



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



**Rapport**

**R36:1975**

**Förenklade provningsme-  
toder för kvalitetskontroll  
av PEH-rör**

**Lars-Eric Janson  
Ingemar Björklund**

**Byggforskningen**

TEKNISKA HÖRSKOLEN I BILBY  
SEKTIONEN FÖR VATTEN- OCH VÄRME  
TEKNIK

# Förenklade provningsmetoder för kvalitetskontroll av PEH-rör

Lars-Eric Janson & Ingemar Björklund

## Sammanfattning

Föreliggande forskningsrapport utgör en sammanställning och en utvärdering av en serie industrifinansierade provningar av polyetenrör (PEH-rör), vars syfte varit att skapa underlag för förenklade metoder för kvalitetskontroll av PEH-rör. Provingarna har huvudsakligen omfattat tryckprovningar av PEH-rör, tillverkade av olika polyetenråvaror samt provningar av statistiskt belastade dragstavar, vilka uttagits ur rören.

## Bakgrund

Under senare hälften av 60-talet och början av 70-talet har PEH-rör börjat tillverkas i allt större dimensioner i de nordiska länderna. Den övre tillverkningsgränsen för ovan nämnda rör ligger i dag vid dimensionen  $\varnothing$  1 600 mm. Föreliggande svensk standard för PEH-rör bygger på internationell standard och föreskriver att PEH-rörens kvalitet skall bedömas på basis av provtryckningar vid  $+20^\circ\text{C}$  och  $+80^\circ\text{C}$ . Provtryckning av rörprover i enlighet med ovan nämnda standard kan utföras utan större problem för mindre rördimensioner ( $\varnothing \leq 400$  mm). Har rören större dimensioner blir tryckprovningen mycket dyrbar och praktiskt svår genomförbar. Mot bakgrund av att allt fler PEH-rör tillverkas i stora dimensioner har ett behov skapats av en förenklad provningsmetod, vilken innebär att tryckprovning av rören undviks.

## Avsikt

Vid Statens Provningsanstalt i Göteborg (f.d. Chalmers Provningsanstalt), Sintef i Trondheim samt Gränges Essem Plast i Porsgrunn, Norge, har under åren 1970–1973 en serie industrifinansierade provningar bedrivits, vars syfte varit att skapa ett underlag för en förenklad provningsmetod för kvalitetskontroll av PEH-rör.

Detta forskningsprojekts målsättning har varit att sammanställa och utvärdera de resultat som erhållits vid ovan nämnda undersökningar, i syfte att ge en sammanfattning av den kunskap som i dag finns vad gäller förenklade

provningsmetoder för kvalitetskontroll av PEH-rör.

## Metod

De ovan nämnda undersökningarna har omfattat tryckprovningar av PEH-rör, tillverkade av olika polyetenråvaror samt provningar av ett stort antal dragstavar, vilka uttagits ur rören. Dragstavarna har belastats med en konstant axialbelastning, varefter förlängningen i stavarna har uppmätts tills brott inträffat, fig. 1–2. I rören har under tryckprovningen diameterökningen på mitten av rörproven registrerats. Provingar har bedrivits vid  $+20$ ,  $40$ ,  $60$  och  $80^\circ\text{C}$ .

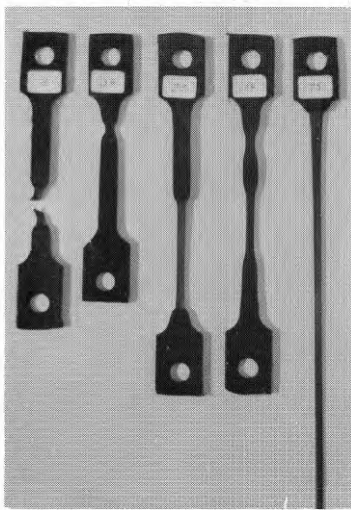


FIG. 1 Lokalflytningsbrott i provstavar av PEH-rör.

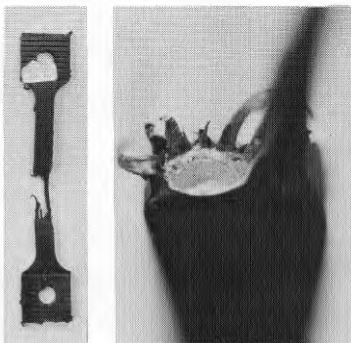


FIG. 2 Sprött brott i provstav av PEH-rör

# Byggforskningen Sammanfattningar

R36:1975

## Nyckelord:

polyetenrör, PEH-rör, provningsmetod, materialprovning

Rapport R36:1975 hänför sig till forskningsanslag 730198-8 från Statens råd för byggnadsforskning till Vattenbyggnadsbyrån, Stockholm.

UDK 620.17  
621.643.29  
SfB (52) IN 6  
ISBN 91-540-2456-0

## Sammanfattning av:

Janson, L-E, & Björklund, I, *Förenklade provningsmetoder för kvalitetskontroll av PEH-rör*. (Statens råd för byggnadsforskning) Stockholm. Rapport R36:1975, 129 s., ill. 23 kr+moms.

Rapporten är skriven på svenska med svensk och engelsk sammanfattning.

## Distribution:

Svensk Byggtjänst  
Box 1403, 111 84 Stockholm  
Telefon 08-24 28 60

Grupp: byggprojektering

varigenom ett omfattande material erhållits vad gäller såväl töjningsförlopp som brottider vid rör- och stavprovning.

### Resultat

Av de utförda undersökningarna framgår att töjningsstillväxten i rör och stavar av samtliga testade PEH-råvaror vid +20 °C uppvisar ett linjärt förlopp i ett dubbellogaritmiskt diagram för töjningar mindre än ca 10 %, fig. 3. Då töjningen överstiger detta värde börjar så småningom en lokal flytning (necking) att ske i materialet, vilket medför att töjningskurvorna antar en krökt form. Stavprovningarna har avbrutits när 50 % förlängning erhållits i dragstavarna, och detta värde på förlängningen i stavarna definierats som "segt brott".

Trots att rören och stavarna varit utsatta för olika belastningsfall har påfallande lika töjningskurvor erhållits för rören och stavarna, när rören provats under en-axligt spänningstillstånd, fig. 4. De sega brotten i rören inträffar emellertid tidigare än i stavarna. Tryckprovras rören under två-axligt spänningstillstånd erhålls en mindre diameterökning hos rörprovet än när provningen sker under en-axligt spänningstillstånd, fig 5. Dessutom inträffar de sega brotten i rören senare, vilket medför att ungefär samma brottider erhålls vid stav- och rörprovningen.

När stav- och rörprovningarna utförs vid förhöjd temperatur erhålls vid höga spänningsnivåer samma typ av töjningsförlopp som vid +20 °C. Dvs töjningskurvorna är rätlinjiga upp till ca 10 %-töjning och antar därefter en krökt form. Vid lägre spänningsnivåer är töjningskurvorna för rör och stavar rätlinjiga eller svagt konvext krökta, och vid dessa spänningsnivåer inträffar sprödbrott (stress-cracking) i materialet, fig. 6.

De utförda undersökningarna har visat att det med hjälp av den använda stavprovningemetoden är möjligt att särskilja olika PEH-rör ur kvalitetssynpunkt, fig. 7-8. Provningar av stavar som uttagits från rör av olika polyetenråvaror visar att stora skillnader i brottider erhållits för de olika stavarna, fig. 7. Detta gäller speciellt för låga spänningsnivåer vid +80 °C, där spröda brott inträffar i stavarna.

Tryckprovningar av rören, fig. 8, har givit likartade resultat som erhållits vid stavprovningarna. Skillnaderna mellan de uppmätta brottkurvorna för rören är störst inom den branta delen av kurvorna vid +80 °C. Dessutom kan observeras att samma inbördes ordning

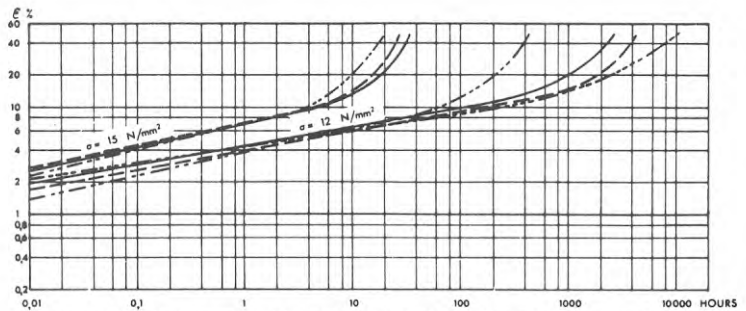


Fig.3 Töjningskurvor för statistiskt belastade provstavar av PEH

PIPE DIMENSIONS (mm)	200x18.2	200x18.2	400x36.4	400x33
TENSILE BAR ORIENTATION	LONGITUDINAL	LONGITUDINAL	LONGITUDINAL	LONGITUDINAL
TENSILE BAR DENSITY (kg/m³)	961	963	962	959
MELT INDEX MI <sub>5</sub> (g/10 min)	0.60	0.34	0.20	1.8
MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> (g/10 min)	16.2	12.6	10.2	21.4
FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub>	27	37	50	12
TEMPERATURE (°C)	+20	+20	+20	+20
ENVIRONMENT	WATER	WATER	AIR	WATER

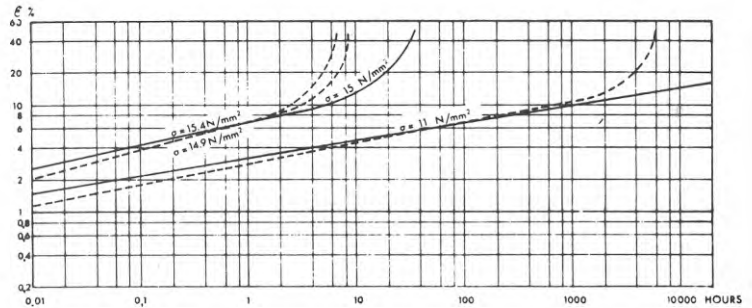


Fig.4 Töjning i PEH-rör resp. stavar

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX MI <sub>5</sub> :	0.60 g/10 min
ENVIRONMENT:	WATER	MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> :	16.2 g/10 min
TEMPERATURE:	20 °C	FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub> :	27
PIPE -----		TENSILE BAR -----	
STATE OF STRESS:	ONE-AXIAL	TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL
MEAN DENSITY:	959 kg/m³	TENSILE BAR DENSITY:	961 kg/m³

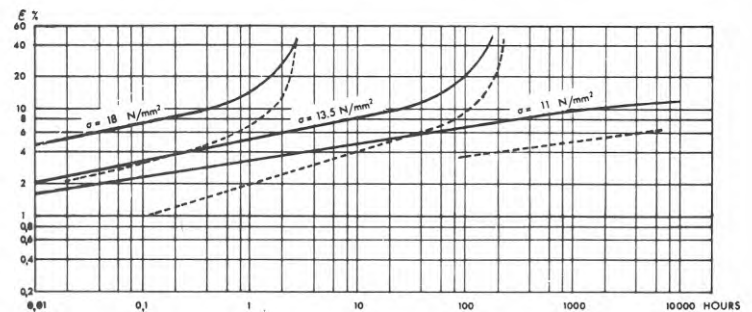


Fig.5 Töjning i PEH-rör resp. stavar

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX MI <sub>5</sub> :	0.34 g/10 min
ENVIRONMENT:	WATER	MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> :	12.6 g/10 min
TEMPERATURE:	+20 °C	FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub> :	37
PIPE -----		TENSILE BAR -----	
STATE OF STRESS:	BI-AXIAL	TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL
MEAN DENSITY:	961 kg/m³	TENSILE BAR DENSITY:	963 kg/m³



föreligger mellan de olika brottkurvorna för rören och stavarna inom detta område. Ovannämnda förhållande gäller under förutsättning att rören tryckprovats under en-axligt spänningstillstånd. Tryckprovas rören med två-axligt spänningstillstånd erhålls en flackare lutning på brottkurvan vid + 80 °C, fig. 8.

Vid de utförda provningarna har längre brottider erhållits för stavarna än för rören, fig. 9. Speciellt stora skillnader har härvid uppmäts vid de spänningsnivåer där sprödbrott inträffar (den branta delen av brottkurvan). Dessa skillnader i brottider kan antas bero på ett flertal faktorer som t.ex. inbyggda termiska spänningar i rören, skillnader i ytstruktur hos rör och stav, fleraxligt spänningstillstånd i rören m.m. Det torde vara möjligt att medelst något accelerationsförfarande förkorta brottiderna för stavarna, så att provningstiderna för dessa kan hållas lika korta som för rören. Fortsatt forskningsarbete bör sålunda i första hand inriktas mot brottmekaniska studier av dragstavar försedda med olika typer av brottanvisningar (notch-effekter).

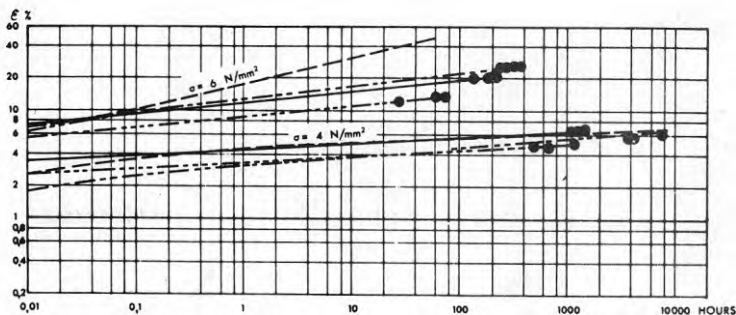


Fig. 6 Töjningskurvor för statistiskt belastade provstavar av PEH

PIPE DIMENSIONS (mm)	200x18.2	200x18.2	200x18.2	400x33
TENSILE BAR ORIENTATION	LONGITUDINAL	LONGITUDINAL	LONGITUDINAL	LONGITUDINAL
TENSILE BAR DENSITY (kg/m <sup>3</sup> )	961	963	961	959
MELT INDEX MI <sub>5</sub> (g/10 min)	0.60	0.34	0.21	1.8
MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> (g/10 min)	16.2	12.6	9.9	21.4
FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub>	27	37	47	12
TEMPERATURE (°C)	+ 80	+ 80	+ 80	+ 80
ENVIRONMENT	WATER	WATER	WATER	WATER

● STRESS-CRACKING FAILURE

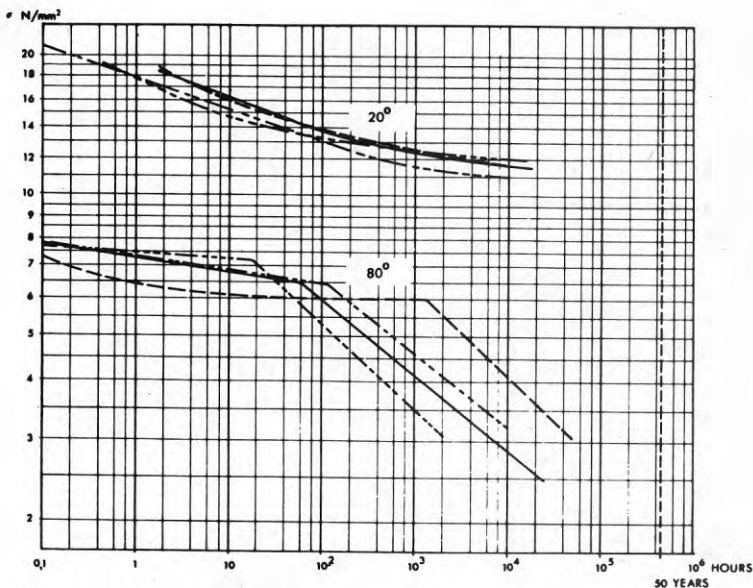


Fig. 7 Brottkurvor för statistiskt belastade provstavar av PEH

RAW MATERIAL	DENSITY	MELT INDEX MI <sub>5</sub>
—————	B 961	0.60
-----	C 963 (958)	0.34
-----	A 961-962	0.21
-----	D 959	1.8

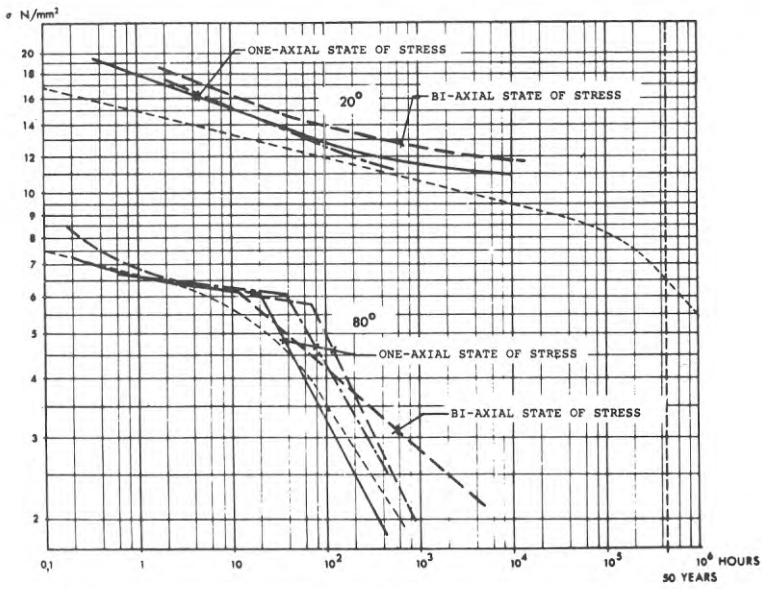


Fig. 8 Brottkurvor för PEH-rör belastade av invändigt tryck

	MI <sub>5</sub>	MEAN DENSITY
—————	0.60	959
- - - - -	0.34	961
- · - · -	0.21	959

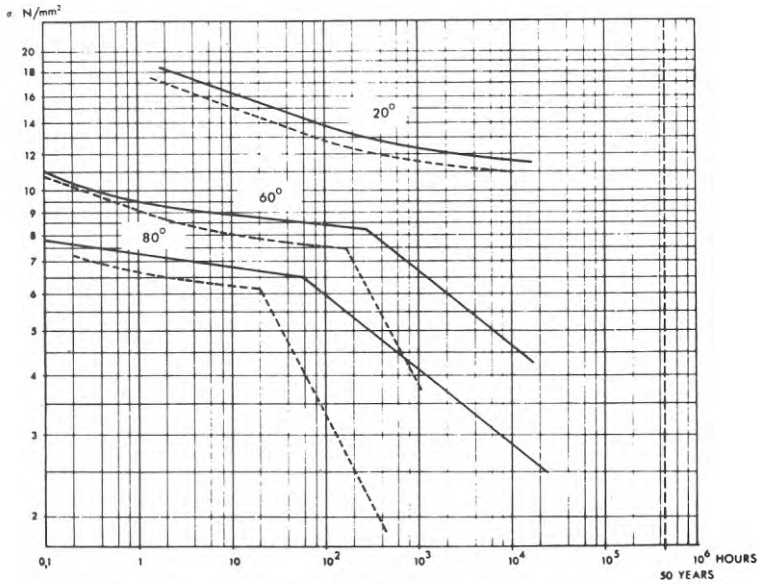


Fig. 9 Brottkurvor för PEH-rör resp. provstavar

—————	TENSILE BAR	MELT INDEX MI <sub>5</sub> = 0.60 g/10 min.
- - - - -	PIPE (ONE-AXIAL STATE OF STRESS)	

# Simplified test methods for the quality control of HDPE pipes

Lars-Eric Janson & Ingemar Björklund

## Swedish Building Research Summaries

R36:1975

*This research report is a compilation and evaluation of the results of a series of tests on HDPE pipes, financed by the industry, the object of which was to provide material for simplified methods for the quality control of HDPE pipes. The work mainly comprised internal hydrostatic pressure testing of HDPE pipes made from different polythene raw materials and static loading of tensile bars taken from the pipes.*

### Background

During the latter half of the sixties and the beginning of the seventies, HDPE pipes were made in increasingly larger dimensions in the Nordic countries. The present maximum diameter of these pipes is 1600 mm. Current Swedish Standards for HDPE pipes are based on international standards and prescribe that the quality of HDPE pipes is to be assessed on the basis of resistance to internal hydrostatic pressure at +20 °C and +80 °C. Hydrostatic testing of pipes in conformity with the above standards can be carried out without major difficulties in the case of small pipe dimensions ( $\varnothing \leq 400$  mm), but testing is very expensive and difficult to carry out in practice when the dimensions are large. In view of the fact that more and more HDPE pipes are made in large dimensions, there is a need for a simplified test method which makes frequent internal hydrostatic pressure testing of pipes unnecessary.

### Object

At Statens Provningsanstalt, National Authority for Testing, Inspection and Metrology at Gothenburg (previously Chalmers Provningsanstalt), Sintef at Trondheim and Gränges Essem Plast at Porsgrunn, Norway, a series of tests, financed by the industry, were performed over the period 1970–73 with the object of providing basis for simplified test methods for the quality control of HDPE pipes.

The aim of this research project was to compile and evaluate the results obtained in these investigations, in order to provide a review of the knowledge available at present concerning simplified test methods for the quality control of HDPE pipes.

### Method

The above investigations comprised in-

ternal hydrostatic pressure tests on HDPE pipes made from different polythene raw materials and tests on a large number of tensile bars taken from the pipes. The bars were subjected to a constant axial load, and the elongation of the bars was measured until failure occurred, FIGs. 1–2. In the case of the pipes, the increase in diameter at the centre of the pipe was recorded during the hydrostatic test. Tests were performed at +20, 40, 60 and 80 °C, and extensive data were thus obtained concerning the elongation process and the time to failure for both the pipes and test bars.

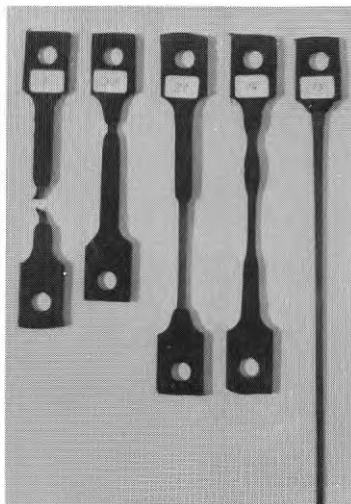


FIG. 1 Necking failure in tensile bars of HDPE

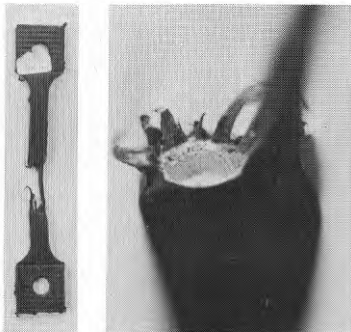


FIG. 2 Stress-cracking failure in tensile bar of HDPE

### Key words:

polythene pipes, HDPE pipes, test method, materials testing.

Report R36:1975 refers to research grant 730198-8 from the Swedish Council for Building Research to Vattenbyggnadsbyrån, Stockholm.

UDC 620.17  
621.643.29  
SfB (52) IN 6  
ISBN 91-540-2456-0

### Summary of:

Janson, L-E, & Björklund, I, *Förenklade provningsmetoder för kvalitetskontroll av PEH-rör*. Simplified test methods for the quality control of HDPE pipes. (Statens råd för byggnadsforskning) Stockholm. Report R36:1975, 129 p., ill. Kr 23.

The report is in Swedish with Swedish and English summaries.

### Distribution:

Svensk Byggtjänst,  
Box 1403, S-111 84 Stockholm  
Sweden

## Results

It is evident from the investigation results that the increase in elongation in both pipes and tensile bars, for all HDPE raw materials tested at +20 °C, is linear for elongations less than about 10 % when plotted in a double-logarithmic diagram, FIG. 3. When the elongation exceeds this figure, local yield (necking) gradually develops in the material, with the result that the elongation curves begin to assume a curved shape. The tests on the tensile bars were terminated when elongation reached 50 %, and this value of the elongation in the bars was defined as ductile failure.

In spite of the fact that the pipes and bars were subjected to different loading conditions, the elongation curves obtained for the pipes and bars were evidently similar when the pipes were tested in a uniaxial state of stress, FIG. 4. However, ductile failure in the pipes occurs earlier than in the bars. If the pipes are tested in a biaxial state of stress, the increase in diameter in the pipe tested is less than when testing takes place in a uniaxial state of stress, FIG. 5. In addition, ductile failure in the pipes occurs later, with the result that approximately the same times to failure are obtained for both bars and pipes.

When bar and pipe tests are performed at elevated temperatures, the same type of elongation curve is obtained at high stress levels as at +20 °C, i.e. the elongation curves are linear up to about 10 % elongation and then assume a curved shape. For lower levels of stress the strain curves for both pipes and bars are linear or slightly convex, and at these stress levels brittle failure (stress cracking) occurs in the material, FIG. 6.

The investigations have shown that the bar testing method makes it possible to distinguish between different HDPE pipes from the point of view of quality, see FIGS. 7-8. Tests on bars taken from pipes made from different polythene raw materials show that there are large differences in times to failure for the different bars, FIG. 7. This is particularly the case for low stress levels at +80 °C when brittle failure occurs in the bars.

Internal hydrostatic pressure testing of the pipes, FIG. 8, yielded results similar to those in the bar tests. The largest differences between the failure curves for pipes occur in the steep portion of the curves at +80 °C. It can also be noted that there is the same relationship between the different failure curves for the pipes and bars in this region. This is valid on condition that the pipes are subjected to internal pressure in a uniaxial state of stress. If testing is carried out in a biaxial state of stress, the failure curve at +80 °C has a flatter slope, see FIG. 8.

In the tests, longer times to failure

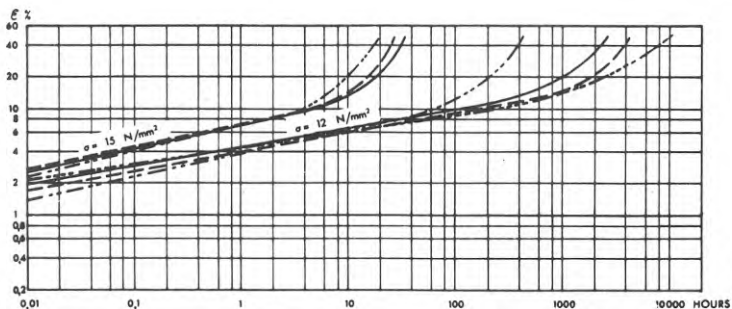


FIG 3 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS (mm)	200x18.2	200x18.2	400x36.4	400x33
TENSILE BAR ORIENTATION	LONGITUDINAL	LONGITUDINAL	LONGITUDINAL	LONGITUDINAL
TENSILE BAR DENSITY (kg/m <sup>3</sup> )	961	963	962	959
MELT INDEX MI <sub>5</sub> (g/10 min)	0.60	0.34	0.20	1.8
MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> (g/10 min)	16.2	12.6	10.2	21.4
FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub>	27	37	50	12
TEMPERATURE (°C)	+20	+20	+20	+20
ENVIRONMENT	WATER	WATER	AIR	WATER

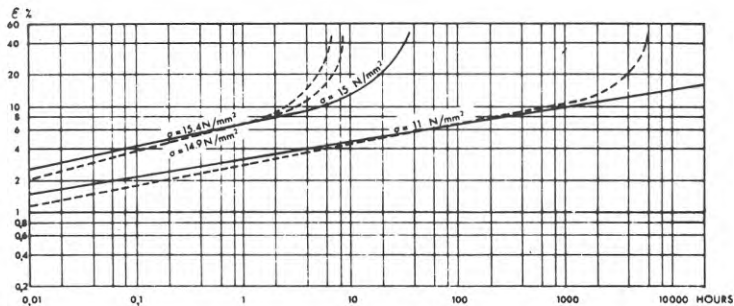


FIG 4 ELONGATIONS IN HDPE PIPES AND TENSILE BARS

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX MI <sub>5</sub> :	0.60 g/10 min
ENVIRONMENT:	WATER	MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> :	16.2 g/10 min
TEMPERATURE:	20 °C	FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub> :	27
PIPE -----		TENSILE BAR -----	
STATE OF STRESS:	ONE-AXIAL	TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL
MEAN DENSITY:	959 kg/m <sup>3</sup>	TENSILE BAR DENSITY:	961 kg/m <sup>3</sup>

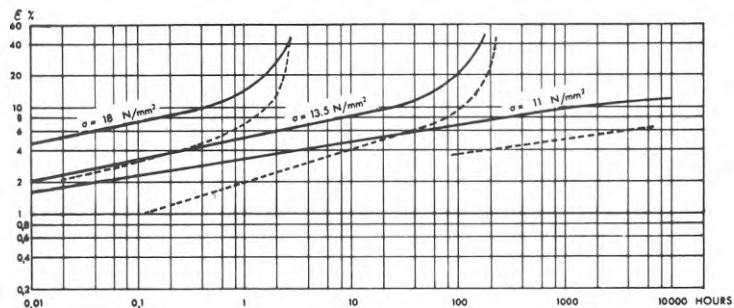


FIG 5 ELONGATIONS IN HDPE PIPES AND TENSILE BARS

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX MI <sub>5</sub> :	0.34 g/10 min
ENVIRONMENT:	WATER	MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> :	12.6 g/10 min
TEMPERATURE:	+20 °C	FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub> :	37
PIPE -----		TENSILE BAR -----	
STATE OF STRESS:	BI-AXIAL	TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL
MEAN DENSITY:	961 kg/m <sup>3</sup>	TENSILE BAR DENSITY:	963 kg/m <sup>3</sup>

were obtained for the bars than for the pipes, FIG. 9. Particularly large differences were recorded at the stress levels where brittle failure occurs (the steep portion of the failure curve). It may be assumed that these differences are due to a number of factors such as frozen-in stresses in the pipes, differences in the surface structures as well as in density and melt viscosity of pipes and bars, multiaxial state of stress in the pipes, etc. It should be possible to shorten the times to failure in the case of the bars by some acceleration procedure, so that the test times for these may be made as short as for the pipes. Further research should thus primarily concentrate on studies of tensile bars provided with different types of notches.

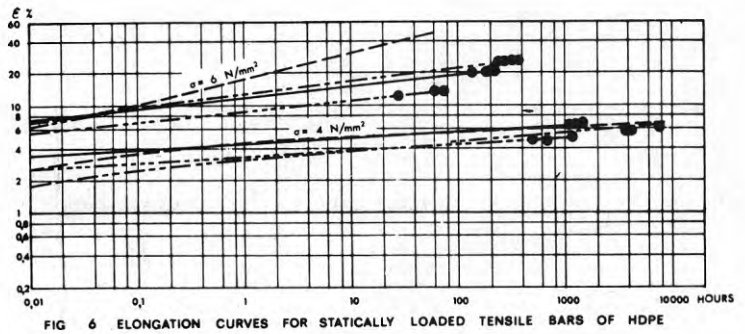


FIG. 6 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS (mm)	200x18.2	200x18.2	200x18.2	400x33
TENSILE BAR ORIENTATION	LONGITUDINAL	LONGITUDINAL	LONGITUDINAL	LONGITUDINAL
TENSILE BAR DENSITY (kg/m <sup>3</sup> )	961	963	961	959
MELT INDEX MI <sub>5</sub> (g/10 min)	0.60	0.34	0.21	1.8
MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> (g/10 min)	16.2	12.6	9.9	21.4
FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub>	27	37	47	12
TEMPERATURE (°C)	+ 80	+ 80	+ 80	+ 80
ENVIRONMENT	WATER	WATER	WATER	WATER

● STRESS-CRACKING FAILURE

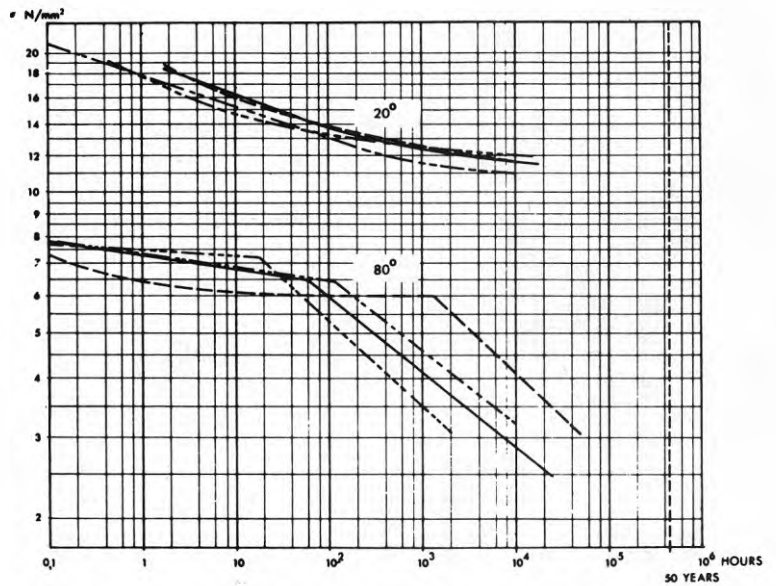


FIG. 7 FAILURE CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

RAW MATERIAL	DENSITY	MELT INDEX MI <sub>5</sub>
—————	B 961	0.60
-----	C 963 (958)	0.34
- - - - -	A 961-962	0.21
-----	D 959	1.8



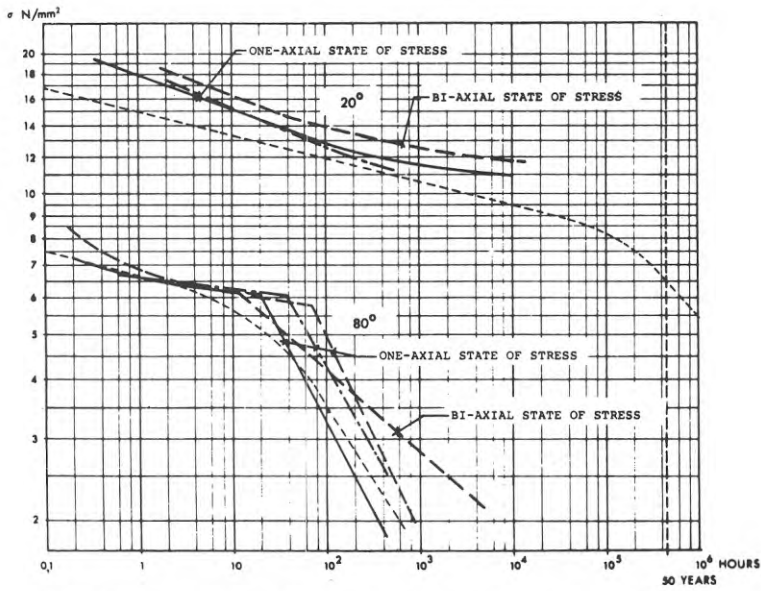


FIG 8 FAILURE CURVES FOR HDPE PIPES SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE

MI <sub>5</sub>	MEAN DENSITY
0.60	959
0.34	961
0.21	959

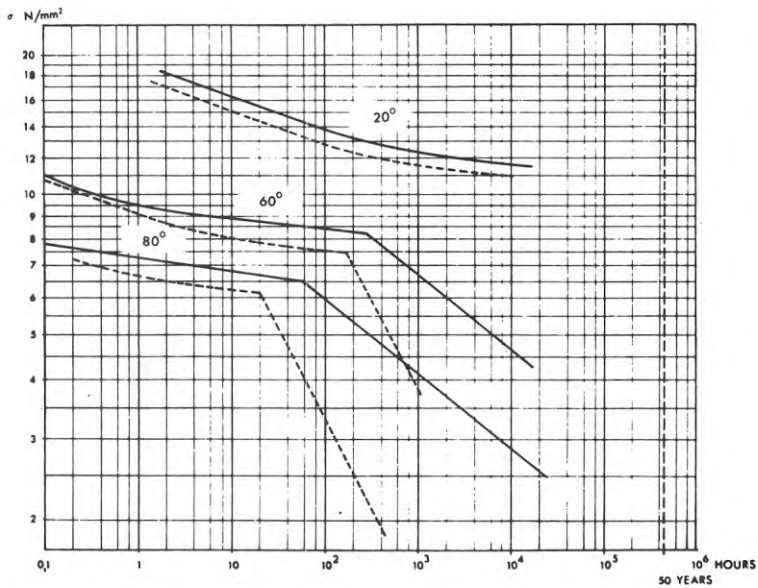


FIG 9 FAILURE CURVES FOR HDPE PIPES AND TENSILE BARS

————	TENSILE BAR	MELT INDEX MI <sub>5</sub> = 0.60 g/10 min.
-----	PIPE (ONE-AXIAL STATE OF STRESS)	

Rapport R36:1975

FÖRENKLADE PROVNINGSMETODER  
FÖR KVALITETSKONTROLL AV PEH-RÖR

Sammanställning och utvärdering av provningsresultat  
från en serie industrifinansierade laboratorieunder-  
sökningar.

Av Lars-Eric Janson  
och Ingemar Björklund

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag  
**730198-8** från Statens råd för byggnadsforskning  
till Vattenbyggnadsbyrån (VBB), Stockholm.

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm  
ISBN 91-540-2456-0

LiberTryck Stockholm 1975

## FÖRORD

Föreliggande forskningsrapport utgör en sammanställning och bearbetning av en serie industrifinansierade provningar, vars syfte varit att skapa underlag för förenklade metoder för kvalitetskontroll av PEH-rör samt att bättre lära känna långtidshållfastheten hos stora PEH-rör. Provningarna, vilka i huvudsak bekostas av Gränges Essem Plast A/S, har utförts vid Statens Provningsanstalt i Göteborg (f.d. Chalmers Provningsanstalt), Sintef i Trondheim samt vid Gränges Essem Plasts eget laboratorium i Porsgrunn, Norge. Vissa av provningarna har delvis finansierats av PEH-råvarutillverkare som Farbwerke Hoechst, Amcel och Unifos. Ovannämnda provningar har pågått i stort sett kontinuerligt i ca 4 års tid och VBB har under denna tid lett och deltagit i provningsarbetet som konsult åt Gränges Essem Plast A/S. Resultaten från ovannämnda provningar har av Gränges Essem Plast A/S ställts till förfogande för föreliggande rapport.

## INNEHÅLL

1.	BAKGRUND	7
1.1	Nuvarande provningsförfarande för PEH-rör	7
1.2	Undersökningarnas syfte	7
1.3	Provningsmetoder	7
2.	UNDERSÖKNINGARNAS OMFATTNING	11
3.	PROVNINGSMETODIK	12
3.1	Provstavsutformning	12
3.2	Uttagning av provstavar	12
3.3	Stavprovning	13
3.4	Rörprovning	14
4.	DENSITETSFÖRDELNING OCH INBYGGD SPÄNNING I RÖREN	15
4.1	Uppmätning av densitetsfördelning i rörvägg	15
4.2	Inbyggda spänningar i rören	15
5.	RESULTAT FRÅN RÖR- OCH STAVPROVNINGAR VID + 20° C	20
5.1	Definitioner	20
5.2	Stavlägets betydelse	21
5.3	Töjningskurvor för stavar av olika råvaror	28
5.4	Töjningskurvor för stavar från rör av olika tryckklasser	35
5.5	Inverkan av tillverkningsbetingelser	37
5.6	Rörprovning vid + 20° C	39
5.7	Jämförelser mellan töjningar i rör och stavar	45
5.8	Erhållna resultat. Sammanfattning	51
6	RESULTAT FRÅN RÖR- OCH STAVPROVNINGAR VID FÖRHÖJD TEMPERATUR	53
6.1	Stavprovning vid + 40° C	53



6.2	Stavprovning vid + 60° C	54
6.3	Rörprovning vid + 60° C	55
6.4	Stavprovning vid + 80° C. Stavorienteringens inverkan på töjningskurvorna	58
6.5	Stavprovning vid + 80° C. Töjningskurvor för stavar av olika råvaror	65
6.6	Stavprovning vid + 80° C. Töjningskurvor för stavar från rör av olika godstjocklek	72
6.7	Rörprovning vid + 80° C	73
6.8	Jämförelser mellan töjningar i rör och stavar	79
6.9	Erhållna resultat. Sammanfattning	80
6.10	Teoretisk behandling av redovisade töjningskurvor	82
7.	UPPMÄTTA BROTTIDER. JÄMFÖRELSE MELLAN RÖR- OCH STAVPROVNINGSMETOD	83
7.1	Brottkurvor för stavar	83
7.2	Brottkurvor för rör	86
7.3	Jämförelse mellan brottkurvor för rör och stavar	89
7.4	Stavprovning i vätmedelhaltigt vatten	91
7.5	Provning av stansade stavar	98
7.6	Provning av stavar med samma tjocklek som rörväggen	101
8.	OLIKA FAKTORERS INVERKAN PÅ BROTTIDER I PEH-RÖR	103
8.1	Parametrar	103
8.2	Brottyper	103
8.3	PEH-råvarans egenskaper	104
8.4	Medeldensitet och densitetsför- delning i rörväggen	104
8.5	Inbyggda spänningar	105
8.6	Brottanvisningar	106

9.	OLIKHETER I BELASTNINGSFALL MELLAN RÖR OCH STAVAR	108
9.1	Parametrar	108
9.2	Spänningar och spänningsför- delning i rör och provstavar	108
9.3	Inbyggda spänningar	109
9.4	Skillnader i spänningstillstånd	109
9.5	Skillnader i ytstruktur	111
9.6	Densitetskillnader	112
10.	STAVPROVNING SOM METOD FÖR FÖRENKLAD KVALITETSKONTROLL AV PEH-RÖR	113
10.1	Avsikt	113
10.2	Brotthållfasthet hos rör	113
10.3	Stavprovningmetod	114
11.	LÅNGTIDSHÅLLFASTHET FÖR PEH-RÖR	116
11.1	Allmänt	116
11.2	Extrapolering med hjälp av Larson-Miller-korrelationen	116
11.3	Extrapolering med hjälp av tøj- ningskurvornas utseende	116
12.	YTTERLIGARE FORSKNINGSBEHOV	120
12.1	Allmänt	120
12.2	A. Materialhållfasthet hos polymerer	121
12.3	B. Långtidshållfasthet hos plaströr som produkt	121
12.4	C. Långtidshållfasthet hos plaströr för olika typer av belastningsfall under nyttjandeskedet	122
	LITTERATUREREFERENSER	123

## 1 BAKGRUND

### 1.1 Nuvarande provningsförfarande för PEH-rör

För att beskriva långtidshållfastheten hos PEH-rör används vanligen de i fig. 1 angivna kurvorna. Kurvorna har framtagits på grundval av ett stort antal rörprovningar, vilka huvudsakligen omfattat provningar av rör med små dimensioner tillverkade av en viss PEH-råvara (Hostalen GM 5010). För rör av andra PEH-råvaror finns likartade kurvor framtagna som de i fig. 1. Gemensamt för dessa är emellertid att provningsunderlaget är avsevärt mindre än för den förstnämnda råvaran. I svensk och utländsk standard för PEH-rör har därför den föreskrivna hållfastheten hos rören huvudsakligen baserats på förstnämnda kurvor, fig. 1.

### 1.2 Undersökningarnas syfte

De tryckprovningar som föreskrivs i ovannämnda standards, fig. 1, kan utföras utan större problem för PEH-rör av mindre dimensioner. För rör större än  $\varnothing$  400 mm blir emellertid provningarna besvärliga och kostsamma att utföra. Huvudsyftet med de utförda undersökningarna har därför varit att skapa underlag för en förenklad metod för kvalitetskontroll av PEH-rör, innebärande att tryckprovning av rören om möjligt undviks.

