



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

R82:1988

R **Korttidsvärmelagring i
sänkbrunnar i jord**

Förstudie

R/TL

Ingvar Bogdanoff

INSTITUTET FÖR
BYGGDOKUMENTATION

Accnr

Plad

ser

Byggeforskningsrådet

R82:1988

KORTTIDSVÄRMELAGRING I SÄNKBRUNNAR I JORD

Förstudie

Ingvar Bogdanoff

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 860131-1
från Statens råd för byggnadsforskning till Hagconsult AB,
Göteborg.

REFERAT

Syftet med projektet har varit att undersöka förutsättningarna för korttidslagring av värme i brunnar i lera. Brunnarnas diameter kan vara 2,6 - 2,4 m. Grävningen sker med teknik som delvis är känd från tillverkning av grävpålar. Endast brunnarnas topp värmeisolerar. Värmeförlusterna är ca. 14% efter några dygn. Den transienta värmeprocessen vid dygnslagring påverkar ca 0.2 m av jorden utanför brunnen. Som lagringsmedium kan användas makadam och vatten eller enbart vatten. Om brunnen fylls med sten kan den också tjänstgöra som grundläggningselement och föra ner stora laster till fast botten. Isolering mellan lagret och byggnaden kan göras av sk. X-betong som kan ta stora tryckpåkänningar. Lagrets överyta kan utnyttjas även om lagret är fyllt med vatten. Kostnaderna för en vattenfylld brunn blir i samma storleksordning som för en liten industriell tank för värmelagring. Rapporten berör flera olika problemområden som kan ha intresse för andra typer av värmelager i jord,

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

Denna skrift är tryckt på miljövänligt, oblegt papper.

R82:1988

ISBN 91-540-4925-3

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

I N N E H Å L L S F Ö R T E C K N I N G

1.	SAMMANFATTNING.....	5
2.	VÄRMELAGRING I BRUNNAR I JORD.....	7
2.1	Inledning.....	7
2.2	Projektets syfte.....	8
3.	BYGGNADSTEKNIK.....	9
3.1	Grävning av brunn.....	9
3.2	Isolering och lock.....	13
4.	VÄRME.....	16
4.1	Värmeförluster.....	16
4.2	Inverkan av flera brunnar intill varandra.....	20
4.3	Lagringskapacitet.....	20
4.4	Språngskikt mellan varmt och kallt vatten i sprängstensfyllning.....	24
5.	VÄRMELAGER SOM GRUNDLÄGGNINGSELEMENT.....	27
5.1	Påverkan på leran utanför lagret.....	27
5.2	Grundläggning på sprängstensfylld brunn...	30
5.3	Flytande brunnar i jord.....	35
5.4	Brunnar i friktionsjord.....	35
6.	TILLÄMPNING.....	37
6.1	Allmänna tillämpningar.....	37

7.	KOSTNADER.....	38
7.1	Byggnadskostnader.....	38
7.2	Kostnader för olika foderrör.....	41
7.3	Kostnad för stenfylld brunn som grund- läggningselement och värmelager.....	41
7.4	Kostnader för värmeförluster.....	43
7.5	Specifika kostnader.....	44
7.6	Jämförelse med andra lagertyper.....	44
8.	SLUTSATSER.....	46
9.	REFERENSER.....	48

Bilaga: Rör av typ "vägtrumma"

Syftet med projektet har varit att undersöka om grävbrunnar i jord kan användas för korttidslagring av värme. Brunnarna kan utföras som enstaka eller flera brunnar intill varandra. Endast lagrets topp isole-ras. De kan vara enbart vattenfyllda eller fyllda med sten och vatten. I det senare fallet skulle brunnarna kunna användas som grundläggningselement och föra ner stora laster från byggnader till fast botten. Förde-len med brunnar i jord är att lagret kan placeras osynligt i jord samtidigt som man kan utnyttja marken ovanför.

Undersökningen visar att värmeförlusterna blir accep-tabla även för små volymer eftersom uppehållstiden för värmen i lagret är kort. Vid dygnslagring deltar endast 0.2 m av jorden utanför lagret i den transi-enta värmeprocessen. Motsvarande värde för veckolag-ring är 0.4 m - som också har befunnits att vara ett lämpligt avstånd mellan brunnarna då man har flera brunnar intill varandra.

Genom att använda foderrör med succesivt minskande diameter kan brunnarna utföras djupa utan att man får stora kohesionskrafter på foderrören vid neddrivning av dessa. Lämpliga foderrör kan vara korrugerade rör av samma typ som används för vägtrummor.

När ett stenfyllt lager belastas med en vertikalkraft fördelas lasten via stenskelettet till foderröret där det tas upp som ringspänningar. Det krävs därför, om brunnen används som grundläggningselement, att foder-röret är beständigt under byggnadens livstid.

Ett annat problem är att utforma en lämplig värmeiso-lering mellan byggnadens fundament och värmelager. Isoleringen skall klara höga tryck och samtidigt ha ett lågt värmeledningstal. Ett sådant material kan vara s.k. X-betong.

I motsats till många andra lagertyper minskar inte byggnadskostnaden drastiskt vid ökande volym eftersom de fasta kostnaderna är höga. För volymer upptill 150 m³ är kostnaden för en vattenfylld brunn ungefär lika hög som för en trycklös ståltank. Den specifika kostnaden för stenfyllda brunnar blir marginellt större än för ståltankar om lagret kan utnyttjas som grundläggningselement.

Lagret kan endast utföras i täta jordar (lerjordar) och måste föras ner till fast botten för att de inte skall sätta sig. När leran runt brunnen värms hastigt kommer den cykliska värmeprocessen orsaka sättningar runt brunnen och som måste kompenseras senare med lättfyllning. Sättningarna bidrar dock till att vattenkonvektion runt brunnen förhindras och att leran blir fastare. Det motverkar även korrosion av foderröret.

Förslaget med brunnar i lera som värmelager innehåller flera oprövade svårigheter som lämpligast kan undersökas i fullskaleförsök. Trots att kostnaden för brunnarna är hög kan det vara värt att prova lagertypen eftersom man kan få svar på frågor som även berör andra lagertyper i jord, t.ex. vad avser isole-ring och lerans uppförande för höga temperaturer. Behovet av värmväxlare för stenfyllda lager behöver också undersökas ytterligare.

2. VÄRMELAGRING I BRUNNAR I JORD

2.1 Inledning

Grävpålar används som grundläggningselement för att föra ner stora laster till fast botten. I sand- och lerjordar kan ett foderrör, vanligen med diameter mellan 1-2 m, drivas ner i marken. Urgrävning av jorden inne i röret sker med gripskopa, eller ibland med en skruv. När man nått fast botten fylls brunnen med betong, samtidigt som man drar upp röret. Metoden har använts länge och tekniken är välkänd.

Om man istället för betong fyller röret med vatten eller sprängsten och vatten borde brunnen gå att använda som värmelager. Eftersom brunnens väggar inte isoleras med annat än omgivande jord kan man endast förvänta att brunnen enbart kan användas som korttidslager - för att värmeförlusterna inte skall hinna bli för stora. Endast brunnens överyta skulle behöva isoleras. Lagret skulle därefter kunna arbeta som en sprängskiktackumulator.

Fördelen med brunnarna jämförd med ståltankar skulle vara att dessa kan placeras osynligt och marken ovanför skulle kunna användas för annan verksamhet. Ett stenfyllt lager borde även kunna användas för att föra ner stora laster till fast botten. En nackdel med jordgropar som värmelager anses vara att deras överyta inte kan beträdas eftersom det är svårt att lösa isoleringsproblemet och samtidigt få en överyta som kan beträdas utan risk.

Syftet med projektet har varit att:

- undersöka hur lagret kan byggas
- beräkna värmeförluster
- undersöka förutsättningarna för att använda stenfyllda brunnar som grundläggningselement.
- beräkna kostnader
- föreslå applikationer

3. BYGGNADSTEKNIK

3.1 Grävning av brunn

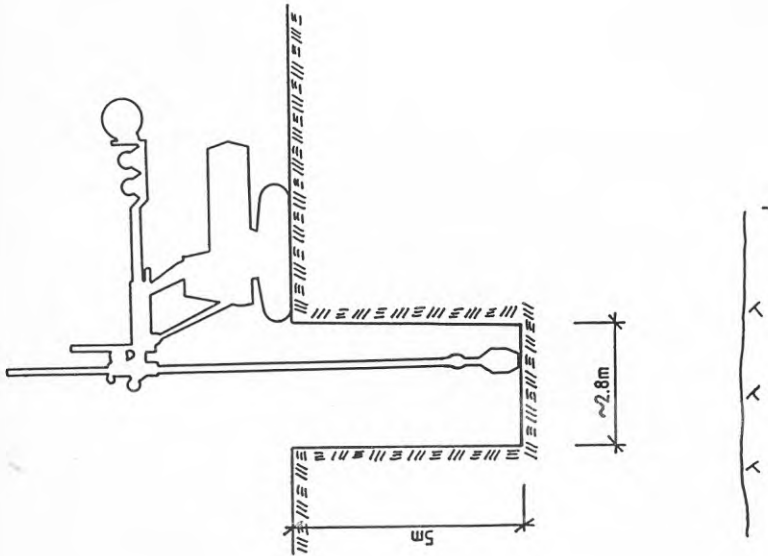
För att utföra en brunn krävs ett lämpligt foderrör som kan lämnas kvar i marken. De foderrör som används vid byggnation av grävpålar är alldeles för dyrbara eftersom de är utförda för att kunna återvinnas och för att kunna drivas genom relativt hårda jordar med stenar. Betongringar är ett annat alternativ som förkastats eftersom varmt vatten anses urlaka betongen.

