Sprængningsforsøg med store stålrør til gastransmission

Hans Peter Nielsen

FORCE Technology
Park Allé 345
2605 Brøndby

Abstract
Because of the complexity of the physics behind the propagation and arrest of an axial crack in a buried, pressurized (natural gas) pipe line, full-scale burst experiments are sometimes necessary to verify the currently used empirical estimations of arrest potential. These experiments are used for two distinct purposes. The first is to verify that a particular material toughness (Charpy energy) can arrest a running ductile fracture. The second is to verify/measure the minimum arrest toughness for a particular set of operating conditions. These full-scale experiments require initiation of a running ductile fracture (~ 200-300m/s) and introducing this running fracture into pipe joints (~10-12 m in length) of increasing toughness until an arrest occurs. Measuring the crack velocity, the gas decompression behaviour, and the overall pipe movement aid in understanding the minimum arrest toughness from these experiments. If the design conditions are such that arrest cannot be economically achieved by toughness in the material of the pipe body, then an option is to use mechanical crack arrestors that slip over the pipe at designated intervals. The design of the arrestor device can be optimised and validated in a full-scale test.

These full-scale experiments are complex to conduct with many idiosyncrasies that can result in poor test results if not diligently handled. Through years of experience both in designing, conducting and analysing these types of experiments, FORCE Technology and Engineering Mechanics Corporation of Columbus (Emc2) have developed a team for successfully conducting these critical experiments. This document briefly describes the capability of this team in conducting full-scale high-energy crack propagation and arrest experiments on line pipe materials.

Introduktion
Det overordnede formål med at udføre sprængningsforsøg med gastransmissionsledninger er at belyse sikkerheden for både kommende og eksisterende ledninger. Med sikkerhed tænkes her på både person- og forsyningssikkerhed.

Nogle af de mere specifikke spørgsmål, der ønskes besvaret, kan være:

- Hvilke egenskaber har rørene? Dvs. materialeviden til stålproducenter, bygherrer og operatører
- Hvilke konsekvenser er der ved uheld?
- Hvor langt kan en revne løbe?
- Stopper revnen i grundmaterialet eller i en rundsøm?
- Hvilken indflydelse har rørdimensioner, gassammensætning og temperatur på revneudbredelseshastigheden?
- Passer de eksisterende modeller for revneudbredelse?
- Fungerer udstyr til standsning af en løbende revne?

FORCE Technology har i perioden 2001-2006 gennemført 10 fuldskalarørsprængninger for et japansk konsortium. Det primære formål har været at verificere eksisterende modeller for revneudbredelse.

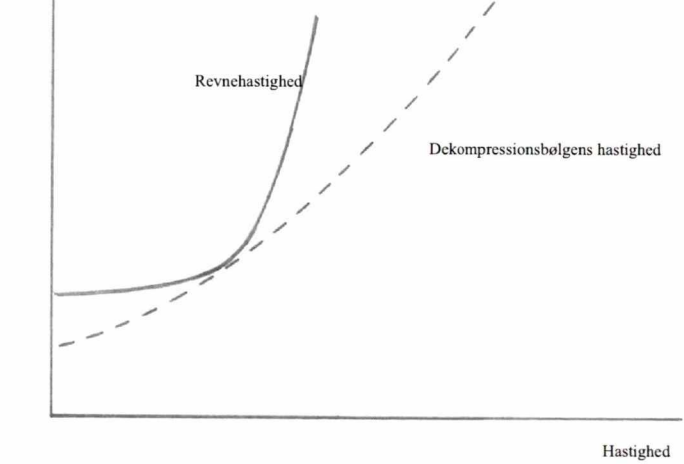
I dette indlæg beskrives, hvorledes sådanne sprængningsforsøg kan gennemføres. Ydermere omtales det måleudstyr, der benyttes.

Lidt teori

Det, som enhver operatør af gastransmissionsrørledninger frygter mest, er, at en revne vil udbrede sig over lange strækninger. Med andre ord, hvis der opstår en revne, er det vigtigt, at denne revne standser så hurtigt som muligt, for at begrænse skadernes omfang. Langt de fleste brud på rørledninger opstår som følge af udefra kommende mekaniske påvirkninger (pågravninger), men også udmattelsespåvirkninger og/eller korrosion vil kunne udløse et brud. Da de største spændinger i et tryksat rør er de rundgående, vil et brud normalt starte som en langsgående revneudbredelse. For de fleste nyere rørstål vil den stabile revneudbredelseshastighed være 200-300 m/s, men 20 gange så høje hastigheder kan forekomme i stål med ringe slagsejhedsegenskaber. Revnehastigheden afhænger af mange parametre, bl.a. den øjeblikkelige spænding ved revnespidsen. Da spændingerne i røret er proportionale med trykket, bliver revnehastigheden en funktion af bl.a. det øjeblikkelige tryk på det sted, hvor revnespidsen befinder sig.

