

Undersökning av täthet hos flänsförband i grova plaströr med beräkningar och experiment

*Lars Jacobsson
Hans Andersson*



Svenskt Vatten Utveckling

Svenskt Vatten Utveckling (SVU) är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna. Programmet lägger tonvikten på tillämpad forskning och utveckling inom det kommunala VA-området. Projekt bedrivs inom hela det VA-tekniska fältet under huvudrubrikerna:

Dricksvatten
Ledningsnät
Avloppsvatten
Management

SVU styrs av en kommitté, som utses av styrelsen för Svenskt Vatten AB. För närvarande har kommittén följande sammansättning:

Agneta Granberg, ordförande	Göteborgs Stad
Daniel Hellström, sekreterare	Svenskt Vatten
Stefan Johansson	Skellefteå kommun
Charlotte Lindstedt	Göteborg Vatten
Lena Ludvigsson-Olafsen	Smedjebackens kommun
Margareta Lundin Unger	Kungsbacka kommun
Kenneth M. Persson	Sydvatten AB
Lars-Gunnar Reinius	Stockholm Vatten AB
Mats Rostö	Gästrike Vatten AB
Bo Rutberg	Sveriges Kommuner och Landsting
Lena Söderberg	Svenskt Vatten
Ulf Thysell	NSVA
Fred Ivar Aasand, adjungerad	Norsk Vann

Författarna är ensamma ansvariga för rapportens innehåll, varför detta ej kan åberopas såsom representerande Svenskt Vattens ståndpunkt.

Svenskt Vatten Utveckling
Svenskt Vatten AB
Box 47 607
117 94 Stockholm
Tfn 08-506 002 00
Fax 08-506 002 10
svensktvatten@svensktvatten.se
www.svensktvatten.se
Svenskt Vatten AB är servicebolag till föreningen Svenskt Vatten.

Rapportens titel:	Undersökning av täthet hos flänsförband i grova plaströr med beräkningar och experiment
Title of the report:	Investigation of tightness of flange joints for coarse plastic pipes by means of computations and experiments
Rapportnummer:	2011-17
Författare:	Lars Jacobsson och Hans Andersson, SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
Projektnummer:	28-101
Projektets namn:	Optimering av flänsförband på plaströrsledningar
Projektets finansiering:	SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Svenskt Vatten Utveckling, Nordiska plaströrgruppen, KP-rådet
Rapportens omfattning	
Sidantal:	24
Format:	A4
Sökord:	Flänsförband, polyetenrör, täthet, beräkningar, experiment
Keywords:	Flange joints, polyethylene pipes, tightness, computations, experiments
Sammandrag:	Resultaten visar att förbanden ska hålla tätt om rekommenderade monteringsprocedurer följs noga, särskilt vad avser åtdragning av skruvarna. Man finner att tidsberoende deformationer i plastmaterialet leder till en ojämn tryckfördelning i flänsytorna. Friktionen i skruvförbandet kan vid vissa kombinationer av ytbehandling och smörjning ge skruvkrafter som blir väsentligt lägre än vad som får ur formeln för sambandet mellan åtdragningsmoment och skruvkraft. Det är fördelaktigt med återdragning av förbandet efter någon dag.
Abstract:	The results show that the flange joints should remain tight if recommendations for mounting are followed strictly, particularly as regards the tightening of the bolts. It appears that the time-dependent deformations in the PE-material leads to a non-uniform pressure distribution in the flange surfaces. The friction in the in bolts and nuts can, for some combinations of surface treatment and lubrication, result in bolt forces that are much lower than expected from the commonly used relationship between torque and bolt force. It is favourable to re-tighten the joint after a day or two.
Målgrupper:	Verksamma inom tillverkning, montering, samt drift och underhåll av stora PE-ledningar för distribution av vatten
Omslagsbild:	Flänsar vid långtidsförsök. Foto: SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
Rapport:	Finns att hämta hem som PDF-fil från Svenskt Vattens hemsida www.svensktvatten.se
Utgivningsår:	2011
Utgivare:	Svenskt Vatten AB © Svenskt Vatten AB

Förord

Det här projektet initierades 2008 efter att ett antal fall med läckande flänsförband för grövre vattenledningar i polyeten hade inträffat. Ingemar Björklund hos Nordiska plaströrsgruppen och Hans Bäckman på Svenskt Vatten har till sammans med SP utformat projektet som ska ge ny kunskap om hur flänsförband i plast beter sig i framför allt för grövre rördimensioner. Ett problem har varit att få information om rekommenderat monteringsförfarande i Sverige. Några grossister av rördelar och packningar har kontaktats för att inhämta information. Det visade sig att de har begränsad information om hur rördelarna och packningarna ska monteras på ett tillfredställande sätt. Detta faktum belyser ett av problemen, nämligen att någon säljare tar helhetsansvaret för att flänsförbanden monteras på ett korrekt sätt för valda och förhoppningsvis lämpliga kombinationer av komponenter. Det kan bero på att bra information är svår att skaffa.

Föreliggande rapport summerar arbetet som är utförligt redovisat i två separata SP-rapporter. Projektet har utförts av SP med delfinansiering från Svenskt Vatten Utveckling, NPG och KP-rådet, vilket tacksamt erkänns. Ingemar Björklund och Hans Bäckman som medverkat i en referensgrupp med värdefulla synpunkter tackas också.

Göteborg i september 2011

Lars Jacobsson och Hans Andersson

Innehåll

Förord.....	3
Sammanfattning.....	6
Summary.....	7
1 Bakgrund och syfte.....	8
2 Frågeställningar.....	9
3 Beräkningar.....	11
3.1 Förenklad beräkningsanalys.....	11
3.2 Datorberäkningar med FEM.....	13
4 Experiment.....	18
5 Diskussion av resultaten.....	23
Referenser.....	24

Sammanfattning

Denna rapport är en sammanfattning för en bredare läsekrets av två tekniska rapporter [1] och [2] som beskriver ett projekt omfattande dels beräkningar och dels experiment för att undersöka funktionen hos flänsförband i plaströr. Viktiga faktorer är plastmaterialets tidsberoende egenskaper, den geometriska utformningen, funktionen hos packningar, samt proceduren för åtdragning av skruvar.

Projektet har motiverats av de läckage som ibland uppträder i flänsförband i framför allt grövre ledningar för vattentransport. Sådana ledningar har stor ekonomisk betydelse och är viktiga för samhällsfunktioner. Reparationer är kostsamma och föranleder ofta tvister om orsaken till haveriet. Syftet har varit att finna möjliga orsaker till läckage och om möjligt åtgärder eller konstruktions- och monteringslösningar som ger hög grad av säkerhet för att uppnå täta förband.

Beräkningar har genomförts både manuellt och med datorsimulering för olika geometrier. Viktiga generella resultat är tryckfördelningen i flänsytorna, relaxation med tiden i flänsarna, expansion hos rören, samt funktionen hos packningar. Det framgår bland annat att förband som monteras med korrekta skruvkrafter bör hålla tätt och att återdragning efter någon dag är fördelaktig.

Experimenten, som genomförts på grova rör, 630 mm, och med olika typer av flänsar och packningar, ger principiellt nya resultat, genom att både skruvkrafter och åtdragningsmoment har kunnat mätas. Det visar sig att materialet i flänsen relaxerar ganska mycket redan under åtdragningen så att krafterna i skruvarna minskar och fördelas om. Vidare blir skruvkrafterna för de använda skruvarna mycket mindre än de som beräknas från åtdragningsmomenten, och de har stor spridning. Detta visar på betydelsen av åtdragningen och tillräcklig kunskap om friktion och smörjning hos olika typer av skruvar. Experimenten ger också en god bild av vilka kombinationer av packningar och moment/skruvkrafter som ger täta förband.