Lämpliga foderrör bedöms vara rör av korrugerat plåt, sk. vägtrummeerör. De är billiga relativt svetsade rör och finns som standard med dimensionerna 2.6, 2.4, 2.2 osv. Godstjockleken för ett 2.6 m rör är 4.0 mm. Bilaga 1 visar ett utdrag ur broschyrmaterial som beskriver rören.

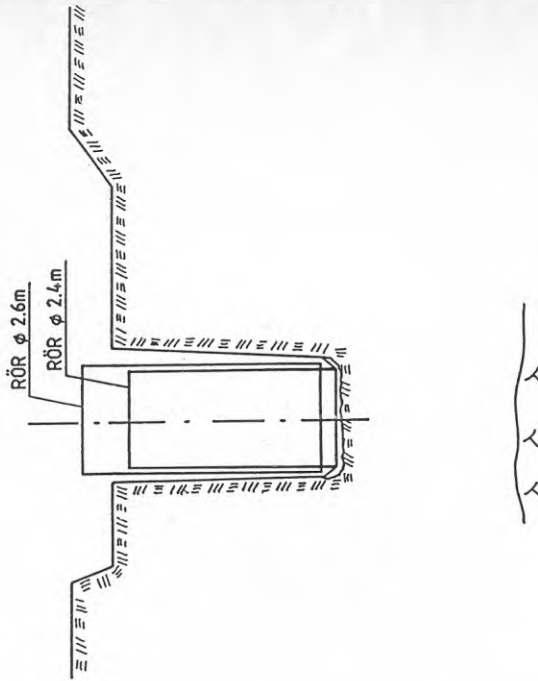
Byggnadstekniken för 1, 3 eller 7 brunnar beskrivs nedan.

- Urgravning utförs för ett 6 m långt rör med diametern 2.6 m. Se fig. 3.1.1. Om lagret består av flera brunnar grävs en gemensam grop för alla rören.
- Rören med diametern 2.6 m sänks ner i gropen, se fig.3.1.2.
- Ett rör med diametern 2.4 m sätts in i röret med diametern 2.6 m. Schaktningen kan nu fortsätta från -5 m nivån inne i det mindre röret. Neddrivningen av 2.4 m röret sker växelvis genom schaktning och nedpressning, se fig. 3.1.3.

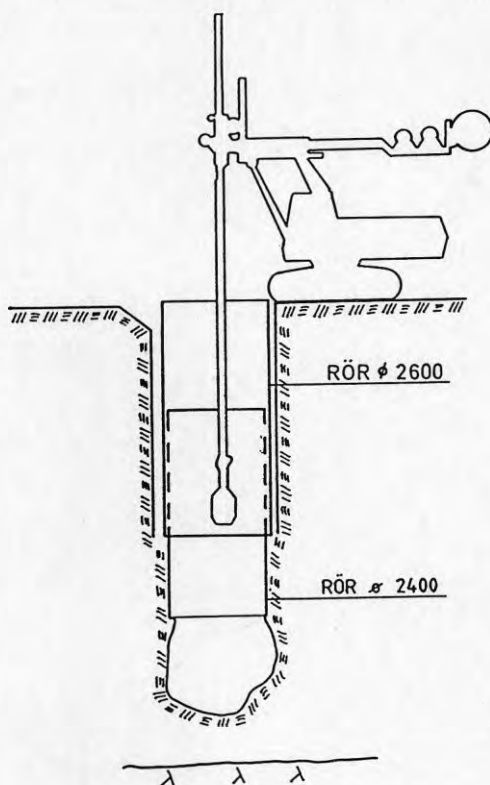
Nedpressningen av 2.4 m röret kräver att man tillverkar en nedpressningsplatta som passar till diametern. Den relativt stora diametern tillåter att



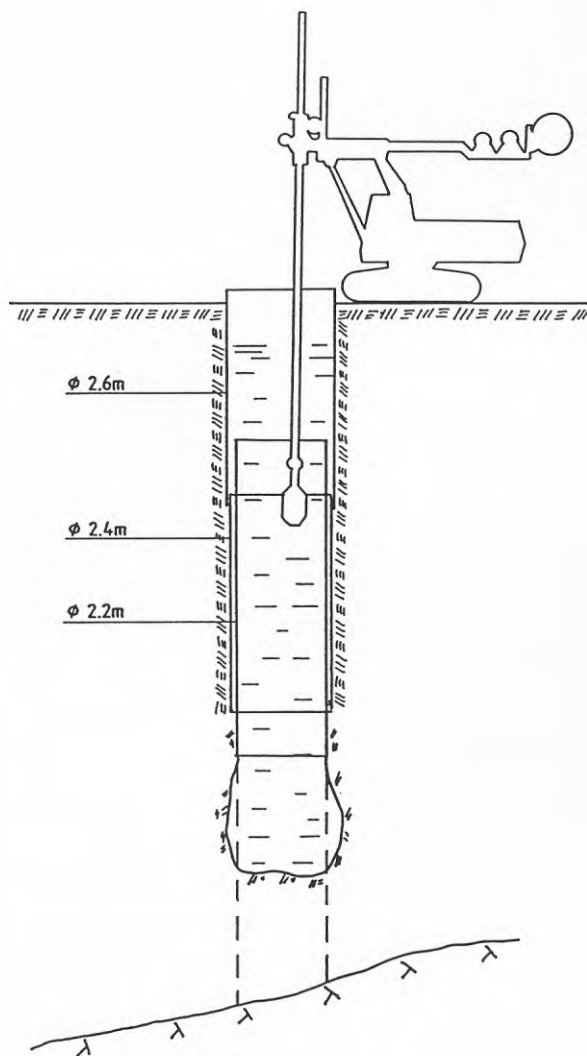
3.1.1 Urgrävning i jord för ett 6 m långt rör



3.1.2 Två rör med diametrarna 2.6 och 2.4 m har sänkts ner i den förgrävda gropen. Det inre röret kan nu sänkas ytterligare 5 m.



- 3.1.3 Sänkning av det inre röret sker genom växelvis grävning med gripskopa och nedpressning av röret. Den stora diametern medger att skopan (stickan) kan lutas något och grävning kan ske utanför mantelytan.



3.1.4 Brunn med succesivt minskande foderrör för att minska kohesionskrafter. Rören transporteras inskjutna i varandra.

gripskopan kan lutas lite för att schaktning skall kunna ske något större än rördiametern - för att underlätta neddrivningen.

Fördelen med minskande rördiameter med brunnsdjupet är att man minskar kohesionskrafter och mantelfriktion. Fig. 3.1.4 visar en brunn med tre rör med succesivt minskande diameter. Rörlängderna kan sedan erfarenhet vunnits anpassas till optimala längder. Rören kan transporteras inskjutna i varandra.

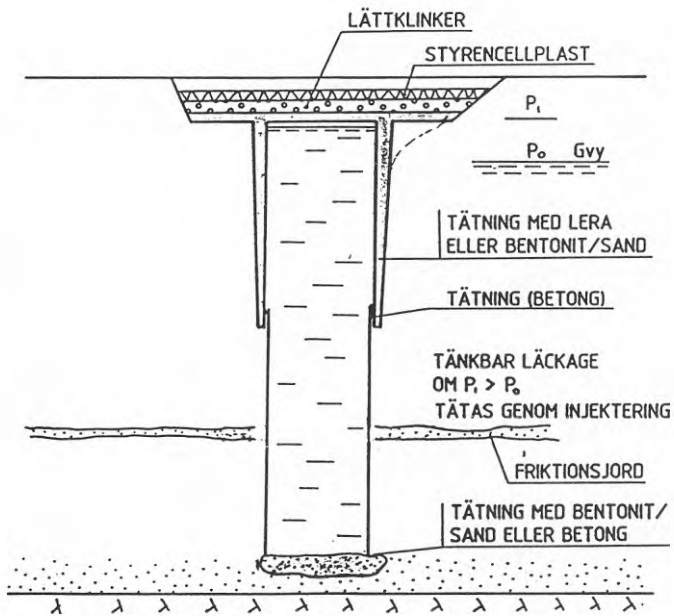
För att förhindra bottenuppträckning tätas botten med betong. Även skarven mellan rören tätas med betong. Betongen låser rören i skarvarna.

Rören är uppbyggda med en fals som löper i spiral runt röret. Falsarna är inte vattentäta. Om rören drivs ner i lera kan man dock förmoda att skikt med friktionsmaterial kommer att tätas p.g.a. omröringen i leran. Runt det övre röret kan man täta med bentonit/sand. Det minskar även påhängskrafter mot röret. Se vidare i avsnitt 5.2. Man kan efter vattenfyllning lätt konstatera tätheten. Om läckage föreligger kan detta tätas genom injektering på ett relativt enkelt sätt. Fig 3.1.5

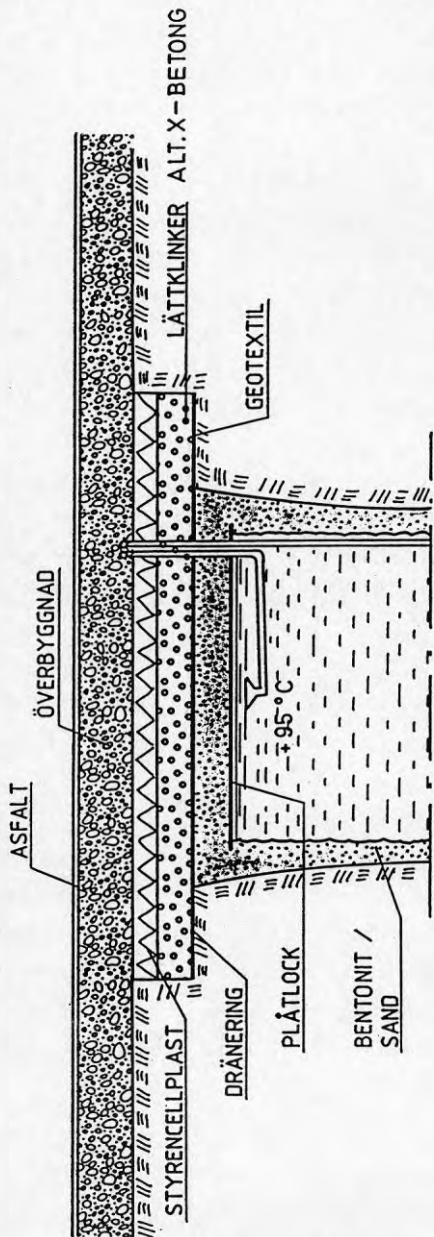
3.2 Isolering och lock

Efter att laddnings- och urladdningsröret monterats kan brunnen fyllas med vatten.

