



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

R53:1986

**Återvinning av värmeförluster
i fjärrvärmekulvertar med
värmepump**

Kulverttyper och systemoptimering

**Mats Barring
Mats Rosenberg**

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

K/O
[Signature]

Bygghforskningsrådet

R53:1986

ÅTERVINNING AV VÄRMEFÖRLUSTER
I FJÄRRVÄRMEKULVERTAR MED VÄRMEPUMP

Kulverttyper och systemoptimering

Mats Barring
Mats Rosenberg

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 821138-9
från Statens råd för byggnadsforskning till AF-Energi-
konsult AB, Malmö.

REFERAT

Syftet med rubricerade rapport är att såväl tekniskt som ekonomiskt optimera markkollectorns utformning och förläggning för att med värmepump återvinna kulvertförluster från fjärrvärmeledningen.

Beräkningar visar att lönsamheten för en dylik anläggning kan vara företagsekonomiskt lönsam, om befintlig värmepump kan utnyttjas och elpriset är relativt lågt.

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

R53:1986

ISBN 91-540-4571-1

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Liber Tryck AB Stockholm 1986

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

BETECKNINGAR		Sida
1.	INLEDNING	6
1.1	Problemet, dess bakgrund och avgränsning	6
1.2	Projektet	6
1.3	Rapport, sammanfattning av etapp A	7
1.4	Rapport, sammanfattning av etapp B	8
2.	FÖRUTSÄTTNINGAR	9
2.1	Allmänt	9
2.2	Teknik - förutsättningar	10
2.3	Ekonomi - förutsättningar	11
2.4	Drift- och underhållskostnader	12
2.5	Energikostnader	12
3.	BERÄKNINGAR	14
3.1	Allmänt	14
3.2	Termodynamiska beräkningar	14
3.3	Optimering av slangplacering	14
3.4	Beräkningsgång för ekonomiska kalkyler	15
3.5	Optimering av slangdimension	19
3.6	Optimering av antal slangar	20
3.7	Alternativa dimensioner	21
3.8	Känslighetsanalys	22
3.9	Sammanfattning	25

4.	ÖVRIGA BEAKTANDE	26
4.1	Allmänt	26
4.2	Tjälhävning	26
4.3	Frysning av slangmediet	27

DIAGRAM

BILAGOR

BETECKNINGAR

W_{PT}	Tillförd energimängd till värmeproduktionsanläggningen
W_P	Producerad energimängd (exkl. energimängd från återvinningsanläggningen)
W_{PF}	Omvandlingsförlust vid värmeproduktion
W_A	Till abonnenterna tillförd energimängd
W_{FN}	Normal kulvertförlust
W_{FO}	Brutto "kulvertförlust"
W_{P1}	Återvunnen "kulvertförlust"
W_{F2}	Netto "kulvertförlust"
W_J	Upptagen jordvärme
W_{VP}	Avgiven energimängd från återvinningsanläggningen
W_{KM}	Tillförd energimängd till återvinningsanläggningen
W_{KF}	Omvandlingsförlust vid kompressordrift
W_K	Tillförd energimängd till kompressor
Φ	Värmefaktor för värmepumpen

1. INLEDNING

1.1 Problemet, dess bakgrund och avgränsning

Enligt Svenska Värmeverksföreningens "Fjärrvärmeplan 1985" beräknas den sammanlagda anslutna värmeeffekten för samtliga värmeverk i Sverige uppgå till ca 20 GW 1985 och den levererade värmemängden till ca 39 TWh per år. I "Fjärrvärmeplan 1985" har Värmeverksföreningen beräknat att dess siffror ska öka med ca 50 % inom en 20-års period. Den sammanlagda kulvertlängden som har installerats i Sverige är ca 5 000 km och ytterligare ca 4 - 5000 km beräknas bli installerade under den närmsta 20 års perioden.

Kulvertförlusterna beräknas uppgå till minst ca 6 % av levererad värmemängd dvs ca 2.3 TWh per år och kommer att öka till ca 3.5 TWh år 2005. Det är således stora mängder energi som här går förlorade. Ett sätt att nyttiggöra dessa är att med hjälp av värmepump med lämpligt utformad kollektor, nerlagd längs kulverten, återföra värmeenergin till fjärrvärmesystemet. Teoretiskt kan t o m mer energi än kulvertförlusterna utvinnas genom bidrag från omkringliggande mark.

På många håll har värmepumpar kommit till användning för utnyttjande av värmeenergi från källor med låga temperaturer, så även i kommunala fjärrvärmesystem. Exempel på sådana källor är mark, sjöar och avloppsvatten. Den nu föreslagna kan troligen väl mäta sig med avloppsvatten då den är konstant året runt. Vidare har den ej mark- och sjöalternativens nackdelar med låga temperaturer vintertid.

Tanken på att återvinna värmeförluster från värmekulvertar kan utvidgas till att omfatta alla förluster från uppvärmda rum och föremål ex. byggnader. Detta projekt begränsas dock till värmeförluster från markförlagda värmekulvertar.

1.2 Projektet

Projektet syftar till att ta fram ett tekniskt och ekonomiskt vettigt värmepumpsystem för återvinning av värmeförlusterna från värmekulvertar. Känd värmepumpsteknik skall användas i kombination med kollektorer anpassade för ändamålet.

Värmepumpsystemet är i första hand tänkt att installeras vid kommunala värmeverk.

Projektet planeras delas upp i följande etapper:

A: Teknisk och ekonomisk utredning av möjligheterna att återvinna värmeförluster från kulvertar genom installation med kollektorer av speciell typ.

Här klargörs de tekniska förutsättningarna för användande av värmepump i sammanhanget och förslag till teknisk lösning utarbetas. Ekonomiska kalkyler utföres och lönsamheten beräknas.

B: Framtagning av modeller för utformning av kollektorer.

Här prövas olika utformningar av kollektorer genom teoretiska beräkningar av värmeflödena mellan värmerör och kollektor. För beräkningarna används datorprogram baserade på finita element metoden.

Beräkningarna ska leda till en optimal kollektorutformning med hänsyn till värmeupptagning, investeringskostnad, kulvertdimension och kulverttyp.

C: Praktiska försök.

I samband med byggandet av en lämplig fjärrvärmeledning av plaströrstyp vid något kommunalt värmeverk, med vilket vi regelbundet samarbetar, kan en provsträcka med markkollektorer utföras. Vi räknar med att projektet i så fall ej belastas med någon kostnad för schaktning och återställning, utan endast material- och lägningskostnader.

1.3 Rapport, sammanfattning av etapp A

Efter studie av de tekniska och ekonomiska förutsättningarna har preliminära beräkningar utförts vad gäller värmeupptagning i en tänkt kollektor bestående av parallellt med kulverten förlagda plastslangar. Aktuell kulverttyp är den s k "plastkulverten".

Beräkningarna som endast måste gälla som beräkningsexempel visar att en stor del av värmeförlusten kan återvinnas, utan att värmeflödet från fjärrvärmerören ökar i någon större grad. Någon optimering eller analys av utformning har ej utförts.

Baserat på det termodynamiska beräkningsexemplet utföres ekonomiska kalkyler och känslighetsanalyser för en anläggning i ett tänkt fjärrvärmesystem. Beräkningarna visar att, utöver de energibesparande fördelarna, finns goda möjligheter för lönsamhet. Vidare redovisas inverkan av de viktigaste parametrarna. Inverkan av anläggningens storlek har ej studerats, då detta kräver noggrannare termodynamisk och systemteknisk analys.

1.4 Rapport, sammanfattning av etapp B

Föreliggande rapport omfattar etapp B enligt avsnitt 1.2.

Optimeringen av återvinningsanläggningen visar att upp till ca 75 % av kulvertförlusterna kan återvinnas och att kulvertförlusterna då ökar med drygt 10 %.

Baserat på de utförda beräkningarna rekommenderas att markkolektorn (slangarna) utformas med sex återvinnings slangar placerade "runt" fjärrvärmerören. Den optimala dimensionen på slangarna är 63/5.8 vid de studerade förutsättningarna.

Hastigheten på mediet i slangarna bör vara ca 1.2 m/s vid "billig" el och då "dyrt" bränsle kan ersättas. Ökar elpriset är det fördelaktigt att sänka hastigheten på mediet något för att erhålla ett optimalt system.

Baserat på det termodynamiska beräkningsexemplet utföres ekonomiska kalkyler och känslighetsanalyser för en anläggning i ett tänkt fjärrvärmesystem. Beräkningarna visar, att erfordras det en investering i en ny värmepump, är det endast lönsamhet i verksamheten, om den ersatta energin består av olja. Finns värmepumpeffekt tillgänglig är lönsamheten klart bättre, men elpriset bör vara "lågt".

Vidare redovisas en mindre känslighetsanalys där inverkan av de huvudsakliga parametrarna redovisas.

2. FÖRUTSÄTTNINGAR

2.1 Allmänt

Energin som kan återvinnas med hjälp av slangarna är beroende av flera faktorer. Huvudsakligen energipris, elpris, kapitalkostnader och graden av återvinning eller minskning av värmeförlusterna.

Värmeförlusterna i ledningssystemet är beroende av temperaturen i fjärrvärmeledningarna och den omgivande markens temperatur. I bilaga 2.1 redovisas utseendet på temperaturstyrningskurvan i ett vanligt fjärrvärmesystem.

Ur kurvan kan utläsas att temperaturen på framledningen varierar mellan ca 120 °C och 75 °C. För returledningen är motsvarande intervall ca 70 °C - 50 °C. Årsmedeltemperaturen för mark varierar mellan ca + 8 °C i södra Sverige och ca - 3 °C i nordligaste Sverige. Söder om Gävle är dock årsmedeltemperaturen ca 5 - 8 °C. I bilaga 2.2 redovisas en karta över Sverige med temperaturzonerna utmärkta. I den fortsatta utredningen antas medelframledningstemperaturen till 90 °C, medelreturledningstemperaturen till 60 °C och årsmedeltemperaturen i mark till 8 °C.

Vilket tidigare nämnts uppgår kulvertförlusterna (W_{FN}) i ett normalt fjärrvärmesystem till minst ca 6 % av totalt levererad energi. Vid införande av en värmeupptagande kollektor kommer kulvertförlusten (W_{F0}) från fjärrvärmesystemet att öka något. Teoretiskt kan hela kulvertförlusten (W_{F0}) återvinnas.

Hur stor den verkligt återvunna energimängden (W_{F1}) blir är dels beroende av kollektorns utförande och dels av köldbärartemperaturen (temperaturen i slangarna). Är köldbärartemperaturen tillräckligt låg och kollektorn lämpligt utformad, kan även energi (W_J) upptas från omgivningen (dvs. markvärme).

Beroende på värmepumpens värmefaktor och verkningsgrad erfordras en tillförd energimängd (W_K) för att driva värmepumpen. Detta resulterar i att en energimängd (W_{VP}), som är större än den återvunna kulvertförlusten, tillförs fjärrvärmesystemet.

Erforderligt tillförd energi till kompressorn blir:

$$W_K = (W_{F0} + W_J - W_{F2}) / (\Phi - 1)$$

$$\text{där } \Phi = W_{VP} / W_K$$

Reduktionen (ΔW_P) av värmeproduktionen i värmeverkets övriga produktionsanläggningar, kan uttryckas enligt följande:

$$\Delta W_P = W_{VP} - \Delta W_{FO} = \phi W_K - \Delta W_{FO}$$

där ΔW_{FO} är ökningen i "brutto" kulvertförlust

$$\text{dvs. } \Delta W_{FO} = W_{FO} - W_{FN}$$

Villkoret för att "återvinningsanläggningen" skall vara lönsam är att värdet av den ersatta energin i värmeproduktionsanläggningen (ΔW_P) är större än kostnaden för den till-satta kompressorenergien (W_K) inklusive fasta kostnader och drift- och underhållskostnader och ökning av brutto kulvertförlust.

För att förklara ovanstående resonemang redovisas i bilaga 2.3 ett Sankeydiagram över energibalansen i ett tänkt fjärrvärmesystem, före (a) och efter (b) införandet av värmeåtervinningsanläggningen. (Diagrammen beskriver endast storleksordningen av respektive flöde.)

De parametrar som därvid bör studeras är dels utformningen av kollektor, för att utvärdera hur följande parametrar varierar.

- ökningen av brutto kulvertförlust (ΔW_{FO})
- återvunnen kulvertförlust (W_{F1})
- upptagen jordvärme (W_J)

Dessutom kommer de ekonomiska aspekterna in för att beräkna lönsamheten av "återvinningsanläggningen". De faktorer som därvid varierar är energi och elpriser samt kapitalkostnaderna.

Samtliga dessa parametrar är beroende av markkollektorns (slangarnas) utformning och dimension.

2.2 Teknik - förutsättningar

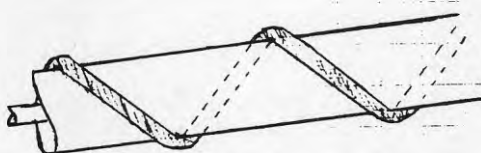
Utformningen av markkollektorn kan ske på ett otal olika sätt. Från kylda väggar utanför rörisoleringen till enkla plastslangar i närheten av fjärrvärmeledningen. Utformningen påverkas till största delen av vilken typ av kulvert som är aktuell.

Till exempel i fjärrvärmestunnlar omges fjärrvärmeledningarna av luft där temperaturen varierar mellan 20 och 40 grader beroende på vilket material kulvertarna är utförda i. Genom en luftvärmepump kan temperaturen sänkas i tunnlarna och energi kan erhållas för uppvärmning.

Den idag förhärskande kulverttypen vid nyinstallationer är plastkulvert, dvs separat förlagda fram- och returledningar

bestående av stålrör isolerade med polyetanskum och inneslutna i polyetenrör. I den fortsatta utredningen har endast plastkulvert utnyttjats i beräkningarna.

För att kostnaderna vid förläggningen av markkollektorn ska bli så billig som möjligt bör markkollektorn finnas på rulle och kunna placeras samtidigt med att plastkulverten förläggs till en obetydlig merkostnad. Sker förläggningen på detta vis bör plastslangarna placeras parallellt med plastkulverten på samma eller i närheten av plastkulverten. En alternativ förläggning av plastslangen är att skruva den runt plastkulverten enligt figur nedan, men metoden är relativt dyr och komplicerad och förläggingskostnaderna skulle öka så att lönsamheten i projektet skulle äventyras. Dessutom skulle antagligen fjärrvärmerörets tyngd påverka slangarna under röret så att dessa kläms ihop med ökade tryckfall som resultat.



2.3 Ekonomi - förutsättningar

För att "återvinningsanläggningen" ska vara lönsam krävs som tidigare nämnts att den vunna energimängden är mer värd än den till värmepumpen tillförda energimängden plus den ökning av kulvertförlusterna som sker när slangarna ansluts.

Investeringskostnaden för "återvinningsanläggningen" kan delas upp i två huvudposter, dels värmepumpanläggningen och dels kollektorn. Kostnaden för värmepumpanläggningen är beroende av kapacitet, storlek och antal värmepumpar, men uppskattas till ca 3000 kr/kW avgiven effekt.

Investeringskostnaden för kollektorn är beroende av dels priset för plastslangarna och dels utformningen. I föreliggande studie förutsattes att plastslangarna förlägges parallellt med kulverten.

För plastslangar på rulle (finns på upp till 200 m/rulle) och för ett maximalt tryck på 10 bar(e) har följande priser erhållits i prisnivå medio 1985.

Tabell 2.1 Slangpris PN 10

Dim	Pris
32/3.0	6 kr/m
40/3.7	8 kr/m
50/4.6	13 kr/m
63/5.8	20 kr/m

Tryckförlust i slangarna gör att det krävs tryckstegringspumpar längs ledningen med olika inbördes avstånd beroende på hastighet i mediet och slangdimension.

Om utgångstrycket är 10 bar (vilket är det maximala trycket för slang PN 10), har ett max tryckfall på 8 bar accepterats innan nästa tryckhöjning erfordras.

Priset för en pump med tillbehör som ex fundament, elektrisk inkoppling mm, för de relativt små flöde och dimensioner som krävs har bedömts uppgå till ca 20 kkr i prisnivå medio 1985.

2.4 Drift- och underhållskostnader

Drift- och underhållskostnaden för återvinningsanläggningen bedöms vara låg. En utökning av de personella resurserna kan ej anses vara aktuell. Härmed återstår endast underhållskostnader som uppskattas till 1.5 % av investeringen för slangar och 4 % av investeringen för värmepumpen.

2.5 Energikostnader

Värdet av den ersatta energin betraktas endast ur marginalkostnads synpunkt. Då den maximala effektreduktionen endast blir förhållandevis ringa, kommer inte kapitalkostnaderna för övriga produktionsanläggningar att kunna minskas. Härmed återstår endast den rörliga energikostnaden som "vinst" för den ersatta energin. Eftersom återvinningsanläggningen kommer att utnyttjas under en stor del av året kommer energin att till en stor del att ersätta fastbränsle eller spillvärme-producerad energi. Under vissa perioder (höglast) kan dock den ersatta energin vara oljebaserad. I bilaga 2.4 redovisas ett varaktighetsdiagram över energitäckningen som visar vilken energi som kommer att ersättas i ett vanligt fjärrvärmesystem idag.

Ekonomiska kalkyler har utförts för tre olika bränslepriser.

Tabell 2.2 Bränslepriser

Bränsle	Bruttopris (kr/MWh)	Verkningsgrad	Nettopris (kr/MWh)
Olja	240	90 %	267
Fastbränsle	130	80 %	162
Mix	-	-	190

Bränslemixen består till 75 % av fastbränsle och till 25 % av olja.

Drivenergin för värmepumpen kan idag utgöras av eldrivna, gasdrivna och även absorptionsvärmepumpar. Det idag mest realistiska alternativet är eldrivna värmepumpar. Kostnaden för denna energi är beroende på var i landet och när under året som anläggningen utnyttjas. Antages dagens förutsättningar (Sydkraft) för separat elabonnemang, uppgår det totala elpriset (energikostnad och abonnemangskostnad) till ca 280 kr/MWh beroende på typen av abonnemang. I de ekonomiska kalkylerna har två olika elpriser utnyttjats dels ett billigt och ett dyrt.

Billig el: 260 kr/MWh
Dyr el: 320 kr/MWh

Idag blir eltaxorna mer och mer differentierade och i de fallen bör möjligheten att stänga av värmepumpen under höglast beaktas och på så vis optimera driften efter differentieringen i eltaxan.

Värmefaktorn (Φ) för värmepumpen med de temperaturnivåer som är aktuella har antagits till 2.5 i de fortsatta beräkningarna om inte annat anges. Verkningsgraden (η) för motorn i kompressorn antas till 95 %.

För att beräkna kostnaden för pumpenergi antas samma elpris som för värmepumpen, verkningsgraden (η) för pumparna antas till 70 %.

3. BERÄKNINGAR

3.1 Allmänt

För att mediet i slangarna ska få en jämn temperatur och därigenom en stor värmeupptagning ska erhållas, förutsätts att det råder turbulent strömning i slangarna, vid de hastigheter som gäller i de följande beräknings fallen.

I samband med beräkningarna har följande förenklingar utnyttjats.

- Värmemotstånden på insidan av fjärrvärmerören (vattensidan) försummas.
- Värmemotstånd i stålrör och polyetenrör försummas. (PEH-värmeledningstal är i samma storleksordning som markens varför mantelröret räknas in i jordvolymen.)
- Stationära förhållanden förutsätts råda, vilket innebär att markens och isoleringens värmekapacitet försummas. Således räknas ej med ökade förluster i samband med uppstart av systemet.
- Gränsytan mellan isolering och mark antas vara isoterm.

3.2 Termodynamiska beräkningar

Eftersom de termodynamiska beräkningar är relativt komplicerade, erfordras datorprogram och datorhjälp för en rationell analys. Denna assistans erhållits från Lunds Tekniska Högskola. (Johan Claesson och Carl-Eric Hagentoft, Husbyggnadsteknik)

I bilaga 3.1 redovisas en rapport från LTH, innehållande beräkningsprinciper och modellen för beräkningarna.

De inledande beräkningarna gäller för en plaströrskulvert av dimension DN 150. Temperaturen i slangmediet har antagits till 8 °C, vilken motsvarar årsmedeltemperaturen i mark. Temperaturen antas i framledningen till 90 °C och i returledningen till 60 °C.

3.3 Optimering av slangplacering runt fjärrvärmerören

De första datorberäkningarna utföres för att optimera förläggningen av markkollektorn (slangarna), dvs oberoende av dimension på fjärrvärmerör, slangar eller antal slangar.

Genom att ändra förläggningsdjup och placering av slangarna runt kulverten erhålles vissa riktlinjer, för hur slangarna

bör placeras för att erhålla maximal effektupptagning och orsaka minimal effektförlust från fjärrvärmeledningarna.

Tre beräkningar utfördes med fyra slangar och fem beräkningar utfördes med två slangar, samtliga beräkningar redovisas i bilaga 3.2.

Beräkningarna kan sammanfattas i att placeringen av slangarna inte har någon större betydelse eftersom effektupptagning och effektförlust inte varierar i någon större grad med placeringen. Dock är det något fördelaktigare att placera slangarna under än över fjärrvärmerören och slangarna bör placeras på ett "lagom" avstånd ca 15 - 20 cm från fjärrvärmerören.

Placeras slangarna under fjärrvärmerören måste detta ske med stor försiktighet så att inte fjärrvärmerören trycker till slangarna, så att dessa kläms ihop.

I de följande beräkningarna har vid driftfall med två slangar, dessa placerats under fjärrvärmerören. Vid fyra och sex slangar, har dessa placerats "runt" fjärrvärmerören.

3.4 Beräkningsgång för ekonomiska kalkyler

3.4.1 Allmänt

För att bedöma lönsamheten och för att optimera kollektorns utformning tekniskt, har lönsamhetskalkyler för hela "återvinningsanläggningen" utförts. Beräkningarna är utförda i prisnivå medio 1985.

Kapitalkostnaderna beräknas med annuitetsfaktorn 0.0736, vilket motsvara realräntan 4 % och 15 års avskrivningstid.

Drifttiden för anläggningen antas till 8000 tim/år.

3.4.2 Maximal slanglängd

Accepteras en temperaturhöjning av mediet i slangarna på maximalt 10 °C, från det att mediet lämnar värmepumpen tills det att mediet återförs kan de maximala ogrenade slanglängderna beräknas med hänsyn till temperaturbegränsningen.

För total effektupptagning per längd enhet (q) gäller följande;

$$q = \dot{m} C_p \Delta T / L$$

där $\dot{m} = \pi D_i^2 \rho v / 4$
 C_p = värmekapacitiviteten (4.2 kJ/kg K)
 v^p = hastigheten på mediet₃
 ρ = densiteten (1000 kg/m³)
 D_i = innerdiametern på slangarna

För att beräkna den maximala längden erhålles följande formel.

$$L = \Delta T D_i^2 v \pi \rho C_p / 4 q$$

I tabellen nedan redovisas maximal ogrenad slanglängd per värmepump vid en maximal temperaturhöjning på 10 °C, vid några olika hastigheter och dimensioner på slangarna.

Tabell 3.1 Maximal slanglängd (dvs. slang 1 + slang 2 + ...)

Dim	0.5 m/s	1.0 m/s	1.5 m/s	2.0 m/s
32/3.0	796	1592	2388	3184 m
40/3.7	1252	2504	3756	5008 m
50/4.6	1961	3922	5883	7844 m
63/5.8	3112	6224	9336	12448 m

3.4.3 Tryckfall och tryckhöjning i slangarna

I avsikt att beräkna erforderligt antal pumpsteg för att höja trycket i slangarna har tryckfallet i slangarna beräknats, med utgångspunkt från att polyetenslang ($\lambda=0.03$) av tryckklass PN 10 utnyttjas. Följande tryckfall och flöde erhålles vid samma hastighet och dimension som i tabell 3.1.

