

**Rapport**

**R84:1982**

**Friktionsfixerad  
fjärrvärmeledning**

**Fältmätningar i Lund**

**Dan Olofsson  
Jan Molin  
Kurt Bergendorff**

INSTITUTET FÖR  
BYGGDOKUMENTATION

Accnr

Plac *ser*

*K  
Mol*

**Byggforskningsrådet**

R84:1982

FRIKTIONSFIXERAD FJÄRRÄRMELEDNING  
Fältmätningar i Lund

Kurt Bergendorff  
Rolf Jönsson  
Jan Molin  
Dan Olofsson

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag  
780633-3 från Statens råd för byggnadsforskning  
samt projektanslag E26 från Stiftelsen för värme-  
teknisk forskning till VBB AB, Malmö.

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

R84:1982

ISBN 91-540-3747-6

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

LiberTryck Stockholm 1982

## INNEHÅLL

SAMMANFATTNING .....	5
1. PROJEKTBEKRIVNING .....	9
1.1 Syfte .....	9
1.2 Bakgrund .....	9
1.3 Mätningar .....	11
2. FRIKTIONSFIXERADE OCH FRIKTIONSHÄMMADE LEDNINGSSYSTEM .....	13
3. FÖRVÄRMNING .....	17
3.1 Syftet med förvärmning .....	17
3.2 Friktionskoefficient och påkänningar under förvärmning .....	18
4. DRIFTSSKEDE .....	27
4.1 Rörelser - friktionskoefficient .....	27
4.2 Spänningar - raka ledningssträckor .....	36
5. SMÅ AVVINKLINGAR .....	41
6. SCHAKTNINGSRESTRIKTIONER .....	45
6.1 Schaktning under fjärrvärmeledningar ...	45
6.2 Schaktning parallellt med rak fjärrvärmeledning .....	47
6.3 Schaktning invid avvinklingar .....	49
Bilaga 1	Uppmätta axiella rörelser
Bilaga 2	Beräknad fördelning av axial- spänningar längs friktionssträckan vid kammare 1
Bilaga 3	Töjningsmätningar
Bilaga 4	Sidorörelser vid avvinkling på 4,5°
Textplansch 1	Mätanordningar m m längs lednings- sträckan
Textplansch 2	Framledningstemperatur 1979-1982



## SAMMANFATTNING

I projektet har - genom mätningar av rörelser, temperaturer, spänningar m m - en kontroll i full skala erhållits över funktionen hos en lång friktionsfixerad fjärrvärmeledning av stor dimension.

Mätningarna har under tre år utförts på en 1,7 km lång friktionsfixerad DN 600-ledning i Lund.

Generellt kan sägas att inga resultat har framkommit som tyder på att de förläggningsmetoder som här diskuteras skulle vara olämpliga. Dock erfordras - framförallt vid större ledningsprojekt - ett hänsynstagande under såväl projektering, byggande som drift till de frågeställningar och resultat som presenteras i denna rapport.

Följande avsnitt behandlas:

### Friktionshämmande och friktionsfixerad förläggning

De principiella skillnaderna mellan friktionsfixerad och friktionshämmande förläggning redovisas.

### Förvärmning

Vid förvärmning uppstår axiella spänningar på grund av friktion mellan den friliggande ledningen och ledningsbädden.

En beräkningsmodell härför behandlas. De utförda rörelsemätningarna visar att friktionskoefficienten  $\mu_e = 0,3$  är ett rimligt dimensioneringsvärde för bestämning av maximala påkänningar vid förvärmning. Vid rörelseberäkningar kan  $\mu_e = 0,2$  användas eftersom detta värde är ett ungefärligt genomsnittsvärde av mätresultaten.

För större ledningsprojekt rekommenderas att beräkningar görs enligt de principer som redovisas i denna rapport för bestämning av maximal förvärmningslängd.

### Driftsskede - friktionskoefficient

Även här redovisas en beräkningsmodell som innebär att rörelsen vid en fri ände som funktion av temperaturen kan beskrivas av en "cigarr" som omsluter de maximala rörelserna. Vid en viss temperatur kan rörelsen vara såväl positiv som negativ i förhållande till ursprungsläget efter förvärmning beroende på temperaturhistorien.

Genomförda mätningar har givit en lägsta friktionskoefficient på  $\mu = 0,29$  under de första driftsmånaderna. Första vintern gav  $\mu = 0,21$  som lägsta friktionskoefficient medan  $\mu = 0,19$  erhöles som lägsta värde under hela mätperioden.

Rörelserna har således inte ökat i någon nämnvärd omfattning sedan första vintern, varför det är vår bedömning att  $\mu = 0,15$  kan ses som ett rimligt undre gränsvärde för friktionsfixerade ledningssystem. Detta värde kan således nyttjas för bestämning av maximala rörelser.

Beträffande friktionshämmande ledningssystem rekommenderas att  $\mu = 0$  används vid rörelseberäkning. Vid bestämning av största tillåtna friktionslängd är maximal friktionskoefficient av intresse. Nuvarande praxis med  $\mu = 0,4-0,45$  synes vara rimlig, såvida inte konstruktionsdelar används som är känsliga för stora axiella krafter (ex dimensionsövergångar). I sådana fall bör  $\mu = 0,6$  nyttjas.

#### Driftsskede - axiella spänningar

Mätningarna har visat att maximal spänning för raka ledningssträckor uppstår längs den fixerade delen. Beräkning kan här göras under antagande att ledningen är fast inspänd.

Längs den rörliga delen av en ledningssträcka kan såväl tryck- som dragspänningar uppstå vid en viss temperatur beroende på temperaturhistorien (jfr "cigarren" vid rörelseberäkning). Spänningarna längs den rörliga delen av ledningssträckan är alltid lägre än maximal spänning längs den fixerade delen.

#### Små avvinklingar

Sidorörelser har mätts vid en avvinkling på  $4,5^\circ$  längs den fixerade delen av ledningssträckan. Sidorörelserna har varierat mellan ca +6 mm och -2 mm.

Beräkningar har gjorts med en beräkningsmodell där ledningen omges av elastiska fjädrar. Uppmätta rörelser motsvarar fjäderkonstanten  $k = \frac{2}{D} \frac{PEH}{y} \text{ N/mm}^3$  i fast lagrad jord.

Avvinklingar medför en viss ökning av påkänningarna i stålroret.

Vår bedömning är att för dimensioner upp till DN 300-400 mm 5° avvinkling kan nyttjas utan komplikationer. Vid större dimensioner bör särskilda beräkningar utföras i enskilda projekt.

#### Schaktningsrestriktioner

De stora axialkrafterna som finns i ledningssystem med direktskummade fjärrvärmekulvertar medför risk för utknäckning m m om schaktning görs för nära ledningen.

Rekommendationer ges för schaktning under och parallellt med en direktskummad rak fjärrvärmeledning samt i anslutning till små avvinklingar.





## 1. PROJEKTBEKRIVNING

### 1.1 Syfte

I projektet studeras genom mätningar av rörelser, temperaturer, spänningar mm funktionen i full skala hos en lång friktionsfixerad fjärrvärmeledning av stor dimension.

Projektet syftar till att ge ett förbättrat underlag för projektering och byggande av långa friktionsfixerade fjärrvärmeledningar. Därtill belyses behovet av restriktioner beträffande framtida schaktningsarbeten nära ledningen.

### 1.2 Bakgrund

För snart 20 år sedan introducerades i Sverige sk direktskummade fjärrvärmekulvertar med mediarör av stål, isolering av direktapplicerat polyuretanskum samt mantelrör av polyeten PEH, se Fig 1.1. Uttrycket direktskummad syftar på att skumning skett direkt mot stålroret och ej mot ett särskilt hålrör. Genom denna teknik erhålls direkt förbindning mellan mediarör och mantelrör och krafter kan överföras mellan de båda rören.

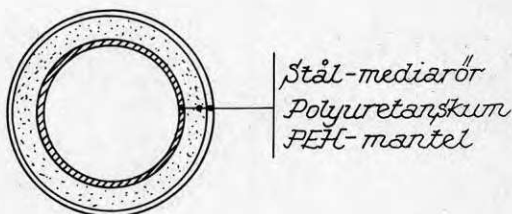


Fig 1.1 Direktskummad fjärrvärmekulvert

Den direktskummade kulverten svarar i dag för den helt dominerande delen av den svenska kulvertmarknaden.

Två typer av förläggningssätt kan användas för direktskummad fjärrvärmekulvert. Dessa betecknas friktionsfixerad respektive friktionshämmad förläggning och beskrivs närmare i kap 2.

Tekniken med att i mark direkt förlägga en kulvert där friktions- och skjuvkrifter kan överföras mellan omgivande kringfyllning och stålrör har utvecklats för mindre dimensioner. Under senare år har det funnits en tendens att extrapolera tekniken från mindre dimensioner till större dimensioner ( $\geq$  DN 300). Problemställningar som för mindre dimensioner normalt kan försummas kräver emellertid en speciell uppmärksamhet för stora dimensioner.

Under andra halvåret 1978 påbörjade Lunds Tekniska Verk bygnadsarbetena för Huvudledning 2 mellan Vårbruksvägen och Öresundsvägen, se Fig 1.2. Ledningen har projekterats (VBB) och byggts (ABV - NVS) som en friktionsfixerad fjärrvärmekulvert (fabr Pan Isovit). Den friktionsfixerade ledningssträckan är 1,7 km och dimensionen är DN 600 (stålrör 609,6 x 6,3 mm,  $D_y^{PEH} = 800$  mm).

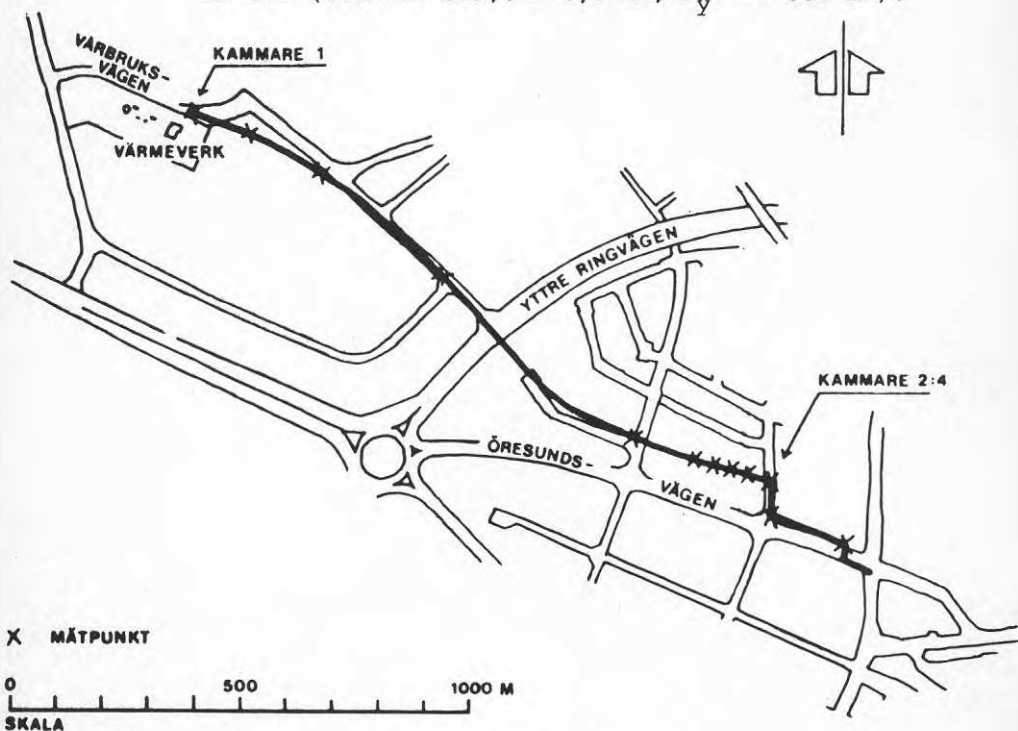


Fig 1.2 Sträckning av huvudledning 2 i Lund

Denna huvudledning utgör således studieobjekt i detta projekt vars syfte är att erhålla en kontroll av funktionen hos en lång friktionsfixerad ledning med stor dimension.

Projektet har gemensamt genomförts av Lunds Tekniska Verk och VBB i Malmö. Anslag har erhållits från BFR och Stiftelsen för värmeteknisk forskning.

### 1.3 Mätningar

I projektet har rörelser, töjningar, temperaturer och invändiga tryck mätts.

På textplansch 1 redovisas en översikt över de olika mätpunkterna.

Mätpunkter belägna i kammare eller i speciellt utplacerade mätbrunnar har nyttjats såväl under förvärmnings- som under driftsskedet. Övriga mätpunkter utgörs av stålramar som placerats över ledningen för att följa upp rörelserna under förvärmningen. Dessa har av naturliga skäl inte använts under driftsskedet.

Vid vissa mätpunkter har ett större antal (60-tal) mätningar gjorts under olika skeden. Vid andra mätpunkter kan det röra sig om ett 20-tal mätningar. De första mätningarna gjordes i november 1978 och de sista utfördes i oktober 1981.

På textplansch 2 redovisas utgående vattentemperatur i framledningen som registrerats i värmeverket kl 8.00 varje dag. Temperaturen har också mätts i de olika kamrarna vid respektive mätfällor.

Mätresultaten redovisas och kommenteras i de följande avsnitten.

Dessförinnan kan det finnas anledning att informera om hur ledningen byggts.

Ledningssträckan längs etapp 1, se textplansch 1, svetsades samman på sedvanligt sätt varefter ändarna bottnades. Därefter provtrycktes ledningen med 21 bars invändigt tryck, varefter ledningen kringfylldes vid några punkter för att styra rörelserna under förvärmningen. Bl a utfördes en fixåterfyllning mitt på ledningssträckan för etapp 1, dvs vid mätpunkt 4 enligt textplansch 1. Nästa moment var att höja temperaturen till drygt 40°C för att därmed få bättre förutsättningar för skumning av skarvar. Efter skumningen sänktes åter temperaturen till ca 10°C.

Förvärmningen innebar att temperaturen successivt under ett par dygn höjdes till 83°C, varefter temperaturen sänktes till 78°C. Avsikten med att höja temperaturen till 83°C för att därefter sänka den till 78°C var att i viss mån reducera spänningarna av friktionskrafter som uppstår på grund av ledningens egenvikt. Temperaturen 78°C bibehölls tills hela etappen var återfylld.

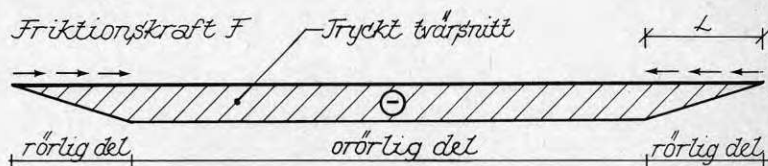
När ledningssträckan i etapp 2 var provtryckt och skarvarna skummats enligt samma förfarande som ovan, sänktes temperaturen i de båda etapperna (delvis tömning). Därefter svetsades de två rörändarna tillhörande de båda etapperna ihop. Ledningen var i detta skick helt återfylld längs etapp 1 och låg fritt i rörgraven längs etapp 2.

Förvärmningen av etapp 2 utfördes på samma sätt som vid etapp 1. Skillnaden var dock att den återfyllda ledningen längs etapp 1 fungerade som fix.

Samma förfarande som för etapp 2 tillämpades för etapp 3 och 4.

## 2. FRIKTIONSFIXERADE OCH FRIKTIONSHÄMMADE LEDNINGSSYSTEM

Utgångspunkten är en lång rak direktskummad fjärrvärmeledning med en expansionsanordning (lyra, slag eller kompensator) i respektive ände. Om temperaturen höjs rör sig ledningen ut mot respektive ände. Därmed uppstår också friktionskrafter längs den rörliga delen av ledningen.



Dessa friktionskrafter medför tryckspänningar i stålröret, som på avståndet  $L$  från respektive ände är så stora att ledningen blir fast inspänd.

Friktionskraften  $F$  kan beräknas enligt

$$F = \rho \cdot g \cdot H \cdot \pi \cdot D \cdot \mu = F_0 \cdot \mu \quad (1.1)$$

där  $F$  friktionskraft N/m  
 $\rho$  fyllningens densitet ( $\sim 1800 \text{ kg/m}^3$ )  
 $g$  tyngdaccelerationen ( $\sim 10 \text{ m/s}^2$ )  
 $H$  fyllningshöjd över ledningens hjässa, m  
 $D$  PEH-mantelns ytterdiameter, m  
 $\mu$  friktionskoefficient som definieras av ekv 1.1

$$F_0 = \rho \cdot g \cdot H \cdot \pi \cdot D$$

Ekvationen 1.1 innebär att medeljordtrycket runt ledningen antas vara  $\rho g H \text{ N/m}^2$ .

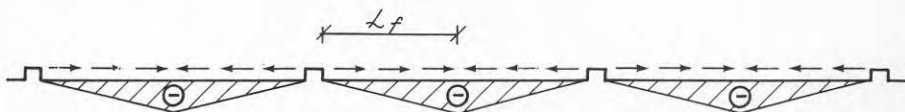
Den axiella kraften i den orörliga delen av ledningen motsvarar den kraft som erhålls vid fast inspänning. Denna kraft är lika stor som summan av friktionskrafterna, dvs

$$\alpha \cdot E \cdot A \cdot \Delta T = F \cdot L \quad (1.2)$$

där  $\alpha$  stålrörets längdutvidgningskoefficient ( $1.2 \cdot 10^{-5}$ )  
 $E$  stålrörets elasticitetsmodul ( $2,1 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$ )  
 $A$  stålrörets tvärsnittsarea ( $\frac{\pi}{4} (D_y^2 - D_i^2)$ )  
 $\Delta T$  temperaturdifferens mellan max drifttemperatur och temperatur vid återfyllningstillfället, °C

Av ekv 1.2 framgår att påkänningarna längs den fixerade delen av ledningen är direkt proportionella mot temperaturdifferensen. Genom förvärmning kan  $\Delta T$  minskas, vanligen till ungefär halva driftvärdet. Därmed begränsas också påkänningarna så att friktionsfixering kan nyttjas även med normalt förekommande stålqualiteter (SIS 1312, 1330). En friktionsfixerad ledningssträcka kan i princip få vara hur lång som helst, vilket är till fördel för anläggningskostnaderna genom att expansionsanordningar ej erfordras.

Vid friktionsfixerad förläggning begränsas således temperaturdifferensen  $\Delta T$  genom förvärmning för att därmed möjliggöra "obegränsade" ledningslängder utan expansionsanordningar. Vid friktionshämmande förläggning är förhållandet det omvända. Avståndet ( $2 \times L_f$ ) mellan två expansionsanordningar begränsas. Därmed kan "obegränsade"<sup>1)</sup> temperaturdifferenser tillåtas.



Om temperaturen höjs från läggningstemperaturen (ex  $10^\circ\text{C}$ ) utbildas successivt friktionskrafterna. Vid exempelvis  $50^\circ\text{C}$  kan friktionskrafterna vara fullt utbildade. Höjs temperaturen ytterligare upp till  $120^\circ\text{C}$  så innebär detta ingen ökning av påkänningarna i ledningen. Dvs det begränsade avståndet ( $2 \times L_f$ ) mellan expansionsanordningarna begränsar också spänningarna till tillåtna värden.

En fördel med friktionshämmande förläggning är att de axiella krafterna är lägre längs större delen av ledningen. Dock bör observeras att den axiella kraften mitt mellan expansionsanordningarna är av samma storlek som vid friktionsfixerad förläggning. En annan fördel är att systemet inte är beroende av friktion eftersom expansionsanordningarna normalt dimensioneras för fri expansion.

1) Andra faktorer såsom polyuretanskummets hållfasthet begränsar den maximala temperaturen till  $120\text{--}130^\circ\text{C}$

$L_f$  vid friktionshämrad förläggning och  $\Delta T$  vid  
friktionsfixerad förläggning bestäms genom beräk-  
ning av jämförelsespänningar som också skall in-  
kludera invändigt tryck (metod 1 i Rörlednings-  
norm 1978).





### 3. FÖRVÄRMNING

#### 3.1 Syftet med förvärmning

Vid friktionsfixerad förläggning är den axiella spänningen i en ledning direkt proportionell mot den temperaturdifferens ledningen är utsatt för.

Den axiella spänningen på grund av temperaturändringar kan beräknas till

$$\sigma_{ax} = E \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (3.1)$$

$\Delta T$  avser här skillnaden mellan dimensionerande driftstemperatur ( $T_{max}$  eller  $T_{min}$ ) och förvärmningstemperatur ( $T_0$ ).

I Figur 3.1 visas skillnaden i spänningsnivå med och utan förvärmning.

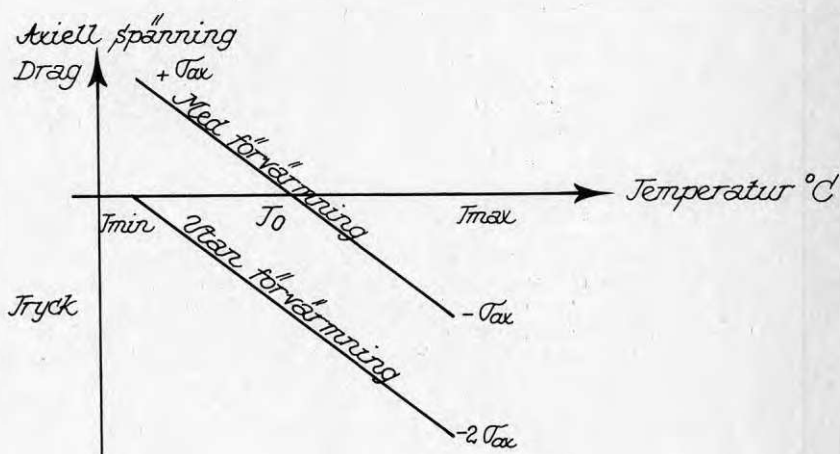


Fig 3.1 Spänningsnivå med och utan förvärmning

Genom förvärmning av en friktionsfixerad ledningssträcka kommer denna att spänningsmässigt arbeta mellan en drag- och en tryckspänning, dvs spänningsnivån är endast hälften av vad som erhålles utan förvärmning.