Lagrets överyta isoleras och utsträcker minst 1 m utanför lagrets diameter, fig. 3.2.1. Närmast lagret kan man använda lättklinker och därefter styrencellplast. Lättklinkern gör att temperaturen mot cellplastisoleringen inte överstiger +70°C som är dess högsta tillåtna temperatur. Ett annat alternativ är att använda X-betong element. Se vidare i avsnitt 5.2.



- 3.1.5 Vattenfyllt lager. Botten tätas med betong liksom skarven mellan rören. Betongen låser skarven.



- 3.2.1 Isolering av vattenfyllt lager. Bentonit /sandlagret förhindrar vattenånga att tränga upp i isoleringen. Plåtlocket kan eventuellt svetsas fast till foder-röret.

Locket görs av 20 mm plåt alternativt en tunnare plåt med förstärkningar. Nedböjningen med 20 mm plåt och en jämt utbredd last på 100 kPa blir ca. 3 mm. Tätningen med bentonit runt locket gör brunnen vattentät upptill. Det är därför även möjligt att använda markskivor av stenull som värmeisolering, om man dränerar bort ytvatten som kan rinna till brunnarna.

4. VÄRMEBALANS

4.1 Värmeförluster

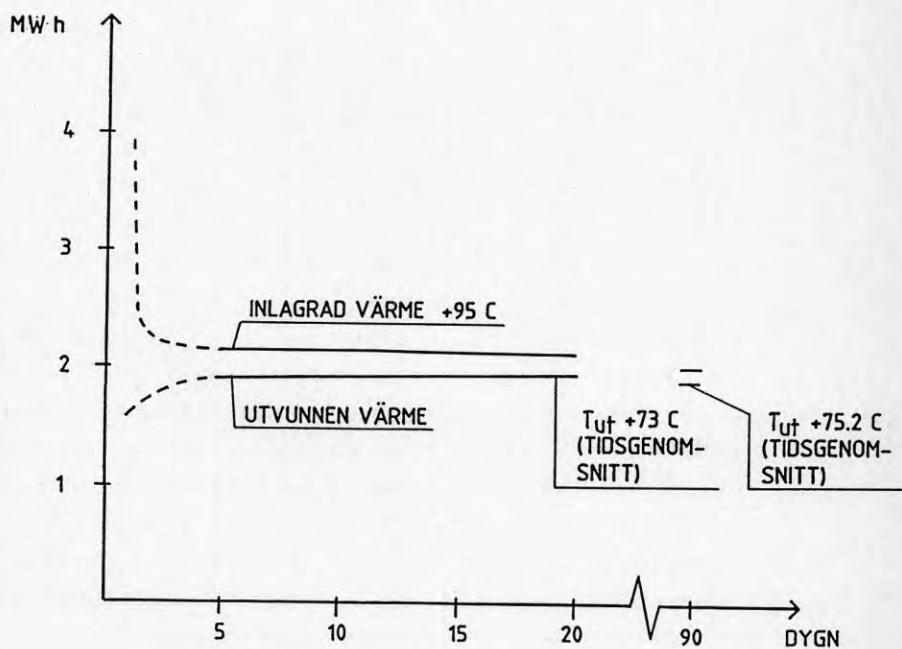
Lagring av värme i brunnar i jord förutsätter korta lagringstider. Stora värmeförluster ska inte hinna ske under den tid som lagret är laddat. Endast brunnarnas topp isoleras. Om omgivande jord är värmetrögt hinner värmen inte tränga långt ut i jorden under den tid som brunnen laddas, vilar och urladdas.

Fig. 4.1.1 visar inlagrad och utvunnen värme ur en brunn med diametern 2.5 m. Lagret har simulerats som ett dygnslager med 12 timmar laddning, 4 timmar vila och 12 timmar urladdning. Efter 4 dygn är förlusten endast 14%. Efter 90 cykler är värmeförlusten 9%. Utvunnen energi är i det närmaste 1.9 MWh och inlagrad energi mellan 2.1 och 2 MWh.

Beräkningen är utförd för en brunn i lera. Värmekonduktiviteten har satts till 1.0 W/m °C. Lagret har en toppisolering motsvarande 0.5 m isolering med $\lambda = 0.05$ W/m °C. Lagrets höjd är 10 m. Medeltemperaturen (T_m) har beräknats som:

$$T_m = \frac{95 + 50}{2} = 72.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Under det första året är förlusterna något större än efterföljande år. Tabell 4.1 visar hur förlusterna avtar för ett stort och ett litet lager. Eftersom korttidslagret inte används på sommaren blir medeltemperaturen något lägre än det som förutsätts i tabellen. Förlusterna under vila blir följaktligen också något mindre.



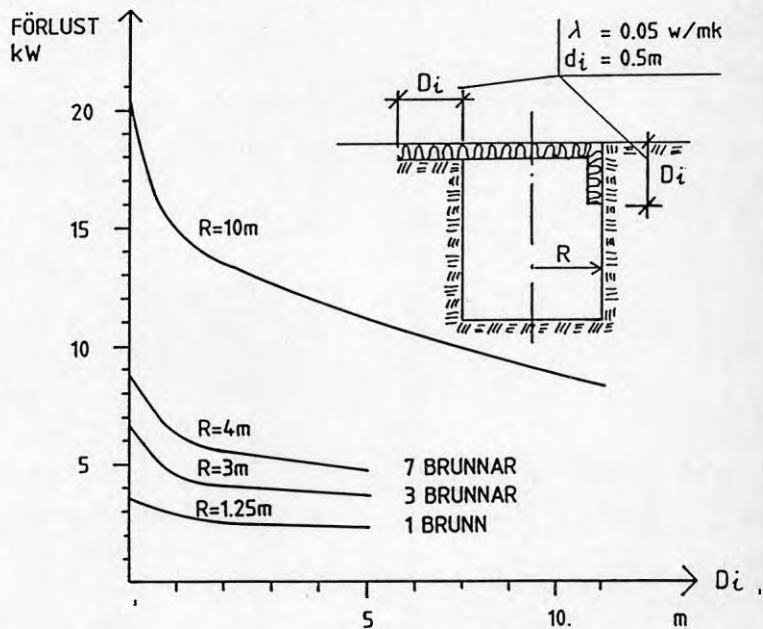
- 4.1.1 Inlagrad och utvunnen värme ur en brunn med diametern 2.5 m. Inlagring sker under 12 timmar, vila under 4 timmar och urladdning under 12 timmar. Beräkningen är utförd för en stenfylld brunn.

TABELL 4.1 Värmeförluster ur ett lager med diametern 2.5 och 10 m vid medeltemperaturen + 72.5 °C. Lagrets höjd är 10 m.

ÅR	FÖRLUSTER kW	
	diam. 2.5 m	diam. 10 m
1	4.2	31
2	3.2	20
3	3.1	18.5
4	3.1	17.8
5	3.05	17.4

Utförandet av toppisoleringen har väsentlig betydelse för förlusterna. I tabell 4.1 och fig. 4.1.1 visade förluster har förutsatts att isoleringen ligger endast över lagrets tvärsnittsarea. Om isoleringen dras utanför lagret kan det jämföras med en vertikal kantisolering. Fig. 4.1.2 visar kantisoleringens betydelse för förlusterna. Figuren har beräknats med handräkningsmetoder enligt Markvärmeboken. Fig. 4.1.2 indikerar att det finns en brytpunkt i förlusterna vid ca. 1 m isolering utanför lagret. Kantisoleringen får vidare större betydelse för ökande lagerstorlek. Förlusterna avser fortfarande stillstånd.

Då man har flera brunnar intill varandra, antas här att förlusterna ur lagret kan approximeras till att vara lika stora som ur ett lager med en diameter som omskriver brunnarna. Se vidare i nästa stycke.



- 4.1.2 Förlusterna minskar om isoleringen går utanför lagret. Utsträckningen horisontellt antas motsvara en isolering med en lika stor utsträckning i vertikalled (efter Claesson 1985).

Om man betraktar en enskild brunn vid veckolagring så deltar endast 0.35 m av jorden utanför brunnen i den transienta värmeprocessen. Vid dygnslagring minskar avståndet till 0.15 m, se fig. 4.2.1 och 4.2.2.

