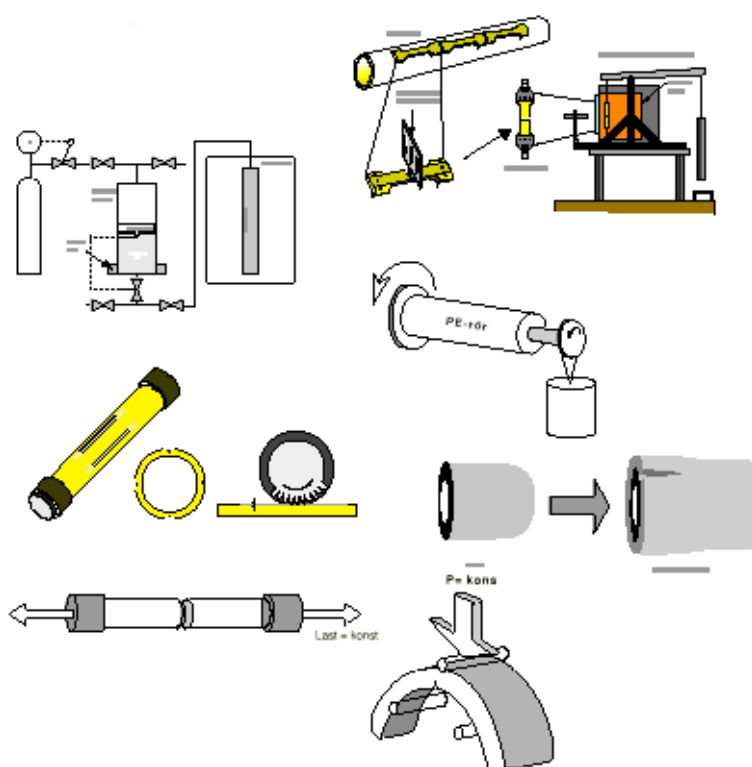

Rapport SGC 098

**METODER FÖR SNABB
KVALITETSKONTROLL AV
PE-RÖR FÖR GASDISTRIBUTION**

©Swedish Gas Center - April 1999

Tomas Tränkner
Studsvik Polymer



SGC:s FÖRORD

FUD-projekt inom Svenskt Gastekniskt Center AB avrapporteras normalt i rapporter som är fritt tillgängliga för envar intresserad.

SGC svarar för utgivningen av rapporterna medan uppdragstagarna för respektive projekt eller rapportförfattarna svarar för rapporternas innehåll. Den som utnyttjar eventuella beskrivningar, resultat e dyl i rapporterna gör detta helt på eget ansvar. Delar av rapport får återges med angivande av källan.

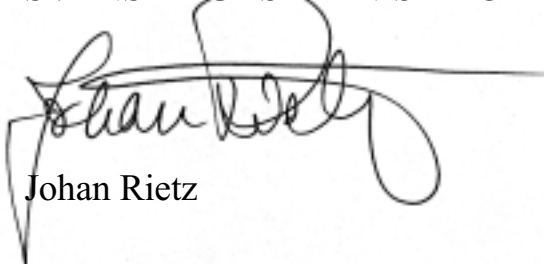
En förteckning över hittills utgivna SGC-rapporter finns på SGC's hemsida www.sgc.se.

Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC) är ett samarbetsorgan för företag verksamma inom energigasområdet. Dess främsta uppgift är att samordna och effektivisera intressenternas insatser inom områdena forskning, utveckling och demonstration (FUD). SGC har följande delägare: Svenska Gasföreningen, Sydgas AB, Sydkraft AB, Göteborg Energi AB, Lunds Energi AB och Öresundskraft AB.

Följande parter har gjort det möjligt att genomföra detta utvecklingsprojekt:

Sydgas AB
Göteborg Energi AB
Helsingborg Energi AB
Lunds Energi AB
NUTEK

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB



Johan Rietz

Sammanfattning av projektet

Ett flertal olika metoder finns för snabb kvalitetskontroll av PE-rör för gasdistribution. Vilken provningsmetod som förekommer beror på traditionen i olika länder. Tabellen nedan anger schematiskt sammankoppling till länder och provningsmetoder. Observera att provningsmetoderna endast avser kontroll av långsam spricktillväxt (Stadie II-test).

Provningsmetod	Land
Hydrostatisk tryckprovning av PE-rör i vatten vid 80°C i 170 h	Internationellt
Notch Pipe Test (NPT)	England
Cone test	Frankrike
Bell-test, böjprovning i ytspänningsnedsättande medel	USA
PENT	USA
Full Notch Tensile Creep Test	Frankrike/Japan
Rotary Fatigue Testing	USA
Utmattningsprovning	USA/Japan
Dynamisk tryckcyklingsutmattningsprovning av PE-rör	England
Full Notch Tensile Creep Test i ytspänningsnedsättande medel	Tyskland
Tryckprovning av PE-rör vid 95°C i lutensol	Sverige (Studsvik)
Trepunktsböjning	USA

Snabb kvalitetskontroll av PE-rör (Stadie II) bör göras med hänsyn till rördimension (för SDR 11 rör). **Dy < 63 mm:** Studsvik rekommenderar tryckprovning i lutensol vid 95°C som den mest ekonomiska och snabba metoden.

Dy = 63-160 mm: Tryckprovning av anvisade rör (Notch Pipe Test) är det bästa alternativet. Men även enaxlig provning av anvisade provstavar är ett intressant alternativ. Klassificering av PE 100 material kräver tryckprovningsresultat av anvisade rör. **Dy > 160 mm:** PENT är billigare än tryckprovning av stora rör.

Övriga kommentarer: För kontroll av Stadie I används idag vanlig tryckprovning vid 80 och 20°C. Stadie III (kemiska nedbrytning) kontrolleras i allmänhet ej genom tryckprovning hos PE-rör för gasdistribution. För varmvattenapplikationer utförs Stadie III-provning vid 110°C med luft som yttre medium och vatten som inre medium. Följande slutsatser erhöles från den experimentella delen av projektet:

- * MDPE och HDPE tycks påverkas olika av Igepal. MDPE16 uppvisade upp till 50 gånger kortare brottid i Igepal medans HDPE2 (som har högre densitet) uppvisade endast 5 gånger kortare brottid. Detta gör det svårt att använda provning i Igepal som en rankingtest.
- * "Aktiviteten" av Igepallösningen avtar med tiden.
- * Provning av MDPE-16 vid 100°C i luft visade att brottiden förkortades med endast 30 % jämfört med provning vid 80°C. Anledningen till detta kan vara att MDPE mjuknar väsentligt vid 100°C beroende på partiell smältning av materialet.
- * Den partiella smältningen medför att materialet blir mer segt och brottsegheten ökar därmed.
- * Att förkorta brottiden genom att höja temperaturen över 80°C ger inte tillräckligt korta brottider för att anses vara ett intressant alternativ.
- * PENT ger generellt sett kortast brottid.
- * Tryckprovning (T.P.) ger cirka 10-20 gånger längre brottid än PENT och cirka 5-10 gånger längre brottid än NPT.
- * Sambandet mellan PENT, NPT och T.P. tycks gälla även vid 60°C och eventuellt också vid 20°C.
- * Brottiden i vatten/vatten för NPT är den samma som för vatten/luft vid 80°C för HDPE2.
- * Multipellinjär regression fungerar bra för extrapolering av brottidsdata.
- * Tiden till sprickinitiering för trepunktsböjning måste kunna mätas. Det är mycket svårt att uppskatta den tiden vid lägre belastningar då deformationen är liten och skillnaden mellan deformation p.g.a. vanlig krypning och deformation p.g.a. spricktillväxt är oerhört liten (i vissa fall mindre än 0.002 mm).
- * De formler för livslängdens beroende av temperatur och belastning vid trepunktsböjning antas vara samma för alla PE-material. Ingen hänsyn tas till om det förekommer skillnader (vilket erfarenheter från provning enligt ISO/TR 9080 vid Studsvik Polymer har visat).

Att höja temperaturen över 80°C eller att använda ytspänningsnedsättande medel innebär svårigheter antingen med att provmaterialet ändrar egenskaper eller att provningsmediumet ändras (skiktas, bryts ned, faller ut etc). Provning av hela rör i vatten eller luft är att föredra ur vetenskaplig synvinkel då steget från verkliga förhållanden ej är så stor. Men PENT ger alltid kortast brottid, speciellt vid låga belastningar. För små rördimensioner (där godstjockleken underskrider 5 mm) kan provning i ytspänningsnedsättande medel vara det bästa alternativet som accelererad provningsmetod för Stadie II. Den pågående provningen av PE-rör bör fortsätta för att en bättre jämförelse skall kunna göras mellan de olika provningsmetoderna. De experimentella resultaten för HDPE2 har visat att sambandet mellan T.P., NPT och PENT tycks gälla även vid lägre temperaturer vilket är en mycket viktig slutsats när det gäller extrapoleringsmöjligheter. Vi har ej funnit några andra data som redovisar denna typ av samband i litteraturen. Livslängdsbedömningar baserade på notch tester kan göras med större säkerhet i framtiden på grund av den ökande kunskapen mellan provning och verklighet.

Innehållsförteckning		Sida
1	Inledning	1
2	Litteraturstudie	1
2.1	Inledning och målsättning	1
2.2	Livslängd hos PE-rör	1
2.3	Standardiserade provningsmetoder	4
2.3.1	Hydrostatisk tryckprovning, SS 3470, ISO 1167	5
2.3.2	Notch Pipe Test (NPT), ISO 13479	6
2.3.3	CONE-testet, ISO DIS 13480	7
2.3.4	Bell-test, böjprovning i ytspänningsnedsättande medel	7
2.3.5	PENT	8
2.3.6	Full Notch Tensile Creep Test (FNCT)	9
2.3.7	Rotary Fatigue Testing	9
2.3.8	Utmattningsprovning	10
2.3.9	Dynamisk tryckcyklingsutmattning av PE-rör,	10
2.3.10	Full Notch Tensile Creep Test i ytspänningsnedsättande medel	10
2.3.11	Tryckprovning av PE-rör vid 95°C i lutensol	10
2.3.12	Trepunkts-böjprovning	10
2.4	Slutsatser och rekommendationer från litteraturstudien	11
3	Experimentella resultat	13
3.1	Provning av anvisade provstavar i ytspänningsnedsättande medel	13
3.2	Provning av anvisade provstavar vid temperaturer högre än 80°C	14
3.3	Provning av anvisade rör vid olika temperaturer	14
3.3.1	Resultat för HDPE2	15
3.3.2	Resultat för MDPE16	17
3.4	Trepunktsböjning enligt SwRI's metod	17
3.5	Mätning av långsam spricktillväxt	18
4	Diskussion och slutsatser	19
	Referenser	18
	Bilagor	
A	Hydrostatisk tryckprovning, Tabell A.1-A.8	
B	Krypbrottsdiagram, Diagram B.1-B.7	

1998-12-29

1 Inledning

Polyetenrör har under de senaste 20 åren genomgått en kraftig materialutveckling som har lett till förbättrad livslängd hos rören. Med tryckprovning tar materialutvärderingen ett år eller mer för moderna PE-rör. För att snabbt kunna bedöma livslängden kvalitativt, utan att behöva genomföra omfattande och tidskrävande provningar, är det angeläget att studera förekommande alternativ till "vanlig" tryckprovning av rör. En kvalitetskontrollmetod skall vara betydligt snabbare att genomföra för att vara intressant.

Målsättningen med projektet är att studera olika metoder för snabb kvalitetskontroll av livslängd hos PE-rör för gasdistribution. Projektet ingår i Studsviks basforskningsprogram för utvärdering av polymerers livslängd.

Provning utförs på två materialkvaliteter, dels Finathene 3802Y CF (MDPE) och dels Hostalen GM 5010 T2 (HDPE). Båda materialen har tidigare ingått i EVOPE [1] varför mycket data finns framtaget för dessa material. Dessa data kan användas för jämförelse med de som genereras inom projektet Snabba kvalitetskontrollmetoder.

Målsättningen med projektet är följande:

- * Data från kraftigt accelererade långtidsprovningar skall kunna användas för livslängdsextrapolering.
- * Nya material skall kunna livslängdsbedömas inom rimliga provningstider.
- * Säkrare livslängdsbedömningar skall kunna göras från accelererade provningar. Detta kommer att vara möjligt på grund av ökad kunskap om samband mellan provning och verklighet.
- * Införa internationell kunskap till Sverige dels genom det förlängda samarbetet inom EVOPE och dels genom andra kontakter som etablerats internationellt inom EVOPE projektet (Gaz de France, Italgas, Southwest Research Institute, Univ of Illinois, Norman Brown, m.fl.).

1998-12-29

2 Litteraturstudie

2.1 Inledning och målsättning

Med snabb kvalitetskontroll avses i detta fall metoder för kontroll av de egenskaper som styr livslängden. En betydelsefull egenskap för gasrör är motståndsförmågan mot långsam spricktillväxt (SCG-resistensen). Långsam spricktillväxt styr livslängden i miljöer där kemisk nedbrytning ej förekommer. Denna litteraturstudien behandlar således ej metoder för kontroll av kemisk struktur eller kontroll av korttidsegenskaper av typen draghållfasthet, E-modul eller slagseghet. Provningar av den typen är snabba, några minuter eller sekunder. Metoder för kontroll av livslängd tar däremot 10 - 10 000 h att genomföra.