Tabell 3.2 Tryckfall (mbar/m) / flöde (l/s)

Dim	0.5 m/s	1.0 m/s	1.5 m/s	2.0 m/s
32/3.0	1.5/0.27	6.0/0.54	13.5/0.81	24.0/1.08
40/3.7	1.2/0.42	4.8/0.84	10.8/1.26	19.1/1.68
50/4.6	0.96/0.65	3.8/1.30	8.6/1.95	15.3/2.60
63/5.8	0.76/1.04	3.0/2.08	6.8/3.12	12.1/4.16

I slangarna accepteras som tidigare nämnts ett tryckfall på 8 bar innan en tryckhöjning erfordras. Med utgångspunkt från detta kan den maximala slanglängden per pumpsteg beräknas för de tidigare redovisade fluidhastigheterna och slangdimensionerna.

Tabell 3.3 Maximal slanglängd per pumpsteg (m)

Dim	0.5 m/s	1.0 m/s	1.5 m/s	2.0 m/s
32/3.0	5333	1333	593	333 m
40/3.7	6667	1667	741	417 m
50/4.6	8333	2083	926	520 m
63/5.8	10526	2631	1170	658 m

Erforderlig pumpenergi per pumpsteg beräknas med följande förutsättningar;

Verkningsgraden för pumpen: $\eta = 0.70$

Tryckhöjning: $\Delta p = 8 \text{ bar}$

Pumpenergin (P) = flödet * tryckhöjningen * antal pumpsteg * drifttiden / verkningsgraden

Elkostnaden för pumpen antas vara lika med elkostnaden för värmepumpen.

Anm. Det mesta av pumpenergin resulterar även det i en liten höjning av temperaturen på slangmediet på grund av friktionsvärmen, detta är dock inte vidare beaktat.

3.4.4 Exempel på beräkning

För att beskriva beräkningsgången i lönsamhetskalkylen redovisas i det följande ett exempel på hur beräkningarna genomförs.

Som exempel studeras fallet med två slangar.

Värmeförluster och värmeåtervinning uppgår till följande.

$$\begin{aligned} q_F &= 38 \text{ W/m} & q_1 &= 15 \text{ W/m} \\ q_R &= 24 \text{ W/m} & q_2 &= 13 \text{ W/m} \end{aligned}$$

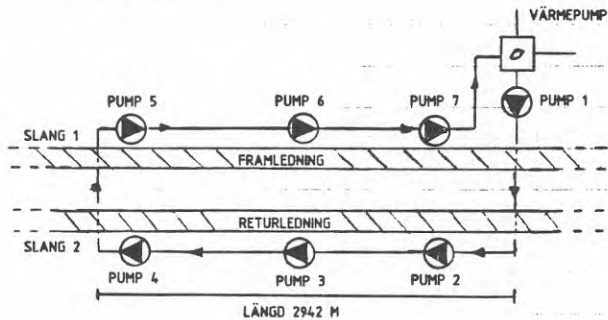
Värmeförlusten utan återvinningsslangar uppgår till 56.8 W/m, vilken ökar till ca 62 W/m med återvinningsslangar, dvs en ökning av kulvertförlusterna med ca 5.2 W/m.

Värmeåtervinningen är större i slang 1 än i slang 2 och därmed blir slang 1 dimensionerande för maximal slanglängd med avseende på temperaturhöjningen.

Vid detta exempel beräknas lönsamheten vid hastigheten 1.5 m/s och slangdimensionen 50 mm.

Ur tabell 3.1 erhålles slanglängden till 5833 m, vilket är den totalalängden för slang 1 och slang 2. Total kulvertlängd uppgår till $5833/2 = 2942 \text{ m}$. Ur tabell 3.3 erhålles att 926 m är maximal längd/pumpsteg för den aktuella slang, i detta

fall erfordras således sju pumpsteg. I figuren nedan redovisas en översikt, med två slangar och sju pumpsteg i återvinnings anläggningen.



Tabell 3.4 Effekt och energi

Ökningen i kulvertförlust: $(5.2 \text{ W/m} * 2942 \text{ m})$	15.3 kW
Värmeåtervinning: $((15+13 \text{ W/m}) * 2942 \text{ m})$	82.4 kW

De årliga energimängderna blir enligt följande:

I kollektorn upptagen energi: $(82.4 * 8000 \text{ h})$	659 MWh
Av kompressorn utnyttjad energi: $(\Phi = 2.5)$	439 MWh
Från värmepumpen avgiven energi:	1098 MWh

Ökning av kulvertförlust: $(15.3 * 8000 \text{ h})$	122 MWh
---	---------

Till kompressorn tillförd energi: $(439/0.95)$	462 MWh
Tillförd pumpenergi: $(\eta = 0.7)$	113 MWh

Med utgångspunkt från att värmepumpens avgivna effekten uppgår till ca $(1098 \text{ MWh}/8000 \text{ h})$ 137 kW, kan investeringskostnaden för värmepumpen beräknas. I detta exempel blir investeringskostnaden ca 411 kkr.

Investeringskostnaden för slangar och pumpsteg beräknas med avseende på aktuell längd, dimension och antal pumpsteg till totalt ca 216 kkr.

Drift- och underhållskostnader baseras på schabloner och anges i procent av investeringskostnaden. För slangarna beräknas den årliga kostnaden till ca 3.2 kkr och för värmepumpen till ca 20 kkr.

Härmed kan en lönsamhetskalkyl gällande ett driftår sammanställas. Kalkylen är utförd vid ett lågt elpris (260 kr/MWh) och det ersatta bränet antas bestå av olja till nettopriset 267 kr/MWh.

Tabell 3.5 Ekonomisk kalkyl

Värdet av ersatt energi	293 kkr
Kostnad för ökade kulvertförluster	- 33 kkr
Kostnad för kompressorenergi	- 120 kkr
Kostnad för pumpenergi	- 30 kkr
Driftkostnad	- 3 kkr
Kapitalkostnad för slangar	- 20 kkr

Årligt överskott utan värmepump investering	87 kkr/år
Kapitalkostnad för värmepump	- 36 kkr
Driftkostnad värmepump	- 17 kkr

Årligt överskott med värmepump investering	34 kkr/år

Med givna förutsättningar är projektet således lönsamt även om en investering i värmepump måste ske.

De ovan beskrivna ekonomiska beräkningar är relativt komplicerade och därför utvecklades ett mindre datorprogram för att kunna simulera de olika driftfall som uppträder. Samtidigt som en högre noggrannhet erhålles reduceras även risken för eventuella felräkningar.

I bilaga 3.4 redovisas utseendet på datorutskriften från ovanstående driftfall.

För varje beräkning varierar hastigheten på mediet i slangarna mellan 0.5 m/s - 2.5 m/s i steg om 0.1 m/s. Detta medför att 20 resultat utskrifter erhålles för varje beräkningsfall. I fortsättningen redovisas endast diagram med årligt överskott som funktion av flödet för de studerade driftfallen.

3.5 Optimering av slangdimension

Överskottet per år studeras som funktion av hastigheten på mediet i återvinningsslangarna. I kurvorna framträder tydliga maxima vid en speciell hastighet.

Högre hastighet medför större strömningsförluster och därmed fler pumpar och följaktligen mer pumpenergi. Detta gör att ett ekonomiskt maximum finns vid en viss hastighet.

För att optimera slangdimensionen på kollektorn studeras ett driftfall med följande förutsättningar:

- Fjärrvärmeledning, plastkulvert DN 150 normalisolerad.
- Värmepump med tillgänglig kapacitet finns.
- Den ersatta energin är oljeproducerad (267 kr/MWh).

- Tillgång finns till billig elkraft (260 kr/MWh).

Ett konservativt antagande är att en grov slang tar upp lika mycket effekt som en tunn slang mer meter men eftersom flödet är lägre blir inte tryckfallet i slangen så omfattande utan färre tryckstegringspumpar erfordras.

I diagram 1 redovisas det årliga driftöverskottet som funktion av hastigheten i slangarna, för fyra olika dimensioner på de två återvinnings slangarna.

Det maximala årliga överskottet i de fyra fallen uppgår till följande.

Tabell 3.6 Lönsamheten vid olika dimensioner på slangarna

Dim	Överskott (kk/år)
32/3.0	39.3 kkr
40/3.7	59.2 kkr
50/4.6	90.0 kkr
63/5.8	129.7 kkr

Då dimension 63/5.8 ger klart högst överskott utnyttjas endast den i de fortsatta beräkningarna.

3.6 Optimering av antal slangar

För att optimera antal återvinnings slangar har beräkningar utförts med 2, 4 och 6 slangar vid varierande el- och bränslepris. I diagram 2, 3 och 4 redovisas resultatet av beräkningarna.

Följande förutsättningar är gemensamma.

- Fjärrvärmeledning, plastkulvert DN 150 normalisolerad.
- Värmepump med tillgänglig kapacitet finns.
- Slangdimension 63/5.8.

Observera att skalan på axeln med överskott ej är den samma i de olika diagrammen.

I tabellen nedan redovisas driftfall där den ersatta energin är olja och elpriset är lågt, samt driftfall där den ersatta energin är en mix och elpriset är högt.

Tabell 3.7 Lönsamheten vid olika antal slangar

Antal slangar	Överskott vid ersatt olja lågt elpris	Överskott vid ersatt mix högt elpris
2	130 kkr/år	12 kkr/år
4	264 kkr/år	29 kkr/år
6	342 kkr/år	30 kkr/år

I diagram 5, 6 och 7 redovisas motsvarande kurvor där även värmepumpinvesteringen är medtagen. I detta fall blir resultatet positivt endast om den ersatta energin är olja.

Sammanfattat framgår av tabellen ovan att 6 slangar är fördelaktigare än både 2 och 4 med de studerade förutsättningarna.

I de fortsatta beräkningarna utnyttjas såldes 6 återvinningsslangar i samtliga driftfall.

3.7 Alternativa dimensioner

Hittills har endast kulvertförlusterna studerats från normalisolerade fjärrvärmeledningar med dimension 150. Med dagens höga bränslepriser är det dock ekonomiskt fördelaktigare att utnyttja extra isolerade ledningar.

För att utföra beräkningar vid andra dimensioner och andra isolertjocklek har det enklaste varit att göra nya datorberäkningar med andra värden. Tyvärr är dock det utnyttjade datorprogrammet relativt invecklat och fordrar en hel del korrigeringar för att kunna räkna med andra dimensioner. Därför har i stället en teoretisk modell utnyttjats för att utföra de ekonomiska beräkningar vid andra dimensioner och isolertjocklek än DN 150 normalisolerad.

I bilaga 3.3 redovisas utförligt hur den teoretiska modellen fungerar jämfört med datormodellen.

De dimensioner som studerats är följande; DN 100, DN 150, DN 200 och DN 300 i samtliga fall extraisolerade. I de studerade driftfallen varierar el- och bränslepris inom de tidigare redovisade intervallerna. Diagram 8, 9, 10 och 11 redovisar resultatet av beräkningarna.

Följande förutsättningar är gemensamma.

- Värmepump med tillgänglig kapacitet finns.
- Slangdimension 63/5.8.
- Sex slangar utnyttjas.

Observera att skalan på axeln med överskott ej är den samma i de olika diagrammen.

I tabellen nedan redovisas de driftfall där den ersatta energin är olja och elpriset är lågt, samt driftfall där den ersatta energin är en mix och elpriset är högt.

Tabell 3.8 Lönsamheten vid olika dimension på fv.ledningarna

Dimension fv.ledning	Överskott vid ersatt olja lågt elpris	Överskott vid ersatt mix högt elpris
DN 100	195 kkr/år	- kkr/år
DN 150	312 kkr/år	20 kkr/år
DN 200	325 kkr/år	22 kkr/år
DN 300	325 kkr/år	25 kkr/år

I diagram 12, 13, 14 och 15 redovisas motsvarande kurvor där även värmepumpinvesteringen är medtagen. I detta fall blir resultatet positivt endast om den ersatta energin är olja.

3.8 Känslighetsanalys

I avsikt att studera känsligheten i projektet om förutsättningarna för kapitalkostnaderna skulle förändras har fem olika känslighetsanalyser genomförts.

Grund alternativet är DN 150 fjärrvärmeledning, normalisolerad med sex återvinnings slangar av dimension 63/5.8. Elpriset förutsätts vara lågt (260 kr/MWh) och ersatt bränsle är olja (netto 267 kr/MWh). Dvs detta är det gynsammaste fallet av samtliga studerade.

Årligt överskott uppgår till följande.

Överskott utan värmepumps investering: 356 kkr
 Överskott med värmepumps investering: 152 kkr

De faktorer som kommer att varieras i känslighetsanalysen är följande.

Tabell 3.9 Känslighetsanalys

	<u>Grund värde</u>	<u>Nya värden</u>
- Värmefaktorn,	$\phi = 2.5$	$\phi = 2.0$ och 3.0
- Räntan,	4 %	6 % och 8 %
- Avskrivningstiden,	15 år	10 år
- Investeringskostnad vp.	3000 kr/kW	4000 kr/kW
- Drifftiden av anläggning.	8000 timmar	7500 timmar

3.8.1 Värmefaktorn

Värmefaktorn har stor inverkan på resultatet om en värmepump-investering erfordras. För att åskådliggöra detta redovisas nedan en tabell på lönsamheten, i form överskott utan och med investeringskostnad för värmepump.

Tabell 3.10 Känslighet, värmefaktor

Värmefaktor	Överskott utan vp.	Överskott med vp.
$\phi = 2.0$	350 kkr/år	105 kkr/år
$\phi = 2.5$	355 kkr/år	152 kkr/år
$\phi = 3.0$	359 kkr/år	176 kkr/år

Antas en lägre värmefaktor erfordras mer elenergi och en större värmepump för att kunna ta hand om den "återvunna energin" som hela tiden är konstant. Att värdena utan värmepumpsinvesteringen har så små skillnader beror på att skillnaden mellan kalkylerat elpris (260 kr/MWh) och oljepriset (267 kr/MWh) är så liten.

3.8.2 Räntan

Investeringskostnaden för slangar och pumpar är relativt låga, varför räntan inte har någon större betydelse för dem. När det gäller värmepumpen, som är mycket kapitalkrävande, inverkar räntan mer. För att åskådliggöra detta redovisas nedan en tabell på lönsamheten, i form av överskott utan och med investeringskostnad för värmepump vid 4 %, 6 % och 8 % ränta.

Tabell 3.11 Känslighet, ränta

Ränta	Överskott utan vp.	Överskott med vp.
4 %	355 kkr/år	152 kkr/år
6 %	344 kkr/år	120 kkr/år
8 %	332 kkr/år	86 kkr/år

3.8.3 Avskrivningstiden

Avskrivningstiden inverkar på samma sätt som räntan på kapitalkostnaderna. För att åskådliggöra detta redovisas nedan en tabell på lönsamheten, i form av överskott utan och med investeringskostnad för värmepump vid 10 och 15 års avskrivningstid.

Tabell 3.12 Känslighet, avskrivningstid

Avskrivningstid	Överskott utan vp.	Överskott med vp.
10 år	326 kkr/år	70 kkr/år
15 år	355 kkr/år	152 kkr/år

Att förkorta avskrivningstid från 15 till 10 år slår således hårdare än att ändra räntan från 4 till 8 %.

3.8.5 Lägre driftstid

Driftstiden är svår att exakt bestämma för värmepumpen, dels uppstår temperaturbegränsningar vid låga utetemperaturer och dels kan driftstörningar förkorta utnyttningstiden. Detta har i viss mån beaktats när driftstiden har sänkts från maximala 8760 timmar/år till 8000 timmar/år, men även denna siffra är hög och kräver en nära nog felfri produktion. I tabellen nedan redovisas lönsamheten om drifttiden skulle minska med 500 h till totalt 7500 timmar/år.

Tabell 3.13 Känslighet, driftstid

Inv.kostnad	Överskott utan vp.	Överskott med vp.
7500 timmar	328 kkr/år	124 kkr/år
8000 timmar	355 kkr/år	152 kkr/år

3.9 Sammanfattning

De tidigare redovisade beräkningarna kan sammanfattas i följande.

Med de givna förutsättningarna består den optimala markkolektorn av sex slangar som är placerade "runt om" fjärrvärmeledningarna. Dimensionen för slangarna är 63/5.8 vilket är den största dimension som finns på rulle. Vid placering av slangarna bör dessa rullas ut, med en slang under vardera fjärrvärmeröret, en slang på vardera utsidan av fjärrvärmerören och en slang i återfyllingsmassan ovanför vardera fjärrvärmeröret.

Hastigheten på mediet i slangarna bör vara ca 1.0 - 1.5 m/s för att vara optimalt, med avseende på antal pumpsteg och tryckfall i slangarna. Ökar elpriset är det förelaktigast att sänka hastigheten något.

Dimensionen på fjärrvärmeledningarna bör inte understiga DN 150 för att kunna få lönsamhet i anläggningen. Självklart ger en extraisolerad fjärrvärmeledning sämre resultat än en normal isolerad.

Lönsamheten är god om det finns tillgänglig kapacitet i en befintlig värmepump, dvs om en värmepump har byggts och inte kan utnyttjas maximalt på grund av begränsningar i värmekällan. En förutsättning är dock att återvinningsanläggningen kan utnyttjas under hela året, dvs den befintliga värmepumpen får inte vara så stor att den begränsar drifttiden för återvinningsanläggningen.

Dessutom erhålles lönsamheten i ett system som idag endast utnyttjar olja för sin produktion, där då investeringen i en värmepump, som utnyttjar återvinningsanläggningen sänker totalkostnaden i fjärrvärmesystemet.

De faktorer som starkt påverkar lönsamheten är dels elpriset och dels värdet för den ersatta energin. På senaste tiden (vintern - våren 1986) har priset på olja drastiskt sjunkit samtidigt som elpriset ökat något. Detta medför en kraftigt försämrad lönsamhet för projektet.

4. ÖVRIGA BEAKTANDE

4.1 Allmänt

I det följande beskrivs en del synpunkter som bör tas under beaktande innan projektet genomförs.

Driftskostnaden för distributionspumparna kommer att öka något i och med att kulvertförlusterna ökar i omfattning. I denna utredning har dock inte hänsyn tagits till detta beroende på dels att ökning är så liten och dels att det mesta av pumpenergin kommer att omvandlas till värme i fjärrvärmeledningarna.

4.2 Tjällyftning

Under tjälsäsongen påverkas den naturliga tjälbildningen i området närmast fjärrvärmeledningarna p g a den avgivna värmen från värmekulvertarna.

Tjällyftning innebär att när mark som innehåller stora mängder av vatten fryser, så kan markytan bli lägre över ledningen än vid sidan om. Speciellt vid lerjordar är rörelserna extra stora.

Effekterna som tjällyftning kan ha på värmekulvertar är;

- höjning av ledningarna när marken runt om ledningarna fryser.
- skapandet av en spricka över ledningarna eftersom den omgivande marken expanderar mera än marken ovanför ledningarna.

Här kan uppstå höjdskillnader på upptill ca 10 - 15 cm på kortare sträckor. Under tjällossningen sker en snabbare upptining av marken över fjärrvärmeledningen. Detta kan orsaka att ännu större höjdskillnader uppstår mellan marken över ledningarna och omgivande mark under tjällossningen.

Detta är ett problem som kan lösas genom en kraftig isolering av fjärrvärmeledningen eller markskivor.

Motsvarande effekt borde även modellen med utlagda värmeåtervinningsslangar medföra. Även här kan man ju tala om en extra isolering. Det är dock viktigt att se till att inte marken under ledningarna börjar frysa, då detta kan resultera i att FV-ledningarna skadas av tjällyftning. Dessa frågor bör utredas vidare och då förslagsvis under etapp C, i de praktiska försöken.

4.3 Vinterdrift

Under vintern när marktemperaturen sjunker till under 0 °C finns det risk för att vattnet i slangarna fryser. Vid en tillsats av antifrysmedel som ex. glykol påverkas vattnets värmekapacitivet, vilket innebär att mindre energi kan tas upp i slangarna. Med tanke på det framför allt under vinterperioden som fjärrvärmesystemet är i maximal drift med höga temperaturer som följd, kan det förefalla onödigt att tillsätta antifrysmedel. Skulle det av någon anledning bli ett så långvarigt avbrott i fjärrvärmeleveransen att risk för frostbildning föreligger är det förhållandevis enkelt att helt tömma systemet för att sedan köra in nytt vatten när värmeleveransen återupptas.

Detta är fullt tillämbart eftersom det är relativt små vattenmängder och ingen risk för korrosion eller dylikt föreligger i plastslangarna.

REFERENSER

Andersson 1984

Ekonomisk isoleringstjocklek för direktskummade fjärrvärmeledningar.

Claesson och Dunand 1983

Heat extraction from the ground by horizontal pipes.

Eneborg 1958

Beräkningar av värmeförluster från markledningar

Jansson 1984

Tjälproblem vid fjärrvärmeledningar i gator.

