

SPRÖDA BROTT I MANTELRÖR

Stefan Nilsson, Kristian Thörnblom, Sven-Erik Sällberg,
Gunnar Bergström



Forskning och Utveckling | 2005:131

SPRÖDA BROTT I MANTEL RÖR

BRITTLE FRACTURE IN CASING PIPES

Forskning och Utveckling | 2005:131

Stefan Nilsson, Kristian Thörnblom,
Sven-Erik Sällberg, Gunnar Bergström

ISSN 1401-9264

© 2005 Svensk Fjärrvärme AB

Art nr FOU 2005:131

I rapportserien publicerar projektledaren resultaten från sitt projekt.
Publiceringen innebär inte att Svensk Fjärrvärme AB tagit ställning till
slutsatserna och resultaten

Sammanfattning FOU 2005:131 – Spröda brott i mantelrör

Vid ett flertal tillfällen har Rapid Crack Propagation (RCP) inträffat i mantelröret hos stora fjärrvärmerör. RCP är ett mycket snabbt sprickförlopp där sprickan drivs fram av ringdragspänningar i mantelröret. Det är ett problem framför allt vid arbete på rören i låga temperaturer. Dels blir mantelrörmaterialet sprödare då det kyls ned, och dels gör en temperatursänkning att ringdragspänningar byggs in i mantelröret då det förhindras att dra ihop sig av stålror och PUR-skum. RCP-sprickor i fjärrvärmemantelrör har dokumenterats vid temperaturer kring -18 °C men sannolikt har fenomenet inträffat i enstaka fall redan vid några grader under noll.

Tre olika polyetenmaterial utvärderades med avseende på risken för spröda brott i mantelrör. Dels ett unimodalt material av PE80-kvalitet som har använts i stor utsträckning tidigare, dels ett modernare unimodalt PE80-material som används emellanåt idag och slutligen ett bimodalt PE80-material av en kvalitet som för närvarande används av de flesta tillverkare. Generellt sett är modernare material avsevärt tåligare med avseende på spröda brott då det är en viktig utvecklingsparameter hos råmaterialtillverkarna.

Provningar genomfördes på polyetenrör av både stor (upp till 630 mm diameter) och liten (160 mm) dimension.

Ett hanteringsprov genomfördes där rören kylades ned och bearbetades med elverktyg på samma sätt som sker i fält. Här uppstod ett RCP-brott vid -25 °C under skärbete med vinkelslip på ett rör med diameter 500 mm av det modernare unimodala PE80 materialet.

Samma material sprack även vid slagprovning enligt SS-EN 253 vid -20 °C på såväl liten som stor dimension. Den bimodala polyetenvarianten klarade båda provningarna utan brott.

En serie slagprov genomfördes på rör med diameter 160 mm med en egenutvecklad provningsmetodik med avsikten att ringa in kritiska temperaturer och temperaturspänningsnivåer vid vilka man bör iaktta särskild försiktighet. Resultaten visar att det bimodala polyetenmaterial som provats är så tåligt med avseende på spröda brott att det knappast är förknippat med någon större risk att hantera dem i normalt vinterklimat. Det äldre materialet, som sprack vid hanteringsprov och slagprov enligt SS-EN 253, är dock betydligt känsligare och en spänningsanalys visar att det, för stora dimensioner, finns en påtaglig risk för sprödbrott redan vid temperaturer några grader under noll.

Slagsegheten hos de olika materialen har också utvärderats med sk *Charpyslagprovning*, som provningsmässigt är betydligt enklare att genomföra än slagprov i fullskala på hela rör. Även här var syftet att bestämma en kritisk omslagstemperatur mellan segt och sprött beteende. Tydliga skillnader kunde ses mellan de olika polyetenkvaliteterna. Sannolikt finns en korrelation mellan resultaten från Charpyprov och rörslagprov. Emellertid saknas statistiskt underlag för att dra några kvantitativa slutsatser, men med mer underlag skulle metoden troligtvis kunna användas för klassificering och kravgränser.

Summary FOU 2005:131 – Brittle fracture in casing pipes

Rapid Crack Propagation (RCP) has been observed in the casing pipe of large diameter district heating pipes on several occasions. An RCP crack is driven by hoop stresses in the casing pipe wall. It is a problem during installation work in cold weather. The casing pipe material is more brittle in low temperatures, and a temperature decrease will cause a hoop stress build-up since the thermal contraction of the casing pipe is constrained by the steel pipe and the PUR foam. RCP fracture has been documented at temperatures around -18 °C but has likely, at some instances, occurred already at few degrees below 0 °C .

Three different polyethylene materials were evaluated with respect to the risk for brittle fracture of the casing pipe. One unimodal material of PE80 quality which have been used in casing to a large extent previously, one modern unimodal PE80 material which is used today and, finally, a bimodal PE80 material of a quality which currently is the dominant choice among pipe producers. Modern materials are in general much more resistant to brittle fracture, since it is an important design property for the raw material producers.

Tests were done on casing of both large (up to 630 mm in diameter) and small (160 mm) dimension.

A handling test was made where the pipes were cooled down and worked on with power tools in a manner similar to actual field work. An RCP fracture occurred at -25 °C during cutting with angle grinder on a pipe with a diameter of 500 mm on the modern unimodal PE80 material.

The same material also fractured during impact testing according to EN 253 at -20 °C on both small and large diameter pipes. The bimodal PE80 resin passed both tests without fracture.

A series of impact tests were done on pipes with diameter 160 mm with the purpose of determining critical temperatures and temperature stress levels with respect to brittle fracture. The results show that the bimodal material is so resistant that there is no real risk for RCP in normal winter climate. The older material, which cracked during the handling and EN 253 tests, is much more sensitive. A stress analysis show that, for large diameter pipes, special care should be taken at temperatures a few degrees below 0 °C .

The impact resistance of the different materials were evaluated with *Charpy impact tests*. The ductile brittle transition temperature was obviously different for different polyethylene qualities. There is probably a correlation between the results from Charpy testing and impact testing on whole pipes, but statistical data are insufficient for any quantitative conclusions. With more empirical data, the method could likely be used for classification and material requirements.

Innehållsförteckning

1.	Inledning	7
2.	Spröda brott i polyeten	8
2.1.	Rapid Crack Propagation (RCP).....	9
2.2.	Spänningsförhållanden i fjärrvärmemantelrör	10
2.3.	Standardmässiga provningsmetoder för slagtålighet	11
2.3.1.	S4-test och Full-scale test.....	11
2.3.1.1.	S4-test.....	11
2.3.1.2.	Full-scale-test.....	12
2.3.2.	Slagprov enligt SS-EN 253	13
2.3.3.	Charpyslagprov	14
3.	Genomförda försök	16
3.1.	Polyetenmaterial och rörprover.....	16
3.2.	Slag- och hanteringsprov.....	17
3.2.1.	Charpyprovning.....	18
3.2.2.	Slagprov enligt SS-EN 253	18
3.2.3.	Giljotinprov	18
3.2.4.	Simulerad verklig hantering	19
4.	Resultat och diskussion.....	21
4.1.	Charpyprovning.....	21
4.2.	Slagprov enligt SS-EN 253.....	22
4.3.	Giljotinprov	22
4.4.	Simulerad verklig hantering	24
5.	Slutsatser	27
6.	Referenser	29
	Bilaga A: Rörprover och genomförda försök	30
	Bilaga B: Temperaturspänningar i mantelröret.....	31
	Bilaga C: Spänningsrelaxation hos polyeten.....	32
	Bilaga D: Spänningsrelaxation hos polyuretanskum	33

1. Inledning

Standardprodukten för fjärrvärmeledningar är idag stålrör isolerade med polyuretanskum (PUR-skum). Utvändigt skyddas konstruktionen med mantelrör av polyeten. Som de flesta termoplaster har polyeten hög brottseghet och mekanisk dämpning och är därför väl lämpat för tillämpningar där slag och stötar förekommer. Under vissa förhållanden kan dock termoplastiska material bli spröda. Det är väl känt att vanlig styv PVC vid temperaturer under -10 °C blir spröd. Detta beror på den molekyllära strukturen i materialet där graden av rörlighet hos molekysegmenten förändras med temperaturen. Generellt uppträder därför spröda brott främst vid låga temperaturer. När det gäller markförlagda rörkonstruktioner av polyeten innebär detta att risken för skador är störst när rören hanteras i kyla i samband med transport och installation.

Mantelrör av polyeten har vid ett flertal tillfällen spruckit längs hela rörets längd. Sprickbildningen har vid dessa tillfällen haft ett mycket snabbt förlopp som är känt under beteckningen Rapid Crack Propagation (RCP). Drivkraften hos RCP är en samverkan mellan dragspänningar i mantelröret som byggts in då röret skummats och de temperaturberoende spänningar som uppstår när mantelröret kyls. Då sprickor och brott uppträder i gas- och vattenledningar tryckavlastas dessa snabbt och sprickutbredningen avstannar. När det gäller sprickbildning i mantelrör tryckavlastas dessa inte på samma sätt utan spänningarna kvarstår i de ospräckta delarna vilket leder till att en spricka kan sprida sig på långa sträckor.

Syftet med projektet har varit att bestämma vid vilka temperaturer olika mantelrörsmaterial blir känsliga med avseende på spröda brott med målsättningen att resultaten skall kunna ligga till grund för riktlinjer kring hur rören bör behandlas vid kall väderlek. En avsikt har också varit att undersöka om mantelrörens spricktålighet kan utvärderas med enkla materialundersökningar som alternativ till storskaliga slagprov.

Projektet har finansierats av Svensk Fjärrvärme AB, Energimyndigheten och SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut. Arbetet har utförts av SP i Göteborg i samråd med Svensk Fjärrvärmes referensgrupp bestående av Göran Johansson, Powerpipe Systems AB; Magnus Johansson, Luleå Energi AB; Ture Nordenswan, Svensk Fjärrvärme AB; Anette Winter, Göteborg Energi AB. Rör för de genomförda provningarna har tillhandahållits av Mölndals Energi AB, Kollektivvärme AB samt Powerpipe Systems AB.

2. Spröda brott i polyeten

Polyeten är en termoplast av typen polyolefin, vilket innebär att dess polymermolekyler är uppbyggda av endast kol- och väteatomer. Materialet har en delkristallin struktur där en stor del av molekylkedjorna är regelbundet ordnade i kristallgitter. De kristallina delarna av strukturen är styvare och tätare än de icke-kristallina, eller amorfa, och genom att processa råmaterialet på olika sätt under tillverkningen kan polyetener med olika egenskaper åstadkommas. De vanliga varianterna är LDPE (Low Density), LLDPE (Linear Low Density), MDPE (Medium Density) och HDPE (High Density). För dessa olika typer varierar densitet och kristallinitet mellan 915 – 935 kg/m³ och 40 – 50 % för LDPE till 940 – 965 kg/m³ och 60 – 80 % för HDPE (Oberbach 1998). För HDPE ligger glastransitionstemperaturen¹ på ca. –120 °C och kristallitsmältpunkten mellan +115 och +140 °C.

Polyeten är uppbyggt av molekylkedjor av varierande längd. Beroende på hur fördelningen av molekylkedjelängden, eller *molekylvikten*, ser ut talar man om unimodala respektive bimodala material. Hos unimodala material är molekylvikten koncentrerad kring ett medelvärde, d.v.s. det finns egentligen en kedjelängd i materialet med en naturlig spridning runt om. Hos bimodala material har tillverkningsprocessen anpassats så att man får två ”toppar” i molekylviktsfördelningen, d.v.s. det finns såväl längre som kortare molekylkedjor. Bimodala material är normalt mer motståndskraftiga mot spröda brottmekanismer som RCP.

Mantelrör till fjärrvärmerör tillverkas normalt av högdensitetspolyeten (HDPE), som är ett av de mest använda plastmaterialen i världen idag. Rör av HDPE kan tillverkas genom direktextrudering i diametrar mellan 16 och ca. 1600 mm (Janson 1999). Polyetenmaterial för tryckrörstillämpningar klassificeras efter deras långtidshållfasthet med avseende på inre tryck. Till exempel skall materialklasserna PE63, PE80 och PE100 överleva en konstant ringdragspänning på 6,3, 8 respektive 10 MPa under 50 år utvärderat enligt den internationella standarden ISO/TR 9080 (1994).

HDPE har ett mycket segt beteende vid höga spänningsnivåer. Flytspänningen är ca. 20 MPa och nås vid omkring 15 % töjning. Därefter fortsätter materialet att töjas ut till mellan 500 – 800 % innan det faktiskt går av. Vid låga spänningsnivåer kan det dock ta så lång tid för krypdeformationerna att leda till ett segt brott att den spröda brottmekanismen *Slow Crack Growth* (SCG) tar överhanden. SCG är den långsamma och stabila tillväxten av en spricka genom materialet. Fenomenet sker med endast lokal plastisk deformation och karakteriseras således som en spröd brottmekanism. Det finns också en kemikalisk begränsning av livslängden. Polyeten påverkas av termisk oxidation genom att syre bryter upp molekylkedjorna under bildandet av karbonylgrupper. För att göra materialet mindre känsligt tillsätts antioxidanter. När dessa har förbrukats av inträngande syre angrips dock polymeren istället och materialets egenskaper försämras snabbt. Tiden tills antioxidanterna konsumerats sätter alltså en övre gräns för materialets tekniska livslängd. Detta går fortare vid högre temperatur enligt en Arrheniusrelation².

¹ Glastransitionstemperaturen eller mjukningstemperaturen T_g är den temperatur över vilken större segment av polymerkedjorna i de amorfa (icke-kristallina) delarna blir rörliga. Glastransitionen är en termodynamisk fasomvandling jämförbar med exempelvis smältpunkten. För ett delkristallint material som polyeten är den dock mindre märkbar, då en stor del av molekylkedjorna är låsta i kristallstrukturen.

