uppstå över korta sträckor, vilket bl a kan innebära problem för fordonstrafiken där fjärrvärmeledningen korsar gator och vägar.

Föreliggande rapport avser Del II av ett utvecklingsarbete omfattande tre programmerade delar. Del I utgör en förstudie rubricerad "Probleminventering och teoretisk analys" och återfinns som BFRs Rapport R111:1984. I Del II som fått underrubriken "Teoretisk simulering" prövas den utvecklade datamodellen för simulering av temperaturbilden runt värmekulverten omgiven av olika isoleringsformer. Avsikten har varit att söka fram de tekniska lösningar som teoretiskt kan påvisas mest intressanta för att problemet med ojämn tjällyftning runt värmekulvertar skall undanröjas. I en senare Del III planeras en praktisk verifikation av riktigheten av dessa problemlösningar genom fullskaleförsök i fryslaboratorium.

Arbetet har resulterat i att två tekniska metoder påvisats ha bättre teoretiska förutsättningar för en problemlösning än övriga prövade. Den ena innebär att man utan omgivande isoleringar i jorden men genom sparsam isolering av fjärrvärmerören vid passage av gatan sprider värme på större avstånd från kulverten, (Fig. 15B). Den andra metoden går ut på att man i stället isolerar värmerören extremt starkt, alternativt ventilerar bort värmeläckaget, samtidigt som tjälens nedträngning under värmerören förhindras genom en kortare markskiva av polystyren rakt ovanför kulverten, (Fig. 6 och 7).

I Bygghörsningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

R51:1986

ISBN 91-540-4567-3

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Liber Tryck AB Stockholm 1986

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	Sid
SAMMANFATTNING.....	2
1. BAKGRUND.....	4
2. TEORERETISK ANSATS.....	6
3. BASDATA.....	8
4. TESTKÖRNINGAR.....	12
5. SLUTLEDNING.....	21
LITTERATURHÄNVISNING.....	23

Appendix 1: BERÄKNING AV TVÅDIMENSIONELL
TEMPERATURFÖRDELNING I MARK
Manual för användare

K8011
BFR-Tjälproblem FV

TJÄLPROBLEM VID FJÄRRVÄRMELEDNINGAR I GATOR. II

Teoretisk simulering

Av Lars-Eric Janson

1. BAKGRUND

På initiativ och bekostnad av Umeå Energiverk påbörjade författaren 1981 ett studium av den process som i form av ojämn tjällyftning kring värmekulvertar kan skapa problem för gatutrafiken. Problemet härrör i korthet från det förhållandet att den normala tjällyftningen av gatumark reduceras där värmekulverten med sin värmeavgivning till omgivande mark förhindrar tjälnedträngning och därmed tjällyftning. Problemet känns igen genom att biltrafikanten vid passage av en korsande värmekulvert förnimmer en mer eller mindre påtaglig svacka i vägbanan. För gångtrafikanter kan problemet ta sig form av halka på lokal isbark på markytan rakt ovanför kulverten, härstammande från temporär omväxlande upptining (dagtid) och frysning (nattetid) av en ofullständigt snöröjd gångbana.

Problemet omfattning sammanhänger med att fjärrvärmekulverten som regel läggs tämligen nära markytan, och att därmed återfyllningen ovanför kulverten sällan eller aldrig utgörs av annat än icke tjälskjutande väggkroppsmaterial. En mycket kraftig värmeisolering av fjärrvärmerören skulle visserligen kunna medföra att tjälen trängde ned under rören och gav upphov till en viss tjällyftning i rörgraven som skulle kunna minska tjällyftningsdifferensen till omgivande gatumark. Emellertid skulle detta omedelbart innebära stor risk för att fjärrvärmekulverten skulle brytas sönder av de uppkomna markrörelserna.

I stället har man i många fall sökt lösa problemet med den ojämna tjällyftningen genom att medelst utbredda isoleringsskivor av expanderad polystyren över och vid sidan av rörgraven utjämna tjällyftningsdifferensen på en längre sträcka i gatans riktning. Förfarandet kräver för att lyckas en successiv utspetsning av isoleringen som samtidigt måste dras ut mycket långt vid sidan av rörgraven. (En typlösning som ti-

digare använts i Umeå i starkt trafikerade gator visas på Fig. 1.) Kostnaden för denna problemlösning blir mycket hög, inte bara i anläggningsskedet utan kvarstår ständigt som en återkommande reparationskostnad i driftsskedet i samband med angränsande reguljära gatemarksarbeten. Det har mot denna bakgrund varit en angelägen uppgift att söka en teknisk lösning på problemet som till en lägre totalkostnad kan bedömas tillfredsställande.

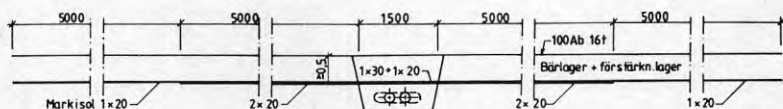


Fig. 1 Utspetsande isolering av gata som korsas av fjärrvärmekulvert

Med stöd av anslag från BFR har sålunda en problem-inventering gjorts liksom en teoretisk ansats till en allmän problemlösning. Arbetet redovisas i BFR's Rapport R111:1984, /1/. Slutsatsen i denna rapport är att problemet observerats som tämligen omfattande i stora delar av Sverige, samt att den inledande teoretiska analysen givit goda förhoppningar om att ett fortsatt teoretiskt arbete skulle kunna ge anvisningar till en adekvat problemlösning. Mot denna bakgrund har BFR ställt ytterligare anslag till förfogande för en mer omfattande teoretisk analys. Resultatet av denna analys redovisas i det följande.

Samma referensgrupp som tidigare har välvilligt ställt sig till förfogande för detta arbete. Den sammansätts av byggnadschef Rune Widmark, Umeå Energiverk, ingenjör Martin Åberg, Stockholms Energiverk (Svenska värmeverksföreningens representant) samt docent Johan Claesson, LTH. Ansvarig för arbetets ADB-hantering inklusive framtagning av manual för programbeskrivning har varit civ.ing. Lennart Andersson, VBB. Diskussioner kring den teoretiska ansatsens relevans ställd i relation till tjällyftningsprocessens mekanism har förts med sakkunniga vid Statens väg- och trafikinstitut (VTI), Linköping: forskningsledare Sven Fredén, övering. Rune Gandahl och 1:e forskn.ing. Lars Stenberg.

2. TEORETISK ANSATS

Den teoretiska ansatsen baseras på följande förut-sättningar beträffande tjälnedträngning respektive tjällyftningsmekanism.

Tjälnedträngningen i marken begränsad av det största djup (tjäldjupet) till vilket 0° -isotermen sträcker sig bestäms primärt av ortens köldmängd och årsmedeltemperatur i markytan samt av jordartens fukthalt och värmeledningsförmåga. Såväl teoretiskt exakta som praktiskt approximativa analytiska beräkningsmetoder finns beskrivna i litteraturen; se exempelvis /2/ och /3/. Den störning av värmebalansen i marken som en i jorden inlagrad cirkulär värmekälla åstadkommer finns beskriven samt matematiskt och praktiskt behandlad bl a i /4/, /5/ o. /6/. Med under senare år utvecklade datorbaserade numeriska differensberäkningsmetoder kan även komplicerade störningar och diskontinuiteter i marken, uppkomna exempelvis genom införandet av högvärdiga isoleringsmaterial i jorden, tämligen enkelt behandlas. En sådan metod beskrivs kortfattat i /1/. Avsikten med föreliggande arbete är att en utvecklad tillämpning av denna metod skall prövas som underlag för eventuellt efterföljande verifierande fält- eller laboratoriestudier. Målsättningen är att medelst datorsimulering bestämma 0° -isotermens förlopp i jorden närmast kring värmekulverten och dess isoleringsformer.

Som beskrivits i /1/ förutsattes där, att tjällyftningen vid markytan står i viss relation till tjäldjupet, åtminstone i så måtto, att en mjuk kontinuerlig övergång från ett litet till ett angränsande stort tjäldjup borde ge en mjukare övergång i markytans tjällyftning än om tjäldjupsförändringen i sidled räknat från kulverten är starkt diskontinuerlig. Denna förutsättning bygger på kännedomen om tjällyftningsmekanismens villkor. Under senare år har omfattande studier av tjällyftningen av vägar bedrivits i Sverige av VTI, se bl a /7/-/12/. Härav kan man finna att den islinsbildning i jorden som ger sig till känna i form av markytans lyftning kan anses vara en enkel funktion av skillnaden mellan uppåt utströmmande och nedifrån inströmmande värmemängd vid tjälgränsen. Förutsättningen för tjällyftning är således att energin som lämnar tjälgränsen är större än den som tillförs underifrån. Detta betyder därmed att tjällyftningen inte nödvändigtvis är en funktion av tjäldjupet, utan mer beroende av den energimängd som vid tjälgränsen förmår omvandla vatten från vätskefas till fast fas. Denna process är i sin tur beroende i hög grad av jordartens kapillaritet och permeabilitet samt av avståndet till den fria grundvattenytan. Om jordarten inte haft tjällyftande egenskaper skulle det energitillstånd som

eljest skulle förorsakat islinsbildning och därmed tjällyftning, i stället resulterat i en kraftig tjäl-
nedträngning i marken. (Fenomenet känns igen i det
praktiska fallet i det att tjäldjupet alltid under
ett och samma klimatförhållande blir betydligt större
i torra grovkorniga, ej tjällyftande, jordar än i
finkorniga jordar som står i kapillär kontakt med
ett grundvattenmagasin).

Konsekvensen av ovanstående blir att om man genom
artificiella metoder ökar värmestillströmning under-
ifrån till tjälgränsen genom införandet av en värme-
källa i jorden, kommer mer eller mindre balans att
nås mellan avgiven och tillförd energi i tjälgränsen.
Samtidigt som tjäldjupet därmed blir ringa, kommer
dessutom energiutbytet vid tjälgränsen att vara otill-
räckligt för att någon mer omfattande tjällyftningspro-
cess skall kunna äga rum. Det synes således som tro-
ligt att en mjuk utjämning av 0° -isotermens utbredning
kring den värmeavgivande värmekulverten borde samti-
digt medföra en motsvarande utjämning av tjällyftning-
en av markytan. Med andra ord bör sådana isolerings-
former eller andra åtgärder eftersträvas, som ger
en så jämn och harmonisk utbredning av 0° -isotermen
(tjälgränsen) som möjligt. I det följande har strävan
varit att finna tekniska lösningar som satisfierar
dessa tankegångar.

3. BASDATA

Liksom i tidigare utredning /1/ har klimatdata hämtats från Umeå under en normal respektive en extrem vinter. Sålunda har följande temperaturer antagits gälla vid markytan.

