



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

R36:1986

Energi- och effektbehov hos en bergverkstad

Torbjörn Winqvist

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

K/A

Bygghorskningsrådet

R36:1986

ENERGI- OCH EFFEKTBEHOV HOS EN BERGVERKSTAD

Torbjörn Winqvist

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 791343-3
från Statens råd för byggnadsforskning till VBB AB,
Stockholm.

REFERAT

Energiomsättningen i en bergverkstad har mätts under en 18-månaders period. Det specifika uppvärmningsbehovet har befunnits vara 230 kWh/m^2 , år resp 31 kWh/m^3 , år. Energiförlusterna består av transmissionsförluster (18%), ventilationsförluster (53%), kylbehov (4%), ångbildningsvärme (24%) och övrigt (1%). Av förlusterna återvinns 10%. Med effektivare värmeåtervinning skulle uppvärmningsbehovet kunna reduceras avsevärt. I de angivna värdena ingår ej förluster p g a ofrivillig ventilation och från klimatisk synpunkt omotiverad drift, som förekommit under mätperioden.

Bergverkstaden är belägen i mellersta Norrland, Den är byggd i dränerat, granitiskt berg. Verkstadens volym är $28\,500 \text{ m}^3$, golvytan $3\,900 \text{ m}^2$, medeltemperaturen i verkstaden 18°C , luftomsättningen 1,6 ggr/h under 2 300 timmars drift/år. Transmissionsförlusterna är konstanta över året, medan ventilationsförlusterna helt naturligt beror av yttertemperaturen. Ångbildningsvärmets varierar i tiden med grundvattenbildningen för ett litet (snabbt) grundvattensystem. Denna, som i den aktuella regionen främst styrs av snösmältningsperioden, har ett minimum under den kallaste årstiden och ett maximum i juni. Bergverkstadens effektbehov är därför störst under mars månad.

Förslag ges till metodik att ungefärligt ange ångbildningsvärmens storlek och årscykel hos bergrum i drift. Synpunkter ges också på sätt att reducera vatteninläckningen genom berget, som ju är den främsta orsaken till ångbildningsvärmens stora andel i energibalansen.

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

R36:1986

ISBN 91-540-4537-1

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Liber Tryck AB Stockholm 1986

INNEHÅLL

SAMMANFATTNING

1.	INLEDNING	7
1.1	Syfte	7
1.2	Projektets genomförande	7
2.	OM ENERGI- OCH EFFEKTBEHOV HOS UPPVÄRMDA ELLER KYLDA BERGRUM	9
3.	BESKRIVNING AV BERGVERKSTADEN	11
3.1	Läge	11
3.2	Byggnad	11
3.3	Verksamhet	12
3.4	Uppvärmnings- och ventilations- system	12
3.5	Yttre byggnader	14
3.6	Vidtagna förbättringsåtgärder i bergverkstaden under mätperioden	14
4.	BERÄKNINGSMODELL OCH MÄTPROGRAM	17
4.1	Energibalans	17
4.2	Mätprogram	19
4.3	Redogörelse för utförda mätningar	20
5.	REDOVISNING AV MÄTNINGAR OCH BERÄKNINGAR	23
5.1	Klimatet på orten	23
5.2	Bergverkstadens klimat	23
5.3	Energibalans under mätperioden	25
5.4	Specificering av posterna i energibalansen	25
6.	DISKUSSION AV MÄTRESULTATEN OCH SLUTSATSER	39
6.1	Normaliserad energibalans, exklusive värmeåtervinning	39
6.2	Tillförd energi	39
6.3	Transmissionsförluster	41
6.4	Ventilation, exkl värmeåtervinning	41
6.5	Kylenergi	41
6.6	Förångningsenergi. Samband med grundvattenbildningen	41
6.7	Åtgärder för att minska förång- ningsenergens storlek	44
6.8	Effektbehovet	45
6.9	Metod att bestämma förångnings- energens andel i befintliga anläggningar	46
6.10	Värmeåtervinning	46
6.11	Summerande karakterisering av bergverkstaden	47

SAMMANFATTNING

Energiomsättningen i en bergverkstad har mätts under en 18-månadersperiod. Det specifika uppvärmningsbehovet har befunnits vara $230 \text{ kWh/m}^2, \text{år}$ resp $31 \text{ kWh/m}^3, \text{år}$. Energiförlusterna består av transmissionsförluster (18 %), ventilationsförluster (53 %), kylbehov (4 %), ångbildningsvärme (24 %) och övrigt (1 %). Av förlusterna återvinns 10 %. Med effektivare värmeåtervinning skulle behovet att tillföra energi kunna reduceras avsevärt. I de angivna värdena ingår ej förluster pga ofrivillig ventilation och från klimatisk synpunkt omotiverad drift, som förekommit under mätperioden.

Bergverkstaden är belägen i mellersta Norrland. Den är byggd i dränerat, granitiskt berg. Verkstadsens volym är $28\,500 \text{ m}^3$, golvytan $3\,900 \text{ m}^2$, medeltemperaturen i verkstaden 18°C , luftomsättningen $1,6 \text{ ggr/h}$ under $2\,300$ timmars drift/år.

Transmissionsförlusterna är konstanta över året, medan ventilationsförlusterna helt naturligt beror av yttertemperaturen. Ångbildningsvärmets varierar i tiden med den lokala grundvattenbildningen hos små (snabba) grundvattensystem. Denna, som i den aktuella regionen främst styrs av snösmältningsperioden, har ett minimum under den kallaste perioden och ett maximum i juni. Bergverkstadsens effektbehov är därför störst först under mars månad.

Förslag ges till metodik att ungefärligt ange ångbildningsvärmets storlek och årscykel hos berg- rum i drift. Synpunkter ges också på sätt att reducera vatteninläckningen genom berget, som ju är den främsta orsaken till ångbildningsvärmets stora andel i energibalansen.

1. INLEDNING

Att utrymmen i bergrum har låga energi- och effektbehov för uppvärmning är välbekant. Storleksordningen av dessa är däremot mindre känd. En del data finns redovisade i olika litteratur. Uppgifterna avser olika slag av verksamheter och är inte särdeles samstämmiga. De utgörs därtill av summariska data över total tillförd energi eller, vanligare, av teoretiska beräkningar.

I BFR-rapporten R58:1980 Effekt och energibehov i under- respektive ovanmarksbyggnader (forskningsanslag 78 08 04-0) sammanfattas tillgänglig litteratur på området samt förbrukningsdata för 5 olika verksamheter, däribland verkstäder, belägna i bergrum.

1.1 Syfte

I detta uppföljande projekt görs för första gången vederligen en detaljerad studie av energiomsättningen i ett bergrum där rumstemperatur (18-20°C) upprätthålls under driftmässiga förhållanden. Projektet har tillkommit bl a som svenskt bidrag inom ett IEA (International Energy Agency)-samarbete kring energiaspekter vid undermarksanvändning.

Syftet med projektet är att visa vilka energimängder som i praktiken har förts till en anläggning i drift och hur de olika förlustposterna har fördelat sig vad gäller omfattning och fördelning i tiden. Sådan kunskap är värdefull både som underlag för analys och åtgärdsplanering i befintliga anläggningar och för projektering av nya.

1.2 Projektets genomförande

Genom tillmötesgående från Fortifikationsförvaltningens sida har projektgruppen kunnat studera en militär bergverkstad (anläggning G0221) i vilken en över året likartad verksamhet bedrivs. Verkstaden är inrymd i ett bergrum med en golvyta om 3900 m² och en volym om 28 500 m³. C:a 25 personer arbetar där med olika slag av verkstadsarbeten. C:a 25 ton material förs in och ut ur verkstaden en normal arbetsdag. Verkstaden värms via ventilationsluften (förvärmning från oljepanna som förbrukar c:a 150 m³ olja/år) och via en betydande elanvändning (c:a 500 MWh/år).

Efter instrumentering påbörjades mätningar i juni 1981. Projektet genomfördes med anslag från BFR fram till juli 1982. Som ett resultat av mätningarna kunde ett antal åtgärder för att förbättra verkstadens driftekonomi föreslås. FortF beslöt att genomföra dessa åtgärder och att bekosta fortsatta mätningar under ytterligare 11 månader, fram t o m maj 1983. Därmed gavs möjligheter att utvärdera effekterna av de vidtagna åtgärderna.

Verksamma i projektet har varit:

Ingenjör Roland Avasjö, Theorells Kontroll AB
Civ ing Per-Erik Larsson, Larsson Värmeteknik
Civ ing Torbjörn Winqvist, VBB AB (projektledare)

Mätcentralen för energiforskning vid KTH har tillhandahållit registreringsapparatur och bearbetningsresurser samt grundbehandlat registrerade data. Civ ing Per Huitfeldt vid Mätcentralen har därvid med sin kunnskap och entusiasm varit ett stöd för oss andra. Civ ing Lars Malmström, VBB har upprättat ett utvärderingsprogram och räknat fram de presenterade medelvärdena av registrerade data.

Mätningar av ofrivillig ventilation med hjälp av spårgas har utförts av ing Cenneth Lindqvist, IVK Ventilationskonsult.

Fil dr Åke Möller, VBB har bidragit med synpunkter på sambanden mellan grundvattenbildning och vatteninläckning i bergum.

Ing Göran Wilson, Wilson & Dahl Ingenjörbyrå, har bidragit med sin kunskap om dimensionering av VVS-anläggningar i bergum.

Såväl under projektplaneringen som under mätningsarbetet har projektgruppen mött stort intresse och hjälpsamhet från verkstadschefens och hans personals sida liksom från Fortifikationsförvaltningens. Jag vill här gärna tacka för denna för projektet helt avgörande hjälp. Jag hoppas att vår analys i gengäld skall visa sig nyttig för denna och andra bergverkstädernas fortsatta drift.

Stockholm i juni 1985

Torbjörn Winqvist

2. OM ENERGI- OCH EFFEKTBEHOV HOS UPPVÄRMDA ELLER KYLDA BERGRUM

Värmda eller kyllda berggrum isoleras inte, utan berget självt får vara isolator. Transmissionsförlusterna bestäms av värmeledningsförmågan och värmekapaciteten hos omgivande bergarter och överlagrade jordarter. Isoleringsförmågan hos berg är låg, 10 m granit motsvarar 10-14 cm mineralull. Då bergtäckningen av konstruktiva och topografiska skäl vanligtvis är stor, blir emellertid det sammanlagda värmemotståndet stort. Genom bergmaterialets avsevärda värmetröghet kan därtill värmeströmningens hastighet föga varieras.

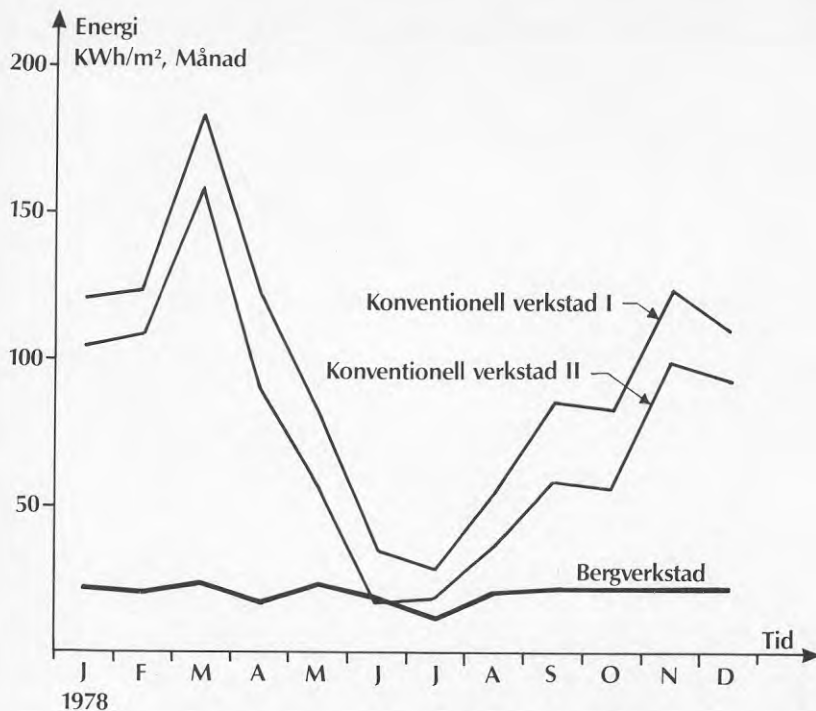
När ett nyanlagt berggrum tas i drift måste under ett inledande skede den omgivande bergmassan värmas från sin ursprungliga temperatur. Effektbehovet för att upprätthålla önskad ny temperatur i berggrummet är först mycket stort, men avtar dramatiskt efter några månader för att sedan asymptotiskt närma sig ett slutvärde. Fortvarighetstillstånd i bergmassan ovanför ett berggrum kan inträda efter något decennium, beroende på bl a bergtäckningen, medan transmissionsflödena nedåt/åt sidorna knappast hinner utvecklas fullständigt under ett sekel. Efter en 10-årsperiod kan effektbehovet vara storleksordningen 20-40 % över det slutliga. På större djup än storleksordningen 10-25 m under markytan (beroende på snödjup, lagerföljd och slag av material m m) är årstidsvariationen av bergets temperatur försumbar. För de flesta berggrum är därför transmissionsförlusterna oberoende av ytterluftens temperaturvariationer.