² Enligt *Arrhenius* är logaritmen av den kemiska reaktionshastigheten en linjär funktion av den inverterade absoluta temperaturen: $A = Be^{-Q/RT}$.

De olika brottyperna enligt ovan – segbrott, SCG och termisk oxidation – benämns ofta brott i stadium I, II respektive III. För fjärrvärmetillämpningar behöver risken för segbrott bara beaktas vid tillverkningen när PUR-komponenterna injiceras mellan stålrör och mantelrör och reagerar med varandra under tryck- och temperaturutveckling. Sprött brott genom SCG kan uppträda som en konsekvens av punktlaster mot rörväggen från stora stenar (Nilsson 2000). Termisk oxidation skulle kunna ske om mantelröret utsätts för onormalt höga temperaturer, t.ex. vid starkt deformerade ledningsböjar (Bergström och Nilsson 2001).

2.1. Rapid Crack Propagation (RCP)

Det finns ytterligare en spröd brottmekanism som går under benämningen *Rapid Crack Propagation* (RCP). RCP är en mycket hastig sprickutbredning som drivs av upplagrad töjningsenergi i materialet och som normalt initieras av någon form av stöt. RCP har studerats i stor omfattning vad gäller tryckledningsrör. Risken för RCP ökar vid lägre temperaturer då materialet blir styvare och sprödare. Enligt gängse teorier ökar också känsligheten med materialsiktets tjocklek.

En översiktlig utredning av RCP i fjärrvärmerör har gjorts av Bergström (1999) och fenomenet har observerats i fjärrvärmesammanhang. Som exempel har i Luleå RCP-brott uppstått vid två tillfällen. 1996 sprack en hel rörlängd DN 300/500-ledning vid en temperatur på -18°C . Brottet initierades av bearbetning med bormaskin eller sticksåg under förberedelser för muffsvetsning. Ett liknande fall inträffade 1999 under påstickarbete vid -25°C på en DN 150/315-ledning lagd sju år tidigare (M. Johansson, 2005). I mitten av 1990-talet inträffade två brott på en DN 800/1000-ledning i Tyskland vid kall väderlek. Det ena brottet skedde då ett rör oaksamt släpptes på marken efter kranlyft. Ett annat rör sprack längs en hel rörlängd då den låg i rörgraven på natten (G. Johansson, 2005). Initieringen i det senare fallet kan eventuellt ha orsakats av temperaturrelser.

Sedan introduktionen av polyeten i gas- och vattenledningar har marknaden kontinuerligt sökt material som har bra motstånd mot både långsam sprickbildning (SCG) och snabb sprickutbredning (RCP), samtidigt som de skall tåla höga tryck. Forskningen kring riskerna för RCP i polyeten initierades 1973 när British Gas extrapolerade sina erfarenheter av stål till polyeten. RCP har sedan diskuterats i mer än 25 år inom de internationella standardiseringsorganen varefter två provningsmetoder utvecklades och godkändes på internationell nivå. Den ena metoden benämns S4-test (Small-Scale Steady-State test) och utförs i laboratorieskala (ISO 13477, 1997). Den andra metoden är ett fullskaletest utvecklat av British Gas (ISO 13478, 1997). Se vidare avsnitt 2.3.1. Fullskaletestet baseras på långtgående erfarenheter från stålrör och försök i full skala i fält på termoplaströr. S4-testet bygger på att en baffelkonstruktion i rörprovet motverkar tryckavlastning vid sprickutbredningen, det vill säga att trycket reduceras bara i den del av rörprovet där sprickan finns. I fullskaleproven är rören tomma inuti vilket leder till att tryckavlastning i röret sker snabbare och därmed minskar krafterna som driver sprickförloppet. Provningsresultaten från de båda metoderna blir därmed inte fullt jämförbara, men en korrelationsfaktor har föreslagits. Provningsmetoderna är dock dyra och tidskrävande för stora rördimensioner, (Vanspeybroeck, 2001).

Slagprovningsmetoder som Charpy har ökat förståelsen för sprickbildningsmekanismerna i polyeten vid höga spänningsnivåer samtidigt som dessa metoder är snabbare och billigare att genomföra. Med Charpyprov på notchade provkroppar mäts energin som åtgår för att spräcka provkroppen i spänningslöst tillstånd. Det har visat sig att under den kritiska temperatur åtgår mycket mindre energi för att spräcka provkroppen samtidigt som sprickan genom provkroppen

propagerar mycket snabbt. Ovanför den kritiska temperaturen ökar energiåtgången (Clutton mfl, 1998).

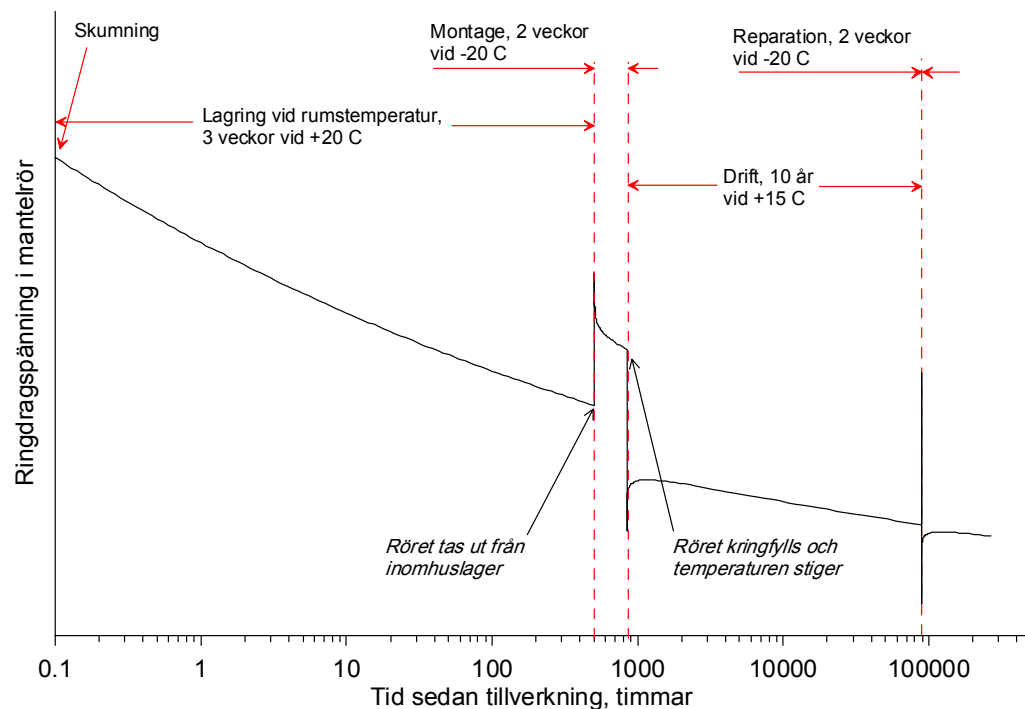
En serie jämförande slagprov med både Charpy- och S4-metod av Greenshields m fl (2000) visar att Charpymetoden är väl tillämplig för att rangordna material med avseende på RCP-känslighet. Brown och Lu (2001) har visat på en tydlig korrelation mellan slagenergin vid ett Charpyprov och den kritiska S4-temperaturen och menar att man i princip kan bestämma den kritiska temperaturen utifrån ett enda Charpyprov i rumstemperatur.

2.2. Spänningsförhållanden i fjärrvärmemantelrör

Ett fjärrvärmemantelrör är normalt utsatt för ringdragspänningar som en direkt konsekvens av skumningstrycket vid tillverkningen. Då isocyanat- och polyolkomponenterna sammanförs reagerar de under bildandet av koldioxid och förångning av löst cyklopentan. Det ger ett invändigt övertryck i röret som expanderar.

I produktstandarden för förtillverkade fjärrvärmerör SS-EN 253 (2003) anges att

Bild 1 Schematisk spänningshistoria för fjärrvärmemantelrör



Efter uppskumning relaxerar spänningarna i röret tills det tas ut i låg temperatur – vid montage eller vid senare reparation. Då ledningen kringfylls stiger temperaturen och tryckspänningar kan uppstå genom att dragspänningarna från föregående nedkylning delvis relaxerat bort.

Schematic hoop stress history in district heating pipe casing. The stresses from the foaming pressure during manufacture will relax until the pipe is exposed to low temperatures—at installation or later repair. When the pipeline is backfilled, the temperature rises and compressive stresses may arise, since the tensile stresses from prior cooling are partly relaxed.

diameterökningen hos mantelröret får uppgå till maximalt 2 % under skumningen³. Sedan skummet härdat kvarhålls expansionen i röret och spänningarna ligger kvar,

³ I skrivande stund är frågan om mantelrörets godstjocklek och tillåten skumningsexpansion under diskussion och 2003-års revision av SS-EN 253 kan komma att ändras genom ett s.k. *amendment*.

men relaxerar⁴ med tiden och blir mindre och mindre. Spänningsrelaxationen är en temperaturberoende process som går fortare ju varmare materialet är.

Ytterligare ringdragspänningar tillkommer då röret kyls ned. Detta beror på att mantelrörets temperaturkontraktion är större än PUR-skummet. Det hindras alltså från att dra ihop sig så mycket som det skulle vilja. Även temperaturspänningarna relaxerar med tiden. De återgår då temperaturen åter höjs men återkommer vid efterföljande nedkylningar. I Bild 1 visas schematiskt hur ringdragspänningen kan utvecklas för ett fjärrvärmerör som efter tillverkning installeras på vintern och efter tio år i drift grävs upp och repareras i kyla. Viskoelastiska modeller för polyeten- respektive PUR-materialen diskuteras i bilagorna C och D.

Stora spänningstillskott är att förvänta om ledningen friläggs på vintern även om den varit i drift under lång tid.

2.3. Standardmässiga provningsmetoder för slagtålighet

Slagtålighet är en materialegenskap som provas i flera olika sammanhang, på hela rör och på mindre materialprover. I det följande beskrivs några av de metoder som finns och som är relevanta med avseende på projektet.

2.3.1. S4-test och Full-scale test

Det finns två provningsmetoder för direkt kontroll av tåligheten hos ett tryckledningsrör gentemot RCP: de sk. *S4*- och *Full-Scale*-testen. Metoderna används för tryckledningsrör men skulle i princip kunna användas även för fjärrvärmemantelrör. Kortfattat går de ut på att med direkta försök ringa in det kritiska inre trycket vid en given provningstemperatur alternativt den kritiska temperaturen vid ett givet inre tryck.

De båda metoderna ger inte resultat i fullständig överensstämmelse, men det finns en korrelation mellan dem (Vanspeybroeck 2001).

2.3.1.1. S4-test

S4-testet (Small-Scale Steady-State test) är ett laborietest för att mäta motståndet mot RCP i plaströr enligt ISO 13477 (1997). Testet bygger på att rörprover hålls vid en specificerad temperatur och trycksätts, varefter de utsätts för ett slag nära den ena röränden. Slaget utförs med ett speciellt slagdon, Bild 2. Slagdonets hastighet när det träffar rörprovet skall vara $15 \text{ m/s} \pm 5 \text{ m/s}$.

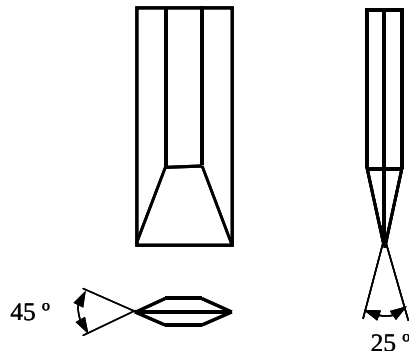
Bild 3 beskriver schematiskt provutrustningen som används vid testen. Ett rör med längden minst sju gånger rörets ytterdiameter, d_n , placeras enligt figuren. Rörprovet är placerat innanför styrningar för att begränsa den radiella expansionen vid sprickbildning samtidigt som de skall tillåta fri expansion till följd av trycket i röret. Dekompressionsbafflarna inuti röret är till för att sektionera trycket vilket innebär att då sprickbildning sker motverkas tryckavlastningen innanför de oskadade delarna av röret så att ringspänningarna bevaras tills sprickbildningen avstannat⁵. För att en

⁴ I viskoelastiska material, som polyeten och polyuretan, sker en kontinuerlig omfördelning av molekylstrukturen. Detta medför att materialet i viss mån flyter och att spänningarna orsakade av en konstant deformation avtar – eller *relaxerar* – med tiden. Det omvända fallet, att deformationen från en konstant spänning ökar med tiden, kallas för *krypning*. Se t.ex. Ferry (1980) för en allmän behandling av viskoelastiska polymerer.

⁵ Detta förfarande gör att S4-testet i praktiken bättre motsvarar förhållandena i ett fjärrvärmerör än i ett trycksatt gas- eller vattenledningsrör.

spricka skall definieras som uppkommen genom RCP skall den uppfylla ett antal krav: bl a skall den inte avstanna inom en sträcka på fem rördiametrar.