	Medeltemp i jan.	Årsmedel- temp	Tjäldjup
Normal vinter	- 9°C	+3°C	1,8 m
Extrem vinter	-13°C	+1°C	2,6 m

Den naturliga jordarten kring värmekulverten har antagits vara en tjällyftande siltig morän med följande jordartskonstanter.

Värmeledningsförmåga, ofrusen jord	1,6 W/mK
Värmeledningsförmåga, frusen jord	2,3 W/mK
Vattenhalt, vikts-% av torrsubstansen	16 %
Torr densitet	1600 kg/m ³
Volymetrisk värmekapacitet, ofrusen jord	2,4 · 10 ⁶ J/m ³ K
Volymetrisk värmekapacitet, frusen jord	1,9 · 10 ⁶ J/m ³ K
Isbildningsvärme	86 · 10 ⁶ J/m ³

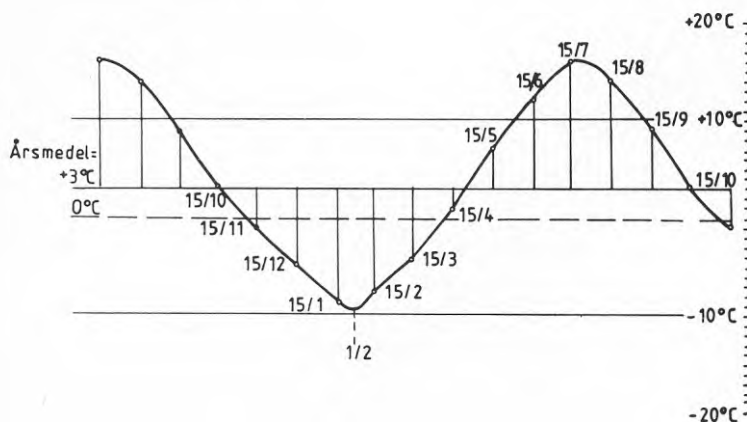


Fig. 2 Normal lufttemperaturfördelning (månadsmedelvärden) för Umeå. Årsmedeltemperatur +3°C

För använda isoleringsmaterial har följande konstanter använts för värmeledningsförmågan.

Rörisolering av expanderad polyuretan	0,027 W/mK
Markskivor av expanderad polystyren	0,035 W/mK

Normalt räknas med 5 cm tjocklek hos markskivorna, vilket ger ett värmemotstånd av 1,43 m²K/W.

Temperaturen i värmekulvertens framledning (hetvatten) har antagits vara 115°C och i returledningen 75°C. Beräkningarna har i huvudsak tillämpats på den nominella rördiametern 125, motsvarande en diameter hos det vattenbärande stålröret av 139,7 mm och en isoleringstjocklek av 38 mm. Det horisontella avståndet mellan fram och återledningen är därvid 475 mm och avståndet mellan markytan och rörcentrum är i samtliga fall 0,8 m.

Den normala lufttemperaturfördelningen över året för Umeå visas på Fig. 2 baserad på månadsmedelvärden under 30 år. Härav framgår att vinterns extremtemperatur inträffar omkring 1 februari och sommarens extrem omkring 1 augusti. Ortens årsmedeltemperaturer sammanfaller vidare med månadsmedeltemperaturen för månaderna oktober respektive april.

I Fig. 3 återges en teoretisk harmonisk temperaturfördelning som för den matematiska modellbehandlingen så nära som möjligt ansluter till den verkliga. Modellens temperaturfördelning anpassas bäst till den verkliga om modellens månad 3 betraktas som varande verklighetens 1 februari. Modellens månad 0 blir därmed ekvivalent med den 1 november, månad 6 med den 1 maj och månad 9 med den 1 augusti. I jämförelse med förutsättningarna i /1/ innebär denna temperaturfördelning en tidsförskjutning av den harmoniska funktionen med en halv månad framåt i tiden. Avkylning av markytan påbörjas därmed inom tidrymden 15 september till 1 oktober. I konsekvens härmed sker begynnande tillförsel av värme till markytan i stort sett mellan den 15 mars och den 1 april. Man kan räkna med att avsmältning av markens tjäle påbörjas så sakta under dagtid omkring 1 april, varvid samtidigt tjälen når sitt maximala djup. Efter denna tid sker en avsmältning av den tjälade jorden huvudsakligen genom värmeströmning från den uppvärmda markytan men också till en mindre grad genom värmeströmning underifrån till följd av kvarvarande värmeinhåll på större djup härstamande från tidigare sommarhalvår. På Fig. 3 visas dels denna verkliga tjälutbredning i jorden och dels den som den använda teoretiska modellen visar. Som synes sammanfaller verklighet och modell helt under tjälnedträngningsfasen fram till den 1 april då maximalt tjäldjup kan registreras. Under den följande

avsmältningsperioden visar emellertid modellen en fördröjd tjälning som inte motsvaras av verkligheten. Det är enkelt att anpassa modellen till denna verklighet men med hänsyn till att skillnaden inte har någon praktisk betydelse för bedömningen av den för tjällyft-

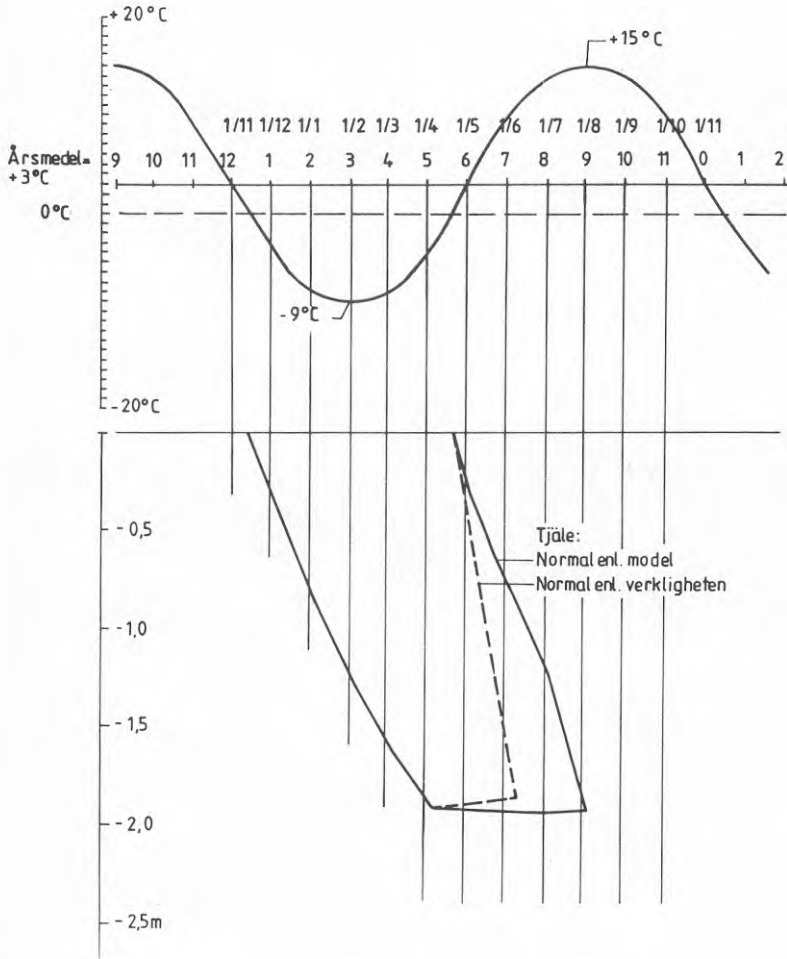


Fig. 3 Teoretiskt anpassad harmonisk temperaturfördelning för ett normalår i Umeå. Datamodellens månadsnummer anges liksom motsvarande tidpunkt i verkligheten. Den undre delen av figuren visar tjälens nedträngning i marken under vinter och avsmältning under våren.

ningen betydelsefulla tjälutbredningen, har det inte ansetts nödvändigt i detta skede att finjustera modellens upptiningsfas. Som framgår av det följande ger också, denna ofullständighet till trots, testkörningarna en tillfredsställande beskrivning relativt sett av olika isoleringsformers betydelse för 0°-isotermens utbredning under tjälbildningsförloppet. Avsmältningsförloppet, som likaså har stor betydelse för bedömningen av markens bärighet måste ändå bedömas på andra grunder än de som avsmältningshastigheten ger upphov till.

ett flertal fall genomräknats. Dessa illustreras schematiskt i Fig. 4-15 varav Fig. 11-14 visar prov på isotermer som framräknats och uppritats maskinellt på ovan beskrivna sätt.

Ändamålet med testkörningen enligt Fig. 4, som visar en fjärrvärmekulvert utan markskivor var att pröva datamodellens resultat jämfört med resultatet av tidigare utförda analytiska beräkningar /1/. Jämförelsen avser en normalvinter med en månadsmedeltemperatur av -9°C i markytan under januari. Man kan av Fig. 4 konstatera att modellens temperaturfördelning väl överensstämmer med den förenklade analytiska beräkningens. (Det bör anmärkas att den analytiska beräkningen gjorts för ett stationärt värmeledningsförlopp, medan datormodellen framräknar instationära förlopp.)

I Fig. 5 har en 4 m lång horisontell markskiva av polystyren inlagts över kulverten. Man kan här se hur 0° -isotermer från den 1 januari till den 1 april successivt kryper ned i jord. Det framgår också av figuren att 0° -isotermer visar ett kraftigt fall vid markskivans slut under senare delen av vintern. Man kan således i detta fall befara att en stor tjällyftningsskillnad kan uppträda just vid markskivans ändar.

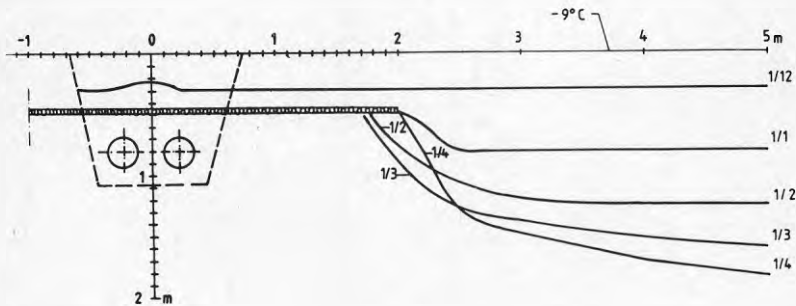


Fig. 5 0° -isotermer i jorden den 1 december till den 1 april under en normalt kall vinter i Umeå. Isolering med en 4 m lång markskiva av polystyren.