Jonasson m fl 1984

Metoder att minska värmeförluster i befintliga fjärrvärmesystem

Svenska VärmeverksFöreningen 1983

Fjärrvärmeplan 1983

Werner 1982,

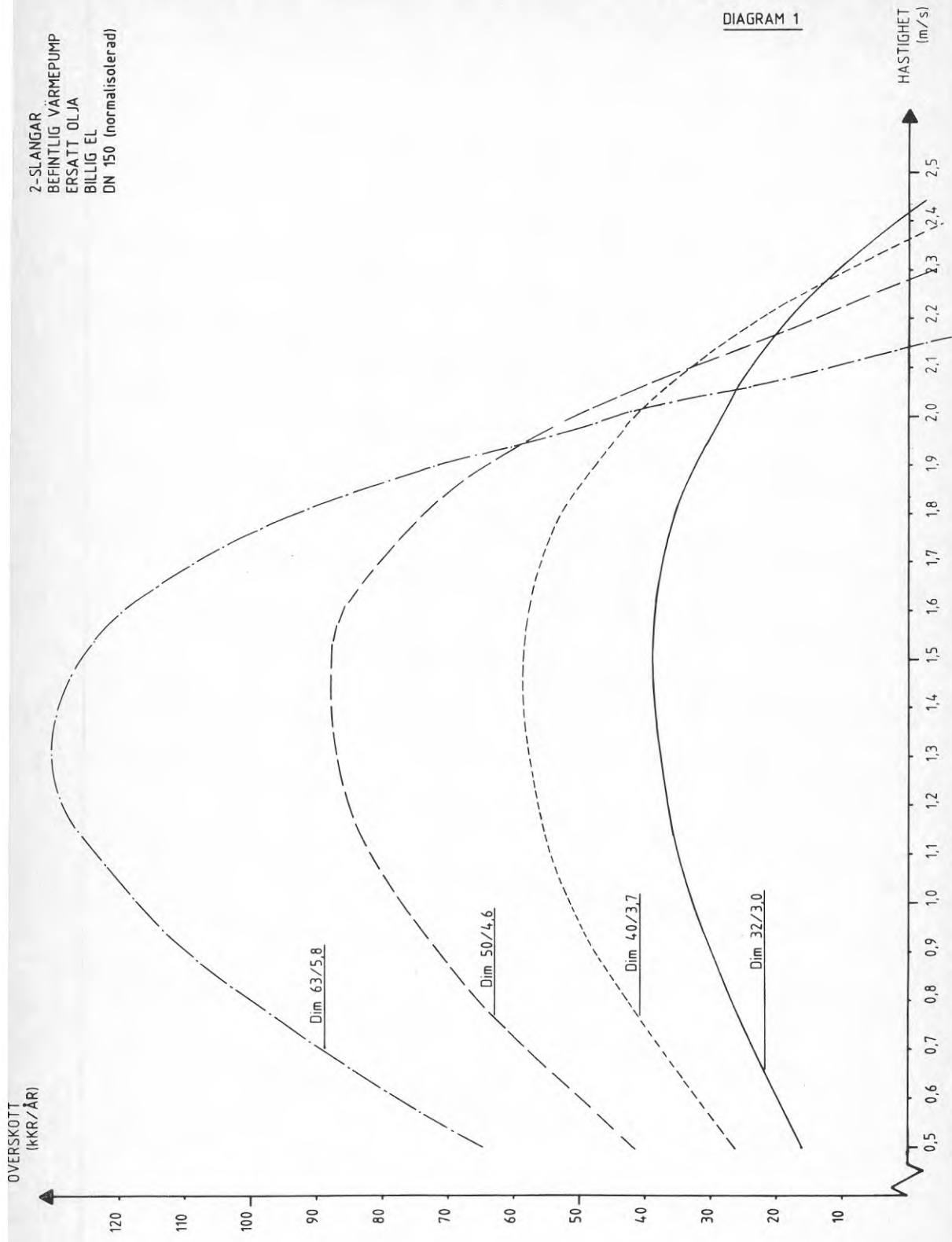
Värmeförluster vid fjärrvärmedistribution

BILAGOR

- 2.1 Temperaturstyrningsprogram
- 2.2 Årsmedeltemperatur i mark
- 2.3 Energibalans för fjärrvärmesystem
- 2.4 Varaktighetsdiagram
- 3.1 Termodynamiska beräkningar från LTH
- 3.2 Optimering av slangplacering
- 3.3 Teoretiska beräkningar från andra dimensioner än DN 150 normalisolerad
- 3.4 Datorutskrift av lönsamhetskalkyl

2-SLANGAR
BEFINTLIG VÄRMEPUMP
ERSÄTT OLJA
BILLIG EL
DN 150 (normalisolerad)

DIAGRAM 1



2-SLANGAR $\phi 63$
BEFINTLIG VARMEPUMP
DN 150 (normalisolerad)

DIAGRAM 2

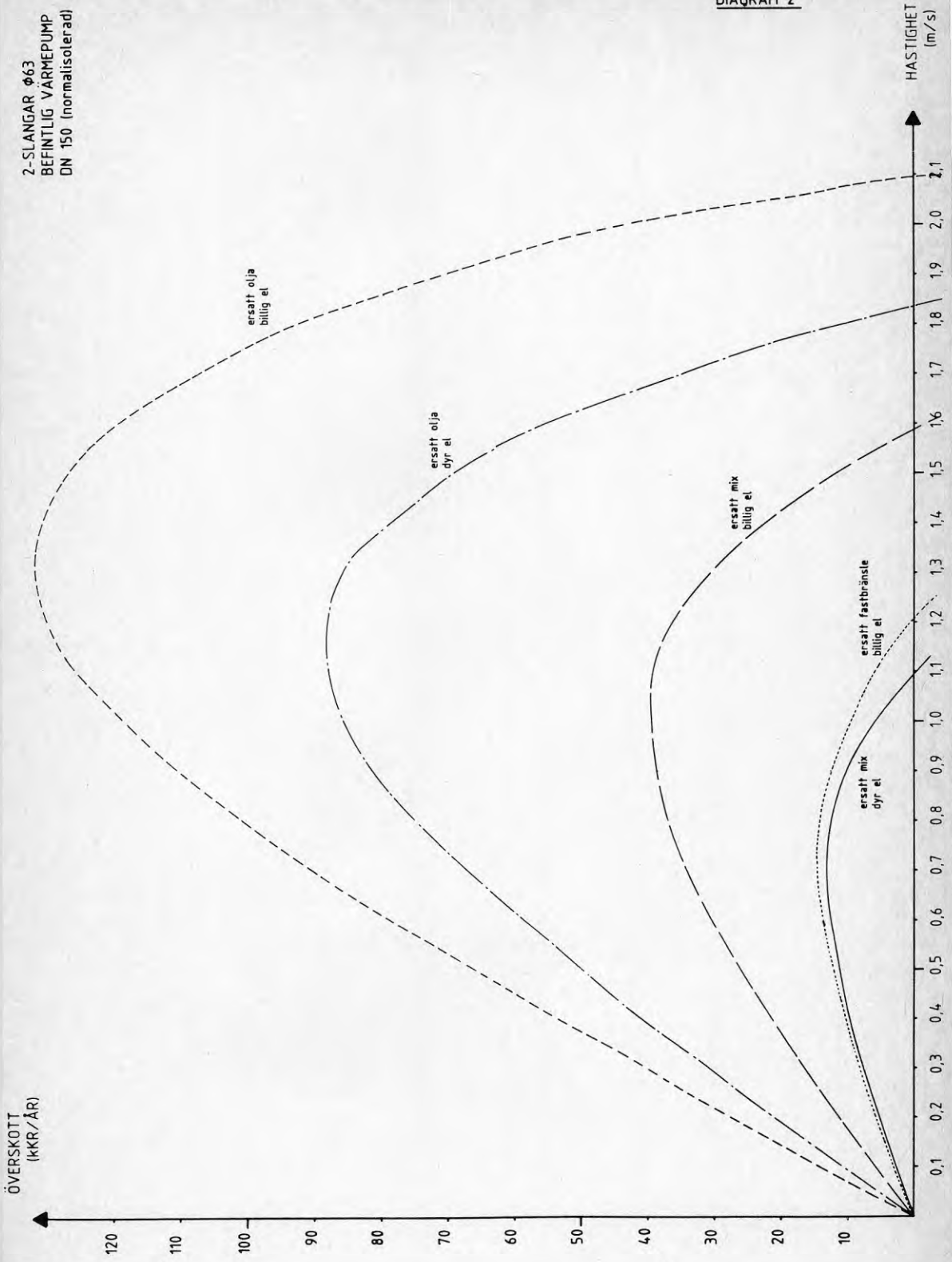
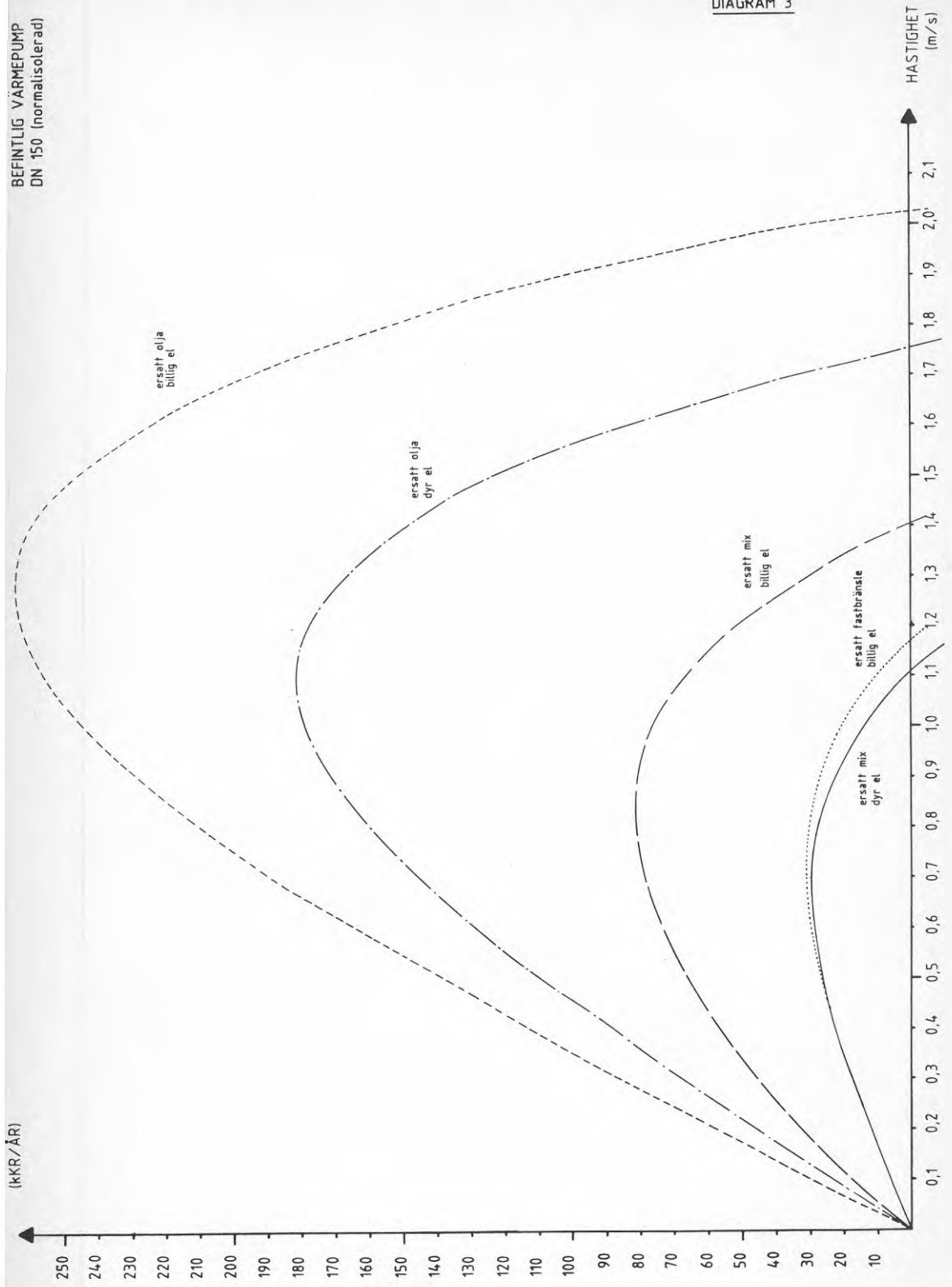
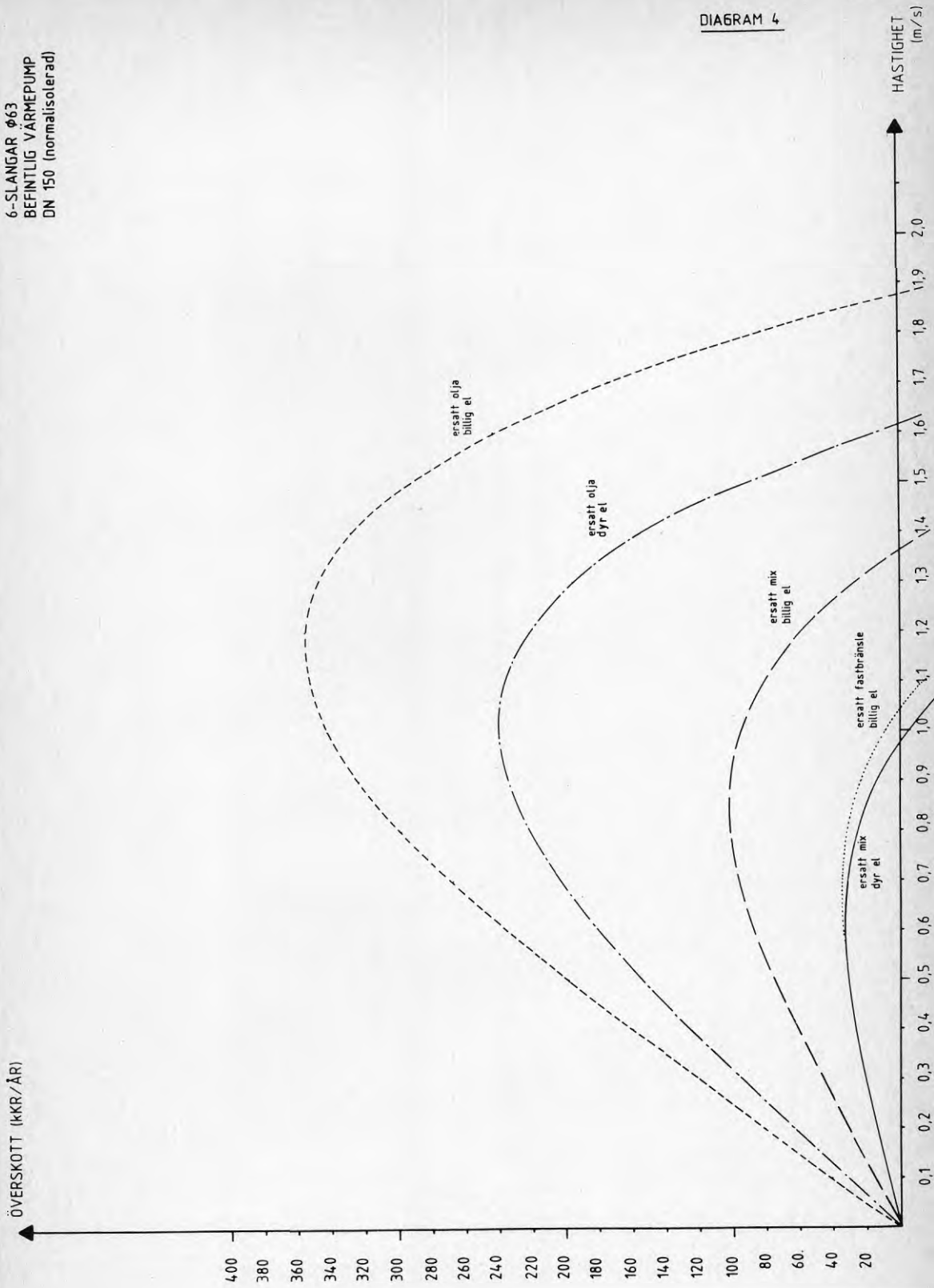


DIAGRAM 3



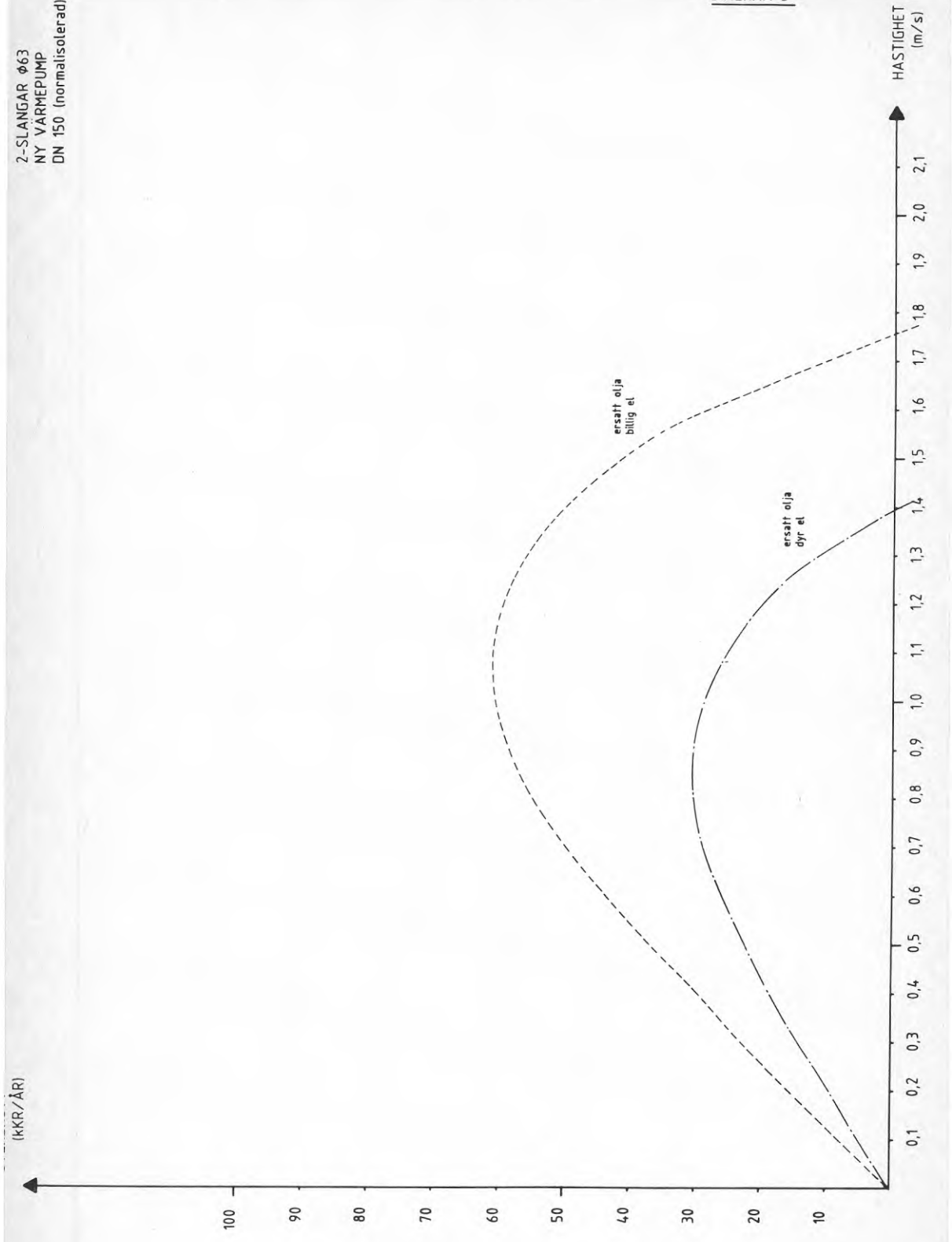
6-SLANGAR Ø63
BEFINTLIG VÄRMEPUMP
DN 150 (normalisolerad)

DIAGRAM 4



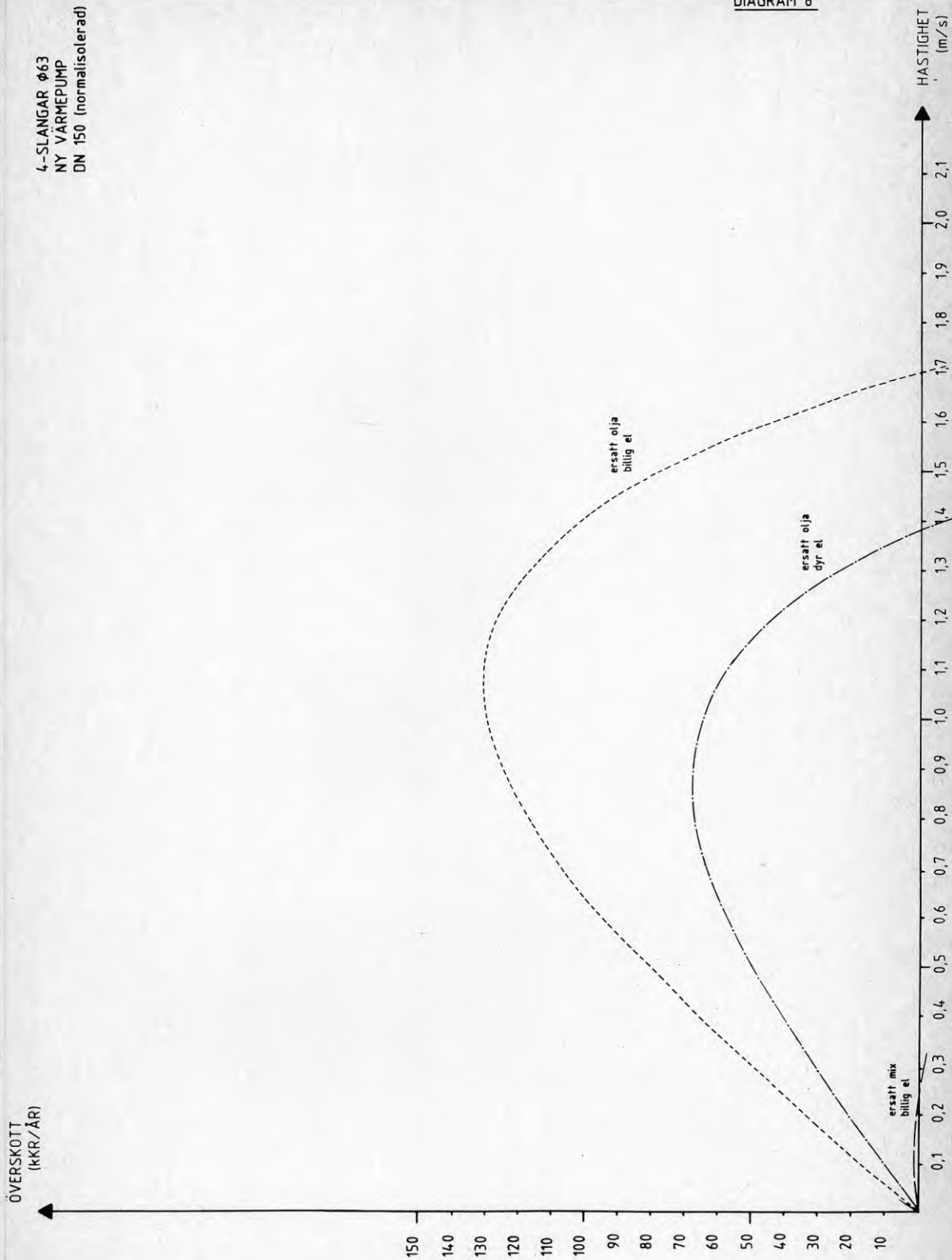
2-SLANGAR Ø63
NY VÄRMEPUMP
DN 150 (normalisolerad)

DIAGRAM 5



4-SLANGAR Ø63
NY VÄRMEPUMP
DN 150 (normalisolerad)

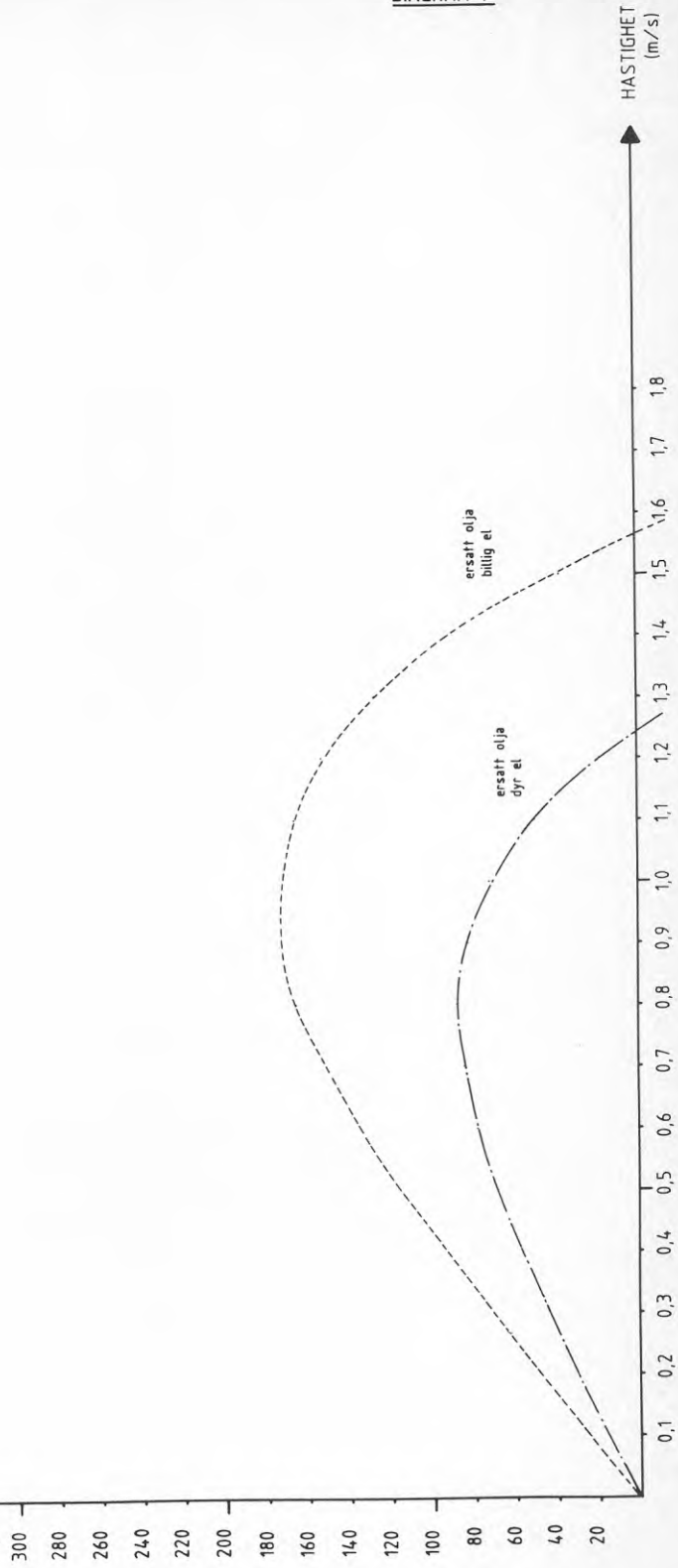
DIAGRAM 6



ÖVERSKOTT
(MKR/ÅR)