Den inledande uppvärmningen av den omgivande bergmassan kan ses som en investering. För att en ny temperatur i berggrummet ska kunna etableras krävs återigen en avsevärd energiinsats. Ett avbrott i tillförseln av uppvärmningsenergi får därför endast marginella konsekvenser under en ansevärd tidsperiod, vilket är en värdefull drift- och säkerhetsaspekt.

Till transmissionsförlusterna kommer energiförluster genom ventilation. Ventilationsbehovet beror av verksamheten i berggrummet. På grund av bergets täthet kan den ofrivilliga ventilationen kontrolleras på ett helt annat sätt än vad fallet är för vanliga byggnader. Förutsättningarna för att återvinna den energi som tillförs tilluften är därmed goda.

I den inledningsvis nämnda forskningsrapporten jämförs en bergverksstad i södra Sverige med två konventionella verkstäder, byggda 1974-75, på samma plats och jämförbara vad avser storlek och verksamhet.

Behovet av tillförd energi under år 1978 för de tre verkstäderna framgår av figur 1.



Figur 1 Tillförd energi till två konventionella verkstäder och till en bergverkstad (Windelhed, Wingvist 1980).

Sammanfattningsvis anges den tillförda energin detta år till:

Objekt	Total tillförd energi	
	kWh/m ² , år	kWh/m ³ , år
Konv verkstäderna, medeltal	1 039	131
Bergverkstad	249	52

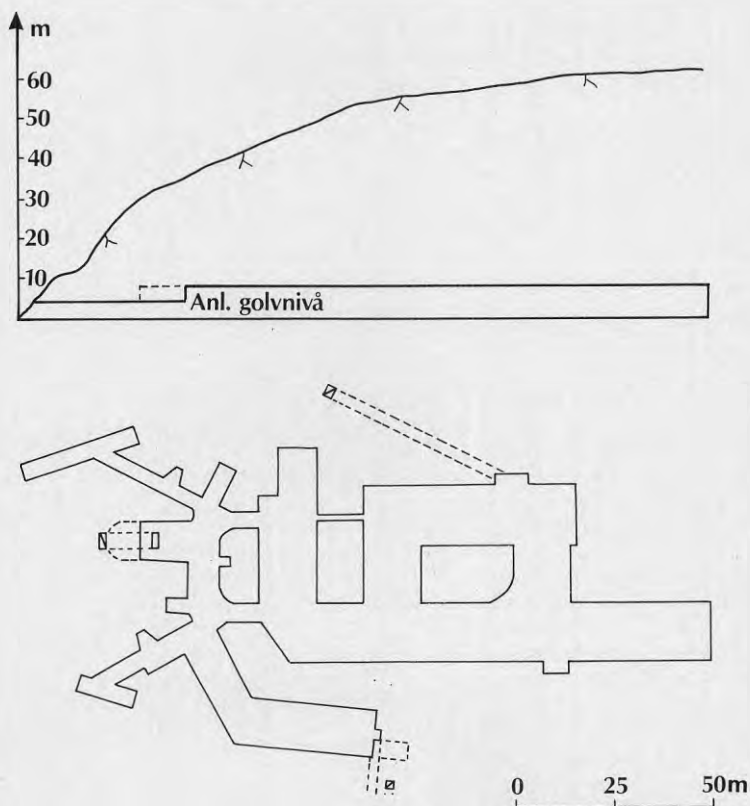
Det specifika effektbehovet räknat per m² värmd byggnadsyta var för bergverkstaden endast ca 25 % av vad de konventionella verkstäderna krävde.

3. BESKRIVNING AV BERGVERKSTADEN

3.1 Läge

Verkstaden är belägen i mellersta Norrland. Den klimatiska belastningen på platsen är ca 5 070 graddagar och årsmedeltemperaturen är 3,7°C.

3.2 Byggnad



Figur 2 Schematisk plan och sektion av berggrumsanläggningen.

Verkstaden är inrymd i ett berggrum, vars huvudsakliga form och bergtäckning framgår av figur 2. Verkstaden har två infartstunnlar och står dessutom i förbindelse med markytan via tre ventilationsschakt. Bergmassan utgörs av granit med värmeledningsförmågan 3,6 W/m,°C och värmekapaciteten 2,5 MJ/m³,°C. Bergverkstadens totala golvyta är ca 3 900 m² och volym ca 28 500 m³.

Inne i berggrummet har en byggnad uppförts, som inrymmer de olika verkstadslokalerna. Byggnaden är uppförd i ca 15 cm oisolerad betong. Luftspalten mellan bergvägg och betongväggar är ca 1-2 m medan det fria utrymmet över betongtaket kan nå 3 m. Luftvolymerna utanför och innanför byggnadskalet kommunicerar via otätheter vid dörrar, kabelgenomföringar osv, belägna vid de tre oinklädda ventilationsschakten och på några andra platser.

3.3 Verksamhet

I verkstaden utförs mekanisk bearbetning, målningsarbeten, viss träbearbetning m m. Arbetets omfattning är likartad över året. Arbetet bedrivs vardagar kl 0700-1600, ca 230 arbetsdagar/år. Normalt är ca 25 personer kontinuerligt sysselsatta i verkstaden. Ett materialflöde motsvarande ca 25 ton stål anländer till respektive lämnar verkstaden per arbetsdag.

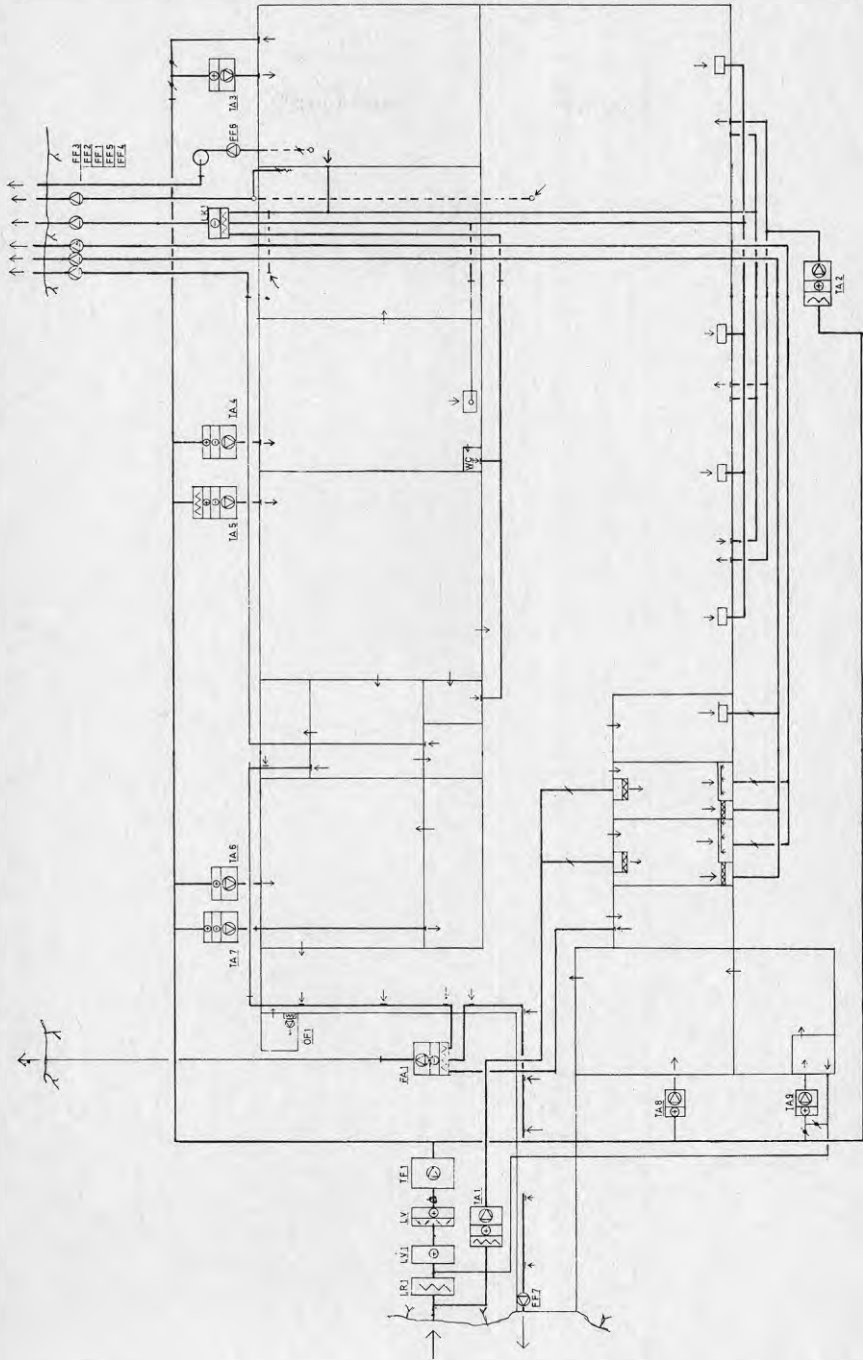
Materialflöde, fordonstrafik, persontrafik m m till verkstaden sker genom den ena (östra) entrétunneln medan den andra (västra) nyttjas i första hand för verkstadens egen försörjning av reservdelar.

3.4 Uppvärmnings- och ventilationssystem

Bergverkstaden uppvärms med luft som via värmebatterier tillförs värme från en oljepanna. Värmepannan försörjer även två byggnader utanför berget. Verkstaden försörjs med tilluft via en tilluftskanal vid ena tillfartstunneln. Luft förs från verkstaden via 6 kanaler i ett frånluftsschakt och via en frånluftskanal samt en ventilationskanal från ett kraftaggregat i det andra. Det tredje stigschaktet som finns står ej i ventilationsmässig kontakt med berggrummet och nyttjas ej. Sommartid kan kylning av verkstaden erfordras vilket sker genom ventilation nattetid och/eller kylning av delar av tilluften.

Verkstaden togs i drift år 1955. Under åren 1975/76 byggdes uppvärmnings- och luftbehandlingssystemet om, varvid bl a värmeåtervinning av frånluften infördes. Sedan dess har några smärre förändringar av just värmeåtervinningen genomförts.

Luftbehandlingssystemet i bergverkstaden framgår av flödesschemat, se figur 3. Tilluften förs huvudsakligen till verkstaden av tilluftsfläkten TF1, en mindre del av tilluftsfläkten TA1. Frånluften förs bort från verkstaden av frånluftsfläktarna FA1 och FF1, FF2, FF3, FF4, FF5 och FF6. Ytterligare en frånluftsfläkt finns, FF7, som intermitterent för avgaser ut ur den östra tillfartstunneln. Detta luftflöde bedöms dock ej påverka verkstadens uppvärmningsbehov (intern luftförelse). Luftflödernas storlek och de manuellt styrda fläktarnas drifttider anges i avsnitt 5.4.



Figur 3 Flödesschema för bergverkstadens luftbehandlingsystem

Luften förvärms vid TF1 och TA1. Luften från TF1 eftervärms vid 8 tilluftsfläktar kallade TA2 - TA9, och luften från TA1 eftervärms vid två utsläppsdon. Från luften från FA1 och FF5 passerar värmeväxlare där värme överförs till ett förvärmningsbatteri vid TF1 via en glykolkrets.

Följande driftsrutiner tillämpas:

TF1 styrs av tidur. Fläkten körs 0630-1630 alla arbetsdagar. Vid utetemperaturer lägre än -25°C körs fläkten på halvfart

TA1 och FF1 samköres. De betjänar två sprutboxar och står still, körs på halvfart eller helfart allt efter behov

FA1, FF3 och FF5 samkörs med TF1.

FF2 samkörs med TF1 på halvfart. Vid särskilda behov körs FF2 på helfart

FF4 och FF6 startar och stoppas från manuella manöverdon.

Vid behov av kylning under natt körs TF1, FA1, FF2 och FF5. För kylning under arbetstid utnyttjas kylbatterier vid tilluftsfläktarna TA4, TA5 och TA7.

3.5 Yttre byggnader

Av den energi som bokförs bergverkstaden, olja och el, nyttiggörs delar utanför denna. Det gäller uppvärmningen av två byggnader, elförsörjningen av dessa och en tredje samt utomhusbelysning.

Byggnaderna är om 270 resp 180 m² golvyta och 1 220 resp 950 m³ värmd volym. Den senare byggnaden är otät vid två höga portar.

