

Rapport

R-22-04

December 2022



Några mätningar av segjärns åldring

Jan Sarnet

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING AB

SWEDISH NUCLEAR FUEL
AND WASTE MANAGEMENT CO

Box 3091, SE-169 03 Solna
Phone +46 8 459 84 00
skb.se

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING

ISSN 1402-3091

SKB R-22-04

ID 1957484

December 2022

Några mätningar av segjärns åldring

Jan Sarnet

Svensk Kärnbränslehantering AB

Nyckelord: Segjärn, Dragprovning, Deformationsåldring, Blåsprödhet.

Denna rapport är publicerad på www.skb.se

© 2022 Svensk Kärnbränslehantering AB

Sammanfattning

För att beskriva segjärnets (nodulärt gjutjärn) åldring och eventuella blåsprödhet har SKB låtit mäta hållfastheten genom dragprovning vid rumstemperatur och förhöjda temperaturer. I denna rapport analyseras mätningarna. Hållfastheten har mätts för flera olika provstycken och flest mätningar och analyser finns för de två provtillverkade segjärnsinsatserna i57 och i76. Dessa insatser tillverkades år 2007 respektive 2015 och skiljer sig något i legeringssammansättning. Mätningar av hållfastheten för SKB:s segjärn varierar något under tidsperioden 12 år respektive 4 år och en förändring som svag kallåldring kan inte uteslutas. Hållfastheten varierar med temperatur, draghastighet, gjutgodsets struktur och defekter som påverkas av legeringssammansättning, provstyckets läge och höjd i gjutgodset (insatsen). Töjbarheten mätt som brottförlängning är den hållfasthetsdata som varierar mest. Men brottförlängning kan mätas enligt olika definitioner och på olika sätt och detta kan öka variationen vid jämförelser med mätningar i facklitteraturen.

SKB:s mätningar visar att dynamisk och statisk deformationsåldring kan förekomma för segjärn beroende på faktorer som temperatur, deformation och deformationshastighet. Materialets töjbarhet minskar något vid statisk deformationsåldring, men inget sprött beteende kan identifieras. Vid dragprovning är töjbarheten högst vid 23–125 °C. Endast vid temperaturer som är långt över de som förväntas i slutförvaret påverkas töjbarheten eller segheten. En negativ inverkan på insatsens och därmed kapselns integritet skulle endast uppkomma om samma kapsel skulle utsättas för två på varandra följande kraftiga deformationer, något som bedöms som extremt osannolikt.

Abstract

To describe the aging of the ductile iron (also referenced as nodular cast iron) and possible blue brittleness, SKB has had the strength measured by tensile testing at room temperature and elevated temperatures. In this report, the measurements are analyzed. The strength has been measured for several different test pieces and most measurements and analyzes are available for the two pre-production ductile iron inserts with identifications i57 and i76. These inserts have been manufactured year 2007 and 2015 and differ somewhat in alloy composition. Measurements of the strength of SKB's ductile iron vary slightly during the time period 12 years and 4 years, respectively, and a change such as slight quench aging cannot be ruled out. The strength varies with temperature, tensile testing rate, the alloy composition of the casting, the position of the test piece and the height of the casting (insert). Ductility measured as elongation at failure is the strength data that varies the most. However, elongation at failure can be measured according to different definitions and in different ways and this can increase the variation in comparisons with measurements from the literature.

SKB's measurements show that dynamic and static deformation (strain) aging can occur for ductile iron depending on factors such as temperature, deformation and strain rate. The ductility of the material decreases slightly with static strain aging, but no brittle behaviour can be identified. In tensile tests, the ductility is highest at 23–125 °C. Only at temperatures that are well above those expected in the final repository is the ductility or toughness affected. A negative impact on the integrity of the insert and thus the canister would only occur if the same canister was subjected to two consecutive severe deformations, something which is considered to be extremely unlikely.

Innehåll

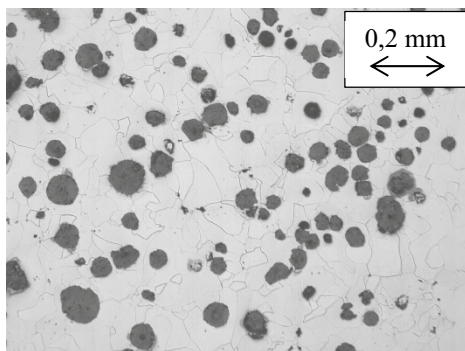
1	Introduktion	7
2	Dragprovning och material	9
2.1	Allmänt om dragprovning	9
2.1.1	Sträckgräns	10
2.1.2	Brottgräns	11
2.1.3	Brottförlängning	11
2.1.4	Dragprovningshastighet	12
2.2	Segjärnsprover	12
2.2.1	Segjärnsprover från provtillverkade kapselinsatser	12
2.2.2	Segjärnsprover med varierande kvävehalt från mindre standardblock	15
2.3	Försöksplanering	17
2.3.1	Kallåldring	17
2.3.2	Dynamisk deformationsåldring	17
2.3.3	Statisk deformationsåldring	18
2.4	Tekniker för utvärdering av deformationsåldring	19
2.4.1	Kallåldring	19
2.4.2	Dynamisk deformationsåldring	19
2.4.3	Statisk deformationsåldring	20
3	Sammansättningens inverkan på hållfastheten	23
3.1	Skillnad i sammansättning och hållfasthet (sträckgräns) för segjärnsinsatserna i57 och i76	23
3.2	Några mätningar av kvävehaltens inverkan på deformationsåldring eller sprödhet	24
4	Kallåldring	27
4.1	Kallåldring i57	27
4.2	Kallåldring i76	31
5	Dynamisk deformationsåldring	33
5.1.1	Nya mätningar av hållfasthetsdata, 23–400 °C	34
5.1.2	Ojämnheter i kraftkurvan (dragprovkurvan), 23–400 °C	36
6	Statisk deformationsåldring	41
6.1	SKB:s mätningar av statisk deformationsåldring	41
6.1.1	Statisk åldrings inverkan på sträckgräns	41
6.1.2	Statisk åldrings inverkan på brottgräns	45
6.1.3	Statisk åldringens inverkan på brottförlängningen	46
6.2	Sammanfattning av Björklund (2021)	50
7	Diskussion	51
7.1	Allmänt	51
7.2	Kallåldring	51
7.3	Dynamisk deformationsåldring	52
7.3.1	SKB:s mätningar	52
7.3.2	Resultat från Pihlajamäki (2017)	52
7.3.3	Förväntad effekt av dynamisk deformationsåldring för segjärn i slutförvaret	52
7.4	Statisk deformationsåldring	52
7.4.1	SKB:s mätningar	52
7.4.2	Resultat från Björklund (2021)	52
7.4.3	Förväntad effekt av statisk deformationsåldring för segjärn i slutförvaret	53
8	Slutsatser	55
9	Författarens tack	57