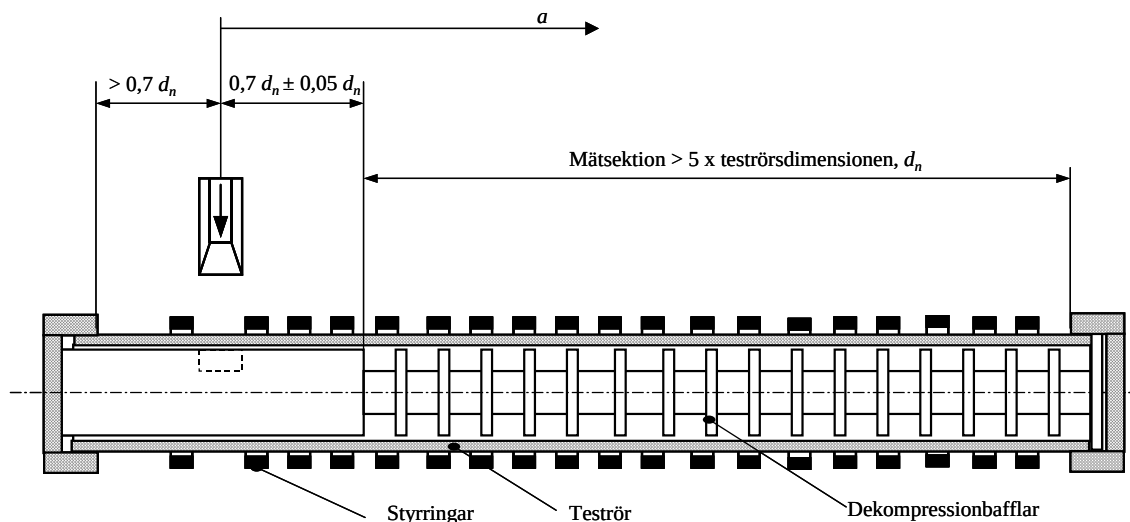
Bild 2 Principskiss – Slagdon till S4-test



Schematisk bild av slagdonet med vass egg som används vid S4-test enligt ISO 13477.

Schematic view of the striker blade with sharp edge used in S4-test according to ISO 13477.

Bild 3 Principskiss – S4-test



Provuppställning vid slagprov enligt ISO 13477. Det fallande slagdonet med sin vassa egg träffar röret vinkelrätt med en hastighet av 15 m/s.

Test rig for impact testing according to ISO 13477. The falling striker blade with its sharp edge hits the pipe face with a velocity of 15 m/s.

En serie test vid olika tryck definierar sedan det kritiska trycket för RCP. Genom att på motsvarande sätt genomföra en serie test med konstant tryck vid olika temperaturer erhålls den kritiska temperaturen för RCP.

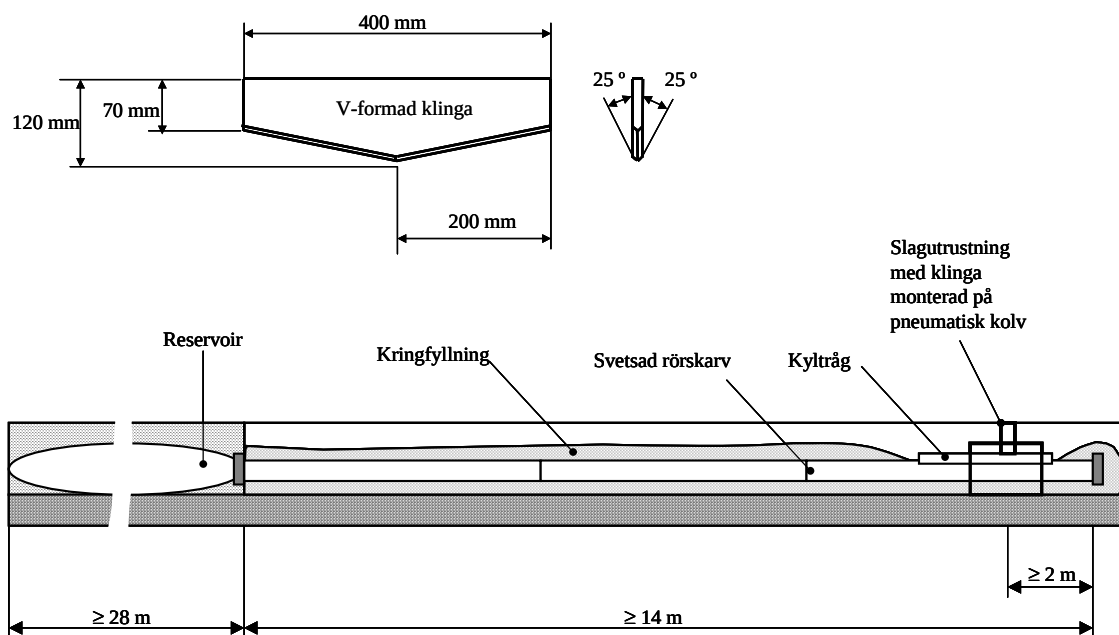
2.3.1.2. Full-scale-test

Fullskaletestet utförs enligt ISO 13478 (1997) i ett temperaturkontrollerat tråg vilket schematiskt visas i Bild 4. Tråget med tillhörande utrustning skall minst rymma ett 14 m långt rörprov. Rörprovet täcks med 100 mm kringfyllning och kyls längs hela sin längd med cirkulerande vatten innehållande frostskyddsmedel. I rörprovets borte ände (till vänster i bilden) är en reservoar ansluten, denna skall vara minst dubbel så lång som rörprovet. Genom reservoaren trycksätts provet till bestämt tryck. Minst 2 m från rörprovets främre ände (till höger i bilden) är en lufttrycksdriven slagutrustning monterad, bestående av en kolv med en stålklina. För att initiera sprickbildning i

rörprovet fräses en notch i rörprovet där stålklungan skall träffa. På var sida längs notchen och ytterligare 1 m i riktning mot reservoaren läggs ett kyltråg vilket kyls ned till $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ vid provningen. Inuti röret innanför notchen placeras en cirka 500 mm lång träplugg som på ovansidan i längsled direkt under notchen är försedd med en fördjupning fylld med komprimerbart skum. Träpluggen fungerar som mothåll när metallklungan slås in i rörprovet. Om så behövs kan även ett mothåll placeras under rörprovet.

Efter att stålklungan slagits in i rörprovet mäts alla sprickornas utbredning i längsled. För att en spricka skall definieras som uppkommen genom RCP skall den längsta sprickan uppfylla ett antal krav: bl a skall den vara längre än 90 % av rörprovets längd.

Bild 4 **Principskiss – Full-scale test**



Provpuppställning vid slagprov enligt ISO 13478. Den V-formade stålklungan med sin vassa egg slås in genom rörets vägg med hjälp av en tryckluftsdreven kolv.

Test rig for impact testing according to ISO 13478. The steel blade with its sharp edge is driven through the pipe wall by a pneumatic piston.

Liksom i S4-testet utförs en serie prov med konstant temperatur vid olika tryck för att finna det kritiska trycket för RCP, samt en serie prov med konstant tryck vid olika temperaturer för att finna den kritiska temperaturen.

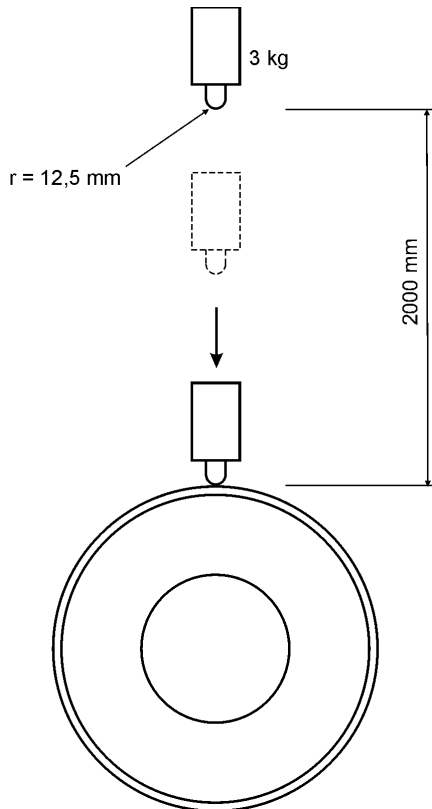
2.3.2. Slagprov enligt SS-EN 253

Enligt den europeiska produktstandarden för fjärrvärmerör SS-EN 253 (2003) skall fjärrvärmerörens mantelrör testas med avseende på slagåtlighet. En provkropp bestående av en rörenhet med längden minst fem gånger mantelrörets ytterdiameter provas efter att ha konditionerats under minst 3 timmar vid en temperatur av $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Slagprov genomförs inom 10 sekunder från de att provet tagits ut ur konditioneringsutrymmet med en fallvikt som släpps mot röret mot ett bestämt antal jämt fördelade i förväg markerade linjer runt om dess omkrets. Fallvikten skall ha en massa av 3 kg, vara försedd med en halvsfärisk slagyta med diametern 25 mm och släppas från höjden 2000 mm, Bild 5.

Enligt specifikationer i ISO 3127 (1994) är antalet slag runt rören relaterat till mantelrörets ytterdiameter. Detta innebär att på till exempel ett rör med

mantelrörsdiameter 160 mm utförs 8 slag jämt fördelade runt röret och på rör med mantelrörsdiameter större eller lika med 280 mm utförs 16 slag.

Bild 5 **Principskiss – Slagprov enligt SS-EN 253**



Provuppställning vid slagprov enligt SS-EN 253. Fallvikten med den sfäriska spetsen träffar mantelröret vinkelrätt med en hastighet på 6,3 m/s och en rörelseenergi på 59 J.

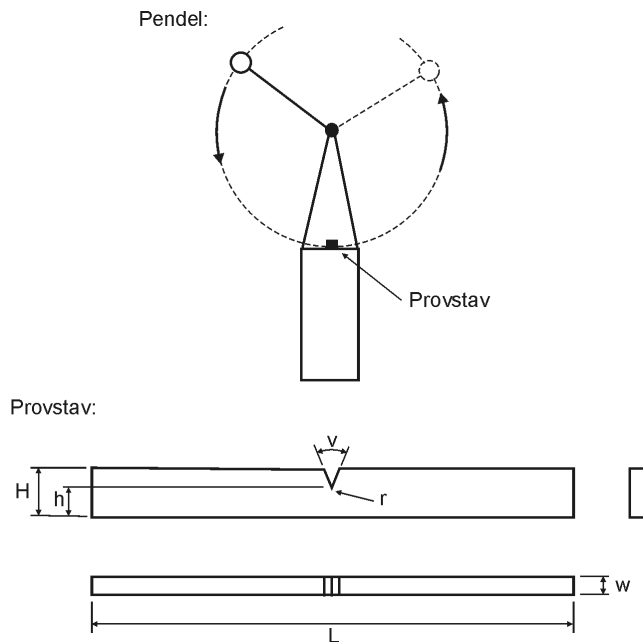
Test rig for impact testing according to EN 253. The falling weight with its spherical tip hits the casing pipe face on with a velocity of 6.3 m/s with a kinetic energy of 59 J.

2.3.3. **Charpyslagprov**

Slagprov enligt Charpymetoden är en standardmässig metod för utvärdering av slagsegheten hos olika material och kan utföras exempelvis enligt den amerikanska standarden ASTM D 6110 (1997).

Metoden går ut på att man med hjälp av en pendel slår av en provkropp och mäter energin som går åt för att åstadkomma brottet. Ju sprödare materialet är, desto lättare går provkroppen av och energiåtgången blir mindre. Slagenergin bestäms genom att mäta pendelns svängningsvinkel efter stöten genom provstaven i relation till startvinkeln, Bild 6. Vinkeln mäts genom att en släpvisare följer pendelarmen. Mer sofistikerade mätningar kan också göras med s k instrumenterad slagprovning, där en lastcell i pendelns slaghuvud registrerar de dynamiska krafterna under stötförloppet när pendeln träffar provstaven.

Provstavarna skall ha en tjocklek mellan 3 mm och 12,7 mm. En anvisning, eller *notch*, fräses i provstaven så att måttet h blir 10,2 mm. Notchens öppningsvinkel v skall vara 45 ° och dess bottenradie r skall vara 0,25 mm. De provstavar som användes i föreliggande projekt (se avsnitt 3.2.1) hade måtten $w = 4,5$ mm, $H = 12,5$ mm samt $L = 125$ mm.

Bild 6 **Principskiss – Charpyslagprov**

Provuppställning och provkropp för Charpyslagprov enligt ASTM D 6110 (1997). Pendelns slaghuvud träffar provstaven med en hastighet på 3,5 m/s.

Test rig and specimen for Charpy impact test according to ASTM D 6110 (1997). The pendulum's striker head hits the test specimen with a velocity of 3.5 m/s.

3. Genomförda försök

3.1. Polyetenmaterial och rörprover

Inom föreliggande projekt har tre olika polyetenmaterial utvärderats med avseende på risken för RCP i mantelrör. Materialen har valts så att dels sådana material som används idag och dels sådana som har använts tidigare i stor utsträckning täckts in.

Material **A** är ett s.k. unimodalt PE80-material⁶. Material av den här klassen har tidigare använts i mycket stor utsträckning till fjärrvärmerör vilket innebär att en betydande del av de befintliga fjärrvärmenäten har mantelrör av detta material. Det är osäkert om materialet skulle uppfylla dagens tuffare krav i SS-EN 253.

Material **B** är ett också ett unimodalt PE80-material, men av senare generation än material A. Materialet används av enstaka tillverkare och uppfyller kraven enligt SS-EN 253.

Material **C** är ett bimodalt PE80-material som uppfyller kraven enligt SS-EN 253. Det är idag det dominerande och mest använda materialet för mantelrör.

Materialegenskaperna hos de tre studerade mantelrörsmaterialen visas i Tabell 3-1. Termostabilitet, densitet och smältindex (MFR) är alla grundläggande analyser för att karakterisera ett polyetenmaterials egenskaper. Smältindex och densitet hos ett material ger indikationer på dess hållfasthetsegenskaper medan termostabiliteten ger ett mått på hur väl materialet är stabiliserat mot oxidativ nedbrytning. Termostabiliteten bestäms genom att mäta induktionstiden, det vill säga begynnelsestidpunkten för den exoterma oxidativa nedbrytningsreaktionen. Ju längre tider desto mer stabiliserat är materialet. Termostabiliteten mäts på provbitar uttagna från både insidan och utsidan av rörväggen. För densitet och smältindex har provkroppar tagits ut från hela tvärsnittet.