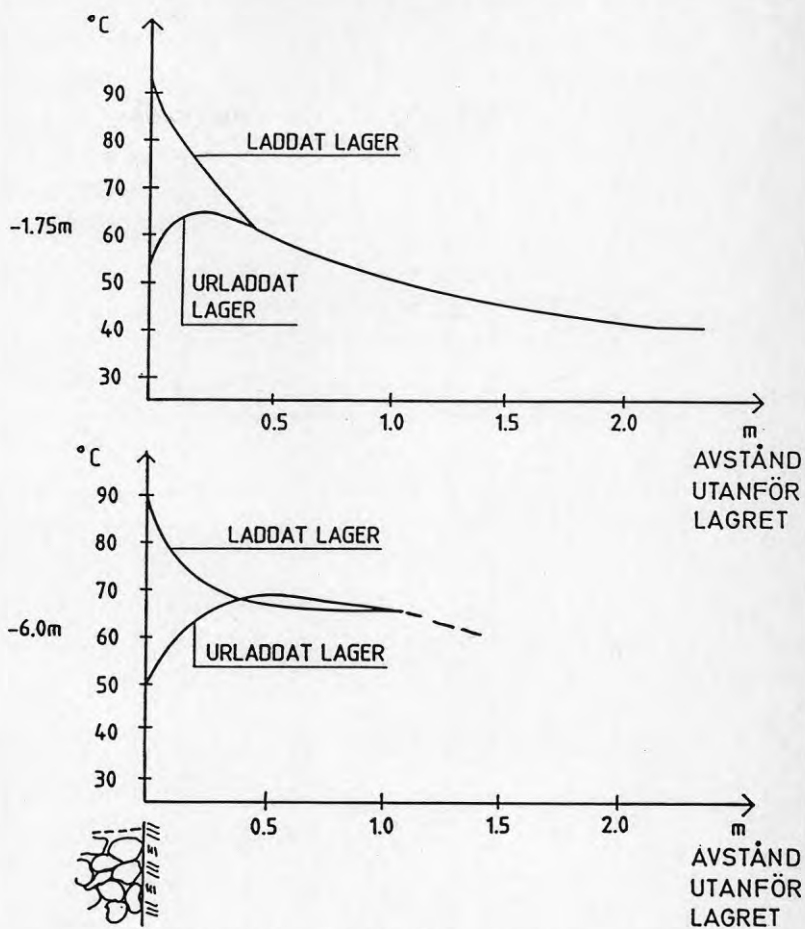
Beräkningen av inträngningen är utförd för ett lager med radien 0.63 m med en numerisk modell. Analytiska lösningar för ett plant endimensionellt fall ger inträngningen 0.53 m vid veckolagring och 0.3 m för ett dygnslager. För större lager än 0.63 m kan inträngningen således förväntas bli något större än i fig. 4.2.1 och 4.2.2, eftersom man då går mot det plana fallet.

En slutsats av fig.4.2.1 och 4.2.2 är att avståndet mellan brunnarna kan vara 0.4 m eller något större. Man får då en överlagring av temperaturer där mantelytorna mellan brunnarna är nära varandra; å andra sidan finns det delar mellan brunnarna som inte berörs av det transienta förloppet. Ur utförande synpunkt bedöms även avståndet 0.4 m vara lämpligt. Fig. 4.2.3 visar plan av 7 brunnar med 0.35 m jord emellan.

4.3 Lagringskapacitet

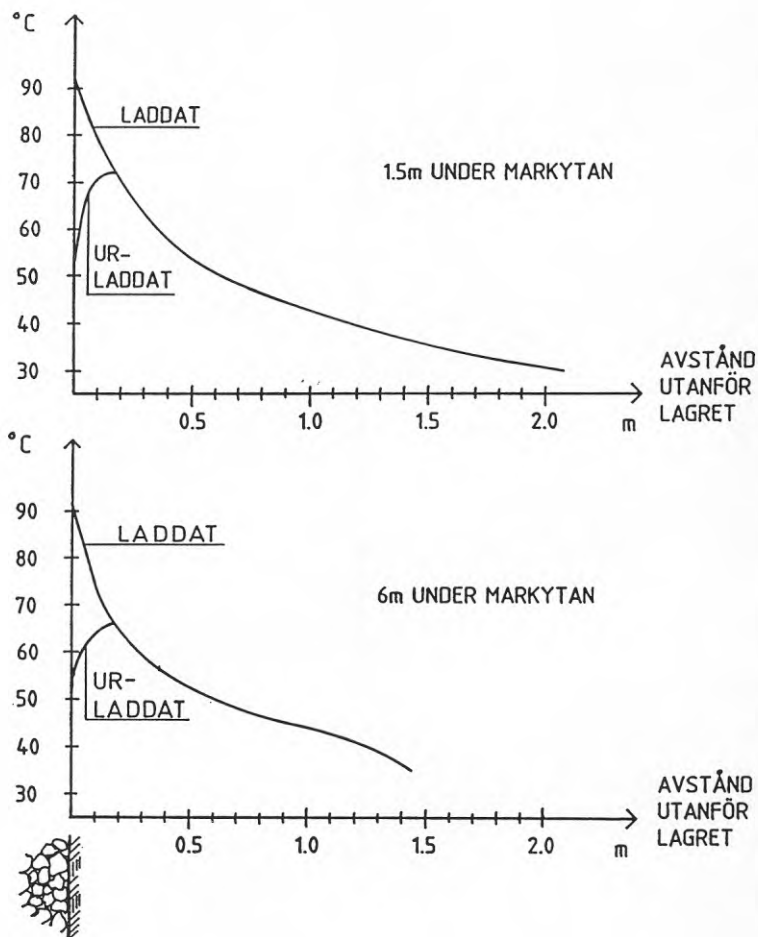
En vattenfylld sprängstensfyllning har lägre värmekapacitet än vatten. Bergets volymetriska värmekapacitet kan variera något och har här satts till $2.3 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$.

Porositeten i osorterad sprängsten är ca. 39-40 %. Om finmaterialet skiktas bort och stenen blir ensgraderad (makadam) kan porositeten öka till 48%, Bogdanoff (1981). Den vattenfyllda sprängstensfyllningen får då lagringskapaciteten $0.89 \text{ kWh/m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$ och som skall jämföras med vattens $1.16 \text{ kWh/m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$.

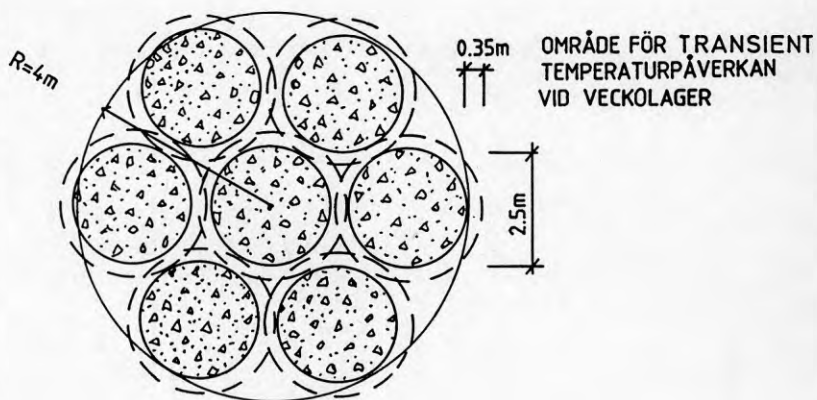


TEMPERATURPROFIL UTANFÖR LAGRET VID
VECKOLAGRING EFTER TIDEN 1 ÅR.
PROFILERNA ÄR TAGNA -1.75 OCH -6.0m
UNDER MARKYTAN.

- 4.2.1 Temperaturprofil utanför lagret p.g.a den transienta värmeprocessen vid veckolagring.



4.2.2 Temperaturprofil utanför lagret p.g.a. den transienta värmeprocessen vid dygnslagring.



- 4.2.3 Plan av 7 brunnar med 0.35 m jord emellan. Figuren visar även den "transienta räckvidden". Värmeförlusten ut från lagret approximeras till att gälla för ett lager med en diameter som omskriver brunnarna.

4.4 Språngskikt mellan varmt och kallt vatten i språngstensfyllning

Lagret arbetar som en språngskiktsackumulator med det varma vattnet ovanpå det kalla.

Fig. 4.4.1 visar simulering av språngskiktet i ett lager fyllt med språngsten och vatten. Lagret urladdas med ca. 1.5 m/h. Efter 8 h urladdning är utgående vattentemperatur +52°C. Vattnet som pumpas till lagrets botten har temperaturen +50°C.

För ett stenfyllt lager förutsättes tillsvdare att värmen måste överföras med värmeväxlare. Det innebär att lagret kan urladdas till ca. +55°C, i bästa fall. Den värme som är kvar i lagret motsvarar dock endast 70-80 kWh.

Ett ökande språngskikt innebär en kvalitetsförsämring av värme. Däremot påverkas inte värmeförlusterna ut ur lagret. Språngskiktet i ett stenfyllt lager blir större än i ett lager fyllt med enbart vatten.

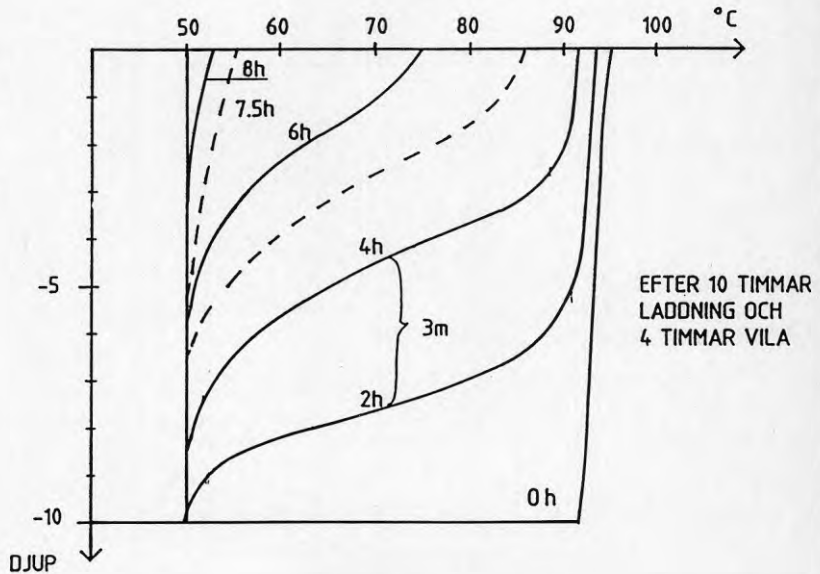
Att språngskiktet blir större i det stenfyllda lagret beror främst på att värmeledningsförmågan inne i lagret ökar. Stenstorleken har en mindre betydelse medan den termiska hastigheten kan förändra språngskiktet något för de hastigheter som är aktuella här <1.5 m/h.