Med förvärmning reduceras således spänningsnivån. Därmed kan också spänningarna hållas inom de tillåtna gränserna, dvs vi kan förlägga en ledning friktionsfixerad med normalt förekommande stålmaterial och driftstemperaturer.

Förvärmning förekommer ibland också i friktionshämmande system. Motivet är då ofta en önskan att minska spänningsnivån och rörelserna. Detta kan exempelvis vara motiverat då markskivor e dyl nyttjas för expansionsupptagning. Osäkerheten om långtidseffekten hos markskivorna gör att det kan vara en fördel att arbeta med exempelvis rörelsen  $\pm 30$  mm i stället för  $+ 60$  mm.

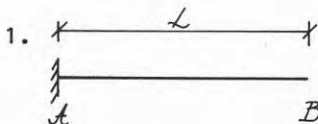
### 3.2 Friktionskoefficient och påkänningar under förvärmning

Ovanstående resonemang har utgått från att ledningen är spänningslös vid förvärmningstemperaturen, jfr ekv. 3.1.

Ledningens expansion under förvärmningen motverkas emellertid av friktionen mellan ledning och underlag. Därmed uppstår också påkänningar i ledningen.

#### Beräkningsmodell

Förvärmning utförs när en ledning ligger fritt i rörgraven. Det kan exempelvis vara frågan om att höja temperaturen i ledningen från en utomhustemperatur på  $10^{\circ}\text{C}$  till en förvärmningstemperatur på  $75^{\circ}\text{C}$  ( $78^{\circ}\text{C}$  för den här aktuella ledningen).



I utgångsläget (1) är ledningen spänningslös.



Om nu temperaturen höjs ett par grader (2) kommer ledningen att röra sig något ute i änden. Därmed uppstår också motverkande friktionskrafter. Större delen av sträckan ligger dock still.

Friktionskraften per meter ledning  $F_e$  är

$$F_e = \mu_e \cdot Q_e \quad (3.2)$$

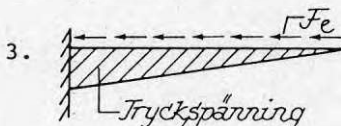
där  $\mu_e$  är friktionskoefficienten mellan ledningsbädd och ledning och  $Q_e$  är egenvikten per meter ledning.

Rörelsen i änden (B) kan beräknas till

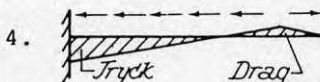
$$\Delta L = \alpha \cdot \Delta T \cdot L - \frac{F_e \cdot x^2}{2 \cdot E \cdot A} - \frac{F_e \cdot x \cdot (L-x)}{E \cdot A} \quad (3.3)$$

Avståndet  $x$  kan beräknas ur

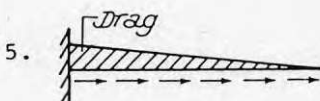
$$F_e \cdot x = E \cdot A \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (3.4)$$



När temperaturen höjts tillräckligt mycket (3) har hela ledningen rört sig. Därmed finns också friktionskrafter längs hela sträckan. Rörelsen kan beräknas med ekv 3.3 genom att sätta  $x=L$



Om nu temperaturen sänks några grader (4) kommer ledningen att dra sig tillbaka något. Därmed uppstår friktionskrafter åt andra riktningen. Sänks temperaturen tillräckligt mycket (5) har hela ledningen dragit sig tillbaka.



I syfte att principiellt visa vad som händer om temperaturen ändras ett flertal gånger redovisas i Figur 3.2 rörelsen  $\Delta L$  i änden som funktion av ett antaget temperaturförlopp.

## Temperaturförlopp

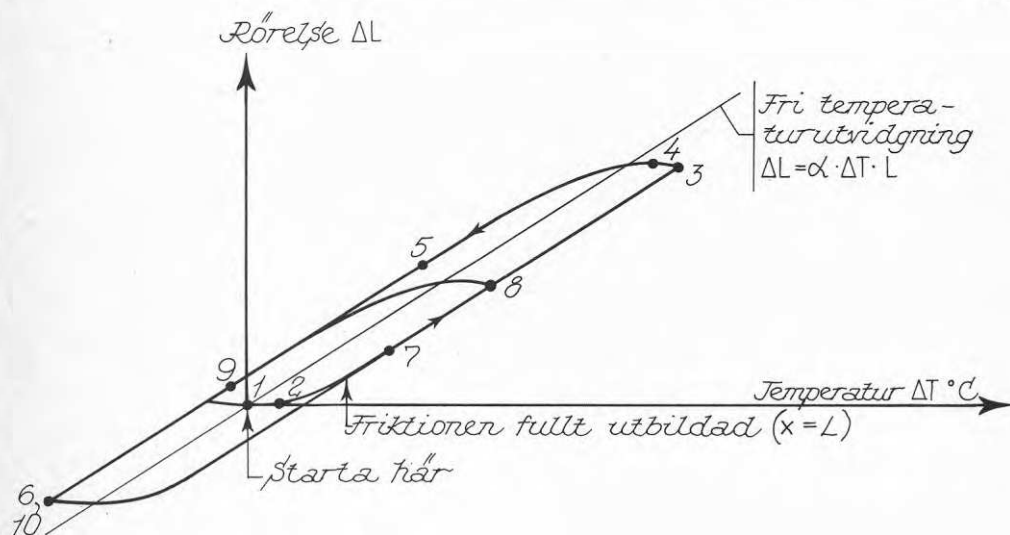
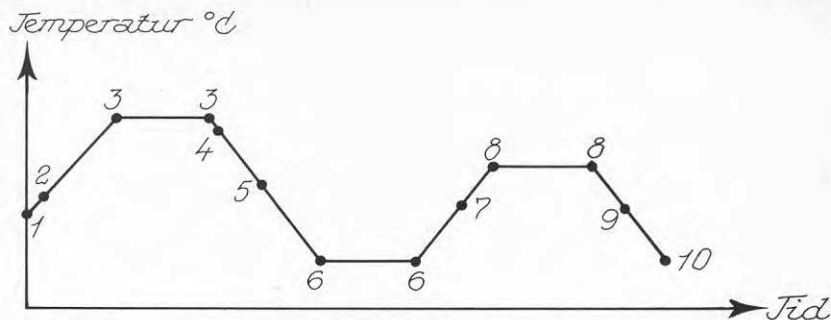


Fig 3.2 Rörelser under förvärmning vid ett antaget temperaturförlopp

Av figuren framgår att i början av förloppet (från pkt 1 till pkt 2) ger temperaturändringar endast små utslag i rörelser. Efter pkt 2 nås en punkt där friktionen är fullt utbildad längs hela ledningssträckan ( $x = L$ ). Därefter rör sig ledningen parallellt med linjen för fri temperatur-expansion.

Invändigt tryck har ej inkluderats i ovanstående beräkningsuttryck. Detta dels på grund av att det invändiga trycket är av mindre betydelse för rörelserna, dels på grund av att framställningen inte i onödan bör kompliceras med för många termer.

### Mätresultat

I bilaga 1 redovisas uppmätta rörelser under förvärmningen. Även driftsskedet redovisas men dessa resultat kommenteras i kap 4.

Temperaturen har höjts två gånger. Första höjningen upp till drygt 40°C utfördes i samband med skumning av skarvar. Några veckor därefter höjdes temperaturen successivt upp till 83°C, varefter temperaturen sänktes till förvärmningstemperaturen 78°C.

Ledningen har legat fritt i rörgraven under detta temperaturförlopp.

Uppmätt rörelse vid mätpunkt 1 framgår av Figur 3.3.

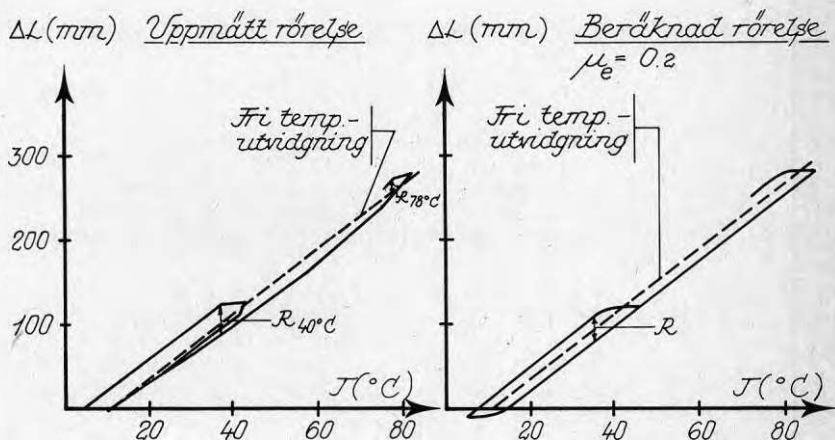


Fig 3.3 Rörelser under förvärmning

R är ett mått på friktionens inverkan, dvs vi får en avvikelse från fri temperaturutvidgning.

Enligt ekv 3.3 kan R<sup>1)</sup> beräknas enligt

$$R = \frac{\mu_e \cdot Q_e L^2}{E A} \quad (3.5)$$

Genom att ur diagrammen i bilaga 1 ta fram R-värden kan också friktionskoefficienten  $\mu$  beräknas enligt ekv 3.5. Resultatet härav framgår av nedanstående tabell.

$$1) R = 2 \cdot \Delta L_{\text{friktion}} = 2 \cdot \frac{F_e \cdot x^2}{2 \cdot E \cdot A}$$

Mätpunkt	Friktionskoefficient $\mu$	
	vid 40°C	vid 78°C
1	0,19	0,16
2	0,17	0,16
3	0,15	-
4	0,21	0,25
5	0,15	-
6	0,15	0,13
7	0,14	0,14
8	0,18	0,13
9	0,17	-
16	0,06	0,10

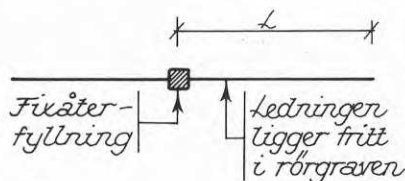
Medelvärde av friktionskoefficienterna är  $\mu_e = 0,16$ .

Dessa värden på friktionskoefficienten för en ledning som ligger fritt i rörgraven ska betraktas som ungefärliga. Det kan mycket väl tänkas att högre koefficienter kortvarigt kan förekomma, dvs vilofriktion ger temporärt högre koefficienter.

Vår bedömning är att  $\mu_e = 0,3$  kan vara ett rimligt dimensioneringsvärde för beräkning av påkänningar i ledningen på grund av friktion och att  $\mu_e = 0,2$  är ett ungefärligt genomsnittsvärde, som kan användas vid rörelseberäkning.

### Diskussion

När en friktionsfixerad ledningssträcka ska byggas, är det av intresse hur lång ledningssträcka som kan förvärmas i en etapp.



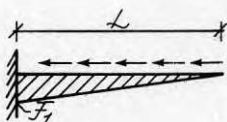
Önskemålet är egentligen att kunna höja temperaturen i ledningen till förvärmningstemperaturen  $T_0$  utan att påkänningar uppstår i ledningen. Är detta möjligt finns ur hållfasthetssynpunkt ingen begränsning för längden L.

Egenvikten medför emellertid att motverkande friktionskrafter uppstår. Längden L begränsas därmed av de påkänningar som uppstår samt av risken för utknäckning.

Olika metoder kan tillgripas för att minska friktionskrafterna. Exempel härpå är att förvärma ledningen med varmluft eller med el. Därmed minskar ledningens egenvikt  $Q_e$ , eftersom den då inte är vattenfylld. Ett annat exempel kan vara att lägga upp ledningen på rullar eller att lyfta ledningen något från underlaget (små dimensioner).

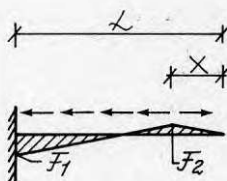
Att värma upp ledningen med varmluft förändrar inte principen för bestämning av  $L$ . Skillnaden är att egenvikten är mindre.

Ett sätt att reducera inverkan av förvärmningen på påkänningarna i färdig ledning är att först höja temperaturen över avsedd förvärmningsnivå och därefter sänka den till denna.



Vid temperaturhöjning till förvärmningstemperaturen  $T$  kan maximal axiell kraft beräknas enligt

$$F_1 = -\mu_e \cdot Q_e \cdot L \quad (3.6)$$



Höjs nu temperaturen några grader  $\Delta T_0$  över förvärmningstemperaturen  $T_0$  för att därefter sänkas till  $T_0$  erhålls följande krafter:

$$F_1 = -\mu_e \cdot Q_e \cdot (L - 2x) \quad (3.7)$$

$$F_2 = +\mu_e \cdot Q_e \cdot x \quad (3.8)$$

Avståndet  $x$  kan beräknas enligt

$$x = \frac{\Delta T_0 \cdot \alpha \cdot E \cdot A}{2 \cdot \mu_e \cdot Q_e} \quad (3.9)$$

Påkänningarna i ledningen på grund av förvärmning kan således beräknas enligt ekv (3.6) till (3.9). Därtill kan komma axiella påkänningar på grund av invändigt tryck som beräknas på traditionellt sätt.

Frågan om huruvida dessa "engångsspänningar" påverkar risken för brott kan i och för sig disku-



teras. Nuvarande rörledningsnorm tillåter endast att metod 1 för spänningsanalys används för den här typen av ledning. Därmed torde också en "korrekt" beräkning enligt rörledningsnormen innebära att dessa engångspåkänningar som byggs in i systemet inkluderas vid beräkning av maximala jämförelse-spänningar. Dock bör nämnas att om ett resonemang förs - vid sidan av normtexten - utifrån spänningsomfång och utmattningshållfasthet (jfr metod 2 i rörledningsnormen) så leder detta för den här aktuella typen av ledning till att man inte bör se så strängt på denna typ av engångsbelastningar.

För att få en uppfattning om storleksordningen av de friktionskrafter och axiella spänningar som kan uppstå på grund av friktion vid förvärmning redovisas nedan ett beräkningsexempel där ekv (3.6) nyttjats med  $\mu_e = 0,3$  och  $L = 100$  m för samtliga dimensioner.

Dimension	Egenvikt $Q_e$  kN/m	Friktionskraft vid förvärmn; $F_1 = \mu_e \cdot Q_e \cdot L$  $F_1$ kN	Axiell spänning  $\sigma_{ax} = F_1/A$  $\sigma_{ax}$ N/mm <sup>2</sup>
DN 32	0,056	1,7	5,2
DN 100	0,24	7,2	5,8
DN 300	1,36	41	7,3
DN 600	4,4	133	8,2
DN 1000	12,0	360	10,4

Härav framgår att det i första hand är för stora dimensioner och långa förvärmningslängder som hänsyn till friktionen på grund av egenvikt behöver tas i hållfasthetsdimensioneringen.

Med långa förvärmningslängder följer också risk för utknäckning. I kap 6 behandlas knäckning av friliggande ledningar. För att minska risken för utknäckning finns möjligheten att intermittent kringfylla ledningen någon längdmeter.

Frågan om hur lång ledningssträcka som kan förvärmnas beror på flera faktorer såsom förvärmningsmetod, förvärmningstemperatur, stålqualität m m. Det är därför föga meningsfullt att ange en generell rekommendation för hur lång ledningssträcka som kan förvärmnas. Denna kan i stället beräknas i det enskilda fallet. De hållfasthetstekniska

begränsningarna utgörs av maximal jämförelsespänning och risk för utknäckning. För större ledningsprojekt rekommenderas således att denna typ av hållfasthetsberäkningar görs för bestämning av längden  $L$ . Här redovisade friktionskoefficienter och beräkningsuttryck kan då användas.



## 4. DRIFTSSKEDE

4.1 Rörelser - friktionskoefficientBeräkningsmodell

Följande antaganden görs:

- friktionskoefficienten är konstant längs rörelsesträckan under den betraktade tidsperioden
- fyllningshöjden varierar ej längs rörelsesträckan
- det invändiga trycket är konstant.

Med dessa antaganden kan en förhållandevis enkel beräkningsmodell tas fram för en friktionsfixerad ledningssträcka.

Till förutsättningarna hör också att förvärmning sker vid temperaturen  $T_0$ . Max- och mintemperatur betecknas  $T_{\max}$  respektive  $T_{\min}$ .

Det principiella utseendet mellan rörelse under driftsskedet i den fria änden och driftstemperatur framgår av Fig 4.1.

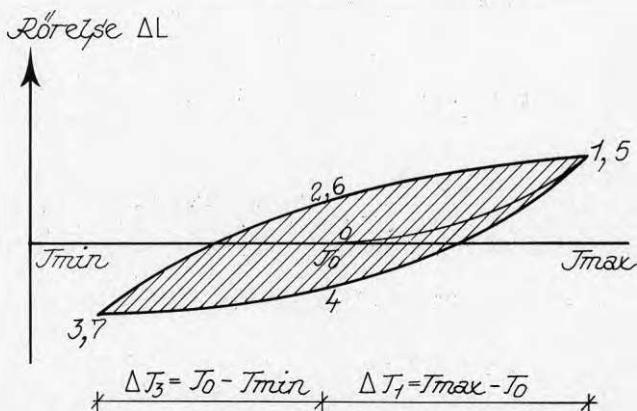


Fig 4.1

I detta exempel antas att  $\Delta T_1$  är större än  $\Delta T_3$ .

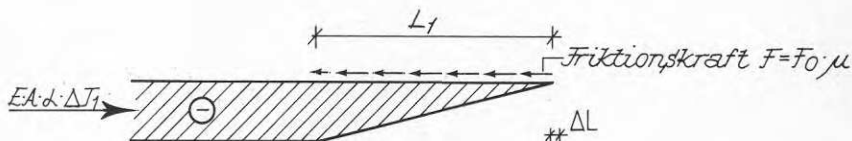
Vi ska nu förflytta oss från pkt 0 till pkt 1 osv till pkt 7.

Vid varje punkt kan en kraftekvation och en rörelseekvation uppställas. Härur erhålls friktionslängd och rörelser.

### Pkt 0

Vid pkt 0 är ledningen spänningslös och rörelserna för övriga punkter beräknas utifrån detta "noll-läge".

### Pkt 1



Höjs temperaturen vill ledningen utvidga sig. Samtidigt uppstår friktionskrafter som alltid är motriktade rörelseriktningen. Dessa friktionskrafter medför att ledningen blir friktionsfixerad på avståndet  $L_1$  från den fria änden.

$$\text{Kraftekv: } EA\alpha \cdot \Delta T_1 = F_0 \cdot \mu \cdot L_1 \quad (4.1)$$

$$\text{Rörelseekv: } \Delta L = \alpha \cdot \Delta T_1 \cdot L_1 - \frac{F_0 \cdot \mu \cdot L_1^2}{2 \cdot EA} \quad (4.2)$$

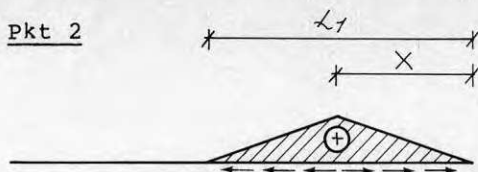
Skjuvdeformation av polyuretanskummet ger endast ett marginellt tillskott till stålrörets axiella rörelse och försummas därför.

Ur ekv 4.1 och 4.2 erhålls:

$$L_1 = \frac{\alpha \cdot EA \cdot \Delta T_1}{F_0 \cdot \mu} \quad (4.3)$$

$$\Delta L = \frac{EA\alpha^2}{2 \cdot F_0} \left( \frac{\Delta T_1}{\mu} \right)^2 \quad (4.4)$$

Pkt 2



Vid pkt 2 är vi tillbaka vid förvärmningstemperaturen  $T_0$ . Ledningen är spänningslös längs den friktionsfixerade delen av sträckan.

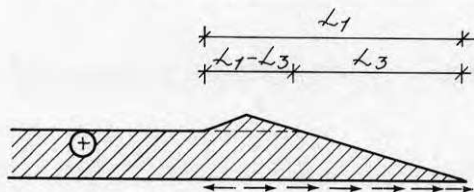
$$\text{Kraftekv: medför att } x = \frac{L_1}{2} \quad (4.5)$$

$$\text{Rörelsekv; medför } \Delta L = \frac{EA\alpha^2}{4 \cdot F_0} \left( \frac{\Delta T_1^2}{\mu} \right) \quad (4.6)$$

Rörelsen är här hälften så stor som vid pkt 1.

Pkt 3

Inledningsvis nämndes att  $\Delta T_1$  är större än  $\Delta T_3$ . Härav följer att riktningen på de friktionskrafter som utbildas närmast den friktionsfixerade delen av sträckan endast påverkas av  $\Delta T_1$ , se nedanstående figur.



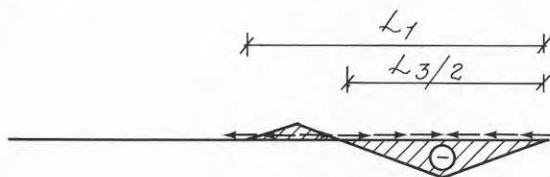
$$\text{Kraftekv: } L_3 = \frac{\alpha \cdot EA}{F_0} \cdot \frac{\Delta T_3}{\mu} \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned} \text{Rörelsekv: } \Delta L = & -\alpha \cdot \Delta T_3 \cdot L_1 + \frac{F_0 \cdot \mu \cdot L_3^2}{2 EA} \\ & + \frac{L_3 \cdot F_0 \cdot \mu (L_1 - L_3)}{EA} + \frac{2 \cdot F_0 \cdot \mu}{2 EA} \left( \frac{L_1 - L_3}{2} \right)^2 \quad (4.8) \end{aligned}$$

Ekv (4.3), (4,7) och (4,8) ger

$$\Delta L = \frac{EA \alpha^2}{2 F_0 \mu} \left( \frac{-\Delta T_3 + \Delta T_1^2}{2} - \Delta T_1 \cdot \Delta T_3 \right) \quad (4.9)$$

Pkt 4



$$\text{Rörelsekv: } \Delta L = \frac{EA \cdot \alpha^2}{2 \cdot F_0 \cdot \mu} \left( \frac{\Delta T_1^2}{2} - \Delta T_1 \cdot \Delta T_3 \right) \quad (4.10)$$

Pkt 5, 6 och 7

Se pkt 1, 2 och 3.

