

MATERIAL- OCH KEMITEKNIK

1253

Dimensioneringskriterier för anläggningsdelar utsatta för krypning

Anders Kallenberg, Peter Algotsson

Dimensioneringskriterier för anläggningsdelar utsatta för krypning

Dimensioning criteria for plant piping components exposed to creep

Anders Kallenberg
Peter Algotsson

M12-216

VÄRMEFORSK Serviceaktiebolag
101 53 STOCKHOLM · Tel 08-677 25 80
Oktober 2014
ISSN 1653-1248

Abstract

Undersökning av EN13480 visar att den förväntade livslängden för anläggningar designade för 200 000 timmar kan vara mycket kortare än så på grund av hur normen utformats. En modell för uppskattning av den förväntade livslängden ges och även en ekonomisk motivation till varför en större säkerhetsfaktor bör användas vid design av rör i anläggningar.

Sammanfattning

Sedan den europeiska rörnормen EN13480 presenterades, har det för vissa stålsorter noterats att den erforderliga tjockleken vid design av anläggningsdelar som är utsatta för krypning, kan bli tunnare om de designas för en livslängd på 200 000 timmar än om de designas för 100 000 timmar. Det är troligen ologiskt att ett tunnare gods skulle hålla längre än ett tjockare.

Uppgiften i denna rapport består dels i att försöka bevisa att normen är fel utformad, dels att undersöka för vilka fall den är fel utformad, dessutom visa på en rimlig omformulering samt en uppskattning av den förväntade livslängden på de anläggningar som designats enligt normen.

Målet med rapporten är att den ska vara till hjälp för beställare av anläggningar då krav ska specificeras samt till hjälp för driften av anläggningar då det kommer till återkommande underhåll.

Studien har genomförts genom litteraturstudier av handböcker, normer och vetenskapliga rapporter. Dessutom har samtal förts med personer med stor både vetenskaplig och erfarenhetsmässig kunskap inom kryp-, hållfasthet- och materialområdet. Ett par möten med en referensgrupp har genomförts då viktiga synpunkter har framförts som bidragit till rapportens utformning.

Resultaten visar att för flertalet material kan en situation uppstå då godset blir tunnare för en längre designad livslängd, än för designlivslängden 100 000 timmar trots utformning enligt norm. Både en undersökning av kryptöjning samt en empirisk undersökning av kända fall av skador på rör visar att tunnare gods och högre utnyttjandegrad ger snabbare kryptöjning och snabbare uppkomst av skador.

En jämförelse mellan kostnaden för att designa en huvudångledning enligt den gällande normen och en variant där samma krypsäkerhetsfaktor används för 200 000 timmar som vid 100 000 timmar, visar att om man väljer att designa med det senare fallet, kan kostnaderna öka med ca 25 % (X10CrMoVNb9-1 DN250) men den förväntade livslängden ökar med ca 50 %.

Om man som beställare ska specificera krav för en anläggning som ska designas för 200 000 timmar, bör en krypsäkerhetsfaktor på 1.5 istället för 1.25 övervägas, åtminstone då materialet X10CrMoVNb9-1 ska användas. Ägare till anläggningar som designats för 200 000 timmar bör starta med undersökningar av krypskador på svets skarvar minst 10 % (10 % snabbare kryptöjning är vad som framkommer för materialet 13CrMo4-5 i rapporten. Tills samma data finns för andra material är det detta som får gälla som riktvärde) tidigare än vad som anges i publicerade rekommendationer såsom [8][9][13].

Därefter ska ytterligare provningar genomföras efter drifttider som styrs av: eventuella avvikelser vid den tidigare provningen, utnyttjandegrad, systemspänningar och publicerade rekommendationer såsom [8][9][13].

Generellt bör en nollprovning utföras som för ångledningar innebär att en replikaprovning utförs på några valda svetsar (för X10CrMoVNb9-1 även en rörböj). Detta är för att kontrollera mikrostruktur och värmebehandling samt att en direkt jämförelse kan göras med kommande replikprovningar.

Executive Summary

New standards hopefully mean new knowledge, but sometimes it also means new sources of errors. Things that once were obvious has now been altered and tampered with. So is the case of the creep safety factor, SF_{cr} . In the old standard, Swedish Piping code 1978, the material thickness of pipes grew thicker with designed lifetime. If a pipe is to last as long as it is designed for, the pipe needs to be sturdier, hence thicker.

In the current standard, EN13480, when calculating the required wall thickness, a safety factor for creep is used. This is to account for divergent material behaviour in individual pipes.

But why would the behaviour diverge? Divergent material behavior can be due to smaller differences in: composition from one batch to another, heat treatment and product forms. Typically, the scatter band in creep test data is $\pm 20\%$ of the mean creep rupture strength. In addition, the creep rupture strength already is extrapolated from long term testing and the behaviour of one individual piece of metal can't be exactly foreseen. Exposed to the same conditions, individual pipes, or more correctly, individual welds in that pipe, since it actually is in the welds where creep damages are most prone to appear, will be subject of different creep strain curves.

In EN13480 is specified the safety factor for creep to be used when designing for various lifetimes of a pipe according to Table a.

Table a: Designed lifetime and creep safety factor used in EN13480

Time T h	Safety factor SF_{cr}
200 000	1.25
150 000	1.35
100 000	1.5

It is seen in Table a that the individual behaviour of different pipes/welds is expected to converge by time, that the spread from the mean behaviour will be less, since the SF_{cr} is shrinking from 1.5 when designing for 100 000 hours to 1.25 when designing for 200 000 hours. A more conservative approach would be to at least use the same creep safety factor for 200 000 hours as for 100 000 hours.

When examining what the different safety factors leads to, plots were made for some materials and different design conditions. For many materials, the required wall thickness does not differ much when designing for 100 000 or 200 000 hours, at least for some design conditions. For some materials and conditions, the required wall thickness is less when designing for 200 000 than when designing for 100 000 hours, in some cases the wall thickness gets so thin that it would barely hold for 50 000 hours

when doing the same calculations with the greater safety factor, see Figure a. The illogical in these results is obvious.

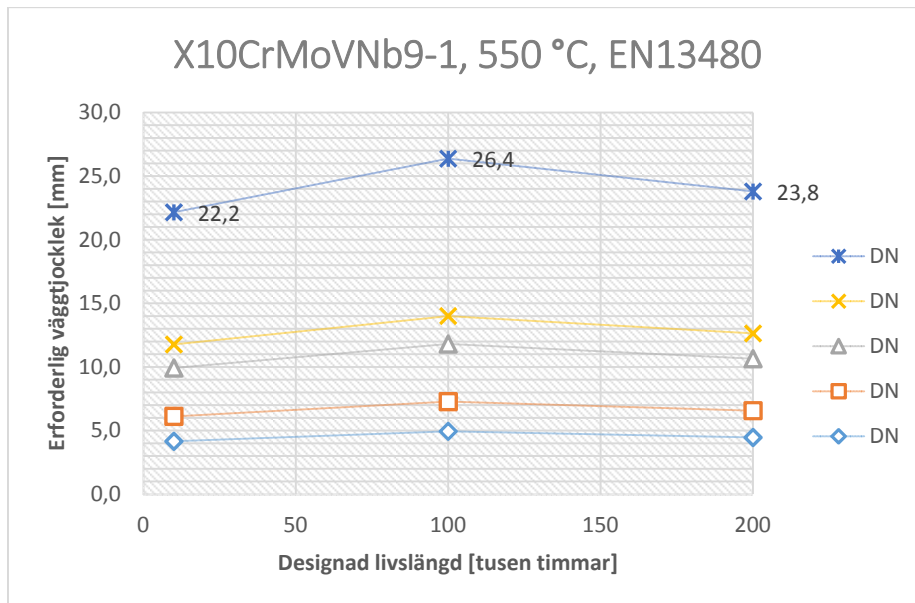


Figure a: Required wall thickness of a pipe in material X10CrMoVNb9-1 at 550°C and 100 bars for various pipe dimensions.

A model was made in an attempt to calculate the expected lifetime of a plant designed for 200 000 hours in terms with EN 13480. In this model, data were used from two different plants; Heleneholmsverket - HVK - in Malmö, and Västhamnsverket - VHV - in Helsingborg, as seen in Table b. These pipes were all designed according to the current norm at that time, which would be somewhat less than 100 000 hours in the current norm.

Table b: Data from Heleneholmsverket and Västhamnsverket. Size, material, utilization ratio and operating conditions until the pipe was replaced.

	Location	Dimension	Material	Wall thickness	Utilization ratio	Design data	Operating time (thousands of hours)*
1	HVK	DN250	10CrMo9-10	28 mm	1.015	TS: 530°C PS: 129 bar	230
2	HVK	DN250	10CrMo9-10	28 mm	1.015		180
3	HVK	DN250	14MoV6-3	23 mm	1.078		150
4	HVK	DN250	14MoV6-3	23 mm	1.078		170
5	HVK	DN400	14MoV6-3	36 mm	1.001		220
6	HVK	DN400	14MoV6-3	36 mm	1.001		100
7	HVK	DN250	10CrMo9-10	28 mm	1.015		150
8	VHV	Ø298.5 mm	10CrMo9-10	32 mm	1.097	TS: 540°C PS: 120 bar	120

* Until decision of replacement of pipe based on creep damages in the welds

The utilization ratio from Table b were plotted against the operating time. The two materials used in the data are 10CrMo9-10 and 14MoV6-3. For these two materials, the utilization ratio when using a $SF_{cr}=1.5$ to calculate the required wall thickness for 100, 200 and 250 thousand hours were also plotted. A mean value of the latter is plotted as a dashed line, which is then translational moved upwards (the line with asterisks) until it reaches the first data point from HVK+VHV. This is used as the modelling limit.

Then, for the material X10CrMoVNb9-1, utilization ratios are calculated, first when using $SF_{cr}=1.25$ which gives $U=1.0967$. Then the utilization ratio when using $SF_{cr}=1.5$ is calculated which gives $U=0.9739$. Both are plotted to their respective crossing with the modelling limit, and the expected operating lifetime is read from the horizontal axis, see Figure b.

The material X10CrMoVNb9-1 is admittedly in a different category than the materials used in the model, but since there is not yet this type of data from facilities with X10CrMoVNb9-1, this comparison is the best available.

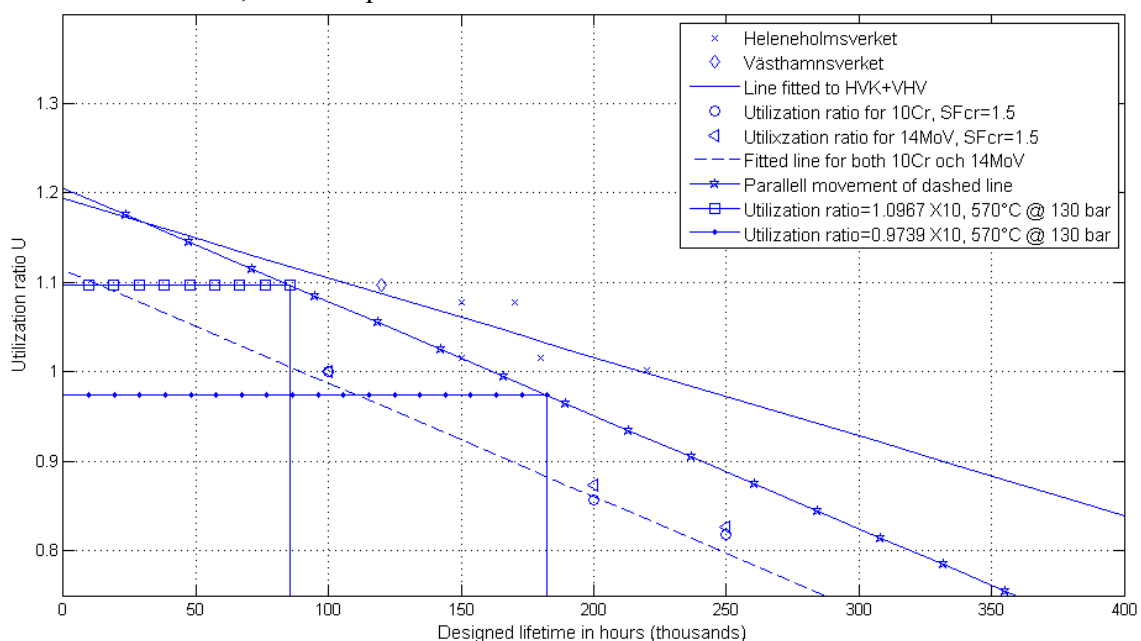


Figure b: Data points from Table b and utilization ratio of these materials with $SF_{cr}=1.5$. A mean value from these are plotted and translational moved upwards to nearest data point. Utilization ratio for X10CrMoVNb9-1 when using $SF_{cr}=1.25$ and $SF_{cr}=1.5$ are plotted as line with squares and line with dots respectively.

When designing a plant for 100 000 hours using X10CrMoVNb9-1, the cost per meter could be 100 000 SEK for a standard thickness of 25 mm. When designing a plant for 200 000 hours and the same material, the cost per meter would then be 78 000 SEK (see 3.4) for a standard thickness of 22.2 mm.

The utilization ratio for 25 mm is less than 1 (0.9739) which gives an estimated operating lifetime of 180 000 hours (see Figure b), but the utilization ratio at 100 000 hours, when designing for 200 000 hours, will be 1.0967 (a required wall thickness of 24.35 mm over the sufficient wall thickness 22.2 mm) and as seen in Figure b, about 80 000 hours of expected operating life. An example plant would have 50 meters of main steam pipe from boiler to turbine. This would mean a cost reduction of 1.1 million

SEK in designing for 200 000 hours than designing for 100 000 hours, but using the results from Figure b it is shown that this extra cost (ca 28 %) would result in an increase in expected operating life time of more than 100 %.

It is recommended that when specifying a new plant or when replacing pipes in an existing plant, do not look to short time cost benefits, because the gain in operating lifetime will overshoot the increase in costs.

It is important to regularly check the status of hangers, drainage and welds and to start the documentation of this as early as possible to have as a reference. The inspection of hangers should be done twice a year, once with the system warm and in operation, and once with a cold system.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	BAKGRUND	1
1.2	BESKRIVNING AV FORSKNINGSSOMRÅDET.....	1
1.3	FORSKNINGSUPPGIFTEN OCH DESS ROLL INOM FORSKNINGSSOMRÅDET	2
1.4	MÅL OCH MÅLGRUPP	2
2	TEORI	3
2.1	KRYPNING	3
2.2	BELASTNING.....	4
2.3	HUR ERFORDERLIG VÄGGTJOCKLEK BERÄKNAS ENLIGT NORM	10
3	RESULTATREDOVISNING	14
3.1	STUDIE AV VÄGGTJOCKLEKSBERÄKNINGAR ENLIGT EN 13480	14
3.2	STUDIE AV VÄGGTJOCKLEKSBERÄKNINGAR ENLIGT RÖRNORM 1978	22
3.3	STUDIE AV KRYPTÖJNINGEN.....	29
3.4	UNDERSÖKNING AV KOSTNADSDIFFERENS	30
3.5	UNDERSÖKNING AV LIVSLÄNGD OCH UTNYTTJANDEGRAD	30
3.6	SANNOLIKHET FÖR VISS SKADA.....	33
4	RESULTATANALYS	35
5	SLUTSATSER	36
6	REKOMMENDATIONER OCH ANVÄNDNING	37
7	FÖRSLAG TILL FORTSATT FORSKNINGSGÄRDET.....	38
8	LITTERATURREFERENSER	39

Bilagor

A	ELEMENTARFALL
---	---------------

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Enligt rörledningsnormen EN13480-3, kan den erforderliga vägg tjockleken på rör utsatta för krypning, e , dimensioneras för 10 000, 100 000 samt 200 000 timmars livslängd. Det har dock visat sig att vid design för 200 000 timmars livslängd, kan e bli tunnare än vid design för 100 000 timmars livslängd. Det verkar orimligt att ett tunnare gods, till och med tunnare än vad normen anger för halva livslängden, skulle hålla längre.

När ett rakt rör utan söm designas för högt tryck är det både rörnормen EN13480-3 samt materialstandarden EN10216-2 som används. Om vi utgår ifrån att det är orimligt att tunnare gods skulle hålla längre än tjockare, så är det uppenbarligen något som är fel. Vad är det som har orsakat detta fel? Är normen skriven fel? Hur skiljer sig EN 13480 från andra normer?

Om mindre gods används i rörledningar, blir anläggningen billigare. Därför har många entreprenörer valt att designa anläggningar för just 200 000 timmar. Vilken livslängd kan anläggningsägaren räkna med att dessa anläggningar har?

Om sambandet mellan tjocklek på godset och livslängd är proportionellt, dvs. för att öka livslängden så är det bara att välja tjockare gods, finns det då andra aspekter att betänka som kan verka menliga för anläggningen vid val av tjockare gods?

1.2 Beskrivning av forskningsområdet

För närvarande pågår ett arbete inom CEN för att förbättra EN13480 [1]. Delegationer från olika europeiska länder kommenterar vad de anser bör åtgärdas. Några kommentarer rör krypsäkerhetsfaktorn SF_{cr} . Ett förslag är att krypsäkerhetsfaktorn bör anges enligt följande

$$SF_{cr} = SF_{var} \cdot SF_{ip} \quad (1)$$

där SF_{var} är en säkerhetsfaktor för toleransområdet för mätvärdena av krypbrottstyrkan. SF_{var} ska beräknas som standardavvikelsen för krypbrottstyrkan eller det värde som tillser att 15 % av testpopulationen faller under den nivån. Och om inga goda statistiska data finns tillgängliga, bör SF_{var} sättas till 1.25.

SF_{ip} är en säkerhetsfaktor för interpolation och extrapolation inom tidsdomänen. Den bör sättas till 1.0 då värdet på krypbrottstyrkan S_{RTt} fås genom interpolation.

Om istället S_{RTt} fås genom extrapolation samtidigt som etablerade metoder för kontroll och övervakning av status och återstående livslängd med avseende på krypning används, bör SF_{ip} sättas till 1.05.

Slutligen bör SF_{ip} sättas till 1.1 om S_{RTt} fås genom extrapolation eller om det inte någon kontroll och övervakning med avseende på krypning enligt ovan.

1.3 Forskningsuppgiften och dess roll inom forskningsområdet

EN13480 ger anvisningar för hur vägg tjockleken ska beräknas med hjälp av krypsäkerhetsfaktorn SF_{cr} . Denna norm är dock inte avpassad på så sätt att vägg tjockleken ökar kontinuerligt med den designade livslängden. Att ta reda på hur normer bör användas när det råder tveksamheter är av största vikt för att erhålla säkra och kostnadseffektiva anläggningar i framtiden.

1.4 Mål och målgrupp

Föreliggande undersökning förväntas visa var och hur normen EN13480 kan ifrågasättas. Den bör också ge en fingervisning om vilken livslängd anläggningsägare kan förvänta sig på anläggningar designade enligt EN13480, samt hur kravspecifikationer bör formuleras. Rapporten bör också ge råd om hur anläggningsägare ska göra för att övervaka krypskador på anläggningen.

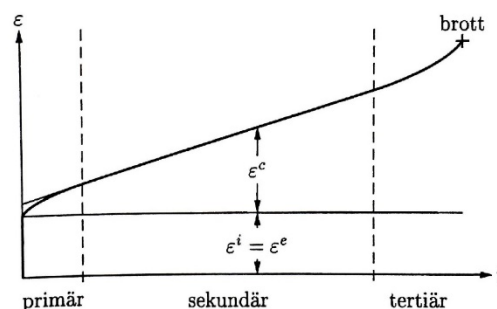
2 Teori

2.1 Krypning

Då temperaturen i ett material når en nivå då krypning, dvs. tidsberoende deformation vid konstant last, blir signifikant måste krypfenomenen beaktas vid dimensioneringen (för metaller sker detta vanligen vid $0,3 - 0,4 \times T_m$ där T_m är materialets smältpunkt i Kelvin [6][10]). Ju längre tid som materialet utsätts för belastningen, desto större blir töjningen ända till materialets förmåga att töja sig tar slut och krypbrott inträffar. En del material kryper märkbart redan vid rumstemperatur. Ett exempel från [6] är plastkassen, då denna lastas för mycket kommer dess handtag att bli längre och smalare med tiden, för att till slut möjligen gå av. Plastpåsar är vanligen gjorda av polyeten (PE) som har smältpunkt mellan $85-145^\circ\text{C}$ ($358-418\text{ K}$). Halva smältpunkten för den hårdigaste plastpåsen nås alltså redan vid 209 K vilket är långt under rumstemperatur. De elastiska och plastiska förlängningarna sker direkt när belastningen läggs på, men ändå kan en tidsberoende förlängning av handtagen ske om belastningen är tillräcklig. Detta beror på en egenskap hos materialet som kallas viskoelasticitet.