Litteraturstudien syftar till att besvara följande frågor:

- * Vilka standardiserade snabba kvalitetskontrollmetoder förekommer idag?
- * Vilka övriga snabba kvalitetskontrollmetoder förekommer idag?
- * Vilka data finns tillgängliga idag avseende provning i ytspänningsnedsättande medel, provning av anvisade provstavar, provning av anvisade rör och tre-punktsböjprovning?

Information har sökts i Studsviks referensbibliotek över polymerartiklar och i symposieproceedings från Plastic Pipes Conference, International Plastic Fuel Gas Pipe Conference och International Gas Research Conference.

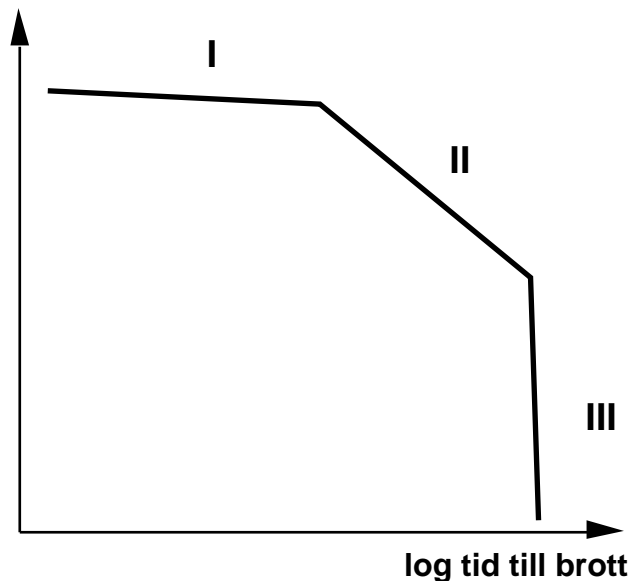
Denna rapport utgör en kort sammanfattning av ny dokumentation och tidigare gjorda litteraturstudier som är utförda vid Studsvik inom närliggande områden [2-6].

2.2 Livslängd hos PE-rör

Plaströr havererar antingen till följd av övertryck som orsakar segbrott eller p.g.a. spricktillväxt i rörväggen som orsakar läckage. Spricktillväxten kan starta dels på grund av mekaniska defekter i rörväggen eller att röret blir kemiskt nedbrutet. Den mekaniska nedbrytningen beror av den pålagda lasten. Den kemiska nedbrytningen beror förutom på temperaturen också på den närvarande miljön. I den kemiska nedbrytningsprocessen ingår både irreversibla processer (oxidation, hydrolys) och reversibla processer (mjukgörning, svällning m.m.). I princip kan en krypbrottskurva för ett plaströr delas in i tre delar. Dessa visas schematiskt i figur 1.

1998-12-29

log inre övertryck

**Figur 1**

Schematisk krypbrottskurva för plaströr.

Stadie I Mekanisk brottsprocess -> sega brott

Stadie II Mekanisk-kemisk brottsprocess -> omslagsbrott eller sprödbrott

Stadie III Kemisk brottsprocess -> sprödbrott

Under Stadie I utsätts röret i huvudsak för mekanisk påverkan. Denna del av krypbrottskurvan leder i de flesta fall till segbrott. Beroende på olika defekter i rörmaterialet är det inte osannolikt att även sprödbrott inträffar inom Stadie I. Vid Stadie II är krypbrottskurvens lutning större. Knäpunkten som skiljer Stadie II från Stadie I benämnes ibland "mekanisk knäpunkt". Inom Stadie II uppträder enbart omslagsbrott (övergång mellan segt och sprött brott) eller sprödbrott. Inom Stadie II inträffar normalt ingen nedbrytning av plasten. Stadie III kännetecknas av att krypbrottskurvan är mer eller mindre spänningsoberoende. Den andra knäpunkten mellan Stadie II och Stadie III benämns oftast "kemisk knäpunkt". Vid förhöjd temperatur inträffar Stadie II och III efter kortare tider.

För gasrör av plast är det främst Stadie I och II som är av intresse. Ett polyetenrör består av bulkpolymer, stabilisatormedel och pigment. Det är i huvudsak själva bulkpolymeren som avgör när Stadie I och II inträffar.

Generellt gäller att med minskande densitet erhålls en lägre styvhet och därmed ett mer flexibelt material. Det är viktigt att påpeka att detta gäller korttidshållfastheten. Vad gäller långtidsegenskaperna förbättras dessa generellt med minskad densitet. "Tredje generationens PE" påstås dock förena hög densitet med samma goda långtidsegenskaper som mediumdensitetspolyeten.

1998-12-29

2.3 Standardiserade provningsmetoder

Standardisering av provningsmetoder är mycket tidskrävande och därför finns endast ett fåtal provningsmetoder upptagna i standarder angående provning av långsam spricktillväxt. Det finns däremot ett flertal icke-standardiserade metoder. En sammanställning över de vanligaste metoderna visas i tabell 1.

Tabell 1

Olika typer av provningsmetoder för snabb kvalitetskontroll av långsam spricktillväxt hos PE-rör.

Metod	Referens
Hydrostatisk tryckprovning av PE-rör i vatten vid 80°C i 170 h	SS 3470, ISO 1167
Notch Pipe Test	ISO 13479, ASTM F 1474-93
Cone test	ISO DIS 13480
Bell-test, böjprovning i ytspänningsnedsättande medel	ASTM F 1248 - 89, Ref 7
PENT	ASTM F 1473 - 94, Ref 8, 9
Full Notch Tensile Creep Test	Ref 10
Rotary Fatigue Testing	Ref 11
Utmattningsprovning	Ref 12
Dynamisk tryckcyklingsutmattning av PE-rör	Ref 14
Full Notch Tensile Creep Test i ytspänningsnedsättande medel	Ref 16, 17
Tryckprovning av PE-rör vid 95°C i lutensol	Ref 18
Trepunktsböjning	Ref 19

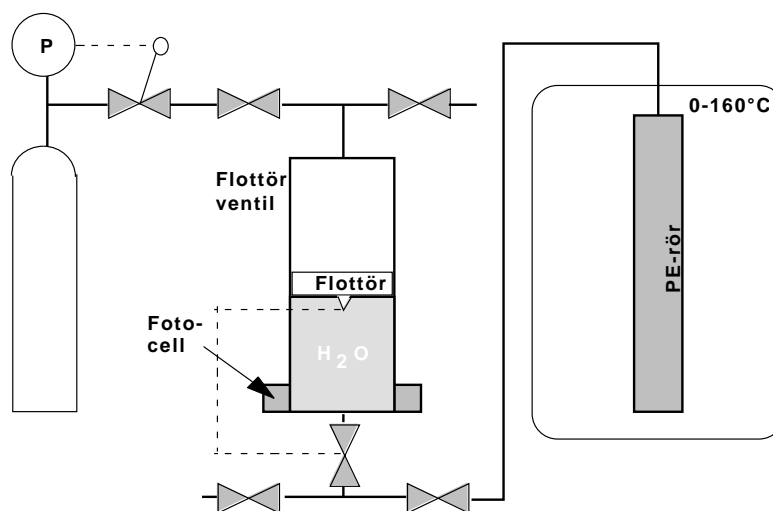
Som framgår av tabell 1 är fem provningsmetoder ISO eller ASTM standarder och då är två av dessa preliminära standarder. I respektive land förekommer nationella specifikationer för kvalitetskontroll. Den enda internationellt förekommande provningsmetoden i dagens läge är hydrostatisk tryckprovning i vatten vid 80°C i 170 h av icke anvisade PE-rör.

Nedan görs en kort presentation av respektive metoder. En mer detaljerad presentation återfinns i Ref 2-20.

1998-12-29

2.3.1 Hydrostatisk tryckprovning, SS 3470, ISO 1167

Tryckprovning vid förhöjd temperatur är den ursprungliga provningsmetoden för plaströr. Tryckprovning är den idag helt dominerande provningsmetoden för kontroll och utvärdering av plaströr av alla typer. Exempelvis genomförs omfattande tryckprovning vid tryckklassificering av PE-rör där mer än 100 PE-rör provas vid tre eller fyra temperaturer i upp till 10 000 h. Data behandlas sedan statistiskt i ett PC-program för beräkning av den statistiska övre tryckgränsen för brott efter 50 års drift.

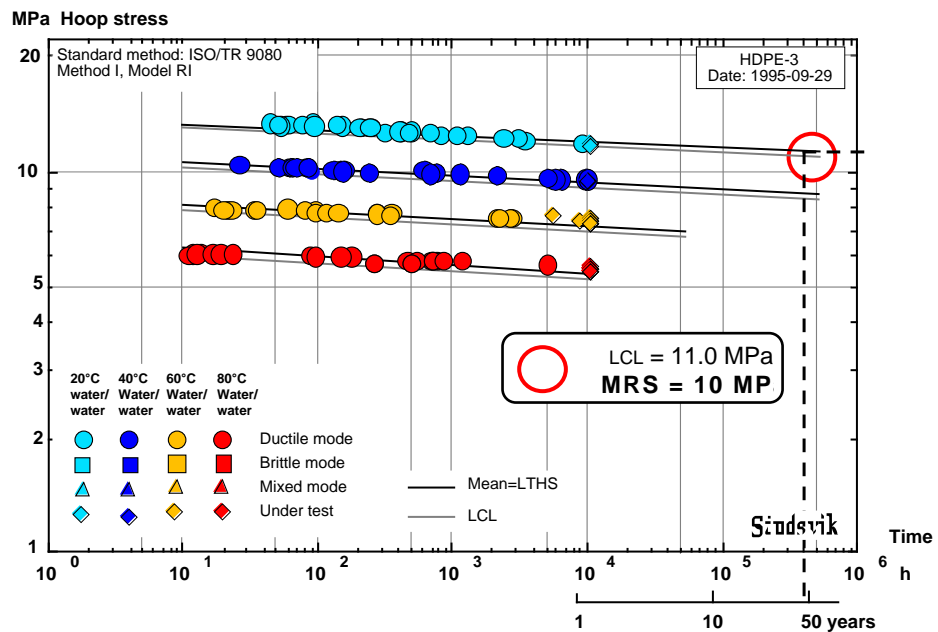


Figur 2 Hydrostatisk tryckprovning av PE-rör i vatten/vatten.

Fördelar med tryckprovning är att en hel komponent provas och att inverkan av böjar, svetsar, olika inre och yttre miljö mm kan beaktas. **Nackdelarna** är att metoden kräver långa provningstider för moderna materialkvaliteter och är dyr för provning av stora rördimensioner.

Figur 3 visar ett exempel på utvärdering av ett PE 100 material enligt ISO/TR 9080 (standard för utvärdering av långtidshållfasthet). Diagrammet visar resultat från tryckprovning av 32x3 mm PE-rör vid 20, 40, 60 och 80°C. Den förväntade hållfastheten vid 50 år och 20°C har sedan beräknats med hjälp av ett datorprogram. För en komplett ISO/TR 9080 utvärdering provas cirka 100 rör vid tre eller fyra temperaturer.

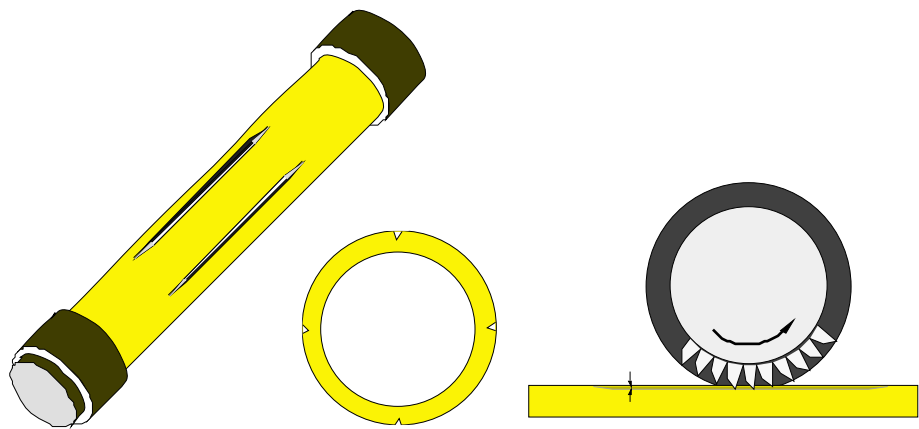
1998-12-29

**Figur 3**

Utvärderingsresultat från ISO/TR 9080 utvärdering av ett PE 100 material.
Resultat från Studsvik Polymer AB.

2.3.2 Notch Pipe Test (NPT), ISO 13479

Genom att fräsa spår i PE-rörets utsida kan tiden till brott förkortas avsevärt. British Gas har denna metod som standard för gasrör sedan många år. Notch Pipe Test är en ISO och ASTM standard och är medtagen i den kommande CEN standarden för PE-rör för gasdistribution EN 1555. Figur 4 visar en principskiss för provprepareringen. Fyra spår (notchar) fräses till ett djup av 20% av godstjockleken. Vid den påföljande tryckprovningen kommer brottet att inträffa i någon av notcharna. Ett PE 100 rör (110 x 10 mm) måste klara 165 h tryckprovning vid 9.2 bar vid 80°C i vatten/vatten. Vanligast är att tre rör provas för en rörkvalitet.