Referenser	59
Bilaga 1 Dynamisk deformationsåldring 1 (2)	61
Dynamisk deformationsåldring 2 (2)	63
Bilaga 2 Statisk deformationsåldring 1 (5)	65
Statisk deformationsåldring 2 (5)	66
Statisk deformationsåldring 3 (5)	67
Statisk deformationsåldring 4 (5)	68
Statisk deformationsåldring 5 (5)	69

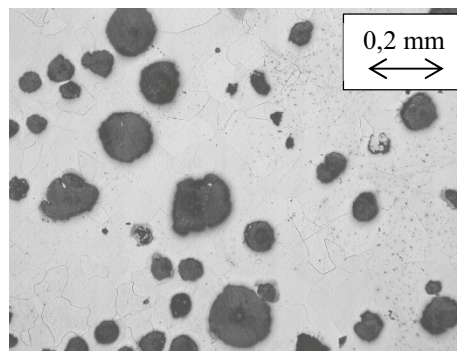
1 Introduktion

Järn och stål hårdnar i allmänhet med ökande deformation. Därtill kan materialen bli hårdare och sprödare genom åldring vid lagring efter avkyllning eller deformation. Dessa åldringsfenomen kallas kallåldring respektive deformationsåldring. Deformationsåldringen kan ske under deformationen (dynamisk) eller efter deformationen (statisk). Principen för deformationsåldring upptäcktes och patenterades för att öka ståls hållfasthet under andra hälften av 1800-talet. Charpy (1914) konstaterade att åldringen och försprödningen minskar med föroreningshalten. Sambanden mellan åldring, sprödhet och materialets sammansättning är inte fullständigt klarlagda, men under 1900-talet kunde ståls åldringsbenägenhet minskas genom forskning och praktisk utveckling. Upptäckten och forskningen om järns och ståls åldring har tidigare beskrivits av Hultgren (1966), Honeycombe (1968, 1984) samt Honeycombe och Bhadeshia (1995). Teorier och modeller för deformationen i metallkristaller och åldring har Honeycombe (1968, 1984) och Kocks med flera (1975) beskrivit. Det klarlades att gjutjärn försprödas genom deformationsåldring vid 150–350 °C av Löhe med flera (1982) samt Yanagisawa och Lui (1983). Nya artiklar har visat på töjningshastighetens inverkan och dess samspel med temperaturen för deformationsåldring av ferritiska material (Rao med flera 2021, Jalava med flera 2020).

Segjärn ingår som lastbärande del i KBS-3 kapseln för slutförvaring av använt kärnbränsle. Segjärnsinsatser har provtillverkats sedan slutet av 1990-talet och materialet har dragprovats för att säkerställa att provtillverkningen fungerat som planerat och att kraven uppfylls. Figur 1-1 visar att mikrostrukturen från en provgjutet segjärnsinsats består av en ferritisk ljus grundmassa och grafit i form av noder. Ett ferritiskt segjärns hållfasthet, töjbarhet som brottförlängning och seghet som slagseghet och brottseghet kan påverkas av halten ingående legeringsämnen genom att en viss mängd ferrit ersätts av perlitstruktur som höjer hållfastheten men minskar töjbarheten och segheten. Även defekter från gjutning och stelning (Stefanescu 2017) minskar segjärnsinsatsens töjbarhet och seghet. Exempel är degenererad grafit och dross och i viss mån porositet (Jonsson med flera 2018, s 50). Av figurerna framgår att strukturen kan variera inom en segjärnsinsats beroende av höjd i gjutgodset.



Figur 1-1a. Mikrostruktur för segjärnsinsats i76, höjd i gjutgodset = 0,3 m (SKBdoc 1526879). Tillstånd från RISE att publicera bilderna.



Figur 1-1b. Mikrostruktur för segjärnsinsats i76, höjd i gjutgodset = 4,6 m (SKBdoc 1523414).