Fig. 6 och 7 visar 0° -isotermens nedträngning kring en 4 m lång markskiva, då ingen artificiell värmekälla finns i jorden. Fig. 6 illustrerar en normalvinter och Fig. 7 en extremt kall vinter med -13°C som månadsmedeltemperatur i januari och en årsmedeltemperatur av $+1^{\circ}\text{C}$. Modellen har i detta fall körts med en rörisolering med oändligt värmemotstånd. Bilderna simulerar således det tillstånd som man skulle kunna närma sig om värmekulvertens rör isolerades extremt kraftigt. Man kan se hur en viss diskontinuitet i 0° -isotermens utbredning uppkommer vid markskivans slut men bara under vinterns början. Senare när tjälgränsen brutit igenom markskivans isolering fås en successivt allt mer utjämnad 0° -isoterm. Det kan noteras att tjälgränsen vid köldperiodens inledning (1 december) som sig bör sjunker djupare ned där markskivan förhindrar uppåtriktad värme från jorden än vid sidan av isoleringen (Jfr halkriser under förvintern på markisolerade vägar).

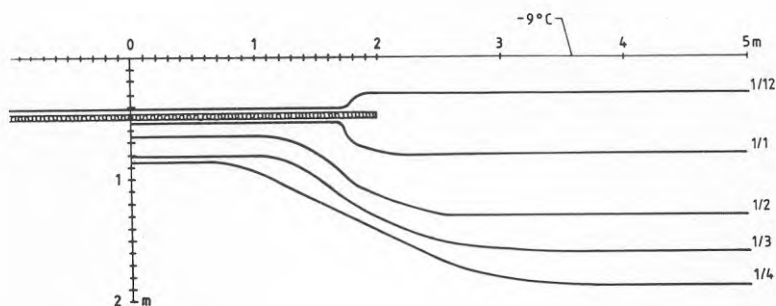


Fig. 6 0° -isotermer i jorden den 1 december till den 1 april under en normalt kall vinter i Umeå. Isolering med en 4 m lång markskiva men utan värmeläckage från fjärrvärmerör.

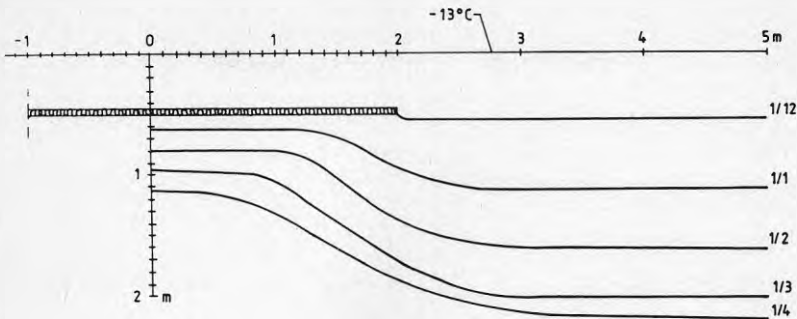


Fig. 7 Som Fig. 6 men avser en extremt kall vinter (Månadsmedeltemperatur för januari är -13°C vid markytan. Årsmedeltemperaturen är $+1^{\circ}\text{C}$.)

På Fig. 8 har markskivans längd över värmerören begränsats till 1,1 m, dvs i stort sett begränsats till rörgravsbredden. Man kan se ett tämligen brant fall av 0° -isotermer räknat från markskivans ände. Framför allt gäller detta en extremt kall vinter (-13°C i januari), som illustreras av den streckade linjen för den 1 april.

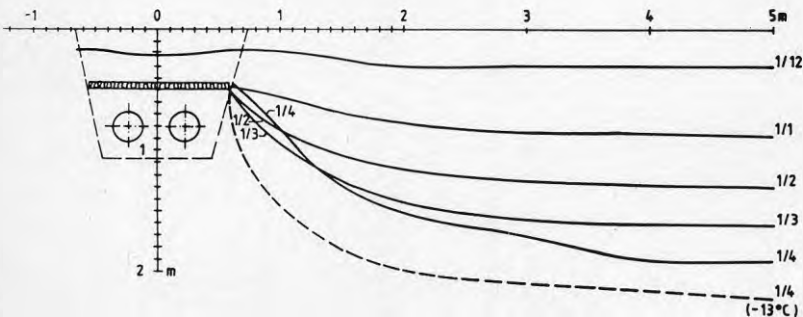


Fig. 8 0° -isotermer i jorden den 1 december till den 1 april under en normalt kall vinter samt den 1 april för en extremt kall vinter (markytans månadsmedeltemperatur i januari är -13°C). Isolering med en 1,1 m lång markskiva.

Ibland förekommer att man placerar markskivor i hästskoform för att därmed förhindra frysning av jorden under rören. På Fig. 9 ser man hur 0° -isotermerna under en normalvinter får ett tämligen flackt förlopp utanför hästskoformen, men att under en extremt kall vinter (den streckade linjen som gäller för den 1 april) tjäldjupsförändringen kan bli mer dramatisk.

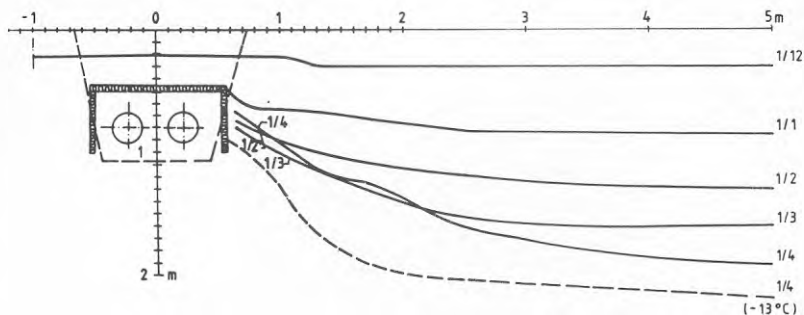


Fig. 9 0° -isotermerna i jorden den 1 december till den 1 april under en normalt kall vinter samt den 1 april för en extremt kall vinter. Hästskoformad isolering.

På Fig. 10 visas en isoleringsform som innebär att den 4 m långa markskivan enligt Fig. 5 öppnats på en sträcka av 1,1 m i rörgraven rakt ovanför värmerören. Fördelen med denna isoleringsform skulle vara

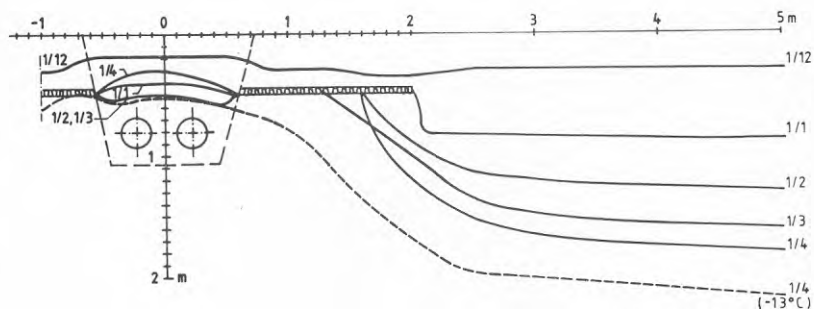


Fig. 10 0° -isotermerna i jorden den 1 december till den 1 april under en normalt kall vinter samt den 1 april för en extremt kall vinter. Markskivan har öppnats över rörgraven.

att den inte hindrar eller fördyrar uppschaktning av rörgraven för reparation under driftstadiet. Man ser dock att även i detta fall inträffar tämligen stora diskontinuiteter i 0° -isotermer vid markskivans yttre del. Speciellt påtagligt är detta under normalvintern den 1 april.

Baserat på idén med en isoleringsform där denna inte hindrar uppschaktning av rörgraven har två ytterligare fall prövats enligt Fig. 11-12 respektive Fig. 13-14. (Som tidigare nämnts har dessa figurer uppritats maskinellt.) I det första fallet finns enbart vertikala markskivor motsvarande hästskoformens vertikala sidor och i det andra fallet kompletteras isoleringen med horisontala markskivor utlagda utanför rörgravskanten till en längd av 1,5 m räknat för rörgravscentrum. Fig. 11 och 13 illustrerar förhållandena under en normalvinter och Fig. 12 och 14 förhållandena under en extremt kall vinter. Som framgår når man inte i några av dessa fall ett tillstånd med flack lutning för 0° -isotermerna. Möjligen finns en viss fördel som kan utläsas av Fig. 13, där man under en normalvinter åtminstone lyckas flytta tjälkroppen ett stycke bort från rörgravskanten. I princip får man emellertid ingen förbättring jämfört exempelvis med isoleringsformen enligt Fig. 5 eller 10.

Isotemer 0 grader C

Fall 7A Vertikala markskivor R|risol. 38mm T_{min} -9grader c

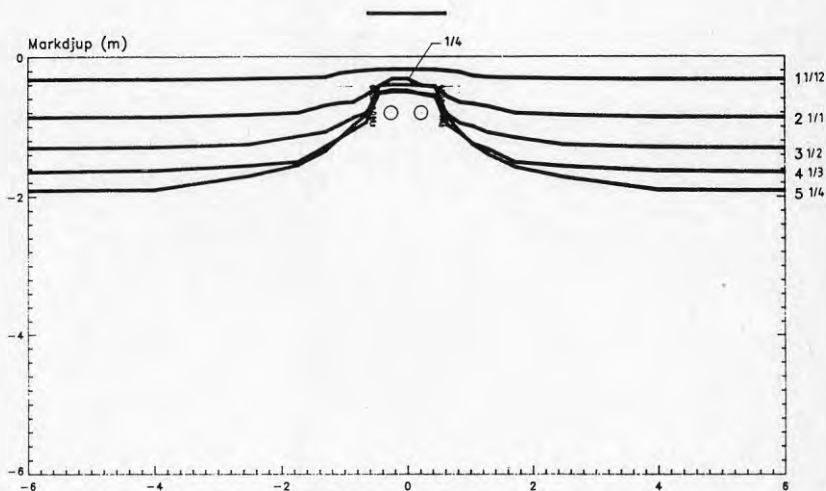


Fig. 11 0° -isotemer i jorden den 1 december till den 1 april under en normalt kall vinter. Enbart vertikala markskivor.

Isotermer 0 grader C
Fall7b Vertikala markskivor R|risol. 38mm Tmin -13grader c

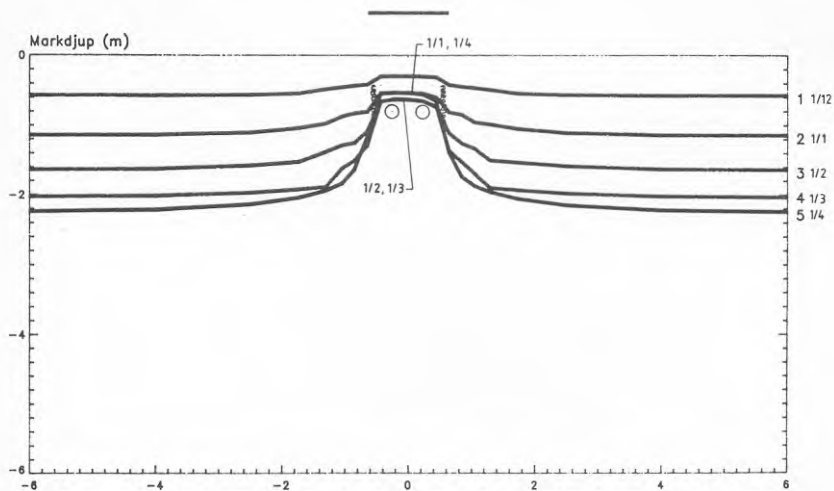


Fig. 12 Som Fig. 11 men avser en extremt kall vinter.