Ett bisyfte har dessutom varit att kontrollera i vad mån långtidshållfastheten hos de provade rören avviker från kurvorna i fig. 1. Eftersom dessa kurvor i stor utsträckning baserats på provningar av små PEH-rör är det inte osannolikt att de verkliga brottkurvorna för större PEH-rör kan avvika från ovannämnda kurvor. I små PEH-rör erhålls på grund av den relativt tunna väggtjockleken en förhållandevis snabb kylning av röret vid tillverkningen. Detta resulterar i en liten densitetsskillnad mellan rörväggens ut- och insida samt en låg medeldensitet i rörväggen. Den tunna rörväggen medför även att de inbyggda termiska spänningarna i rören blir låga. För större PEH-rör med väggtjocklekar mellan 2-4 cm erhålls på grund av rörväggens tjocklek en långsam avsvälning av rörets insida. Därmed uppkommer en påtaglig densitetsskillnad mellan rörväggens in- och utsida samt icke obetydliga inbyggda spänningar.

Eftersom såväl PEH-råvarans egenskaper som densiteten och den inbyggda spänningens storlek kan förväntas inverka på rörens långtidshållfasthet har det ansetts angeläget att bedöma långtidshållfastheten för de olika PEH-rör som använts vid undersökningarna.

### 1.3 Provningsmetoder

De provningar som utförts har i huvudsak omfattat provningar av statistiskt belastade dragstavar, vilka

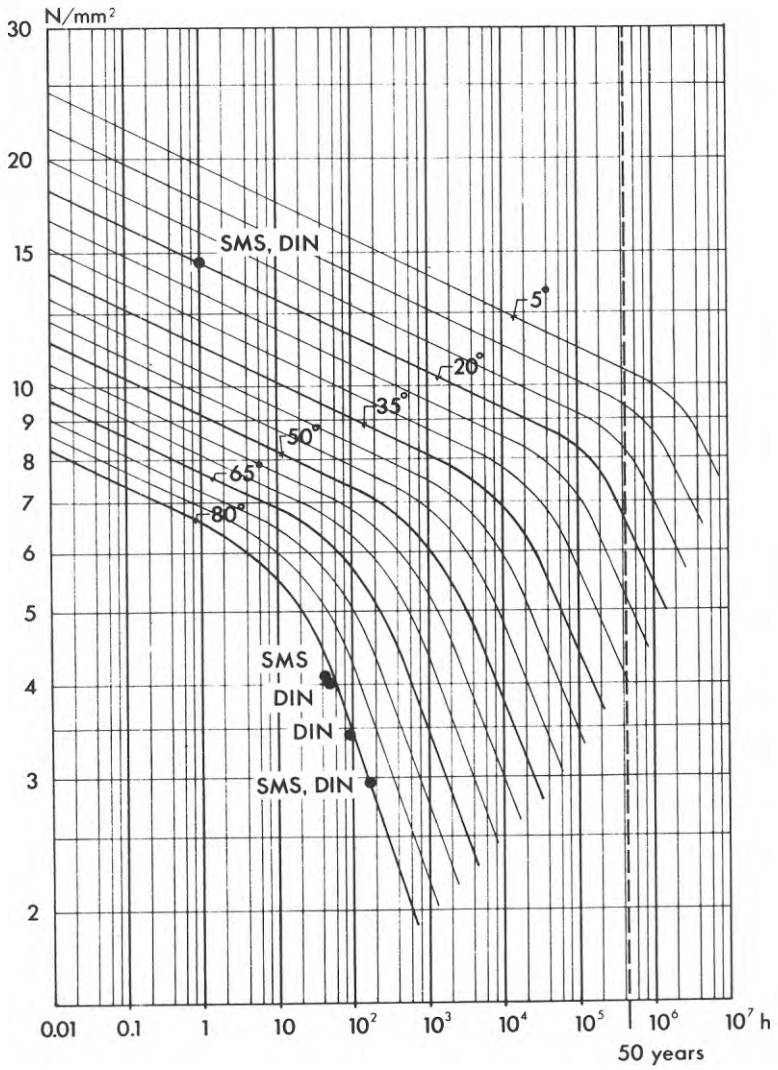


FIG. 1 BURST CURVES FOR HDPE PIPES  
SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE

uttagits på olika sätt ur rörväggen. Förutom dessa provningar har även smältindex, inbyggda spänningar samt densitetsfördelning i rörväggen uppmätts för rören. De aktuella rörens hållfasthet har bestämts genom provningar med invändigt vattentryck i rören.

Avsikten med provningarna har varit att utveckla en metod att fastställa rörens kvalitet på basis av resultaten från stavprovningarna samt resultat från mätningarna av densitet, smältindex och inbyggd spänning.



Investigation	1	2	3	4	5
Testing started	1970	1971	1972	1972	1972
Material	HDPE	HDPE	HDPE	HDPE	HDPE
Raw material manufacture	A	A,B	A,C	C	D
Melting index	Measured	Measured	Measured	Measured	Measured
Pipe dimensions	400x36.4	200x18.2	200x7.7 200x18.2	200x18.2	315x12.7 400x33
Frozen-in stresses	Measured	Measured	Measured	Measured	Measured
Density distribution of pipewall	Measured	Measured	Measured	Measured	Measured
Testing of pipe samples in water	10 samples at +20°C	110 samples at +20, 60 and 80°C	57 samples at +20 and 80°C	-	-
Testing of pipe samples in water with surfactant	-	8 samples at +80°C	-	-	-
Stresses in pipewall caused by internal pressure	Hoop stresses and longitudinal stresses	Hoop stresses only	Hoop stresses and longitudinal stresses	-	-
Direction of tensile bars	Longitudinal and tangential	Longitudinal and tangential	Longitudinal and tangential	Longitudinal	Longitudinal
Number of different positions from which tensile bars have been taken out of pipe wall	6	1	1	1	1
Testing of tensile bar samples in air	60 samples at +20°C	-	-	-	22 samples at +20°C
Testing of tensile bar samples in water	-	152 samples at +20, 40, 60 and 80°C	80 samples at +20 and 80°C	60 samples at +20°C	67 samples at +20 and 80°C
Testing of tensile bar samples in water with surfactant	-	58 samples at +20, 40, 60 and 80°C	18 samples at +80°C	-	-
Other tests	-	Fractographic tests of 5 bar samples. Relaxation tests of frozen-in stress in 10 pipe samples. Testing of 5 tensile bar samples with the same thickness as pipe wall	-	-	Fractographic tests of 4 bar samples
Remarks	-	-	6 pipe samples tested with only hoop stresses caused by internal pressure	Tensile bar samples loaded and reloaded at +80°C before testing at +20°C	Both stamped and machined bar samples tested

**TABLE 1**      **TESTS PERFORMED**

## 2      UNDERSÖKNINGARNAS OMFATTNING

Totalt omfattar de utförda undersökningarna ca drygt 500 provningar av dragstavar samt ca 200 tryckprovningar av PEH-rör fördelade på 5 olika undersökningar under åren 1970-1973, tabell 1. Rör av dimensionerna  $\varnothing$  200 -  $\varnothing$  400 mm, tillverkade av sammanlagt fyra olika råvaror, har härvid provats. De olika råvarorna, vilka i tabell 1 betecknats med bokstäverna A-D, är samtliga av HD-typ och enligt tillverkarna avsedda för rörtillverkning.

Ett mått på de olika råvarornas medelmolekylvikt och molekylviktsfördelning kan erhållas ur tabell 2, där smältindexvärden för de olika materialen redovisats. Värdena som anges i tabell 2 utgör de värden som uppmätts på de aktuella rören. Siffrorna inom parentes anger de av råvarufabrikanterna uppgivna normalvärdena för resp. råvara.

50

Raw material manufacture	Pipe dimensions	MI <sub>5</sub> (g/10 min.)	MI <sub>21.6</sub> (g/10 min.)	MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub>
A	400x36.4	0.20 (0.3)	10.2	50
"	200x18.2	0.21	9.9	47
B	200x18.2	0.60	16.2	27
C	200x18.2	0.34 (0.4)	12.6	37
"	200x18.2	0.35	11.9	34
"	200x7.7	0.43	14.4	34
D	400x33	1.8	21.4	12
"	315x12.7	2.3	25.9	11

TABLE 2. MEASURED MELT INDEX VALUES FOR HDPE PIPES TESTED

### 3 PROVNINGSMETODIK

#### 3.1 Provstavsutformning

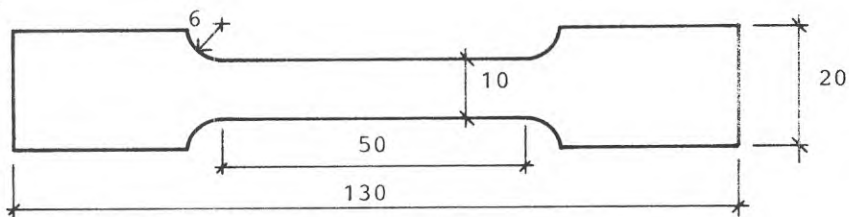
Vid provningarna har två olika typer av dragstavar använts, fig. 2. Bägge stavtyperna har haft en mätlängd av 50 mm och ett stavtvärsnitt på 4x10 mm. Stavtyp 1 har huvudsakligen använts vid provningar i luft vid + 20°C, medan övriga provningar har utförts på stavar av typ 2.

#### 3.2 Uttagning av provstavar

Stavarna har uttagits ur rörväggen medelst fräsning. Utfräsning har skett i två etapper. Först har en platta av samma tjocklek som dragstaven frästs ut ur rörväggen. För att förhindra uppvärmning av PEH-materialet, och därmed sannolikt förändrade hållfasthetsegenskaper, har under fräsningen arbetsstycket be-  
gjutits med kylvätska. Den slutliga provstaven har sedan frästs ut ur plattan.

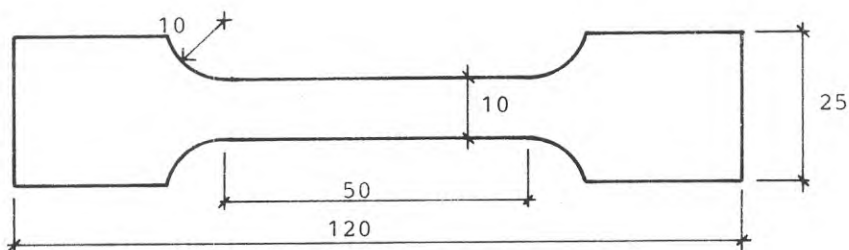
För att undersöka i vad mån ytfinishen hos stavarna påverkar brottiderna har även några provningar utförts på stavar vilka stansats ut ur plattan. I det sistnämnda fallet erhålls stavar med en sämre ytfinish än för de utfrästa stavarna. De stansade stavarnas dimensioner har varit i överensstämmelse med stavtyp 1, fig. 2.

TYPE 1



Thickness: 4 mm

TYPE 2



Thickness: 4 mm

FIG. 2 TENSILE BAR DIMENSIONS

### 3.3 Stavprovning

De uttagna provstavarna har belastats med en konstant axialkraft, varefter tiden till brott har uppmätts. Under provningen har dessutom förlängningen i provstavarna uppmätts som funktion av tiden. När provningarna skett vid höga spänningsnivåer har en mycket kraftig deformation föregått det slutliga brottet. I dessa fall har en lokal avsmalning av stavtvärsnittet ("necking") kunnat observeras, fig. 3. I detta område på provstaven har sedan en kraftig töjningstillväxt ägt rum. Eftersom den verkliga töjningen i detta fall varierar kraftigt i olika punkter på provstaven och dessutom brotttöjningen är mycket stor har det bedömts vara av mindre intresse att bedriva provningarna till slutgiltigt brott. Provningarna har därför avbrutits när förlängningen av stavarna uppgått till 50 %. Detta värde på förlängningen har i fortsättningen definierats som "segt brott" i provstavarna.

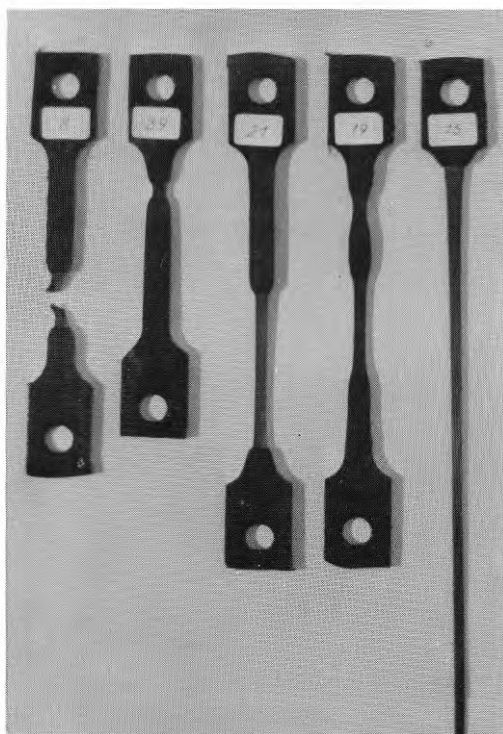


Fig. 3 Necking failure in  
tensile bars of HDPE

Förlängningen i provstavarna har, beroende på stavtypen, uppmätts på två olika sätt. För stavtyp 1, vilken provats i luft vid + 20°C, har förlängningen på mätsträckan uppmätts med hjälp av skjutmått. För stavtyp 2 har förlängningen registrerats med hjälp av potentiometer, vilken mätt förskjutningen mellan infästningsklämmorna på provstaven. Mätnoggrannheten har i bägge fallen varit  $\pm 0.05$  mm.

När stavprovningarna utförts vid förhöjd temperatur och låga spänningsnivåer har brotten i stavarna skett i form av en långsam spricktillväxt (stress-cracking), fig. 4. Spricktillväxten har resulterat i att stavtvärsnittet har gått av vid den uppkomna sprickan med följd att segbrott erhållits i den resterande delen av stavtvärsnittet.

### 3.4 Rörprovning

Rören har tryckprovats på vanligt sätt i vattenbad. Tryckprovningen har utförts på rörprover med en längd av 3 x rörets diameter, och under provningens gång har diameterutvidgningen på mitten av rörproverna uppmätts. Vid provningarna har vidare två olika typer av ändförslutningar använts. En typ har varit förankrad i PEH-röret medan den andra typen av ändförslutning varit rörlig gentemot röret. Vid den förstnämnda kopplingstypen har det invändiga vattentrycket åstadkommit såväl längd- som ringspänningar i röret, medan sistnämnda kopplingstyp inte förorsakat några längdspänningar av betydelse i rörprovet. Oavsett typen av ändförslutning råder emellertid alltid en viss grad av fleraxligt spänningstillstånd i rören, eftersom inbyggda spänningar finns i rörens axialriktning och en viss friktion mellan rör och ändförslutningar svårligen kan undvikas.

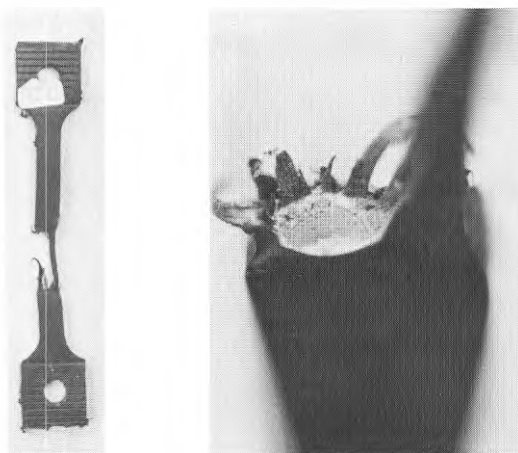


Fig. 4 Stress-cracking failure in tensile bar of HDPE



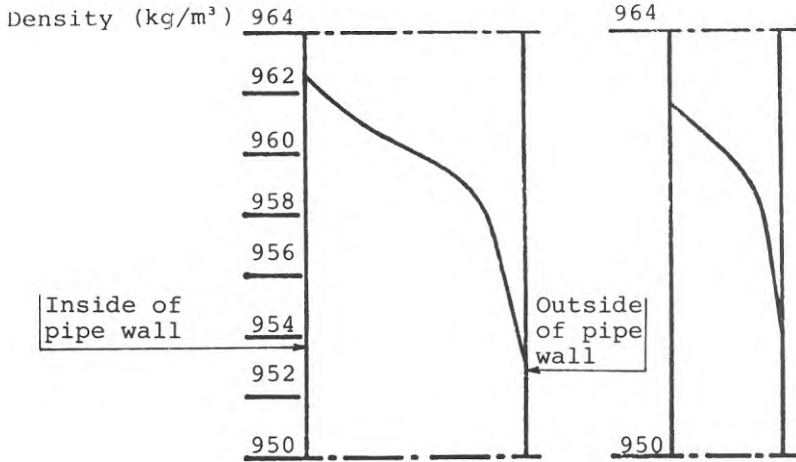
## 4 DENSITETSFÖRDELNING OCH INBYGGD SPÄNNING I RÖREN

### 4.1 Uppmätning av densitetsfördelning i rörvägg

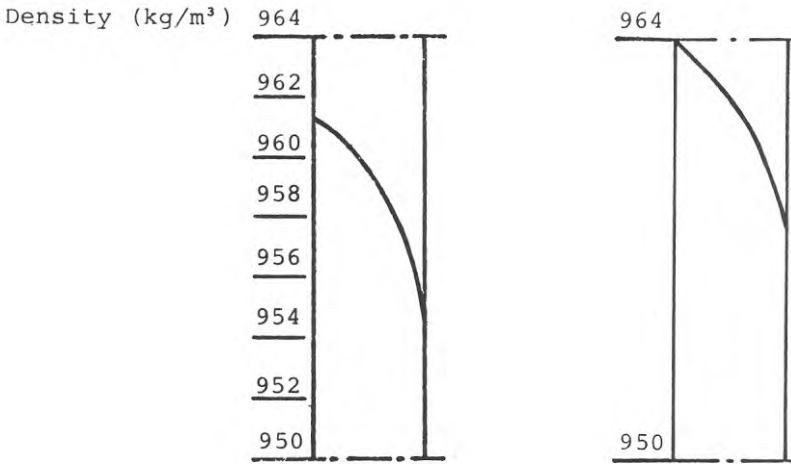
Densitetsfördelningen i rörväggen har uppmätts på ett varierande antal prover från de olika rörtyper som provats. Varje uppmätning av densitetsfördelning har omfattat bestämningar av densiteten i olika punkter i rörväggen från insidan till utsidan. Densitetsbestämningarna i de olika punkterna har utförts på kuber med ca 4 mm sida, vilka skurits ut ur rörväggen. PEH-kuberna har därefter nedsänkts i en densitetskolonn där de fått tid att inlagra sig på stabil nivå. Den använda metoden har medgivit densitetsbestämningar med en noggrannhet på  $\pm 0.05 \text{ kg/m}^3$ . Av de olika uppmätningar av densitetsfördelning i rörväggen som företagits har framgått att spridningen i uppmätta densitetsvärden är ungefär lika stor för samtliga testade rörtyper och uppgår till ca  $\pm 0.5 \text{ kg/m}^3$ . I det följande anges därför densitetsvärden för rör och stavar med en noggrannhet av  $\pm 0.5 \text{ kg/m}^3$ . De uppmätta densitetsfördelningarna i rörväggen för samtliga testade rörtyper har redovisats i fig. 5-6. Vid uppmätningen av ovan nämnda densitetsprofiler har ingen hänsyn tagits till var i förhållande till rörets hjässa vid extruderingen som densitetsmätningarna ägt rum. Eftersom kylningen av rören vid tillverkningen kan variera något längs rörets omkrets är det inte uteslutet att även densiteten kan uppvisa variationer, beroende på var på röret densitetsmätningen utförts. För att undersöka i vilken utsträckning en dylik densitetsvariation kan förekomma har i några enstaka fall densiteten uppmätts i åtta olika punkter jämnt fördelade längs periferin i en och samma sektion på röret. I dessa fall har inga signifikanta densitetsskillnader kunnat iakttagas, utan spridningen har varit godtycklig och ungefär lika stor som tidigare observerats (ca  $\pm 0.5 \text{ kg/m}^3$ ).

### 4.2 Inbyggda spänningar i rören

I alla termoplaströr uppkommer spänningar i materialet härrörande från tillverkningsförloppets kylningsetapp. Dessa spänningar, vilka vanligen benämnes inbyggda spänningar, uppkommer på följande sätt. När rören vid tillverkningen kyls utvändigt sammandrar sig det utvändiga ytskiktet termiskt och åstadkommer därvid en plastisk hoptryckning av det ännu varma ytskiktet på rörets insida. När insidan senare svalnar strävar det invändiga ytskiktet till följd av den termiska längdändringen att sammandra sig men hindras härvid av det utvändiga ytskiktet, som tidigare svalnat och redan antagit sin form. Följden blir att dragspänningar uppkommer vid rörets insida, medan utsidan får tryckspänningar. Skär man upp ett rör i axialriktningen uppkommer sålunda en periferiminskning, som är ett direkt mått på den inbyggda spänningens storlek.

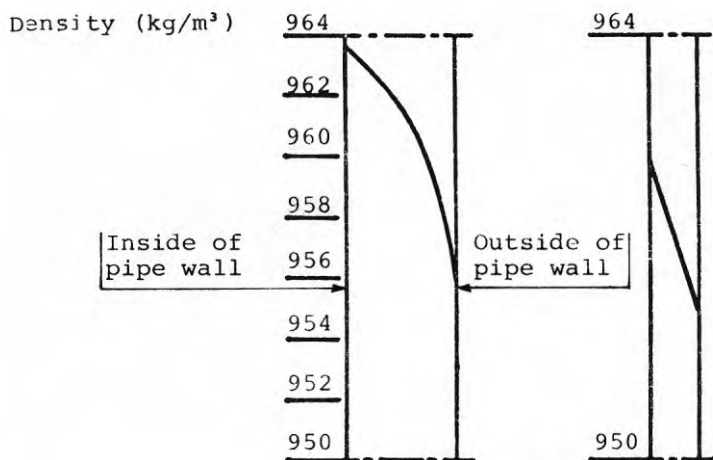


PIPE DIMENSIONS	(mm)	400x36.4	200x18.2
MELT INDEX MI <sub>5</sub>	(g/10 min)	0.20	0.21
MELT INDEX MI <sub>21.6</sub>	(g/10 min)	10.2	9.9
FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub>		50	47

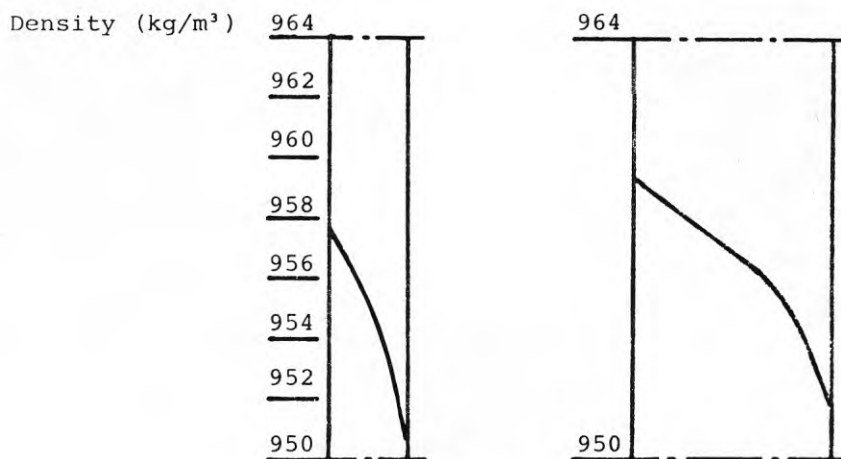


PIPE DIMENSIONS	(mm)	200x18.2	200x18.2
MELT INDEX MI <sub>5</sub>	(g/10 min)	0.60	0.35
MELT INDEX MI <sub>21.6</sub>	(g/10 min)	16.2	11.9
FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub>		27	34

FIG. 5 MEASURED DENSITY DISTRIBUTIONS IN PIPE WALLS FOR HDPE PIPES TESTED



PIPE DIMENSIONS	(mm)	200x18.2	200x7.7
MELT INDEX $MI_5$	(g/10 min)	0.34	0.43
MELT INDEX $MI_{21.6}$	(g/10 min)	12.6	14.4
FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$		37	34



PIPE DIMENSIONS	(mm)	315x12.7	400x33
MELT INDEX $MI_5$	(g/10 min)	2.3	1.8
MELT INDEX $MI_{21.6}$	(g/10 min)	25.9	21.4
FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$		11	12

FIG. 6 MEASURED DENSITY DISTRIBUTIONS  
IN PIPE WALLS FOR HDPE PIPES TESTED

De inbyggda spänningarna i de olika testade rörtyperna har uppmätts på ett stort antal prover från resp. rörtyp. Den inbyggda spänningens storlek har härvid bestämts genom mätning av periferiminskningen efter uppsnittning av rörprover vid + 20°C. Rörprovernas längd har i samtliga fall varit lika stor som rörens diameter. Med hjälp av det uppmätta värdet på periferiminskningen kan den inbyggda spänningen beräknas med formeln:

$$\sigma = \frac{a}{\pi \cdot D_m - a} \cdot \frac{s}{D_m} \cdot E_k$$

där  $E_k$  = rörmaterialets krypmodul (tidsberoende E-modul)

$s$  = godstjockleken

$D_m$  = rörets medeldiameter

Ovanstående formel förutsätter en linjär spänningsfördelning i rörväggen. I verkligheten är spänningsfördelningen i rörväggen inte alltid linjär, varför de beräknade spänningsvärdena endast utgör ett approximativt mått på den inbyggda spänningen i rören. En viss hjälp att bedöma den inbyggda spänningens fördelning i rörväggen har man av den uppmätta densitetsfördelningen. Den inbyggda spänningens fördelning är nämligen sannolikt approximativt konform med densitetsfördelningen i rörväggen. Av fig. 5-6 framgår således att en linjär spänningsfördelning kan förväntas i de tunnväggiga rören, medan allt större avvikelser från en linjär fördelning erhålls med en ökad väggjocklek hos rören.

Eftersom ett icke uppsnittat rör är bundet till sin form blir den av den inbyggda spänningen förorsakade töjningen i rören konstant. Detta innebär i sin tur att spänningen genom relaxation kommer att minska med tiden. Den inbyggda spänningen är således störst efter rörets tillverkning och avtar därefter med tiden. I de aktuella undersökningarna har därför den inbyggda spänningen uppmätts dels efter rörens tillverkning dels samtidigt som rören tryckprovats. En sammanställning av uppmätta inbyggda spänningar för de olika testade rörtyperna har redovisats i tabell 3. De i tabellen angivna värdena har beräknats under förutsättning att linjär spänningsfördelning råder i rörväggen och avser den inbyggda spänningens storlek ca 1-2 månader efter rörens tillverkning. Den spänningsrelaxation som därefter uppmätts fram till dess rören tryckprovats har varit relativt obetydlig och i stort sett legat inom det uppmätta spridningsområdet  $\pm 0.15 \text{ N/mm}^2$  för de i tabell 3 angivna värdena.

Raw material manufacture	Pipe dimensions	Frozen-in stress (N/mm <sup>2</sup> )
A	400x36.4	2.4
"	200x18.2	2.3
B	200x18.2	2.1
C	200x18.2	2.1
"	200x18.2	2.1
"	200x7.7	2.6
D	400x33	~ 4.5 <sup>1)</sup>
"	315x12.7	~ 5.0 <sup>1)</sup>

1) Estimated value

TABLE 3. FROZEN-IN STRESSES IN HDPE PIPES TESTED

## 5 RESULTAT FRÅN RÖR- OCH STAVPROVNINGAR VID + 20°C

5.1 Definitioner

I rapporten angivna spännings- och töjningsvärden har definierats enligt följande:

Med spänningen i provstavarna avses:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

där

P = axiell belastning

A = tvärsnittsarea hos provstaven före belastning

Med töjningen i provstavarna avses:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

där

$\Delta L$  = uppmätt förlängning hos provstaven

L = provstavens längd före belastning

Med spänningen i rören avses:

$$\sigma = \frac{p \cdot D_m}{2 \cdot s}$$

där

p = invändigt vattentryck

$D_m$  = medeldiameter  $\frac{(D_i + D_y)}{2}$  hos rörprovet före belastning

s = medelgodstjocklek hos rörprovet före belastning

Med töjningen i rören avses:

$$\varepsilon = \frac{\Delta o}{o}$$

där

$\Delta o$  = omkretsökningen på mitten av rörprovet

o = rörprovets omkrets före belastning

## 5.2 Stavlägets betydelse

För att undersöka i vad mån stavarnas läge och orientering i rörväggen påverkar resultaten vid stavprovningen har en serie provningar av stavar uttagna från  $\emptyset$  400 NT 10 rör utförts, fig. 7-14.

Av fig. 7-8 framgår uppmätta töjningskurvor för stavar, vilka uttagits i rörets längdriktning på ett avstånd av 3 mm från rörväggens insida. Stavarna har uttagits ur olika kvadranter i röret och stav nr 3 är alltid uttagen ur den del av rörväggen som motsvarar rörets hjässa vid extruderingen. Som framgår av fig. 7-8 erhålls en viss spridning mellan de uppmätta töjningskurvorna. Spridningen är emellertid slumpmässig och ingen signifikant skillnad mellan töjningskurvorna för de olika stavarna kan observeras.

Motsvarande provningar av stavar, vilka uttagits i rörets tangentialriktning, har även utförts, fig. 9-10. Även i detta fall erhålls en spridning mellan de uppmätta töjningskurvorna. Denna är ungefär lika stor som för de stavar som uttagits i rörets längdriktning och även i detta fall kan ingen signifikant skillnad mellan töjningskurvorna observeras.

Om stavarna uttages på olika avstånd från rörväggens insida erhålls däremot en skillnad mellan töjningskurvorna, fig. 11-12. Ovannämnda figurer visar uppmätta töjningskurvor för stavar vilka uttagits i rörens längdriktning 3 resp. 23 mm från rörväggens insida. I detta fall erhålls genomgående större töjningar i de stavar som uttagits 23 mm från rörväggens insida än för de stavar som uttagits nära insidan.

Ett likadant förhållande kan även observeras för stavar som uttagits i tangentiell riktning i rören, fig. 13-14.

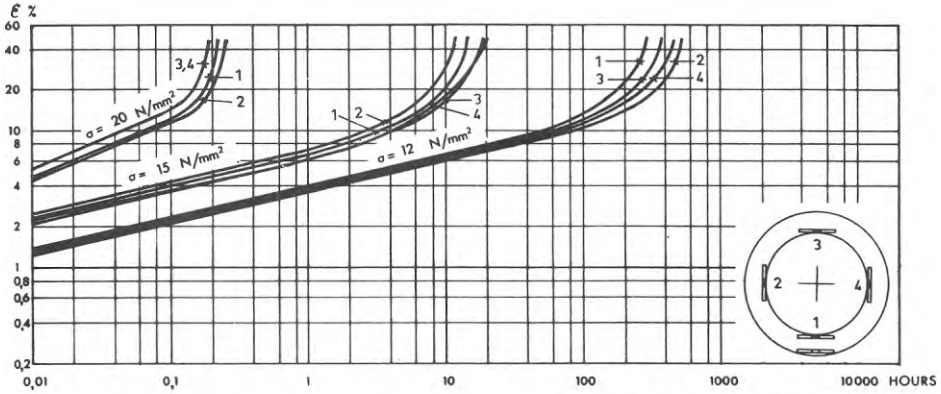


FIG 7 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	400x36.4 mm	MELT INDEX MI <sub>5</sub> :	0.20 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> :	10.2 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	962 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub> :	50
ENVIRONMENT:	AIR	TEMPERATURE:	+ 20 °C

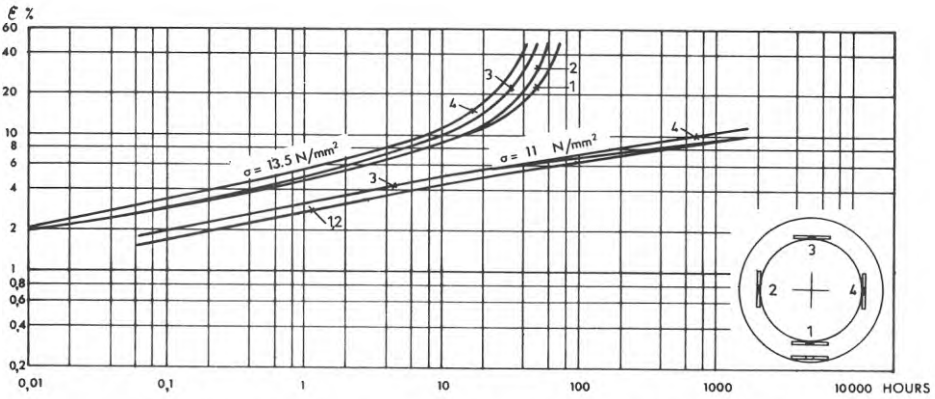


FIG 8 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	400x36.4 mm	MELT INDEX MI <sub>5</sub> :	0.20 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> :	10.2 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	962 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub> :	50
ENVIRONMENT:	AIR	TEMPERATURE:	+ 20 °C



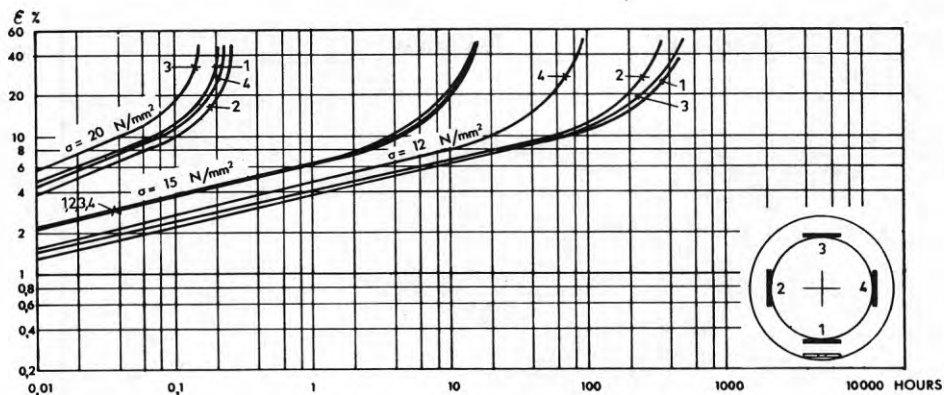


FIG 9 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	400x36.4 mm	MELT INDEX MI <sub>5</sub> :	0.20 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	TANGENTIAL	MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> :	10.2 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	962 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub> :	50
ENVIRONMENT:	AIR	TEMPERATURE:	+ 20 °C

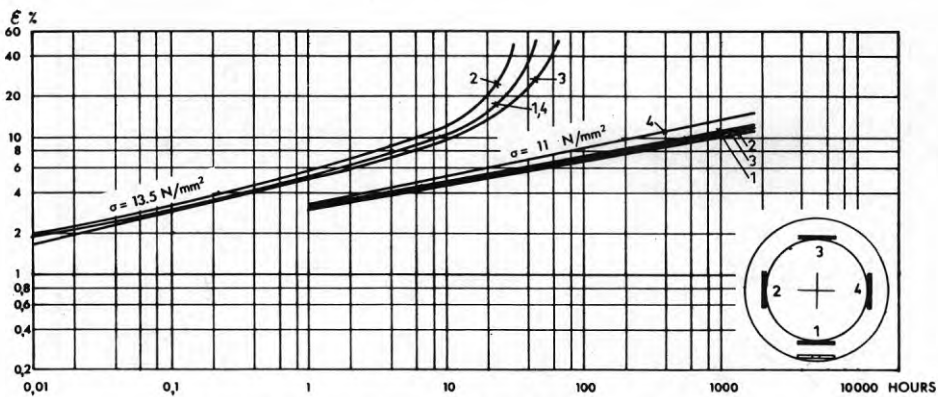


FIG 10 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	400x36.4 mm	MELT INDEX MI <sub>5</sub> :	0.20 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	TANGENTIAL	MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> :	10.2 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	962 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub> :	50
ENVIRONMENT:	AIR	TEMPERATURE:	+ 20 °C

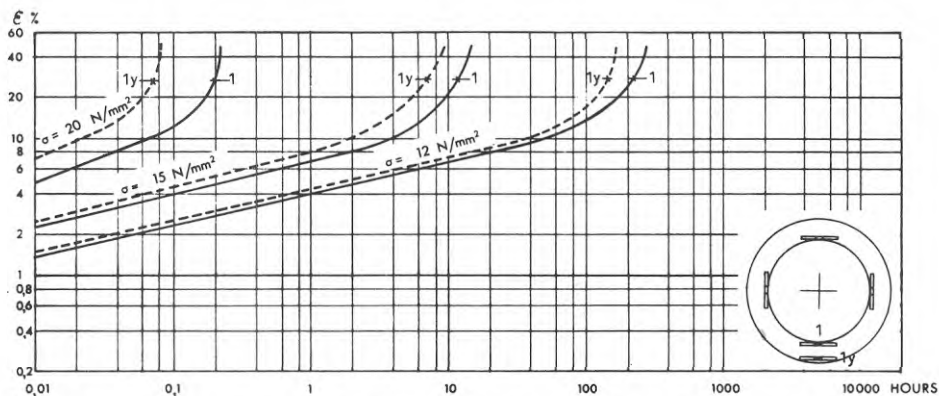


FIG 11 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	400x36.4 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.20 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	10.2 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	962; 959 (1y) kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	50
ENVIRONMENT:	AIR	TEMPERATURE:	+ 20 °C

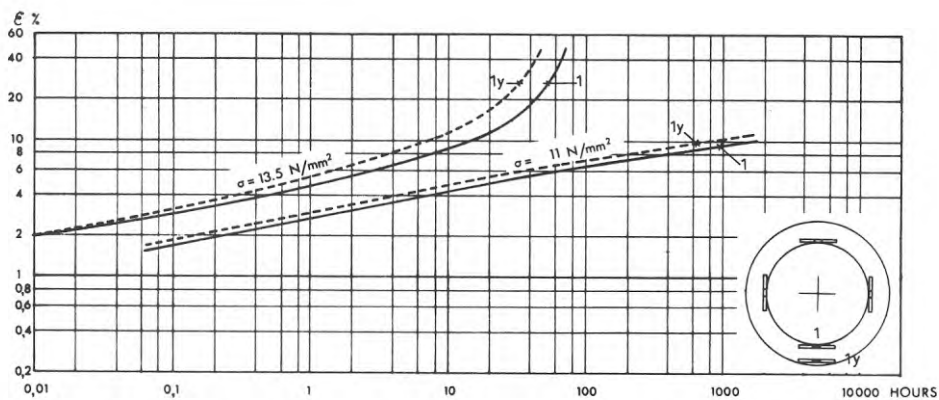


FIG 12 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	400x36.4 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.20 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	10.2 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	962; 959 (1y) kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	50
ENVIRONMENT:	AIR	TEMPERATURE:	+ 20 °C

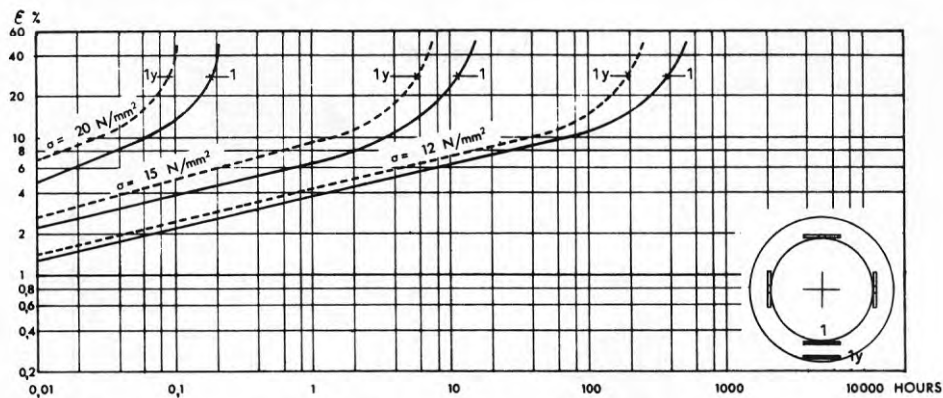


FIG 13 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	400x36.4 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.20 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	TANGENTIAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	10.2 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	962; 959(1y) kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	50
ENVIRONMENT:	AIR	TEMPERATURE:	+ 20 °C

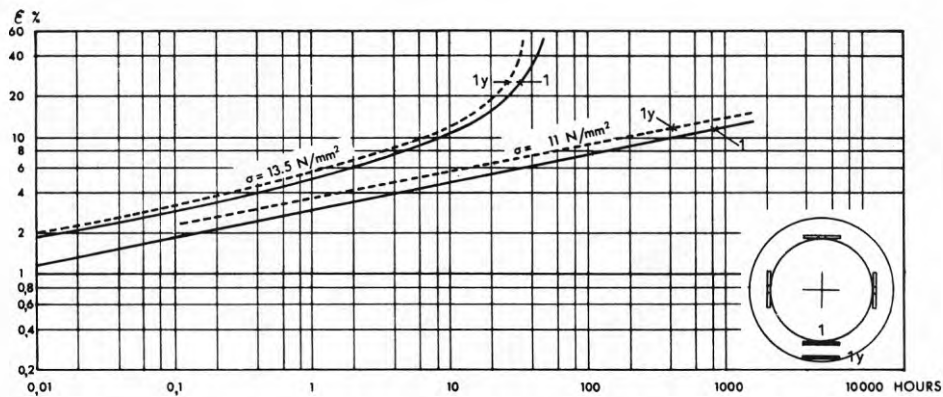


FIG 14 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	400x36.4 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.20 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	TANGENTIAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	10.2 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	962; 959(1y) kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	50
ENVIRONMENT:	AIR	TEMPERATURE:	+ 20 °C

Orsaken till skillnaden mellan töjningskurvorna kan i detta fall hänföras till densitetsskillnader mellan stavarna. Eftersom man i tjockväggiga PEH-rör får en relativt kraftig densitetsvariation i rörväggen på grund av kylningsförloppet vid tillverkningen kommer de stavar som uttagits nära rörväggens insida att få en högre densitet än de stavar som uttagits närmare rörväggens utsida, fig.15. I detta fall var densitetsskillnaden mellan stavarna ca  $3 \text{ kg/m}^3$ , vilket tydligen är tillräckligt för att påverka töjningskurvor och brotttider för stavarna i så måtto att en högre densitet ger en ökad segbrottshållfasthet.

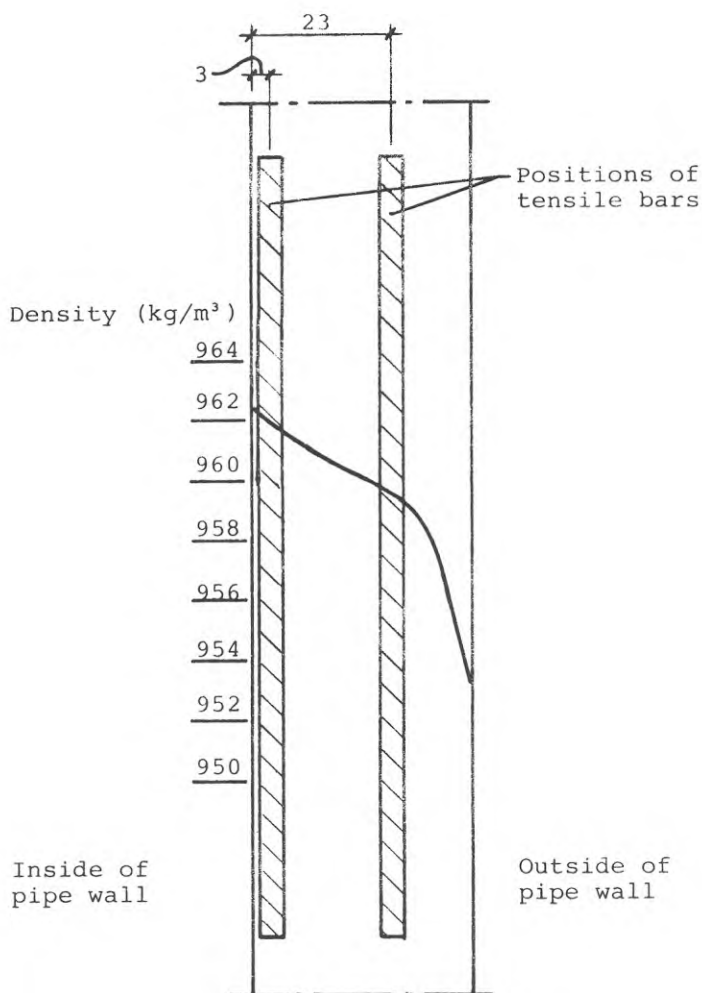


FIG. 15 MEASURED DENSITY DISTRIBUTION IN PIPE WALL FOR HDPE PIPES 400x36.4

En jämförelse mellan uppmätta töjningskurvor för stav-  
var uttagna i rörets längd- resp. tangentialriktning  
visar att några större skillnader inte föreligger,  
fig. 16-17. De obetydliga skillnader som redovisats  
i ovannämnda figurer ligger samtliga inom töjnings-  
kurvornas spridningsområden.