Resultatet från försök i fyllning med porositeten 39% tyder på att man inte kan tillåta högre urladdningshastigheter än ca. 1.0 m/h. Om hastigheten ökas så riskerar man att vattnet transporteras i kanaler genom fyllningen (vattnet tar den lättaste vägen genom fyllningen). Genom att använda ensgraderat sten, (makadam) ökar porositeten till ca. 45 - 48%. Det bör tillförsäkra en jämn vattenströmning för aktuella urladdningshastigheter. Förhållandet mellan vattenhastigheten i fyllningen och den termiska hastigheten har för makadam

$$v_W / v_T = 1,6$$

Vid $v_T = 1,5 \text{ m/h}$ så är vattenhastigheten genom fyllningen således $2,4 \text{ m/h}$.

Beräkningsmodellen som ligger till grund för Fig. 4.4.1 har kontrollerats mot försök i vattenfylld sprängsten i en betongbassäng med volymen 20 m^3 . Bogdanoff (1981), Claesson (1985).



4.4.1 Temperaturfördelning i ett stenfyllt lager vid urladdning. Urladdnings eller den termiska hastigheten är 1.5 m/h .

Om temperatursprånget är 45 °C blir lagringskapaciteten i en stenfylld brunn 1960 kWh. En överslagsberäkning i fig. 4.2.1 och 4.2.2 ger emellertid att det i omgivande jord lagras ca 100 kWh/cykel vid dygnslagring och ca. 350-400 kWh/cykel vid veckolagring. I tabell 4.3.1 ges en sammanställning av lagringskapaciteter för några alternativ.

TABELL 4.3.1 Sammanställning av lagringskapaciteter och värmeförluster för sten och vattenfyllda, och för enbart vattenfyllda lager.

	Inlagrad värme sten + vatten/ enbart vatten kWh	Värmeförlust kWh
1 brunn, diam. 2.5, värmeförlust 4 kW		
Dygnslagring	2060/2660	100
Veckolagring	2300/2900	670
3 brunnar, diam 6 m, värmeförlust 7 kW		
Dygnslagring	6200/8000	170
Veckolagring	6900/8700	1200
7 brunnar, diam. 8 m, värmeförlust 9 kW		
Dygnslagring	14400/18600	220
Veckolagring	16100/20000	1500

5. VÄRMELAGER SOM GRUNDLÄGGNINGSELEMENT

5.1 Påverkan på lera utanför lagret

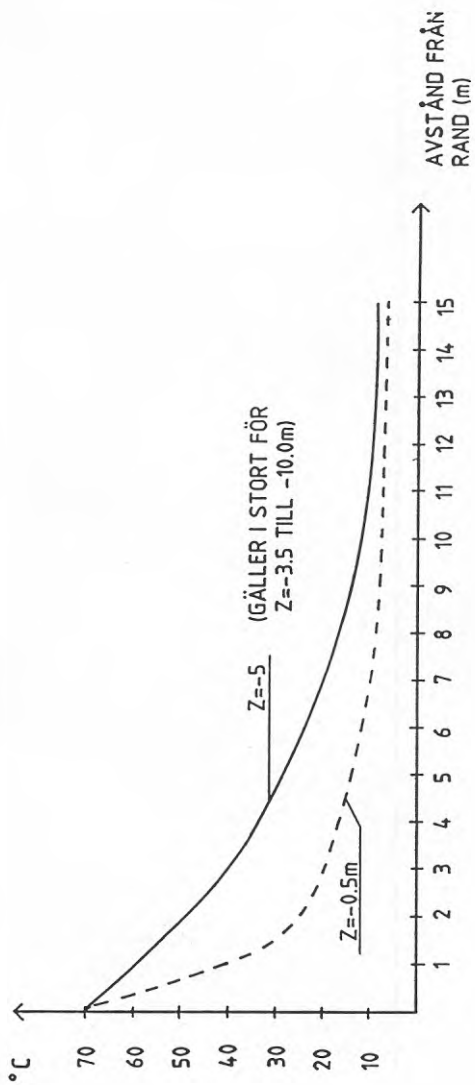
Efter Adolfsson (1987)

Genom de snabba temperaturförändringarna i lagrets omedelbara närhet kommer leran att utsättas för stora portrycksvariationer i närområdet. Detta innebär att porvattnets volym ökar vid uppvärmningen, men eftersom leran är tät, kommer marken att hävas. En liten del av porvattnet kommer dock att dräneras bort. Detta fenomen kommer att i avtagande grad upprepas vid varje lagringscykel, med en sättning av marken som följd. Se fig 5.1.1.

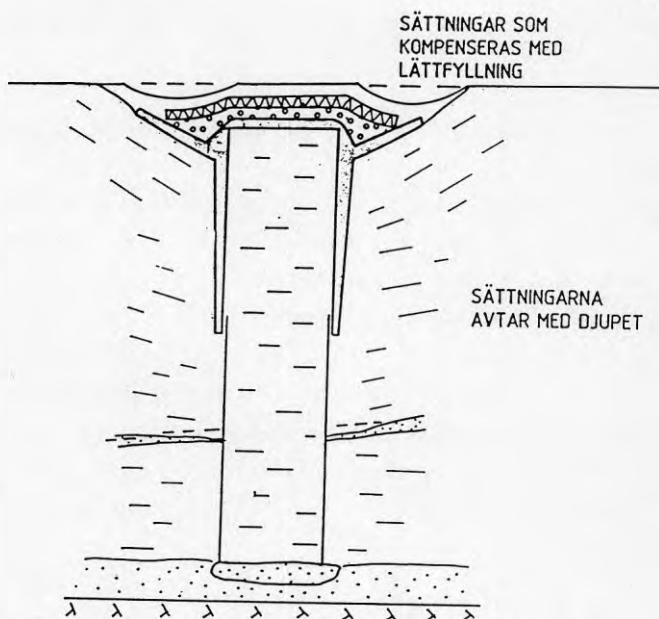
Det finns ingen bra teoretisk modell för att beräkna sättningarna. Med ledning av försök som utförts i lera görs dock bedömningen att sättningen intill lagret kan uppgå till 0.6 m och sedan avta till ett avstånd på 3-4 m från lagret. Det är således temperaturtransienterna som orsakar en "pumpningseffekt" i leran och som i sin tur orsakar sättningarna. Vid längre avstånd från lagret kommer temperaturen att sakta höjas. Temperaturhöjningen är dock så långsam att portrycket i leran hinner utjämnas. Fig. 5.1.2. visar temperaturen utanför lagret efter 1 år.

Den förhöjda temperaturen innebär att vattnets viskositet förändras så att hastigheten på eventuellt pågående sättningar i området runt lagret kommer att öka. Vidare kommer lerans skjuvhållfasthet att sjunka i närområdet varför en viss försiktighet vid belastning av jorden kan vara befogad.

Lerans förkonsolideringstryck kommer att under de första cyklerna att minska. Det har till följd att en del sättningsrörelser kan komma att utbildas utan att



5.1.2; Temperatur fördelning utanför lagret på olika djup (z) efter 1 år.



- 5.1.1 Den cykliska värmebelastningen orsakar sättningar runt lagret som måste kompenseras senare.

någon synlig last påförts jorden. Efter hand som lagret används kommer dock genom konsolidering av dessa sättningar att snabbt avtaga.

I jord där porvattentrycken utjämnas snabbt tex. silt uppstår inga stora sättningsfenomen.

Efter att sättningarna har uppkommit kan man kompensera dem. Fyllningsmaterialet bör då vara av typen lättfyllning, tex. lättklinker.

5.2 Grundläggning på sprängstensfylld brunn

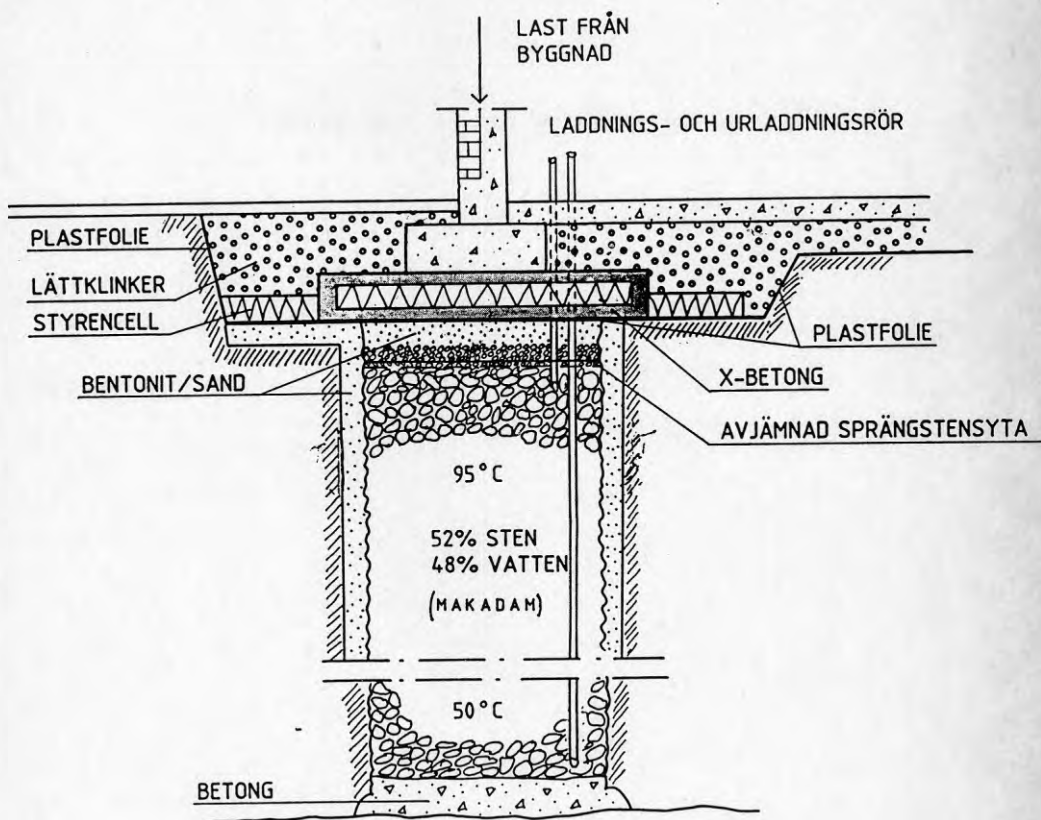
Sprängstensfyllda brunnar kan utsättas för stora vertikala belastningar. När brunnen belastas överförs lasten via stenskelettet till foderröret där det upptas som ringspänningar.

