
Rapport SGC 169

Repor och intryckningar i trycksatta plaströr - Kunskapsläge

©Svenskt Gastekniskt Center – September 2006



Stefan Forsaeus Nilsson
Sven-Erik Sällberg
SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut

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 eller dylikt 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, E.ON Gas Sverige AB, E.ON Sverige AB, Göteborg Energi AB, Lunds Energi AB och Öresundskraft AB.

Följande parter har gjort det möjligt att genomföra detta utvecklingsprojekt:

E.ON Gas Sverige AB
Öresundskraft AB
Lunds Energi AB
Göteborg Energi AB

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB



Jörgen Held

Sammanfattning

Föreliggande rapport redovisar en kartläggning av kunskapsläget vad gäller repor och intryckningar i plaströr: hur och under vilka förutsättningar de uppstår och i vilken utsträckning de försämrar rörens beständighet. Arbetet har genomförts som en sökning av publicerad teknisk och vetenskaplig litteratur.

Genom fältstudier vet man en hel del om hur stora intrycks- och rep-skador man kan få på rören under installation och drift. Kunskaperna är också tämligen goda kring hur sådana skador påverkar risken för snabba, sega brott. Emellertid orsakas faktiska ledningshaverier oftast av spröda brott genom långsam spricktillväxt. Hur sprickinitiering och spricktillväxt sker i polyeten har studerats under lång tid och man har en god bild av fenomenet, vilket också utnyttjas för materialprovning. Regelmässigt används sprickanvisningar för att accelerera provningar och ge snabbare brott. Vad som däremot tycks saknas är kunskap om i vilken utsträckning och under vilka förutsättningar verkliga repor och intryckningar kan ha en sprickanvisningseffekt, det vill säga skynda på en spröd brottprocess.

Det är en pusselbit som krävs innan man kan börja utarbeta utvärderingsmetoder för beständighet och ta fram väl underbyggda kravgränser med avseende på tillåtliga repor och intryckningar.

Summary

This report presents a screening of the current knowledge on scratches and indentations in plastics pipes: how they may occur, and to what extent they influence the durability of the pipe. The work was done as a review of published technical and scientific literature.

Field studies have yielded some knowledge on the extent of the scratch and indentation damage that may arise on a pipe during installation and service. It is also fairly well understood how such damage may increase the risk for short-term ductile fracture. However, actual pipeline failures are usually caused by brittle fractures through slow crack growth. The initiation and propagation of slow cracks in polyethylene has been thoroughly studied, and the phenomenon is used for material testing. Notches are regularly used to accelerate tests and give shorter testing times. What seems to be lacking, however, is knowledge on to what extent, and under which conditions, scratches and indentations may have a notch effect, i.e., accelerate a brittle fracture mechanism.

This needs to be understood before evaluation methods can be developed and relevant requirements with respect to allowable scratches and indentations may be established.

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	3
1.1	Projektets genomförande	3
1.2	Allmänt om tillgänglig litteratur	3
1.3	Läsanvisningar.....	4
2	Slutsatser	4
3	Skador på rör i fält.....	5
4	Repor.....	5
4.1	Hur uppstår repor?.....	5
4.2	Vilka konsekvenser har repor?	6
5	Intryckningar	7
5.1	Hur uppstår intryckningar?	7
5.2	Vilka konsekvenser har intryckningar?.....	8
6	Långsam spricktillväxt i polyeten.....	9
6.1	Utvärderingsmetoder	10
6.2	Notchens inverkan	10
7	Ny teknik	11
7.1	Grävningsfri rörläggning	11
7.2	Rör med skyddskikt.....	12
8	Standardiserade provningsmetoder	12
9	Materialegenskaper hos polyeten.....	13
10	Beteckningar.....	14
11	Referenser.....	15

1 Inledning

Livslängden hos trycksatta plaströrsledningar kan påverkas av förekomsten av ut- och invändiga skador såsom repor och stenintryckningar. I vilken utsträckning har dock, såvitt SP känner till, aldrig tydligt klarlagts.

I takt med att det blivit mer och mer aktuellt att rationalisera arbetet vid läggning av rörledningar genom att använda grävningsfria tekniker som till exempel styrd borrhning och rörspräckning har problemen med utvändiga skador aktualiserats.

Flera europeiska tillverkare av tryckrör har under senare år lanserat nya produkter som uppges vara särskilt motståndskraftiga mot utvändiga skador. Att värdera dessa egenskaper är dock svårt då fullständig kännedom om hur stora skador som kan uppstå på ett rör i en verklig situation och vilka konsekvenserna blir när det gäller rörets funktion och tekniska livslängd saknas.

De problem som kan uppstå med avseende på rörens beständighet beror på arten av skadan. Trubbiga repor leder till en ökning av ringdragspänningen i rörväggen genom att vägg-tjockleken lokalt minskas. Det samma gäller för vassa repor där även risken för att repa utgör en sprickanvisning från vilken ett sprött materialbrott kan utbildas. Intryckningar i sin tur kan leda till stora lokala dragpåkänningar på rörväggens insida.

I rörbranschen tillämpas idag mer eller mindre regelmässigt en tumregel som säger att repor i rörväggen inte får vara djupare än maximalt 10 % av vägg-tjockleken. Detta krav åter-

finns ofta i rörtillverkarnas tekniska anvisningar men tycks inte vara styrkt av någon vetenskaplig undersökning.

Målsättningen med innevarande studie har varit att kartlägga kunskapsläget vad gäller repor och intryckningar i trycksatta plaströr av polyeten – både vad gäller uppkomsten av sådana skador samt konsekvenserna av dem med avseende på rörens livslängd.

1.1 Projektets genomförande

Kartläggningen av kunskapsläget vad gäller repor och intryckningar i plaströr har genomförts som en sökning av publicerad teknisk och vetenskaplig litteratur rörande problemställningen.

Litteratursökningen har gjorts med hjälp av följande vetenskapliga databaser och sökverktyg:

- Civil Engineering Database
- Compendex
- Google Scholar
- Inspec
- Science Citation Index
- Science Direct
- Scifinder

Sökningen har gjorts huvudsakligen med olika kombinationer av följande nyckelord:

- horizontal drilling
- impression
- indentation
- multilayer
- no-dig
- PE/HDPE/polyethylene
- pipe
- point load
- score
- scratch
- stone
- trenchless

Litteratursökningen har även innefattat en inventering av tillämpliga standarder rörande tryckrör av plast för vatten- och gasdistribution.

Funnen relevant litteratur har därefter granskats och utvärderats. Slutligen har resultaten sammanfattats och utvärderats i föreliggande rapport.

1.2 Allmänt om tillgänglig litteratur

Det mesta av litteraturen med direkt tillämpning mot projektets huvudfokus hittas i europeiska publikationer för rörtillämpningar, framför allt i proceedings från konferensen *Plastics Pipes* och den tyska tidskriften *3R International*. Referenser av mer akademisk karaktär återfinns i de stora poly-

mertidskrifterna, till exempel *Polymer*, *Polymer Testing* och *Plastics, Rubber and Composites*. En del intressant har dock även hittats i tidskrifter med fokus på tryckkärl och mekanik i allmänhet. *American Society for Civil Engineers* publicerar ett antal tidskrifter med bygg- och anläggningsfokus där bland annat mycket kunskap om grävningsfria anläggningstekniker återfunnits.

Den tidigaste referensen som har hittats är från 1953 (Spencer & Footner). Där talas om beständighet hos rostskyddscoating av fyllda bitumenmaterial.

Den allmänna problematiken med långtidshållfasthet hos polymera material – och specifikt polyeten – i mark, är intressant inte bara för rörledningar utan behandlas i litteraturen även med fokus på geomembran. Geomembran används i jordkonstruktioner för att minska eller förhindra genomströmning av vätskor eller gaser, se till exempel Svenska Geosyntetföreningen (2006).

1.3 Läsanvisningar

Texten nedan baseras på ett ganska stort källmaterial. Redogörelserna för enskilda författares resultat är inte fullständiga, och det är inte säkert att all relevant information från de artiklar, böcker och rapporter som refereras finns återgiven. Läsa uppmanas därför att konsultera originalkällan om något framstår som särskilt intressant. All litteratur i referenslistan finns att tillgå från svenska bibliotek.

2 Slutsatser

De viktigaste slutsatserna från litteratursökningen är:

- Punktlast mot rörväggen är en signifikant orsak till skador på ledningar. Detta har visats genom fältstudier av faktiska haverier (avsnitt 3).
- Repor kan uppträda i rörväggen vid installation med grävningsfria tekniker. Det är dock osannolikt att uppnå repdjup som överskrider dagens *de facto*-standard på 10 % av vägg tjockleken förutom vid små rördimensioner med små vägg tjocklekar. Rörspäckning leder till djupare repor än styrd borrhning. Faktum är att styrd borrhning inte ger upphov till repor som är väsentligt djupare än vad som kan uppstå vid ”normal” hantering under transport och leverans. Ovarsam hantering av rören på arbetsplatsen kan dock leda till avsevärda skador på ytskiktet (avsnitt 4.1).
- Repor i rörväggen skulle kunna fungera som sprickanvisningar. Så kallade *notchar* används regelmässigt för att accelerera spricktillväxt i laboratorieförsök. I vilken utsträckning ”fältmässiga” repor har en notch-effekt är inte känt. Man vet dock att geometrin hos en sprickanvisning har stor betydelse för hur stor accelerationseffekt den har (avsnitt 6.2).

- Även oaktat eventuell notch-effekt, gör en repa att rörets förmåga att bära ett inre tryck minskar – ungefär i proportion till tjockleken av det kvarvarande ligamentet. Detta på grund av att ringdragspänningarna vid repan måste bäras av en tunnare rörvägg (avsnitt 4.2).
- Stenintryckningar kan uppträda vid installation med grovkornig kringfyllning. Fältstudier indikerar att risken är större då rundkornigt naturgrus används än då man återfyller med mer skarpkantat krossmaterial (avsnitt 5.1).
- Stenintryckningar leder till töjningskoncentrationer i rörväggen och således en förhöjning av påkänningsnivån som skulle kunna fungera som en sprickanvisning. Det finns en korrelation mellan provningsmässiga brotttider för rör belastade med punktlast och det snabba och förhållandevis enkla FNCT-provet (avsnitt 5.2). Ingen redovisning har hittats om i vilken utsträckning punktlast som sådana påverkar långtidshållfastheten hos faktiskt rör.
- Det pågår alltjämt ett intensivt forskningsarbete om långtidshållfasthet hos polyeten med avseende på långsam spricktillväxt (avsnitt 6) och teknikutvecklingen har gått fort de senaste åren vad gäller läggningstekniker (avsnitt 7.1) och nya produkter (avsnitt 7.2).