Sammanfattningsvis kan sägas att man får täta förband för olika konstruktionsprinciper om man följer respektive rekommendationer för montering och har god kunskap om friktionsförhållandena i de använda skruvarna. Det räcker med mindre avvikelser från rekommendationer för att risk för läckage uppstår. Detta beror på att plasten är mycket mera flexibel än stål och dessutom har ett tidsberoende, vilket gör konstruktionsprincipen känslig. Detta blir extra tydligt om man använder tunna rör vid högt tryck.

Summary

Two technical reports [1] and [2] are summarised in this paper for the general reader. It describes a project investigating the function of flange joints in plastic pipes using both computations and experiments. Essential factors are the time dependent properties of the plastic material, the flange geometry, the functioning of the gaskets, and the procedure for tightening of the bolts.

The project was motivated by several leakages reported in flange joints, mostly in large pipelines for water supply. Such pipelines are important from an economic point of view and for the societal infrastructure. Repair is costly and often causes dispute on the reason for failure. The objective was to find probable causes for leakage and, if possible, actions or alternative designs or mounting principles that give a high degree of probability for tight joints.

Calculations were made both manually and by computer simulations for a set of geometries. The pressure distribution in the flange surfaces, the time development of relaxation in the flanges, the expansion of the pipe, and the functioning of the gaskets are essential results. It appears that flange joints, which are mounted by correct bolt forces, should be tight, and that re-tightening after some day is advantageous.

The experiments were performed on 630 mm pipes with different types of flanges and gaskets. Principally new results were obtained thanks to the continuous measurement of bolt forces in addition to torques. The flange material relaxes significantly already during tightening of the bolts so that bolt forces decrease and are re-distributed. Further, the bolt forces for the type of bolts used here become much smaller than those calculated from the corresponding torques, and there is a considerable scatter. This underlines the importance of the tightening and adequate knowledge about friction and lubrication of bolts. The experiments also give a good picture of which combinations of gaskets and torques/bolt forces that give tight flange joints.

To conclude, it can be stated that tight flange joints are obtained for different designs if the respective mounting recommendations are followed and if the friction properties of the actual bolts are well known. It is sufficient with small deviations for risks of leakage to occur, i.e. the design is in principle a sensitive one. This is due to the fact that the polymer is much more flexible than steel, and that it has in addition time dependent properties. This becomes extra evident if one uses thin pipes and high pressures.

1 Bakgrund och syfte

Läckor kan uppträda i flänsförband i rörledningar av plast, företrädesvis sådana med grövre dimension. Detta inträffar trots att det uppgivits att standardiserade konstruktioner har använts och monteringen har skett enligt anvisningar och praxis. Eftersom sådana ledningar är stora och viktiga investeringar, bland annat för vattenförsörjning, är detta ett betydande problem. Reparationer är också besvärliga då ledningarna oftast är förlagda under mark eller i vatten.

SVU (Svenskt Vatten Utveckling) och NPG (Nordiska Plaströrsguppen) har därför uppdragit åt SP att undersöka funktionen hos flänsförband av plast, i detta fall polyeten, och möjliga orsaker till läckage, samt också att om möjligt lämna förslag till förbättrande åtgärder.

Undersökningen har genomförts i två delar, en beräkningsmässig och en experimentell. De har redovisats utförligt i två SP-rapporter, [1] och [2]. Denna sammanfattande huvudrapport beskriver arbetet övergripande och de principiella resultaten.

Beräkningarna har genomförts för att erhålla en principiell förståelse för hur flänsförbandets olika delar, bordring, skruvar och lösfläns, samt packningar, samverkar och påverkar varandra, i synnerhet eftersom flänsmaterialet har ett viskoelastiskt beteende och förändras över tid. Viskoelasticiteten innebär en successiv deformation av plastmaterialet vilket leder till att tätningskrafterna minskar. Särskilt har också undersökts betydelsen av variationer i anvisningar och rekommendationer om montage från olika tillverkare och leverantörer.

I den experimentella studien har rör med olika flänsgeometri, packningar och metod för åtdragning trycksatts till olika nivåer och villkoren för läckage har studerats. Syftet har varit dels att finna hur verkligt beteende hos rören förhåller sig till det beräknade, dels att finna de kombinationer av flänsar, packningar och montering som ger tillfredsställande resultat.

2 Frågeställningar

Olika principer för åtdragning av skruvar, samt sambandet mellan åtdragningsmoment och resulterande skruvkraft är av stor betydelse för förbandets funktion och behöver undersökas.

Skillnader i åtdragning kan bero på antaganden om användning av packningstyp, flänstyp eller typ av stålring, samt hur man avser att kompensera för flänsmaterialets tidsberoende, krypning. En jämn tryckspänning av omkring 10–12 MPa ska uppnås genom ett angivet mönster av korsvis åtdragning. Det finns också variation då det gäller återdragning efter viss tid, 4–24 timmar, eller att åtdragningen sker i omgångar om 20 % moment i varje omgång.

Det teoretiska sambandet mellan åtdragningsmoment och skruvkraft visar ett tydligt beroende av friktionen i gängor och skruvhuvud. Friktionen beror i sin tur av smörjning och ytbehandling. Anvisningar för montering av flänsförband utgår från en tumregel som innebär en friktionskoefficient av ungefär 0,2. Om den verkliga friktionen är större får man en mindre kraft än beräknat för ett visst moment.

Variationer i utformningen av plastflänsen kan ha betydelse. En genomgång av standard och tillverkares kataloger visar på olikheter i flänsdimensioner som kan påverka kontaktrycket i flänsytorna. De ursprungliga orsakerna till detta kan vara flera, såsom materialkvalitet, driftsförhållanden, rörutformning (SDR-förhållande) med mera. Detta är av intresse att studera systematiskt med tanke på att man i allt större utsträckning använder högre materialkvalitet och tunnare rör, till exempel går från PE 80 till PE 100 och från SDR 11 till SDR 17.

Det finns också olika principer för åtdragning beroende på val av packning, sannolikt i vissa fall med en historia från flänsförband av metall. Styva packningar innebär högre krav på skruvkrafter än sådana av till exempel EPDM-gummi. Det finns också stålflänsar som har ett profilerat tvärsnitt utformade för att vara extra fjädrande och på så sätt kompensera för minskat flänstryck på grund av krypning i plastflänsen. Betydelsen av dessa varianter för läckagerisk är också av intresse att undersöka.

Behovet av en sammanhållen undersökning beror också på svårigheter att finna information i öppen litteratur.

Tillverkare, såsom UPONOR, KWH, med flera ger ut teknisk information, och erbjuder beräkningsstöd och kurser, men det finns inte öppen information om grunderna för konstruktionsutformningen, och den skiljer också i olika avseenden.

Materialegenskaper finns återgivna i ett antal publikationer och kataloger från tillverkare. De ges dock oftast för geometrier, rör under övertryck, böjprover etc., som inte enkelt kan översättas till exakta materialdata för modellering.

Numerisk analys av flänsförband finns i litteraturen men behandlar metalliska rör och problem med packningar och temperatur i tryckkärl. Såvitt bekant saknas motsvarande undersökningar i den öppna litteraturen

av rör i plast och med fokus på krypning och relaxation. Sådana resultat är väsentliga att få fram av ovan nämnda skäl. Några tillverkare hävdar dock att man har FEM-beräkningar som grund för utformning av sina konstruktioner och monteringsanvisningar.