Kommentar till beräkningsmodell

Under förutsättning av att temperaturen ej under- eller överskrider  $T_{\min}$  respektive  $T_{\max}$  kommer ledningen aldrig att röra sig utanför det skraf-ferade området i Fig 4.1.

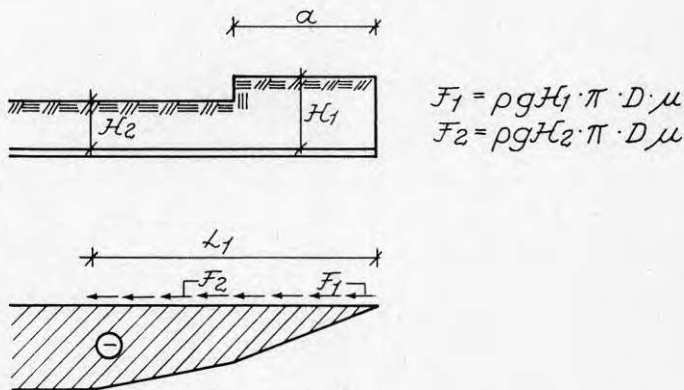
Var ledningsänden befinner sig inom detta område beror på temperaturhistorien. Vid temperaturen  $T_0$  kan ledningen - beroende på temperaturhistorien - befinna sig någonstans mellan pkt 4 och pkt 6 i Fig 4.1.

Vad händer nu om någon av förutsättningarna a) till c) ej är uppfyllda? Allmänt kan sägas att

samma resonemang som lett fram till uttrycken (4.1) till (4.10) kan föras. Dock kompliceras beräkningarna något, vilket kommer att belysas i det följande.

Om förutsättning a) (konstant friktionskoefficient) kan sägas att det säkerligen i praktiken är så att friktionskoefficienten varierar. Det intressanta i en utvärdering av rörelser är dock att få fram den friktionskoefficient som ger största rörelsen. Således kan "cigarren" i Fig 4.1 bestämmas utifrån de maximala rörelserna, vilket resulterar i den minsta friktionskoefficienten.

Om förutsättning b) (konstant fyllningshöjd) ej är uppfylld ändras inte det principiella resonemanget. Exempelvis kan rörelsen vid pkt 1 beräknas på följande sätt om två olika fyllnadshöjder förekommer längs rörelsesträckan.



$$\text{Kraftekv: } a \cdot F_1 + (L_1 - a) \cdot F_2 = \alpha \cdot EA \cdot \Delta T_1 \quad (4.11)$$

$$L_1 = \frac{\alpha \cdot EA \cdot \Delta T_1 - a (F_1 - F_2)}{F_2} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} \text{Rörelsekv: } \Delta L &= \alpha \cdot \Delta T_1 \cdot L_1 - \frac{F_1 \cdot a^2}{2 EA} - \frac{F_1 \cdot a(L_1 - a)}{EA} \\ &\quad - \frac{F_2 \cdot (L_1 - a)^2}{2 EA} \end{aligned} \quad (4.13)$$

$\Delta L$  kan beräknas genom insättning av  $L_1$  i ekv 4.13.



Slutligen kan även om förutsättning c) sägas att samma principiella resonemang kan föras även om trycket ändras. Även här kompliceras dock beräkningsuttrycken, varför vi i den tidigare framställningen valt att utelämna inverkan av invändigt tryck. Följande komplettering kan dock lämnas.

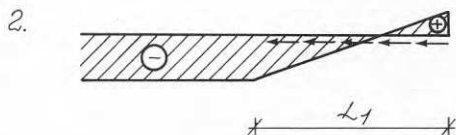
Vid återfyllning antas det invändiga trycket vara  $p_0$ . Om nu detta i ett driftsskede ökas till  $p_1$  kan rörelserna beräknas enligt följande:



$$\text{Axial Kraft} = \frac{p_0 \cdot \pi \cdot D_i^2}{4}$$

Vid återfyllning

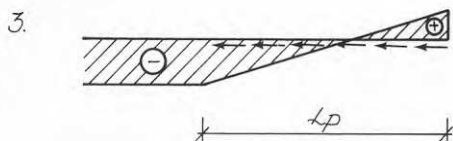
$$p = p_0, J = J_0$$



Efter temp.ökning

$$p = p_0, J = J_1$$

Rörelseekvation enligt pkt 1 ovan, dvs ekv (4.4)



Efter tryckhöjning

$$p = p_1, J = J_1$$

$$\text{Kraftekvation: } -EA \alpha \cdot \Delta T_1 + v \cdot \Delta \sigma_t \cdot A = 0,5 \cdot \Delta \sigma_t \cdot A - L_p \cdot F$$

$$\text{där } \Delta \sigma_t = (p_1 - p_0) \cdot \frac{D_i}{2 \cdot s}$$

$$L_p = \frac{EA \alpha \cdot \Delta T_1 + (0,5 - v) \Delta \sigma_t \cdot A}{F} \quad (4.14)$$

$$v = 0,3$$

$$\text{Rörelseekvation: } \Delta L = \alpha \cdot L_p \cdot \Delta T_1 - \frac{EA \alpha^2}{2 \cdot F_0} \left( \frac{\Delta T_1}{\mu} \right)^2 +$$

$$+ \frac{0,2 \cdot \Delta \sigma_t \cdot L_p}{E} \quad (4.15)$$

Av ekvation (4.15) framgår att det invändiga trycket medför en förlängning av ledningen och en ökning av friktionslängden. Detta under förutsättning att driftstrycket  $p_1$  är större än trycket  $p_0$  vid återfyllning. Annars erhålls en förkortning.

Det invändiga trycket är dock av mindre betydelse för rörelserna jämfört med temperaturändringarna, varför inverkan härav ofta kan försummas.

### Mätresultat

I bilaga 1 redovisas uppmätta rörelser under driftsskedet. Driftstemperaturen framgår av textplansch 2.

Den friktionsfixerade ledningssträckan har två fria ändar vid kammare 1 respektive kammare 2:4. Uppmätta rörelser vid kammare 1 återfinns på sid 1 i bilaga 1.

Vi ska nu följa rörelseförloppet under driftsskedet.

Första temperaturändringen (från pkt 1 till pkt 2) efter återfyllning var en sänkning på grund av inkoppling av nästa ledningsetapp. Överensstämmelse mellan uppmätta och beräknade rörelser erhålls med friktionskoefficienten  $\mu = 0,29$ . Nästa mätning (pkt 4), som utfördes vid temperaturen  $56^\circ\text{C}$ , visar att rörelsen då skulle ha varit negativ, dvs motsvarat en förkortning av ledningen. Då temperaturen höjs är en förkortning av ledningen dock osannolik. Antas i stället att temperaturen först sjunkit till  $34^\circ\text{C}$  (pkt 3) erhålls överensstämmelse mellan uppmätt och beräknad rörelse vid temperaturen  $56^\circ\text{C}$  (med  $\mu = 0,29$ ).

Rörelseförloppet i kammare 1 framgår av Fig 4.2.

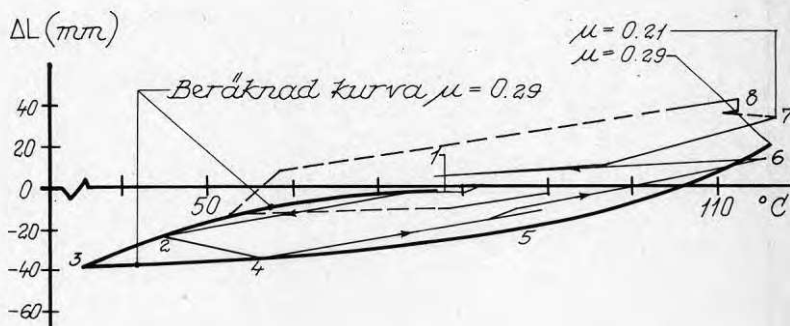


Fig 4.2 Rörelser vid kammare 1

Därefter höjdes temperaturen till 116°C (pkt 6) och en ungefärlig överensstämmelse erhålls mellan beräknad och uppmätt rörelse med  $\mu = 0,29$ . Det uppmätta värdet vid 116°C är något lägre än det beräknade, vilket tyder på att friktionskoefficienten varit något högre ( $\mu \sim 0,3$ ) än den antagna.

Efter denna temperaturtopp, som arrangerades i oktober 1979, sjönk temperaturen till för årstiden normala värden omkring 90 à 100°C och steg därefter långsamt under vintern 1979-1980 för att kulminera vid ca 119°C (pkt 7). Rörelsen var vid detta tillfälle större än tidigare och god överensstämmelse mellan beräknade och uppmätta värden erhålls med friktionskoefficienten  $\mu = 0,21$ .

Det tycks således som om den långsamma temperaturstegringen under vintern givit ett något lägre friktionsvärde än vad som erhöles vid den snabba temperaturvariationen under igångkörningsskedet i oktober 1979.

Temperaturen har därefter gått ner till ca 90°C under sommarhalvåret för att därefter åter höjas till maximalt 118°C (pkt 8) under vintern 1980-1981. Rörelserna har då ökat något i förhållande till föregående vinter och motsvarar  $\mu = 0,19$  (jfr  $\mu = 0,21$ ).

Under de tre år som mätningar pågått har maximal temperatur uppmätts till 119°C. Lägsta temperatur är mer osäker eftersom denna har inträffat i samband med revision då ledningen varit avstängd. Här ansätts 34°C som lägsta temperatur.

Mellan mars 1980 och februari 1981 är inga mätningar gjorda. Orsaken härtill är att det då ej var klart att fortsatta mätningar skulle göras. Sista mätning utfördes den 8 oktober 1981.

Rörelserna vid mätpunkt 1 (kammare 1) har varierat mellan + 42 mm och - 32 mm. I Fig 4.3 har en "cigarr" lagts in som omsluter de största rörelserna. Friktionskoefficienten uppgår till  $\mu = 0,19$ . Friktionslängden, dvs den del av ledningen som rör sig, kan beräknas till 203 m ( $\mu = 0,19$ ).

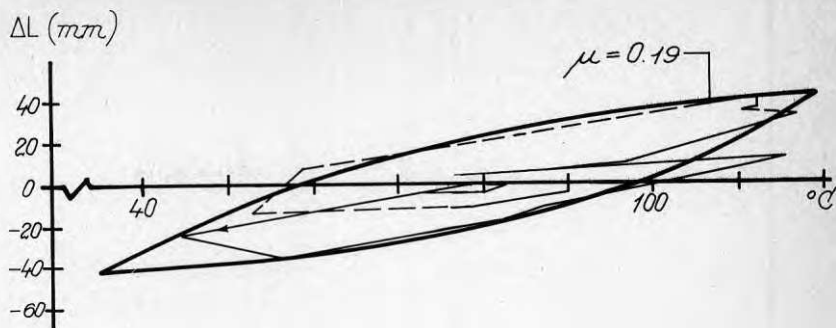


Fig 4.3 Rörelser vid kammare 1

Mätpunkter som ligger utanför cigarren beror på att högre friktionskoefficienter än  $\mu = 0,19$  kan förekomma.

I bilaga 2 redovisas beräknad fördelning av friktionskrafter och axialspänningar i stålroret längs friktionssträckan vid kammare 1. Utgångspunkten har varit uppmätta rörelser och därav beräknade friktionskoefficienter samt en tillämpning av i denna rapport redovisad beräkningsmodell.

I Fig 4.4 har en cigarr lagts in som omsluter rörelserna vid den andra fria änden, dvs vid kammare 2:4. Den beräknade friktionskoefficienten uppgår till  $\mu = 0.21$ . Maximal rörelse uppgår här till +47 mm (jfr +42 mm vid kammare 1). Mindre fyllningshöjder på sträckan närmast kammare 2:4 medför att friktionskoefficienten blir något högre (0,21 jämfört med 0,19) trots att rörelsen är större.

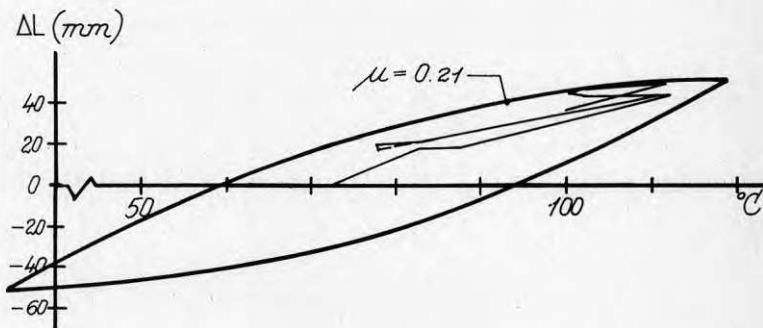


Fig 4.4 Rörelser vid kammare 2:4

Rörelserna i returledningen har varit mindre beroende på mindre temperaturvariationer (ungefärligen 85-35°). Vid kammare 1 har rörelsen varierat mellan 0 och 24 mm och vid kammare 2:4 mellan +9 och -3 mm.

### Slutsats

Genomförda rörelsemätningar under tre års tid har givit en lägsta friktionskoefficient på  $\mu = 0,19$ .

Rörelserna har inte ökat successivt i någon nämnvärd omfattning varför det är vår bedömning att  $\mu = 0,15$  kan betraktas som ett rimligt undre slutvärde vid normal drift i ett fjärrvärmesystem.

Maximal friktionskoefficient har framför allt intresse vid bestämning av friktionslängden vid friktionshämrad förläggning. Här har en praxis utvecklats med  $\mu = 0,4-0,45$ . En ökning av detta värde leder till direkta kostnadsökningar för ett ledningssystem i och med att fler expansionsanordningar då måste nyttjas. Med hänsyn till att risken för utmattningsbrott är liten för ett fjärrvärmesystem på grund av att antalet temperaturcykler är litet, synes det ej vara motiverat att rekommendera en högre friktionskoefficient i synnerhet som haverier oss veterligt hittills ej inträffat av denna orsak längs raka ledningssträckor.

Används av någon anledning konstruktionsdelar i systemet som är känsliga för stora axialkrafter (exempelvis dimensionsövergångar) bör friktionskoefficienter på  $\mu = 0,6$  nyttjas, eftersom snabba temperaturändringar mycket väl kan leda till friktionskoefficienter av denna storleksordning.

Vid friktionshämrad förläggning erhålls en liten skillnad om rörelsen bestäms med  $\mu = 0,15$  eller  $\mu = 0$ . I beräkningarna kan dessutom ett fel erhållas om den antagna rörelsenollpunkten mellan två expansionsanordningar förflyttar sig något. Med anledning härav rekommenderas därför att rörelsen beräknas som vid fri expansion ( $\mu = 0$ ) vid friktionshämrad förläggning.

#### 4.2 Spänningar - raka ledningssträckor

Som framgår av textplansch 1 har töjningsmätningar genomförts vid 7 olika mätpunkter längs ledningssträckan.

Vid varje mätställe har svetsade trådtöjningsgivare <sup>1)</sup> placerats i axialled kl 9 och kl 3. Medelvärdet av de uppmätta töjningarna utgör ett mått på den axiella kraften i ledningen.

Rörelsemätningar gjorda på den friktionsfixerade delen av ledningssträckan bekräftar att ledningen där ligger still (se mätpunkt 4, 6, 9, 14 i bilaga 1. Även mätpunkt 2 och 18 har små rörelser i driftskedet). Härav följer att sambandet mellan spänning och temperaturdifferens kan beräknas enligt följande uttryck:

$$\sigma_{ax} = \epsilon \cdot E = \alpha \cdot \Delta T \cdot E \quad (4.16)$$

där  $\sigma_{ax}$  = axiell spänning pga  $\Delta T$ , N/mm<sup>2</sup>  
 $\epsilon$  = axiell töjning  
 $E$  = elasticitetsmodul ( $2,1 \cdot 10^5$  N/mm<sup>2</sup>)  
 $\alpha$  = längdutvidgningskoefficient ( $1,2 \cdot 10^{-5}$ )  
 $\Delta T$  = temperaturdifferens

I bilaga 3 redovisas töjningsmätningar som funktion av temperaturen under första driftsmånaderna fram till mitten av november 1979. Mätpunkterna 4, 9, 14 och 17 ligger under denna tidsperiod inom den friktionsfixerade delen av ledningssträckan. Mätpunkten 17 kommer i senare skede att hamna utanför den friktionsfixerade delen av ledningssträckan. För mätpunkterna 4-17 kan således konstateras att uppmätta töjningar ungefärligen följer ekv 4.16. Avvikelse härifrån är inte större än att de sannolikt beror på osäkerheten i mätningarna.

Mätpunkterna 19 och 20 och delvis 18 ligger inom den rörliga delen av ledningssträckan. Som väntat finns här inget entydigt samband mellan töjning och temperatur. Töjningen beror på temperaturhistorien, vilket också framgår av den beräkningsmodell som tidigare redovisats. Dock bör påpekas att maximala töjningar är lägre vid mätpunkt 19 och 20 än vid de övriga, dvs dimensionerande spänningar uppstår längs den fixerade delen av ledningssträckan.

Det bör påpekas att det är svårt att utföra töjningsmätningar utomhus under längre tid på grund av krypning m m i givare. Töjningsmätningar bör därför tolkas med viss försiktighet.

1) Trådtöjningsgivare av fabr Ailtech

I nedanstående Fig 4.5 redovisas töjningsmätningarna från mätpunkterna 14, 17, 18, 19 och 20, belägna i anslutning till den fria änden vid kammare 2:4, se textplansch 1.

Lutningen på kurvorna i Fig 4.5 är ett mått på friktionskoefficienten. Vid mätvärdena den 24 oktober och 16 november 1979 har kurvor inlagts som motsvarar friktionskoefficienten  $\mu = 0,45$  respektive  $\mu = 0,20$ .

Spänningsbilden vid de olika mättillfällena stöder det resonemang som tidigare förts om hur en markförlagd direktskummad fjärrvärmeledning fungerar.

Som slutsats av de utförda mätningarna kan följande sägas beträffande de spänningar som uppstår i en rak friktionsfixerad ledning under driftsskedet på grund av temperaturändringar:

- Maximal spänning uppstår längs den fixerade delen av ledningssträckan och kan beräknas enligt ekv 4.16. Beaktas även invändigt tryck inkluderas kontraktionsspänningarna i princip enligt ekv 4.14.
- Längs den rörliga delen av ledningssträckan ändrar friktionskrafterna riktning beroende på temperaturändring. Såväl drag- som tryckspänningar kan uppstå vid en viss temperatur beroende på temperaturhistorien. Spänningarna längs den rörliga delen av ledningssträckan är alltid lägre än maximal spänning längs den fixerade delen.

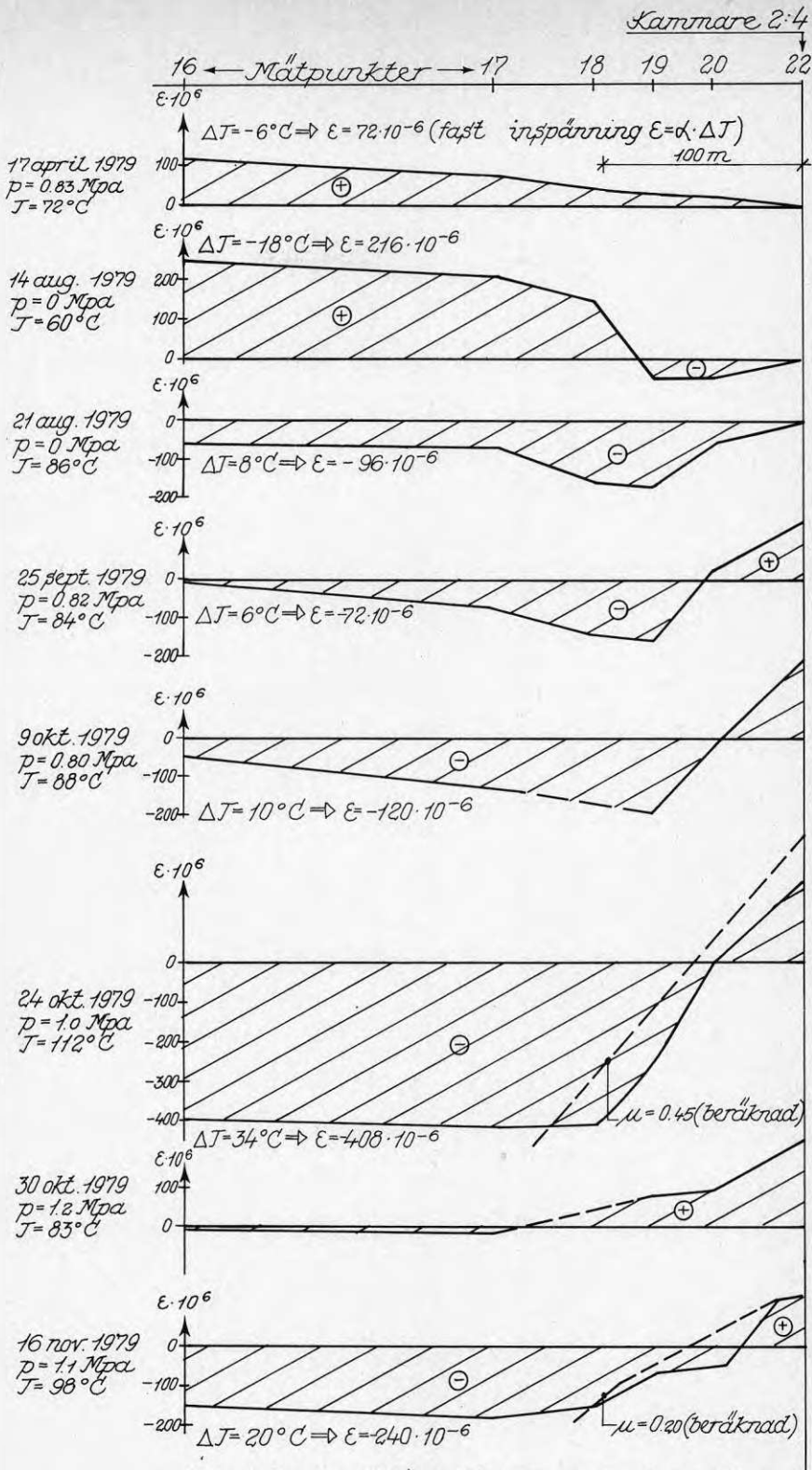


Fig 4.5 Uppmätta töjningar vid olika temperaturer längs friktionssträckan vid kammare 2:4





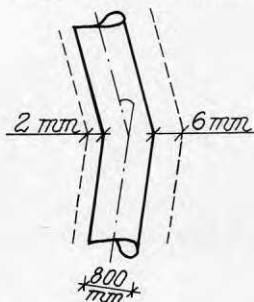
## 5. SMÅ AVVINKLINGAR

I Sverige har utvecklats en praxis att tillåta avvinkling genom girning upp till 5°. Oss veterligt har inga skadefall inträffat som tyder på att denna praxis skulle vara olämplig. En teoretisk behandling av avvinklingar återfinns i Scharfe Knicke in Fernheizleitungen, utgiven av Meier Schenk AG i Zürich 1972.

