



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.



Transport av spillvärme genom bergtunnel till Kramfors fjärrvärmenät

P/109

Förstudie

Jan Nordling
Staffan Stillesjö
Hans Åkesson

INSTITUTET FÖR BYGGDOKUMENTATION	
Accnr	81-1237
Plac	<i>ser</i>

R113:1981

TRANSPORT AV SPILLVÄRME GENOM BERGTUNNEL
TILL KRAMFORS FJÄRRVÄRMENÄT

Förstudie

Jan Nordling
Staffan Stillesjö
Hans Åkesson

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 800289-9
från Statens råd för byggnadsforskning till Scandiaconsult
AB, Stockholm.

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

R113:1981

ISBN 91-540-3574-0
Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

LiberTryck Stockholm 1981

INNEHÅLL

0	SAMMANFATTNING	4
1	ALLMÄNT	6
2	FÖRUTSÄTTNINGAR	7
2.1	Bergtunnel	7
2.2	Spillvärmekälla	9
2.3	Fjärrvärmnät	10
3	ANLÄGGNINGENS UTFORMNING	11
3.1	Älvvattentillförsel	11
3.2	Värmecentral	12
3.3	Kulvertar	14
3.4	Bergtunnel	15
3.5	Kulvert mellan tunnel och värmepump	17
3.6	Värmepump	18
4	KOSTNADSKALKYL	21
4.1	Investeringskostnader	21
4.2	Årskostnader	22
4.3	Resultat	25
5	REFERENSLISTA	27
6	BILAGOR	28

Denna utredning studerar möjligheten att tillföra Kramfors fjärrvärmenät spillvärme från Väja Sulfatfabrik (NCB). Värmetransport sker i befintlig bergtunnel och via en värmepump-anläggning överförs värmeenergin till fjärrvärmenätet.

Fjärrvärmenätet som har en ansluten effekt av ca 30 MW försörjs för närvarande från provisoriska panncentraler. Inom de närmaste åren kommer en permanent hetvattenanläggning att uppföras och ersätta de provisoriska centralerna. Vid fullt utbyggt nät väntas den anslutna effekten uppgå till ca 50 MW.

Sulfatfabriken i Väja är belägen ca 5 km från Kramfors. Avståndet gör att transporten av vattenburen spillvärmeenergi, som håller en temperatur av ca 25°C, inte kan ske med rörledning på grund av för höga kostnader. Vi har därför studerat möjligheterna att utnyttja den oanvända delen av sötvattentunneln mellan Väja och Kramfors för transport av uppvärmt älvvatten.

För att inte förorena den södra delen av tunneln har vi räknat med att spillvattnet från fabriken skall värmväxlas med älvvatten, som sedan transporteras i tunneln till värmepumpanläggningen i Kramfors. Älvvattnet som utnyttjas som värmebärare tas in vid det normala sötvattenintaget i Hammar och tappas av i Väja.

Den värmda älvvattnet transporteras i en plaströrskulvert till en isolerad vattenbassäng, från vilken ett hål borrar ned till tunneln. Det borrarade hålets diameter är 300 mm, vilket medger ett vattenflöde av 0,5 m³/s.

I tunneln finns ursprungligen en port direkt efter avgreningen till Väja. Denna port som måste stängas, manövreras inifrån. För att porten skall bli åtkomlig måste tunneln tömmas på vatten. Urtappningen av vattnet sker lämpligen i samband med ett driftstopp i Väjafabriken.

Vid beräkning av förlusterna i bergtunneln har vi använt oss av ett datorprogram som beräknar temperatur och temperaturändringen i cirkulära skikt. Berget har antagits vara homogent, dvs endast värmeförluster på grund av ledning har beräknats och grundvattnets inverkan på värmeförlusterna i berget har försumrats. Värmeövergångstalet vatten/berg har antagits vara oändligt, dvs samma temperatur råder på bergytans vägg som i vattnet.

Någon optimering av värmepumpens storlek har inte gjorts, utan vi har valt att studera en konventionell anläggning på 10 MW.

Installation av värmepumpanläggningen antas inte medföra att investeringskostnaderna minskar för värmeverket i övrigt. Värmepumpanläggningen krediteras endast för den energimängd som levereras. Anledningen är att när effektbehovet i nätet är som störst, kan anläggningen enbart avge ca 2,5 MW. Det är dessutom lämpligt att installera full reserveffekt exklusive värmepumpanläggningens tillskott. Kommunen bör inte bli beroende av industrins leveransförmåga, speciellt eftersom industrin har vissa stilleståndsperioder.

Investeringskostnaden för projektet har beräknats till ca 16,7 miljoner kronor.

Projektet medför en årlig oljebesparing på ca 8,1 miljoner kronor motsvarande ca 5 800 m³ Eo 4.

Den årliga energikostnadsbesparingen uppgår till ca 4,2 miljoner kronor per år.

Denna utredning studerar möjligheten att tillföra Kramfors fjärrvärmenät spillvärme från Väja Sulfatfabrik (NCB). Värme-transport sker i befintlig bergtunnel och via en värmepumpanläggning överförs värmeenergin till fjärrvärmenätet.

Fjärrvärmenätet som har en ansluten effekt av ca 30 MW försörjs för närvarande från provisoriska panncentraler. Inom de närmaste åren kommer en permanent hetvattenanläggning att uppföras och ersätta de provisoriska centralerna. Vid fullt utbyggt nät väntas den anslutna effekten uppgå till ca 50 MW. I samband med detta har bl a ett alternativ med en värmepumpanläggning studerats.

Sulfatfabriken i Väja är belägen ca 5 km från Kramfors. Avståndet gör att transporten av vattenburen spillvärmeenergi, som håller en temperatur av ca 25°C, inte kan ske med rörledning på grund av för höga kostnader. Vi har därför studerat möjligheterna att utnyttja den oanvända delen av sötvattentunneln mellan Väja och Kramfors för transport av uppvärmt älvvatten. I värmväxlare värms älvvatten med spillvärmevatten från sulfatfabriken i Väja och pumpas via bergtunneln till Kramfors.

Bergtunneln byggdes på sextiotalet för att förse fabrikerna längs Ångermanälven med sötvatten. Från vattenintaget i Hammar till Kramfors är tunneln ca 13 km lång.

I och med att fabrikerna i Sandviken och Kramfors lades ned används inte längre tunnelsträckan mellan Väja och Kramfors.

En av målsättningarna med denna studie är att utreda om tunneln kan ha någon alternativ användning inom energiområdet.

Förutom det redan nämnda användningsområdet att transportera spillvärmeenergi, studeras även tunneln som kapacitivt värme-lager. Eftersom detta utnyttjande endast ger ett marginellt energitillskott har studien kommit att behandla det först-nämnda användningsområdet.

2.1 Bergtunnel

Cellulosaindustrin har i sin fabrikationsprocess behov av mycket stora mängder vatten. En medelstor cellulosafabriks vattenförbrukning är jämförbar med behovet i en större stad. Kravet på vattnets kvalitet är också hög, speciellt viktigt är vattnets salthalt. Vid hög salthalt blir korrosionsproblemen stora, vilket medför höga driftkostnader. Salthalten medför också problem vid blekprocesserna. Vid Ångermanälven låg förut flera cellulosafabriker som huvudsakligen hade tillgång till salt eller bräckt vatten. För att tillgodose dessa fabrikers behov av sötvatten, beslutades 1957 att en tunnel skulle byggas. Resultatet blev en 13 km lång bergtunnel från Hammarbron till Kramfors. Arbetet startade 1961 och tunneln var klar att tas i bruk 1965.

Tunnelns intag börjar 500 m uppströms Hammarbron. Från intaget leds vattnet genom en intagstunnel till en sil- och pumpstation för uppfordring och silning av vattnet. Vattnet transporteras sedan i bergtunnlar med förgreningar till fabrikena i Väja, Sandviken och Kramfors, se figur i bilaga 1.

Bergtunnelns läge i profil bestäms av drivningsriktningen och att tillfredsställande bergtäckning över tunneln krävs. Bilaga 1 visar längdprofilen av tunneln. För att kunna avlägsna luft på höjdpunkterna har avluftningshål och svallbassänger byggts.

Delar som inte utan svårigheter kan byggas om, såsom intag, bergtunnlar och stationsbyggnad, har dimensionerats för en högsta vattenföring av ca 10 m³/s.

I och med att fabrikena i Sandviken och Kramfors lades ned används inte längre den södra delen av tunneln. Detta innebär att ca 5 300 m bergtunnel med en total volym av ca 42 500 m³ är outnyttjad. För närvarande är uttagen vid Sandviken och Kramfors avstängda och det finns stillastående vatten i den södra delen av tunneln. Det stillastående vattnet antar efter en tid en temperatur av ca 7,5°C, dvs ortens grundvattentemperatur.

Data på tunneln

Intagstunneln, tvärsnittsytta:	ca 30 m ²
Tunneldimensioner:	
Hammarbron - Väja:	ca 10 m ²
Väja - Kramfors:	ca 8 "
Anslutningar till Sandviken, Väja och Kramfors:	ca 4 "
Vattenflöde, max:	ca 7 m ³ /s
Tunnelsträcka, Väja - Kramfors:	4 770 m
Anslutning till Kramfors:	560 m

Vattenbeskaffenhet

Mjukt, saltfattigt

Kloridhalt: 1 mg/l, max 4 mg/l

pH. 7,0 - 7,1

Grumlighet: svag till tydlig

I bilaga 2 redovisas älvvattentemperaturens variation under året.

2.2 Spillvärmekälla

Fabriken i Väja producerar ca 160 000 ton grovpapper per år i två pappersmaskiner. För detta förbrukas följande mängder energi.

Bränsle

- o 40 000 ton olja, Bunker C
- o 6 000 toe¹⁾ i form av bark
- o 45 000 toe i form av avfallslut

1) toe = ton oljeekvivalenter = 41,87 GJ

Totalt förbrukas alltså en energimängd av 91 000. Av detta omvandlas 5 500 toe till el i en mottrycksanläggning.

Det är planerat att inom en sexårsperiod minska oljeförbrukningen med ca 15 000 toe. Detta skall ske genom att andelen bränsle i form av bark, flis och avfall ökas.

El

Elförbrukningen är ca 248 000 MWh/år.

Vattenförbrukning

Vattenförbrukningen är ca 0,75 m³/s. Utsläppen fördelas på fem olika avlopp. Som spillvärmekälla har vi räknat med att utnyttja vattnet från sedimenteringsbassängen och bakvatten från pappersmaskin 6, totalt ca 0,43 m³/s.

Med hjälp av personal från fabriken har temperatur- och flödesmätningar av dessa två flöden utförts under senhösten 1980.

Temperaturvariationerna på vattnet till sedimenteringen följer i stort älvvattnets variation, samtidigt som produktionen medför att små temperaturvariationer överlagras på detta.

Bakvattnet från pappersmaskin 6 är då det lämnar fabriken endast 5°C kallare på vintern än på sommaren. Vattnet blandas med ett något kallare kondensatvattenflöde på ca 0,03 m³/s med en temperatur av ca 15°C. Det är inget problem att separera dessa flöden om det är nödvändigt.

Någon större ändring av mängden energi i spillvattnet mer inte att ske i framtiden. Minskar temperaturen ökas flödet, och vice versa, men dessa ändringar bedöms bli obetydliga.

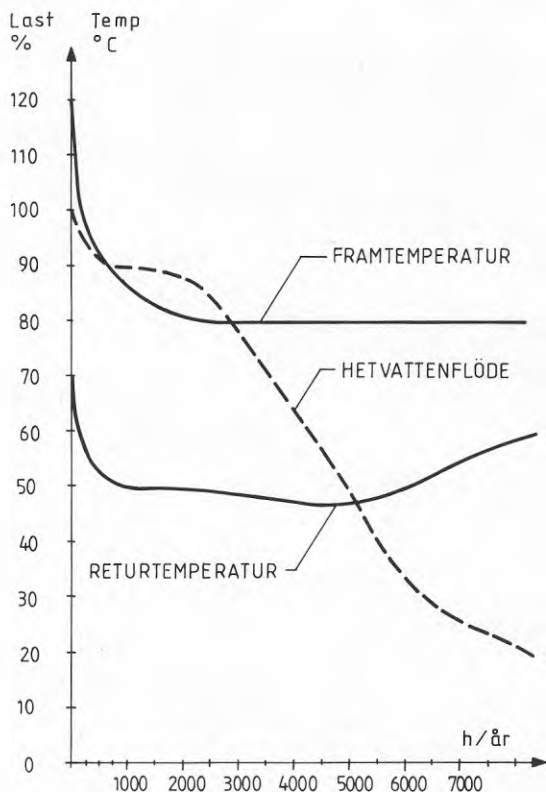
I bilaga 3 redovisas vattentemperaturernas variation med älvvattnet under året och i bilaga 4 och 5 redovisas temperaturer och flöden för avloppen från sedimenteringsbassängen och pappersmaskin 6, under den studerade perioden.