Om en byggnad skall grundläggas på brunnen krävs det av värmeisoleringen mellan byggnaden och brunnen att den kan ta stora tryckpåkänningar som tål en hög temperatur (+95°C).

Ett annat svårt problem är att garantera att foderröret inte korroderar för mycket under byggnadens livstid.

Ett sätt att lösa problemet med isoleringen är att använda sandwichelement av sk. X-betong. I denna är isoleringen ingjuten i en armerad vattentät betong med låg densitet som i sig har en god värmeisolerande förmåga. Fig. 5.2.1 visar en principiell lösning där X-betongen är 0.3 m tjock och motsvarar en isolering med $\lambda = 0.04 \text{ W/m}^\circ\text{C}$.

X-betongelementen kan prefabriceras till önskad mått. För att förhindra att vattenånga tränger in i elementet, tätas sprängstensytan med ett lager med bentonit blandad med sand. Bentoniten har den egen-



5.2.1 Sprängstensfylld brunn som grundläggningselement och värmelager.

skapen att den sväller om det kommer i kontakt med vatten. Fuktskyddet kan ytterligare förstärkas med asfalt ovanpå bentoniten.

Miljön runt brunnarna är inte korrosiv eftersom vattenkonvektion inte kommer att förekomma i anslutning till foderröret. Foderrören är korrosionskyddade med zink och kan till en rimlig kostnad förses med ett lager av tjärepxi. För att korrosionsskyddet inne i röret inte skadas vid fyllningen med sten kan stenen fyllas genom ett rör - ungefär som när man gjuter betong under vatten.

Värmen runt foderröret kommer att konsolidera leran och förmodligen torka och bilda ett tätt skikt. Eventuella skikt av friktionsjord kommer att sättas igen av omrörningen av leran vid neddrivningen av foderröret. En svårighet här är att kunna garantera foderrörets stabilitet under mycket lång tid. Det kräver att man känner lerans egenskaper och kan förutsäga hur det kommer att bete sig för höga temperaturer.

När brunnen belastas fördelas lasten via stenskelettet till röret där de tas upp som ringspänningar, se fig. 5.2.2. Vid spänningsjämvikt gäller:

$$\sigma_h \cdot D = \sigma_r \cdot t$$

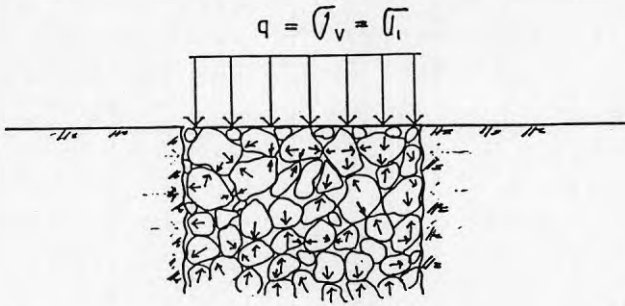
σ_h = den horisontala spänningskomponenten

D = rörets diameter

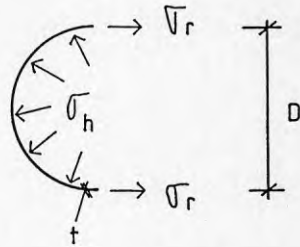
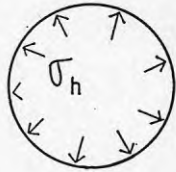
σ_r = ringspänningen i plåtmaterialet

t = plåttockleken

Om $\sigma_r = 173 \text{ N/mm}^2$ fås för D = 2.6 m och t = 4 mm, $\sigma_h = 0.266 \text{ MPa}$ och för D = 2.4 och t = 3.7 mm, $\sigma_h = 0.267 \text{ MPa}$.



$$\sigma_h \cdot D = \sigma_r \cdot t$$



5.2.2 Den vertikala lasten överförs via friktion mellan stenarna till plåtmaterialet där den upptas som ringspänningar. Friktionsvinkeln för sprängsten antas till 42° .

Förhållandet mellan den vertikala (σ_1) och horisontella (σ_3) spänningen i fyllningen beror på stenmaterialets friktionsvinkel ϕ' och ges av formeln:

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \cdot \sigma_3 \quad (5.2.2)$$

$$\sigma_3 = \sigma_h$$

Den inre friktionsvinkeln för sprängsten är mellan $40-45^\circ$ (Handboken Bygg).

Den största påkänningen blir mot det undre röret. Med korrektion för invändig vattentryck, egenvikt av sten och utvändig vilojordtryck fås:

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \left[\sigma_3 - \sigma_w \cdot h \cdot g - (\gamma_{sten} - \gamma_w) \cdot h \cdot g + K_o \cdot \sigma_1^{lera} \right]$$

γ_w = vattnets densitet

γ_{sten} = stenens densitet cirka 1.6 ton/m^3

h = höjden = 10 m

K_o = vilojordstryck koefficienten cirka 0.5

$$\sigma_1^{lera} = \gamma_{lera} \cdot h \cdot g \approx 1.6 \cdot 10 \cdot 10 = 160 \text{ kPa}$$

$$\sigma_1 \approx 0.94 \text{ MPa}$$

Det motsvarar en vertikal last på 4260 kN.

Som nämndes i avsnitt 5.1 uppstår sättningar runt röret vilket innebär påhängskrafter.

Påhängskraften mot det övre röret kan elimineras genom ett plastskikt mellan bentonit/sand och leran. Det är då rimligt att antaga påhängskrafter endast mot det undre röret.

Påhängskraften P_p blir ungefär $0.6 \tau_{fu} \cdot$ Mantelytan

Eftersom belastningen sker långsamt blir skjuvspänningen i leran lägre än den odränerade skjuvhållsfastheten τ_{fu} som här sätts till 30 kPa.

$$P_p \approx 678 \text{ kN}$$

Röret med stenfyllning kan alltså ta en nyttig last på $4260 - 678 = 3580$ kN. Det motsvarar ungefär den tillåtna belastningen på en ordinär grävpåle, eller 6 st 60 tons betongpålar.

En stenfylld brunn har alltså en betydande lastupptagande förmåga.

5.3 Flytande brunnar i jord

Påhängslasten som uppstår från sättningarna runt brunnen gör att brunnarna inte kan utföras svävande i leran utan att utsättas för sättningar.

En vattenfylld brunn är ca. 290 kN lättare än motsvarande lervolym. Enligt föregående avsnitt kan påhängskraften bli cirka 680 kN, d.v.s den resulterande belastningen blir 390 kN, med sättningar som trolig följd.

5.4 Brunnar i friktionsjordar

Värmeförlusterna i friktionsjord ökar av två skäl. Det ena är att värmekonduktiviteten är högre än för lera. Dessutom ökar förlusterna p.g.a vattenkonvektion runt brunnen. Vattenkonvektionen kan uppstå p.g.a värmegradienten mellan brunnen och omgivande jord.

Om foderröret inte utförs vattentätt måste lagrets överyta placeras vid grundvattenytan.

Schaktning måste ske under vatten.

Det är möjligt att genom injektering täta jorden runt brunnen. Det utgör emellertid en fördyring som inte kan bortses. Brunnar i friktionsjord bedöms därför inte kunna användas som värmelager utan värmeisolering av mantelytan och ett tätt foderrör.

6. TILLÄMPNING

6.1 Allmänna tillämpningar

Grävbrunnar i lera kan ur funktionssynpunkt närmast motsvara trycklösa vattentankar för dygns- och i vissa fall veckolagring. Brunnarna kan utgöra alternativ till vattentankar där man inte kan eller vill ha synliga vattentankar exempelvis i gruppbebyggelse och vissa industriområden. Andra alternativ kan vara att projektera vattenfyllda brunnar under sporthallar, garage och lätta industribyggnader - om detta görs i projekteringsstadiet så att man kan ta hänsyn till sättningsarna runt lagret.

Den sprängstensfyllda brunnen kan enbart bli aktuell i kombinationen grundläggningselement och värmelager. Det gör att applikationer till befintliga system inte blir aktuella.

I motsats till många andra lagertyper sjunker inte byggnadskostnaden drastiskt med ökande volym, se vidare kap 7. Det gör att volymen begränsas från ett 10-tal m³ till ett par hundra kubikmeter. Å andra sidan kan lagret succesivt byggas ut om behovet skulle uppstå.

Ekonomi och systemtillämpningar för små lager har utförligt utretts av Margen (1986).