3.6 Vidtagna förbättringsåtgärder i bergverkstaden under mätperioden

Efter utvärdering av iakttagelser och mätresultat kunde efter ett års mätningar konstateras att ofrivillig ventilation av avsevärd omfattning förekom. FortF genomförde under perioden januari - mars 1983 ett antal förbättringsåtgärder i syfte att minska dessa ofrivilliga värmeförluster. Följande åtgärder genomfördes:

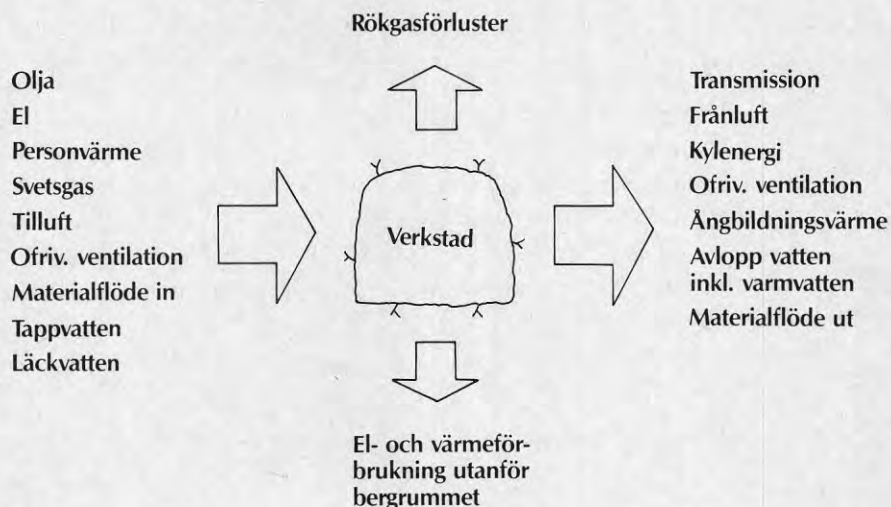
1. Komplettering med tätslutande metalldörrar i entrétunnlarna omedelbart innanför skyddsportarna. I östra entrétunneln även utbyte av befintlig trädörr mot tätslutande metalldörr. Motorisering av dörrarna och införande av slussfunktion i den östra entrétunneln. Åtgärderna genomförda under januari. Innan denna ombyggnad stod dörrarna i den östra tillfartstunneln

öppna under arbetstid vid temperaturer över ca 0°C. Vid lägre temperaturer stängdes trädörren och/eller verkstadsdörren av personalen allt eftersom de upplevde obehag av inströmmande kallluft.

2. Byte till bättre spjäll (klass 3) i tilluftskanalerna TF1 och TA1. Införande av spjäll i frånluftskanalerna FF1, FF3, FF4, FF5 och FA1, vilket alltså inte fanns tidigare. Åtgärderna genomförda under mars.
3. Införande av täta väggar i de två aktiva frånluftsschakten på nivå obetydligt över verkstadsens. Åtgärderna genomförda under mars.

4. BERÄKNINGSMODELL OCH MÄTPROGRAM

4.1 Energibalans



Figur 4 Principiell energibalans för bergverkstaden

I figur 4 visas hur de väsentligaste energimängderna förs till och från bergverkstaden. Beskrivningen är illustrativ. Den är däremot inte helt praktisk som utgångspunkt för beräkningar genom att några poster redovisas såväl som bidrag och förluster. I det följande redovisas därför på vanligt sätt sådana poster sammanslagna. Följande modell tillämpas:

Energitillskott	Energiförluster
olja	transmission
elektricitet	ventilation
personvärme	kylning av tilluften
svetsgas	ofrivillig ventilation
	rökgasförluster
	materialuppvärmning
	uppvärmning av vatten
	ångbildningsvärme
	yttre förbrukningar

Som underlag för den fortsatta diskussionen kommenteras här olika poster något:

Elektricitet	All elektricitet till belysning, fläktar, arbetsmaskiner m m i bergverksstaden bedöms omvandlas till värmeenergi (undantag kylkompressor utanför verkstadslokalen)
Personvärme	Arbetet i verkstaden är att betrakta som relativt lätt
Svetsgas	Acetylengas för svetsning
Transmissionsförluster	Värmeförluster genom ledning genom det omgivande berget till luften. Då verkstaden varit i drift i över 25 år har den näraliggande bergmassan värmts upp i en omfattning som ligger nära fortvarighetstillstånd, dvs transmissionsförlusterna kommer att minska endast obetydligt under kommande år
Kylning av tilluften	Under sensommaren kyls delar av tilluften av kylbatterier vid tilluftsfläktarna TA4, TA5 och TA7. Värmen förs bort via en vattenkrets till en kylkompressor, som är placerad i det inre frånluftsschaktets översta del.
Ofrivillig ventilation	Luft har passerat in genom portarna såväl dag- som nattetid. Luft har strömmat genom kanalerna även då fläktarna stått. Luft har passerat i stigschakten vid sidan om kanalerna. Då schakten mynnar ca 45 resp 35 m över verkstadens golvnivå har vintertid den termiska stigkraften i schakten varit avsevärd
Materieluppvärmning	Ett kontinuerligt flöde motsvarande ca 25 ton stål per dag förs in i verkstaden. Materielet bedöms uppvärmas från utomhustemperatur till verkstadens temperatur
Uppvärmning av vatten	Utöver varmvattenuppvärmning kan viss uppvärmning av kallvatten äga rum mellan tappställe och avloppsbrunn. Kallvatten används väsentligen till att spola ren materiel i ett tvättrum
Ångbildningsvärme	Viss inläckning av vatten genom bergsprickor förekommer, vilket delvis förångas. Bergrummet är mycket torrt. Ett mått på detta är att stendamm ej binds vid bergytorna. Även tappvatten (spolvatten) förångas i viss utsträckning

Yttre förbrukning De yttre byggnaderna värms via en separat krets från bergverkstadens pannor. Yttre belysning och elanvändning i de yttre byggnaderna registreras på bergverkstadens elmätare.

4.2 Mätprogram

Energiflöden

- Olje-, el- och vatten- och varmvattenförbrukningen avlästes månadsvis
- Materialflödet och svetsgasförbrukning hämtades ur verkstadens årsredovisning
- Tilluftens energiinnehåll mättes med kontinuerlig mätning av utomhustemperaturen och tilluftsflyktarnas drifttid, mätning av flödenas storlek (ett tillfälle, mars 1983) samt uppgifter om luftens relativa fuktighet från SMHI
- Frånluftens energiinnehåll mättes med kontinuerlig mätning av temperaturerna i de olika frånluftskanalerna och resp fläktars drifttid och mätning av flödena vid olika driftfall (två tillfällen, april 1982 och mars 1983)
- Ofrivilliga ventilationen genom tillfartstunnlarna mättes med spårgasmätning (två tillfällen, april 1982 och mars 1983)
- Den ofrivilliga ventilationen i frånluftskanalerna uppskattades utifrån mätningar av flödena (två tillfällen, april 1982 och mars 1983) och registrerade temperaturer
- Inläckande vattenmängder uppskattades vid besök. Under snösmältningsperioden 1983 gjordes observationer var 14:e dag
- Kylning mättes genom kontinuerlig registrering av drifttiden hos en pump i kylkretsen under sommaren 1982
- Transmissionsförlusterna beräknades med matematisk modell, varvid de termiska konstanterna bestämts vid försök på borrhärdar ur två stenprover
- Den nyttiggjorda värme som pannorna producerade mättes genom att pannvattentemperaturerna registrerades kontinuerligt (producerat hetvatten, retur från verkstad och från yttre byggnader). Huvudflödet angett genom uppgift från pumptillverkare, flödet genom yttre byggnader från mätning (ett tillfälle, april 1982)

- Uppvärmning av yttre byggnader, se ovan. Yttre elförbrukning beräknades genom bestämning av installerad effekt och bedömning av drifttider (intervju).

Klimat

- Ytterluftens temperatur mättes kontinuerligt
- Data från en närbelägen meteorologisk station utnyttjades för jämförelse och kontroll
- Lufttemperaturen i bergverkstaden har mätts kontinuerligt i två punkter. Därtill har tre mättermometrar avlästs 1-2 ggr per månad. Den relativa luftfuktigheten har mätts på 6 platser (två tillfällen, april 1982, mars 1983).

4.3 Redogörelse för utförda mätningar

Under mätningsperioden har dels olika slag av temperaturer, dels drifttider för fläktar registrerats kontinuerligt. I schemat redovisas under vilka tidsperioder som olika mätdata samlats in:

Tabell 1 Redovisning av genomförda kontinuerliga mätningar

Objekt	Reg	Mätperiod		
		811118-820328	820329-821217	821218-830619
FF1	temp	ja	ja	ja
FF1	drift	-	ja	ja
FF2	temp	ja	ja	ja
FF2	drift	-	ja	ja
FF3	temp	ja	ja	ja
FF4	temp	ja	ja	ja
FF4	drift	-	ja**	ja
FF5	temp	ja	ja	ja
FF6	temp	ja	-	ja
FF6	drift	-	ja	ja
FA1	temp	-	ja	ja
uteluft	temp	ja*	ja	ja
verkstad	temp	ja	ja	ja
verkstadsentré	temp	ja	-	ja
pannvatten, ut	temp	ja	ja	ja
pannv retur berggrum	temp	ja	ja	ja
pannv retur byggn	temp	ja	-	ja
verkstadsport	drift	-	-	ja***

* mättes t o m 830303 i tilluftskanalen, därefter utomhus

** under perioden 820626 t o m 821011 registrerades drift av pump P19 i kylkretsen

*** kopplades in 830329

Ursprungligen nyttjades en 12-punkts Philipsskrivare för kontinuerlig registrering av mätvärden. Provdrift påbörjades 3 juni 1981. En del kompletterande ledningsdragningar och justeringar av registreringsapparaten

gjordes under sommaren och det egentliga mätprogrammet påbörjades 28 augusti. Emellertid visade sig registreringsapparaten fungera dåligt, med ibland ryckig gång och otillförlitliga bläckskrivare.

Denna mätutrustning byttes därför mot registreringsapparat från Mätcentralen för Energiforskning vid KTH. I verkstaden installerades en voltmeter (Schlumberger 7060) till vilken mätpunkterna kopplades, vidare en scanner (Minete) och en bordsdator (HP 85). Mätdata registrerades var 5:e minut varur timmedelvärden beräknades, som lagrades på kassetband. Mätvärdena råbearbetades och lagrades i en större dator vid KTH, i vilken senare utvärderingsarbeten gjordes (mätprogrammet MUMS). Mätcentralens anläggning togs i drift 18 november 1981. Med undantag av totalt 13 dagars stillestånd under november och december 1981 har anläggningen fungerat klanderfritt.

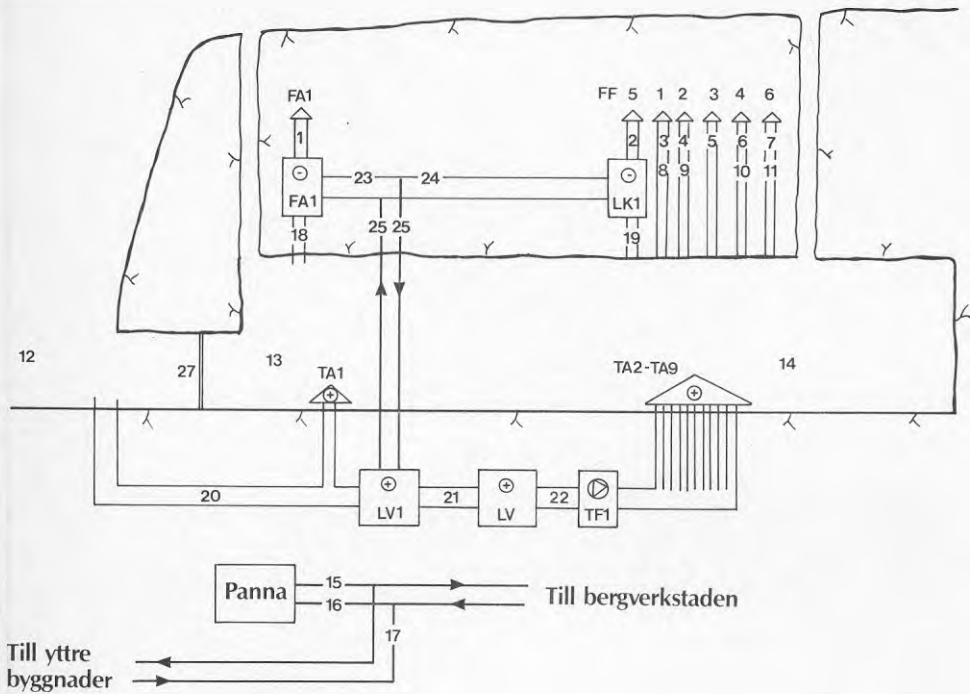
I takt med analyser av registrerade mätvärden växte insikten om olika mätdatas signifikans och om hur bergverkstadens uppvärmnings- och luftbehandlingssystem egentligen fungerade. Vid kontroll visade sig registrerad tilluftstemperatur vara för hög vid stark kyla, varför mätpunkten flyttades. Vissa temperaturmätningar ersattes under perioden av kontroller av fläktars drifttider. Pga det begränsade antalet tillgängliga mätgångar kunde inte båda mätas samtidigt (begränsad projektekonomi).