Mätningarna av vattentemperatur och flöde från sedimenteringsbassängen har utförts 3 ggr/dygn. Mätningarna från pappersmaskin 6 avser endast flöde. Detta ansågs tillräckligt eftersom vattentemperaturens variationer där är måttliga.

Ansluten fjärrvärmeeffekt i Kramfors är för närvarande ca 30 MW. Vid fullt utbyggt nät kommer den att uppgå till ca 50 MW. Med sammanlagringsfaktorn 0,8 blir det totala effektbehovet 40 MW. Värmeproduktionen sker idag i 8 st transportbara värmecentraler. Långt framskridna planer finns att uppföra ett permanent värmeverk. Verkets placering och lämplig bränsletyp är två frågor som fortfarande övervägs. En trolig lokalisering av verket är vid hamnen på tomten efter den nedlagda SCA-fabriken. Denna placering är utomordentligt gynnsam ur spillvärmeprojektets synpunkt, eftersom tunneln mynnar ut ca 300 m därifrån, se bilaga 7.

Fjärrvärmenätets konsekutiva belastningskurva vid fullt utbyggt nät visas i bilaga 6. Effekten är sammanlagrad med 80%.

Fjärrvärmenätets höga dimensioneringstemperatur kräver att energin från en värmepumpanläggning måste tillföras returvärmesystemet. Anledningen till detta är att en konventionell värmepumpanläggningens framledningstemperatur är ca 75°C, medan framledningstemperaturen för fjärrvärme aldrig understiger 80°C. I figur 2.1 visas temperaturerna för fjärrvärmenätets framledning resp returledning.



Figur 2.1. Temperaturer och flöde i fjärrvärmenätet.

3 ANLÄGGNINGENS UTFORMNING

För att inte förorena den södra delen av tunneln har vi räknat med att spillvattnet från fabriken skall värmeväxlas med älvvatten, som sedan transporteras i tunneln till värmepumpanläggningen i Kramfors. Älvvattnet som utnyttjas som värmebärare tas in vid det normala sötvattenintaget i Hammar och tappas av i Väja.

3.1 Älvvattentillförsel

I detta avsnitt beskrivs befintlig pumpstation vid Hammar samt distributionen till Väjafabriken.

Beskrivning av befintlig pumpstation

De ursprungliga fabrikernas sötvattenbehov uppgick till 3,75 m³/s. Man räknade med ett framtida behov av 7 m³/s. Nuvarande vattenbehov för fabriken i Väja, som är den enda i drift, uppgår till ca 0,8 m³/s. Den centrala pumpstationen vid Hammar är således klart överdimensionerad i förhållande till dagens behov.

Råvattnet som tas in vid pumpstationen passerar maskinrensade galler och uppfordras i en "råvattenpump" till en med trumsilar utrustad finsilningsanläggning. Från renvattenkanalen efter silarna uppfordras vattnet med en centrifugalpump till huvudtunneln och vidare till fabriken.

Av pumpstationens totalt fyra pumpar har ett par bytts ut och ersatts med ett pumpar som anpassats till nuvarande behov. För närvarande är endast detta pumpar i drift med en kapacitet av ca 0,95 m³/s.

Samtliga motorer, pumpar, ventiler, etc, som ej är i drift konditionskörs en gång per månad. All utrustning är i god kondition och kan startas upp omgående.

Den ökning av flödet som krävs för detta projekt ligger i storleksordningen 0,1-0,2 m³/s. Under större delen av året klarar de nu använda pumparna denna ökning.

Distribution till Väjafabriken

Från pumpstationen leds vattnet genom bergtunneln till Väja. Väjafabriken är ansluten till tunneln via en kulvert med diametern 1 200 mm.

Beräkningar visar att denna kulvert är överdimensionerad och pumputrustningen har tillräcklig kapacitet för att klara erforderlig ökning av vattenflödet. Ökning av flödet kan uppnås med befintlig utrustning.

För att lägsta möjliga driftkostnad skall erhållas kan vissa ombyggnader av pumpningsutrustningen bli nödvändiga.

3.2 Värmeväxlarcentral

En värmeväxlarcentral uppförs intill sedimenteringsbassängen vid fabriken i Väja. Med hjälp av värmeväxlarna förs värmeenergi över från fabriken till spillvatten till värmebärarvattnet som utgörs av sött älvvatten från pumpstationen i Hammar.

Nedan beskrivs älv- och spillvattenflödets väg samt erforderlig utrustning i värmeväxlarcentralen.

Älvvattenflöde

Ett delflöde av det totala flödet till Väjafabriken avtappas och leds via kulvert till värmeväxlarcentralen.

I centralen sker värmeväxling mot vatten från sedimenteringsbassängen och bakvatten från pappersmaskin 6.

Med hjälp av tryckhöjningspumpar pumpas älvvattnet genom värmeväxlarna och via PEH-kulvert till tunneln. Nedanför avstängningsanordningen i tunneln borras ett hål i vilket det värmda vattnet leds ned i tunneln.

Spillvattenflöde

Värmeväxlarbyggnaden placeras intill befintlig sedimenteringsanläggning och bakvattnet från pappersmaskin 6 leds samman med utloppet från sedimenteringsbassängen.

Vattnet från pappersmaskinen har högre temperatur vilket innebär att för värmeväxlarna erforderlig temperatur möjliggörs under hela året.

För värmeväxlarna erforderligt flöde pumpas från avloppet genom värmeväxlarna, där värmen överförs till älvvattnet som fungerar som värmebärare. Efter värmeväxlarna pumpas spillvattnet ut i älven som tidigare.

Pumpar för värmebärarvattnet

Tryckhöjningspumparna för värmebärarvattnet utgörs av två centrifugalpumpar med vardera kapaciteten 0,12 m³/s.

För att erhålla god tillgänglighet föreslås två parallellkopplade pumpar.

Pumpar för spillvärmevattnet

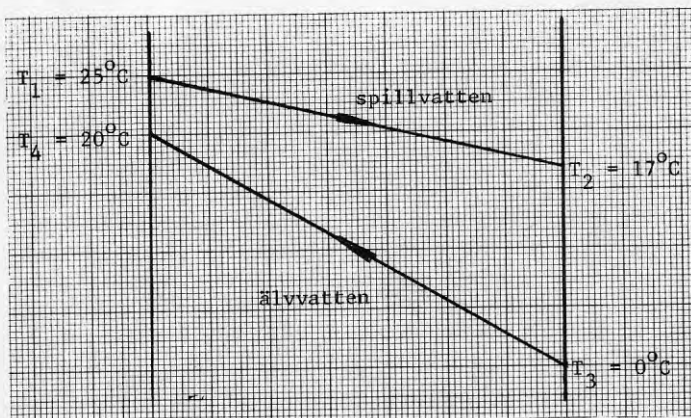
Spillvärmevattnet pumpas genom växlarna med hjälp av två parallellkopplade centrifugalpumpar. Pumparna dimensioneras för vardera kapaciteten 0,30 m³/s.

Värmeväxlare

De två medieflödena utgörs av "rent" sötvatten och spillvatten från processen. Fiberinnehållet i spillvattnet ligger på ett värde av ca 60 mg/l. Detta fiberinnehåll medför att igensättningsproblem kan uppstå om plattvärmeväxlare väljs. Plattvärmeväxlare skulle dock i denna tillämpning medföra låga investeringskostnader jämfört med andra typer av värmeväxlare.

Lamellvärmväxlare är att föredra i detta fall. Den sida där det förorenade spillvattnet passerar kan enkelt rengöras och på den andra sidan är försmutsningen försumbar. I kalkylerna förutsätts att lamellvärmväxlare installeras. Vid en djupare studie bör dock möjligheterna att använda plattvärmväxlare närmare undersökas.

För värmväxlarenheterna har dimensionerande temperaturer valts enligt figur 3.1.



Figur 3.1. Dimensionerande temperaturer för värmväxlare

Utnyttjat spillvärmefflöde $0,30 \text{ m}^3/\text{s}$ ger ett $20\text{--}25^{\circ}\text{C}$ varmt älvvattenflöde på $0,12 \text{ m}^3/\text{s}$ under den kallaste delen av året.

Valda temperaturer och flöden har optimerats. En temperaturbegränsande faktor är materialvalet i kulverten till tunneln.

Fyra värmväxlarenheter utförda i rostfritt stål föreslås.

Byggnad

En ny byggnad för pumpar, reglerutrustning och värmväxlare med kringutrustning uppförs i anslutning till befintlig sedimenteringsbassäng.

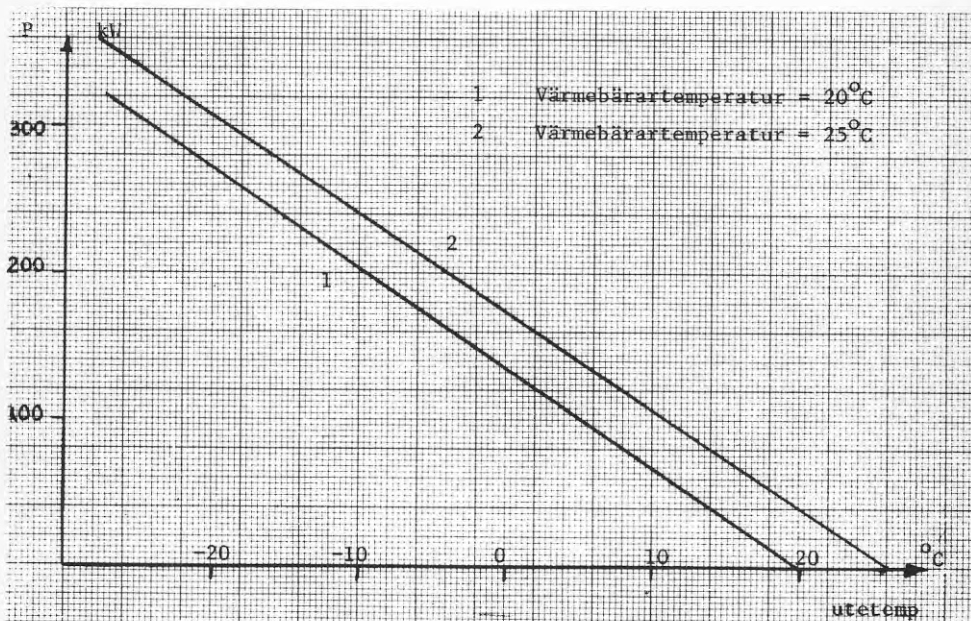
Från befintlig matarledning för älvvatten till fabriken, avleds ett delflöde i polyetenrör (PEH-rör) till värmväxlarbyggnaden. Även kulverten för värmebärrarvattnet till tunneln utförs med PEH-rör. Det är ur korrosionssynpunkt inte lämpligt att använda konventionella värmekulvertar för detta ändamål, eftersom syresatt älvvatten kontinuerligt tillförs. Att använda bättre stål-kvaliteter i konventionella kulvertar medför höga material-kostnader. Användandet av PEH-rör innebär också betydligt lägre fognings- och lägningskostnader jämfört med konventionella värmekulvertar.

Kulverten utförs helsvetsad i tryckklass NT6 med följande data:

Diameter: $D = 400 \text{ mm}$
 Vattenhastighet: $V = 1 \text{ m/s}$
 Längd: $L = 1500 + 300 \text{ m}$

I kalkylerna förutsätts grund förläggning (0,6 m) på normal ledningsbädd och att fyllning sker med återfyllningsmassor utan speciell packning, bilaga 12.