Stål har en ungefärlig smältpunkt vid 1798 K . Detta gånger $0,3$ är $539,4\text{ K}$ ($266,4^\circ\text{C}$). Vid elproduktion i värmekraftverk vill man ha så hög temperatur som möjligt för att maximera verkningsgraden. Temperaturer mellan $500-600^\circ\text{C}$ är inte ovanliga. För att klara dessa temperaturer måste stål legeras så att kryptöjningsmotståndet ökar. Även sådana stål uppvisar i denna typ av anläggningar både ett initialt elastiskt och plastiskt beteende samt ett tidsberoende olinjärt viskoelastiskt beteende [6].

Vid krypprovning av ett material brukar töjningen plottas mot tiden enligt Figur 1.



Figur 1: Krypkurva [6]. ϵ^i är den initiala töjningen. Genom extrapolation av den konstanta kryptöjningen i det sekundära området, genom det primära området fås linjen som syns till vänster i diagrammet. ϵ^e är kryptöjningen.

Creep curve [6]. ϵ^i is the initial strain. By extrapolation of the constant creep strain from the secondary area back into the primary area, a straight line is achieved, which is seen in the left part of the figure. ϵ^e is the creep strain.

I Figur 1 ses att kryptöjningshastigheten verkar vara konstant i sekundärområdet. Då kryptöjningen i primärområdet är relativt liten, kan kryptöjningshastigheten fram till tertiärområdet approximeras som linjärt. Följande samband gäller

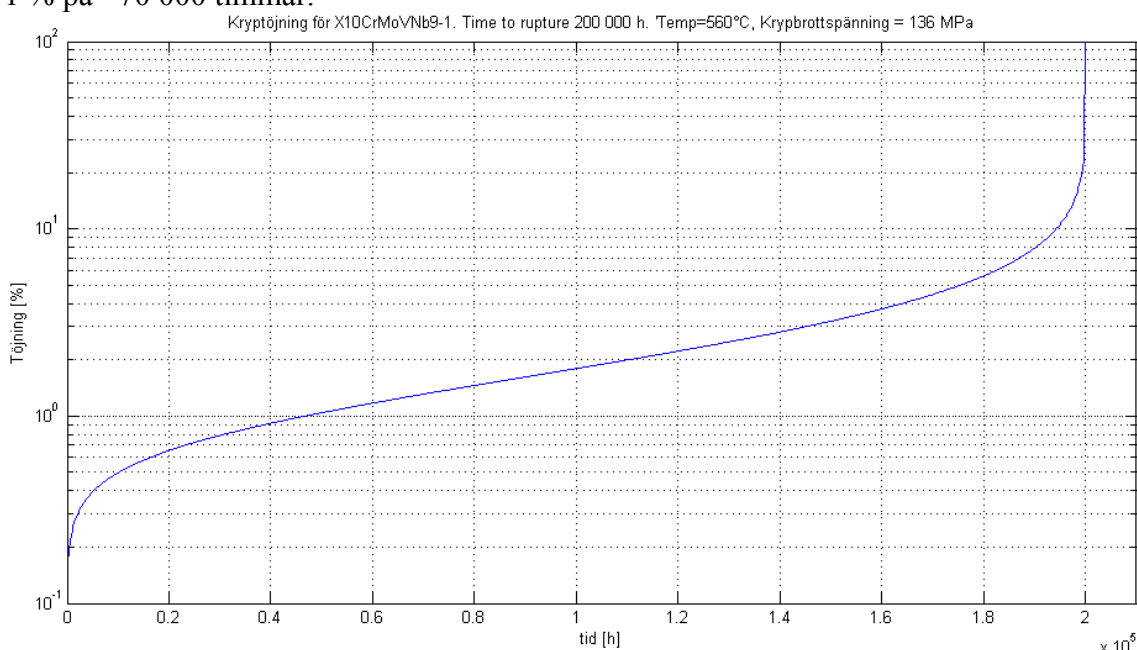
$$\varepsilon = \varepsilon^i + \varepsilon^c \text{ där } \varepsilon^i = \frac{\sigma}{E} \text{ och } \dot{\varepsilon}^c = \text{konstant} \quad (2)$$

Kryptöjningshastigheten har ett olinjärt beroende av spänningen σ . Empirisk forskning visar att sambandet är som i ekvation (3), Nortons lag.

$$\dot{\varepsilon}^c = k\sigma^n \quad (3)$$

2.1.1 Modell för kryptkurvor, Logistic Creep Strain Prediction - LCSP

I Stefan Holmströms avhandling ”*Engineering Tools for Robust Creep Modelling*” [11] lyfts modellen LCSP fram som en mycket robust modell för modellering av kryptkurvor för olika material. Om temperatur, tryck och tid för kryptbrott är känt, kan LCSP ge kryptkurvan. I Figur 2 ses kryptkurvan för X10CrMoVNb9-1 som är modellerad med hjälp av LCSP. En linjärisering av sekundärområdet ger direkt kryptöjningshastigheten 1 % på ~70 000 timmar.



Figur 2: Kryptkurva för X10CrMoVNb9-1 modellerad med LCSP [11].

Creep curve for X10CrMoVNb9-1 modelled with LCSP [11].

2.2 Belastning

Vid beräkning av resulterande spänning i balk pga. belastningar, skiljer man på kraftstyrd och rörelsestyrd belastning. Kraftstyrd belastning fortsätter att verka även efter det att balken böjt sig medan en rörelsestyrd belastning endast verkar på balken tills den har böjt sig motsvarande den belastande rörelsen.

2.2.1 Kraftstyrd belastning

2.2.1.1 Rör utsatt för böjning

Den normalspänning som uppstår i en balk (rör) vid en kraftstyrd eller en rörelsestyrd belastning kan uttryckas enligt (4) [7].

$$|\sigma(x)| = \frac{|M(x)|}{W_b(x)} \quad (4)$$

D.v.s. beloppet av spänningen är lika med beloppet av momentet genom böjmotståndet, där momentet är kraft gånger hävstång och böjmotståndet för ett rör beräknas genom (5)

$$W_b(x) = \frac{I(x)}{z} = \frac{\frac{\pi}{4}(R^4 - r^4)}{z} = \frac{\pi(R^4 - r^4)}{4R} \quad (5)$$

$I(x)$ är yttröghetsmotståndet och z är det längsta avståndet från masscentrum till ytterkant, R är ytterradien på röret och r är innerradien. Om ett fast inspänt rör med längd fem meter, ytterdiameter 273 mm och vägg tjocklek på 30 mm, belastas med en massa på 1000 kg i rörets ytterände, blir normalspänningen i rörets fästpunkt enligt (6)

$$\sigma = \frac{1000 \cdot 9.81 \cdot 5 \cdot 4R}{\pi(R^4 - r^4)} = \frac{196200 \cdot 0.1365}{\pi(0.1365^4 - 0.1065^4)} = 39 \text{ MPa} \quad (6)$$

2.2.1.2 Rör utsatt för vridning

Då en balk eller i detta fall ett rör vrids, uppstår en skjuvspänning, τ_{max} , enligt (7)

$$\tau_{max} = \frac{M_v}{W_v} \quad (7)$$

där M_v är det vridande momentet och W_v är ämnets vridmotstånd som kan uttryckas enligt (8)

$$W_v = \frac{\pi}{16D} (D^4 - d^4) \quad (8)$$

där D och d är yttre respektive inre diameter.

Om ett rör med dimensionerna 273x30 mm belastas med ett moment om 9807Nm fås följande uttryck enligt (7)

$$\tau_{max} = \frac{9807}{\frac{\pi}{16 \cdot 0.273} (0.273^4 - 0.213^4)} = 3.900 \text{ MPa}$$

Enligt Tresca's hypotes beräknas sedan normalspänningen enligt ekvation (9), [8]

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} = 2\tau = 7.8 \text{ MPa} \quad (9)$$

Enligt Saabye Ottosen och Ljung är Tresca mer konservativ i räkningarna än von Mises.

2.2.1.3 Rör utsatt för inre övertryck

För beräkning av spänning i rör som är utsatta för inre övertryck kan man använda Lames formler för tjockväggiga rör enligt följande

$$\sigma_r = P \cdot \frac{\kappa^2}{1-\kappa^2} \left(1 - \frac{b^2}{r^2}\right) \text{ spänning i radiell led} \quad (10)$$

$$\sigma_\varphi = P \cdot \frac{\kappa^2}{1-\kappa^2} \left(1 + \frac{b^2}{r^2}\right) \text{ spänning i tangentiell led} \quad (11)$$

$$\sigma_z = P \cdot \frac{\kappa^2}{1-\kappa^2} \text{ spänning i axiell led} \quad (12)$$

Uttryck (10) är spänningen i radiell led där b är ytterradien och r är beräkningsradien, man ser att denna spänning är noll längst ut.

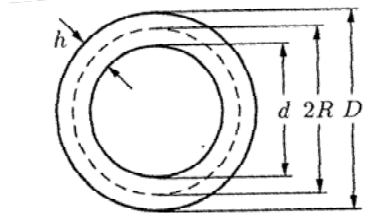
Uttryck (11) är spänningen i tangentiell led. Denna är störst vid den inre radien och minskar utåt.

Uttryck (12) beskriver spänningen i axiell led vilken är proportionell mot trycket.

Kappa är kvoten mellan inre och yttre diameter $\kappa = \frac{d}{D}$.

När spänning från inre tryck adderas med spänning från böjning eller vridning så är det spänningen i axiell led som avses. Om vi använder beteckningar från Figur 3 kan vi skriva:

$$\begin{aligned} D &= 2R + h \\ d &= 2R - h \\ D^2 - d^2 &= (D + d)(D - d) = 4R \cdot 2h = 8Rh \end{aligned}$$



Figur 3: Yttre och inre diameter samt vägg tjocklek h .

Outer and inner diameter and wall thickness h .

Dessutom kan man för tunnväggiga rör göra följande approximeringar

$$\begin{aligned} r^2 &\approx R^2 \approx \frac{1}{4}D^2 \\ (2R - h)^2 &\approx 4R^2 \end{aligned}$$

Vilket i sin tur skulle ge följande uttryck för den axiella kraften till följd av inre tryck [8]

$$\sigma_z = P \cdot \frac{\kappa}{1 - \kappa} = P \cdot \frac{(d/D)^2}{1 - (d/D)^2} = P \cdot \frac{d^2}{D^2 - d^2} = P \cdot \frac{R}{2h} = \frac{PD}{4h} \quad (13)$$

$$\sigma_\varphi = P \cdot \frac{\kappa}{1 - \kappa} \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) = P \cdot \frac{R}{2h} \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) = \frac{PD}{4h} \cdot 2 = \frac{PD}{2h} \quad (14)$$

2.2.1.4 Rör utsatt för böjning eller vridning och inre övertryck

Om röret utsätts för en kombination av krafter, exempelvis böjning och inre tryck, adderas spänningen från bägge som i uttryck (15), där man ser att det är det av böjningen uppkomna resulterande momentet som avses

$$\sigma_1 = \frac{PD}{4e_n} + \frac{M_b}{W_b} \quad (15)$$

där e_n är nominell vägg tjocklek hos röret.

Då röret utsätts för vridning och inre tryck adderas även av dessa påkänningar uppkomna spänningar enligt (16), naturligtvis orsakar en vridning ett moment, se (9)

$$\sigma_2 = \frac{PD}{4e_n} + 2\tau = \frac{PD}{4e_n} + 2 \cdot \frac{M_v}{W_v} \quad (16)$$

2.2.2 Rörelsestyrd belastning

2.2.2.1 Termisk expansion

Då ett system av rörledningar är sammankopplade och fluiden som strömmar i dem är varm, avger denna värme till rören. En resulterande temperaturökning i röret leder till att materialet expanderar. Denna expansion beskrivs i uttryck (17)

$$\Delta L = \alpha \cdot \Delta T \cdot L \quad (17)$$

där ΔL är förskjutningen, α är en expansionskoefficient som finns tabellerad, Δ är den förhöjda temperaturen i röret i grader Celsius och L är längden hos det expanderande röret. Ett stålrör med längden 10 m och temperaturen 120°C kommer att utvidga sig ungefär 12 mm. Denna expansion kommer att trycka på ett anslutande rör och ge upphov till en s.k. rörelsestyrd belastning.

När röret böjer sig för belastningen kan deflektionen användas för att beräkna en motsvarande kraft och därmed ett moment som verkar på röret. Med momentet och böjmotståndet kan en spänning beräknas som i (7).

Sammanfattningsvis kan spänningen beskrivas som summan av spänningar uppkomna dels genom inre tryck, dels genom olika krafter och moment och dels genom rörelse (18)

$$\sigma_4 = \frac{PD}{4e_n} + \frac{M_A}{Z} + \frac{M_C}{Z} \quad (18)$$

där Z är böjmotståndet.

Precis på samma sätt formuleras uttrycket i stycke 12.3.4.2 i EN13480 [2]:

12.3.4. Stress range due to thermal expansion and alternating loads

The stress range, σ_3 , due to resultant moment, M_C , from thermal expansion and alternating loads, e.g. seismic loads, shall either satisfy the following equation:

$$\sigma_3 = \frac{i \cdot M_C}{Z} \leq f_a \quad (12.3.4-1)$$

or where the conditions of equation (12.3.4-1) are not met, the sum of stresses, σ_4 , due to calculation pressure p_c , resultant moment, M_A , from sustained mechanical loads and the resultant moment, M_C , from thermal expansion and alternating loads shall satisfy the following equation:

$$\sigma_4 = \frac{p_c d_o}{4e_n} + \frac{0,75 i M_A}{Z} + \frac{i M_C}{Z} \leq f_h + f_a \quad (12.3.4-2)$$

Koefficienterna framför M_A respektive M_C får aldrig understiga 1, i är spänningsintensitetsfaktorn vilken för rårör är 1.

För ytterligare undersökningar hänvisas till elementarfallen i bilaga 1.

2.2.2.2 Effekten av böjmoment och vridning på t-stycken och böjar

Böjning och vridning av t-stycken och böjar behandlas i normer t.ex. EN13480 och RN78 med hjälp av spänningsintensitetsfaktorer - SIF. I ekvation 12.3.4.2 från EN13480, som ses i Figur 6 samt i ekvation (19) nedan, anges SIF som i .

$$\sigma_4 = \frac{p_c d_o}{4e_n} + \frac{0,75 \cdot i \cdot M_A}{Z} + \frac{i \cdot M_C}{Z} \quad (19)$$

De spänningsintensitetsfaktorer som anges i bilaga H [2] i EN 13480 är generella, grova och baserade på utmattningsprovning angivna. De tar inte hänsyn till position i svetsen eller storleken på hålet. I både RN78 samt i EN13480 anges i som i ekvation (20) för både rörböjar och t-stycken

$$i = \frac{0,9}{h^{2/3}} \quad (20)$$

där h är *Flexibilitetskaraktäristik* för rördelen i fråga. För rörböjar är h som uttryck (21)

$$h = \frac{4 \cdot R \cdot e_n}{d_m^2} \quad (21)$$

där R är böjradien, e_n är vägg tjockleken och d_m är mittendiametern (diameter på röret mätt från mitten av rörväggen). Detta uttryck är likadant i både EN13480 och RN78.

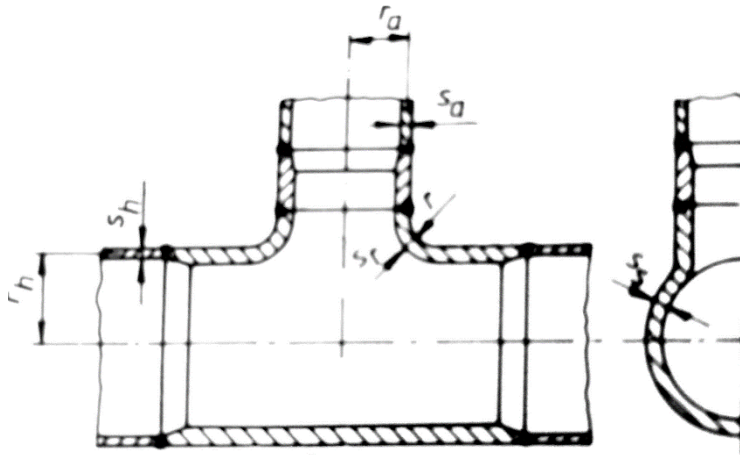
För ett oförstärkt t-stycke med påsvetsad, insvetsad eller utkragad stuts är h uttryckt som (22) i EN13480.

$$h = \frac{2e_n}{d_m} \quad (22)$$

RN78 skiljer här på utkragade avstick och påsvetsade/insvetsade. För det senare fallet gäller som i uttryck (22), medan flexibilitetskaraktäristiken uttrycks som (23) för utkragade avstick

$$h = \left(\frac{S_e}{S_h}\right)^{3/2} \cdot \frac{S_e \cdot R_e}{r_h} \quad (23)$$

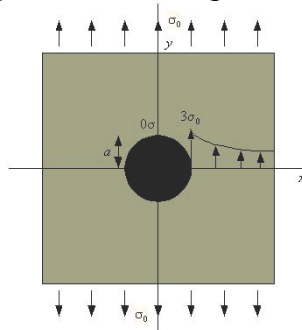
där definitionerna ses i Figur 4.



Figur 4: Utkragning eller avstick med radie i övergången mellan huvudrör och avstick [4].

Extruded tee or branch with radius in the transition between the main pipe and branch [4].

Spänningsintensitetsfaktorerna för t-stycken och rörböjar är angivna mycket generellt; de har utformats utifrån de spänningar som uppstår i ett plant metallstycke som utsätts för en sträckspänning σ i planet. Då blir spänningen 3σ i ytterkanten på hålet och noll i ovanbelaget på hålet som i Figur 5.



Figur 5: Spänningsintensitet kring ett hål i en platta som utsätts för en spänning σ_0 i planet under förutsättning att dimensionsförhållandena mellan hål och platta är tillräckligt stort för att eliminera alla randeffekter.

Stress intensity around a hole in a plate that is subject to a stress σ_0 in the plane provided that the dimensional relationships between the hole and the plate is large enough to eliminate any boundary effects.

Sedan har man tänkt sig att denna platta kröks till dess den formar ett rör. Ett inre övertryck i ett rör ger upphov till spänningar i tangentiell led så som är antaget för plattan.

Ett DN250-rör, 273x25, med ett oförstärkt avstick, får en spänningsintensitetsfaktor i enligt ekvation (24)

$$i = \frac{0.9}{\left(\frac{2 \cdot 25}{248}\right)^{2/3}} \approx 2.62 \quad (24)$$

Då det tillkommer spänningar i planet genom exempelvis vridning eller böjning av röret, beräknas den resulterande spänningen ut och multipliceras med tre för att få maximal spänningskoncentration runt hålet, 3σ .

För t-stycken med stora avstick tillkommer andra effekter som gör att SIF blir större än 3. På liknande sätt hanteras övriga diskontinuiteter, exempelvis böjar och konor.

För fler kommentarer se kap 7.

2.3 Hur erforderlig vägg tjocklek beräknas enligt norm

2.3.1 SS-EN 13480-3

§6 i EN 13480 behandlar *konstruktion av rörledningskomponenter under inre tryck*. För raktör gäller att:

Minsta erforderliga vägg tjocklek för ett rakt rör utan tillägg och toleranser, e , skall beräknas enligt [2]:

1. När $D_o/D_i \leq 1.7$:

$$e = \frac{p_c D_o}{2f_z + p_c} \quad (25)$$

eller

$$e = \frac{p_c D_i}{2f_z - p_c} \quad (26)$$

2. När $D_o/D_i > 1.7$:

$$e = \frac{D_o}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{f_z - p_c}{f_z + p_c}} \right) \quad (27)$$

eller

$$e = \frac{D_i}{2} \left(\sqrt{\frac{f_z + p_c}{f_z - p_c}} - 1 \right) \quad (28)$$

Svetsfaktorn z för sömlösa rör är 1. Då beräkningarna gäller konstruktioner under statisk belastning i krypområdet tillkommer ett index cr på beräkningsspänningen f . Denna beräknas enligt (29)

$$f_{cr} = \frac{S_{RTt}}{SF_{cr}} \quad (29)$$

Där S_{RTt} är ett tabellerat värde på krypbrotthållfastheten som beror på material och temperatur. SF_{cr} är en säkerhetsfaktor som finns angiven i EN13480-3. Den beror på konstruktionens designade livslängd.