Tabell 3-1 Materialegenskaper hos använda polyetenmaterial

Material	Densitet Kg/m ³	Smältindex g/10 min	Termostabilitet min <i>insida / utsida</i>
A <i>Charpy</i>	952,2	0,483	34,7 / 20,7
<i>verklig hantering</i>	950,0	0,477	16,3 / 6,2
<i>referensvärde</i>	954,0	0,520	48
B	945,9	0,417	42,3 / 44,3
C	953,2	0,433	45,1 / 44,7

Grundläggande materialdata för de provade PE-materialen. För material A avser de tre olika värdena material från rör för Charpyslagprovning (Charpy) tillverkat 1997, material från rör för simulerad verklig hantering (verklig hantering) tillverkat 1986 samt ett referensvärde från en materialprovning genomförd av SP 1997, då materialet var nyttillverkat och användes i stor utsträckning (referensvärde).

Basic properties of the tested materials. For material A, the three values refer to material from pipe for Charpy impact testing (Charpy) manufactured 1997, material from pipe for simulated field treatment (verklig hantering) manufactured 1986 and a reference value from a material evaluation made by SP in 1997 when the material was newly manufactured and widely in use.

Samtliga material uppfyller SS-EN 253 beträffande densiteten, som skall vara större än 935 kg/m³. Avseende smältindex säger standarden bara att material som skall svetsas ihop inte får ha smältindex som skiljer sig åt mer än 0,5 g/10 min. Termostabilitetskravet i den senaste utgåvan av standarden säger att induktionstiden

⁶ Se avsnitt 2, sidan 8.

skall vara längre än 20 minuter. Detta krav uppfylls inte av den äldsta varianten av material A.

Anledningen till att flera varianter av material A har undersökts med avseende på materialagenskaper är att svårförklariga resultat påträffades vid hanteringsprov och slagprov enligt SS-EN 253 (se avsnitt 4.2 och 4.4). Dessutom visade sig olika rör av material A, från olika tillverkningsår, ha väsentligt olika slagseghetsegenskaper i Charpy-hänseende (se avsnitt 4.1, sidan 21). Skillnaden i resultat skulle kunna bero på att råmaterialen till något av de provade rören inte bestått uteslutande av material A utan blandats upp med någon ytterligare råvara. Å andra sidan har material A varit i bruk länge och utvecklats under den tidsperiod som provobjekten spänner över. Skillnaden mellan de olika A-varianterna i Tabell 3-1 är inte så stora att man entydigt kan säga att de är tillverkade av olika råmaterial. Olikheter i termostabilitet kan vara en konsekvens av att materialen är olika gamla och därmed har utsatts för olika grad av fysikalisk åldring.

För att täcka in både nya och gamla material, har anskaffningen av fjärrvärmerör till provning och utvärdering skett både från en fjärrvärmerörstillverkare och från ett energibolags "skrotlager". Målsättningen var att finna fjärrvärmerör av liten respektive stor dimension av vardera materialet. Som liten dimension valdes DN 65/160 medan den större dimensionen varierade mellan DN 2x150/450 och DN 400/630, beroende på vilka rör man lyckades komma över. Ett av de sökta rören, DN 65/160 med mantelrör av material A, gick inte att uppbringa. Information om material, rördimension och tillverkningsdatum för de provade mantelrören ges i Tabell 3-2. En detaljerad lista över vilka rörprover som använts till respektive provningar återfinns i bilaga A.

Tabell 3-2 Rör för genomförda provningar

Material	Rör	Tillverkat år (vecka)
A	FV-rör: DN 400/560 × 8,8	1997 (29)
	FV-rör: DN 400/630 × 12,6	1986 (05)
B	FV-rör: DN 65/160 × 3,0	2003 (47)
	FV-rör: DN 300/500 × 7,8	2004 (17)
	Mantelrör: 500 × 7,8	2000 (34)
C	FV-rör: DN 65/160 × 3,0	2001 (46)
	FV-rör: DN 2x150/450 × 7,0	2002 (37)
	Tryckrör: PN4 160 × 6,0	2001 (01)
	Tryckrör: PN6 160 × 9,1	2003 (45)
	Tryckrör: PN10 160 × 14,6	2004 (08)

Materialklass, rörtyp och -dimension samt tillverkningsdatum för de rör som använts för provningarna.

Material class, pipe type and size and date of manufacture for pipes used for tests.

3.2. Slag- och hanteringsprov

Charpyslagprovning genomfördes på de olika materialen A, B och C för ta reda på övergångstemperaturen mellan segt och sprött beteende. Slagprov enligt SS-EN 253 gjordes på såväl små som stora rördimensioner för att kunna relatera resultaten till de standardprovningar som föreskrivs idag.

Metoderna S4 och Full-scale som redovisas i avsnitt 2.3.1 är utrymmeskrävande och dyra att genomföra. Därför har en egenutvecklad liknande metod, här benämnd *giljotinprovning*, använts. Syftet med denna var att för olika rörmaterial försöka ringa in vid vilka temperaturer snabb sprickutbredning initieras och propagerar.

Dessutom har ett *hanteringsprov* genomförts med avsikten att efterlikna verkliga förhållanden med avseende på hur rören bearbetas i fält, och försöka återskapa de brott som faktiskt emellanåt uppstår.

3.2.1. Charpyprovning

Slagprov med Charpymetoden genomfördes enligt ASTM D 6110 (1997). Metoden beskrivs närmare i avsnitt 2.3.3.

Slagproven utfördes på material A från två olika tillverkningsår, 1986 och 1997, samt på provkroppar av material B och C tillverkade år 2000 och 2003. På samtliga material genomfördes provserier där provkropparna inför slagproven konditionerades till bestämda temperaturer mellan cirka $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ till $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Inför slagproven förvarades provkropparna i en temperaturkontrollerad konditioneringsutrustning så att provkropparna på kort tid kunde placeras i slagprovssapparaten och därefter slagprovet genomföras. Provkropparnas var frästa till mått inom ramen för vad som anges i ASTM D 6110 (1997), se avsnitt 2.3.3.

3.2.2. Slagprov enligt SS-EN 253

Vid standardmässig provning av fjärrvärmerör utförs slagprovningen normalt på rör av liten dimension. Detta är framför allt av provningstekniska skäl. Metoden är utrymmeskrävande och svår att applicera på stora rör.

Slagprov enligt SS-EN 253 utfördes på små fjärrvärmerör med mantelrör av material B och C med dimensionen DN 65/160. Slagprov utfördes även på stora fjärrvärmerör med mantelrör av material A med dimension DN 400/630, material B med dimension DN 300/500 och på material C med dimension DN 2x150/450. I enlighet med specifikationer i SS-EN 253 (2003) och ISO 3127 (1994) som beskrivs i avsnitt 2.3.2 utfördes 8 stycken slag runt omkretsen på de små rören och 16 stycken slag runt omkretsen på de stora.

För de små provrören användes en frysbox för att kyla ned rören till -20°C . Rören konditionerades vid denna temperatur under minst 12 timmar före slagproven. Slagproven genomfördes i en intilliggande slagprovsutrustning inom 10 sekunder efter att provkroppen lämnat frysboxen. För de stora provrören användes en kylcontainer utrustad med en slagprovningssutrustning, vilket innebar att provkropparna kunde slås vid den aktuella temperaturen -20°C utan att lämna konditioneringsanläggningen. De stora rören konditionerades vid denna temperatur i ca 24 timmar före provning.

3.2.3. Giljotinprov

Slagprov enligt egen metod, med en så kallad giljotin, har genomförts vid olika temperaturer på betongfyllda plaströr av material C samt på fjärrvärmerör med mantelrör av material B.

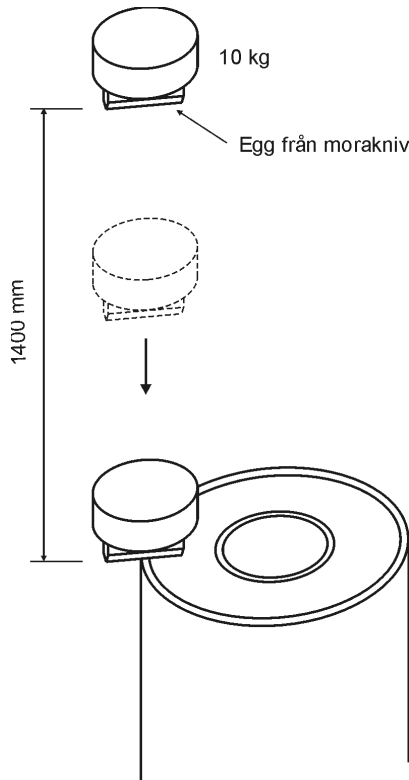
Proven har genomförts med en knivförsedd fallvikt som från bestämd höjd släppts vertikalt mot mantelrörens ändyta på stående provrör, se Bild 7. För att kunna utvärdera och jämföra olika plaströrsmaterials samt olika rörgodstjocklekars inverkan på den kritiska temperaturen, användes betongfyllda plaströr⁷ för tryckrörsapplikationer.

Efter genomfört slagprov noterades om röret sprack eller inte. På alla rör där en spricka erhöles, mättes sprickans längd upp och anges i Tabell 4-2 som andel av den

⁷ Betongfyllda tryckrör användes för att möjliggöra mätningar på tjocka rörväggar utan att behöva hantera alltför stora rördimensioner. Ett vanligt fjärrvärmerör med 14,6 mm tjock mantel är 1,2 m i diameter.

totala rörlängden. Slagprovningen fortgick med successivt ökad eller sänkt temperatur till dess man ringat in vid vilka temperaturer rören sprack fullt samt delvis.

Bild 7 **Principskiss – Giljotinprov**



Provuppställning vid giljotinprov. Fallvikten med knivseggen träffar kanten på mantelröret med en hastighet på 5,2 m/s och en rörelseenergi på 137 J.

Test rig for guillotine tests. The falling weight and knife edge hits the edge of the casing pipe at a velocity of 5.2 m/s with a kinetic energy of 137 J.

Ett liknande prov genomfördes efter avslutade slagprov enligt SS-EN 253 (se ovan) på de prov som inte sprack. Med en skarpslipad yxa utdelades ett kraftigt slag vertikalt mot mantelrörets utsida samt horisontellt mot mantelrörets ändyta.

3.2.4. Simulerad verklig hantering

Som ett simulerat verklighetsprov har fjärrvärmerör med de i studien ingående mantelrörmaterialen A, B och C under verkliga temperaturbetingelser behandlats med i fält vanligt förekommande verktyg. För att erhålla de olika temperaturbetingelserna användes en kylcontainer där temperaturen varierades mellan 0 och -30°C. De verktyg som ingått i provningen är bormaskin, sticksåg och vinkelslip.

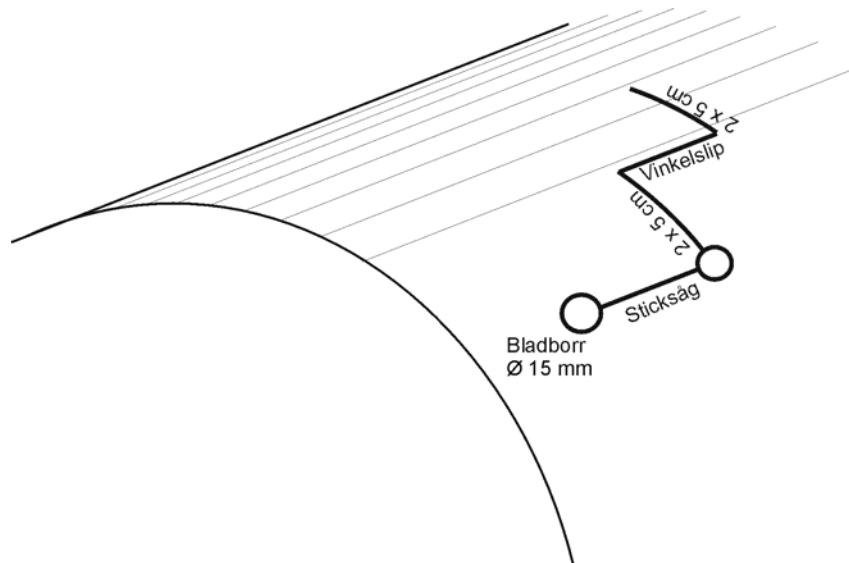
Provningen genomfördes så att alla provrör utsattes för en och samma serie av behandling med verktyg i en förbestämd ordning. Provningsserien innefattade följande steg, Bild 8:

- 1) Ett första hål borrades med ett 16 mm bladborr.
- 2) Utgående från hålet sågades 5 cm i rörets längsled med sticksåg.
- 3) Ett andra hål borrades i slutet av snittet och därefter sågades ytterligare 5 cm i ringled med sticksåg.
- 4) Därefter sågades ett nytt 5 cm snitt i längsled, men nu med vinkelslip.
- 5) Avslutningsvis sågades 5 cm med vinkelslip i ringled.

Beroende på mantelrörsmaterial och resultat från genomförda Charpyslagprov (se rubrik 3.2.1), valdes en starttemperatur för varje material. Provningsen utfördes sedan vid successivt sjunkande temperatur till dess att brott erhöles vid något av de ingående provmomenten. För att ligga inom verkliga temperaturbetingelser, avslutades provningen om inga brott erhöles vid -30°C .

De simulerade verklighetsproven utfördes på fjärrvärmerör av liten och stor dimension parallellt.

Bild 8 **Principskiss – Verklighetsanpassat hanteringsprov**



Genomförande av verklighetsanpassad hanteringsprov. Först borras ett hål genom mantelröret med en bladborr. Utgående från detta sågas två 5 cm långa sträckor med sticksåg i axiell respektive tangentiell riktning. Därefter görs samma sak med vinkelslip.

Handling test. First, a hole is drilled through the casing pipe with a double cutting drill. Then two 5 cm long slits are cut with a jigsaw in the axial and tangential directions. Finally, the same thing is done with an angle grinder.