**Figur 4** Notch Pipe Test

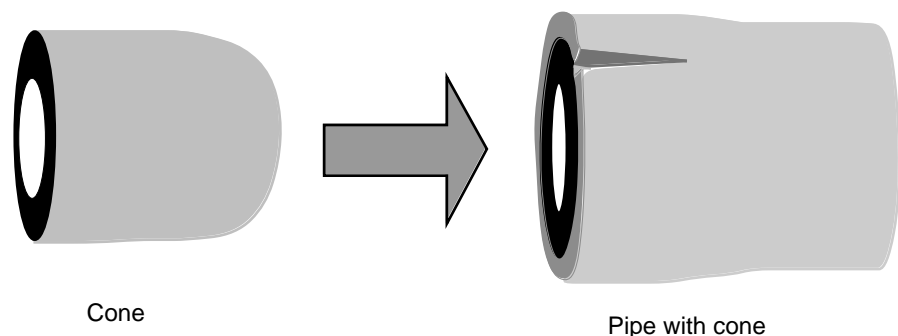
1998-12-29

Fördelar med NPT är de samma som för vanlig tryckprovning. Provnings tiden kan förkortas med 5-10 gånger jämfört med icke anvisade PE-rör. Detta finns redovisat utförligare under experimentella resultat nedan. Metoden är väldokumenterad och standardiserad inom ISO, CEN och ASTM. Notch pipe test är idag troligen den mest använda "notch" metoden för PE-rör, i vart fall i Europa.

Nackdelarna är att metoden är dyr för provning av stora rördimensioner ($D_y > 160$ mm) och att PE-rör med godstjocklek mindre än 5 mm ej kan provas p.g.a. att den plastiska zonen vid sprickspetsen blir för stor i förhållande till godstjockleken (plant spänningstillstånd).

2.3.3 CONE-testet, ISO DIS 13480

En plugg (kon) trycks in i PE-röret varvid tangentialspänningar uppstår i rörväggen. Metoden är utvecklad av Gaz de France. Rörväggen har anvisats i axiell led och röret med den intryckta konan exponeras för ytspänningsnedsättande medel vid 80°C. Efter viss tid kommer en spricka att initieras. Sprickinitieringen noteras visuellt genom att lyfta upp rörprovet vid olika tider.



Figur 5 CONE-test.

Fördelar med CONE-testet är att ingen tryckprovning- eller krypprovningstrustning behövs. Metoden ger ett snabbt svar.

Nackdelarna är att provningen är "deformationskontrollerad" och ej "lastkontrollerad", som är fallet vid tryckprovning. Deformationskontrollerad provning innebär att lasten (påkänningen) i provet avtar med tiden. Att prova i ytspänningsnedsättande medel ställer speciella krav på kontroll av provningsmedium då mediumet bryts ned och blir mindre "aktivt" med tiden. Det är således ej möjligt att direkt jämföra resultaten från en provningsserie med en annan från provning i ytaktivt medium. Typiska ytaktiva medier är 2 % Lutensol FA 12 (används av Studsvik), Igepal och Arcopal.

2.3.4 Bell-test, böjprovning i ytspänningsnedsättande medel

Bell testet utförs med ringar av små PE-rör som trycks ihop (sammankläms) och sedan hoptryckta exponeras för ytspänningsnedsättande medel. I allmänhet genomförs provningen av flera rörbitar samtidigt vid 50°C. Definitionen på brottid är när 50 % av

1998-12-29

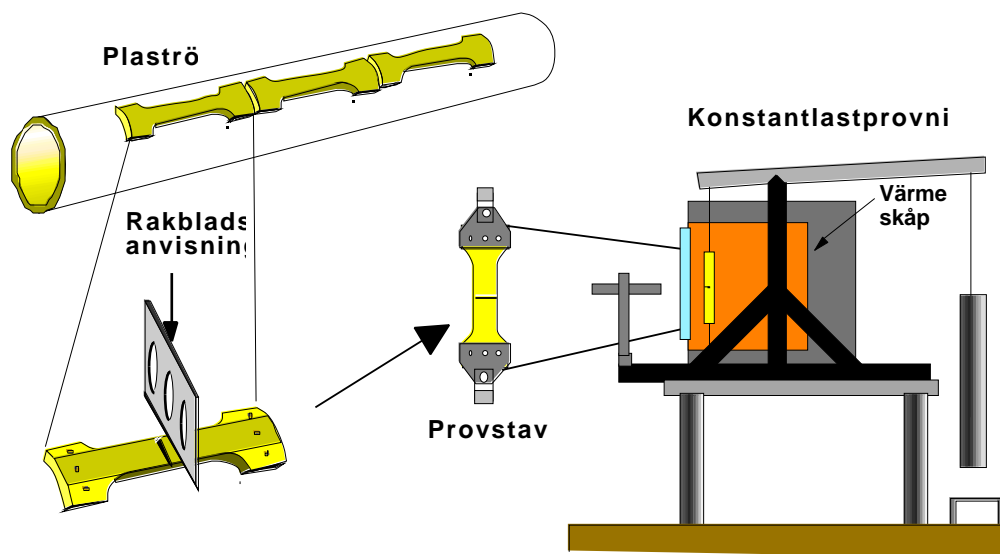
proverna har havererat. Bell testet utvecklades i USA och har inte fått stor spridning i Europa. Belltestet är en ASTM-standard (ASTM F 1248 - 89) "Determination of Environmental Stress Crack Resistance (ESCR) of Polyethylene Pipe".

Fördelar med Bell-testet är att ingen tryckprovnings- eller kryppprovningsutrustning behövs. Provbitarna är små.

Nackdelarna är deformationskontrollerad provning och att miljön är ytspänningsnedsättande medel. Det är stor avstånd mellan provningsförhållanden och verkligheten.

2.3.5 PENT Ref 9, 10

PENT står för Pennsylvania Notch Test och är utvecklad av Norman Brown i USA. Provingen utförs på provstavar som antingen är formsprutade eller frästa ur t.ex. ett PE-rör, se figur 5. Metoden är vanlig i USA. De flesta större slutanvändare i USA utför egen PENT-provning. Studsvik har inom EVOPE-projektet utfört omfattande provning av denna typ. PENT är idag en ASTM standard (ASTM F 1473 - 94) "Notch Tensile Test to Measure Resistance to Slow Crack Growth of Polyethylene Pipe".



Figur 6
PENT - Provning av långsam spricktillväxt. Metodutförande vid Studsvik Polymer AB.

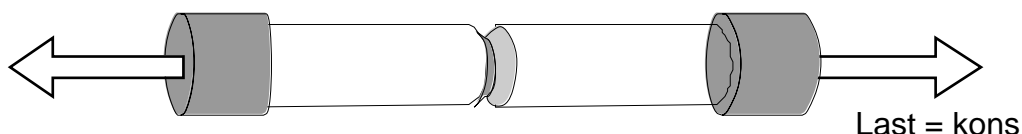
Fördelar är att metoden är väl utprovad och att den är billig för PE-rör i stora dimensioner. Spridningen i data är mycket liten. Det finns stor erfarenhet av metoden på Studsvik.

Nackdelarna är att inte själva röret provas. PE-rör med defektinnehåll kan inte särskiljas med PENT. Rör med mindre godstjocklek är 5 mm är svåra att prova. Metoden är inte vanlig i Europa.

1998-12-29

2.3.6 Full Notch Tensile Creep Test (FNCT) Ref 11

Denna provningsmetod är vanlig i Japan och efter EVOPE-projektet även hos GdF i Frankrike. Det är i princip samma metod som PENT men med en annan provgeometri. En provstav anvisas på alla sidor. Inga kanteffekter uppstår då. Tvärsnittet kan vara kvadratisk eller cirkulärt. Metoden är ej provad på Studsvik.



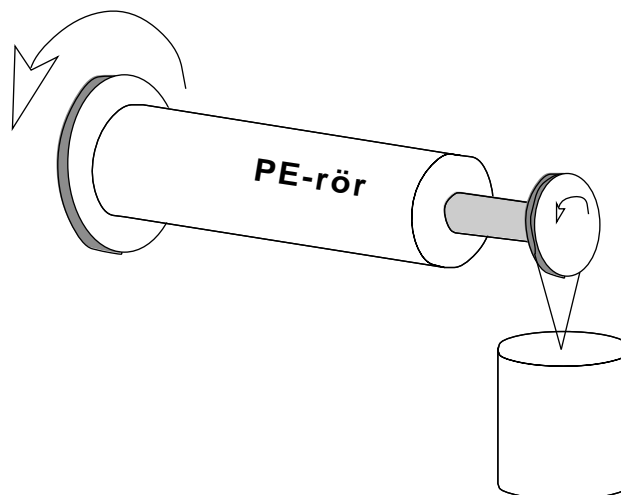
Figur 7
FNCT-testet. En massiv cirkulär provstav med en anvisning runt hela omkretsen utsätts för en konstant last.

Fördelar med FNCT är samma som för PENT.

Nackdelarna är att provningsgeometrin ger en spricktillväxt som ej liknar verkligheten. Det är praktiskt taget endast sprickinitieringen som liknar verkliga förhållanden. Efter sprickinitieringen kommer nettospänningen att öka kvadratisk med ökad spricktillväxt. För PENT sker denna ökning linjärt. För FNCT leder detta till mycket snabbt, och ofta duktilt, brott efter sprickinitiering jämfört med PENT.

2.3.7 Rotary Fatigue Testing Ref 12

Ett rör monteras med en vikt i ena änden och är fast inspänd i andra änden. Röret roteras kring sin egen axel. Provningsmetoden är utvecklad i USA och är speciellt avsedd för svetsade rör. Provningsmetoden kan även utföras under samtidigt inre övertryck. En principskiss över provningsmetoden framgår av Figur 8. Provningsmetoden kan även utföras under samtidigt inre övertryck.



Figur 8
Principen för roterande utmattningsprovning av PE-rör.

1998-12-29

Fördelar är att hela röret provas. Utmattning är ett känt sätt att förkorta brottiden. **Nackdelen** är att belastningen ej liknar verkliga förhållanden. Metoden har liten eller ingen spridning i Europa.

2.3.8 Utmattningsprovning Ref 13, 14

Med lastcyklning (utmattning) kan tiden till brott förkortas avsevärt jämfört med konstantlastprovning. Provstavar med alla typer av tvärsnitt förekommer.

Fördelen är att utmattning ger den kortaste provningstiden av alla metoder om provning sker i luft. **Nackdelen** är att provningsutrustningen kan vara mycket dyr.

2.3.9 Dynamisk tryckcyklingsutmattning av PE-rör Ref 15, 16

Tryckprovning av plaströr under varierande tryck ger avsevärd förkortning av brottiden. Metoden är utvecklad i England. Metoden är tekniskt komplicerat och har därför ej fått stor spridning.

Fördel: Kort provningstid. **Nackdel:** Dyr provningsutrustning.

2.3.10 Full Notch Tensile Creep Test i ytspänningsnedsättande medel Ref 17, 18

En metod som är vanlig i Tyskland. Ger stor acceleration av brottiden. **Fördelen** är kort brottid. **Nackdelen** är att provningen måste utföras i ytspänningsnedsättande medel.

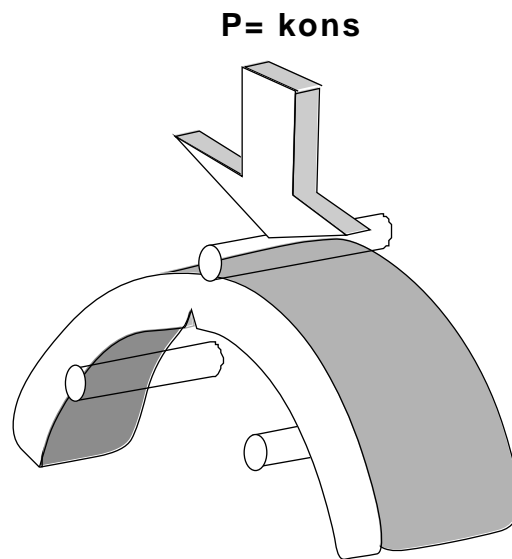
2.3.11 Tryckprovning av PE-rör vid 95°C i lutensol Ref 19

Vanlig metod vid Studsvik Polymer som kontrollprovning av långsam spricktillväxt (Stadie II test). Metoden är speciellt lämplig för rör i små dimensioner ($D_y < 63$ mm). Studsvik har lång erfarenhet av provning vid 95°C med lutensol. **Fördelarna** är att hela röret provas, brottiden kan accelereras mycket och eventuella defekter i röret kan detekteras genom sprickinitiering. **Nackdelen** är att mediumet bryts ned med tiden. Det medför att det är svårt att jämföra prover som är provade vid olika tillfällen.

2.3.12 Trepunkts-böjprovning Ref 20

Utvecklad av Battelle för livslängdsberäkning av PE-rör, se figur 9. Metoden är inte tänkt som en snabb kvalitetskontrollmetod men kan i princip fungera som en sådan. Studsvik har genomfört en serie provningar med denna metod, se avsnitt 4.2 nedan.