Från 1 mars 1982 avlästes 3 mättermometrar i verkstaden och i utrymmet mellan betongbyggnaden och bergvägen. Avläsningarna gjordes ca var 14:e dag, samtidigt med kassetbyten. 5, 6 och 7 april 1982 gjordes särskilda mätningar av den ofrivilliga ventilationen nattetid, av flödena i de olika luftkanalerna vid olika drifttillstånd och av relativa fuktigheten på olika platser i bergrummet.

I och med att mätprogrammet utökades hösten 1982 gavs ekonomiska möjligheter till att höja registreringsanläggningens kapacitet. Från 16 december 1982 registrerades ytterligare 6 kanaler. På FortF:s önskan tillkom mars 1983 ett antal mätpunkter för att mäta värmeåtervinningsanläggningens effektivitet. I figur 5 visas schematiskt ventilationssystemet och läget för de kontinuerligt registrerade mätpunkterna.

Under januari-mars 1983 genomfördes, som nämnts, förbättringsåtgärder i bergverkstaden för att minska omfattningen av den ofrivilliga ventilationen. 29-30 mars, då dessa arbeten avslutats, gjordes ånyo de särskilda mätningarna (samma som 5-7 april 1982).

Mätningarna avbröts 19 juni 1983.



Mätpunkt
Registrering

1. Temp frånluftskanal
2. " "
3. " "
4. " "
5. " "
6. " "
7. " "
8. Drifftid frånluftsfläkt
9. " "

Mätpunkt
Registrering

- | | | |
|-----|--------------------------------|-----|
| FA1 | 10. Drifftid frånluftsfläkt | FF4 |
| FF5 | 11. " " | FF6 |
| FF1 | 12. Temp uteluft | |
| FF2 | 13. Temp verkstad | |
| FF3 | 14. Temp entrédel | |
| FF4 | 15. Temp utgående pannvatten | |
| FF6 | 16. Temp retur pannvatten | |
| FF1 | 17. Temp retur pannvatten | |
| FF2 | ytte byggnader | |
| | 27. Öppethållande östra porten | |

Figur 5 Översikt över mätpunkter och registrerade mätdata. Alla mätpunkter har registrerats var 5:e minut, varur timmedelvärden räknats fram och lagrats. Luftflöden m³/m har mätts vid två besök (månadsskiftet mars/april 1982 och 1983). (Mätpunkterna 18-26 användes för en undersökning av värmeåtervinningssystemets effektivitet, vilken ej särskilt tas upp i denna rapport).

5. REDOVISNING AV MÄTNINGAR OCH BERÄKNINGAR

5.1 Klimatet på orten

Under perioden december 1981 - maj 1983 var enligt SMHIs graddagsstatistik den termiska belastningen 8 689 graddagar mot normalvärdet 8 785 graddagar, dvs 99 %.

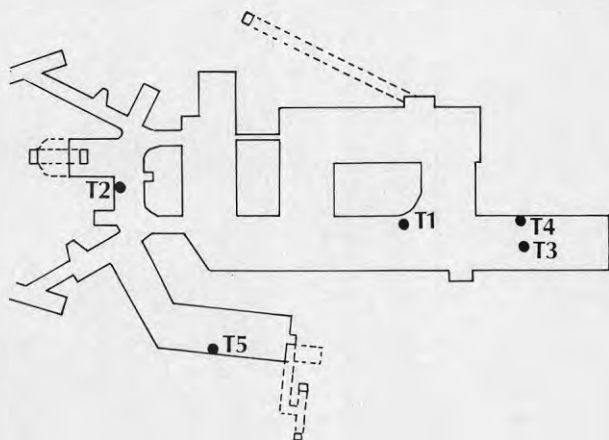
Mätningarna vid bergverkstadens entré angav 1,5 % lägre graddagsbelastning än SMHIs station, framför allt pga något högre temperaturer vintertid. I tabell 3 redovisas månadsmedelvärden för graddagar och temperaturer.

5.2 Bergverkstadens klimat

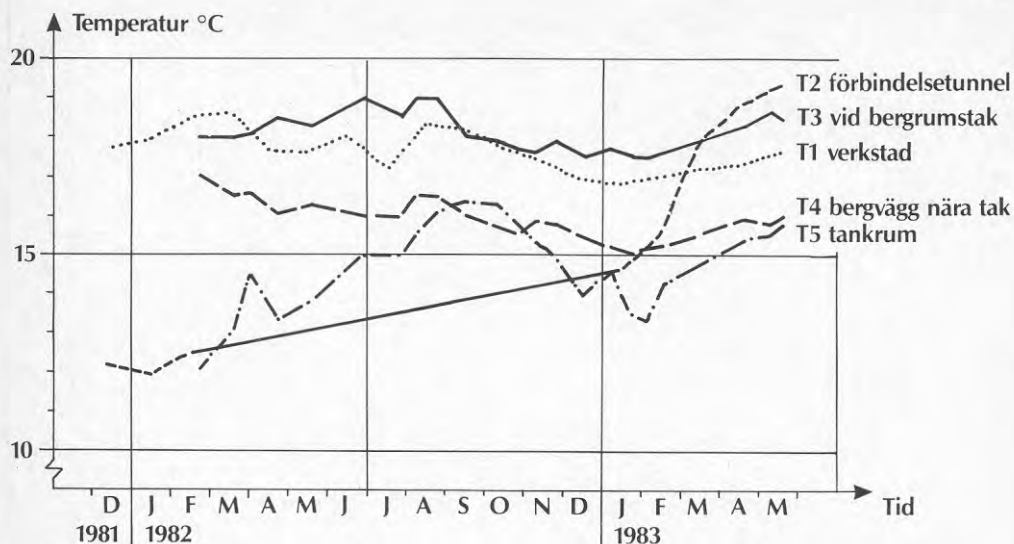
Temperaturen inom verkstaden varierar något. I en lågutnyttjad del (sidoskeppet) råder lägre temperatur. Entrétunnlarna har ingen egen värmeförsörjning varför temperaturen där (särskilt innan ombyggnaden) påverkas av utetemperaturen.

Innan de nya portarna uppfördes var delen närmast innanför entrétunnlarna mycket kall vintertid, ca 5-6°C under verkstadens temperatur. Efter portarnas tillkomst har temperaturen i denna del blivit högre än i verkstaden i övrigt. Pannrummet är beläget invid denna del.

Luftrummet över verkstadsbyggnadens tak har ca 1,5° högre temperatur än verkstadens, medan bergytans temperatur i höjd med verkstadstakets nivå var 1-2° lägre än verkstadsluftens.



Figur 6 De 5 platserna för temperaturmätning. T1 och T2 avser verkstadens klimat, T3 luftens temperatur och T4 bergytans temperatur i utrymme över verkstadsbyggnaden och T5 ett förrådsutrymme vid sidan om själva verkstaden.



Figur 7 Redovisning av mätta temperaturer i verkstaden. På samtliga mätställen har temperaturen höjts efter ombyggnadsarbetena (jan-mars 1983). Temperaturhöjningen i förbindelsetunneln vid verkstadens entré är särskilt tydlig.

I figur 6 visas var de 5 mätpunkterna var belägna och i figur 7 redovisas mätta temperaturer i bergverkstaden. Se även tabell 3.

Luftens relativa fuktighet mättes vid två tillfällen:

Tabell 2 Mätningar av luftens relativa fuktighet

Mätställe	1982-04-06			1983-03-29		
	Tv(°C)	Tt(°C)	RH(%)	Tv(°C)	Tf(°C)	RH(%)
Början av inre schaktet	11,0	16,6	43	10,4	15,0	58
På taket nära schaktet	11,2	17,4	45	10,2	18,2	35
I verkstaden	10,8	20,4	27	10,6	20,0	30
På taket, innersta delen	12,8	18,2	50	12,8	18,0	58
Vid östra infartstunneln	7,2	14,2	35	10,8	18,2	40
Ute, vid östra infarten	2,0	5,0	50	0,0	0,4	95

Luftomsättningen vid drift är ca 45 000 m³/h, vid genomsnittlig användning av frånluftfläktarna. Drifttiden per år är ca 10 timmar per dag under 230 dagar, dvs 2 300 av årets 8 760 timmar. Det genomsnittliga luftflödet är därmed 11 800 m³/h. För hela berggrummet motsvarar detta en medelomsättning om ca 0,4 omsättningar per timme, räknat för hela året. Under drift är omsättningen ca 1,6 ggr per timme.

5.3 Energibalans under mätperioden

I tabell 3 redovisas klimatdata, förbrukningsdata och drifttid, vilka tillsammans beskriver driftförhållandena för bergverkstaden. I tabell 4 och 5 redovisas de mätta och beräknade värden som utgör underlaget för energibalansens tillskotts- och förlustposter. Energibalansen sammanfattas i figur 8 för hela mätperioden, varvid även yttre förbrukningar och förluster anges. I figur 9 redovisas energibalans månadsvis för enbart bergverkstaden. I det följande avsnittet (5.4) beskrivs de olika delposterna i energibalansen och hur de beräknats.

Som framgår av figurerna 8 och 9 har bergverkstaden besvärats av betydande energiförluster i form av icke avsedd drift (fortsättningsvis kallad extraordinarie drift) och genom ofrivillig ventilation. Mätresultaten diskuteras därför i kap 6 i en generaliserad form, där dessa förluster frånräknats.

Några kommentarer beträffande noggrannheten i den beräknade energibalansen:

- Den största osäkerheten i beräkningarna rör förångningsenergin storlek, vilken beräknats på indirekt väg
- Värdena för ofrivillig ventilation och (därmed) förångningsenergin är osäkra spec för perioden februari-mars 1983. Detta beror på att någon noggrannare hänsyn ej kunnat tas till när i tiden de ombyggnadsarbeten som då pågick fick effekt
- Ofrivilliga ventilationens storlek under drifttid, som utgör ca 1/3 av delposten, bygger enbart på en uppskattning.

Se vidare kommentarerna under nästa avsnitt.

5.4 Specificering av posterna i energibalansen

Oljeförbrukning

Verkstadens ordinarie redovisning av oljeförbrukningen grundas på mätningar av lagermängd och mängd tillförd olja. Dessa uppgifter avsågs ingå i beräkningsunderlaget, men fick bortfalla då olika källor till fel befanns förekomma. I tabell 3 anges bokförda mängder. För perioden som helhet bedöms uppgifterna vara tämligen riktiga, felanmärkningarna främst från redovisningen av lagerhållningen.

Tillförd värme har därför beräknats enbart med utgångspunkt från mätningar av pannvattnets temperaturer, se vidare nedan.

Månad	Utomhusklimat SMHIS mätstation			mätt bergverkstad		Bergverksta- dens klimat		Förbrukningsdata				Drifttid arbets- dag/mån
	medel- temp °C	grad- dagar	grad- dagar normal	medel- temp °C	grad- dagar	verk- stad °C	entré- del °C	olja (?) m ³	vatten m ³	härav varm- vatten m ³	WWh	
8112	-13,9	956	781	-11,6	903	17,7	12,2	13,3	214	-	-	17
8201	-13,8	966	838	-11,2	873	17,9	12,0	18,7	271	12	0,8	17
8202	- 8,8	721	746	- 6,0	645	18,5	12,5	29,3?	203	18	1,1	20
8203	- 0,1	554	641	- 0,1	520	18,6	-	13,3	205	18	1,1	23
8204	3,4	407	459	3,7	398	17,6	-	10,0	179	13	0,8	19
8205	7,6	263	255	7,9	281	17,6	-	7,0	296	13	0,8	18
8206	11,0	129	31	12,1	155	18,0	-	5,4	152	10	0,6	21
8207	16,5	0	4	16,7	42	17,2	-	4,8	35	6	0,4	9
8208	14,8	20	38	14,9	82	18,3	-	6,8	76	13	0,8	22
8209	9,2	221	240	9,2	234	18,2	-	9,0	99	19	1,2	22
8210	2,8	438	420	2,9	436	17,7	-	13,8	76	16	1,1	21
8211	- 0,7	534	612	- 1,0	539	17,4	-	12,5	117	18	1,1	22
8212	- 8,1	778	781	- 7,9	771	16,9	-	13,8	168	22	1,4	21
8301	- 6,3	720	838	- 6,8	736	16,8	14,6	10,1	223	21	1,3	19
8302	- 9,6	743	746	- 7,6	690	17,0	15,5	15,5	261	17	1,1	20
8303	- 3,6	640	641	- 2,6	605	17,2	17,8	7,5	218	17	1,1	23
8304	2,3	438	459	2,6	431	17,3	18,8	8,8	150	15	0,9	19
8305	9,4	161	255	9,9	220	17,6	19,3	8,6	150	11	0,7	19
medel värde	0,6	483	488	1,4	476	17,6	-	11,6	172	14	0,9	19