I det nu aktuella projektet har horisontella avvinklingar på maximalt 4,5° nyttjats.

Riktningssändringen vid mätpunkt 4 på 27° är uppdelad på 6 girningar à 4,5° med c/c-avståndet 12 m. Mätpunkt 4 är belägen vid andra girningen (av 6) sett från kammare 1.

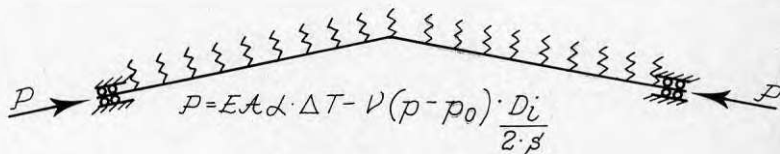
I bilaga 4 redovisas uppmätta sidorörelser för fram- och returledningen. Som framgår av dessa diagram finns inte ett entydigt samband mellan sidorörelse och temperatur. Maximalt rörelseomfång uppgår emellertid till ca 8 mm. Detta rörelseomfång uppdelas i sidorörelserna



6 och 2 mm enligt vidstående figur.

Kringfyllningen kring ledningen består av väl packat friktionsmaterial med min 92 % packningsgrad enligt tung laboratorieinstampning (mod proctor).

Beräkningsmässigt har belastningsfallet behandlats enligt nedanstående belastningsmodell.



Beräkningar har gjorts med Teknikdatas program R01019. Med  $p - p_0 = 0$  och  $\Delta T = 41^\circ\text{C}$  erhålls  $P = 1,26 \text{ MN}$  (126 ton). Diskreta fjädrar har placerats på c/c 1,0 m.

Två olika antaganden om fjäderkonstantens storlek har gjorts.

Med fjäderkonstanten  $k = 10000 \text{ N/mm}$  erhålls maximala sidorörelsen  $2,2 \text{ mm}$ . Med fjäderkonstanten  $k = 3000 \text{ N/mm}$  erhålls  $5,4 \text{ mm}$  sidorörelse (jfr  $6-7 \text{ mm}$  som maximal uppmätt sidorörelse).

I kap 6 anges följande värde på kringfyllningens fjäderkonstant (ekv 6.1)

$$k = \frac{10}{D_y} \text{PEH} \quad \text{N/mm}^3$$

vilket med diskreta fjädrar på c/c  $1,0 \text{ m}$  ger  $k = 10000 \text{ N/mm}$ . De uppmätta sidorörelserna och de utförda datorberäkningarna tyder således på att fjäderkonstanten är något lägre än vad som antogs i beräkningarna.  $k = 2/D_y \text{PEH}$  synes vara rimligt för ett belastningsfall av här aktuellt slag, där kringfyllningen utsätts för varierande belastning under lång tid och där naturlig mark består av fast lagrad jord.

Även vid mätpunkt 4 har töjningar mätts med trådtöjningsgivare. Dessa givare placerades på vardera sida om röret (kl 3 och kl 9). Avsikten härmed var att få fram såväl normalkraft som moment. Spridningen i mätningarna gör att det är svårt att med någon större noggrannhet ange momentandelen av påkänningarna. De uppmätta töjningarna har varit måttliga ( $\max 300 - 400 \cdot 10^{-6}$ , dvs  $60-80 \text{ N/mm}^2$ ).

Datorberäkningarna ger axiella spänningar vid avvinklingen på  $130 \text{ N/mm}^2$  med  $k = 10000 \text{ N/mm}$  och  $140 \text{ N/mm}^2$  med  $k = 3000 \text{ N/mm}$ . Den lägre fjäderkonstanten och den därav ökade sidorörelsen från  $2,2$  till  $5,4 \text{ mm}$  ger således endast ett litet genomslag i den axiella spänningen. Den axiella spänningen på grund av normalkraften uppgår i beräkningsexemplet till  $90 \text{ N/mm}^2$ . ( $\Delta T = 41^\circ\text{C}$ ,  $p = 1,0 \text{ Mpa}$ ). Ökningen upp till  $130$  à  $140 \text{ N/mm}^2$  beror således på de moment som uppstår vid avvinklingen.

Vår bedömning är att för dimensioner upp till DN  $300 - 400 \text{ mm}$   $5^\circ$  avvinkling kan nyttjas utan komplikationer. Vid större dimensioner bör särskilda beräkningar utföras i enskilda projekt. Dessa beräkningar bör beakta spänningar i stålröret, yttryck mot polyuretanskummet samt omgivande marks förmåga att ta upp sidokrafterna.

I annat sammanhang har beräkningar genomförts för en DN 1000 ledning. Resultatet blev i detta fall att avvinkling genom girning begränsades till 2°.



## 6. SCHAKTNINGSRESTRIKTIONER

### 6.1 Schaktning under fjärrvärmeledningen

Om schaktning utförs under ledningen kommer denna att vara fribärande. Oberoende av temperaturen i ledningen måste schaktbredden begränsas med hänsyn till de böjspänningar som uppstår på grund av att ledningen fungerar som fribärande balk. Om därtill temperaturen är hög, dvs ledningen är belastad med axiella tryckkrafter, föreligger risk för utknäckning. Detta behandlas beräkningsmässigt som knäckning med samtidig böjning.

I Fig 6.1 redovisas den beräkningsmodell som nyttjats. Ett finit-element program med namnet CALFEM har använts.

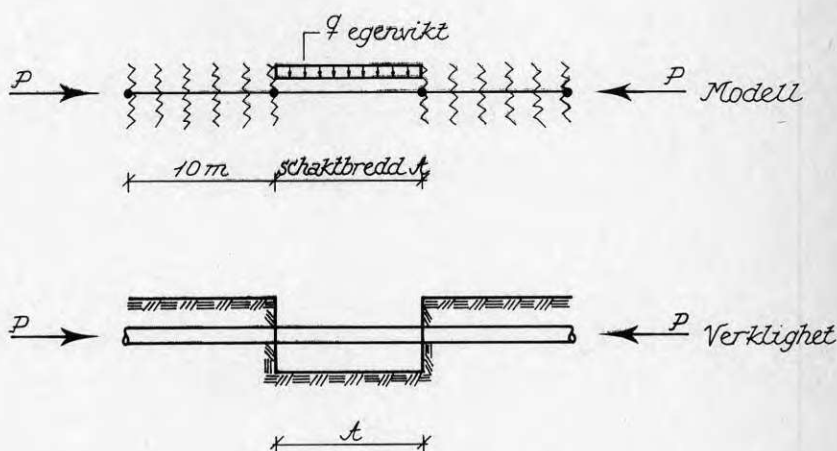


Fig 6.1 Beräkningsmodell - schaktning under ledningen

Kringfyllningens fjäderkonstant antas uppgå till

$$k = \frac{10}{D_Y^{PEH}} \quad \text{N/mm}^3 \quad (6.1)$$

Fjäderkonstanten per m ledning uppgår därmed till

$$k = \frac{10 \cdot D_Y^{PEH} \cdot 1000}{D_Y^{PEH}} = 10000 \text{ N/mm}$$

I Fig 6.2 redovisas resultatet av beräkningarna.

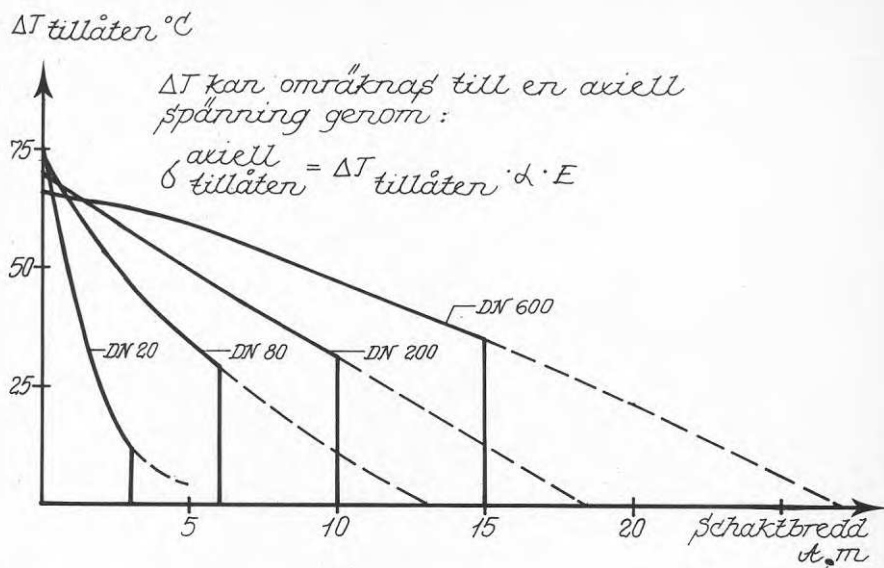


Fig 6.2 Tillåtna schaktbredder

Ovanstående tillåtna schaktbredder har framtagits genom att belastningsfallet anses vara tillfälligt, varvid 20 % högre spänningar tillåts (metod 1 i rörledningsnormen). Spänningsberäkningen blir dimensionerande. Knäckkurvorna ger således något större schaktbredder.

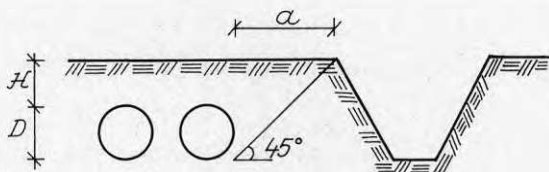
De vertikala linjerna i diagrammet har ej erhållits vid beräkningarna utan är inlagda som en övre begränsning på vad som är rimligt att acceptera som största schaktbredder med hänsyn till nedböjningar och oförutsedda belastningar, såsom personlast m m.

Av Fig 6.2 framgår exempelvis att tillåten schaktbredd för en DN 200-ledning vid  $\Delta T = 50^{\circ}\text{C}$  är 5,0 m.

## 6.2 Schaktning parallellt med fjärrvärmeledning

### Fjärrvärmeledning ej frilagd

Om schaktning utförs nära en fjärrvärmeledning längs en lång sträcka kan ledningen knäcka ut. Initialkrokigheter och minskade jordtryck på ena sidan av fjärrvärmeledningen bidrar till att öka knäckningsrisken.



Om avståndet från ledningen till en schaktkant är lika stort eller större än djupet till ledningens underkant, synes ingen risk för utknäckning föreligga även om den urschaktade rörgraven är mycket lång. Denna rekommendation gäller för raka ledningar, dvs ej kring avvinklingar upp till 5°.

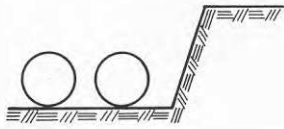
För mindre dimensioner och i fasta jordarter kan avståndet  $a$  minskas något.

Om önskemål finns om schaktning närmare ledningen kan olika alternativ tillgripas. Ett är att begränsa schaktlängden. Ett annat kan vara att slå enstaka spont för att stabilisera fyllningen kring ledningen. Ett tredje alternativ kan vara att sänka temperaturen i ledningen helst så mycket att dragkrafter uppstår istället för tryckkrafter. Här bör man dock vara försiktig längs friktionssträckan, dvs den rörliga delen av en ledningssträcka, eftersom det där inte finns ett entydigt samband mellan temperatur och tryck- eller dragspänning.

Vid schaktning till större djup än fjärrvärmeledningens underkant skall sedvanliga åtgärder vidtas om risk finns för sättningar under fjärrvärmeledningar.



## Fjärrvärmeledning frilagd



Med hänsyn till risk för käckning måste frischaktningslängden begränsas på likartat sätt som då schaktning utförs under fjärrvärmeledning (avsnitt 6.1)

I Fig 6.3 redovisas beräknade frischaktningslängder. Skillnaden i beräkningsmodellen jämfört med Fig 6.1 är att böjning på grund av egenvikt ej inkluderas. 2-faldig säkerhet gentemot knäckning har nyttjats. I praktiken är säkerhetsfaktorn större, eftersom friktion på grund av ledningens egenvikt motverkar utböjningar. Denna effekt har ej inkluderats i beräkningarna.

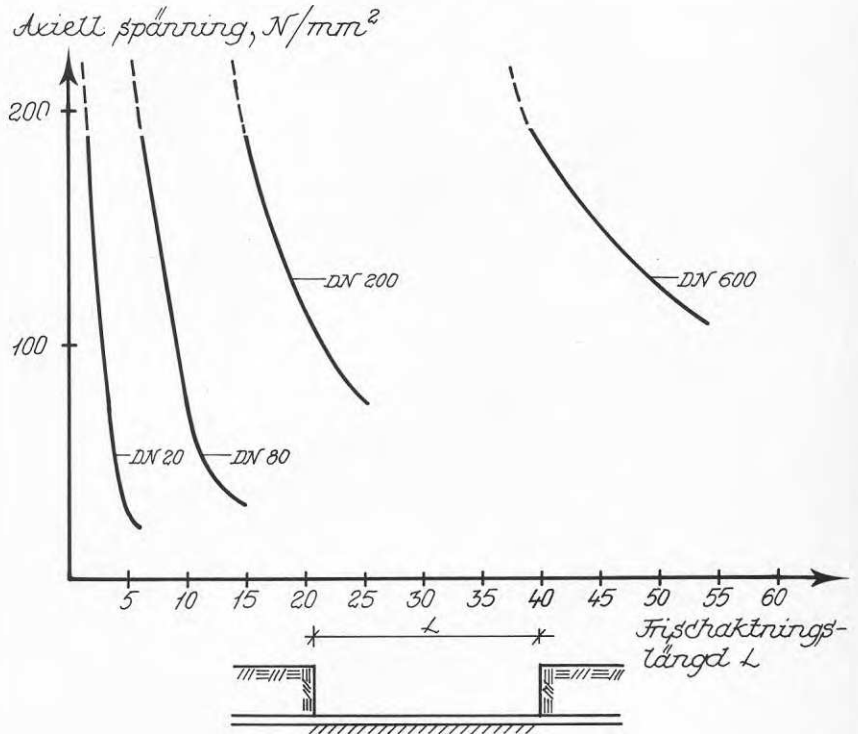


Fig 6.3 Tillåtna frischaktningslängder för frilagd ledning

De beräknade kurvorna ansluter ungefärligen till Eulers fall 2<sup>1)</sup> vid korta frischaktningslängder och till Eulers fall 4<sup>1)</sup> vid långa längder. Detta beror på att vid långa frischaktningslängder är ledningen vek relativt kringfyllningen som förmår att ge en nästan fast inspänning. Vid korta längder är ledningen styv och kringfyllningen deformeras, vilket ger en större utböjningsbåge vid knäckning. Detta förhållande kan t o m innebära kortare frischaktningslängd än vad som erhålls med Eulers fall 2 med leder i schaktkanten.

### 6.3 Schaktning invid små avvinklingar

Vid avvinklingar uppstår sidoriiktade krafter såsom beskrivs i kap 5. Dessa krafter överförs från ledningen till omgivande jord och är av väsentligt större storleksordning än vad som är fallet längs en rak ledningssträcka. För att såväl säkerheten mot jordbrott som en begränsning av ledningens sidorörelse vid avvinklingen skall kunna hållas på önskvärd nivå är det nödvändigt att viss skärpning av schaktningsrestriktionerna iakttas invid avvinklingar jämfört med rak ledningssträcka.

Brottfiguren i jord har det principiella utseende som visas i Fig 6.4.

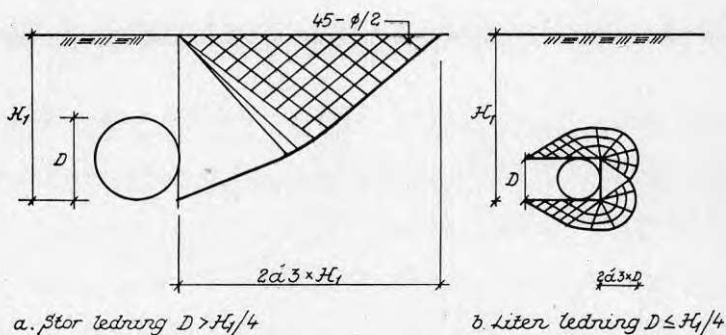


Fig 6.4 Brottzonens principiella utseende i jorden vid sidan av en avvinkling

1) Euler 2 innebär ledad infästning för en sträva.  
Euler 4 innebär fast inspänning.

Brottzonens utseende är olika beroende på förhållandet mellan läggningsdjup och ledningens ytterdiameter. För stora diametrar går brottzonen upp till markytan medan brott vid små diametrar sker i en zon omkring ledningen. Brottzonen blir i det senare fallet ej lika utbredd som i det förra.

Horisontalkrafterna skall i normalfallet med erforderlig säkerhetsmarginal ligga under brottlasten för jorden. Även om så är fallet uppstår dock sidorörelser hos ledningen beroende på kompression av jorden vid belastning. Den jordvolym som påverkas av horisontaltrycket från ledningen är beroende av främst ledningens diameter vilket illustreras i Fig 6.5.

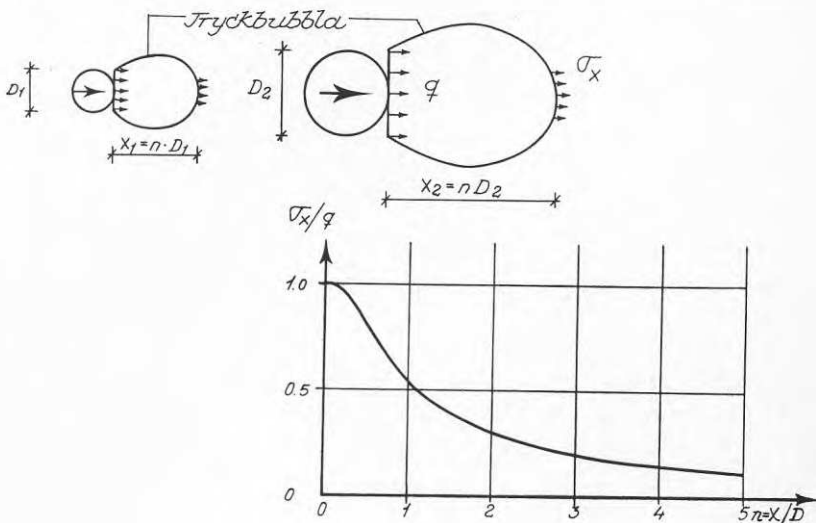


Fig 6.5 Tryckbubblans storlek i jorden vid sidan av röret

Ledningens rörelse påverkas främst av kompressionen hos den del av jorden som ligger närmare röret än ca 2 gånger røyterdiameteren förutsatt att jorden är homogen och ungefär likartad. Om däremot återfyllningen närmast ledningen avsevärt skiljer sig från den naturliga jorden i schaktväggen beträffande kompressionsegenskaperna gäller andra förhållanden. I sådana fall kan tryckbubblan bli såväl mindre som större än i homogen jord.

Horisontaltrycket fördelas också längs ledningen så att det har sitt maximala värde vid avvinklingen och har avtagande storlek på större avstånd från denna, i princip enligt Fig 6.6.

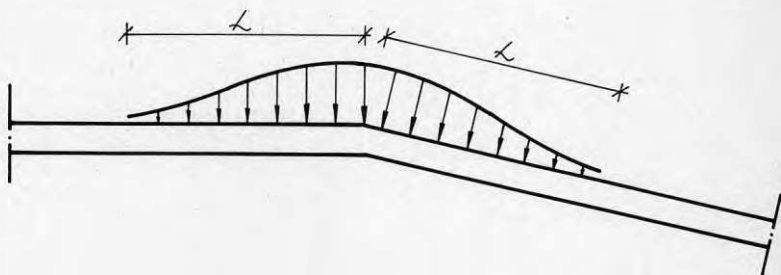


Fig 6.6 Horisontaltryckets fördelning längs ledningen nära en avvinkling

Avståndet  $L$  är beroende av bl a förhållandet mellan ledningens och jordens styvhet. Ledningen kan behandlas som en balk på elastiskt underlag. Längden  $L$  blir då en funktion av rördiametern. Större delen av trycket har avklingat på avståndet  $L = 5$  å  $10 \cdot D$  från avvinklingen.