Isotermer 0 grader C
Fall8A L-formade markskivor R|risol. 38mm Tmin -9grader c

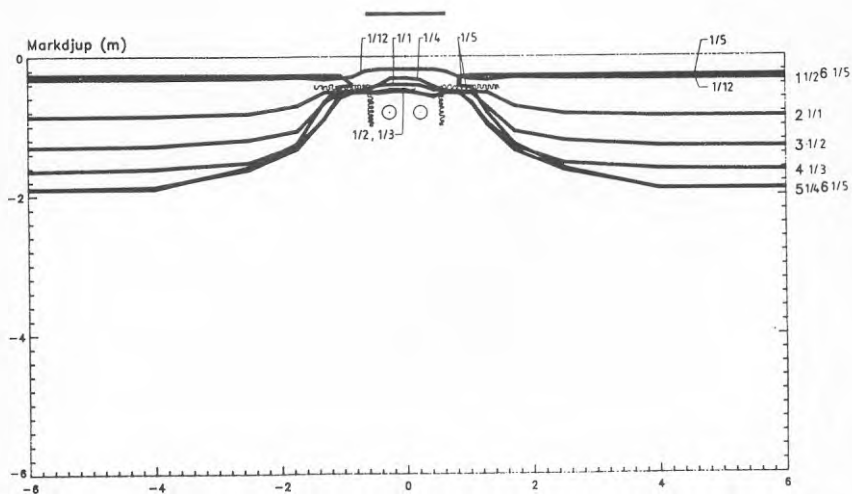


Fig. 13 0°-istotermer i jorden den 1 december till den 1 maj under en normalt kall vinter. Vertikala markskivor kombinerade med horisontala skivor utanför rörgraven.

Isotermer 0 grader C
FallBB L-formade markskivor Rorisol. 38mm Tmin -13grader C

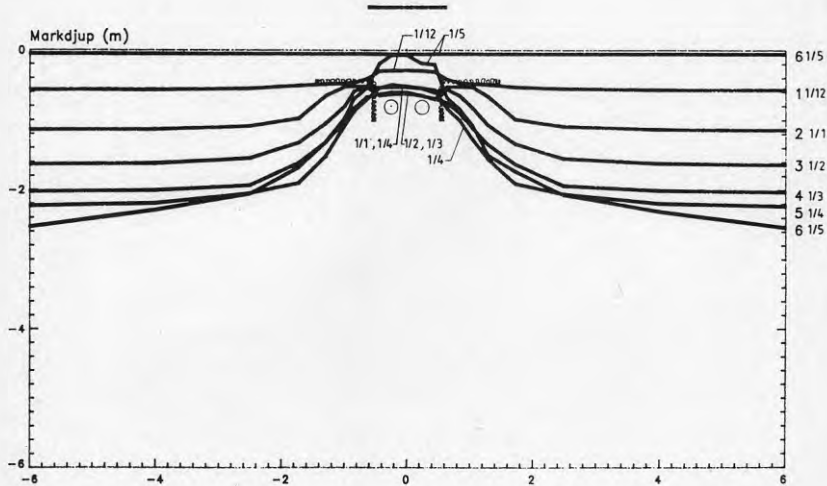


Fig. 14 Som Fig. 13 men avser en extremt kall vinter.

Man kan således mot bakgrunden av ovanstående slå fast att ingen av de studerade isoleringsformerna ger en så bra utjämnande effekt på 0°-isotermer, att man kan tro att den skapar förutsättningar för en fullgod teknisk problemlösning. Redan i tidigare arbete /1/ fastslogs att de isoleringsformer som då inledningsvis studerades inte i något fall gav bättre resultat beträffande 0°-isotermerens utplaning än vad ett ökat värmeläckage från värmekulverten skulle kunna åstadkomma. För verifiering av detta uttalande återges i Fig. 15 resultatet av fyra olika utformningar som alla har det gemensamt att rörisoleringen minskats från 38 mm till 10 mm (Jfr Fig. 8 i Bilaga 2 till /1/). I fall A minskas eventuella olägenheter av kraftig avsmältning av markytans snö- eller isskikt medelst en horisontell markskiva ovanför kulverten. I fall B saknas markskivor helt och i fall C skyddas eventuella underliggande vattenledningar mot uppvärmning genom en markskiva i rörgravsbotten. I fall D finns en markskiva både över och under värmerören.

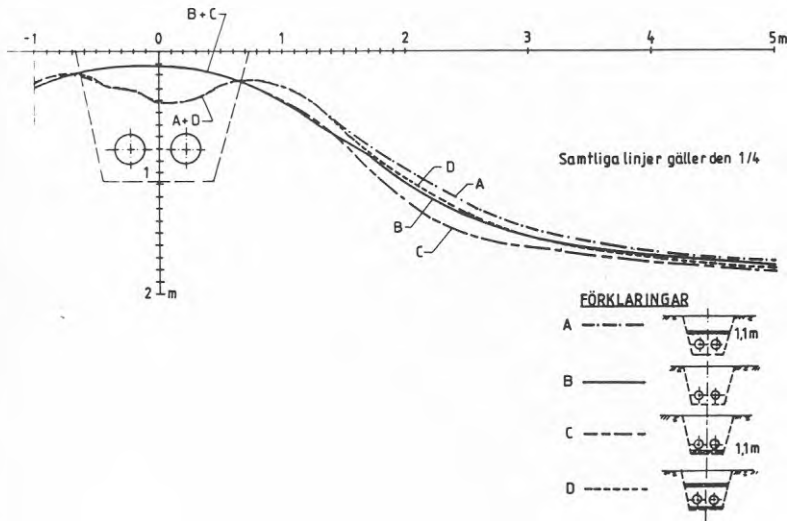


Fig. 15 0°-isotermer i jorden den 1 april under en normalt kall vinter. Olika utformning med och utan markskivor. I samtliga fall är rörisoleringen reducerad med större värmeläckage från fjärrvärmekulverten som följd.

Samtliga 0°-isotermer gäller för den 1 april under en normalvinter. En jämförelse med tidigare redovisade isoleringsformer visar, att ingen av dessa skapar en så flack 0°-isoterm som den som Fig. 15 uppvisar. Ett undantag härifrån utgörs av 0°-isotermernas utbredning i Fig. 6 och 7 efter tjälens genombrott av markskivan. I detta fall saknas dock värmeströmning ut ifrån värmerören, ett tillstånd som skulle kunna efterliknas om rören gavs en extremt kraftig isolering eller om utströmningen av värme från rören kunde ventileras bort genom en kring rörens placerad ventilationstrumma.

5. SLUTLEDNING

Det förutsättes i det följande att den i figurerna markerade rörgraven återfylls med icke tjällyftande jordmaterial samt att underkanten av väggkroppens överbyggnad sammanfaller med den nivå på vilken markskivor i förekommande fall inläggs. Detta innebär att även om ingen värmeströmning ägde rum från värmerören skulle man likväl få en nivåskillnad vid rörgravskanten eftersom rörgraven lyfter mindre eller inte alls i jämförelse med angränsande naturligt tjällyftande mark. Ambitionen bör således vara att flytta 0° -isotermin utanför skärningen mellan rörgravskanten och väggkroppens underbyggnad samt att tillse att vinkeln mellan 0° -isotermin och terrasseringsnivån blir så liten som möjligt. Tjälldjupet bör således tillåtas nå sitt naturliga djup först på stort avstånd från rörgraven.

Mot denna bakgrund och med stöd av de genomförda testkörningarna kan man dra följande slutsatser. Som alternativ till en mycket långt utdragen och avtrappande isolering med markskivor (jfr Fig. 1) är den hittills upptäckta bästa metoden den som innebär blott och bart en ökad värmspridning från värmerören. Detta kan som visas på Fig. 15 åstadkommas genom en minskad rörisolering. Iakttagelsen gäller främst mindre rördimensioner, från vilka det naturliga värmeläckaget är ringa. För större rör är i många fall det naturliga värmeläckaget tillräckligt stort för att en god utplanning av 0° -isotermin skall erhållas. Det gäller dock i så fall att inte vid vägpassagerna isolera rören så omfattande som annars kan vara motiverat av ekonomiska skäl för kulverten i övrigt.

Det kan likväl i vissa fall betraktas som olämpligt att inte fullt ut kunna isolera rören så mycket som en sund driftsekonomisk betraktelse ger anvisningar om. Den tekniska lösning som då förestår som mest lovande är den som kan skapas av kombinationen av en extremt kraftig rörisolering med en överliggande kort horisontell markskiva enligt Fig. 6 och 7. Markskivan har härvid huvudsakligen funktionen att hindra tjäljen att tränga ned under värmerören som annars löper risken att brytas sönder av underliggande tjällyftande jord. I vissa fall kan en mindre urschaktning under rören behöva utföras med återfyllning med ej tjällyftande material. I de fall ledningen av topografiska skäl ändå hamnar på större djup än normalt blir givetvis markskivan mindre nödvändig.

För verifikation av dessa tekniska lösningars lämplighet bör praktiska frysförsök utföras. Dessa görs bäst i ett stort fryslaboratorium där både olika klimatförhållanden och olika rördimensioner - isoleringsutbredning tämligen enkelt kan simuleras. En utveck-

ling av den matematiska värmebalansmodellen till en anpassning till och samkörning med VTI:s tjällyftningsmodell skulle samtidigt kunna inledningsvis medföra praktiska anvisningar om laboratorieförsökens mest ekonomiska utformning. Arbetet bör lämpligen drivas som ett samprojekt med deltagande av KTH (islaboratoriet vid institutionen för vattenbyggnad), LTH (modell Anpassning; institutionen för husbyggnadsteknik), VTI och VBB.