Tabell 1: Säkerhetsfaktor för olika designlivslängder enligt EN 13480

Tid T h	Säkerhetsfaktor SF_{cr}
200 000	1,25
150 000	1,35
100 000	1,5

Exempel: Ett DN250-rör i material X10CrMoVNb9-1 som det ska gå ånga i. Ångan håller en temperatur av 560 grader Celsius och trycket är 128 bar. Röret ska designas för 200 000 h livslängd. Krypbrottshållfastheten hämtas från [3].

Temperature °C	Creep rupture strength values for (MPa)		
	10 000 h	100 000 h	200 000 h
500	289	258*	246*
510	271	239*	227*
520	254	220*	208*
530	234	201*	189*
540	216	183*	171*
550	199	166	154*
560	182	150	139*

Figur 6: Urklipp från EN10216-2.

Clip from EN10216-2.

Beräkningsspänning blir

$$f_{cr} = \frac{139}{1.25} = 111.2 \text{ MPa}$$

Röret antas bli tunt ($D_y/D_i \leq 1,7$) därför används ekvation (25)

$$e = \frac{12.8 \cdot 273}{2 \cdot 111.2 + 12.8} \approx 14.9 \text{ mm}$$

Kontroll att röret är tunt: $\frac{D_y}{D_i} = \frac{273}{273 - 14.9 \cdot 2} \approx 1,12 \leq 1,7$ vilket stämmer.

Antag att röret istället designas för 100 000 h livslängd. Detta ger

$$f_{cr} = \frac{150}{1.5} = 100 \text{ MPa}$$

$$e = \frac{12.8 \cdot 273}{2 \cdot 100 + 12.8} \approx 16.4 \text{ mm}$$

Kontroll av tunt rör: $D_o/D_i \approx 1.14$ vilket stämmer.

För att beräkna erforderlig väggjocklek med korrosionstillägg och tolerans (i detta fall en tolerans på 12.5%) används följande uttryck (30)

$$e_{ord} \geq (e + c_0 + c_2) \cdot 100 / (100 - x) \quad (30)$$

där c_0 är korrosionstillägg - här används 1 mm - c_2 är den tillåtna förtunningen till följd av tillverkningsprocessen (vilket för rårör är noll) och x är toleransen angiven i procent. Vi får för 200' h

$$e_{ord} \geq (14.9 + 1) \cdot \frac{100}{100 - 12.5} \approx 18.12 \text{ mm}$$

och för 100' h fås

$$e_{ord} \geq (16.4 + 1) \cdot \frac{100}{100 - 12.5} \approx 19.91 \text{ mm}$$

Om man använder e för 200 000 timmar, fås en utnyttjandegrad

$$U = 19.91/18.12 \approx 1.099$$

redan vid 100 000 timmar.

2.3.2 Rörledningsnorm 1978

I *Rörledningsnormer 1978 kap. 6 Beräkning av rör och rördelar för inre tryck* [4] står följande:

Rörets minsta godstjocklek S_{min} beräknas enligt formeln

$$S_{min} = \frac{D_y \cdot p \cdot m}{20 \cdot \sigma_{tn} \cdot z + p} \quad (31)$$

där D_y är ytterdiameter, p är inre tryck, m är en koefficient som baseras på kvoten mellan ytter- och innerdiameter, σ_{tn} är tillåten spänning vid beräkningstemperatur, z är svetsfaktorn.

Rörets minsta nominella godstjocklek $S_{min \text{ nom}}$ beräknas enligt formeln

$$S_{min \text{ nom}} = (S_{min} + c) \cdot \psi \quad (32)$$

där c är korrosionstillägg och ψ är en koefficient som tar hänsyn till minustolerans på godstjockleken.

För samma data som ovan fås med RN78 följande för 200 000 h designad livslängd

$$S_{min} = \frac{273 \cdot 128 \cdot 1}{20 \cdot \frac{139}{1.5} \cdot 1 + 128} \approx 17.64 \text{ mm}$$

$$S_{min \text{ nom}} = (17.64 + 1) \cdot 1.14 \approx 21.25 \text{ mm}$$

och för 100 000h designad livslängd

$$S_{min} = \frac{273 \cdot 128 \cdot 1}{20 \cdot \frac{150}{1.5} \cdot 1 + 128} \approx 16.42$$

$$S_{min \text{ nom}} = (16.42 + 1) \cdot 1.14 \approx 19.86 \text{ mm}$$

Här har antagits en minustolerans på 12.5%, ett förhållande $D_y/D_i=1.13$ samt att krypbrottshållfasthetsdata från nyare normer (EN10216-2) går att använda utan att det påverkar resultatet.

Värdet för 200 000 h ger en utnyttjandegrad, $U = 0.935$ vid 100 000 h.

I RN78 ges möjlighet att använda en alternativ regel som säger att

”Om krypbrottsgränsvärden för 200 000 h ($R_{km\ 200\ 000}$) är fastställda
i någon nationell eller internationell standard får $R_{km\ 100\ 000}$ utbytas
mot $1.2 \cdot R_{km\ 200\ 000}$ ”

I denna undersökning har valts att inte räkna med detta undantag, då det funnits en önskan om att hålla sig till normens grundförutsättningar.

2.3.3 DIN-2413. Stahlrohre, Berechnung der Wanddicke gegen Innendruck. (Beräkning av vägg tjocklek för stålrör mot inre tryck)

På sidan 102 i *DIN-Taschenbuch, Stahlrohrleitungen 1* från 1987, börjar DIN-2413 som publicerades 1972. Här definieras vägg tjockleksberäkning för stålrör utsatta för inre övertryck [5]. Vid konstant påkänning över 120°C ska vägg tjockleken beräknas enligt (33)

$$S_v = \frac{d_a}{\left(\frac{2\sigma_{zul}}{p} - 1\right)v_N + 2} \quad (33)$$

där σ_{zul} är tillåten påkänning vid konstant belastning och kan även skrivas K/S, där K är *hållfasthetsvärde*; det minsta av två värden – antingen sträckgränsen vid beräkningstemperaturen - $\check{\sigma}_{0.2/\vartheta}$ med en säkerhetsfaktor S på 1.5 eller krypbrottshållfasthetsvärdet - $\check{\sigma}_{B/200000/\vartheta}$ (*mindestwert*) med en säkerhetsfaktor S på 1.0 (det som finns tabellerat är medelkrypbrottsvärdet - Mittelwert - för att få mindestwert måste en faktor på 0.8 användas - $\check{\sigma}_{B/200000/\vartheta} = 0.8 \cdot \bar{\sigma}_{B/200\ 000/\vartheta}$).

Används $\bar{\sigma}_{B/100\ 000/\vartheta}$ ska en säkerhetsfaktor på 1.5 användas.

v_N är en svetsfaktor för längssvetsade rör – 1 för sömlösa, p är det inre övertrycket och d_a är ytterdiametern.

När vi jämför resulterande uttryck upptäcks att DIN-2413 är samma uttryck som EN13480:

$$S_v = \frac{d_a}{\left(\frac{2\sigma}{p} - 1\right)v_N + 2} = \frac{d_a \cdot p}{2 \cdot \sigma \cdot v_N - p \cdot v_N + 2 \cdot p} = \frac{d_a p}{2 \cdot \frac{K}{S} + p}$$

$$= \begin{cases} \frac{d_a p}{\frac{2 \cdot \check{\sigma}_{B/200000/\vartheta}}{1.25} + p} & \text{för 200'h beräknad livslängd} \\ \frac{d_a p}{\frac{2 \cdot \check{\sigma}_{B/100000/\vartheta}}{1.5} + p} & \text{för 100'h beräknad livslängd} \end{cases}$$

detta gör att samma resultat erhålls för DIN-2413 som för EN13480.

3 Resultatredovisning

3.1 Studie av vägg tjockleksberäkningar enligt EN 13480

För att studera vad tjockleksberäkningar i EN 13480 resulterar i, går fler material och fall igenom. De presenteras i diagramform för att tydliggöra resultaten. De fyra första materialen (X10CrMoVNb9-1, X20CrMoV11-1, 10CrMo9-10 samt 13CrMo4-5) har ett temperaturintervall som är någorlunda lika med avseende på krypbrottspänningen, se Figur 7. Det medförde att dessa material kom att undersökas vid samma temperatur som ligger ungefär i mitten av deras medelkrypbrottspänningsintervall såsom det anges i [14] och som kan ses i Figur 7. De två efterkommande materialen (P235GH och 16Mo3) skiljer sig från de fyra första genom att den maximala temperaturen som anges i normen 10216-2 [14] för deras medelkrypbrottspänningsintervall ligger betydligt lägre än för de förra, se Figur 8.

an for de Roma, se Fig. 8:

Steel grade		Temperature	Steel grade		Temperature
Steel name	Steel number	°C	Steel name	Steel number	°C
X10CrMoVNb9-1	1.4903	500	10CrMo5-5 13CrMo4-5	1.7338 1.7335	450
		510			460
		520			470
		530			480
		540			490
		550			500
		560			510
		570			520
		580			530
		590			540
		600			550
		610			560
		620			570
		630			580
		640			590
		650			600
		660			
		670			
Steel grade		Temperature	Steel grade		Temperature
Steel name	Steel number	°C	Steel name	Steel number	°C
X20CrMoV11-1	1.4922	480	10CrMo9-10	1.7380	450
		490			460
		500			470
		510			480
		520			490
		530			500
		540			510
		550			520
		560			530
		570			540
		580			550
		590			560
		600			570
		610			580
		620			590
		630			600
		640			
		650			

Figur 7: Temperaturintervall för medelkrypbrottspänningen enligt EN10216-2 [14] för materialen X10CrMoVNb9-1, X20CrMoV11-1, 13CrMo4-5 och 10CrMo9-10.

Temperature interval for average creep rupture stress according to EN10216-2 [14] for the materials X10CrMoVNb9-1, X20CrMoV11-1, 13CrMo4-5 and 10CrMo9-10.

Steel grade		Temperature	Steel grade		Temperature
Steel name	Steel number	°C	Steel name	Steel number	°C
16Mo3	1.5415	450	P235GH	1.0345	400
		460	P265GH	1.0425	410
		470			420
		480			430
		490			440
		500			450
		510			460
		520			470
		530			480
		540			490
		550			500

Figur 8: Temperaturintervall för medelkrypbrottsspänningen enligt EN10216-2 [14] för materialen 16Mo3 och P235GH.

Temperature interval for average creep rupture strength according to EN10216-2 [14] for the materials 16Mo3 and P235GH.

3.1.1 X10CrMoVNb9-1, X20CrMoV11-1, 10CrMo9-10 och 13CrMo4-5

I följande stycke studeras vanligt förekommande material på anläggningar inom process- och kraftindustrin. Inledningsvis studeras dessa genom att variera ytterdiametern och använda en temperatur som låg ungefär i mitten av tabellen över materialets medelkrypbrottsvärde, se Figur 7 och följande beräkning

$$\frac{\left\{ \frac{(500^{\circ}\text{C}-670^{\circ}\text{C})}{2} + \frac{(480^{\circ}\text{C}+650^{\circ}\text{C})}{2} + \frac{(450^{\circ}\text{C}+600^{\circ}\text{C})}{2} + \frac{(450^{\circ}\text{C}+600^{\circ}\text{C})}{2} \right\}}{4} = 550^{\circ}\text{C}$$

Det visar sig dock att inte alla material får en tunnare vägg tjocklek för 200 000 timmar än för 100 000 timmar, när ytterdiameterns varierar, vid just denna temperatur. Materialen X10CrMoVNb9-1 och X20CrMoV11-1 verkar klara sig sämst, deras vägg tjocklek blir tunnare vid 200 000 timmar än vid 100 000 timmar både när temperatur och dimension varierar. 10CrMo9-10 får minst lika tjock vägg vid 200 000 timmar som vid 100 000 timmar.

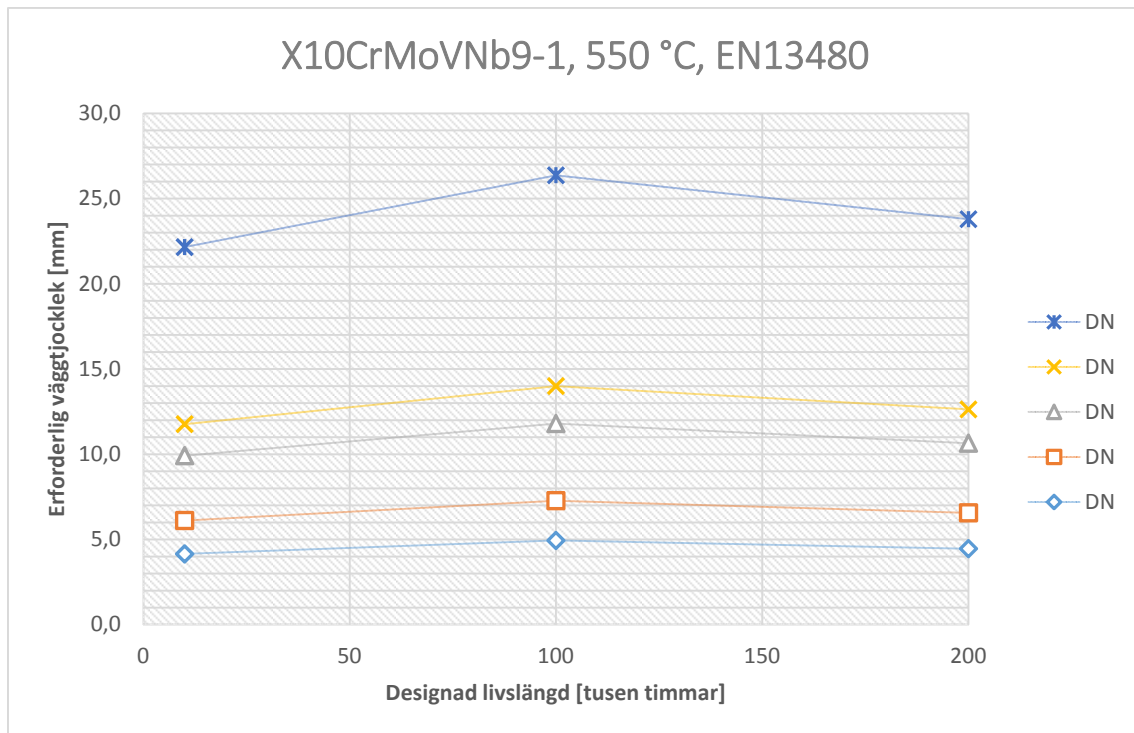
Därefter gjordes ett annat diagram där en konstant ytterdiameter valdes, DN250 (273 mm). Istället varierades temperaturen. När temperaturen varierar finns det även för 10CrMo9-10 och 13CrMo4-5 ett område där vägg tjockleken blir mindre om dimensioneringen görs för 200 000 timmar än om den görs för 100 000 timmar.

Här har använts följande uttryck för beräkning av vägg tjocklek, e :

$$e = \frac{p_c D_o}{2f_z + p_c}$$

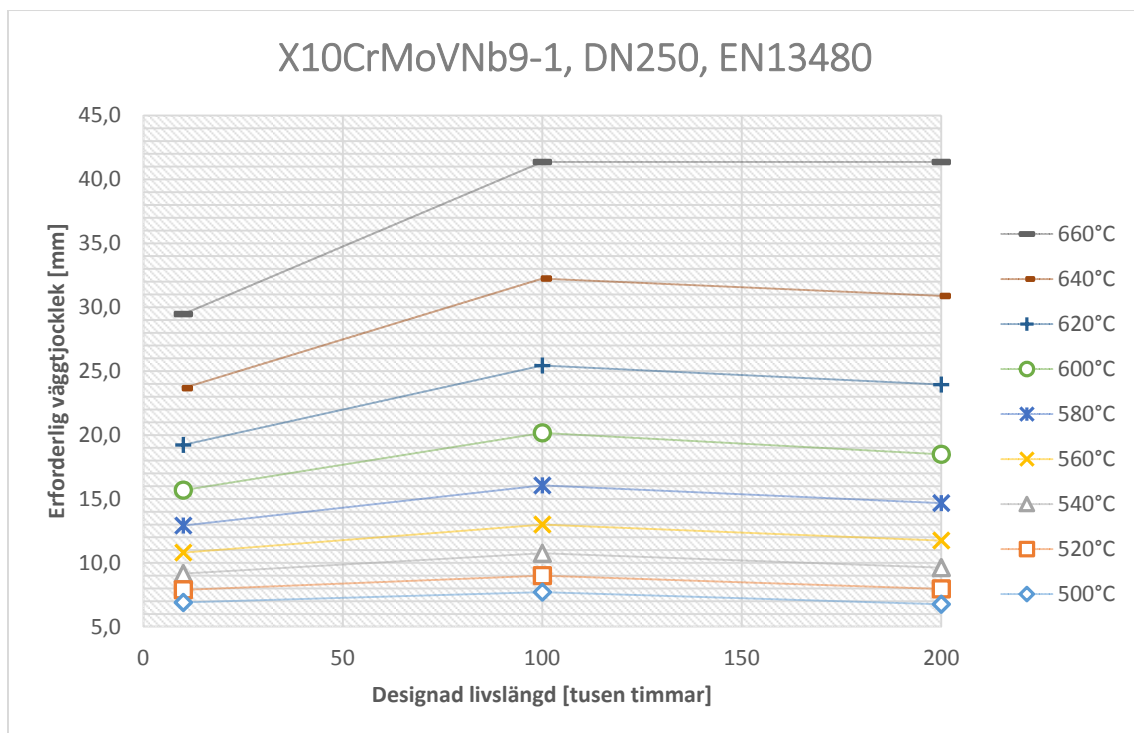
$$f_{cr} = \frac{S_{RTt}}{SF_{cr}}$$

Där p_c är övertryck i MPa, D_o är ytterdiameter i mm, f_z är beräkningsspänning i MPa som får indexet $_{cr}$ vid beräkningar i kryptområdet, S_{RTt} är medelkrypbrottsspänningen vilket är en materialegenskap och SF_{cr} är en säkerhetsfaktor enligt [2].



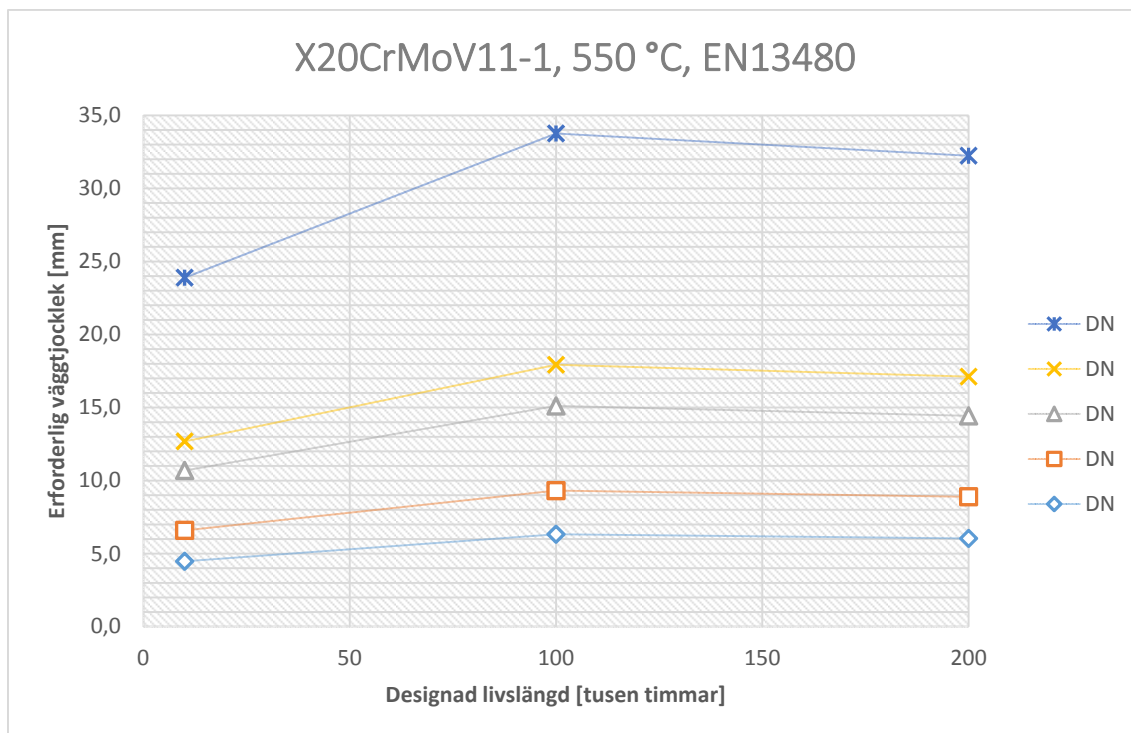
Figur 9: Beräknad väggjocklek för materialet X10CrMoVNb9-1 vid temperatur 550°C enligt norm EN13480 för flera olika dimensioner avseende ytterdiameter.