Sammanfattningsvis kan följande rekommendationer ges för schaktning vid sidan av en avvinkling:

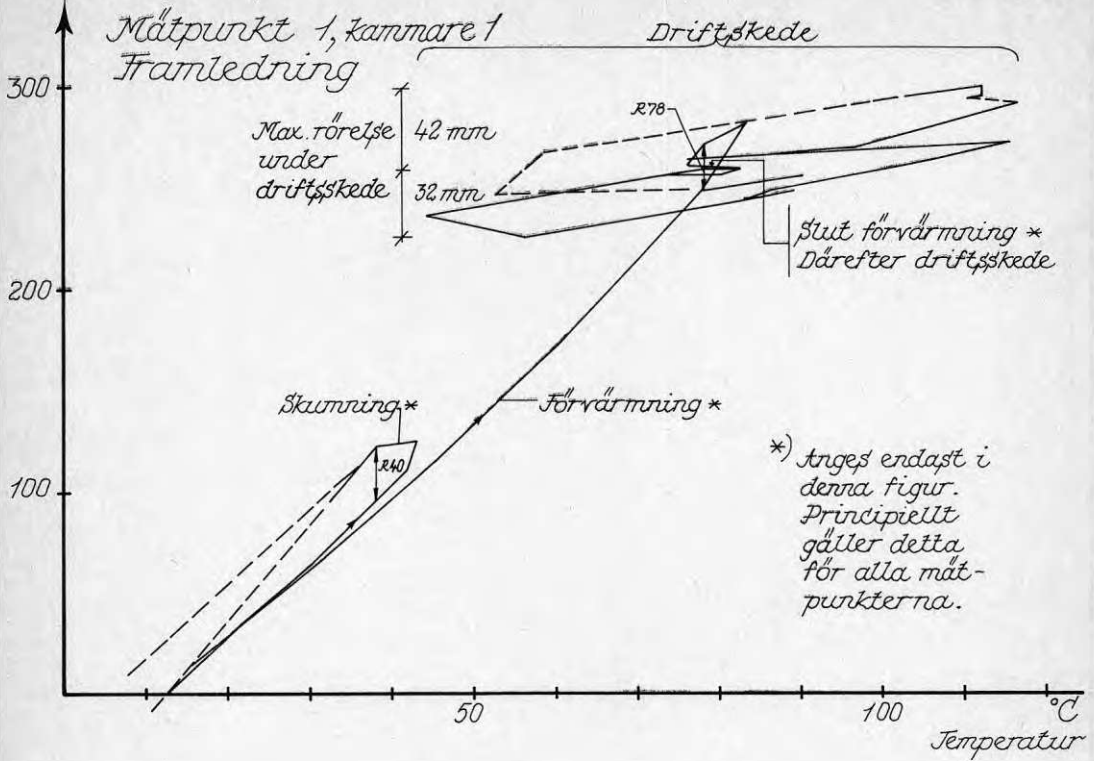
- Schaktning bör på en sträcka av 10 gånger ytterdiametern på kulverten åt vardera hållet från en avvinkling ej ske närmare ledningen än 3 gånger läggningsdjupet  $H_1$  (avståndet mellan markyta och underkant ledning) för stora ledningar (ytterdiameter mantelrör  $D > H_1/4$ ) och ej närmare än 5 gånger mantelrörets ytterdiameter för små ledningar ( $D < H_1/4$ ). Härtill skall läggas den säkerhetsmarginal som behövs med tanke på schakttoleranser o d.

- Avvikelser från ovanstående schaktningsrestriktion kan göras om horisontalkraften reduceras, exempelvis genom en temperatursänkning i ledningen. Effekten av en sådan temperatursänkning blir dock olika för friktionshämmat och friktionsfixerat system och skall bedömas enligt riktlinjer lämnade i kap 4.