LITTERATURHÄNVISNING

- /1/ Janson, L-E, 1984. Tjälproblem vid fjärrvärmeledningar i gator. - Probleminventering och teoretisk analys. BFR Rapport R111:1984.
- /2/ Janson, L-E, 1964. Frost Penetration in Sandy Soil. - Trans. Royal Inst. Technology, Stockholm. Nr 231, 1964.
- /3/ Apostolopoulos, Chr., Hafner, F., Schneider, W. Näherungsverfahren zur Errechnung der Frosttiefe in Strassenkonstruktionen. Cold Region Science and Technology, 4, 1981, pp 195-213.
- /4/ Janson, L-E, 1968. Tjäldjupet i Sverige. Information från Statens naturvårdsverk, Stockholm. V4, 1968.
- /5/ Janson, L-E, 1974. Undersökning av frysrisker för vattenledningar ovanför tjälgränsen. - Frost i jord nr 14, Oslo 1974.
- /6/ Janson, L-E, 1979. Tryckavloppsledningars frostskydd. - BFR Rapport R43:1979
- /7/ Fredén, S, 1964. Studier över tjällyftningsmekanismen. Statens Vägintitut. Specialrapport 22, Stockholm, 1964.
- /8/ Gandahl, R, 1970. Provvägarna Edsvalla 1966 och 1967. Några erfarenheter från undersökningar under åren 1966-1969. Statens Vägintitut. Specialrapport 87, Stockholm, 1970.
- /9/ Fredén, S, 1981. Metod för beräkning av tjällyftning. Statens väg- och trafikintitut (VTI). Meddelande nr 274, Linköping, 1981.
- /10/ Fredén, S, 1982. Avtrappning av tjälisolering genom utglesning av isolerskivor. Försök vid Sandfors 1975 och 1981. Statens väg- och trafikintitut (VTI). Meddelande nr 311, Linköping, 1982.
- /11/ Stenberg, Lars, 1984. Tjälprovyta Gälven. Observationer vintern 1982-83. Statens väg och trafikintitut (VTI). Meddelande nr 395, Linköping, 1984
- /12/ Stenberg, Lars, 1984. Laboratorieutrustning för tjällyftningsstudier. Del 2. Frysförsök avseende repeterbarhet och reproducerbarhet. Statens väg- och trafikintitut (VTI). Meddelande nr 412, Linköping, 1984.

Appendix 1
Härtill 2 bilagor
som dock inte
redovisas i denna
publikation

K8011-200
BFR Tjälproblem FV

BERÄKNING AV TVÅDIMENSIONELL TEMPERATURFÖRDELNING
I MARK

Beskrivning av ett dataprogram tillämpat på
fjärrvärmekulvertar utvecklat vid institutionen
för husbyggnadsteknik, Tekniska Högskolan i Lund

Manual för användare

Stockholm 1984-11-05
VBB AB
VATTEN MARK MILJÖ

Lenart Andersson

INNEHÅLL

1	INLEDNING	2
1.1	Värmeledning.....	2
1.2	Studerad problemtyp	2
1.3	Beräkningar	3
2	DATAPROGRAMMET	4
2.1	Huvudprogram och subrutiner	4
2.2	Numerisk teknik	4
3	BERÄKNINGSMODELL	6
3.1	Cellindelning av marken - koordinatsystem	6
3.2	Approximation av fjärrvärmeröret	7
3.3	Frysmodell	8
3.4	Markytans temperatur	9
4	BESKRIVNING AV INDATA	10
4.1	Uppställning av indata	10
4.2	Subrutin för att göra cellindelning, COORD	12
4.3	Subrutin för att läsa indata för cellernas egenskaper, INPUT2	13
4.4	Subrutin för att läsa indata för markens termiska egenskaper, SOIL2	14
5	BERÄKNINGSEXEMPEL	15
5.1	Basdata	15
5.2	Resultatutskrift	16
6	LITTERATUR	18

BILAGOR

1	Huvudprogram och de subrutiner som huvudprogrammet är sammansatt av, källkod i fortran
2	Uppställning av indata

1.1 Värmeledning

Temperaturfördelningen i marken beräknas genom att studera värmetransporten från en punkt till en annan. I det följande förutsätts att transporten sker helt genom värmeledning. Den enklaste formen av värmeflöde kan beskrivas genom att studera en endimensionell, stationär värmeström i en kropp av homogent material.

$$Q = \Delta T \cdot \frac{A}{m}$$

där

Q	=	värmeflöde	W
m	=	d/λ = värmemotstånd	m ² K/W
d	=	materialets tjocklek	m
λ	=	värmekonduktivitet	W/m K
A	=	area genom vilken värmeflödet strömmar	m ²
ΔT	=	temperaturskillnaden mellan de två ytorna	K

Den generella formen för värmeledning beskrivs genom den allmänna värmeledningsekvationen. Denna ekvation beskriver temperaturen T hos en godtycklig punkt i ett utsträckt, isotropt medium. Ekvationen innehåller alla lösningar till alla förekommande fall.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right\}$$

där

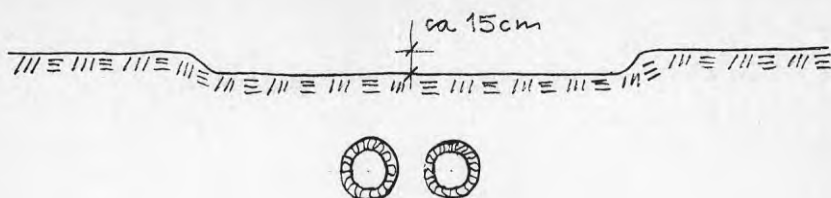
T	=	temperaturen
t	=	tiden
λ	=	värmekonduktiviteten
ρ	=	densitet
c	=	värmekapacitet per viktsenhet
ρc	=	värmekapacitet per volymenhet

Mer om värmeledning finns att läsa i referenserna /1/och /2/.

1.2 Studerad problemtyp

Fjärrvärmekulvertar läggs i mark med ett läggningsdjup på ca 1 meter. Temperaturen i ledningarna är i genomsnitt ungefär 100°C. Ledningarna avger värme till den omgivande marken.

I mark som består av tjälfarlig jord inträffar en tjällyftning under vinterhalvåret. Om en fjärrvärmekulvert är förlagd i sådan jord så kommer tjällyftningen att bli ojämn eftersom tjäldjupet blir mindre i anslutning till fjärrvärmekulverten. Man får en lokal svacka i vägen ovanför kulverten som i extremfallet kan vara ca 3 m bredd och ha djupet 15 cm, se figur 1.1. Detta fenomen kan skada gatubeläggningen och vara till obehag för trafikanterna.



Figur 11 Gupp i väg som orsakas av ojämn tjällyftning ovanför fjärrvärmekulvertar

Datorprogrammet används för att studera temperaturfördelningen i marken. Olika isoleringar kan studeras i syfte att få så jämna temperaturgradienter som möjligt. Detta innebär att guppet blir flackt och orsakar på så sätt mindre obehag. Dessutom ska isoleringsformen vara billig.

1.3 Beräkningar

Beräkningarna har gjorts med ett dataprogram som har tagits fram vid Lunds Tekniska Högskola. Där har man utvecklat ett allmänt dataprogram för tvådimensionell, tidsvariabel värmeledning. Detta program har anpassats för att kunna beräkna temperaturen i mark runt fjärrvärmekulvertar. Temperaturändringen antas vara konstant under ett tidssteg. Temperaturändringen approximeras genom att använda en explicit framåt differensmetod. Med denna metod är det tämligen enkelt att ändra olika parametrar och data. Man kan till exempel ge ett smältvärme som ändras år från år. Randtemperaturen vid markytan kan varieras godtyckligt. Snö och randmotstånd vid markytan kan inkluderas i beräkningarna.

2.1 Huvudprogram och subrutiner

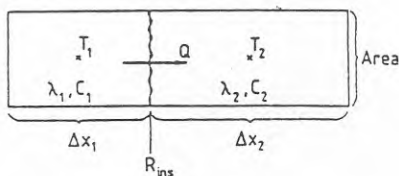
Huvudprogrammet och de subrutiner som detta är uppbyggt av redovisas i sin helhet i bilaga 1. Rutinernas namn och innehåll framgår sammanfattningsvis av följande sammanställning.

Rutinens namn	Innehåll
TEMP2FRK1	Huvudprogram
HT2FR	Lista på parametrar
IND2FR	Läsning och utskrift av indata
FLD2FR	Beräkning av erforderliga fält
DT2FR	Tidssteg
FLW2FR	Värmeflöden
BND2FR	Randvillkor
NWT2FR	Nya temperaturer i beräkningsnoderna
RES2FR	Utskrift av resultat

2.2 Numerisk teknik

Ekvationerna för att beräkna värmeflödena löser man genom att använda finita differenser. Tidsderivatorna approximeras genom att använda en explicit framåtdifferensmetod. Hur man löser differentialekvationer med differensmetoder finns beskrivet i referens /3/.

För att kunna beskriva marken måste man dela in den i ett rutnät där varje ruta kallas för en cell. I figur 2.1 visas två godtyckliga celler från rutnätet. Cellerna ansluter till varandra med en mellanliggande isolering. Temperaturerna i de två cellerna ändras från ett tidssteg till ett annat. Temperaturen i en cell representeras av värdet i cellens mitt.



Figur 2.1 Dimensioner, konstanter och variabler för två anslutande beräkningsceller

Vid en tidpunkt $t = t_0$ har cellerna temperaturerna T_1 och T_2 . Värmeflödet Q från cell 1 till cell 2 är då

$$Q = (T_1 - T_2) \frac{\text{Area}}{\frac{\Delta x_1}{2\lambda_1} + R_{\text{ins}} + \frac{\Delta x_2}{2\lambda_2}} \quad (\text{W})$$

där

- Q = värmefflöde
 λ_i = värmekonduktivitet i cell nr i
 x_i = längd på cell nr i
 R_{ins} = isolering mellan cellerna
 Area = area mellan cellerna
 T_1, T_2 = temperaturerna i två celler

Värmekonduktansen G mellan de två cellerna beräknas till

$$G = \frac{Q}{T_1 - T_2} = \frac{\text{Area}}{\frac{\Delta x_1}{2\lambda_1} + R_{\text{ins}} + \frac{\Delta x_2}{2\lambda_2}} \quad (\text{W/K})$$

Värmefflödet genom alla cellavgränsningar beräknas för tiden $t = t_0$. Värmefflödena antas vara konstanta under tidssteget Δt .

Därefter beräknas ändringen av den termiska energin i cellerna under tidssteget Δt . Sedan kan de nya temperaturerna vid tidpunkten $t_0 + \Delta t$ beräknas genom att använda cellernas värmekapacitet.