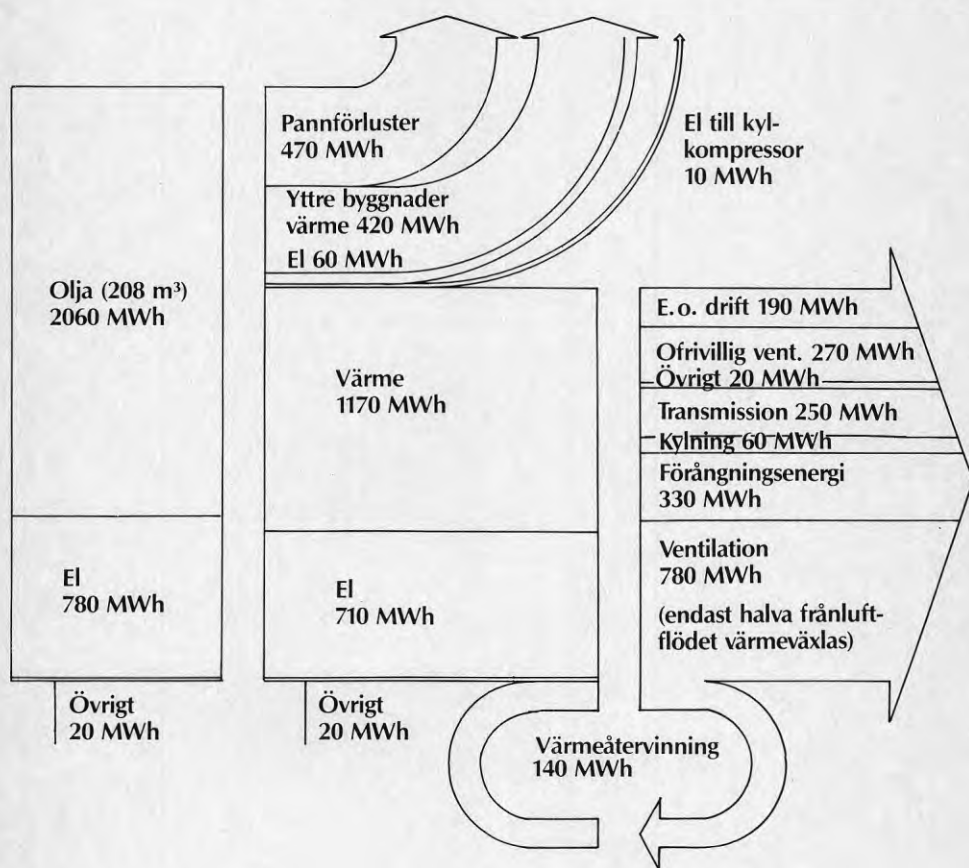
Tabell 3 Klimatdata, förbrukningsdata och drifttid under mätperioden

Månad	Hettvatten, producerat		totalt yttre berg- härav e.o. drift		Hettvatten, producerat		totalt yttre berg- härav e.o. drift		Elförbrukning		berg- härav kyln. e.o. drift		Övriga energi- tillsk.	Återfört värmeät.- vinning	Summa tillfört berggrum
	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh			
8112	131	37	94	10	40	5	35	-	?	?	?	?	1	11	141
8201	124	36	88	5	46	5	41	-	?	?	?	?	1	11	141
8202	102	31	71	-	46	5	41	-	-	-	-	-	1	10	123
8203	97	24	73	-	48	4	44	-	-	-	-	-	1	10	128
8204	69	21	48	-	41	3	38	-	-	-	-	-	1	7	94
8205	56	17	39	-	34	2	32	-	-	-	-	-	1	5	77
8206	46	13	33	-	38	2	36	-	-	-	-	-	1	4	74
8207	26	7	19	-	18	0	18	1	-	-	-	-	0	1	37
8208	35	10	25	-	40	2	38	4	-	-	-	-	1	3	63
8209	66	15	51	15	52	2	50	3	7	7	7	7	1	5	104
8210	114	22	92	45	54	4	50	1	8	8	8	8	1	8	150
8211	104	26	78	20	48	5	43	-	2	2	2	2	1	9	131
8212	113	33	80	5	43	5	38	-	1	1	1	1	1	12	131
8301	104	32	72	-	48	5	43	-	-	-	-	-	1	10	126
8302	161	32	129	50	52	5	47	-	4	4	4	4	1	11	188
8303	119	28	91	15	46	4	42	-	0	0	0	0	1	10	144
8304	73	22	51	-	44	3	41	-	-	-	-	-	1	7	100
8305	52	17	35	5	41	2	39	-	1	1	1	1	1	4	79
medel värde	88	22	65	9	43	4	40	0,5	1	1	1	1	1	8	113

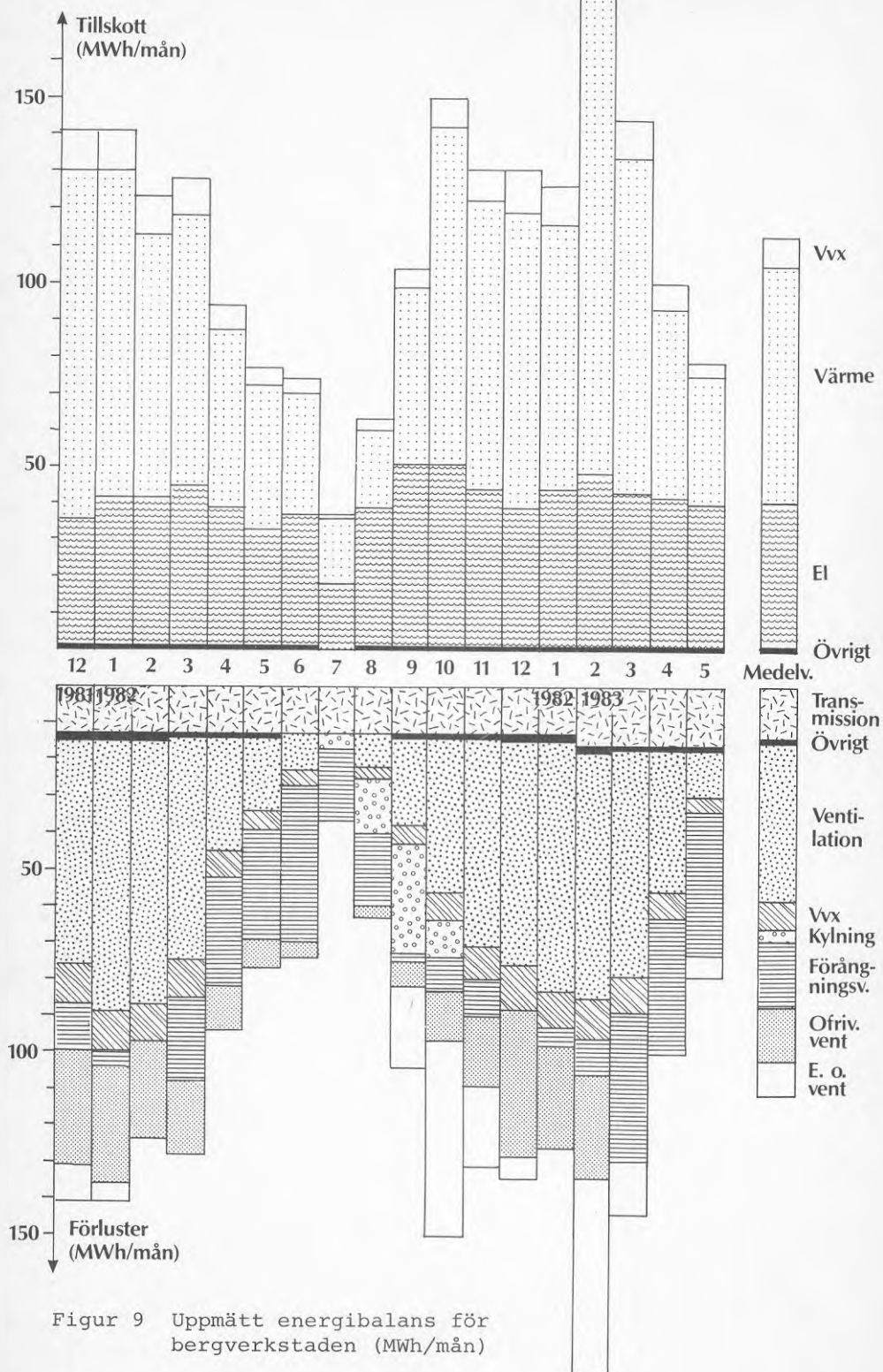
Tabell 4 Tillförda energimängder under mätperioden

Månad	Transmission MWh	Mtrl.- uppv. mm	Ventilation								Summa bortfört bergrum MWh
			normal, värm- återv. drift MWh	värm- återv. ord. drift MWh	kylning normal MWh	e.o. drift MWh	e.o. drift MWh	ofriv. vent. drift villa		förång- nings- energi MWh	
								MWh	MWh		
8112	13	2	61	11	-	-	10	9	23	12	141
8201	13	2	74	11	-	-	5	10	22	4	141
8202	13	2	72	10	-	-	-	10	17	0	124
8203	13	1	61	10	-	-	-	9	11	23	128
8204	13	1	31	7	-	-	-	4	8	30	94
8205	13	1	20	5	-	-	-	3	5	30	77
8206	13	0	10	4	-	-	-	1	3	43	74
8207	13	0	-	1	4	-	-	0	0	20	37
8208	13	0	9	3	15	-	-	1	2	20	63
8209	13	1	24	5	12	18	22	3	4	2	104
8210	13	1	42	8	4	6	53	6	8	9	150
8211	13	1	57	9	-	-	22	8	11	10	131
8212	13	2	71	12	-	-	6	10	20	0	134
8301	13	2	68	10	-	-	-	9	19	5	126
8302	16	2	67	11	-	-	54	9	19	10	188
8303	16	1	62	10	-	-	15	0?	0?	40?	144
8304	16	1	39	7	-	-	-	0	0	37	100
8305	16	1	13	4	-	-	6	0	0	39	79
medel värde	14	1	43	8	2	1	9	5	10	18	113

Tabell 5 Bortförda energimängder under mätperioden



Figur 8 Energibalans för bergverkstaden och de yttre byggnaderna under de 18 månader mätperioden omfattade



Figur 9 Uppmätt energibalans för bergverkstaden (MWh/mån)

Producerad värme

Beräkningen av nyttiggjord värme från panncentralen utgår från temperaturmätningar och pannvattenflöden. Huvudflödet från pannan har ej mätts. Huvudpumpens flöde har angivits vara 9 l/s. Flödena till de yttre byggnaderna har mätts med tryckfallsmätare över särskilt insatta ventiler. Tillsammans uppgår de till 0,7 l/s.

Tillförd el

Ordinarie redovisning av elförbrukningen, med månadsvis avläsning, har utnyttjats. Den elmängd som förbrukats utanför själva bergverkstaden har beräknats ur uppgifter om installerade effekter (huvudsakligen belysning) och drifttider. All elförbrukning inom bergverkstadens bedöms ha omvandlats till värme.

Tillförd personvärme

Under arbetstid vistas ca 25 personer i verkstaden. Med antagande om en energiavgivning om 250 W per person blir det årliga energitillskottet genom personvärme ca 14 MWh.

Tillförd svetsgas

Uppgiften årsförbrukning om ca 75 kg acetylen motsvarar ett tillskott om ca 1,0 MWh. (Energivärde 48 600 kJ/kg).

Transmissionsförluster

Energiförlusterna genom transmission av värme genom berget har beräknats teoretiskt. Som underlag för beräkningen har bestämningar av de termiska konstanterna gjorts på två stenprover. Provningarna har utförts på utborrade kärnor av Inst för Jord- och bergmekanik vid KTH. Följande resultat erhöles:

Tabell 6 De termiska konstanterna hos 2 stenprover

Bestämning	Prov 1	Prov 2
Termisk ledningsförmåga, W/m°C	3,3	3,67
Värme kapacitet J/m°C	0,91	0,96
Densitet t/m ³	2,68	2,64

Prov 2 har subjektivt bedömts vara den huvudsakligen förekommande bergarten (granitisk typ) och prov 1 en tämligen rikligt förekommande gångbergart (basisk typ). Skillnaderna mellan bergarternas egenskaper är överraskande små.

Transmissionsberäkningen baseras på bedömningen att flödena från bergrummets tak och väggar efter 27 års drift ej avviker nämnvärt från stationärt tillstånd. Däremot är flödet genom golvet långt från färdigutbildat men utvecklas mycket långsamt. Beräkningarna utgår

från tvådimensionella strömningsmodeller i tvärsnitt genom berggrummets huvudriktningar.

Transmissionen beräknas uppgå till högst 15 kW. Flödet varierar ej över året (marginell variation i entrétunnarna undantagen). I beräkningen utgör transmissionen genom golvet, ca 3,6 kW, den mest osäkra delen. Det motsvarande månatliga energiflödet är 10-11 MWh. De högre värdena för transmissionsförlusterna som anges för mätperiodens sista fyra månader beror av den högre temperatur som rått i berggrummets yttre delar sedan de nya portarna infördes (inlagring av värme i det omgivande berget).