Når der går hul på et tryksat rør, begynder trykket at falde. Dekompressionsbølgens hastighed (lydhastigheden i den komprimerede gas) er også en funktion af det øjeblikkelige tryk.

Figur 1 viser, hvorledes revnehastigheden og dekompressionsbølgens hastighed kan variere som funktion af trykket.

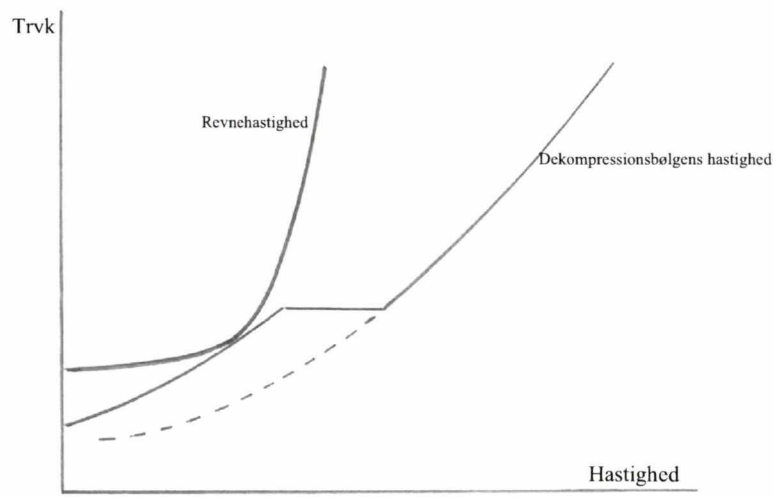


Figur 1. Revnehastighed og dekompressionsbølgens hastighed som funktion af trykket.

Er dekompressionsbølgens hastighed større end revnehastigheden for alle tryk, vil revnen stoppe, fordi trykaflastningen indhenter revnefronten. Hvis der derimod kan opstå en situation, som vist i figur 1, hvor de 2 kurver tangerer hinanden, kan revnevæksten forsætte (i det uendelige!) da revnespidsen og trykfaldet udbreder sig med samme konstante hastighed. Det er en situation, som her beskrevet, der ønskes undgået.

Der er opstillet flere modeller til beregning af revnevæksthastigheden, som funktion af bl.a. tryk, rørdiameter, godstykkelse, trækstyrke, flydespænding, E-modul, slagsejhedsenergi (charpy-V), samt en parameter, der afhænger af, hvorledes rørledningen ligger (luft, jord, vand eller frossen jord). Disse modeller skal ikke omtales nærmere her, men figur 1 og 2 anskueliggør, hvorfor det er nødvendigt under sprængningsforsøg at kunne måle både revnens og dekompressionsbølgens hastighed.

Hvorfor bruge rigtig gas til sprængningsforsøg?
Brandrisikoen under sprængningsforsøgene kan elimineres, hvis der benyttes komprimeret kvælstof eller atmosfærisk luft. FORCE Technology har derfor også til nogle sprængningsforsøg benyttet disse gasser, men til forsøg, hvor dekompressionsbølgens hastighed er af betydning, er man nødt til at benytte realistiske gasser, da dekompressionsforholdene er afhængige af gassammensætnignen. F.eks. indeholde den danske naturgas forholdsvis store mængder propan og butan, der vil fordråbe under dekompressionen. Dekompressionskurven for en gas, hvori der optræder 2 faser under dekompressionen ser ud som vist på figur 2. Med en sådan gas er risikoen for at dekompressionskurven tangerer eller krydser revnehastighedskurven større end for en gas, der er enfaset under hele dekompressionsforløbet (stiplet linie i figur 2).



Figur 2. En gas, hvori der, under dekompressionen optræder 2 faser, har et plateau på dekompressionskurven.