Som tidigare nämnts antas värmefflödet vara konstant under tidssteget. Detta innebär att metoden med explicita framåtdifferenser har en begränsning då det gäller längden på tidssteget Δt . Denna begränsning kan man teckna som

$$t \leq \Delta t_{\text{stab}} = \text{minimum av } \frac{C}{G_i} \text{ beräknat för alla celler} \quad (\text{s})$$

där

- t_{stab} = stabilt tidssteg, den minsta cellen bestämmer tidssteget
 C = total värmekapacitet för cellen (J/K)
 G_i = värmekonduktans mellan två intill varandra liggande celler (W/K) = (J/sK)

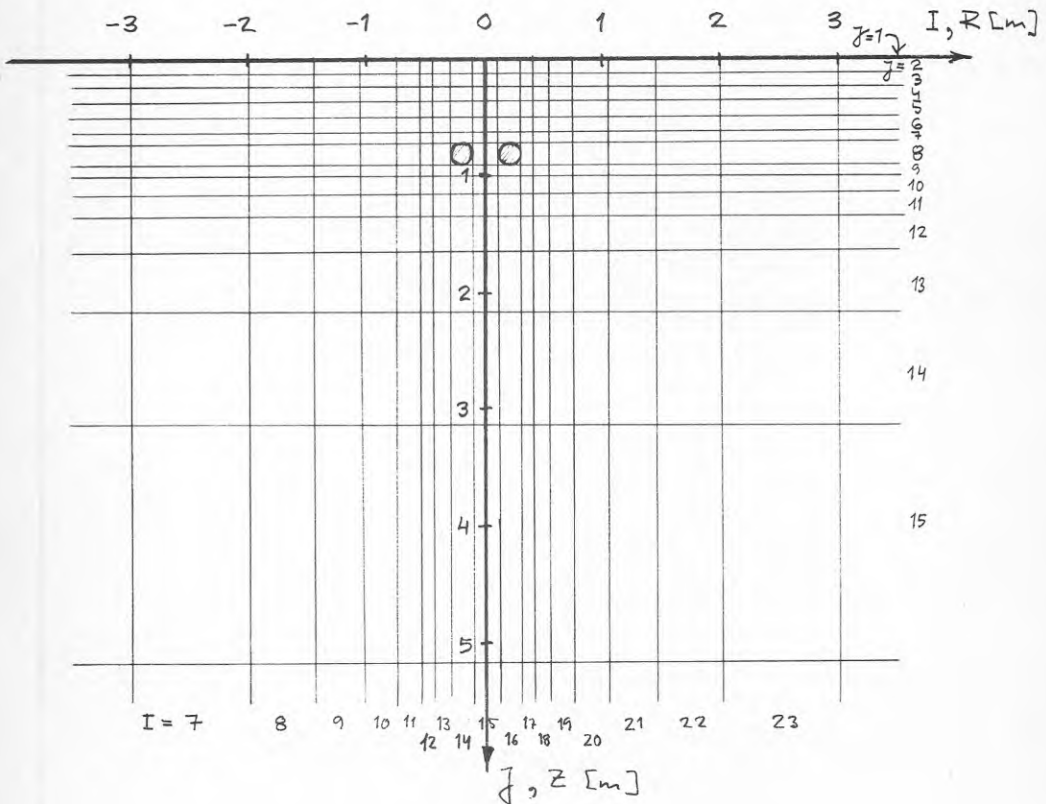
I ord uttryckt innebär det att man inte kan transportera bort mer energi från en cell än vad som finns lagrat i cellen under det aktuella tidssteget. Om man inte uppfyller villkoret enligt ovan får man därför en instabil och felaktig lösning.

Värdet på Δt_{stab} beror på cellens storlek. Ju mindre celler desto mindre tidssteg och vice versa. I dataprogrammet finns en rutin inbyggd som beräknar Δt_{stab} för den cellstruktur som man valt. Därefter väljs automatiskt tidssteget till $0,99 \Delta t_{\text{stab}}$ i programmet. Det finns också en möjlighet att ge tidssteget i indata. Detta värde används av programmet om det är mindre än det av programmet beräknade tidssteget $0,99 \Delta t_{\text{stab}}$.

Ett exempel ger en god uppfattning om hur långt tidssteget är. En minsta cell med måtten $0,20 \times 0,12$ m i ett gitter ger tidssteget 3 249 sekunder vilket är ca 54 minuter. En beräkning omfattar vanligen en period på ett år dvs 8 760 timmar.

3.1 Cellindelning av marken - koordinatsystem

Informationen som ges i detta kapitel är i huvudsak hämtad från referens /4/. Marklagret beskrivs i datorprogrammet genom att dela in det i ett gitter med hjälp av horisontella och vertikala linjer. Marken kommer på så sätt att beskrivas genom ett antal celler. Ett exempel på en del av ett gitter framgår av figur 3.1. I bilaga 2 redovisas ett exempel på ett fullständigt gitter.



Figur 3.1 Exempel på indelning av marken i ett gitter

Av figur 3.1 framgår att koordinataxlarna heter R och Z. I indata specificeras gittret genom att ange indelningen i horisontell och vertikal del. På så sätt får varje cell sin bestämda bredd och höjd. Man ska

sträva efter en tätare cellindelning i de partier där temperaturgradienten beräknas bli stor. I kanterna på beräkningsområdet kan cellerna vara stora eftersom gradienterna är nära noll. Som ett komplement till koordinatsystemet använder man också ett indexsystem (I,J). Med detta index är det sedan enkelt att ange olika egenskaper på de olika cellerna iform av värme-konduktivitet, isoleringar mellan cellerna m m. Index I=1 och J=1 markerar ränderna på beräkningsområdet. Index J=1 är sålunda markytan och J=2 är första cellen under markytan.

3.2 Approximation av fjärrvärmeröret

Det använda datorprogrammet förutsätter celler av rektangulär form. Därför approximeras det cirkulära tvärsnittet med en eller ett antal rektanglar, se figur 3.2. Det visar sig vara lämpligast att använda en kvadrat med samma area som cirkeln. Isoleringen anpassas så att värmeförlusten per meter rör blir oförändrad.



Figur 3.2 Approximation av cirkulärt tvärsnitt med ett kvadratiskt

För att arean skall bibehållas gäller:

$$\pi R^2 = d^2 \Rightarrow d = \sqrt{\pi} \cdot R$$

Värmeförlusten q (W/m) skall vara lika stor för de två fallen vid konstant temperatur T' utanför isoleringen. Då krävs det att:

$$T - T' = q \cdot \frac{\ln(R/(R - d_i))}{2\pi \lambda_i} \quad ; \text{ cirkel}$$

$$T - T' = q \cdot \frac{1}{4 \cdot d \cdot 1} \cdot \frac{d_{ik}}{\lambda_i} \quad ; \text{ kvadrat}$$

Ekvationerna bestämmer kvadratens isolertjocklek:

$$d_{ik} = 4 \cdot d \cdot \frac{\ln(R/(R-d_i))}{2\pi}$$

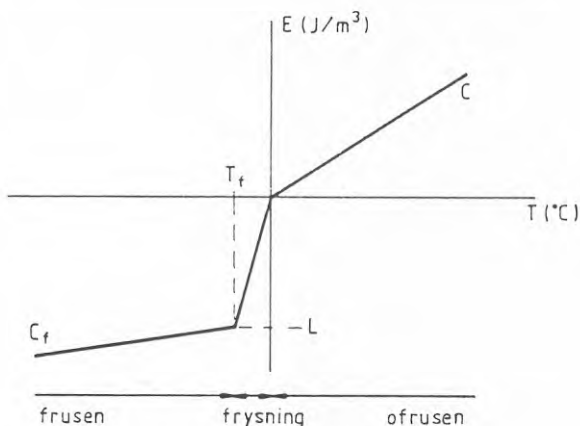
En noggrann test av den ovan beskrivna approximationen har gjorts i referens /5/.

3.3 Frysmodell

I datorprogrammet representeras marken av en mängd beräkningsceller. Varje cell ges en värmekapacitet och en värmeledningsförmåga. Dessa kan väljas godtyckligt. Då marken förutsätts vara homogen blir dessa en funktion enbart av temperaturen. Vidare karakteriseras cellerna av ett värmeinnehåll E (J/m^3), vilket också är en funktion av temperaturen. Definitionsmässigt är E noll då temperaturen i cellen är noll $^{\circ}\text{C}$.

Marken antages frysa i ett temperaturintervall $T_f < T < 0^{\circ}\text{C}$. I frysmodellen får man tre möjliga tillstånd: helt frusen, frysning och helt ofrusen. Den undre frysgränsen T_f kan väljas fritt. För att marken skall nå det helt ofrusna tillståndet från det helt ofrusna måste smältvärmes L (J/m^3) bortföras. Värmeinnehållet har sjunkit till $-L$ då temperaturen nått undre frysgränsen T_f .

Figur 3.3 visar värmeinnehållet E som funktion av temperaturen.



Figur 3.3 Värmeinnehåll per volymsenhet som funktion av temperaturen

Fasövergången sker inom ett temperaturintervall där värmekapaciteten är betydligt större än i övrigt. Värmekapaciteten blir L/T_f , vilket är lutningen på kurvan i frysningsintervallet. För det helt ofrusna och helt frusna tillståndet karakteriseras marken av konstant värmekapacitet C och C_f . Dessa värden anger lutningen på kurvan i de två tillstånden.

Efter varje tidssteg i beräkningsprogrammet ökar eller minskar värmeinnehållet i cellen på grund av värmeflödet till respektive från cellen. Värmeinnehållet ändras. Den nya temperaturen erhålles enligt figur 3.3.

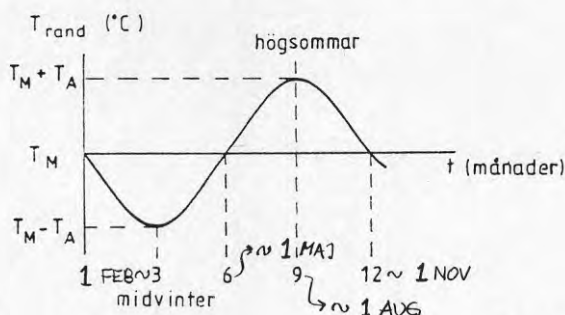
Då temperaturen är känd kan värmeledningsförmågan bestämmas. I det helt ofrusna och helt frusna tillståndet ges dessa av λ och λ_f . Under frysning ges värmeledningsförmågan av ett mellanliggande interpolerat värde.

3.4 Markytans temperatur

Markytans temperatur varierar sinusformigt med amplituden T_A kring ett årsmedelvärde T_M . Den betecknas T_{rand} (°C) och blir:

$$T_{rand} = T_M - T_A \cdot \sin(2\pi t/t_0); t_0 = 1 \text{ år} \quad (1)$$

Figur 3.4 visar hur temperaturen varierar med tiden t :



Figur 3.4 Markytans temperatur beskriven som en harmonisk sinussvängning. Månad 3 motsvarar ungefär den 1 februari

Vid tiden $t=0$ sjunker temperaturen under sitt årsmedelvärde. Vinterhalvåret börjar.

Några exempel på lufttemperaturer och tillhörande tjäldjup är:

	T_A °C	T_M °C	$T_M - T_A$ °C	Tjäldjup m
Normal vinter	12	3	- 9	1,8
Exceptionell vinter	14	1	-13	2,6

Smältvärmes L , värmeledningsförmågan i frusen mark λ_f och markyttemperaturen är de faktorer som huvudsakligen bestämmer tjäldjupet i ostörd mark långt bort från kulverten. I närheten av kulverten inverkar även värmeförlusten från denna på tjäldjupet.