Calculated wall thickness of the material X10CrMoVNb9-1 at the temperature of 550°C according to standard EN13480 for several dimensions concerning outer diameter.



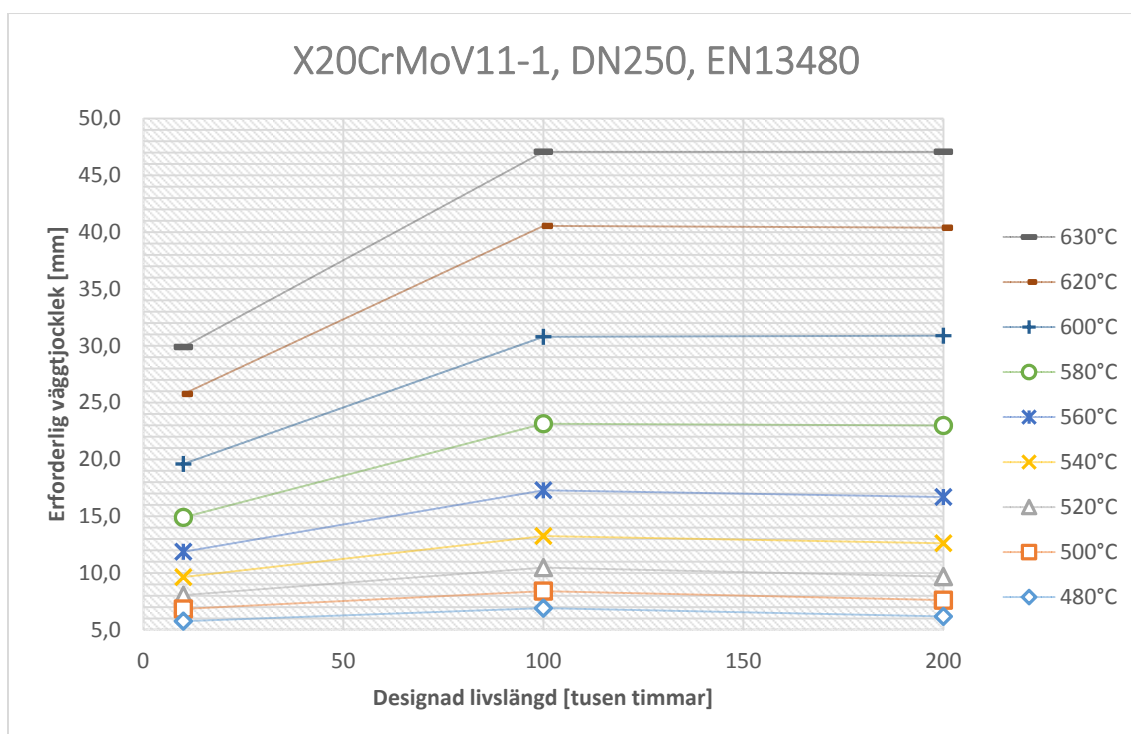
Figur 10: Erforderlig väggjocklek enligt EN 13480 för ett DN250 rör av X10CrMoVNb9-1 beroende på designad livslängd och varierat på temperatur.

The required wall thickness according to EN 13480 for a DN250 pipe of X10CrMoVNb9-1 depending on the designed service life and varied in temperature.



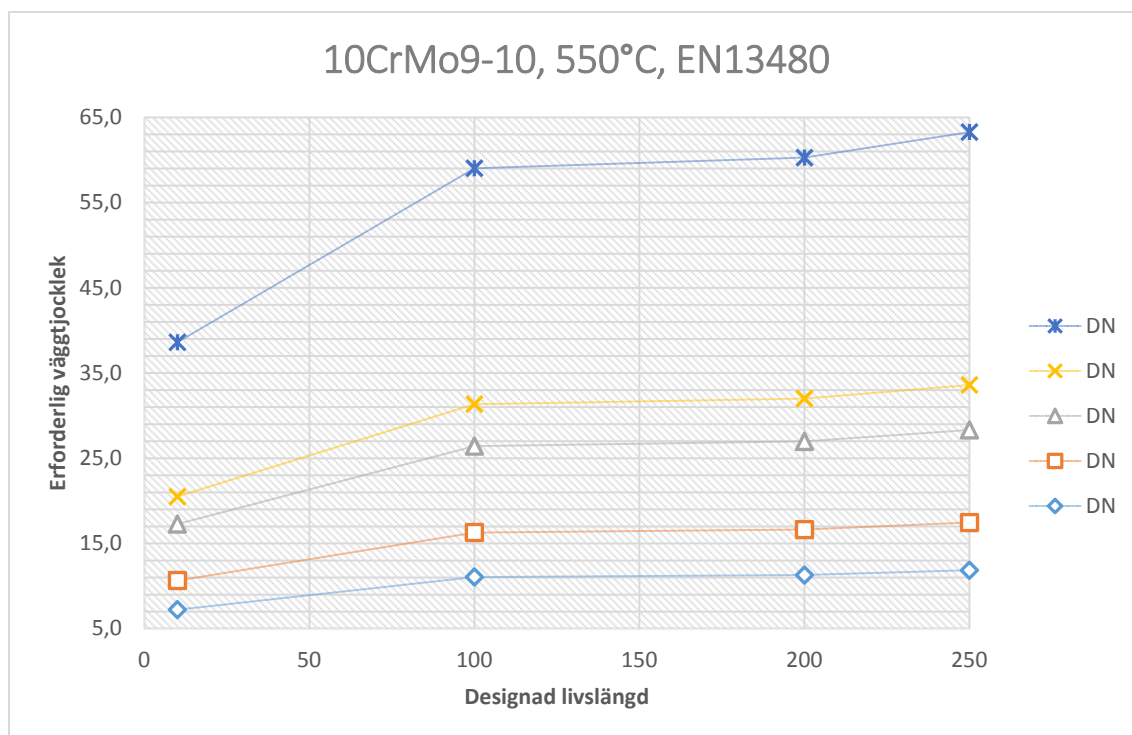
Figur 11: Beräknad vägg tjocklek för materialet X20CrMoV11-1 vid temperaturen 550°C enligt norm EN13480 för flera olika dimensioner avseende ytterdiameter.

Calculated wall thickness of the material X20CrMoV11-1 at the temperature of 550°C according to standard EN13480 for several dimensions concerning outer diameter.



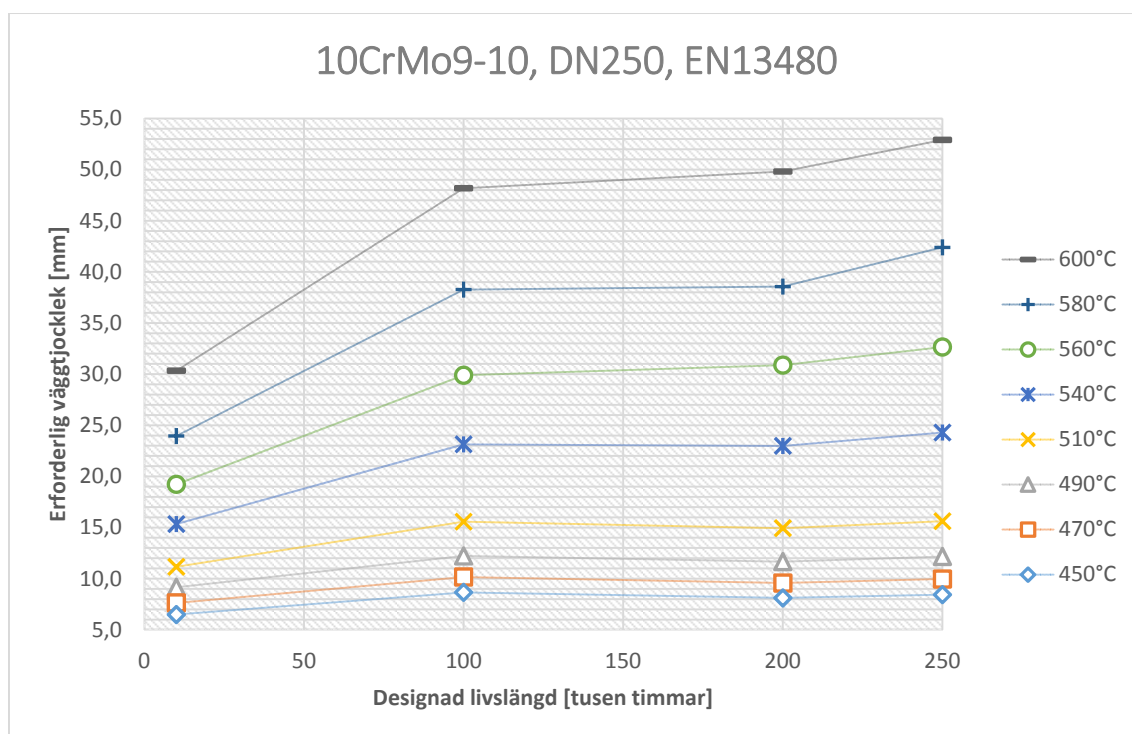
Figur 12: Erforderlig vägg tjocklek enligt EN 13480 för ett DN250 rör av X20CrMoV11-1 beroende på designad livslängd och varierat på temperatur.

The required wall thickness according to EN 13480 for a DN250 pipe of X20CrMoV11-1, depending on the designed service life and varied in temperature.



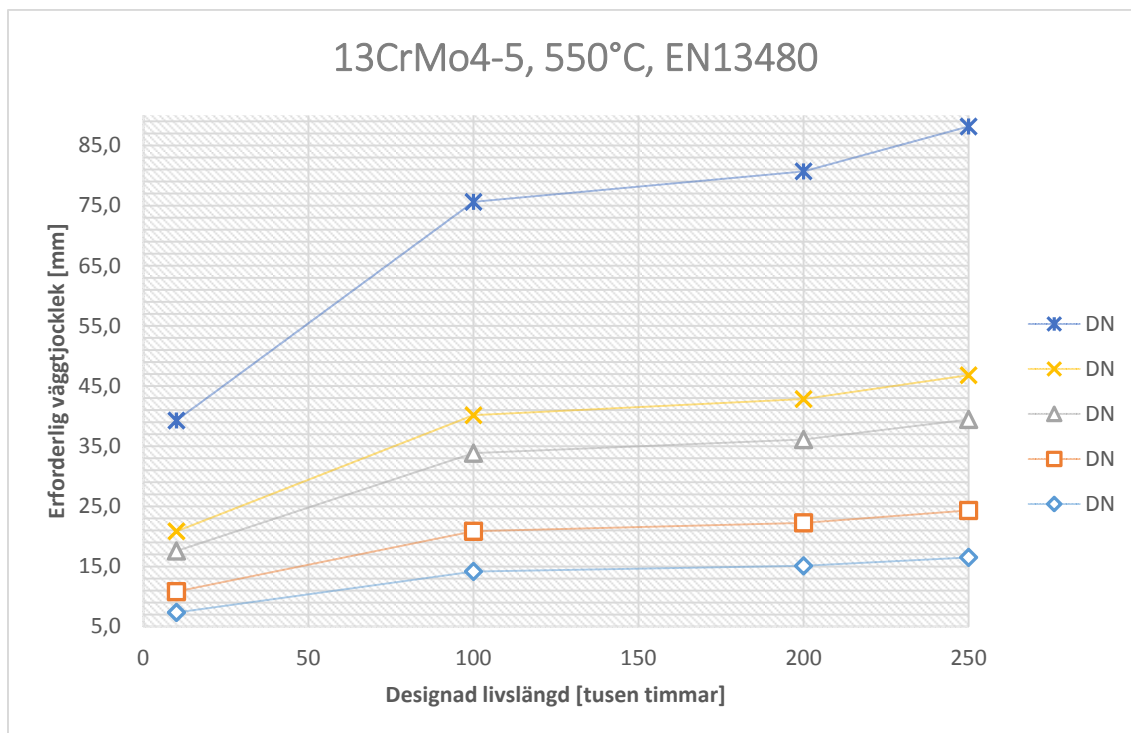
Figur 13 Beräknad väggjocklek för materialet 10CrMo9-10 vid temperaturen 550°C enligt norm EN13480 för flera olika dimensioner avseende ytterdiameter.

Calculated wall thickness of the material 10CrMo9-10 at the temperature of 550°C according to standard EN13480 for several dimensions concerning outer diameter.



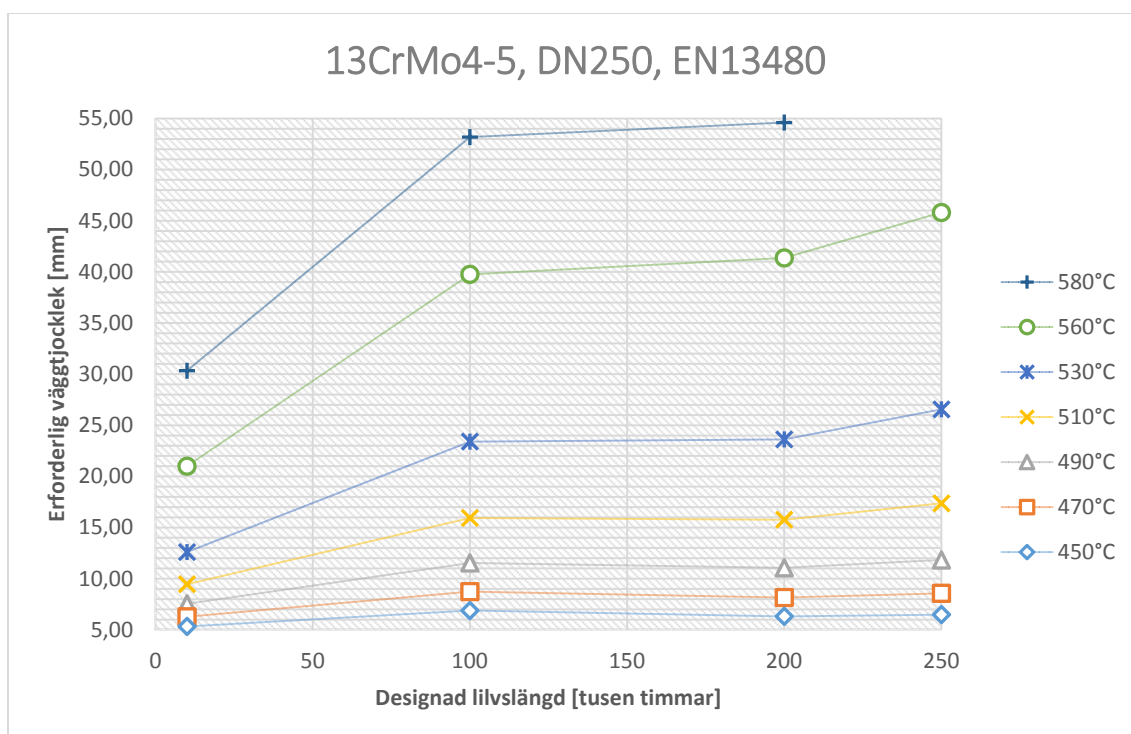
Figur 14: Erforderlig väggjocklek enligt EN 13480 för ett DN250 rör av 10CrMo9-10 beroende på designad livslängd och varierat på temperatur.

The required wall thickness according to EN 13480 for a DN250 pipe of 10CrMo9-10 depending on the designed service life and varied in temperature.



Figur 15: Beräknad väggjocklek för materialet 13CrMo4-5 vid temperaturen 550°C enligt norm EN13480 för flera olika dimensioner avseende ytterdiameter.

Calculated wall thickness of the material 13CrMo4-5 at the temperature of 550°C according to standard EN13480 for several dimensions concerning outer diameter.

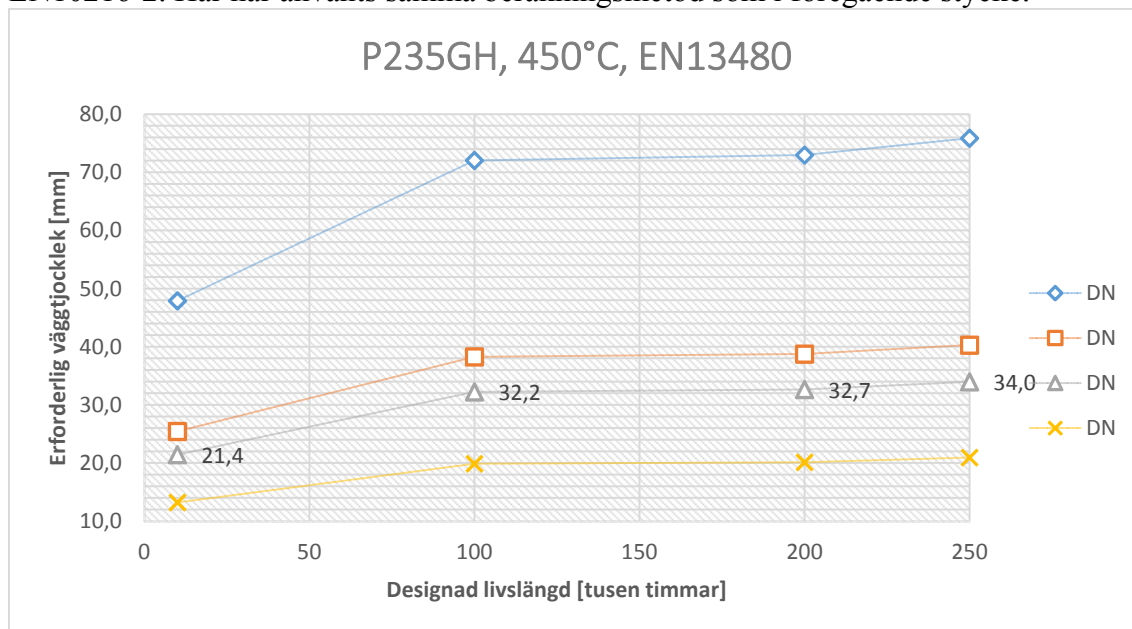


Figur 16: Erforderlig väggjocklek enligt EN 13480 för ett DN250 rör av 13CrMo4-5 beroende på designad livslängd och varierat på temperatur.

The required wall thickness according to EN 13480 for a DN250 pipe of 13CrMo4-5 depending on the designed service life and varied in temperature.

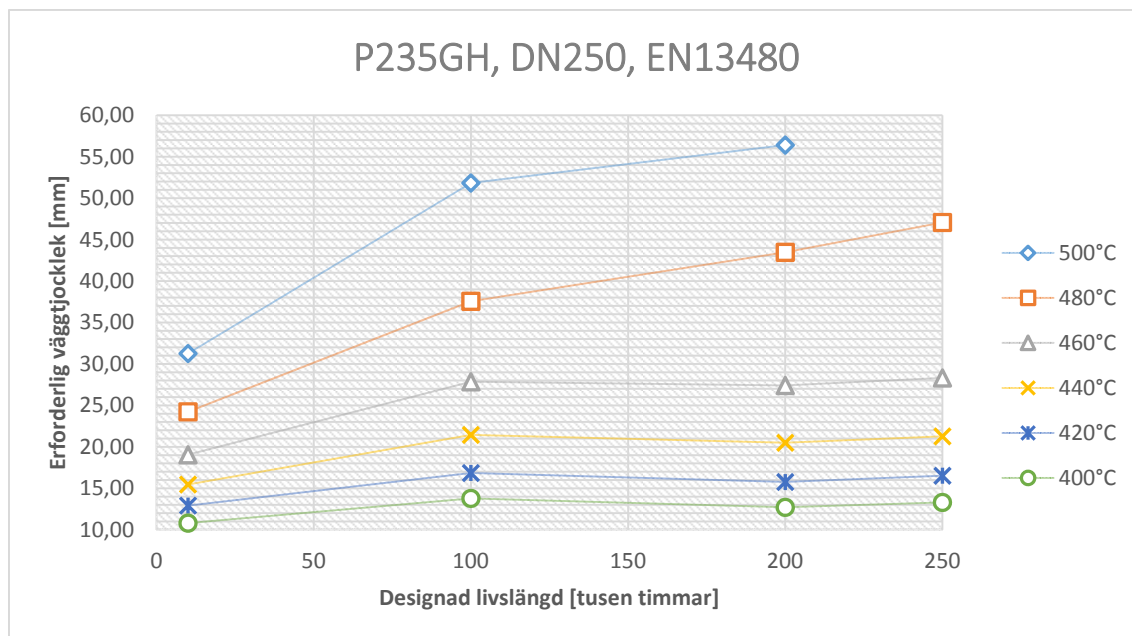
3.1.2 P235GH och 16Mo3

Nedan följer två vanligt förekommande material men med något olika temperaturgränser. P235GH är undersökt vid 450°C och 16Mo3 är undersökt vid 500°C, vilka låg ungefär i mitten på deras respektive angivna hållfasthetsområde enligt EN10216-2. Här har använts samma beräkningsmetod som i föregående stycke.