3 Beräkningar

3.1 Förenklad beräkningsanalys

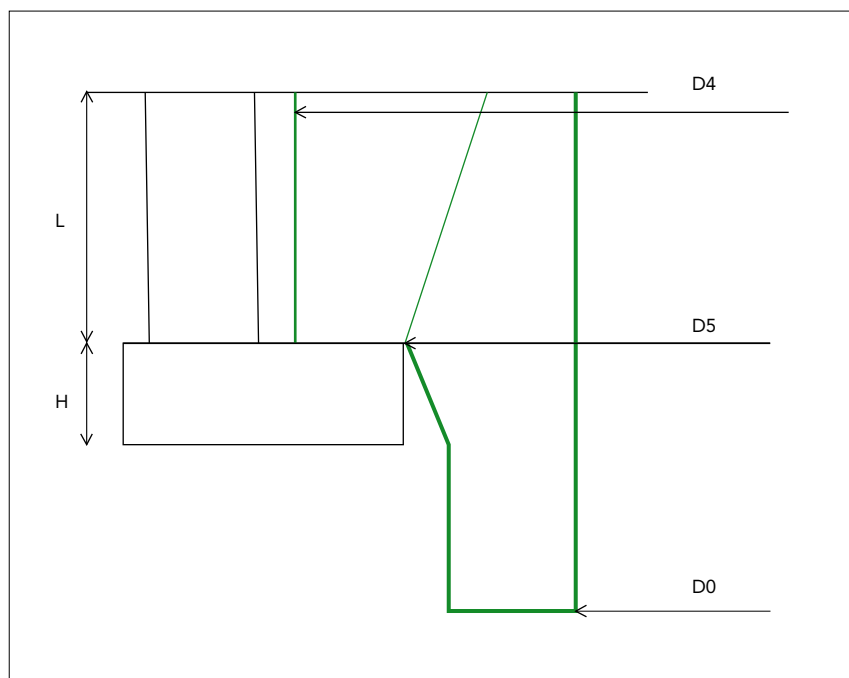
Beräkningar har gjorts för icke trycksatta flänsförband av dimensioner från 200 mm till 630 mm och med mått enligt standard (för diameter 630 mm finns en smal fläns enligt ISO och en bredare föreslagen av tillverkaren KWH). Elastiska förhållanden har förutsatts och en E-modul på 1 000 MPa för HDPE har använts för plastflänsen. Syftet har varit att undersöka vilka nominella tryck som uppstår mellan stålfläns och plastfläns och i flänsytorna där rörändarna möts, dels för att se om de är stora nog för att klara att hålla förbandet tätt, dels för att se om det finns väsentliga skillnader mellan olika rördimensioner. Ett annat syfte har varit att studera förhållandet mellan styvheter i plast- och i ståldelarna. Även om man vet att tillståndet ändras med tiden på grund av krypning på ett komplext sätt som kräver numerisk analys, ger förenklade beräkningar ändå ett begrepp om hur ett flänsförband fungerar.

Symmetrin i rörets omkretsriktning gör att ett förband kan analyseras genom att studera endast en skruv och dess omgivning, en "tårtbit", med lösläns i stål och rörände med fläns (bordring) i plast, samt eventuell packning. Systemet kan ses som två förspända fjädrar, se Figur 3-1, med stålfläns och skruv i dragning (svart) och plastflänsen i tryck (grönt).

Utgående från rekommenderade åtdragningsmoment för olika dimensioner har skruvkrafter bestämts med den gängse formeln

$$M = 0,2 D F \quad (1)$$

där M är moment i Nm, F är kraft i kN och D skruvdiameter i mm.



Figur 3-1
Förenklad modell av flänsförband
(med skruv av längd $L + H$, massiv
stålfläns med tjocklek H och rörände
med plastfläns).

Exempel på resultat visas i Tabell 3-1 för två rördimensioner, där medeltrycken beräknats från de ringformade ytorna med diametrar D4 och D5 respektive D4 och D0 i Figur 3-1.

Det finns som synes i exemplet variationer i rekommenderade moment, men de ger inte upphov till stora skillnader. Det mest anmärkningsvärda är det höga trycket mellan stålflänsen och bordringen för 600 mm rör. För mindre dimensioner ligger trycket vid stålflänsen kring 10–12 MPa och i flänsytan kring 4–5 MPa. Det bör här noteras att trycket i flänsytan i verkligheten säkert blir högre och koncentrerat till ytterkanten, kraften överförs till stor del vertikalt från stålflänsen. Detta kommer också fram i de numeriska beräkningarna i nästa avsnitt. Man kan också observera att plastmaterialen, som PE 100, får olinjärt och starkt tidsberoende uppträdande kring och över 10 MPa.

I den utförliga rapporten [1] ges också en elastisk analys av hur trycksättningen av röret påverkar spänningsförhållandena. Resultaten visar att påverkan är modest, med en minskning av trycket i flänsytorna av omkring 10–15 %.

I litteraturen indikeras att relaxationen under det första året av drift i ett förband utan packning och med massiv stålfläns ger en reduktion av trycken till ungefär 35 % av de ursprungliga. Detta ska vara tillräckligt för att tillförsäkra ett tätt förband om man utgår från nivåer av cirka 10 MPa och enligt normen kräver 2 MPa vid ett vätsketryck av 10 bar i röret (1 MPa).

Genom att jämföra framräknade ”fjäderkonstanter” för axiell styvhet för plast- och stålkomponenterna, se Figur 3-1, fås en uppfattning om hur deformationer äger rum. Med en konservativ uppskattning, så stor styvhet som möjligt, av hur stor del av plastflänsen som tar upp kraft erhålls typiska förhållanden mellan fjäderkonstanter enligt Tabell 3-2, det vill säga stålde-larna är mycket styvare än plastdelarna.

Förbandet fungerar således som om skruv/stålfläns är mer eller mindre stela och vid relaxation med tiden sker huvuddelen av deformationen i plastflänsen. Den blir snabb vid de höga tryckspänningar 10–12 MPa som finns vid lösflänsen efter åtdragning. Det noteras att den numeriska analysen visar på viss flexibilitet i stålflänsen. Denna ökar också vid användning av flexibla, profilerade lösflänsar. Dessa måste dock vara mycket flexibla för att kunna återfjädra effektivt och hålla trycket uppe vid plastflänsens relaxation.

Sammanfattningsvis visar de förenklade beräkningarna att det inte finns några dramatiska skillnader i flänstryck för olika rördimensioner och rekommenderade åtdragningsmoment, samt att flänstrycken borde vara tillräckliga för att ge täta förband även efter relaxation i plasten.

Tabell 3-1 Exempel på framräknade tryck, moment och med mått enligt ISO. Som jämförelse visas i fyrkantparentes rekommenderade moment från en tillverkare.

Rördiameter (mm)	Skruv (antal)	Rek moment (Nm)	Kraft (kN)	Tryck vid stålfläns (MPa)	Tryck i flänsyta (MPa)
400	M24 (16 st.)	145 [120]	30,2 [25,0]	12,4	4,9
600 (630)	M27 (20 st.)	200 [220]	37,0 [40,7]	16,9	4,6

Tabell 3-2 Resultaterande förhållande mellan fjäderkonstanter (axiell styvhet).