Totala kulvertförluster som funktion av utetemperaturen redovisas i nedanstående diagram.



Figur 3.2. Kulvertförluster som funktion av utetemperatur

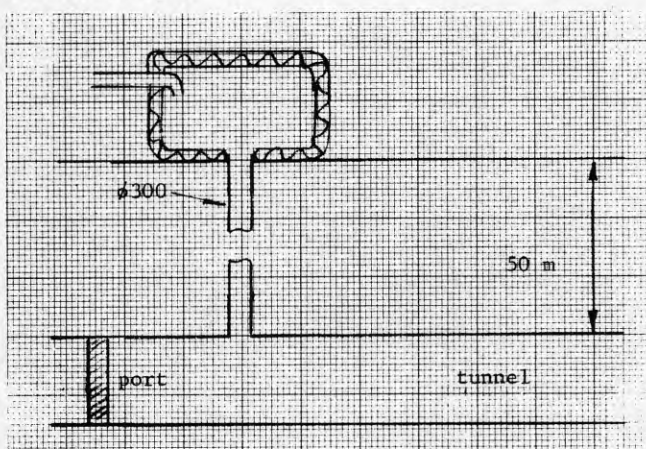
Värmeavgivningen från kulverten är av ungefär samma storlek som värmeavgivningen från en konventionell värmekulvert. Den temperatursänkning som värmeförlusterna medför beräknas kunna kompenseras med något högre vattentemperatur efter värmväxlarna.

3.4 Bergtunnel

Det varma älvvattnet från PEH-rörskulverten avbördas i en isolerad vattenbassäng, från vilken ett hål borras ned till tunneln. Det borrarade hålets diameter är 300 mm, vilket medger ett vattenflöde av 0,5 m³/s, se fig 3.3.

I tunneln finns ursprungligen en port direkt efter avgreningen till Väja. Denna port som måste stängas, manövreras inifrån. För att porten skall bli åtkomlig måste tunneln tömmas på vatten. Ur-tappningen av vattnet sker lämpligen i samband med ett driftstopp i Väjafabriken.

Porten byggdes för att man under anläggandet av södra delen av tunneln skulle kunna utnyttja den då färdiga delen av tunneln fram till Väja.



Figur 3.3. Vattentillförsel till tunneln, principskiss.

Tillgänglig nivåskillnad mellan vattenbassängen och anslutningstunnelns mynning är ca 30 m. Detta ger en lutning av 5,6 o/oo. Tunneln bör vid denna lutning kunna ge ett flöde av ca 13 m³/s.

Den använda tunnelsträckningen omfattar ca 4 770 m av huvud-tunneln och ca 560 m anslutningstunnel till Kramfors, se bilaga nr 7. Vattenföringen 0,12 m³/s, som dessa kalkyler bygger på, medför att det tar ca 3 dygn för vattnet att transporteras till Kramfors. Det bör gå att transportera vattnet från Väja till Kramfors utan extra pumpning.

Förluster från tunneln

Som framgått i tidigare kapitel kommer vattentemperaturen i tunneln att variera mellan 20-30°C. Det stillastående vattnet i bergtunneln erhåller en temperatur av ca 7,5°C. Detta medför att stora värmemängder kommer att krävas för att värma upp tunneln när den tas i drift.

Vid beräkning av förlusterna har vi använt oss av ett datorprogram som beräknar temperatur och temperaturändringen i cirkulära skikt utanför bergtunneln. Beräkningsmodellen är en endimensionell finit differensmetod med polära koordinater, vilket ger en tvådimensionell lösning. Berget har antagits vara homogent, dvs endast värmeförluster på grund av ledning har beräknats och grundvattnets inverkan på värmeförlusterna i berget har försummats. Värmeövergångstalet vatten/berg har antagits vara oändligt, dvs samma temperatur råder på bergytans vägg som i vattnet.

Beräkningsmodell

Vid förlustberäkningarna har antagits att tunneln är omsluten av cirkulära skikt. Yttersta skiktet har satts konstant, lika med grundvattentemperaturen 7,5°C. Temperaturen i mitten av de övriga skikten har beräknats. I bilaga 8 redovisas beräkningsmodellen.

Enligt de undersökningar som genomfördes när tunneln byggdes består berget av gnejs, normalt med följande data:

- densitet:	2 610 kg/m ³
- värmeledningstal:	2,16 W/m ⁰ C
- värmekapacitet:	2 160 kJ/m ³ °C

Gnejs har normalt mycket små grundvattenflöden. Termiska variationer under 200°C påverkar bergets hållfasthet mycket litet.

Förutsättningar för beräkningarna

- tunnelnlängd:	5 330 m
- tunnelradie:	1,5 m
- skiktjocklek:	0,75 m
- vattentemperatur:	20°C
- grundvattentemperatur:	7,5°C
- antagen radie till grundvattentemperatur:	20,25 m

I diagrammet i bilaga 9 och 10 redovisas temperatur och värmeförluster vid olika tidpunkter efter uppvärmningens början. Som framgår av diagrammen beräknas förlusterna till ca 2 000 kW efter 1 dygn, men redan efter 50 dygn är förlusterna nere i ca 730 kW, för att efter 1 år vara nere i ca 450 kW.

Efter ett år sjunker förlusterna mycket långsamt ned till 350 kW som är värdet vid fortvarighet, vilket uppnås efter ca 8 år. Värmeförlusterna från tunneln är således små, bortsett från de första dygnet, i förhållande till den överförda värmeeffekten på ca 7,2 MW. Temperatursänkningen på vattnet som följd av värmeförlusten vid fortvarighet blir ca 0,7°C.

I de fortsatta beräkningarna har vi antagit värmeförlusten under den studerade perioden till 360 kW, vilket kan anses utgöra ett medelvärde under 15 år. För att kompensera de höga förlusterna under första året kan en något högre temperatur tillföras tunneln under den perioden.

PEH-rörskulverten mellan värmeväxlarna och tunneln utgör en begränsande faktor när det gäller maximal temperatur på tillfört vatten till tunneln.

Energilagring i tunnel

Den oanvända delen av tunneln med en volym av ca 42 500 m³ skulle även kunna utnyttjas som ett kapacitivt värmelager. Lagringsförmågan är ca 1 675 GJ eller 465 MWh (30 toe).

Detta är beräknat med en temperatursänkning av 10°C. Energimängden är dock, i dessa sammanhang, i det närmaste försumbar i jämförelse med energiflödet från sulfatfabriken i Väja.

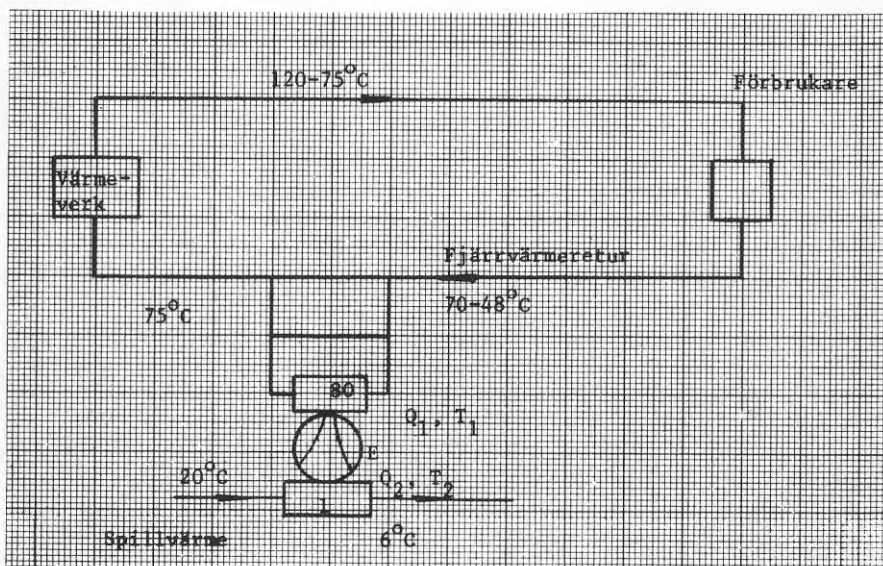
3.5 Kulvert mellan tunnel och värmepump

Transporten av vattnet från tunneln till värmepumpanläggningen vid värmeverket i Kramfors antas ske i en PEH-rörskulvert liknande den som används mellan värmeväxlare och tunnel. Längden på kulverten antas till 1 km. Eftersom värmeverket inte är byggt kan inte sträckan bestämmas exakt.

Med värmeverket placerat på tomten för den nedlagda Kramforsfabriken, blir avståndet mellan värmeverk och tunnel avsevärt kortare, ca 300 m.

Någon optimering av värmepumpens storlek har inte gjorts, utan vi har valt att studera en konventionell anläggning på 10 MW. Sådana finns som "turn-key" anläggningar. Troligtvis kan en anläggning uppdelad på två mindre enheter ge en högre total värmefaktor.

För att fjärrvärmenätet skall kunna tillgodogöras spillvärme-energin måste, som tidigare påpekats, tillförseln ske på fjärrvärmens retur. En principkoppling kan se ut enligt fig 3.4.



Figur 3.4. Principkoppling över värmepumpsystemet.

Dimensionering av värmepumpsystem

Utgående från att värmepumpen skall avge 10 MW vid en temperatur av 75°C , vilket är en lämplig temperatur med R12 som köldmedium, och att tunnelvattnet håller en medeltemperatur av ca 20°C , har fastställts erforderlig sänkning av tunnelvattnets temperatur i förångaren.

I beräkningarna har antagits att kondenseringstemperaturen skall ligga 5°C över avgiven temperaturen, dvs i detta fall 80°C .

Förångningstemperaturen har på samma sätt antagits ske vid en temperatur som är 5°C lägre än tunnelvattnets utloppsmedeltemperatur från förångaren.

Q_1	=	avgiven effekt	(kW)
T_1	=	kondenseringstemperatur	(K)
Q_2	=	upptagen effekt	(kW)
T_2	=	förångningstemperatur	(K)
E	=	tillförd eleffekt	(kW)
Q	=	värmefaktor	
t	=	tunnelvattnets avloppstemperatur	(°C)
\dot{m}	=	vattenflöde	(kg/s)

$$Q_1 = E + Q_2; \quad \phi = \frac{Q}{E}; \quad \phi = 1 + 0,6 \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad (1)$$

$$Q_2 = Q_1 \left(1 - \frac{1}{1 + 0,6 \cdot \frac{T_2}{T_1 - T_2}} \right) \quad (1)$$

$$Q_2 = \dot{m} c_p \cdot \Delta t \Rightarrow Q = 0,12 \cdot 4,187 (20-t) \quad (2)$$

Ekvation 1 sätts lika med ekvation 2.

$$1\,000 \cdot 0,12 \cdot 4,187 \cdot (20-t) = 10\,000 \left(1 - \frac{1}{1 + 0,6 \cdot \frac{273+(t-5)}{80-t-5}} \right)$$

Ur detta kan vi bedöma spillvärmevattnets avloppstemperatur till 6°C och förångningstemperaturen blir därmed 1°C.

Värmefaktorn blir då ca 3,1.

Dimensionerande flöde

Vid dimensionering av värmepumpanläggningen har vi räknat med konstant flöde genom kondensorn. Detta möjliggörs med en by-pass koppling före värmepumpanläggningen. Drifttiden har begränsats med hänsyn till eventuella svårigheter att reglera flödet vid fallande effektbehov.

Dimensionerande data

Dimensionerande vattenflöde:	119 kg/s
Avgiven maximal effekt:	10 MW
Kyleffekt:	7,2 MW
Erforderlig maximal eleffekt:	3,3 MW
Köldmedium:	R12
Kondenseringstemperatur:	80°C
Förångningstemperatur:	1°C
Värmefaktor:	3,1

Utrustning

- Kompletta värmepumpanläggning
- Tryckhöjningspump och motormanövrerad avstängningsventil i fjärrvärmeledningen
- Spillvattenpump med pumpgrop
- Stålbyggnad, inklusive värme och ventilation, belysning, vatten och avlopp samt fundament

Total investering: 11 400 kkr

I avsnitt 2.3 framgår hur temperatur och flöde varierar i fjärrvärmenätet. Maximalt vattenflöde i fjärrvärmenätet är ca 190 kg/s. Detta sjunker under sommaren ned till ca 38 kg/s. Värmepumpanläggningen har dimensionerats för ett maximalt flöde av 120 kg/s; vilket medför att när effektbehovet minskar under ca 13 MW kan inte värmepumpen avge full effekt till nätet på grund av att flödet att tillföra energimängden på är för litet. Under de kallaste delarna av året är returtemperaturen för hög för att värmepumpen skall kunna leverera full effekt.