4 BESKRIVNING AV INDATA

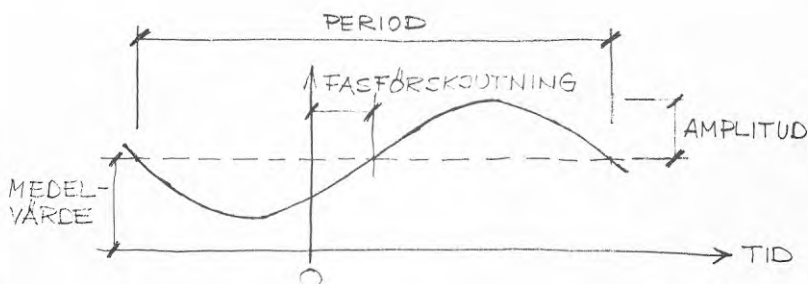
4.1 Uppställning av indata

I bilaga 2 redovisas ett exempel på hur man ställer upp indata till en beräkning. Denna bilaga ska man studera parallellt med följande beskrivning av de olika indataparametrarna.

Indata grupp	Variabel namn	Förklaring
1	LQST	=1 ger en utskrift med förklarande text till indata =0 ingen utskrift
2	LPRT	=1 ger en utskrift av indataelementet =0 ingen utskrift
3	LFPRT	=1 ger en utskrift av de inmatade fälten med variabelnamnen T, RLAM, CIN, RISOR, RISOZ =0 ingen utskrift
4	IMAX JMAX LCOORD	Maximala antalet celler i horisontell led maximala antalet celler i vertikal led =1 cartesiska koordinater dvs rätvinkligt koordinatsystem =2 cylinderkoordinater
5A	NA	Antalet delområden, rektanglar, som tillsammans definierar beräkningsområdet runt omkring de två fjärrvärmerören, se figuren sist i bilaga 2
5B		Hörnkoordinaterna I-min, J-min respektive I-max, J-max anges för det antal delområden som anges med variabeln NA
6	STRTTM STOPTM PRSTTM PRNTDT DTOKAY	Alla tider anges i sekunder Starttid Stoptid Tid för första utskrift Intervall på utskrifterna t ex varje månad Max tillåtet tidssteg
7	R(I)	Cellernas bredd i meter i R-led. Bredderna ges med hjälp av rutinen COORD
8	Z(J)	Cellernas bredd i meter i Z-led. Bredderna ges med hjälp av rutinen COORD

9A	RLAM(I,J) C (I,J)	Värmekonduktivitet i ofrusen jord, W/mK Värmekapacitet (volymetrisk) i ofrusen jord, J/m ³ K
	RLAMFR(I,J) CFR(I,J)	Värmekonduktivitet i frusen jord, W/mK Värmekapacitet (volymetrisk) i frusen jord, J/m ³ K
	DMELT	Isbildningsvärme, J/m ³ Värdena ges med hjälp av rutinen SOIL2
9B	TFREEZ	Undre frysgränsen i den använda frysmodellen, °C
10	RISOR(I,J)	Isoleringar mellan cellerna (I-1,J) och (I,J). Inläsning med hjälp av rutinen INPUT2, m ² °C/W
11	RISOZ(I,J)	Isoleringar mellan cellerna (I,J-1) och (I,J). Inläsning med hjälp av rutinen INPUT2, m ² °C/W
12	T(I,J)	Start- och randtemperaturer. Inläsning med hjälp av INPUT2. Cellerna i beräkningsområdets kanter ska ges en konstant randtemperatur oberoende av tiden, °C
13A	NTR	Antal randdelar med R-axeln som normalriktning (vertikalt) för vilka en randtemperatur ska ges
13B		Temperaturen för en randdel mellan kolumn I-1 och I. Temperaturen ges genom en sinusfunktion som bestäms av följande parametrar: I, J-min, J-max, medeltemperatur, amplitud, period, fas. Se figur 4.1 Upprepas NTR gånger
14A	NTZ	Antal randdelar med Z-axeln som normalriktning (horisontalt) för vilka randtemperaturen ska ges
14B		Temperaturen för en randdel mellan rad J-1 och J. Temperaturen ges genom en sinusfunktion som bestäms av följande parametrar: J, I-min, I-max, medeltemperatur, amplitud, period, fas. Se figur 4.1. Upprepas NTZ gånger
15A	NFLR	Antal randdelar med R-axeln som normalriktning (vertikalt) för vilka värmeflödet ska ges
15B		Värmeflödet för en randdel mellan kolumn I-1 och I. Värmeflödet ges genom en sinusfunktion som bestäms av följande parametrar: I, J-min, J-max, medelflöde, amplitud, period, fas. Se figur 4.1. Upprepas NFLR gånger.

- 16A NFLZ Antal randdelar med Z-axeln som normalriktning (horisontalt) för vilka värmeflödet ska ges
- 16B Värmeflödet för en randdel mellan rad J-1 och J. Värmeflödet ges genom en sinusfunktion som bestäms av följande parametrar: J, I-min, I-max, medelflödet, amplitud, period, fas. Se figur 4.1. Upprepas NFLZ gånger
- 17 IPRINT =1 ger utskrifter av både temperaturer och värmeflöden
=0 ger utskrifter av enbart temperaturer
=-1 ger ingen utskrift av varken temperaturer eller värmeflöden.
Speciell subrutin för önskad utskrift måste finnas i detta fall.

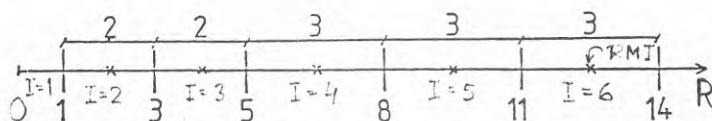


Figur 4.1 Definition av randvärden med hjälp av en harmonisk sinussvängning. Randvärdena kan vara temperaturer eller värmeflöden. Följande parametrar ges i indata: Medelvärde (W/m^2 eller $^{\circ}C$), amplitud (W/m^2 eller $^{\circ}C$), period (s) och fASFÖRSKJUTNING (s).

4.2 Subrutin för att göra cellindelning, COORD

Uppställningen av indata för att skapa cellstrukturen förklaras enklast genom ett exempel.

Exempel



Exemplet visar en endimensionell cellindelning som består av 2 celler med bredden 2 meter och 3 celler med bredden 3 meter. Strukturens vänstra rand har koordinaten 1 meter. Uppställningen av dataraderna som ska läsas av subrutinen blir i detta exempel:

<u>Indata</u>	<u>Förklaring</u>
a) 1.	första cellens rand har koordinaten 1 meter
b) 2	antal datapar som följer på rad c
c) 2,2.,3,3.	2 celler med bredden 2 meter och 3 celler med bredden 3 meter

Cellerna med index $I=1$ och $J=1$ används för att definiera randvillkoren. Detta innebär att första cellen där temperaturberäkningarna genomförs fås index $I=2$. Cellen I,J har sin vänstra rand på koordinaten $R(I)$ och den högra randen på koordinaten $R(I+1)$. Temperaturberäkningen genomförs i cellens mitt dvs enligt formeln

$$RM(I) = \frac{[R(I) + R(I+1)]}{2}$$

4.3 Subrutin för att läsa indata för cellernas egenskaper, INPUT2

För att läsa in data om cellernas egenskaper används rutinen INPUT2. Ett exempel förklarar enklast hur man ställer upp indata.

Exempel

		i				
		1	2	3	4	5
j	1	1.	1.	1.	1.	1.
	2	1.	1.	2.	2.	1.
	3	1.	1.	2.	2.	1.
	4	3.	1.	1.	1.	1.

<u>Indata</u>	<u>Förklaring</u>
a) 1.	Det generella värdet 1 ges till alla celler
b) 35	Kod som innebär att både block av celler och singelceller används för att ange celler som inte har det generella värdet 1
c) 1	1 block presenteras i d
d) 3,2,4,3,2.	index för blockets övre vänstra och nedre högra hörn anges där- efter följer blockets värde som är 2.
e) 1	1 singelcell presenteras i f
f) 1,4,3.	cellen har index 1,4 och värdet 3.

Principen är alltså att först ange ett generellt värde på alla celler på första raden. Därefter följer en parameter som beskriver om fler data är nödvändiga och i sådant fall hur dessa ska anges. De olika möjligheterna bestäms av parametern ITYP.

ITYP=1 Det generella värdet gäller för alla celler

ITYP=5 Ett värde ges till ett eller flera antal block av celler som avgränsas med hjälp av index (I-min, J-min), (I-max, J-max) dvs övre vänstra respektive nedre högra hörnet. Indata ges i ordning:
 b) ITYP=5
 c) antal block
 d) (I-min, J-min), (I-max, J-max), värde. En rad för varje block

ITYP=7 Ett värde ges till en singelcell. Detta kan man naturligtvis också göra med ITYP=5 men den här rutinen är något snabbare att arbeta med. Indata ges i ordning:
 b) ITYP=7
 c) antal singelceller
 d) I, J index för cellen, värde. En rad för varje cell.

ITYP=35 Båda sätten enligt rutinerna ITYP=5 och ITYP=7 används här. Indata ges i ordning:
 b) ITYP=35
 c) antal block
 d) (I-min, J-min), (I-max, J-max), värde. En rad för varje block
 e) antal singelceller
 f) (I, J) index för cellen, värde. En rad för varje cell.

4.4 Subrutin för att läsa indata för markens termiska egenskaper, SOIL2

Subrutinen används för att läsa indata som beskriver markens termiska egenskaper. Rutinen är uppbyggd på samma sätt som rutinen INPUT2. Enda skillnaden är att man anger fem värden istället för ett. Dessa värden är värmekonduktivitet och volymetrisk värmekapacitet i ofrusen respektive i frusen jord. Sist anger man isbildningsvärmets. För att använda rutinen SOIL2 hänvisas därför här till rutinen INPUT2. Inmatningen av konstanten "värde" byts bara ut mot strängen: "värmekonduktivitet och volymetrisk värmekapacitet i ofrusen jord, värmekonduktivitet och volymetrisk värmekapacitet i frusen jord, isbildningsvärme".

5.1 Basdata

Beräkningsmodellen kräver förutom den rent geometriska beskrivningen av marken även en del fysikaliska storheter för att beskriva markens egenskaper. Dessa basdata redovisas i följande uppställningar.