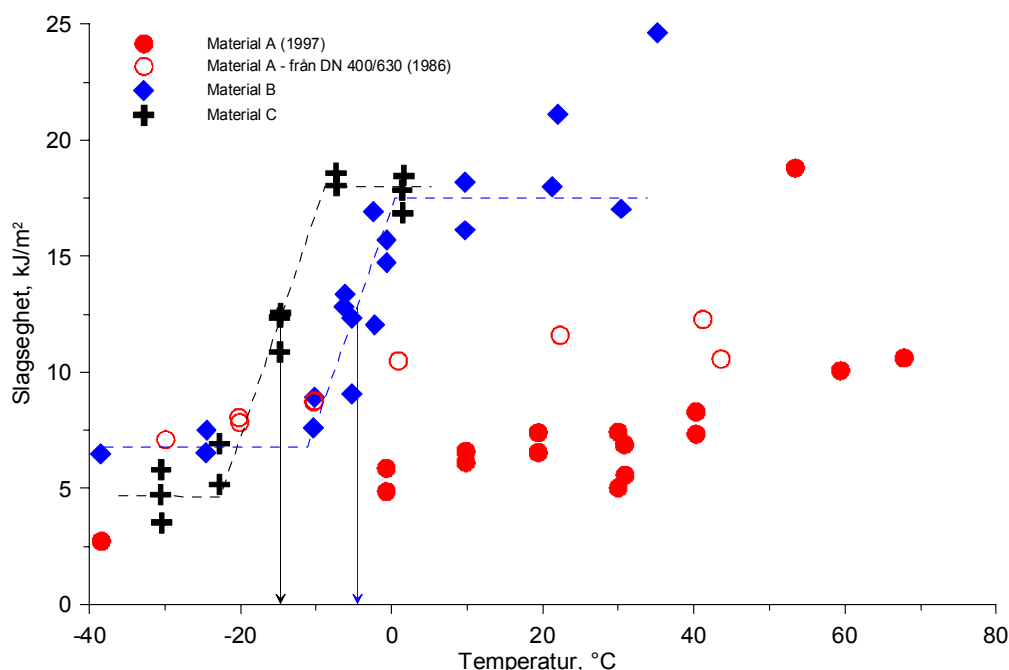
4. Resultat och diskussion

4.1. Charpyprovning

Charpyutvärderingen visade på distinkta övergångstemperaturer mellan segt och sprött beteende för materialen B och C, Bild 9. Vid övergångstemperaturen avtar slagenergin som krävs för att slå av provstaven drastiskt – från en nivå representativ för segt brott till en lägre nivå representativ för helt sprött brott. Den absoluta nivån på slagenergin, eller *slagsegheten*, är inte av primärt intresse här. Men övergångstemperaturen kan ge ledtrådar om materialens användbarhet i olika temperaturområden.

Övergångstemperaturerna för materialen B och C ligger omkring -5 °C respektive -15 °C . Material A uppvisade inte någon distinkt övergång, utan en gradvis ökning av slagsegheten med temperaturen. Två varianter av material A, med olika tillverkningsår, undersöktes. Anledningen till detta var att svårförklariga resultat påträffades vid hanteringsprov och slagprov enligt SS-EN 253 (se avsnitt 4.2 och 4.4). Resultaten för de två A-varianterna i Bild 9 skiljer sig åt ganska markant och det är troligt att materialen är olika. Detta antyder att det material A som har använts i föreliggande projekt och som använts i stor omfattning för fjärrvärmemantelrör tidigare inte är så noggrant kontrollerat och väldefinierat som nyare material.

Bild 9 Resultat från Charpyslagprov



Uppmätt slagseghet mot temperatur för de provade materialen. Materialklasserna B och C uppvisar tydliga övergångstemperaturer mellan segt och sprött beteende vid ca -15 °C respektive -5 °C .

Measured impact resistance vs. temperature for the tested materials. Material classes B and C show clear transition temperatures between ductile and brittle behaviour at -15 °C and -5 °C respectively.

Brown och Lu (2001) har påvisat en korrelation mellan resultaten från den här typen av Charpyprovning i rumstemperatur och den kritiska temperaturen i S4-hänseende⁸. Med de slagenergier som uppmäts här, skulle de kritiska S4-temperaturerna för ett rör

⁸ Se avsnitt 2.3.1.1, sidan 11.

med SDR⁹ 11, för material A och material B vara ca. +3 °C respektive –12 °C. Inga Charpyslagprov har gjorts vid rumstemperatur på material C.

Det finns en viss korrelation mellan slagproven enligt Charpy och de på hela rör, såtillvida att övergångstemperaturerna mellan segt och sprött beteende för materialen B och C förhåller sig i relation ungefär som de kritiska spänningsnivåerna vid giljotinproven (se Bild 10, sidan 24). Detta antyder att Charpyprovning skulle kunna användas för klassificering av mantelrörsmaterial med avseende på risken för spröda brott som ett alternativ till nuvarande slagprovning i SS-EN 253.

4.2. Slagprov enligt SS-EN 253

Det är tämligen ovanligt att fjärrvärmerör av liten dimension spricker vid en slagprovning enligt SS-EN 253. Här sprack emellertid såväl ett litet som ett stort rör av material B. Samtliga övriga prover genomfördes utan brott.

För materialen B och C ligger resultaten i linje med giljotinproven såtillvida att de beräknade spänningsnivåerna ligger över eller nära kritiskt värde i Bild 10, sidan 24, för material B och under kritiskt värde för material C. Det är emellertid överraskande att material A inte spricker då det, nominellt sett, skall vara känsligare än material B. Detta kan dock bero på att de A-varianter som använts i föreliggande projekt inte varit helt väldefinierade, se vidare resonemang i stycke 4.1.

Tabell 4-1 Resultat från slagprovning enligt SS-EN 253

Material	Dimension	Provlängd mm	Sprack	Spänning MPa
A	DN 400/630	3450	—	2,4
B	DN 65/160	1010	Ja	1,8
	DN 65/160	1010	—	1,8
	DN 300/500	3150	Ja	2,4
C	DN 65/160	820	—	1,8
	DN 65/160	820	—	1,8
	2×DN 150/450	2350	—	2,3

Resultat från slagprovning enligt SS-EN 253 vid –20 °C (Bild 5). Spänningen är beräknad temperaturspänning enligt bilaga B med referenstemperaturen +20 °C.

Results from impact testing according to EN 253 at –20 °C. Only material B cracked at the test. The stress (Spänning) is the calculated temperature stress in accordance with appendix B with the reference temperature +20 °C.

4.3. Giljotinprov

Tabell 4-2 redovisar resultaten från samtliga giljotinslagprov på materialen B och C samt de ”yxprov” (se sidan 23) som genomfördes som en avslutning på SS-EN 253-slagproven. För de små rördimensioner som provats tycks det finnas förutsättningar att tämligen entydigt ringa in en kritisk temperatur för att ett fortskridande sprickförlopp skall kunna uppstå. Även yxproven, som genomförts på större rördimensioner, faller in väl i mönstret.

Av tabellen förefaller material B ha en lägre kritisk temperatur än material C. Detta är dock sannolikt en konsekvens av att de provade rören av material C varit betongfyllda vilket gör att samma temperatursänkning ger större dragspänningar i rörväggen jämfört med ett vanligt fjärrvärmerör. Detta beror på att betong inte är tillnärmelsevis lika eftergivligt som PUR-skum och därmed i större utsträckning hindrar

⁹ SDR betecknar förhållandet mellan ett rörs ytterdiameter och dess godstjocklek.

polyetenmanteln från att dra ihop sig då temperaturen sjunker¹⁰. Om man jämför sprickutbredningen med temperaturdragspänningen beräknad enligt bilaga B (Bild 10) syns en tydlig skillnad mellan de två materialen beträffande den spänningsnivå som krävs för att RCP skall kunna uppstå: ca 2 MPa för material B och ca 3,5 MPa för material C.

Provningar på material C genomfördes på en serie vägg tjocklekar men resultaten visar inte på att tjockleken har någon tydlig inverkan, vilket teorier för RCP i tryckledningsrör normalt hävdar.

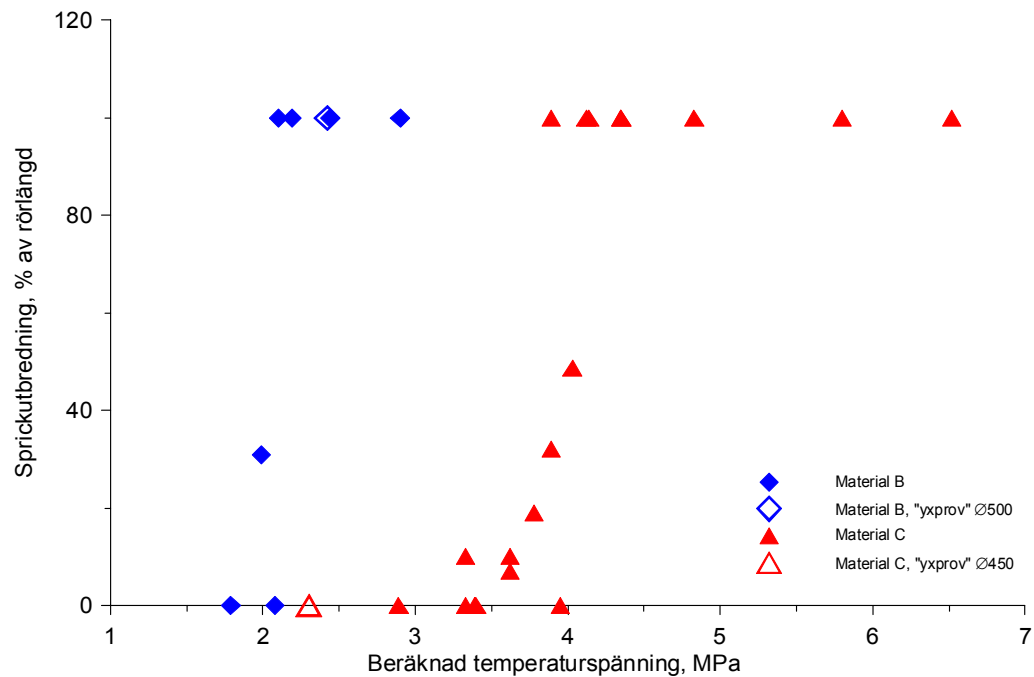
Tabell 4-2 Resultat från giljotinslagprov

Material	Diameter mm	Vägg tjocklek mm	Temperatur °C	Spricklängd %	Spänning MPa
A *	630	9,8	-20,0	100	2,6
B	160	3,1	-20,5	0	1,8
			-24,9	31	2,0
			-27,0	0	2,1
			-27,4	100	2,1
			-29,5	100	2,2
			-35,0	100	2,4
			-45,4	100	2,9
	500	7,8	-20,0	100	2,4
C	160	6,0	-9,9	0	2,9
			-14,5	0	3,3
			-15,1	0	3,4
			-17,5	10	3,6
			-19,1	19	3,8
			-20,3	100	3,9
			-30,0	100	4,8
			-40,1	100	5,8
			-47,5	100	6,5
		9,1	-14,5	10	3,3
			-15,2	0	3,4
			-17,5	7	3,6
			-20,3	32	3,9
			-21,7	49	4,0
			-22,8	100	4,1
			-25	100	4,4
		14,6	-20,8	0	4,0
			-22,6	100	4,1
			-25,0	100	4,4
	450	7,0	-20,0	0	2,2

Resultat från giljotinslagprov. Spricklängden anges i % av provets längd. Spänningen är beräknad temperaturspänning enligt bilaga B med referenstemperaturen +20 °C. Små prover av material B har bestått av vanliga fjärrvärmerör. Små prover av material C har bestått av betongfyllda plaströr. Stora fjärrvärmerör, markerade med *, har inte slagits i giljotinen utan utsatts för ett "yxprov", se sidan 22.

*Results from guillotine tests. The crack length (spricklängd) is given in % of the sample length. The stress (Spänning) is the calculated temperature stress in accordance with appendix B. The small samples of material B were regular district heating pipes. The small samples of material C were concrete filled plastics pipes. Large district heating pipes, marked with a *, were not tested in the guillotine, but were instead hit with a sharp axe.*

¹⁰ Jämför ekvation 3 i bilaga B. I ett "betongfall" sätts elasticitetsmodulen för betong in istället för E_{PUR} , vilket resulterar i ett större ekvivalent inre tryck P_i .

Bild 10 Sprickutbredning och temperaturspänning vid giljotinprov

Sprickutbredning i % av provlängd som funktion av beräknad temperaturspänning för proverna i Tabell 4-2.

Crack propagation in % of sample length as function of calculated temperature stress for the samples in Tabell 4-2.

4.4. Simulerad verklig hantering

Endast ett RCP-brott uppstod under hanteringsprovet. Det stora röret av material B sprack vid -25 °C under bearbetning med vinkelslip, Tabell 4-3 och Bild 12. Ett osprucket prov visas i Bild 11.

En jämförelse mellan sprickförekomsten och den beräknade ringdragsspänningen till följd av temperatursänkningen antyder att det krävs högre spänningar (och alltså lägre temperatur) för att RCP skall uppstå vid hanteringsprovet än vid giljotinprov och slagprov enligt SS-EN 253. Detta kan vara en konsekvens av att initieringen är betydligt våldsammare vid slagproven än vid hanteringsprovet.