De erhållna resultaten, fig. 7-14, visar således att  
det sannolikt inte har någon större betydelse i vil-  
ken kvadrant i röret som provstavarna varit belägna,  
och inte heller i vilken riktning de uttagits. Däre-  
mot erhålls olika resultat beroende på hur nära rör-  
väggens insida som stavarna uttagits. I de fortsatta  
undersökningarna har därför stavarna genomgående ut-  
tagits i rörets längdriktning 3 mm från rörväggens  
insida, utan närmare beaktande av i vilken kvadrant i  
röret som stavarna varit belägna.

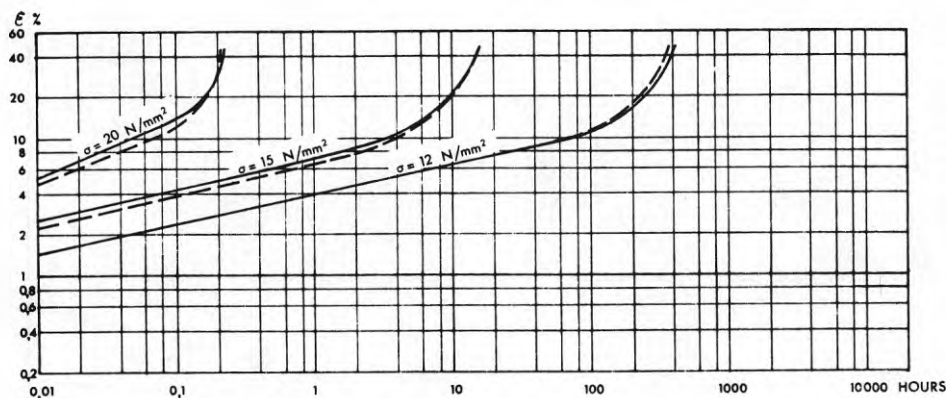


FIG 16 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

	— — — — —	
	LONGITUDINAL	TANGENTIAL
PIPE DIMENSIONS (mm)	400 x 36.4	
TENSILE BAR ORIENTATION	LONGITUDINAL	TANGENTIAL
TENSILE BAR DENSITY (kg/m <sup>3</sup> )	962	
MELT INDEX MI <sub>5</sub> (g/10 min)	0.20	
MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> (g/10 min)	10.2	
FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub>	50	
TEMPERATURE (°C)	+20	
ENVIRONMENT	AIR	

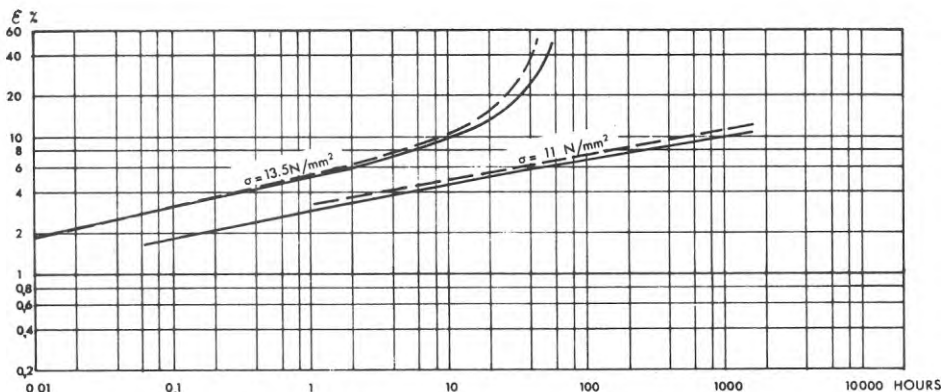


FIG 17 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS (mm)	400 x 36.4	
TENSILE BAR ORIENTATION	LONGITUDINAL	TANGENTIAL
TENSILE BAR DENSITY (kg/m <sup>3</sup> )	962	
MELT INDEX MI <sub>5</sub> (g/10 min)	0.20	
MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> (g/10 min)	10.2	
FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub>	50	
TEMPERATURE (°C)	+20	
ENVIRONMENT	AIR	

### 5.3 Töjningskurvor för stavar av olika råvaror

För sammanlagt fyra olika PEH-råvaror har stavprovningar utförts vid ett antal olika spänningsnivåer, fig. 18-28. Resultaten har, som framgår av ovan nämnda figurer, redovisats i form av töjningskurvor med angivna spridningsområden. De redovisade kurvorna bygger på provningar av 3-5 stavar på varje enskild spänningsnivå. Stavarna har i samtliga fall varit uttagna i rørets längdriktning 3 mm från rørets insida.

Ur det redovisade provningsmaterialet kan följande iakttagelser göras:

1. Spridningen mellan uppmätta töjningskurvor är för samtliga PEH-råvaror ungefär densamma, och överensstämmer i stort med den spridning som observerats för provstavar vilka uttagits från olika kvadranter av røret, fig. 7-8.
2. Töjningskurvorna för stavarna av samtliga råvaror är vid högre spänningsnivåer ungefär rätlinjiga upp till ca 10 % töjning. Därefter kröker kurvorna kraftigt av.
3. Vid lägre spänningsnivåer erhålls rätlinjiga eller svagt konvext krökta töjningskurvor.

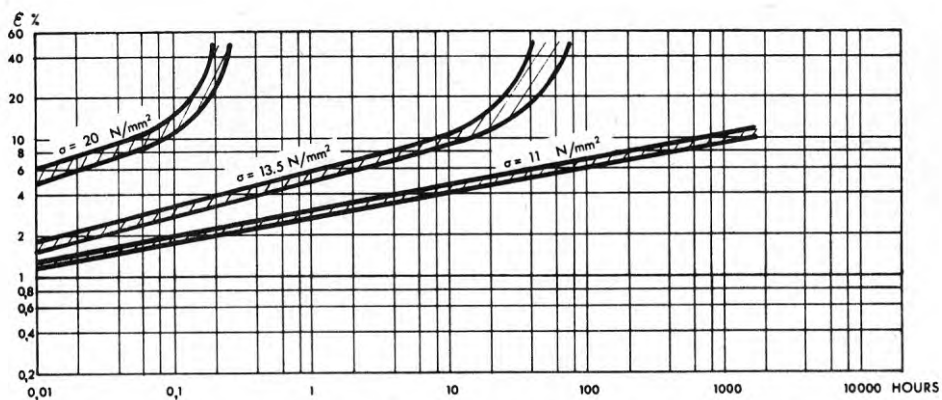


FIG 18 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	400x36.4 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.20 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	10.2 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	962 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	50
ENVIRONMENT:	AIR	TEMPERATURE:	+ 20 °C

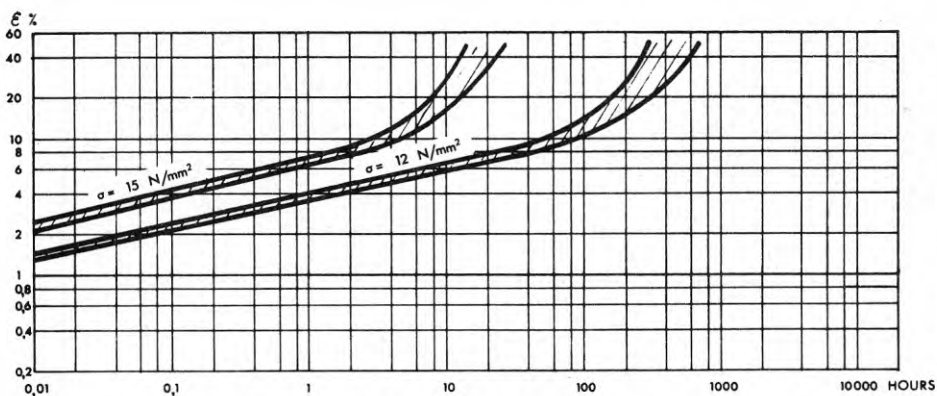


FIG 19 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	400x36.4 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.20 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	10.2 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	962 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	50
ENVIRONMENT:	AIR	TEMPERATURE:	+ 20 °C

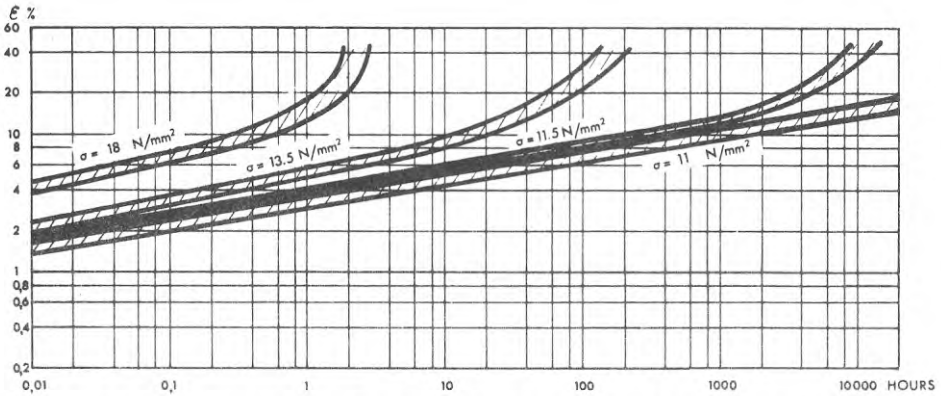


FIG 20 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.60 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	16.2 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	961 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	27
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 20 °C

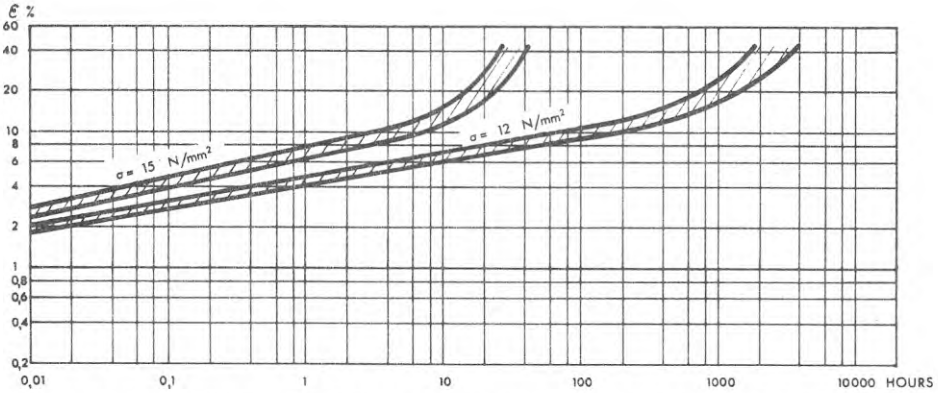


FIG 21 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.60 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	16.2 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	961 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	27
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 20 °C



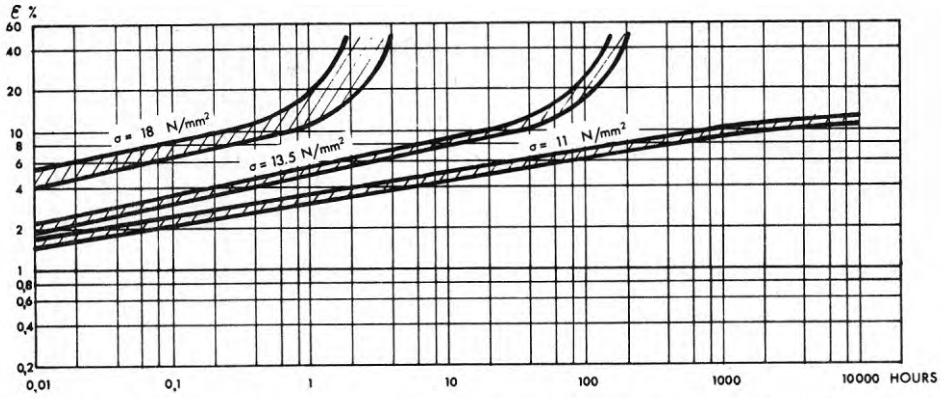


FIG 22 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.34 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	12.6 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	963 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	37
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 20 °C

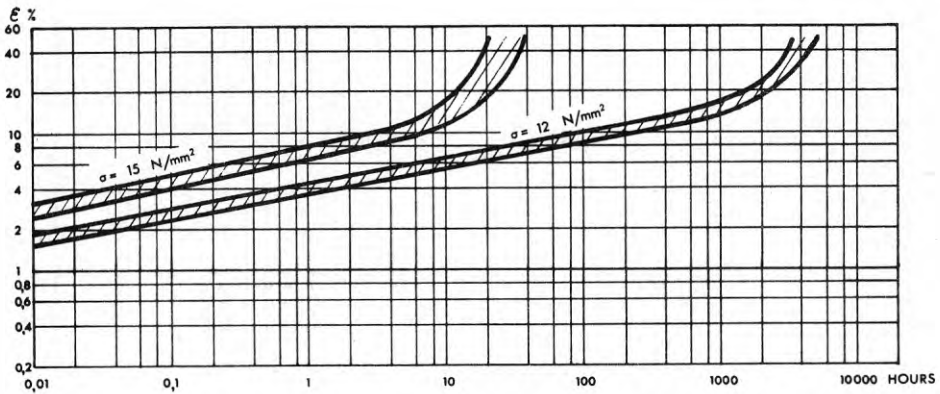


FIG 23 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.34 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	12.6 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	963 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	37
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 20 °C

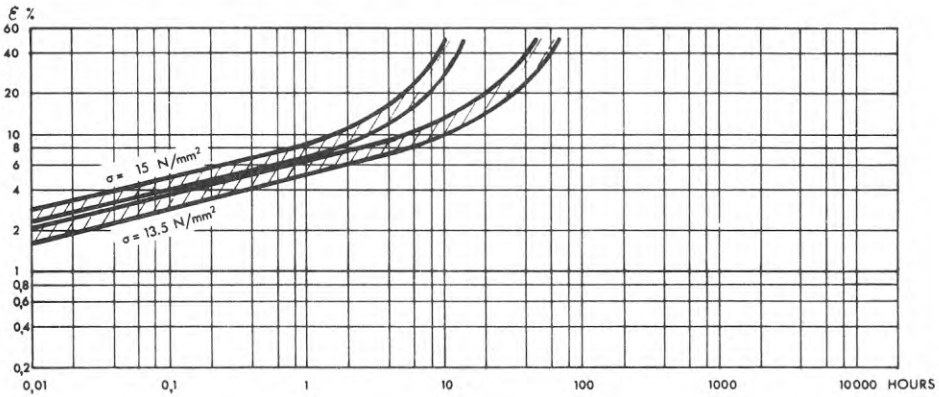


FIG 24 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	200x7.7 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.43 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	14.4 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	958 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	34
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 20 °C

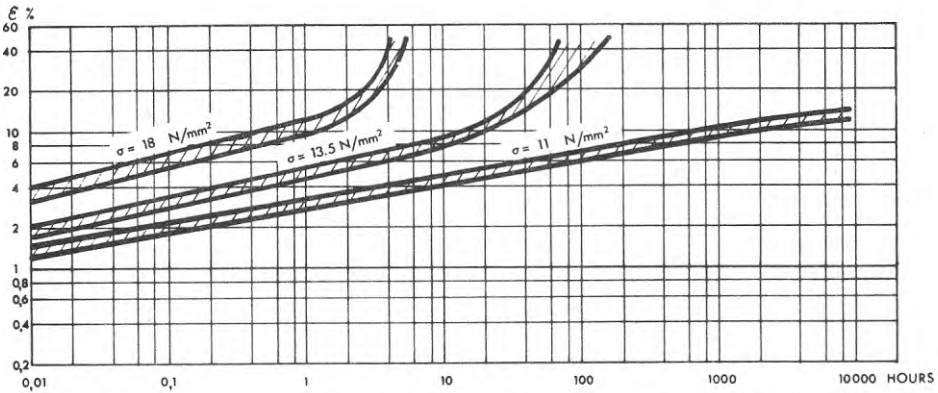


FIG 25 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.35 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	11.9 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	964 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	34
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 20 °C

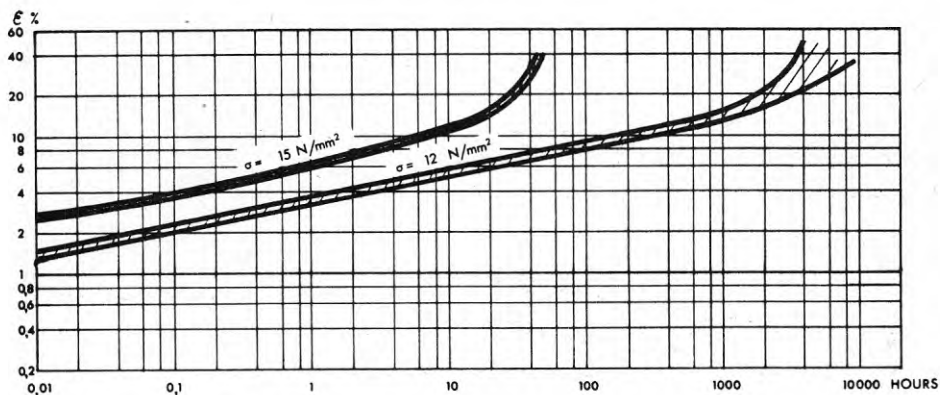


FIG 26 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	206x18.2 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.35 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	11.9 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	964 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	34
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 20 °C

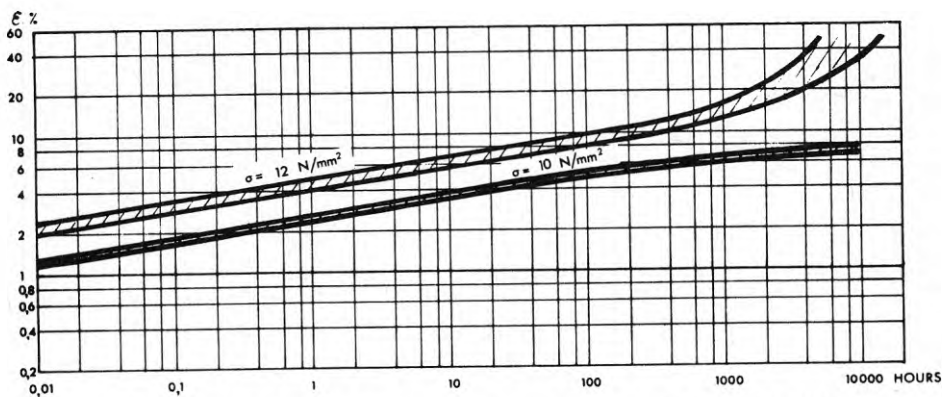


FIG 27 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	400x33 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	1.8 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	21.4 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	959 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	12
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 20 °C

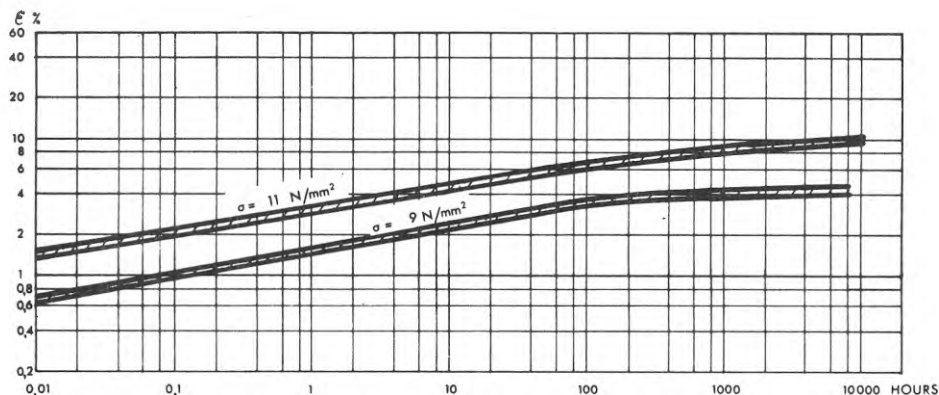


FIG 28 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	400x33 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	1.8 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	21.4 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	959 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	12
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 20 °C

Det karaktäristiska utseendet hos töjningskurvorna är betingat av att en lokal flytning (necking) uppstår i provstavarna efter en viss tid. Som nämnts under punkt 2 ovan erhålls till en början rätlinjiga kurvor, vilka representerar en med tiden avtagande töjningshastighet i stavarna. När ca 10 % förlängning uppnåtts i stavarna kröker kurvorna av och lutningen hos kurvorna ökar starkt. Vid en förlängning i stavarna av storleksordningen 20 % har en begynnande "necking" kunnat observeras rent visuellt. Inom den starkt krökta delen av töjningskurvan, vilken representerar en med tiden ökande töjningshastighet, kan därför töjningstillväxten till största delen

hänförs till ett visst parti på staven. Den starka krökningen hos kurvorna vid töjningar större än ca 10 % kan därför anses betingad av en begynnande flytning i materialet.

En jämförelse mellan de uppmätta töjningskurvorna för stavar av olika PEH-råvaror visar att stora likheter föreligger mellan de olika töjningskurvorna, fig. 29-30. För töjningar upp till ca 10 % är avvikelsen mellan de olika kurvorna ytterst obetydlig. Inom det område där kurvorna kröker av förekommer emellertid större skillnader mellan töjningskurvorna för de olika stavarna. Sålunda kan observeras att de kortaste brottiderna erhålls för stavarna med det lägsta  $MI_5$ -värdet, medan stavarna med det högsta  $MI_5$ -värdet tycks ge de längsta tiderna till segbrott. Det sistnämnda förhållandet är intressant även ur den synpunkten att stavarna med det högsta smältindexvärdet har haft den klart lägsta densiteten ( $959 \text{ kg/m}^3$ ). Mot bakgrund av tidigare erhållna resultat (fig. 11-12) bör en låg densitet hos provstavarna bidra till tidiga segbrott. I det aktuella fallet ger dock stavarna från råvaran med det högsta  $MI_5$ -värdet de längsta segbrottstiderna trots det låga densitetsvärdet. De erhållna resultaten visar således att medelmolekylvikten och molekylviktsfördelningen hos PEH-råvaran har inverkan på töjningsförloppet i stavarna. Speciellt märkbar är denna inverkan då den lokala flytningen äger rum i stavarna.

#### 5.4 Töjningskurvor för stavar från rör av olika tryckklasser

Provningar av stavar, uttagna från rör av olika tryckklasser har utförts i mindre omfattning, fig. 31. I det aktuella fallet har rören varit tillverkade av samma råvara och haft samma diameter. De uppmätta smältindexvärdena för rören skiljer sig något, men avviker relativt blygsamt från det normalvärde som råvarutillverkaren uppger ( $MI_5 = 0.4 \text{ g/10 min.}$ ). Som framgår är de uppmätta töjningarna relativt lika till en början, men töjningsökningen sker snabbare i stavarna från de tunnväggiga rören än i stavarna från de tjockväggiga rören. Eftersom ett tunnväggigt rör kyls fortare än ett tjockväggigt blir densiteten lägre i det förstnämnda röret, jfr fig. 5-6. Skillnaderna mellan de uppmätta töjningskurvorna kan därför huvudsakligen antas bero på densitetsskillnaden mellan de olika stavarna.

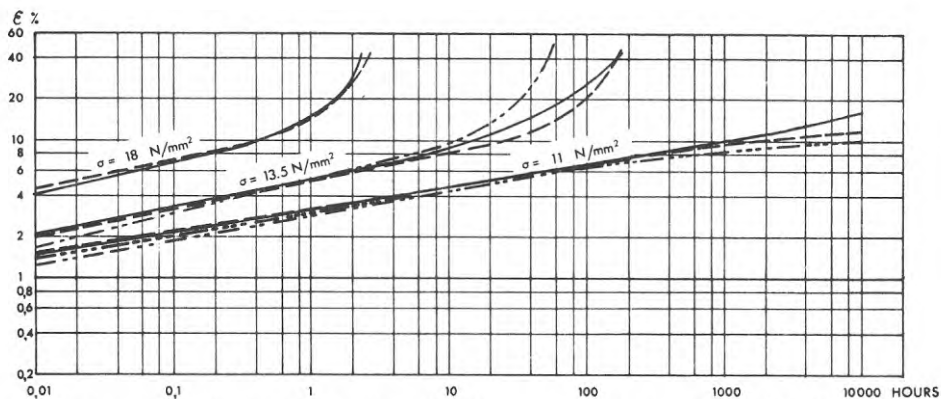


FIG 29 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS (mm)	200x18.2	200x18.2	400x36.4	400x33
TENSILE BAR ORIENTATION	LONGITUDINAL	LONGITUDINAL	LONGITUDINAL	LONGITUDINAL
TENSILE BAR DENSITY (kg/m <sup>3</sup> )	961	963	962	959
MELT INDEX MI <sub>5</sub> (g/10 min)	0.60	0.34	0.20	1.8
MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> (g/10 min)	16.2	12.6	10.2	21.4
FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub>	27	37	50	12
TEMPERATURE (°C)	+ 20	+ 20	+ 20	+ 20
ENVIRONMENT	WATER	WATER	AIR	WATER

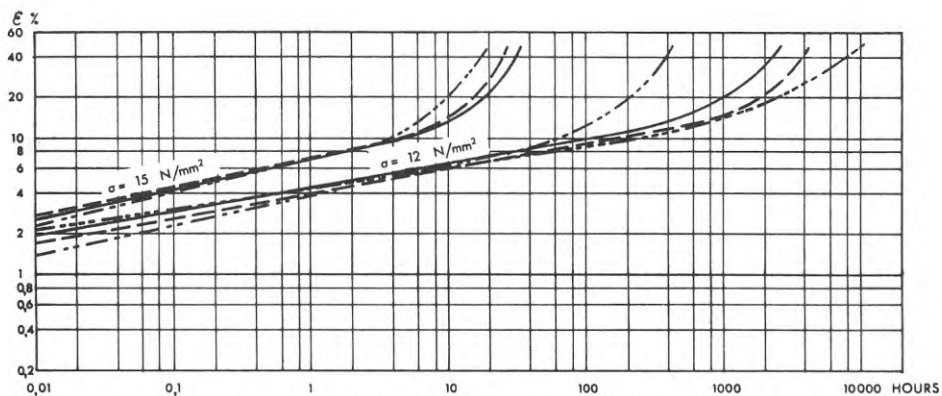


FIG 30 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS (mm)	200x18.2	200x18.2	400x36.4	400x33
TENSILE BAR ORIENTATION	LONGITUDINAL	LONGITUDINAL	LONGITUDINAL	LONGITUDINAL
TENSILE BAR DENSITY (kg/m <sup>3</sup> )	961	963	962	959
MELT INDEX MI <sub>5</sub> (g/10 min)	0.60	0.34	0.20	1.8
MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> (g/10 min)	16.2	12.6	10.2	21.4
FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub>	27	37	50	12
TEMPERATURE (°C)	+ 20	+ 20	+ 20	+ 20
ENVIRONMENT	WATER	WATER	AIR	WATER

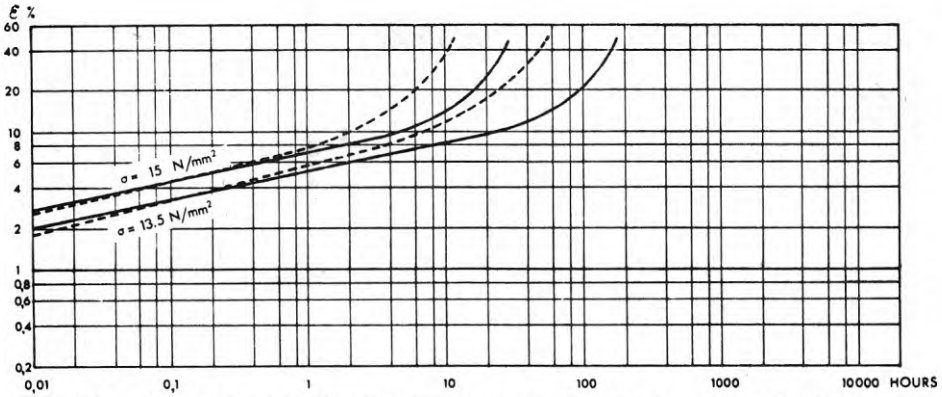


FIG 31 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

	—————	-----
PIPE DIMENSIONS (mm)	200x18.2	200x7.7
TENSILE BAR ORIENTATION	LONGITUDINAL	LONGITUDINAL
TENSILE BAR DENSITY (kg/m <sup>3</sup> )	963	958
MELT INDEX MI <sub>5</sub> (g/10 min)	0.34	0.43
MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> (g/10 min)	12.6	14.4
FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub>	37	34
TEMPERATURE (°C)	+ 20	+ 20
ENVIRONMENT	WATER	WATER

### 5.5 Inverkan av tillverkningsbetingelser

För att undersöka i vad mån en förändring av tillverkningsparametrarna kan inverka på resultaten vid stavprovningarna har några provningar utförts på stavar från rör som tillverkats under olika betingelser, fig. 32-33. I ena fallet har tillverkningshastigheten varit hög samtidigt som rören kylts med kallt kylvattnet. I andra fallet har en låg tillverkningshas-



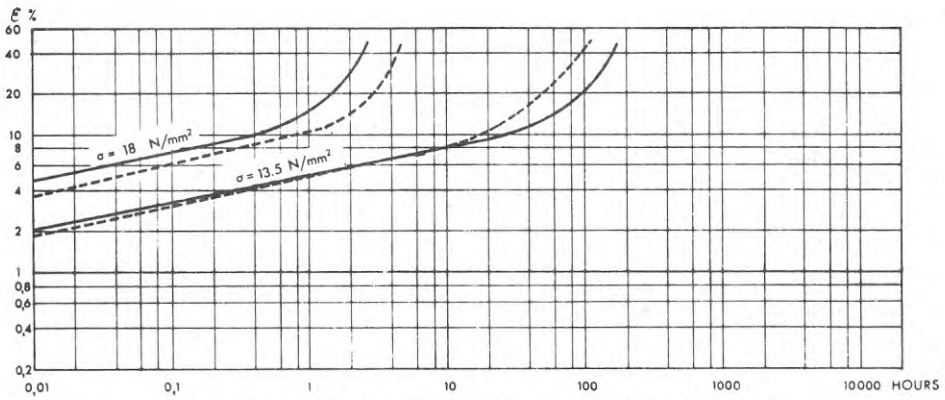


FIG 32 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

	1) ———— 2)		
	—————	-----	
PIPE DIMENSIONS (mm)	200x18.2	200x18.2	
TENSILE BAR ORIENTATION	LONGITUDINAL	LONGITUDINAL	
TENSILE BAR DENSITY (kg/m <sup>3</sup> )	963	964	1) Pipes manufactured with cold cooling water and a high manufacturing speed.
MELT INDEX MI <sub>5</sub> (g/10 min)	0.34	0.35	
MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> (g/10 min)	12.6	11.9	2) Pipes manufactured with warm cooling water and a medium manufacturing speed.
FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub>	37	34	
TEMPERATURE (°C)	+ 20	+ 20	
ENVIRONMENT	WATER	WATER	

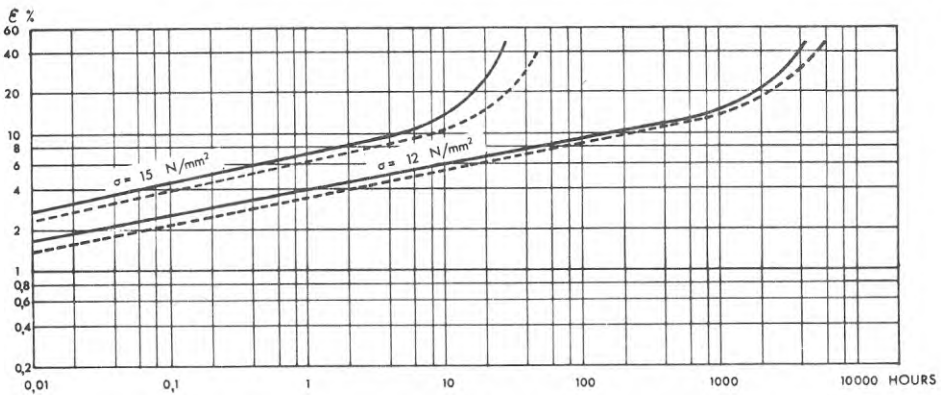


FIG 33 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

	1) ———— 2)		
	—————	-----	
PIPE DIMENSIONS (mm)	200x18.2	200x18.2	
TENSILE BAR ORIENTATION	LONGITUDINAL	LONGITUDINAL	
TENSILE BAR DENSITY (kg/m <sup>3</sup> )	963	964	1) Pipes manufactured with cold cooling water and a high manufacturing speed.
MELT INDEX MI <sub>5</sub> (g/10 min)	0.34	0.35	
MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> (g/10 min)	12.6	11.9	2) Pipes manufactured with warm cooling water and a medium manufacturing speed.
FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub>	37	34	
TEMPERATURE (°C)	+ 20	+ 20	
ENVIRONMENT	WATER	WATER	

tighet tillämpats och varmt kylvatten använts. För övrigt har rören haft samma dimensioner och varit tillverkade av samma råvara. De ovannämnda tillverkningsförfarandena har resulterat i att i bägge fallen ungefär lika stora inbyggda spänningar har erhållits i rören. Densitetsfördelningen i rörväggen är även ungefär densamma i bägge fallen, jfr fig. 5-6. Några större skillnader mellan töjningskurvorna har inte heller kunnat uppmätas, och de erhållna avvikelserna ligger i stort inom töjningskurvornas normala spridningsområden.

### 5.6 Rörprovning vid + 20°C

Vid den tryckprovning som utförts av olika PEH-rör har förutom brotttider även diameterökningen på mitten av rörproven uppmätts. De töjningskurvor som härvid erhållits, fig. 34-36, uppvisar likheter med de töjningskurvor som uppmätts för provstavarna. Töjningskurvorna för rören är i likhet med kurvorna för stavarna ungefär rätlinjiga upp till ca 10 % töjning, och kröker därefter av vid större töjningar.

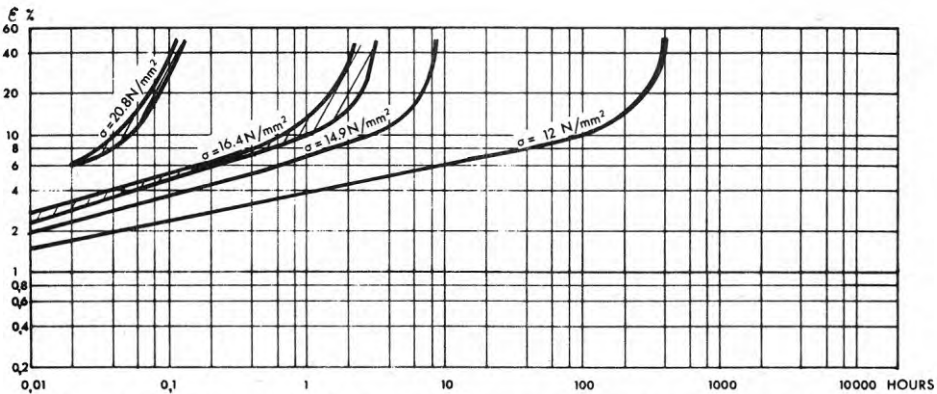


FIG 34 PERIPHERAL ELONGATION IN HDPE PIPES SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.60 g/10 min
STATE OF STRESS:	ONE-AXIAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	16.2 g/10 min
MEAN DENSITY:	959 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	27
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 20 °C

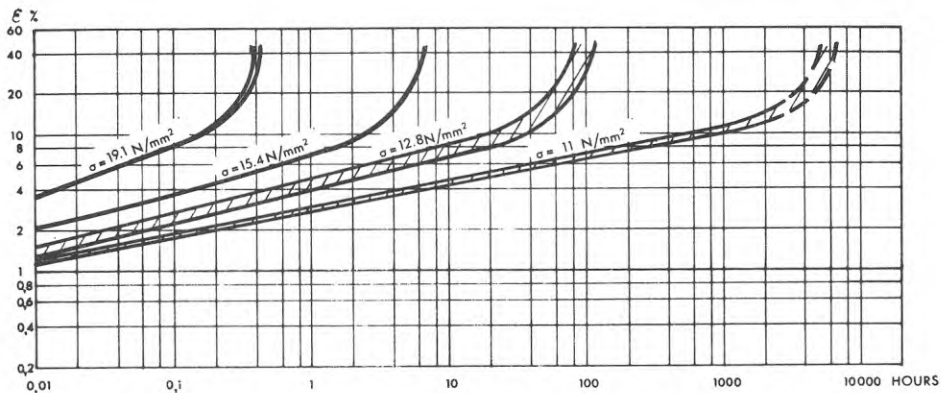


FIG 35 PERIPHERAL ELONGATION IN HDPE PIPES SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX MI <sub>5</sub> :	0.60 g/10 min
STATE OF STRESS:	ONE-AXIAL	MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> :	16.2 g/10 min
MEAN DENSITY:	959 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub> :	27
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 20 °C

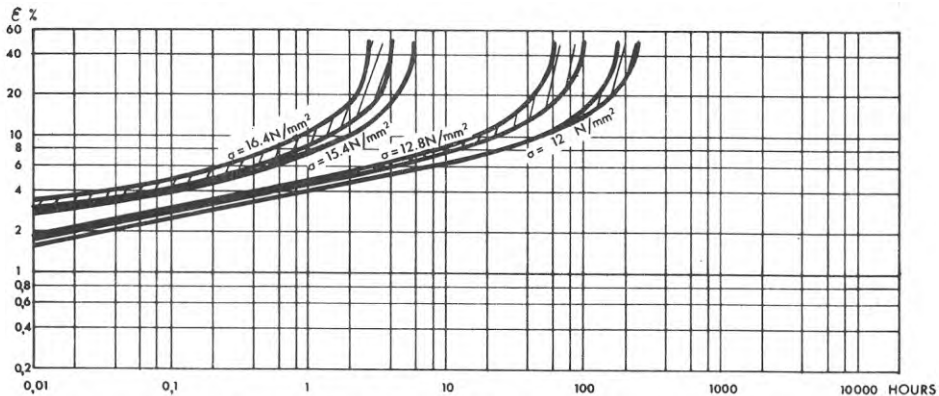


FIG 36 PERIPHERAL ELONGATION IN HDPE PIPES SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX MI <sub>5</sub> :	0.21 g/10 min
STATE OF STRESS:	ONE-AXIAL	MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> :	9.9 g/10 min
MEAN DENSITY:	959 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub> :	47
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 20 °C

En jämförelse mellan uppmätta töjningar i enaxligt belastade rör av två olika PEH-råvaror visar att töjningsförloppen är ungefär desamma för bägge rören upp till 10 % töjning, fig. 37-38. Bägge rören är av samma dimension och har haft en nära nog identisk densitetsfördelning i rörväggen, jfr fig. 5-6, samt ungefär lika stora inbyggda spänningar (ca 22 kp/cm<sup>2</sup>). Jämför man de töjningskurvor som uppmätts för stavar från ovannämnda rör, fig. 29-30, finner man att stavarna från rören med  $MI_5 = 0.21$  uppnått 50 % förlängning tidigare än stavarna med  $MI_5 = 0.60$ . För rören är denna skillnad mellan bröttiderna mindre markerad.

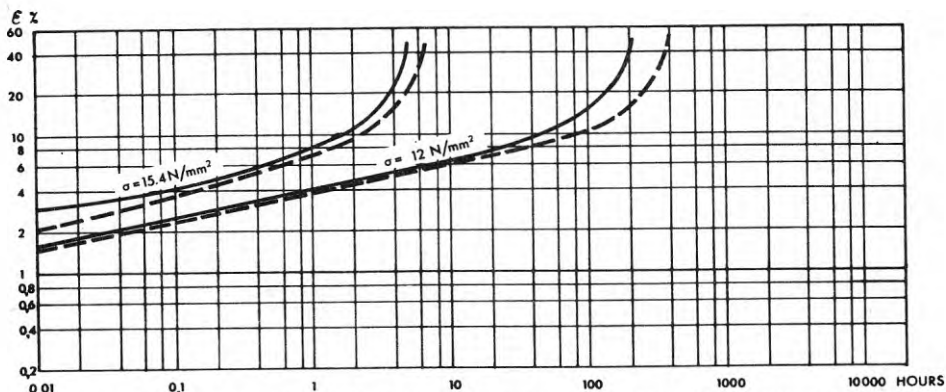


FIG 37 PERIPHERAL ELONGATION IN HDPE PIPES SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE

		—————	-----
PIPE DIMENSIONS (mm)	200x18.2	200x18.2	
STATE OF STRESS	ONE-AXIAL	ONE-AXIAL	
MEAN DENSITY (kg/m <sup>3</sup> )	959	959	
MELT INDEX $MI_5$ (g/10 min)	0.21	0.60	
MELT INDEX $MI_{21.6}$ (g/10 min)	9.9	16.2	
FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$	47	27	
TEMPERATURE (°C)	+20	+20	
ENVIRONMENT	WATER	WATER	

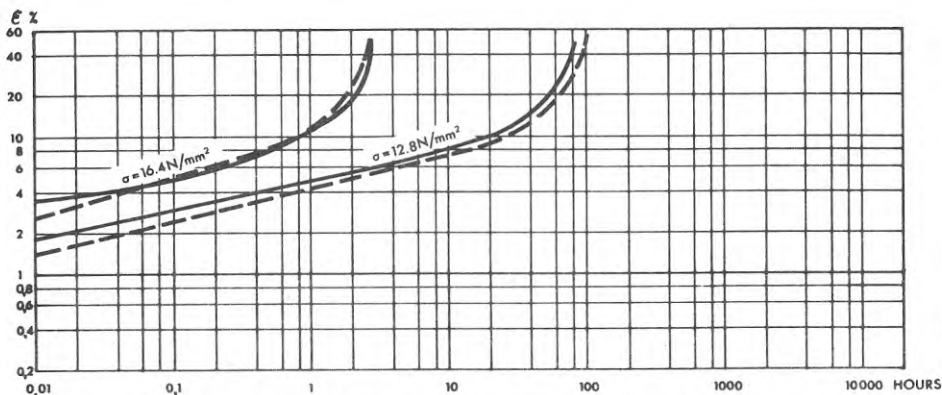


FIG 38 PERIPHERAL ELONGATION IN HDPE PIPES SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE

		—————	-----
PIPE DIMENSIONS	(mm)	200x18.2	200x18.2
STATE OF STRESS		ONE-AXIAL	ONE-AXIAL
MEAN DENSITY	(kg/m <sup>3</sup> )	959	959
MELT INDEX MI <sub>5</sub>	(g/10 min)	0.21	0.60
MELT INDEX MI <sub>21.6</sub>	(g/10 min)	9.9	16.2
FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub>		47	27
TEMPERATURE	(°C)	+20	+20
ENVIRONMENT		WATER	WATER

Tryckprovningarna har som tidigare nämnts utförts med olika typer av ändförslutningar vilket möjliggjort provningarna med såväl en- som tvåaxligt spänningstillstånd, orsakat av det invändiga hydrauliska trycket. Då provningarna utförts med ändförslutningar vilka förankrats i rörväggen och därmed åstadkommit ett tvåaxligt spänningstillstånd i rören erhålls töjningskurvor med brantare lutning än om provningen skett under enaxligt spänningstillstånd, fig. 39-42.