Dynamisk deformationsåldring uppträder inte för segjärn vid dragprovning i rumstemperatur eller vid temperaturer på cirka 110 °C som kan förväntas i det planerade slutförvaret (Ikonen 2020). Dessutom kan permanenta deformationer på högst någon procent förväntas för kapseln av skjuvningar från eventuella framtida jordbävningar eller någon annan last i slutförvaret och därför är SKB:s krav på brottförlängning för att upprätthålla kapselns funktion i slutförvaret 3 % (Jonsson med flera 2018). SKB:s bedömning att åldringsfenomen hos segjärn inte försämrar kapselns förmåga att motstå mekaniska laster redovisades 2017 i (SKB 2017), baserat på litteraturstudier.

Nu har denna litteraturgenomgång kompletterats med experimentella studier av åldrings inverkan på draghållfasthet och töjbarhet för SKB:s segjärn. Resultaten redovisas i denna rapport. Faktorer som varierats är temperatur, tid och draghastighet. Material har dragprovats från två segjärnsinsatser i 57 och i 76 för varierande provuttag (lägen) i godset. Dessutom refereras resultat från små provblock som gjutits för att utvärdera möjligheten att variera segjärns halt av kväve. Dragprovningen har utförts vid tre olika laboratorier i det följande benämnda 1, 2 och 3. Varmdragprovning har utförts vid laboratorium 2 och 3. Dragprovning vid laboratorium 1 har möjliggjort jämförelser med tidigare mätningar av draghållfastheten.

Deformationsåldring påverkar framför allt omslagstemperaturen vid slagseghetsprovning (Thelning 1975) och brottseghet. Men töjbarheten vid dragprovning kan också användas för att utvärdera materials sprödhet (Carlsson 1976). Eftersom dynamisk överbelastning förväntas vara osannolik i slutförvaret och inga alternerande laster förväntas kan det vara lämpligt att utvärdera segjärnsinsatsens deformationsåldring med dragprovning.

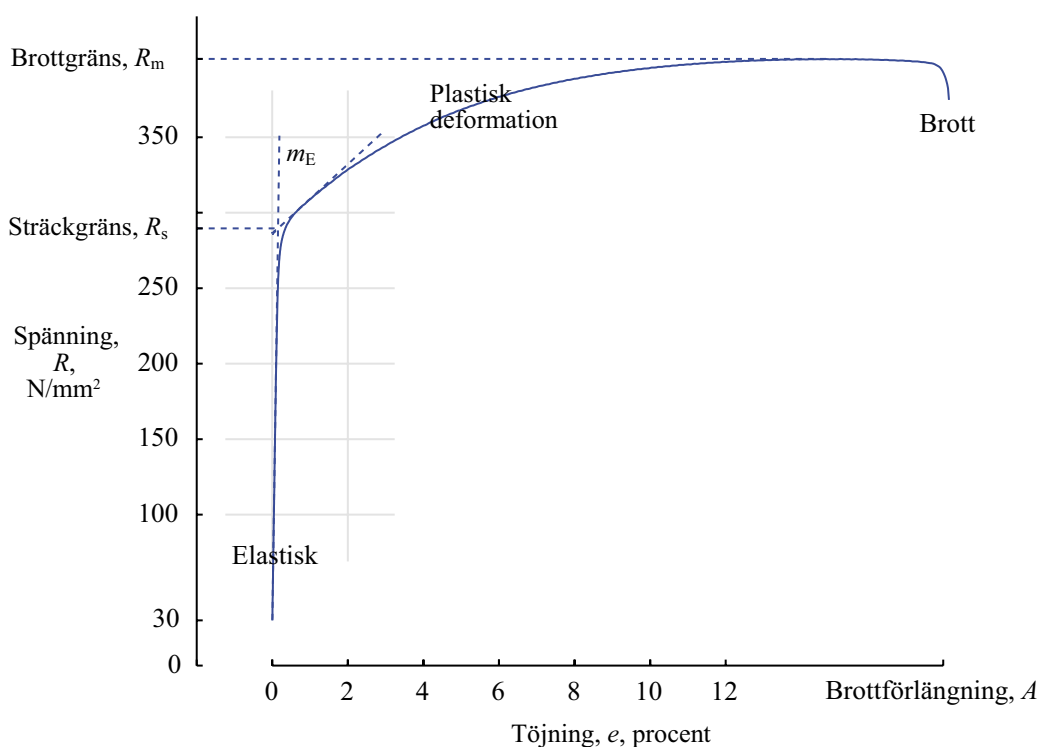
2 Dragprovning och material

2.1 Allmänt om dragprovning

Dragprovning används ofta som kontrollmetod för metallers hållfasthet (SS-EN-ISO-6892-1:2019). Hållfasthetsprovningen utförs genom att statistiskt belasta och sträcka en stav eller provbit tills den går av. Dessutom kan dragprovning användas för studier av fundamentala egenskaper och beteende (Hultgren 1966, Carlsson 1976) till exempel metallers åldring och deformationshårdnande vid dynamisk överbelastning (Storåkers 1985).

I figur 2-1 visas en dragprovkurva för SKB:s segjärn. Kurvan inleds med en linjär elastisk och reversibel deformation som anges med elasticitetsmodulen, m_E . Om övergången från elastisk till plastisk deformation är mjuk kan den beskrivas med sträckgränsen R_s (Storåkers 1985). Efter en kort linjär plastisk del upp till 1 procent avtar järnets deformationshårdnande. Efter brottgränsen, R_m , kan järnet inte bära en ökande last men provstaven deformeras ytterligare något innan staven dras av. Provstavens relativa förlängning, töjningen, kan mätas på provstaven och motsvaras i figur 2-1 av brottförlängningen, A .

Dragprovstavarna i denna rapport hade diametern 14 mm och en så kallad halv mätlängd, vilket innebär 5 gånger diametern.