Tabell 4-3 Resultat från simulerad verklig hantering

Material	Dimension	Temperatur °C	Sprack vid behandling med					Spänning MPa
			Borrmaskin	Sticksåg		Vinkelslip		
				Längsled	Ringled	Längsled	Ringled	
A	DN 400/630	0	—	—	—	—	—	1,2
		-5	—	—	—	—	—	1,5
		-10	—	—	—	—	—	1,8
B	DN 65/160	-5	—	—	—	—	—	1,1
		-10	—	—	—	—	—	1,3
		-15	—	—	—	—	—	1,6
		-20	—	—	—	—	—	1,8
		-25	—	—	—	—	—	2,0
		-30	—	—	—	—	—	2,2
	DN 300/500	-5	—	—	—	—	—	1,5
		-10	—	—	—	—	—	1,8
		-15	—	—	—	—	—	2,1
		-20	—	—	—	—	—	2,4
		-25	—	—	—	—	Ja	2,7
C	DN 65/160	-15	—	—	—	—	—	1,6
		-20	—	—	—	—	—	1,8
		-25	—	—	—	—	—	2,0
		-30	—	—	—	—	—	2,2
	2×DN 150/450	-15	—	—	—	—	—	2,0
		-20	—	—	—	—	—	2,3
		-25	—	—	—	—	—	2,6
		-30	—	—	—	—	—	2,9

Resultat från simulerad verklig hantering enligt Bild 8. Spänningen är beräknad temperaturspänning enligt bilaga B med referenstemperaturen +20 °C.

Results from simulated handling test with double cutting drill (bladborr), jigsaw (sticksåg) and angle grinder (vinkelslip) according to Bild 8. The stress (Spänning) is the calculated temperature stress in accordance with appendix B with the reference temperature +20 °C.

Bild 11 Hanteringsprov utan brott



Efter hanteringsprov vid -30 °C på material C.

After handling test at -30 °C with no fracture on material C.

Bild 12 Hanteringsprov med brott



Efter hanteringsprov vid -25°C på material B.

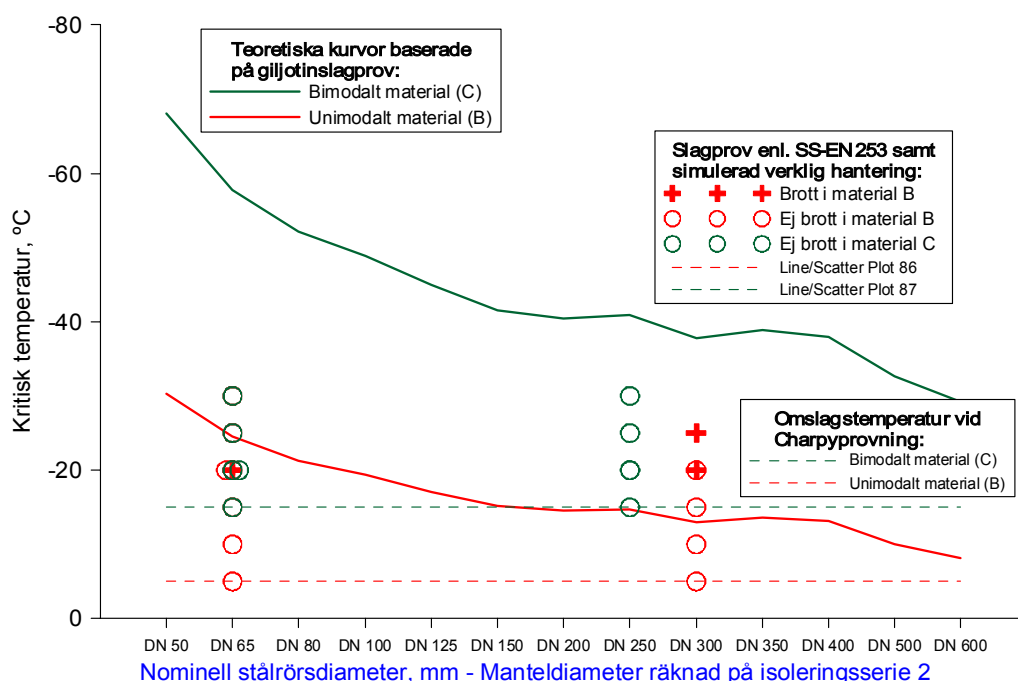
After handling test at -25°C with fracture on material B.

5. Slutsatser

Provningarna har visat på ett handfast sätt att RCP kan uppstå vid ”vanlig” hantering av ett fjärrvärmemantelrör, Bild 12. Resultaten från de mätningar av slagsegheter och försök att ringa in kritiska hanteringstemperaturer som gjorts visar också att det är stora kvalitetsskillnader mellan dagens gängse polyetenmaterial och modernare varianter som modifierats med spröda brott i särskild åtanke.

Bild 13 visar en sammanställning över genomförda slagprov på rör för materialen B och C. De teoretiska kurvorna i diagrammet kan ses som gränsvärden för olika rördimensioner beträffande den temperatur som de kan utsättas för innan de blir påtagligt känsliga för sprödbrott. De är framräknade under förutsättning att de gränsspänningar som observerades under giljotinslagprovet är avgörande. Punkterna i diagrammet visar resultaten från de andra slagprovsmetoderna. De stämmer väl överens med kurvorna, men tyvärr saknas provningsdata vid så låga temperaturer som tycks krävas för att brott skall kunna uppstå även i material C.

Bild 13 Kritisk temperatur med avseende på risk för sprödbrott



Kurvorna är beräknade enligt bilaga B utifrån antagandet att ringdragspänningarna som krävs för att sprödbrott skall uppstå är 2 MPa för material B och 3,5 MPa för material C (Bild 10, sidan 24). Temperatursänkningen enligt bilaga B antas utgå från rumstemperatur, eller +20 °C.

Critical temperature vs. risk for brittle fracture. The curves are calculated according to appendix B assuming that the hoop stress needed for brittle fracture to occur is 2 MPa for material B and 3.5 MPa for material C (Bild 10, page 24). The temperature decrease is calculated from a reference temperature of +20 °C.

Med stora rördimensioner och ett unimodalt polyetenmaterial finns risk för spröda brott redan omkring några grader under noll. De temperaturdragspänningar som krävs ökar med minskande rördimension och för ett DN 50-rör, med 140 mm mantelrör, krävs teoretiskt en temperatur på omkring -30 °C eller lägre. För ett bimodalt mantelrörsmaterial krävs så stora temperatursänkningar att det inte är rimligt att förvänta sig att spröda brott kan uppstå.

De teoretiska kurvorna i Bild 13 är sannolikt på säkra sidan. Dels för att rör vid verkliga montagearbeten normalt lagras utomhus en tid innan arbetet utförs. De

”konditioneras” således och temperaturspänningarna hinner till viss del relaxera. Sättet att initiera sprickförloppet är sannolikt också av betydelse. Kurvorna är baserade på giljotinslagprovet som är förhållandevis extremt: det kan närmast jämföras med ett kraftigt slag med skarpslipad yxa.

Det äldre polyetenmaterialet, material A, faller utanför ramen med avseende på uppkomst av spröda brott. Det uppvisar inga brott vid slagprovning enligt SS-EN 253 eller vid hanteringsprovet, trots att det nominellt skall vara betydligt sämre än de båda andra materialen och att det vid Charpyprovningen uppvisade betydligt lägre slagseghetsvärden. Förklaringen till denna diskrepans mellan förväntade resultat och utfall har inte kunnat studeras närmare inom ramen för föreliggande projekt. Rörproverna som material A hämtats ifrån är betydligt äldre än för de övriga materialen¹¹, varför de ringspänningar som en gång funnits i mantelröret som en konsekvens av uppskumningen till betydande del har relaxerat.

Då så få av de genomförda hanteringsproven uppvisat något brott¹² saknas statistiskt underlag för att kvantitativt utreda en eventuell korrelation mellan övergångstemperaturen vid Charpyprovning och den kritiska temperaturen för RCP. Det tycks dock som att skillnaden i kritiskt temperatur mellan bi- och unimodala material är större för hela rör än för Charpyprovstavar. De streckade linjerna i Bild 13 visar de kritiska Charpytemperaturerna för materialen B och C, och spannet mellan dessa är mindre än spannet mellan motsvarande heldragna kurvor för hela rör. Det är tydligt att Charpyslagprovning är användbar för att rangordna olika material sinsemellan. Med mer empiriska data skulle metoden sannolikt kunna användas för klassificering och kravgränser.

¹¹ Tabell 3-2, sidan 17.

¹² Tabell 4-3, sidan 25.

6. Referenser

- Amerikansk standard ASTM D 6110 (1997). *Standard test methods for determining the Charpy impact resistance of notched specimens of plastics*.
- Bergström, G. (1999). Rapid Crack Propagation, RCP, in the PE Casing of District Heating Pipes, *Proceedings of the 7th International Symposium on District Heating and Cooling*, Lund.
- Bergström, G. och Nilsson, S. (2001). *Direktförlagda böjar i fjärrvärmeledningar – Påkänningar och skadegränser*, Svensk Fjärrvärme FoU 2001:52.
- Brown, N. och Lu, X. (2001), A Simple Test to Prevent Rapid Crack Propagation, *Plastics Pipes XI*, München.
- Clutton, E. Q. mfl. (1998), Slow crack growth and impact mechanisms in polyethylene, *Plastics Pipes X*, Göteborg.
- Ferry, J. D. (1980). *Viscoelastic properties of polymers*, John Wiley & Sons.
- Greenshields, C. J. mfl. (2000), A fluid-structure model for fast brittle fracture in plastics pipes, *Journal of Fluids and Structures*, **14**, 221 – 234.
- Internationell standard ISO 3127 (1994). *Thermoplastics pipes – Determination of resistance to external blows – Round the clock method*.
- Internationell standard ISO/TR 9080 (1994). *Thermoplastics pipes for the transport of fluids – Methods of extrapolation of hydrostatic stress rupture data to determine the long-term hydrostatic strength of thermoplastics pipe materials*.
- Internationell standard ISO 13477 (1997). *Thermo plastic pipes for the conveyance of fluids – Determination of resistance to rapid crack propagation (RCP) – Small-scale steady-state test (S4)*.
- Internationell standard ISO 13478 (1997). *Thermoplastics pipes for the conveyance of fluids - Determination of resistance to rapid crack propagation (RCP) - Full-scale test (FST)*.
- Janson, L. E. (1999). *Plastics Pipes for Water Supply and Sewage Disposal*, Borealis, Stockholm, 3:e utgåvan.
- Johansson, G. (2005). *Personlig kommunikation*, Powerpipe Systems AB.
- Johansson, M. (2005). *Personlig kommunikation*, Luleå Energi AB.
- Kausch, H. –H. (1987). *Polymer fracture*, Springer Verlag.
- Nilsson, S. (2000). *On stone indentations in district heating pipes – Pipe and backfill interactions and life time aspects*, Licentiatuppsats, Chalmers tekniska högskola.
- Oberbach, K. (1998). *Kunststoff Taschenbuch*, Carl Hanser Verlag, 27:e utgåvan.
- Roark, R. J. och Young, W. C. (1975). *Formulas for stress and strain*, McGraw-Hill Kogakusha, 5:e utgåvan.
- Svensk standard SS-EN 253 (2003). *Fjärrvärmesystem – förisolerade rörsystem med fast förband mellan värmeisolering och medierör respektive mantelrör för direkt markförlagd distribution av hetvatten – Rörenhet bestående av raka medierör av stål, värmeisolering av hård uretancellplast (PUR-skum) och mantelrör av etenplast (PE)*.
- Vanspeybroeck, P (2001). RCP, after 25 years of debates, finally mastered by two ISO-tests, *Plastics Pipes XI*, München.
- Williams, J. G. (1987). *Fracture mechanics of polymers*, Ellis Horwood Limited.

Bilaga A: Rörprover och genomförda försök

Provningsmetod	Materia l	Rör	Tillverkat år(vecka)
Giljotinprov (avsnitt 3.2.1)	B	FV-rör: DN 65/160 × 3,0	2003 (47)
	C	Tryckrör: PN4 160 × 6,0	2001 (00)
	C	Tryckrör: PN6 160 × 9,1	2003 (45)
	C	Tryckrör: PN10 160 × 14,6	2004 (08)
Slagprov enligt SS-EN 253 (avsnitt 3.2.2)	A	FV-rör: DN 400/630 × 12,6	1986 (05)
	B	FV-rör: DN 300/500 × 7,8	2004 (17)
	B	FV-rör: DN 65/160 × 3,0	2003 (47)
	C	FV-rör: DN 2x150/450 × 7,0	2002 (37)
	C	FV-rör: DN 65/160 × 3,0	2001 (46)
Simulerad verklig hantering (avsnitt 3.2.4)	A	FV-rör: DN 400/630 × 12,6	1986 (05)
	B	FV-rör: DN 300/500 × 7,8	2004 (17)
	B	FV-rör: DN 65/160 × 3,0	2003 (47)
	C	FV-rör: DN 2x150/450 × 7,0	2002 (37)
	C	FV-rör: DN 65/160 × 3,0	2001 (46)
Charpyslagprov (avsnitt 3.2.1)	A	FV-rör: DN 400/630 × 12,6	1986 (05)
	A	FV-rör: DN 400/560 × 8,8	1997 (29)
	B	Mantelrör: 500 × 7,8	2000 (34)
	C	Tryckrör: PN6 160 × 9,1	2003 (45)

Bilaga B: Temperaturspänningar i mantelröret

Då ett fjärrvärmerör kyls ned strävar det efter att dra ihop sig och bli mindre. Mantelrörets temperaturkontraktion är större än PUR-skummets. Detta innebär att mantelröret förhindras att dra ihop sig till sin temperaturmässigt rätta storlek, vilket i sin tur gör att ringdragspänningar förs in. Hur stora dessa blir beror på hur mycket PUR-skummet orkar hålla emot mantelrörets sammandragning. Beräkningsmässigt kan detta hanteras enligt nedan.