Sammanfattningsvis: Man vet en hel del genom empiriska studier om hur stora skador man kan få på rören vad gäller repor och intryckningar. Hur dessa påverkar rörets hållfasthet på kort sikt, det vill säga risken för plastiska snabba brott, kan förmodligen hanteras med de beräkningsmodeller som finns. Sådana brott förekommer emellertid sällan i praktiken.

Ledningshaverier har oftast sin orsak i spröda brott genom långsam spricktillväxt. Mycket forskning har gjorts kring långtidshållfasthet med avseende på långsam spricktillväxt, framför allt för polyeten, och många beräknings- och förklaringsmodeller har föreslagits för hur sprickor initieras och tillväxer. Sprickanvisningar, som accelererar sprickinitiering, tycks framför allt ha studerats med fokus på att erhålla snabbare provningsresultat med hjälp av så kallade *notchar*. Och man har god kännedom om hur resultaten från olika provningsmetoder korrelerar.

Man vet dock inte i vilken utsträckning verkliga repor och intryckningar fungerar som sprickanvisningar. Det är den viktigaste kunskapsluckan som behöver fyllas innan man kan börja utarbeta kravgränser och provningsmetoder med avseende på repor och intryckningar.

Det faktum att fler haverier inte rapporteras in talar för att de tumregler som branschen idag jobbar efter är konservativa nog. Det innebär, å andra sidan, att det finns utrymme att ytterligare förbättra kostnadseffektiviteten med avseende på markförlagda plaströrssystem.

3 Skador på rör i fält

Ett flertal sammanställningar av verkliga skadefall på tryckrörsledningar av plast har gjorts, se till exempel Lustiger (1985 & 1995) och Scholten och Rijpkema (1992). I nästan samtliga fall är den bakomliggande orsaken någon abnormalitet – ett materialfel eller en sekundär belastning utöver det invändiga trycket. Sådana sekundära belastningar kan till exempel utgöras av punktlaster från stenar i fyllningen.

Duvall har redovisat en undersökning (2002) av haverier i tre stora HDPE-rör. I ett av fallen var intryckning av ett hårt föremål i rörväggen den direkta orsaken till att en spricka utbildats ifrån områden med förhöjda dragspänningar på rörväggens insida.

En studie av 45 st. profilväggsrör av HDPE för motorvägsdränering i South Carolina, USA, har genomförts av Gassman m.fl. (2005). Rören valdes ut statistiskt med avseende på diameter, ålder, etc. för att spegla populationen. 60 % av de undersökta rören hade inga invändiga skador. Övriga rör var i olika utsträckning skadade av tiden i drift. Inbuktningar, sannolikt orsakade av att stenar i fyllningen penetrerat den yttre profilväggen sågs på 20 % av rören. 29 % av rören uppvisade istället utbuktningar, som en konsekvens av dålig understoppning vid packningsarbetet.

Punktlaster mot rörväggen tycks alltså vara en signifikant orsak till ledningshaverier och kunskap om hur livslängden påverkas av intryck och repor är väsentlig. Detta oavsett om nya typer av flerskiktströr eller nya metoder för rörläggning introduceras på marknaden.

4 Repor

Repor är inte på något tydligt sätt behandlade i standarder och dimensioneringsanvisningar. Man förlitar sig i dagsläget på att de repor som uppstår är hanterbara inom ramarna för de säkerhetsfaktorer avseende godstjocklek på 2¹ respektive 1,25 som används för gasrör (SS-EN 1555) och vattenrör (SS-EN 12201). Många rörtillverkare rekommenderar själva att maximalt repdjup får uppgå till 10 % av väggstjockleken (nordisk Wavin A/S 2002, Pipelife Sverige AB 2002, Rix 2005). Det skulle medföra en spänningsökning på 11 % enligt ekvation (1), sidan 6, vilket åtminstone för vattenledningar utgör en väsentlig del av säkerhetsmarginalen. Utöver detta tillkommer risken för ytterligare brottmekanisk spänningskoncentration. Det maximala djupet på 10 % tycks inte vara grundat på några egentliga undersökningar av repors konsekvenser för livslängden men har ändå fått något av en *de facto*-status som branschstandard.

¹ I SS-EN 1555-1 anges att säkerhetsfaktorn skall vara minst 2 eller högre om så anges i nationell lagstiftning.

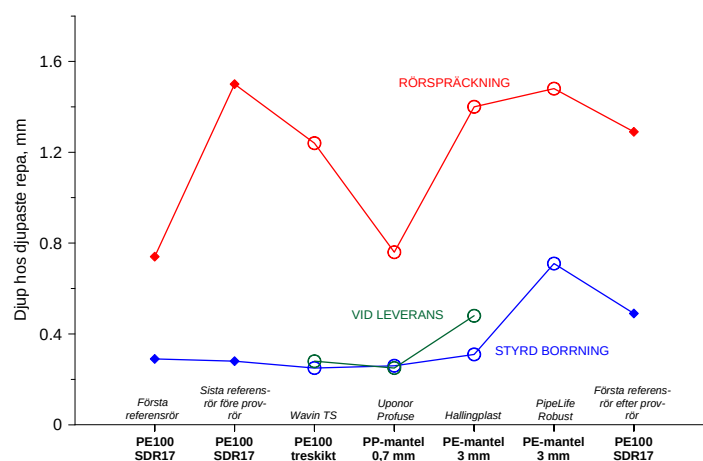
4.1 Hur uppstår repor?

Repor i rörväggen har inte fått särskilt stor uppmärksamhet förrän under de senaste åren då grävningsfria tekniker, såsom styrd borrhning, rörspräckning, etc, kommit i ropet. Några empiriska undersökningar har dock gjorts. Stokes m.fl. (2000 & 2001) tittade på repdjup i rör som lagts med styrd borrhning och rörspräckning i ett antal olika installationsprojekt. Mätningarna visade tydligt att rörspräckning normalt medför djupare repor än styrd borrhning, i storleksordningen 1 mm kontra 0,2 mm. Man drog slutsatsen att det endast är vid rörspräckning med små rördiametrar, och alltså små väggstjocklekar i absoluta mått, som repdjupen riskerar överskrida 10 % av väggstjockleken. Se Tabell 1 för detaljer.

Tabell 1. Statistik över de mest prominenta reporna i undersökningar av Stokes m.fl. (2000 & 2001).

	Styrd borrhning	Rörspräckning	
	Ø90 SDR11	Ø90 SDR11	Ø180 SDR11
Antal undersökta rör	5 st	19 st	5 st
Djupaste repa	0,157 mm	0,899 mm	0,916 mm
Medelvärde	0,107 mm	0,343 mm	0,433 mm
Standardavvikelse	0,028 mm	0,234 mm	0,287 mm
99,9 % konfidensgräns ²	0,191 mm	1,043 mm	1,295 mm

En liknande studie gjordes av Nilsson & Thörnblom (2005) som bekräftar Stokes resultat. Det kunde vidare konstateras att den normala hanteringen av rören fram till leverans vid arbetsplatsen ger upphov till repor med djup i samma storleksordning som styrd borrhning, Figur 1, och hanteringen på arbetsplatsen – släpning av rör på grus och asfalt och över schaktkanter, etc – kan vara en väsentlig källa till repor, Figur 2.



Figur 1. Uppmätta maximala repdjup vid leverans, efter styrd borrhning samt efter rörspräckning (Nilsson & Thörnblom 2005).

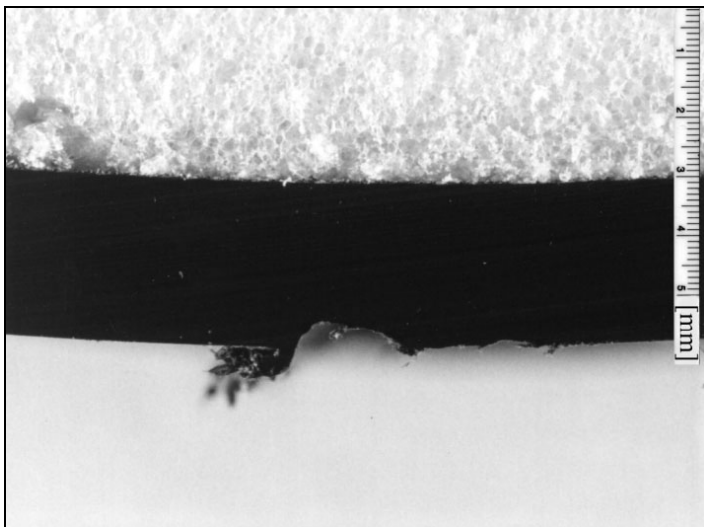
² Konfidensgränsen är ett statistiskt beräknat värde som anger det repdjup under vilket 99,9 % av alla repor förväntas ligga, baserat på uppmätt medelvärde och standardavvikelse.

Nilsson & Thörnblom undersökte också hur ytskiktets beskaffenhet på rören påverkade uppkomsten av repor. Fyra olika rör med skyddsmantel från tillverkarna Wavin³, Uponor, Pipelife och Hallingsplast användes. Ett klart samband kunde ses såtillvida att hårda ytskikt ger mindre repdjup, Figur 1. Man kan dock notera att Uponor Profuse med det hårdaste, och tunnaste, skalet var det enda röret vars mantel penetrerades.



Figur 2. Skrapskador på rör och svetsvulster efter släpning på asfalterad gata (Nilsson & Thörnblom 2005).

Repor har även studerats med bärning mot fjärrvärmerör. Fjärrvärmeledningar är under vissa förutsättningar utsatta för stora axiella rörelser genom att rören expanderar och kontraherar i takt med att temperaturen i fjärrvärmevattnet stiger och sjunker. Repor är därmed en uppenbar risk även då ledningen läggs med "traditionella" metoder utan grävningsfria tekniker.



Figur 3. Ca 0,5 mm djup repa i fjärrvärmemantelrör orsakad av krossmaterial 0 – 100 mm. (Molin m.fl. 1997).

Detta har fått särskilt intresse sedan man uppmärksammat möjligheten att återfylla runt fjärrvärmeledningar med ospecificerat material där förhållandevis stora skarpkantade stenar kan ingå. Molin m.fl. (1997) undersökte i vilken utsträckning repor uppstår då fjärrvärmerör läggs i tre olika fyllningsmaterial: krossmaterial 0 – 8 mm, krossmaterial 0 – 100 mm samt naturmaterial 0 – 100 mm. Rören utsattes för en fram- och

återgående rörelse i 50 cykler med en slaglängd på ca 40 mm. Den djupaste repa blev omkring 0,5 mm djup och uppstod i det grova krossmaterialet, Figur 3.