Jordartskonstanter

Benämning	Beteckn	Värde	Enhet
Värmekonduktivitet ofrusen jord	λ	1,6	W/mK
Värmekonduktivitet frusen jord	λ_f	2,3	W/mK
Vattenhalt i viktsprocent av torrs substans	w	16	%
Densitet för torr jord	ρ	1600	kg/m ³
Värmekapacitet volymetrisk i ofrusen jord (0,20+0,16)x1600x4190	C	$2,4 \times 10^6$	J/m ³ K
Värmekapacitet volymetrisk i frusen jord (0,20+0,08)x1600x4190	C _f	$1,9 \times 10^6$	J/m ³ K
Isbildningsvärme 0,16x1600x80x4190	L	86×10^6	J/m ³
Undre frysgrens	T _f	-0,25	°C

Isoleringskonstanter

Benämning	Beteckn	Värde	Enhet
Värmekonduktivitet för rörisolering		0,027	W/mK
Värmekonduktivitet för markskivor		0,035	W/mK
Värmemotstånd rör tjocklek 3,8 cm, 0,038/0,027		1,41	m ² K/W
tjocklek 5,4 cm, 0,054/0,027		2,0	m ² K/W
Värmemotstånd fyrkantig approximation av rör tjocklek 4,72 cm, 0,0472/0,027		1,75	m ² K/W
tjocklek 5,28 cm, 0,0528/0,027		1,96	m ² K/W
Värmemotstånd markskiva tjocklek 5 cm, 0,05/0,035		1,43	m ² K/W

Lufttemperatur och tjäldjup

Benämning	Min temp °C	Medeltemp °C	Amplitud °C	Tjäldjup m
Normal vinter	- 9	+ 3	12	1,8
Exceptionell vinter	-13	+ 1	14	2,6

Temperatur i fjärrvärmekulvertar

Framledning +115°C Returledning +75°C

Rördimensioner, rörisoleringar och läggningsdjup

Mått i /mm/

DN (beteckn)	40	125	300		
Mediarör utvändigt	48,3	139,7	323,9		
Normal isolering	29	38	54		
Extra tjock isole- ring (++)	42	65	107		
D _{utv} (verklig)	110	140	225	280	450 560
D _{utv} (beräkn=2R)	106	132	216	270	432 538
Avstånd c/c rör= =D _{utv} (verklig) +250	360	390	475	530	700 810

Läggningsdjup = 0,8 m markyta till rörcentrum.

5.2 Resultatutskrift

Ett exempel på datorprogrammets resultatutskrift visas i figur 5.1. Utskriften redovisar marktemperaturen i varje cells mittpunkt. Temperaturen i fjärrvärmekulvertarnas framledning respektive returledning har ringats in. Dessutom har en 4 meter bred horisontell markskiva markerats med ett streck. Den ligger med centrum på 0,47 meters djup under markytan. Man kan godtyckligt välja hur tätt man vill ha mellan utskriften av temperaturen. Normalt räcker det med att begära utskrift en gång per månad om man gör en simulering över ett år.

MANAD 4 ~ 1 MARS

TIME: 10512000.C00 S * 2920.000 HOURS

TEMPERATURES

Z-DIST	-62.00	R-DIST -47.00	-24.50	-13.00	-7.00	-4.00	-2.50	-1.73	-1.30	-1.05	-.85	-.65
.00 3.000	-7.393	-7.393	-7.393	-7.393	-7.393	-7.393	-7.393	-7.393	-7.393	-7.393	-7.393	-7.393
.06 3.000	-7.135	-7.135	-7.135	-7.135	-7.135	-7.124	-7.043	-7.242	-7.233	-7.210	-7.186	-7.160
.18 3.000	-6.607	-6.607	-6.607	-6.607	-6.606	-6.573	-6.526	-6.933	-6.903	-6.834	-6.762	-6.680
.29 3.000	-6.067	-6.067	-6.067	-6.067	-6.065	-6.012	-5.954	-6.633	-6.569	-6.451	-6.327	-6.184
.41 3.000	-5.516	-5.516	-5.516	-5.516	-5.513	-5.441	-4.309	-6.358	-6.238	-6.064	-5.885	-5.678
.53 3.000	-4.955	-4.955	-4.955	-4.955	-4.952	-4.864	3.992	3.775	3.194	3.209	7.137	9.490
.65 3.000	-4.386	-4.386	-4.386	-4.386	-4.383	-4.282	-3.237	6.962	3.605	5.658	7.630	10.09
.80 3.000	-3.628	-3.628	-3.628	-3.628	-3.625	-3.514	-2.315	1.202	4.066	6.102	8.062	10.56
.95 3.000	-2.903	-2.903	-2.902	-2.899	-2.899	-2.789	-1.541	1.675	4.374	6.291	8.100	10.30
1.67 3.000	-2.276	-2.276	-2.276	-2.272	-2.272	-2.168	-9.085	2.051	4.584	6.368	8.008	9.906
1.25 3.000	-1.393	-1.393	-1.393	-1.393	-1.390	-1.204	-2.501-001	2.515	4.773	6.334	7.710	9.184
1.50 3.000	-1.277	-1.277	-1.277	-1.251	-1.251	-1.079-001	2.601	3.010	4.883	6.120	7.149	8.155
1.90 3.000	2.811	2.811	2.815	3.000	3.000	3.133	1.692	3.479	4.817	5.636	6.272	6.849
2.65 3.000	1.042	1.042	1.043	1.087	1.499	2.627	2.759	2.759	4.436	4.812	5.085	5.316
4.15 3.000	2.138	2.138	2.140	2.194	2.579	3.177	3.559	3.559	3.750	3.849	3.917	3.973
7.15 3.000	2.885	2.885	2.885	2.899	2.899	2.977	3.064	3.104	3.128	3.138	3.145	3.151
11.15 3.000	2.997	2.997	2.997	2.997	2.997	3.000	3.000	3.004	3.004	3.004	3.004	3.005
24.45 3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
47.15 3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
62.15 3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000

R-DIST

Z-DIST	-62.00	-24.50	-13.00	-7.00	-4.00	-2.50	-1.73	-1.30	-1.05	-.85	-.65
.00-7.393	-7.393	-7.393	-7.393	-7.393	-7.393	-7.393	-7.393	-7.393	-7.393	-7.393	-7.393
.06-7.135	-7.115	-7.109	-7.126	-7.150	-7.177	-7.203	-7.224	-7.244	-7.248	-7.248	-7.124
.18-6.598	-6.542	-6.524	-6.527	-6.650	-6.734	-6.811	-6.877	-6.936	-6.953	-6.943	-6.575
.29-6.042	-5.961	-5.911	-6.004	-6.133	-6.279	-6.411	-6.529	-6.574	-6.604	-6.604	-6.014
.41-5.561	-5.209	-5.126	-5.401	-5.599	-5.814	-6.004	-6.163	-6.213	-6.402	-6.402	-4.849
.53-5.242	15.221	15.226	13.426	10.524	7.965	5.940	4.285	2.536	-1.420-001	-4.044	-6.859
.65-5.131	17.224	16.065	14.483	11.211	8.481	6.403	4.714	2.931	1.442	-3.296	-6.287
.80-5.146	15.529	16.778	15.000	11.671	8.904	6.839	5.163	3.390	1.832	-2.378	-5.520
.95-5.137	15.224	16.244	14.653	11.331	8.871	6.982	5.408	3.722	1.314	-1.599	-2.795
1.07-5.111	14.114	14.227	12.889	10.722	8.695	7.005	5.549	3.962	1.694	-1.958	-2.174
1.25-5.107	11.631	12.100	11.144	9.776	8.269	6.883	5.624	4.208	2.167	-1.159	-1.509
1.50-5.092	5.761	9.900	9.350	8.551	7.556	6.548	5.565	4.410	2.690	1.575	-1.852-001

1.90 7.330	7.624	7.733	7.468	7.069	6.521	5.915	5.278	4.482	3.217	1.492	1.496
2.65 5.497	5.403	5.403	5.552	5.404	5.193	4.940	4.633	4.271	3.602	2.521	1.465
4.15 4.015	4.039	4.048	4.028	3.995	3.945	3.882	3.809	3.705	3.508	3.129	2.552
7.15 3.155	3.157	3.158	3.156	3.153	3.148	3.142	3.134	3.124	3.102	3.057	2.972
13.15 3.005	3.005	3.005	3.005	3.005	3.005	3.005	3.004	3.004	3.004	3.000	3.000
24.65 3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
47.15 3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
62.15 3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000

R-DIST

Z-DIST	6.99	12.99	24.49	46.99	61.99
.00-7.393	-7.393	-7.393	-7.393	-7.393	3.000
.06-7.135	-7.135	-7.135	-7.135	3.000	3.000
.18-6.606	-6.607	-6.607	-6.607	3.000	3.000
.29-6.065	-6.067	-6.067	-6.067	3.000	3.000
.41-5.513	-5.516	-5.516	-5.516	3.000	3.000
.53-4.952	-4.955	-4.955	-4.955	3.000	3.000
.65-4.383	-4.386	-4.386	-4.386	3.000	3.000
.80-3.625	-3.628	-3.628	-3.628	3.000	3.000
.95-2.899	-2.902	-2.903	-2.903	3.000	3.000
1.07-2.275	-2.276	-2.276	-2.276	3.000	3.000
1.25-1.350	-1.393	-1.393	-1.393	3.000	3.000
1.50-1.253	-1.277	-1.277	-1.277	3.000	3.000
1.90 .2984	.2814	.2811	.2811	3.000	3.000
2.65 1.083	1.043	1.042	1.042	3.000	3.000
4.15 2.190	2.140	2.138	2.138	3.000	3.000
7.15 2.899	2.885	2.885	2.885	3.000	3.000
13.15 2.997	2.997	2.997	2.997	3.000	3.000
24.65 3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
47.15 3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
62.15 3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000

MANAD 5 ~ 1 APRIL

TIME: 13140000.C00 S * 3650.000 HOURS

TEMPERATURES

Z-DIST	-62.00	R-DIST -47.00	-24.50	-13.00	-7.00	-4.00	-2.50	-1.73	-1.30	-1.05	-.95	-.65
--------	--------	------------------	--------	--------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	------	------

Figur 5.1 Exempel på resultatutskrift. Beräkningen gäller ett fall med en 4 meter bred horison-tell markskiva på 0,47 meters djup

6 LITTERATUR

- /1/ Svensk byggnorm, SBN 1980. Statens planverks författningssamling, PFS 1980.1. Stockholm.
- /2/ Ingelstam E, 1968. Fysik för avdelning V. Tekniska högskolans studentkår kompendieförmedling nr 191. Stockholm
- /3/ Björck Å, Dahlqvist G, 1969. Numeriska metoder. Stockholm
- /4/ Hagentoft C-E, 1983. Tjälnedträngning i mark runt fjärrvärmekulvert. Inverkan av värmeisolering ovanför kulverten. Husbyggnadsteknik, Tekniska högskolan i Lund.
- /5/ Claesson J, Hagentoft C-E, 1983. Återvinning av värmeförluster från fjärrvärmekulvertar. Husbyggnadsteknik, Tekniska högskolan i Lund.