Rördiameter (mm)	Kskruv/Kplast
400	13
600 (630)	20

3.2 Datorberäkningar med FEM

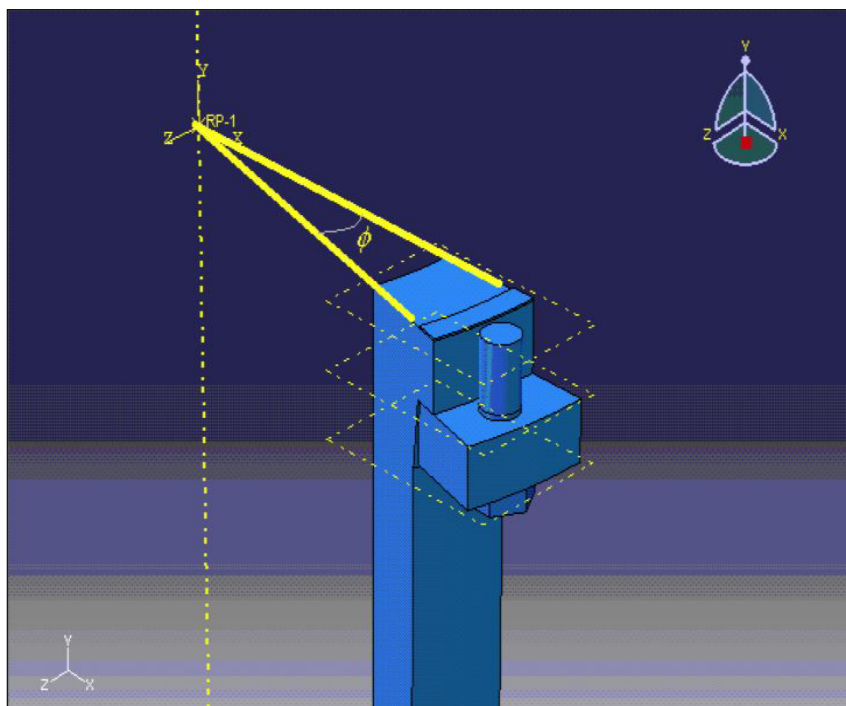
För att ge en bättre beskrivning av spänningarna i ett flänsförband när materialets tidsberoende beaktas har en FEM-(Finit Element Metod) modell utvecklats med användning av FE-programmet ABAQUS. Modellen utnyttjar symmetriegenskaperna hos förbandet och visas i Figur 3-2.

Alla mått och materialegenskaper kan väljas godtyckligt så att olika standarddimensioner, material och packningar kan simuleras. Här har valts att modellera ett typiskt PE 100-material. För att få indata till den töjningshårdnande delen av materialmodellen i ABAQUS har enaxliga relaxationsprov utförts på cylindrar av Hostalen (PE 100) under 48 och 96 timmar. Anpassning av dessa data till beräkningsprogrammets materialmodell har sedan kunnat göras med goda resultat. Materialets snabba respons, det vill säga att den största delen av relaxationen sker för korta tider, medger också extrapolation till mycket längre tider än 100 timmar. Den tidsberoende delen av materialegenskaperna har tagits från katalogdata, som olinjärt elastiska med elasticitetsmodul $E = 1\,090\text{ MPa}$, Poissons tal $\nu = 0,4$ och flytgräns 12 MPa .

Packningsmaterialet antas vara hyperelastiskt, det vill säga gummilikande, och data från enaxliga prov har hämtats i litteraturen för EPDM-gummi.

Skravar och stålfläns modelleras som stål med $E = 200\,000\text{ MPa}$ och Poissons tal $\nu = 0,3$. Stålflänsen modelleras som massiv, men i fall där flexibel, profilerad fläns ska simuleras ges i stället skruvarna en lägre E-modul.

Belastningen sker i två steg. Först förspänns skruvarna till föreskrivna krafter. Dessa har valts enligt Tabell 3-1. Därefter modelleras trycksättningen av ledningen genom att ett tryck appliceras på rörets innerväggar

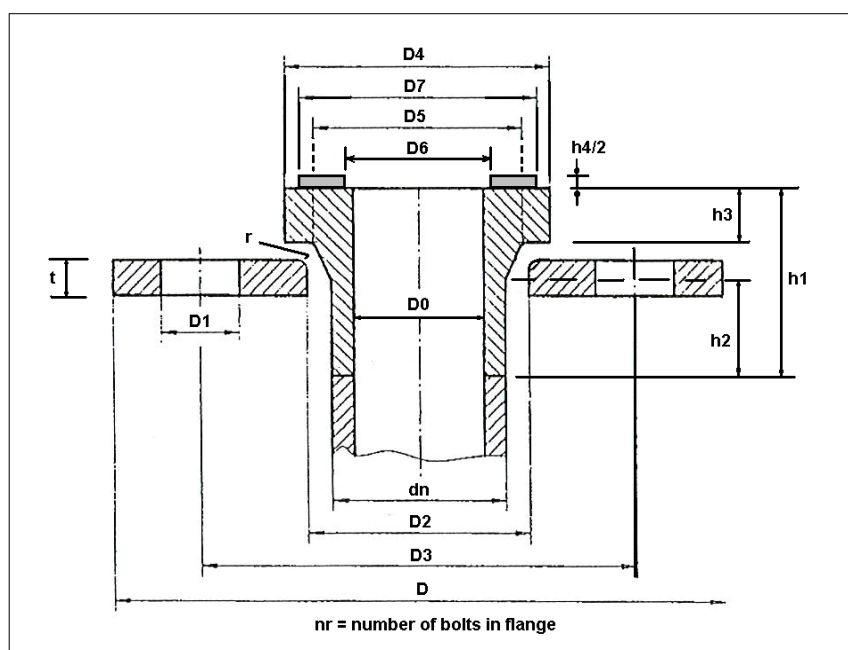


Figur 3-2 FEM-modellens geometri med en n :tedel av rörände, lösfläns och skruv, där n är antal skruvar.

och spänningar läggs på röränden svarande mot inverkan av ett inre övertryck. Detta tryck har valts för tryckklass PN 10, det vill säga 1 MPa som svarar mot 10 bar. Med dessa laster får systemet sedan relaxera och utveckla nya spänningstillstånd och deformationer med tiden under en simulerad driftsfas.

Mått som kan väljas i FEM-modellen anges i Figur 3-3. Väsentliga parametrar är SDR-tal det vill säga rörets ytterdiameter dividerat med vägg tjockleken ($2dn/(D0-dn)$), packningsgeometri, bredd ($D4-D5$) och höjd ($h3$) hos fläns, och effektiv styvhet hos skruv/lösfläns. Efter några inledande körningar valdes att göra sex simuleringar på 400 och 630 mm rör med SDR 17 och ISO-fläns, detta för att få så utslagsgivande resultat som möjligt. (Just 630 mm rör av PE 100 och med SDR 17 anges som problematiska, och ger höga spänningar i rörväggen.)

De inledande körningarna, som gjordes till 10 000 timmar, visade att det går begränsa simulerad tid till 1 000 timmar eftersom mycket lite händer mellan 1 000 och 10 000 timmar.



Figur 3-3 Mått som definierar geometrin i FEM-simuleringarna.

Tabell 3-3 Mått, i mm, för de olika simuleringarna.

Fall	dn	D0	D4	D5	h1*	h3	nr**	D6	D7	h4	D	D1	D2	D3	t	h2
1	400	352,6	482	430	113	46	16	-	-	-	565	26	430	515	32	51
2a	630	555,2	685	645	140	50	24	-	-	-	780	30	645	725	44	74
2b	630	555,2	685	645	140	50	24	645	685	6	780	30	645	725	44	74
2c	630	555,2	685	645	140	50	24	-	-	-	780	30	645	725	44	74
2d	630	555,2	725	645	140	75	24	-	-	-	835	30	645	770	50	49
2e	630	555,2	725	645	140	75	24	645	725	6	835	30	645	770	50	49
3	630	515	685	645	110	80	20	645	685	6	780	30	645	725	44	--

(*) Rörets totala längd i simuleringarna var 3 gånger bordingens längd ($h1$).