Liknande undersökningar har publicerats av Göhler (2004). Repor på i storleksordningen 0,1 mm kunde ses efter skarvprovningar enligt SS-EN 489 (2003) i ett fyllningsmaterial med kornstorlekar upp till ca 56 mm.

4.2 Vilka konsekvenser har repor?

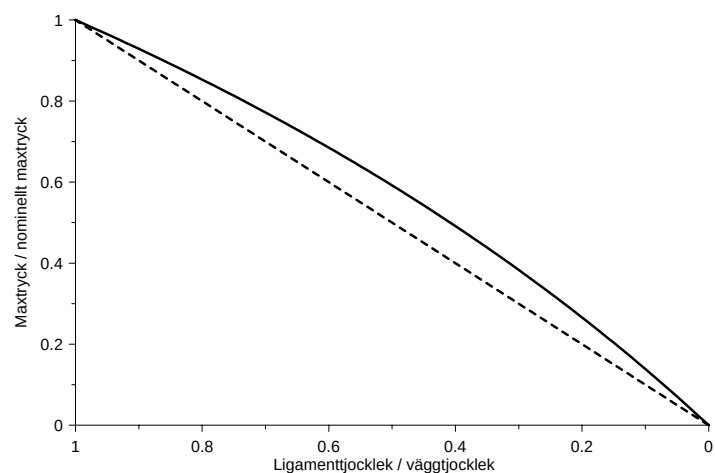
En repa i ett trycksatt rör leder med automatik till en spänningskoncentration i och med att ringdragspänningarna i rörtvärsnittet måste tas upp av en tunnare del av rörväggen. Överslagsmässigt, för en oändligt lång repa och oaktat andra geometriska effekter, är spänningsökningen i relation till den nominella spänningsnivån proportionell mot kvoten mellan rörväggens tjocklek t_{nom} och det kvarvarande ligamentet under repa t^4 :

$$\sigma = \frac{t_{nom}}{t} \sigma_{nom} \quad (1)$$

Miller (1988) har gjort en stor sammanställning av hur geometriska defekter påverkar elastisk hållfasthet och stabilitet hos en mängd olika strukturer. För trycksatta rör med ytliga repor föreslås ekvation (2) för beräkning av maximalt tryck. Se också Figur 4.

$$P_{max} = \frac{\sigma_y t}{R} \frac{\eta}{1 - (1 - \eta) / \sqrt{1 + 1,05 \rho^2}} \quad (2)$$

$$\rho = \frac{c}{\sqrt{Rt}}$$

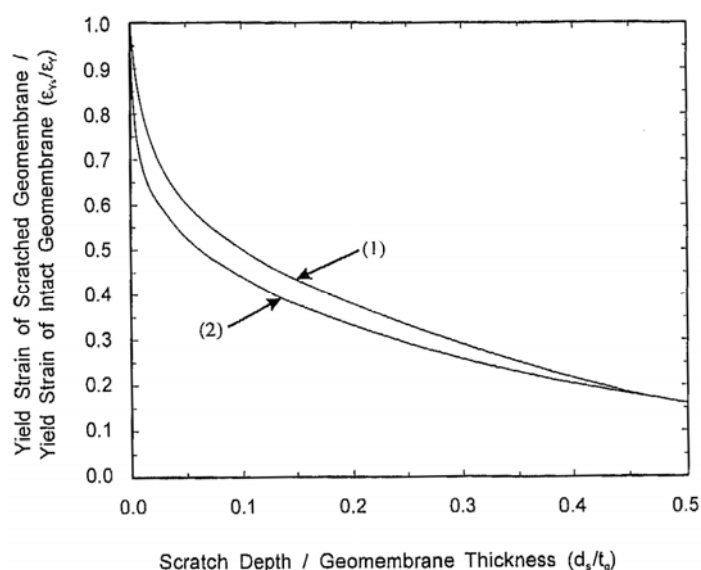


Figur 4. Maxtryck i rör med utvändigt repa som funktion av kvarvarande ligamenttjocklek i repa. Streckad linje visar linjär approximation enligt (1) och heldragen linje visar beräkning enligt (2) för ett rör Ø160 mm SDR 11 med en 200 mm lång repa.

³ Röret från Wavin hade inte någon skyddsmantel i egentlig mening, men var uppbyggt av tre sammanextruderade skikt av olika polyetenkvaliteter.

⁴ Beteckningar som används i ekvationer förklaras i avsnitt 10, sidan 14.

Giroud m.fl. (1994) studerade hur flyttöjningen hos geomembran av HDPE påverkas av repor. Genom så kallad *necking*⁵ kan repa "dra till sig" töjningar och brott kan uppstå vid förhållandevis små globala deformationer, Figur 5.



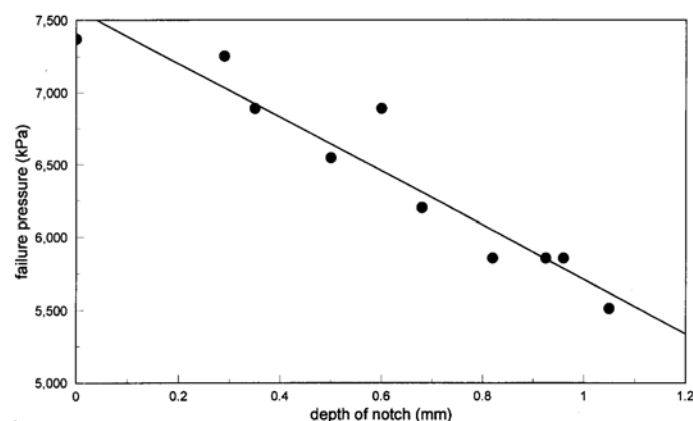
Figur 5. Global flyttöjning hos geomembran som funktion av relativt repdjup. Från Giroud m.fl. (1994).

Repa kan dessutom, beroende på dess geometri, utgöra en sprickanvisning där ett sprödbrott kan initieras. Vassa repor, eller *notchar*, används regelmässigt för att accelerera spröda brottprocesser vid laboratorieprovning av polyetenmaterial, se avsnitt 6.2.

Specifikt för plaströr tog Gaz de France ett initiativ i mitten av nittioalet för att utvärdera risken för skador orsakade av läggning. En FEM-modell för långsam spricktillväxt i PE togs fram och man studerade betydelsen av formen hos en repa med avseende på risken för SCG-brott (Ouakka m.fl. 1997). Man konkluderade att v-formade notchar leder till brott snabbare än cirkulära och rektangulära för såväl FNCT-prover⁶ som notchade rör.

Det är svårt att hitta experimentella undersökningar av repors konsekvenser för hållfasthet. Boot och Toropova (1999) har gjort mätningar av sprängtryck för tunnväggig PE100-relining av gamla rörledningar med hål och skador. Detta har man gjort genom att öka trycket i ledningen tills reliningröret deformerar plastiskt och trycks ut genom hålet i värdröret. Figur 6 visar resultat från en försöksserie där PE-röret notchats. Värdrörets innerdiameter var 182 mm och PE-rörets tjocklek var 6,25 mm. Det linjära sambandet i Figur 6 tolkar man som att ingen "notcheffekt" finns. Reduktionen i

sprängtryck med notchdjup är dock större än motsvarande hållfasthetsreduktion enligt Figur 4 ovan.



Figur 6. Sprängtryck som funktion av notchdjup i PE100-relining. Från Boot och Toropova (1999).

Moreno och Leever (1994) har tittat på hur repor påverkar risken för *Rapid Crack Propagation*, RCP. Med hjälp av S4-test (ISO 13477) har man påvisat att vassa repor har en negativ inverkan på PE100-rörs motstånd mot RCP. Den effekten är dock så liten att repdjupet behöver vara så stort att röret knappast kan användas ändå.

5 Intryckningar

Intryckningar av stenar och andra föremål i rörväggen utgör ett kontaktmekaniskt problem. Spänningar i kroppar som står i mekanisk kontakt med varandra studerades ursprungligen av Hertz i slutet på 1800-talet, se till exempel Johnson (1985). Teorin har bland annat betydelse för hårdhetsprovning av material, där intryckskroppar av olika geometrier trycks in i materialprover för att bestämma dess egenskaper. Empiriska studier av intryck i plastmaterial har publicerats av bland andra Darlix m.fl. (1986), Benabdallah & Chalifoux (1994) och Benabdallah (1995 & 2002).

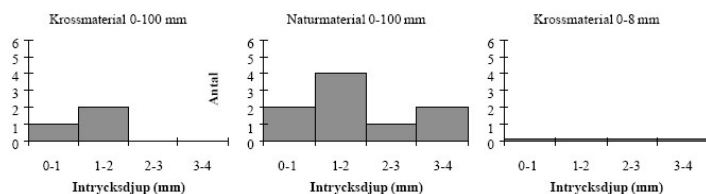
5.1 Hur uppstår intryckningar?

Bergström och Nilsson (1999) gjorde fältförsök med gasrör av polyeten lagda i grov kringfyllning. Man studerade bland annat intryckningar i rörväggen från tre olika fyllningsmaterial: krossmaterial 0 – 8 mm, krossmaterial 0 – 100 mm samt naturmaterial 0 – 100 mm. Rören lades i en vägbank och belastades med ca. 8000 överfarter av tung trafik. Med hjälp av en videokamera konstaterades att det kraftigaste intrycket var omkring 8 mm djupt i ett Ø160 mm SDR11-rör av PE80-kvalitet. Efter uppgrävning lokaliserades stenen som gav upphov till intrycket: den var av naturgrusfraktion (med rundade kanter), låg under röret och hade ett största mått på ca. 125 mm. I samma projekt genomfördes även försök med fjärrvärmerör (Molin m.fl. 1997). De djupaste kvarstående intrycken som observerades efter uppgrävning av rören var

⁵ Om ett tvärsnitt är förtunnat i något område kommer spänningarna att öka i proportion till defekten, jämför ekvation (1). Om spänningarna lokalt når upp till flytspänningen, uppträder plastiska deformationer vid defekten. Detta fenomen, med lokalt mycket stora deformationer, kallas för *necking*.

⁶ Se avsnitt 8, sidan 12.

omkring 4 mm⁷. När rören legat i marken har intrycken sannolikt varit något djupare. Intressant att notera är att det grova naturmaterialet orsakade avsevärt fler och djupare intryck än krossmaterialet.