6-SLANGAR Ø63
NY VARMEPUMP
DN 150 (normalisolerad)

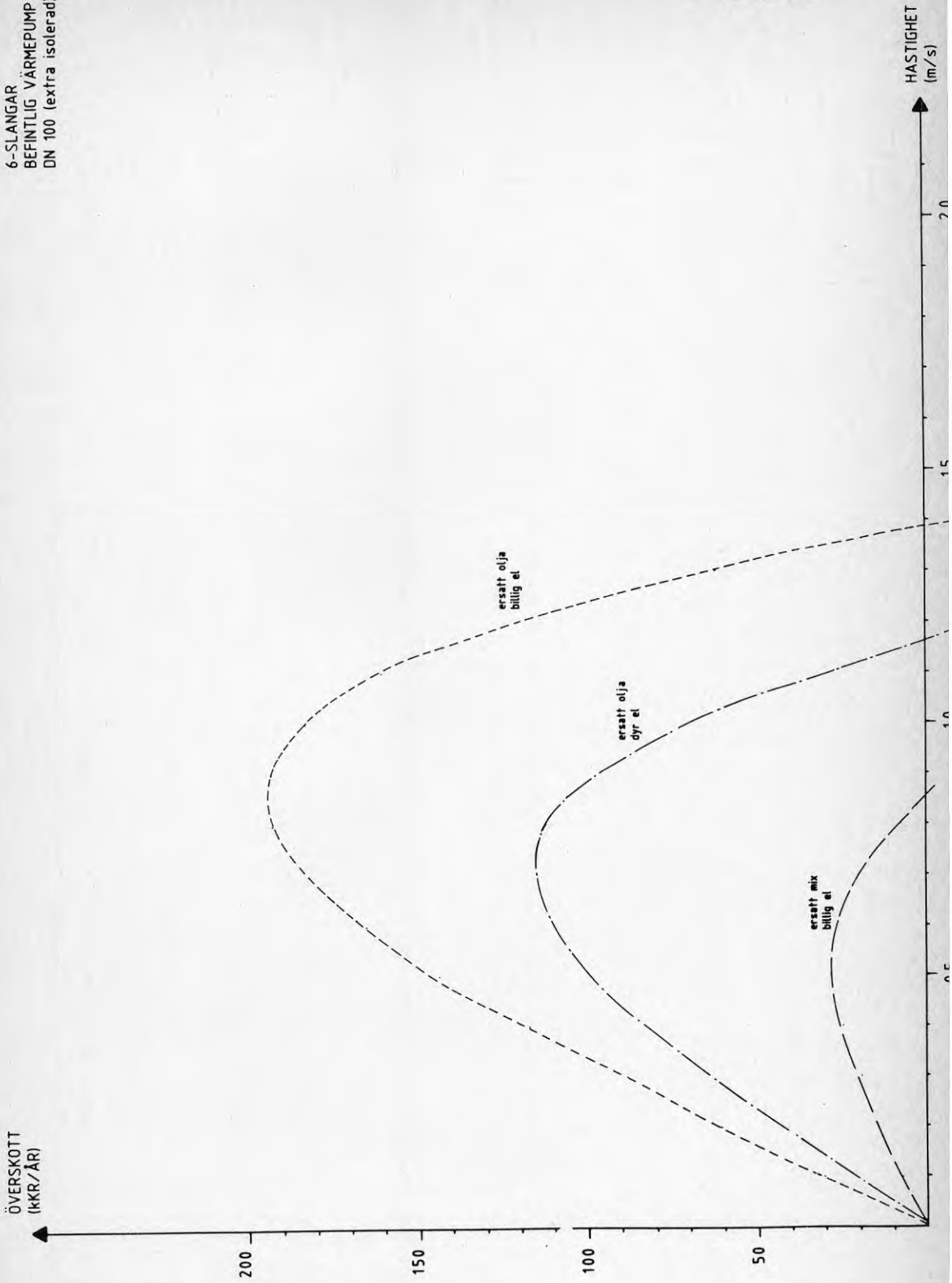
DIAGRAM 7



HASTIGHET
(m/s)

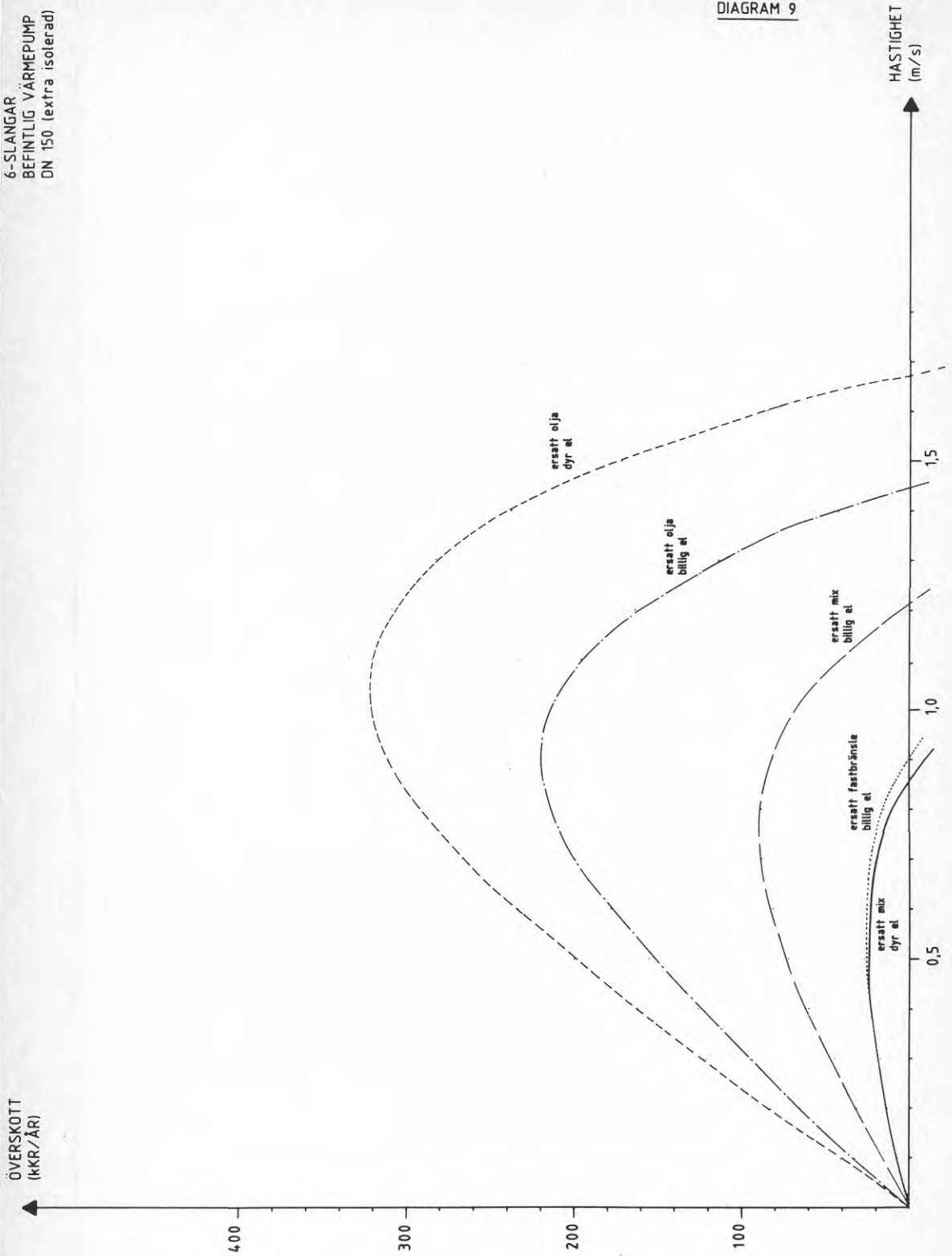
6-SLANGAR
BEFINTLIG VÄRMEPUMP
DN 100 (extra isolerad)

DIAGRAM 8



6-SLANGAR
BEFINTLIG VÄRMEPUMP
DN 150 (extra isolerad)

DIAGRAM 9



6-SLANGAR
BEFINTLIG VÄRMEPUMP
DN 200 (extra isolerad)

DIAGRAM 10

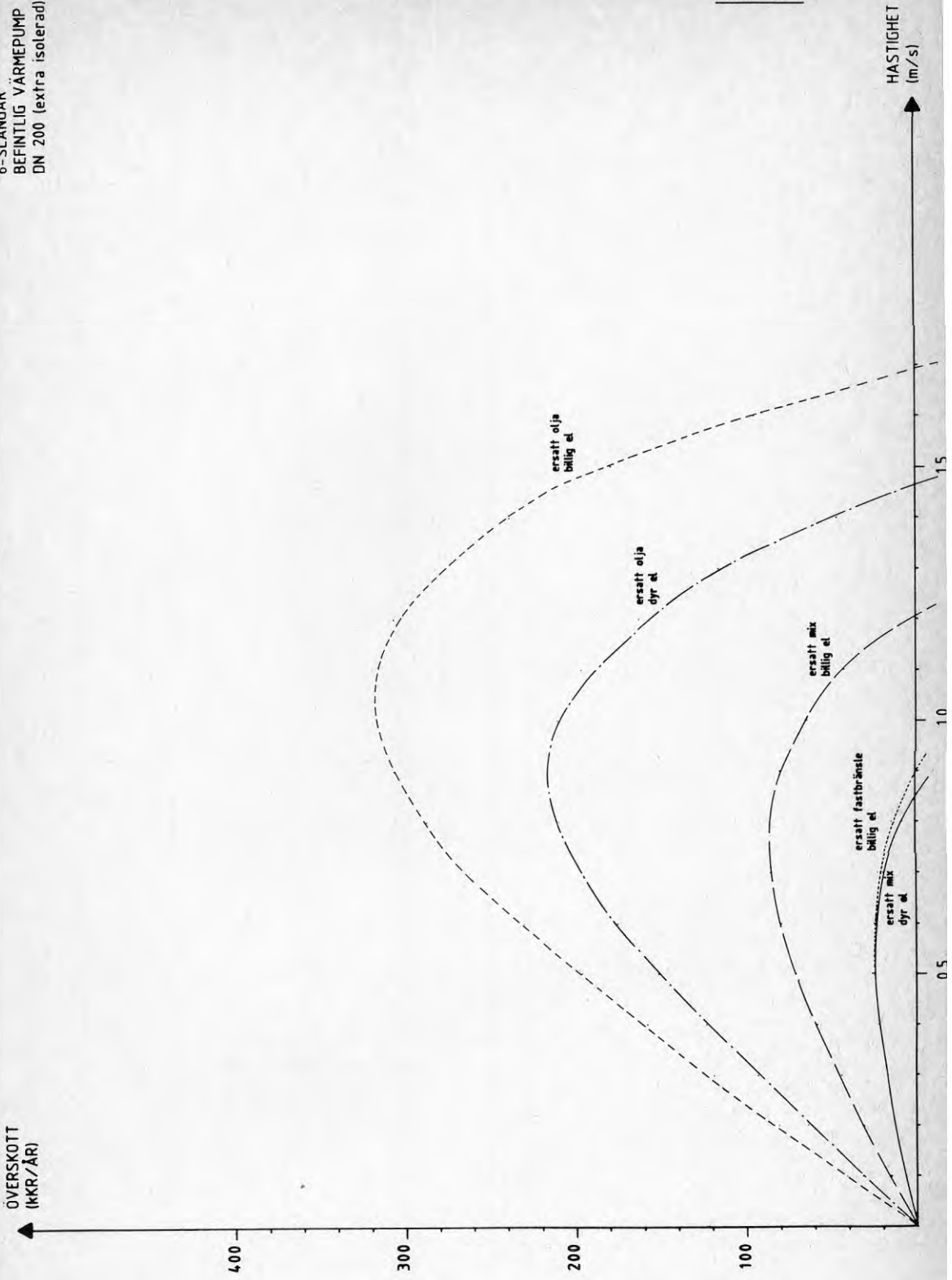
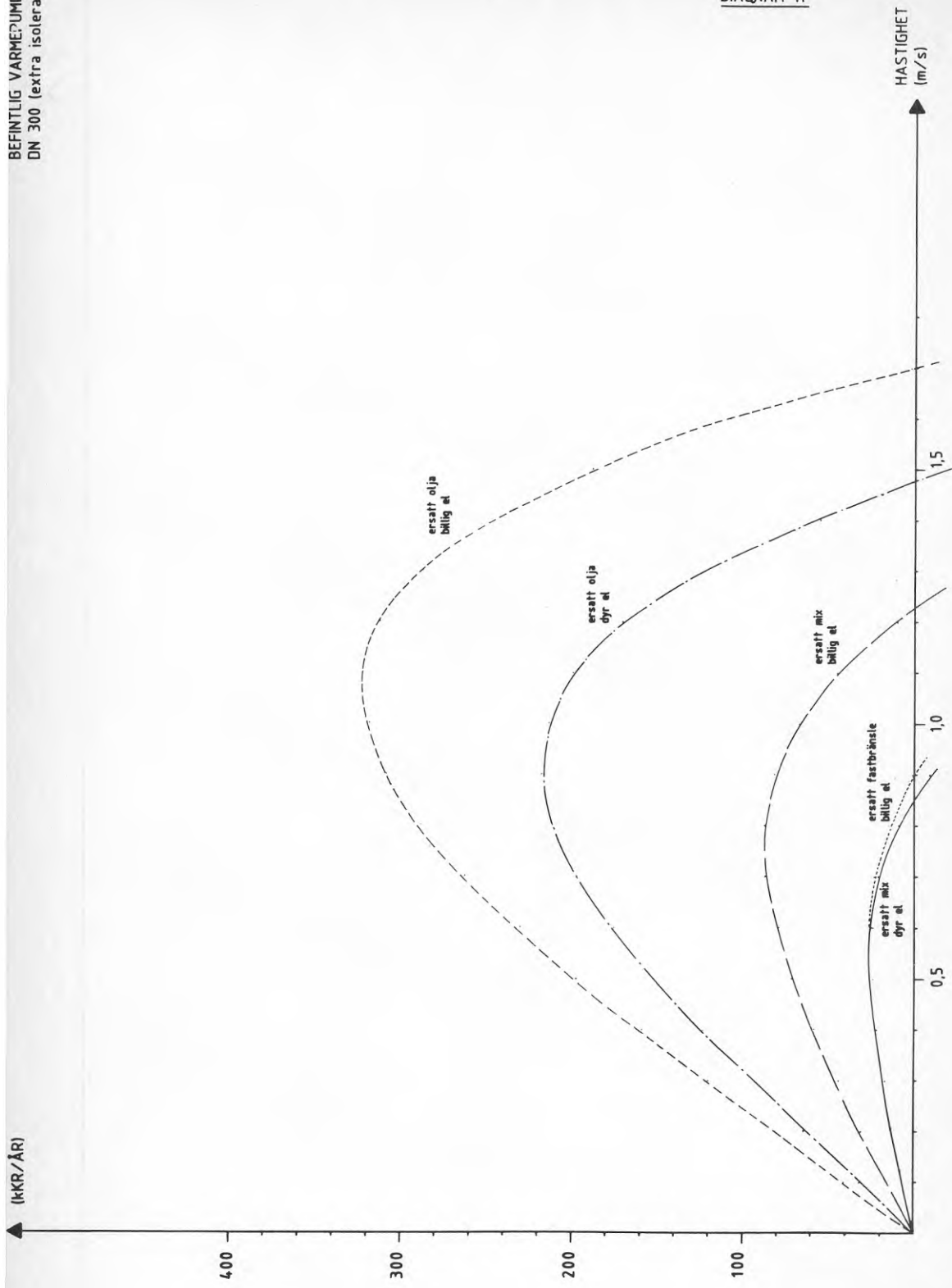


DIAGRAM 11

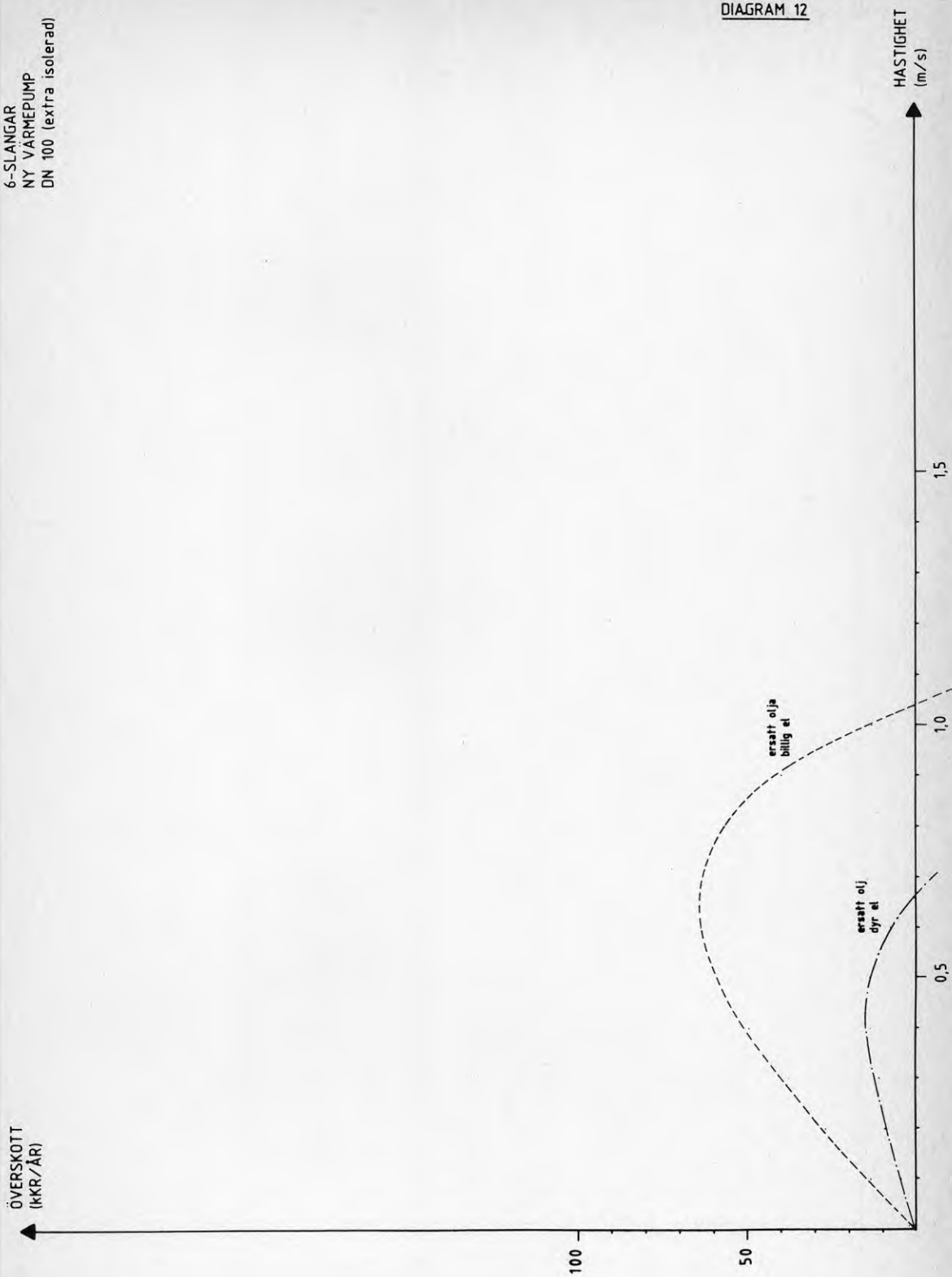


HASTIGHET
(m/s)

IKKR/ÅR

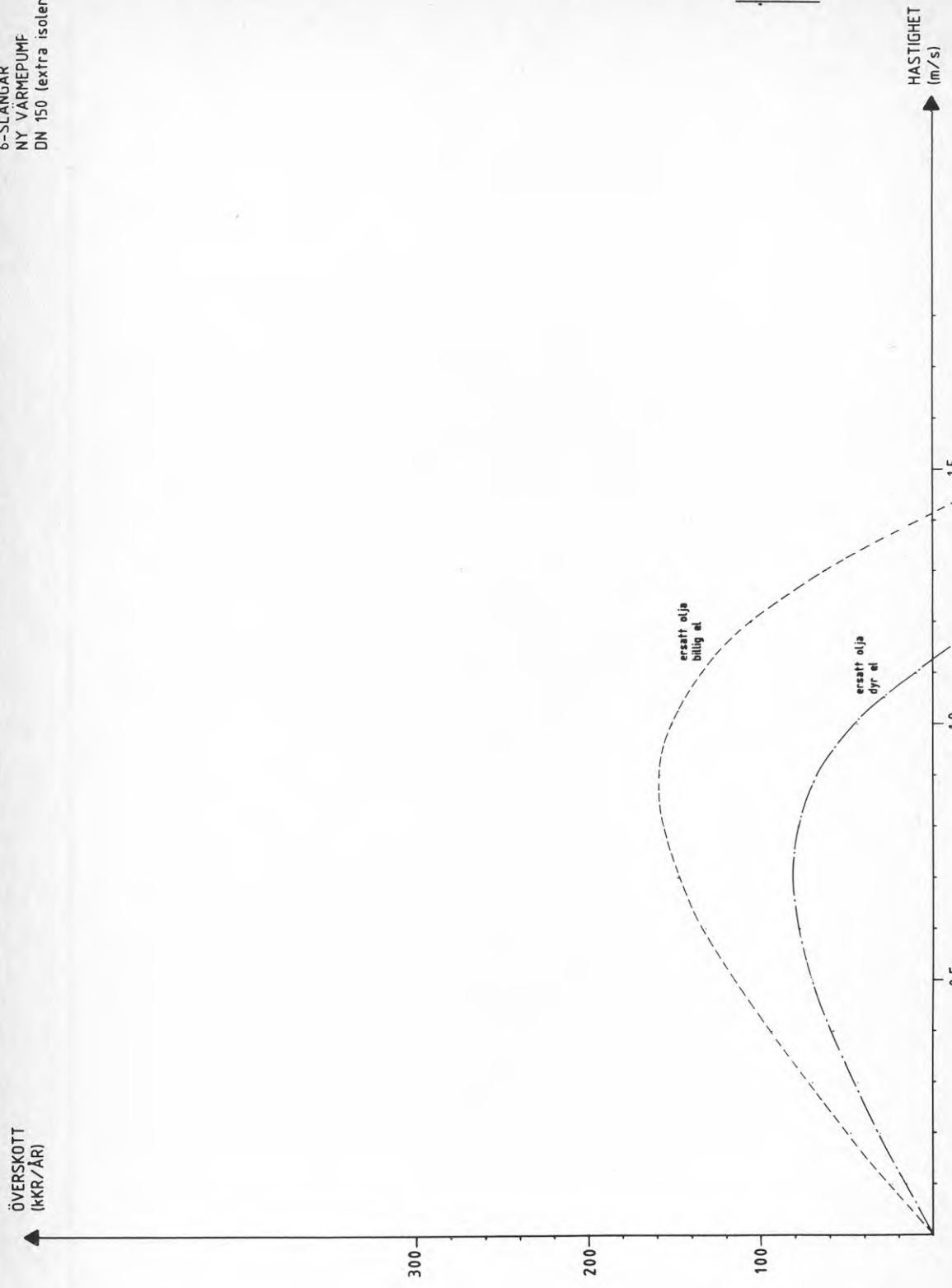
6-SLANGAR
NY VARMEPUMP
DN 100 (extra isolerad)