En jämförelse mellan töjningskurvor för en- resp. tvåaxligt belastade rör, fig. 41, visar att begynnelse-töjningarna är väsentligt mindre i de tvåaxligt belastade rören än i de enaxligt belastade. Töjningen ökar även snabbare i de förstnämnda rören, men är dock genomgående mindre än när rören tryckprovas under enaxligt spänningstillstånd. Dessutom erhålls avsevärt längre brotttider för de tvåaxligt belastade rören. Det bör i detta sammanhang observeras att rören varit av samma dimensioner, men tillverkade av två olika PEH-rå-

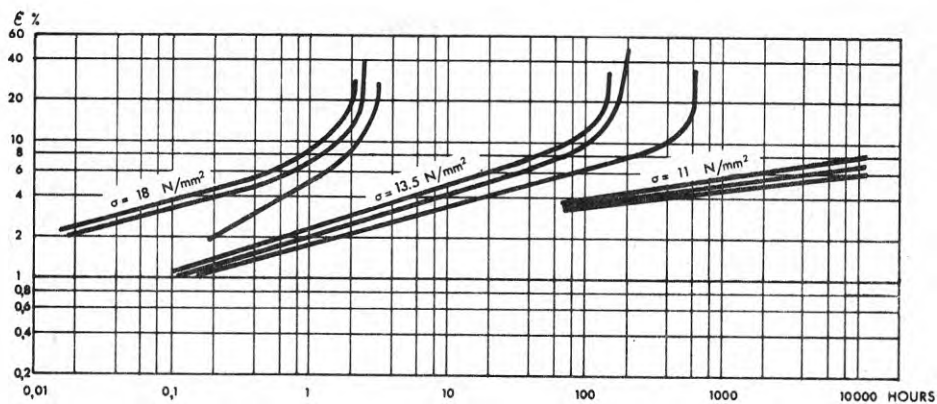


FIG 39 PERIPHERAL ELONGATION IN HDPE PIPES SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.34 g/10 min
STATE OF STRESS:	BI-AXIAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	12.6 g/10 min
MEAN DENSITY:	961 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	37
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 20 °C

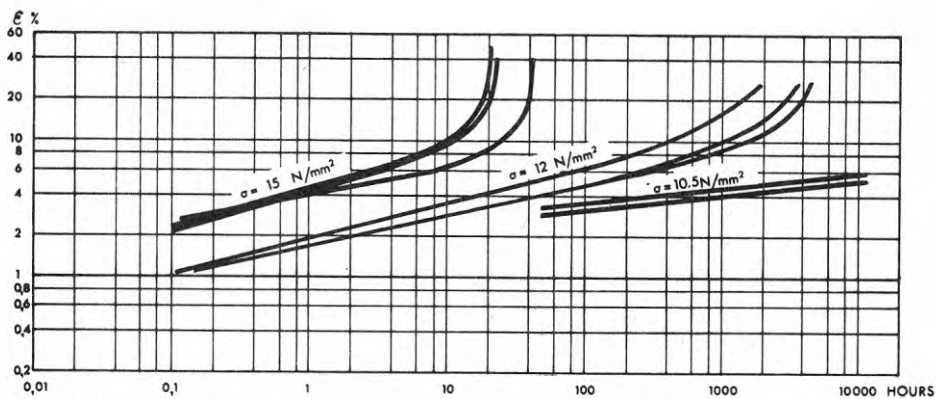


FIG 40 PERIPHERAL ELONGATION IN HDPE PIPES SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.34 g/10 min
STATE OF STRESS:	BI-AXIAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	12.6 g/10 min
MEAN DENSITY:	961 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	37
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 20 °C

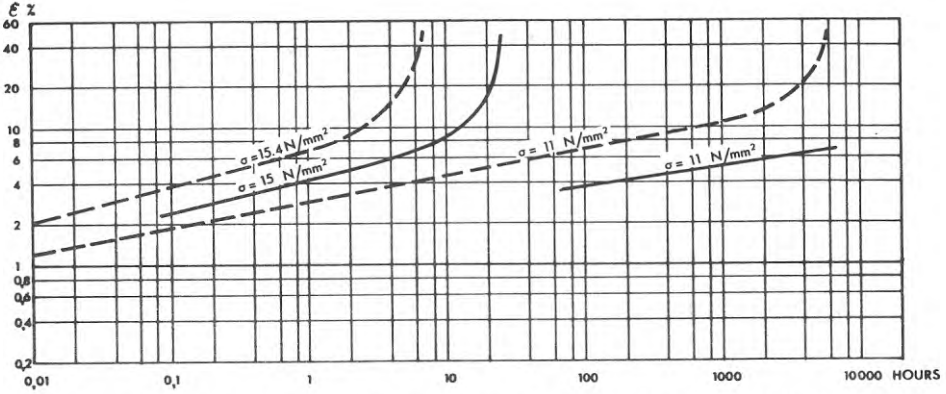


FIG 41 PERIPHERAL ELONGATION IN HDPE PIPES SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE

PIPE DIMENSIONS	(mm)	200x18.2	200x18.2
STATE OF STRESS		BI-AXIAL	ONE-AXIAL
MEAN DENSITY	(kg/m <sup>3</sup> )	961	959
MELT INDEX MI <sub>5</sub>	(g/10 min)	0.34	0.60
MELT INDEX MI <sub>21.6</sub>	(g/10 min)	12.6	16.2
FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub>		37	27
TEMPERATURE	(°C)	+20	+20
ENVIRONMENT		WATER	WATER

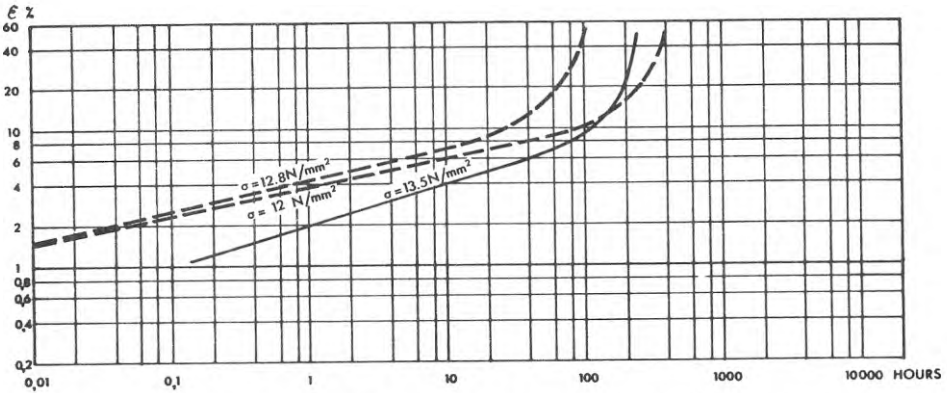


FIG 42 PERIPHERAL ELONGATION IN HDPE PIPES SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE

PIPE DIMENSIONS	(mm)	200x18.2	200x18.2
STATE OF STRESS		BI-AXIAL	ONE-AXIAL
MEAN DENSITY	(kg/m <sup>3</sup> )	961	959
MELT INDEX MI <sub>5</sub>	(g/10 min)	0.34	0.60
MELT INDEX MI <sub>21.6</sub>	(g/10 min)	12.6	16.2
FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub>		37	27
TEMPERATURE	(°C)	+20	+20
ENVIRONMENT		WATER	WATER



varor. De rör som provats under tvåaxligt spänningstillstånd har haft en något högre densitet än de enaxligt belastade rören, jfr fig. 5-6, medan de inbyggda spänningarna har varit av samma storleksordning i bägge rören (ca 2.1-2.2 N/mm<sup>2</sup>). Vid de provningar som utförts på stavar från ovannämnda rör har vidare endast obetydligt skillnader kunnat uppmätas, jfr fig. 29-30. De i fig. 41 redovisade skillnaderna mellan töjningarna i rören måste därför huvudsakligen bero på olikheterna i spänningstillstånd. Härav inses att avsevärt längre brotttider kan erhållas för de sega brotten i rören om rören provas med tvåaxligt spänningstillstånd än om provningen sker under enaxligt spänningstillstånd.

### 5.7 Jämförelser mellan töjningar i rör och stavar

Eftersom stavar och rör är utsatta för helt olika belastningsfall är töjningskurvorna för rören och stavarna inte direkt jämförbara. Likväl visar resultatet från de utförda provningarna att den radiallya töjning som uppmätts vid tryckprovningarna av rören under enaxligt spänningstillstånd, relativt väl överensstämmer med de töjningar som uppmätts i dragstavarna, fig. 43-44. Detta gäller speciellt för töjningar understigande 10 %. Här däremot rören tryckprovats under tvåaxligt spänningstillstånd erhålls helt olika töjningsförlopp i rör och stavar, fig. 45-46.

Skillnaderna i belastningsfall för rör och provstavar är flera. Avvikelser i såväl spänningens storlek som spänningsfördelning och spänningstillstånd förekommer mellan rör och provstavar. Stavarna är, om man bortser från spänningsökningen på grund av tvärkontraktionen, belastade med en konstant dragspänning. I rören ger det invändiga vattentrycket upphov till dragspänningar i rörväggen. Dragspänningens storlek beräknas vanligen med formeln:

$$\sigma = \frac{p \cdot D_m}{2 \cdot s} \quad (1)$$

där  $p$  = invändigt vattentryck

$D_m$  = medelvärdet av rörets inner- och ytterdiameter

$s$  = rörets godstjocklek

Ovanstående formel förutsätter att rörets godstjocklek är liten i förhållande till diametern. Tar man hänsyn till rörets godstjocklek gäller följande formel för beräkning av ringspänningen i röret:

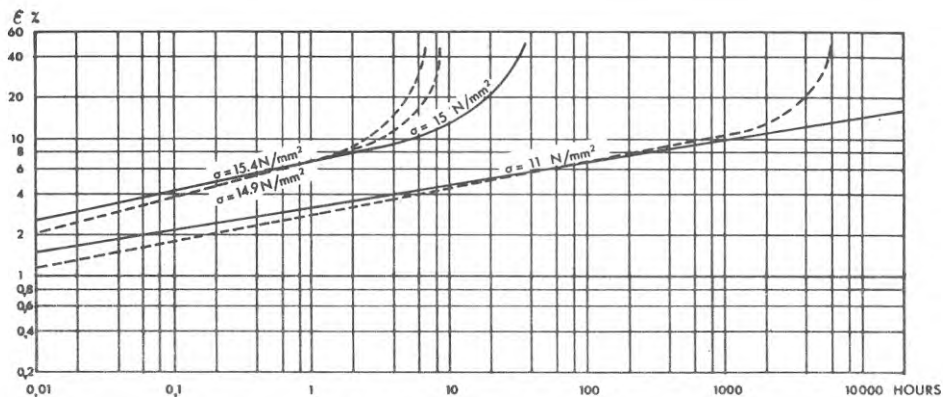


FIG 43 ELONGATIONS IN HDPE PIPES AND TENSILE BARS

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2	mm	MELT INDEX MI <sub>5</sub> :	0.60	g/10 min
ENVIRONMENT:	WATER		MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> :	16.2	g/10 min
TEMPERATURE:	20	°C	FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub> :	27	

PIPE -----

TENSILE BAR -----

STATE OF STRESS: ONE-AXIAL

TENSILE BAR ORIENTATION: LONGITUDINAL

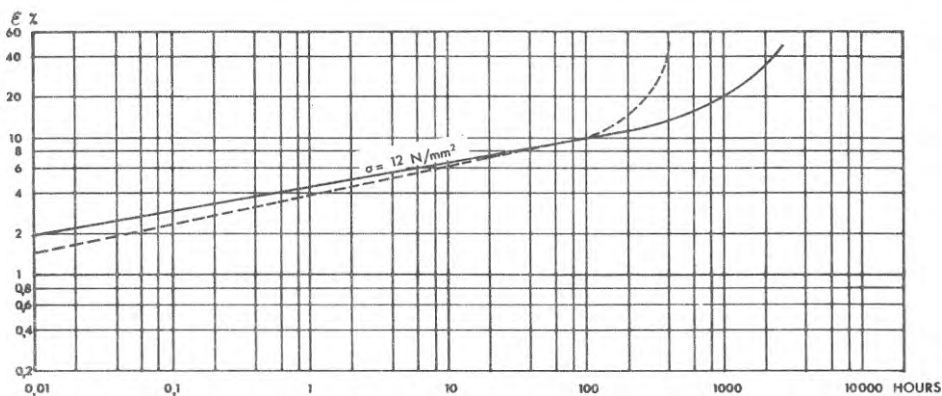
MEAN DENSITY: 959 kg/m<sup>3</sup>TENSILE BAR DENSITY: 961 kg/m<sup>3</sup>

FIG 44 ELONGATIONS IN HDPE PIPES AND TENSILE BARS

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2	mm	MELT INDEX MI <sub>5</sub> :	0.60	g/10 min
ENVIRONMENT:	WATER		MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> :	16.2	g/10 min
TEMPERATURE:	20	°C	FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub> :	27	

PIPE -----

TENSILE BAR -----

STATE OF STRESS: ONE-AXIAL

TENSILE BAR ORIENTATION: LONGITUDINAL

MEAN DENSITY: 959 kg/m<sup>3</sup>TENSILE BAR DENSITY: 961 kg/m<sup>3</sup>

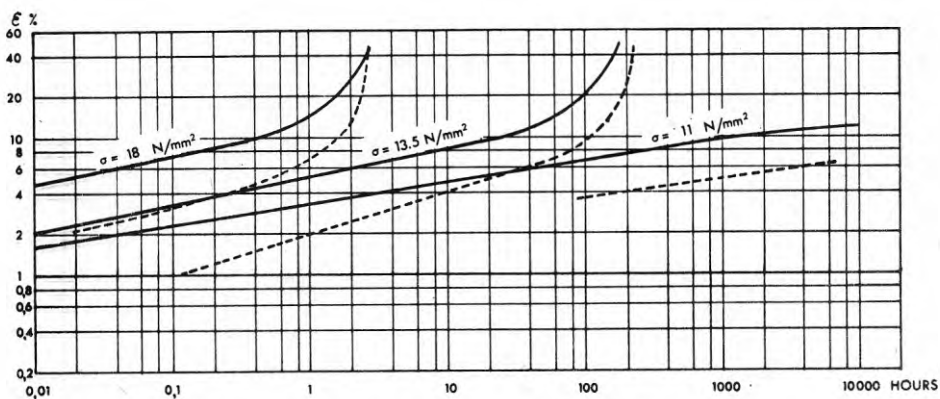


FIG 45 ELONGATIONS IN HDPE PIPES AND TENSILE BARS

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2	mm	MELT INDEX MI <sub>5</sub> :	0.34	g/10 min
ENVIRONMENT:	WATER		MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> :	12.6	g/10 min
TEMPERATURE:	+ 20	°C	FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub> :	37	

PIPE -----

TENSILE BAR -----

STATE OF STRESS: BI-AXIAL

TENSILE BAR ORIENTATION: LONGITUDINAL

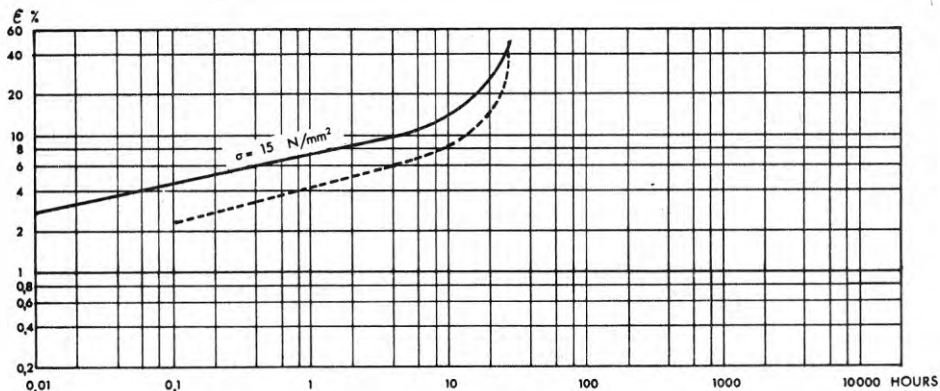
MEAN DENSITY: 961 kg/m<sup>3</sup>TENSILE BAR DENSITY: 963 kg/m<sup>3</sup>

FIG 46 ELONGATIONS IN HDPE PIPES AND TENSILE BARS

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2	mm	MELT INDEX MI <sub>5</sub> :	0.34	g/10 min
ENVIRONMENT:	WATER		MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> :	12.6	g/10 min
TEMPERATURE:	+ 20	°C	FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub> :	37	

PIPE -----

TENSILE BAR -----

STATE OF STRESS: BI-AXIAL

TENSILE BAR ORIENTATION: LONGITUDINAL

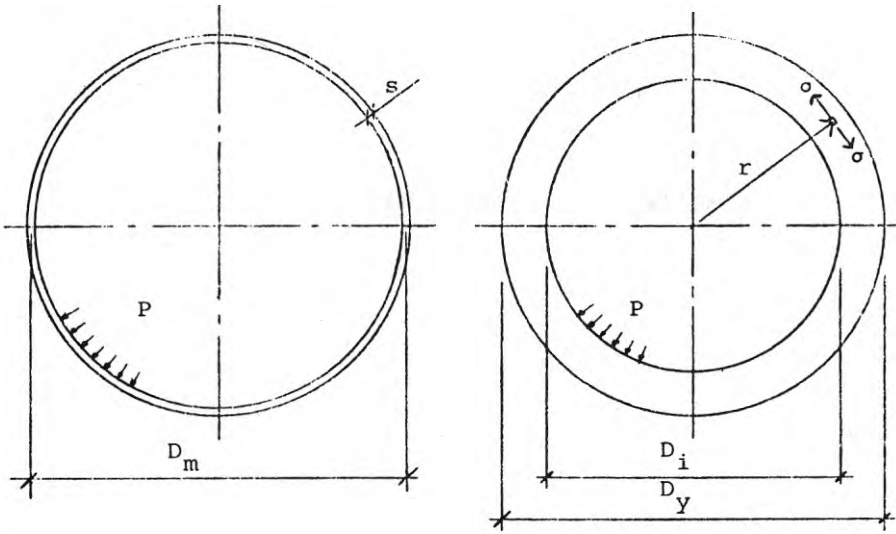
MEAN DENSITY: 961 kg/m<sup>3</sup>TENSILE BAR DENSITY: 963 kg/m<sup>3</sup>

$$\sigma_r = \frac{D_i^2 \cdot p}{D_y^2 - D_i^2} \cdot \left(1 + \frac{D_y^2}{4 \cdot r^2}\right) \quad (2)$$

där  $p$  = invändigt vattentryck  
 $D_y$  = rörets ytterdiameter  
 $D_i$  = rörets innerdiameter  
 $r$  = radiella avståndet från  
 rörets centrum till en god-  
 tycklig punkt i rörväggen

Beräknar man spänningen i rörväggen med formel 2 finner man att spänningen är störst vid insidan av rörväggen och minst vid utsidan, fig. 47-48. De spänningvärden som erhålls vid insidan av rörväggen är dessutom nära nog överensstämmande med de värden som erhålls med formel (1) för rör av olika tryckklasser. Som framgår av fig. 47-48 är emellertid skillnaderna mellan de beräknade spänningvärdena enligt formel (1) resp. (2) i praktiken märkbara först vid de största tryckklasserna. Vidare bör observeras att formel (2) bygger på linjär teori och förutsätter sålunda ett linjärt material. I verkligheten varierar E-modulen i rörväggen beroende på densitetsfördelningen i rörväggen. Dessutom är E-modulen beroende av såväl spänningsnivå som belastningstid. Vid invändigt tryck i rören kan därför en viss spänningsutjämnning förutsättas ske i rörväggen. Antar man att en fullständig spänningsutjämnning sker i rörväggen erhålls för PEH-rör av tryckklass NT 10 med formel (2) 10 % lägre värde på dragspänningen än vad formel (1) anger. Vid de utförda tryckprovningarna har spänningen i rörväggen beräknats enligt formel (1), vilket innebär att den verkliga spänningen i rörväggen i genomsnitt är 10 % lägre. Detta är sannolikt en förklaring till varför töjningskurvorna för stavar och enaxligt belastade rör så nära överensstämmer för töjningar understigande 10 %, trots att stavarnas densitet är högre än rörens medeldensitet.

När töjningarna i rör och stavar överstiger ca 10 % blir skillnaderna mellan töjningskurvorna mer markerade. Töjningstillväxten sker fortare i rören och brotten kommer ca en halv dekad tidigare än i stavarna. Vid rör- och stavprovningen kommer den verkliga spänningen i provkropparna att öka med tiden på grund av tvärkontraktionen i materialet. Spänningsökningen kommer emellertid att ske snabbare i rörprovet eftersom ringspänningen i rörväggen är direkt proportionell mot rörets diameter (ekv. 1) vilken ökar under provningens gång. Denna kombinerade spännings- och töjningsökning får ett alltmer accelererat förlopp, vilket resulterar i en mycket hastig töjningsökning omedelbart före det slutliga brottet i röret.



Thin-walled pipe

$$\sigma_o = \frac{p \cdot D_m}{2s} \quad (1)$$

Thick-walled pipe

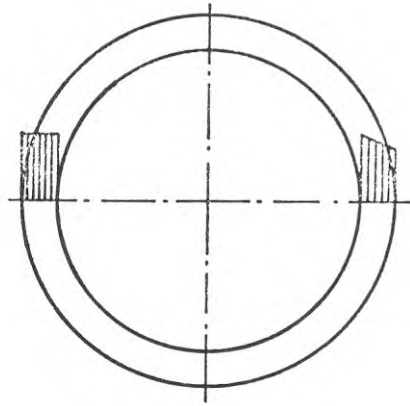
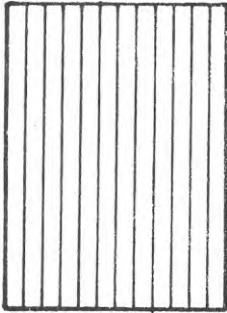
$$\sigma_r = \frac{D_i^2 \cdot p}{D_y^2 - D_i^2} \cdot \left( 1 + \frac{D_y^2}{4r^2} \right) \quad (2)$$

Pressure class NP	Hoopstress at inside of pipe wall	Average hoopstress	Hoopstress at outside of pipe wall
	$\frac{\sigma_r}{\sigma_o}$ %	$\frac{\sigma_r}{\sigma_o}$ %	$\frac{\sigma_r}{\sigma_o}$ %
2.5	100.06	97.5	95.06
4	100.16	96.0	92.16
6	100.40	94.0	88.40
10	101.00	90.0	81.00
16	102.72	84.0	70.72

FIG. 47 HOOP STRESSES IN PIPES  
SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE

HOOP STRESSES CALCULATED BY FORMULA (1):

5.00 N/mm<sup>2</sup>

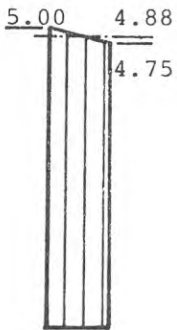


PRESSURE CLASS:

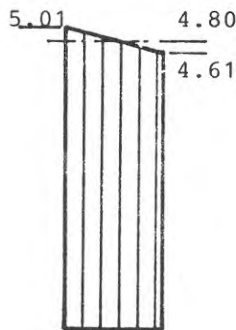
ALL CLASSES

HOOP STRESSES CALCULATED BY FORMULA (2):

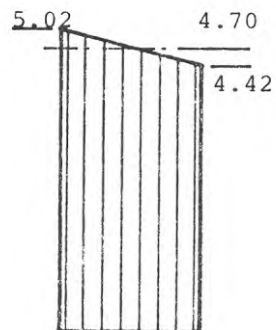
(all sorts N/mm<sup>2</sup>)



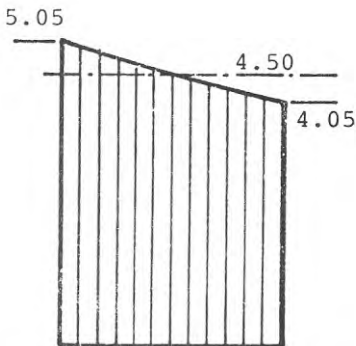
NP 2.5



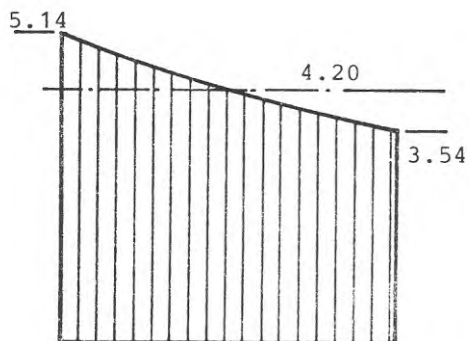
NP 4



NP 6



NP 10



NP 16

PRESSURE CLASS:

PRESSURE CLASS:

FIG. 48 HOOP STRESSES IN PIPE WALL FOR PIPES OF DIFFERENT PRESSURE CLASSES SUBJECTED TO NOMINAL PRESSURE

Härvid erhålls brantare töjningskurvor och kortare brotttider för rören än för stavarna.

När rören tryckprovats med ändförslutningar vilka varit förankrade i rörväggen har det invändiga vattentrycket givit upphov till såväl ring- som längdspänningar i rören. I dessa fall har som tidigare framgått klara skillnader uppmätts mellan töjningskurvorna för rör och stavar, fig. 45-46. Beräkningsmässigt erhålls mindre töjningar i ett rör av elastiskt material om detta utsätts för tvåaxlig belastning än om röret enbart påverkas av ringspänningar. Den relativa töjningsminskningen hos tvåaxligt belastade rör beror på graden av tvåaxlighet i spänningstillståndet samt på materialets tvärkontraktionstal ( $\nu$ ). För ett linjärt elastiskt material med  $\nu = 0.4$  kan töjningen vid tvåaxlig belastning beräknas vara ca 75-80 % av töjningen vid enaxlig belastning. Den mindre töjningen i de tvåaxligt belastade rören bidrar indirekt till att spänningsökningen i rören på grund av diameterutvidgningen även blir mindre. Härigenom erhålls genomgående mindre töjningar och längre brotttider för tvåaxligt belastade rör än för enaxligt belastade.

#### 5.8 Erhållna resultat. Sammanfattning

Resultaten från de utförda rör- och stavprovningarna vid + 20°C kan sammanfattas enligt följande:

1. Töjningstillväxten i rör och stavar av samtliga testade PEH-råvaror uppvisar ett linjärt förlopp i ett dubbellogaritmiskt diagram för töjningar mindre än ca 10 %. Då töjningen överstiger detta värde börjar så småningom en lokal flytning (necking) att ske i materialet, vilket medför att töjningskurvorna antar en krökt form.
2. Den uppmätta spridningen i töjningsvärdena har varit lika stor för samtliga råvaror.
3. Ingen signifikant skillnad föreligger mellan de töjningskurvor som uppmätts för stavar, vilka uttagits ur olika kvadranter av röret.
4. Ingen signifikant skillnad föreligger mellan töjningskurvor för stavar som uttagits i rörets längd- resp. tangentialriktning.
5. För en och samma PEH-råvara erhålls större töjningar i stavar med lägre densitet än i stavar med högre densitet.
6. Töjningsegenskaperna hos rör och provstavar påverkas sannolikt av råvarans egenskaper (medelmolekylvikt och molekylviktsfördelning).

7. På den rätlinjiga delen av töjningskurvorna erhålls på grund av kurvornas flacka lutning en relativt liten skillnad mellan töjningskurvorna för stavar av olika råvaror resp. med olika densitet.

8. Däremot erhålls skillnader mellan töjningskurvor för stavar av olika råvaror inom den krökta delen av kurvorna, dvs. inom det töjningsområde där den lokala flytningen sker i materialet. Samma förhållande gäller även för stavar av samma råvara men med olika densitet.

9. Mindre töjningar samt längre brotttider för de sega brotten i rören erhålls om rören tryckprovas med ett tvåaxligt spänningstillstånd än om provningen sker under enaxligt spänningstillstånd i rören.

10. Töjningskurvorna för enaxligt belastade rör och provstavar, uttagna nära rörväggens insida, är nära överensstämmande för töjningar understigande 10 %.

11. De sega brotten i de enaxligt belastade rören inträffar ca 0.5-1 dekad tidigare än "segbrotten" (50 %-töjning) i stavarna.

12. Då rören utsätts för ett tvåaxligt spänningstillstånd inträffar de sega brotten ungefär samtidigt i rör och provstavar.



## 6 RESULTAT FRÅN RÖR- OCH STAVPROVNINGAR VID FÖRHÖJD TEMPERATUR

### 6.1 Stavprovning vid + 40°C

Vid + 40°C har i begränsad omfattning stavprovningar utförts i såväl vatten som vätmedelhaltigt vatten. De uppmätta töjningstidssambanden för dessa stavar, fig. 49, uppvisar likheter med de resultat som erhållits vid + 20°C. Liksom befunnits gälla vid + 20°C är töjningskurvorna ungefär rätlinjiga upp till ca 10 % töjning, varefter de antar en krökt form. Vid spänningsnivån 9,5 N/mm<sup>2</sup> har emellertid brott inträffat i stavarna innan 50 %-töjning uppnåtts. Brottet har i dessa fall skett i form av sprödbrott (stress-cracking), fig. 4. Flertalet av de erhållna sprödbrotten har emellertid angivits inom parentes i fig. 49, eftersom det visat sig att utfräsningen av stavarna i detta fall inte varit helt perfekt. Eftersom ytstrukturen hos stavarna har en stor inverkan på brottiderna för ovan nämnda typ av brott (se vidare avsnitt 8 och 9) har den mindre goda utfräsning sannolikt bidragit till att påskynda brotten.

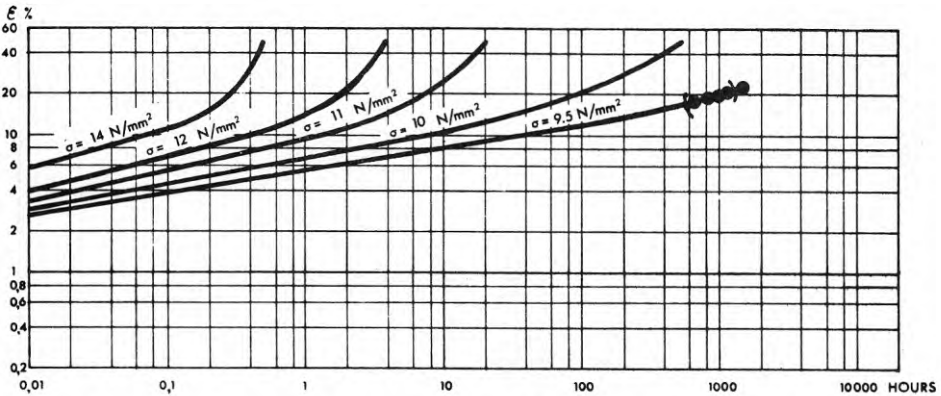


FIG 49 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX MI <sub>5</sub> :	0.60 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> :	16.2 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	961 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub> :	27
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 40 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE

## 6.2 Stavprovning vid + 60°C

Vid + 60°C har stavprovningar utförts vid sammanlagt sex olika spänningsnivåer, fig. 50. De erhållna töjningskurvorna uppvisar ett likartat utseende som erhållits vid provningarna vid + 20 resp. + 40°C. Dessutom kan observeras att spröda brott (stress-cracking) inträffar för sådana spänningsnivåer där töjningskurvorna är rätlinjiga eller svagt konvext krökta. Vid högre spänningsnivåer uppvisar kurvorna en konkav kurvform när töjningen överstiger ca 10 %.

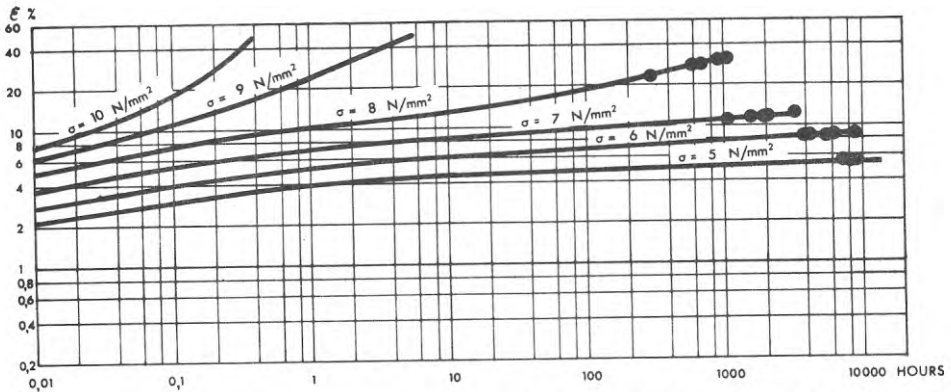


FIG 50 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX MI <sub>5</sub> :	0.60 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> :	16.2 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	961 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub> :	27
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 60 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE

## 6.3 Rörprovning vid + 60°C

Tryckprovningar av rör vid + 60°C har endast utförts på rör tillverkade av en råvara ( $MI_5 = 0,6$ ). Tryckprovningarna har dessutom endast skett på sådant sätt att det invändiga vattentrycket inte givit upphov till några längdspänningar i rören. De erhållna töjningskurvorna, fig. 51-52, uppvisar samma karaktäristiska utseende som erhållits vid lägre temperaturer. Vid låga spänningsnivåer erhålls rätlinjiga eller svagt konvexa kurvor och i dessa fall erhålls spröda brott i rören. Vid den högsta spänningsnivån erhålls konkava töjningskurvor vilka slutar med segbrott i rören.

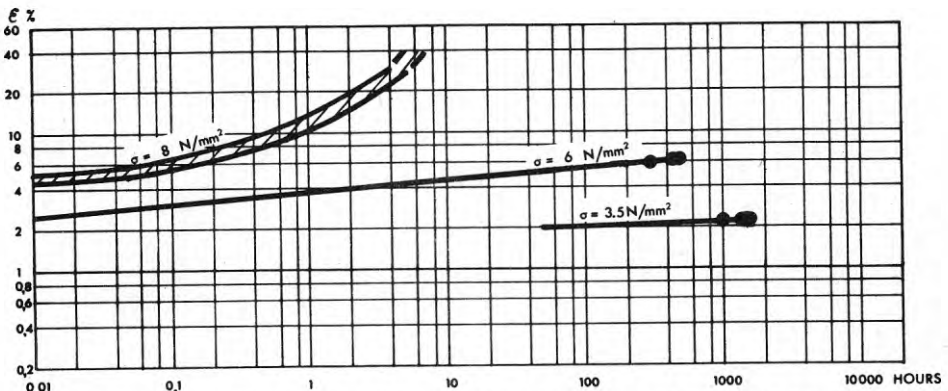


FIG 51 PERIPHERAL ELONGATION IN HDPE PIPES SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.60 g/10 min
STATE OF STRESS:	ONE-AXIAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	16.2 g/10 min
MEAN DENSITY:	959 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	27
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 60 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE

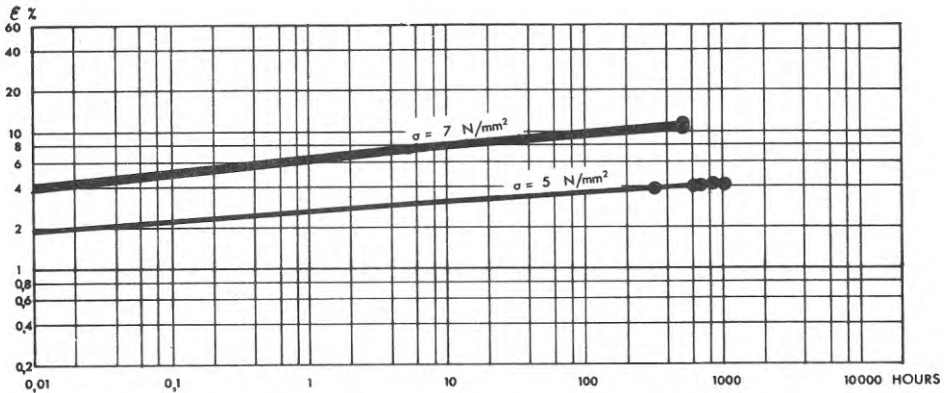


FIG 52 PERIPHERAL ELONGATION IN HDPE PIPES SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX MI <sub>5</sub> :	0.60 g/10 min
STATE OF STRESS:	ONE-AXIAL	MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> :	16.2 g/10 min
MEAN DENSITY:	959 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub> :	27
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 60 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE

De uppmätta töjningskurvorna för rör och stavar uppvisar ett likartat utseende trots att rören och stavarerna varit utsatta för olika belastningsfall, fig. 53-54. Dock kan observeras att sprödbrotten uppträder avsevärt tidigare i rören än i stavarerna. Vid de lägre spänningsnivåerna är töjningarna i rören ungefär lika stora eller något mindre än i stavarerna. Vid spänningsnivån 8 N/mm<sup>2</sup> (80 kp/cm<sup>2</sup>) är emellertid skillnaden större mellan töjningskurvorna för rör och stavar. I rören erhålls segbrott efter ca 5 timmar medan sprödbrott inträffar i stavarerna efter ca 1 000 timmars provning. Skillnaden beror sannolikt på att ovannämnda spänningsnivå ligger i närheten av det område där omslaget sker mellan segt och sprött brottbeteende. I detta spänningsområde har små spänningsvariationer en relativt stor inverkan på töjningskurvornas förlopp. Mellan rören och stavarerna föreligger skillnader i belastningsfall, inte minst beroende på att spänningen i rörväggen ökar med rørets diameterökning.

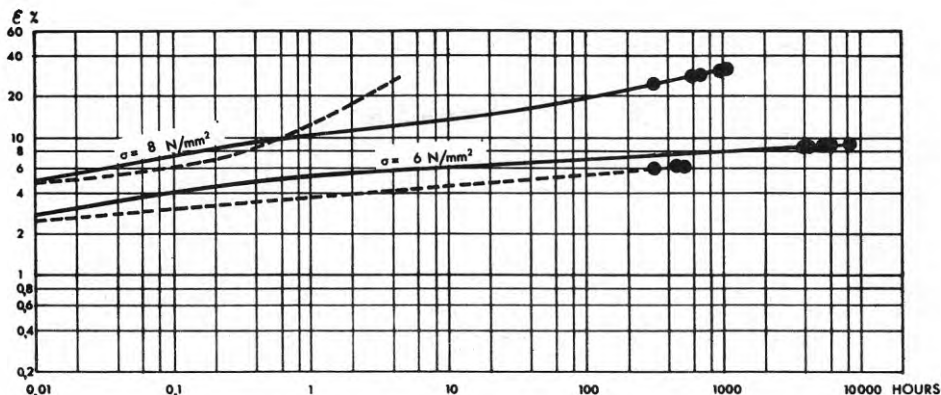


FIG 53 ELONGATIONS IN HDPE PIPES AND TENSILE BARS

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2	mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.60	g/10 min
ENVIRONMENT:	WATER		MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	16.2	g/10 min
TEMPERATURE:	+ 60	$^{\circ}\text{C}$	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	27	

PIPE - - - - -

TENSILE BAR - - - - -

STATE OF STRESS:	ONE-AXIAL
MEAN DENSITY:	959 $\text{kg/m}^3$

TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL
TENSILE BAR DENSITY	961 $\text{kg/m}^3$

● STRESS-CRACKING FAILURE

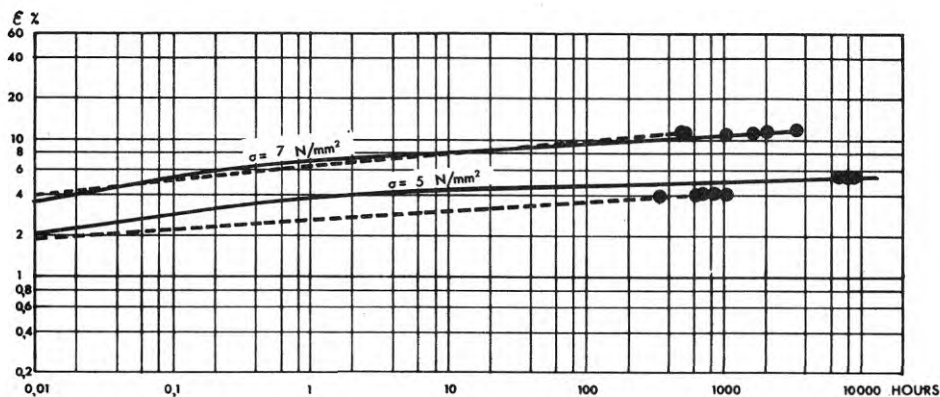


FIG 54 ELONGATIONS IN HDPE PIPES AND TENSILE BARS

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2	mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.60	g/10 min
ENVIRONMENT:	WATER		MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	16.2	g/10 min
TEMPERATURE:	+ 60	$^{\circ}\text{C}$	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	27	

PIPE - - - - -

TENSILE BAR - - - - -

STATE OF STRESS:	ONE-AXIAL
MEAN DENSITY:	959 $\text{kg/m}^3$

TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL
TENSILE BAR DENSITY	961 $\text{kg/m}^3$

● STRESS-CRACKING FAILURE

#### 6.4 Stavprovning vid + 80°C. Stavorienteringens inverkan på tøjningskurvorna

För att undersöka huruvida stavarnas orientering i rörväggen påverkar provningsresultaten har provningar utförts på stavar som varit uttagna i såväl längs- som tangentiell riktning i rörväggen, fig. 55-58. De i figurerna redovisade spridningsområdena för tøjningar i stavar har baserats på provningar av fem stavar på varje spänningsnivå. Motsvarande provningar har även utförts på stavar av en annan PEH-råvara, fig. 61-64. I de sistnämnda figurerna har de redovisade spridningsområdena för tøjningskurvorna baserats på provningar av tre provstavar på varje spänningsnivå. De erhållna resultaten från provningarna av stavar, vilka uttagits i längd resp. tvärriktningen i rören, visar att några större skillnader inte förekommer, fig. 59-60 resp. 65-66. För stavar av bägge råvarorna överensstämmer såväl tøjningskurvor som tider till sprödbrott då stavar är uttagna i rörets längd resp. tvärriktning.