(**) nr är antalet skruvar.

Följande simuleringar gjordes alltså för 1000 timmar, med mått enligt Tabell 3-3:

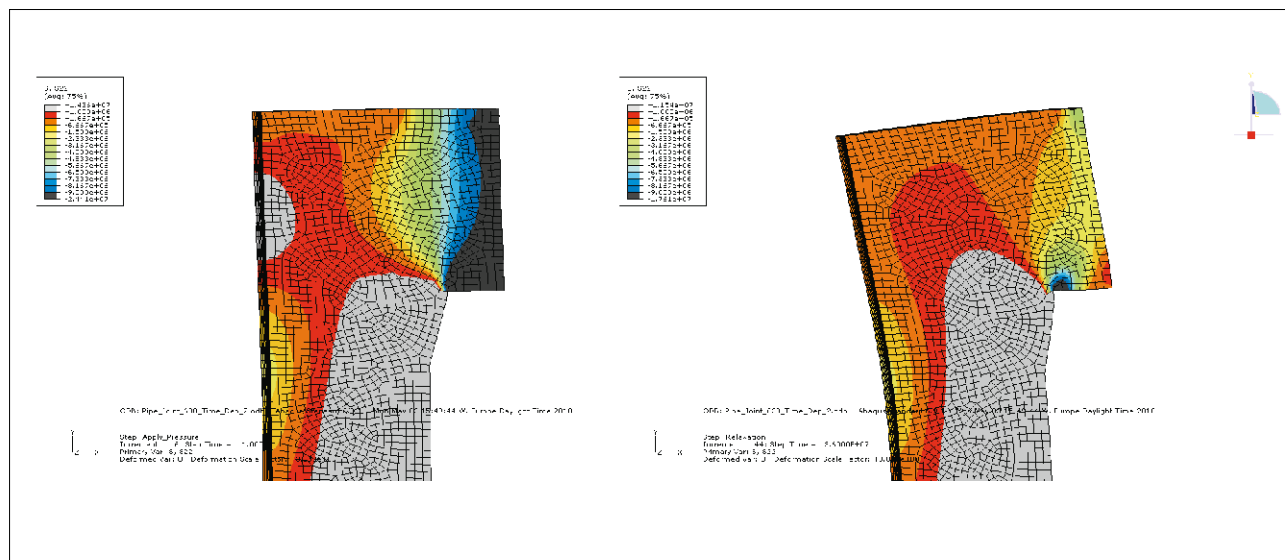
1. Ett 400 mm rör, med styv packning, för att få en referens till ett fall där läckage sällan rapporteras.
- 2a. Ett 630 mm rör, med styv packning, för jämförelse med 400 mm röret.
- 2b. Ett 630 mm rör med en plan 6 mm tjock gummipackning.
- 2c. Ett 630 mm rör med styv packning och skruvar som har endast 10 % av nominell styvhet, för att simulera den principiella effekten av flexibla stålflänsar.
- 2d. Ett 630 mm rör med bredare (KWH) fläns och styv packning, för att studera skillnader på grund av flänsbredd.
- 2e. Ett 630 mm rör med såväl bredare flänsar som flexibel stålfläns och plan 6 mm tjock gummipackning.

Dessutom användes för jämförelse:

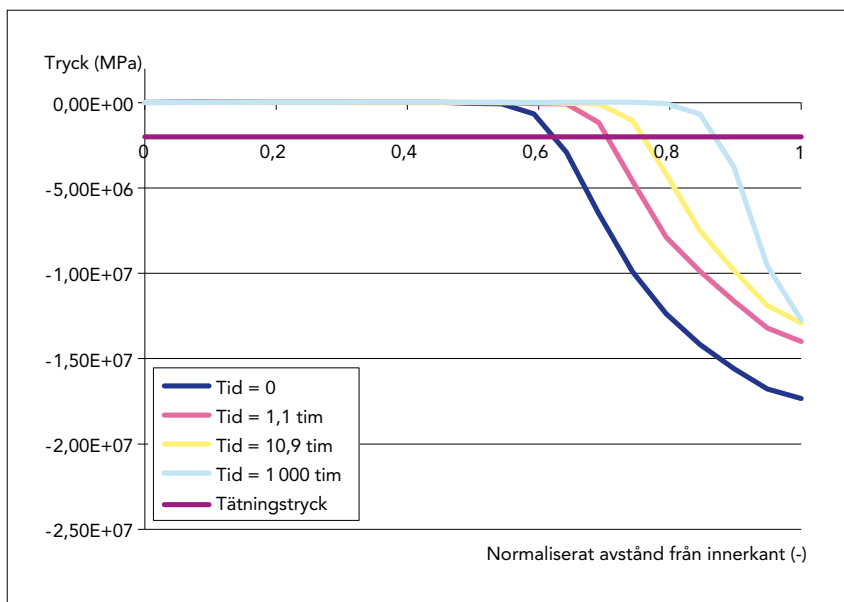
3. Ett 630 mm rör med SDR 11 (en av de inledande körningarna till 10000 timmar) för att studera effekten av den i detta fall simulerade återdragningen av skruvar efter 48 timmar.

Resultat från datorsimuleringarna är spänningar och förskjutningar för olika tidpunkter, som kan väljas godtyckligt. Som ett exempel visas i Figur 3-4 elementnät och vertikala spänningar och förskjutningar i mittsektionen av "tårtbiten" för fall 3 efter 10000 timmar (stålfläns och skruv visas inte).

Det utan jämförelse viktigaste resultatet är utvecklingen av tryckfördelningen i flänsytan (överkanten av flänsarna i Figur 3-4). Som exempel visas denna för fall 2a i Figur 3-5. Som jämförelse visas också det rekommenderade tätningstrycket 2 MPa som en violett linje.



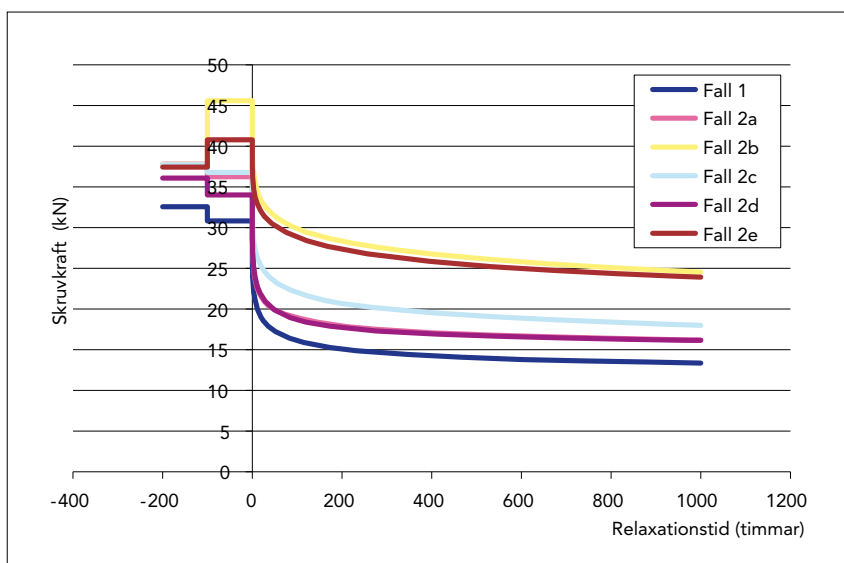
Figur 3-4 Översikt över vertikala spänningar och förskjutningar överdrivna 3 gånger. Vänster: direkt efter att inre övertryck har lagts (tid=0 timmar); höger: efter 10000 timmar.