DIAGRAM 12



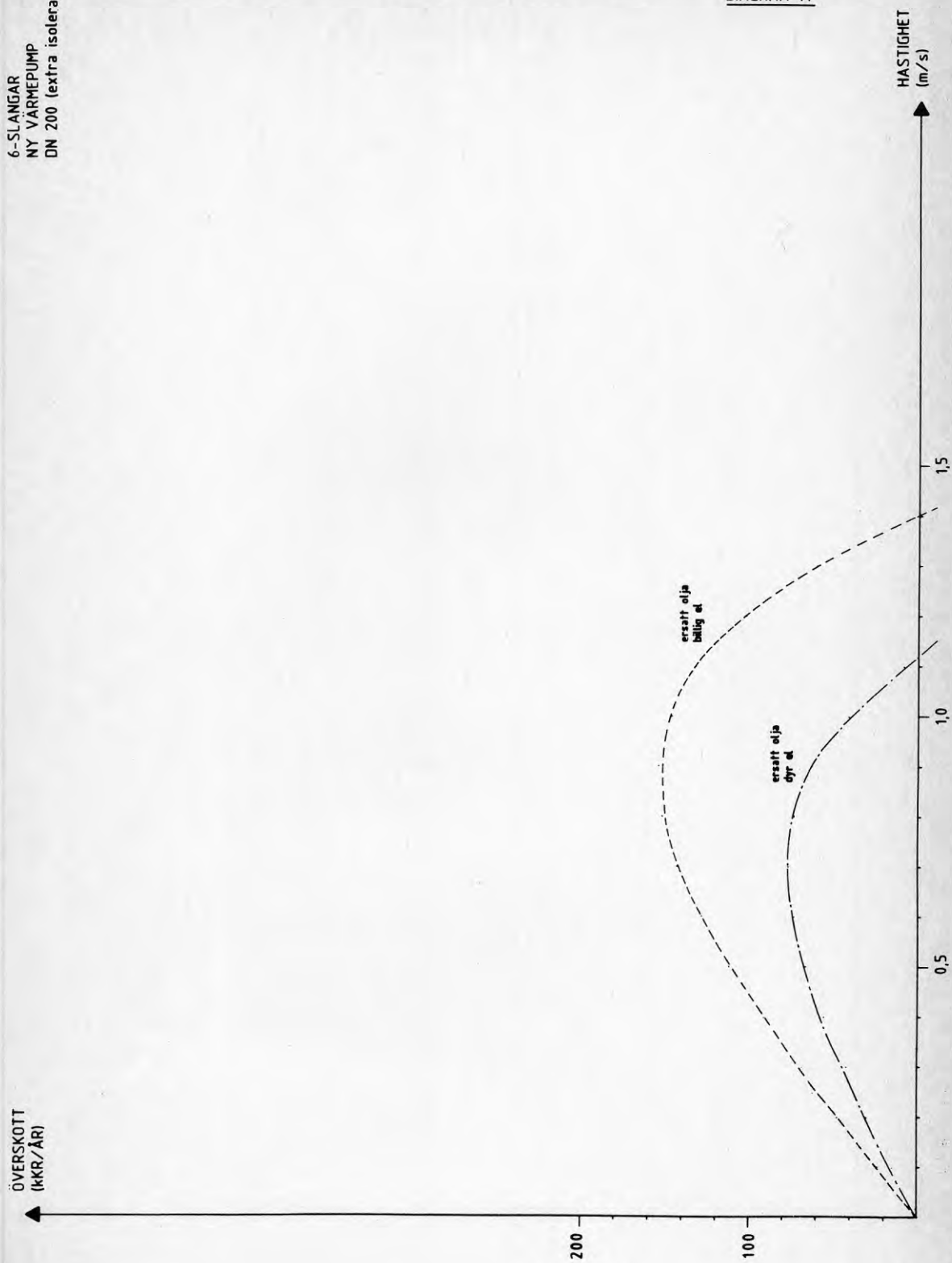
6-SLANGAR
NY VÄRMEPUMPF
DN 150 (extra isolerad)

DIAGRAM 13



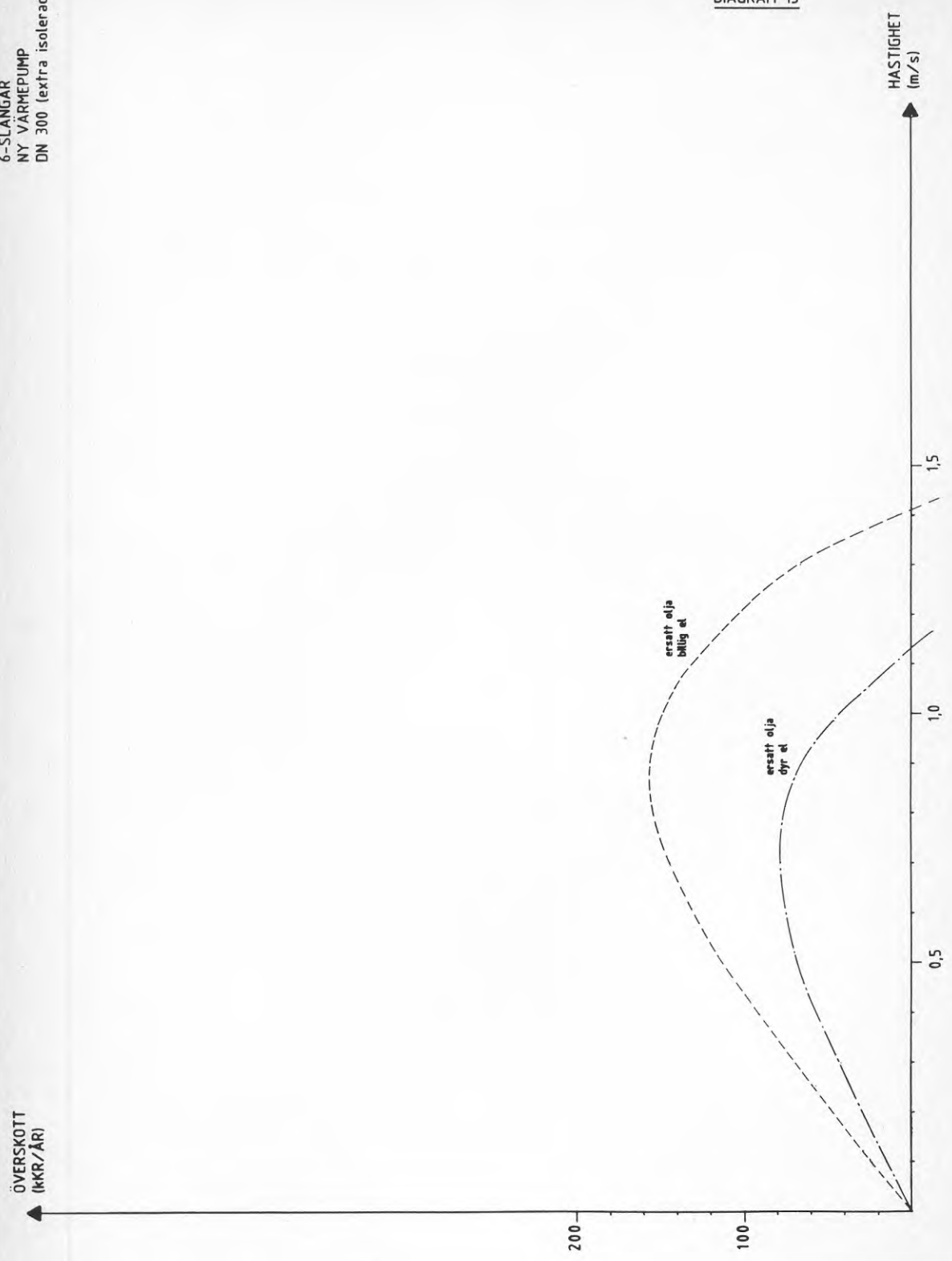
6-SLANGAR
NY VARMEPUMP
DN 200 (extra isolerad)

DIAGRAM 14

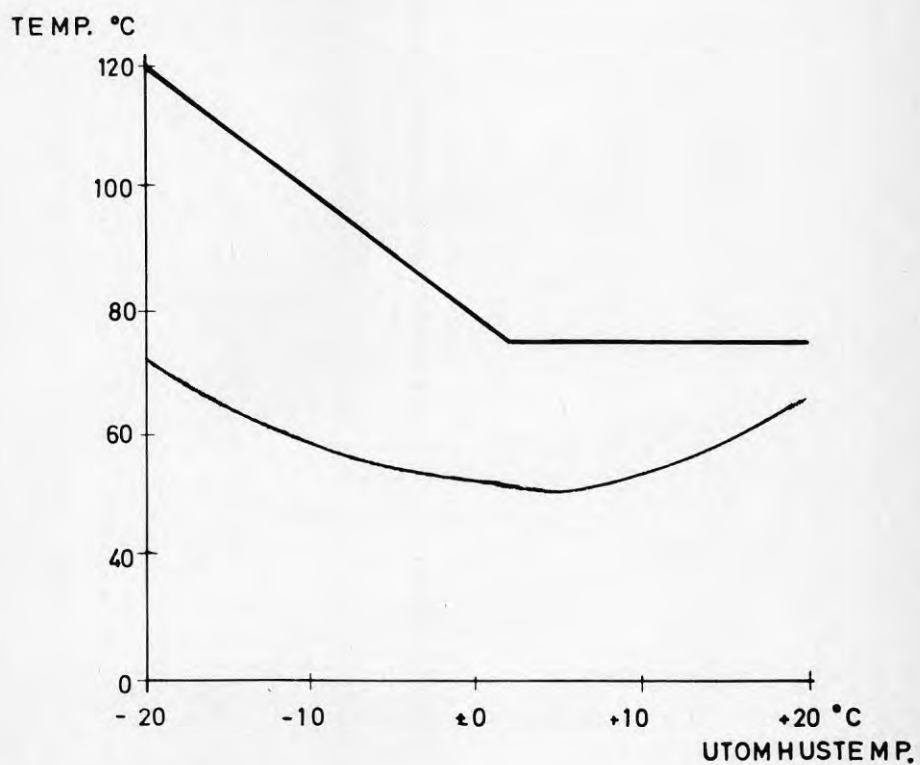


6-SLANGAR
NY VARMEPUMP
DN 300 (extra isolerad)

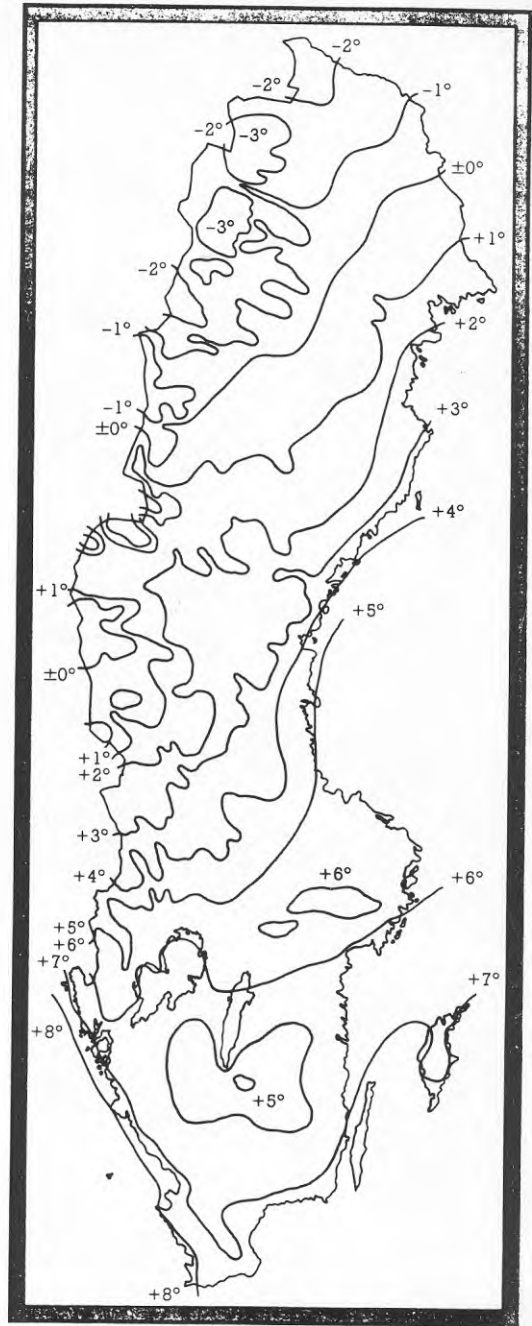
DIAGRAM 15



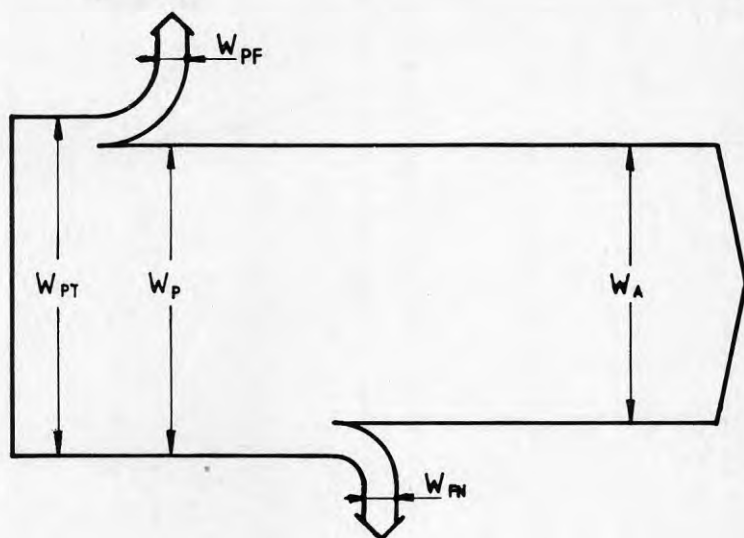
KONVENTIONELL FRAMLEDNINGSTEMPERATUR-
REGLERING I FJÄRRVÄRMENÄT



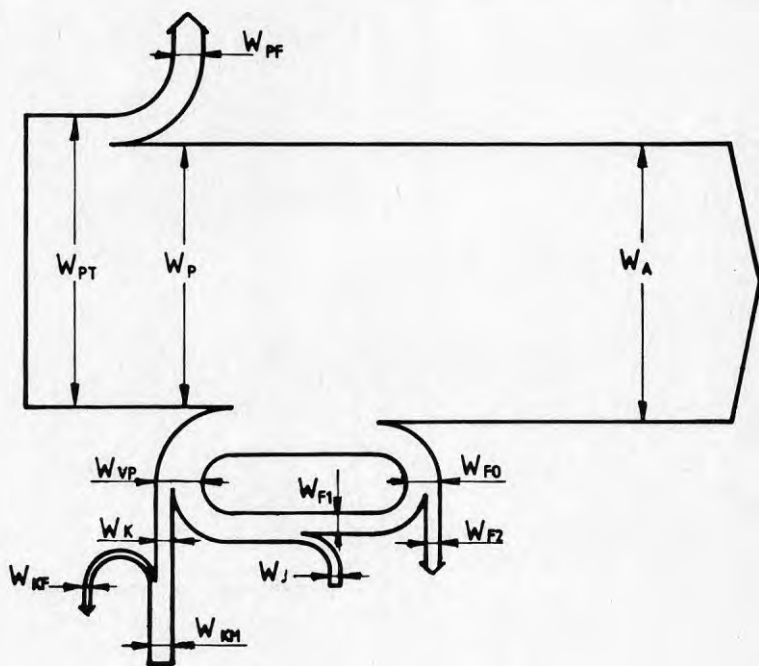
Geografiska temperaturzonen (tm°C)



Årsmedeltemperatur 1931 - 1960. SMHI.



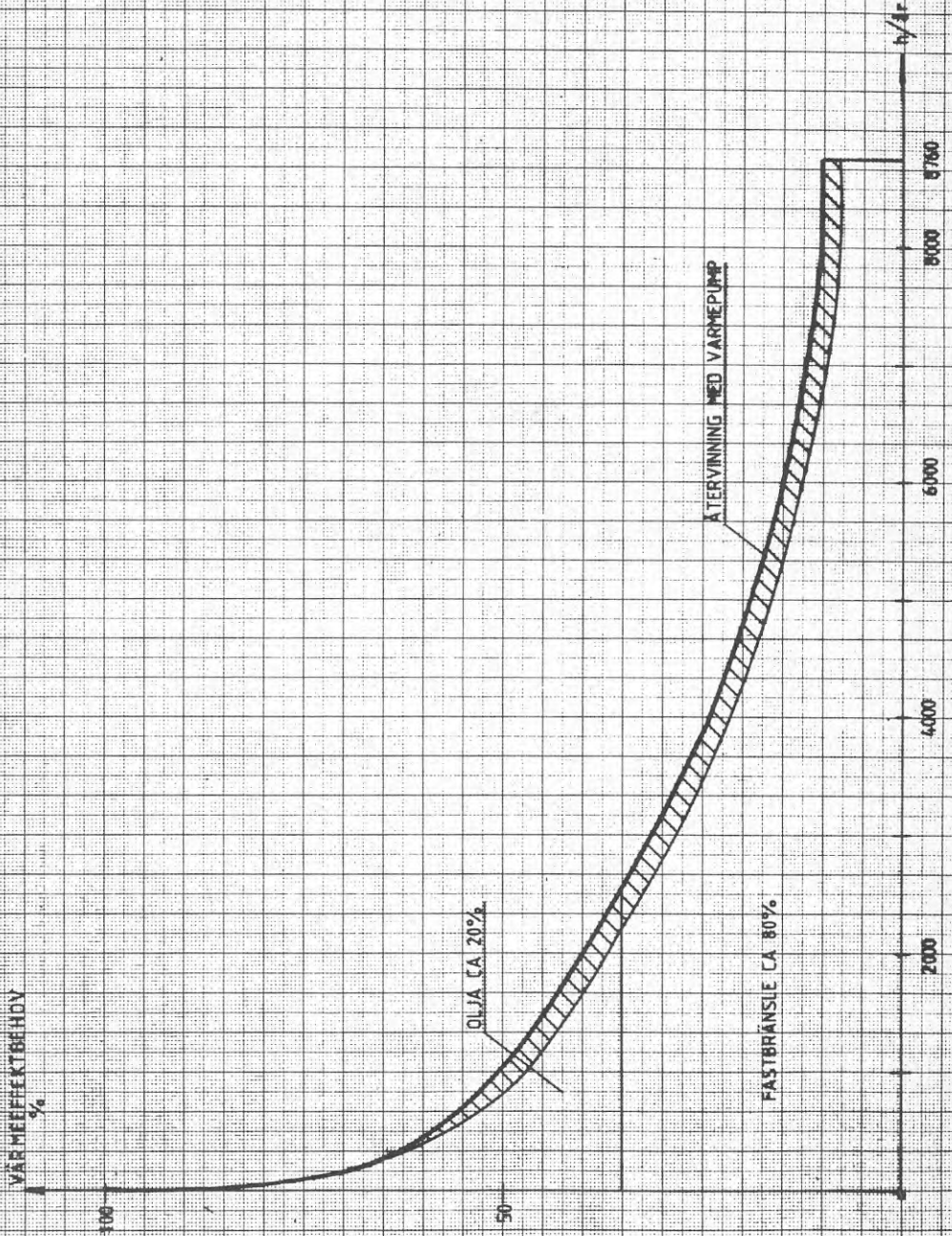
a) Energibalans i ett normalt fjärrvärmesystem



b) Energibalans efter införandet av återvinningsanläggning

ENERGITÄCKNING I ETT VANLIGT
FÖR VÄRME SYSTEM

T = 2500 h



HUSBYGGNADSTEKNIK
TEKNISKA HÖGSKOLAN I LUND

ÅTERVINNING AV VÄRMEFÖRLUSTER FRÅN
FJÄRRVÄRMEKULVERTAR

JOHAN CLAESSION
CARL-ERIC HAGENTOFT

CODEN:LUTVDG/(TVBH-7075)/1-14/(1983)

INNEHÅLL

	Sid.
1. Fjärrvärmekulvert med värmeåtervinningslangar.	3
2. Datormodell	4
2.1 Approximation av fjärrvärmerör.	4
2.2 Modell för värmeflöde till slangarna.	5
2.3 Programanpassning.	7
2.4 Test av approximation för fjärrvärmerör.	8
2.5 Test av modell för värmeflöde till slangarna.	9
3. Beräkningar för några olika slangkonfigurationer.	10

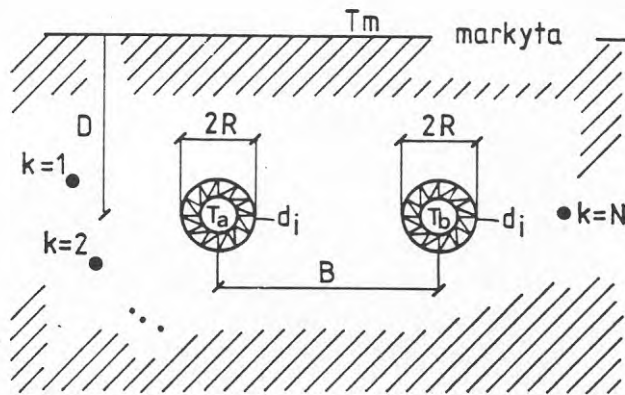
FÖRORD

På uppdrag av Byggforskningsrådet har en datormodell för återvinning av värmeförluster från fjärrvärmekulvertar framtagits. Modellen skall användas för att studera lämplig placering av värmeåtervinnings-slangar kring fjärrvärmekulvert.

Projektet drivs av AF-Energikonsult AB med Sven Olsson som projektledare.

1. FJÄRRVÄRMEKULVERT MED VÄRMEÅTERVINNINGSSLANGAR

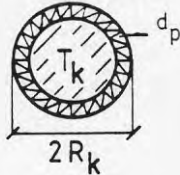
Figur 1 visar i ett tvärsnitt den studerade typen av fjärrvärmekulvert. Parallellt med fjärrvärmerören har N stycken värmeåtervinningsslangar utplacerats. Dessa slangar är av samma typ som används i ytjordvärme-system.



Figur 1. Fjärrvärmekulvert med kringliggande värmeåtervinnings-slangar.