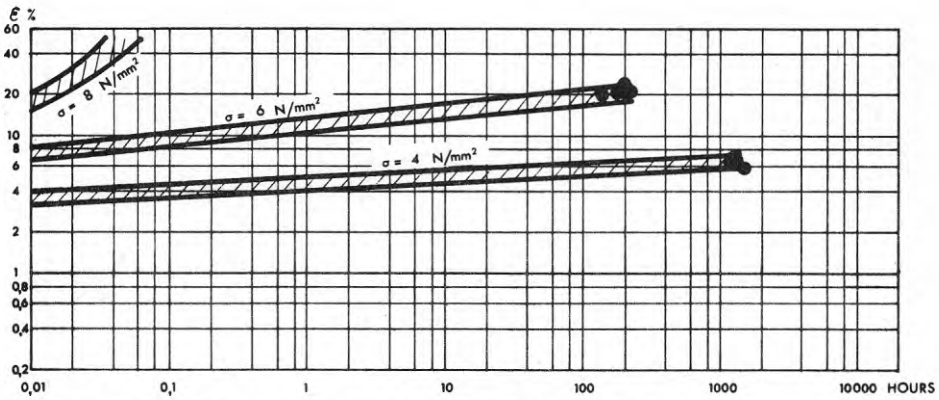


FIG 55 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.60 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	16.2 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	961 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	27
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 80 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE

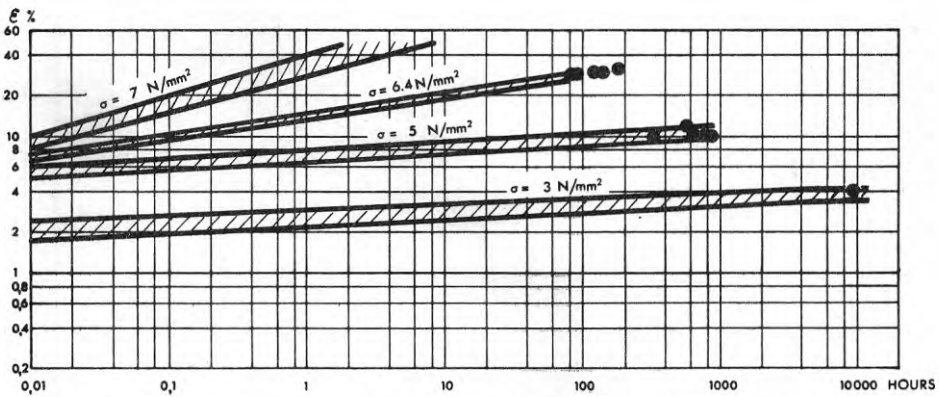


FIG 56 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.60 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	16.2 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	961 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	27
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 80 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE

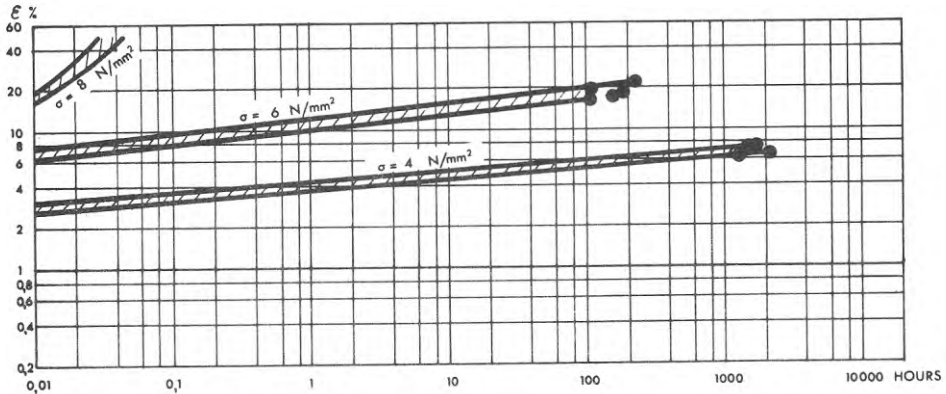


FIG 57 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.60 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	TANGENTIAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	16.2 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	961 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	27
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 80 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE

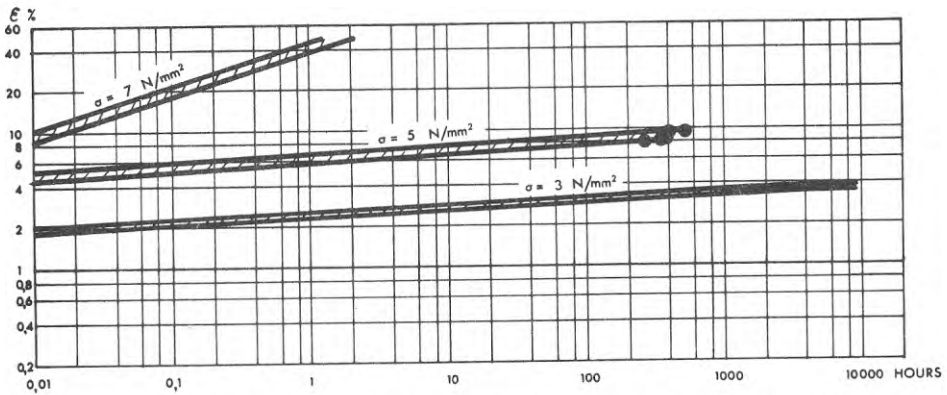


FIG 58 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.60 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	TANGENTIAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	16.2 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	961 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	27
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 80 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE



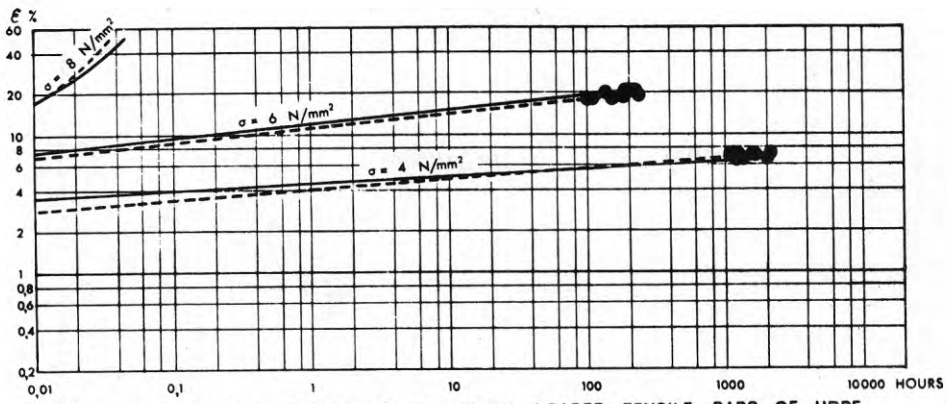


FIG 59 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS (mm)	200x18.2	
TENSILE BAR ORIENTATION	LONGITUDINAL	TANGENTIAL
TENSILE BAR DENSITY (kg/m <sup>3</sup> )	961	
MELT INDEX MI <sub>5</sub> (g/10 min)	0.60	
MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> (g/10 min)	16.2	
FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub>	27	
TEMPERATURE (°C)	+ 80	
ENVIRONMENT	WATER	

● STRESS-CRACKING FAILURE

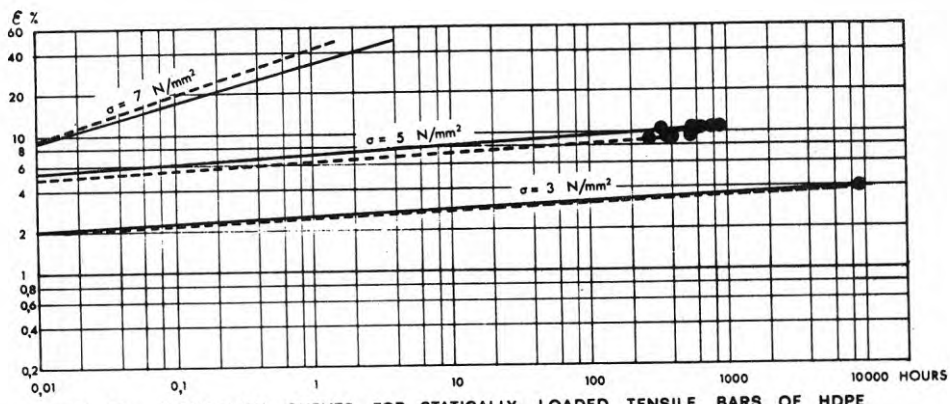


FIG 60 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS (mm)	200x18.2	
TENSILE BAR ORIENTATION	LONGITUDINAL	TANGENTIAL
TENSILE BAR DENSITY (kg/m <sup>3</sup> )	961	
MELT INDEX MI <sub>5</sub> (g/10 min)	0.60	
MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> (g/10 min)	16.2	
FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub>	27	
TEMPERATURE (°C)	+ 80	
ENVIRONMENT	WATER	

● STRESS-CRACKING FAILURE

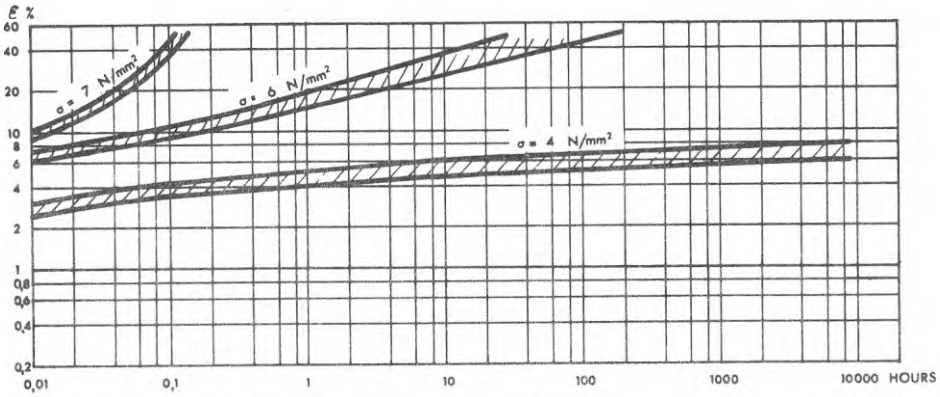


FIG 61 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.34 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	12.6 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	963 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	37
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 80 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE

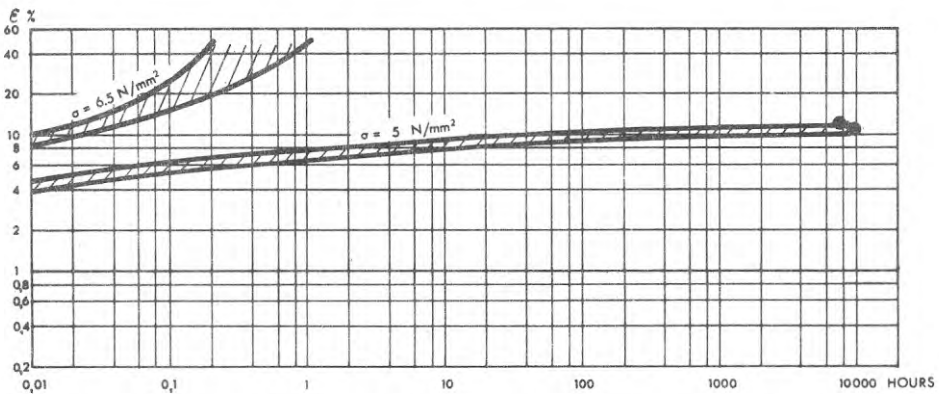


FIG 62 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.34 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	12.6 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	963 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	37
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 80 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE

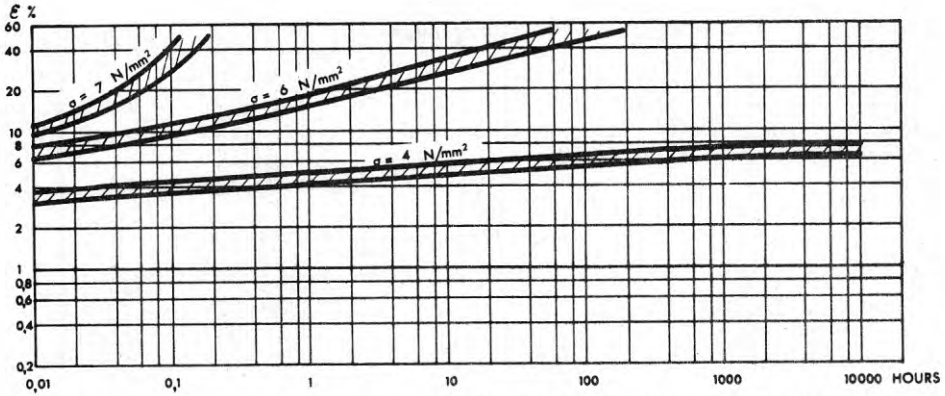


FIG 63 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.34 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	TANGENTIAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	12.6 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	963 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	37
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 80 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE

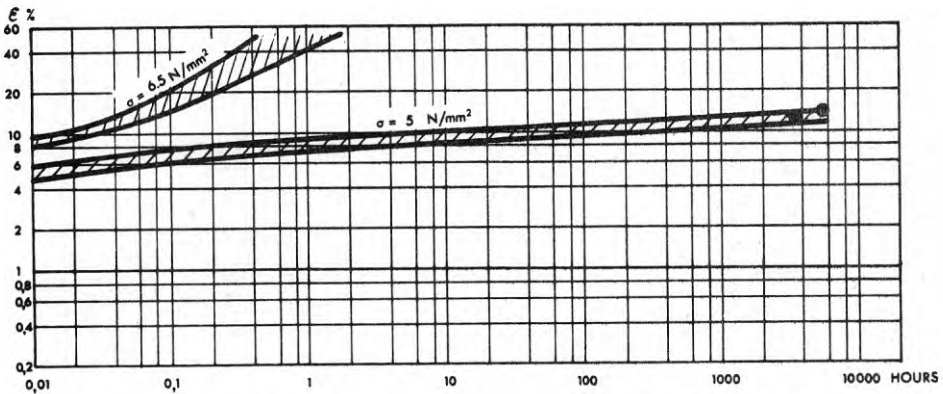


FIG 64 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.34 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	TANGENTIAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	12.6 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	963 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	37
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 80 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE

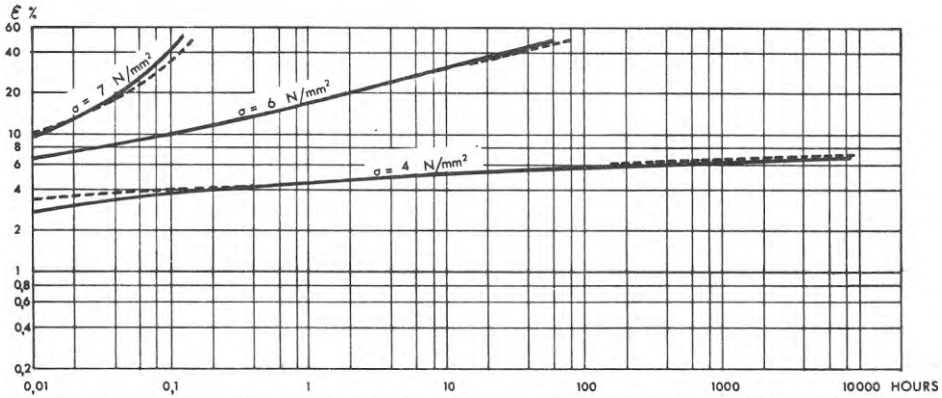


FIG 65 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS (mm)	200x18.2	
	LONGITUDINAL	TANGENTIAL
TENSILE BAR DENSITY (kg/m <sup>3</sup> )	963	
MELT INDEX MI <sub>5</sub> (g/10 min)	0.34	
MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> (g/10 min)	12.6	
FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub>	37	
TEMPERATURE (°C)	+ 80	
ENVIRONMENT	WATER	

● STRESS-CRACKING FAILURE

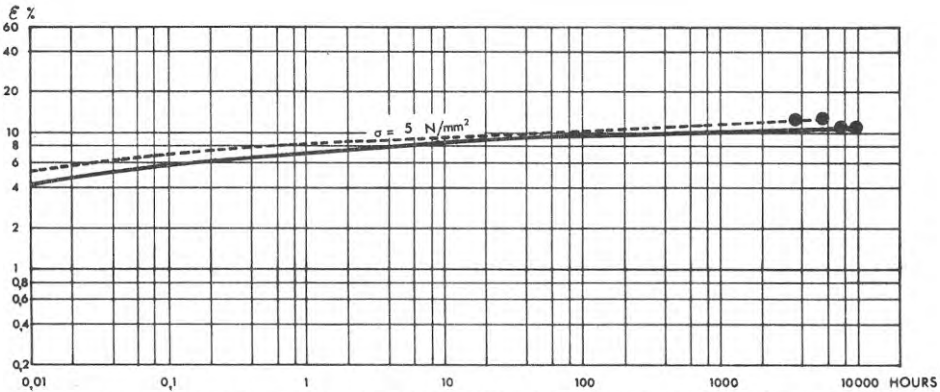


FIG 66 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS (mm)	200x18.2	
	LONGITUDINAL	TANGENTIAL
TENSILE BAR DENSITY (kg/m <sup>3</sup> )	963	
MELT INDEX MI <sub>5</sub> (g/10 min)	0.34	
MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> (g/10 min)	12.6	
FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub>	37	
TEMPERATURE (°C)	+ 80	
ENVIRONMENT	WATER	

● STRESS-CRACKING FAILURE

### 6.5 Stavprovning vid + 80°C. Töjningskurvor för stavar av olika råvaror

För sammanlagt fyra olika PEH-råvaror har stavprovningar utförts vid ett antal olika spänningsnivåer, fig. 55-56, 61-62 samt 67-73. Provningsresultaten har i ovannämnda figurer redovisats i form av töjningskurvor med angivna spridningsområden. De redovisade kurvorna bygger samtliga på provningar av 3-5 stavar, vilka uttagits i rørets längdriktning 3 mm från insidan av rørvæggen.

Från det redovisade provningsmaterialet kan följande iakttagelser göras:

1. Den uppmätta spridningen i töjningsvärdena är ungefär densamma för samtliga råvaror.
2. Vid de spänningsnivåer där sprödbrott inträffar i stavarna är töjningskurvorna ungefär rätlinjiga eller svagt konvext krökta.

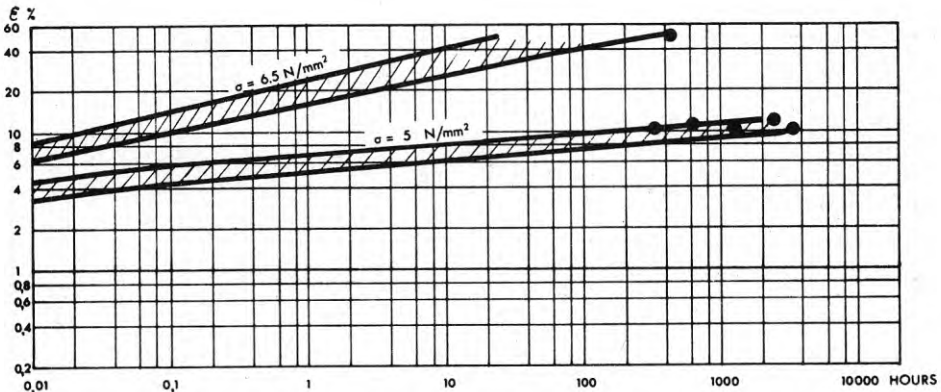


FIG 67 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX MI <sub>5</sub> :	0.21 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> :	9.9 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	961 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub> :	47
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 80 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE

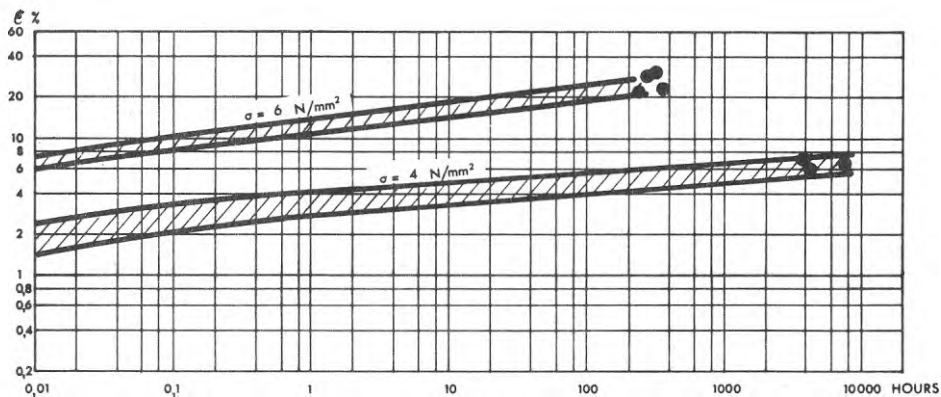


FIG 68 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.21 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	9.9 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	961 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	47
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 80 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE

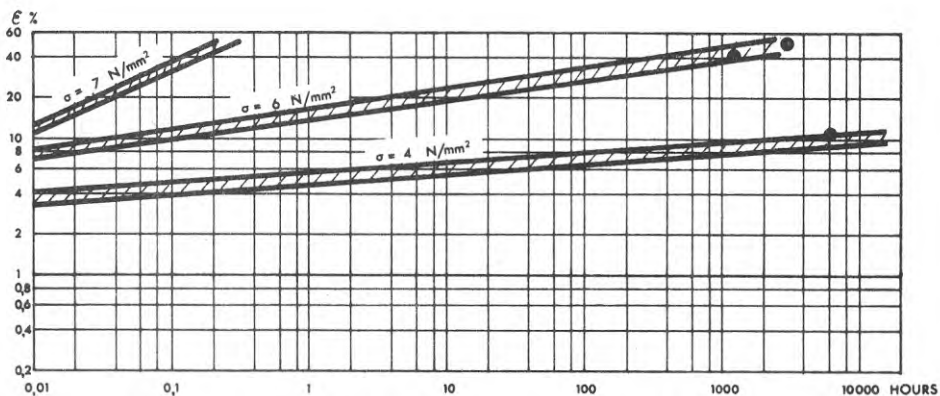


FIG 69 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	200x7.7 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.43 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	14.4 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	958 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	34
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 80 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE

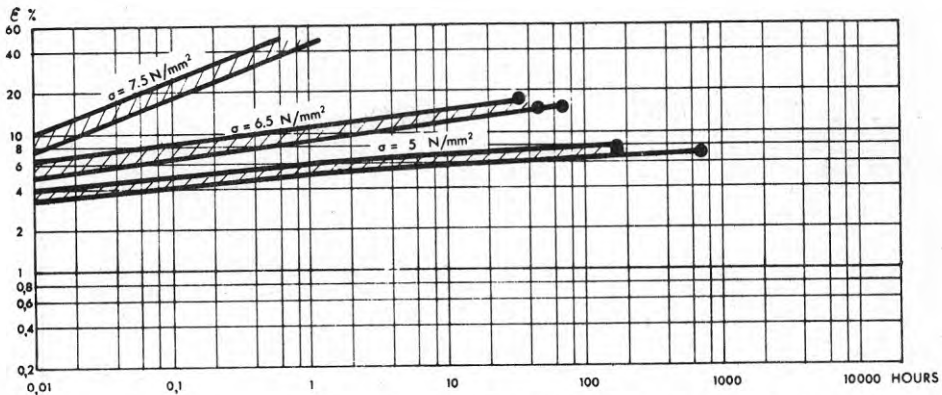


FIG 70 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	400x33 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	1.8 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	21.4 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	959 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	12
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 80 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE

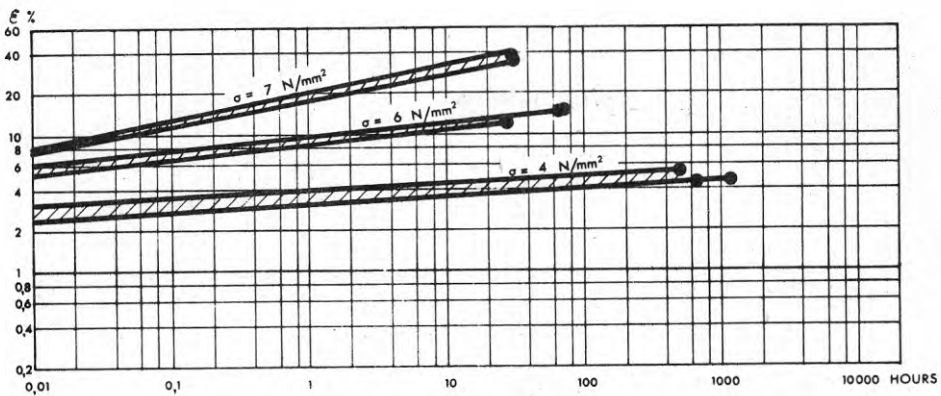


FIG 71 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	400x33 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	1.8 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	21.4 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	959 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	12
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 80 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE

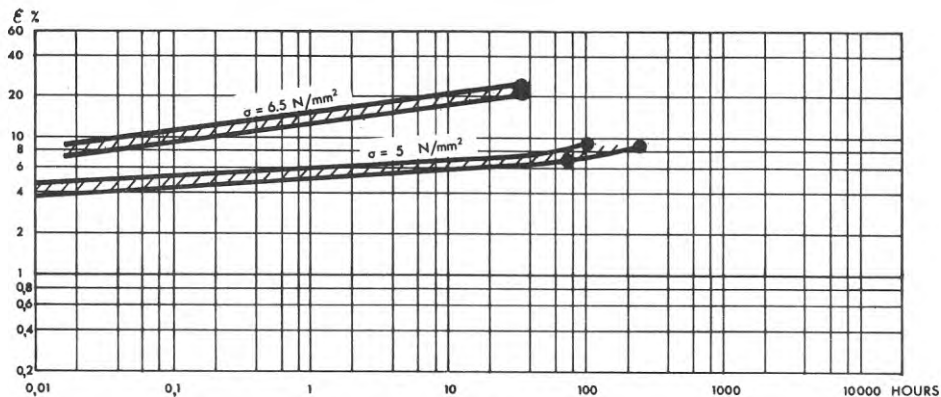


FIG 72 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	315x12.7 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	2.3 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	25.9 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	957 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	11
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 80 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE

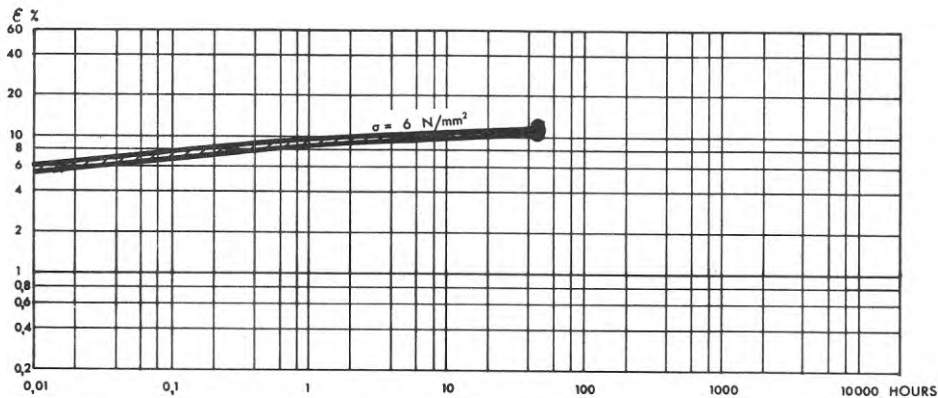


FIG 73 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	315x12.7 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	2.3 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	25.9 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	957 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	11
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 80 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE



3. Vid höga spänningsnivåer där brotten är av seg karaktär erhålls konkava tøjningskurvor.
4. Spridningen i uppmätta tider till sprödbrott uppgår för samtliga råvaror normalt till en halv dekad.

En jämförelse mellan tøjningskurvorna för stavarna av olika råvaror, fig. 74-75, visar att vissa skillnader föreligger mellan uppmätta brottider för de olika stavarna. Vid spänningsnivån  $7 \text{ N/mm}^2$  ( $70 \text{ kp/cm}^2$ ) erhöles för stavar av två olika råvaror segt brott efter ca 0,1 resp. 4 timmar, medan i stavar av en tredje råvara ( $MI_5 = 1,8$ ) sprödbrott erhöles efter ca 30 timmar. Vid övriga spänningsnivåer var skillnaderna mellan uppmätta tøjningskurvor relativt små, dock erhöles genomgående något mindre tøjningar för stavarna av råvaran med det högsta  $MI_5$ -värdet än för övriga stavar. Vad gäller tiderna till sprödbrott kan observeras att de kortaste brottiderna genomgående uppmätts för stavarna med  $MI_5 = 1,8$  medan de längsta brottiderna erhöles för stavarna med  $MI_5 = 0,34$ . Dvs. de stavar som vid spänningsnivån  $7 \text{ N/mm}^2$  uppvisade den största hållfastheten gav vid lägre spänningsnivåer klart sämre brottider än övriga stavar. Orsaken till de stora skillnader i brottider som uppmätts vid spänningsnivån  $7 \text{ N/mm}^2$  beror sannolikt på att denna spänning ligger inom det område där omslaget sker från segt till sprött brottbeteende. Provstavarna från två av råvarorna gav därför segbrott medan provstavarna från råvaran med  $MI_5 = 1,8$  gav sprödbrott.

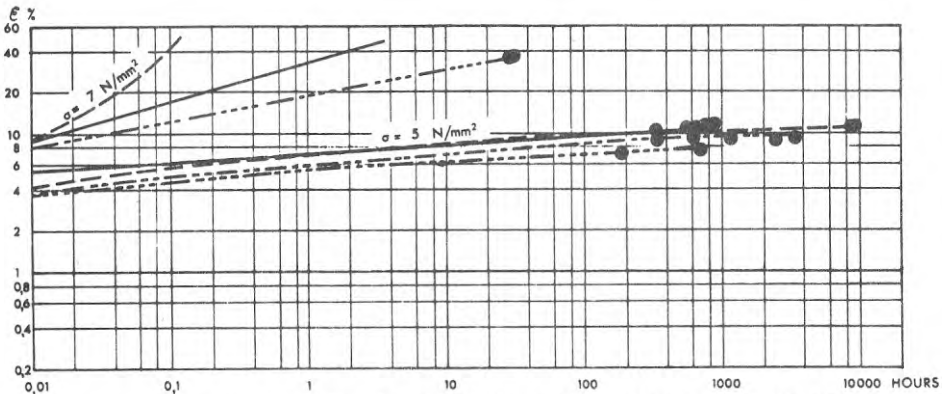


FIG 74 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS (mm)	200x18.2	200x18.2	200x18.2	400x33
TENSILE BAR ORIENTATION	LONGITUDINAL	LONGITUDINAL	LONGITUDINAL	LONGITUDINAL
TENSILE BAR DENSITY (kg/m <sup>3</sup> )	961	963	961	959
MELT INDEX MI <sub>5</sub> (g/10 min)	0.60	0.34	0.21	1.8
MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> (g/10 min)	16.2	12.6	9.9	21.4
FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub>	27	37	47	12
TEMPERATURE (°C)	+ 80	+ 80	+ 80	+ 80
ENVIRONMENT	WATER	WATER	WATER	WATER

● STRESS-CRACKING FAILURE

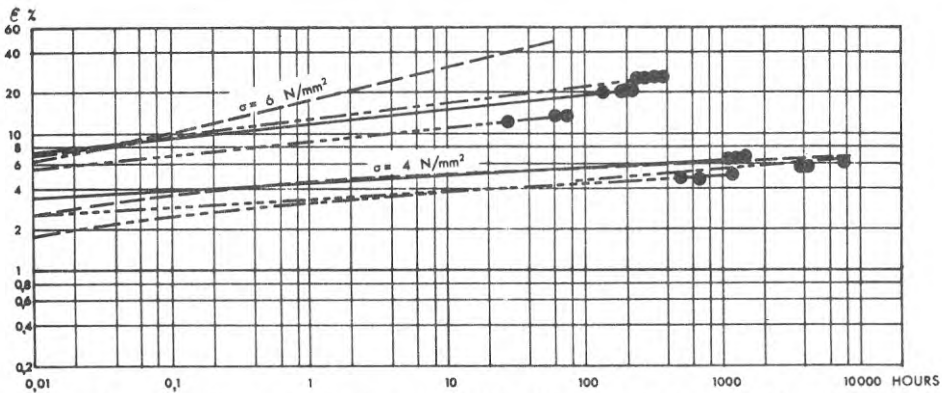


FIG 75 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS (mm)	200x18.2	200x18.2	200x18.2	400x33
TENSILE BAR ORIENTATION	LONGITUDINAL	LONGITUDINAL	LONGITUDINAL	LONGITUDINAL
TENSILE BAR DENSITY (kg/m <sup>3</sup> )	961	963	961	959
MELT INDEX MI <sub>5</sub> (g/10 min)	0.60	0.34	0.21	1.8
MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> (g/10 min)	16.2	12.6	9.9	21.4
FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub>	27	37	47	12
TEMPERATURE (°C)	+ 80	+ 80	+ 80	+ 80
ENVIRONMENT	WATER	WATER	WATER	WATER

● STRESS-CRACKING FAILURE

En jämförelse mellan uppmätta brotttöjningar vid  $+80^{\circ}\text{C}$  för olika polyetenråvaror som funktion av spänningsnivån, fig. 124, visar att brotttöjningarna vid låga spänningsnivåer är ungefär lika stora för de olika polyetenråvarorna. Större skillnader i brotttöjningsvärden kan observeras först vid de spänningsnivåer där omslaget sker från sprött till segt brott. Att överensstämmelsen mellan brotttöjningarna för de olika råvarorna är god vid låga spänningsnivåer beror i första hand på att töjningskurvorna vid dessa spänningsnivåer är mycket flacka (se fig. 55-73). Oavsett när de spröda brotten inträffar, sker dessa vid i stort sett samma töjningsvärden. Detta förklarar varför likartade brotttöjningar erhålls för stavar av olika polyetenråvaror vid låga spänningsnivåer, trots att stora skillnader i brotttider föreligger (se fig. 74-75).

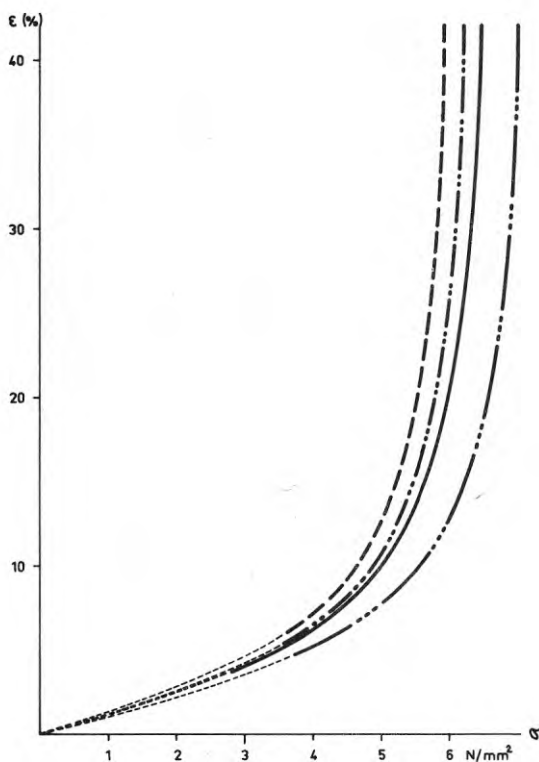


FIG 124 ELONGATION AT BURST FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

		-----	-----	-----
PIPE DIMENSIONS (mm)	200x18.2	200x18.2	200x18.2	400x33
TENSILE BAR ORIENTATION	LONGITUDINAL	LONGITUDINAL	LONGITUDINAL	LONGITUDINAL
TENSILE BAR DENSITY (kg/m <sup>3</sup> )	961	963	961	959
MELT INDEX MI <sub>5</sub> (g/10 min)	0.60	0.34	0.21	1.8
MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> (g/10 min)	16.2	12.6	9.9	21.4
FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub>	27	37	47	12
TEMPERATURE (°C)	+ 80	+ 80	+ 80	+ 80
ENVIRONMENT	WATER	WATER	WATER	WATER

### 6.6 Stavprovning vid + 80°C. Töjningskurvor för stavar från rör av olika gödstjocklek

Provningar av stavar, vilka uttagits från rör med olika väggstjocklekar, har utförts i begränsad omfattning, fig. 76. Provningarna har utförts på stavar, vilka uttagits från  $\varnothing$  200 rör av två olika tryckklasser. Bägge rören har varit tillverkade av samma råvarumaterial, men en smärre skillnad i smältindexvärdena

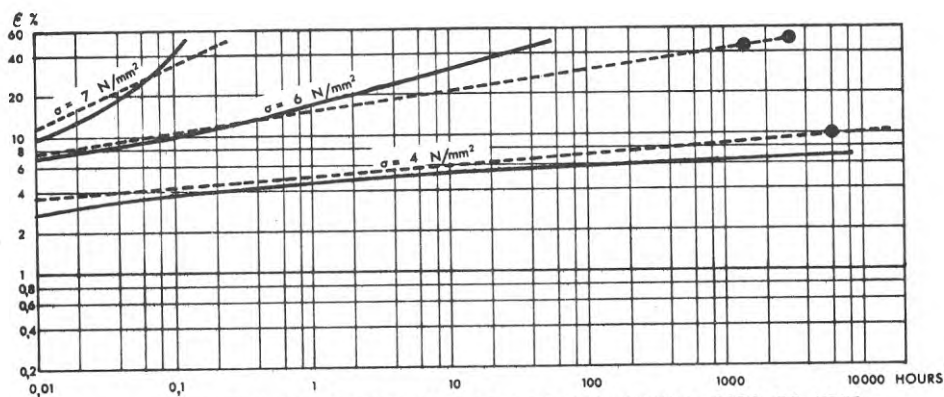


FIG 76 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

	—————	-----	
PIPE DIMENSIONS (mm)	200x18.2	200x7.7	
TENSILE BAR ORIENTATION	LONGITUDINAL	LONGITUDINAL	
TENSILE BAR DENSITY (kg/m <sup>3</sup> )	963	958	
MELT INDEX MI <sub>5</sub> (g/10 min)	0.34	0.43	
MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> (g/10 min)	12.6	14.4	
FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub>	37	34	
TEMPERATURE (°C)	+ 80	+ 80	
ENVIRONMENT	WATER	WATER	

● STRESS-CRACKING FAILURE

för de färdiga rören har emellertid kunnat konstaterats. Resultatet från provningarna visar att smärre skillnader föreligger mellan de erhållna töjningskurvorna. Skillnaden är störst vid spänningsnivån  $6 \text{ N/mm}^2$  ( $60 \text{ kp/cm}^2$ ), dvs. vid den spänningsnivå som ligger närmast omslaget från segt till sprött brottbeteende. De erhållna skillnaderna mellan töjningskurvorna kan till viss del antas bero på densitetsskillnaden mellan stavarna. Av erhållna töjningskurvorna att döma tycks stavarna från det tunnväggiga röret (högre  $MI_5$ -värde och lägre densitet än för det tjockväggiga röret) uppvisa något sämre sprödbrottsegenskaper än stavarna från det tjockväggiga röret. Skillnaderna är dock små och provningsunderlaget är alltför begränsat för att några närmare slutsatser skall kunna dras från de erhållna resultaten.

#### 6.7 Rörprovning vid $+ 80^\circ\text{C}$

Registrering av diameterökningen vid tryckprovning samt uppmätning av brottider har utförts för rör tillverkade av tre olika råvaror, fig. 77-82. Provningarna har för rören från två av råvarorna utförts med sådana ändförslutningar att inga längdspänningar uppkommer i rören på grund av det invändiga vattentrycket. Rören som varit tillverkade av den tredje råvaran har huvudsakligen tryckprovats med tvåaxligt spänningstillstånd i rören, fig. 81-82. Några tryckprovningar av sistnämnda rör har emellertid även utförts med enaxligt spänningstillstånd i rören, fig. 80.

Vid de utförda tryckprovningarna med tvåaxligt spänningstillstånd i rören har vid låga spänningsnivåer brott ofta inträffat i form av sprickor vinkelrätt mot rörets längdriktning vid ändförslutningarnas infästning i rörväggen. Dessa brott har normalt ej beaktats utan provningen har i stället utförts på nytt. Vid spänningsnivån  $4 \text{ N/mm}^2$  ( $40 \text{ kp/cm}^2$ ) har emellertid trots upprepade omprovningar brotten alltid skett vid ändförslutningarna. De i fig. 81 angivna brottiderna vid denna spänningsnivå avser brottider som erhållits för ovannämnda brotttyp och har därför angivits inom parentes.