Mantelrörets radieförändring till följd av en temperaturförändring ΔT och ett invändigt övertryck P_i kan tecknas (se t.ex. Roark och Young, 1975, för formler avseende tunnväggiga rörtvärnsnitt):

$$\Delta r_C = \alpha_{PE} r_C \Delta T + \frac{P_i r_C^2}{E_{PE} s_C} \quad (1)$$

Där Δr_C är mantelrörets radieförändring (m), α_{PE} och E_{PE} är längdutvidgningskoefficienten ($1/^\circ\text{C}$) respektive elasticitetsmodulen (MPa) för polyeten, r_C är mantelrörets medelradie (m) och s_C är dess godstjocklek (m).

Om skummet betraktas som en endimensionell plan fjädrande bädd kan motsvarande tjockleksförändring hos skummet uttryckas:

$$\Delta s_F = \alpha_{PUR} s_F \Delta T - \frac{P_i}{E_{PUR}} s_F \quad (2)$$

Där Δs_F är skummets tjockleksförändring (m), α_{PUR} och E_{PUR} är längdutvidgningskoefficienten ($1/^\circ\text{C}$) respektive elasticitetsmodulen (MPa) för PUR-skummet och s_F är skummets tjocklek (m).

Då röret utsätts för en temperatursänkning ställer tryckspänningen mellan mantelrör och skum in sig så att radieminskningen Δr_C blir lika med tjockleksminskningen Δs_F . Genom att sätta (1) lika med (2) kan jämviktstrycket bestämmas:

$$P_i = \Delta T (\alpha_{PUR} s_F - \alpha_{PE} r_C) \left(\frac{r_C^2}{E_{PE} s_C} + \frac{s_F}{E_{PUR}} \right)^{-1} \quad (3)$$

Därefter kan ringdragspänningen i mantelrörsväggen beräknas ur

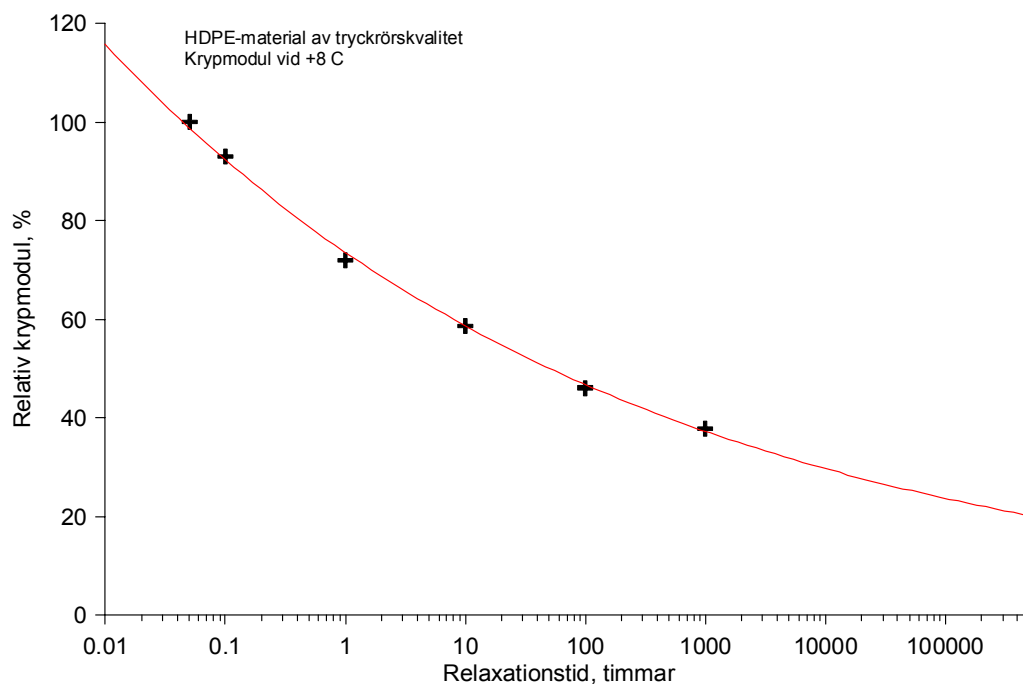
$$\sigma = \frac{P_i r_C}{s_C} \quad (4)$$

Bilaga C: Spänningsrelaxation hos polyeten

Det är förhållandevis svårt att få tag på goda data vad gäller spänningsrelaxation hos polyeten, i synnerhet vid låga temperaturer. I föreliggande behandling används krypmätningar gjorda av SP på ett HDPE-material av tryckrörskvalitet, Bild 14. Som tidsberoende relaxationsmodul används

$$E_{PE}(t) = 735,7 \text{ MPa} \times t^{-0,099} \quad (5)$$

Bild 14 Spänningsrelaxation hos polyeten



Punkterna visar uppmätt modul. Kurvan är en anpassad potensfunktion (log/log-linjär). Observera att ingen absolut bestämning av krypmodulens storlek är gjord, varför abscissan anger styvheten i relation till 3-minutersvärdet (vid 0,05 timmar). I beräkningar baserade på dessa mätningar antas 3-minutersmodulen till 1000 MPa.

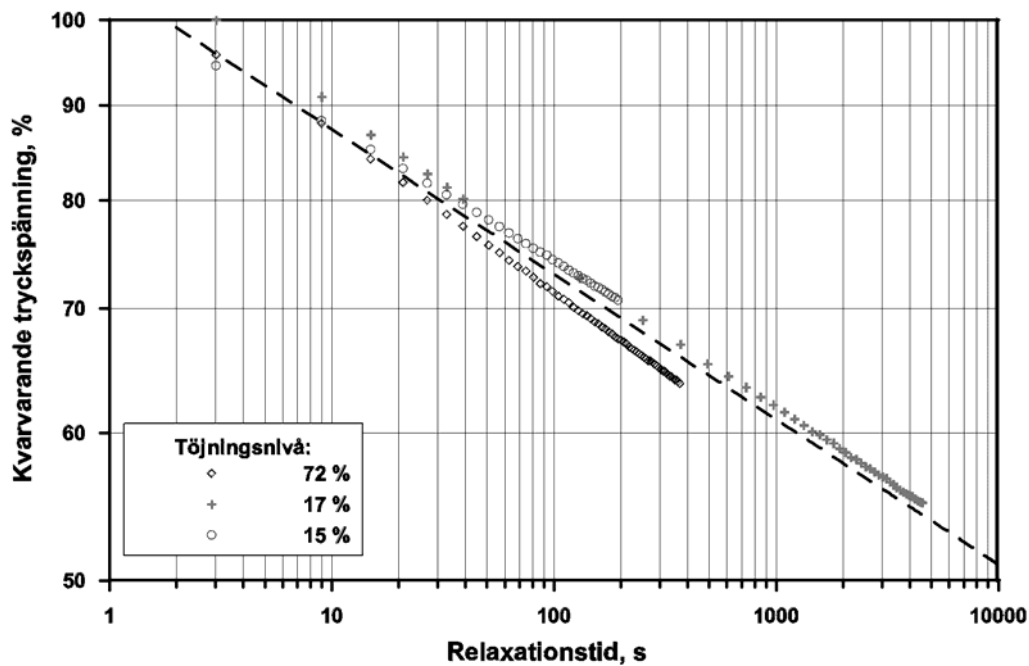
The dots show measured creep modulus. The curve is fitted with a power function. Note that no absolute determination of the modulus is done. Hence, the abscissa shows the relative stiffness with respect to the 3 minutes value (0.05 hours). In calculations based on these measurements, the 3 minutes modulus is assumed to 1000 MPa.

Bilaga D: Spänningsrelaxation hos polyuretanskum

En beräkningsmässig approximation av spänningsrelaxationen hos tryckbelastat PUR-skum har gjorts baserat på mätningar genomförda av Bergström och Nilsson (2001), Bild 15. Den tidsberoende relaxationsmodulen är beräknad från 15 %-kurvan i diagrammet till

$$E_{PUR}(t) = 8,1 \text{ MPa} \times t^{-0,071} \quad (6)$$

Bild 15 Spänningsrelaxation hos PUR-skum



Uppmätt spänningsrelaxation hos tryckbelastat PUR-skum vid olika belastningsnivåer (Bergström och Nilsson 2001). I beräkningar baserade på dessa mätningar antas 3-minutersmodulen (vid 0,05 timmar) till 10 MPa.

Measured stress relaxation in compression loaded PUR foam at various load levels (Bergström and Nilsson 2001). In calculations based on these measurements, the 3 minutes modulus is assumed to 1000 MPa.

Rapportförteckning

**Samtliga rapporter kan beställas hos Svensk Fjärrvärmes Förlagsservice.
Telefon: 026 – 24 90 24, Telefax: 026 – 24 90 10, www.svenskfjarrvarme.se**

<i>Nr</i>	<i>Titel</i>	<i>Författare</i>	<i>Publicerad</i>
FORSKNING OCH UTVECKLING – RAPPORTER			
1	Inventering av skador på befintliga skarvar med CFC-blåsta respektive CFC-fria fogskum	Hans Torstensson	maj-96
2	Tryckväxlare – Status hösten 1995	Bror-Arne Gustafson Lena Olsson	maj-96
3	Bevakning av internationell fjärrvärmeforskning	Sture Andersson Gunnar Nilsson	maj-96
4	Epoxirelining av fjärrvärmerör	Jarl Nilsson	sep-96
5	Effektivisering av konventionella fjärrvärmecentraler (abonnentcentraler)	Lena Råberger Håkan Walletun	okt-96
6	Auktorisation av montörer för montage av skarvhylsor och isolering Former och utvärdering	Lars-Åke Cronholm	okt-96
7	Direkt markförlagda böjar i fjärrvärmeledningar	Jan Molin Gunnar Bergström	dec-96
8	Medierör av plast i fjärrvärmesystem	Håkan Walletun Heimo Zinko	dec-96
9	Metodutveckling för mätning av värmekonduktiviteten i kulvertisolering av polyuretanskum	Lars-Åke Cronholm Hans Torstensson	dec-96
10	Dynamiska värmelaster från fiktiva värmebehov	Sven Werner	mars-97
11	Torkning av tvätt i fastighetstvättstugor med fjärrvärme	H. Andersson J. Ahlgren	maj-99
12	Omgivningsförhållandenas betydelse vid val av strategi för ombyggnad och underhåll av fjärrvärmenät. Insamlingsfasen	Sture Andersson Jan Molin Carmen Pletikos	dec-97
13	Svensk statlig fjärrvärmeforskning 1981-1996	Mikael Henriksson Sven Werner	dec-97
14	Korrosionsrisker vid användning av stål- och plaströr i fjärrvärmesystem – en litteraturstudie	Peeter Tarkpea	dec-97
15	Värme- och masstransport i mantelrör till ledningar för fjärrkyla och fjärrvärme	Daniel Eriksson Bengt Sundén	dec-97
16	Utvärdering av fuktinträngning och gasdiffusion hos gamla kulvertrör ”Hisings-Backa”	Ulf Jarfelt	dec-97
17	Kulvertförläggning med befintliga massor	Jan Molin Gunnar Bergström Stefan Nilsson	dec-97
18	Värmeåtervinning och produktion av frikyla – två sätt att öka marknaden för fjärrvärmedrivna absorptionskylmaskiner	Peter Margen	dec-97
19	Projekt och Resultat 1994-1997	Anders Tvärne	mars-98

Nr	Titel	Författare	Publicerad
20	Analys av befintliga fjärrkylakunders kylbehov	Stefan Aronsson Per-Erik Nilsson	mars-98
21	Statusrapport Trycklösa Hetvattenackumulatorer	Mats Lindberg Leif Breitholtz	maj-98
22	Round Robin test av isolerförmågan hos fjärrvärmerör	Ulf Jarfelt	maj-98
23	Mätvärdesinsamling från inspektionsbrunnar i fjärrvärmesystem	Håkan Walletun	juni-98
24	Fjärrvärmerörens isolertekniska långtidsegenskaper	Ulf Jarfelt Olle Ramnäs	juni-98
25	Termisk undersökning av koppling av köldbärarkretsar till fjärrkylanät	Erik Jonson	juni-98
26	Reparation utan uppgrävning av skarvar på fjärrvärmerör	Jarl Nilsson Tommy Gudmundson	juni-98
27	Effektivisering av fjärrvärmecentraler – metodik, nyckeltal och användning av driftövervakningssystem	Håkan Walletun	apr-99
28	Fjärrkyla. Teknik och kunskapsläge 1998	Paul Westin	juli-98
29	Fjärrkyla – systemstudie	Martin Forsén Per-Åke Franck Mari Gustafsson Per-Erik Nilsson	juli-98
30	Nya material för fjärrvärmerör. Förstudie/litteraturstudie	Jan Ahlgren Linda Berlin Morgan Fröling Magdalena Svanström	dec-98
31	Optimalt val av värmemätarens flödesgivare	Janusz Wollerstrand	maj-99
32	Miljöanpassning/återanvändning av polyuretanisolerade fjärrvärmerör	Morgan Fröling	dec-98
33	Övervakning av fjärrvärmenät med fiberoptik	Marja Englund	maj-99
34	Undersökning av golvvärmesystem med PEX-rör	Lars Ehrlén	apr-99
35	Undersökning av funktionen hos tillsatser för fjärrvärmevatten	Tuija Kaunisto Leena Carpén	maj-99
36	Kartläggning av utvecklingsläget för ultraljudsflödesmätare	Jerker Delsing	nov-99
37	Förbättring av fjärrvärmecentraler med sekundärnät	Lennart Eriksson Håkan Walletun	maj-99
38	Ändgavlar på fjärrvärmerör	Gunnar Bergström Stefan Nilsson	sept-99
39	Användning av lågtemperaturfjärrvärme	Lennart Eriksson Jochen Dahm Heimo Zinko	sept-99
40	Tätning av skarvar i fjärrvärmerör med hjälp av material som sväller i kontakt med vatten	Rolf Sjöblom Henrik Bjurström Lars-Åke Cronholm	nov-99
41	Underlag för riskbedömning och val av strategi för underhåll och förnyelse av fjärrvärmeledningar	Sture Andersson Jan Molin	dec-99