I bilaga 6 redovisas en konsekutiv belastningskurva över fjärrvärmenätet med värmepumpanläggningen inlagd. Som framgår av diagrammet kan värmepumpanläggningen leverera ca 52 250 MWh värmeenergi.

Installation av värmepumpänläggningen antas inte medföra att investeringskostnaderna minskar för värmeverket. Värmepumpänläggningen krediteras endast för den energimängd som levereras. Anledningen är att när effektbehovet i nätet är som störst, kan anläggningen enbart avge ca 2,5 MW. Det är dessutom lämpligt att installera full reserveffekt exklusive värmepumpänläggningens tillskott. Kommunen bör inte bli beroende av industrins leveransförmåga, speciellt eftersom industrin har vissa stilleståndsperioder. Ingen extra personal anses nödvändig utöver den ordinarie personalen vid verket.

4.1 Investeringskostnader

De totala investeringskostnaderna fördelas på följande huvudposter:

- Mindre ombyggnader av befintliga pumpar till en kostnad av 30 kkr.
- PEH-rörskulvert för älvvatten från fabriken försörjningsledning till värmeväxlarcentral. Totalt ca 300 m, kulvert till en beräknad kostnad av ca 200 kkr.
- Tryckhöjningspumpar för älvvatten. Dessa placeras före värmeväxlarna i värmeväxlarbyggnaden. Beräknad kostnad för två pumpenheter inkl motorer och installation, ca 115 kkr.
- Fyra lamellvärmväxlare i rostfritt stål med totalt 400 m² värmeöverföringsyta. Kostnaden inkl installation har beräknats till 1 250 kr/m², vilket ger totalkostnaden 500 kkr.
- Spillvattenpumpar placeras före värmeväxlarna i värmeväxlarbyggnaden. Beräknad kostnad för två pumpenheter inkl motorer och installation ca 150 kkr.
- Värmeväxlarbyggnad uppförs i stål med telferbalk och stor port och ställs upp på betongplatta. Den erforderliga storleken på byggnaden som förutom värmeväxlare skall inrymma pumpar och övrig kringutrustning är L = 10,5 m, B = 7,0 m H = 4,0 m. Kostnaden för byggnaden har beräknats till 160 kkr.
- PEH-rörskulvert från värmeväxlarbyggnad till bergtunnel. Totalt ca 1 500 m kulvert till en beräknad kostnad av ca 1 090 kr.
- Styr- och reglerutrustning, ventiler, anslutning mellan kulvert, pumpar, värmeväxlare, etc, samt övrig kringutrustning. Kostnaden har beräknats till ca 200 kkr.

- Anslutning mellan PEH-rörskulvert och tunnel. Investeringskostnaderna uppgår till ca 100 kkr fördelade på borrhning av hål ca 60 kkr och övrig utrustning ca 40 kkr.
- PEH-rörskulvert från tunnel till värmepumpanläggning ca 600 kkr.
- Kompletta värmepumpanläggning och övrig utrustning enligt beskrivning i avsnitt 3.6. Investeringskostnaden har beräknats till ca 11 400 kkr.

Sammanställning av investeringskostnader

Ombyggnad, pumpstation Hammar	30 kkr
Kulvert till VVX-byggnad:	200 "
Tryckhöjningspumpar, älvvatten:	115 "
Värmeväxlare:	500 "
Spillvärmepumpar:	150 "
Värmeväxlarbyggnad:	160 "
Kulvert till tunnel	1 090 "
Styr, regler, ventiler, anslutningar, övrig kringutrustning:	200 "
Borrhning av hål, m m:	100 "
Kulvert till värmepump:	600 "
Värmepumpanläggning:	11 400 "
Summa	14 545 "
Projektering 10%	1 455 "
Oförutsett 5%	730 "
Summa	16 730 "

4.2 Årskostnader

Årskostnader har beräknats enligt följande:

- kapitalkostnader
- driftkostnader
- underhållskostnader
- försäkringskostnader

Kapitalkostnader

Kapitalkostnaderna har beräknats efter en räntefot av 12% och en avskrivningstid av 15 år. Detta ger en annuitet av 14,7%.

Pumpar

Driftkostnaderna för anläggningen utgörs av elenergi för pumpning av älv- och spillvattenvärme samt elförbrukning för värmepumpen.

Statistik över energiförbrukningen för älvvattenpumparna visar att vid aktuella flöden åtgår för befintliga pumpar ca 0,20 kWh/m³ vatten.

Tidigare då anläggningen arbetade med dubbelt så stora flöden uppgick energiförbrukningen till ca 0,14 kWh/m³.

Anläggningen är dimensionerad för 7 m³/s och det beräknade kraftbehovet vid detta flöde är 2 200 kW. Energibehovet blir då ca 0,09 kWh/m³.

Modifiering av befintliga pumpar beräknas kunna medföra en sänkning av den specifika energiförbrukningen.

I kalkylerna har energiförbrukningen för pumparna satts till 0,18 kWh/m³ vatten.

Med drifttiden 6 000 h och vattenflödet 0,12 m³/s blir den årliga ökningen av elenergiförbrukningen för befintliga pumpar ca 470 MWh.

Förutom pumpenergin för befintliga älvvattenpumpar tillkommer energiförbrukningen för tryckhöjningspumpar såväl på älvvattensidan som på spillvattensidan. Effektbehovet för dessa pumpar har beräknats till 70 resp 57 kW. Med drifttiden 6 000 h blir den årliga energiförbrukningen för dessa pumpar ca 760 MWh.

Den totala årliga elenergiförbrukningen för samtliga pumpar blir ca 1 230 MWh och det totala effektbehovet ca 200 kW.

Ovanstående förbrukning medför följande årliga kostnader:

Effektavgift (150 kr/kW):	31 kkr
Förbrukningsavgift (inkl skatt 19 öre/kWh):	234 kkr
Summa	265 kkr

Den av värmepumpen levererade värmeenergimängden har beräknats till 52 250 MWh. Den specifika förbrukningen av pumpenergi blir 23,5 kWh el/MWh värme, vilket motsvarar en kostnad av ca 5,05 kr/MWh värme.

Som framgår av den konsekutiva belastningskurvan i bilaga 6 kommer värmepumpanläggningen att kunna leverera ca 52 250 MWh per år. Med en värmefaktor av 3,1 blir erforderlig elenergi-mängd till värmepumpen ca 17 550 MWh per år, inklusive erforderlig hjälpenergi. Effektbehovet blir ca 3,4 MW.

Effektavgift (150 kr/kW)	505 kkr
Förbrukningsavgift (inkl skatt 19 öre/kWh)	<u>3 335 "</u>
Summa	3 840 "

Behovet av elenergi vid hetvattencentralen har beräknats minska med 15 kWh_{el} per levererad MWh värmeenergi från värmepumpanläggningen.

Elpriset har uppskattats till 21,5 öre/kWh inklusive fasta avgifter.

Underhållskostnad

Underhållskostnaden har uppskattats till 2% av anläggningskostnaden.

Försäkringar

Försäkringskostnaderna har bedömts uppgå till 0,5% av anläggningskostnaden.

Sammanställning av årskostnader

Kapitalkostnader:	2 460 kkr
Underhållskostnader:	335 "
Försäkringar:	<u>85 "</u>
Summa fasta kostnader:	2 880 "
Energikostnad:	4 105 "
Inbesparad elkostnad vid värmeverket:	<u>./.</u> 170 "
Summa rörlig kostnad:	3 935 "

Årskostnaden för värmepumpprojektet blir således 6 815 kkr/år.

4.3 Resultat

Den inbesparade energikostnaden i jämförelse med olja blir, med ett oljepris av 1 400 kr/m³ och en årsmedelverkningsgrad av 85% ca 8 120 kkr. Årlig vinst blir 8 120 - 6 815 = 1 305 kkr/år.

Detta ger en pay off tid av:

$$\frac{16\ 730}{8\ 120 - 6\ 815} = 4,0 \text{ år}$$

Resultatet kan även uttryckas som internränta ($i = f(\text{livslängd}), (\text{pay off tid}) = 24\%$).

För att ytterligare belysa resultatet kan en jämförelse göras med andra energislag vid värmeverket. Som tidigare påpekats anser vi inte att värmepumpanläggningen ger någon besparing i installationskostnad vid värmeverket. Vid jämförelsen med kol- respektive oljeeldade centraler kommer dessa endast att belastas med bränsle- kostnaden. I bilaga 11 redovisas ett diagram över hur resultatet beror av energipriset. Följande värden ligger till grund för jämförelsen.

Oljepanna

Värmevärde: 10,6 MWh/m³
 Årsmedelverkningsgrad i värmeverket: 85%

Kolpanna

Värmevärde: 7,56 MWh/ton
 Årsmedelverkningsgrad i värmeverket: 83%

Värmepump

Fast kostnad: $\frac{2\ 880 \cdot 10^5}{52\ 250 \cdot 10^3} = 5,5$ öre/kWh

Av diagrammet kan utläsas att med ett oljeeldat värmeverk är en värmepumpanläggning lönsam redan vid dagens energipriser. Används kol som bränsle i värmeverket kan, vid konstant elpris, kolpriset stiga till ca 800 kr/ton innan värmepumpprojektet blir lönsamt. Denna bedömning baseras på nuvarande energibesättning.

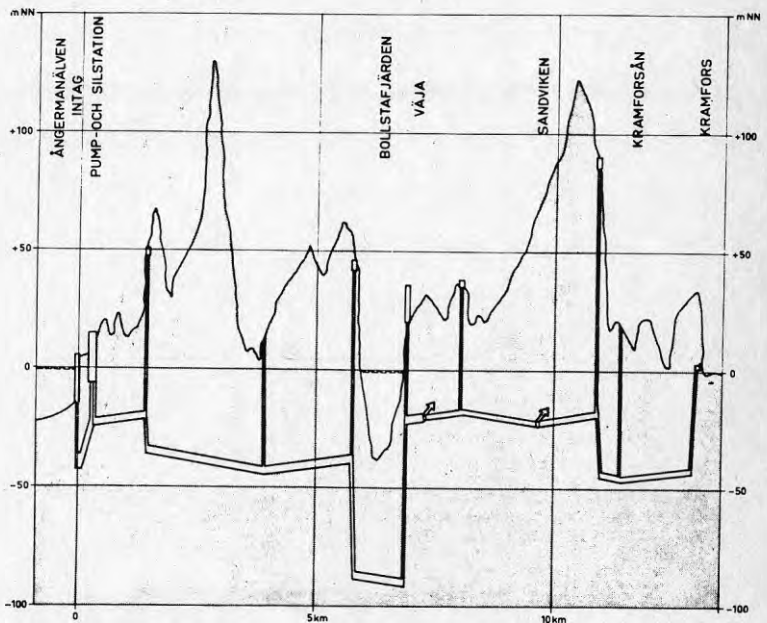
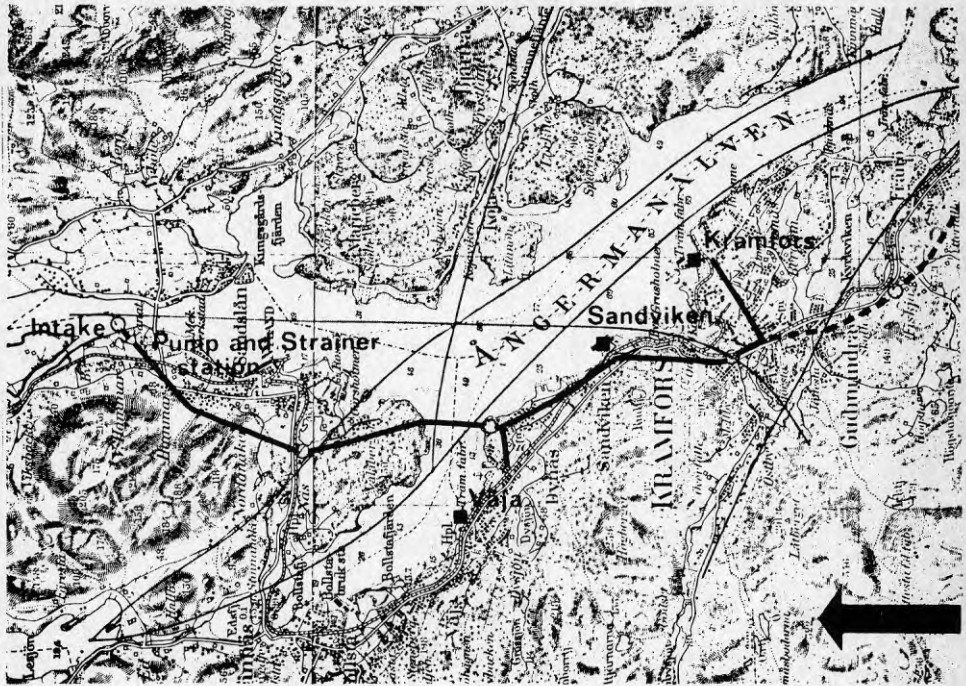
I det fall att värmepumpanläggningen kan anses ersätta en hetvattenpanna förändras naturligtvis lönsamhetsbilden även i kol-fallet. Energikostnaderna för värmeverket belastas som framgår av diagrammet inte av någon investeringskostnad.