7. KOSTNADER

7.1 Grundkostnad för vattenfyllda brunnar

De höga kostnaderna för foderrör som måste användas till varje brunn gör att kostnadsminskningen med ökande volym blir måttlig. Urgrävningskostnaden minskar inte heller radikalt med ökande volym. Vid större volymer måste man även räkna med ökade kostnader för geotekniska undersökningar.

Tabell 7.1.1 och 7.1.2 specificerar kostnaderna. Tabellerna innefattar inte överbyggnaden ovanför lagret som t.ex. kan bestå av bärlager och asfalt. Dessa kostnader bör istället belasta den verksamhet som nyttjar lagrets överyta exempelvis en parkeringsplats.

Grundkostnaden för vattenfyllda brunnar blir något högre än för trycklösa stålcisterner. Det förutsätts här att brunnarna kan hållas helt vattenfyllda för att man inte ska behöva värmeväxlare.

 TABELL 7.1.1 Byggnadskostnad för en vattenfylld
 brunn i lera, $V = 49 \text{ m}^3$

Etablering och avveckling	10.000
Grävning för rör till 6 m, 37 m^3 a 100 kr/ m^3 inkl. borttransport av massor	4.200
Grävning från 6 till 10 m inklu- sive rörsättning. 21 m^3 a 400 kr/ m^3	9.000
Rör $D=2.6 \text{ m}$, $l=5 \text{ m}$ a 2900 kr/m	17.400
Rör $D=2.4 \text{ m}$, $l=4 \text{ m}$ a 2500 kr/m	12.500
Kringfyllning av övre rör med lera, bentonit/sand. 5 m^3 a 400 kr/ m^3	2.000
Plåtlock 750 kr/ m^2	4.000
Lerlager, geomatta och kapillär- brytande skikt ovanför topplåt 20 m^2 a 200 kr/ m^2	3.000
Isolering 0.3 m a 1000 kr/ m^3 ca. 1.5 m utanför lagret	7.500
Geoteknisk undersökning	12.000
Vattenfördelning i lagret	4.000

SUMMA	83.000
Rörsystem + pump (25%)	20.800
Projektering + administration 10%	9.100

SUMMA TOTALT	112.900
Kostnad/m^3	2.300 kr

 TABELL 7.1.2 Grundkostnad för 3 brunnar, $V=147 \text{ m}^3$

Etablering	10.000
Grävning för $D=2.6 \text{ m}$ rör inkl. bort- transport av massor, 110 m^3 100 kr/m^3	11.000
Grävning för $D=2.4 \text{ m}$ rör 68 m^3 400 kr/m^3	25.200
Rör $D=2.6 \text{ m}$, 18 m 2900 kr/m	52.200
Rör $D=2.4 \text{ m}$, 15 m a 2500 kr/m	30.000
Kringfyllnad med lera, bentonit/sand	6.000
Plåtlock	12.000
Lerlager, geomatta och kapillärbrytande skikt, 50 m^2 a 200 kr/m^2	10.000
Isolering $t=0.3 \text{ m}$ a 1000 kr/m^3	15.000
Geoteknisk undersökning	16.000
Rör inne i lagret	12.000
SUMMA	----- 199.400
Rörssystem + pump 25%	49.900
Projekt + administration 11%	22.000
SUMMA TOTALT	----- 308.700
Kostnad/ m^3	1.845

7.2 Kostnader för olika foderrör

Foderrören kan i princip utgöras förutom av "vägtrummetyp" även av släta stålrör, betongrör och rostfria rör. Kostnaden för de olika typerna framgår av Tab. 7.2.

TABELL 7.2 Kostnad för olika rörtyper

RYDAB vägtrummerör: genomsnittlig kostnad för diam. 2,6 m och 2,4 m	2.750 kr/m
Stålrör, diam. 2,5 m, plåttjocklek 3,7 mm	5.000 kr/m
Rostfria rör plåttjocklek 3 mm	11.000 kr/m
Betongrör, sk genomtryckningsrör	7.300 kr/m

7.3 Kostnad för vattenfylld brunn som grundläggningselement och värmelager

Stenfyllda brunnar kan bara bli aktuella i kombinationen värmelager och grundläggningselement.

Kostnaden för en stenfylld brunn ges i Tab. 7.3.1.

 TABELL 7.3.1. GRUNDKOSTNAD FÖR EN STENFYLLD BRUNN
 V = 49 m³.

Etablering	10.000 kr
Grävning	12.100 kr
Extra rensning i botten	1.000 kr
Rör (vägtrummor)	27.400 kr
Extra korrosionsskydd	3.000 kr
Makadam 150 kr/m ³	7.400 kr
Laddnings rör (ingen dysa behövs)	2.400 kr
Avjämning och försegling av stenyta 200 kr/m ²	1.000 kr
Plastfolie 10 kr/m ²	300 kr
Lättklinker 100 kr/m ³ x 0.2 m x 25 m ²	5.000 kr
X-betong isolering, 12 m ² a 600 kr/m ²	7.350 kr
Geoteknisk undersökning	10.000 kr
SUMMA	92.000 kr
Rörssystem + pump (25%)	21.700 kr
Projektering + adm. 11%	9.600 kr
SUMMA TOTALT	118.250 kr
Kostnad / m ³ = 2.400 kr	
=====	

Om lagret kan ersätta en grävpåle värt 2000 kr/m så minskar kostnaden med 20.000 kr till cirka 2.000 kr/m³, utan värmväxlare och till 3.200 kr/m³ med värmväxlare.

Om lagret antas ersätta dagel med nattel kan merparten av värmeförlusterna bli kompenserade med nattel. Här antas att förlusterna kompenseras mellan natt- och dagel med förhållandet 7:1.

Dagel kostar idag i Västsverige 45 öre

Natt- och sommarel 23 öre

Priserna inkluderar 5 öre i skatt.

Medelpriset för el till lagerförluster blir 25.8 öre.

Under sommartid då lagret inte är i drift antas lagertemperaturen sjunka och hålla en medeltemperatur på + 20°C under ca. 5110 h. Under den tid som lagret används är lagertemperaturen +72.5°C. Förlusterna ur lagret är direkt proportionella mot den genomsnittliga lagertemperaturen.

Under de första åren bedöms värmeförlusterna bli 3.5, 6.5 och 8.5 kW för 1, 3 och 7 brunnar. Jämför fig. 4.1.2 och Tab. 4.1.

Värdet av värmeförlusten ur en brunn blir:

$$3.5 \text{ kW} (3.650 \times 0.258 \text{ kr} + 5.110 \times 0.23 \text{ kr} \times 20/72.5^{\circ}\text{C}) = 4.430 \text{ kr}$$

Tabell 7.4 visar kostnaden per volymenhet.

TABELL 7.4 TYPISKA ÅRSKOSTNADER FÖR VÄRMEFÖRLUSTER

antal brunnar	1	3	7
Värmeförlust kW	3.5	6.5	8.5
Kr/år	4.400	8.200	10.080
Kr/m ³	100	70	40

7.5 Specifika kostnader

I Tab. 7.5 ges specifika kostnader vid dygnslagring för olika alternativ. Beräkningen tar hänsyn till lagring i omgivande jord. Kostnaden innefattar rör-system och kostnader för värmeförluster liksom projektering och administration. För lagringskapaciteter se tabell 4.3.1.

TABELL 7.5 SPECIFIKA KOSTNADER KR/kWh

	Vattenfyllda	Stenfyllda	
		utan VVX	med VVX
1 brunn	44	48	74
3 brunnar	35	(ej aktuellt)	

Kostnaden minskar sedan med antalet lagringscykler.

7.6 Jämförelse med andra lagertyper

I fig. 7.6.1 visas en kostnadsjämförelse per volyms-

Kostnaden för brunnarna kan antas vara ungefär lika som för stältankarna. En viss osäkerhet råder här med tanke på kostnadsberäkningen för brunnarna inte kan vara lika exakt som för stältankarna, och med tanke på ev. prisförändringar för stältankar.

Av tabell 7.5 framgick att den specifika kostnaden för stenfyllda brunnar är ca. 8% högre än för vattenfyllda även om man räknar av värdet för brunnen då det ersätter en grävpåle.

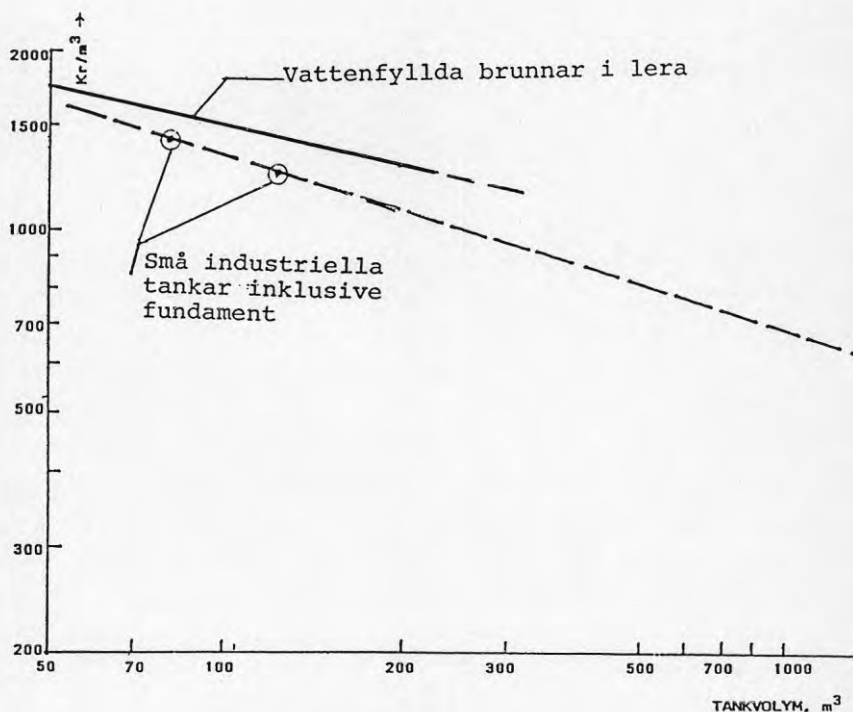


Fig.7.6.1 Jämförelse av kostnader för vattenfyllda brunnar och stältankar. Kostnaderna är exklusive pumpar och rör. Kostnaderna för stältankar är efter P. Margen, (1986) och utan korrigerig för prisindex.