1998-12-29



Figur 9

Principskiss över trepunktsböjning. En 120° bit av ett PE-rör belastas i tre punkter. Nedböjningen mäts som funktion av tiden. Tiden till brott definieras som tiden till en viss grad av nedböjning.

Fördelarna med metoden är att det är själva PE-röret som provas och att sprickan ligger i samma riktning som i verkligheten. **Nackdelen** är att brott sällan inträffar i den mening att provet brister i två delar. Definitionen på brott blir därför i allmänhet beroende av hur mycket töjning provningsutrustningen klarar av. Provningsutrustningen är relativt dyr då avancerade elektroniska längdmätare måste monteras.

2.4 Slutsatser och rekommendationer från litteraturstudien

Ett flertal olika metoder finns för snabb kvalitetskontroll av PE-rör för gasdistribution. Vilken provningsmetod som förekommer beror på traditionen i olika länder. Tabell 2 anger schematiskt sammankoppling till länder och provningsmetoder. Observera att provningsmetoderna endast avser kontroll av långsam spricktillväxt (Stadie II-test).

1998-12-29

Tabell 2

Provningsmetoders nationella ursprung

Provningsmetod	Land
Hydrostatisk tryckprovning av PE-rör i vatten vid 80°C i 170 h	Internationellt
Notch Pipe Test	England
Cone test	Frankrike
Bell-test, böjprovning i ytspänningsnedsättande medel	USA
PENT	USA
Full Notch Tensile Creep Test	Frankrike/Japan
Rotary Fatigue Testing	USA
Utmattningsprovning	USA/Japan
Dynamisk tryckcyklingsutmattning av PE-rör	England
Full Notch Tensile Creep Test i ytspänningsnedsättande medel	Tyskland
Tryckprovning av PE-rör vid 95°C i lutensol	Sverige (Studsvik)
Trepunktsböjning	USA

Snabb kvalitetskontroll av PE-rör (Stadie II) bör göras med hänsyn till rördimension (för SDR 11 rör):

Dy < 63 mm

Studsvik rekommenderar tryckprovning i lutensol vid 95°C som den mest ekonomiska och snabba metoden.

Dy = 63-160 mm

Tryckprovning av anvisade rör (Notch Pipe Test) är det bästa alternativet. Men även enaxlig provning av anvisade provstavar är ett intressant alternativ. Klassificering av PE 100 material kräver tryckprovningens resultat av anvisade rör.

Dy > 160 mm

PENT är billigare än tryckprovning av stora rör.

Övriga kommentarer

För kontroll av Stadie I används idag vanlig tryckprovning vid 80 och 20°C. Stadie III (kemiska nedbrytning) kontrolleras i allmänhet ej genom tryckprovning hos PE-rör för gasdistribution. För varmvatten-applikationer utförs Stadie III-provning vid 110°C med luft som yttre medium och vatten som inre medium.

1998-12-29

3 Experimentella resultat

Den experimentella delen utgör en fortsättning och fördjupning av provningar som påbörjades inom EVOPE-projektet [se SGC rapport nr 073]. Inriktningen av projektet framgår av brev till Olle Johansson på Sydgas, 1997-02-14. Den övergripande ambitionen med projektet är att fokusera på tre provningsmetoder som är allmänt accepterade i branschen och är standardiserade.

Dessa är:

- tryckprovning av PE-rör vid 80°C
- provning av anvisade PE-rör vid 80°C
- provning av anvisade provstavar vid 80°C i luft (PENT).

Då unika långtidsdata finns från det tidigare EVOPE projektet som genomfördes vid Studsvik är detta projektet inriktat mot att komplettera och fortsätta denna provning och även undersöka överförbarheten till verkliga betingelser. Projektet fokuseras mot två materialkvaliteter, Hostalen GM 5010 T2 (HDPE2) och Finathene 3802 Y CF (MDPE16). Dessa två material har använts i det tidigare EVOPE-projektet. Erfarenheter från övriga provningsmetoder som genomförts i mindre omfattning inom projektet redovisas översiktligt nedan.

En viktig fråga är vilken inverkan provningsmedium har på provningsresultaten: För gasrör (och även vattenrör) utförs standardiserad tryckprovning med vatten som invändigt och utvändigt medium medans det i verkligheten ofta förekommer luft på rörets utsida. För att undersöka detta har tryckprovning utförts med både luft och vatten som yttre medium, se avsnitt 3.3.

Inom projektet har begränsade provningar genomförts av alternativa provningsmetoder. Nedan ges en sammanfattning av dessa försök.

3.1 Provning av anvisade provstavar i ytspänningsnedsättande medel

Syftet är att kunna erhålla snabba resultat jämfört med provning i luft eller vatten. Tidigare erfarenheter har visat att provning i ytspänningsnedsättande medel kan förkorta brottiden med 5-10 gånger. Inom projektet har provning utförts i Igepal vid 80°C med anvisade provstavar. Provningsmetoden är densamma som för PENT (se avsnitt 2.3.5 ovan) med undantag för att provningsmiljön är Igepal. Resultaten från provning av fyra provstavar gav följande erfarenheter:

- * MDPE och HDPE tycks påverkas olika av Igepal. MDPE16 uppvisade upp till 50 gånger kortare brottid i Igepal medans HDPE2 (som har högre densitet) uppvisade endast 5 gånger kortare brottid. Detta gör det svårt att använda provning i Igepal som en rankingtest.
- * "Aktiviteten" av Igepallösningen avtar med tiden.

Rätt utnyttjad kan dock provning av långsam spricktillväxt i Igepallösning vara ett intressant alternativ då inga andra metoder står till buds för t.ex. små rör eller tunnväggiga provstavar eller om det är nödvändigt att prova en hel komponent. Som standardprovningsmetod är den dock inte lämpad

1998-12-29

med tanke på det svåra handhavandet och svårigheten i att tolka provningsresultat.

3.2 Provning av anvisade provstavar vid temperaturer högre än 80°C

Om provningstemperaturen höjs med 20°C ($T=20^\circ$) skall provningstiden onom Stadie II förkortas med 4-9 gånger om tumregler antas gälla. Detta är intressant för PE-material som uppvisar långa brottider vid 80°C. Slutsatserna från de provningar som genomförts vid $T>80^\circ\text{C}$ är följande:

- * Provning av MDPE-16 vid 100°C i luft visade att brottiden förkortades med endast 30 % jämfört med provning vid 80°C. Anledningen till detta kan vara att MDPE mjuknar väsentligt vid 100°C beroende på partiell smältning av materialet.
- * Den partiella smältningen medför att materialet blir mer segt och brottsegheten ökar därmed.
- * Att förkorta brottiden genom att höja temperaturen över 80°C ger inte tillräckligt korta brottider för att anses vara ett intressant alternativ.

3.3 Provning av anvisade rör vid olika temperaturer

Följande tre provningsmetoder har studerats i mer detalj:

- * Konventionell tryckprovning (ISO 1167)
- * Notch Pipe Test (ISO 13479), anvisade PE-rör som tryckprovas
- * PENT (ASTM F 1473), anvisade provstavar som konstantlastprovas

I nedanstående text förekommer följande förkortningar: Konventionell tryckprovning (**T.P.**), Notch Pipe Test (**NPT**), konstantlastprovning (**PENT**). Provnigen genomfördes vid 80, 60 och 20°C. Två materialkvaliteter inkluderades: HDPE2 och MDPE16. Dessa två uppvisar principellt olika livslängdsegenskaper (Tabell 3):

Tabell 3

Generell skillnad i krypbrottskurvans utseende för HDPE2 och MDPE16.

Materialkvalitet	Stadie I	Stadie II	Stadie III*)
HDPE2	Högt	Kort tid	Okänt
MDPE16	Medel	Lång tid	Lång tid

*) Livslängden bestäms av motståndsförmåga mot kemisk nedbrytning.

Resultaten finns redovisade i Bilaga A (tabeller) och Bilaga B (diagram). Nedanstående tabell (tabell 4) sammanfattar det experimentella läget:

1998-12-29

Tabell 4

Sammanställning över experimentellt provningsläge.

Material-kvalitet	Temp-eratur	Tryckprovning Test	Notch Pipe	PENT
HDPE2	80°C	OK, Provn. pågår	OK	OK
HDPE2	60°C	Provn. pågår*)	OK	OK
HDPE2	20°C	Litt.data	Extrapol.data	OK
MDPE16	80°C	Provn. pågår*)	Provn. pågår	OK
MDPE16	60°C	Litt.data	Provn. pågår	Exklud.
MDPE16	20°C	Litt.data	Exkluderat	Exklud.

*) Litteraturdata eller andra interna data har inkluderats som komplement.

Totalt pågår provning av 7 rör. Dessa bör fortsättas att provas för att erhålla en bättre jämförelse mellan de olika provningsmetoderna.

3.3.1 Resultat för HDPE2**80°C**

Vid 80°C finns data vid för alla provningsmetoderna för HDPE2. Två prover löper vidare efter 7 728 h, se Tabell A.1. Resultaten visar att vid höga belastningar (precis under Stadie I-nivå) är brottiden ungefär den samma för PENT och NPT, mellan 50 och 100 h, se Diagram B.4. För icke anvisade PE-rör är motsvarande brottid cirka 1000 h. Det betyder att brottiden förkortas med 10-20 gånger om provet anvisas. Vid låga belastningar ger PENT avsevärt kortare brottid än NPT på grund av dess brantare lutning. Detta kan förklaras med att PENT har en annan geometri och eventuellt med att anvisningen är annorlunda orienterad i PENT.

Nedan har termen "Initial nettospänning" använts för NPT och PENT. Hänsyn tas då till reducering i vägg tjocklek på grund av anvisning av provet.

Se Tabell A.1, A.3 och Diagram B.4

Jämförelse mellan provning med luft eller vatten som yttre medium

För HDPE2 har Notch Pipe Test genomförst vid 80°C dels med luft och dels med vatten som yttre medium (inre medium var i båda fallen vatten). En sammanställning av resultaten presenteras nedan:

Ringspänning (80°C)	Vatten/Luft	Vatten/Vatten
4 MPa	106 h	98 h
3 MPa	285 h	359 h
2 MPa	6 850 h	>11 116 h

Av ovanstående resultat dras slutsatsen att det är ingen större skillnad i brottid mellan vatten och luft som yttre medium. Andra undersökningar har emellertid visat att brottiden kan bero på vattenkvaliteten (t.ex. klorerat vatten, avjoniserat vatten, saltvatten etc.)

1998-12-29

60°C

Vid 60°C har motsvarande provning som vid 80°C genomförts för HDPE2. Skillnaden är dock att inga data finns för vanlig tryckprovning, endast litteraturdata. Tryckprovning pågår av två rör men inga brott har ännu inträffat. Intressant är dock att PENT och NPT data har samma principiella utseende vid 60°C som vid 80°C. Dvs. lutningen för PENT är brantare än NPT. Skillnaden i brottid mellan PENT/NPT och vanlig tryckprovning är större än vid 80°C. Provningarna för vanlig tryckprovning bör löpa vidare för att en bättre jämförelse skall erhållas.

Se Tabell A.2, A.4 och Diagram B.5

20°C

Vid 20°C finns endast data för PENT. NPT-data är extrapolerade från 80 och 60°C. Men även den extrapolerade linjen för NPT vid 20°C ligger längre fram i tiden än PENT. Det är mycket intressant att notera att linjerna för PENT och NPT har samma principiella relation vid 20°C som vid 60 och 80°C (under förutsättning att den extrapolerade 20°C linjen för NPT är korrekt).

Se Diagram B.6

Extrapoleringar och jämförelser vid 5 MPa (10 bar) och 2 MPa (4 bar)

För NPT och PENT har extrapolering med multipellinjär regression genomförts. Följande ekvation har anpassats till data (tid, spänning, temperatur):

$$\text{Log } t = -A - B \cdot \log \frac{\sigma}{T} + C/T$$

t är tiden till brott (h)

σ är ringspänningen (MPa)

T är temperaturen (K)

A, B, C är regressionskonstanter (materialparametrar)

Följande preliminära resultat erhöles för extrapoleringen:

Tabell 5

Extrapoleringsresultat för HDPE2.

Metod	A	B	C	max 50 års livslängd vid temp ¹⁾			E _a ²⁾ kJ/mol
				20°C	10°C	0°C	
NPT ³⁾	14.016	1860.192	6951.583	4.36	5.56	7.08	122.3
PENT ⁴⁾	10.439	878.335	4974.903	1.98	3.03	4.60	95.2

1) Maximal spänning vid olika temperaturer för livslängd 50 år (initial nettospänning).

2) Aktiveringsenergi

3) Notch Pipe Test

4) Konstantlastprovning av anvisade provstavar

1998-12-29

I detta fall har provningen genomförts med 110x10 mm PE-rör. Det inre övertrycket är därför 2* (ex: =4.36 MPa motsvarar ett inre övertryck på 8.7 bar). Observera att ovanstående extrapolering av NPT är preliminär på grund av den begränsade indatamängden. För NPT har 6 värden använts och för PENT har 39 värden använts, i båda fallen endast två temperaturer. För att en extrapolering av denna typ av data skall anses god ur statistisk synvinkel bör minst 75 värden och tre temperaturer ingå (baserat på ISO/TR 9080).