Figur 3-5 Exempel på tryckfördelning i flänsytan, för fall 2a.

Man ser, som väntat och till skillnad från antagandet vid manuella beräkningar, att det finns kontakt bara vid ytterkanten av flänsen och att kontaktytan minskar med tiden. (Observera dock att relativt lite händer mellan 10,9 och 1 000 timmar!) Tryckfördelningen blir också olikformig, närmast triangulär. Liknande bilder fås för de övriga sex simuleringarna. Dock har främst packningstypen betydelse för fördelningens utseende, se [1] för detaljer.

Ett annat intressant resultat är utvecklingen av skruvkrafter med tiden. Dessa visas i Figur 3-6. Nivåerna till vänster om tiden 0 är inlagda för att visa de erhållna krafterna just efter åtdragning och efter trycksättning. Orsakerna till utseendet av dessa nivåer beskrivs i den utförliga rapporten [1]. Det huvudsakliga resultatet är att krafterna efter trycksättning minskar till ungefär hälften under 1 000 timmar och att stabilisering då har skett. En mycket stor del av minskningen sker under det första dygnet.



Figur 3-6 Utveckling av skruvkrafter med tiden för fallen 1–2e.

Datorsimuleringen är alltså ett kraftfullt instrument för att få en grundläggande förståelse för hur flänsförbandet fungerar över tid med ett viskoelastiskt material. De nackdelar som finns är dels att materialet måste simuleras med en modell som inte säkert återger det verkliga materialets egenskaper fullt ut, dels att randvillkoren inte blir verklighetstroga. I detta fall förutsätts ju till exempel att samtliga skruvar momentant ges rätt kraft och att trycksättningen sker omedelbart efter detta. Som framgår av experimenten har det stor betydelse att åtdragningen sker i sekvenser och under så lång tid som omkring 30 minuter. Detta innebär att plastmaterialet hinner genomgå omfattande relaxation som ger successiv omfördelning av skruvkrafterna. Även trycksättningen tar i verkligheten tid.

Viktiga slutsatser från de numeriska simuleringarna är:

- Geometrin hos flänsförbandet innebär att kontakten förloras över stora delar av flänsytan redan vid trycksättningen och för alla undersökta fall. Såväl dragkrafter i röret som expansionen vid trycksättning och krypning leder till böjmoment som strävar att kränga flänsen ur förbandet. Detta beror bland annat på att plasten är mycket mera flexibel än stålfläns och skruv, och innebär att denna typ av flänsförband har en annan och sämre grundläggande funktion än sådana av metalliska material.
- För längre tider uppstår en i huvudsak triangulär spänningsfördelning som täcker ett område av den yttre flänsytan ungefär svarande mot stålflänsens bredd, och med en maximal spänning av, i de bästa fallen, 10–13 MPa. Detta ska jämföras med de 2 MPa i genomsnittsspänning som rekommenderas för de aktuella PN 10-ledningarna.
- De töjningshårdnande egenskaperna innebär att den största delen av den tidsberoende deformationen utvecklas under första 50–100 timmarna och att principiella effekter kan bedömas lika väl efter 1 000 som efter 10 000 timmar.
- Detta innebär också att återdragning av förbandet efter någon eller några dagar är en av de få effektiva åtgärder som kan vidtas för att förbättra förbandets funktion.
- Om flexibla bordringar ska användas och ge avsedd funktion måste de vara mycket fjädrande, se ovan.
- Det är bättre med hård åtdragning från början. De högre nominella spänningarna i 630 mm rör verkar fördelaktiga.
- Det verkar inte vara bättre med en SDR 11 (tjockare rör) geometri än med en SDR 17 geometri då det gäller att åstadkomma hög maximal spänning i flänsytorna.
- Betydelsen av packning är, förutom att utjämna ojämnheter i flänsytorna, att fördela trycket mera jämnt, till omkring 40 % av flänsbredden i det aktuella fallet. Då blir också det maximala trycket något lägre.
- Användning av bredare flänsar är inte fördelaktigt, om man inte samtidigt ökar skruvkrafterna.

4 Experiment

Experimenten genomfördes för att undersöka inverkan av monteringsätt och olika packningstyper, liksom av det verkliga materialets tidsberoende egenskaper. Dessa faktorer går inte att få full klarhet om genom modellering. Det finns också olika lösningar, och motiveringar till dessa lösningar, bland leverantörer. Syftet var att påvisas vilka parametrar som är väsentliga, hur ett tätt förband kan åstadkommas, samt att så långt möjligt jämföra med datorberäkningarna.

Experiment har utförts på 630 mm rör av PE100 och med SDR17. Såväl ISO-flänsar som en typ av bredare flänsar har svetsats på korta rör som har satts samman med stålringar (samma för bägge flänstyperna) och skruvar till ett förband och försetts med ändbeslag.

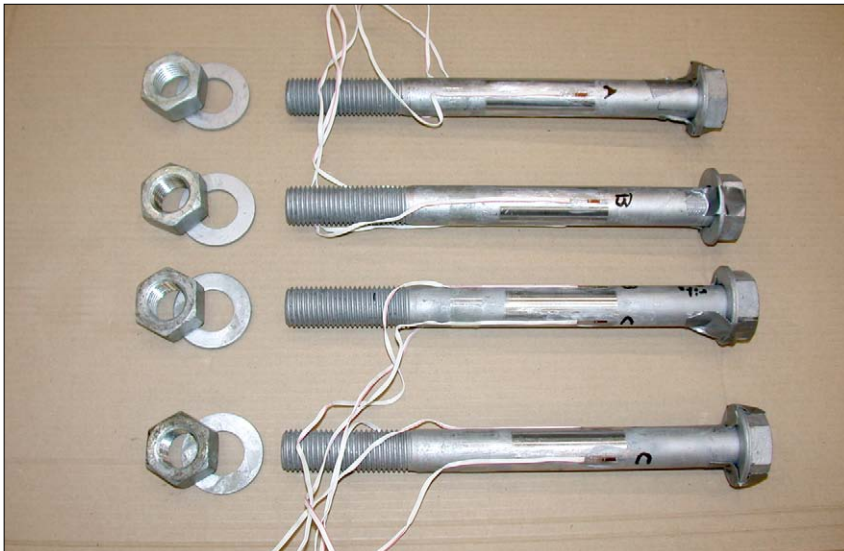
Med beteckningar enligt Figur 3 har rör med SDR17 $D_0 = 552$ mm och $dn = 632$ mm. Den breda flänsen har $h_3 = 65$ mm och $D_4 = 725$ mm, och ISO-flänsen har $h_3 = 65$ mm och $D_4 = 685$ mm. Stålringarna har massiv sektion och måtten $t = 55$ mm, $D = 840$ mm, $D_2 = 645$ mm och $D_1 = 35$ mm. Skruvarna är i det här fallet M30.

Försöksuppställningen visas i Figur 4-1. Den kopplades till en tryckanordning som kan ändra trycket $0,1$ MPa/min och hålla det konstant inom $\pm 0,05$ MPa. Mätningen kan loggas kontinuerligt.