5 REFERENSLISTA

1. Pierre, B, 1970, Mekanisk värmeteori
Institutionen för mekanisk värmeteori och kylteknik
KTH, Stockholm
2. Johansson, B, Nordell, B, Berglager
Avdelningen för Vattenteknik, Högskolan i Luleå
3. Ådalstunneln 1964 informationsskrift från Kramfors
kommun

BILAGOR

- 1 Tunnelsträckning och längdprofil
- 2 Älvsvattnets temperaturvariation över året
- 3 Spillvattnets temperaturvariation med älvvattnet
- 4 Temperatur- och flödesvariation från sedimenteringen under tiden 1980 10 26 - 1980 12 04
- 5 Flödesvariation från pappersmaskin 6 under tiden 1980 10 26 - 1980 12 04
- 6 Konsekutiv belastningskurva över fjärrvärmånätet
- 7 Nedre delen av tunnelsträckningen
- 8 Beräkningsmodell tunnelförluster
- 9 Temperaturgradient i tunneln
- 10 Värmeförluster från tunneln
- 11 Kostnadsdiagram
- 12 Underlag PEH-kulvert



Längdprofil av tunnel.

ÄLVVATTNETS TEMPERATURVARIATION
ÖVER ÅRET

C° ▲

19

18

17

16

15

14

13

12

11

10

9

8

7

6

5

4

3

2

1

0

J

F

M

A

M

J

J

A

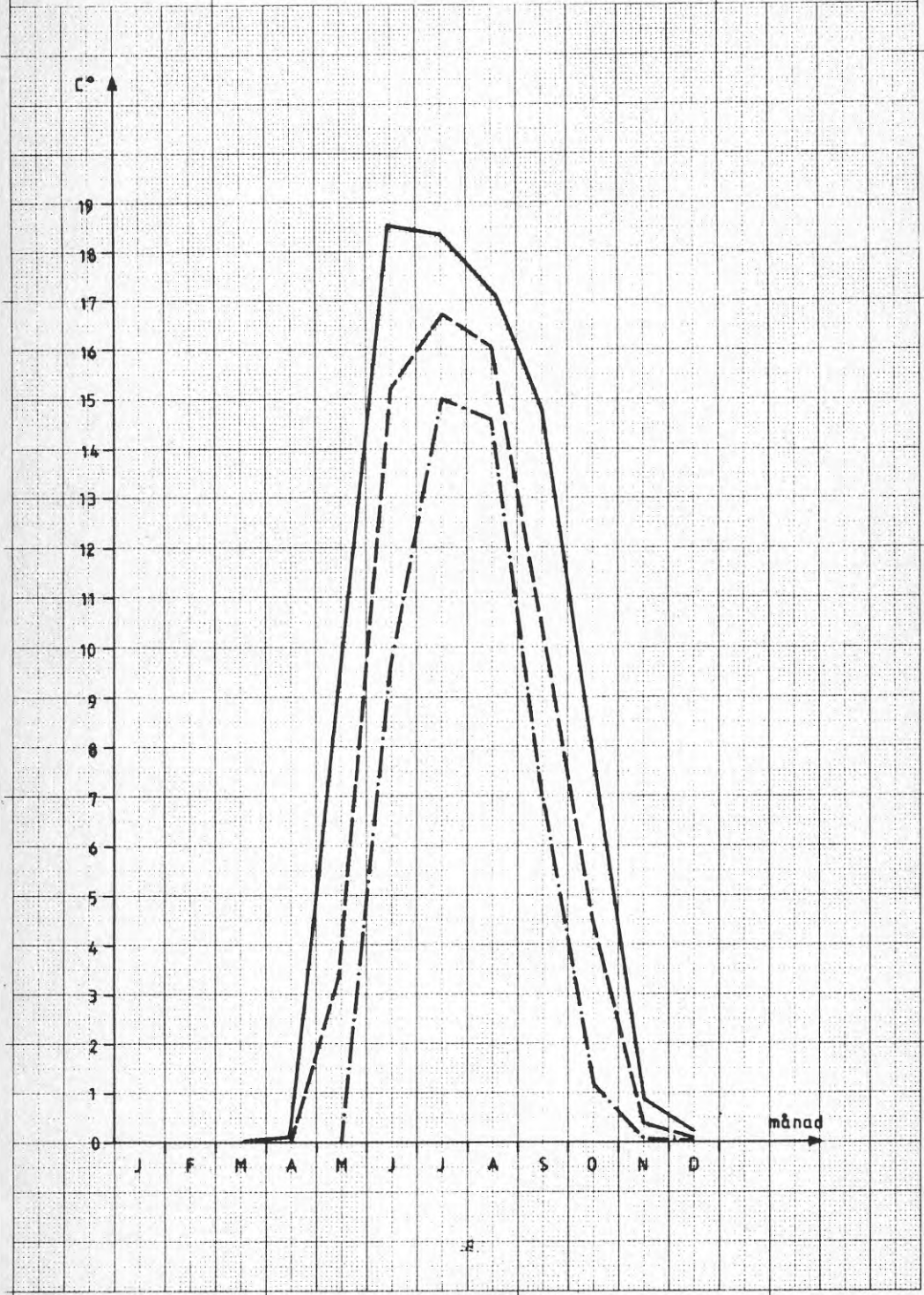
S

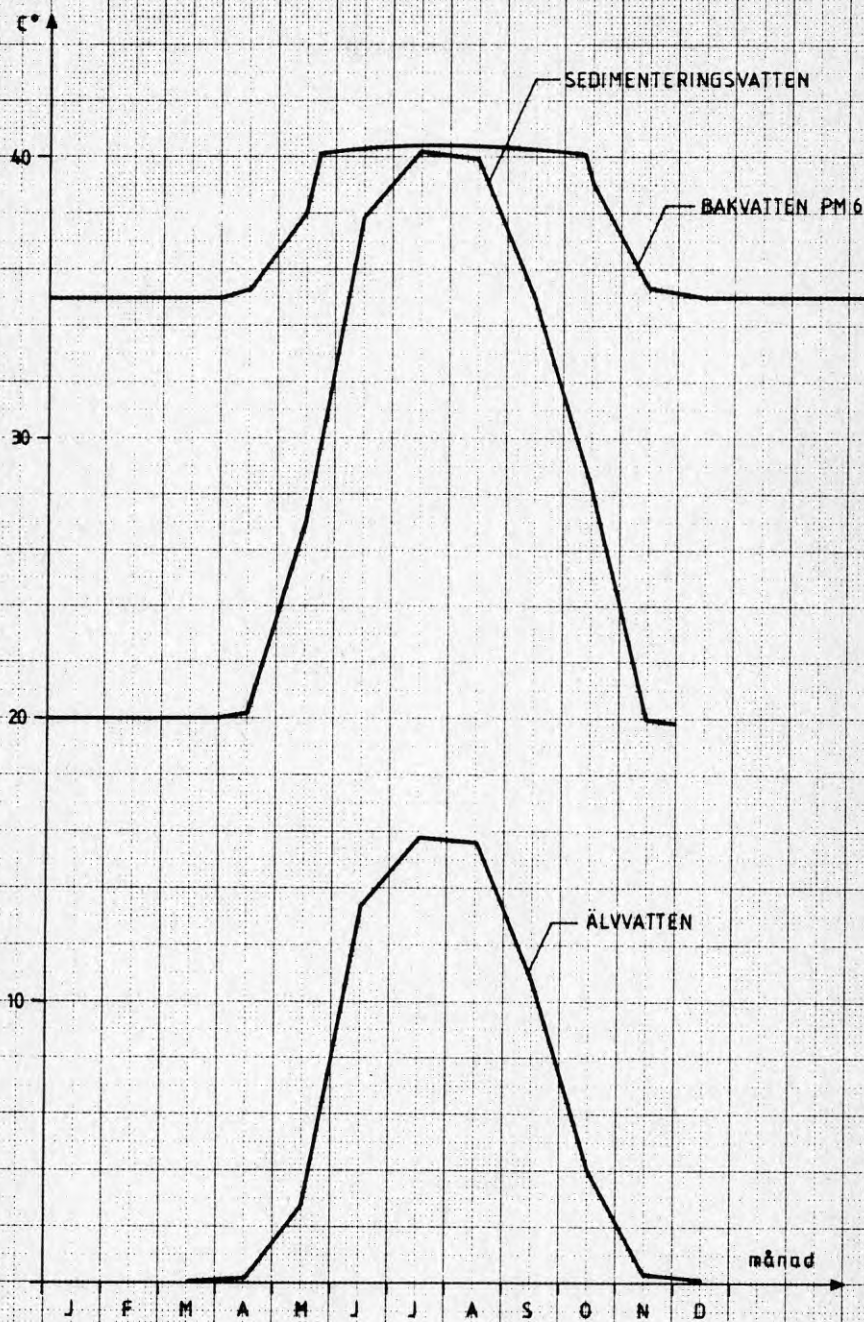
O

N

D

månad



SPILLVATTNETS TEMPERATURVARIATION
MED ÄLVVATTNET

TEMPERATUR- OCH FLÖDESvariation
FRÅN SEDIMENTERINGEN UNDER TIDEN
1980 10 26 - 1980 12 04

$\frac{m^3}{min}$ flöde

flöde

$^{\circ}C$ temp
från sediment