Om ovanstående extrapoleringsresultat räknas om till livslängder vid 5 MPa (10 bar) och 2 MPa (4 bar) erhålls följande resultat för de olika provningsmetoderna (tabell 6):

Tabell 6

Teoretiska brottider för HDPE2

Temp	=5 MPa (10 bar), (h)			=2 MPa (4 bar), (h)		
	T.P. ¹⁾	NPT ²⁾	PENT ³⁾	T.P. ¹⁾	NPT ²⁾	PENT ³⁾
80	1 000	97	81	>14000	12 096	794
60	>60 000	886	448	>100 000	147 632	5 018
20	>50 år	182 753	27 383	>50 år	>50 år	426 377

1) Tryckprovning av icke anvisade rör. För 60 och 20°C är tiderna uppskattade från litteraturdata

2) Notch Pipe Test

3) Konstantlastprovning av anvisade provstavar

Av ovanstående resultat dras slutsatsen att PENT är överlägset den snabbaste provningsmetoden vid låga belastningar. Vid högre belastningar är skillanden inte lika stor mellan PENT och NPT.

3.3.2 Resultat för MDPE16

80°C och 60°C

Vid 80°C har endast ett tryckprovningssbrott inom Stadie II uppträtt, i vatten/vatten efter 41 078 h. MDPE16 har väsentligt längre tid till Stadie II än HDPE2. De två notchade PE-rören löper vidare efter 7 728 h utan att brott har inträffat. PENT brott uppträder efter drygt 5 000 h.

Brottidskvoten mellan T.P. och PENT är cirka 7, vilket är i samma storleksordning som för HDPE2. Det kommer att vara av stort intresse att se när brott inträffar för de två notchade MDPE-rören vid 80°C. Då kan viktiga slutsatser dras om sambanden mellan PENT och NPT för MDPE16.

Vid 60°C har inga brott, förutom segbrott, uppträtt. Både icke notchade och notchade rör löper vidare utan brott efter 7 728 h provningstid. Vid 20°C är endast Stadie I linjen visad (litteraturdata). Stadie II vid 20°C uppträder förmodligen senare än 50 år.

Se Tabell A.5-A.8 och Diagram B.7

1998-12-29

3.4 Trepunktsböjning enligt SwRI's metod

Trepunktsböjning är en metod som används i USA hos Battelle och South West Research Institute. Provningsmetoden bygger på att mäta hur provkroppen deformeras under konstant belastning av en anvisad provstav.

Deformationsdata överförs sedan genom en matematisk formel till spricklängd i provet. Genom att på detta indirekta sätt mäta spricktillväxt i provet vid olika belastningsnivåer beräknas (extrapoleras) spricktillväxten till rumstemperatur. Beroende på rördimension beräknas sedan den tid det tar för sprickan att växa genom rörväggen. Det finns dock vissa betydande svårigheter med trepunktsböjning som extrapolationsmetod:

- * Tiden till sprickinitiering måste kunna mätas. Det är mycket svårt att uppskatta den tiden vid lägre belastningar då deformationen är liten och skillnaden mellan deformation p.g.a. vanlig krypning och deformation p.g.a. spricktillväxt är oerhört liten (i vissa fall mindre än 0.002 mm).
- * De formler för livlängdens beroende av temperatur och belastning antas vara samma för alla PE-material. Ingen hänsyn tas till om det förekommer skillnader (vilket erfarenheter från provning enligt ISO/TR 9080 vid Studsvik Polymer har visat).

Inom projektet har böjprovning utförts vid 80, 60 och 40°C av HDPE-2 provstavar som anvisats. Resultaten visar att "brottiden" är jämförbar med PENT och Notch Pipe Test. Vår erfarenhet/lärdom av de inledande försöken med tre-punktsböjning är följande:

- * Det ställs stora krav på mätutrustning vad beträffar repetitivitet och stabilitet i tiden.
- * Mätning måste kunna göras med en noggrannhet av 0.001 mm och det är mycket lätt att vibrationer och andra störningar påverkar mätningarna så att resultatolösheten äventyras.
- * En komplett provningsrigg med all mätutrustning och datainsamling är mycket dyrare än PENT och tryckprovningsutrustning.
- * Spridningen i provningsresultaten är större än för PENT.

3.5 Mätning av långsam spricktillväxt

För ett flertal PENT provningar har spricktillväxten mätts vid olika tider. Den mest användbara informationen från spricktillväxtmätningar är tiden till initiering av sprickan. Initieringen kan dock med acceptabel noggrannhet uppskattas genom att visuellt inspektera provet med eller utan mätkikare. För PENT är det en stor fördel att provet sitter väl synligt under hela provningstiden. En tumregel som stämmer i de flesta fall för medelhöga belastningar är att tiden till sprickinitiering är ungefär 50 % av brottiden.

1998-12-29

4 Diskussion och slutsatser från genomförda experiment

Dagens PE-material har mycket bättre livslängd än de PE-kvaliteter som förekom för 20 år sedan. Detta har fått den naturliga konsekvensen att livslängdsutvärderingen tar längre tid med dagens material. I vissa fall måste provning pågå 1-3 år innan brott inträffar vid 80°C. I framtiden kommer därför långa provningstider att bli mer värdefulla. Det är utan tvekan viktigt att samordna framtida provningsinsatser så att antalet provningsmetoder kan minimeras. På så sätt kan kunskapen om vissa specifika provningsmetoder ökas.

Följande experimentella slutsatser erhöles:

- * MDPE och HDPE tycks påverkas olika av Igepal. MDPE16 uppvisade upp till 50 gånger kortare brottid i Igepal medans HDPE2 (som har högre densitet) uppvisade endast 5 gånger kortare brottid. Detta gör det svårt att använda provning i Igepal som en rankingtest.
- * "Aktiviteten" av Igepallösningen avtar med tiden.
- * Provning av MDPE-16 vid 100°C i luft visade att brottiden förkortades med endast 30 % jämfört med provning vid 80°C. Anledningen till detta kan vara att MDPE mjuknar väsentligt vid 100°C beroende på partiell smältning av materialet.
- * Den partiella smältningen medför att materialet blir mer segt och brottsegheten ökar därmed.
- * Att förkorta brottiden genom att höja temperaturen över 80°C ger inte tillräckligt korta brottider för att anses vara ett intressant alternativ.
- * PENT ger generellt sett kortast brottid.
- * T.P. ger cirka 10-20 gånger längre brottid än PENT och cirka 5-10 gånger längre tid till brott än NPT.
- * Sambandet mellan PENT, NPT och T.P. tycks gälla även vid 60°C och eventuellt också vid 20°C.
- * Brottiden i vatten/vatten för NPT är den samma som för vatten/luft vid 80°C för HDPE2.
- * Multipellinjär regression fungerar bra för extrapolering av brottidsdata.
- * Tiden till sprickinitiering för trepunktsböjning måste kunna mätas. Det är mycket svårt att uppskatta den tiden vid lägre belastningar då deformationen är liten och skillnaden mellan deformation p.g.a. vanlig krypning och deformation p.g.a. spricktillväxt är oerhört liten (i vissa fall mindre än 0.002 mm).
- * De formler för livslängdens beroende av temperatur och belastning vid trepunktsböjning antas vara samma för alla PE-material. Ingen hänsyn tas till om det förekommer skillnader (vilket erfarenheter från provning enligt ISO/TR 9080 vid Studsvik Polymer har visat).

Resultaten har visat att det finns svårigheter i att använda alltför accelererade snabba kvalitetskontrollmetoder. Nackdelarna är att provningsresultaten blir mer osäkra bl.a. p.g.a. provningen blir mer komplicerad och att provningsutrustningen i vissa fall är mycket kostsam (t.ex. utmattningsprovning). Att höja temperaturen över 80°C eller att använda ytspänningsnedsättande medel innebär svårigheter antingen med att provmaterialet ändrar egenskaper eller att provningmediumet ändras

1998-12-29

(skiktas, bryts ned, fällt ut etc). Provning av hela rör i vatten eller luft är att föredra ur vetenskaplig synvinkel då steget från verkliga förhållanden ej är så stor. Men PENT ger alltid kortast brottid, speciellt vid låga belastningar. För små rördimensioner (där godstjockleken underskrider 5 mm) kan provning i ytspänningsnedsättande medel vara det bästa alternativet som accelererad provningsmetod för Stadie II. Den pågående provningen av PE-rör bör fortsätta för att en bättre jämförelse skall kunna göras mellan de olika provningsmetoderna.

I och med att data tas fram även för lägre temperaturer och för material som tar lång tid att prova (t.ex. MDPE16) bör utvärdering av nya okända material kunna utföras med större säkerhet. De experimentella resultaten för HDPE2 har visat att sambandet mellan T.P., NPT och PENT tycks gälla även vid lägre temperaturer vilket är en mycket viktig slutsats när det gäller extrapoleringsmöjligheter. Vi har ej funnit några andra data som redovisar denna typ av samband i litteraturen. Livslängdsbedömningar baserade på notch tester kan göras med större säkerhet i framtiden på grund av den ökande kunskapen mellan provning och verklighet.

1998-12-29

Referenser

- 1 TRÄNKNER T, IFWARSON M
EVOPE-Utvärdering av polyetenrör för gasdistribution, slutrapport. Studsvik Report M-94/61.
- 2 TRÄNKNER, T.
Plaströrsstandarder för gasdistribution. Studsvik Report EX-88/61.
- 3 IFWARSON M, TRÄNKNER T
Stora gasledningar av polyeten (>225 mm), en litteraturstudie. Studsvik Report EX-88/71f.
- 4 TRÄNKNER, T.
Haverimekanismer i polyetenrör för gasdistribution. Studsvik Report EX-90/12.
- 5 WEDHOLM, E.
Studie av brottmekaniska provningsmetoder, examensarbete. Studsvik Report M-91/72.
- 6 TRÄNKNER, T.
Plaströr för gasdistribution, utvärdering av tre års experimentella undersökningar. Studsvik report M-91/24.
- 7 FISCHER, H.
Långsam spricktillväxt i polyetenrör, examensarbete. Studsvik Report M-94/150.
- 8 LUSTIGER, A.
Environmental Stress Cracking: The Phenomenon and Its Use. *Failure of Plastics*, Carl Hanser Verlag, ISBN 3 44 14199 5, 1989.
- 9 BROWN N, LU X
Pent quality control test for PE gas pipes and resins
Proc. of 12th plastic fuel gas pipe symposium, 1991, p. 128.
- 10 TRÄNKNER T, GEDDE UW
Lifetime of polyethylene gas pipes in uniaxial tension. Proc. of 13th plastic fuel gas pipe symposium, 1993, p. 316-326.
- 11 NISHIO N, IIMURA S, YASUHARA M, NAGATANI F
Standard full-notch creep test method and some test results on MDPE pipes. Proc. of ninth plastic fuel gas pipe symposium, 1985, p. 29.
- 12 RONNING E A, KLOOCK G J
Rotary fatigue testing of plastic material. Proc. of tenth plastic fuel gas pipe symposium, 1987, p. 36.

1998-12-29

- 13 BROWN N, KLEIN M, MOET A, NISHIMURA H
International round robin study of a fatigue test approach to the ranking of polyethylene piping material. Proc. of 12th plastic fuel gas pipe symposium, 1991, p. 446.
- 14 HERTZBERG R W, MANSON J A
Fatigue of Engineering Plastics, Academic Press Inc, 1980. ISBN 0 12 344550 1.
- 15 GREIG J M AND LAWRENCE C C
The possibility of assessing the long term performance of PE pipes using a quality control fatigue test. *Plastics pipes VII*, 1988, p. 14.1-14.9.
- 16 LAWRENCE C, POTTER R AND TEO S
Further evidence (waveform) of a relationship between the behaviour of notched fatigue data and that derived from the long term performance tests on plastic pipes. *Proc. of 12th plastic fuel gas pipe symposium*, 1995, p. 170-175.
- 17 HESSEL J, MAUER E
Zeitstandzugprüfung in wäßriger Netzmittellösung. *Materialprüfung*, 36 (1994), no 6.
- 18 FLEIßNER, M.
Slow Crack Growth and Creep Rupture Strength of Polyethylene Pipe. *Kunststoffe German Plastics* 77(1987)1.
- 19 TRÄNKNER T, GEDDE U W
Molecular structure and long term hydrostatic strength of a medium density polyethylene pipe for gas distribution. Proc. of 12th plastic fuel gas pipe symposium, 1991, p. 285.
- 20 POPELAR C F, KANNINEN M F, LEUNG C P, MAMOUN M M
Industry useable procedures for forecasting the service life and mechanical performance of PE gas pipes. Proc. of 12th plastic fuel gas pipe symposium, 1991, p. 134.

1998-12-29

Tabell A.1

Hydrostatisk tryckprovning av icke anvisade HDPE2 (högdensitetspolyetenrör) vid 80°C med vatten som inre medium och luft som yttre medium.