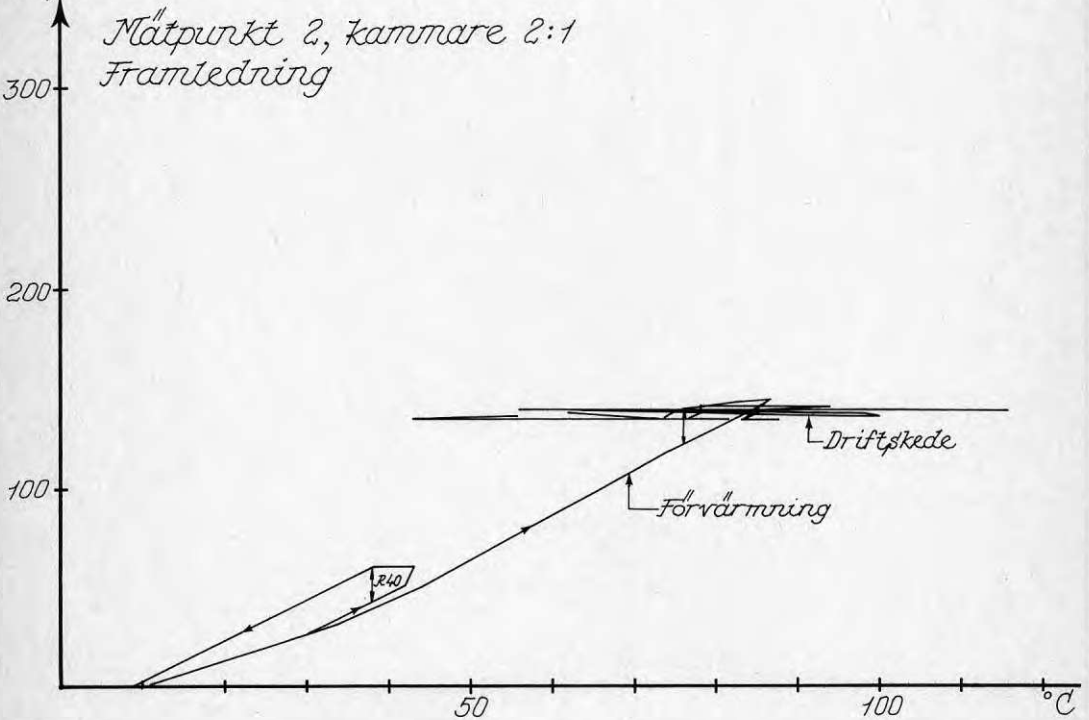
DO/BSG.UK  
SÖ/V73/039/001

Axiell rörelse  $\Delta L$ , mm

Bilaga 1



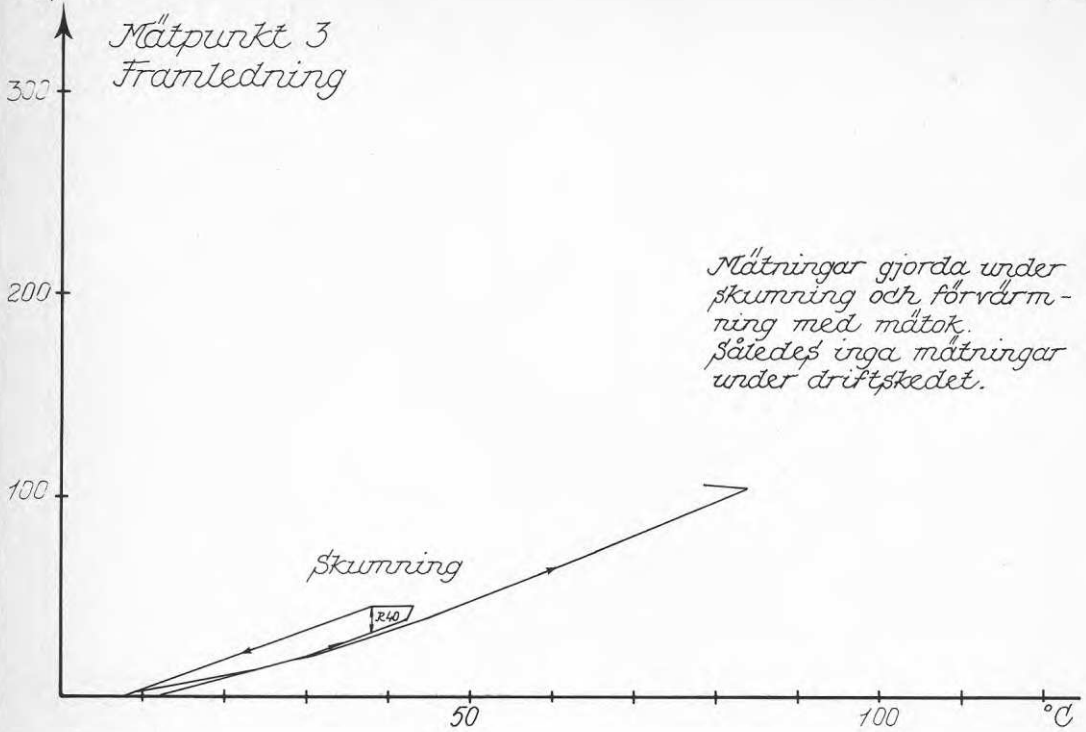
$\Delta L$ , mm



$\Delta L, \text{mm}$

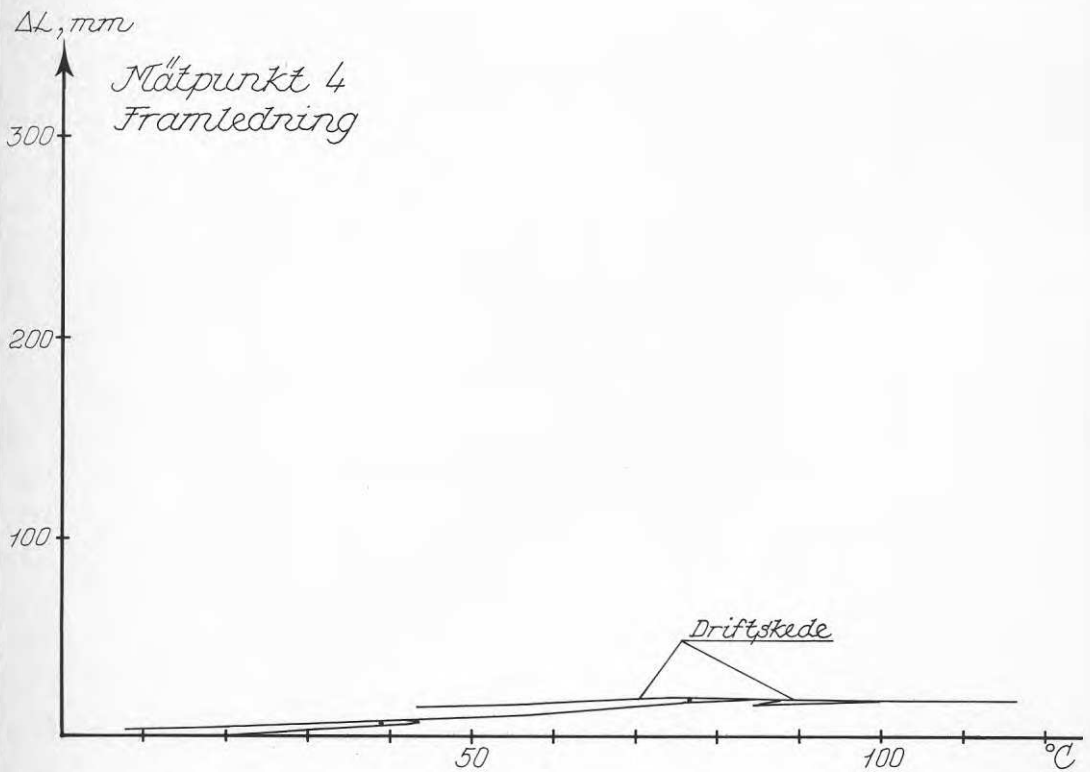
1:2

Mät punkt 3  
Framledning



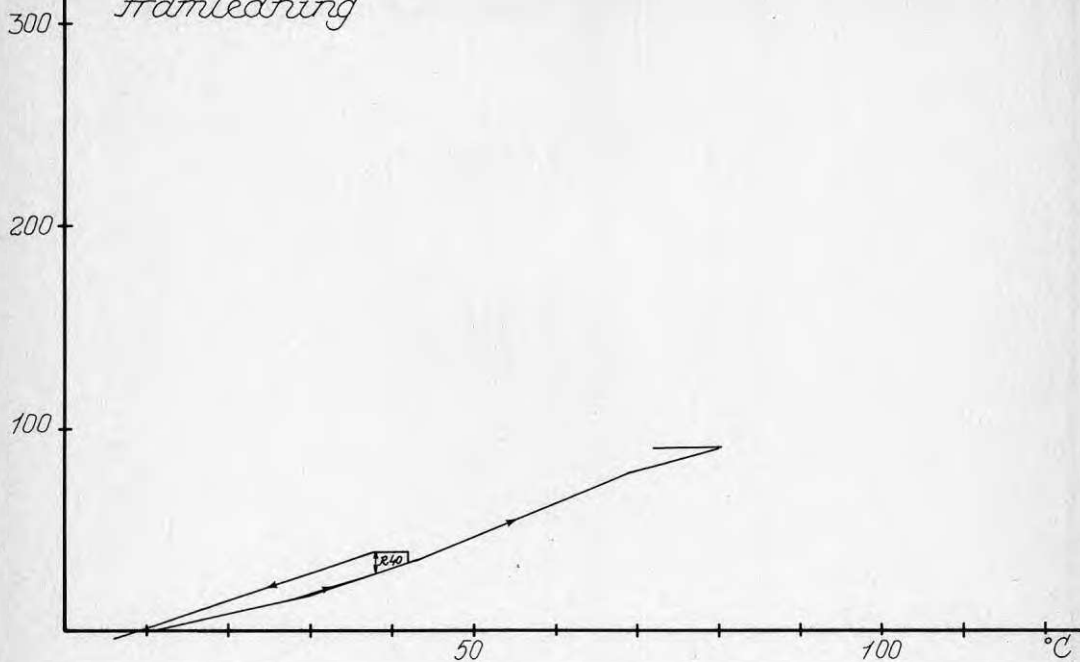
$\Delta L, \text{mm}$

Mät punkt 4  
Framledning

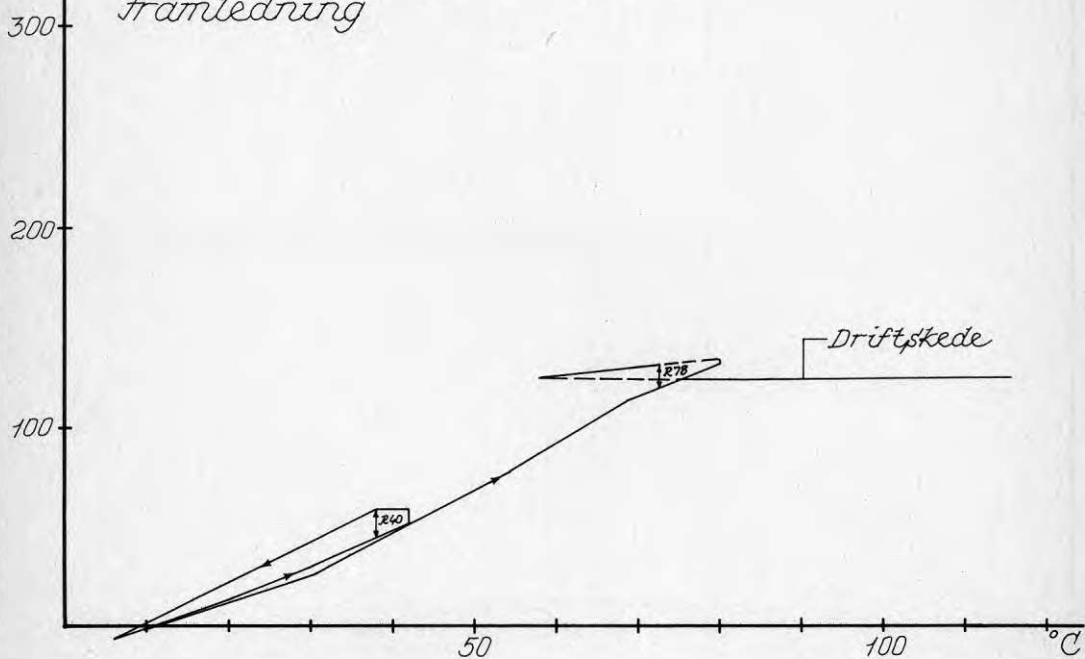


$\Delta L, \text{mm}$ 

Mätpunkt 5  
Framledning

 $\Delta L, \text{mm}$ 

Mätpunkt 6, kammare 2:11  
Framledning

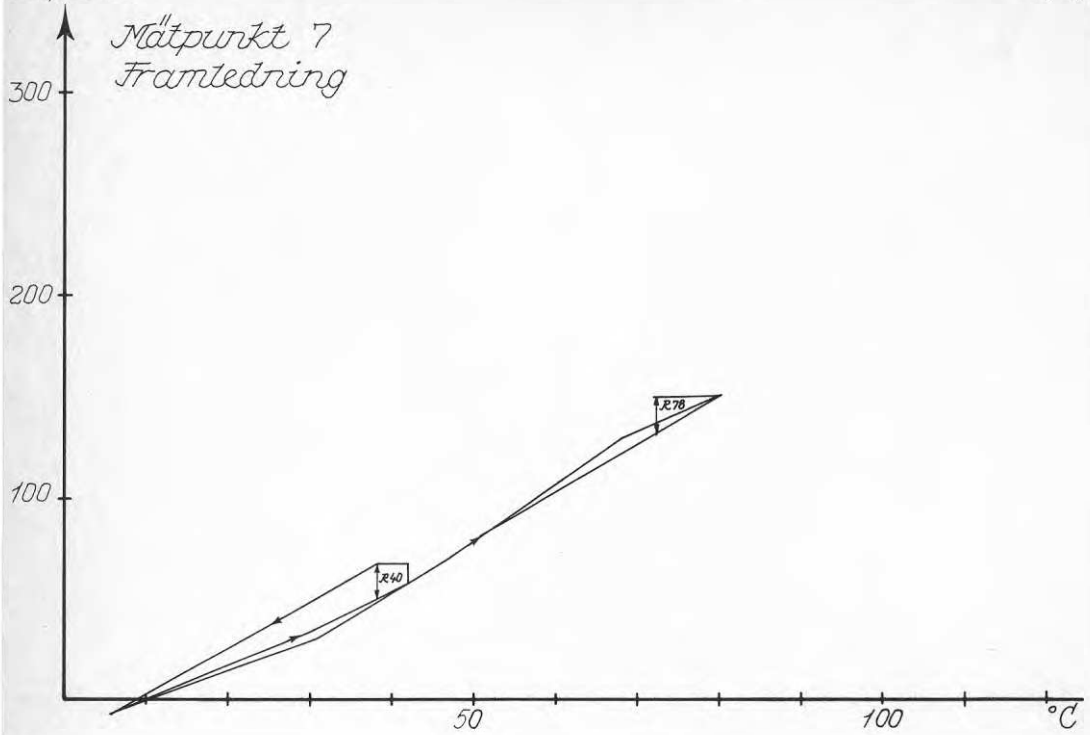




$\Delta L, mm$

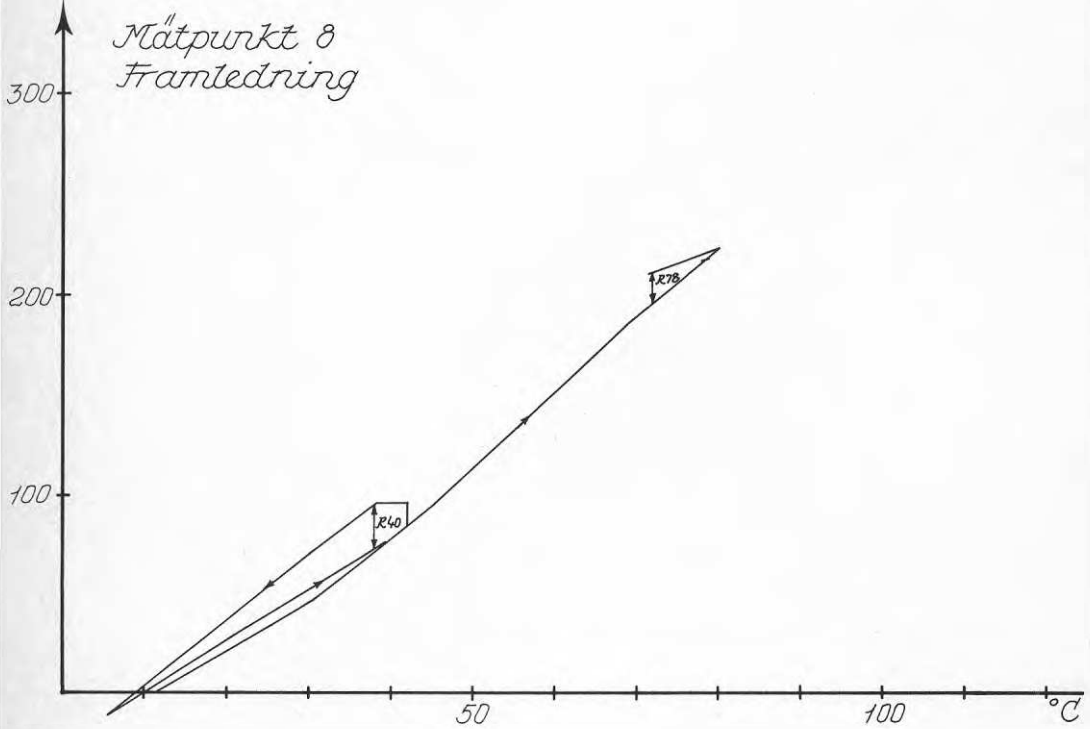
1:4

Mät punkt 7  
Framledning



$\Delta L, mm$

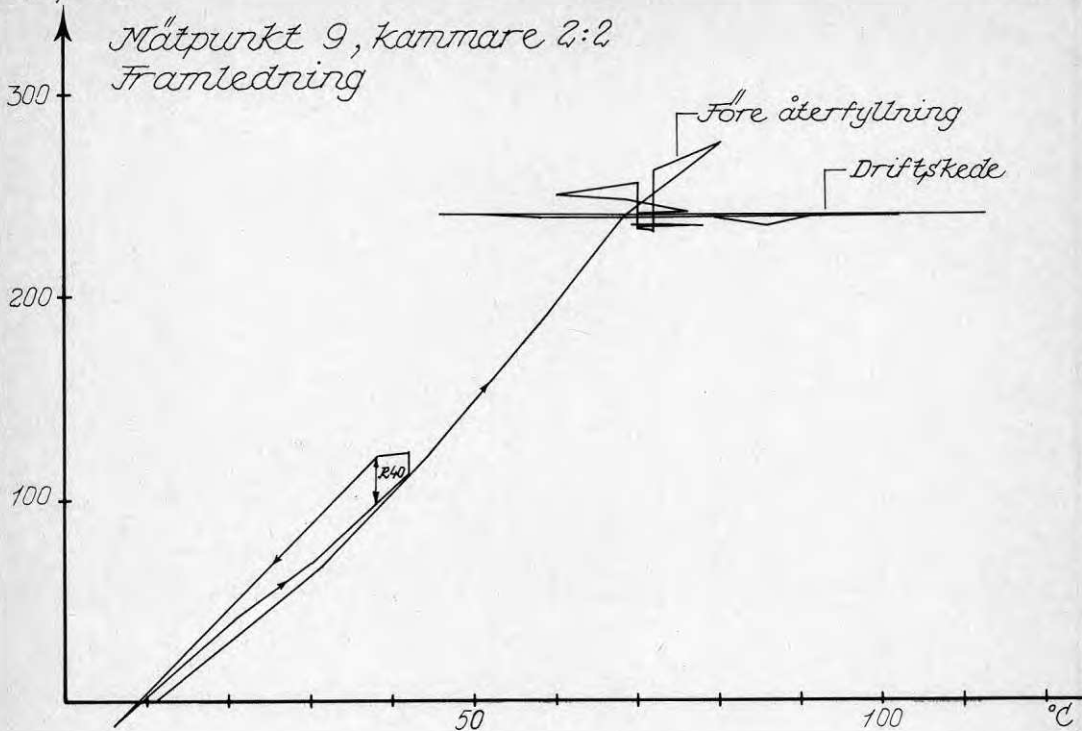
Mät punkt 8  
Framledning



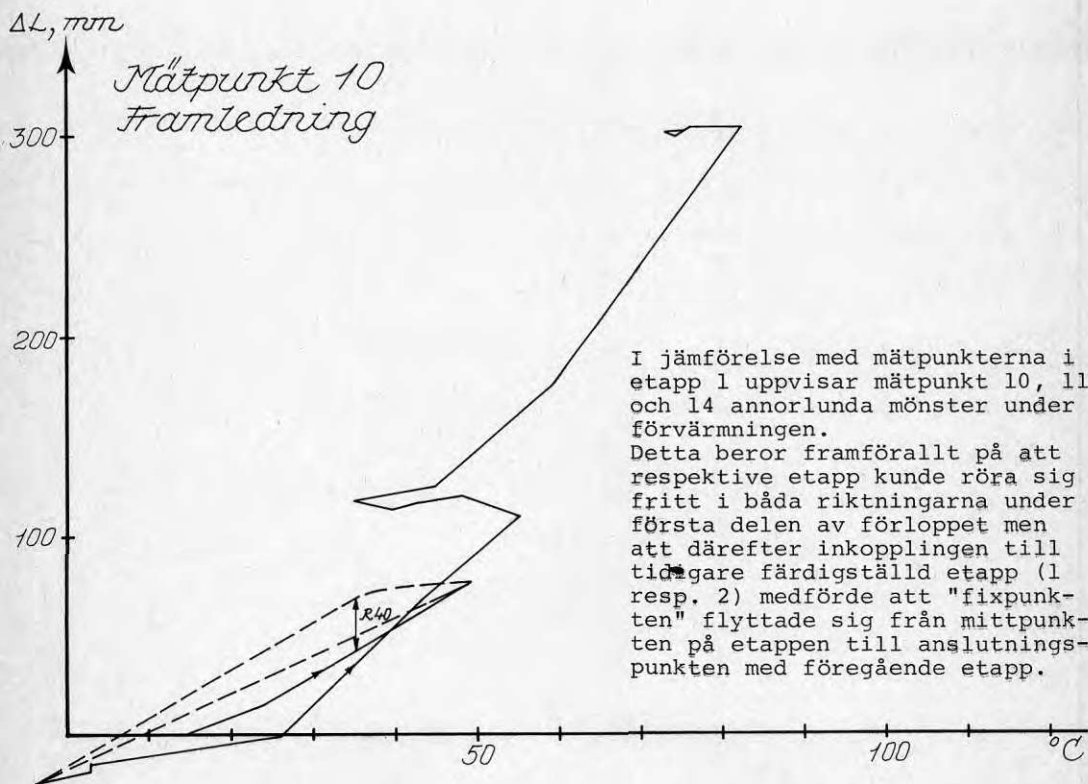
$\Delta L, mm$ 

1:5

Mätpunkt 9, kammare 2:2  
Framledning

 $\Delta L, mm$ 

Mätpunkt 10  
Framledning

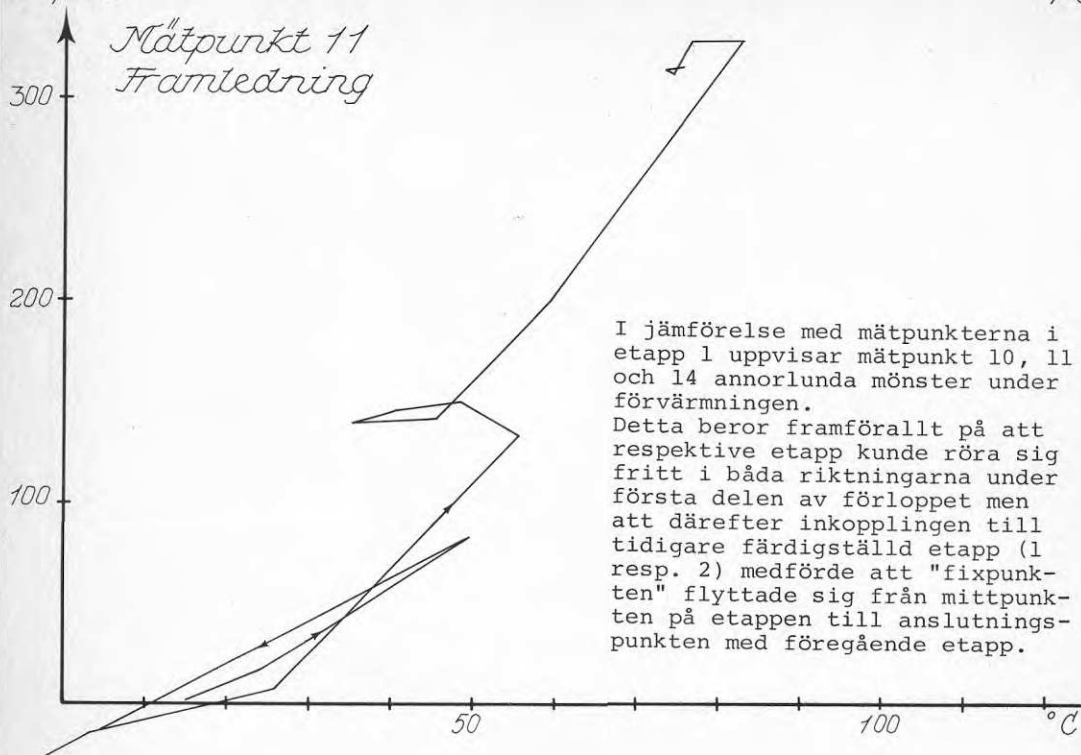


I jämförelse med mätpunkterna i etapp 1 uppvisar mätpunkt 10, 11 och 14 annorlunda mönster under förvärmningen.

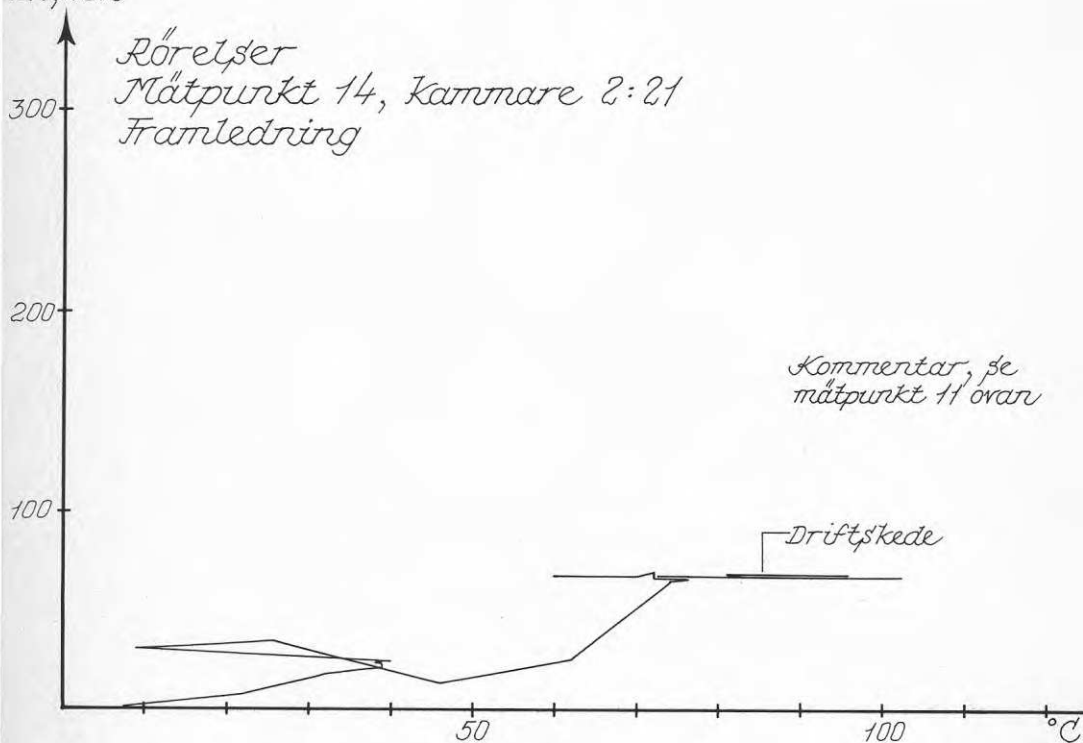
Detta beror framförallt på att respektive etapp kunde röra sig fritt i båda riktningarna under första delen av förloppet men att därefter inkopplingen till tidigare färdigställd etapp (1 resp. 2) medförde att "fixpunkten" flyttade sig från mittpunkten på etappen till anslutningspunkten med föregående etapp.