- Beteckningar i figur 1:
- T_m Lufttemperatur ($^{\circ}\text{C}$).
 - T_a Framledningstemperatur ($^{\circ}\text{C}$).
 - T_b Returledningstemperatur ($^{\circ}\text{C}$).
 - R Fjärrvärmerörens radie inkl isolering (m).
 - D Avstånd från markyta till rörcentrum (m).
 - B Centrumavstånd mellan fram- och returledning (m).
 - d_i Fjärrvärmerörens isolertjocklek (m).
 - λ_i Värmeledningsförmåga för rörisolering (W/mK).
 - λ Jordens värmeledningsförmåga (W/mK).

Figur 2 visar ett tvärsnitt av den k:te slang.



T_k	Fluidtemperatur ($^{\circ}\text{C}$)
R_k	Slangens ytterrädie (m).
d_p	Slanghöljets tjocklek (m).
λ_p	Plastens värmeledningsförmåga (W/mK)

Figur 2. Värmeåtervinnings slang.

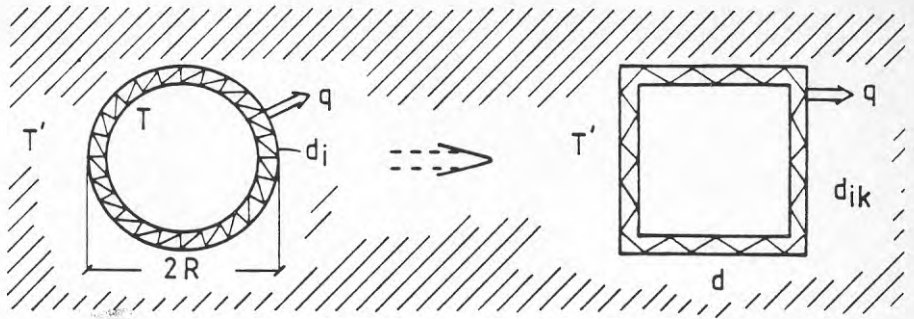
2. DATORMODELL

Ett allmänt datorprogram för tvådimensionell tidsvariabel värmeledning har modifierats för den aktuella tillämpningen.

De olika indatatemperaturerna (T_a , T_b , T_m , T_k) kan varieras relativt godtyckligt, om så önskas. Ett periodiskt värmeförlopp kan till exempel simuleras. Då man önskar ett årsmedelvärde för värmeförlusten från rören och värmeupptagningen i slangarna, fixeras temperaturerna till sina årsmedelvärden. Därefter får de transienta räkningarna pågå tills stationära värden uppnåtts.

2.1 Approximation av fjärrvärmerör

Det använda datorprogrammet förutsätter celler av rektangulär form. Se diagram A. Därför approximeras det cirkulära tvärsnittet med ett antal rektanglar. 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. Approximation av cirkulärt tvärsnitt med ett kvadratisk.

För att arean skall bibehållas gäller:

$$\pi R^2 = d^2 \Rightarrow d = \sqrt{\pi} \cdot R \quad (1)$$

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

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

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

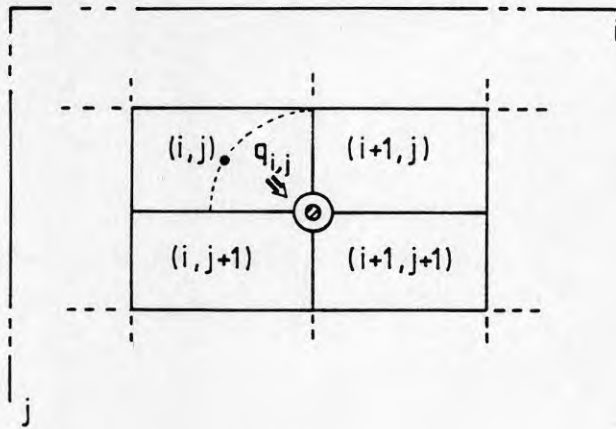
Ekvationerna bestämmer kvadratens isolertjocklek:

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

2.2 Modell för värme flöde till slangarna

Vi måste på något sätt komma ifrån den runda formen hos slangarna vid beräkningar involverande dessa. Det är samma geometriska problem som tidigare med fjärrvärmerören. Dessutom råder det en kraftig temperaturgradient nära slangerna, vilken kan vara besvärlig att efterlikna. Det krävs ett stort antal små celler lokalt vid slangarna. Detta innebär långa beräkningstider. En analytisk modell för slangarna skall därför införas.

Varje slang placeras ut så att dess centrum blir beläget i hörnet mellan fyra celler.



Figur 4. Värmeåtervinnings slang placerad i hörnet av fyra celler.
Cellindex inom parentes.

Värmeflödet från cell (i, j) till slangen betecknas $q_{i,j}$ (W/m). Mellan fluidtemperaturen T_k i slangen och temperaturen $T_{i,j}$ i cellens mittpunkt har man ett värmemotstånd över plastslangen och jorden fram till cellens mittpunkt.

Värmeflödet blir då:

$$q_{i,j} = \frac{1}{4} \cdot \frac{T_{i,j} - T_k}{m_k + \frac{\ln(D_{i,j}/R_k)}{2\pi \lambda_{i,j}}} \quad (3)$$

Där:	m_k	Motstånd i slanghölje = $\frac{\ln(R_k/(R_k - d_p))}{2\pi \lambda_p}$	(mK/W)
	$D_{i,j}$	Avstånd mellan slangcentrum och medelpunkt i cell (i,j).	(m)
	R_k	Slangens ytterradie.	(m)
	d_p	Slanghöljets tjocklek.	(m)
	$\lambda_{i,j}$	Värmeledningsförmåga i cell (i,j).	(W/mK)

Från de tre andra cellerna (i+1,j), (i,j+1) och (i+1,j+1) fås analoga bidrag.

2.3 Programanpassning

Datorprogrammet använder framåt differensmetoden. Programmet kompletteras med speciella rutiner för beräkning av värmeflödena till återvinnings slangarna.

Först beräknas nettovärmeflödena för cellerna enligt det ursprungliga programmet. Därefter kompletteras värmeflödena för cellerna kring slangarna enligt i avsnitt 2.2 beskrivet sätt, varefter det nya temperaturfältet kan räknas fram.

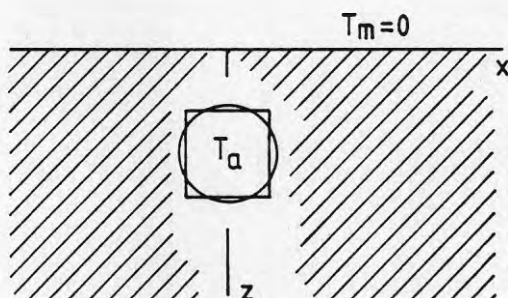
2.4 Test av approximation för fjärrvärmerör

Det cirkulära fjärrvärmeröret approximeras enligt avsnitt 2.1 med ett kvadratisk rör med samma area och värmemotstånd. Se figur 3. För att testa denna approximation ser vi på det stationära temperaturfältet från ett enda rör. Vi tar följande data:

$D = 0,72 \text{ m}$	$R = 0,12 \text{ m}$
$d_i = 0,0307 \text{ m}$	$\lambda_i = 0,04 \text{ W/mK}$
$\lambda = 1,0 \text{ W/mK}$	$T_a = 100 \text{ }^\circ\text{C}$
$T_m = 0 \text{ }^\circ\text{C}$	

Detta ger för kvadratapproximationen:

$$\begin{array}{ll}
 D = 0,72 \text{ m} & d = 0,212 \text{ m} \\
 d_{ik} = 0,04 \text{ m} & \lambda_i = 0,04 \text{ W/mK} \\
 \lambda = 1,0 \text{ W/mK} & T_a = 100 \text{ }^\circ\text{C} \\
 T_m = 0 \text{ }^\circ\text{C} &
 \end{array}$$



Figur 5. Test av approximation av fjärrvärmerör.

Temperaturen i marken utanför det cirkulära röret kan beräknas analytiskt. Enligt (*) blir den:

$$T(x,z) = 5,1 \cdot \ln \left(\frac{x^2 + (z+0,72)^2}{x^2 + (z-0,72)^2} \right) \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (4)$$

Värmeflödet från röret blir:

$$q = 64,1 \text{ W/mK} \quad (4')$$

De numeriskt framräknade värdena för kvadratapproximationen stämmer väl med den analytiska lösningen. Det numeriskt beräknade värmeflödet q blev 63,7 (W/mK). Skillnaden är bara 0,6%. Efter två månaders transienta beräkningar var temperaturfältet kring röret någorlunda

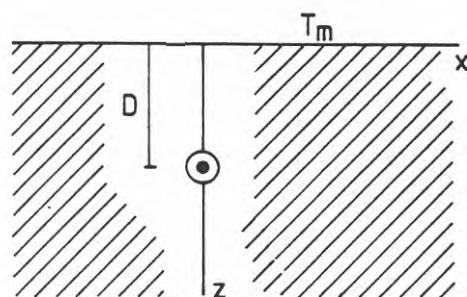
(*) Temperaturen kring isolerade rör i jord. Johan Claesson, 1970. Arbetsrapport 1970:2. Byggnadskonstruktionslära, LTH.

stationärt. Maximal skillnad mellan numeriska och analytiska värden på temperaturen var då 3%.

2.5 Test av modell för värmeflöde till slangarna

Med hjälp av den analytiska formeln för en slang kan vår modell för värmeflödet till en slang (enligt avsnitt 2.2) testas.

Data enligt figur 6 användes.



$$\begin{aligned} T_m &= 0 \text{ } ^\circ\text{C} \\ T_k &= 100 \text{ } ^\circ\text{C} \\ R_k &= 0,02 \text{ m} \\ r_k &= 0,0163 \text{ m} \\ D &= 0,0755 \text{ m} \\ \lambda &= 1,2 \text{ W/mK} \\ \lambda_p &= 0,38 \text{ W/mK} \end{aligned}$$

Figur 6. Data för testfall.

Enligt (*) blir det analytiska uttrycket för temperaturfältet:

$$T(x,z) = 10,1 \cdot \ln \left(\frac{x^2 + (z+0,0755)^2}{x^2 + (z-0,0755)^2} \right) \text{ } (^\circ\text{C}) \quad (5)$$

Värmeflödet från röret blir:

$$q = 151,7 \text{ W/m} \quad (5')$$

De numeriskt framräknade värdena erhöles efter cirka 1 månads transienta beräkningar. Stationaritet hade då i stort sett erhållits. Temperaturerna sjönk dock en aning i cellerna långt borta från slangerna. Det beräknade värmeflödet blev 154,9 W/mK. Skillnaden mellan det numeriskt och det analytiskt framräknade värmeflödet från slangerna är cirka 2%. I temperaturfältet är skillnaden mindre än 3%.

Dessa uppskattningar av skillnaden mellan numeriska och analytiska resultat är i överkant, då temperaturfältet tenderar att överensstämma allt bättre ju längre beräkningarna fortgår.

3 BERÄKNINGAR FÖR NÅGRA OLIKA SLANGKONFIGURATIONER

Beräkningar för några olika slangkonfigurationer runt kulverten har gjorts. Cellstrukturen bestod av 30×39 celler. Följande data har använts:

Rör:	$R = 0,12 \text{ m}$	$T_a = 90 \text{ }^\circ\text{C}$
	$D = 0,72 \text{ m}$	$T_b = 60 \text{ }^\circ\text{C}$
	$B = 0,45 \text{ m}$	$\lambda_i = 0,03 \text{ W/mK}$
	$d_i = 0,036 \text{ m}$	

Slang:	$R_k = 0,02 \text{ m}$	$T_k = 8 \text{ }^\circ\text{C}$
	$r_k = 0,0163 \text{ m}$	

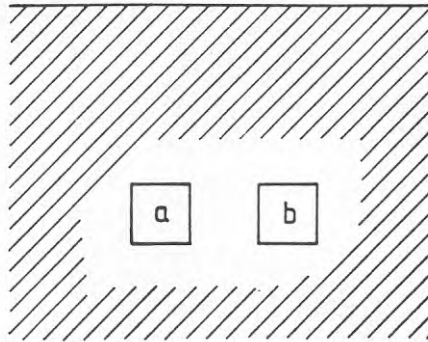
Mark:	$\lambda = 1,2 \text{ W/mK}$	$T_m = 8 \text{ }^\circ\text{C}$ (årsmedeltemperatur)
-------	------------------------------	---

För rörapproximationen fås enligt (1) och (2): $d = 0,213 \text{ m}$ och $d_{ik} = 0,0483 \text{ m}$. Värmemotståndet m_k över slanghöljet blir enligt avsnitt 2.2 lika med $0,0857 \text{ mK/W}$.

Temperaturen i slangarna har valts lika med markytans temperatur. Detta innebär att slangarna enbart "suger" upp energi från fjärrvärmerören. Olika konfigurationer av slangar har provats för att på olika sätt "skärma" fjärrvärmerören. Vid god skärmning ökar förlusterna från rören, vilket måste vägas in vid en bedömning.

Först redovisas värmeförluster från fjärrvärmekulvert utan slangar. Därefter behandlas fyra olika konfigurationer med mellan fyra och sex slangar. Värmeförlusten per meter (W/m) från rör a och b betecknas q_a och q_b . Värmeupptagning per meter (W/m) från slang k betecknas q_k .

Fjärrvärmekulvert utan slangar:



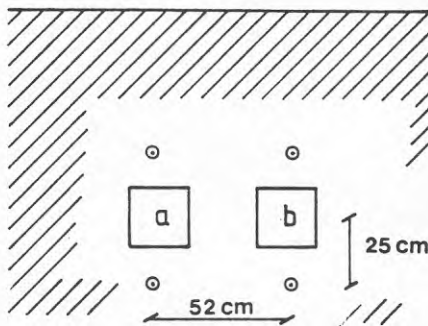
$$q_a = 35,6 \text{ (W/m)}$$

$$q_b = 21,2$$

$$\text{Total värmeförlust} = 56,8.$$

Figur 7. Fjärrvärmekulvert utan värmeåtervinningslangar.

Konfiguration I:



$$q_a = 38,8 \text{ (W/m)}$$

$$q_b = 24,1$$

$$\text{Total värmeförlust} = 62,9.$$

$$q_1 = 11,5$$

$$q_2 = 13,0$$

$$q_3 = 8,9$$

$$q_4 = 10,3$$

$$\text{Total värmeupptagning} = 43,7.$$

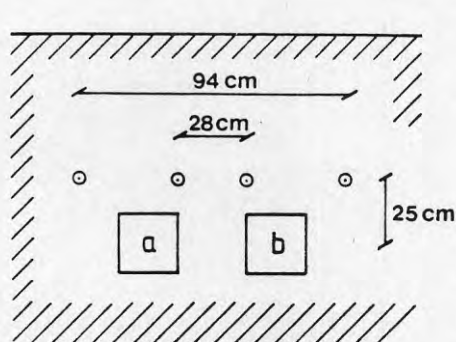
Figur 8. Fjärrvärmekulvert med fyra kringliggande värmeåtervinningslangar.

Den nya nettoförlusten blir: $62,9 - 43,7 = 19,2 \text{ (W/m)}$. Detta värde skall jämföras med värmeförlusten utan slangar $56,8 \text{ (W/m)}$.

$$\text{Minskning av värmeförlust i procent: } 100 \cdot \frac{56,8 - 19,2}{56,8} = 66\%$$

$$\text{Extra förlust från fjärrvärmekulvert i procent: } 100 \cdot \frac{62,9 - 56,8}{56,8} = 11\%.$$

Konfiguration II:



$$q_a = 37,6 \text{ (W/m)}$$

$$q_b = 23,0$$

$$\text{Total värmeförlust} = 60,6.$$

$$q_1 = 8,0$$

$$q_2 = 11,5$$

$$q_3 = 9,4$$

$$q_4 = 6,0$$

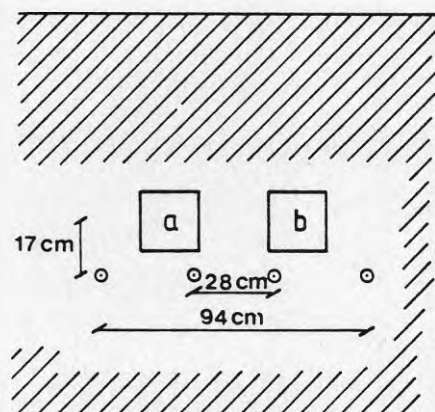
$$\text{Total värmeupptagning} = 34,9.$$

Figur 9. Fjärrvärmekulvert med fyra ovanförliggande värmeåtervinningslangor.

Minskning av värmeförlust: 55%

Extra förlust från fjärrvärmekulvert: 7%.

Konfiguration III:



$$q_a = 38,8 \text{ (W/m)}$$

$$q_b = 24,0$$

$$\text{Total värmeförlust} = 62,8.$$

$$q_1 = 8,2$$

$$q_2 = 13,0$$

$$q_3 = 10,2$$

$$q_4 = 6,0$$

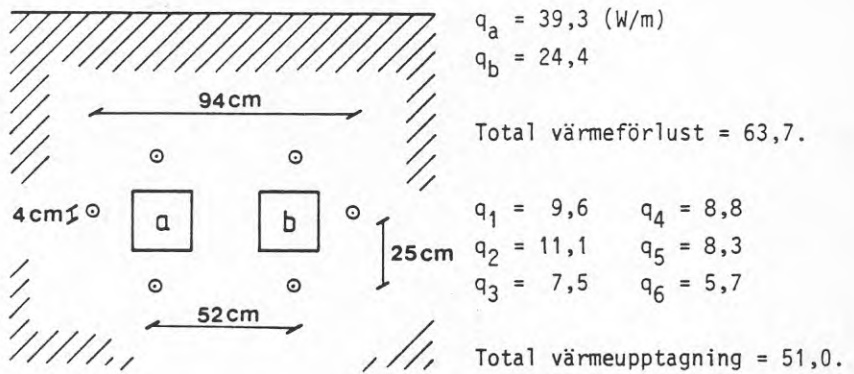
$$\text{Total värmeupptagning} = 37,4.$$

Figur 10. Fjärrvärmerör med fyra nedanförliggande värmeåtervinningslangor.

Minskning av värmeförlust: 55%

Extra förlust från fjärrvärmekulvert: 11%.

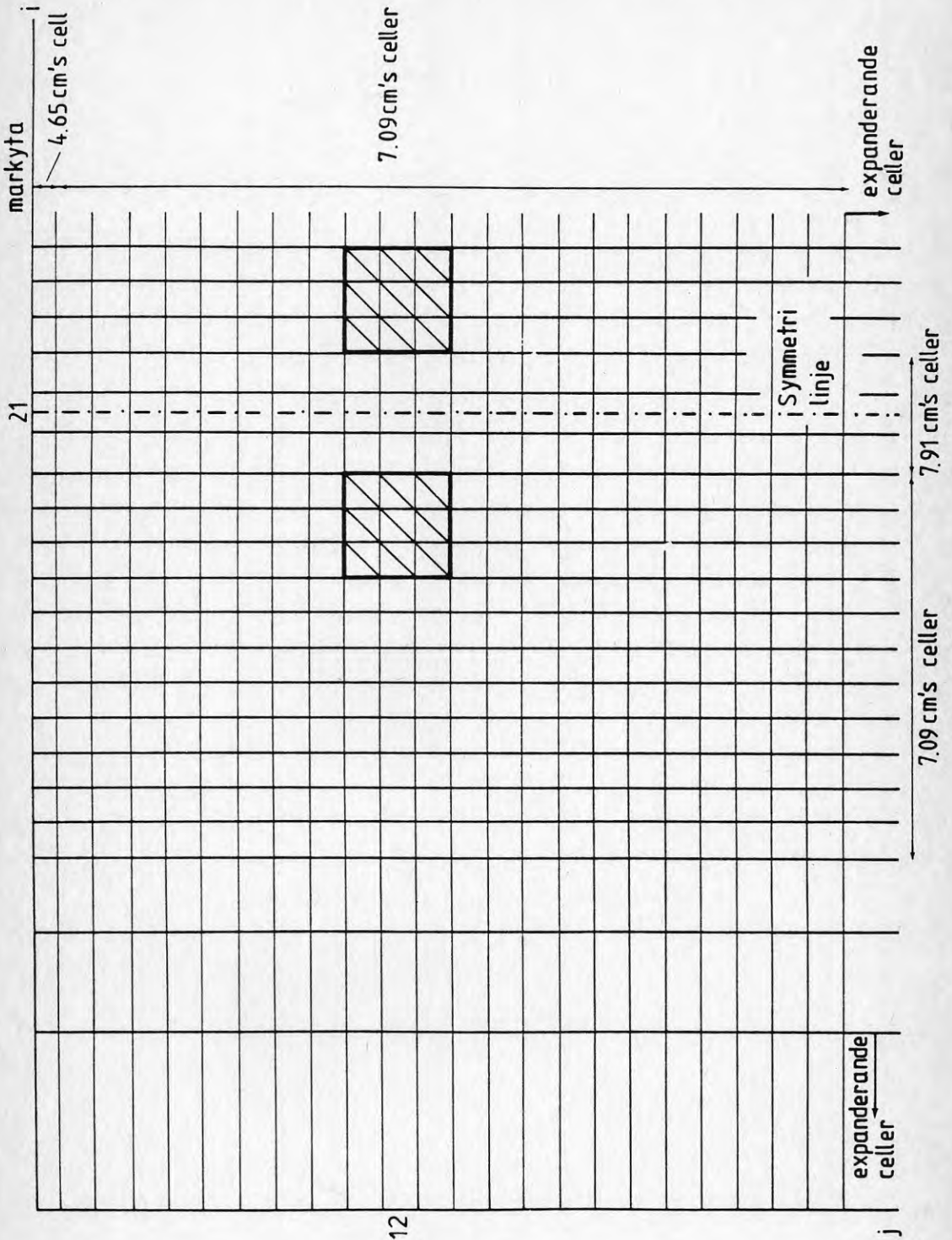
Konfiguration IV:



Figur 11. Fjärrvärmerör med sex kringliggande värmeåtervinnings-slangar.

Minskning av värmeförlust: 77%

Extra förlust från fjärrvärmekulvert: 12%.



1. OPTIMERING AV SLANGPLACERING

1.1 Allmänt

I avsikt att optimera slangarnas placering runt fjärrvärmeledningarna har ett antal datorberäkningar utförts med gemensamma förutsättningar och endast slangarnas placering har varierats.

Följande beteckningar och förutsättningar är oförändrade i samtliga driftfall.

T_f = Temperatur, framledning = 90 °C

T_r = Temperatur, returledning = 60 °C

T_m = Temperatur i mark och
medeltemperatur i slangar = 8 °C

i_i = Värmekonduktivitet, isolering = 0.03 W/m °C

i_m = Värmekonduktivitet, mark = 1.2 W/m °C

i_p = Värmekonduktivitet, slang = 0.38 W/m °C

D = Förläggningsdjup från markytan
till rörens centrum = 0.72 m

r = Ytterradie på fjärrvärmerören = 0.12 m

d_i = Isolerings tjocklek = 0.036 m

B = Avstånd mellan centrum på fjärrvärmerören = 0.45 m

r_s = Ytterradie på slangarna = 0.02 m

q_n = Effektopptagning i slang n (n=1,6) (W/m)

q_f = Effektförlust från framledningen (W/m)

q_r = Effektförlust från returledningen (W/m)

1.2 Beräkningar

Datorberäkningarna har utförts av sektionen för Husbyggnadsteknik vid Lund Tekniska Högskola och i bilaga 3.1 redovisas hur datormodellen har framtagits och med vilka approximationer beräkningarna genomförs.