Provningslaboratorium:	Studsvik Polymer AB
Ansvarig för provningen:	Joakim Jansson
Provningsmetod:	ISO 1167-1973
Konditioneringstid:	3 h
Kopplingar:	Wipex mäsningsskopplingar
Nominell rördimension:	110 x 10 mm
Rörlängd:	580 mm
Läget per den:	1998-12-29

Rörkod ¹⁾ (intern kod)	Temp °C	Start	t ²⁾ mm	D ³⁾ mm	p ⁴⁾ bar	⁵⁾ MPa	Brottid h	Brott typ	Anmärkning
HDPE2-40	80	970506	10.04	110.70	10.98	5.51	86	Segt	
HDPE2-53	80	980210	10.04	110.70	8.04	4.03	->		6), >7 728 h
HDPE2-13	80	930824	10.12	110.80	7.35	3.66	7 996	Sprött	
HDPE2-5	80	930525	10.30	110.70	6.18	3.01	14 345	Sprött	
HDPE2-54	80	980210	10.04	110.70	3.92	1.97	->		6), >7 728 h

1) Fullständig dokumentation finns tillgänglig på Studsvik.

2) Minsta godstjocklek

3) Maximal genomsnittlig utvärdig diameter

4) Inre övertryck

5) Ringspänning

6) Tryckprovningen pågår fortfarande

1998-12-29

Tabell A.2

Hydrostatisk tryckprovning av icke anvisade (högdensitetspolyetenrör) vid 60°C med vatten som inre medium och luft som yttre medium.

Provningslaboratorium:	Studsvik Polymer AB
Ansvarig för provningen:	Joakim Jansson
Provningsmetod:	ISO 1167-1973
Konditioneringstid:	3 h
Kopplingar:	Wipex mäsningsskopplingar
Nominell rördimension:	110 x 10 mm
Rörlängd:	580 mm
Läget per den:	1998-12-29

Rörkod ¹⁾ (intern kod)	Temp °C	Start	t ²⁾ mm	D ³⁾ mm	p ⁴⁾ bar	⁵⁾ MPa	Brottid h	Brott typ	Anmärkning
HDPE2-39	60	970506	10.00	110.70	15.69	7.90	28	Segt	
HDPE2-41	60	970513	9.99	110.70	14.91	7.51	489	Segt	
HDPE2-52	60	980210	10.04	110.70	9.81	4.92	->		6), >7 728 h
HDPE2-53	60	980210	10.04	110.70	5.98	3.00	->		6), >7 728 h

- 1) Fullständig dokumentation finns tillgänglig på Studsvik.
- 2) Minsta godstjocklek
- 3) Maximal genomsnittlig utvärdig diameter
- 4) Inre övertryck
- 5) Ringspänning
- 6) Tryckprovningen pågår fortfarande

1998-12-29

Tabell A.3

Hydrostatisk tryckprovning (NOTCH TEST) av anvisade HDPE2 (högdensitetspolyetenrör) vid 80°C med luft som yttre medium.

Provningslaboratorium:	Studsvik Polymer AB
Ansvarig för provningen:	Joakim Jansson
Provningsmetod:	ISO 13479
Konditioneringstid:	12 h
Kopplingar:	Wipex mäsningsskopplingar
Nominell rördimension:	110 x 10 mm
Rörlängd:	580 mm

Rörkod ¹⁾ (intern kod)	Temp °C	Start	t ²⁾ mm	D ³⁾ mm	p ⁴⁾ bar	⁵⁾ MPa	Brottid h	Brott typ	Anmärkning ⁸⁾
HDPE2-47	80	980210	10.43	110.70	8.04	4.98	106	Sprött	6) LUFT
HDPE2-48	80	980210	10.37	110.70	6.18	3.74	285	Sprött	6) LUFT
HDPE2-45	80	980210	10.25	110.65	3.92	2.40	6 850	Sprött	6) LUFT
HDPE2-34	80	940929	10.29	110.85	8.57	5.04	98	Sprött	6,7) VATTEN
HDPE2-38	80	941006	10.32	110.75	6.42	3.76	359	Sprött	6,7) VATTEN
HDPE2-36	80	941006	10.12	110.80	4.08	2.44	>11 116	Avbrutet	6,7) VATTEN

1) Fullständig dokumentation finns tillgänglig på Studsvik.

2) Minsta godstjocklek

3) Maximal genomsnittlig utvärdig diameter

4) Inre övertryck

5) Initial nettospänning (ringspänning)

6) Anvisat (notchat) enligt ISO 13479, 4 st spår fräses i axiell riktning till ett djup av 2 mm. Fullständig dokumentation om anvisningsförfarande finns på Studsvik.

7) Provningsen är utförd med vatten som yttre medium

8) "LUFT" eller "VATTEN" anger yttre medium i förekommande fall. Inre medium är vatten.

1998-12-29

Tabell A.4

Hydrostatisk tryckprovning (NOTCH TEST) av anvisade HDPE2 (högdensitetspolyetenrör) vid 60°C med vatten som inre medium och luft som yttre medium.

Provningslaboratorium:	Studsvik Polymer AB
Ansvarig för provningen:	Joakim Jansson
Provningsmetod:	ISO 13479
Konditioneringstid:	12 h (ISO13479)
Kopplingar:	Wipex mäsningsskopplingar
Nominell rördimension:	110 x 10 mm
Rörlängd:	580 mm

Rörkod ¹⁾ (intern kod)	Temp °C	Start	t ²⁾ mm	D ³⁾ mm	p ⁴⁾ bar	⁵⁾ MPa	Brottid h	Brott typ	Anmärkning
HDPE2-42	60	980210	10.26	110.60	10.30	6.29	334	Sprött	Notch ⁶⁾
HDPE2-46	60	980210	10.16	110.70	8.04	4.98	886	Sprött	Notch ⁶⁾
HDPE2-43	60	980210	10.24	110.70	6.18	3.79	3 166	Sprött	Notch ⁶⁾

1) Fullständig dokumentation finns tillgänglig på Studsvik.

2) Minsta godstjocklek

3) Maximal genomsnittlig utvändig diameter

4) Initial nettospänning (ringsspänning)

5) Ringsspänning

6) Anvisat (notchat) enligt ISO 13479, 4 st spår fräses i axiell riktning till ett djup av 2 mm. Fullständig dokumentation om anvisningsförfarande finns på Studsvik.

1998-12-29

Tabell A.5

Hydrostatisk tryckprovning av icke anvisade MDPE16 (mediumdensitetspolyetenrör) vid 80°C med luft som yttre medium.

Provninglaboratorium:	Studsvik Polymer AB
Ansvarig för provningen:	Joakim Jansson
Provningsmetod:	ISO 1167-1973
Konditioneringstid:	3 h
Kopplingar:	Wipex mäsningsskopplingar
Nominell rördimension:	110 x 10 mm
Rörlängd:	580 mm

Rörkod ¹⁾ (intern kod)	Temp °C	Start	t ²⁾ mm	D ³⁾ mm	p ⁴⁾ bar	⁵⁾ MPa	Brottid h	Brott typ	Anmärkning
MDPE16-2	80	920901	10.54	110.45	10.59	5.02	8.5	Segt	Vatten/luft
MDPE16-3	80	920924	10.64	110.45	10.30	4.83	38	Segt	Vatten/vatten
MDPE16-5	80	921102	10.58	110.40	9.61	4.53	41 078	Sprött	Vatten/vatten

1) Fullständig dokumentation finns tillgänglig på Studsvik.

2) Minsta godstjocklek

3) Maximal genomsnittlig utvändig diameter

4) Inre övertryck

5) Ringspänning

1998-12-29

Tabell A.6

Hydrostatisk tryckprovning av icke anvisade MDPE16 (mediumdensitetspolyetenrör) vid 60°C med vatten som inre medium och luft som yttre medium.

Provningslaboratorium:	Studsvik Polymer AB
Ansvarig för provningen:	Joakim Jansson
Provningsmetod:	ISO 1167-1973
Konditioneringstid:	3 h
Kopplingar:	Wipex mäsningsskopplingar
Nominell rördimension:	110 x 10 mm
Rörlängd:	580 mm

Rörkod ¹⁾ (intern kod)	Temp °C	Start	t ²⁾ mm	D ³⁾ mm	p ⁴⁾ bar	⁵⁾ MPa	Brottid h	Brott typ	Anmärkning
MDPE16-130	60	970506	10.28	110.45	13.73	6.69	898	Segt	
MDPE16-131	60	970513	10.23	110.40	13.24	6.48	232	Segt	

- 1) Fullständig dokumentation finns tillgänglig på Studsvik.
- 2) Minsta godstjocklek
- 3) Maximal genomsnittlig utvärdig diameter
- 4) Inre övertryck
- 7) Ringspänning
- 8) Tryckprovningen pågår fortfarande

1998-12-29

Tabell A.7

Hydrostatisk tryckprovning (NOTCH TEST) av anvisade MDPE16 (mediumdensitetspolyetenrör) vid 80°C med vatten som inre medium och luft som yttre medium.

Provningslaboratorium:	Studsvik Polymer AB
Ansvarig för provningen:	Joakim Jansson
Provningsmetod:	ISO 13479
Konditioneringstid:	12 h
Kopplingar:	Wipex mäsningsskopplingar
Nominell rördimension:	110 x 10 mm
Rörlängd:	580 mm
Läget per den:	1998-12-29

Rörkod ¹⁾ (intern kod)	Temp °C	Start	t ²⁾ mm	D ³⁾ mm	p ⁴⁾ bar	⁵⁾ MPa	Brottid h	Brott typ	Anmärkning
MDPE16-137	80	970210	10.30	110.45	8.23	5.01	->		6), >7 728 h ⁷⁾
MDPE16-136	80	970210	10.23	110.40	6.18	3.78	->		6), >7 728 h ⁷⁾

- 1) Fullständig dokumentation finns tillgänglig på Studsvik.
- 2) Minsta godstjocklek
- 3) Maximal genomsnittlig utvärdig diameter
- 4) Initial nettospänning (ringspänning)
- 5) Ringspänning
- 6) Tryckprovningen pågår fortfarande
- 7) Anvisat (notchat) enligt ISO 13479, 4 st spår fräses i axiell riktning till ett djup av 2 mm. Fullständig dokumentation om anvisningsförfarande finns på Studsvik.

1998-12-29

Tabell A.8

Hydrostatisk tryckprovning (NOTCH TEST) av anvisade MDPE2 (mediumdensitetspolyetenrör) vid 60°C med vatten som inre medium och luft som yttre medium.

Provningslaboratorium:	Studsvik Polymer AB
Ansvarig för provningen:	Joakim Jansson
Provningsmetod:	ISO 13479
Konditioneringstid:	12 h (ISO13479)
Kopplingar:	Wipex mäsningsskopplingar
Nominell rördimension:	110 x 10 mm
Rörlängd:	580 mm

Rörkod ¹⁾ (intern kod)	Temp °C	Start	t ²⁾ mm	D ³⁾ mm	p ⁴⁾ bar	⁵⁾ MPa	Brottid h	Brott typ	Anmärkning
MDPE16-135	60	980210	10.22	110.45	8.23	5.05	->		6), >7 728 h ⁷⁾

1) Fullständig dokumentation finns tillgänglig på Studsvik.

2) Minsta godstjocklek

3) Maximal genomsnittlig utvändig diameter

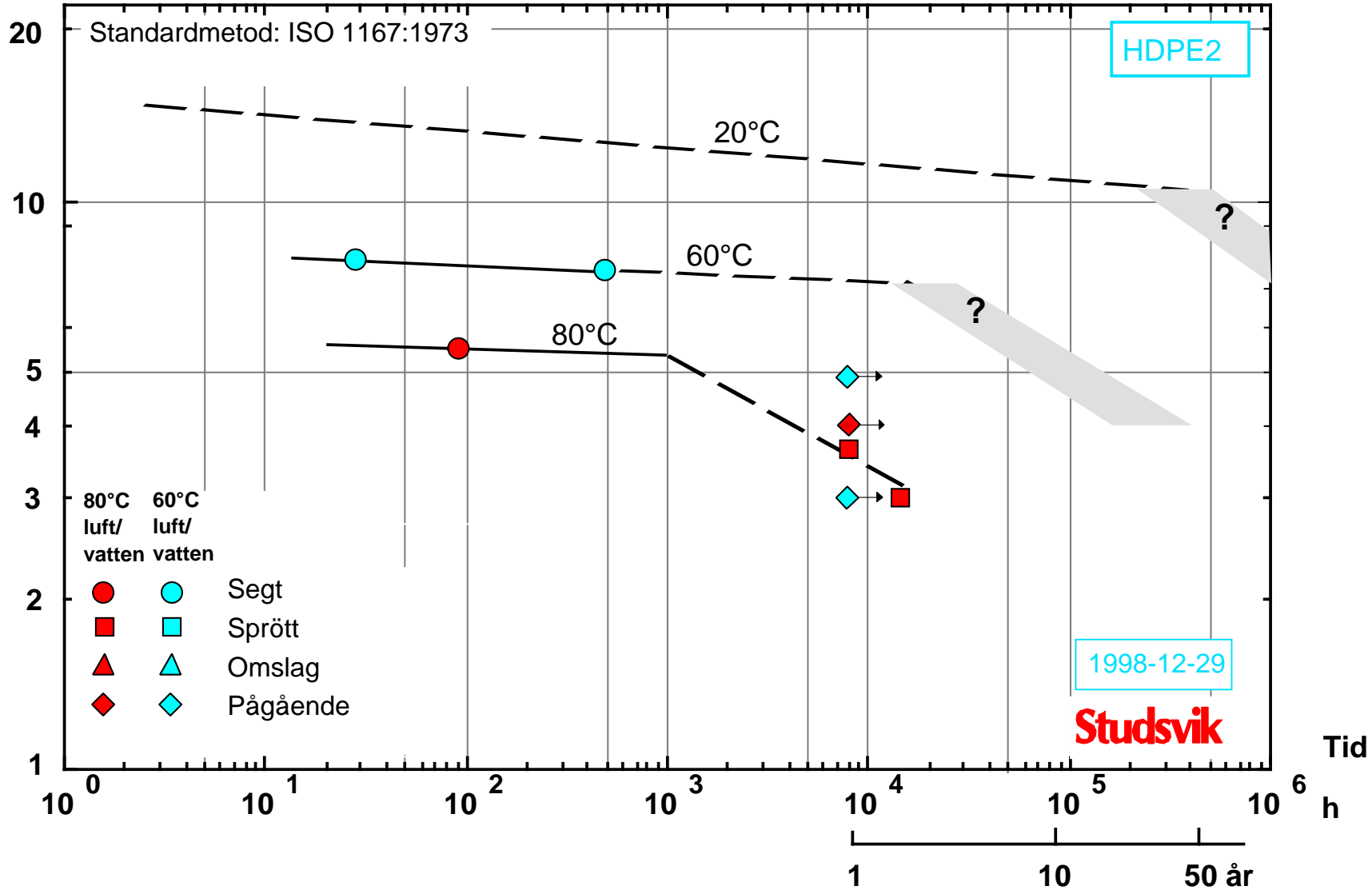
4) Initial nettospänning (ringsspänning)