En kritisk del av undersökningen är naturligtvis att känna till skruvkrafterna. Därför har fyra av de 20 skruvarna utrustats med givare, se Figur 4-2, kopplats till en mätbrygga och kalibrerats. Därigenom kan även dessa skruvkrafter loggas kontinuerligt under försöken. Dessa skruvar har placerats symmetriskt, det vill säga som nr 1, 6, 11 och 16 i en följd runt röret. Skruvarna är varmgalvaniserade och smorda/anoljade med ett lätt smörjfett.



Figur 4-1 Bild av försökuppställningen med ändbeslag och flänsförbandet i mitten.



Figur 4-2 Skruvar som försetts med givare.

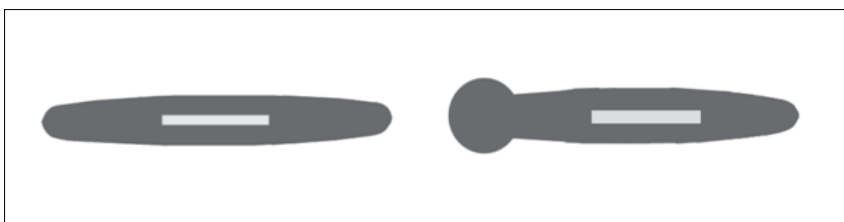
Vid normal montering mäter man åtdragningsmoment med en momentnyckel och översätter till antagna skruvkrafter med en tumregel, formel (1) på sidan 11. Även vid försöken har åtdragningsmomenten mätts med momentnyckel, och det har därigenom varit möjligt att kontrollera sambandet mellan moment och skruvkraft.

Slutligen har tre packningstyper använts, vilka representerar olika strategi för tätning, nämligen:

- En Klingsil fiberpackning som är mycket styv jämfört med en gummpackning.
- En flat gummpackning med stålkärna (Kroll & Ziller G-ST), se Figur 4-3.
- En flat gummpackning med stålkärna och integrerad O-ring (Kroll & Ziller G-ST-P/S), se Figur 4-3.

Klingsil-packningarna hade dimensionerna 550×685×1,5 (smal fläns) och 550×725×1,5 (bred fläns). För gummpackningarna från Kroll & Ziller användes PN10 för den smala flänsen med dimensionerna 620×695×7 respektive 620×695×7/10 (G-ST och G-ST-P/S) och PN16 för den breda flänsen med dimensionerna 620×735×7 respektive 620×735×7/10 (G-ST och G-ST-P/S).

Det kan nämnas att andra tillverkare, till exempel Specma Seals, har likadana gummpackningar.



Figur 4-3 Tvärsnittsp profiler av gummpackningarna G-ST (vänster) och G-ST-P/S (höger).

De åtta genomförda försöken med olika kombinationer av fläns och packning visas i kronologisk ordning i Tabell 4-1. Av praktiska och resursskäl används samma fläns för flera försök och blir därmed utsatt för upprepade krypdeformation, vilket kan påverka de senare försöken i en sekvens. Som synes har försöken med den smala flänsen utförts med packningarna i omvänd ordning för att i någon mån ta hänsyn till och få en uppfattning om betydelsen av detta.

Tabell 4-1 Konfigurationer för genomförda försök i kronologisk ordning.

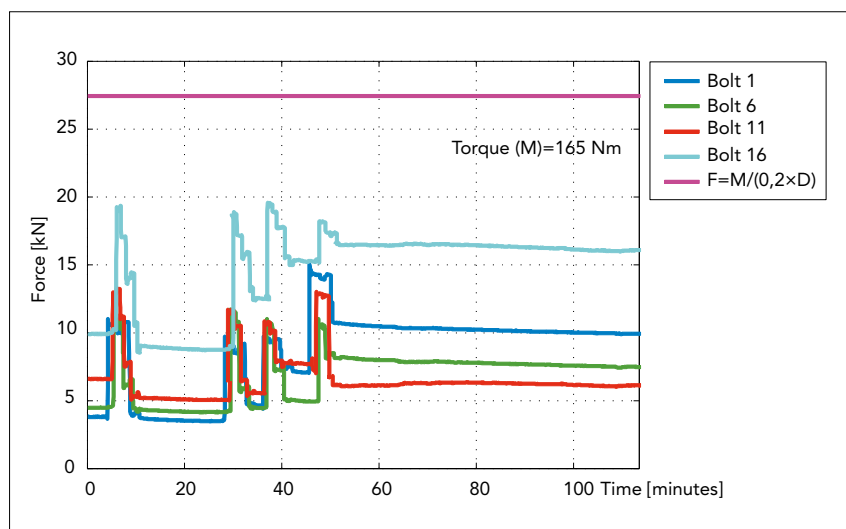
	Flänstyp	Packning
Fall 1	Bred fläns (KWH)	Ingen
Fall 2	-"-	Klingersil
Fall 3	-"-	G-ST
Fall 4	-"-	G-ST-P/S
Fall 5	Smal fläns (ISO)	G-ST-P/S
Fall 6	-"-	G-ST
Fall 7	-"-	Klingersil, första montering
Fall 8	-"-	Klingersil, andra montering

Dessutom har de inledande försöken med nödvändighet genomförts delvis för att få fram en lämplig procedur och kan därmed förefalla mindre systematiska, se [2]. I princip har emellertid ett försök utförts så att skruvarna har dragits till förutbestämda momentnivåer i en ökande serie. För varje nivå har därefter trycket höjts till dess att läckage inträffat. Om förbandet varit tätt vid trycknivån 13 bar eller högre har nivån satts till 13 bar under ett antal dagar.

Åtdragningen gjordes normalt med fyra återdragningar i följd till en viss momentnivå och med rekommenderad korsvis ordning hos skruvarna enligt följade:

1-11-6-16 > 3-13-8-18 > 5-10-15-20 > 2-12-7-17 > 4-14-9-19

I varje dragning kommer då de givarförsedda skruvarna först och i ordningen 1-11-6-16. Då gjordes några viktiga observationer illustrerade av exemplet i Figur 4-4, som är typiskt för alla fallen.



Figur 4-4
Exempel på skruvkrafter under åtdragning till 165 Nm.

De fyra åtdragningsomgångarna syns tydligt med de fyra givarförsedda skruvarna först i varje omgång och i den angivna ordningen. Det är anmärkningsvärt att:

- det sker en stark relaxation, med kraftminskning i skruvarna, redan under åtdragningsprocessen (man ser ju inte krafterna i de 16 inte givarförsedda skruvarna)
- skruvkrafterna blir mycket olika för samma åtdragningsmoment (handböcker för skruvförband anger att osäkerheten i samband mellan moment och kraft i skruvförband kan vara 30 % eller mer, vilket ändå inte räcker för att förklara skillnaderna här)
- skruvkrafterna ligger långt under den nivå som skulle uppnås enligt vedertagen formel (angiven med violett linje)
- efter de fyra åtdragningsomgångarna, under 45 minuter, är skruvkrafterna stabila (detta gäller även för längre tider).

Ett antal andra sätt att genomföra åtdragningen, till exempel att vänta ett dygn mellan två dragningar, ger samma principiella effekter.

En detaljerad beskrivning av hur de åtta försöken genomförts återfinns i rapporten [2]. När samtliga konfigurationer undersökts kan resultaten sammanfattas enligt Tabell 4-2.