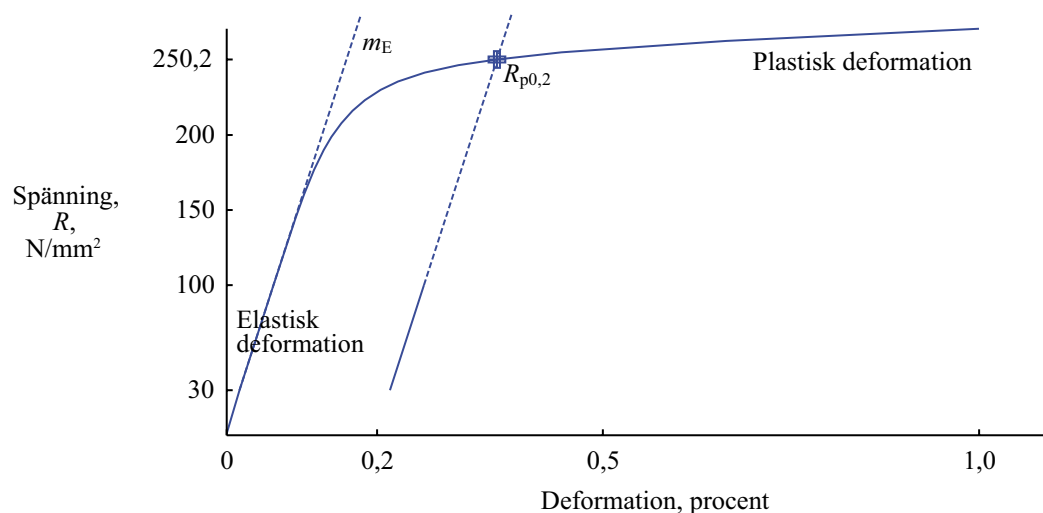
Figur 2-1. Dragprovkurva för SKB:s segjärnsinsats i57, prov k38 provad enligt standard ISO-6892-1:2019, A444 av laboratorium 1.

2.1.1 Sträckgräns

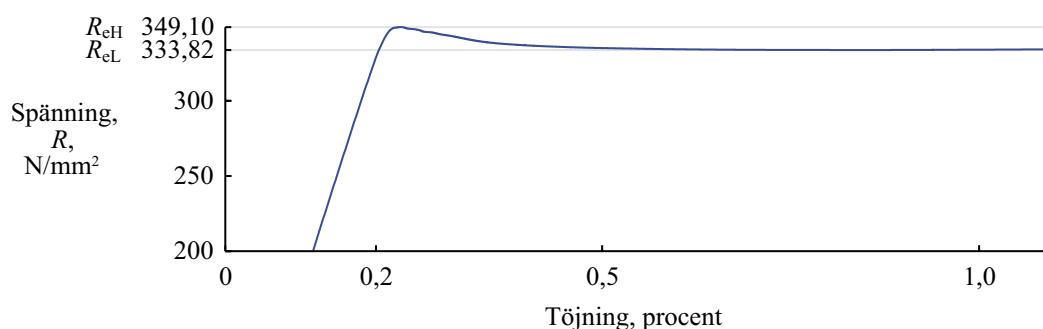
I figurerna 2-1 och 2-2 visas typiska exempel på den mjuka övergången från elastisk till plastisk deformation för SKB:s mätningar på segjärn. Övergången kan bestämmas genom skärningspunkten mellan extrapolationer av dragprovkurvan från de elastiska respektive de plastiska områdena. Skärningspunkten mellan de streckade linjerna definierar sträckgränsen R_s . Vid mätningarna i denna rapport av segjärn med mjuk övergång har sträckgränsen definierats som spänningsnivån för 0,2 procents kvarstående deformation, $R_{p0,2}$ (Storåkers 1985) som visas i figur 2-2.

För ferritiska stål är markerad övre, R_{eH} och undre sträckgräns, R_{eL} , enligt Edwards med flera (1940, 1943) besläktade med deformationsåldring och det finns inga tecken av deformationsåldring vid dragprovningen i figur 2-1 och figur 2-2 eller andra dragprovningmätningar av det gjutna segjärnet från de provtillverkade kapselinsatserna. Detta är förväntat eftersom proverna inte har deformerats före dragprovningarna och att provningarna utförts i rumstemperatur.

Däremot framträder tecken på åldring som markerad sträckgräns (övre sträckgräns) som i figur 2-3 om segjärnet har utsatts för en fördeformation på 3 %. Deformationsåldring förutsätter att rörliga grundämnen som kol och kväve finns löst i (legerat i) järnets ferritiska kristallstruktur och rör sig och anrikas till (segregerar till) deformationsstrukturer i kristallkornen. Kväves effekt på sträckgräns är inte begränsad till järn och stål utan har konstaterats för zinkkristaller och mässing (Honeycombe 1968).



Figur 2-2. Teknik för bestämning av övergången mellan elastisk och plastisk deformation med avskärningsmetoden vid $R_{p0,2}$ för segjärnsinsats i76, höjd 2 m, provläge B, provstav 2, m3, provad av laboratorium 3.



Figur 2-3. Avläsning av övre och undre sträckgräns i dragprovkurva av SKB:s segjärn som deformationsåldrats i laboratorium 3.

2.1.2 Brottgräns

Brottgränsen är den spänning när kraften är som störst i ett dragprov som tillåts gå till brott. Spänningen beräknas med den ursprungliga arean på provstaven. Som framgår av figur 2-1 uppnås brottgränsen efter stor plastisk deformation för segjärn (insats i57 prov k38).