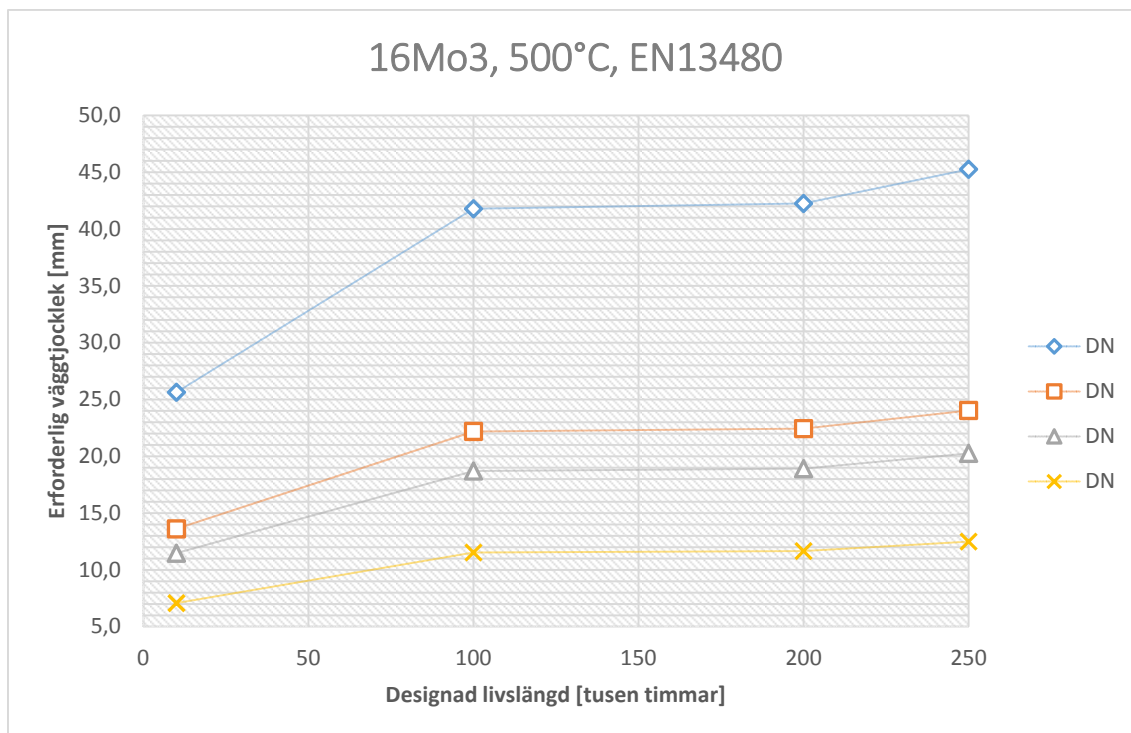
Figur 17: Beräknad vägg tjocklek för materialet P235GH vid temperaturen 450°C enligt norm EN13480 för flera olika dimensioner avseende ytterdiameter.

Calculated wall thickness of the material P235GH at the temperature of 450°C according to standard EN13480 for several dimensions concerning outer diameter.



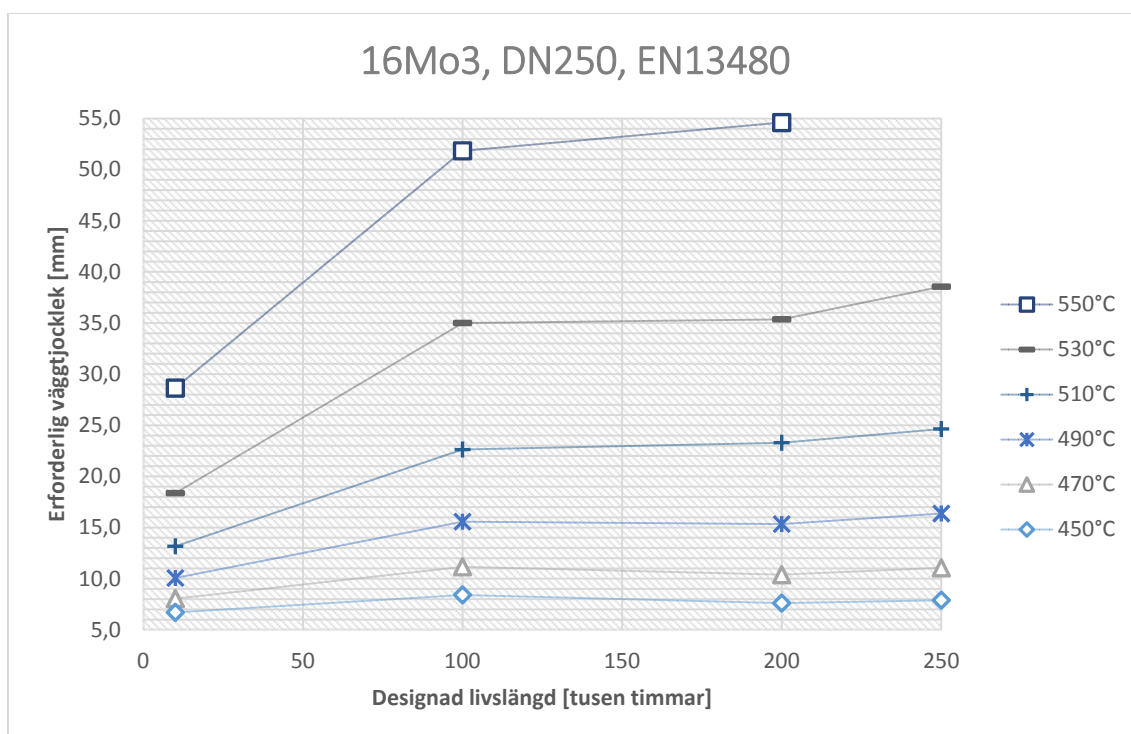
Figur 18: Erforderlig vägg tjocklek enligt EN 13480 för ett DN250 rör av P235GH beroende på designad livslängd och varierat på temperatur.

The required wall thickness according to EN 13480 for a DN250 pipe of P235GH depending on the designed service life and varied in temperature.



Figur 19: Beräknad väggjocklek för materialet 16Mo3 vid temperaturen 500°C enligt norm EN13480 för flera olika dimensioner avseende ytterdiameter.

Calculated wall thickness of the material 16Mo3 at the temperature of 500°C according to standard EN13480 for several dimensions concerning outer diameter.



Figur 20: Erforderlig väggjocklek enligt EN 13480 för ett DN250 rör av 16Mo3 beroende på designad livslängd och varierat på temperatur.

The required wall thickness according to EN 13480 for a DN250 pipe of 16Mo3 depending on the designed service life and varied in temperature.

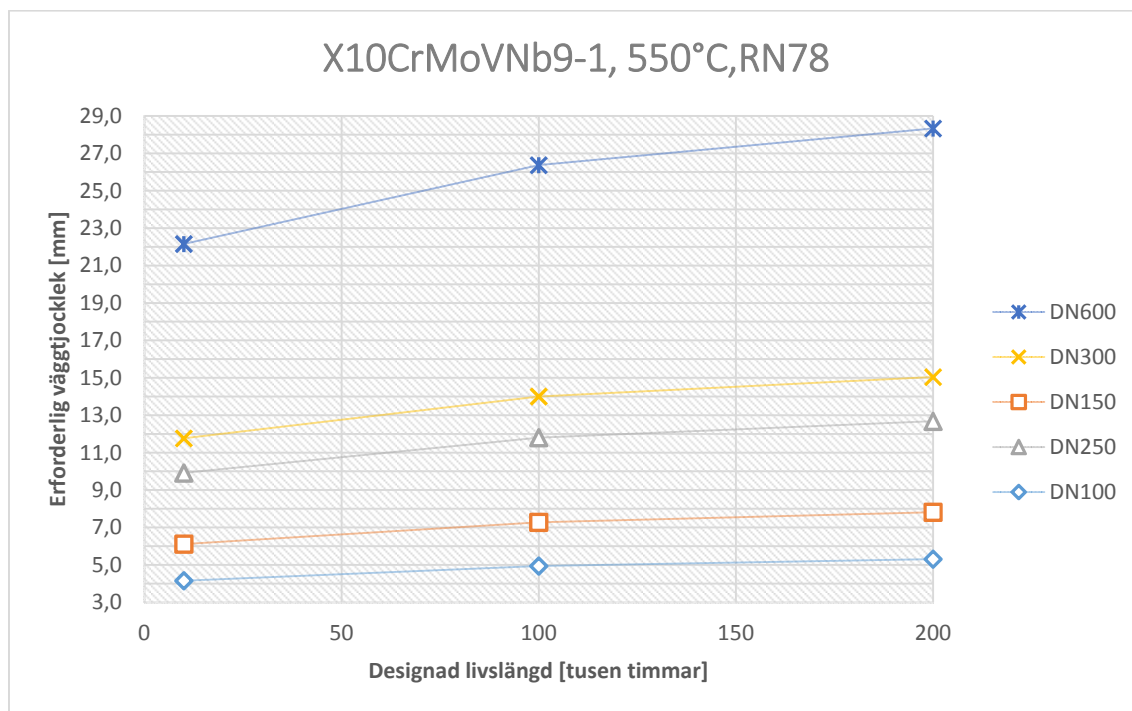
3.2 Studie av vägg tjockleksberäkningar enligt Rörnorm 1978

På samma sätt som EN 13480, studeras här RN78, för att undersöka vad tjockleksberäkningar, enligt normen, resulterar i. I figurena har följande uttryck använts:

$$S_{min} = \frac{D_y \cdot p \cdot m}{20 \cdot \sigma_{tn} \cdot z + p} \quad (34)$$

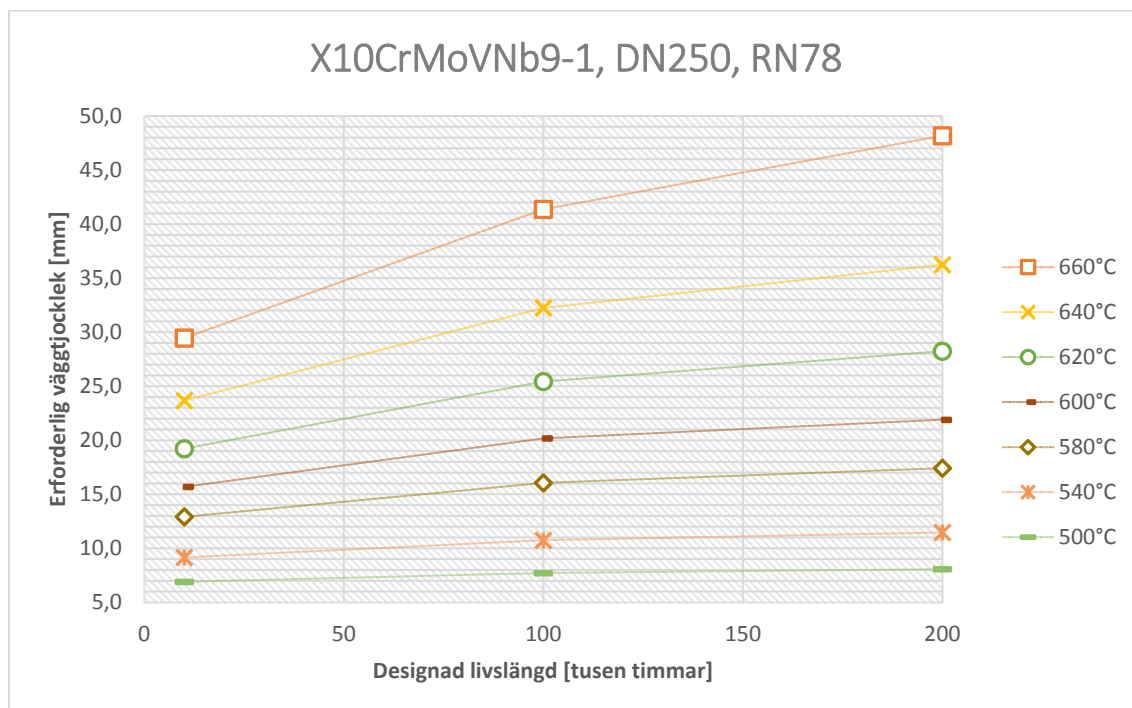
Där S_{min} är den beräknade minsta tjockleken, D_y är ytterdiameter på röret i mm, p är inre övertryck i bar, m är en koefficient som tar hänsyn till kvoten mellan inner- och ytterdiameter, men som vid beräkning mot krypbrottsträckgräns ska vara 1, σ_{tn} är tillåten spänning vid beräkningstemperatur, z är svetsfaktorn som är 1 vid sömlösa rör. Här har antagits att materialdata som återfinns i EN10216-2 för krypbrottspänning är applicerbar i en norm från ett äldre datum. Därför görs uppdelningen av material enligt medelkrypbrottspänningsintervallet på samma sätt här som i föregående stycke.

3.2.1 X10CrMoVNb9-1, X20CrMoV11-1, 10CrMo9-10 och 13CrMo4-5



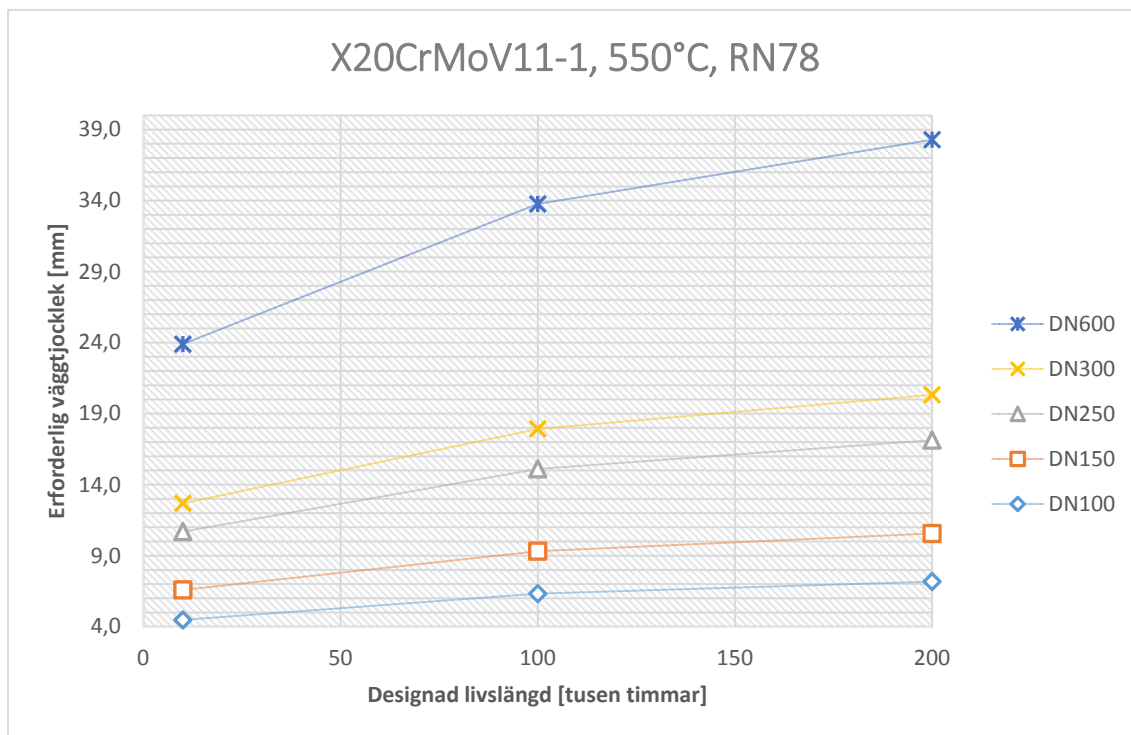
Figur 21 Beräknad vägg tjocklek för materialet X10CrMoVNb9-1 vid temperaturen 550°C enligt norm RN78 för flera olika dimensioner avseende ytterdiameter.

Calculated wall thickness of the material X10CrMoVNb9-1 at the temperature of 550°C according to standard RN78 for several dimensions concerning outer diameter.



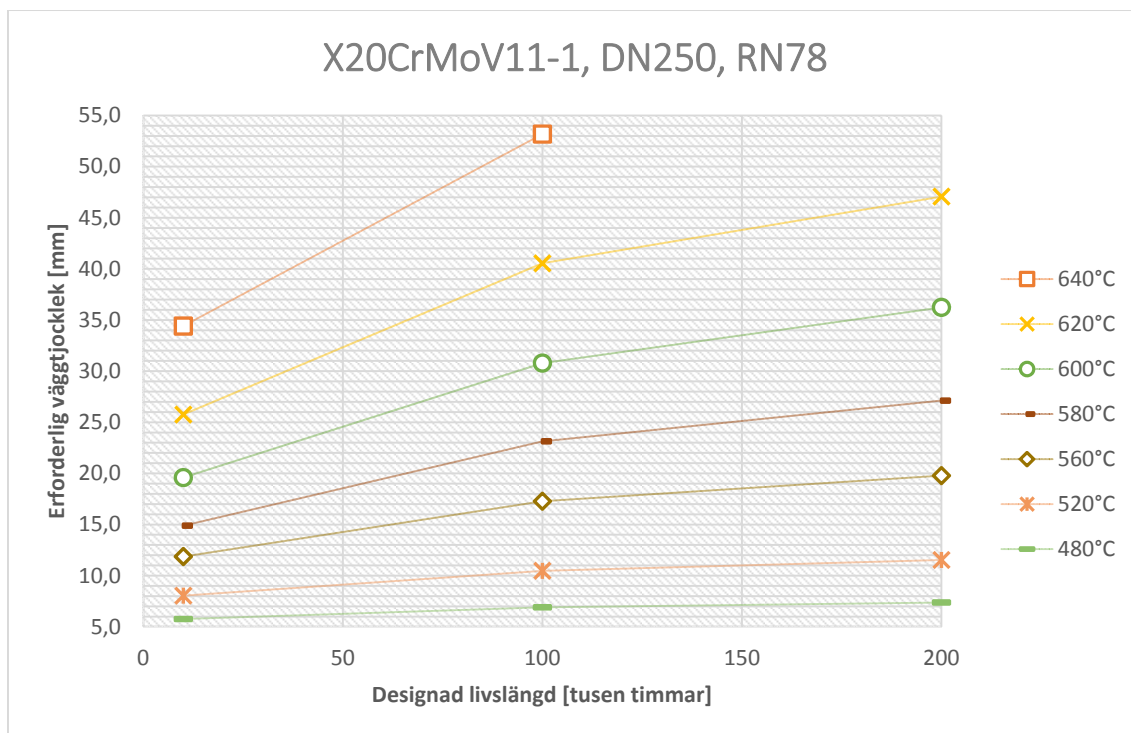
Figur 22: Erforderlig vägg tjocklek enligt RN78 för ett DN250 rör av X10CrMoVNb9-1 beroende på designad livslängd och varierat på temperatur.

The required wall thickness according to RN78 for a DN250 pipe of X10CrMoVNb9-1, depending on the designed service life and varied in temperature.