8. SLUTSATSER

Vid dygnslagring är värmeförlusterna acceptabla om lagrets topp isoleras 1 m utanför lagret. Ur funktionssynpunkt kan brunnarna närmast motsvara ståltankar. Funktionen ur termohydraulisk synpunkt är för stenfyllda lager prövad för volymen 20 m^3 . I dessa försök användes sprängsten med varierande storlek. I brunnarna kan man använda makadam vilket är gynnsammare eftersom porositeten blir större.

Stenfyllda brunnar kan bara bli aktuella om de kan kombineras som grundläggningselement. En förutsättning är att man kan garantera att foderröret inte korroderar i sådan omfattning att stenen pressas ut i leran.

Vattenfyllda brunnar kan placeras intill varandra och lagret kan succesivt byggas ut. Kostnaden för brunnarna minskar måttligt med ökande volym varför brunnarna endast kan konkurrera med ståltankar för mindre volymer, $50-150 \text{ m}^3$.

Vinsten med att få ett dolt lager under markytan är svår att värdesätta. Om lagret placeras i ett industriområde kan det utgå olika subventioner för tomtmarken från kommunerna. Det finns dock en klar fördel ur arkitektonisk synpunkt med att placera lagret under mark.

En begränsning med brunnar i jord är att de måste placeras i en lera eller tät silt. Liksom vid alla typer av markförlagda lager gäller att den lämpliga marken måste finnas nära det värmesystem som utnyttjar lagret, för att ledningskostnaderna inte skall bli för höga.

De höga temperaturer som krävs för korttidslagring gör att lerans uppförande i närområdet behöver undersökas ytterligare.

Isoleringen av lagrets topp är inte prövad. Användning av X-betong kan vara en intressant lösning även för andra typer av lager exempelvis groplager.

Förslaget med värmelagring i brunnar innefattar flera osäkerheter inom olika områden. För att komma vidare krävs försök i full skala. Trots att kostnadsbildningen är hög kan det vara väl motiverat att utföra försök bl.a. med tanke på att man vinner erfarenheter som har tillämpningar för andra lagertyper i jord.

REFERENSER

- Bogdanoff, 1981,
Blockfyllda berggrum för värmelagring. Värmespridning
i lagret. Befo Nr 61:1/81. Stiftelsen Bergteknisk
forskning.
- Claesson, m.fl., 1985,
Markvärme en handbok om termiska analyser.
- Handboken Bygg del II, Geoteknik
- Margen, p, 1986,
Ekonomi för energilagring i mindre system BFR,
R3:1986
- Holm, T, 1987
Värmetekniska beräkningar avseende korttidslagring av
värme i sprängstensfyllda grävbrunnar. Geologiska
institutionen CHALMERS TEKN. HÖGSKOLA /opublicerad
stencil.
- Adolfsson, K, 1987
Värmelagring i brunnar i NOL /opublicerad stencil.
- Berge, Olav
Personlig kommunikation avseende X-betong.
- Jendeby, Leif
Personlig kommunikation.

KORRUGERING

Styrkan i ett spiralfalsat rör är beroende på korrugeringen. Med sinuskorruering får man den största hållfastheten att klara läggningen på ojämn mark, stå emot tunga trafikklaster, kraftig tjällossning etc.

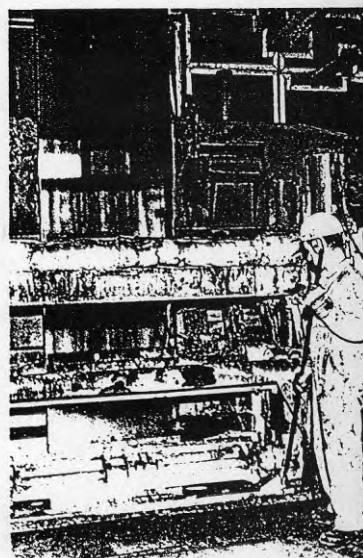
RYDAB:s trummor är korrugerade
68 x 13 mm alt. 100 x 20 mm



FALS

Falsen är utförd enl. "Fyrveckstyp", med dubbel låsning, vilket innebär att plåten är fyrdubblad i falsen och låst i sitt läge. Detta ger god täthet, samt styvhet och styrka hos röret.

Den skall ta upp de dragkrafter som uppkommer genom sättningar i marken och vid hantering av trummor.



KORROSIONSSKYDD

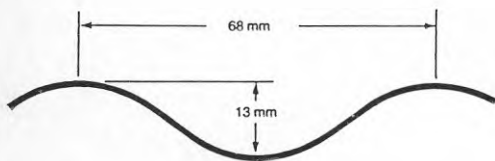
Varmförzinkningen utföres direkt vid stålverket, enl. sendzimimetoden ASTM-A-525, med marknadens bästa zinksikt Zn 640 gr/m² (motsv. ca 46 my/sida)

alt. Zn 840 gr/m² (motsv. ca 60 my/sida).

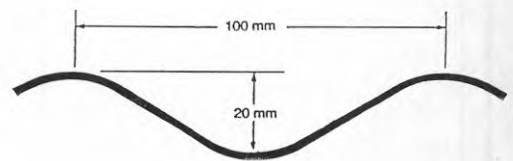
Om extra korrosionsskydd erfordras kan plastisol eller epoxybeläggning levereras.

RYDAB:s vägtrummor är tillverkade och godkända enligt Statens Vägverk:s byggnadstekniska krav och anvisningar BYA-84 tabell 10:05-2, 10:05-7 och enligt Skogsstyrelsen D nr: 307/83.

Den nya trumtyp D2 (motsv. trumtyp A) enl. BYA -84 är en godkänd vägtrumma för läggning genom alla vägar, dock med en viss begränsning för fordonsmängd (ÅDT).


D1
Trumtyp D1

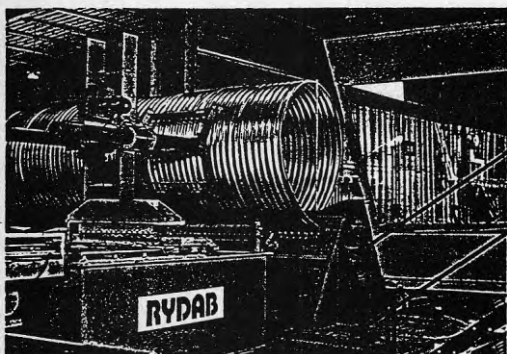
Korrugering: 68 x 13 mm
Korrosionsskydd: Zn 640 gr/m²


D2
Trumtyp D2

Korrugering: 100 x 20 mm
Korrosionsskydd: Zn 840 gr/m²

PLÅTTJOCKLEK

Area m ²	Dimension mm	D1	D2	D2
		Statens Vägverk Skogsstyrelsen	Statens Vägverk	Skogs- styrelsen
0,07	Ø 300	1,50 mm		
0,13	Ø 400	1,50 mm		
0,20	Ø 500	1,90 mm	1,90 mm	1,90 mm
0,28	Ø 600	1,90 mm	1,90 mm	1,90 mm
0,50	Ø 800	2,00 mm	1,90 mm	1,90 mm
0,78	Ø 1000	2,30 mm	2,20 mm	2,20 mm
1,13	Ø 1200	2,60 mm	2,50 mm	2,50 mm
1,54	Ø 1400	3,00 mm	2,70 mm	2,70 mm
2,01	Ø 1600		3,00 mm	2,70 mm
2,55	Ø 1800		3,20 mm	3,00 mm
3,14	Ø 2000		3,50 mm	3,20 mm
3,80	Ø 2200			3,50 mm
4,52	Ø 2400			3,70 mm
5,31	Ø 2600			4,00 mm



TILLVERKNING

De spiralfalsade rören framställs i vår nya specialmaskin, som är marknadens största.

Utgångsmaterialet är varmförzinkad plåt enl. sendzimimetoden.

Rören kan tillverkas i önskad längd mellan 3,0 – 14,0 meter.

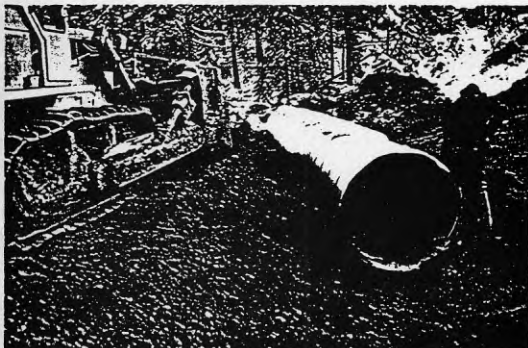
RYDAB är den första tillverkare, och hittills enda, som erhållit godkännande av SBS (Svensk Byggstälkontroll).

Produktionen står även under kontroll av SBS.



TRANSPORT

Leverans sker direkt från vår fabrik eller från någon av Fosselius & Alpens många lagerplatser. Med bil eller järnväg, för säkra transporter direkt till leveransplatsen.



LÄGGNING

Då trummorna tillverkas färdiga i hela längder är de lätta att hantera och lägga, vilket ger en låg to-talkostnad.

**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 860131-1
från Statens råd för byggnadsforskning till Hagconsult AB,
Göteborg.**

R82: 1988

ISBN 91-540-4925-3

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6708082

**Abonnemangsgrupp:
Ingår ej i abonnemang**

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

Cirkapris: 36 kr exkl moms