temperatur

30

28

26

24

22

20

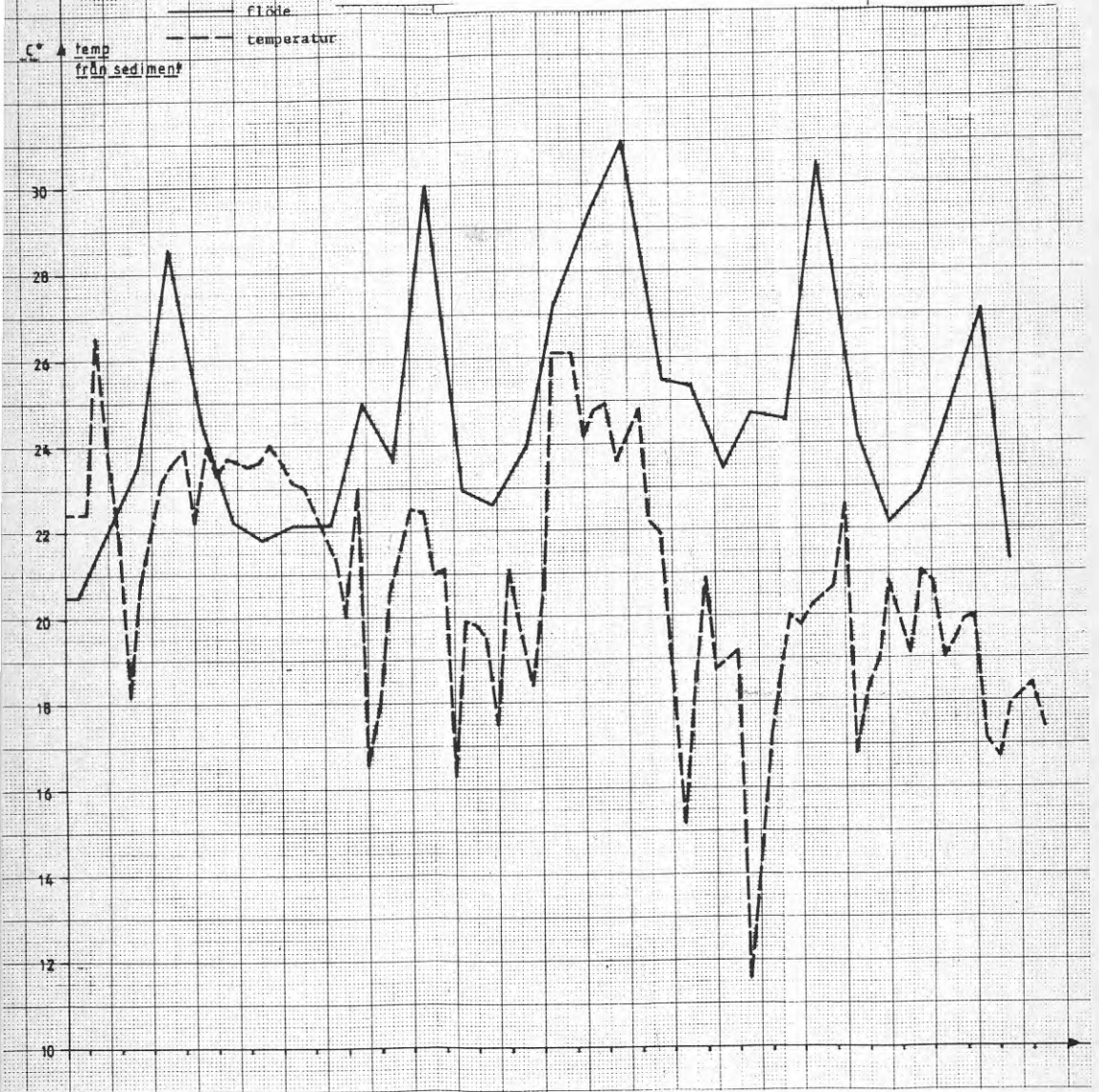
18

16

14

12

10



FLÖDESvariation FRÅN PAPPERSMASKIN 6
UNDER TIDEN 1980 10 26 - 1980 12 04

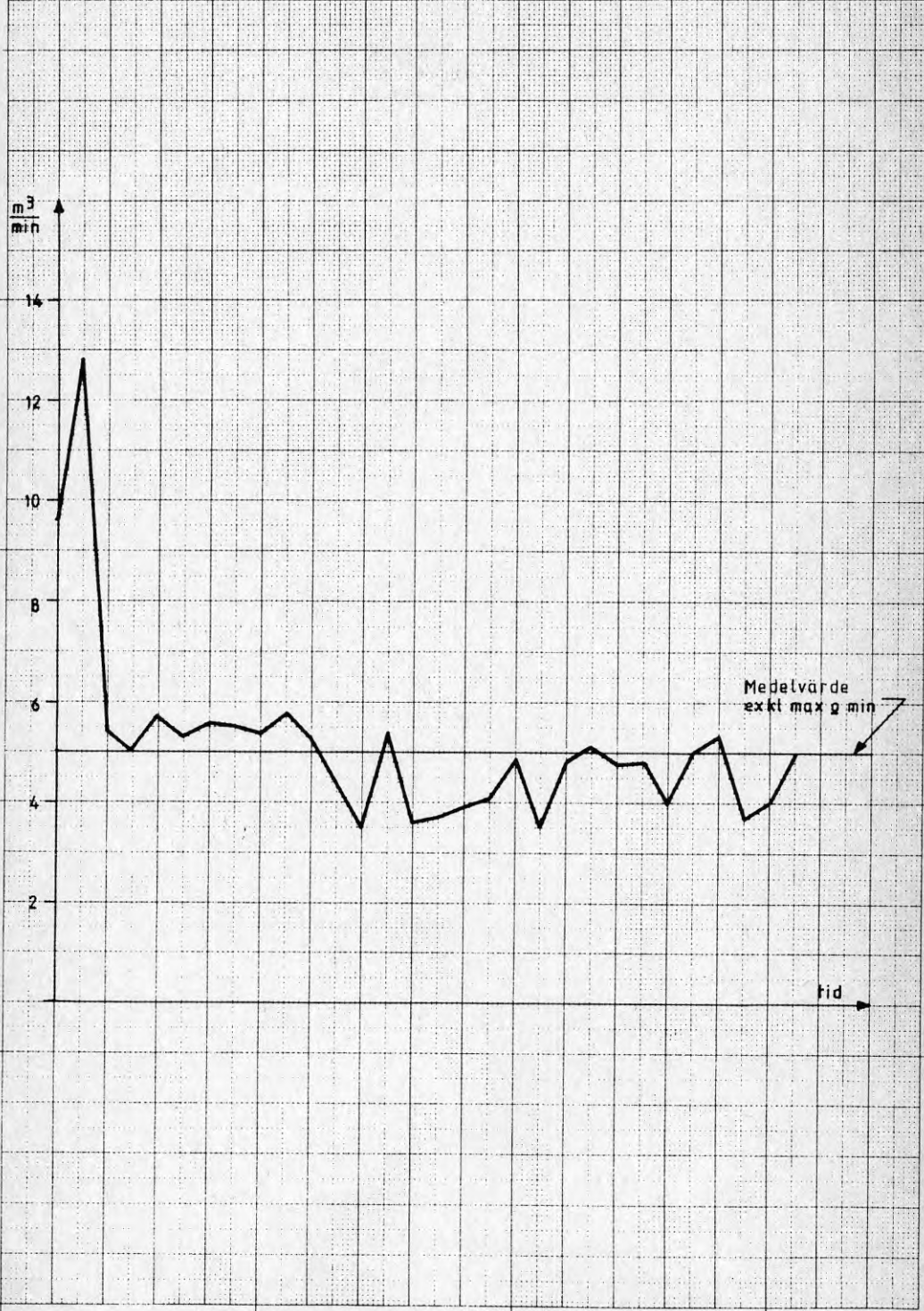
BILAGA 5

$\frac{m^3}{min}$

14
12
10
8
6
4
2

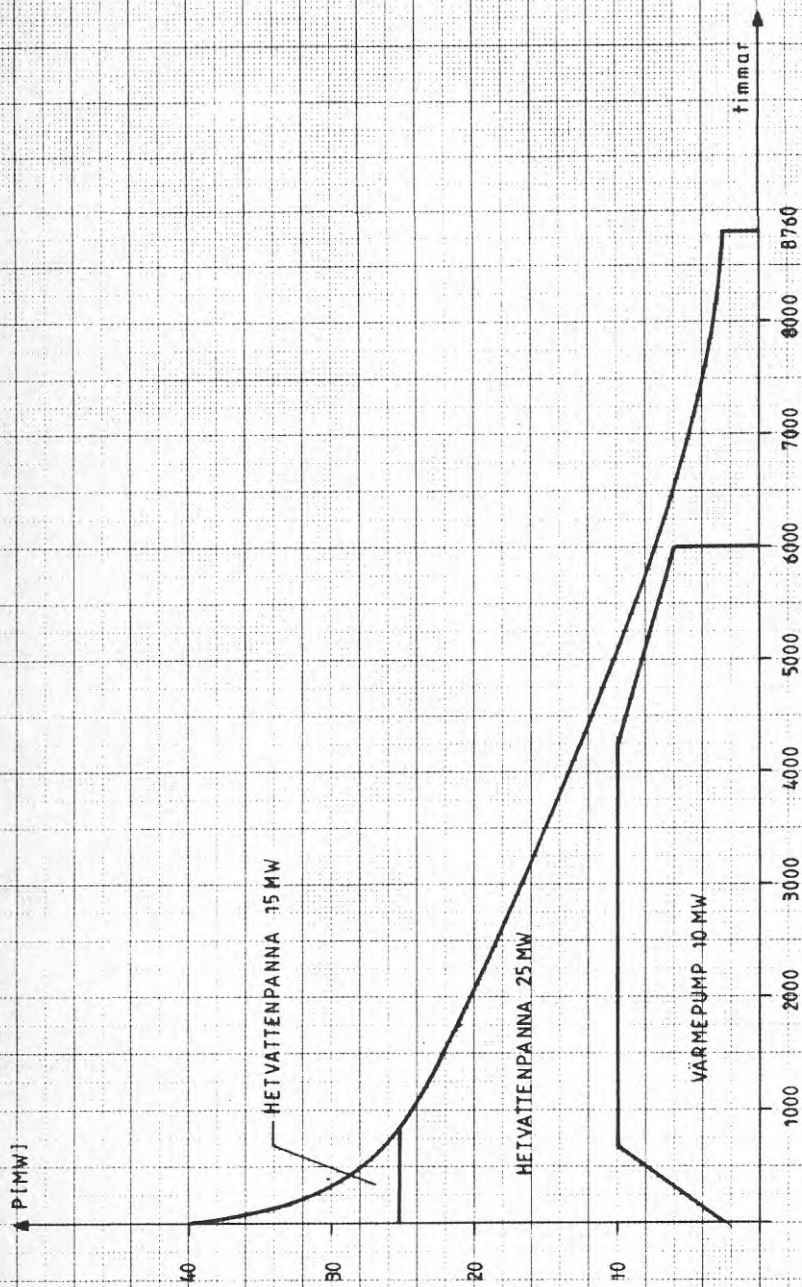
Medelvärde
exakt max g min

tid



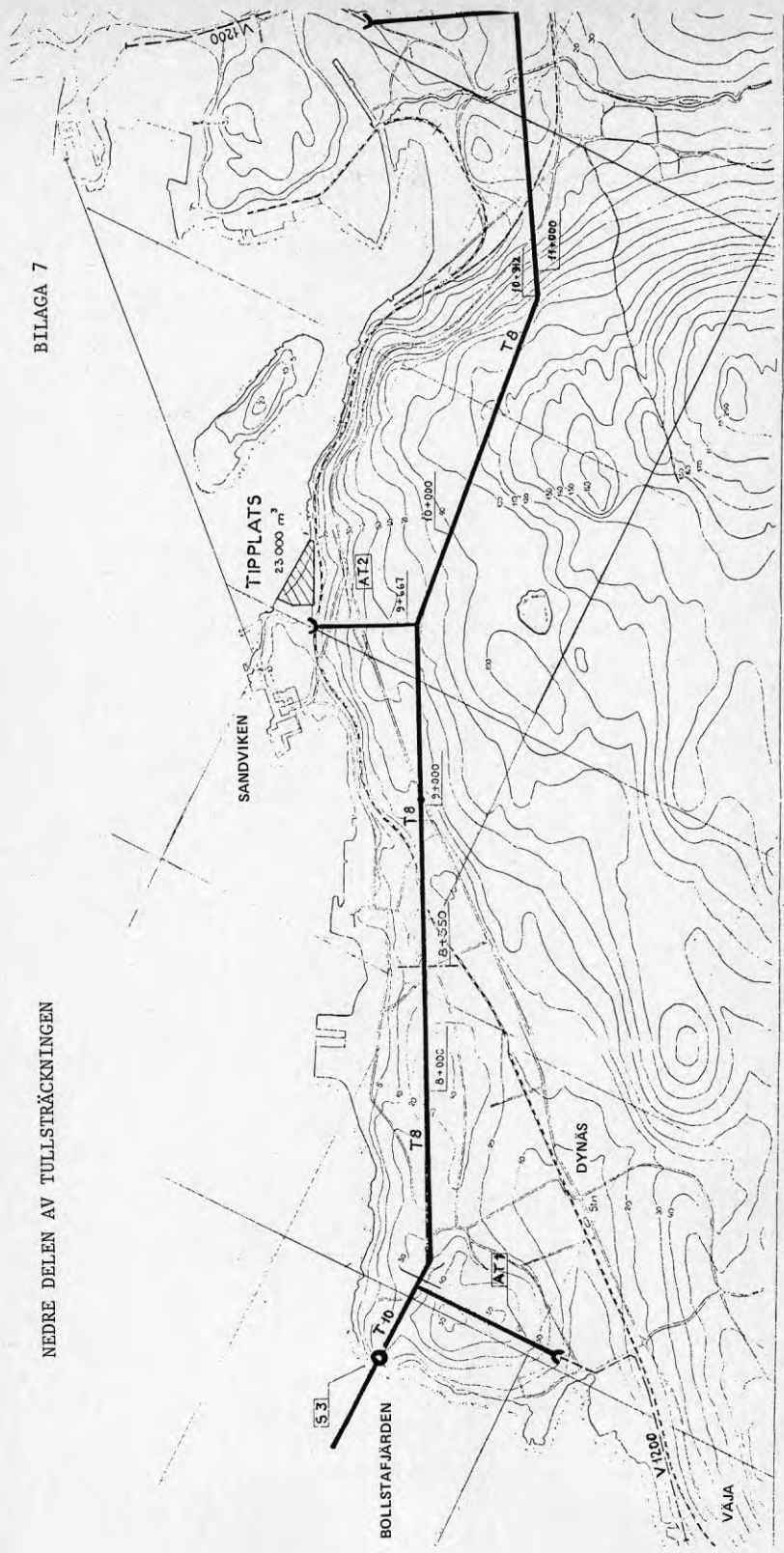
KONSEKUTIV BELASTNINGSKURVA
ÖVER FJÄRRVÄRMENÄTET

BILAGA 6



NEDRE DELEN AV TULLSTRÄCKNINGEN

BILAGA 7



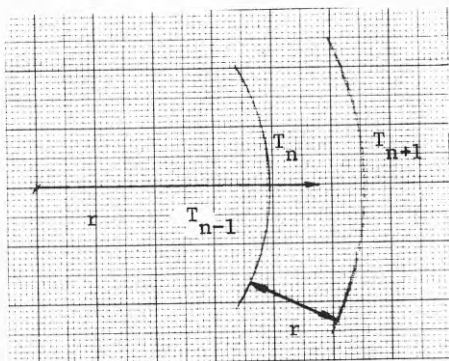
Beräkningsmodell

Temperaturen beräknas i mitten av varje skikt. Tiden mellan varje temperaturberäkning antas vara så kort att temperaturgradienten vid skiktets ytor är konstant under tidsintervallet. Av värmebalansen för skiktet beräknas hur mycket temperaturen hos skiktet förändras under tidsintervallet under inverkan av temperaturgradienten vid ytorna. Ur temperaturtillståndet i väggen vid startögonblicket beräknas hur temperaturen blir efter det första tidsintervallet. Därefter beräknas temperaturen vid slutet av nästa tidsintervall osv.

Värmeflödet i skikten beräknas med utgångspunkt från följande samband:

$$q = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dr} \quad (\text{ref 1}) \text{ som i detta sammanhang lämpligen skrivs som: } q = -\lambda \cdot 2 \cdot r \cdot l \cdot \frac{dT}{dr}$$