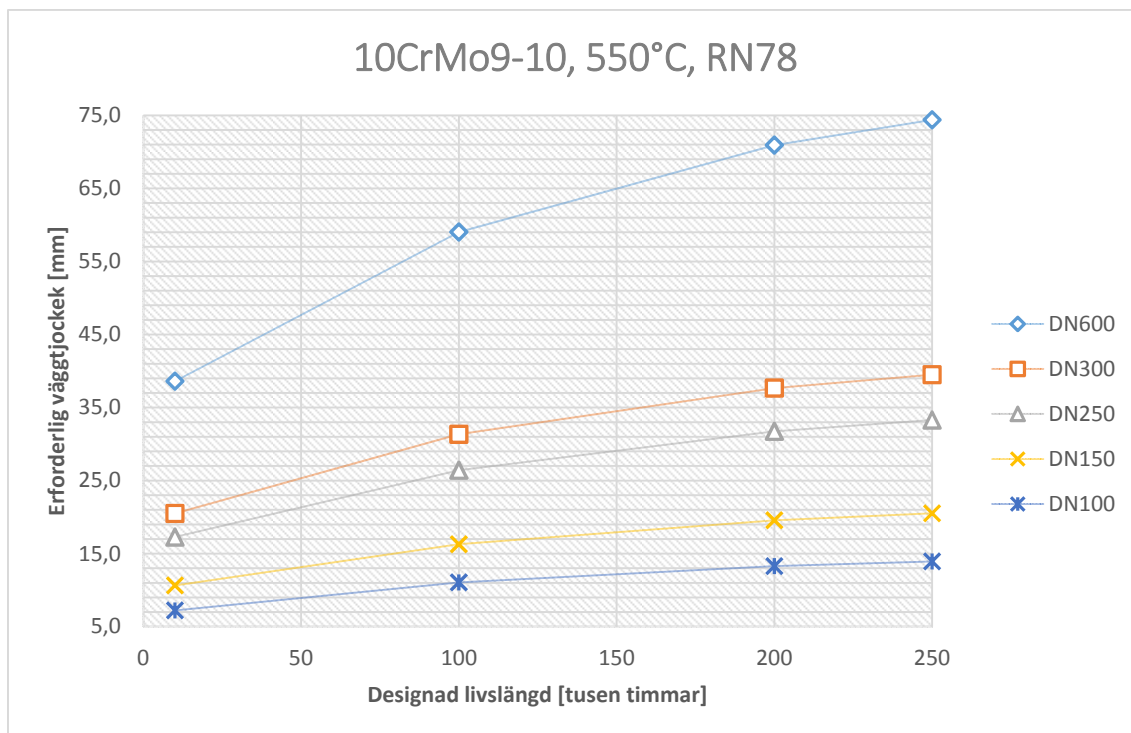
Figur 23: Beräknad väggjocklek för materialet X20CrMoV11-1 vid temperaturen 550°C enligt norm RN78 för flera olika dimensioner avseende ytterdiameter.

Calculated wall thickness of the material X20CrMoV11-1 at the temperature of 550°C according to standard RN78 for several dimensions concerning outer diameter.



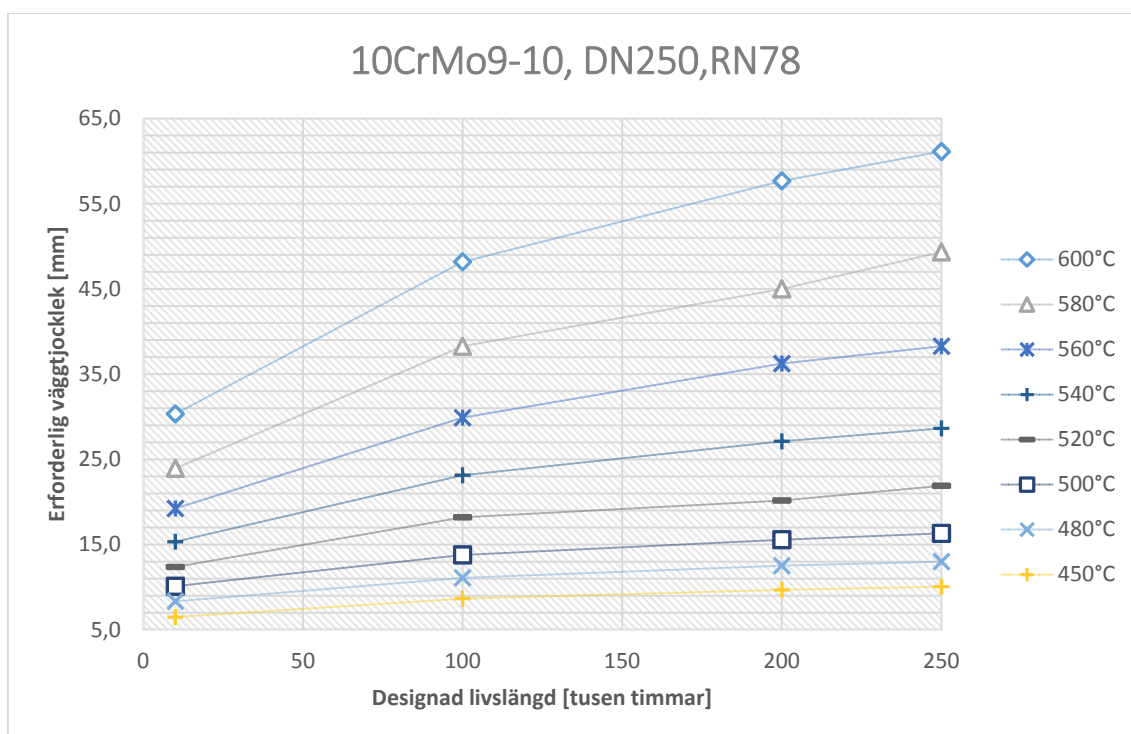
Figur 24: Erforderlig väggjocklek enligt RN78 för ett DN250 rör av X20CrMoV11-1 beroende på designad livslängd och varierat på temperatur.

The required wall thickness according to RN78 for a DN250 pipe of X20CrMoV11-1, depending on the designed service life and varied in temperature.



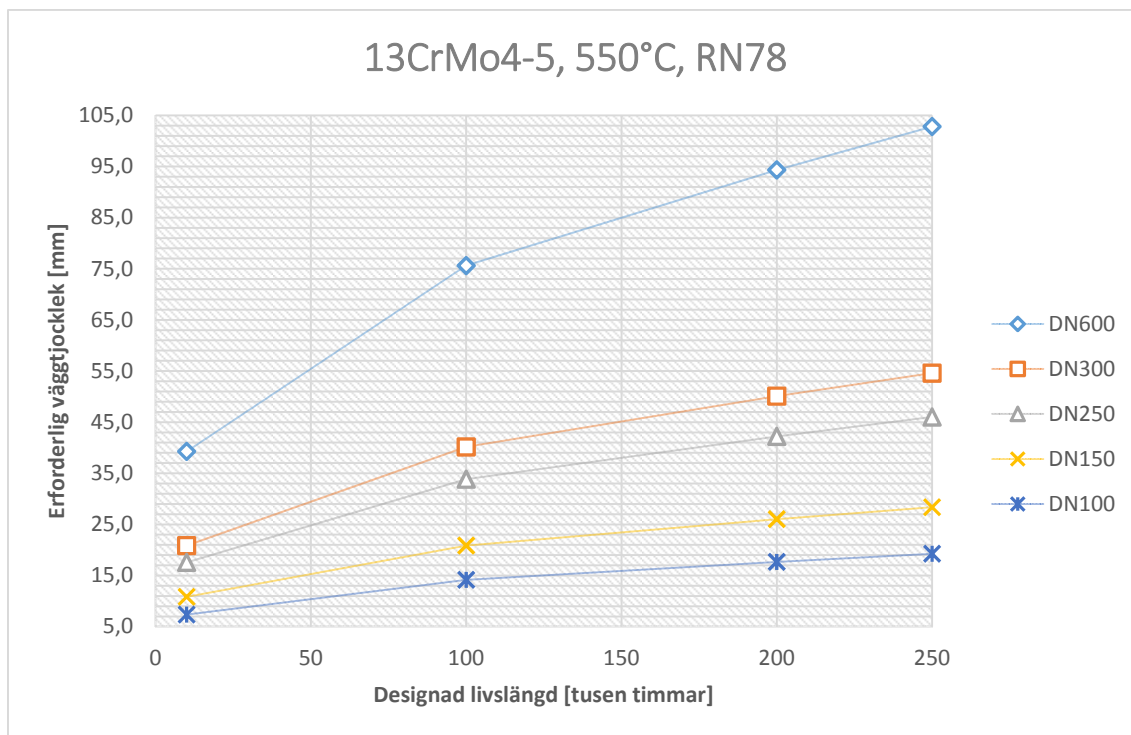
Figur 25: Beräknad väggjocklek för materialet 10CrMo9-10 vid temperaturen 550°C enligt norm RN78 för flera olika dimensioner avseende ytterdiameter.

Calculated wall thickness of the material 10CrMo9-10 at the temperature of 550°C according to standard RN78 for several dimensions concerning outer diameter.



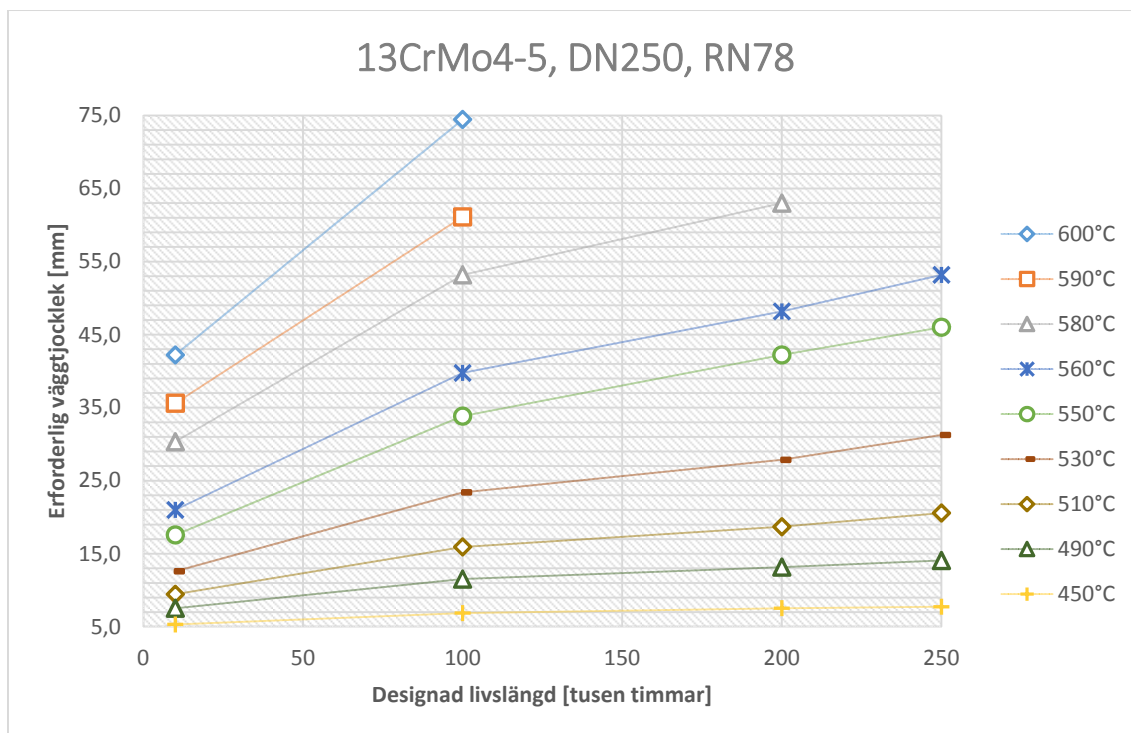
Figur 26: Erforderlig väggjocklek enligt RN78 för ett DN250 rör av 10CrMo9-10 beroende på designad livslängd och varierat på temperatur.

The required wall thickness according to RN78 for a DN250 pipe of 10CrMo9-10, depending on the designed service life and varied in temperature.



Figur 27: Beräknad väggjocklek för materialet 13CrMo4-5 vid temperaturen 550°C enligt norm RN78 för flera olika dimensioner avseende ytterdiameter.

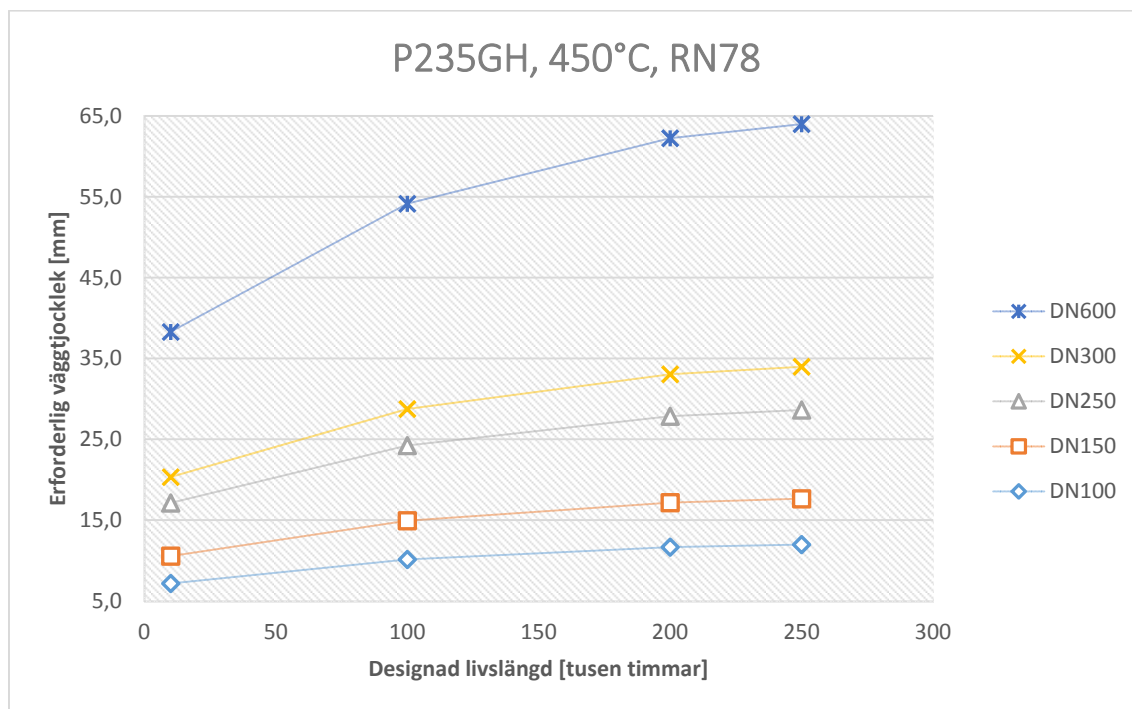
Calculated wall thickness of the material 13CrMo4-5 at the temperature of 550°C according to standard RN78 for several dimensions concerning outer diameter.



Figur 28: Erforderlig väggjocklek enligt RN78 för ett DN250 rör av 13CrMo4-5 beroende på designad livslängd och varierat på temperatur.

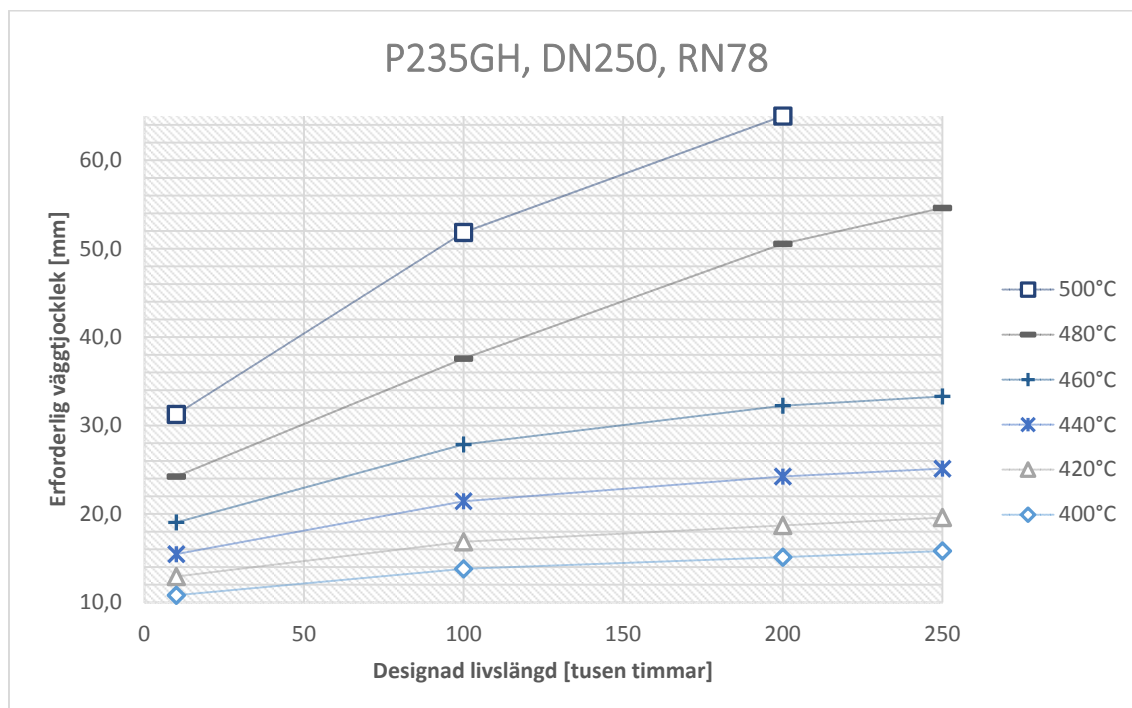
The required wall thickness according to RN78 for a DN250 pipe of 13CrMo4-5, depending on the designed service life and varied in temperature.

3.2.2 P235GH och 16Mo3



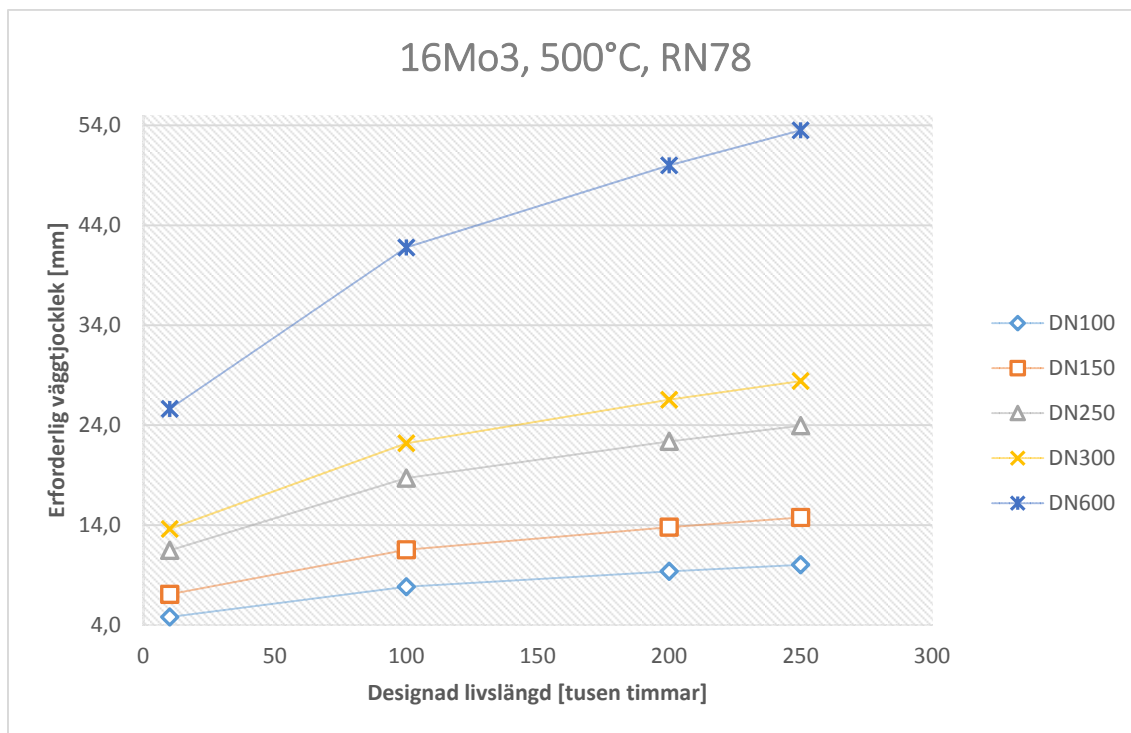
Figur 29: Beräknad vägg tjocklek för materialet P235GH vid temperaturen 450°C enligt norm RN78 för flera olika dimensioner avseende ytterdiameter.