I avsikt att utröna hur slangarna bör placeras runt fjärrvärmeledningarna har fem beräkningar utförts med två slangar och tre beräkningar med fyra slangar. För varje beräkning redovisas kulvertförlusterna från vardera fjärrvärmeledningen samt den upptagna effekten i varje slang.

Kulvertförlusterna utan slangar beräknas uppgå till följande.

$$\begin{aligned} q_f &= 35.6 \text{ W/m} \\ q_r &= 21.2 \text{ W/m} \end{aligned}$$

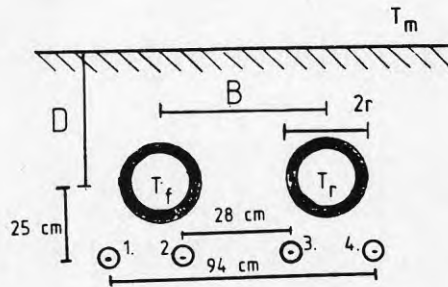
Dvs. totalt uppgår värmeförlusten till ca 56.8 W/m.

1.3 Beräkningar med fyra slangar.

Vid beräkningar med fyra slangar är målet att kunna konstatera vilken placering av slangarna som ger optimalt resultat. Placering över, under eller runt fjärrvärmeledningarna.

1.3.1 Beräkning 1, placering under fv.-ledningarna.

I figuren nedan redovisas modellen för datorberäkningen med fjärrvärmerören och fyra nedanför liggande värmeåtervinnings slangar.



Figur 1

Värmeförluster och upptagning.

$$\begin{array}{ll} q_f = 38.8 \text{ W/m} & q_1 = 8.2 \text{ W/m} \\ q_r = 24.0 \text{ W/m} & q_2 = 13.0 \text{ W/m} \\ & q_3 = 10.2 \text{ W/m} \\ & q_4 = 6.0 \text{ W/m} \end{array}$$

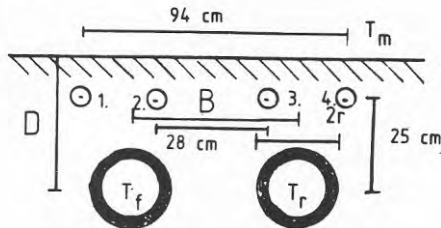
Totalt uppgår således värmeförlusten till ca 62.8 W/m och värmeupptagningen till ca 37.4 W/m. Nettoförlusten blir 25.4 W/m vilket ska jämföras med värmeförlusten utan slangar 56.8 W/m.

Minskning av kulvertförlust: $(56.8-25.4)/56.8 = 55 \%$

Extra förlust från fjärrvärmekulvert: $(62.8-56.8)/56.8 = 11 \%$

1.3.2 Beräkning 2, placering över fv.-ledningarna.

I figuren nedan redovisas modellen för datorberäkningen med fjärrvärmerören och fyra ovanför liggande värmeåtervinnings-slangar.



Figur 2

Värmeförluster och upptagning.

$$\begin{array}{ll} q_f = 37.6 \text{ W/m} & q_1 = 8.0 \text{ W/m} \\ q_r = 23.0 \text{ W/m} & q_2 = 11.5 \text{ W/m} \\ & q_3 = 9.4 \text{ W/m} \\ & q_4 = 6.0 \text{ W/m} \end{array}$$

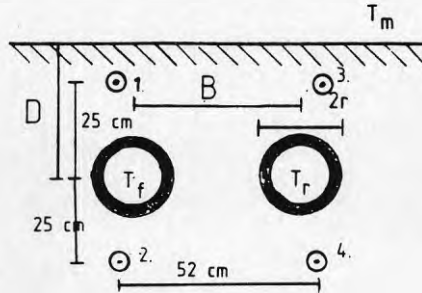
Totalt uppgår således värmeförlusten till ca 60.6 W/m och värmeupptagningen till ca 34.9 W/m. Nettoförlusten blir 25.7 W/m vilket ska jämföras med värmeförlusten utan slangar 56.8 W/m.

Minskning av kulvertförlust: $(56.8-25.7)/56.8 = 55 \%$

Extra förlust från fjärrvärmekulvert: $(60.6-56.8)/56.8 = 7 \%$

1.3.3 Beräkning 3, placering runt fv.-ledningarna.

I figuren nedan redovisas modellen för datorberäkningen med fjärrvärmerören och fyra kring liggande värmeåtervinnings-slangar.



Figur 3

Värmeförluster och upptagning.

$$\begin{array}{ll} q_f = 38.8 \text{ W/m} & q_1 = 11.5 \text{ W/m} \\ q_r = 24.1 \text{ W/m} & q_2 = 13.0 \text{ W/m} \\ & q_3 = 8.9 \text{ W/m} \\ & q_4 = 10.3 \text{ W/m} \end{array}$$

Totalt uppgår således värmeförlusten till ca 62.9 W/m och värmeupptagningen till ca 43.7 W/m. Nettoförlusten blir 19.2 W/m vilket ska jämföras med värmeförlusten utan slangar 56.8 W/m.

Minskning av kulvertförlust: $(56.8 - 19.2) / 56.8 = 66 \%$

Extra förlust från fjärrvärmekulvert: $(62.9 - 56.8) / 56.8 = 11 \%$

1.3.4 Sammanfattning av fyra slangar.

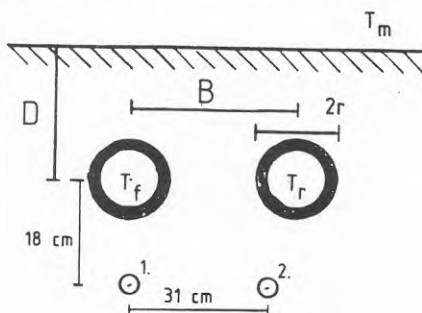
Resultatet av ovanstående redovisade beräkningar visar att det är fördelaktigare att placera återvinnings-slangarna över fjärrvärmeledningarna än under, men det klart fördelaktigaste är beräkningsfall 3.3 med två slangar ovanför och två slangar under fjärrvärmerören.

1.4 Beräkningar med två slangar

I avsikt att optimera avståndet mellan slangarna och fjärrvärmerören har fem olika beräkningar genomförts där avståndet och placeringen av slangarna har varierats.

1.4.1 Beräkning 1, placering under fv.-ledningarna.

I figuren nedan redovisas modellen för datorberäkningen med fjärrvärmerören och två nedanför liggande värmeåtervinnings-slangar. Slangen under returledningen är placerad ca 14 cm närmare framledningens centrumlinje än returledningens centrumlinje.



Figur 4

Värmeförluster och upptagning.

$$\begin{aligned} q_f &= 38.4 \text{ W/m} & q_1 &= 15.1 \text{ W/m} \\ q_r &= 23.5 \text{ W/m} & q_2 &= 13.7 \text{ W/m} \end{aligned}$$

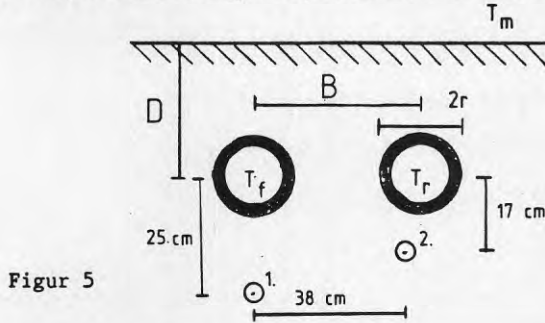
Totalt uppgår således värmeförlusten till ca 61.9 W/m och värmeupptagningen till ca 28.8 W/m. Nettoförlusten blir 33.1 W/m vilket ska jämföras med värmeförlusten utan slangar 56.8 W/m.

Minskning av kulvertförlust: $(56.8 - 28.8) / 56.8 = 49\%$

Extra förlust från fjärrvärmekulvert: $(61.9 - 56.8) / 56.8 = 9\%$

1.4.2 Beräkning 2, placering under fv.-ledningarna.

I figuren nedan redovisas modellen för datorberäkningen med fjärrvärmerören och två nedanför liggande värmeåtervinnings-slangar. Jämfört med förra beräkningen har slang 1 flyttats ner ca 7 cm i marken och slang 2 flyttats ca 7 cm till höger.



Figur 5

Värmeförluster och upptagning.

$$\begin{aligned} q_f &= 37.8 \text{ W/m} & q_1 &= 14.5 \text{ W/m} \\ q_r &= 23.5 \text{ W/m} & q_2 &= 13.0 \text{ W/m} \end{aligned}$$

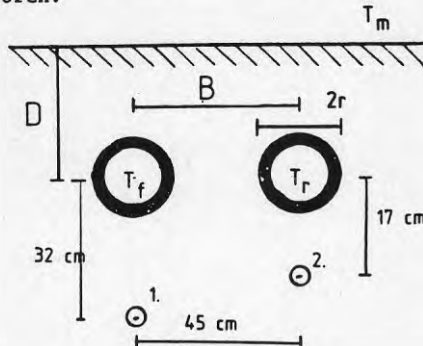
Totalt uppgår således värmeförlusten till ca 61.3 W/m och värmeupptagningen till ca 27.5 W/m. Nettoförlusten blir 33.8 W/m vilket ska jämföras med värmeförlusten utan slangar 56.8 W/m.

Minskning av kulvertförlust: $(56.8 - 27.5) / 56.8 = 52 \%$

Extra förlust från fjärrvärmekulvert: $(61.3 - 56.8) / 56.8 = 8 \%$

1.4.3 Beräkning 3, placering under fv.-ledningarna.

I figuren nedan redovisas modellen för datorberäkningen med fjärrvärmerören och två nedanför liggande värmeåtervinnings-slangar. Jämfört med beräkning 2 har slang 1 flyttats ytterliggare ca 7 cm ner i marken och slang 2 ytterliggare ca 7 cm till höger. Båda slangarna ligger nu rakt under centrumlinjen för vardera fjärrvärmerören.



Figur 6

Värmeförluster och upptagning.

$$\begin{aligned} q_f &= 37.4 \text{ W/m} & q_1 &= 13.5 \text{ W/m} \\ q_r &= 23.4 \text{ W/m} & q_2 &= 12.6 \text{ W/m} \end{aligned}$$

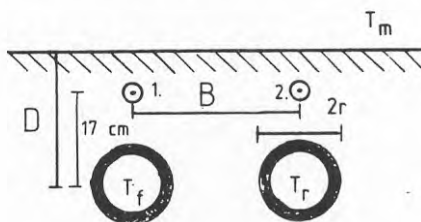
Totalt uppgår således värmeförlusten till ca 60.8 W/m och värmeupptagningen till ca 26.1 W/m. Nettoförlusten blir 34.7 W/m vilket ska jämföras med värmeförlusten utan slangar 56.8 W/m.

Minskning av kulvertförlust: $(56.8-26.1)/56.8 = 54 \%$

Extra förlust från fjärrvärmekulvert: $(60.8-56.8)/56.8 = 7 \%$

1.4.4 Beräkning 4, placering över fv.-ledningarna.

I figuren nedan redovisas modellen för datorberäkningen med fjärrvärmerören och två ovanför liggande värmeåtervinnings-slangar.



Figur 7

Värmeförluster och upptagning.

$$\begin{aligned} q_f &= 37.5 \text{ W/m} & q_1 &= 15.9 \text{ W/m} \\ q_r &= 22.9 \text{ W/m} & q_2 &= 11.6 \text{ W/m} \end{aligned}$$

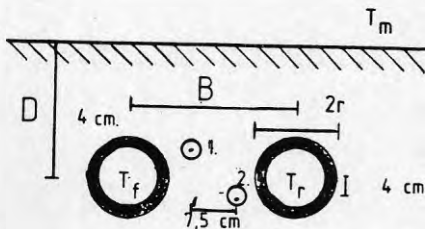
Totalt uppgår således värmeförlusten till ca 60.4 W/m och värmeupptagningen till ca 27.5 W/m. Nettoförlusten blir 32.9 W/m vilket ska jämföras med värmeförlusten utan slangar 56.8 W/m.

Minskning av kulvertförlust: $(56.8-27.5)/56.8 = 52 \%$

Extra förlust från fjärrvärmekulvert: $(60.4-56.8)/56.8 = 6 \%$

1.4.5 Beräkning 5, placering mellan fv.-ledningarna.

I figuren nedan redovisas modellen för datorberäkningen med fjärrvärmerören och två mellan liggande värmeåtervinnings-slangar.



Figur 8

Värmeförluster och upptagning.

$$\begin{aligned} q_f &= 38.5 \text{ W/m} & q_1 &= 15.1 \text{ W/m} \\ q_r &= 24.0 \text{ W/m} & q_2 &= 14.1 \text{ W/m} \end{aligned}$$

Totalt uppgår således värmeförlusten till ca 62.5 W/m och värmeupptagningen till ca 29.2 W/m. Nettoförlusten blir 33.3 W/m vilket ska jämföras med värmeförlusten utan slangar 56.8 W/m.

Minskning av kulvertförlust: $(56.8 - 29.2) / 56.8 = 49 \%$

Extra förlust från fjärrvärmekulvert: $(62.5 - 56.8) / 56.8 = 10 \%$

1.4.6 Sammanfattning av två slangar

Genom att jämföra resultatet från beräkning 1, 2 och 3 kan följande utläsas.

- Flyttas slang 1 djupare ner i marken minskar värmeupptagningsförmåga.
- Sidoförflyttas slang 2 närmare framledningen, än rakt under returledningen, kan värmeupptagningsförmågan öka något.

Jämförs beräkning 1 och 4 erhålles samma resultat som för fyra slangar, dvs att det är bättre att placera slangarna under än över fjärrvärmeledningarna.

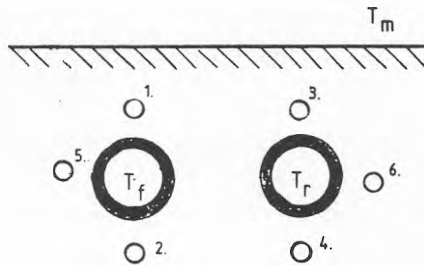
Resultatet av beräkning 1 och 5 visar dock att det är ingen större skillnad att placera ledningarna mellan eller under fjärrvärmeledningarna.

1.5 Sammanfattning

Placeringen av slangarna har inte någon större betydelse eftersom effektupptagning och effektförlust inte varierar i någon större grad. Dock är det fördelaktigare att placera slangarna under än över fjärrvärmerören på ett "lagom" avstånd ca 15 -20 cm från fjärrvärmerören.

Placeras slangarna under fjärrvärmerören måste detta ske med stor försiktighet så att inte fjärrvärmerören trycker till slangarna så att dessa täpps till.

I de följande beräkningarna har vid driftfall med två slangar dessa placerats under fjärrvärmerören enligt figur 4. Vid fyra slangar har dessa placerats "runt" fjärrvärmerören enligt figur 3. Vid sex slangar placeras dessa enligt figuren nedan.



Figur 9

1. TEORETISK BERÄKNING AV VÄRMEUPPTAGNINGEN FRÅN ANDRA DIMENSIONER ÄN DN 150 NORMALISOLERAD

1.1 Allmänt och beteckningar

I avsikt att även studera värmeupptagningen ifrån andra dimensioner än DN 150 har en teoretisk modell utvecklats för att kunna beräkna effektupptaget i slangarna och kulvertför-lusten i fjärrvärmeledningarna. Första steget är att via det datorberäknade fallet beräkna effektupptagningen motsvarande den teoretiska modellen. Genom att sedan utnyttja den skillnad som föreligger mellan de teoretiska och de datorberäknade värdena kan den teoretiska modellen korrigeras för de studerade kulvertdimensionerna.

Temperatur

T_f = Temperatur, framledning = 90 °C

T_r = Temperatur, returledning = 60 °C

T_{fs} = Temperatur på ytan av framledning (°C)

T_{rs} = Temperatur på ytan av returledning (°C)

T_m = Temperatur i mark och
medeltemperatur i slangar = 8 °C

Värmemotstånd

R_i = Värmemotstånd, isolering (m °C/W)

R_j = Värmemotstånd, mark (jord) (m °C/W)

R_{fr} = Värmemotstånd i mark mellan rören (m °C/W)

R_n = Värmemotstånd för slang_n (n=1,6)
och aktuell ledning (m °C/W)

Effektupptagning

q_n = Effektupptagning i slang n ($n=1,6$) (W/m)

q_{tot} = Summa effektupptagning för slang 1-6 (W/m)

q_m = Effektförlust med återvinnings slangar (W/m)

q_u = Effektförlust utan återvinnings slangar (W/m)

q_f = Effektförlust från framledningen (W/m)

q_r = Effektförlust från returledningen (W/m)

$$\Delta q = q_m - q_u$$

Fysikaliska egenskaper

λ_i = Värmeledningsförmåga, isolering = $0.03 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$

λ_m = Värmeledningsförmåga, mark = $1.2 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$

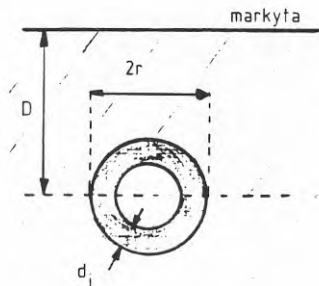
Geometriska mått

D = Förläggningsdjup från markytan till rörens centrum (m)

r = Ytterradie på fjärrvärmerören (m)

d_i = Isoleringens tjocklek (m)

N = Antal slangar



Figur 1

1.2 Teoretisk beräkning av värmeförlusten

I grundläggande kurser inom värmeöverföring brukar följande uttryck utnyttjas när det gäller att beräkna värmeförlusten från ett varmt och oisolerat rör.

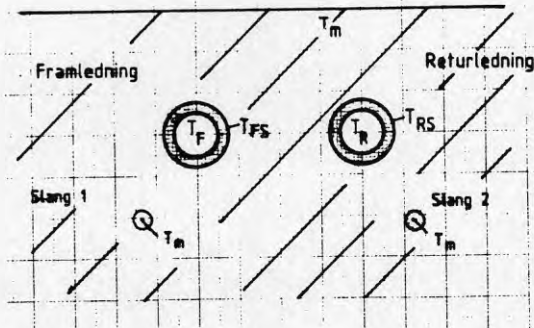
$$q \sim (T_f - T_r) / (\ln(2D/r) / (\lambda_m * 2 * \pi)) = \Delta T / R_{tot}$$

Uttrycket gavs av Forchheimer 1888 och brukar kallas Forchheimers ekvation. Formeln utvecklades av Shubin 1934 för att även gälla för ett markförlagt, varmt och oisolerat rörpar.

För beräkningar av värmeförluster från markförlagda fjärrvärmekulvertar beräknas värmemotståndet i varje isoleringsskikt. Dessa motstånd kopplas sedan samman till ett resulterande totalt värmemotstånd. Värmeförlusten q beräknas som kvoten mellan temperaturdifferensen från rören till omgivningen och det totala värmemotståndet R .

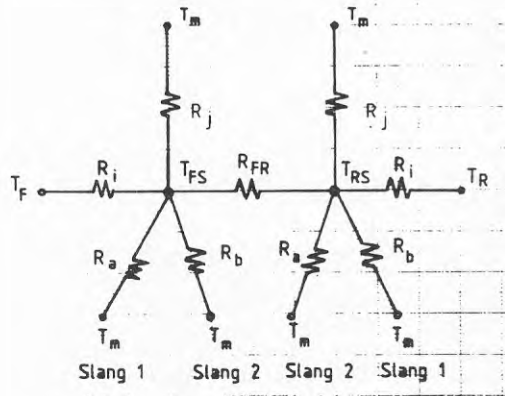
1.2.1 Resulterande värmemotstånd

I figuren nedan redovisas en översiktlig skiss över två fjärrvärmeledningar och två slangar. Där slangarna ligger symmetriskt i ett plan mellan de båda fjärrvärmeledningarna.



Figur 2

Denna bild kan ersättas med figur 3, som är motsvarande analoga krets.



Figur 3

Den totala värmeförlusten från mediet i framledningsröret till ytan av framledningsröret;

$$q_f = (T_f - T_{fs}) / R_i \quad \dots 1.1$$

Den totala värmeförlusten från mediet i returledningen till ytan av returledningsröret;

$$q_r = (T_r - T_{rs}) / R_i \quad \dots 1.2$$

Vidare kan värmeflödet från rörhöljerna till marken och slangarna beräknas.

$$\begin{cases} (T_{fs} - T_{rs}) / R_{fr} + (T_{fs} - T_m) / R_n = q_f & \dots 1.3 \\ (T_{rs} - T_{fs}) / R_{fr} + (T_{rs} - T_m) / R_n = q_r & \dots 1.4 \end{cases}$$

På samma sätt kan den upptagna effekten i de båda slangarna beskrivas. För slang 1 gäller följande formel för värmeeffektupptagningen;

$$q_1 = (T_{fs} - T_m) / R_a + (T_{rs} - T_m) / R_b \quad \dots 1.5$$

Motsvarande gäller för slang 2.

$$q_2 = (T_{fs} - T_m) / R_b + (T_{rs} - T_m) / R_a \quad \dots 1.6$$

Värmemotståndet i isoleringen och mellan rörhöljet och marken kan uttryckas enligt nedan. Värmemotståndet i själva röret och mellan rörmediet och röret är mycket mindre än övriga värmemotstånd och är inte medtagna i beräkningen.

För värmemotståndet i isoleringen gäller följande;

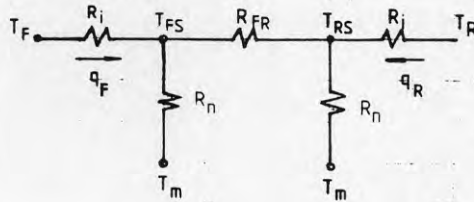
$$R_i = \ln(r/(r-d_1)) / (2 \pi \lambda_1) \quad \dots 1.7$$

För värmemotståndet mellan rörhöljet och marken gäller följande;

$$R_j = \ln(2D/r) / (2 \pi \lambda_m) \quad \dots 1.8$$

Figur 4 visar en förenklad bild av figur 3, där isoleringsskiktet mellan mark och dylikt ersätts med ett värmemotstånd.

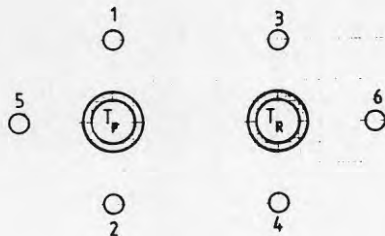
$$1/R_n = 1/R_i + 1/R_a + 1/R_b \quad \dots 1.9$$



Figur 4

1.3 Teoretisk beräkning med sex slangar

I de ovanstående beräkningarna har endast två slangar utnyttjats nedan beskrivs den teoretiska modellen vid sex slangar.

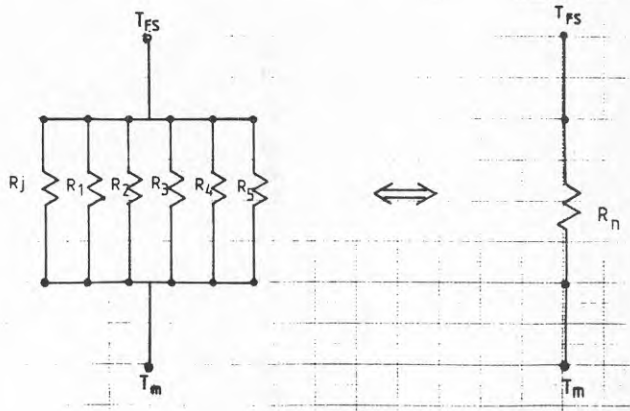


Figur 5

1.3.1 Framledning

För framledningen gäller följande förenklade totala värmeövergångsmotstånd. Slangen 6 är helt "gömd" bakom returledningen och kan inte ta upp någon effekt från denna.