2.1.3 Brottför längning

Materiallets förmåga att undergå deformation benämns tøjbarhet och på engelska ductility. Tøjbarheten eller duktiliteten kan mätas som provets förlängning. Vid dragprovning exempelvis enligt SS-EN-ISO 6892-1:2019 kan, brottför längningen, definieras och avläsas vid den maximala spänningen eller efter brott. Den relativa förlängningen är en kvot mellan förändring i mätlängd och ursprunglig mätlängd och det är praktiskt att redovisa den relativa förlängningen i procent. I figur 2-4 visas två olika avläsningstekniker för brottför längningsvärden. Den lägsta brottför längningen är den plastiska förlängningen vid maximal kraft A_g . Den totala förlängningen vid maximal kraft A_g som inkluderar elastisk tøjning är några tiondels procent högre, men visas inte i figuren. Den (plastiska) brottför längningen efter brott A är tydligt högre.

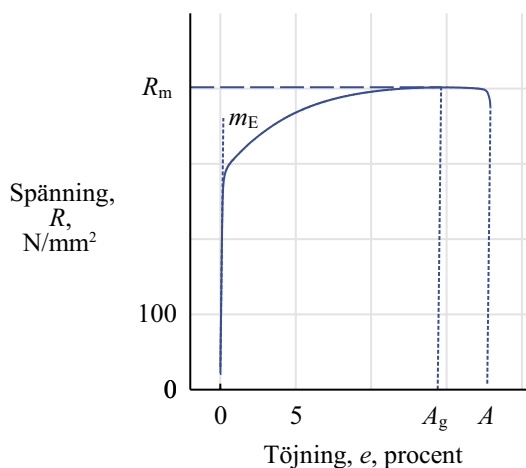
Vid jämförelser mellan liknande prover av samma material med systematiska skillnader i förlängning mellan mättillfällen eller laboratorium kan den likformiga förlängningen e beräknas om volymkonstans antas (Dieter 1984). Längden före dragprovning, L_o , och längden efter dragprovning, L_u ersätts med originaldiametern d_o till diametern d_u över antagande av volymkonstans för det cylindriska tvärsnittet:

$$e = (L_u - L_o)/L_o \text{ och } Area_u \cdot L_u = Area_o \cdot L_o$$

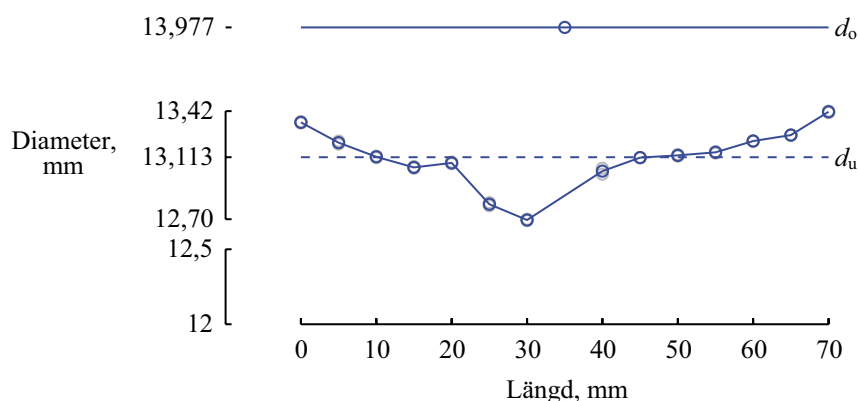
$$\text{ger } e = (d_o^2/d_u^2 - 1) \cdot 100, \%$$

Förlängningen e bör närmast jämföras med den likformiga plastiska förlängningen A_g .

De statistiskt åldrade dragproven mättes med skjutmått två gånger med 90 graders vridning vid flera, typiskt 13 positioner på mätlängden. Från de två mätningarna beräknades en medeldiameter. På de dragna proverna kunde ritmärken användas för att bestämma ekvidistanta positioner på ursprungsmätlängden, L_o . I de fall som ritmärken saknades markerades 13 ekvidistanta mätpositioner. Figur 2-5 visar hur diametern kan variera efter dragprovning. Deformationen är relativt likformig över mätlängden 70 mm bortsett från den lokaliserade kontraktionen vid brottet (Dieter 1984), här vid 25–30 mm.



Figur 2-4. Definition av olika förlängningar vid dragprovning för SKB:s segjärnsinsats i57, prov k38.



Figur 2-5. Diametermätningar av provstav före, d_o , och efter, d_u , dragprovning (prov m46).

2.1.4 Dragprovningshastighet

När segjärn kontrolleras enligt standard (SS-EN-ISO 6892-1:2019, SS-EN-ISO 6892-2:2018) får draghastigheten ändras under provningen för att på ett enkelt sätt säkerställa en god mätning av det branta elastiska området och minska tidsåtgången vid mätning av det större plastiska området och brottgränsen. Spänningen som krävs för deformation beror till viss del av hastigheten och därför syns hack i dragprovkurvorna när hastigheten har ändrats som i figur B1-1. Spänningen ökar något med hastigheten och mätningar av brottgränsen får ett något högre värde än om hastigheten hade varit konstant under provningen.