Figur 7. Antal och djup av kvarstående intryck i ett av de provade fjärrvärmerörerna (Molin m.fl. 1997).

Vidare studier av intryck i fjärrvärmerör har gjorts av Nilsson (2000) och Bergström & Nilsson (2001). Fokus har framför allt varit på sidoförskjutningar av fjärrvärmeledningar mot stenar inbäddade i kringfyllningen. En intressant slutsats är att intrycksdjupet, vid sidoförskjutning, i stor utsträckning beror på fyllningens packningsgrad. Vid lös packning kan inga stora jordtryck mobiliseras på stenen och följaktligen kan inga stora kontaktkrafter etableras mellan sten och rörvägg. Om, å andra sidan, fyllningen är mycket hårt packad fås ingen koncentration av jordtrycket och inget punktlastfall uppstår. Det kritiska fallet tycks vara ”normalhård” packning.

Bryder m.fl. (1996) studerade risken för att fjärrvärmerör punkteras av spadar etc. under installationsarbete. Detta gjordes genom belastningsförsök där fjärrvärmerör punktbelastades med kilformade verktyg. Slutsatsen var polyetenröret är svårt att penetrera med en korttidsbelastning: mycket stora deformationer krävs innan rörväggen brister.

5.2 Vilka konsekvenser har intryckningar?

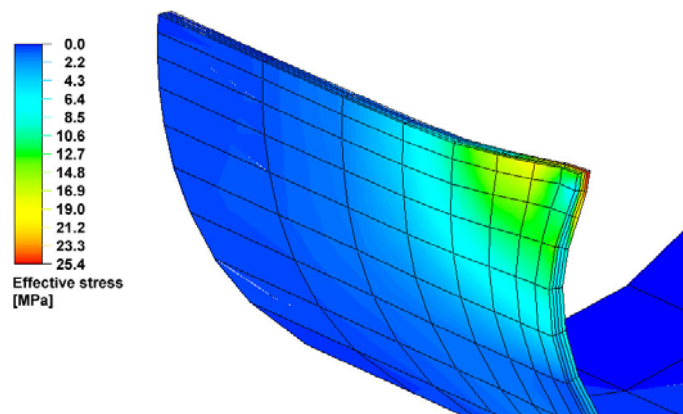
Med hänsyn till rörledningars långtidsbeständighet är dock inte kontaktspanningarna som sådana av primärt intresse. En rörkonstruktion har en förhållandevis liten styvhet och kommer att deformeras av stenens kontaktkraft. Stabilitet hos tunnväggiga rör utsatta för intryck och samtida inre laster har undersökts av Wierzbicki & Suh (1988), som bland annat visade att ett tunnväggigt rörs motståndskraft mot intryckslaster är starkt beroende av axialkraften i röret – strukturen är känslig mot samtida intryck och tryckande axialkrafter. Lancaster & Palmer (1996) har visat att djupa intrycksdeformationer kan medföra starka koncentrationer av påkänningar i trycksatta rörledningar: töjningskoncentrationsfaktorer på mellan 10 och 30 kunde ses vid trycksättning av rör med djupa intryck. Vilka krafter som krävs för att åstadkomma ett intryck i ett tunnväggigt rör har studerats av Hyde m.fl. (2005a & b) som har jämfört analytiska och numeriska beräkningsresultat och av Liu & Francis (2004), som har tagit fram

en elegant analytisk lösning av vilken kraft F som krävs för att åstadkomma ett intryck med djupet δ :

$$F = \sigma_y t \sqrt{Rt} \left[f_1 + f_2 \frac{1}{2} \sqrt{\frac{t}{R}} \right] \quad (3)$$

$$\begin{cases} f_1 = 4 \sqrt{0,7\bar{\delta}\sqrt{2\bar{\delta}}} \left[0,75 + \frac{1}{3} \bar{p} \sqrt{\bar{\delta}(2-\bar{\delta})} \right] \\ f_2 = 1,5 + \bar{p} \sqrt{\bar{\delta}(2-\bar{\delta})} \\ \bar{p} = \frac{PR^2}{\sigma_y t^2} \\ \bar{\delta} = \delta/R \end{cases}$$

För plaströr torde den kritiska belastningen vara böjpåkänningar på rörväggens insida där den kröker sig runt stenen. Ett stort invändigt tryck kan härvid medverka till att göra de lokala böjtöjningarna större. Om intryckningen blir djup nog fås en ytterligare förhöjning av påkänningarna i rörväggen genom utsträckning av materialet, Figur 8.



Figur 8. 10 mm djupt intryck i fjärrvärmemantelrör $\varnothing 160 \text{ mm} \times 3,0 \text{ mm}$. En fjärdedel av intrycket visas, med symmetrinsnitt längs med och vinkelrätt rörets axel. Färgerna visar von Mises effektivspänning⁸ som är ett mått på påkänningsnivån.

Såsom påvisats av Bryder m.fl. (1996) är det i praktiken nästan omöjligt att punktera ett polyetenrör med en intrycksbelastning på grund av materialets flexibilitet och stora brottöjning. Mycket djupa intryck kan dock leda till stora biaxiella dragtöjningar med så kallad *necking*⁹ som konsekvens. Tjueliene m.fl. (1999) har studerat detta med avseende på geomembran, och konstaterat att de stora biaxiella deformationerna kan ge en avsevärd tjockleksminskning och en förändring av polyetenmaterialet i så motto av kristalliniteten avtar. Den kritiska brottmekanismen för ett plaströr utsatt för en stenintryckning är dock sannolikt inte korttidspunktering,

⁸ Von Mises effektivspänning kan tecknas

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}}$$

⁹ Se not på sidan 7.

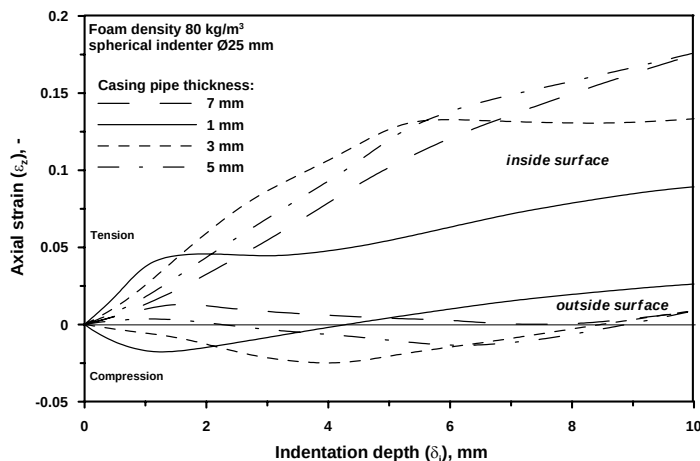
⁷ Fjärrvärmerörerna hade en utvärdig diameter på 160 mm och en mantel av ca. 3 mm tjock HDPE.

utan snarare långsam spricktillväxt i måttligt överbelastade materialzoner med så kallat stadium II-brott som konsekvens, se Figur 19, sidan 14.

Nilsson (2000) har studerat påkänningarna i fjärrvärmemantelrör utsatta för stenintryck och konstaterat att dragtöjningarna på rörväggens insida blir större med ökande väggjocklek, Figur 9. Lastfallet är annorlunda för ett fjärrvärmemantelrör jämfört med ett ”vanligt” plaströr i så motto att röret är fyllt med polyuretancellplast på insidan. Rörväggen får därmed stöd inifrån och blir mer benägen att kröka sig runt stenen och anta stenens krökningsradie. Böjtöjningen ε vid väggjockleken t och krökningsradien r kan uttryckas:

$$\varepsilon = \frac{t}{2r + t} \quad (4)$$

Ekvation (4) är giltig om intrycket i röret är så djupt att rörväggen kröks runt den inträngande stenen. För ett gas- eller vattenledningsrör, med en fluid på insidan, krävs ett djupare intryck för att detta skall inträffa.

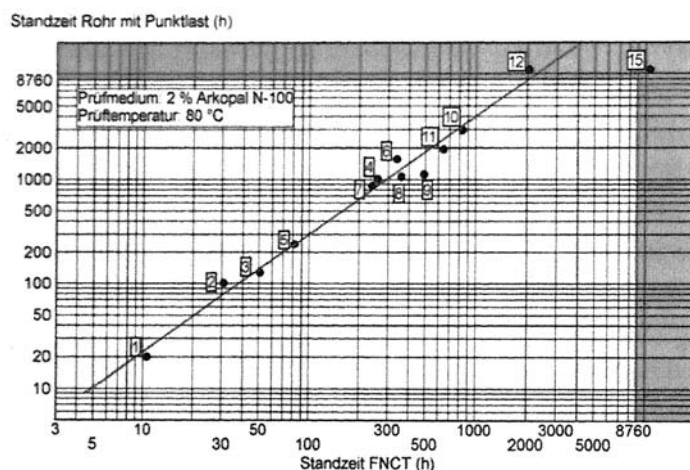


Figur 9. Töjningar i axialled på insidan av ett fjärrvärmemantelrör som funktion av intrycksdjup för olika rörväggstjocklekar. Från Nilsson (2000).

Experimentella undersökningar av livslängd hos rör utsatta för intryck under accelererade betingelser med förhöjd temperatur och vätmedel har gjorts av bland andra Lenz (2001) och Rouyer & Cornette (2001). Med hjälp av speciella provningsriggar har rör av PE och PEX utsatts för samtidigt invändigt tryck och utvändigt punktlast. Inga speciellt intressanta resultat har dock redovisats förutom av Hessel (2001a & b), som påvisade tydliga samband mellan brottider uppmätta på FNCT-provstavar (se avsnitt 8) och intryckprover, Figur 10. Detta antyder att säkerhet hos rör med avseende på punktlaster skulle kunna kontrolleras med förhållandevis enkla och snabba provningsmetoder. Hessel konstaterade i övrigt att intryckets djup och radien hos intrycksstämpeln har mycket lite inverkan på brottiderna. Försök gjordes även med invändig notch under intrycket, med slutsatsen att brottiderna förkortas med en faktor ca. 3,7 praktiskt taget oavsett notchens djup.

Baserat på dessa slutsatser föreslår Hessel & Grieser (2005) en schematisk metod för att ta fram säkerhetsfaktorer med avseende på punktlaster och andra ”icke beräkningsbara” belastningar som i princip går ut på följande:

1. En materialklassificering.
2. FNCT-provning i vätmedel och i rent vatten för att bestämma brottaccelerationen från vätmedlet.
3. Provning med ”komplex” belastning (till exempel punktlast) i vätmedel.