Calculated wall thickness of the material P235GH at the temperature of 450°C according to standard RN78 for several dimensions concerning outer diameter.



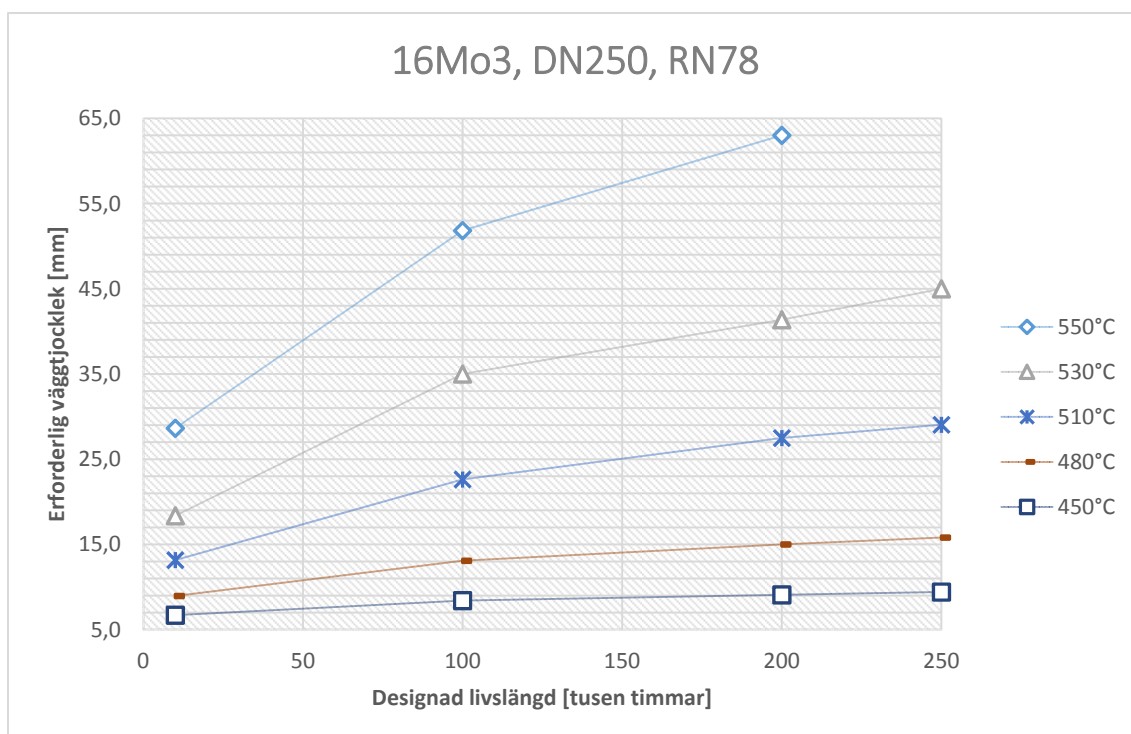
Figur 30: Erforderlig vägg tjocklek enligt RN78 för ett DN250 rör av P235GH beroende på designad livslängd och varierat på temperatur.

The required wall thickness according to RN78 for a DN250 pipe of P235GH, depending on the designed service life and varied in temperature.



Figur 31: Beräknad väggjocklek för materialet 16Mo3 vid temperaturen 500°C enligt norm RN78 för flera olika dimensioner avseende ytterdiameter.

Calculated wall thickness of the material 16Mo3 at the temperature of 500°C according to standard RN78 for several dimensions concerning outer diameter.



Figur 32: Erforderlig väggjocklek enligt RN78 för ett DN250 rör av 16Mo3 beroende på designad livslängd och varierat på temperatur.

The required wall thickness according to RN78 for a DN250 pipe of 16Mo3, depending on the designed service life and varied in temperature.

3.3 Studie av kryptöjningen

För att se hur designen av rör med avseende på vägg tjocklek enligt EN13480 påverkar kryptöjningen, studeras materialet 13CrMo4-5 i följande exempel.

3.3.1 13CrMo4-5 (SS 2216)

Ett DN250-rör av materialet 13CrMo4-5 som det ska gå ånga i designas för trycket 100 bar(ö), samt temperaturen 500°C. Enligt 2.3.1 görs beräkningar för livslängd 100 000 h respektive 200 000 h enligt följande:

$$e_{100} = \frac{p_c D_o}{2 \cdot f_z + p_c} = \frac{10 \cdot 273}{2 \cdot \frac{145}{1.5} + 10} \approx 13.43 \text{ mm}$$

$$e_{200} = \frac{p_c D_o}{2 \cdot f_z + p_c} = \frac{10 \cdot 273}{2 \cdot \frac{123}{1.25} + 10} \approx 13.20 \text{ mm}$$

Från flera [6][7] källor hämtas uttrycket

$$\dot{\epsilon}_{cr} = 10^{-7} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{c7}} \right)^n \quad (35)$$

som beskriver kryptöjningshastigheten i enheten h^{-1} , dvs. 1 % på 100 000 timmar. Värderna på σ_{c7} samt n hämtas från tabell i [7] och σ är den uppkomna spänningen i materialet.

För beräkning av spänning i rör som är utsatta för inre övertryck kan man använda Lames formler för tjockväggiga rör enligt (13).

Alltså blir spänningen i detta fall

$$\sigma_{100} = \frac{10 \cdot 273}{4 \cdot 13.43} = 50.8 \text{ MPa}$$

respektive

$$\sigma_{200} = \frac{10 \cdot 273}{4 \cdot 13.20} = 51.7 \text{ MPa}$$

det ger att kryptöjningshastigheten blir

$$\dot{\epsilon}_{cr100} = 10^{-7} \left(\frac{50.8}{83} \right)^{5.4} \approx 7.08 \cdot 10^{-9} = 0.000708 \Rightarrow 0.071\% \text{ på } 100\,000 \text{ timmar}$$

Hur lång tid tar det för ett rör som är designat för 200 000 timmar enligt EN13480 att krypa samma sträcka?

$$\dot{\epsilon}_{cr100} \cdot 100\,000 \text{ timmar} = \dot{\epsilon}_{cr200} \cdot \text{tid}$$

$$\frac{\dot{\epsilon}_{cr100}}{\dot{\epsilon}_{cr200}} \cdot 100\,000 \text{ timmar} = \text{tid}$$

$$\text{tid} = 10^5 \frac{10^{-7} \left(\frac{50.8}{83} \right)^{5.4}}{10^{-7} \left(\frac{51.7}{83} \right)^{5.4}} \approx 91300 \text{ timmar}$$

Alltså, ett rör som är designat för 100 000 timmar kryper ca 0,071 % på 100 000. Ett rör som är designat för 200 000 timmar behöver bara 91 300 timmar på sig för att krypa samma sträcka.

Detta visar att det i Nortons lag finns bekräftelse för att normen EN13480 är felaktigt utformad.

3.4 Undersökning av kostnadsdifferens mellan att designa för 100 000 eller 200 000 timmar

Låt oss anta att vi vill designa en anläggning som ska ha ånga vid 560°C till ett tryck av 160 bar. Vi använder oss av X10CrMoVNb9-1 och för enkelhetens skull väljer vi att använda PipeCalc och standarddimensioner på ett DN250-rör. Vid en designad livslängd på 100 000 timmar ger en tjocklek på 25 mm en utnyttjandegrad på 97,39 %. Om den designade livslängden väljs till 200 000 timmar klarar 22,2 mm en utnyttjandegrad på 99,54 %. Dessa rörtjocklekar är standardtjocklekar för DN250.

En ungefärlig prisuppgift (avser färdig anläggning och ska endast användas för jämförelse) på X10-materialet är 100 000 SEK/meter för det första röret med en tjocklek på 25 mm [12]. Det ger ett kg-pris på ca 6500 kr/kg. Det andra röret kommer då att kosta ca 78 000 SEK/meter.

En anläggning där detta rör leder huvudånga mellan panna och turbin kommer ungefär att kräva 50 meter av detta rör. Det blir 5 miljoner SEK för det första röret och knappt 4 miljoner för det andra röret. Man gör alltså en besparing på 21 % av kostnaden om man designar för 200 000 timmar jämfört med om man designar för 100 000 timmar.

3.5 Undersökning av livslängd och utnyttjandegrad

För att göra en analys av livslängden hos material används här erfarenheter dragna från Heleneholmsverket, HVK, i Malmö samt Västhamnsverket, VHV, i Helsingborg. I Tabell 2 samlas data från dessa erfarenheter. Alla rören har bytts därför att det uppstått skador i svetsskarvarna, alltså inte i basmaterialet.

Tabell 2: Data från Heleneholmsverket och Västhamnsverket. Dimensioner, material, vägg tjocklek, utnyttjandegrad, designdata och drifttid tills röret byttes.

Data from Heleneholmsverket and Västhamnsverket. Size, material, utilization ratio and operating conditions until the pipe was replaced.

	Plats	Dimension	Material	Tjocklek	Utnyttjandegrad	Designdata	Drifttid (tusen timmar)*
1	HVK	DN250	10CrMo9-10	28 mm	1,015	TS: 530°C PS: 129 bar	230
2	HVK	DN250	10CrMo9-10	28 mm	1,015		180
3	HVK	DN250	14MoV6-3	23 mm	1,078		150
4	HVK	DN250	14MoV6-3	23 mm	1,078		170
5	HVK	DN400	14MoV6-3	36 mm	1,001		220
6	HVK	DN400	14MoV6-3	36 mm	1,001		100
7	HVK	DN250	10CrMo9-10	28 mm	1,015		150
8	VHV	Ø298,5 mm	10CrMo9-10	32 mm	1,097	TS: 540°C PS: 120 bar	120

* till beslut om byte av rörledning

*until decision of replacement of the pipe

Utnyttjandegraden har beräknats som uppkommen spänning genom tillåten spänning enligt ekvation

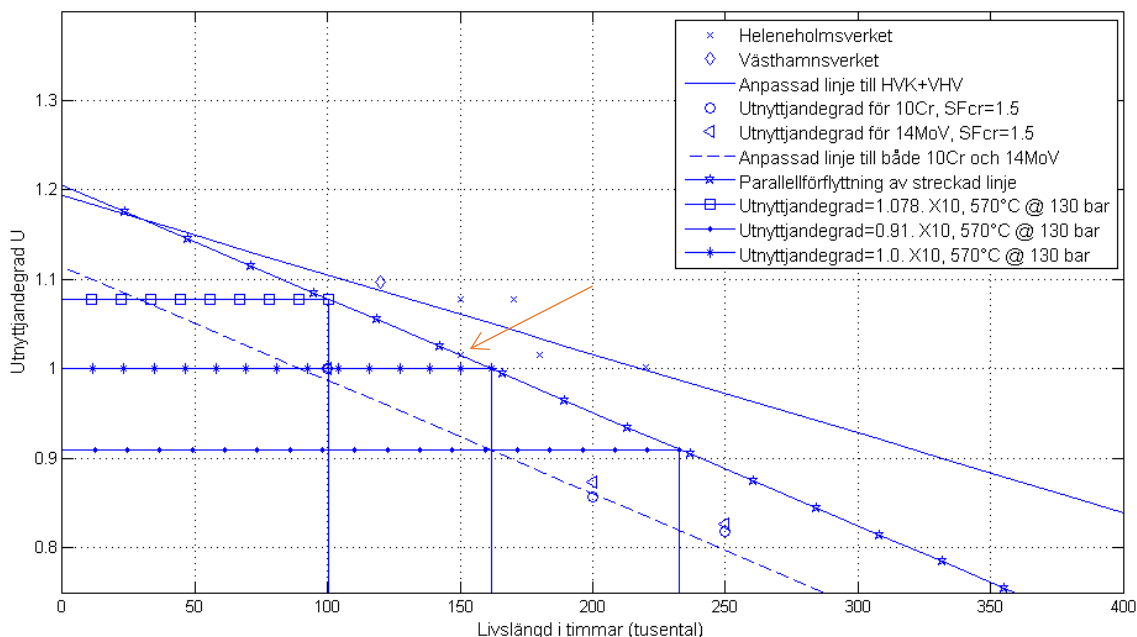
$$U = \frac{\sigma}{\sigma_{tillåten}} = \left(\frac{SF_{cr}}{2} \right) \left(\frac{p_c \cdot d_o}{\frac{e_r}{c_1} - c_0} - p_c \right) / S_{RTt} \quad (36)$$

där SF_{cr} är krypsäkerhetsfaktorn, p_c är inre tryck, d_o är ytterdiameter, e_r är erforderlig vägg tjocklek med korrosionstillägg och tolerans, c_1 är toleranstillägg i procent, c_0 är korrosionstillägg och S_{RTt} är max tillåten krypspänning vid beräknad livslängd. I Figur 33 har det lägsta värdet på drifttider tagits bort, av drifttiderna i Tabell 2.

I Figur 33 finns, förutom punkterna från HVK och VHV, även värden på utnyttjandegraden U för 14MoV6-3 och 10CrMo9-10. Här har U beräknats enligt ekvation

$$U = \frac{e_{100@SF_{cr}=1.5}}{e_{200@SF_{cr}=1.5}} \text{ samt } U = \frac{e_{100@SF_{cr}=1.5}}{e_{250@SF_{cr}=1.5}} \quad (37)$$

För dessa punkter har ett medelvärde tagits, mellan $U_{10CrMo9-10}$ och $U_{14MoV6-3}$. Sedan har en linjärapproximering gjorts för dessa värden. Denna medellinje har parallellförflyttats så att den skär den punkt bland värdena från HVK och VHV som ger en så konservativ linje som möjligt, vilket är vid pilen i Figur 33.



Figur 33: Utnyttjandegrad och drifttid för sju rördelar från HVK och VHV. Dessutom plottas utnyttjandegrad för dessa 2 material (10CrMo9-10 samt 14MoV6-3) med säkerhetsfaktorn $SF_{cr}=1.5$. En linje anpassas till medelvärdet av dessa utnyttjandegrader. Linjen parallellförflyttas upp till närmaste empiriska värde. Vägg tjockleken för X10CrMoVNb9-1 beräknas för 200 000 timmar med $SF_{cr}=1.25$ respektive 1.5. Genom att jämföra med vägg tjockleken för 100 000 timmar fås en utnyttjandegrad. Dessa ger i sin tur en vink om vilken livslängd som går att förvänta om vägg tjockleken dimensioneras för 200 000 timmar enligt norm eller med $SF_{cr}=1.5$.

Utilization ratio and operating time for seven pipes from HVK and VHV. Additionally, utilization rate for these two materials (10CrMo9-10 and 14MoV6-3) is plotted with safety factor $SF_{cr} = 1.5$. A line is adjusted to the mean of these utilization rates. The line parallel moved up to the closest empirical value. The wall thickness for X10CrMoVNb9-1 is calculated for 200 000 hours with $SF_{cr} = 1.25$ and 1.5. By comparing with the wall thickness of 100 000 hours, a utilization rate is obtained. These gives a hint of the lifetime expectancy if the wall thickness is dimensioned for 200 000 hours according to EN13480 or with $SF_{cr} = 1.5$.

Den konstruerade linjen i Figur 33 kan ge en fingervisning om den förväntade livslängden för en anläggning/rör designade med en viss utnyttjandegrad.

I Figur 33 har tre utnyttjandegrader för rör i materialet X10CrMoVNb9-1 markerats. Detta material tillhör förvisso en annan materialkategori än 10CrMo9-10 och 14MoV3, men i väntan på liknande materialdata från anläggningar där X10CrMoVNb9-1 har använts, är en jämförelse med de nämnda materialen det bästa som finns att tillgå. En där röret är designat för 100 000 timmar med krypsäkerhetsfaktorn 1.5 enligt norm. Detta ger en utnyttjandegrad på 1 vilket markeras av linjen med asterisker. Denna design har enligt Figur 33 en förväntad livslängd på ca 160 000 timmar.

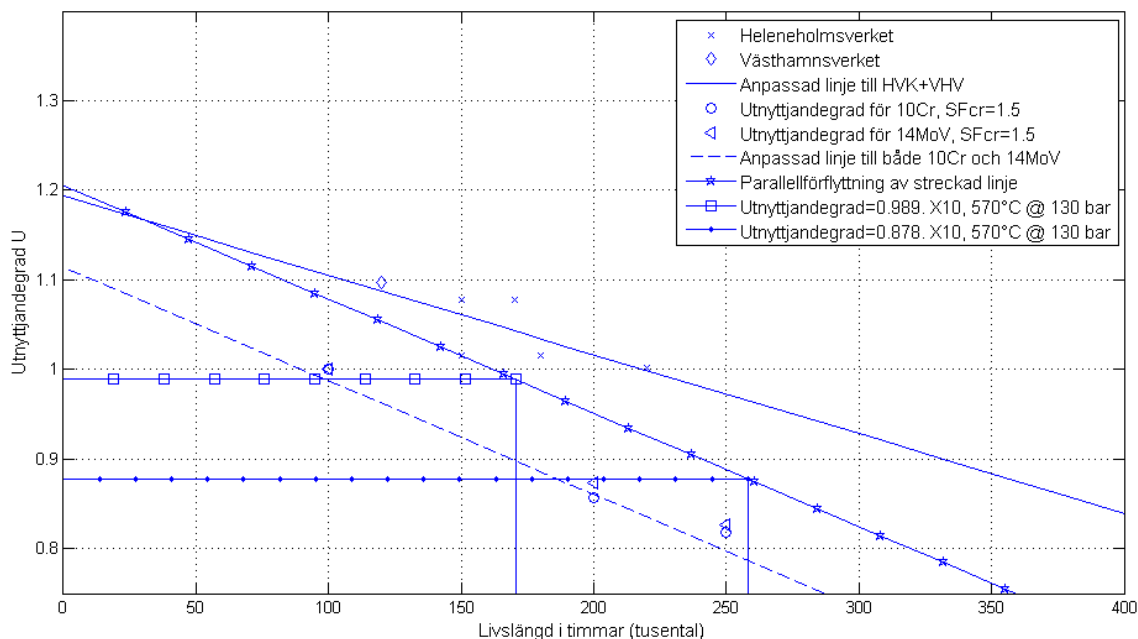
Dessutom finns markerat en design av X10CrMoVNb9-1 för 200 000 timmar med säkerhetsfaktorn 1.25 enligt norm. Utnyttjandegraden vid en jämförelse av tjockleken på röret med tjockleken vid designen för 100 000 timmar med säkerhetsfaktorn 1.5 blir 1,078, vilket markeras av strecket med kvadrater. Denna design har en förväntad livslängd på 100 000 timmar enligt Figur 33.

Till slut görs en design för 200 000 timmar med säkerhetsfaktorn 1.5. Vid en jämförelse med tjockleken för röret som designades för 100 000 timmar blir utnyttjandegraden 0.91 vilket ger en förväntad livslängd på 230 000 timmar.

Om ett rör i X10CrMoVNb9-1 ska designas i DN250 för trycket 130 bar och temperaturen 570°C, blir tjockleken om krypsäkerhetsfaktorn $SF_{cr}=1.25$ används - med korrosionstillägg på 1 mm och en tolerans på 12.5 % - 20.01 mm.

Standardtjocklekarna är 20 eller 22.2 mm. Om röret istället designas med $SF_{cr}=1.5$, allt annat lika, blir minsta erforderliga tjocklek 23.5 mm. Nästa standardstorlek är 25 mm. Alltså kan prisexemplet från 3.4 användas. Om 22.2 mm används i det första fallet blir $U=0,989$, och om 25 mm används i det senare fallet blir $U=0,878$.

I Figur 34 är markerat utnyttjandegraderna i exemplet, där kan även den förväntade livslängden avläsas. Förväntad livslängd på 170 000 timmar vid $SF_{cr}=1.25$ till en kostnad av 4 miljoner jämfört med förväntad livslängd på 258 000 timmar vid $SF_{cr}=1.5$ till en kostnad av 5 miljoner. Den förväntade livslängden ökar med 51 % vid en kostnadsökning på 25 %.



Figur 34: Design för 200 000 timmar med $SFcr=1.25$ ($U=0.989$) respektive $SFcr=1.5$ ($U=0.878$) för $X10CrMoVNb9-1$.