Nr	Titel	Författare	Publicerad
		Carmen Pletikos	
42	Metoder att nå lägre returtemperatur med värmeväxlardimensionering och injusteringsmetoder. Tillämpning på två fastigheter i Borås.	Stefan Petersson	mars-00
43	Vidhäftning mellan PUR-isolering och medierör. Har blåstring av medieröret någon effekt?	Ulf Jarfelt	juni-00
44	Mindre lokala produktionscentraler för kyla med optimal värmeåtervinningsgrad i fjärrvärmesystemen	Peter Margen	juni-00
45	Fullskaleförsök med friktionsminskande additiv i Herning, Danmark	Flemming Hammer Martin Hellsten	feb-01
46	Nedbrytningen av syrereducerande medel i fjärrvärmenät	Henrik Bjurström	okt-00
47	Energimarknad i förändring Utveckling, aktörer och strategier	Fredrik Lagergren	nov-00
48	Strömförsörjning till värmemätare	Henrik Bjurström	nov-00
49	Tensider i fjärrkylennät – Förstudie	Marcus Lager	nov-00
50	Svensk sammanfattning av AGFWs slutrapport ”Neuartige Wärmeverteilung”	Heimo Zinko	jan-01
51	Vattenläckage genom otät mantelrörsskarv	Gunnar Bergström Stefan Nilsson	jan-01
52	Direktförlagda böjar i fjärrvärmeledningar Påkänningar och skadegränser	Sven-Erik Sällberg Gunnar Bergström Stefan Nilsson	jan-01
53	Korrosionsmätningar i PEX-system i Landskrona och Enköping	Anders Thorén	feb-01
54	Sammanlagring och värmeförluster i närvärmenät	Jochen Dahm Jan-Olof Dalenbäck	feb-01
55	Tryckväxlare för fjärrkyla	Lars Eliasson	mars-01
56	Beslutsunderlag i svenska energiföretag	Peter Svahn	sept-01
57	Skarvtätning baserad på svällande material	Henrik Bjurström Pal Kalbantner Lars-Åke Cronholm	okt-01
58	Täthet hos skarvar vid återfyllning med befintliga massor	Gunnar Bergström Stefan Nilsson Sven-Erik Sällberg	okt-01
59	Analys av trerörssystem för kombinerad distribution av fjärrvärme och fjärrkyla	Guaxiao Yao	dec-01
60	Miljöbelastning från läggning av fjärrvärmerör	Morgan Fröling Magdalena Svanström	jan-02
61	Korrosionsskydd av en trycklös varmvattenackumulator med kvävgasteknik – fjärrvärmeverket i Falkenberg	Leif Nilsson	jan-02
62	Tappvarmvattenreglering i P-märkta fjärrvärmecentraler för villor – Utvärdering och förslag till förbättring	Tommy Persson	jan-02
63	Experimentell undersökning av böjar vid kallförläggning av fjärrvärmerör	Sture Andersson Nils Olsson	jan-02

Nr	Titel	Författare	Publicerad
64	Förändring av fjärrvärmenäts flödesbehov	Håkan Walletun Daniel Lundh	jan-02
65	Framtemperatur vid värmegles fjärrvärme	Tord Sivertsson Sven Werner	mars-02
66	Fjärravläsning med signaler genom röret – förstudie	Lars Ljung Rolf Sjöblom	mars-02
67	Fukttransport i skarvskum	Gunnar Bergström Stefan Nilsson Sven-Erik Sällberg	april-02
68	Round Robin test II av isolerförmågan hos fjärrvärmerör	Ture Nordenswan	april-02
69	EkoDim – beräkningsprogram	Ulf Jarfelt	juni-02
70	Felidentifiering i FC med ”flygfoton” – Förstudie	Patrik Selinder Håkan Walletun	juni-02
71	Digitala läckdetekteringssystem	Jan Andersson	aug-02
72	Utvändigt skydd hos fjärrvärmerörsskarvar	Gunnar Bergström Stefan Nilsson Sven-Erik Sällberg	sept-02
73	Fuktdiffusion i plaströrsystem	Heimo Zinko Gunnar Bergström Stefan Nilsson Ulf Jarfelt	sept-02
74	Nuläge värmegles fjärrvärme	Lennart Larsson Sofie Andersson Sven Werner	sept-02
75	Tappvarmvattensystem – egenskaper, dimensionering och komfort	Janusz Wollerstrand	sept-02
76	Teknisk och ekonomisk jämförelse mellan 1- och 2-stegskopplade fjärrvärmecentraler	Håkan Walletun	okt-02
77	Isocyanatexponering vid svetsning av fjärrvärmerör	Gunnar Bergström Lisa Lindqvist Stefan Nilsson	okt-02
78	Förbättringspotential i sekundärnät	Lennart Eriksson Stefan Petersson Håkan Walletun	okt-02
79	Jämförelse mellan dubbel- och enkelrör	Ulf Jarfelt	dec-02
80	Utvändig korrosion på fjärrvärmerör	Göran Sund	dec-02
81	Varmvattenkomfort sommartid i småhus	Tommy Persson	dec-02
82	Miljöbelastning från produktion av fjärrvärmerör	Morgan Fröling Camilla Holmgren	dec-02
83	Samverkande produktions- och distributionsmodeller	John Johnsson Ola Rossing	feb-03
84	Användning av aska vid förläggning av fjärrvärmeledningar - förstudie	Rolf Sjöblom	feb-03
85	Marginaler i fjärrvärmesystem	Patrik Selinder Heimo Zinko	mars-03
86	Flödesutjämnande körstrategi	Gunnar Larsson	april-03
87	”Black-Box”-undersökning av fjärrvärmecentraler	Håkan Walletun Bernt Svensson	juni-03
88	Långtidsegenskaper hos lågflödesinjusterade radiatorsystem	Stefan Petersson Sven Werner	aug-03

Nr	Titel	Författare	Publicerad
89	Rationellt byggande av fjärrvärmeledningar	Tommy Gudmundson	sep-03
90	Total – Kontra utförandeentreprenad	Tommy Gudmundson	sep-03
91	Tryckväxlare för fjärrkyla – Teknik och funktion	Bror-Arne Gustafson	sep-03
92	Kylning av kylmaskiners kondensorer med fjärrkyla i livsmedelsbutiker	Caroline Haglund Stignor	sep-03
93	Minskade distributionsförluster med diffusionstäta fjärrvärmerör	Maria Olsson	okt-03
94	Kopplingsprinciper för fjärrvärmecentral och frånluftsvärmepump	Patrik Selinder Håkan Walletun Heimo Zinko	okt-03
95	Funktion hos 1-rörs radiatorsystem – Avkylning, komfort och stabilitet	Stefan Petersson Bernt-Erik Nyberg	okt-03
96	EPSPEX-kulvert – Utveckling, utförande och uppföljning	Tommy Gudmundson	okt-03
97	EPSPEX-kulvert – Funktion under och efter vattendränkning	Stefan Nilsson Sven-Erik Sällberg Gunnar Bergström	okt-03
98	Fukt i fjärrvärmerör, larmsystem och detektering Inventering av mätmetoder och gränsvärden	Henrik Bjurström Lars-Åke Cronholm Mats-Olov Edström	okt-03
99	Undersökning av skarvar med isolerhalvor efter nio år i drift	Stefan Nilsson Sven-Erik Sällberg Gunnar Bergström	nov-03
100	Strategier för framtidens fjärrvärme	Markus Fellelsson	dec-03
101	Fjärrvärmevärmda torkrumsanläggningar	Peter Neikell Tobias Nilsson	nov-03
102	Kyllager i befintligt kylnät	Fredrik Setterwall Benny Andersen	nov-03
103	Reglerdynamik, tryckhållning och tryckslag i stora rörsystem	Gunnar Larsson	dec-03
104	Energimätning i småhus. Förstudie.	Jan Eliason Morgan Romvall Håkan Walletun	dec-03
105	Konsekvenser av mindre styrventiler i distributionsnät	Håkan Lindkvist Håkan Walletun	jan-04
106	Inventering av nya inspektionsinstrument för statuskontroll av fjärrvärmerör	Göran Sund	jan-04
107	Kopplingar i fjärrvärmesystem – inventering av alternativ och utvecklingspotential	Rolf Sjöblom Jöns Hilborn	feb-04
108	Gratid för kyla	Peter Lundell	april-04
109	Effektivare rundgångar	Håkan Walletun Karolina Näsholm	april-04
110	Mikrobiell aktivitet i fjärrkylennät	Magnus Nordling	april-04
111	Effektivare distribution av fjärrkyla	Olle Källman Per Hindersson Börje Nord	maj-04
112	Värmedriven kyla	Magnus Rydstrand Viktoria Martin Mats Westermark	maj-04

Nr	Titel	Författare	Publicerad
113	Markradar fältförsök	Emelie Vestin Peter Wilén	juni-04
114	EcoTrench läggning av fjärrvärmerör	Alf Lindmark	juni-04
115	Tappvarmvattenanvändning på hotell	Stefan Petersson Sven Werner Martin Sandberg Åsa Wahlström	juni-04
116	PET-skum som isoleringsmaterial i fjärrvärmerör	Sara Mangs Olle Ramnäs Ulf Jarfelt	sept-04
117	Flexibla fjärrvärmerörs isoleringsegenskaper	Ulf Jarfelt Olle Ramnäs Camilla Persson Charlotte Claesson	okt-04
118	Injustering av vvc-kretsar	Janusz Wollerstrand Tommy Persson	okt-04
119	Integration av absorptionskylmaskiner i fjärrvärmesystem - Förstudie	Heimo Zinko Sven-Olof Söderberg Elsa Fahlén Alemayehu Gebremedhin	dec-04
120	Teknisk utvärdering av gamla och nya fjärrvärmecentraler i Slagsta	Håkan Lindkvist och Håkan Walletun	jan-05
121	Förkorta byggtider för fjärrvärmebyggnation	Hans Gille	jan-05
122	Ny metod för att bestämma fjärrvärmerörs isoleringsförmåga	Bijan Adl-Zarrabi	jan-05
123	Samverkande produktions- och distributionsanalys i fjärrvärmesystem	Ola Rossing John Johnsson	jan-05
124	Fuktmätning med pulsekometer	Stefan Nilsson Sven-Erik Sällberg Gunnar Bergström	jan-05
125	Utvärdering av funktionsintegrerad fjärrvärmecentral	Sofie Andersson Sven Werner	feb-05
126	Värmeförluster i småhusområdet Prästmarken, Växjö	Heimo Zinko Benny Bøhm	mars-05
127	Läckagevägar för markvatten i skarvisolering	Stefan Nilsson Sven-Erik Sällberg Gunnar Bergström	april-05
128	Kylprocessers design i fjärrvärmesystem	Viktoria Martin Fredrik Setterwall Mikael Andersson	april-05
129	Absorptionsmaskiner för kyl- och värmeproduktion i energisystem med avfallsförbränning	Maria Brorsson	april-05
130	Mät- och värmeförluster för fjärrvärmesystem i småhusområden	Frederick Cederborg Ola Nordgren Johannes Drewitz	april-05

<i>Nr</i>	<i>Titel</i>	<i>Författare</i>	<i>Publicerad</i>
131	Spröda brott i mantelrör	Stefan Nilsson Kristian Thörnblom Sven-Erik Sällberg Gunnar Bergström	maj-05
132	Avkylningsarbete på Göteborg Energi AB 1995-2004	Anders Fransson	maj-05

FORSKNING OCH UTVECKLING – ORIENTERING

1	Fjärrkyla: Behov av forskning och utveckling	Sven Werner	jan-98
2	Utvärdering av fjärrkyla i Västerås. Uppföljning av Värmeforsk rapport nr 534. Mätvärdesinsamling för perioden 23/5 – 30/9 1996.	Lars Lindgren Conny Nikolaisen	jan-98
3	Symposium om Fjärrvärmeforskning på Ullinge Wårdshus i Eksjö kommun, 10-11 december 1996	Lennart Thörnqvist	jan-98
4	Utvärdering av fjärrkyla i Västerås. Uppföljning av Värmeforsk rapport nr 534. Mätvärdesinsamling för period 2. 1/1 – 31/12 1997.	Conny Nikolaisen	juli-98
5	Metodutveckling för mätning av värmekonduktiviteten i kulvertisolering av polyuretanskum	Lars-Åke Cronholm Hans Torstensson	sept-99
6	Optimering av fjärrvärmevattens framledningstemperatur i mindre fjärrvärmesystem	Ilkka Keppo Pekka Ahtila	jan-03
7	Sammanställning över fjärrvärme- och kraftvärmeprojekt med eu-stöd	Sofie Andersson Sven Werner	feb-04
8	Utvärdering av FOU-programmet Hetvattenteknik 2001-2003	John Johnsson Håkan Sköldberg	feb-04
9	Nytta med svensk fjärrvärmeforskning	Sven Werner	feb-04
10	Förenklad metod för energimätning i fjärrvärmecentral	Tommy Jonsson	jan-05
11	Värdet av icke levererad fjärrvärme till kunder – Fjärrvärmecentralers felfrekvenser i fjärrvärmesystem	Tero Loustarinen	jan-05

*Svensk Fjärrvärme AB och Statens energimyndighet bedriver
forskningsprogram inom området fjärrvärme, hetvattenteknik och fjärrkyla.*



Svensk Fjärrvärme • 101 53 Stockholm • Telefon 08-677 25 50 • Fax 08-677 25 55
Besöksadress: Olof Palmes gata 31, 6 tr. E-post: kontakt@svenskfjarrvarme.se
www.svenskfjarrvarme.se