Man ser två tydliga tendenser, dels att den smala flänsen ger bättre resultat, tätt för högre vattentryck vid lägre åtdragningsmoment, dels att gummipackningar, och i synnerhet sådana med O-ring är bättre än styva packningar. Att den smala flänsen ger täthet med lägre åtdragningsmoment beror troligen på att det för samma skruvkraft blir högre yttryck i flänsen med den mindre ytan. Det noteras att angivna moment inte alls svarar mot förväntade skruvkrafter, för den använda skruvtypen och ytbehandlingen.

Tabell 4-2 Sammanfattning av resultat. Talen under respektive momentnivå anger tryck vid läckage i bar.

Momentnivå (Nm)		50	70	110	165	220	280
Bred fläns (KWH)	Klingersil, fall 2	2,0		3,0	3,6	3,7	
	Flat, gummi, fall 3 G-ST			2,4	3,7	7,2	>16
	O-ring, gummi, fall 4 G-ST-P/S		14,4	14,4			
Smal fläns (ISO)	Klingersil, fall 7, 8	9,5*		11,7	>16		
	Flat, gummi, fall 6 G-ST		13,3/ 10,5	>16			
	O-ring, gummi, fall 5 G-ST-P/S		>16				

(*) Den andra av två monteringar.

Som jämförelse kan nämnas att KWH rekommenderar ett åtdragningsmoment av 335 Nm för den breda plastflänsen och massiv stålfläns, samt 190 Nm för den smala ISO-plastflänsen med en flexibel, profilerad stålfläns. Det är emellertid inte klart för vilka packningstyper detta skulle gälla. Det påpekas också att skruvarna i försöken har smorts, enligt PPI (Plastic Pipes Institute), med ett lätt smörjfett, för att förbandet inte ska lossna. Detta har uppenbarligen tillsammans med de galvaniserade skruvarna lett till hög friktion.

Alternativt skulle man, enligt Specma Seals med flera, kunna använda ett grafitfett. Detta skulle kunna ge lägre friktion och bättre överensstämmelse med formeln (1).

Fallen 3, 8 och 6, markerade med fet stil i Tabell 4-2, trycksattes först upp till 16 bar varefter trycket sänktes och sedan utsattes för konstant tryck 13 bar under 7, 3 respektive 5 dygn och förblev i samtliga fall täta. Här görs anmärkningen att nivån 13 bar för den här använda SDR 17-geometrin gör att rören expanderar kraftigt med tiden, se även [2].

Slutsatser från experimenten är:

- Det faktum att flänsytorna är ”begagnade” i en del försök måste beaktas. Ändå är resultaten konsistenta. Gummipackningar ger täta förband för lägre tryck. Deras elastiska egenskaper bidrar till att utjämna ojämnheter och möjligen till att kompensera för relaxationen.
- Sambandet mellan åtdragningsmoment och resulterande skruvkraft stämmer inte alls med den vedertagna formeln för de använda skruvarna, utan krafterna blir endast cirka hälften av de beräknade. Därför är det viktigt att känna till den korrekta relationen för precis de använda skruvarnas ytbehandling och smörjning. Man ska också veta att beräknade samband har en inneboende osäkerhet (som kan vara av storleken 30 %).
- Genom att flänsarna relaxerar under den tid åtdragningen tar sker en betydande kraftminskning och omfördelning. Därför är åtdragning i omgångar fördelaktig liksom återdragning efter några timmar eller dagar. Därefter är förhållandena stabila, eller ändras lite, även för långa tider.

Användning av SDR 17-rör för trycknivån 13 bar innebär betydande krypning och diameterökning. Speciellt för den breda flänsen innebär detta att flänsen strävar att ”vränga sig” ur förbandet och öka koncentrationen av kontakttryck till den yttersta delen av flänsen. Skillnaden mellan 10 och 13 bar innebär en stor skillnad i materialets krypegenskaper för SDR 17.

5 Diskussion av resultaten

Sammantaget ger beräkningar och experiment mycket och viktig information om flänsförband i plaströr, delvis sådan som bekräftar praxis och delvis sådant som ger ny kunskap.

Beräkningarna ger en god principiell bild av mekaniken i ett förband, som att tryckfördelningen är koncentrerad till ytterkant av flänsarna och det snabba tidsförloppet till stabilisering. Detta stöder slutsatser som att återdragning är en bra metod att få till stånd ett tätt förband. Man får också förståelse för funktionen hos packningar, att fördela och utjämna tryck, och hos flexibla stålringar. Tryckfördelningen blir olikformig, nästan triangulär, och koncentrerad till ytterkanten, vilket möjligen kan utnyttjas för tumregel-mässiga beräkningar. Vidare ser man att breda flänsar, särskilt i kombination med tunna rör, SDR17, verkar vara en känslig konstruktion. Det verifieras också att med de skruvkrafter som ska uppnås genom åtdragning till rekommenderade moment så bör förbanden fungera tillfredsställande.

Experimenten bekräftar detta men ger också viktig ny och möjligen oväntad kunskap. Genom plastens tidsberoende och genom att sambandet mellan moment och skruvkraft inte stämmer för vissa typer av skruvar och smörjning fås mycket lägre och mera ojämnt fördelade skruvkrafter än väntat. Ändå visar försöken att det går att få täta förband med de moment som ges i rekommendationer trots att dessa ger endast den halva avsedda skruvkraften.

Detta visar på betydelsen av att känna till hur olika skruvar, smörjning och åtdragningsprocedurer fungerar, och att följa rekommendationer för aktuell typ av packning och förband.

Det är svårt att direkt översätta åtdragningsmomenten i Tabell 4-2 till tryckfördelningar i flänsytorna liknande de som kommer fram i FEM-simuleringar enligt Figur 3-5, även om detta vore mycket intressant att göra. För detta skulle egentligen krävas FEM-simuleringar vid de faktiska och oväntade lägre skruvkrafterna, där relaxationen kan väntas vara av mindre omfattning. En första, approximativ uppfattning kan dock fås på följande sätt.

De olika experimenten 1–8 ger krafter i de instrumenterade skruvarna enligt diagram som det i Figur 4-4. Dessa visar på att krafterna, och därmed medelspänningarna, efter 1–100 timmar ligger på 40–50 % av de som skulle erhållas med formel (1), konservativt skattat alltså på nivån 0,4 av dessa.

Dessa medelspänningar kan sedan, med stöd av resultat som det i Figur 3-5, räknas om till triangulära spänningsfördelningar i de ringformiga flänsytorna med en bredd svarande mot den hos stålringen eller packningen, eller smalare, kanske ner till hälften av dessa för den breda flänsen, och för långa tider. På så sätt skulle en ungefärlig uppfattning fås om tryckfördelningen i flänsytorna när man ligger just över gränsen för att förbandet ska vara tätt.

Referenser

Genom att detta är en rapport för en bred läsekrets och sammanfattar två utförliga rapporter, en om experiment och en om beräkningar, ges här endast referens till dessa. Nedanstående rapporter finns att hämta hem som pdf-fil från SP Sveriges Tekniska Forskningsinstituts hemsida, www.sp.se.

[1] Lars Jacobsson, Hans Andersson, Daniel Venetti. *Tightness of flange joints for large polyethylene pipes – Part 1: Numerical simulations*. SP Report 2011:49, ISBN 978-91-86622-79-4, SP Technical Research Institute of Sweden, 2011.

[2] Lars Jacobsson, Hans Andersson, Sven-Erik Sällberg. *Tightness of flange joints for large polyethylene pipes – Part 2: Full scale experimental investigations*. SP Report 2011:50, ISBN 978-91-86622-80-0, SP Technical Research Institute of Sweden, 2011.



Box 47607, 117 94 Stockholm

Tel 08 506 002 00

Fax 08 506 002 10

E-post svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se