Figur 10. Korrelation mellan brottider för punktblastade rörprover och FNCT-prover. Från Hessel (2001a).

I vissa fall, exempelvis för icke-trycksatta rör, är ett stenintryck huvudsakligen ett deformationsstyrt lastfall. Det innebär att stenen medför en deformation i rörväggen som hålls konstant under det att spänningarna i materialet relaxerar med tiden. Relaxationsfall är svåra att accelerera då en höjning av temperaturen, som normalt används för att påskynda spricktillväxt, även gör att de viskoelastiska processerna – och därmed spänningsrelaxationen – går fortare. Detta har studerats experimentellt i Nilsson (2004). Där påvisas bland annat att notchade prover under stora töjningar går till brott fortare med ett PE100-material än med ett PE63-material, vilket sannolikt är en konsekvens av snabbare spänningsrelaxation.

6 Långsam spricktillväxt i polyeten

Långsam spricktillväxt, eller *Slow Crack Growth* (SCG), leder till sprödbrott, eller så kallat stadium II-brott, se Figur 19, sidan 14. Det är en mekanism som kommer till uttryck vid måttliga påkänningsnivåer som inte leder till plastiska krypbrott, och det är ett fenomen som kräver att en spricka initieras – genom en defekt i materialet eller genom en mekanisk skada i ytskiktet. SCG kan alltså bli en konsekvens av repor och intrycksskador och det är i sammanhanget intressant att titta närmare på fenomenet.

I motsats till spröda material, där en spricka normalt är antingen stationär eller propagerar med hög hastighet, kan polyeten uppvisa en stabil och långsam spricktillväxt där propage-

ringen styrs av bildandet och nedbrytningen av starkt utdragna *fibriller* vid sprickspetsen (Williams, 1987). Sådana regioner med orienterat material kallas för *crazes*. Brottet sker genom att molekyler som håller samman flera områden av kristallint material bryts sönder eller lossnar (Kausch 1986 & 1987). Material med en hög andel så kallade *tie molecules* har således en bättre hållfasthet med avseende på SCG.

En stor mängd vetenskapliga arbeten har publicerats inom området, bland annat vad gäller applicering av brottmekaniska teorier. Exempelvis kan nämnas att Brown och Lu (1995) och Slay m.fl. (1999) har presenterat teorier för hur sprickan tillväxer som funktion av spänningsintensiteten vid sprickspetsen.

6.1 Utvärderingsmetoder

Det finns ett antal standardiserade provningsmetoder för att utvärdera långtidshållfastheten hos polyetenmaterial med avseende på långsam spricktillväxt. Det finns tre huvudstrategier för att accelerera sprickförloppet: provning vid förhöjd temperatur, provning i vätmedel och brottinitiering med *notch*, eller sprickanvisning. Normalt används någon eller samtliga av dessa principer för att erhålla brottvärden inom rimliga provningstider.

Tabell 2. De viktigaste provningsmetoderna med avseende på långsam spricktillväxt i polyeten (Grosse-Boes & Kloth, 2004).

Provning i inert medium	Notched Pipe Test (NPT)	SS-EN ISO 13479 ¹⁰	Provning av rör.
	Polyethylene Notch Test (PENT)	SS-ISO 16241	Notchade Dragprovstavar från plattor.
Provning i vätmedel	Bell Telephone Test	ASTM D 1693	Notchade provstavar utsätts för konstant deformation.
	Notched Constant Tensile Load Test (NCTL)	ASTM D 5397	Tunna timglasprover med notch.
	Cone Test	ISO 13480	Uppdörning av rör till större diameter. Lastfall med konstant deformation.
	Full Notch Creep Test (FNCT)	ISO 16770	Kvadratisk dragprovstav med notch runt om.

¹⁰ En kort sammanfattning av de viktigaste standardmetoderna ges i avsnitt 8, sidan 12.

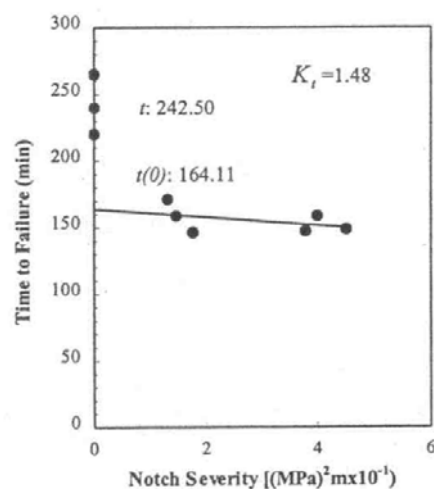
Grosse-Boes och Kloth (2004) har gjort en sammanställning av de vanligaste standardmetoderna, Tabell 2, och konkluderat att *Notched Pipe Test* (Allwood & Beech, 1993) är den mest lämpade för att utvärdera hållfastheten hos faktiska rör. Beech & Clutton (2005) har kommit till samma slutsats. FNCT-provet, som används mycket för att karakterisera polyetenmaterial, bör inte användas som referenstest för rörspecifikationer. NPT-provet är mer tillförlitligt för det ändamålet. Haager m.fl. (2004) menar att brottmekanismen vid FNCT-provning inte är densamma som vid SCG-brott i rör, trots att brottytorna ser sådana ut. Istället utbildas en crazezon som växer genom hela ligamentet innan fibrillerna börjar brista och sprickan börjar växa.

Många undersökningar har publicerats om korrelationen mellan resultat från olika provningsmetoder och hur man går till väga för att snabba på sprickförloppet och minska provningstiden utan att försämra precisionen i metodiken. Grace Hsuan (2000) gjorde en studie av spricktillväxt i geomembran och jämförde det så kallade Bell-testet med NCTL-provning och konstaterade att det inte är bra nog. Krishnaswamy (2005) hävdar att det inte finns någon korrelation alls mellan spröda brott i rörprover och resultat från PENT-testet.

Statisk provning på dragprovstavar är den dominerande principen för utvärdering. *Bell test* och *Cone test* enligt Tabell 2, med prover satta under konstant deformation och spänningsrelaxation, utförs endast i undantagsfall. En annan provningsstrategi kan vara utmattningsprovning. Bland andra har Favier (2002) och Pinter m.fl. (2004 & 2005) behandlat utmattningsprovning av polyeten.

6.2 Notchens inverkan

En repa i rörväggen kan, under ogynnsamma förhållanden, fungera som en notch och initiera ett sprött brott i materialet. Hur stor en sådan effekt är kan bero på notchens geometri, det vill säga hur djup och vass den är. Det beror också på materialets egenskaper.



Figur 11. Bestämning av notchkänslighetsfaktor. Notch severity på den horisontella axeln är notchdjupet multiplicerat med den pålagda spänningen i kvadrat. Från Niu m.fl. (2000).

Niu m.fl. (2000) definierade en notchkänslighetsfaktor K_t , som gränsvärdet för kvoten mellan brotttiden för ett onotchat krypbelastningsprov och ett notchat prov då notchdjupet extrapoleras mot noll, Figur 11. En motsvarande storhet formulerades även för korttidsbelastningar med slaghållfasthet som styrande egenskap. Relationen i Figur 11 ger en notchkänslighetsfaktor på 1,48, vilket man jämfört med motsvarande värde för polybutylen (PB). Slutsatsen var att K_t för PB var mycket högre, och att PE således är bra med avseende på notchkänslighet.

En hel del undersökningar har gjorts kring hur brottiderna påverkas av notchens geometri och av hur notchen produceras. 1987 konstaterade Lawrence och Sumner att metoden för att skära notchen kan påverka tiden till brott med en faktor 2. Man föreslår också att notchen aldrig skall vara djupare än 2 mm. Kuhlman m.fl. (1992) föreslår att notchdjupet bör vara konstant i absoluta termer, det vill säga samma notchdjup oberoende av provets tjocklek. Detta skulle medföra att brottiderna blir dimensionsoberoende. Man pekar också på vikten av att känna till de inbyggda spänningarna i materialet om provstavar tas från ett rörprov. Extrusionsprocessen kan göra att man får tryckspänningar på utsidan av en provstav som skärs ut ur ett rör, vilket ger missvisande brottider. En modernare undersökning på detta tema har gjorts av Kratochvill m.fl. (2005). Även Lu m.fl. (1991) som jämfört brottider för prover med notcher tillverkade på olika sätt. Det standardmässiga sättet att skära notchen med ett vanligt rakblad visade sig vara det mest effektiva. Ouakka m.fl. (1997) har studerat inverkan av notchens form med hjälp av FEM-beräkningar av FNCT-prov, och konstaterat att en v-formad notch går till brott snabbare än en cirkulär och en rektangulär. Haager m.fl. (2004) hittade emellertid inte någon inverkan på brottider vid FNCT-prov från notchningsverktyg eller notchradie. Man hypotiserar om att detta kan bero på att man inte får något egentligt SCG-brott vid FNCT-provning, se resonemang i avsnitt 6.1 ovan.

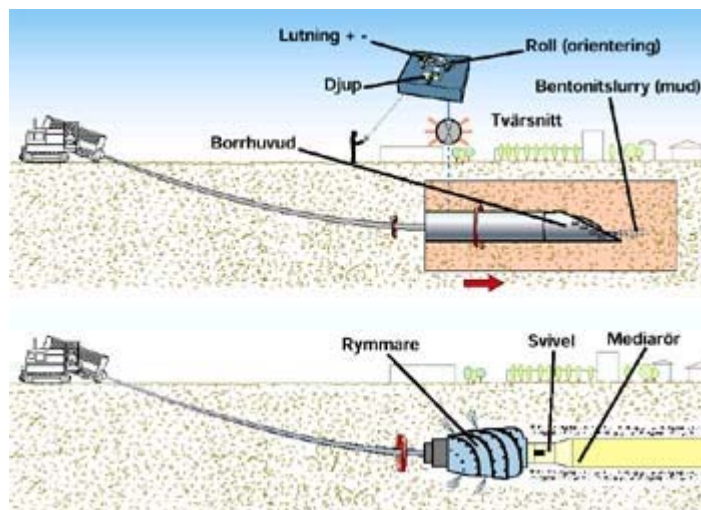
7 Ny teknik

7.1 Grävningsfri rörläggning

Det finns ett antal olika tekniker för ledningsbyggande och ledningsrenovering som kan inordnas som grävnings- eller schaktfria. En bra översikt på svenska har gjorts av Borrås m.fl. (2005) och Styrd (2006).