Design for 200 000 hours with $SFcr = 1.25$ ($U = 0.989$) and $SFcr = 1.5$ ($U = 0.878$) for $X10CrMoVNb9-1$.

3.6 Sannolikhet för viss skada

I rapporten “*Evaluation of Creep Damage from Replica Inspection Results*” [9], redovisas resultat från replikaundersökningar av rördelar från anläggningar som ingick i Nordtest project Nr 1306-96. I ett stycke i rapporten har testdata plottats i diagram där x-axeln representerar tid/skadeklass och y-axeln representerar sannolikhet för en viss typ av skada som har kunnat påvisas med replikaprovning. I diagrammen har ekvation (38) använts där

$$P(t_D) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t_D}{\sigma}\right)^\beta\right) \quad (38)$$

t_D är tid till specifik skada, σ och β är passningsparametrar. Genom att använda logaritmisk skala erhöles ett diagram enligt Figur 35. På y-axeln har följande uttryck plottats

$$\ln\ln(1/(1 - P(t_D))) \quad (39)$$

vilket gör att 0 på y-axeln ger värdet

$$P(t_D) = 1 - \frac{1}{e^{e^0}} = 1 - \frac{1}{e} \approx 1 - 0.368 = 63.2 \%$$

Här används en faktor för varje typisk skadeklass enligt Tabell 3, där även betydelsen av vad de olika skadeklasserna innebär är angiven.

Tabell 3: Skadeklasser vid replikaprovning, deras innebörd och multiplikationsfaktor enligt [9].

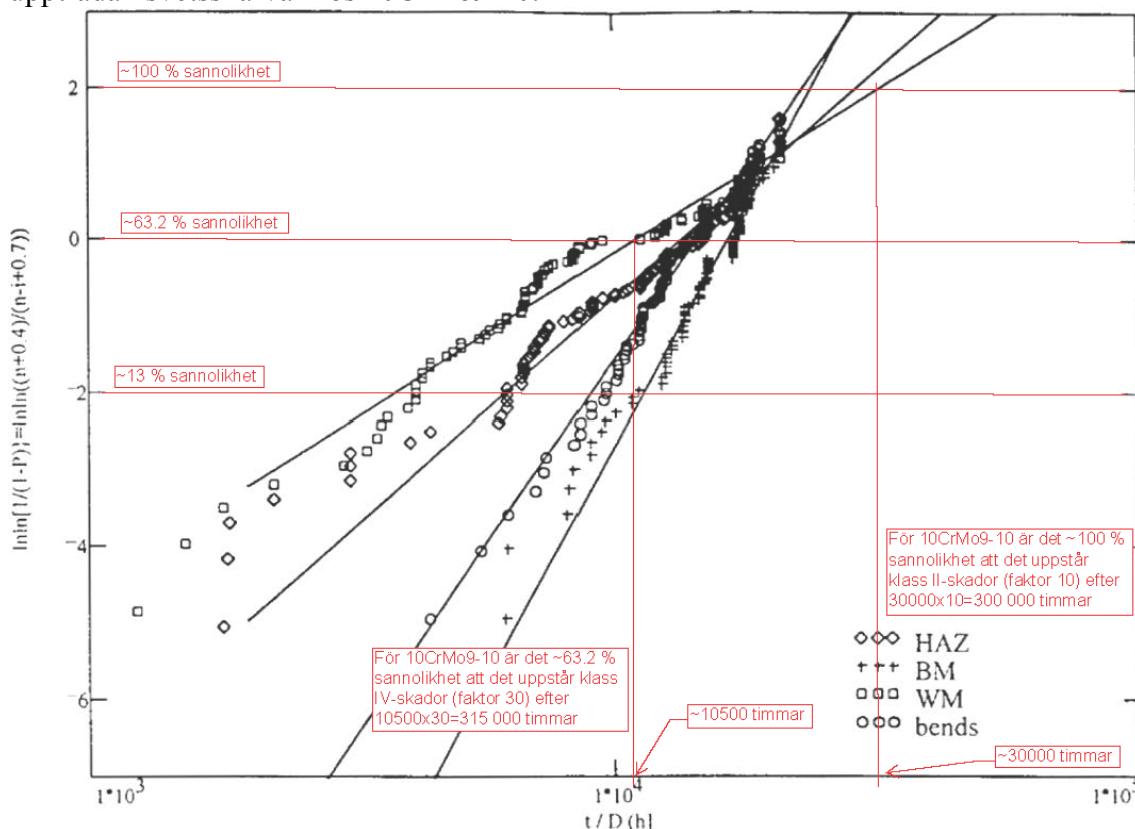
Damage Classes at replica testing, their meaning and multiplication factors according to [9]

Skadeklass	Faktor	Betydelse
I	0	Inga kaviteter
II	10	Isolerade kaviteter
III	20	Orienterade kaviteter
IV	30	Mikroskopiska sprickor
V	40	Makroskopiska sprickor

Antag att vi vill veta hur lång tid det tar för att klass II-skador (isolerade kaviteter) ska uppträda i svetsskarvar i materialet 10CrMo9-10. I Figur 35 vid 2 på y-axeln är det ca 100 % sannolikhet för en viss typ av skada. En rät horisontell linje dras från 2 på y-axeln till den skär linjen som markerar svetsskarvar (WM), som markeras av kvadrater. Vid denna skärningspunkt dras en lodrät linje som skär x-axeln varvid denna avläses till ca 30 000 timmar. Vi är intresserade av klass II-skador. Då ska en faktor 10 användas enligt Tabell 3. Det ger

$$30000 \cdot 10 = 300\,000 \text{ timmar}$$

Efter 300 000 timmar är det nästan 100 % sannolikhet för att klass-II skador ska uppträda i svetsskarvar hos 10CrMo9-10.



Figur 35: Sannolikhet för typisk skada i olika delar av rörledning i materialet 10CrMo9-10. X-axeln anger antal timmar till skada (logaritmisk skala).

Probability of typical damage in various parts of the pipeline in the material 10CrMo9-10. The x-axis indicates the number of hours until typical damage (logarithmic scale).

4 Resultatanalys

Utifrån vad som visats i rapporten torde det vara helt klart att krypsäkerhetsfaktorn i EN13480 är felbalanserad. Undersökningarna av RN78 visar att den erforderliga väggjockeken ska öka kontinuerligt med designad livslängd. Om SF_{cr} ska minskas för 100 000 timmar eller ökas för 200 000 timmar är en annan fråga, vilken kanske kommer att besvaras av den pågående undersökningen i CEN.

Avseende bestämningen av kryptöjningen och uppskattningen av förväntad livslängd, hade det varit bra med fler värden att använda. För kryptöjningens del fanns endast ett relevant material att tillgå där både σ_{c7} och n hittades i tabell (där de inte bara var riktvärden) för användande i *Nortons lag*.

5 Slutsatser

Krypsäkerhetsfaktorn i EN13480 bör formuleras så att den erforderliga vägg tjockleken blir bättre viktad. Innan en förändring sker i normen bör beställare tillse att utnyttjandegraden ($U = \frac{e_{100\,000}}{e_{200\,000}} < 1$) blir mindre än 1 på nya anläggningar.

När en anläggning är designad för 200 000 h enligt dagens EN13480, bör replikprovning göras tidigare då en given kryptöjningen inträffar ~10% tidigare än om den varit designad för 100 000 h.

Nedan följer ett påstående som kan ses som en generell riktlinje för rörkonstruktörer och anläggningsägare: *Om man konstruerar enligt EN13480 för 100 000 timmar kan man förvänta sig en livslängd på 160 000 timmar. Om man väljer att konstruera för 200 000 timmar enligt EN13480 kan man förvänta sig en livslängd på 100 000 timmar.*

Anläggningsägare kan använda diagrammen 9-32 för att göra en uppskattning av den förväntade livslängden på sina respektive anläggningar. En mer exakt beräkning kan göras individuellt för varje anläggning.

Användandet av *Nortons lag* (ekvation (35)) försvåras av att relevanta värden på konstanterna σ_{c7} och n som ingår, i många fall saknas. Därför hade det varit önskvärt med ett alternativ till *Nortons lag* för att bestämma kryptöjningen.

Det verkar som att *LCSP (Logistic Creep Strain Prediction)* kan vara ett sådant alternativ. Med denna räcker det att känna tryck, temperatur och t_r (time to rupture), för att kunna generera hela krypkurvan, från tid noll till brott. Tid till brott finns redan i standard exempelvis för sömlösa rör, 10216. Förvisso endast för ett fåtal tider (10, 100, 200 samt 250 tusen timmar), men för alla relevanta material och temperaturintervall.

6 Rekommendationer och användning

Egenkontroll av systemet är viktigt. Ju förr en kontroll görs av ett system, desto bättre, för att ha en referenspunkt för framtida avläsningar. Avläs hängare, både varmt och kallt, kontrollera isolering och dräneringar.

Det är viktigt att poängtera att det är lagen som ska följas då en anläggning konstrueras. Använder man sig av en harmoniserad standard är man säker på att lagen följs. Men man kan som kund specificera högre krav än vad som anges i normen.

Antag att man som beställare önskar en livslängd på 200 000 timmar. Då bör man i en upphandling specificera enligt nedan:

”Rörledningar ska dimensioneras i enlighet med EN13480-3:2012+C2:2013 med följande undantag:

creep safety factor, SF_{cr} , enligt Table 5.3.2-1 EN13480-3:2012+C2:2013, ska väljas till 1,5 istället för 1,25.

Tid T i timmar, enligt Table 5.3.2-1 EN13480-3:2012+C2:2013, ska väljas till 200 000”

7 Förslag till fortsatt forskningsarbete

Det kan finnas en poäng med att göra diagram såsom Figur 33 med fler datapunkter och separata diagram för varje individuell metallegering.

För uppskattningen av den förväntade livslängden hade det varit fördelaktigt med fler än sju datapunkter. Därför borde det göras ett större arbete med att samla de data som finns över så många anläggningar som möjligt med tid till brott/skadeklass.

Beräkningen av spänningar enligt normerna fungerar bra när det gäller rårör, för komponenter med spänningsintensitetsfaktorer är normerna mycket olika. Vi behöver en guide som visar olikheter och varningar för icke konservativa fall. Att belysa skillnader mellan normer skulle vara enkelt och informativt för konstruktörer.

8 Litteraturreferenser

- [1] Comments - Draft prCEN/TR 764-9. CEN/TC 269/WG 1 N95. CEN 2013-09-05.
- [2] Industriella rörledningar av metalliska material – Del 3: Konstruktion och beräkning, Swedish Standards Institute, SS-EN 13480-3, Stockholm, augusti 2004.
- [3] Sömlösa rör för tryckkärlsändamål – Tekniska leveransbestämmelser – Del 2: Olegerade och legerade stål med fordrade högttemperaturegenskaper. Swedish Standards Institute, SS EN10216-2, Stockholm, november 2007.
- [4] Rörledningsnormer – *Normer för rörledningar i stationära anläggningar*, II utgåvan, Tryckkärlskommissionen, Stockholm 1978.
- [5] DIN- Taschenbuch. Stahlrohrleitungen 1 – *Maße Technische Lieferbedingungen*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V, Beuth Verlag 1987, Berlin.
- [6] Ljung C; Saabye-Ottosen N; ”Hållfasthetslära del 1 - Enaxliga tillstånd”, Avdelningen för hållfasthetslära, Lunds Universitet. Lund juli 2005.
- [7] Sundström B et al; ”Handbok och formelsamling i hållfasthetslära”, Institutionen för hållfasthetslära KTH, Stockholm september 2005.
- [8] Saabye-Ottosen N; Ljung C; ”Strength of Materials and Solid Mechanics, AK2” Division of Solid Mechanics, Lund University, Lund 2004.
- [9] Auerkari, P. et al. “Evaluation of creep damage from replica inspection results”. VTT Manufacturing Technology. Espoo januari 1997.
- [10] Hedner, G. et al. “Formelsamling i hållfasthetslära”. Institutionen för hållfasthetslära KTH, Stockholm 1978.
- [11] Holmström, S, “Engineering tools for robust creep modeling”, VTT Publications. Espoo 2010.
- [12] Haugland, E, Powerheat AB. Samtal. 2014-04-25.
- [13] Brett, S et. al.”Creep damage development in welded X20 and P91”, Material- och kemiteknik, Värmeforsk. Stockholm, mars 2011.
- [14] Sömlösa rör av stål för tryckändamål - Tekniska leveransbestämmelser. Del 2: Olegerade och legerade stål med fordrade högttemperaturegenskaper, Swedish Standard Institute, SS-EN 10216-2.

Bilaga

A Elementarfall

A.1 Sammanfattning

Beräkningen av SIF-faktorerna är olika i normerna och väljer man tex ett kort t-rör fås stor SIF-faktor enligt RN78. Enligt EN13480 tas ingen hänsyn till huruvida T-stycken är långa eller korta.

EN13480 har ett speciellt utvärderingskriterium för rörledningar inom kryp och detta gör att erforderliga lyror och andra expansionsupptagande element blir något större enligt 13480 än jämfört med RN78.

De spänningar som räknas ut enligt normerna stämmer tillfredställande med de som kan räknas ut analytiskt. Man bör dock observera att det finns stora skillnader när man adderar dislokation tex T-rör och konor. De figurer som finns för val av typ av SIF är heller inte helt entydiga. I RN78 finns tex fem olika formler för att räkna ut SIF faktor för T-rör medan det i EN13480 endast finns tre olika typer.

Det går inte generellt att ange den ena normen mer konservativ än den andra, det beror på vilka fall man studerar.

A.2 Bakgrund

Elementarfallen har studerats inom projekt för Värmeforsk med projektnummer M12-216. Beräkningarna i denna bilaga är fokuserade på spänningar med avseende på expansion dvs rörelsestyrda belastningar.

A.3 Generellt för elementarfallen

Beräkningarna är gjorda utan gravitation, utan korrosionstillägg, utan minustolerans mm för att inte störa tydligheten i resultaten.

Rör beräknade utanför krypområde är av material P235GH.

Rör i krypområde är i kvalitet 10CrMo910.

A.4 Vridning av rör utanför krypområdet

Indata

Rör med diameter 224,5 mm och tjocklek 20 mm

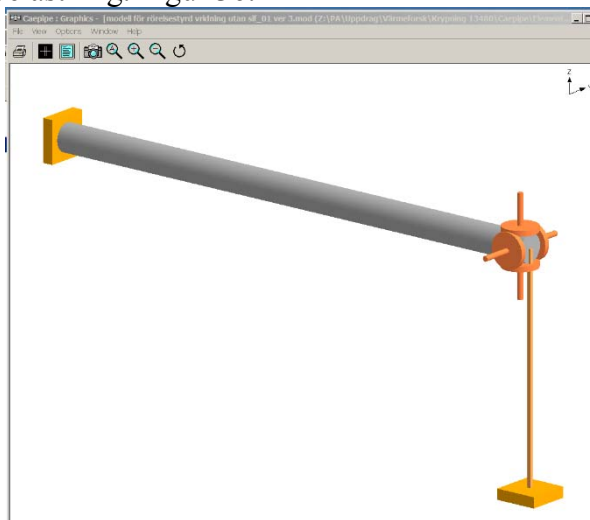
Temperatur 20°C

Inre tryck 0 bar(ö)

Vridning 2,86 Grader

Längd 4690 mm

I ena änden fix och i andra änden en vridning på 2,86 grader som verkar som rörelsestyrd belastning. Figur 36.



Figur 36: Figur från Caepipe, i ena änden fix och i andra änden en vridning på 2,86 grader som verkar som rörelsestyrd belastning.

Resultat

Spänning enligt med analytisk lösning 150 N/mm²

Spänning enligt RN1978: 213 N/mm²

Spänning enligt EN13480 213 N/mm²

Spänning enligt ASME Class 2 92 213 N/mm²

Kommentar

Normerna använder böjstyvheten istället för vridstyvheten. Denna förenkling ger att normerna är något konservativa.

A.5 Böjning av rör utanför krypområdet

Indata

Rör med diameter 224,5 mm och tjocklek 20 mm

Temperatur 20 °C

Inre tryck 0 bar(ö)

Nedböjning 40 mm

Längd 4690 mm

I ena änden fix och i andra änden en deformation på 40 mm som verkar som rörelsestyrd belastning.

Resultat

Spänning enligt analytisk lösning	134 N/mm ²
Spänning enligt RN1978:	141 N/mm ²
Spänning enligt EN13480	141 N/mm ²
Spänning enligt ASME Class 2 92	141 N/mm ²

Kommentar

Normerna räknar på samma sätt och träffar den analytiska lösningen med någon liten säkerhetsmarginal.

A.6 Vridning av rör utanför krypområdet med T-rör

Indata

Rör med diameter 224.5mm och tjocklek 20 mm

Temperatur 20 °C

Inre tryck 0 bar(ö)

Vridning 2,86 Grader

Längd 4690mm

Ett oförstärkt T-rör finns i denna modell 500 mm från fixpunkt.

I ena änden fix i andra änden en vridning på 2,86 grader som verkar som rörelsestyrd belastning.

Resultat

	Spänning	Spänning/tillåten spänning
Spänning enligt RN1978:	213 N/mm ²	2,08
Spänning enligt EN13480	213 N/mm ²	2,16
Spänning enligt ASME Class 2 92	213 N/mm ²	1,68

Kommentar

En dimensionering enligt EN13480 ger största säkerhetsmarginalen med just denna typ av dislokation (oförstärkt T-rör). Väljer man förstärkt t-rör mm skiljer sig normerna ganska mycket åt.

A.7 Böjning av rör utanför krypområdet med T-rör

Indata

Rör med diameter 224.5mm och tjocklek 20 mm

Temperatur 20 °C

Inre tryck 0 bar(ö)

Nedböjning 40 mm

Längd 4690 mm

Ett oförstärkt T-rör finns i denna modell 500 mm från fixpunkt.

I ena änden fix i andra änden en nedböjning på 40 mm som verkar som rörelsestyrd belastning.

Resultat

	Spänning	Spänning/tillåten spänning
Spänning enligt RN1978:	357 N/mm ²	1,23
Spänning enligt EN13480	357 N/mm ²	1,28
Spänning enligt ASME Class 2 92	357 N/mm ²	1,00

Kommentar

En dimensionering enligt EN13480 ger största säkerhetsmarginalen med just denna typ av dislokation (T-rör). Väljer man förstärkt t-rör mm skiljer sig normerna ganska mycket åt.

A.8 Böjning av rör i krypområdet

Indata

Rör med diameter 224,5 mm och tjocklek 20 mm

Temperatur 530 °C

Inre tryck 0 bar(ö)

Nedböjning 40 mm

Längd 4690 mm

I end änden fix och i andra änden en deformation på 40mm som verkar som rörelsestyrd belastning.

Resultat

EN 13480

Spänningen är 143 N/mm² enligt formel Expansion (12.3.4-2)

Krypspänning är 51 N/mm² enligt formel Creep (12.3.5-1)

Utnyttjandegrad formel Expansion (12.3.4-2) är 0,65

Utnyttjandegrad formel Creep (12.3.5-1) är 0,8

RN78

Spänningen är 143 N/mm² enligt formel Expansion (9:40)

Utnyttjandegrad formel Expansion är 0,67

Kommentar

Normerna räknar ungefär lika men RN78 är något mer konservativ i expansionsberäkningen medan EN13480 har formel för krypning som RN78 saknar. Sammantaget blir att om man räknar enligt EN13480 krävs något större expansionsupptagande element.

A.9 Vridning av rör i krypområdet

Indata

Rör med diameter 224,5 mm och tjocklek 20 mm

Temperatur 530 °C

Inre tryck 0 bar(ö)

Vridning 2,86 grader

Längd 4690 mm

I en änden fix och i andra änden en vridning på 2,86 grader.

Resultat

EN 13480

Spänningen är 164 N/mm² enligt formel Expansion (12.3.4-2)

Krypspänning är 54 N/mm² enligt formel Creep (12.3.5-1)

Utnyttjandegrad formel Expansion (12.3.4-2) är 0,74

Utnyttjandegrad formel Creep (12.3.5-1) är 0,86

RN78

Spänningen är 162 N/mm² enligt formel Expansion (9:40)

Utnyttjandegrad formel Expansion är 0,76

Kommentar

Normerna räknar ungefär lika men RN78 är något mer konservativ i expansionsberäkningen medan EN13480 har formel för krypning som RN78 saknar. Sammantaget blir det att om man räknar enligt EN13480 krävs något större expansionsupptagande element.