5) Ringsspänning

6) Tryckprovningen pågår fortfarande

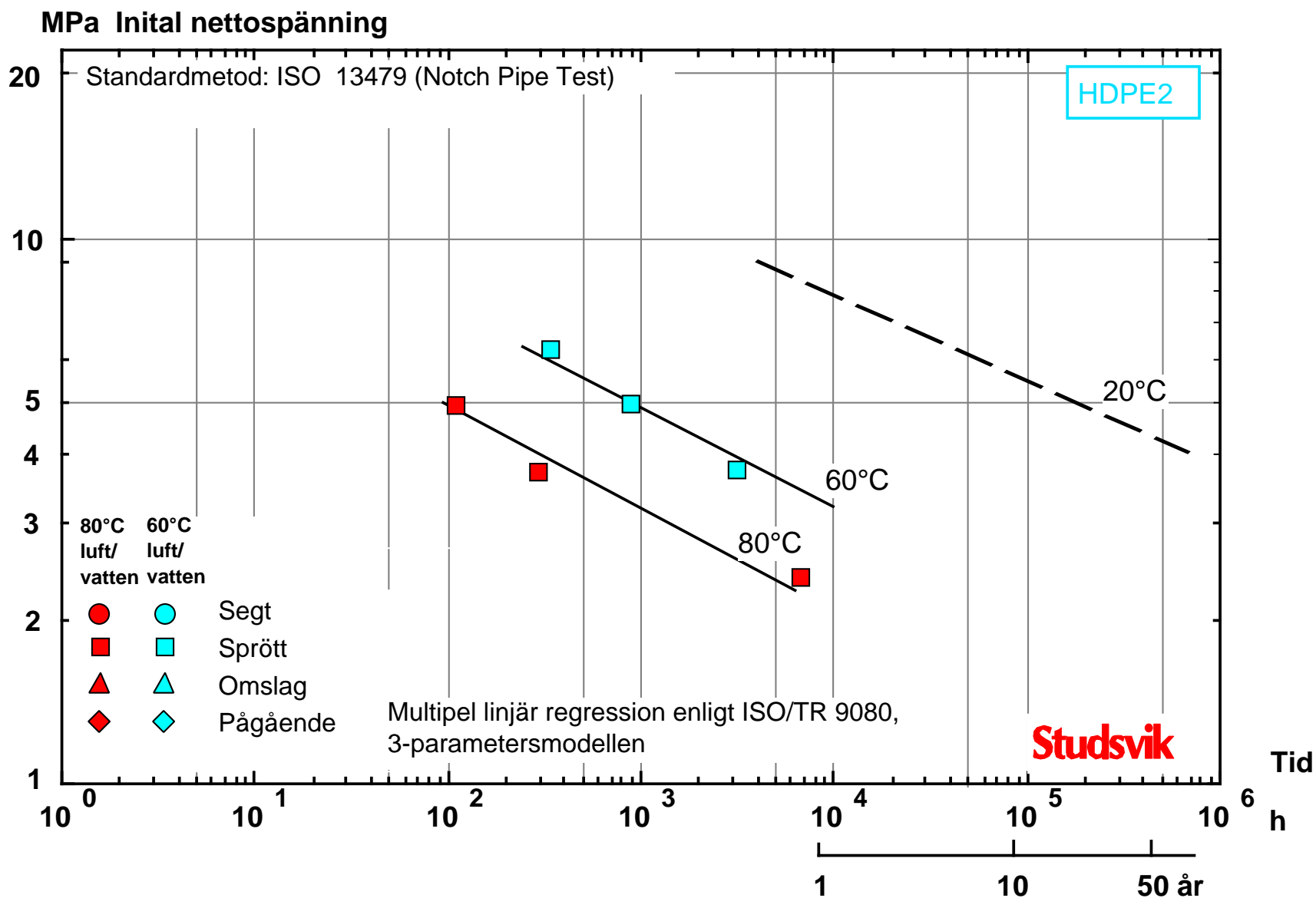
7) Anvisat (notchat) enligt ISO 13479, 4 st spår fräses i axiell riktning till ett djup av 2 mm. Fullständig dokumentation om anvisningsförfarande finns på Studsvik.

MPa Ringspänning



Figur B.1

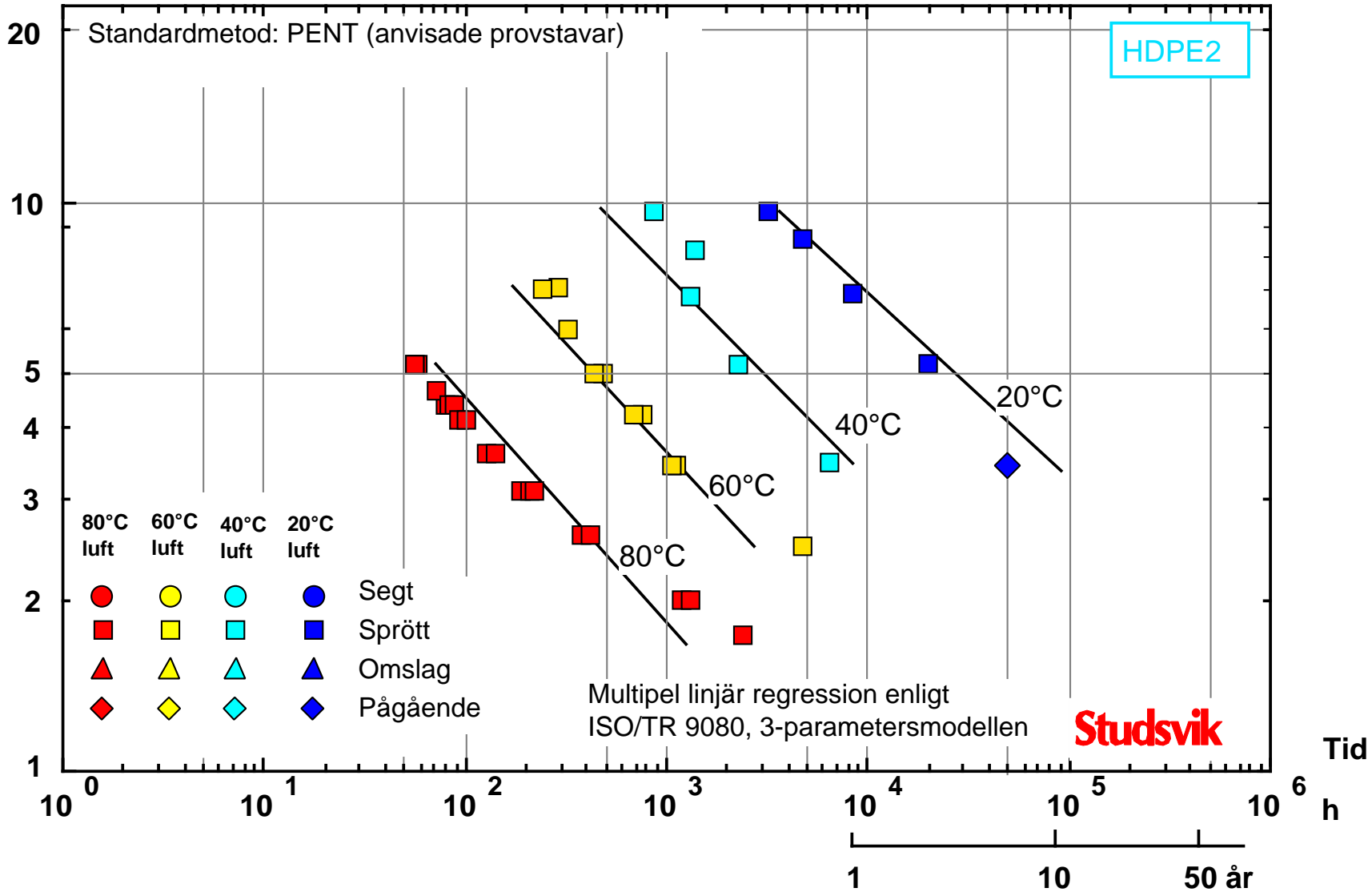
Tryckprovning av HDPE2 (referens utan anvisning). Knäpunkten vid 60 and 20°C är uppskattad från litteraturredata.



Figur B.2

Tryckprovning av HDPE2 (notchade prover). Den streckade linjen vid 20°C är beräknad från data vid 60 och 80°C med hjälp av multipel linjär regression.

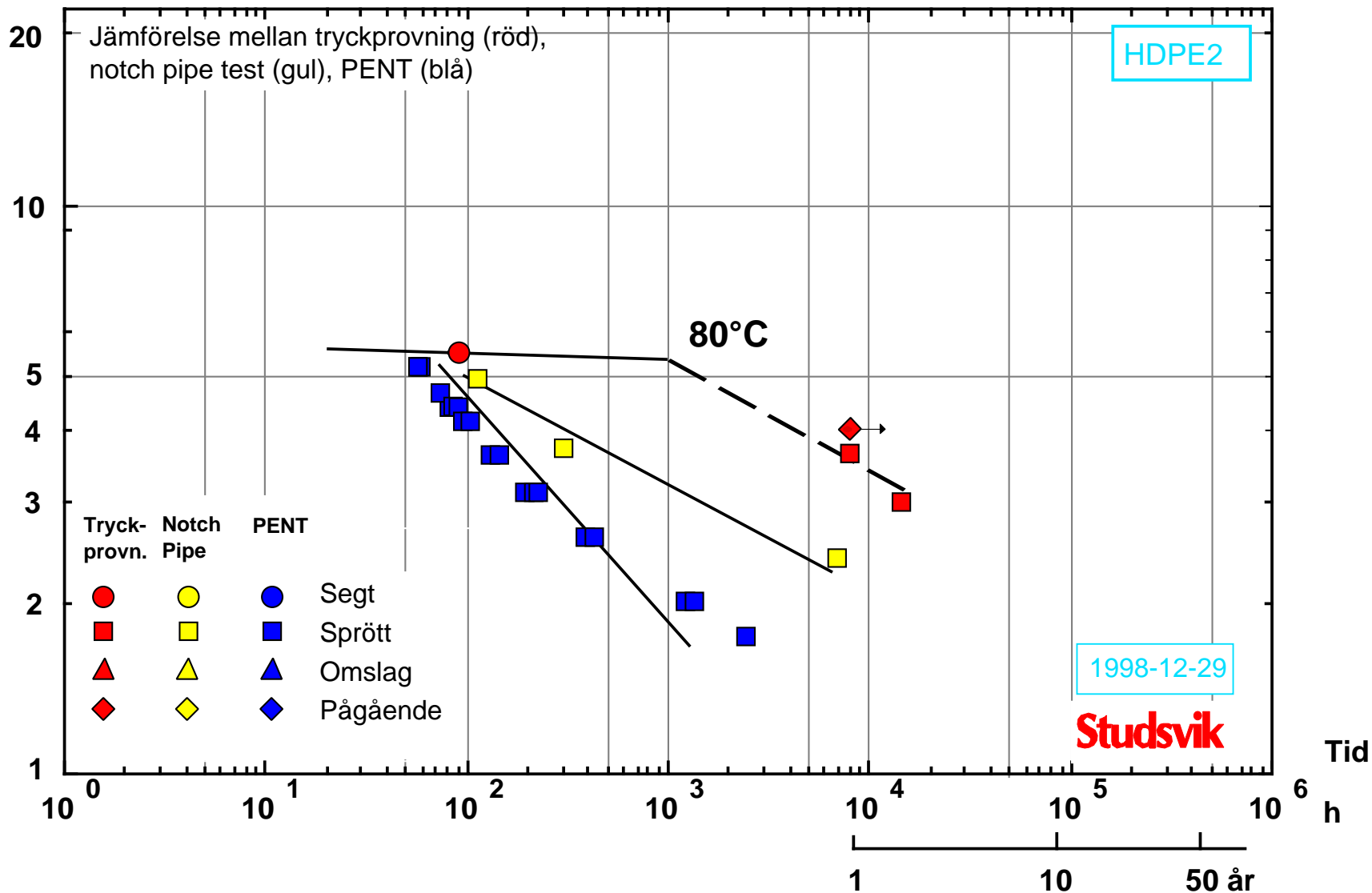
MPa Initial nettospänning



Figur B.3

PENT provning (anvisade provstavar) av HDPE2 i luft vid 80, 60, 40 och 20°C.