*Styrd borrhning*¹¹ är kanske det man i första hand avser när man pratar om grävningsfri teknik. Med ett styrbart borrhuvud görs ett pilothål genom vilket sedan en rymmare dras med det nya röret ”på släp”, Figur 12. Det finns alternativa borrhningsmetoder, som *AT-borrhning* och *raiseborrhning* som kan användas vid tuffare markförhållanden. Det finns också

metoder som går ut på att slå eller trycka fram rör, snarare än att styra sig fram genom marken. Exempel på sådana metoder är *jordraket*, *rörtryckning* och *rörrammning*. En kombinerad variant kan *hammarborrhning* sägas vara, där man med en tryckluftshammare slår fram en roterande borkrona. Zwierchowska (2006) har tagit fram en matematisk modell som möjliggör ett ekonomiskt optimalt val av grävningsfri läggningsmetod utifrån givna indata vad gäller rördiameter, marktyp, avstånd, etc.



Figur 12. Principerna för styrd borrhning, från Styrd (2006).

Vad gäller renovering av gamla ledningar har man två huvudalternativ. Man kan antingen ersätta ledningen genom att spräcka upp röret och dra ett nytt på plats. Detta kallas *rör-spräckning*, eller *bursting*. Det andra alternativet är att dra ett nytt rör inuti det gamla, så kallad *relining*. Vid relining med PE-rör finns möjligheten att tillfälligtvis reducera rörets tvärsnitt så att det kan dras in i den befintliga ledningen och därefter återta sin ursprungliga form. Genom ett sådant förfarande reduceras inte flödesarean i ledningen mer än nödvändigt. Det finns ett antal olika principer för hur rörets tvärsnitt förminskas, se till exempel Boot och Toropova (1999), IDS Water (2006) eller Kompri (2006). *Swagelining* eller *die drawing* innebär att röret värms upp och pressas genom ett koniskt munstycke så att dess diameter förminskas. Wrobel m.fl. (2004) har studerat hur stora krafter som krävs för att pressa samman röret och hur dess formåtergång ser ut. *Roll-down* är en teknik där röret pressas genom rullar och därmed förminskas. Med *subline*-teknik ”viks” röret till en U-form innan det dras in i den befintliga ledningen.

Framför allt styrd borrhning är en växande verksamhet. Allouche (2002) menar att tillväxten i Nordamerika har skett så snabbt att kvalitetssäkringen inte riktigt har hängtt med, och pekar bland annat på risken för skador på det installerade röret. Skadornas art kan till exempel vara överbelastning av röret med för stora dragkrafter, och skrapskador från stenar och annat i marken. Åtgärder för kvalitetssäkring med avseende på sådant kan till exempel vara svaga länkar i dragutrustningen som brister vid för stora dragkrafter och att före-

¹¹ *Horizontal Directional Drilling* på engelska. HDD är en vanligt förekommande förkortning.

skriva att 1 % av rörlängden dras ut för inspektion efter skador.

Det uppstår en hel del krafter på röret under dragningen som tas upp som dragspänningar i rörväggen. Friktionskrafter uppträder mellan röret och omgivningen, och dessa blir större om ledningen dras genom krökta borrhål. En sammanställning av metoder för kraftberäkningar och dimensioneringsprinciper har gjorts av Petroff (1997) och en analytisk beräkningsmodell har utvecklats av Polak & Chu (2005). Dragkraften ökar ju längre rörsträcka som finns i borrhålet och blir i regel större ju större ytterdiameter röret har. Dragkraften ger i sin tur upphov till dragspänningar i rörväggen som gör att röret förlängs.

Mätningar av dragkrafter och töjningar i rör under installation med styrd borrhörning har studerats av flera författare, se till exempel Gelin m.fl. (2000), Colwell och Ariaratnam (2003), Polak m.fl. (2004) och Nilsson och Thörnblom (2005). Mätningar av repdjup i rörväggen till följd av att ledningen dras förbi stenar och annat i marken är svårare att hitta i litteraturen. Studier har gjorts av Stokes m.fl. (2000 & 2001) och Nilsson och Thörnblom (2005), se avsnitt 4.1.

7.2 Rör med skyddsskikt

Under de senaste åren har en hel del hänt på området flerskiktsrör. De flesta större rörtillverkare har presenterat nya produkter med utvändigt skyddsskikt, och många uppfinningar på detta tema kan återfinnas i patentdatabaser.



Figur 13. Flerskiktsrör på marknaden: a) Wavin TS, b) Uponor Profuse, c) Pipelife Robust, d) Hallingplast. Bilder från respektive tillverkares webbplats.

Skyddsskikt i sig är ingen ny företeelse. Principen har länge använts, till exempel bitumenmaterial som korrosionsskydd för rörledningar (Spencer & Footner, 1953). Polyeten har använts som coating för stålrör (Alexander & Glowach, 1995). Plaströr med utvändigt mantel av plast för mekaniskt

skydd har funnits åtminstone sedan slutet av 1990-talet, se Tabell 3.

En skyddsmantel kan dels tjäna som mekaniskt skydd vid transporter och mot omild behandling vid läggning. En fältstudie av mantelns funktion i det här avseende har gjorts av Nilsson och Thörnblom (2005). Fyra olika flerskiktsrör från Wavin, Uponor, Pipelife och Hallingsplast användes. Ett klart samband kunde ses såtillvida att hårda ytskikt ger mindre repdjup. Se vidare resultat på sidan 6. Skyddsmanteln kan också fungera som UV-skydd för huvudröret som då inte behöver pigmenteras. Den kan dessutom underlätta elektromuffsvetsning, då röret kan "skalas" istället för att skrapas och slipas för att säkerställa att ytan är ren (Harget & Bowman, 2001). Bergström m.fl. (2004) har för övrigt visat att även hållfastheten hos stumsvetsar ökar om rörväggarnas ytor skrapas före svetsning.

Tabell 3. Rör med skyddsskikt påträffade i litteratur och patentdatabaser.

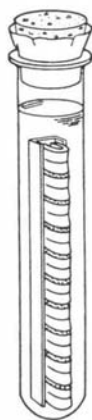
Rör	Tillverkare/ uppfinnare	Källa
HDPE + mantel av polyolefin – Framtaget för att klara grävningsskärningsfri läggningstekniker.	Egeplast (Safety-Line Mantelrohr)	Lingenhoff & Schröder, 1998. Werner, 2001.
Tvåskiktsrör av PE och PEX med bättre motstånd mot RCP.	Nupi S.p.A.	Genoni m.fl., 2001.
Tvåskiktsrör av polyester/polyester.	K. Tagawa	Tagawa, 2003.
HDPE + mantel av PP.	Uponor (Profuse)	Harget & Bowman, 2001. Bowman, 2004. Nilsson & Thörnblom, 2005. Uponor, 2006.
Polybuten + utvändigt mantel för ökad reptålighet.	Mitsui Chemicals Inc.	Tokui & Komiya, 2004.
Treskiktsrör med sammanextruderade lager av HDPE.	Wavin (TS)	Nilsson & Thörnblom, 2005. Wavin, 2006.
HDPE + mantel av tjock polyeten.	Hallingplast	Nilsson & Thörnblom, 2005. Hallingplast, 2006.
HDPE + mantel av tjock polyeten.	Pipelife (Robust)	Nilsson & Thörnblom, 2005. Pipelife, 2006.
Flerskiktsrör av termoplast – förslagsvis PE. Yttre skiktet är fyllt eller förnätat.	Geberit Technik AG	Watrinet & Gatter, 2005.

8 Standardiserade provningsmetoder

Nedan följer en kort sammanfattning av de standarder som refererats i texten ovan och som är av intresse för problematiken kring långtidshållfasthet hos plaströr med repor och intryckningar.

Bell Telephone-test – ASTM D 1693

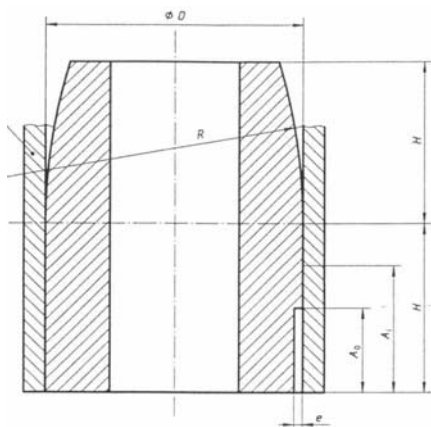
Notchade provkroppar böjs kraftigt och placeras i vätska, Figur 14. Flera prover startas, och antalet som går till brott under en given tid utvärderas.



Figur 14. Provkroppar för Bell Telephone-test (från ASTM D 1693).

Cone Test – ISO 13480

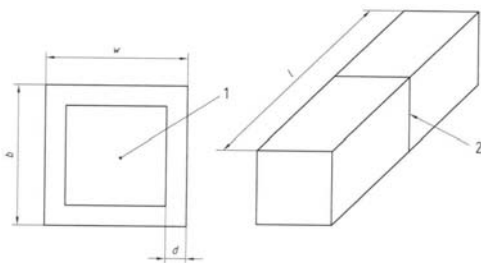
Ett notchat rörprov dornas upp med en kon, Figur 15. Sprickans tillväxthastighet utvärderas.



Figur 15. Provkropp för Cone test (från ISO 13480).

FNCT-prov – ISO 16770

Provstavar notchas runt om enligt Figur 16 och dragbelastas. Tiden till brott utvärderas.



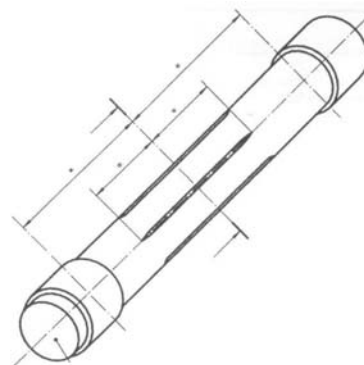
Figur 16. Provkropp för FNCT-prov (från ISO 16770).

NCTL-test – ASTM D 5397

Skall kompletteras

NPT-test – SS-EN ISO 13479

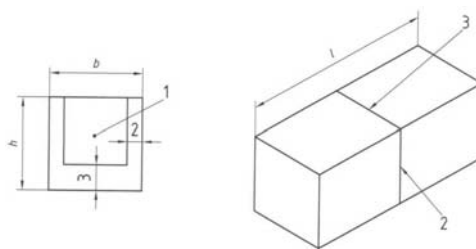
Provning av rör med invändigt övertryck vid +80 °C. Trycket bestäms utifrån materialklass och dimensionsserie. Fyra notchar fräses i röret, Figur 17. Tiden till brott utvärderas.