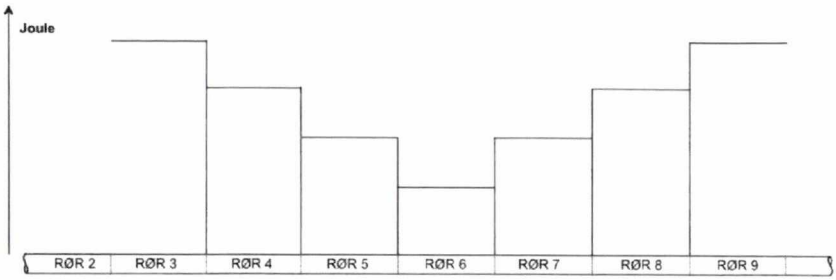
Testopstillingen
De sprængningsforsøg, der er blevet gennemført kræver en sikkerhedsafstand på 1 km. Dels er der den brændbare gas at tage hensyn til, men også risikoen for udslyngede fragmenter spiller ind. FORCE Technology har i Jægersprislejren fået stillet et areal til rådighed, hvor den nødvendige sikkerhedsafstand kan etableres.

De rør, der er blevet benyttet til sprængningsforsøgene har typisk haft en diameter på 30" (762 mm) og en godstykkelse på 17,5 mm. Rørene leveres i længder af 10-12 m og svejses på stedet sammen til det færdige testrør. Foto nr. 1 viser nedlægningen af et testrør efter sammensvejsning.

Foto nr. 1. Nedlægning af sammensvejst testrør

Ved de fleste sprængningsforsøg opbygges testrøret af rør med stigende Charpy-V værdier fra revnestartpunktet og udefter, som anskueliggjort på omstående figur 3.

På denne måde fås et direkte mål for, hvilken slagsejhedsværdi, der er nødvendig for at standse en propaganderende revne under de givne testkonditioner.



Figur 3. Stigende Charpy-V værdier fra revnestartpunktet og udefter

Testsektionen er typisk 100m lang, men da den reflekterende dekompressionsbølge først må mødes med den fremvoksende revne uden for testsektionen, benyttes nogle såkaldte reservoirrør i begge ender af testsektionen. Hvert reservoirrør er 100 m af langt, således at det færdige testrør er 300 m langt.

Sprængningstryk på op til 200 bar har været benyttet, hvilket indebærer, at der frigøres ca. 25.000 m^3 gas ved sprængningen. Da naturgas kun kan brænde i koncentrationsintervallet 3-16 %, bliver det følgelig ca. 200.000 m^3 brændbar gas, der slippes fri. Det kan ikke accepteres, at en sådan gassky driver uantændt af sted, hvorfor der benyttes to systemer til antændelse af gassen så hurtigt som muligt. Som en ekstra sikkerhed afspærres luftrummet over sprængningsområdet i timerne op til sprængningen.

Som en sikkerhedsforanstaltning trykprøves det færdige rør med vand til et tryk 10 % over sprængningstrykket inden gassen pumpes ind i røret.

Det 300 m lange testrør udlægges i en plan rende med en ganske svag hældning, således at trykprøvevand kan løbe ud.

For at holde fast på røret er der placeret store betonblokke for enden af reservoirrørene (125 tons). Tillige kan røret for hver ende af testsektionen fikseres til betonblokke på hver 230 tons.

Revnevæksthastigheden måles ved hjælp af timing wires. Timing wires laves af 0,4 mm koldtrukne isolerede kobbertråde, der monteres rundgående på rørene. Trådene limes til røroverfladen. Når revnen passerer en timing wire brydes en strømkreds og tidspunktet for revnens ankomst kan registreres. Der er monteret en timing wire pr. meter i testsektionen. Målefrekvensen er normalt 25kHz, men højere frekvens kan etableres hvis nødvendigt.

For hver ca. 3 m af testrøret er der monteret tryktransducere, der måler trykket som funktion af tiden. Der benyttes tryktransducere med en responstid på 1/60.000 s og der måles normalt med en frekvens på 25 kHz.

Også temperaturen af gassen og ståloverfladen registreres.

Alle målinger lagres i 2 computere, der er opstillet i en armeret container ved den ene ende af testsektionen. Containeren ses på foto nr. 2. Selv om containeren er placeret så tæt på testrøret som muligt, bruges der alligevel ca. 8 km kabel til hver sprængning.

Foto nr. 2. Måleudstyr monteres og signalerne føres til computere, anbragt i containeren.