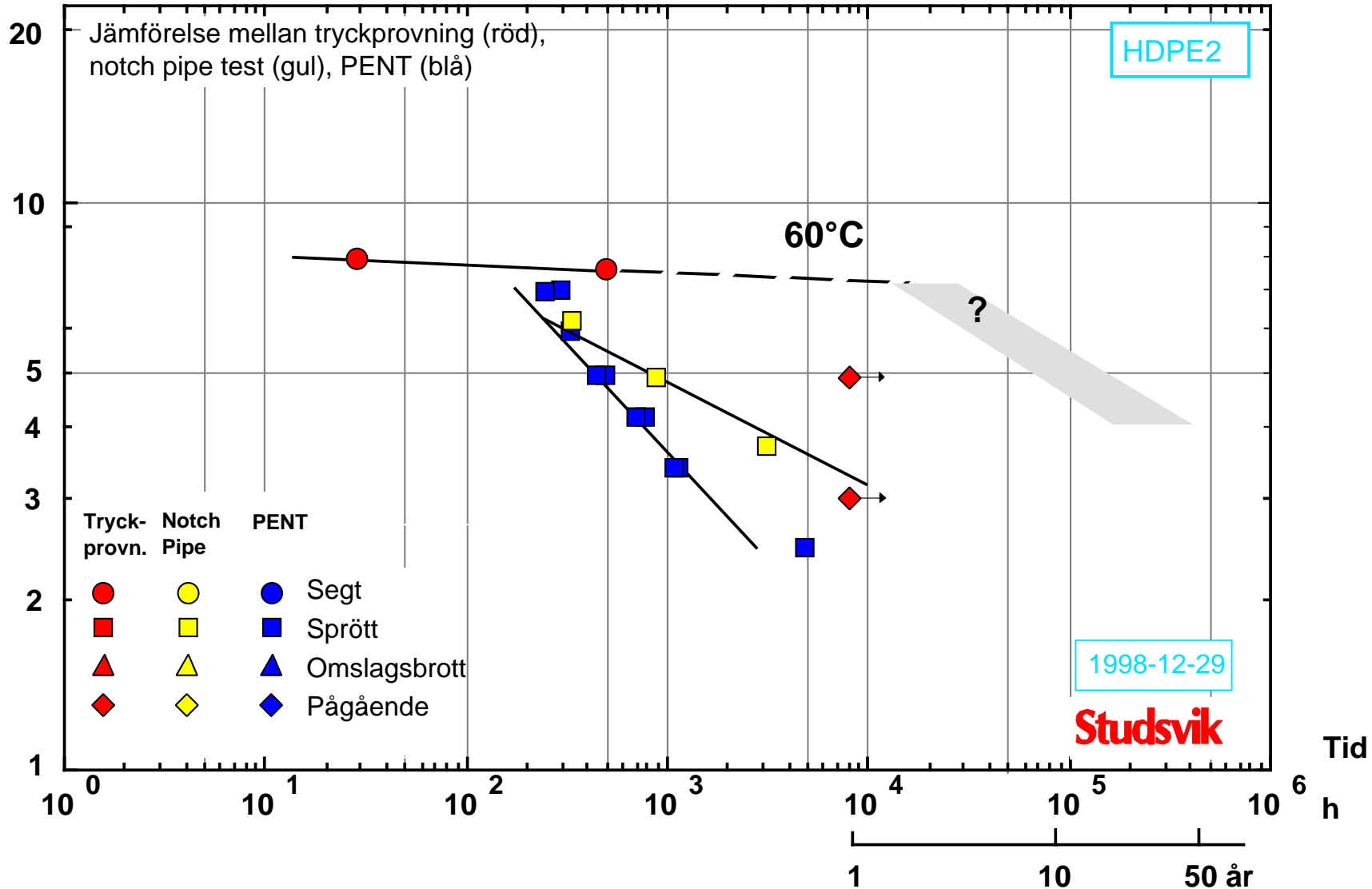
MPa Spänning



Figur B.4

Jämförelse mellan tryckprovning, notchade PE-rör och PENT (anvisade PE-provstavar) vid 80°C i luft. Alla provningar är utförda med samma PE-rör, HDPE2.

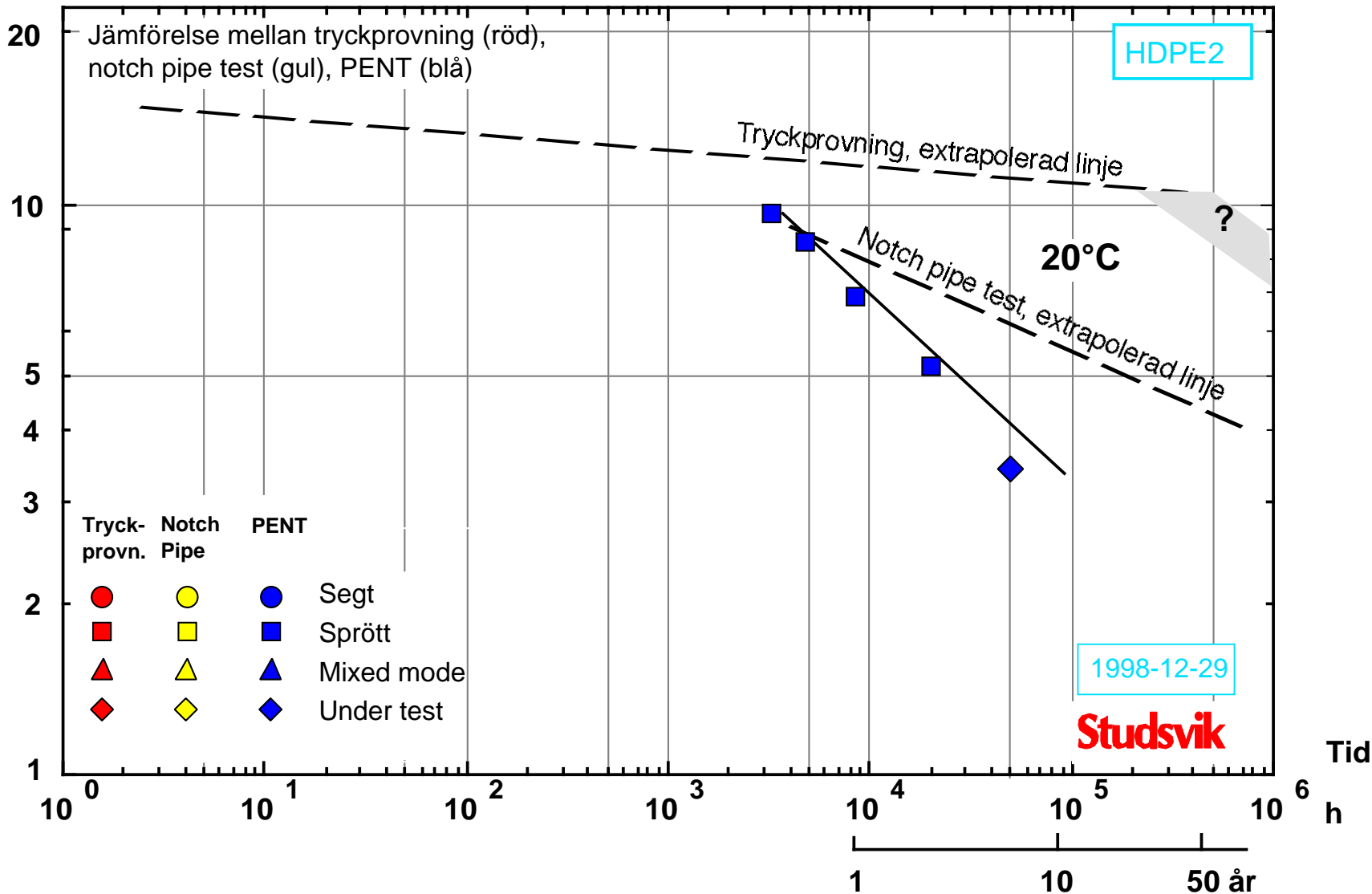
MPa Spänning



Figur B.5

Jämförelse mellan tryckprovning, notchade PE-rör och PENT (anvisade PE-provstavar) vid 60°C. Alla provningar är utförda med samma PE-rör, HDPE2. Det streckade området i diagrammet representerar en uppskattad tid till Stadie II (uppskattningen är baserad på litteraturdata).

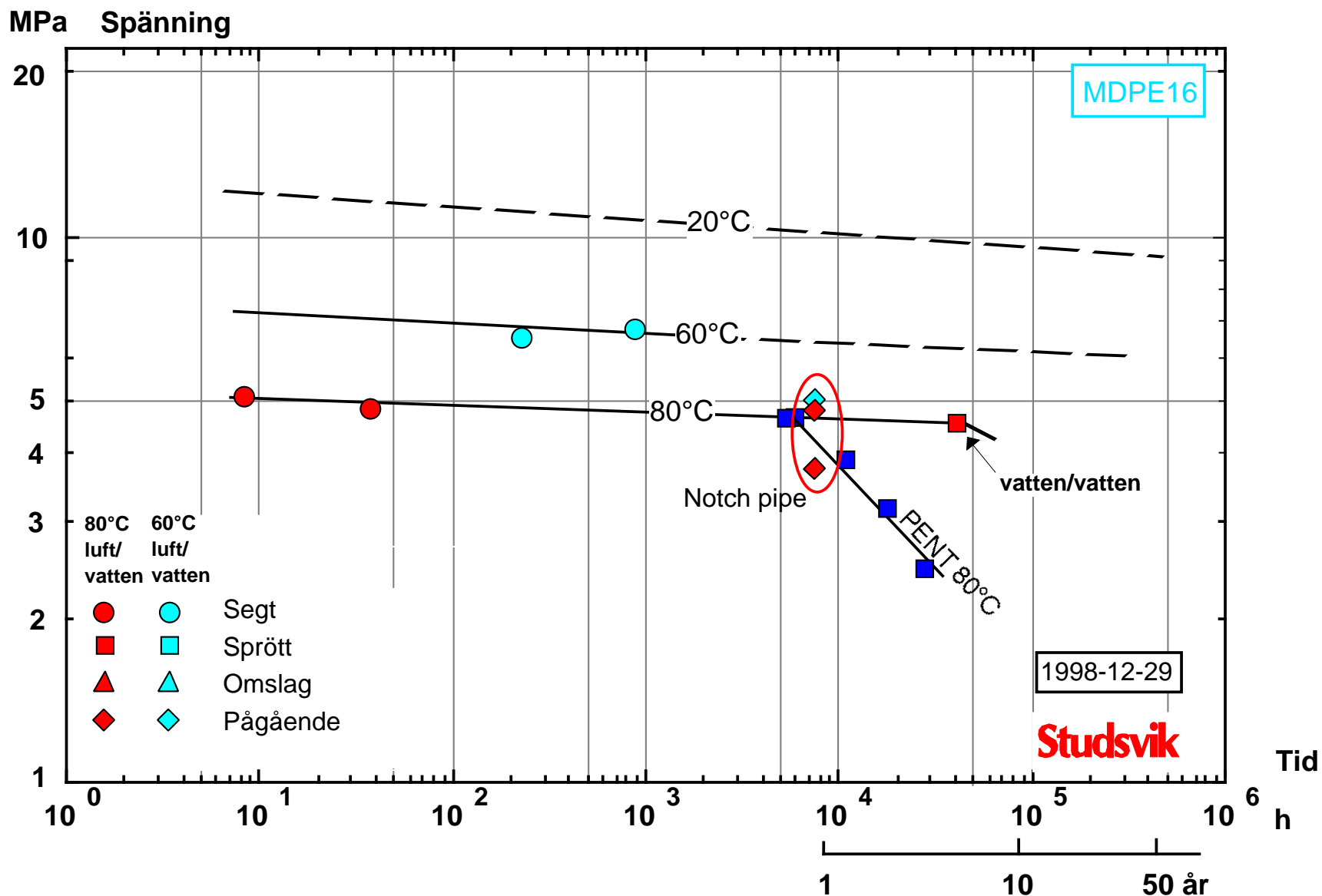
MPa Spänning



Figur B.6

Jämförelse mellan tryckprovning, notchade PE-rör och PENT (anvisade PE-provstavar) vid 20°C. Litteratordata har använts för linjen för tryckprovning. Notch pipe linjen är extrapolerad från 60 och 80°C.

1998-12-29



Figur B.7

Jämförelse mellan tryckprovning, notchade PE-rör och PENT (anvisade PE-provstavar) vid 80°C. Alla provningar är utförda med samma PE-rör, MDPE16. Vid 60°C har endast segbrott erhållits. Linjen för 20°C är framtagen för vatten/vatten (interna data från Studsvik) men kan antas gälla även för luft.



SE-205 09 MALMÖ ● TEL 040-24 43 10 ● FAX 040-24 43 14
www.sgc.se ● info@sgc.se