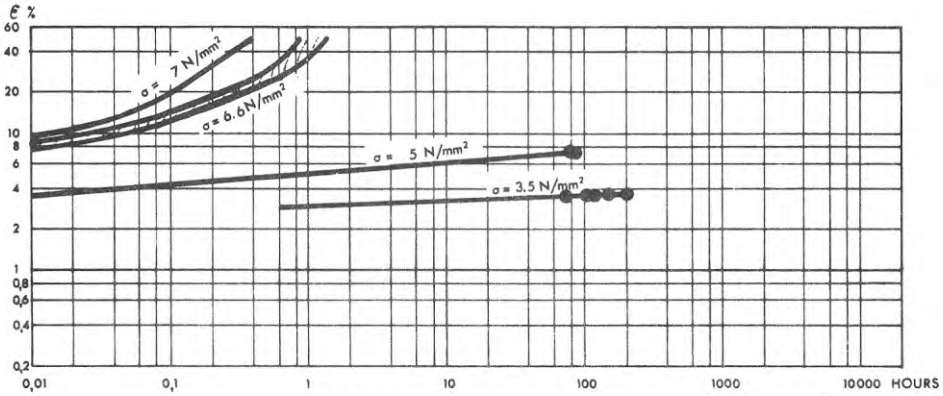


FIG 77 PERIPHERAL ELONGATION IN HDPE PIPES SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX MI <sub>5</sub> :	0.60 g/10 min
STATE OF STRESS:	ONE-AXIAL	MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> :	16.2 g/10 min
MEAN DENSITY:	959 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub> :	27
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 80 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE

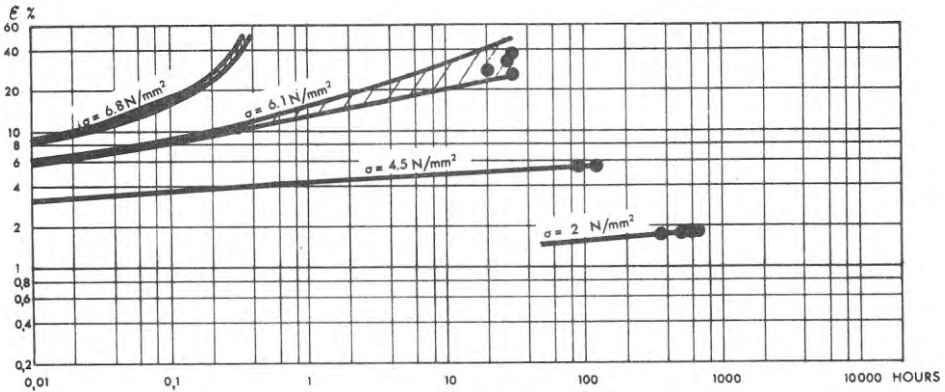


FIG 78 PERIPHERAL ELONGATION IN HDPE PIPES SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX MI <sub>5</sub> :	0.60 g/10 min
STATE OF STRESS:	ONE-AXIAL	MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> :	16.2 g/10 min
MEAN DENSITY:	959 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub> :	27
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 80 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE

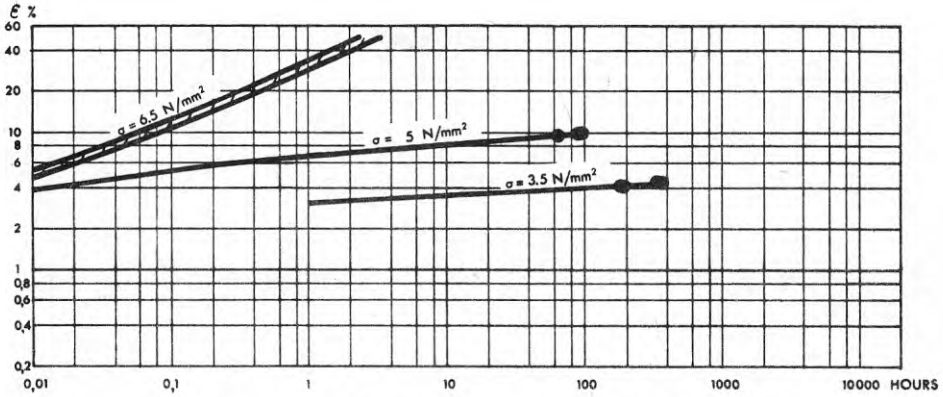


FIG 79 PERIPHERAL ELONGATION IN HDPE PIPES SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.21 g/10 min
STATE OF STRESS:	ONE-AXIAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	9.9 g/10 min
MEAN DENSITY:	959 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	47
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 80 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE

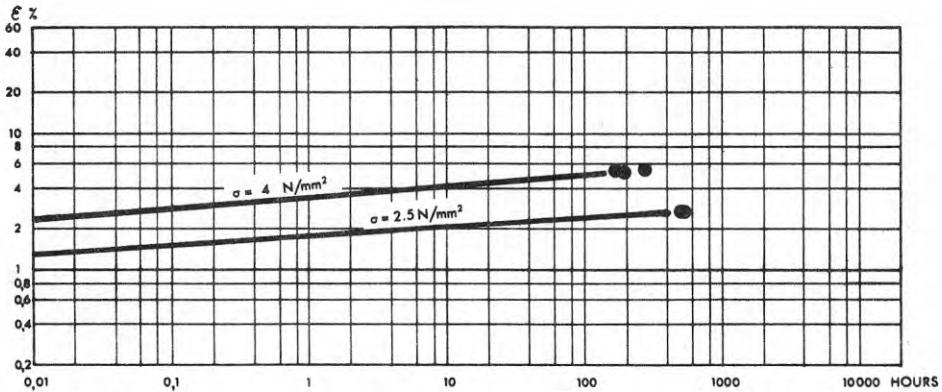


FIG 80 PERIPHERAL ELONGATION IN HDPE PIPES SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.34 g/10 min
STATE OF STRESS:	ONE-AXIAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	12.6 g/10 min
MEAN DENSITY:	961 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	37
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 80 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE

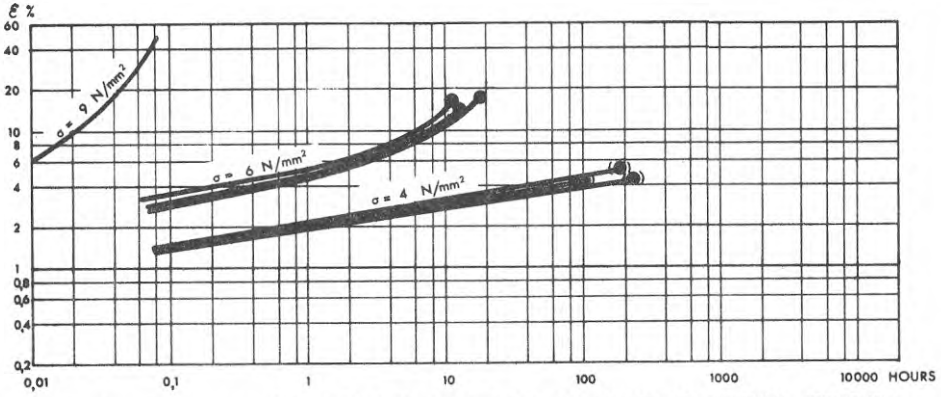


FIG 81 PERIPHERAL ELONGATION IN HDPE PIPES SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX MI <sub>5</sub> :	0.34 g/10 min
STATE OF STRESS:	BI-AXIAL	MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> :	12.6 g/10 min
MEAN DENSITY:	961 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub> :	37
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 80 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE

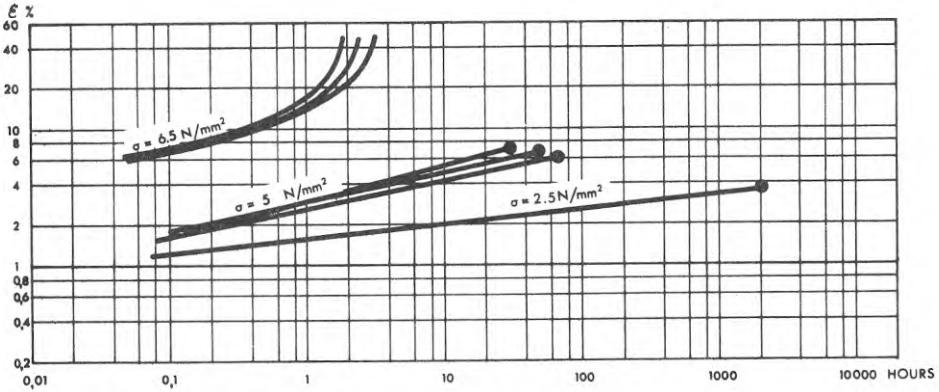


FIG 82 PERIPHERAL ELONGATION IN HDPE PIPES SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX MI <sub>5</sub> :	0.34 g/10 min
STATE OF STRESS:	BI-AXIAL	MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> :	12.6 g/10 min
MEAN DENSITY:	961 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub> :	37
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 80 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE



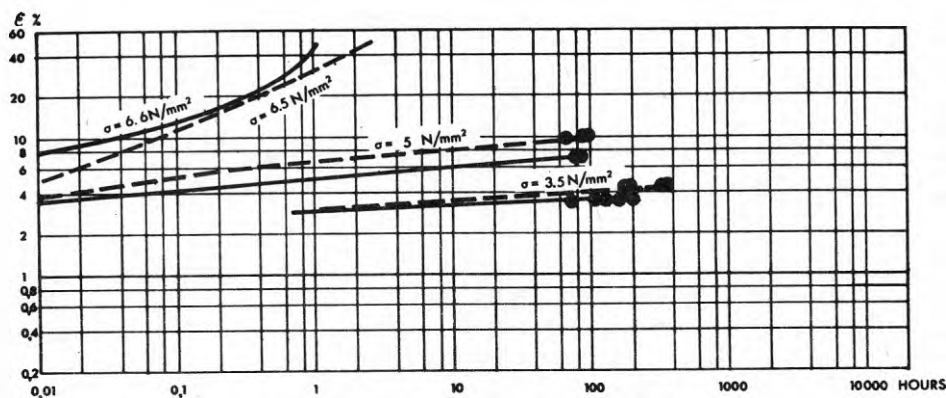


FIG 83 PERIPHERAL ELONGATION IN HDPE PIPES SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE

		-----	-----
PIPE DIMENSIONS	(mm)	200x18.2	200x18.2
STATE OF STRESS		ONE-AXIAL	ONE-AXIAL
MEAN DENSITY	(kg/m <sup>3</sup> )	959	959
MELT INDEX MI <sub>5</sub>	(g/10 min)	0.60	0.21
MELT INDEX MI <sub>21.6</sub>	(g/10 min)	16.2	9.9
FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub>		27	47
TEMPERATURE	(°C)	+ 80	+ 80
ENVIRONMENT		WATER	WATER

● STRESS-CRACKING FAILURE

En jämförelse mellan de erhållna resultaten visar att de uppmätta diameterökningarna är ungefär desamma i de olika rören om rören utsätts för samma belastningsfall, fig. 83-84. Vid olika spänningstillstånd i rören erhålls olika stora diameterökningar, fig. 85. Utsätts rören för tvåaxlig belastning av invändigt vattentryck blir den initiella diameterökningen mindre än om rören varit enaxligt belastade. Töjningstillväxten sker emellertid snabbare då rören är tvåaxligt belastade.

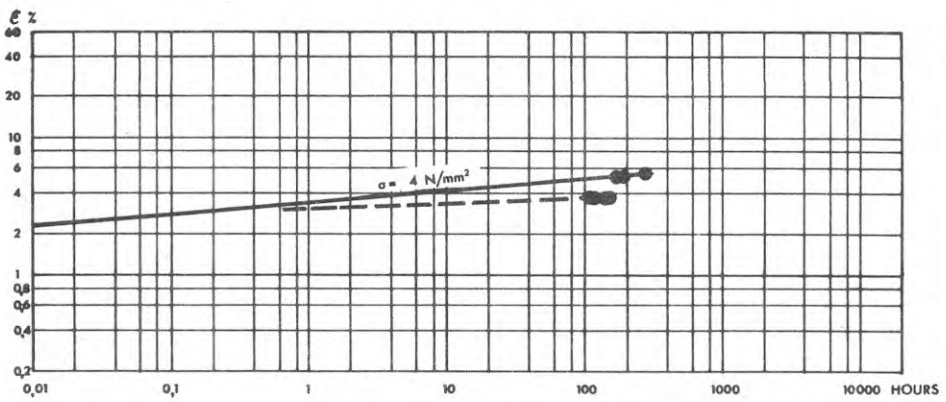


FIG 84 PERIPHERAL ELONGATION IN HDPE PIPES SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE

	(mm)		
		200x18.2	200x18.2
PIPE DIMENSIONS			
STATE OF STRESS		ONE-AXIAL	ONE-AXIAL
MEAN DENSITY (kg/m <sup>3</sup> )		961	959
MELT INDEX MI <sub>5</sub> (g/10 min)		0.34	0.60
MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> (g/10 min)		12.6	16.2
FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub>		37	27
TEMPERATURE (°C)		+ 80	+ 80
ENVIRONMENT		WATER	WATER

● STRESS-CRACKING FAILURE

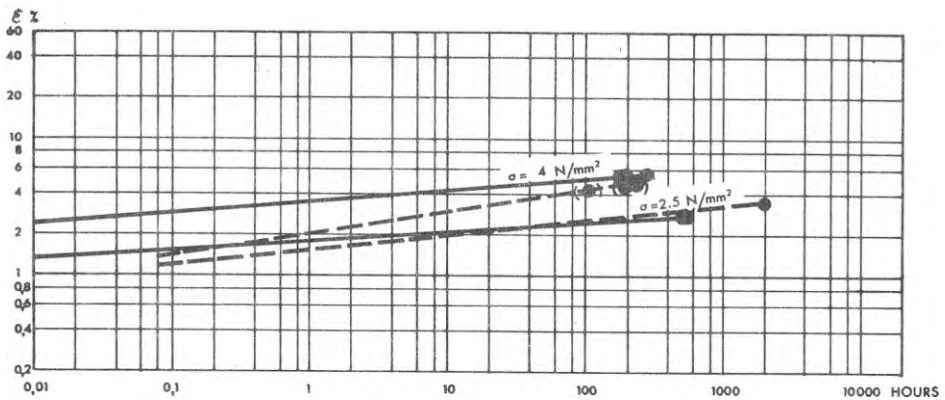


FIG 85 PERIPHERAL ELONGATION IN HDPE PIPES SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE

	(mm)		
		ONE-AXIAL	BI-AXIAL
PIPE DIMENSIONS	200x18.2		
STATE OF STRESS			
MEAN DENSITY (kg/m <sup>3</sup> )		961	
MELT INDEX MI <sub>5</sub> (g/10 min)		0.34	
MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> (g/10 min)		12.6	
FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub>		37	
TEMPERATURE (°C)		+ 80	
ENVIRONMENT		WATER	

● STRESS-CRACKING FAILURE

## 6.8 Jämförelser mellan töjningar i rör och stavar

Trots att rören och stavarna varit utsatta för helt skilda belastningsfall erhålls en likartad töjningstillväxt i rör och stavar i de fall rören tryckprovats under enaxligt spänningstillstånd, fig. 86-87. Överensstämmelsen mellan töjningskurvorna för enaxligt belastade rör och provstavar är visserligen inte fullständig, men kurvorna uppvisar ändå påfallande likheter. Vid de högsta spänningsnivåerna, där brotten till övervägande del är av seg karaktär, erhålls en kraftigare töjningstillväxt i rören än i stavarna. Detta är naturligt med tanke på att ringspänningen i rören ökar linjärt med diameterökningen i rören. Vid ovannämnda spänningsnivåer erhålls stora töjningar i rörväggen, vilket medför att rören utsätts för större spänningar än stavarna och därmed erhåller en kraftigare töjningstillväxt. Vid lägre spänningsnivåer uppvisar töjningskurvorna för rören och stavarna i stort sett samma lutning. Däremot erhålls avsevärt längre brotttider för stavarna än för rören.

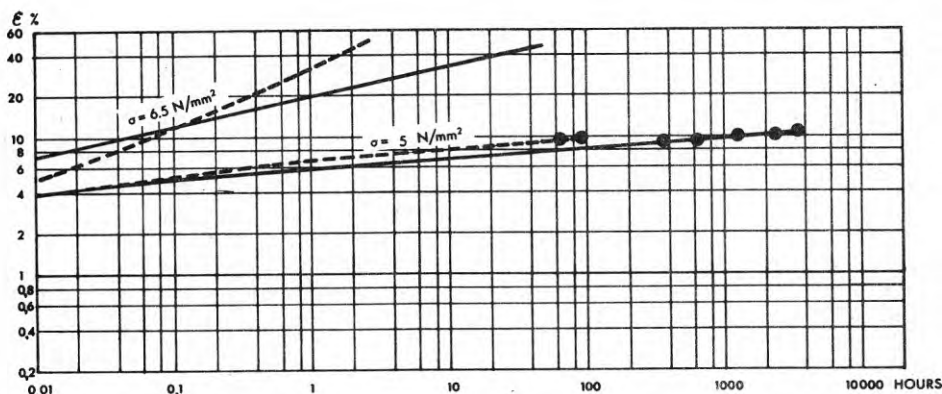


FIG 86 ELONGATIONS IN HDPE PIPES AND TENSILE BARS

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX MI <sub>5</sub> :	0.21	g/10 min
ENVIRONMENT:	WATER	MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> :	9.9	g/10 min
TEMPERATURE:	+ 80 °C	FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub> :	47	

### PIPE -----

STATE OF STRESS: ONE-AXIAL  
MEAN DENSITY: 959 kg/m<sup>3</sup>

### TENSILE BAR \_\_\_\_\_

TENSILE BAR ORIENTATION: LONGITUDINAL  
TENSILE BAR DENSITY 961 kg/m<sup>3</sup>

● STRESS-CRACKING FAILURE

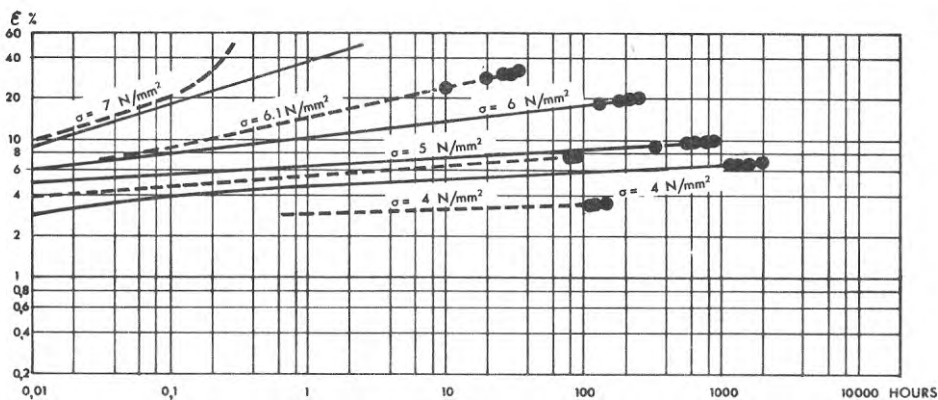


FIG 87 ELONGATIONS IN HDPE PIPES AND TENSILE BARS

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX MI <sub>5</sub> :	0.60	g/10 min
ENVIRONMENT:	WATER	MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> :	16.2	g/10 min
TEMPERATURE:	+ 80 °C	FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub> :	27	

PIPE -----

TENSILE BAR \_\_\_\_\_

STATE OF STRESS: ONE-AXIAL  
MEAN DENSITY: 959 kg/m<sup>3</sup>

TENSILE BAR ORIENTATION: LONGITUDINAL  
TENSILE BAR DENSITY 961 kg/m<sup>3</sup>

● STRESS-CRACKING FAILURE

När rören tryckprovats under tvåaxligt spänningstillstånd erhålls större skillnader mellan töjningstillväxten i rör och stavar än vid enaxlig tryckprovning, fig. 88-89. Vid tvåaxligt spänningstillstånd i rören blir den radiella töjningen i rören avsevärt mindre än när rören tryckprovats under enaxligt spänningstillstånd. Härigenom erhålls större skillnader mellan töjningsförloppen i rören och stavarna. Speciellt kan noteras att rören uppvisar en avsevärt mindre initialtöjning än stavarna, men att töjningstillväxten i rören sker snabbare än i stavarna.

### 6.9 Erhållna resultat. Sammanfattning

De erhållna resultaten från rör- och stavprovningarna vid förhöjd temperatur kan sammanfattas enligt följande:

1. Vid höga spänningsnivåer erhålls samma typ av töjningsförlopp i rör och stavar som vid + 20°C. Dvs. töjningskurvorna är rätlinjiga upp till ca 10 %-töjning och antar därefter en krökt form.
2. Vid lägre spänningsnivåer är töjningskurvorna för rör och stavar rätlinjiga eller svagt konvext krökta, och vid dessa spänningsnivåer inträffar sprödbrott (stress-cracking) i materialet.
3. Den uppmätta spridningen i töjningsvärden har varit lika stor för samtliga råvaror, och överensstämmer till storleken med den spridning som uppmätts vid + 20°C.

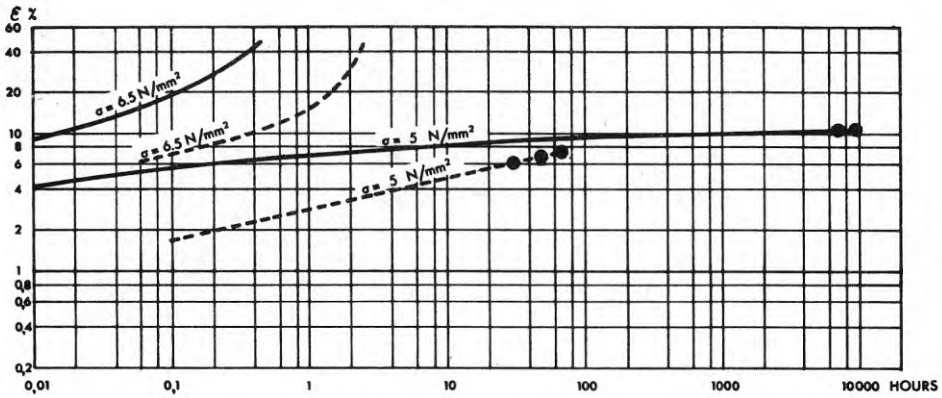


FIG 88 ELONGATIONS IN HDPE PIPES AND TENSILE BARS

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.34	g/10 min
ENVIRONMENT:	WATER	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	12.6	g/10 min
TEMPERATURE:	+ 80 °C	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	37	

PIPE -----

TENSILE BAR -----

STATE OF STRESS: BI-AXIAL  
 MEAN DENSITY: 961 kg/m<sup>3</sup>

TENSILE BAR ORIENTATION: LONGITUDINAL  
 TENSILE BAR DENSITY 963 kg/m<sup>3</sup>

● STRESS-CRACKING FAILURE

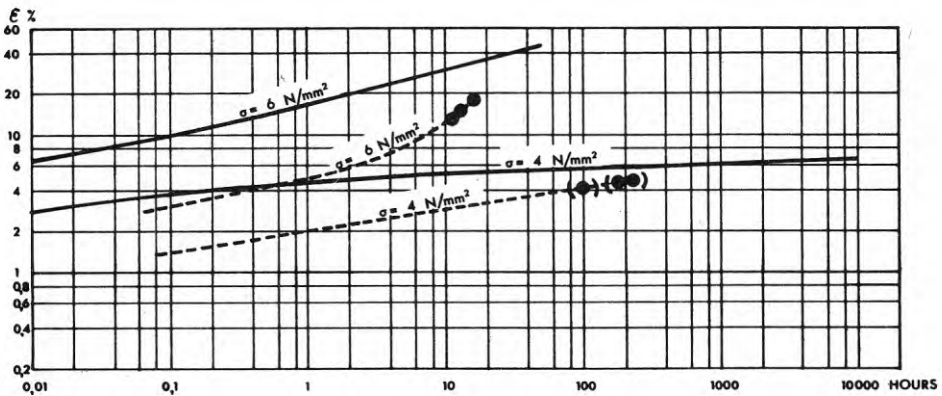


FIG 89 ELONGATIONS IN HDPE PIPES AND TENSILE BARS

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.34	g/10 min
ENVIRONMENT:	WATER	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	12.6	g/10 min
TEMPERATURE:	+ 80 °C	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	37	

PIPE -----

TENSILE BAR -----

STATE OF STRESS: BI-AXIAL  
 MEAN DENSITY: 961 kg/m<sup>3</sup>

TENSILE BAR ORIENTATION: LONGITUDINAL  
 TENSILE BAR DENSITY 963 kg/m<sup>3</sup>

● STRESS-CRACKING FAILURE

4. Ingen signifikant skillnad föreligger mellan tøjningskurvor för stavar som uttagits i rörets längd- resp. tvärriktning. Inte heller kan några skillnader i tider till sprödbrott observeras för ovannämnda stavar.
5. Spridningen i brottider för de spröda brotten i rör och stavar är lika för samtliga råvaror och uppgår till ca 0,5 dekader.
6. Vid spänningsnivåer i närheten av omslaget från segt till sprött brottbeteende i stavarna uppvisar stavarna av olika råvaror helt olika tøjningsegenskaper.
7. Betydande skillnader i tider till sprödbrott kan uppmätas för stavar av olika råvaror.
8. Tøjningskurvorna för enaxligt belastade rör och provstavar, uttagna nära rörväggens insida, är nära överensstämmande för tøjningar understigande 10 %.
9. Avsevärt längre tider till sprödbrott erhålls emellertid för stavarna än för rören.
10. Om rören utsätts för ett tvåaxligt spänningstillstånd erhålls genomgående mindre tøjningar men samtidigt en snabbare tøjningstillväxt än om rören varit enaxligt belastade.
11. Tiderna till sprödbrott påverkas även av spänningstillståndet i rören.

#### 6.10 Teoretisk behandling av redovisade tøjningskurvor

I rapporten redovisade tøjningsdata för rör och stavar, fig. 7-89, torde sannolikt kunna användas för en teoretisk beskrivning av tøjningsförloppet i polyeten i form av en approximativ konstitutiv ekvation. En dylik teoretisk behandling av de redovisade tøjningsvärdena ligger emellertid utanför ramen för denna rapport. Det bör i detta sammanhang dock framhållas att en konstitutiv ekvation endast kan användas för att bestämma tøjningen i polyeten som funktion av spänning, tid och temperatur. En dylik ekvation ger inga upplysningar om när spröda brott kan förväntas i materialet och ekvationen kan således inte användas för att beräkna läget på den branta delen av brottkurvan för PEH-rör (jmf fig. 1).

## 7 UPPMÄTTA BROTTIDER. JÄMFÖRELSE MELLAN RÖR- OCH STAVPROVNINGSMETOD

### 7.1 Brottkurvor för stavar

Som framgått av tidigare har stavprovningarna omfattat uppmätningar av töjningstillväxten i stavarna tills dess att 50 % förlängning eller sprödbrott inträffat i stavarna. Med hjälp av de erhållna brottiderna har brottkurvor för de olika stavarna upprättats, se fig. 90-93. Dessa brottkurvor har liksom brottkurvorna för rören en flack del samt en brant del. Den flacka delen av brottkurvorna för stavarna är i egentlig mening ingen brottkurva utan representerar endast 50 % förlängning av provstavarna. På den branta delen av brottkurvorna har spröda brott erhållits i provstavarna.

En jämförelse mellan de olika brottkurvorna visar att skillnader föreligger mellan de olika materialen, fig. 94. Speciellt påtagliga är skillnaderna mellan de spröda brottkurvorna. Stavarna med det högsta  $MI_5$ -värdet uppvisar de kortaste brottiderna medan stavarna med låga  $MI_5$ -värden har en bättre sprödbrottshållfasthet. Dessutom uppvisar stavarna med de sämsta sprödbrottsegenskaperna den högsta segbrottshållfastheten vid + 80°C, medan de stavar som uppvisar den klart lägsta segbrotthållfastheten vid ovannämnda temperatur har den bästa sprödbrotthållfastheten. Det sistnämnda förhållandet kan också uttryckas så att omslaget från segt till sprött brottbeteende vid + 80°C bör ske vid en så låg spänningsnivå som möjligt för att materialet skall ha en hög sprödbrottshållfasthet.



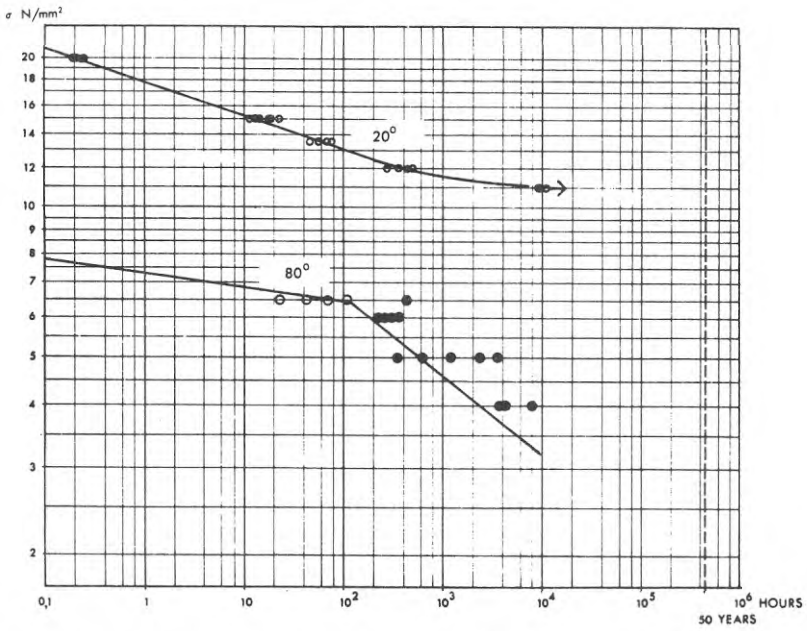


FIG 90 FAILURE CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

RAW MATERIAL:	A	○ DUCTILE FAILURE
TENSILE BAR DENSITY	961-962	● STRESS-CRACKING FAILURE
ENVIRONMENT:	AT + 20°C AIR; AT + 80°C WATER	

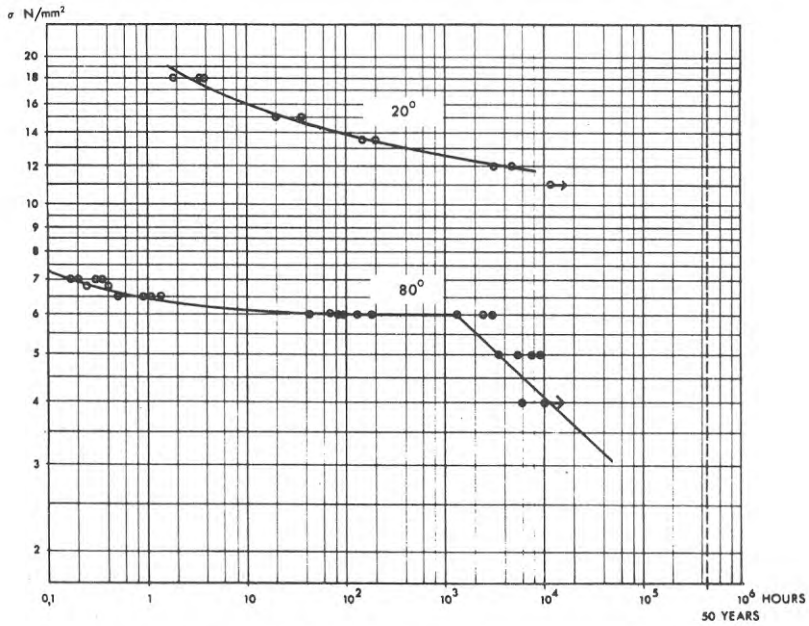


FIG 91 FAILURE CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

RAW MATERIAL:	C	○ DUCTILE FAILURE
TENSILE BAR DENSITY:	963; (958) kg/m³	● STRESS-CRACKING FAILURE
ENVIRONMENT:	WATER	



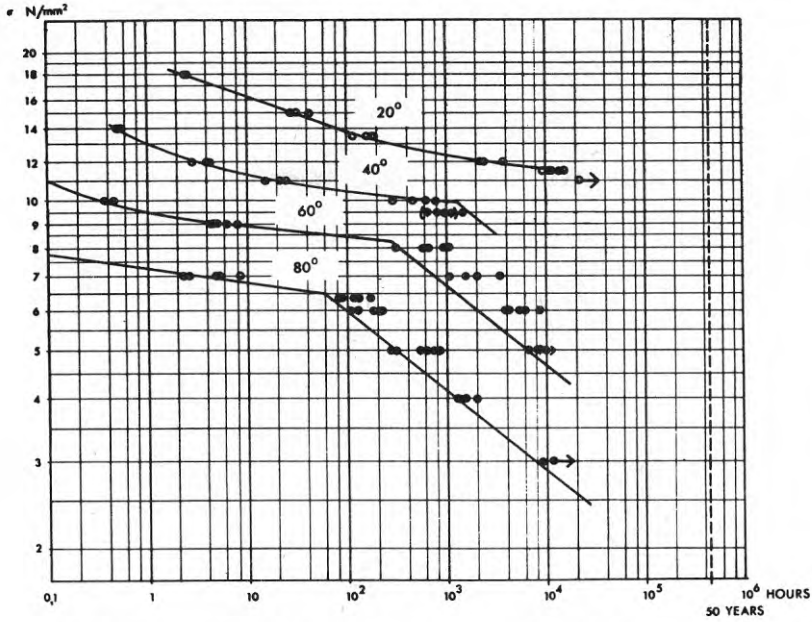


FIG 92 FAILURE CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

RAW MATERIAL: B ○ DUCTILE FAILURE  
 TENSILE BAR DENSITY: 961  $\text{kg/m}^3$  ● STRESS-CRACKING FAILURE  
 ENVIRONMENT: WATER

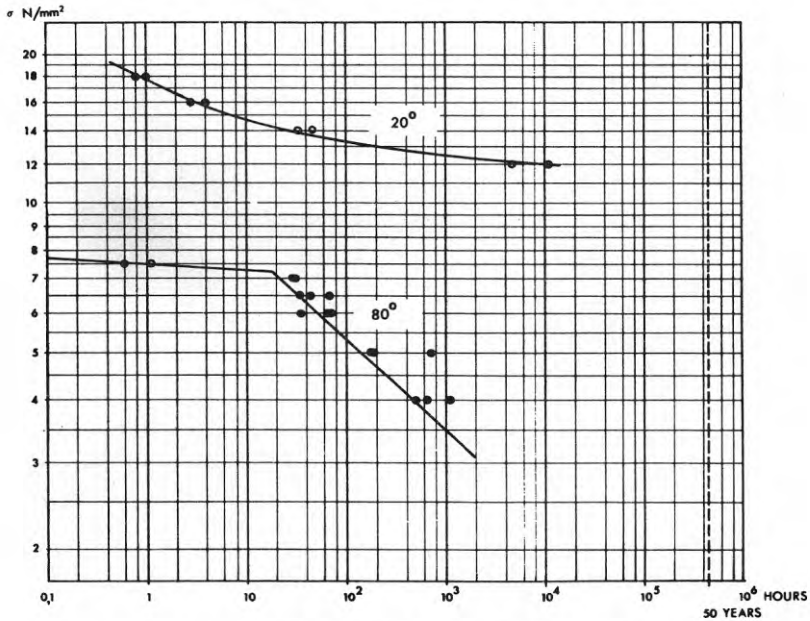


FIG 93 FAILURE CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

RAW MATERIAL: D ○ DUCTILE FAILURE  
 TENSILE BAR DENSITY: 959  $\text{kg/m}^3$  ● STRESS-CRACKING FAILURE  
 ENVIRONMENT: AT + 20°C AIR AND WATER;  
 AT + 80°C WATER

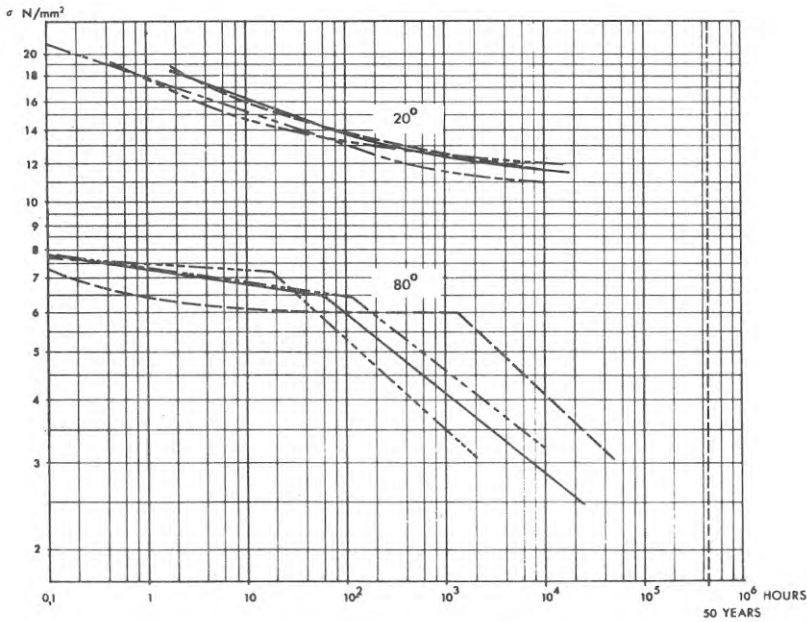


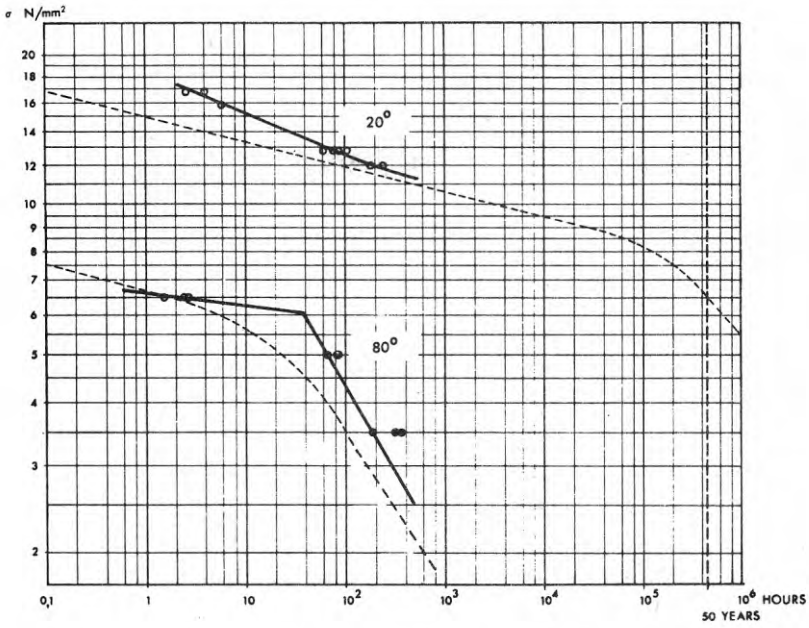
FIG 94 FAILURE CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

RAW MATERIAL	DENSITY	MELT INDEX $MI_5$
—————	B 961	0.60
-----	C 963 (958)	0.34
- · - · - · -	A 961-962	0.21
-----	D 959	1.8

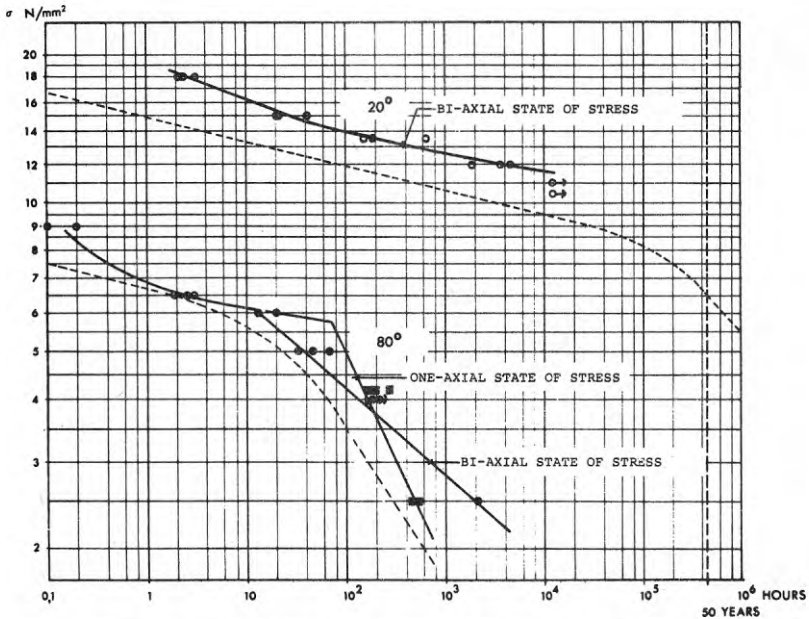
## 7.2 Brottkurvor för rör

De uppmätta brottkurvorna för rören har i fig. 95-97 jämförts med de minimibrottkurvor för PEH-rör som svensk och internationell standard är baserad på. De uppmätta brottiderna ligger med något undantag genomgående över de tider som standardkurvorna anger. På grund av att antalet rörprover varit begränsat har en noggrann bestämning av brottkurvornas form inte kunnat utföras. Brottkurvorna har därför ritats schematiskt och avviker därför i vissa fall något från standardkurvornas form.

Rören från en av råvarorna, fig. 96, har delvis tryckprovats under såväl en- som tvåaxligt spänningstillstånd. I detta fall kan en tydlig skillnad konstateras mellan de spröda brottkurvorna, även om antalet utförda tryckprovningar är relativt få. Tryckprovade rören under tvåaxligt spänningstillstånd erhålls en flackare lutning på den spröda delen av brottkurvan än om provningen sker under enaxligt spänningstillstånd. Brottiderna vid låga spänningsnivåer blir härigenom längre då rören tryckprovats under tvåaxligt spänningstillstånd.



**FIG 95 FAILURE CURVES FOR HDPE PIPES SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE**  
 MELT INDEX  $MI_5$ : 0.21 g/10 min. ○ DUCTILE FAILURE  
 STATE OF STRESS: ONE-AXIAL ● STRESS-CRACKING FAILURE  
 MEAN DENSITY: 959 kg/m<sup>3</sup>  
 ENVIRONMENT: WATER



**FIG 96 FAILURE CURVES FOR HDPE PIPES SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE**  
 MELT INDEX  $MI_5$ : 0.34 g/10 min. ○ DUCTILE FAILURE  
 STATE OF STRESS: - ● STRESS-CRACKING FAILURE  
 MEAN DENSITY: 961 kg/m<sup>3</sup> ■ " " (BI-AXIAL STATE OF STRESS)  
 ENVIRONMENT: WATER

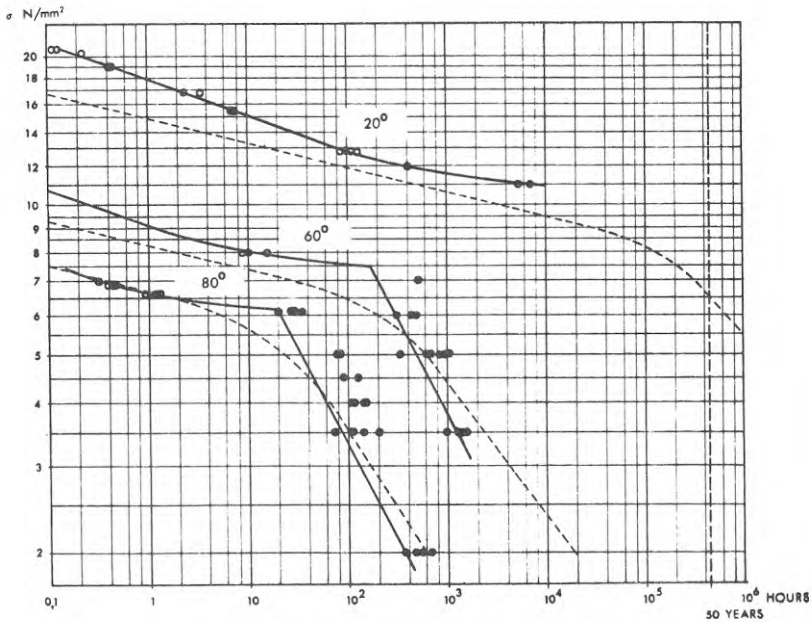


FIG 97 FAILURE CURVES FOR HDPE PIPES SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE  
 MELT INDEX  $MI_5$ : 0.60 g/10 min. ○ DUCTILE FAILURE  
 STATE OF STRESS: ONE-AXIAL ● STRESS-CRACKING FAILURE  
 MEAN DENSITY: 959 kg/m<sup>3</sup>  
 ENVIRONMENT: WATER

En jämförelse mellan de uppmätta brottkurvorna för rör av olika råvaror visar att skillnaderna mellan kurvorna är störst på den branta delen av kurvorna, fig. 98. Lutningen hos de olika kurvorna är inom det spröda brottområdet i det närmaste identisk, då rören tryckprovats under samma spänningstillstånd, men brottkurvorna ligger förskjutna i sidled. Sålunda erhålls i detta fall samma ordningsföljd mellan brottkurvorna för rören som erhållits för stavarna, fig. 94, dvs. de tidigaste sprödbrotten har erhållits för rören med det högsta  $MI_5$ -värdet. Den inbyggda spänningen har vidare varit av ungefär samma storleksordning i samtliga rör, jmf tabell 3, varför denna inte torde påverka det inbördes förhållandet mellan de olika brottkurvorna i någon större utsträckning. Av fig. 98 framgår tydligt att spänningstillståndet påverkar brottiderna för rören. I det fall rören tryckprovats under ett tvåaxligt spänningstillstånd erhålls en mycket flackare brottkurva inom det spröda området än när rören provats med enaxligt spänningstillstånd. De erhållna brottkurvorna vid + 20°C uppvisar mindre skillnader. Rören, som tillverkats av råvaran med  $MI_5 = 0,34$ , har emellertid till skillnad från de övriga fören tryckprovats med tvåaxligt spänningstillstånd vid + 20°C. Brottkurvan för dessa rör ligger något förskjutna till höger i förhållande till de övriga brottkurvorna, vilket sannolikt beror på skillnaden i spänningstillstånd vid tryckprovningen.

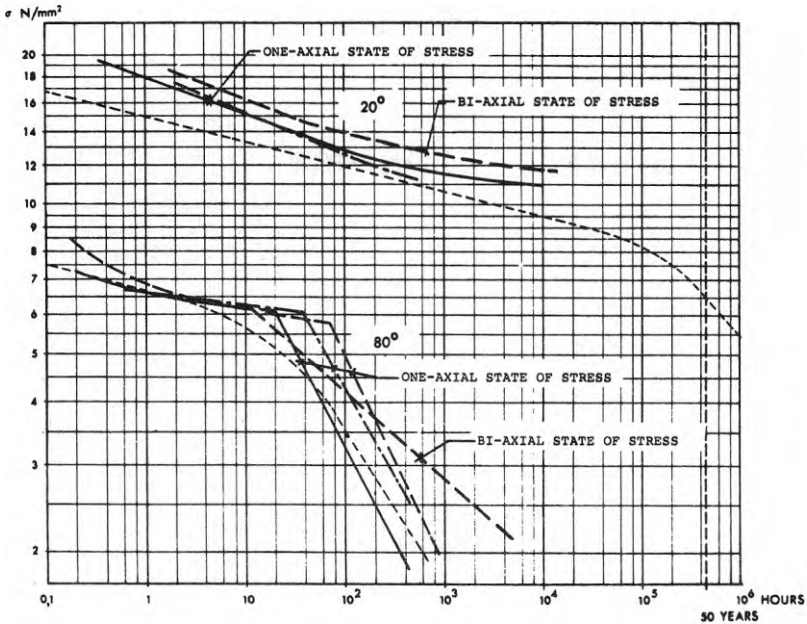


FIG 98 FAILURE CURVES FOR HDPE PIPES SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE

$MI_5$	MEAN DENSITY	
—————	0.60	959
- - - - -	0.34	961
- · - · -	0.21	959

### 7.3 Jämförelse mellan brottkurvor för rör och stavar

En jämförelse mellan uppmätta brottkurvor för rör och stavar av olika PEH-råvaror visar att vissa karaktäristiska skillnader föreligger, fig. 99-101. De spröda brotten inträffar senare i stavarna än i rören och dessutom har den branta delen av brottkurvan olika lutning för enaxligt belastade rör och stavar. Om rören tryckprovas under tvåaxligt spänningstillstånd tycks emellertid brottkurvornas lutning vara lika för såväl rör som stavar, fig. 100. Skillnaderna mellan brottkurvorna för rör och stavar vid + 20°C är emellertid små.