Figur 17. Provkropp för NPT-test (från SS-EN ISO 13479).

PENT-test – SS-ISO 16241

Dragprov vid +80 °C på provstavar tagna ur plattor. Provstavar notchas enligt Figur 18. Tiden till brott utvärderas.



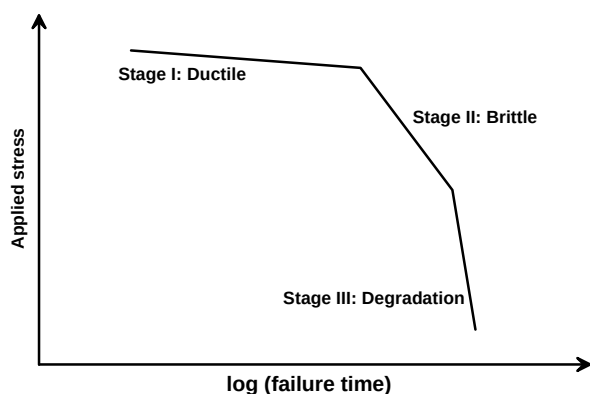
Figur 18. Provkropp för PENT-test (från SS-ISO 16241).

9 Materialegenskaper hos polyeten

Polyeten är en delkristallin termoplast, vilket innebär att en stor del av moleklykedjorna är ordnade i kristallstrukturer med högre densitet och styvhet än materialet i mellanliggande amorfa områden. Genom att variera tillverkningsprocessen kan polyeten med olika egenskaper tillverkas. De vanligaste varianterna är LDPE (Low Density), LLDPE (Linear Low Density), MDPE (Medium Density) och HDPE (High Density). De huvudsakliga skillnaderna mellan dessa är densiteten och kristalliniteten, som varierar från 915 – 935 kg/m³ och 40 – 50 % för LDPE till 940 – 965 kg/m³ och 60 – 80 % för HDPE. En ytterligare variant är tvärbunden polyeten, PEX, där moleklykedjorna är förnätade på liknande sätt som hos hårdplaster. Glastransitionstemperaturen för HDPE är omkring -120 °C och kristallitsmältpunkten ligger mellan +115 och +140 °C.

Som termoplaster i allmänhet har HDPE tidsberoende mekaniska egenskaper. Detta viskoelastiska beteende kan manifesteras antingen som krypning eller relaxation. Krypning innebär att deformationerna ökar med tiden om spänningarna hålls konstanta och relaxation innebär att spänningarna avtar med tiden om deformationerna hålls konstanta.

Vid höga spänningsnivåer är polyeten extremt segt. Materialet börjar flyta någonstans runt 20 MPa och 15 % töjning men fortsätter att deformeras upp till en brotttöjning någonstans runt 500 – 800 %. Vid låga spänningsnivåer går kryppprocessen långsamt och tiden som krävs för ett duktilt brott kan bli väldigt lång. Den sega processen kan då bli passerad av en brottmekanism som kallas långsam spricktillväxt, eller *Slow Crack Growth* (SCG), se avsnitt 6, sidan 9, för mer detaljer runt SCG. Livslängden begränsas också av den kemiska stabiliteten. Polyeten påverkas av termisk oxidation såtillvida att syre bryter upp molekylstrukturen under bildande av karbo-nylgrupper. För att göra materialet mindre känsligt mot detta tillsätts antioxidanter till polymeren. När antioxidanterna har konsumerats påverkas polyetenmolekylerna istället och materialegenskaperna försämrats snabbt. Tiden tills antioxidanterna tagit slut sätter alltså en övre gräns för den tekniska livslängden och varierar med temperaturen enligt ett Arrheniussamband¹² (Karlsson m.fl., 1992).



Figur 19. De olika brottyperna för polyeten och schematiskt deras beroende av spänningsnivåen.

Brott genom den duktila (eller sega) processen, genom långsam spricktillväxt respektive genom termisk oxidation kallas ofta för brott i *stadium I, II* och *III*. Schematiskt kan sambandet mellan påkänningsnivå och brottid i de olika stadierna illustreras som i Figur 19.

10 Beteckningar

I ekvationer och figurer ovan förekommer följande symboler:

F	Kraft	N
P	Tryck	bar, MPa
R	Rörradie	m
c	Längd hos repa	m
t	Rörväggstjocklek	m
r	Krökningsradie	m
δ	Djup hos intryck i rörvägg	m
ϵ	Töjning	%
η	Kvot mellan ligament- och väggstjocklek i repa	m
$\sigma_{1,2,3}$	Huvudspänningar	MPa
σ_e	Von Mises effektivspänning	MPa
σ_y	Flytspänning	MPa

¹² Ett *Arrheniussamband* innebär att logaritmen av reaktionshastigheten är proportionell mot den inverterade absoluta temperaturen, dvs. $A = Be^{-Q/RT}$.

11 Referenser

- Alexander M. & Glowach A. M. (1995). Success and failure of multi-layer epoxy/polyethylene coating for pipe, *11th International Conference on Pipeline Protection*, ss. 249-62.
- Allouche E. N. (2002). Implementing quality control in HDD projects—a North American prospective, *Tunneling and Underground Space Technology*, vol. 16: suppl. 1, ss. S3-S12.
- Allwood W. J. & Beech S. H. (1993). The development of the 'notched pipe test' for the assessment of the slow crack growth resistance of polyethylene pipe, *Construction and Building Materials*, vol. 7: 3, ss. 157-62.
- ASTM D 1693 (1998). *Standard test method for environmental stress-cracking of ethylene plastics*.
- ASTM D 5397 (2005). *Standard test method for evaluation of stress crack resistance of polyolefin geomembranes using Notched Constant Tensile Load test*.
- Beech S.H. & Clutton E.Q. (2004). Interpretation of the results of the full notch creep test and a comparison with the notched pipe test, *Plastics Pipes XII*, Milano, 19 – 22 april, 2004.
- Benabdallah H. & Chalifoux J.-P. (1994). Small depth indentation of plastic materials, *Polymer Testing*, vol. 13: 4, ss.377-94.
- Benabdallah H. (1995). Small depth indentation of UHMW (polyethylene), *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, vol. 19: 3, ss. 247-59.
- Benabdallah H. S. (2002). Indentation of some plastic materials by indenters of different shapes, *Annual Technical Conference – Society of Plastics Engineers*, vol. 2, ss. 1681-85.
- Bergström G. & Nilsson S. (1999). *Förläggning av gasrör av polyeten i befintliga massor*, Svenskt Gastekniskt Center, Arbetsrapport SGC A23.
- Bergström G. & Nilsson S. (2001). Stone indentations in district heating pipes caused by lateral displacement of the pipeline – Experimental studies, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 6.
- Bergström G., Nilsson S. & Lindqvist L. (2004). The influence from pipe surface, weld beads and protective skins on long term failure times for PE butt fusion joints, *Plastics Pipes XII*, Milano, 19 – 22 april, 2004.
- Boot J. C. & Toropova I. L. (1999). Polyethylene thin-walled linings for water mains: development of structural design guidelines, *Tunneling and Underground Space Technology*, vol. 14: suppl. 2, ss. 13-28.
- Borrås R., den Braver B. & Lundberg J. (2005). *Schaktfritt ledningsbyggande*, Styrud AB.
- Bowman J. (2002). A plastic pipe with a removable skin layer, *UK Patent Application. GB 2 392 222 A*.
- Bryder K. m.fl. (1996). Casing of preinsulated district heating pipes, *Energiministeriets forskningsudvalg for produktion af el og varme*.
- Brown N. & Lu X. (1995). A fundamental theory for slow crack growth in polyethylene, *Polymer*, vol. 36: 3, ss. 543-8.
- Colwell D. A. F. & Ariaratnam S. T. (2003). Evaluation of high-density polyethylene pipe installed using horizontal directional drilling, *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 129: 1, ss. 47-55.
- Darlix B., Montmittonet P. & Monasse B. (1986). Creep of polymers under ball indentation: A theoretical and experimental study, *Polymer Testing*, vol. 6: 3, ss. 189-203.
- Duvall D. E. (2002). Analysis of large diameter polyethylene piping failures, *60th Annual Technical Conference – Society of Plastics Engineers*, vol. 3, ss. 3145-9.
- Favier V. m.fl. (2002). Slow crack propagation in polyethylene under fatigue at controlled stress intensity, *Polymer* 43 (2002), pp1375-1382.
- Gassman S. L., Schroeder A. J. & Ray R. P. (2005). *Journal of Transportation Engineering*, februari 2005, ss. 160-7.
- Gelinas M., Polak M. A. & McKim R. (2000). Field tests on HDPE pipes installed using horizontal directional drilling, *Journal of Infrastructure Systems*, vol. 6: 4, ss. 130-7.
- Genoni M., Vannini C. & Ticci A. (2001). Multilayer plastic pipe with improved resistance to crack propagation, *European Patent Application EP 1 152 181 A1*, European Patent Office.
- Giroud J. P., Beech J. F. & Soderman K. L. (1994). Yield of scratched geomembranes, *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 13: 4, ss. 231-46.
- Grace Hsuan Y. (2000). Data base of field incidents used to establish HDPE geomembrane stress crack resistance specifications, *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 18: 1, ss. 1-22.
- Grosse-Boes R. & Kloth R. (2004). Das langsame Risswachstum von Polyethylen – Mythos und Wirklichkeit, *3R International*, vol. 43: 4-5, ss. 233-6.
- Göhler T. (2004). Construction of district heating pipes by reuse of excavated material, *Proceedings of the 9th International Symposium on District Heating and Cooling*, Espoo, 30 – 31 augusti, 2004.