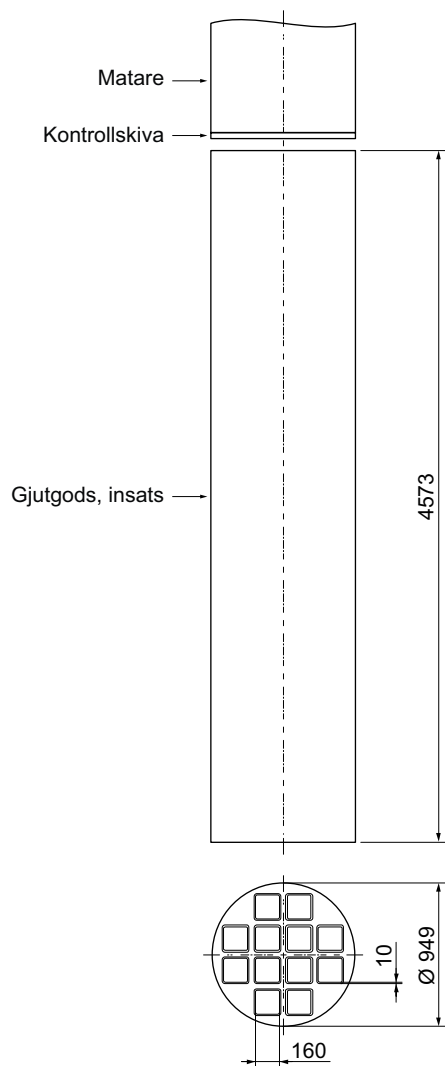
2.2 Segjärnsprover

2.2.1 Segjärnsprover från provtillverkade kapselinsatser

Segjärnets hållfasthet beror på vilken variant av segjärn som valts och vilken godstjocklek som gjutgodset har (Yanagisawa och Lui 1985). Töjbarheten och framförallt brottsegheten försämras med mikroporositet. (Stefanescu 2017). Varianten av segjärn med materialbeteckningen EN-GJS-400-15 har en *ferritisk* grundmassa och är en god kompromiss (optimering) mellan hållfasthet och seghet. Denna variant har beställts vid SKB:s provgjutningar av segjärnsinsatser. Den högsta hållfasthet och töjbarhet som kan garanteras kan utläsas av materialbeteckningen och är 400 N/mm² i brottgräns respektive 15 % i brottförlängning för en mätning av en separatgjuten dragprovstav. En separatgjuten stav medför en gynnsamt kort stelningstid. Riktvärdena är lägre om dragprovet bearbetats från en provskiva som sågats ut ur gjutgodset, 350 N/mm² och 8 %. SKB:s krav på brottförlängning för att upprätthålla kapselns funktion i slutförvaret är lägre, 3 % (Jonsson med flera 2018).

Segjärnsinsatser till kapseln har provtillverkats och materialet har dragprovats sedan slutet av 1990-talet. Som framgår av figur 2-6 gjuts segjärn runt 12 stålprofiler (fyrkantiga rör) i insatsvarianten för BWR-bränsleelement. Insatsen gjuts stående med en överlängd avsedd för att metallsmältan ska kunna mata gjutgodset under stelningen och minimera gjutningsdefekter i den slutliga komponenten.

Struktur och grafitnodulstorleksfördelning har undersökts för SKB:s provtillverkade segjärnsinsatser och stelning- och svalningsförlopp för insatserna har simulerats. Små grafitnoder bildas vid snabb stelning och grövre noder vid långsam stelning, men skillnaderna i nodulstorlek förklarar inte helt variationer i mekaniska egenskaper (Tadesse och Fredriksson 2018).



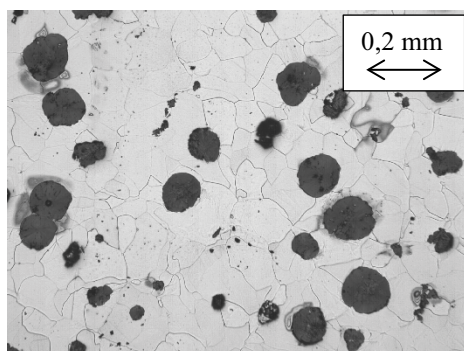
Figur 2-6. Segjärnsinsats för BWR-element med exempel på kontrollskiva och matare (sjunkbox). Skala 1:50.

Eftersom sannolikheten för strukturvariationer och förekomst av defekter är högre i överlängden, sjunkboxen, än i den egentliga delen, insatsen, kan en skiva från överlängden vara ett lämpligt provstycke för oförstörande hållfasthetsprovning. Lämpligheten förutsätter ett likformigt gjutgods och ett tillräckligt antal stickprov bör tas. För undersökningarna i denna rapport har även provskivor tagits på andra höjder i insatsen, alltså förstörande provning av insatsen.

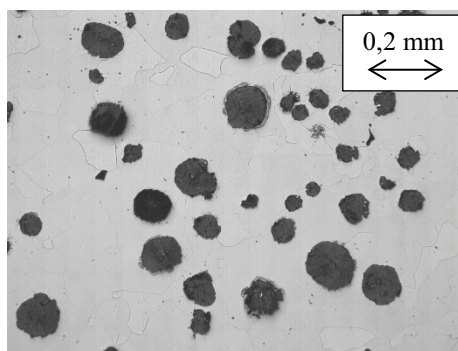
Provtillverkade segjärnsinsatser dragprovats regelmässigt av SKB. I tillägg och för att kunna undersöka förekomst av åldring i SKB:s segjärn togs provstycken ut från två insatser, i57 och i76, och bearbetades till provstavar. Insatserna tillverkades år 2007 respektive 2015 och provstavarna togs ut och bearbetades 2018 och dragprovades 2019.