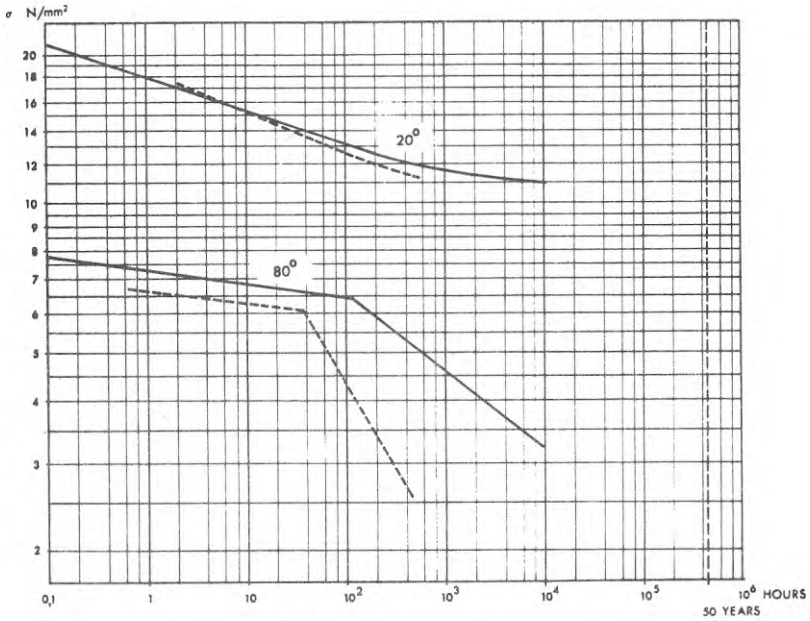


FIG 99 FAILURE CURVES FOR HDPE PIPES AND TENSILE BARS

— TENSILE BAR MELT INDEX  $MI_5 = 0.21$  g/10 min.  
 - - - PIPE (ONE-AXIAL STATE OF STRESS)

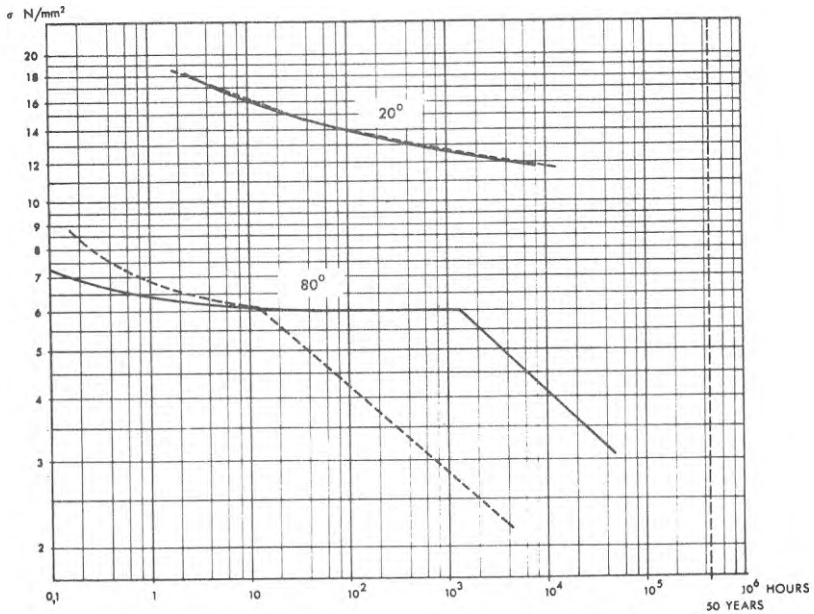


FIG 100 FAILURE CURVES FOR HDPE PIPES AND TENSILE BARS

— TENSILE BAR MELT INDEX  $MI_5 = 0.34$  g/10 min.  
 - - - PIPE (BI-AXIAL STATE OF STRESS)

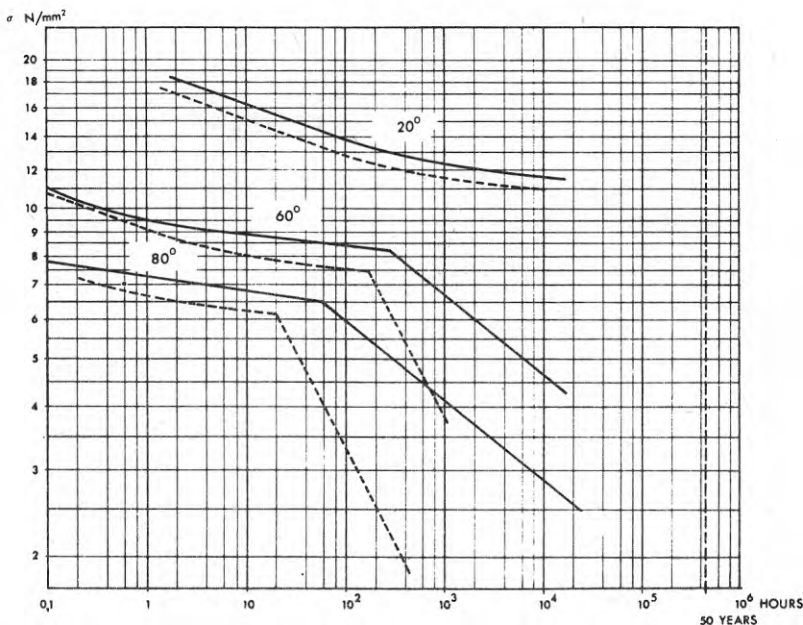


FIG 101 FAILURE CURVES FOR HOPE PIPES AND TENSILE BARS

———— TENSILE BAR MELT INDEX  $MI_5 = 0.60 \text{ g/10 min.}$   
 - - - - - PIPE (ONE-AXIAL STATE OF STRESS)

#### 7.4 Stavprovning i vätmedelhaltigt vatten

I syfte att erhålla kortare tider till sprödbrott i stavarna och därigenom erhålla en bättre överensstämmelse mellan brottider i rör och stavar har några stavprovningar utförts i vätmedelhaltigt vatten. Stavarna har i dessa fall provats i en 2 %-ig vattenlösning av Arkopal N-090 (fabr. Hoechst). Stavprovningarna har för övrigt bedrivits på samma sätt som tidigare, dvs. förlängningen i stavarna har uppmätts fram till brott. De töjningskurvor som härvid erhållits, fig. 102-107, överensstämmer i stort med de kurvor som erhållits



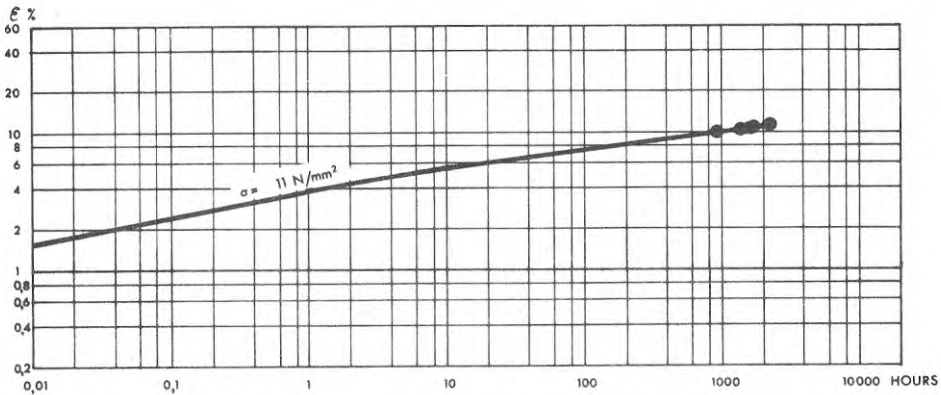


FIG 102 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.60 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	16.2 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	961 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	27
ENVIRONMENT:	WATER CONTAINING 2 % ARKOPAL	TEMPERATURE:	+ 20 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE

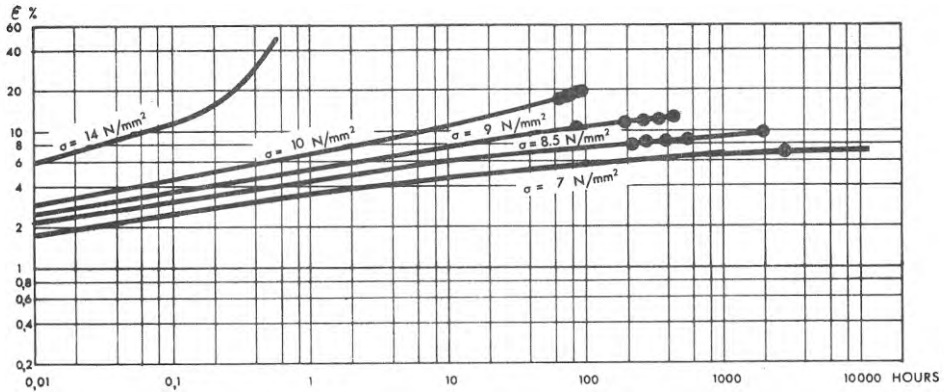


FIG 103 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.60 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	16.2 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	961 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	27
ENVIRONMENT:	WATER CONTAINING 2 % ARKOPAL	TEMPERATURE:	+ 40 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE



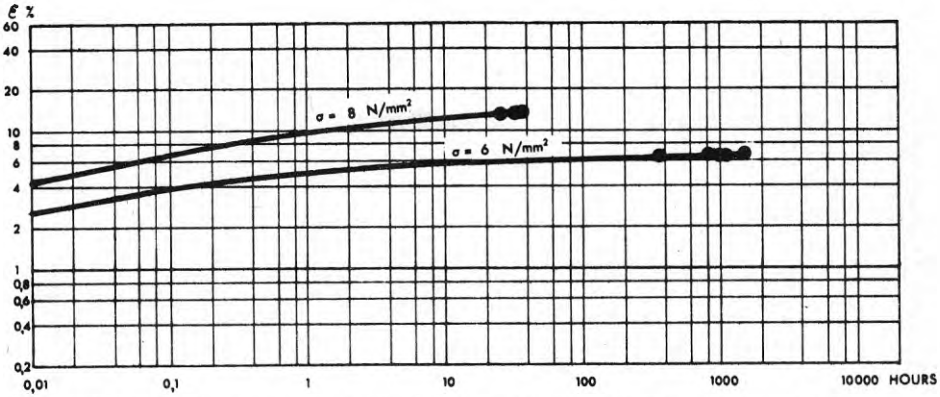


FIG 104 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.60 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	16.2 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	961 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	27
ENVIRONMENT:	WATER CONTAINING 2 % ARKOPAL	TEMPERATURE:	+ 60 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE

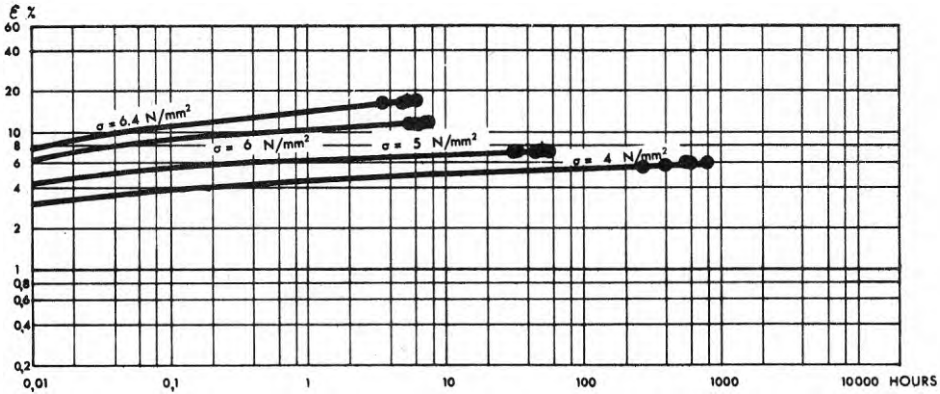


FIG 105 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.60 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	16.2 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	961 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	27
ENVIRONMENT:	WATER CONTAINING 2 % ARKOPAL	TEMPERATURE:	+ 80 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE

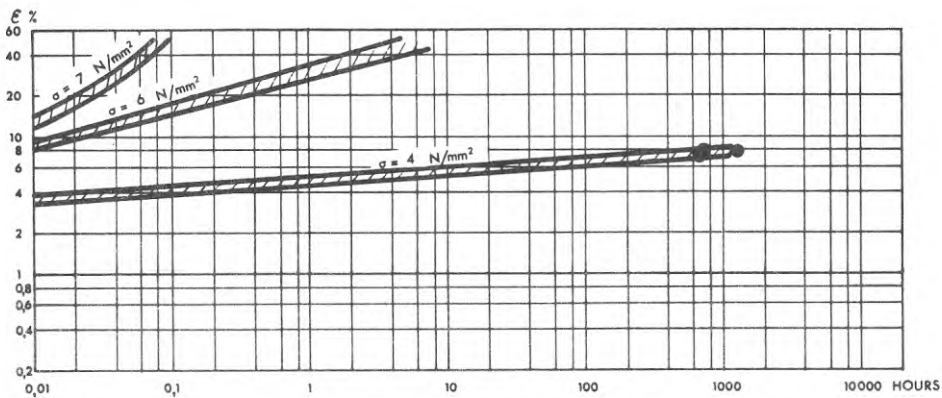


FIG 106 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.34 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	12.6 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	963 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	37
ENVIRONMENT:	WATER CONTAINING 2 % ARKOPAL	TEMPERATURE:	+ 80 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE

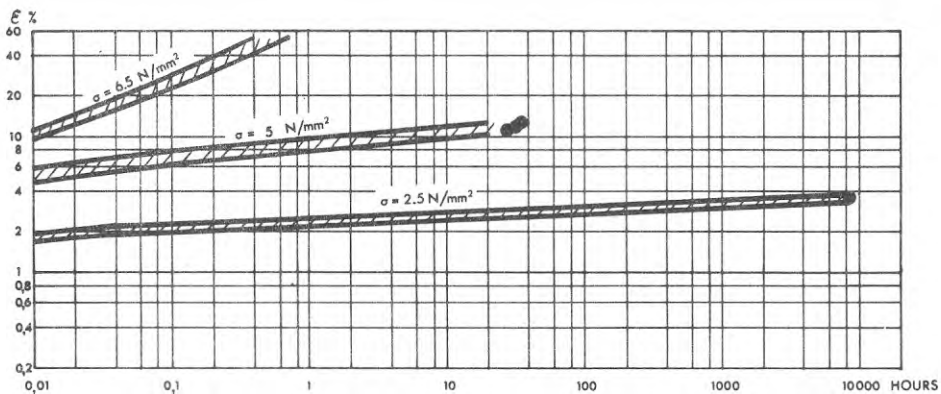


FIG 107 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	200x18,2 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.34 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	12.6 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	963 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	37
ENVIRONMENT:	WATER CONTAINING 2 % ARKOPAL	TEMPERATURE:	+ 80 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE

då stavarna provats i vatten, med den skillnaden att sprödbrotten inträffat avsevärt tidigare än när provningarna bedrivits i vatten. Brottkurvorna för stavar som provats i vätmedelhaltigt vatten får därför ett annat utseende än när stavarna provats i vatten, fig. 108-109. Förutom att brotten inträffar tidigare då stavprovningen bedrivs i vätmedelhaltigt vatten erhålls en flackare lutning på brottkurvorna. Det sistnämnda förhållandet innebär att vätmedlets accelerande inverkan på sprödbrotten i stavarna är spänningsberoende. Vid högre spänningsnivåer erhålls kraftigt förkortade brottider. Dessutom erhålls en förskjutning av "knäet" på brottkurvorna mot högre spänningsnivåer, vilket innebär att spröda brott erhålls vid vissa spänningsnivåer där segbrott skulle inträffat om provningen bedrivits i vatten. Vid låga spänningsnivåer är vätmedlets accelerande inverkan på sprödbrotten i stavarna relativt obetydlig.

En jämförelse mellan brottkurvorna för stavar provade i vätmedelhaltigt vatten och rör som tryckprovats i vatten visar att avvikelser mellan brottkurvornas form föreligger, fig. 110-111. Brottkurvorna för stavarna är avsevärt flackare än för rören och omslaget mellan sega och spröda brott inträffar vid högre spänningsnivåer i stavarna än för rören. Det är vidare endast för spänningsnivåer i området av "knäet" på brottkurvorna för rören som stavarna ger kortare brottider än rören. Mot bakgrund av dessa resultat kan stavprovningar i vätmedelhaltigt vatten knappast anses utgöra en lämplig metod att åstadkomma tidiga sprödbrott i stavarna, som korrelerar med brottiderna för rören.

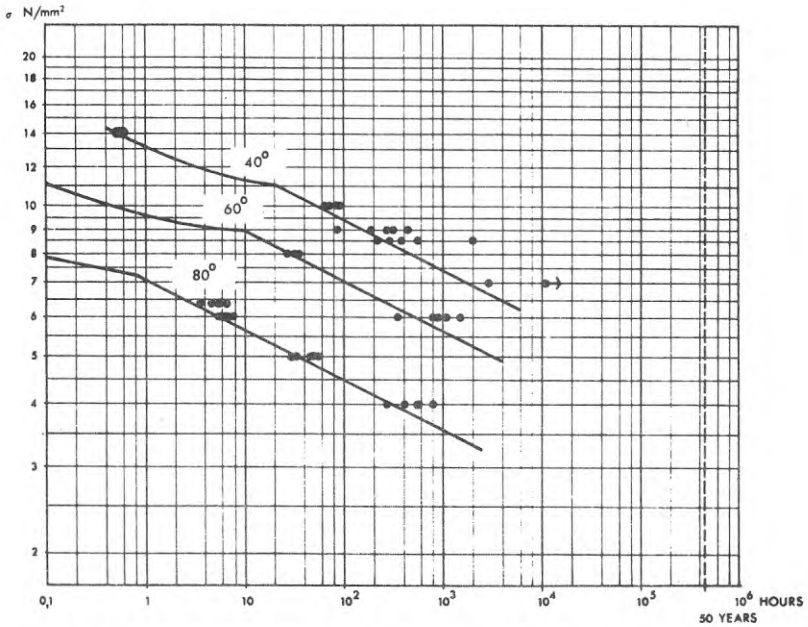


FIG 108 FAILURE CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

MELT INDEX  $MI_5$ : 0.60 g/10 min. ○ DUCTILE FAILURE  
 TENSILE BAR DENSITY: 961  $kg/m^3$  ● STRESS-CRACKING FAILURE  
 ENVIRONMENT: WATER WITH 2 % ARKOPAL

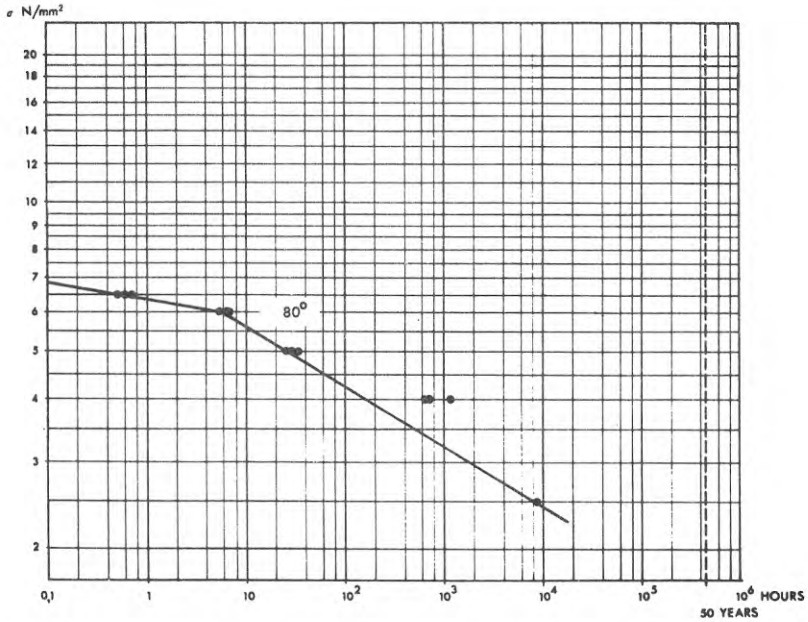


FIG 109 FAILURE CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

MELT INDEX  $MI_5$ : 0.34 g/10 min. ○ DUCTILE FAILURE  
 TENSILE BAR DENSITY: 963  $kg/m^3$  ● STRESS-CRACKING FAILURE  
 ENVIRONMENT: WATER WITH 2 % ARKOPAL

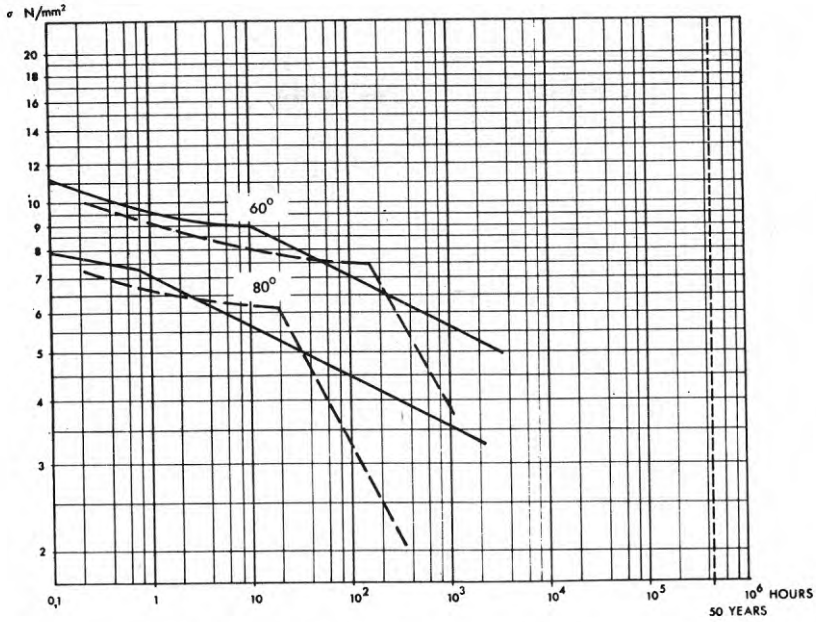


FIG 110 FAILURE CURVES FOR HDPE PIPES AND TENSILE BARS

——— TENSILE BAR MELT INDEX  $MI_5$ : 0.60 g/10 min.  
 - - - PIPE (ONE-AXIAL ENVIRONMENT: WATER (PIPE)  
 STATE OF STRESS) WATER WITH 2% ARKOPAL (BAR)

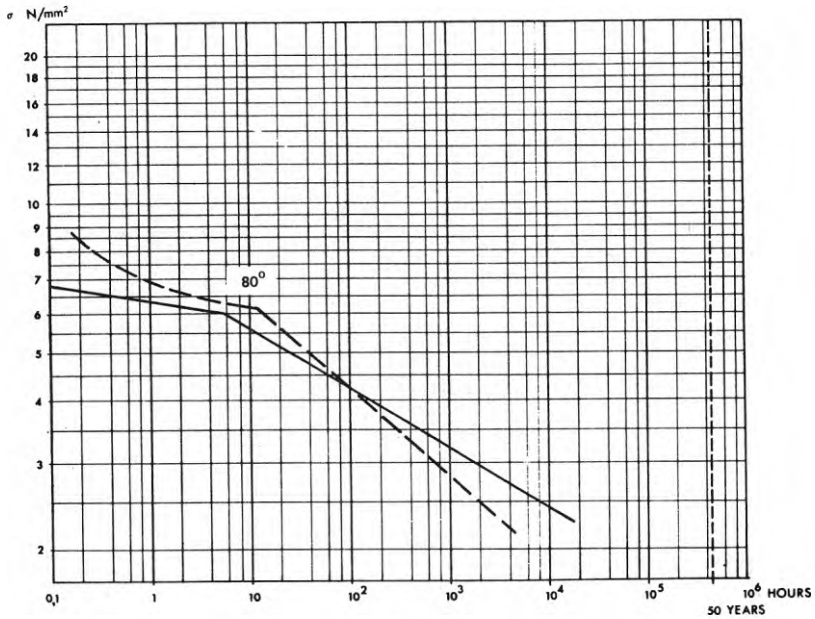


FIG 111 FAILURE CURVES FOR HDPE PIPES AND TENSILE BARS

——— TENSILE BAR MELT INDEX  $MI_5$ : 0.34 g/10 min.  
 - - - PIPE (BI-AXIAL ENVIRONMENT: WATER (PIPE)  
 STATE OF STRESS) WATER WITH 2% ARKOPAL (BAR)

## 7.5 Provning av stansade stavar

För att undersöka i vad mån ytfinishen hos stavarna påverkar stavprovningensresultaten har några provningar utförts på stavar som stansats ut ur rörväggen. De stansade stavarna har haft en sämre ytbeskaffenhet än de frästa stavarna, vilket inneburit att såväl antal som storlek av ytojämheter, vilka kan tjänstgöra som brottanvisningar, har varit större hos de förstnämnda stavarna.

Provningar med stansade stavar av olika PEH-råvaror har utförts vid både + 20°C och + 80°C. De töjningskurvor som erhållits vid provningarna vid + 20°C, fig. 112-113, uppvisar samma karaktäristiska utseende som erhållits vid provningar med frästa stavar. Resultaten från provningarna av stansade stavar vid + 80°C, fig. 114-116, visar att inga större skillnader i töjningshänseende föreligger mellan stansade och frästa stavar. Däremot erhålls kortare tider till sprödbrott i de stansade stavarna än i de frästa. De utförda provningarna visar således att stavarnas ytfinish är av betydelse för tiderna till sprödbrott i stavarna.

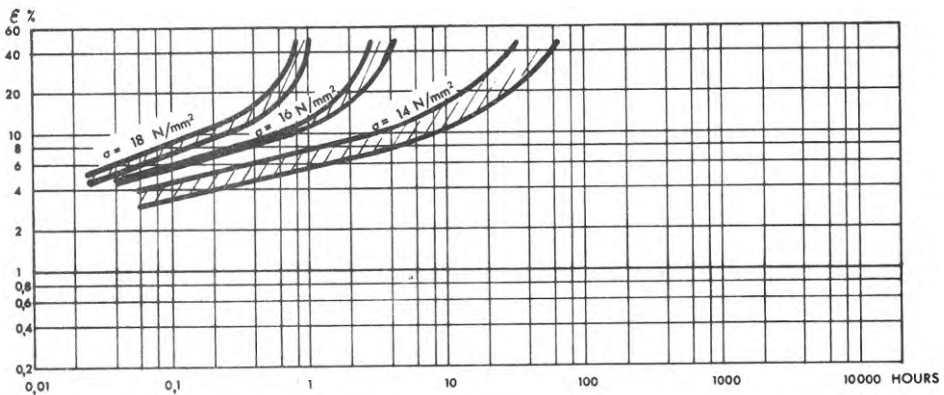


FIG 112 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	400x33 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	1.8 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	21.4 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	959 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	12
ENVIRONMENT:	AIR	TEMPERATURE:	+ 20 °C

NOTE: STAMPED BARS

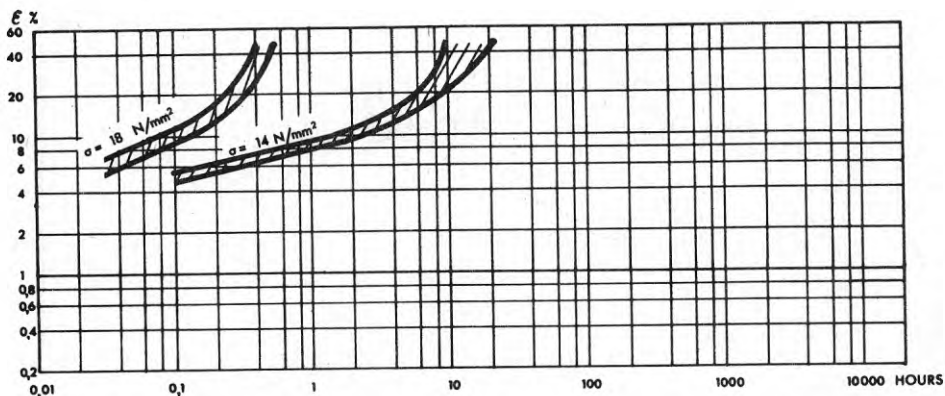


FIG 113 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	315x12.7 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	2.3 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	25.9 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	957 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	11
ENVIRONMENT:	AIR	TEMPERATURE:	+ 20 °C

NOTE: STAMPED BARS

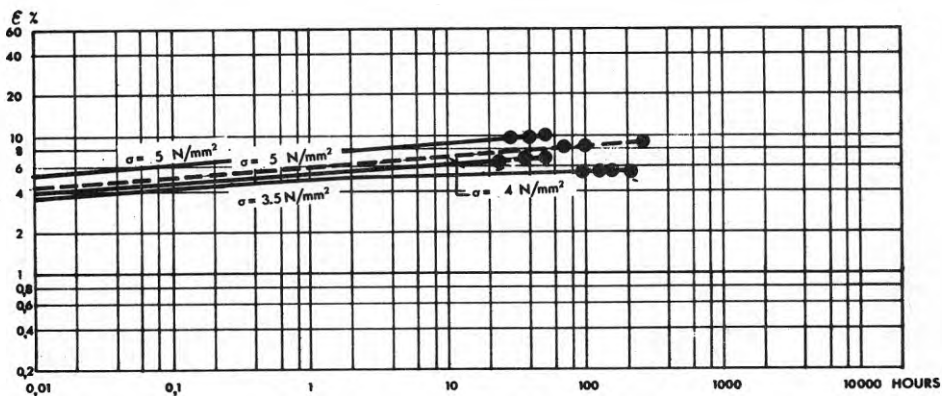


FIG 114 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	315x12.7 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	2.3 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	25.9 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	957 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	11
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 80 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE

———— STAMPED BARS  
 - - - - - MACHINED BARS

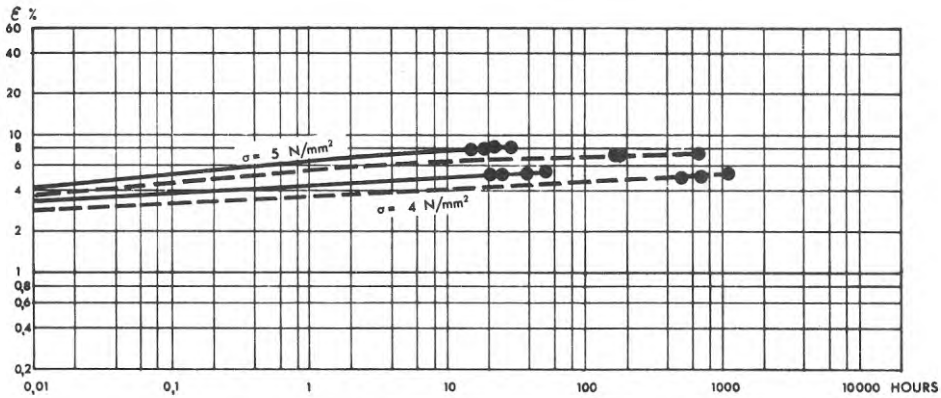


FIG 115 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	400x33 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	1.8 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	21.4 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	959 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	12
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 80 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE

———— STAMPED BARS

----- MACHINED BARS

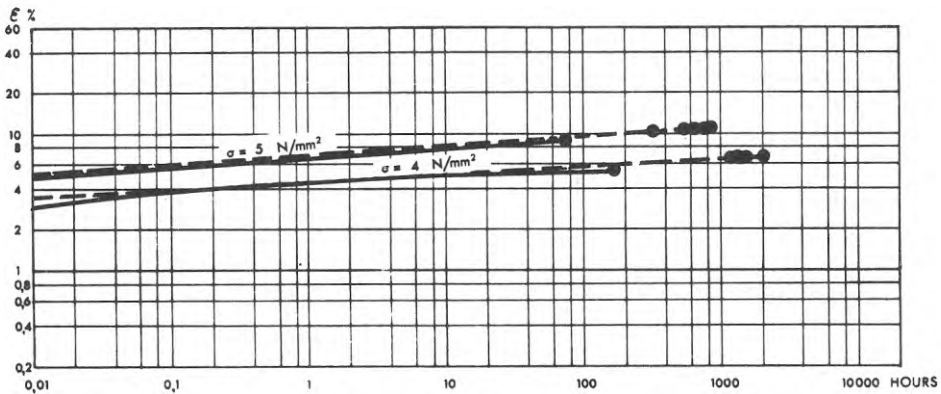


FIG 116 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX $MI_5$ :	0.60 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX $MI_{21.6}$ :	16.2 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	961 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO $MI_{21.6}/MI_5$ :	27
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 80 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE

———— STAMPED BARS

----- MACHINED BARS



## 7.6 Provningar av stavar med samma tjocklek som rörväggen

Några enstaka provningar av stavar med samma tjocklek som rörväggen har även genomförts för att undersöka om de spröda brotten i stavarna startar från den sida på provstaven som motsvarar rörväggens insida, eller om brotten startar från någon av de främsta ytorna. Provningsen har bedrivits på samma sätt som den övriga stavprovningen, dvs. förlängningen har uppmätts i stavarna tills sprödbrott inträffat, fig. 117. Resultaten från provningarna visade att brotten företrädesvis startade i någon av de främsta stavytorna, vilket innebär att dessa ytor sannolikt har farligare brottanvisningar än vad som förekommer på insidan av rörväggen vinkelrätt mot rörets längdriktning. Jämfört med töjningskurvorna för vanliga stavar uppvisade stavarna med samma tjocklek som rörväggen något större töjningar, fig. 118. Dessutom kan tiderna till sprödbrott i de sistnämnda stavarna anses vara något kortare än för de vanliga stavarna. Skillnaderna är dock små och några säkrare slutsatser kan svårligen dras från det begränsade provningsunderlaget.

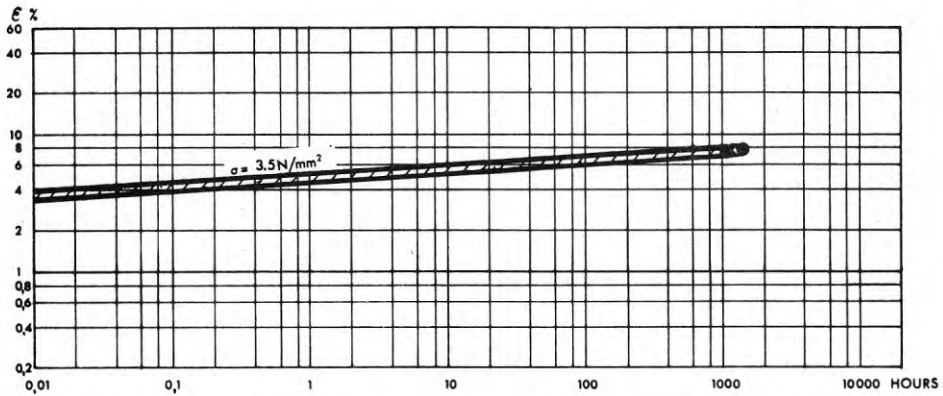


FIG 117 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS:	200x18.2 mm	MELT INDEX MI <sub>5</sub> :	0.60 g/10 min
TENSILE BAR ORIENTATION:	LONGITUDINAL	MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> :	16.2 g/10 min
TENSILE BAR DENSITY:	959 kg/m <sup>3</sup>	FLOW RATIO·MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub> :	27
ENVIRONMENT:	WATER	TEMPERATURE:	+ 80 °C

● STRESS-CRACKING FAILURE

NOTE: BARS WITH SAME THICKNESS  
AS PIPE WALL

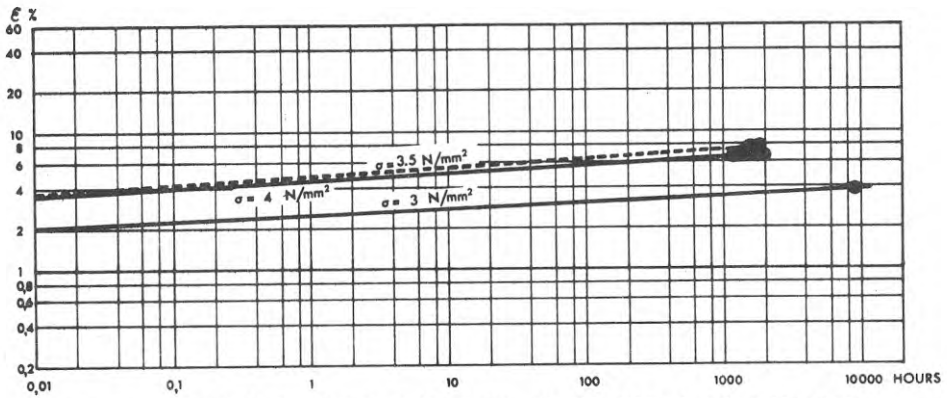


FIG 118 ELONGATION CURVES FOR STATICALLY LOADED TENSILE BARS OF HDPE

PIPE DIMENSIONS (mm)	200x18.2	
TENSILE BAR ORIENTATION	LONGITUDINAL	
TENSILE BAR DENSITY (kg/m <sup>3</sup> )	961	959
MELT INDEX MI <sub>5</sub> (g/10 min)	0.60	
MELT INDEX MI <sub>21.6</sub> (g/10 min)	16.2	
FLOW RATIO MI <sub>21.6</sub> /MI <sub>5</sub>	27	
TEMPERATURE (°C)	+ 80	
ENVIRONMENT	WATER	

● STRESS-CRACKING FAILURE

----- BARS WITH SAME THICKNESS AS PIPE WALL

## 8. OLIKA FAKTORERS INVERKAN PÅ BROTTIDER I PEH-RÖR

### 8.1 Parametrar

Som framgått av resultaten från utförda rör- och stavprovningar kan en viss korrelation härledas mellan brottider resp. töjningar i rör och stavar. Huvudsyftet med undersökningarna har varit att erhålla en metod med vars hjälp rörkvaliteten skall kunna bedömas utan att tryckprovning av rören behöver tillgripas. Av intresse är därför att finna en korrelation mellan rör- och stavprovning med vars hjälp brottiderna för rören skall kunna bedömas. Vad gäller de sega brotten i rör och provstavar har undersökningarna visat att dessa inträffar ungefär samtidigt om rören tryckprovas under tvåaxligt spänningstillstånd. Sker provningen av rören under enaxligt spänningstillstånd erhålls brotten tidigare i rören än i stavarna. För de spröda brotten föreligger större skillnader mellan brottiderna i rör och stavar. Eftersom spröda brott är de i praktiken enda förekommande i PEH-rör är det viktigt att finna en god korrelation mellan brottiderna för rör och stavar vid denna brottyp. För att kunna åstadkomma detta erfordras en närmare granskning av de faktorer som i första hand kan antas bestämma ett PEH-rörs hållfasthetsegenskaper. Dessutom måste skillnaderna i belastningsfall mellan rör och stavar beaktas. De parametrar som i detta fall närmast är aktuella för fastställande av rörens hållfasthet är följande:

1. PEH-råvarans allmänna egenskaper som t.ex.:
  - a. Medelmolekylvikt
  - b. Molekylviktsfördelning
  - c. Förgreningsgrad hos molekylkedjorna
2. Tillverkningsbetingelsernas inflytande på rörets egenskaper i form av:
  - a. Medeldensitet och densitetsfördelning i rörväggen
  - b. Inbyggda termiska spänningar i röret
  - c. Ofullkomligheter i bearbetningen, typ blåsbildningar och andra diskontinuiteter i rörväggen
  - d. Ytstruktur hos röret (brottanvisningar)
3. Storleksberoende

### 8.2 Brottyper

Som tidigare nämnts kan två olika typer av brott uppstå i PEH-rör. Den ena brottypen, segbrott, kännetecknas av att brottet föregås av en kraftig deformation, vil-

ken ofta uppträder i ett lokalt område på röret. Den andra typen av brott ("stress cracking" = spännings-sprickning; sprödbrott) karaktäriseras av att brottet sker i form av en långsam spricktillväxt som så småningom resulterar i en spricka i rörväggen utan föregående stor deformation. Den förstnämnda brottyper inträffar vid höga spänningsnivåer medan de sistnämnda brotten sker vid lägre spänningsnivåer. Ovanför "knäet" på brottkurvorna, fig. 1, är brotten av seg karaktär medan kurvdelarna under "knäet" representeras av spröda brott. Eftersom de bägge ovannämnda brottyperna är av olika karaktär är det väsentligt att fastlägga vilka parametrar som har störst inverkan på brottiderna för respektive brottyp. Det är nämligen sannolikt att vissa parametrar kan ha föga eller ingen inverkan på brottiderna för den ena brottyper medan inverkan på brottiderna för den andra typen av brott kan vara stor. Speciellt stort intresse har härvid de parametrar som påverkar tiderna för sprödbrotten.

### 8.3 PEH-råvarans egenskaper

Det är från litteraturen känt att råvaruegenskaper som medelmolekylvikt och molekylviktsfördelning har en betydande inverkan på rörens hållfasthetsegenskaper, /1, 3/. Detta avspeglas även i de erhållna resultaten, fig. 94, vilka visar att olika brottider erhålls för olika PEH-råvaror. Enligt uppgifter i litteraturen, /1/, ger en låg medelmolekylvikt (hög  $MI_5$ -värde) upphov till en dålig sprödbrottsresistens. De erhållna resultaten överensstämmer i stort med ovannämnda litteraturuppgifter. Sålunda erhålls t.ex. de kortaste sprödbrottiderna för stavarna med det högsta  $MI_5$ -värdet. Däremot tycks medelmolekylvikt och molekylviktsfördelning inte påverka segbrotts-hållfastheten i samma riktning; snarare är förhållandet här det motsatta.

### 8.4 Medeldensitet och densitetsfördelning i rörväggen

Densiteten i rörväggen torde ha en icke obetydlig inverkan på rörens hållfasthet. Medeldensitet och densitetsfördelning i rörväggen är i sin tur avhängiga hur tillverkningen av rören skett och vilken vägg-tjocklek rören haft. Ju långsammare rören kylts vid tillverkning under desto längre tid kan kristallisationen ske i PEH-materialet och desto högre densitet erhålls i rörväggen. Eftersom polyetenets värmeledningstal är lågt ( $\lambda = 0,37 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ), och rören normalt endast kyls utvändigt, kommer ett tjockväggigt rör i praktiken att kylas långsammare och därmed få en högre densitet än ett tunnväggigt rör. Detta avspeglas även i densitetsfördelningen genom rörväggen, jfr. fig. 5-6. Av denna anledning kan ett tjockväggigt rörs hållfasthetsegenskaper avvika från ett tunnväggigt rörs. I de utförda undersökningarna har det ej funnits utrymme för ett närmare studium av densitetens och densitetsfördelningens inverkan på brottiderna för rören. Så gott som samtliga rör som tryckprovats har varit av

samma dimension och tryckklass ( $\emptyset$  200 NT10) och haft en likartad medeldensitet och densitetsfördelning. Däremot har ett antal stavprovningar utförts på stavar som uttagits på olika avstånd från rörväggens insida, fig. 11-14. Denna begränsade undersökning visar att densiteten hos stavar inverkar på brottiderna för de sega brotten i stavar. Motsvarande undersökning av i vad mån en densitetsskillnad hos stavar påverkar tiden till sprödbrott i stavar har emellertid ej utförts. Det är emellertid sannolikt att en ökning av densiteten för ett och samma material medför försämrade sprödbrottsegenskaper. Eftersom sprödbrotten alltid startar från rörväggens insida torde densiteten i denna punkt på rörväggen vara dimensionerande för rörens sprödbrottskänslighet.