$\Delta L, mm$ 

Mätpunkt 11  
Framledning

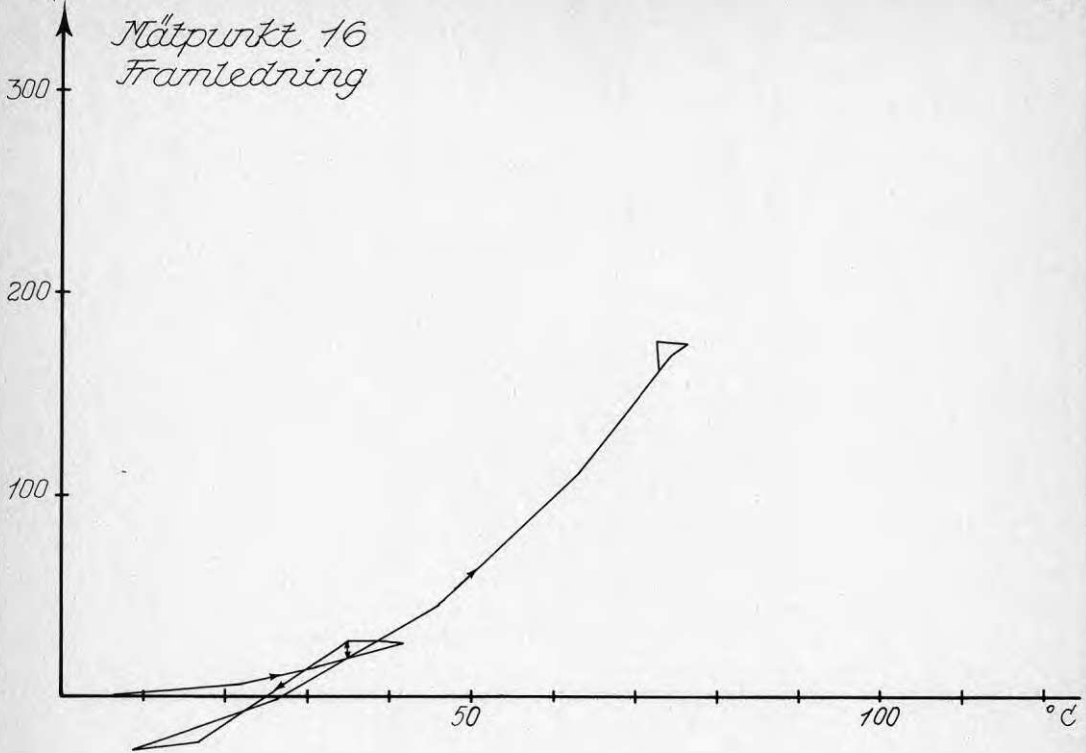
 $\Delta L, mm$ 

Rörelser  
Mätpunkt 14, Kammare 2:21  
Framledning



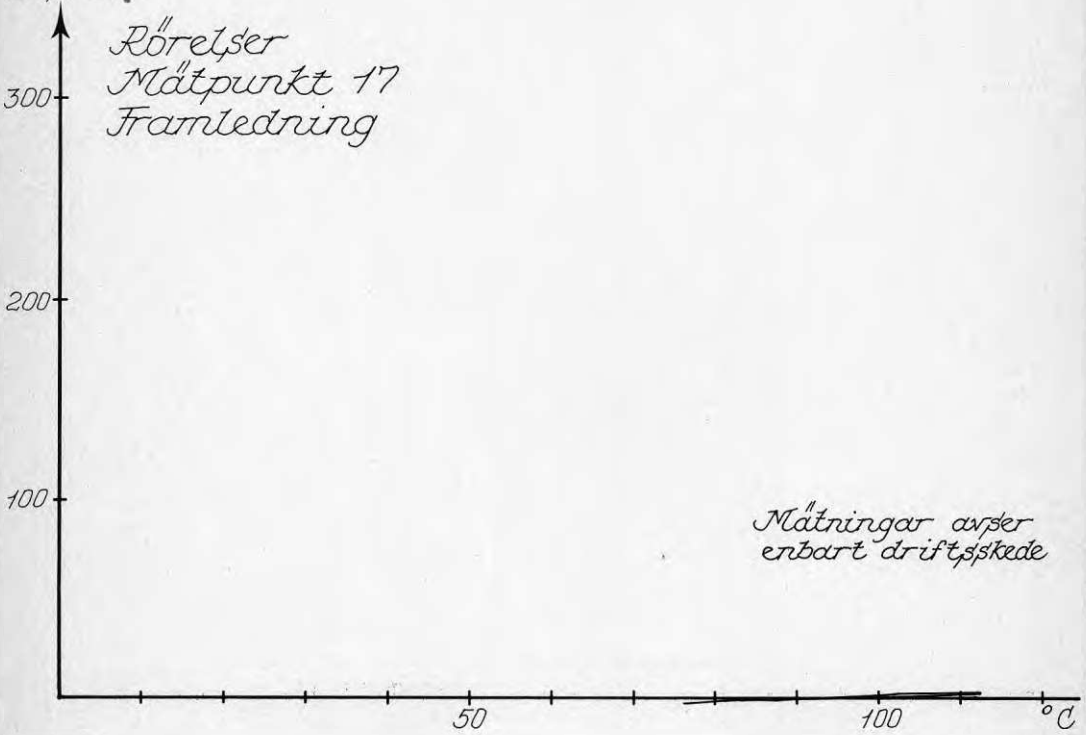
$\Delta L, mm$

Mät punkt 16  
Framledning



$\Delta L, mm$

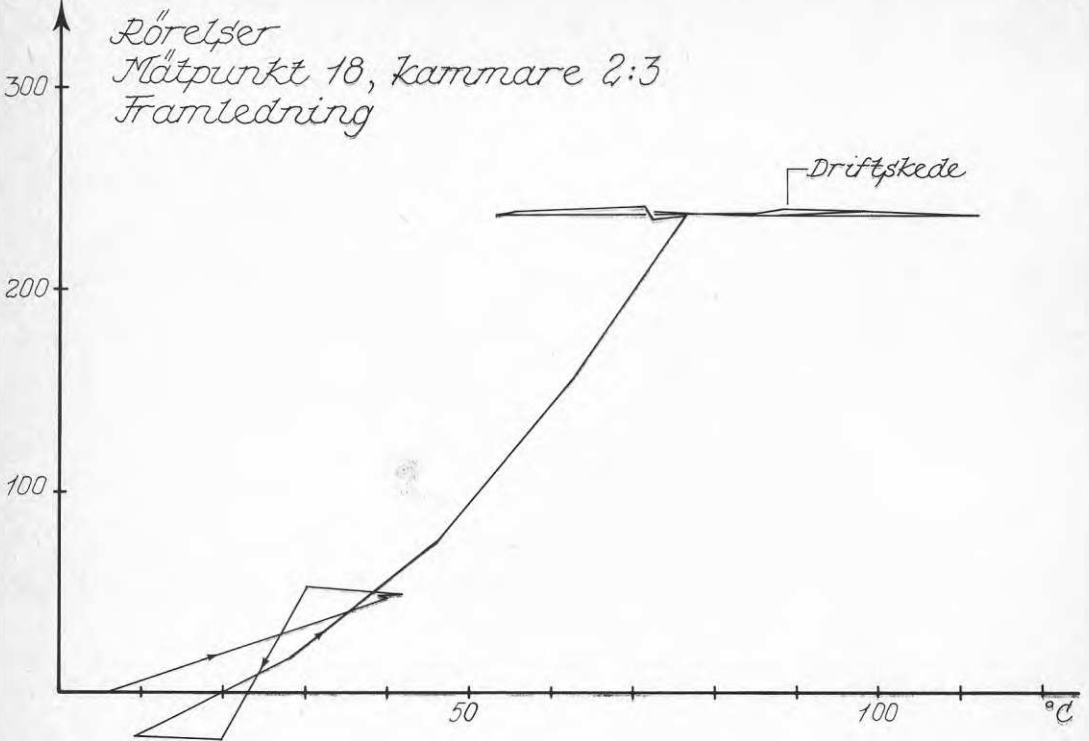
Rörelser  
Mät punkt 17  
Framledning



$\Delta L, mm$

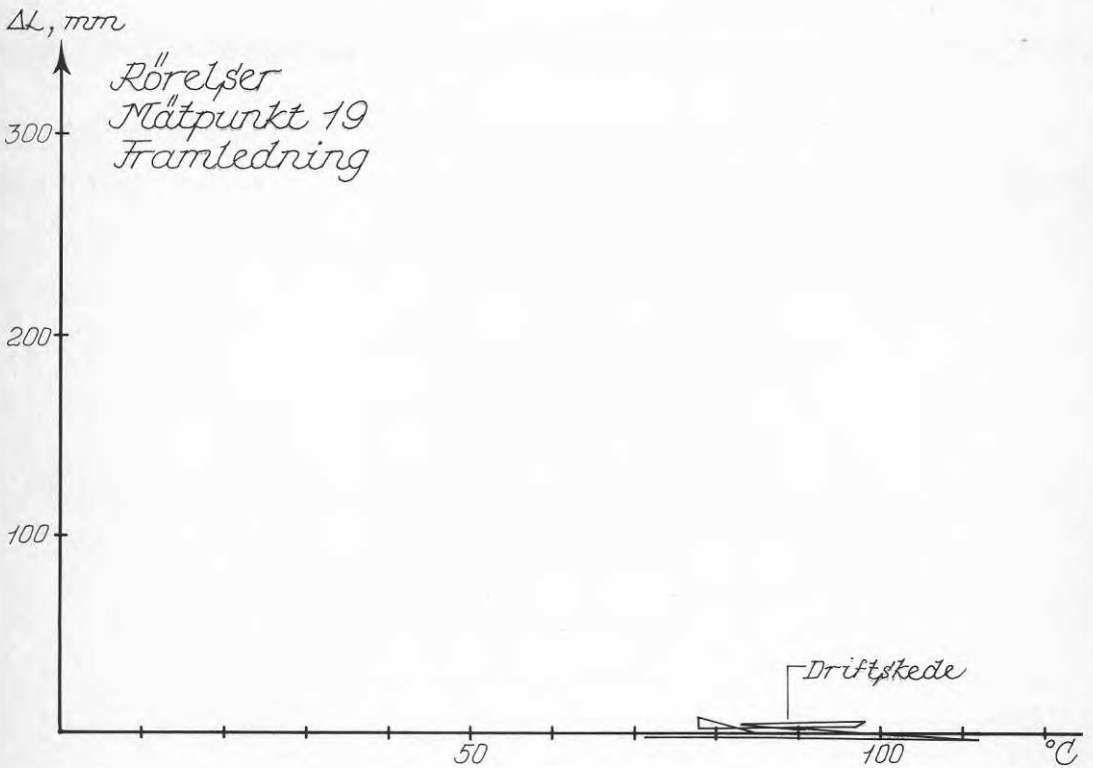
1:8

Rörelser  
Mät punkt 18, kammare 2:3  
Framledning



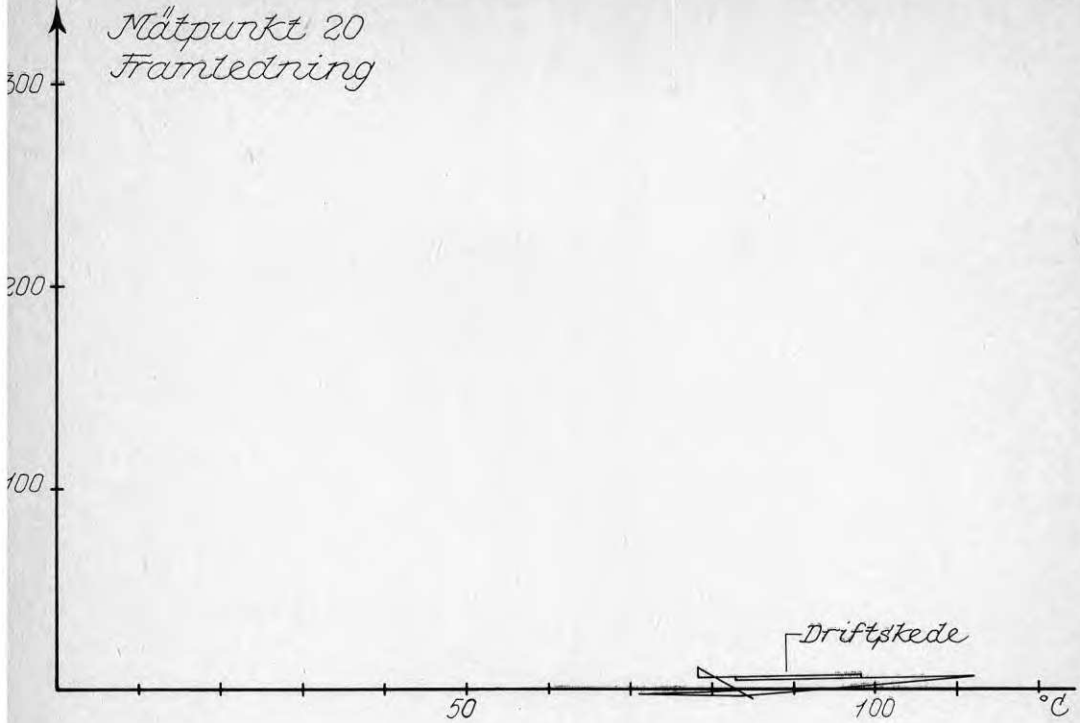
$\Delta L, mm$

Rörelser  
Mät punkt 19  
Framledning



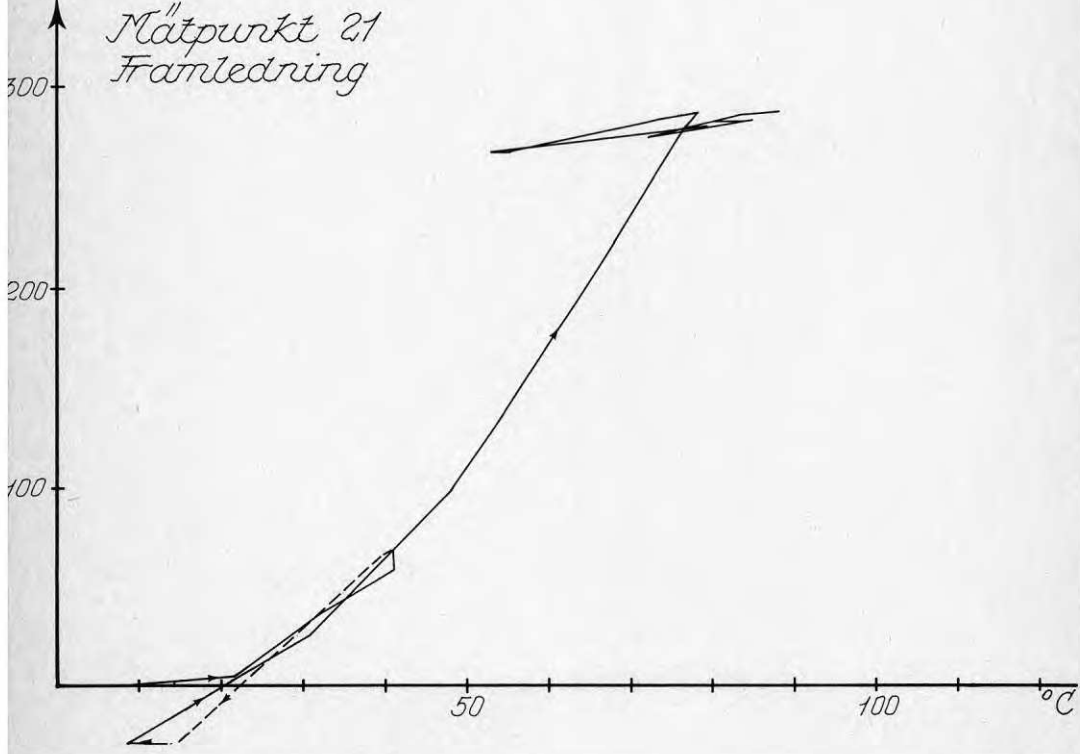
$\Delta L, mm$

Mät punkt 20  
Framledning



$\Delta L, mm$

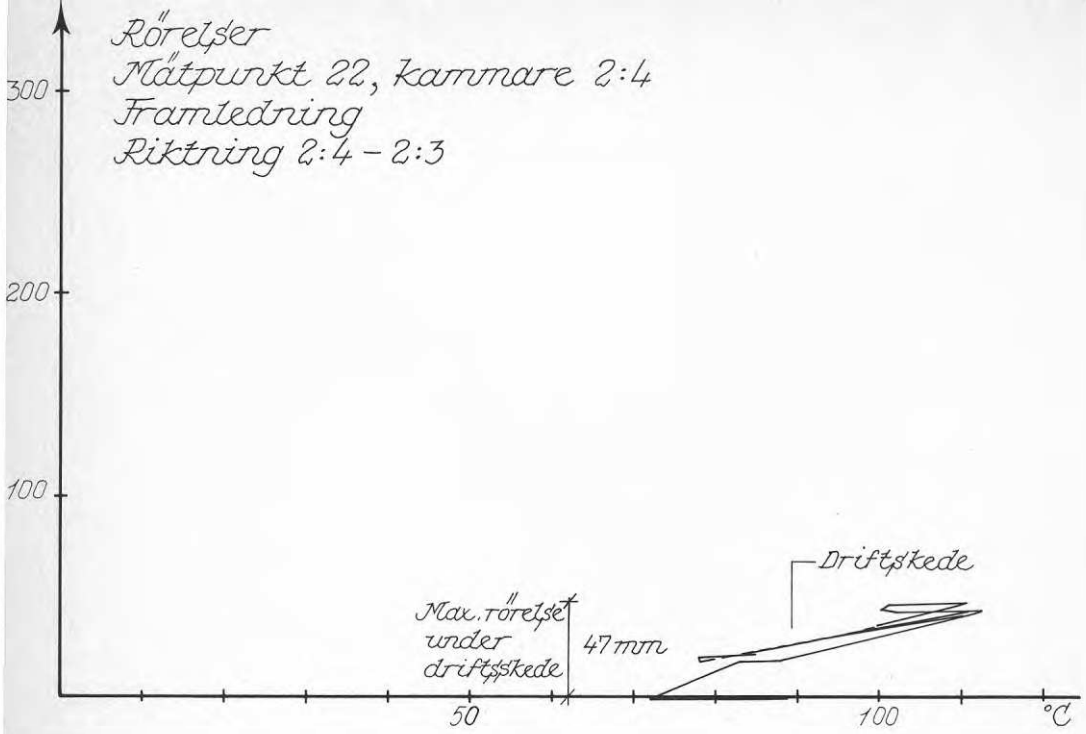
Mät punkt 21  
Framledning



$\Delta L, mm$

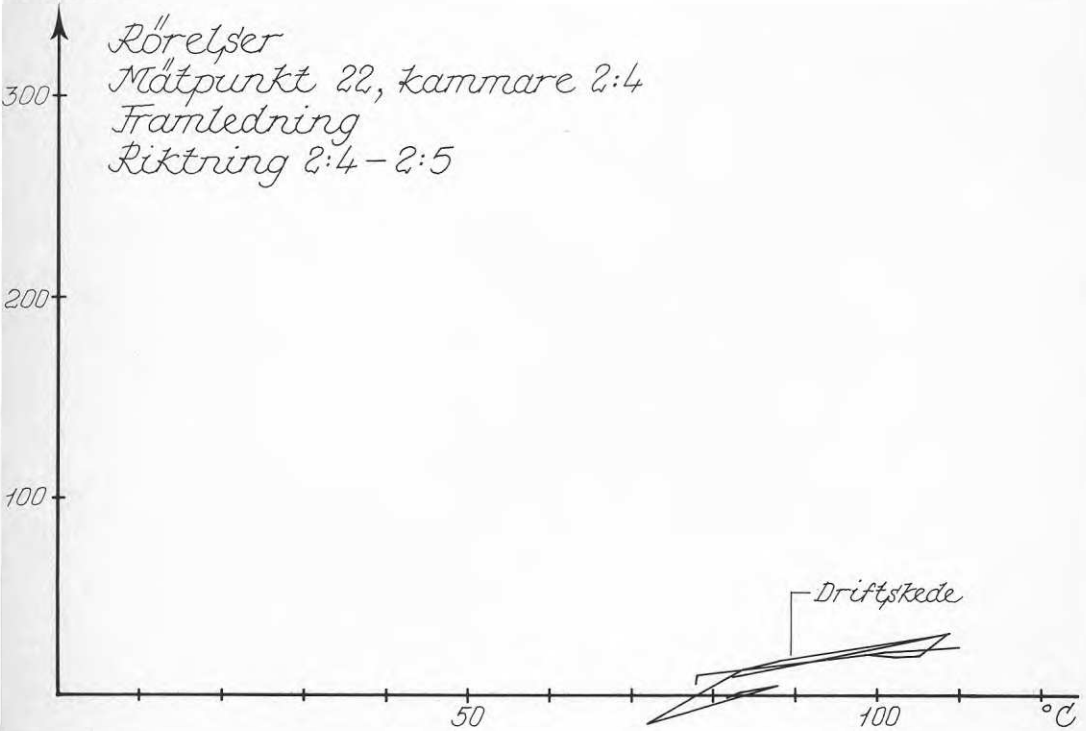
1:10

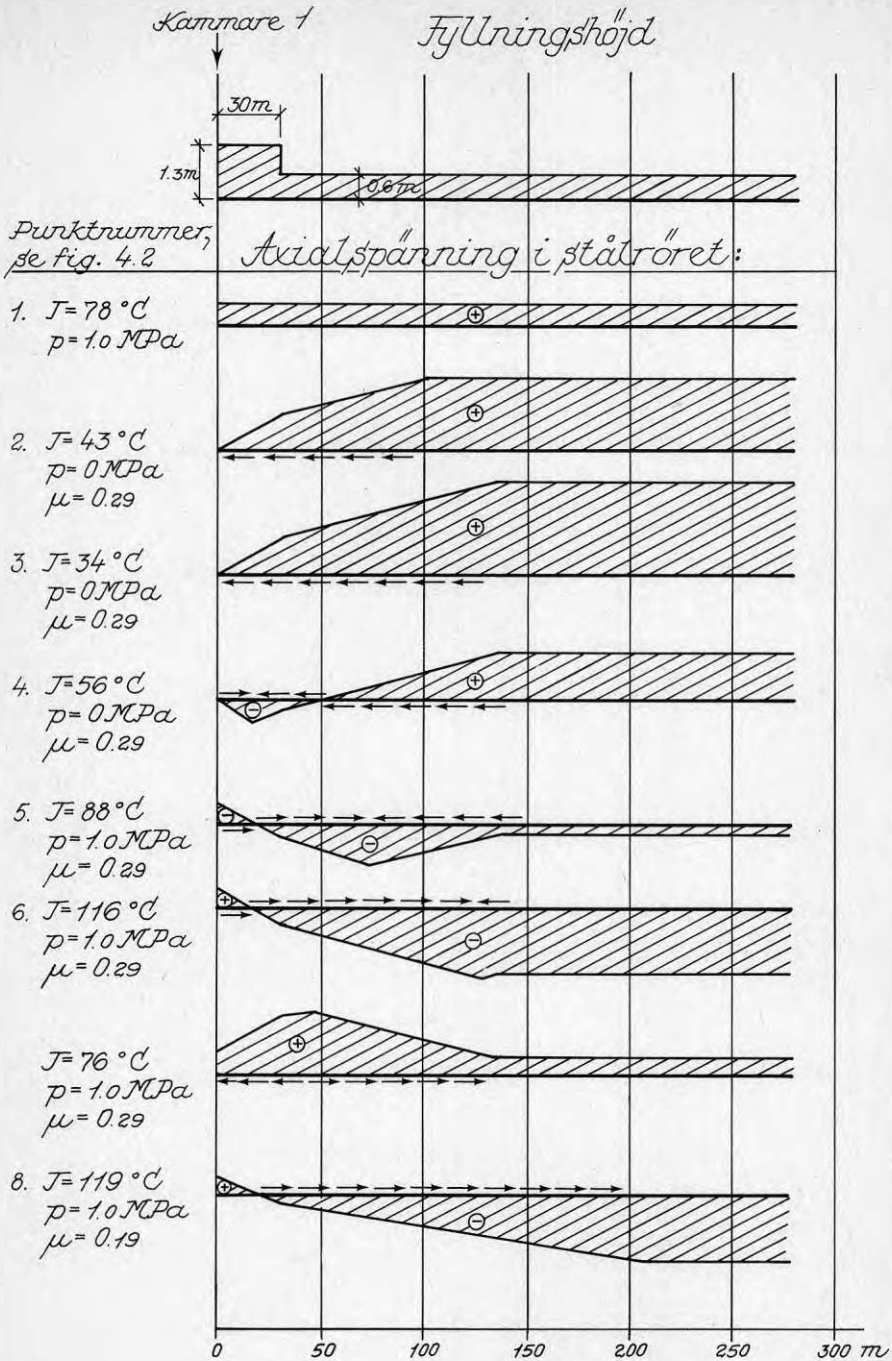
Rörelser  
Mät punkt 22, kammare 2:4  
Framledning  
Riktring 2:4 - 2:3



$\Delta L, mm$

Rörelser  
Mät punkt 22, kammare 2:4  
Framledning  
Riktring 2:4 - 2:5

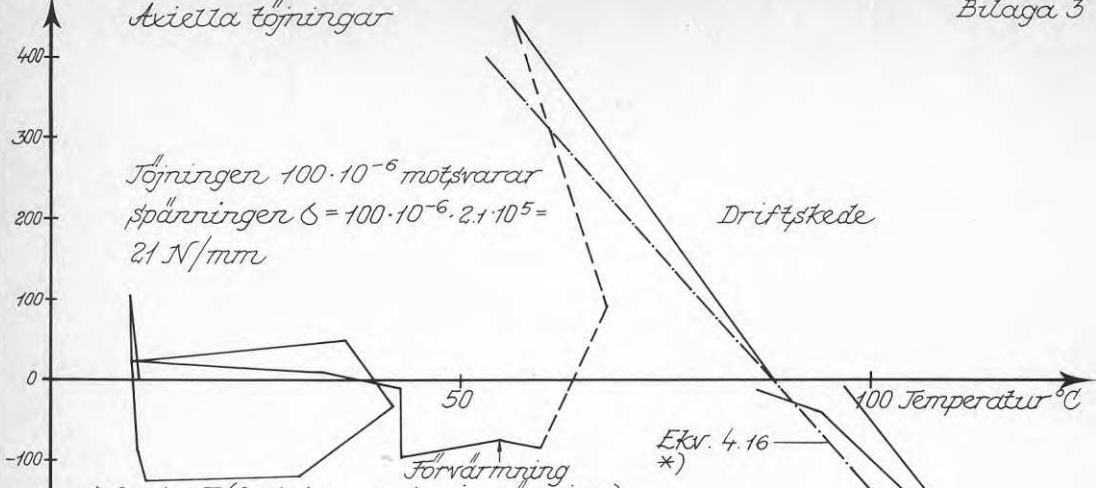




Beräknad fördelning av axiella spänningar vid olika temperaturer längs friktionssträckan vid kammare 1.

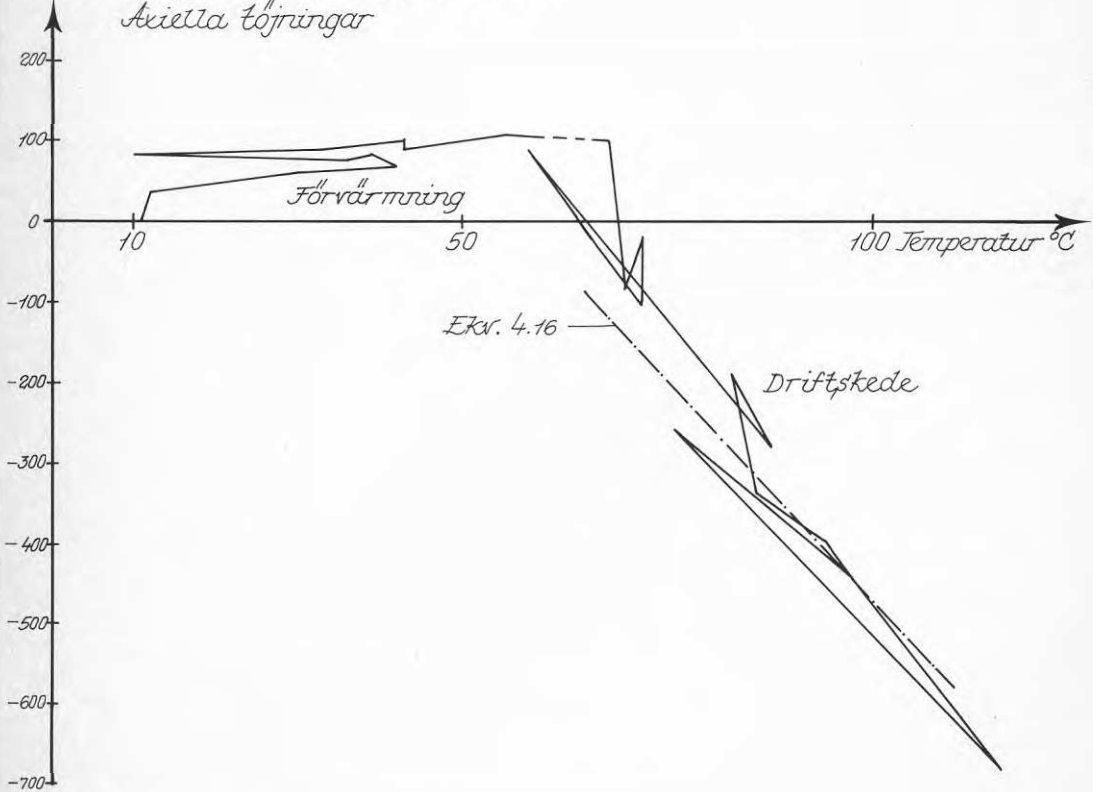


$\epsilon \cdot 10^6$  Mät punkt 4  
Axiala töjningar

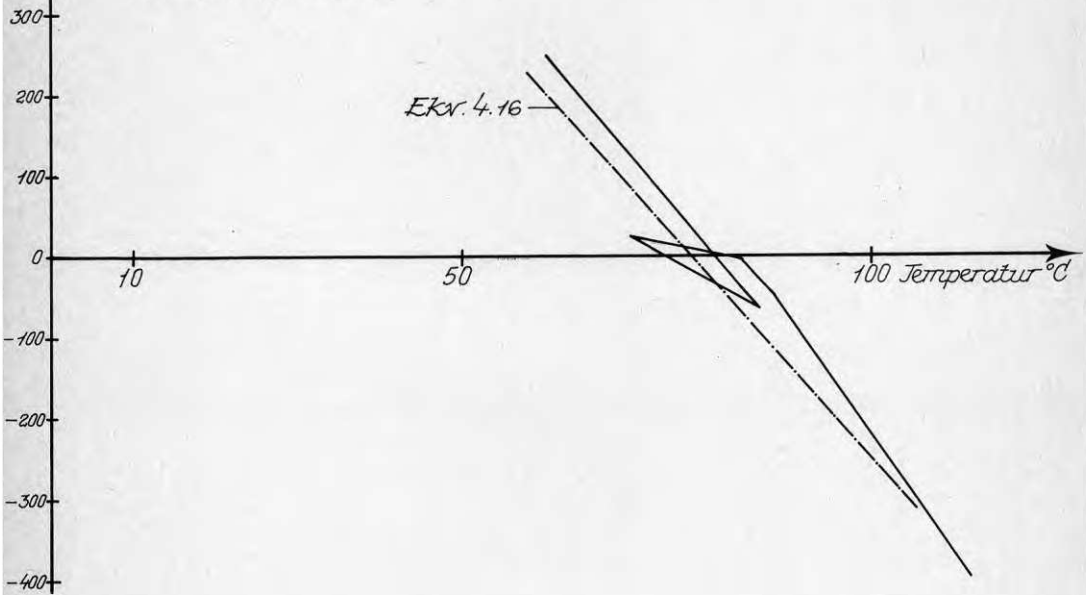


\*)  $\epsilon = \alpha \cdot \Delta T$  (fast temperaturinspänning)  
Lutningen mer intressant än skärningen av temperaturaveln som är mer osäker p.g.a krypning i töjningsgivare. Detta gäller för mät punkt 4 och 9 som installerades 9 månader innan driftskedet påbörjades. Övriga mät punkter installerades ca 1 mån. före driftskedet påbörjades. Därav följer också att skärningen av temperaturaveln ungefärligen sker vid förvärmningstemperaturen  $78^\circ\text{C}$ .