Ventilationsflöden, normaldrift

Arbetsdagar arbetar ventilationssystemet ca 10 timmar per dag (tidursstyrning). Vissa fläktar, som styrs manuellt, kan arbeta kortare tid.

Tillluftens energiinnehåll har beräknats ur uteluftens temperatur, drifttider och en för varje månad bestämd konstant, vari tas hänsyn till luftens vikt och relativa fuktighet. Frånluftens energiinnehåll har beräknats på motsvarande sätt, varvid antagits att fukt ej tillförts luften inne i verkstaden.

Beräkningarna är baserade på följande mätta luftflöden:

Tabell 7 Mätta luftflöden

Kanal	8112-8302 (m ³ /h)	8303-8005 (m ³ /h)
<u>Tilluft</u>		
TF1	33 500	31 400
TA1 helfart	15 100	15 500
TA1 halvfart	7 600	7 800
<u>Frånluft</u>		
FA1	4 700	8 000
FF1 helfart	13 500	13 200
FF1 halvfart	9 000	8 700
FF2 helfart	6 600	6 300
FF2 halvfart	3 700	4 000
FF3	740	750
FF4	4 000	3 000
FF5	15 200	14 200
FF6	5 400	5 100

Generellt sett kan en avtagande kapacitet märkas vilket kan förmodas bero på installationen av spjäll vintern 1983 och försmutsning av fläktar och kanalsystem.

Drifftiderna för de icke tidsstyrda fläktarna har, uttryckt som relation till full drift 10 timmar per arbetsdag, i genomsnitt varit:

TA1 och FF1	85 %
FF2	94 %
FF4	94 %
FF6	10 %

Kylning av tilluften

Kylning av tilluften har registrerats via mätning av drifftiden för en pump (P19) i kylvattenkretsen. Installerad motoreffekt är 20 kW. Enligt entreprenadbeskrivningen är netto kyleffekt 49 kW, dvs anläggningen har en kylfaktor på 2,45.

Kylsystemet arbetade under perioden 26 juli - 9 oktober med avbrott 24 september - 3 oktober. De perioder då fläktsystemet kördes på icke arbetstid pågick även kylning.

Följande energimängder har bortförts via kylning:

Tabell 8 Energimängder för kylning (MWh)

Period	Kylning normal drift	Kylning drivel	Kylning e.o. drift	Kylning drivel
8205	2,5	1,0	-	-
8208	10,8	4,4	-	-
8209	8,3	3,4	13,1	5,4
8210	2,5	1,0	4,1	1,7

Drivenergin frånräknas i energibalansen mängden tillförd el. Kylkompressorn är placerad utanför bergrummets klimatskärm varför värmeförlusterna ej kan tillgodogöras.

Ventilationsflöden, extraordinär drift

Under olika perioder har ventilationssystemet arbetat även nattetid och helgtid. Omfattningen har varierat såväl vad gäller antalet fläktar som utnyttjad fläktkapacitet för de variabla fläktarna.

Tilluftsfläkten TA1 och frånluftsfläkten FF1 samkörs. Drift av FF2 innebär drift även av tilluftsfläkten TF1 och av frånluftsfläktarna FF5 och FA1. Även frånluftsfläkten FF4 har körts. Drift av FF1 och FF4 har undantagslöst skett samtidigt med drift av FF2.

Samtliga driftfall innebär att tilluftsfläktarnas kapacitet överstigit frånluftsfläktarnas. Detta innebär för perioden fram till ombyggnaden att extraordinär drift givit upphov till ökad ofrivillig ventilation via frånluftsschakt och icke nyttjade kanaler.

Beräkningen av uppvärmningsenergin vid extraordinär drift har gjorts utifrån registrerade temperaturer hos ut- och ingående pannvatten. Genom att värmeförlusterna i bergrummet är konstanta under icke-drifttid, i princip transmissionsförluster genom rören i cirkulationskretsen, kan extraordinär energiförbrukning tydligt urskiljas.

I tabellen anges registrerade drifttider och beräknade energimängder. Drifttiderna är uttryckta som andel (%) av full drift under tillgänglig tid (14 timmar per natt mellan arbetsdagar, 24 timmar per helgdag).

Tabell 9 Drifttider och energimängder vid extraordinarie drift

Period	Drift (% av möjlig drift)			Energimängder (MWh)	
	TA1, FF1	TF1, FF2, FF5, FA1	FF4	pannvärme	drivel
8112	-	-	-	11	-
8201	-	-	-	6	-
8209	0	46	0	15	7
8210	12	47	11	46	8
8211	9	15	0	19	2
8212	0	5	6	5	1
8302	0	31	35	50	4
8303	2	5	5	15	0
8305	0	6	12	5	1

Ofrivillig ventilation

Omfattande ofrivillig ventilation förekom fram till dess ombyggnaden var helt genomförd. Under drifttid kunde luft passera in genom tillfartstunnlarna och ut genom frånluftsschakten vid sidan om kanalsystemen. Vid icke drift passerade luft såväl genom kanalsystemet som genom tillfartstunnlar och genom frånluftsschakten. Dessa flöden har i viss utsträckning kunnat mätas och har i övrigt uppskattats.

Vid mätningar 5-7 april 1982 mättes flödena genom entrétunnlarna vid icke drift. Spårgasmätningar utfördes vid stängda ytterdörrar och varianter av öppethållande för övriga dörrar. Dörrarnas positioner framgår av fig 10. Följande värden erhöles (mätnoggrannhet 5 %):

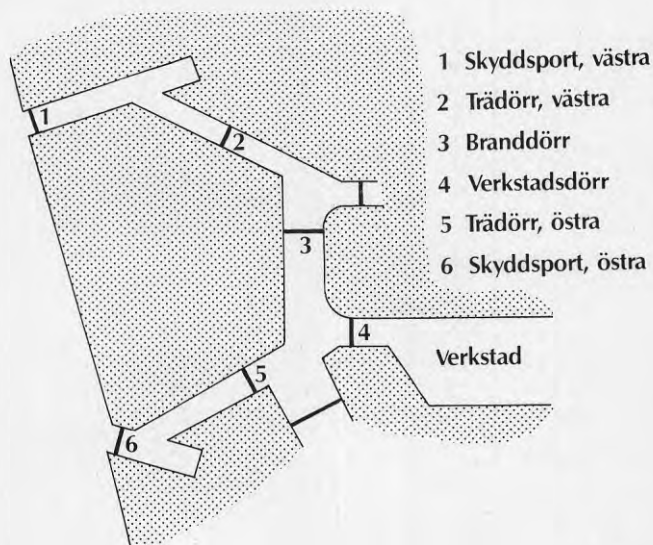
Tabell 110 Luftflöden vid mätning av ofrivilliga ventilationen genom entrétunnlarna april 1982.

Dörrarnas positioner		Flöden (m ³ /h)	
		östra	västra
trädörrar	stängda	550	-
branddörr	stängd		
verkstadsdörr	stängd		
trädörrar	öppna	630	1500
branddörr	stängd		
verkstadsdörr	stängd		
trädörr	öppen	950	-
branddörr	öppen		
verkstadsdörr	stängd		
trädörrar	öppna	2900	1675
branddörr	öppen		
verkstadsdörr	öppen		

Vid mättillfället var utomhustemperaturen -3°C . Vid de två nätter mätningarna ägde rum observerades att dörrarna stängts på olika sätt, (de två sista positionerna i tabellen ovan).

Förnyade mätningar utfördes 29-30 mars 1983. Vid denna tidpunkt hade nya dörrar installerats men vissa tätningarna återstod. Vid mätningarna var de yttre dörrarna stängda.

I den östra infartstunneln uppmättes flödet $125\text{ m}^3/\text{h}$, oberoende av branddörrens och verkstadsdörrens läge.



Figur 10 Lägena hos de dörrar som beskrivs i tabell 9

I den västra infartstunneln uppmättes flödena 325 m³/h och 3 700 m³/h beroende på trädörrens läge. Det kunde med särskilda mätningar konstateras att interna luft-rörelser äger rum mellan verkstaden och utrymmet mellan berg och byggnaden. Det höga mätvärdet vid öppen trädörr beror sannolikt av att spårgasen späddes ut av sådana luftrörelser.

Man kan konstatera att tätningsåtgärderna varit effektiva. När de återstående tätningarna kring dörrkarmarna utförts bör resultatet ha blivit än bättre.

Ofrivilliga ventilationen i frånluftskanalerna mättes vid samma tillfällen. Följande värden mättes upp nätterna till 6:e och 7:e april 1982.

Tabell 11 Luftflöden vid mätning av ofrivilliga ventilationer genom kanalsystemet april 1982

Kanal	Flöde (m ³ /h)
FF1	900
FF2	570
FF3	150
FF4	70
FF5	540
FF&	270
FA3	250
Totalt 2 750	

Därtill kunde med rökgasprovning konstateras att avsevärda mängder luft passerade genom schakten utanför kanalerna. Dessa flöden kunde av praktiska skäl ej mätas (stor längd, varierande area).

Vid de förnyade mätningarna 29-30 mars 1983 hade spjäll i frånluftskanalerna monterats och luftrörelser utanför kanalerna hindrats av nya täta väggar i schakten. Några mätbara flöden kunde ej konstateras, vare sig i eller bredvid kanalerna (utöver termiskt betingade cirkulationsflöden). Däremot konstaterades interna luftflöden äga rum mellan verkstaden och utrymmet utanför betongbyggnaden.

Sammanfattningsvis kan den ofrivilliga ventilationen före ombyggnaden beskrivas enligt följande:

Under drifttid har ofrivillig ventilation passerat in till verkstaden genom tillfartstunnlarna och från verkstaden i frånluftsschakten vid sidan om kanalerna. Dessa flöden har endast kunnat uppskattas.

Vid icke drift har ofrivillig ventilation passerat till verkstaden genom tillfartstunnlar och kanalsystem och från verkstaden genom kanalsystem och i frånluftsschakten vid sidan om kanalsystemen. Mätningar anger 1 000-3 000 m³/h tilluftsflöde i tillfartstunnlarna och 2 800 m³/h i frånluftskanalerna. Härtill kommer

alltså flöden i tilluftskanalerna och vid sidan om kanalerna i frånluftsschakten som endast kunnat uppskattats.

I energibalansberäkningen har antagits att förhållandena vid mätningarna i april varit representativa. Den ofrivilliga ventilationens storlek har förutsatts variera proportionellt med kvadratroten ur temperaturdifferensen mellan verkstadens temperatur och utomhus-temperaturen.

Värmeväxling

Värme återförs från två frånluftskanaler (FF5 och FA1) till huvudtilluftskanalen TF1, via värmeväxlare och en glykolkrets. Av medelflödet i frånluftskanalerna om 45 000 m³/h, värmeväxlas 20-22 000 m³/h eller knappt 50 %. Resterande frånluft värmeväxlas ej pga nedsmutning. De värden på återförd värme som anges härrör från en separat mätning under perioden 10 mars till 10 juni 1983 för FortFs räkning. Mätningen visade att ca 1/3 av det tillgängliga värmeinnehållet i den värmeväxlade frånluften återvinns.

Ångbildningsvärme

Vatten tillförs bergrummet dels genom sprickor i berget och dels genom egen förbrukning, framför allt till en tvättplats. Viss del av vattnet förångas vilket kräver energi. Direkta mätningar av luftens fukthinnehåll och därmed ångbildningsvärmens andel har gjorts vid två tillfällen (månadsskiftet mars/april 1982 och 1983), se avsnitt 5.2.

De mängder förångningsenergi som anges utgör skillnaden mellan beräknade mängder tillförd energi och övriga poster bortförd energi. De på detta indirekta sätt beräknade energimängderna är givetvis mycket osäkra. Årstidsvariationen stöds av en analogi med registrerad grundvattenbildning i en närbelägen (2 mil) mätpunkt i SGUs grundvattenobservationsnät. De nämnda punktmätningarna bedöms stödja de angivna värdenas storlek. Detsamma gäller de observationer som gjorts om dropp eller fuktning av bergytor på några ställen. Se vidare den diskussion om ångbildningsvärme som förs i nästa kapitel.

Inläckning av vatten

Bergrummet har bedömts vara mycket torrt. Ett mått på detta är att stendamm ej binds av fukt. På verkstadsbyggnadens tak står damm, som rörts upp vid passage, kvar i luften 10-tals minuter. Under snösmältningsspe-rioden kan viss inläckning observeras inom ett tämligen snävt område över stora verkstadsrummets innersta del. Under ca tre veckors tid våren 1983 kunde fritt droppande vatten stickprovsmässigt beräknas ske ca 1 gång per sekund. (Nedslag mot plastduk räknades.) Samtidigt fuktades några 10-tal m² väggyta.

Efter det att de nya portarna monterats har takdropp i entrétunnlarnas yttersta delar rapporterats förekomma.

Vattenförbrukning

Ordinarie redovisning av råvatten och varmvatten har nyttjats. Den del av vattenförbrukningen som sker utanför bergrummet är liten. Merparten av vattenförbrukningen gäller spolning med kallvatten av material i en tvättbox.