### 8.5 Inbyggda spänningar

De inbyggda termiska spänningarnas storlek i rören är i likhet med densiteten i rörväggen beroende av hur rören kylts vid tillverkningen. En snabb avkylning medför höga inbyggda spänningar, medan en långsam avkylning ger låga spänningar. Som nämnts i punkt 4.2 relaxerar de inbyggda spänningarna i rören. Spänningsrelaxationen sker snabbast under den första tiden efter tillverkningen. Beräknat relaxationsförlopp för inbyggda spänningar, baserat på de vanligen använda krypmodulkurvorna för PEH-rör, har redovisats i fig. 119. Härav framgår att den inbyggda spänningens storlek efter 50 år är ca hälften så stor som strax efter det att röret tillverkats.

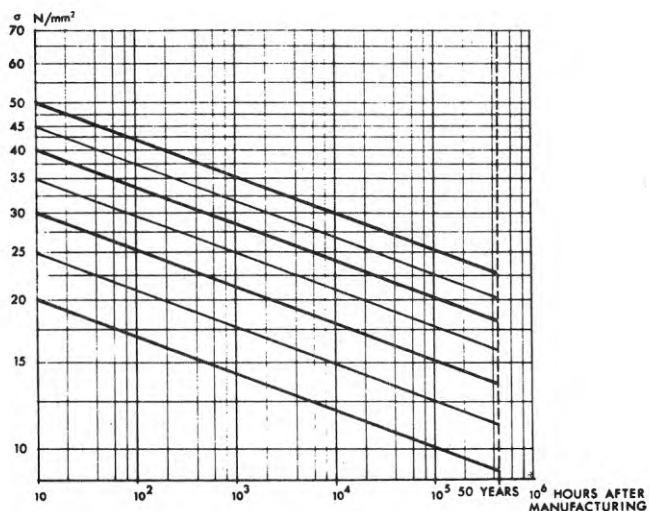


FIG 119 RELAXATION OF FROZEN-IN STRESSES IN HDPE PIPES AT +20°C

Den inbyggda spänningens storlek har sannolikt en stor betydelse för rörens långtidshållfasthet. Då rören kyls utvändigt ger den inbyggda spänningen upphov till dragspänningar vid insidan av röret och tryckspänningar vid utsidan. Den inbyggda spänningen skall adderas till spänningen av invändigt vattentryck, varvid de största dragspänningarna erhålls vid insidan av rörväggen. Det är följdriktigt också vid insidan av rörväggen som praktiskt taget alla sprödbrott initieras. De inbyggda spänningarna påverkar sannolikt brottiderna för rören i olika stor utsträckning beroende på om rören tryckprovas vid sådana spänningsnivåer att sega brott erhålls eller ej. Då rören tryckprovas vid höga spänningsnivåer, vilka medför sega brott i rören, är sannolikt den inbyggda spänningens storlek av mindre betydelse för brottiderna. Dels är nämligen den inbyggda spänningen relativt sett låg jämfört med spänningen i rörväggen av invändigt vattentryck, dels föregås brottet av stora töjningar i rörväggen, vilket medför att en spänningsutjämnning i rörväggen kan antas ske i viss utsträckning. Den för brotten dimensionerande spänningen i rörväggen torde därför i detta fall snarare utgöras av den medelspänning som det invändiga vattentrycket ger upphov till, än av den max. spänning som erhålls om spänningen av invändigt tryck och inbyggd spänning adderas.

När rören tryckprovas vid låga spänningsnivåer är däremot den inbyggda spänningen relativt hög jämfört med spänningen i rörväggen av invändigt vattentryck. Dessutom är töjningen i rörväggen relativt begränsad, vilket innebär att en spänningsomlagring i rörväggen endast kan förväntas ske i liten utsträckning. Den för de spröda brotten i rören dimensionerande spänningen torde därför vara den sammanlagda spänningen vid insidan av rörväggen av hydrauliskt tryck och inbyggd spänning.

Som framgått av tabell 3 har de provade rören samtliga haft ungefär lika stora inbyggda spänningar. De utförda undersökningarna har därför inte medgivit något studium av i vilken utsträckning en variation av den inbyggda spänningens storlek påverkar brottkurvorna.

## 8.6 Brottanvisningar

Ytstrukturen på rörens insida har sannolikt en viss betydelse för rörens långtidshållfasthet. Förekomst av repor och andra småfel på insidan av röret kan nämligen utgöra brottanvisningar och därmed medföra tidiga sprödbrott i rören. Dylika brottanvisningar har sannolikt ingen/eller endast en obetydlig inverkan på brottiderna för rören då rören provats vid så höga spänningsnivåer att sega brott erhålls. De spröda brotten i rören, vilka egentligen består av en långsam spricktillväxt, startar däremot ofta från småfel på rörets insida och för denna brottyp har sannolikt förekomsten av dylika brottanvisningar en

betydande inverkan på brottiderna. Eventuella repor och småfel på rörens utsida påverkar rörens hållfasthet i obetydlig utsträckning. Så gott som samtliga sprödbrott i PEH-rör startar i praktiken från rörväggens insida där spänningen är högst, varför eventuella brottanvisningar på rörets utsida måste vara förhållandevis stora för att sprödbrotten skall initieras i dessa punkter.

De rör som tryckprovats har haft en normal inneryta utan repor eller andra ytfel av betydelse. Av de erhållna resultaten från rörprovningarna kan således inga slutsatser dras i vad mån ytstrukturen hos rören påverkar brottiderna. Däremot har som tidigare nämnts ett antal provningar genomförts på stavar med olika ytfinhet (stansade resp. frästa stavar) fig. 112-116. Resultaten från denna undersökning (se avsnitt 7.5) visar att klart kortare sprödbrottider erhålls om stavar ges en sämre ytfinish, däremot påverkas tiderna för de sega brotten i stavar inte i någon nämnvärd utsträckning.



## 9. OLIKHETER I BELASTNINGSFALL MELLAN RÖR OCH STAVAR

### 9.1 Parametrar

Som framgått av kap. 7 har betydande skillnader i brotttider uppmätts mellan rör och stavar. Skillnaderna har varit speciellt stora inom det spänningsområde där sprödbrotten inträffar i rör och stavar. Orsaken till de uppmätta avvikelserna mellan brottiderna är att rören och stavarne varit utsatta för olika belastningsfall. De väsentligaste skillnaderna i belastningsfall mellan rören och stavarne är härvid följande:

1. Skillnader i spänningar och spänningsfördelning för rör och stavar.
2. Förekomst av inbyggda spänningar i rören.
3. Fleraxligt spänningstillstånd i rören.
4. Skillnader i ytstruktur hos rör och stavar.
5. Densitetsskillnader mellan rör och stavar.

Ovannämnda skillnader bidrar i större eller mindre utsträckning till de uppmätta skillnaderna mellan brottiderna för rör och provstavar.

### 9.2 Spänningar och spänningsfördelning i rör och provstavar

Stavarne, vilka varit belastade med en konstant axialkraft, har om man bortser från tvärkontraktionen i desamma varit utsatta för en konstant, jämnt fördelad dragspänning. Rören, vilka genomgående varit av tryckklass NT10, har däremot varit belastade med ett konstant invändigt vattentryck. Som framgått av fig. 47-48 är den verkliga spänningen i ett PEH-rör av tryckklass NT10 störst vid insidan av rörväggen, medan spänningen vid utsidan endast uppgår till drygt 80 % av spänningen vid insidan av rörväggen. För de spröda brotten i rören, vilka alltid startar från insidan av röret, torde spänningen vid insidan av rörväggen vara dimensionerande. Allteftersom tryckprovningen sker kommer emellertid en viss diameterutvidgning att äga rum i rörprovet. En dylik diameterutvidgning medför sannolikt en viss spänningsutjämning i rörväggen, men samtidigt erhålls en ökad ringspänning på grund av den ökade diametern i röret. Detta resulterar i att den spänning som det invändiga vattentrycket orsakar i rörväggen till sin storlek och fördelning inte kan anses helt känd. Emellertid torde spänningsförändringen vid insidan av rörväggen vara relativt liten för små töjningar i rören, varför denna effekt trots allt torde ha en ringa inverkan på brottkurvorna för rören.



### 9.3 Inbyggda spänningar

En betydelsefull skillnad i belastningsfall mellan rör och stavprovning är förekomsten av inbyggda spänningar i rören. Som framgått av punkt 8.5 kan de inbyggda spänningarna framför allt antas påverka brottiderna för de spröda brotten i rören. Förekomsten av inbyggda spänningar i rören är sannolikt en starkt bidragande orsak till de stora skillnader som uppmätts mellan sprödbrottskurvorna för rör och stavar. I detta sammanhang bör dock observeras att spröda brott endast erhållits i rör och stavar vid provningar vid  $+60^{\circ}\text{C}$  resp.  $+80^{\circ}\text{C}$ . För att undersöka i vilken utsträckning de inbyggda spänningarna relaxerat vid dessa förhöjda temperaturer har en särskild undersökning utförts på  $\varnothing$  200 NT10 rör med  $MI_5 = 0.60$  g/10 min. Undersökningen har omfattat uppmätningar av inbyggda spänningar i rörprover vilka förvarats i  $+80^{\circ}$ -igt vatten under olika långa tidsperioder. Bestämningen av de inbyggda spänningarna har skett genom uppmätning av periferiminskningen efter uppsnittning av rörproverna sedan dessa fått svalna till  $+20^{\circ}\text{C}$ .

De inbyggda spänningarna har beräknats genom insättning av värdet på periferiminskningen i den i avsnitt 4.2 angivna formeln. Resultatet från undersökningen, tabell 4, visar att  $+80^{\circ}\text{C}$  inte är en tillräckligt hög temperatur för att de inbyggda spänningarna skall relaxera i större utsträckning. Det är emellertid inte osannolikt att restspänningarna kan relaxera något snabbare under belastning. Vid tryckprovning av PEH-rör vid  $+80^{\circ}\text{C}$  kan emellertid en inte obetydlig del av den inbyggda spänningen antas finnas kvar i rören.

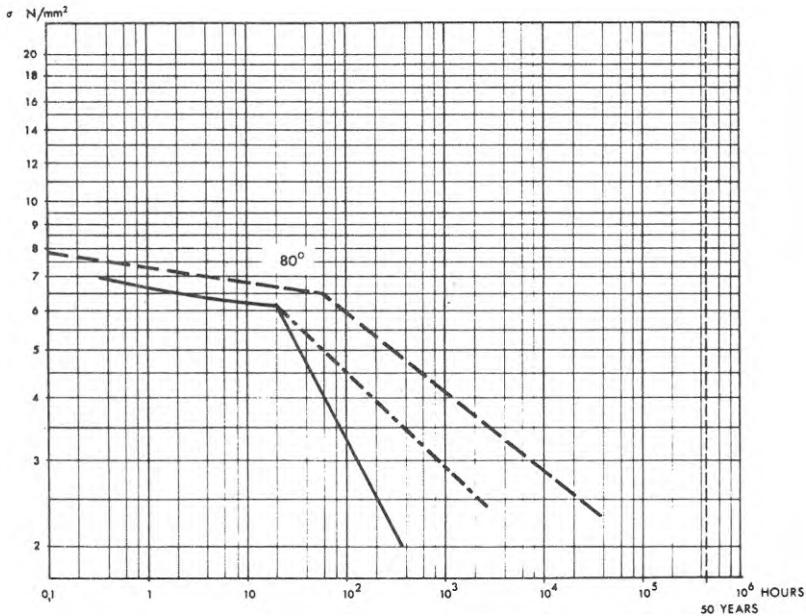
För att med ett exempel belysa möjlig inverkan av inbyggd spänning på brottiderna för PEH-rör vid  $+80^{\circ}\text{C}$  har i fig. 120 en brottkurva inlagts som ligger ca  $1.5$  N/mm<sup>2</sup> över den uppmätta brottkurvan för rören med  $MI_5 = 0.60$  g/10 min. Sistnämnda spänningsvärde har antagits motsvara den inbyggda spänningen vid tryckprovningarna. Genom ovannämnda förfaringssätt kommer brottkurvan för rören att förskjutas närmare brottkurvan för stavarna. Av exemplet framgår således att de inbyggda spänningarna i betydande utsträckning kan påverka brottkurvan för rören, men att skillnader ändå föreligger mellan brottkurvorna för rör och stavar.

### 9.4 Skillnader i spänningstillstånd

Av resultaten från de utförda rörprovningarna framgår att olika brottkurvor erhålls beroende på under vilket spänningstillstånd rören tryckprovats, fig. 96. De utförda provningarna visar således att graden av fleraxlighet i spänningstillståndet påverkar brottiderna för de spröda brotten i rören. En skillnad mellan rör- och stavprovningar är att stavarna varit utsatta för en enaxlig belastning, medan det i rören alltid finns en viss grad av fleraxlighet i spänningstillståndet. Även om tryckprovningen av rören utförs på sådant sätt att det invändiga vattentrycket på

Time for storing of pipes in water at + 80°C (h)	Measured frozen-in stresses in pipes after storing at + 80°C (N/mm <sup>2</sup> )
0	2.0
24	1.6
96-360	1.45

**TABLE 4** RELAXATION OF FROZEN-IN STRESSES  
IN HDPE PIPES AT + 80°C



**FIG 120** FAILURE CURVES FOR HDPE PIPES AND TENSILE BARS

—————	PIPE	MELT INDEX MI <sub>5</sub> = 0.60 g/10 min.
- - - - -	TENSILE BAR	STATE OF STRESS: ONE-AXIAL
- · - · -	ESTIMATED FAILURE CURVE FOR PIPES WITH NO FROZEN-IN STRESSES	ENVIRONMENT: WATER

rörprovns ändförslutningar inte upptas som axialspänningar i rören kommer det ändå, som tidigare nämnts, att finnas dylika spänningar i rören. De inbyggda spänningarna ger nämligen upphov till såväl längd- som ringspänningar i rörväggen. Den inbyggda spänningen i rörets längdriktning har approximativt samma storlek och fördelning som den inbyggda ringspänningen, vilket innebär att tvåaxliga dragspänningar erhålles vid insidan av rörväggen. Tryckprovas rören med ändförslutningar vilka förankras i rörväggen erhålls en ökad grad av tvåaxlighet i spänningstillståndet. Denna skillnad i spänningstillstånd mellan rör- och stavprovning utgör sannolikt en orsak till den skillnad i brotttider som uppmätts för sprödbrotten i rör och stavar. De utförda undersökningarna har emellertid inte varit tillräckligt omfattande för att möjliggöra en närmare kvantifiering av spänningstillståndets inverkan på brotttider för rör och stavar.

### 9.5 Skillnader i ytstruktur

En studie av brottytornas utseende vid spröda brott i såväl rör som provstavar visar att brotten alltid startat från ytan av provkroppen. I rören har de spröda brotten alltid startat från insidan, sannolikt beroende på att ringspänningen är störst i denna del av rörväggen. I stavarna har brotten startat från en av sidorna, företrädesvis från en av de smala sidorna. Eftersom sprödbrotten sannolikt startar vid brottanvisningar, typ ojämnheter och repor i materialet, kan brottiderna förväntas vara beroende av provkroppens ytstruktur. Försök utförda på stavar med olika ytfinhet, fig. 114-116, ger stöd för ovan nämnda antagande. Eftersom de använda provstavarna har frästs ut ur rörväggen har de en annan yta än rörväggens insida. Denna skillnad i ytfinish bidrar sannolikt till skillnaderna i brotttider för de spröda brotten i rör och stavar. Av denna anledning är det även viktigt att uttagningsmetodiken för stavarna är sådan att samtliga stavar får samma ytfinhet. Skulle variationer förekomma skulle sannolikt stora spridningar i brotttider erhållas för stavarna.

Dessutom föreligger ytterligare en betydelsefull skillnad vad gäller provkroppsutformningen hos rör och stavar. Rören är väsentligt större än stavarna och därmed ökar rent statistiskt sannolikheten för att repor och andra småfel, såväl till antal som storlek, i större utsträckning förekommer i rören än i stavarna.

För att undersöka om skillnaderna i ytstruktur hos rör och provstavar påverkar brottiderna för de spröda brotten i större utsträckning har, som nämnts under punkt 7.6, några enstaka provningar utförts på stavarna med samma tjocklek som rörväggen och med en bredd i mättvärnsnittet på 10 mm. Som framgått är emellertid provningsunderlaget så begränsat att några säkrare slutsatser inte kan dras om i vilken utsträck-

ning sprödbrottiderna förkortas då en dylik provstavsutformning används.

#### 9.6 Densitetsskillnader

Förutom ovannämnda faktorer påverkas brottiderna i rör och stavar av materialparametrar som medelmolekylvikt, molekylviktsfördelning och densitet. En ökad sprödbrottskänslighet erhålls med en minskad medelmolekylvikt hos råvaran och dessutom ökar sprödbrottsbenägenheten för en och samma råvara med en ökad densitet. Eftersom provstavarna uttagits ur rörväggen har de samma medelmolekylvikt och molekylviktsfördelning som röret i övrigt. Däremot föreligger densitetsskillnader mellan rör och provstavar. Eftersom det normalt finns en densitetsvariation i rörväggen, fig. 5-6, kommer stavdensiteten att vara beroende av var i rörväggen staven uttagits. För rören kan sprödbrottsbenägenheten anses vara betingad av materialegenskaperna närmast rörväggens insida. Dvs de uppmätta brottiderna för rören kan i viss mån antas vara beroende av densitetsvärdet vid rörväggens insida. För de sega brotten i rören torde däremot medeldensiteten i rörväggen snarare än densiteten vid rörväggens insida vara dimensionerande. Det är dock i första hand densitetens inverkan på sprödbrottstiderna som är av intresse. Eftersom stavarna normalt uttagits i närheten av rörväggens insida är skillnaden relativt liten mellan kantdensiteten vid rörets insida och stavarnas medeldensitet. Huruvida denna skillnad är tillräcklig för att märkbart påverka brottiderna för de spröda brotten är emellertid inte närmare känt.

## 10. STAVPROVNING SOM METOD FÖR FÖRENKLAD KVALITETSKONTROLL AV PEH-RÖR

### 10.1 Avsikt

Som framgått av avsnitten 8 och 9 kan ett PEH-rörs hållfasthet anses beroende av ett flertal olika parametrar. Vid den använda stavprovningens metod har stavarna varit utsatta för ett helt annat (enkellare) belastningsfall än rören, varför en direkt korrelation mellan resultaten från rör- och stavprovningarna omöjligt kan åstadkommas. De i ovannämnda avsnitt förda diskussionerna syftar inte heller till att åstadkomma en fullständig korrelation mellan rör- och stavprovningens resultat, utan avsikten är att i första hand grovt bedöma vilka ytterligare faktorer som kan antas påverka rörens eller stavarnas hållfasthet. Avsikten är att när dessa faktorer inverkan på rörens och stavarnas hållfasthet är bättre kända, det skall vara möjligt att på basis av resultaten från stavprovningen samt dessa faktorerers inverkan kunna avgöra om ett rör uppfyller de nuvarande standardkraven eller ej. De utförda stavprovningarna skall därför i första hand ses som ett inledande försök att finna en metod som möjliggör en förenklad kvalitetskontroll av stora PEH-rör utan att tryckprovning behöver tillgripas.

### 10.2 Brotthållfasthet hos rör

Som tidigare nämnts kan ett flertal parametrar antas påverka rörens hållfasthet. Dels är hållfastheten hos det färdiga röret avhängig vilken råvarukvalitet som använts, dels beror hållfastheten på hur rörtillverkningen bedrivits. Ett PEH-rör av dålig kvalitet kan därför exempelvis åstadkommas om råvarans egenskaper är mindre goda eller om råvarukvaliteten är ojämn. Likaledes kan ett rör av dålig kvalitet erhållas på grund av fel i tillverkningsprocessen även om den använda råvaran är av god kvalitet. Orsakerna till en dålig sprödbrotthållfasthet hos rören kan därför exempelvis vara:

1. Olämpliga råvaruegenskaper.
2. Höga inbyggda spänningar i röret.
3. En "onormal" densitetsfördelning i rörväggen med extremt höga densitetsvärden vid rörväggens insida.
4. Svaghetszoner i rörväggen åstadkomna av en dålig eller ofullständig materialbearbetning.
5. Brottanvisningar i form av répor på rörväggens insida.

Av ovannämnda orsaker till en dålig rörhållfasthet kan sannolikt en stavprovningssmetod endast avslöja de orsaker som angivits under pkt 1, 3 och 4. Andra eventuella orsaker måste avslöjas på annat sätt.

### 10.3 Stavprovningssmetod

Hittills utförda undersökningar är ej tillräckliga för att definitivt fastslå en stavprovningssmetod för förenklad kvalitetskontroll av PEH-rör. Undersökningarna ger dock tillräckligt underlag för att en dylik provningssmetod skall kunna skisseras i grova drag.

En metod för kvalitetskontroll av PEH-rör bör i första hand omfatta en bestämning av rörens sprödbrottshållfasthet. Motivet till detta är att de sega resp. spröda brotten i rören sker enligt två helt skilda brottmekanismer. Långtidshållfastheten för rören bestäms av rörens sprödbrottshållfasthet och en god segbrottshållfasthet betyder inte, att rörens sprödbrottsegenskaper är goda. De erhållna resultaten vid rör och stavprovningarna i fig. 94 och 98 visar tvärtom att en hög segbrottshållfasthet kan medföra en ökad sprödbrottskänslighet. En ytterligare faktor som talar för att rörens sprödbrottshållfasthet i första hand bör bestämmas, är att samtliga haverier på PEH-rör som inträffar i praktiken utgörs av spröda brott. Stavprovningssmetoden bör således vara utformad så att det med hjälp av erhållna resultat skall vara möjligt att förutsäga om den branta delen av brottkurvan för rören vid  $+80^{\circ}\text{C}$  kommer vara belägen till höger eller vänster om standardkurvan vid  $+80^{\circ}\text{C}$  (fig. 1). För att möjliggöra en dylik bedömning av rörkvaliteten erfordras sannolikt åtminstone följande undersökningar:

1. Stavprovning vid någon eller några spänningsnivåer vid  $+80^{\circ}\text{C}$  som medför spröda brott i provstavarna.
2. Uppmätning av inbyggd spänning i röret.
3. Uppmätning av densitetsfördelningen i rörväggen.
4. Inspektion av röret.

Av ovannämnda provningar syftar stavprovningen till att bestämma PEH-materialets sprödbrottshållfasthet. De utförda undersökningarna visar härvid att man med den använda stavprovningssmetoden har kunnat skilja olika PEH-material i sprödbrottshänseende, jfr fig. 94. Dessutom föreligger en korrelation mellan rör- och stavprovningssresultaten så tillvida att bägge metoderna ger samma rangordning för de testade PEH-materialens sprödbrottshållfasthet, jfr fig. 94 och 98. Att så är fallet kan till viss del bero på att rören varit av samma dimensioner, haft lika stora inbyggda spänningar samt haft en likartad densitetsfördelning i rörväggen. Det är nämligen tänkbart

att någon direkt korrelation inte erhållits mellan rör- och stavprovning om exempelvis stora skillnader i inbyggda spänningar funnits mellan de olika rören.

De under pkt 2-4 ovan angivna provningarnas syfte är därför att kontrollera om tidiga sprödbrott kan befaras i rören på grund av höga inbyggda spänningar, "onormal" densitetsfördelning i rörväggen (höga densitetsvärden vid rörväggens insida) eller brottanvisningar. Att ange närmare gränser för vad som kan anses som tillåtet i fråga om brottider vid stavprovning, inbyggda spänningar, densitetsvärden, brottanvisningar m.m. kan emellertid ej göras på basis av hittills utförda provningar. För detta ändamål erfordras ytterligare provningar av rör med olika hållfasthetsegenskaper (olika stora inbyggda spänningar, olika densitetsfördelningar i rörväggen m.m.). Behovet av ytterligare forskningsinsatser i detta avseende har närmare beskrivits i avsnitt 12.



## 11 LÅNGTIDSHÅLLFASTHET FÖR PEH-RÖR

### 11.1 Allmänt

Eftersom hållfastheten för PEH-rör inte är konstant i tiden måste långtidshållfastheten för rören alltid bestämmas med hjälp av ett extrapoleringsförfarande. Flera extrapoleringsmetoder kan användas. Samtliga metoder förutsätter emellertid att kännedom föreligger om brottkurvor för PEH-rör vid högre temperaturer. Som framgått av tidigare avsnitt har de utförda undersökningarna omfattat tryckprovningar av rör av tre olika PEH-råvaror, fig.95-97. För rören från två av råvarorna har provningar endast utförts vid  $+ 20^{\circ}\text{C}$  och  $+ 80^{\circ}\text{C}$ . I dessa fall kan en närmare uppskattning av rörens långtidshållfasthet svårligen utföras. De i ovannämnda fall erhållna brottkurvorna får därför i första hand jämföras med standardkurvorna för PEH-rör, fig.1. För rören av den tredje råvaran, fig.97, har provningar utförts vid tre olika temperaturer. I detta fall finns ett något bättre underlag för bestämning av långtidshållfastheten, även om underlaget knappast är tillräckligt för en noggrann extrapolering av brottkurvan vid  $+ 20^{\circ}\text{C}$ . För en dylik extrapolering erfordras kännedom om brottkurvorna vid åtminstone tre högre temperaturer (exempelvis  $+ 40^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$  och  $80^{\circ}\text{C}$ ). I syfte att erhålla en grov uppskattning av långtidshållfastheten för ovannämnda rör har emellertid en extrapolering av brottkurvan vid  $+ 20^{\circ}\text{C}$  utförts med hjälp av några olika metoder, fig.121-122.

### 11.2 Extrapolering med hjälp av Larson-Miller-korrelationen

Med hjälp av de uppmätta brottkurvorna vid  $+ 60^{\circ}\text{C}$  och  $+ 80^{\circ}\text{C}$  kan brottkurvans läge vid  $+ 20^{\circ}\text{C}$  beräknas med hjälp av Larson-Miller-korrelationen. Utnyttjas de i fig.121 angivna brottkurvorna vid  $+ 60^{\circ}\text{C}$  och  $+ 80^{\circ}\text{C}$  för bestämning av konstanten i Larson-Miller-korrelationen erhålls värdet 18 för ovannämnda konstant. Med hjälp av detta värde på konstanten erhålls de extrapolerade brottkurvorna vid  $+ 20^{\circ}\text{C}$  och  $+ 40^{\circ}\text{C}$  som angivits i fig.121, innebärande att 50-årshållfastheten för rören kan uppskattas till ca  $4.7 \text{ N/mm}^2$ .

### 11.3 Extrapolering med hjälp av tøjningskurvornas utseende

En uppskattning av PEH-rörs långtidshållfasthet kan även erhållas genom ett studium av materialets tøjningsbeteende vid olika temperaturer, fig.122-123. Om man studerar diameterökningen i rören vid sådana spänningsnivåer där omslaget sker mellan segt och sprött brottbeteende finner man ett visst karaktäristiskt utseende hos tøjningskurvorna. För spän-



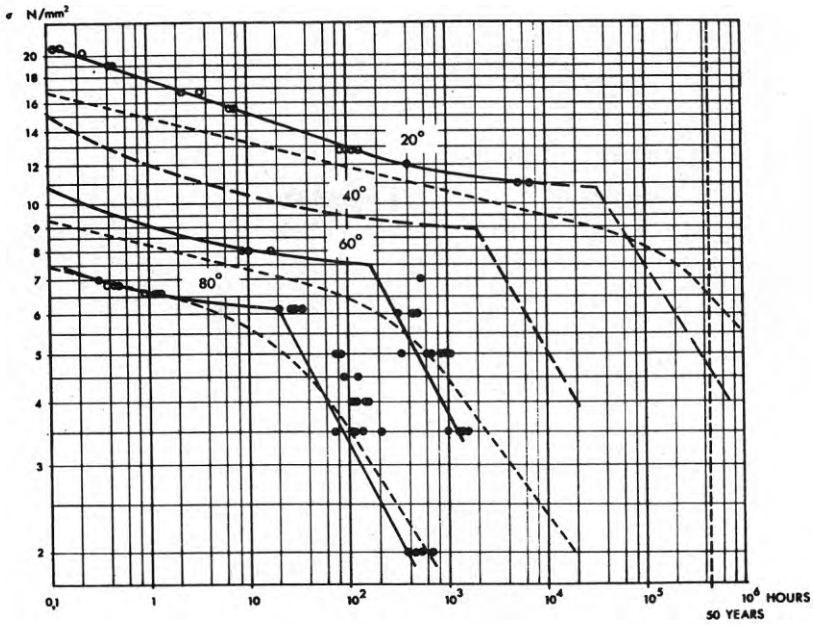


FIG 121 FAILURE CURVES FOR HDPE PIPES SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE

—————	MEASURED CURVE	MELT INDEX $MI_5 = 0.60 \text{ g/10 min}$
- - - - -	EXTRAPOLATED CURVE. EXTRAPOLATION MADE WITH THE LARSON- MILLER CORRELATION	STATE OF STRESS: ONE-AXIAL
		ENVIRONMENT: WATER

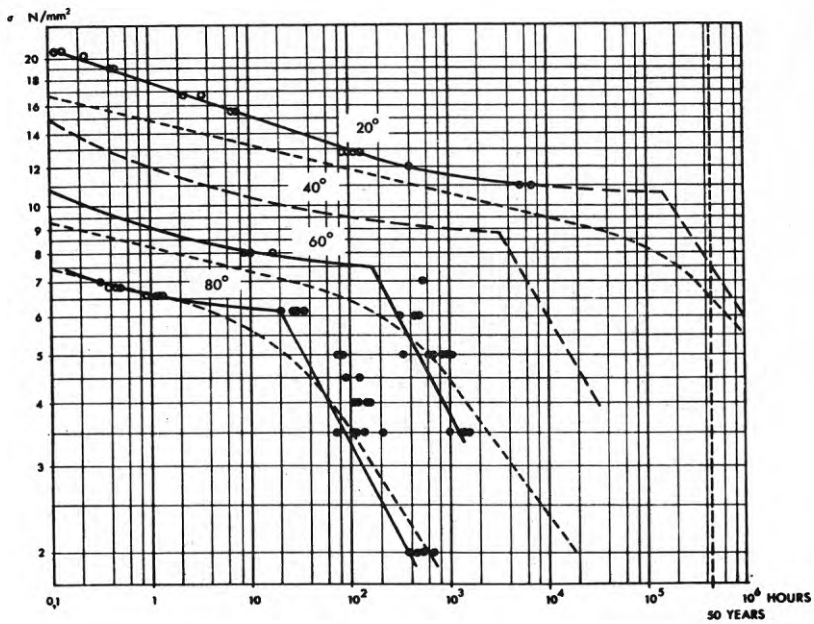


FIG 122 FAILURE CURVES FOR HDPE PIPES SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE

—————	MEASURED CURVE	MELT INDEX $MI_5 = 0.60 \text{ g/10 min}$
- - - - -	EXTRAPOLATED CURVE. EXTRAPOLATION MADE UPON THE APPEARANCE OF THE STRAIN CURVES AT ELEVATED TEMPERA- TURES	STATE OF STRESS: ONE-AXIAL
		ENVIRONMENT: WATER

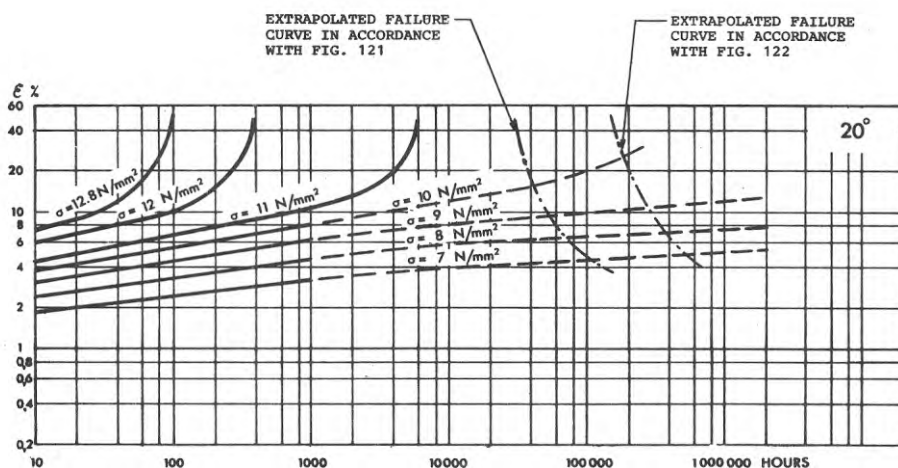
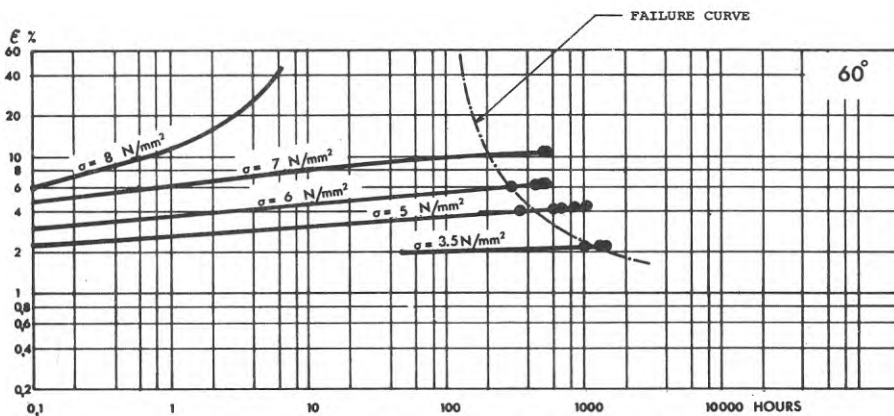
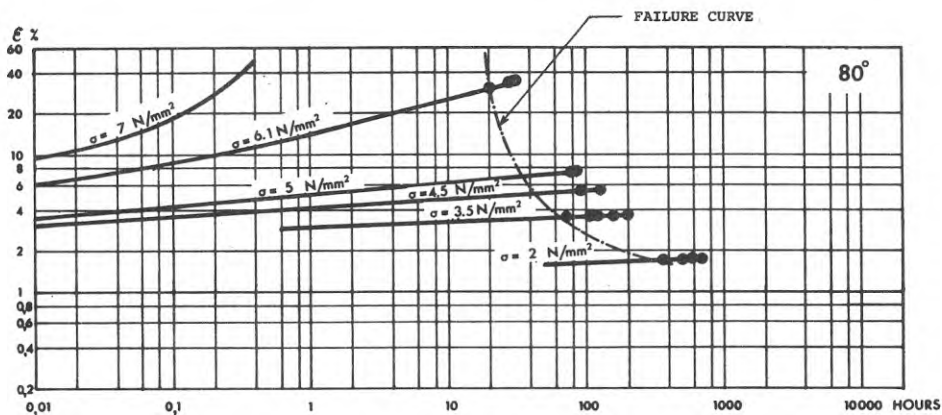


FIG 123 PERIPHERAL ELONGATION IN HDPE PIPES SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE

- MEASURED ELONGATION
  - - - - - ESTIMATED ELONGATION
  - STRESS CRACKING FAILURE
- MELT INDEX  $MI_5 = 0.60 \text{ g/10 min}$
- ENVIRONMENT: WATER

ningsnivåer av storleksordningen ca  $1 \text{ N/mm}^2$  ( $10 \text{ kp/cm}^2$ ) över "knäet" på brottkurvorna erhålls krökta töjningskurvor. När själva omslaget mellan segt och sprött brottbeteende inträffar är töjningskurvorna mer eller mindre rätlinjiga. Vid lägre spänningsnivåer erhålls rätlinjiga eller svagt konvext krökta töjningskurvor och töjningen överstiger normalt inte 10 %. Antar man att töjningskurvorna uppvisar samma karaktäristiska utseende vid  $+ 20^\circ\text{C}$  som vid  $+ 60^\circ$  och  $+ 80^\circ\text{C}$  torde omslaget mellan segt och sprött brottbeteende inträffa tidigast efter ca  $2 \cdot 10^5$  timmar, se fig. 123. Härvid erhålls en högre långtidshållfasthet ( $\sigma_{50 \text{ år}} \approx 7.5 \text{ N/mm}^2$ ) än om extrapoleringen utförs med Larson-Miller-korrelationen, jfr fig. 121-123.

Ovannämnda förfaringssätt att uppskatta långtidshållfastheten hos PEH-rör bör emellertid inte betraktas som en extrapoleringsmetod i egentlig mening utan förfaringssättet bör snarare ses som ett sätt att kontrollera om utförd extrapolering (exempelvis med Larson-Miller-korrelationen) verkar rimlig. Resultaten i detta fall visar att en extrapolering med hjälp av Larson-Miller-korrelationen kan ge brottider vilka är kortare än vad som kan förväntas med hänsyn till materialets brottbeteende vid högre temperaturer. Den relativt betydande skillnad i långtidshållfasthet som erhålls vid de båda ovannämnda extrapoleringsförfarandena, fig. 121-122, understryker vikten av en riktig extrapolering. Larson-Miller-korrelationen vilken ursprungligen uppställdes för att gälla metaller /4/ har visserligen påvisats att gälla även för polyetenrör vid högre temperaturer /2, 5/, men det är ändock ovisst hur god överensstämmelsen med verkligheten är vid  $+ 20^\circ\text{C}$ . Mot bakgrund av ovanstående resultat, är det inte osannolikt att långtidshållfastheten hos PEH-rör kan vara högre än vad som erhålls med en extrapolering med Larson-Miller-korrelationen. Ett stort forskningsbehov avseende utveckling av noggranna extrapoleringsmetoder för PEH-rör torde därför föreligga.

## 12 YTTERLIGARE FORSKNINGSBEHOV

12.1 Allmänt

Som framgått av tidigare avsnitt föreligger ett behov av ytterligare undersökningar för att en för-  
enklad provningsmetod för PEH-rör skall kunna ut-  
arbetas. Rent generellt kan forskningsbehovet för  
PEH-rör uppdelas på tre olika områden:

- A. Forskning avseende generell materialhållfasthet hos polymerer.
- B. Forskning avseende långtidshållfasthet hos plaströr som produkt.
- C. Forskning avseende långtidshållfasthet hos plaströr för olika typer av belastningsfall under nyttjandeskedet.

Med ovannämnda indelning av forskningsbehovet för PEH-rör som grund, kan följande sammanställning av önskvärda forskningsuppgifter anges:

Forskning avseende generell materialhållfasthet hos polymerer

- A1. Generell bestämning av brottmekanismer i polyeten.
- A2. Bestämning av olika typer av brottanvisningars inverkan på brottiderna för polyetenstavar.

Forskning avseende långtidshållfasthet hos plaströr som produkt

- B1. Bestämning av inbyggd spännings inverkan på brottider för PEH-rör.
- B2. Bestämning av den inbyggda spänningens relaxation vid olika temperaturer.
- B3. Utveckling av förbättrade metoder för bestämning av spänningsfördelning i rörväggen av inbyggd spänning.
- B4. Densitetsfördelningens och kantdensitetens inverkan på brottider för PEH-rör.
- B5. Bestämning av sambandet mellan formen på densitetsfördelningen i rörväggen och rörets kylningsförlopp.
- B6. Bestämning av notcheffektens betydelse för brottider i rör och provstavar.

- B7. Bestämning av spänningstillståndets inverkan på brotttider i rör och provstavar.
- B8. Utveckling av noggranna extrapoleringsmetoder för fastställande av långtidshållfasthet för PEH-rör.

FORSKNING AVSEENDE LÅNGTIDSHÅLLFASTHET HOS PLASTRÖR FÖR OLIKA TYPER AV BELASTNINGSFALL UNDER NYTTJANDESKEDET

- C1. Inverkan på brotttider i PEH-rör av dynamisk belastning.
- C2. Punktbelastningars inverkan på PEH-rörs långtidshållfasthet.

I det följande lämnas närmare motiveringar till ovan föreslagna undersökningar.

12.2 A. Materialhållfasthet hos polymerer

Den i avsnitt 12.1 angivna forskningsuppgiften avseende bestämning av brottmekanismer i polyeten är synnerligen omfattande men samtidigt av stort allmänt intresse.

Forskningsuppgiften avseende olika brottanvisningars inverkan på brotttider för PEH-stavar är av betydelse för utvecklandet av förenklade metoder för kvalitetskontroll av PEH-rör. Som framgått av tidigare avsnitt ger den hittills tillämpade stavprovningssmetoden brotttider vilka väsentligt överstiger de som erhålls vid rörprovning. Detta är till nackdel eftersom det innebär att en bedömning av rörkvalitet med hjälp av stavprovning blir tidskrävande. Önskvärt är därför att finna en metod som ger kortare brotttider för stavarna. De försök som utförts med stavar i vätmedelhaltigt vatten har visat att brotttiderna förkortas, men att vätmedlets accelererande inverkan på brottiderna är beroende av spänningsnivån, varför metoden är mindre lämplig. En möjlig metod att erhålla kortare brotttider för stavarna är att förse desamma med en brottanvisning (notch). En undersökning av i vilken utsträckning olika typer av brottanvisningar förkortar brottiderna vid stavprovning är därför önskvärd.

12.3 B. Långtidshållfasthet hos plaströr som produkt

Avsikten med de i avsnitt 12.1 angivna forskningsuppgifterna avseende långtidshållfasthet hos plaströr är att lära känna i vilken utsträckning olika parametrar påverkar rörens hållfasthet. Med

undersökningarna som grund är det sannolikt möjligt att bedöma i vilken utsträckning inbyggda spänningar, fleraxliga spänningstillstånd och densitetsvärden påverkar rörens hållfasthet. Tillsammans med stavprovningens resultat skulle följaktligen rörens hållfasthet kunna bedömas utan att tryckprovning behöver tillgripas. Dessutom bör en ökad kännedom om olika parametrars inverkan på PEH-rörs hållfasthet medföra att extrapoleringen av brottkurvorna kan utföras säkrare, varigenom 50 års-hållfastheten för rören bättre kan fastslås. Det är även möjligt att man som ett resultat av forskningsinsatserna finner att tillåten spänning kan höjas i PEH-rör om dessa uppfyller vissa krav på materialhållfasthet, inbyggd spänning m.m.

#### 12.4 C. Långtidshållfasthet hos plaströr för olika typer av belastningsfall under nyttjandeskedet

De undersökningar av plaströrs långtidshållfasthet som finns redovisade i litteraturen behandlar i huvudsak rör vilka varit belastade med ett invändigt statistiskt tryck. Undersökningar av rörens långtidshållfasthet vid andra typer av belastningar finns endast redovisade i ringa omfattning. Närmare undersökningar av några vanliga belastningsfall, som t.ex. tryckslag i rören resp. punktbelastningar orsakade av stenanliggning, vilka ofta uppkommer under rörens driftskede syns därför väl motiverade.

## REFERENSER

1. Gaube, E. 1959. Zeitstandfestigkeit und Spannungsrissbildung von Niederdruckpolyäthylen. - Kunststoffe 49 (1959), p. 446-454
2. Gloor, W.E. 1958. Service test data on high-density polyethylene. - Modern Plastics 36 (1958), p. 144
3. Karasev, A.N. m.fl. 1970. Relationship between the mechanical behaviour and molecular weight distribution of high density polyethylene, översatt till engelska från Vysokomol. soved A12 No. 5 (1970), p. 1127-1137
4. Larson, F.R. och Miller, J. 1952. A Time-Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses. - Trans.Am.Soc.Mech.Eng. July (1952), p. 765-775
5. Richard, K. och Ewald, R. 1959. Extrapolationsverfahren, Sicherheitsbeiwerte und zulässige Rohrwandbeanspruchung von Polyäthylen und PVC-Rohren. - Kunststoffe 49 (1959), p. 116-120





**R36:1975**

**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 730198-8 från  
Statens råd för byggnadsforskning till Vattenbyggnadsbyrån  
(VBB), Stockholm.**

**Distribution: Svensk Byggtjänst, Box 1403, 111 84 Stockholm  
Grupp: byggprojektering**

**Pris: 23 kronor + moms**