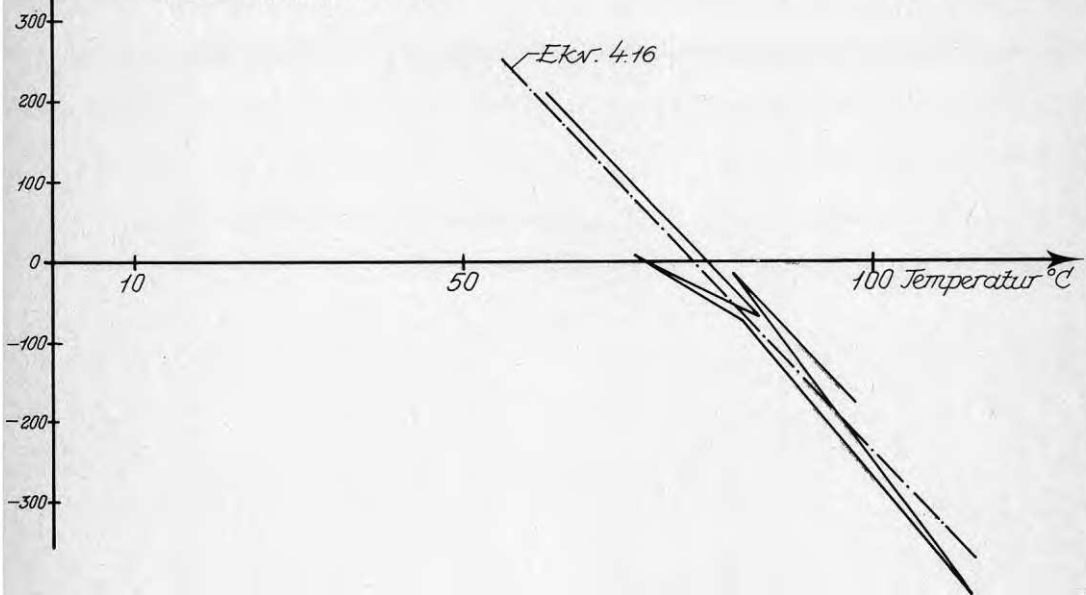
$\epsilon \cdot 10^6$  Mät punkt 9, Kammare 2:2  
Axiala töjningar

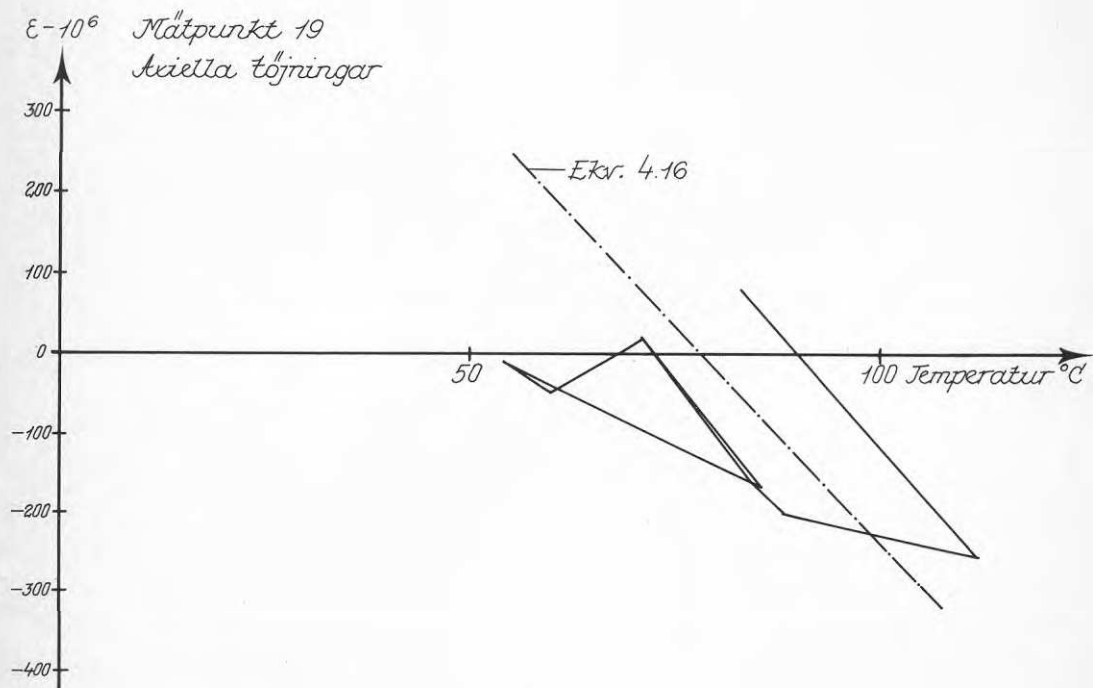
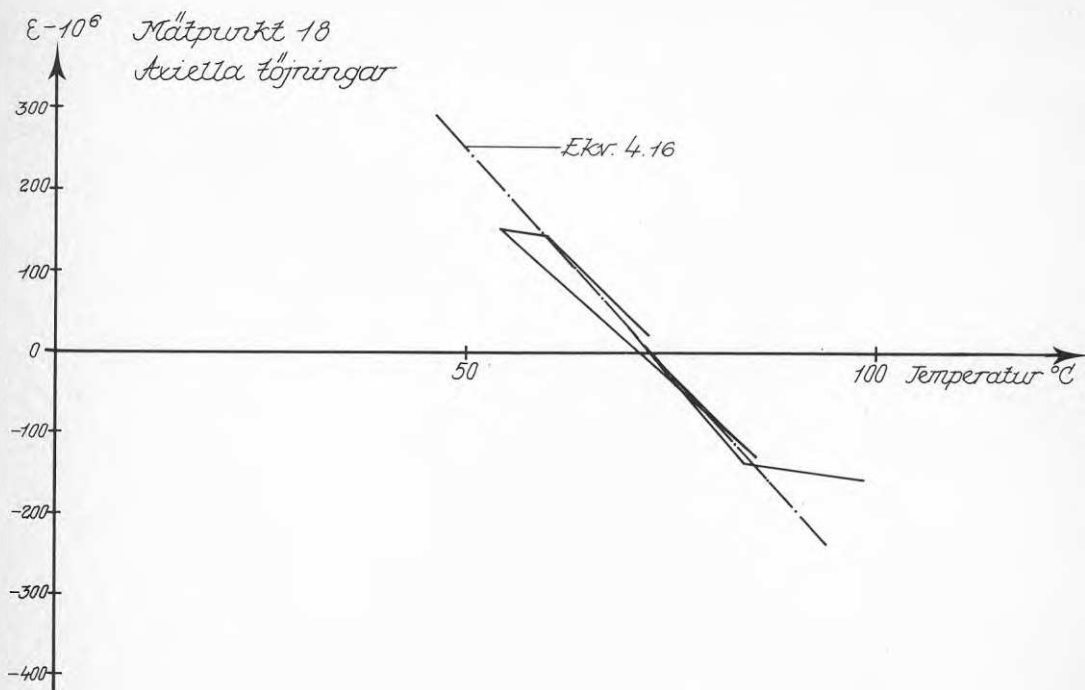


$\epsilon \cdot 10^6$  Mätpunkt 14  
Axiella töjningar

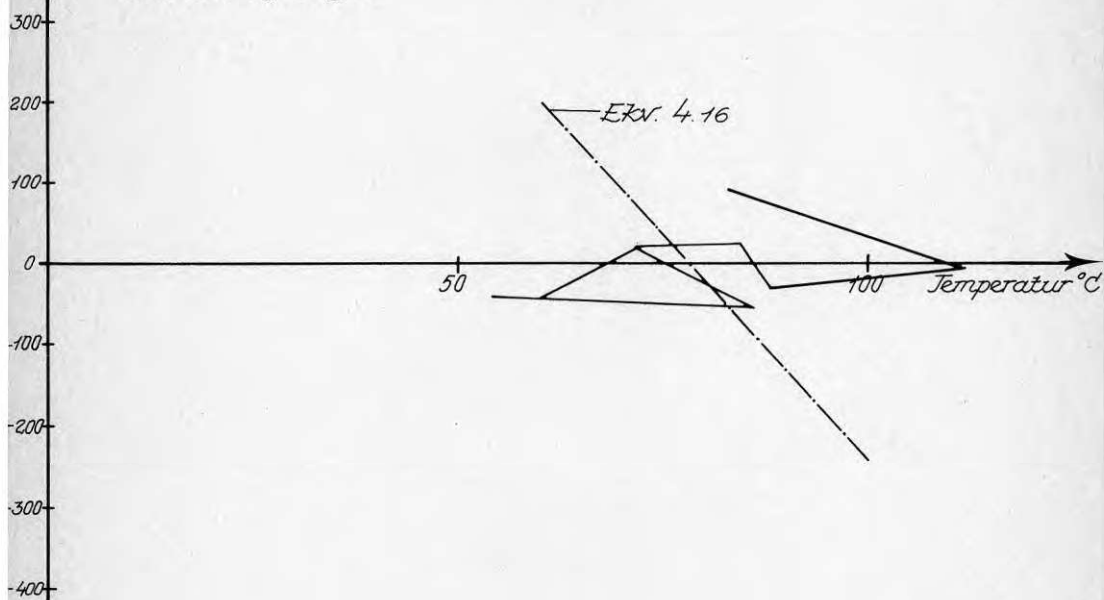


$\epsilon \cdot 10^6$  Mätpunkt 17  
Axiella töjningar



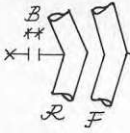


$\epsilon \cdot 10^6$  Mät punkt 20  
Axiella töjningar

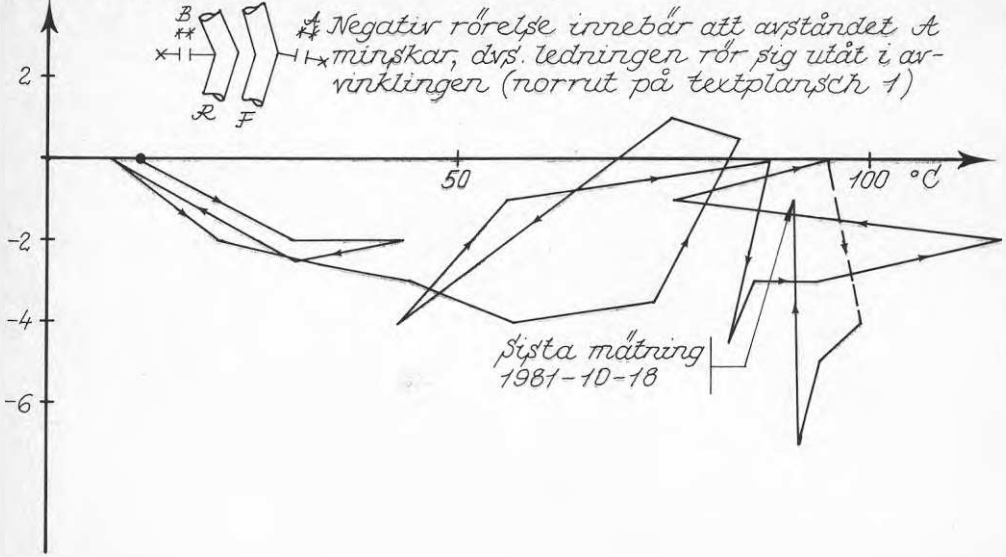


Framledning

Sidorörelse, mm



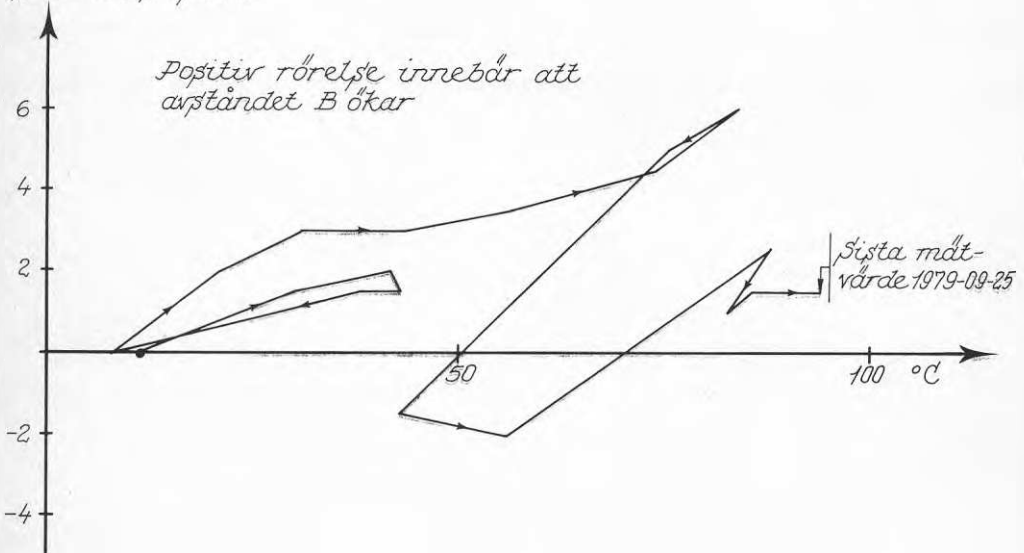
\* Negativ rörelse innebär att avståndet  $A$  minskar, dvs. ledningen rör sig utåt i avrinkingen (norrut på teckplansch 1)



Returledning

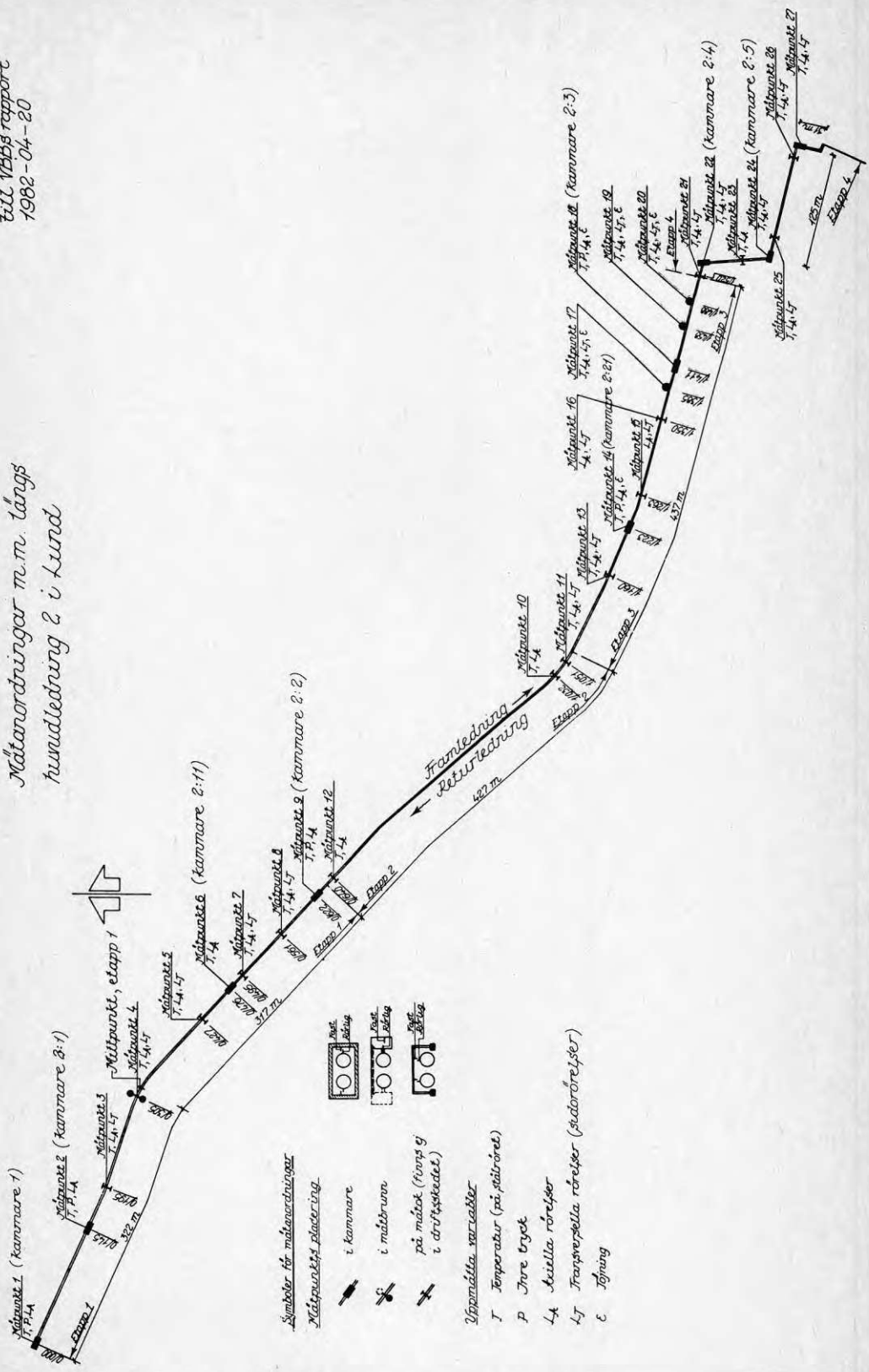
Sidorörelse, mm

Positiv rörelse innebär att avståndet  $B$  ökar



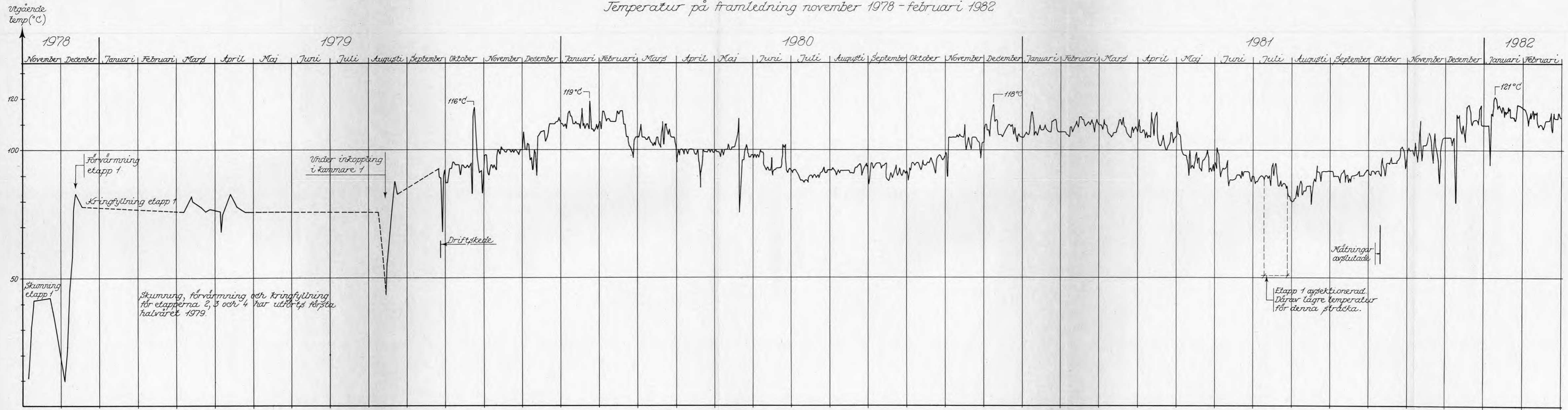
Textplanisch 1  
till VABs rapport  
1982-04-20

Mätanordningar m.m. längs  
hundledning 2 i Lund





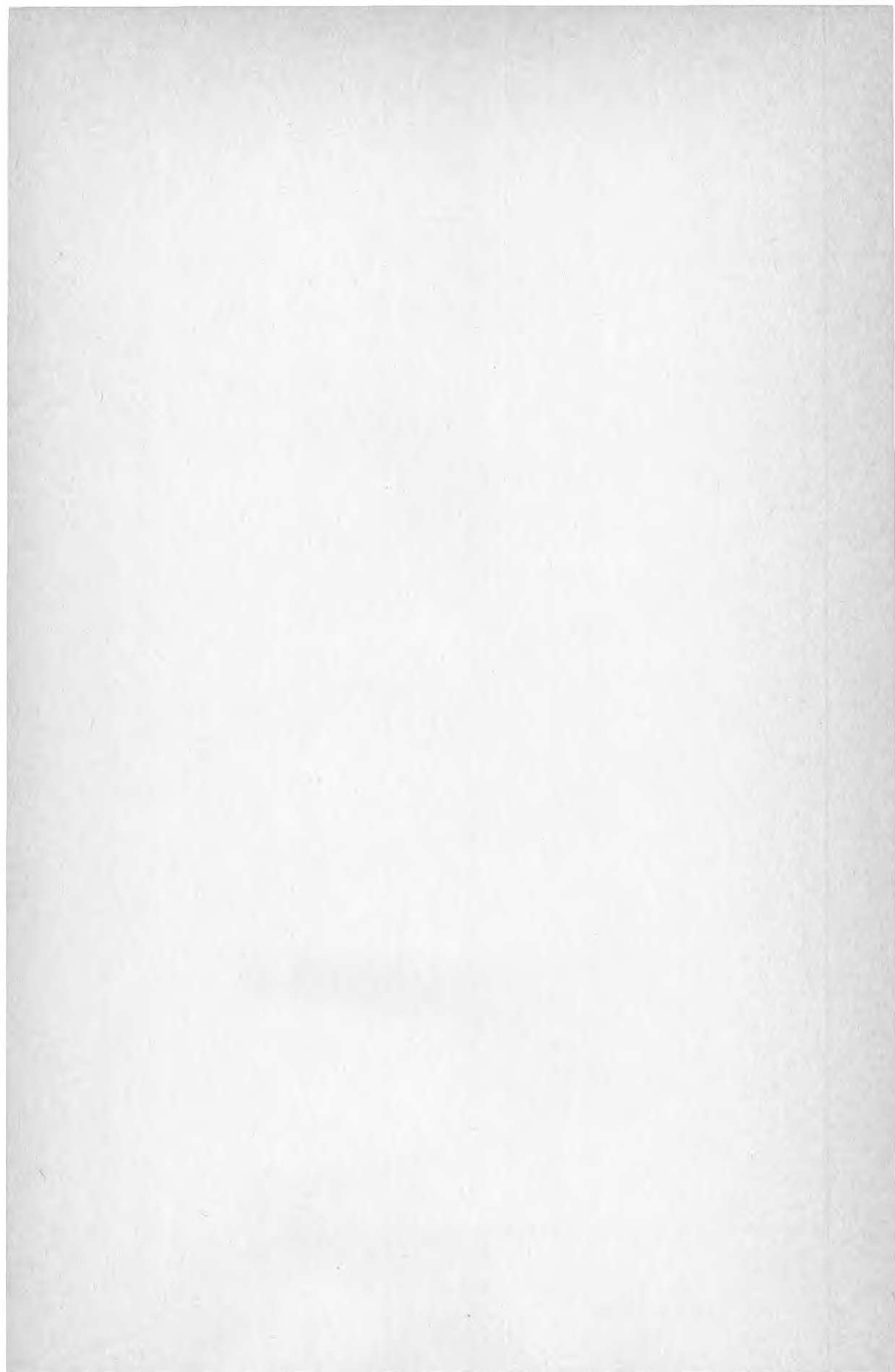
Temperatur på framledning november 1978 - februari 1982



Att:  
Temperaturen är uppmätt vid hetvattencentralen kl. 08<sup>00</sup> varje dag. Då ledning ej varit i drift har temperaturen uppmätts vid kammare 1.









Denna rapport hänför sig till forskningsanslag  
780633-3 från Statens råd för byggnadsforskning  
samt projektanslag E26 från Stiftelsen för  
värmeknisk forskning till VBB AB, Malmö.

**Art.nr: 6700584**

**Abonnemangsgrupp:  
W. Installationer**

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

**R84: 1982**

**ISBN 91-540-3747-6**

**Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm**

**Cirka pris: 30 kr exkl moms**