Materialuppvärmning

Ett tämligen konstant flöde av material motsvarande 25 ton stål passerar genom verkstaden per arbetsdag. Materialet har normalt uteluftens temperatur vid införsel och verkstadslokalens temperatur vid utförsel, varför en uppvärmning motsvarande temperaturdifferensen sker. Med utgångspunkt från värmekapaciteten $0,46 \text{ J/m}^{\circ}\text{C}$ erhålles ett uppvärmningsbehov om totalt $0,065 \text{ MWh/grad, månad}$.

Feluppskattning

Mätfelens storlek uppskattas erfarenhetsmässigt enligt följande

Mätning	Sannolikt mätfel	Amn
Luftflöden	<10 %	
Vattenflöden över TA-ventil	<20 %	
Spårgasmätning av luftflöden	< 5 %	
Temperaturmätningar	<0,2 %	Kontroll av termometrarna utförd under mätperioden
Pannvattnets huvudflöde	<15 %	
Elförbrukning	< 3 %	

De större delposterna i energibalansberäkningen bedöms då vara angivna med följande noggrannhet:

Energipost	Sannolikt mätfel %	Andel i e-balansen MWh/mån	Sannolikt mätfel MWh/mån
Tillförd värme	<15	65	<10
Tillförd el	< 4	40	< 2
Transmissionsförluster	<10	14	< 1
Ventilationsförluster	<15	63	<10
Ofrivillig ventilation	<25	15	< 4
Ångbildningsvärme	?	18	?

Det sannolika felet i beräkningen som helhet kan, med utgångspunkt från ovanstående, uppskattas till <15-20 %.

6. DISKUSSION AV MÄTRESULTATEN OCH SLUTSATSER

Som underlag för en generaliserad diskussion av beräknad energibalans för mätperioden har en normaliserad energibalans beräknats. De förhållanden som varit speciella under mätperioden - den extraordinära driften och den ofrivilliga ventilationen - har här frånräknats. Avsikten är alltså att ge en bild av hur bergverkstaden är tänkt att fungera, och sannolikt fungerar, idag.

6.1 Normaliserad energibalans, exklusive värmeåtervinning

Med utgångspunkt från mätperioden redovisas i figur 11 och Tabell 12 en energibalans för ett år. För de kalendermånader som mätts 2 gånger anges medelvärden. Klimatiska belastningen vid SMHIs mätstation var för den så angivna mätperioden 99 % av normalårsvärdet.

Tabell 12 Normaliserad energibalans (exkl extra ordinarie drift, ofrivillig ventilation, MWh/år

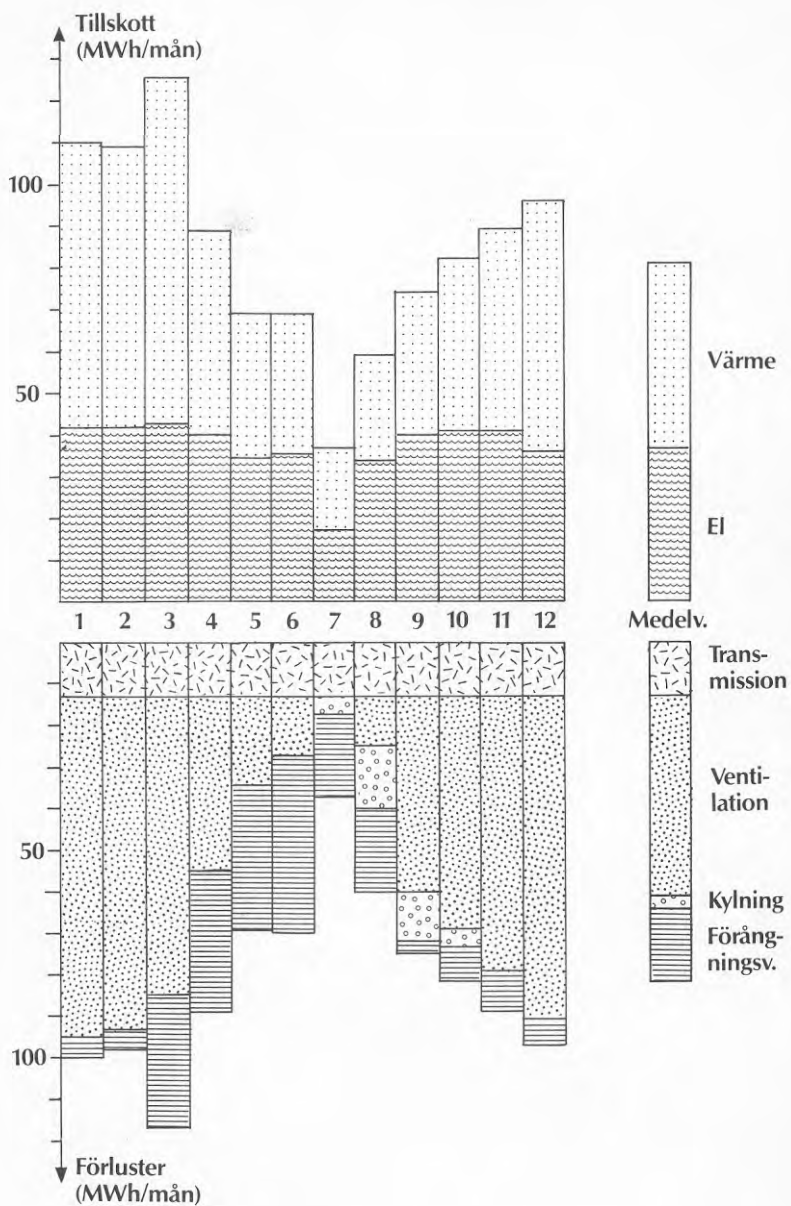
Energipost	Utan värmeåtervinning		Med värmeåtervinning	
	MWh	%	MWh	%
<u>Tillförd energi</u>				
Värme	540	55	450	50
El	450	45	450	50
Totalt	990		900	
<u>Bortförd energi</u>				
Transmission	160	16	160	18
Ventilation	570	58	480	53
Kylning	40	4	40	4
Ångbildning	220	22	220	24
Totalt	990		900	

Till den normaliserade energibalansen kan följande kommentarer göras:

6.2 Tillförd energi

För den aktuella verkstaden är behovet av värmeenergi och elenergi av jämförbar storleksordning.

Elbehovet är tämligen konstant över året. Det styrs av verksamheten i verkstaden. Ingående huvudposter är belysning, drift av fläktarna för ventilation och värme samt drift av olika maskiner. De klimatiska förhållanden utomhus har mycket litet inflytande över elförbrukningen. Exempelvis fläktarnas drifttider varierar föga över året. Energibesparingsåtgärder kan innefatta effektiviserad elanvändning, frågan



Figur 11 Normaliserad energibalans för ett år med utgångspunkt från mätperioden december 1981-maj 1983. Övrigposter (motsvarande < 1 %) undantagna

diskuteras ej särskilt här, men bör framför allt inriktas på att minska behovet att tillföra energi för värmning.

6.3 Transmissionsförluster

Transmissionsförlusternas andel är förhållandevis liten. Någon variation över året förekommer ej, dvs effektbehovet är konstant. De faktorer som styr transmissionsförlusternas storlek är geografiska läget (bergets ursprungliga temperatur), vidare bergtäckningens storlek och bergarternas termiska egenskaper. Strömmande grundvatten kan, beroende på omfattningen, medföra nedkylning av bergmassan och därmed påverka transmissionsförlusternas storlek. Samtliga dessa faktorer bestäms av lokaliseringen av bergrummet. Värmeisolering av bergrummet måste vara betydande för att få effekt, då isoleringen av berget självt från början är stor.

6.4 Ventilation, exkl värmeåtervinning

Energibehovet för att förvärma ventilationsluften visar sig av mätningarna mycket nära följa ytterluftens temperaturvariationer. Iakttagelsen är inte överraskande och kan främst ses som en bekräftelse av beräkningarnas noggrannhet.

6.5 Kylenergi

Mot slutet av sommaren stiger temperatur och luftfuktighet i bergrum, vilket motverkas genom att tilluften kyls (och vatten fälls ut). I bergverkstaden motsvarar den mätta kylenergin 4 % av energibehovet.

6.6 Förångningsenergi. Samband med grundvattenbildningen

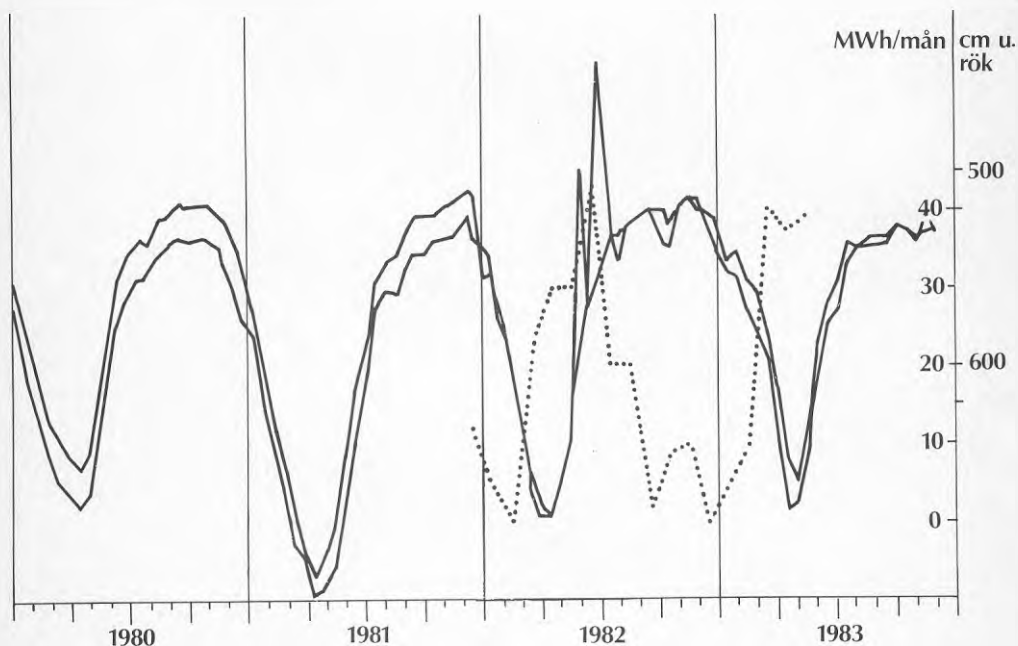
Posten förångningsenergi har som nämnts beräknats som skillnaden mellan mätta värden för tillförd resp bortförd energi, vilket är en osäker metod. Icke desto mindre visar posten ett regelbundet förlopp som visar likhet med den regionala grundvattenbildningens års-cykel. I figur 12 görs en jämförelse mellan förloppen.

Sedan ett antal år följs grundvattenbildningen i Sverige genom SGU:s grundvattenobservationer. I norra Sverige, inklusive regionen där bergverkstaden är belägen, är snösmältningen den helt dominerande faktor som bestämmer grundvattnets nivå. Detta förklarar nivåkurvornas jämna variation.

I södra Sverige är en flackare cykel med toppar både vid snösmältningen och höstregnen vanlig.