A	=	area	(m ²)
λ	=	värmeledningstal	(W/m ⁰ C)
r	=	radie till skiktets mitt	(m)
l	=	tunnelns längd	(m)
dT _n	=	temperaturändring i element n	(⁰ C)
Δr	=	skiktets tjocklek	(m)
ρ	=	densitet	(kg/m ³)
c _p	=	specifikt värme	(J/kg ⁰ C)
T _n	=	temperatur i skikt n	(⁰ C)
dt	=	tidssteg för beräkningarna	(s)



Tillförd energi till skiktet:

$$q_{\text{till}} = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot l \cdot \left(r - \frac{\Delta r}{2} \right) \cdot \left(\frac{T_{n-1} - T_n}{\Delta r} \right)$$

Avgiven energimängd:

$$q_{\text{från}} = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot l \cdot \left(r + \frac{\Delta r}{2} \right) \cdot \left(\frac{T_n - T_{n+1}}{\Delta r} \right)$$

Uptagen värmemängd i skiktet:

$$q = q_{in} - q_{ut} = \int \rho \cdot c_p \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot \frac{dT}{dt}$$

eller

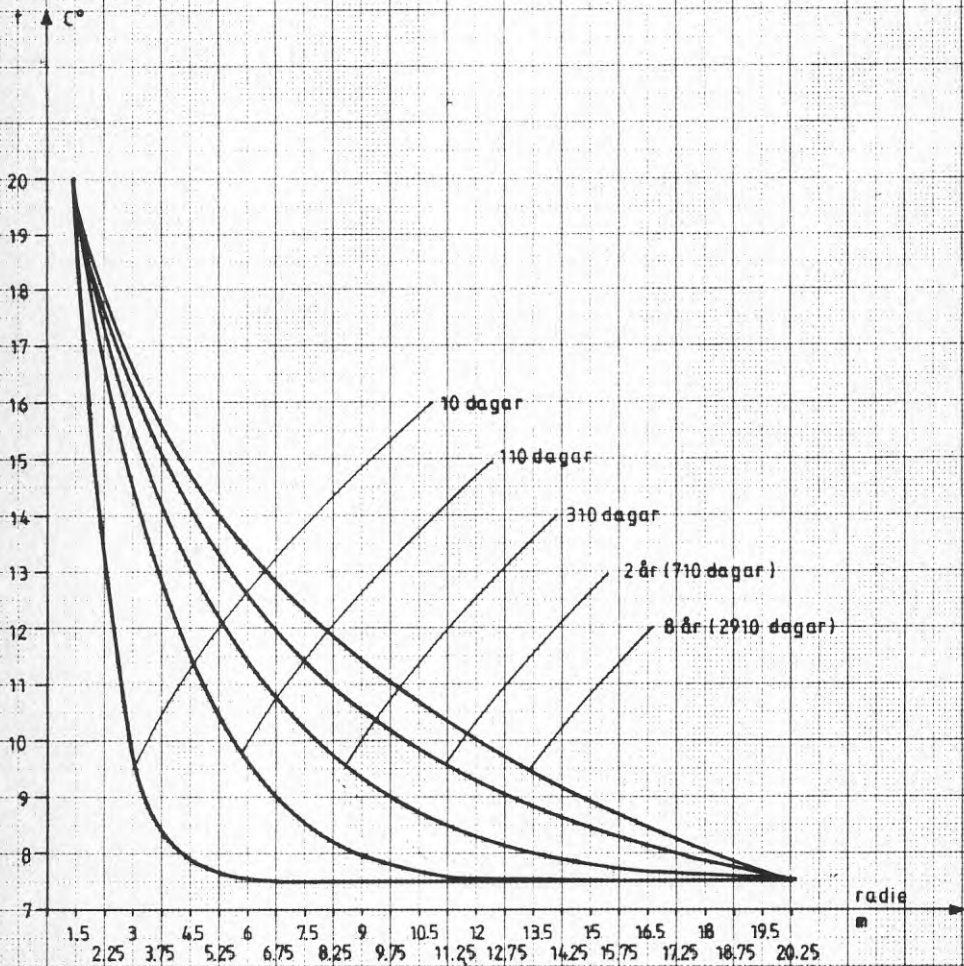
$$dT_n = \frac{\lambda \cdot dt}{\Delta r^2 \cdot r \cdot \rho \cdot c_p} \left(\left(r - \frac{\Delta r}{2} \right) (T_{n-1} - T_n) - \left(r + \frac{\Delta r}{2} \right) (T_n - T_{n+1}) \right)$$

Tidsteget beräknas i programmet som:

$$dt = 0,49 \cdot \left(\frac{\Delta r - r^2}{2} \right) \cdot \frac{\rho \cdot c_p}{\lambda} \quad (\text{ref 2})$$