- Haager M., Pinter G. & Lang R. W. (2004a). Applicability and limitations of the FNCT-methodology to predict the long term failure behavior of polyethylene-pipe materials, *Proceedings of Annual Technical Conference - AN-TEC, Volume 3: Special Areas*, ss. 4023-7.
- Hallingplast (2006). <http://www.hallingplast.no>.
- Harget D. & Bowman J. (2001). Developments in plastics pipe technology and trenchless installation, *Pipeline and Gas Journal*, vol. 228: 12, ss. 24-30.
- Hessel J. (2001a). Mindestlebensdauer von erdverlegten Rohren aus Polyethylen ohn Sandeinbettung, *3R International*, vol. 40: 13, ss. 360-66.
- Hessel J. (2001b). Mindestqualität erdverlegter Polyethylenrohre ohne Sandeinbettung, *UmweltPraxis*, 2001: 12, ss. 23-27.
- Hessel J. & Grieser J. (2005). Verfahren zum Nachweis des Sicherheitsfaktors für Rohre aus Polyethylen unter komplexer Beanspruchungen, *3R International*, vol. 44: 5, ss. 277-83.
- Hyde T. H., Luo R. & Becker A. A. (2005a). Prediction of force-deflection behaviour of pressurised pipes subjected to axially long radial indentation, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 82: 8, ss. 625-37.
- Hyde T. H., Luo R. & Becker A. A. (2005b). Elastic-plastic response of unpressurised pipes subjected to axially-long radial indentation, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 47: 12, ss. 1949-71.
- IDS Water (2006). <http://www.idswater.com>.
- ISO 13480 (1997). *Polyethylene pipes – Resistance to slow crack growth – Cone test method*.
- ISO 16770 (2004). Plastics – Determination of environmental stress cracking (ESC) of polyethylene – Full-notch creep test (FNCT).
- Johnson K. L. (1985). *Contact mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Karlsson K., Smith G. D. & Gedde U. W. (1992). Molecular structure, morphology and antioxidant consumption in medium density polyethylene pipes in hot water applications, *Polymer Engineering and Science*, vol. 32: 10.
- Kausch H.-H. (1986). Intersegmental interactions and chain scission, i Brostow W. & Corneliussen R. D. (red.), *Failure of Plastics*, Hanser Publishers.
- Kausch H.-H. (1987). *Polymer Fracture*, Springer Verlag.
- Kompri (2006). <http://www.kompri.se>.
- Kratochvilla T., Muschik H. & Dragaun H. (2005). Die Kerblage im Visier, *Kunststoffe*, vol. 95: 6, ss. 53-6.
- Krishnaswamy R.K. (2005). Analysis of ductile and brittle failures from creep rupture testing of high-density polyethylene (HDPE) pipes, *Polymer* 46 (2005), 11664-11672.
- Kuhlman C. J., Tweedy L. K. & Kanninen M. F. (1992). Forecasting the long-term service performance of polyethylene gas distribution pipes, *Proceedings of Plastics Pipes VIII*, Eindhoven, 21 – 24 september, 1992.
- Lancaster E. R. & Palmer S. C. (1996). Strain concentrations in pressurized dented pipes, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E – Journal of Process Mechanical Engineering*, vol. 210: E1, ss. 29-38.
- Lawrence C. & Sumner C. (1987). Notch generation and geometry in quality control specimens, *Polymer Testing*, vol. 7: 4, ss. 225-37.
- Lenz J. (2001). Long-term point loads testing with plastic pipes, *Proceedings of Plastics Pipes XI*, München, 3 – 6 september, 2001.
- Lingenhoff H. & Schröder G. (1998). Polyethylenrohre mit Schutzumhüllung für grabenlose Verlegetechniken, *3R International*, vol. 37: 2-3, ss. 109-12.
- Liu J. H. & Francis A. (2004). Theoretical analysis of local indentation on pressured pipes, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 81: 12, ss. 931-9.
- Lu X., Qian R. & Brown N. (1991). Notchology – the effect of the notching method on the slow crack growth failure in a tough polyethylene, *Journal of Materials Science*, vol. 26: 4, ss. 881-8.
- Lustiger A. (1985). Analysis of field failures caused by slow crack growth, *Proceedings of Plastics Pipes 6*, York, 26 – 28 mars, 1985.
- Lustiger A. (1995). Analysis of field failures in polyethylene pipe, *Annual Technical Conference – ANTEC, Conference Proceedings*, vol. 3, ss. 3946-51.
- Miller A. G. (1988). Review of limit loads of structures containing defects, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 32: 1-4, ss. 197-327.
- Molin J., Bergström G. & Nilsson S. (1997). *Kulvertförläggning med befintliga massor*, Svensk Fjärrvärme FoU 1997:17.

- Moreno L. & Leever P. S. (2004). Effect of axial surface scores on rapid crack propagation in polyethylene pipe, *Plastics, Rubbers and Composites*, vol. 33: 4, ss. 149-54.
- Nilsson S. (2000). On stone indentations in district heating pipes – Pipe and backfill interactions and lifetime aspects, Licentiatuppsats, Chalmers tekniska högskola.
- Nilsson S. (2004). Lifetime of HDPE under stress relaxation at large strains, *Proceedings of Plastics Pipes XII*, Milano, 19 – 22 april, 2004.
- Nilsson S. & Thörnblom K. (2005). *Skador på skyddsmantlade plaströr vid grävningsfri förläggning*, SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, Rapport 2005:26.
- Niu X., Chen D., Zhou W., Chudnovsky A. & Jivrai, N. (2000). Notch sensitivity of pipe grade polyethylene and polybutylene, *Plastics, Rubber and Composites*, vol. 29: 9, 447-52.
- Nordisk Wavin A/S (2000). *Teknisk information*, Produktinformation Wavin Tryk.
- Ouakka A., Dang Van K., Gueugnant D. & Blouet P. (1997). An assessment of the defect damages in polyethylene gas pipes, *Proceedings of the 10th International Conference of Deformation, Yield and Fracture of Polymers*, Cambridge, UK, 7 – 10 april, 1997.
- Petroff L. J. (1997). Design guidelines for directional drilled PE pipe, *Proceedings of the Conference on Trenchless Pipeline Projects, Practical Applications*, ss. 432-9.
- Pinter G., Haager M. & Lang R. W. (2004). Ranking of PE-HD pipe grades by fatigue crack growth performance, *Plastics Pipes XII*, Milano, 19 – 22 april, 2004.
- Pinter G., Haager M., Balika W. & Lang R. W. (2005). Fatigue crack growth in PE-HD pipe grades, *Plastics, Rubber and Composites*, vol. 34: 1, ss. 25-33.
- Pipelife Sverige AB (2000). *Pipelife handbok PE trykrör*.
- Pipelife (2006). <http://www.pipelife.com>.
- Polak M. A., Duyvestyn G. & Knight M. (2004). Experimental strain analysis for polyethylene pipes installed by horizontal directional drilling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol 19, issue 2, march 2004, pp 205-216.
- Polak M. A. & Chu D. (2005). Pulling Loads for Polyethylene Pipes in Horizontal Directional Drilling: Theoretical Modeling and Parametric Study, *Journal of Infrastructure Systems*, vol. 11: 2, ss. 142-50.
- Rix B. (2005). *Personlig kommunikation*, Uponor A/S.
- Rouyer V. & Cornette M. (2001). Resistance of crosslinked PE pipes to rock impingement, *Proceedings of Plastics Pipes XI*, München, 3 – 6 september, 2001.
- Scholten F. L. & Rijpkema H. J. M. (1992). Field failures in polyethylene gas pipes: Analysis versus lifetime prediction, *Proceedings of Plastics Pipes VIII*, Eindhoven, 21 – 24 september, 1992.
- Slay J. B., Bradley W. L., Register D. & Lambron M. (1999). *57th Annual Technical Conference – Society of Plastics Engineers*, vol. 3, ss. 3370-3.
- Spencer K. A. & Footner, H. B. (1953). Protective coatings for buried pipelines, *Chemistry and Industry*, May 9, ss. 448-55.
- SS-EN 489 (2003). *Fjärrvärmesystem – Förisolerade rörsystem med fast förband mellan värmeisolering och medierör respektive mantelrör för direkt markförlagd distribution av betvatten – Ventilenhet med ventil av stål för sammanfogning med medierör av stål och med värmeisolering av hård uretancellplast (PUR-skum) och ytterhölje av etenplast*.
- SS-EN 1555 (2003). *Plaströrssystem – Rör och rördelar av PE för gasdistribution*.
- SS-EN 12201 (2003). *Plaströrssystem – Rörsystem för vattendistribution – PE (polyetylen)*.
- SS-EN ISO 9080 (2003). *Plaströrssystem – Bestämning av hydrostatisk hållfasthet under lång tid hos termoplastmaterial i rörform genom extrapolering*.
- SS-EN ISO 13479 (1997). *Polyolefinrör för transport av vätskor – Bestämning av motstånd mot sprickbildning – Provningsmetod för långsam sprickbildning på rör med anvisning (notchprovning)*.
- SS-ISO 16241 (2005). *Plaströrssystem – Brottanvisningsprov för att mäta beständighet mot långsam spricktillväxt i polyetylenmaterial (PE) för rör och rörkomponenter (PENT-prov)*.
- Stokes R., Potter R., Muhl J. & Acland T. (2000). Measurement of scores and scratches on polyethylene pipe used in no-dig operations, *No-Dig International*, vol. 11: 7, ss. 16-19.
- Stokes R., Potter R., Muhl J. & Acland T. (2001). Measurement of scores and scratches on polyethylene pipe used in no-dig operations, *Proceedings of Plastics Pipes XI*, München, 3 – 6 september, 2001.
- Styrud (2006). <http://www.styrud.se>.

- Svenska Geosyntetföreningen (2006). <http://cgi.geosyntetforeningen.a.se>.
- Tagawa K. (2003). Pipe and standing sign, *Japanskt patent nr. JP2003326621*.
- Tijuneliene L., Strazdiene E. & Gutauskas M. (1999). The behaviour of polyethylene membrane due to punch deformation process, *Polymer Testing*, vol. 18: 8, ss. 635-40.
- Tokui S. & Komiya M. (2004). Tubular laminated body of polybutylene, *Japanskt patent nr. JP2004042600*.
- Uponor (2006). <http://www.uponor.se>.
- Watrinet H. & Gatter R. (2005). Mehrschichtiges Rohr aus thermoplastischem Kunststoff, *Europeiskt patent nr. EP 1 524 108 A1*.
- Wavin (2006). <http://www.wavin.dk>.
- Werner J. (2001). HDPE pipes with protective coating, *Proceedings of Plastics Pipes XI*, München, 3 – 6 september, 2001.
- Wierzbicki T. & Suh M. S. (1988). Indentation of tubes under combined loading, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 30: 3-4, ss. 229-248.
- Williams J. G. (1987). *Fracture mechanics of polymers*, Ellis Horwood Limited.
- Wrobel G., Szymiczek M. & Wierzbicki L. (2004). Swagelining as a method of pipelines rehabilitation, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 157-158, ss. 637-42.
- Zwierzchowska A. (2006). The optimum choice of trenchless pipe laying technologies, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Ännu ej tryckt.



Scheelegatan 3, 212 28 Malmö • Tel 040-680 07 60 • Fax 040-680 07 69
www.sgc.se • info@sgc.se