Proverna användes till att studera såväl kallåldring som dynamisk och statisk deformationsåldring enligt försöksplanen i nästa avsnitt 2.3. Provstavar togs ut från samma eller liknande provlägen i yttre delen av gjutgodset för att minska inverkan av systematiska strukturvariationer eller defektvariationer. Ur figurerna 2-7a–d framgår att fyra provstavar med 60°, 300°, 120°, 240° rotation runt insatsens längdaxel i samma provläge A har liknande mikrostruktur och grafitfördelning. Brottgränsens medelvärde för de fyra dragproverna är 385,7 N/mm² och standardavvikelsen är 1,9 N/mm² (Swerea SweCast 2015).

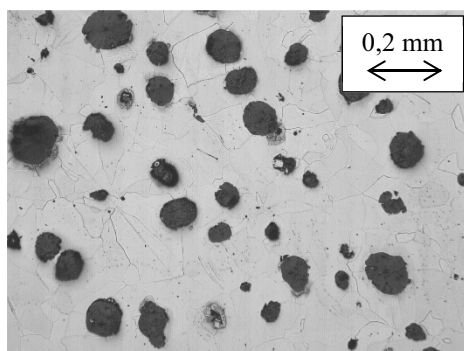
Responser som dragprovningmätningar av sträckgräns, brottgräns och brottförlängning har sammanställts i ett Excel-ark (Sarnet 2022) utifrån underlag från laboratorierna. Mätfilerna från dragprovningarna har funnits tillgängliga för rapportförfattaren och har använts för att rita dragprovkurvor och för jämförelser med laboratoriernas mätningar. I de fall för vilka arbetsmaterialet (mätfilerna) har redovisat fler värdesiffror än brukligt för provningsprotokoll har fler värdesiffror använts som data för analyser. Medelvärden i tabeller och figurer anges med en decimal högre precision än för de ingående mätvärdena. *Faktorer* som provningstemperatur, draghastighet (töjningshastighet), provläge i tvärsnittet som i figur 2-6 och figur 2-8 och höjd för provskiva som i figur 2-6 har också kodats in i Excel-sammanställningen. Denna sammanställning har använts som indata för beskrivande statistik och analyser.



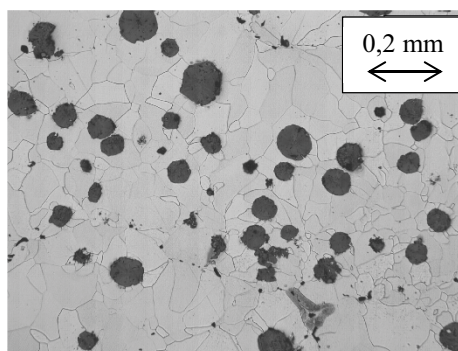
Figur 2-7a. Dragprov segjärnsinsats i76, höjd 2,2 m, provstav D1, provläge A, brottgräns 385,9 N/mm² (Swerea SweCast 2015). Tillstånd från RISE att publicera bilderna.



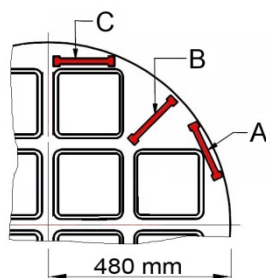
Figur 2-7b. Dragprov segjärnsinsats i76, höjd 2,2 m, provstav D6, provläge A, brottgräns 386,5 N/mm² (Swerea SweCast 2015).



Figur 2-7c. Dragprov segjärnsinsats i76, höjd 2,2 m, provstav D10, provläge A, brottgräns 387,5 N/mm² (Swerea SweCast 2015).



Figur 2-7d. Dragprov segjärnsinsats i76, höjd 2,2 m, provstav D15, provläge A, brottgräns 383,1 N/mm² (Swerea SweCast 2015).



Figur 2-8. Kantprovlägen för BWR-insatser; A = 1, 10, 6, 15 (provstavsnummer), B = 2, 5, 11, 14, C = 3, 4, 12, 13. Skala 1:20.

Den kemiska sammansättningen påverkar hållfastheten och kan förenklat sammanfattas med kolekvivalenten, C_{eq} , beräknad i viktsprocent.

$$C_{eq} = \%C + \%Si/3 + \%Mn/6 + \%P/3$$

alternativt

$$C_{eq} (2) = \%C + (\%Si + \%P)/3$$

Den kemiska legeringssammansättningen analyserades vid gjutningarna 2007, 2007 respektive 2015 enligt standard (ASTM E1999-18). Kol och svavel analyserades enligt ASTM E1019-18. Tabell 2-1 visar att i76 göts med lägre kolhalt och kiselhalt än i55 och i57.

För ett antal dragprover från segjärnsinsatserna i57, i76 och provstycken analyserades kemisk sammansättning, kvävehalter, syrehalter och vätehalter. Insatsen i57 har signifikant högre kvävehalt 48 ppm kväve mot insatsen i76 för vilken 39 ppm uppmättes i medel. Standardavvikelserna för kvävemätningarna var lägre än 1 ppm.

Tabell 2-1. Segjärnsinsatsernas legeringssammansättningar C till Ni vid gjutning och nya analyseringar av N, O och H.

Insats	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N [ppm]	O [ppm]	H [ppm]	Ceq	Ceq (2)
i55	3,64	2,34	0,14	0,022	0,008	0,04	0,39				4,45	4,43
i57	3,66	2,34	0,18	0,023	0,007	0,03	0,38	48	47	4,2	4,47	4,45
i76	3,50	2,18	0,17	0,019	0,006	0,03	0,39	39	38	3,3	4,26	4,23

Segjärnsinsatsen i57 har signifikant högre syrehalt 47 ppm syre mot insatsen i76 för vilken 38 ppm uppmättes i medel. Standardavvikelserna för syremätningarna var 11 ppm.