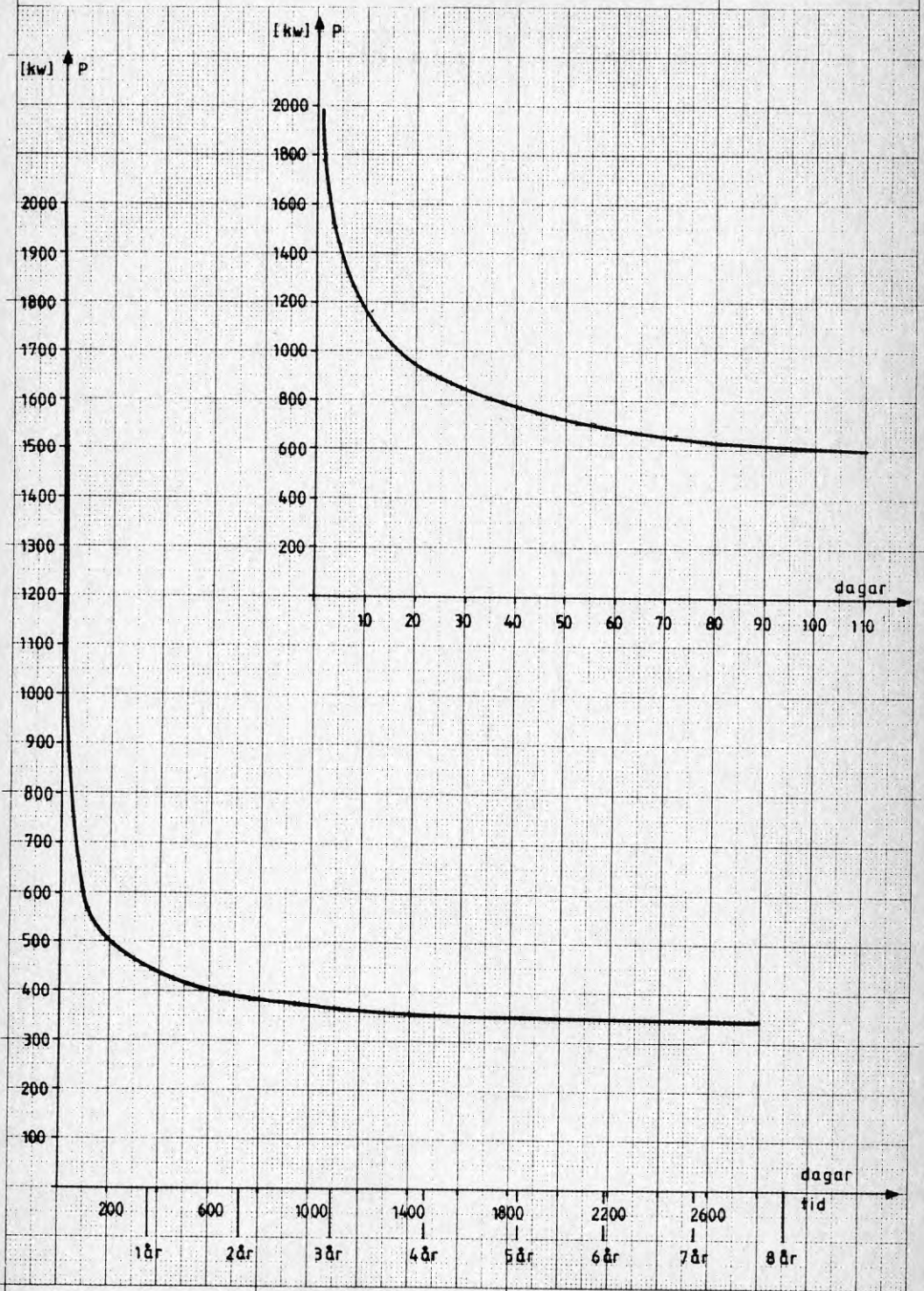
TEMPERATURGRADIENT I TUNNELN

BILAGA 9



VÄRMFÖRLUSTER FRÅN TUNNELN

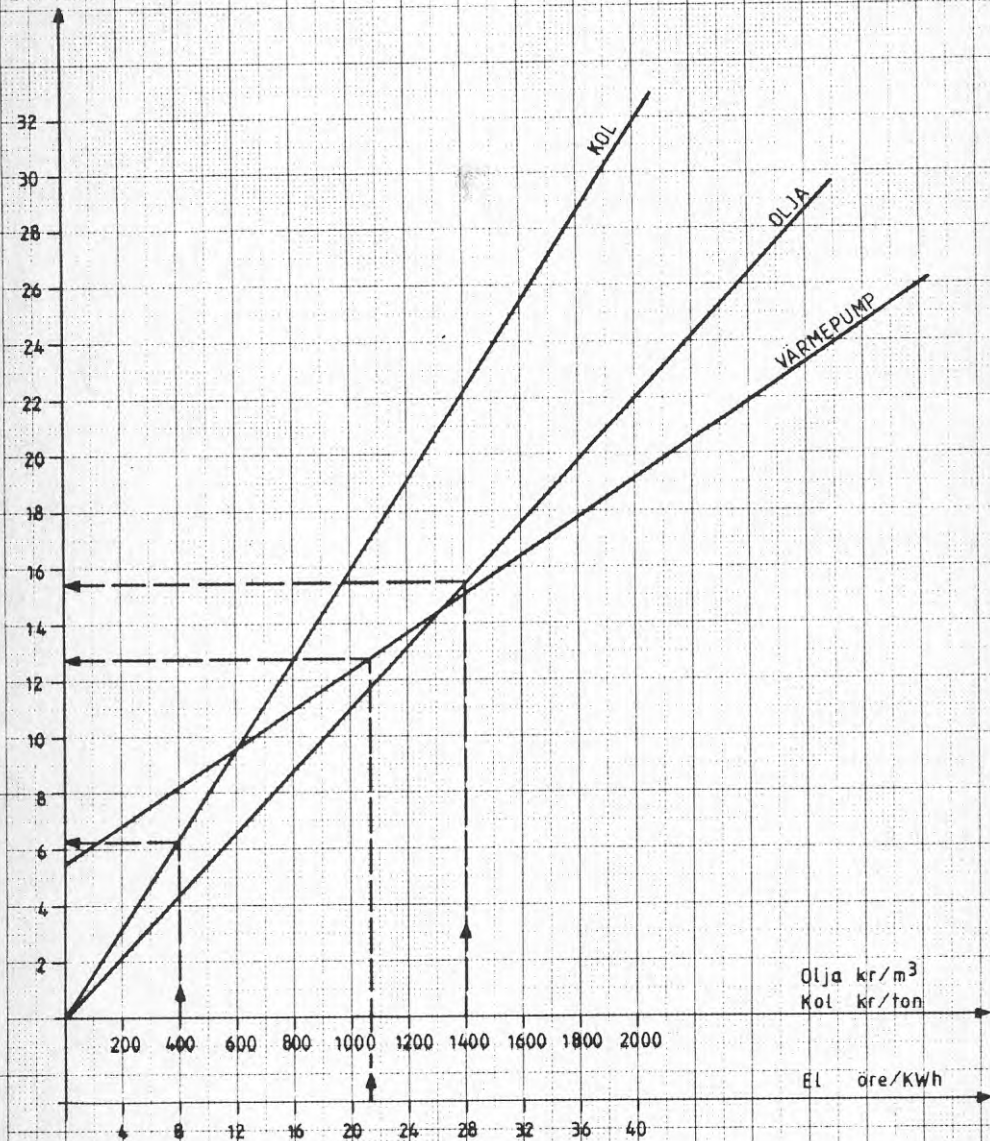
BILAGA 10



KOSTNADSDIAGRAM

BILAGA 11

Öre / kWh



Olja kr/m³
Kol kr/ton

El öre/KWh

Underlag PEH-kulvert

Dimension: DN 400 Dy = 400 mm
 Di = 354,6 mm
 S = 22,7 mm

Tryckklass: TN6

Värmeledningstal: 0,43 W/m⁰C

Grund förläggning, normal ledningsbädd: 0,6 m

Kostnader:

Ledning med svetsning inkl läggning: 450 kr/m

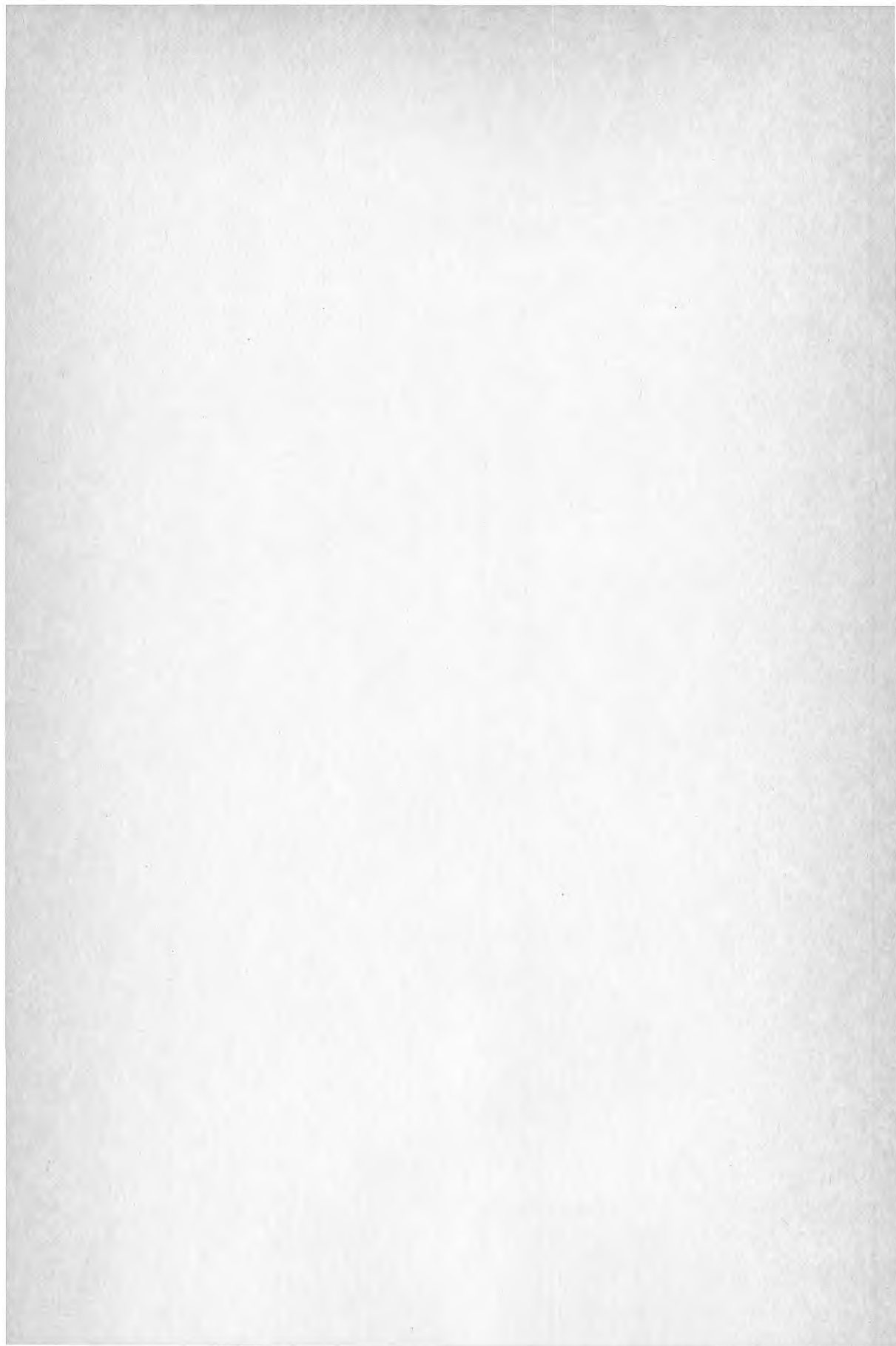
Schaktning och återfyllning inkl fyllnings-
massor: 150 kr/m

Tillägg bergsschakt: 250 kr/m

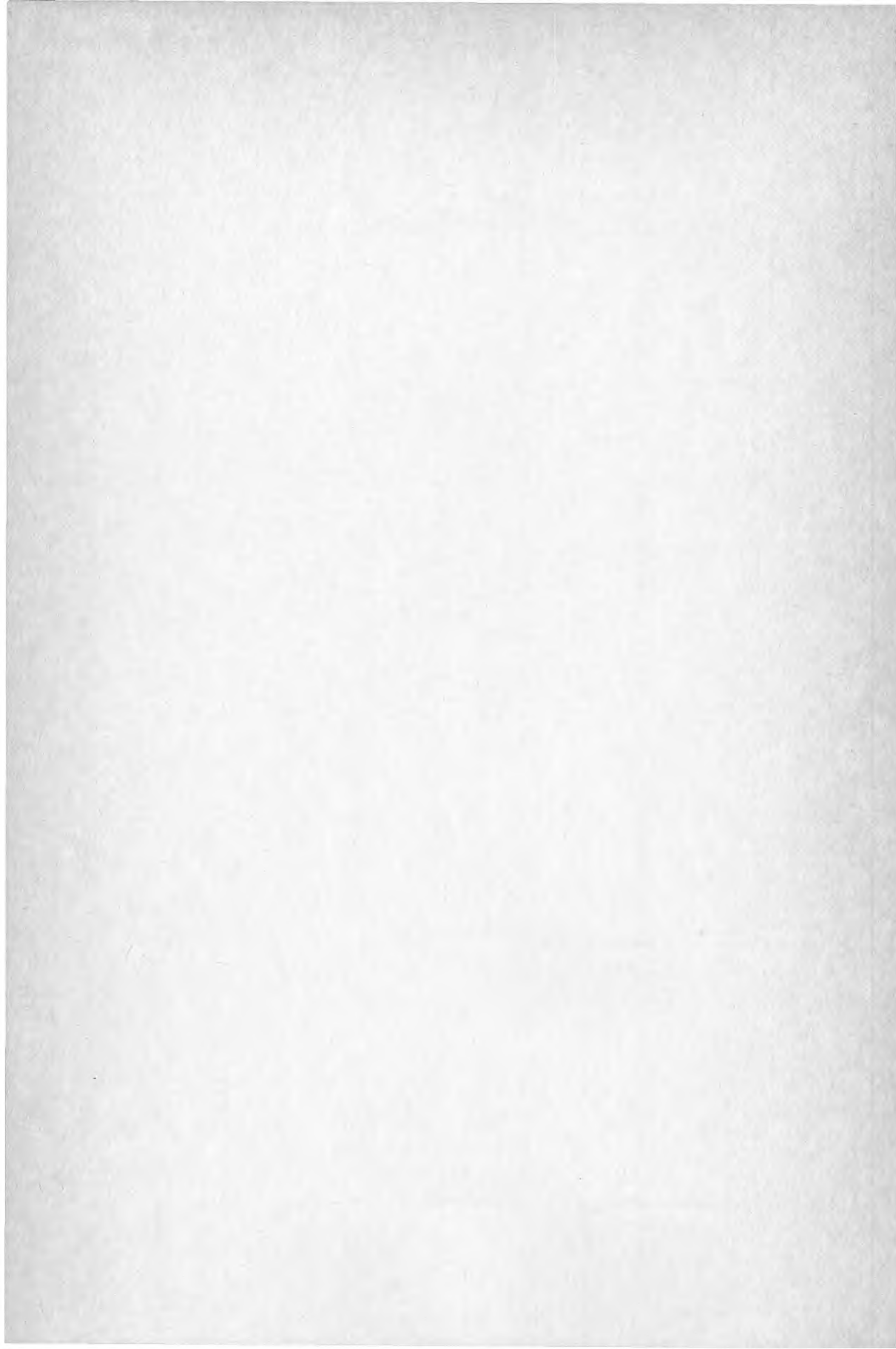
Total kostnad, inkl bergschakt: 850 kr/m

" exkl bergschakt: 600 kr/m

Till kostnaderna kommer projektering, oförutsett m m.







**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 800289-9
från Statens råd för byggnadsforskning till Scandiakonsult
AB, Stockholm.**

R113:1981

ISBN 91-540-3574-0

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

**Art.nr: 6700413
Abonnemangsgrupp:
W. Installationer**

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

Cirka pris: 25 kr exkl moms