Det totala värmemotståndet R_n summeras till en term.



Figur 6

$$1/R_n = 1/R_j + 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + 1/R_4 + 1/R_5 \quad \dots 2.1$$

Avståndet till slang 1, 2 och 5 förutsätts vara lika och värmeövergången kan därmed skrivas;

$$R_1 = R_2 = R_5 = R_a \quad \dots 2.2$$

På samma sätt gäller för slang 3 och 4;

$$R_3 = R_4 = R_b \quad \dots 2.3$$

Genom att slå ihop ekvation 2.1, 2.2 och 2.3 erhålles en förenkling av värmemotståndet;

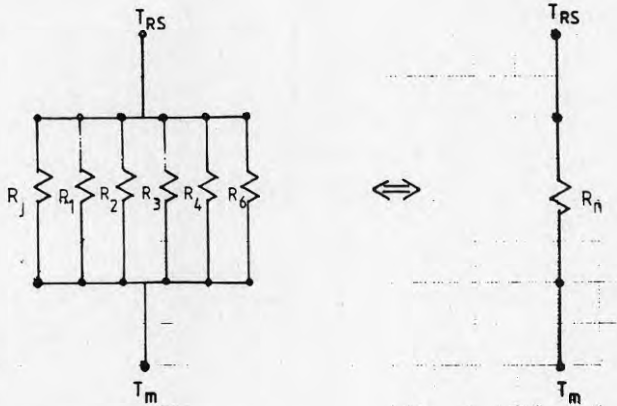
$$1/R_n = 1/R_j + 3/R_a + 2/R_b \quad \dots 2.4$$

1.3.2 Returledning

För returledningen gäller på motsvarande sätt följande;

$$1/R_n = 1/R_j + 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + 1/R_4 + 1/R_6 \dots 2.5$$

Slang 5 är helt "gömd" bakom framledningen sett från returledningen och kan inte ta upp någon värme.



Figur 7

På samma sätt som uttrycket för värmemotståndet vid framledningen förenklas, förenklas uttrycket för returledningen.

$$R_1 = R_2 = R_b \quad \text{och} \quad R_3 = R_4 = R_6 = R_a$$

Vilket ger det totala värmemotståndet;

$$1/R_n = 1/R_j + 3/R_a + 2/R_b \dots 2.6$$

För beräkning av förlusten utan slangar sättes;

$$R_a = R_b = \text{oändligheten} \rightarrow 1/R_n = 1/R_j$$

1.4 Resultat från datorberäkning med två slangar

Utifrån ett datorberäknat exempel med två slangar, där för-lusterna är bestämda, kan R_a , R_b och R_{fr} bestämmas. Om sedan slangarna ligger på ungefärligt samma avstånd och läge, är mot-stånden desamma.

Datorberäkningen gav följande resultat för en normal isolerad kulvert DN 150 och 2 slangar.

$$\begin{aligned} q_f &= 38.4 \text{ W/m} \\ q_r &= 23.5 \text{ W/m} \\ q_1 &= 15.1 \text{ W/m} \\ q_2 &= 13.7 \text{ W/m} \end{aligned}$$

Utnyttjade geometriska mått.

$$\begin{aligned} D &= 0.720 \text{ m} \\ r &= 0.120 \text{ m} \\ d_i &= 0.036 \text{ m} \end{aligned}$$

Ur ekv. 1.7 och 1.8 kan R_i och R_j beräknas.

$$\begin{aligned} R_i &= \ln(0.120/(0.120-0.036)) / (2 \pi \cdot 0.03) = 1.89221 \text{ m}^{\circ}\text{C/W} \\ R_j &= \ln(2 * 0.720/0.120) / (2 \pi \cdot 1.2) = 0.32957 \text{ m}^{\circ}\text{C/W} \end{aligned}$$

Ur ekvation 1.1 och 1.2 kan temperaturerna på ytan av fjärr-värmeledningarna (T_{rs} och T_{fs}) bestämmas baserat på det datorberäknade resultatet.

$$\begin{cases} T_{rs} = T_r - q_r \cdot R_i = 15.5331^{\circ}\text{C} \sim 15.53^{\circ}\text{C} \\ T_{fs} = T_f - q_f \cdot R_i = 17.3391^{\circ}\text{C} \sim 17.34^{\circ}\text{C} \end{cases}$$

För att bestämma R_n och R_{fr} skrivs ekvationerna 1.3 och 1.4 och om divideras med varandra.

$$\begin{cases} (T_{fs}-T_{rs})/R_{fr} = q_f - (T_{fs}-T_m)/R_n & \dots 2.7 \\ (T_{rs}-T_{fs})/R_{fr} = q_r - (T_{rs}-T_m)/R_n & \dots 2.8 \end{cases}$$

Dividera ekv 2.7 med ekv. 2.8

$$(T_{fs}-T_{rs})R_{fr}/(T_{rs}-T_{fs})R_{fr} = (q_f - (T_{fs}-T_m)/R_n)/(q_r - (T_{rs}-T_m)/R_n)$$

Vänsterledet är lika med -1 och multiplikation med $-(q_r - (T_{rs}-T_m)/R_n)$ ger följande;

$$q_r - (T_{rs}-T_m)/R_n = (T_{fs}-T_m)/R_n - q_f$$

I ekvationen kan nu R_n lösas ut och beräknas.

$$(17.34 - 8)/R_n - 38.4 = 23.5 - (15.53 - 8)$$

$$R_n = 0.436 \text{ m}^{\circ}\text{C/W} \quad \dots 2.9$$

R_{fr} erhålles ur ekvation 2.7.

$$R_{fr} = (17.34 - 15.53)/(38.4 - (17.34 - 8)/0.273)$$

$$R_{fr} = 0.436 \text{ m}^{\circ}\text{C/W} \quad \dots 2.10$$

Nu är de flesta faktorerna kända och endast R_a och R_b återstår att bestämma.

Genom att utnyttja ekvation 1.9 erhålles ett samband mellan R_a och R_b .

$$1/R_n = 1/R_j + 1/R_a + 1/R_b$$

$$1/0.273 = 1/0.3295 + 1/R_a + 1/R_b$$

$$0.60 = 1/R_a + 1/R_b \quad \dots 2.11$$

Utnyttjas ekvation 1.5 och 1.6 med effektupptagning i slangarna från datorberäkningen erhålles ett ekvationssystem ur vilket R_a och R_b kan lösas ut.

$$\begin{cases} q_1 = (T_{fs} - T_m)/R_a + (T_{rs} - T_m)/R_b \\ q_2 = (T_{fs} - T_m)/R_b + (T_{rs} - T_m)/R_a \end{cases}$$

Insättning av värden ger;

$$\begin{cases} 15.1 = (17.34 - 8)/R_a + (15.53 - 8)/R_b \\ 13.7 = (17.34 - 8)/R_b + (15.53 - 8)/R_a \end{cases}$$

$$\begin{cases} 15.1 R_a R_b = 9.34 R_b + 7.53 R_a \\ 15.1 R_a R_b = 15.1/13.7 * (9.34 R_a + 7.53 R_b) \end{cases}$$

$$\begin{cases} 15.1 R_a R_b = 9.34 R_b + 7.53 R_a \\ R_a (15.1/13.7 * 9.34 - 7.53) = R_b (9.34 - 15.1/13.7 * 7.53) \end{cases}$$

$$\begin{cases} 15.1 R_a R_b = 9.34 R_b + 7.53 R_a \\ R_a = R_b (9.34 - 15.1/13.7 * 7.53) / (15.1/13.7 * 9.34 - 7.53) \end{cases}$$

$$\begin{cases} R_a = 0.8062 \\ R_b = 2.1420 \end{cases}$$

För att testa resultatet sätts värdena in i ekvation 2.11 och beräknas till 0.59 vilket stämmer väl överens med ekvationen.

1.5 Resultat från datorberäkningen med sex slangar

Vi vet nu de "riktiga" värdena för en normalisolerad kulvert DN 150 med slangar för värmeupptagning runt omkring. Vi kan också räkna ut hur stora förlusterna blir enligt denna modell med 6 slangar och sedan jämföra resultat med det datorberäknade.

Enligt ekvation 2.6 har vi följande uttryck för R_n .

$$1/R_n = 1/R_j + 3/R_a + 2/R_b$$

$$1/R_n = 1/0.33 + 3/0.806 + 2/2.142 = 7.69$$

$$R_n = 0.130 \text{ m}^{\circ}\text{C/W}$$

Genom att utnyttja kontinuitetsekvationen och att ekvation 1.1 = 1.4 och 1.2 = 1.3 erhålles följande ekvationssystem.

Ur ekvationssystemen kan T_{fs} och T_{rs} beräknas.

$$\begin{cases} (T_f - T_{fs})/R_i - (T_{fs} - T_{rs})/R_{fr} - (T_{fs} - T_m)/R_n = 0 \\ (T_r - T_{rs})/R_i - (T_{rs} - T_{fs})/R_{fr} - (T_{rs} - T_m)/R_n = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} (90 - T_{fs})/1.89 - (T_{fs} - T_{rs})/0.436 - (T_{fs} - 8)/0.130 = 0 \\ (60 - T_{rs})/1.89 - (T_{rs} - T_{fs})/0.436 - (T_{rs} - 8)/0.130 = 0 \end{cases}$$

$$\text{Vilket ger } T_{fs} = 12.9 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ och } T_{rs} = 11.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

De totala effektförlusterna från kulvertarna med återvinnings slangar kan beräknas.

$$q_m = (90 - 12.9)/1.89 + (60 - 11.7)/1.89 = 66.3 \text{ W/m}$$

Att jämföras med 63.7 W/m från datorberäkningen.

På samma sätt kan T_{fs} och T_{rs} beräknas vid driftfallet utan slangar, där då $1/R_n = 1/R_j$.

$$(T_f - T_{fs})/R_i - (T_{fs} - T_{rs})/R_{fr} - (T_{fs} - T_m)/R_j = 0$$

$$(T_r - T_{rs})/R_i - (T_{rs} - T_{fs})/R_{fr} - (T_{rs} - T_m)/R_j = 0$$

Vilket ger $T_{fs} = 18.9 \text{ } ^\circ\text{C}$ och $T_{rs} = 17.0 \text{ } ^\circ\text{C}$

De totala effektförlusterna från kulvertarna utan återvinnings slangar kan beräknas.

$$q_u = (90 - 18.9)/1.89 + (60 - 17.0)/1.89 = 60.3 \text{ W/m}$$

Vilket ska jämföras med 56.8 W/m från datorberäkningen.

Ökningen i kulvertförlust ($\Delta q = q_m - q_u$) på grund av slangarna uppgår till ca 6 W/m.

$$\Delta q = 66.3 - 60.3 = 6.0 \text{ W/m}$$

Den upptagna effekten i varje slang beräknas nu baserat på ekvation 1.5 och 1.6.

$$q_1 = (T_{fs} - T_m)/R_a + (T_{rs} - T_m)/R_b$$

$$q_2 = (T_{fs} - T_m)/R_a + (T_{rs} - T_m)/R_b = q_1$$

$$q_3 = (T_{fs} - T_m)/R_b + (T_{rs} - T_m)/R_a$$

$$q_4 = (T_{fs} - T_m)/R_b + (T_{rs} - T_m)/R_a = q_3$$

$$q_5 = (T_{fs} - T_m)/R_a$$

$$q_6 = (T_{rs} - T_m)/R_a$$

Insättning av värden.

$$q_1 = q_2 = (12.9 - 8.0)/0.806 + (11.7 - 8.0)/2.142 = 7.8 \text{ W/m}$$

$$q_3 = q_4 = (12.9 - 8.0)/2.142 + (11.7 - 8.0)/0.806 = 6.9 \text{ W/m}$$

$$q_5 = (12.9 - 8.0)/0.806 = 6.1 \text{ W/m}$$

$$q_6 = (11.7 - 8.0)/0.806 = 4.6 \text{ W/m}$$

Totalt ger således slang 1-6 $q_{tot} = 40.1 \text{ W/m}$

En jämförelse mellan den teoretiska modellen och datorberäkningen ger följande resultat.

Slang	Modell	Datorberäkn.	Avvikelse
q ₁	7.8	9.6	-18.8 %
q ₂	7.8	11.1	-29.7 %
q ₃	6.9	7.5	- 8.0 %
q ₄	6.9	8.8	-21.6 %
q ₅	6.1	8.3	-26.5 %
q ₆	4.6	5.7	-19.3 %
q _{tot}	40.1	51.0	-21.4 %
q _u	60.3	56.8	6.2 %
q _m	66.3	63.7	4.1 %
Δq	6.0	6.9	13.0 %

1.6 Ändrad dimensionen på kulverten till DN 100 extra isolerad.

Genom att utnyttja dels den procentuella skillnaden mellan de teoretiska och de datorberäknade värdena kan de teoretiska värdena för DN 100 kulverten korrigeras och "riktigare" värden kan erhållas.

Geometrisk data;

$$\begin{aligned} D &= 0.712 \text{ m} \\ r &= 0.108 \text{ m} \\ d_i &= 0.051 \text{ m} \end{aligned}$$

$$R_i = \ln(0.108/(0.108-0.051)) / (2 \pi 0.03)$$

$$R_i = 3.390 \text{ m}^{\circ}\text{C/W}$$

$$R_j = \ln(2 * 0.712/0.108) / (2 \pi 1.2)$$

$$R_j = 0.342 \text{ m}^{\circ}\text{C/W}$$

Enligt ekvation 2.6 har vi följande uttryck för R_n.

$$1/R_n = 1/R_j + 3/R_a + 2/R_b$$

$$1/R_n = 1/0.342 + 3/0.806 + 2/2.142 = 7.58$$

$$R_n = 0.132 \text{ m}^{\circ}\text{C/W}$$

Genom att utnyttja kontinuitetsekvationen och att ekvation 1.1 = 1.4 och 1.2 = 1.3 erhålles följande ekvationssystem.

Ur ekvationssystemen kan T_{fs} och T_{rs} beräknas.

$$(T_f - T_{fs})/R_i - (T_{fs} - T_{rs})/R_{fr} - (T_{fs} - T_m)/R_n = 0$$

$$(T_r - T_{rs})/R_i - (T_{rs} - T_{fs})/R_{fr} - (T_{rs} - T_m)/R_n = 0$$

$$(90 - T_{fs})/3.39 - (T_{fs} - T_{rs})/0.436 - (T_{fs} - 8)/0.132 = 0$$

$$(60 - T_{rs})/3.39 - (T_{rs} - T_{fs})/0.436 - (T_{rs} - 8)/0.132 = 0$$

Vilket ger $T_{fs} = 10.9 \text{ }^\circ\text{C}$ och $T_{rs} = 10.2 \text{ }^\circ\text{C}$

De totala effektförlusterna från kulvertarna med återvinnings slangar kan beräknas.

$$q_m = (90 - 10.9)/3.39 + (60 - 10.2)/3.39 = 38.0 \text{ W/m}$$

På samma sätt kan T_{fs} och T_{ts} beräknas vid driftfallet utan slangar, där då $1/R_n = 1/R_j$.

$$(T_f - T_{fs})/R_i - (T_{fs} - T_{rs})/R_{fr} - (T_{fs} - T_m)/R_j = 0$$

$$(T_r - T_{rs})/R_i - (T_{rs} - T_{fs})/R_{fr} - (T_{rs} - T_m)/R_j = 0$$

Vilket ger $T_{fs} = 14.7 \text{ }^\circ\text{C}$ och $T_{rs} = 13.6 \text{ }^\circ\text{C}$

De totala effektförlusterna från kulvertarna utan återvinnings slangar kan beräknas.

$$q_u = (90 - 14.7)/3.39 + (60 - 13.6)/3.39 = 35.9 \text{ W/m}$$

Ökningen i kulvertförlust ($\Delta q = q_m - q_u$) på grund av slangarna uppgår till ca 2.1 W/m

$$\Delta q = 38.0 - 35.9 = 2.1 \text{ W/m}$$

Den upptagna effekten i varje slang beräknas nu baserat på ekvation 1.5 och 1.6.

Upptagen effekt i slang 1-6,

$$q_1 = q_2 = (T_{fs} - T_m)/R_a + (T_{rs} - T_m)/R_b$$

$$q_3 = q_4 = (T_{fs} - T_m)/R_b + (T_{rs} - T_m)/R_a$$

$$q_5 = (T_{fs} - T_m)/R_a$$

$$q_6 = (T_{rs} - T_m)/R_a$$

Insättning av värden ger följande;

$$q_1 = q_2 = (10.9-8.0)/0.806 + (10.2-8.0)/2.142 = 4.6 \text{ W/m}$$

$$q_3 = q_4 = (10.9-8.0)/2.142 + (10.2-8.0)/0.806 = 4.1 \text{ W/m}$$

$$q_5 = (10.9-8.0)/0.806 = 3.6 \text{ W/m}$$

$$q_6 = (10.2-8.0)/0.806 = 2.7 \text{ W/m}$$

Totalt ger således slang 1-6 $q_{\text{tot}} = 23.7 \text{ W/m}$

Korrigeras resultatet med avseende på avvikelser för DN 150 fjärrvärmeledningen erhålles följande resultat.

Slang	Modell DN 100 extra	Modell DN 150 normal	Datorkörn. DN 150 normal	Korrigerad DN 100 extra
q_1	4.6	7.7	9.6	5.8 W/m
q_2	4.6	7.7	11.1	6.6 W/m
q_3	4.1	6.8	7.5	4.5 W/m
q_4	4.1	6.8	8.8	5.3 W/m
q_5	3.6	6.0	8.3	5.0 W/m
q_6	2.7	4.5	5.7	3.5 W/m
q_{tot}	23.7			30.7 W/m
q_u	35.9	60.3	56.8	33.8 W/m
q_m	38.0	66.3	63.7	36.5 W/m
Δq	2.1			2.7 W/m

1.7 Ändrad dimensionen på kulverten
till DN 150 extra isolerad.

Samma beräkningsmönster som avsnitt 1.6 utnyttjas för att beräkna effektupptagning och effektförluster vid DN 150 extra isolerad kulvert.

Korrigeras resultatet med avseende på avvikelserna för DN 150 normal isolerad fjärrvärmeledning erhålles följande resultat.

$$D = 0.740 \text{ m}$$

$$r = 0.115 \text{ m}$$

$$d_i = 0.0504 \text{ m}$$

Slang	Modell DN 150 extra	Modell DN 150 normal	Datorkörn. DN 150 normal	Korrigerad DN 150 extra	
q ₁	5.3	7.8	9.6	6.5	W/m
q ₂	5.3	7.8	11.1	7.5	W/m
q ₃	4.6	6.9	7.5	5.0	W/m
q ₄	4.6	6.9	8.8	5.9	W/m
q ₅	4.1	6.1	8.3	5.6	W/m
q ₆	3.1	4.6	5.7	3.8	W/m
q _{tot}	27.0			34.3	W/m
q _u	41.6	60.3	56.8	39.2	W/m
q _m	44.4	66.3	63.7	42.7	W/m
Δq	2.8			3.5	W/m

1.8 Ändrad dimensionen på kulverten
till DN 200 extra isolerad.

Samma beräkningsmönster som avsnitt 1.6 utnyttjas för att beräkna effektupptagning och effektförluster vid DN 200 extra isolerad kulvert.

Korrigeras resultatet med avseende på avvikelserna för DN 150 normal isolerad fjärrvärmeledning erhålles följande resultat.

$$D = 0.777 \text{ m}$$

$$r = 0.170 \text{ m}$$

$$d_1 = 0.061 \text{ m}$$

Slang	Modell DN 200	Modell DN 150	Datorkörn. DN 150	Korrigerad DN 200	
q ₁	6.2	7.8	9.6	7.6	W/m
q ₂	6.2	7.8	11.1	8.8	W/m
q ₃	5.4	6.9	7.5	5.9	W/m
q ₄	5.4	6.9	8.8	6.9	W/m
q ₅	4.8	6.1	8.3	6.5	W/m
q ₆	3.6	4.6	5.7	4.5	W/m
q _{tot}	31.6			40.2	W/m
q _u	53.3	60.3	56.8	50.2	W/m
q _m	57.0	66.3	63.7	54.8	W/m
Δq	3.7			4.6	W/m

1.9 Ändrad dimensionen på kulverten
till DN 300 extra isolerad.

Samma beräkningsmönster som avsnitt 1.6 utnyttjas för att beräkna effektupptagning och effektförluster vid DN 300 extra isolerad kulvert.

Korrigeras resultatet med avseende på avvikelserna för DN 150 normal isolerad fjärrvärmeledning erhålles följande resultat.

$$\begin{aligned} D &= 0.850 \text{ m} \\ r &= 0.240 \text{ m} \\ d_i &= 0.078 \text{ m} \end{aligned}$$

Slang	Modell DN 300	Modell DN 150	Datorkörn. DN 150	Korrigerad DN 300
q ₁	6.7	7.8	9.6	8.2 W/m
q ₂	6.7	7.8	11.1	9.5 W/m
q ₃	5.8	6.9	7.5	6.3 W/m
q ₄	5.8	6.9	8.8	7.4 W/m
q ₅	5.2	6.1	8.3	7.1 W/m
q ₆	3.8	4.6	5.7	4.7 W/m
q _{tot}	34.0			43.2 W/m
q _u	59.6	60.3	56.8	56.1 W/m
q _m	63.7	66.3	63.7	61.2 W/m
Δq	4.1			5.1 W/m

VÄRMEÅTERTVINNING AV KULVERTFÖRLUSTER

*****INDATA TILL PROGRAMMET
*****SLANGINNERDIMENSION = 40.8 mm
VATTENHASTIGHET = 1.5 m/sSLANGPRIS = 13.0 kr/m
ANTAL SLANGAR = 2 ST
DRIFTTID = 8000 TIM/ÅR
RÄNTA = 4.0 %
AVSKRIVNINGSTID = 15 ÅR
PRIS PÅ ERSATT BRÄNSLE = 240 KR/MWh
VERKNINGSGRAD VID FÖRBRÄNNING = 0.9
ELPRIS = 260 KR/MWhSPECIFIKT PRIS PÅ VÄRMEPUMP = 3000 KR/kW
DRIFT- UNDERHÅLLSKOSTNAD FÖR VP (% AV INV) = 4.0
VÄRMEFAKTOR = 2.5BERÄKNADE DATA
*****FLÖDE = 0.20E-02 m³/s
ANTAL PUMPAR = 7 ST
KULVERTLÄNGD = 2941.7 m
VÄRDET AV ERSATT ENERGI = 260.2 kKR/ÅR
INVESTERING = 216.5 kKR
DRIFTSKOSTNAD = 3.2 kKR/ÅR
KAPITALKOSTNAD = 19.5 kKR/ÅR
ERFORDERLIG VÄRMEPUMPEFFEKT = 137.3 kW
KOSTNAD FÖR KOMPRESSORENERGI (EL) = 120.2 kKR/ÅR
KOSTNAD FÖR PUMPENERGI = 29.5 kKR/ÅR

ÖVERSKOTT = 87.8 kKR/ÅR

INVESTERING I VÄRMEPUMP
*****INVESTERING MED VP = 628.3 kKR
DRIFTSKOSTNAD MED VP = 19.7 kKR/ÅR
KAPITALKOSTNAD MED VP = 56.5 kKR/ÅR

ÖVERSKOTT MED VP = 34.3 kKR/ÅR



**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 821138-9
från Statens råd för byggnadsforskning till ÅF-Energi-
konsult AB, Malmö.**

R53: 1986

ISBN 91-540-4571-1

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6706053

**Abonnemangsgrupp:
Ingår ej i abonnemang**

**Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 7853
103 99 Stockholm**

Cirka pris: 35 kr exkl moms