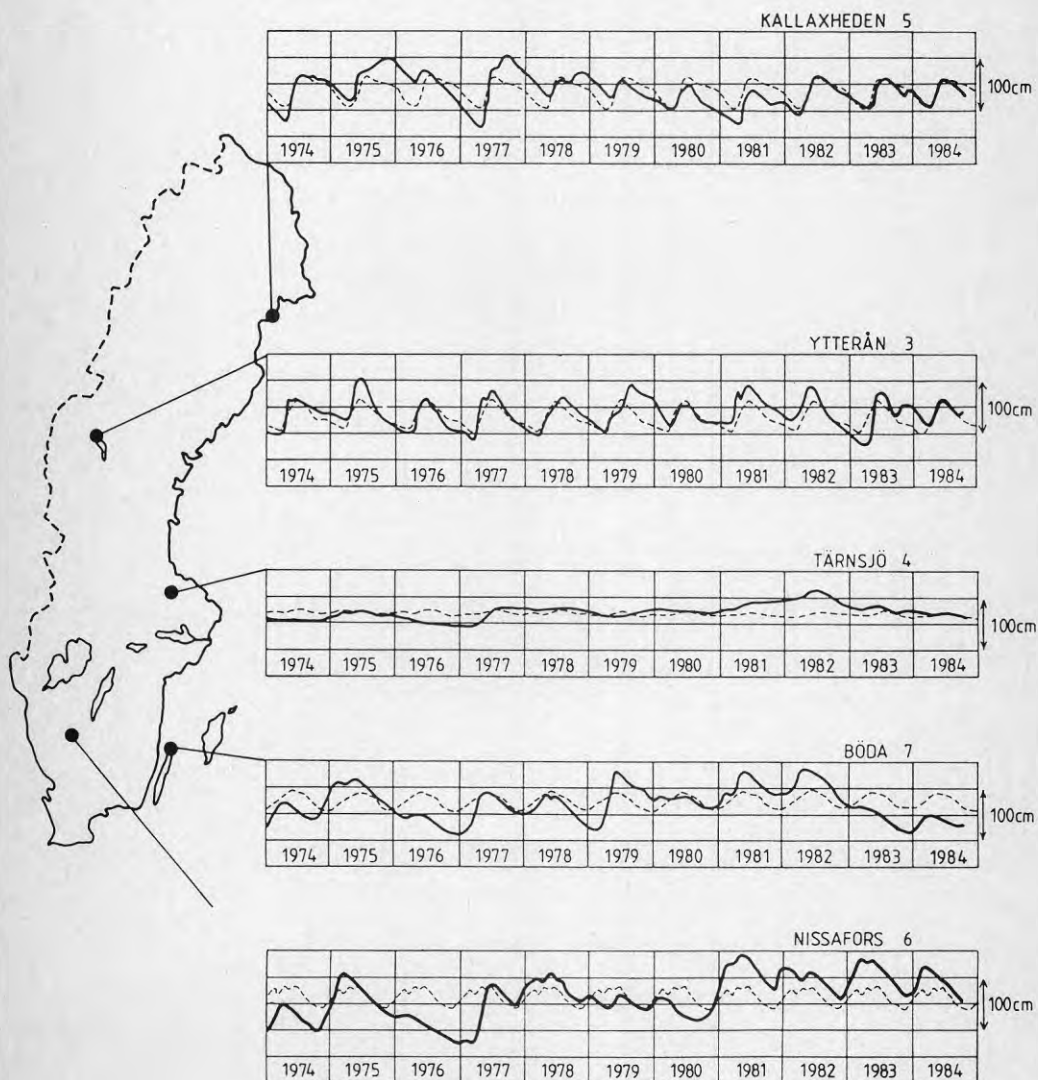
Lokalt skiljer sig grundvattenbildningen åt i tiden beroende på observationspunktens belägenhet. I stora grundvattensystem, vilket SGU:s mätpunkter i figur 12 representerar, sker grundvattenbildningen långsamt, med avsevärd fördröjning gentemot små och snabba grundvattensystem. Spricksystem i berg är att betrakta som mycket snabba grundvattensystem. Det mätta bergrummet är beläget i en södervänd bergssluttning som är väl exponerad mot solen, dvs med tidig snösmältning. Den fasförskjutning i tiden mellan SGU:s mätvärden och bergverkstadens förångningsenergi som figur 12 visar är därmed att förvänta.

Mätningarna anger 220 MWh/år eller 22 % av energibehovet för förångning av inläckande vatten (och viss mängd spolvatten). Högsta beräknade månadsmedelvärde är ca 40 MWh/mån (vilket motsvarar genomsnittlig förångning av ca 25 g vatten/sek). I den tidigare texten har anmärkts att bergrummet upplevts som mycket torrt.



Figur 12 Jämförelse mellan grundvattenbildningen och förångningsenergin. De heldragna linjerna i figuren visar hur nivåerna i två av SGU:s grundvattenobservationsrör, belägna intill varandra och c:a 2 mil från bergverkstaden, varierat under 4 år (cm under röröverkant). Den prickade linjen anger beräknade värden för förångningsenergin under mätperioden (MWh/mån).

— grundvattennivå
 - - - - månadsmedelnivå för perioden



Figur 13 Några exempel på hur grundvattennivåerna har varierat under perioden 1974-1984 på olika platser i riket. Notera både skillnaderna i månadsmedelnivåer och avvikelserna från dessa. (Källa: SGU, Grundvattennätet 1984)

Tumregler som används vid dimensionering av ventilationsanläggningar för bergrum anger ca 2,5 ggr större värde eller storleksordningen 100 MWh/mån dimensionerande värde. En extrapolering av detta värde skulle ge följande bild av energibalansens förlustsida.

Tabell 13 Energibalansens förlustsida vid andel förångningsvärme som motsvarar dimensioneringspraxis

Energipost	MWh/år	%
Transmission	160	12
Ventilation	570	43
Kylning	40	3
Ångbildning	550	42
Totalt	1 330	100

I detta fall skulle förångningsenergin andel utgöra över 40 % av energibehovet. Som exempel på effekten av stor grundvatteninläckning kan en oljelagringsanläggning nämnas. Anläggningen har lokaliserats i anslutning till en myrmark, i praktiken ett vattenmagasin, från vilken vatten via sprickor i berget året runt leds ned till berganläggningen. Den energimängd som krävs för att förånga dessa vattenmängder är så stor att den installerade värme- och ventilationsanläggningen aldrig förmått värme de lokaler den betjänar till avsedd temperatur.

Förångningsenergin storlek beror alltså av bergets sprickighet medan dess variation i tiden synes följa den lokala grundvattenbildningen. (Det förutsättes att bergrummet är beläget i dränerat berg och att påfyllning från något vattenmagasin ej äger rum.) Båda dessa faktorer beror av bergrumms lokalisering.

6.7 Åtgärder för att minska förångningsenergin storlek

I avsnittet diskuteras två metoder att minska vatteninläckningens omfattning.

Bergrum kan tätas genom injektering av det omgivande berget med olika tätningemedel. Normalt kan en avsevärd reduktion av vatteninläckning erhållas. Någon fullgod tätning kan i regel inte påräknas, dels för att god tätning rent tekniskt kan vara svår att åstadkomma, dels för att vattnet kan söka sig nya vägar i spricksystemen när de först läckande sprickorna tätats. Det kan även vara svårt rent praktiskt att utföra injektering i inredda bergrum pga platsbrist.

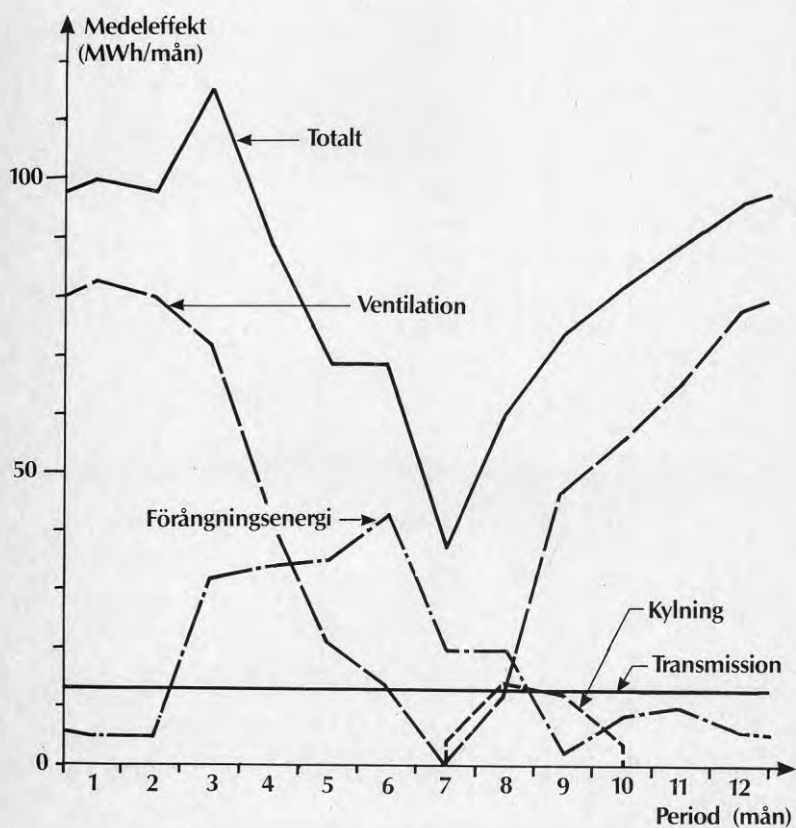
Ett alternativt sätt att minska vatteninläckning som kan vara väl så gynnsamt är att söka minska infiltrationen av vatten i markytan. Detta kan åstadkommas dels genom att söka leda bort vatten genom dränerings-

åtgärder, dels genom att söka täta de sprick- och krosszoner i bergytan som finns i influensområdet. Exempel finns där sådana åtgärder visat sig lyckosamma. Arbetet förutsätter geohydrologisk kompetens.

6.8 Effektbehovet

De olika delposterna för den bortförda energin har sinsemellan helt olika variation i tiden. Medeleffektkurvan för den studerade berganläggningen har därför ett något komplicerat utseende. Se figur 14.

Genom att förångningsenergin cyklus är förskjuten ett drygt kvartal i förhållande till ventilationsförlusterna inträffar det ackumulerade effektbehovet först i mars, dvs två månader efter normalårets kallaste period. Från dimensionerings- och värmeåtervinningssynpunkt är dessa de dominerande att ta hänsyn till. Kylenergiintaget intar en särställning emedan den av praktiska skäl förutsätter eltillförsel.



Figur 14 Effektbehovet och dess komponenter

6.9 Metod att bestämma förångningsenergens andel i befintliga anläggningar

I en situation där driftförhållandena i en befintlig berganläggning ska analyseras är det ingen enkel sak att fastställa förångningsenergens andel. En noggrannare mätning, i höjd med vad som beskrivs i denna rapport, är både kostsam och tidskrävande. En enkel metod som kan ge ledtrådar om förångningsenergens andel och betydelse i energibalansen vore därför värdefull. Här framförs förslag till en sådan metod. Den föreslås utföras i följande steg.

1. Sök information om den lokala grundvattenbildningens årstidsvariation. Grundvattennätet vid Sveriges Geologiska Undersökning (SGU) liksom lokal geologisk expertis kan ge upplysningar.
2. Gör stickprovsmätningar av ventilationsluftens vatteninnehåll, tilluft och frånluft, med syfte att bestämma vattentillskott från bergrummet till frånluften. Tidpunkterna för mätningarna bestäms till perioder när vatteninläckningen bedöms vara störst och minst utifrån pkt 1.
3. Sök rekonstruera ventilations- och förångningsförlusterna utifrån energitillförsel, klimatstatistik och pkt 2. Ett basbehov innehållande transmissionsförluster m m kan uppskattas.

En ungefärlig bild bör kunna erhållas, som kan ge anvisningar om förångningsenergens andel i energibalansen.

6.10 Värmeåtervinning

I den studerade bergverkstaden återvanns under mätperioden endast en mindre del av energin i frånluften, dels genom att 50 % av frånluften pga nedsmutsning ej värmeväxlades, dels pga låg verkningsgrad hos den befintliga värmeåtervinningsanläggningen.

Ovan har visats att tillförd värmeenergi, exklusive el, omfattar ca 540 MWh/år och förlustposterna ventilation och ångbildning omfattar 570 resp 220 MWh/år.

Den installerade värmeåtervinningsanläggningen återför idag ca 90 MWh/år av tillgängliga 290 MWh, dvs 30 % verkningsgrad. 150-160 MWh/år vore ett rimligare värde.

Om, mer generellt, några restriktioner mot värmeväxling av frånluftsmängden ej förelåg skulle 290-320 MWh/år kunna återvinnas, dvs värmeförlusterna skulle kunna reduceras till hälften av den nuvarande. Effektmässigt skulle detta innebära en reduktion för medelår från ca 70 MWh/mån med befintlig installation till kanske 40 MWh/mån.

Om värmeåtervinningsanläggningen har så hög verkningsgrad att frånluften kyls till en temperatur under daggpunkten kan även ångbildningsvärmén återvinnas. Då årsvariationen hos ventilationsenergin och förångningsenergin emellertid är förskjutna i tiden, är dock någon förångningsenergi ej tillgänglig då effektbehovet för ventilationen är som störst. Slutligen finns här uppenbara förutsättningar för värmeåtervinning med frånluftsvärmepump.

Sammanfattningsvis finns för bergverkstäder förutsättningar för värmeåtervinning som med konventionell teknik helt eller delvis kan ersätta värmeförsörjningsbehovet. De individuella förhållandena, i första hand ångbildningens omfattning, varierar dock för mycket för att tillåta generalisering. En avgörande förutsättning för detta konstaterande är berggrummens täthet med få öppningar, som ur ventilationssynpunkt kan kontrolleras.

6.11 Summerande karakterisering av bergverkstaden

Den analyserade bergverkstaden har en golvyta om 3 900 m² och en volym om 28 500 m³. Luften omsätts 1,6 ggr/h vid drift (2 300 h/år). Tillförd energi omfattar till själva verkstaden under normala driftsbetingelser 990 MWh/år, varav 90 MWh/år återvinns. Nettotillförseln 900 MWh/år motsvarar 230 kWh/m²,år och 31 kWh/m³,år.

De angivna specifika värdena för energitillförseln är av samma storleksordning som för den bergverkstad som nämndes inledningsvis, trots ett betydligt nordligare läge (mellersta Norrland mot mellersta Götaland). Detta till trots finns avsevärd potential för att reducera energitillförseln genom förbättrad värmeåtervinning.

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 791343-3
från Statens råd för byggnadsforskning till VBB AB,
Stockholm.

R36: 1986

ISBN 91-540-4537-1

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6706036

Abonnemangsgrupp:
W. Installationer

Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 7853
103 99 Stockholm

Cirka pris: 30 kr exkl moms