Når instrumenteringen er tilendebragt tildækkes testrøret med grus, hvis dette ønskes. I alle tilfælde initieres revnen på midten af testrøret og ved de fleste sprængninger har den ene halvdel af testrøret været tildækket, mens den anden ende har ligget frit. På denne måde kan effekten af nedgravning studeres ved samme forsøg. (Det er selvfølgelig en betingelse, at der er symmetri omkring revneinitieringspunktet med hensyn til rørenes mekaniske egenskaber).

Er det dansk natrugas, der skal benyttes til forsøget, leveres gassen fra MR-stationen i Lynge, hvor Energinet.dk er samarbejdspartner i forbindelse med gasleverancen. I Lynge påfyldes gastrailere med et gastryk på ca. 70 bar. To trailere kører i pendulfart mellem Lynge og Jægerspris. Ved testrøret sørger en kompressor for ifyldningen, indtil det ønskede sprængningstryk er nået. Hele fyldeprocessen varer typisk 4 døgn. Gaspåfyldningen startes en uge før det planlagte sprængningstidspunkt, således at gassen og testrøret kan stabiliseres rent termisk.

Sprængningen
Selve sprængningen af røret initieres med en 75 cm lang skæreledning, der anbringes langsgående for oven på røret. Under skæreladningen er anbragt en timing wire, der definerer tid 0. Skæreladningen penetrerer stålvæggen med en hastighed på 10 km/s.

Umiddelbart før sprængningen antændes romerlys, der skal sikre antændelse af gassen.

Styring af målecomputere og videokameraer, antændelse af romerlys og udløsning af selve sprængningen, foretages af 5 personer, der er anbragt i en armeret container, 600 m fra testrøret.

Det umiddelbare resultat af en sprængning ses på foto nr. 3 og 4.

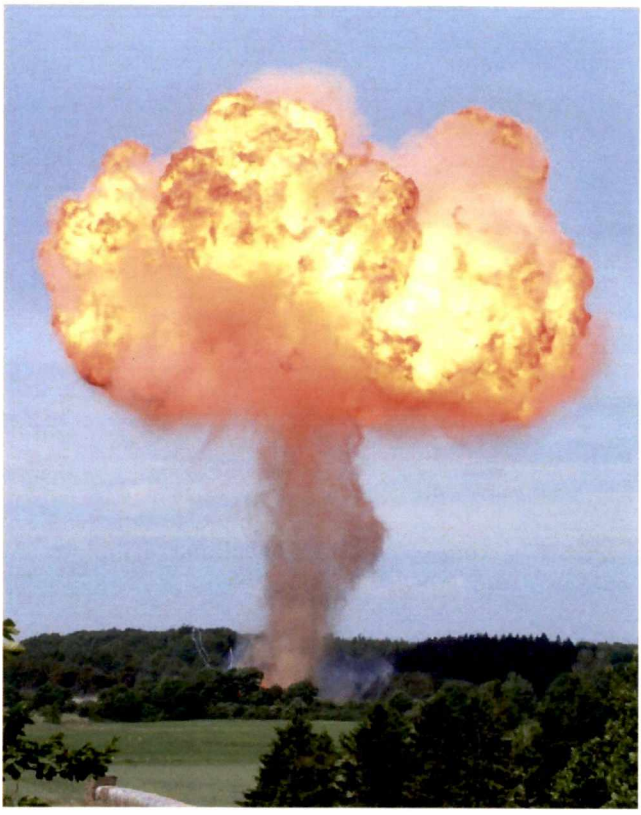


Foto nr. 3. Indkuglen når på dette tidspunkt ca. 300 m op i luften. Bemærk at der stadig skydes romerlys op for neden til venstre.

Foto nr. 4. Typisk muslingeskalsbrud i rør.

Efter sprængningen
Efter sprængningen skal alle data analyseres og sammenlignes med de detaljer, der kan afsløres ved studier af slow-motion-afspilninger af videoptagelserne.

En sprængning anses som en succes, hvis følgende er opfyldt:

- Alle data er registreret. Kabler kan blive revet over, hvorved data går tabt.
- Revnen er stoppet i begge ender inden for testsektionen
- Revnen må ikke være stoppet ved "ring-off" i en rundsøm

Hertil kommer selvfølgelig ønsket om, at materielle skader er ret begrænsede og at klager og erstatningskrav fra naboer undgås.

Det kan afslutningsvis nævnes, at der, i forbindelse med alle de sprængninger, som FORCE Technology har gennemført, aldrig har været personskade og udbetalte erstatninger til naboer har været meget begrænsede.