För i57 uppmättes en medelvätehalt på 4,2 ppm och för i76 en medelvätehalt på 3,3 ppm. 15 år respektive 7 år efter gjutning.

2.2.2 Segjärnsprover med varierande kvävehalt från mindre standardblock

Kvävehalten i järnet kan inverka på hållfasthet och deformationsåldring. Muhmond, Tadesse och Fredriksson (2019) utvecklade därför en metod för att tillsätta kväve i smältan vid gjutning av två provblock och undersökte inverkan av kvävehalten på hållfastheten och tøjbarheten för ferritiska segjärn i ett ännu inte publicerat arbete. Segjärn göts till y-formade och hanterbara separatgjutna provstycken enligt SS-EN-1563:2018 och visas i figur 2-9. Provstyckena vägde i storleksordningen 1,5 kg. Smältornas kolhalt var 3,7 viktsprocent, kiselhalt 2,0 viktsprocent, manganhalt 0,2 viktsprocent och fosforhalt 0,015 viktsprocent. Den ursprungliga kvävehalten i smältan var 30–40 ppm men provstyckena legerades upp vid gjutning med tillsats av Fe_3N -pulver i gjutformen till 60 ppm och 80 ppm. Kvävehalten bestämdes med smältextraktion på metallmynt i anslutning till provstyckena. Mynten stelnade snabbare än styckena men antas ha jämn och samma sammansättning som styckena. Kvävehalterna analyserades en gång till för dragprovstavar i samband med färdigställande av denna rapport.

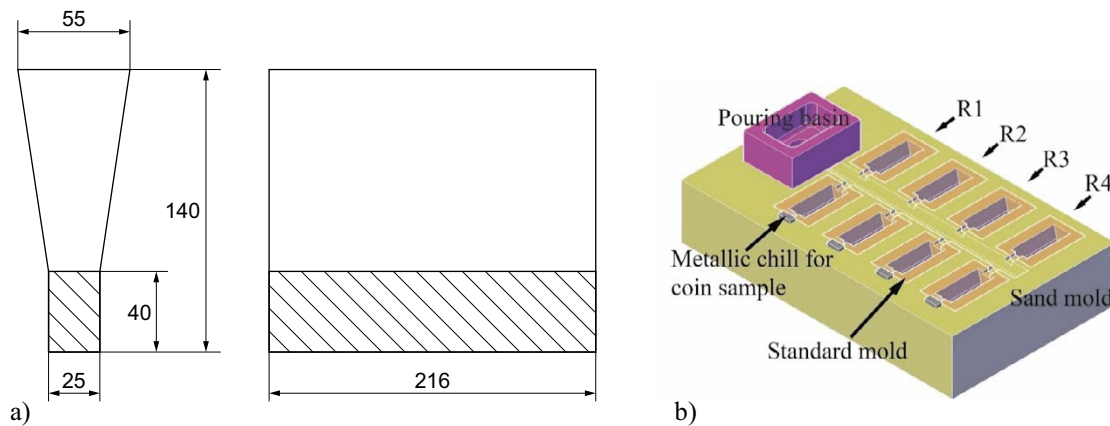
Tabell 2-2. Provblockens smältanalys och kvävetillsatser.

Smälta	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N (ppm)	Ceq	Ceq (2)
1	3,70	1,99	0,17	0,015	0,005	0,017	0,025	40–75	4,40	4,37
3	3,73	2,00	0,20	0,014	0,002	0,020	0,020	30–90	4,43	4,40

Proverna värmebehandlades kort, 45 minuter, vid 750 °C för att säkerställa en ferritisk mikrostruktur som motsvarar SKB:s ferritiska segjärn med beteckningen 400-15. Från smältorna 1 och 3 göts 11 provstycken som gav 19 dragprovstavar och listas i tabell 2-3 men bara 7 stavar har hittills dragprovats. Resterande 12 provstavar har sparats för framtida deformationsåldringsförsök. De sju dragprovsmätningarna möjliggör både analys och grafisk presentation. Smälta och provblock 2 göts för en annan undersökning och redovisas inte i denna rapport.

Tabell 2-3. Provstavar från smälta 1 och 3.

Smälta/provblock	ID	Kvävehalt	Provstav
1	1836, 1840	Ursprunglig 40 ppm	Dragprovad
1	1847, 1849	Kvävelegerad ca 60 ppm	Dragprovad
1	1830, 1843, 1846, 1848	Ursprunglig ca 40 ppm	Sparad
1	1835, 1845	Kvävelegerad ca 40 ppm	Sparad
1	1831, 1841, 1844, 1850	Kvävelegerad ca 50 ppm	Sparad
1	1842, 1851	Kvävelegerad ca 60 ppm	Sparad
3	1820	Ursprunglig 30 ppm	Dragprovad
3	1826, 1828	Kvävelegerad ca 80 ppm	Dragprovad



Figur 2-9. a) y-formade provstycken enligt SS-EN-1563, b) gjutform för provblock med provstycken med olika kvävehalt från Muhmond med flera (2019).

2.3 Försöksplanering

2.3.1 Kallåldring

För att kunna undersöka kallåldring i SKB:s segjärn togs nya prover ut från två insatser från vilka material tidigare dragprovats. Insats i76 valdes eftersom den redan provats av laboratorium 1 med mellanliggande tid. Därtill valdes insats i57 som göts och provades flera år tidigare. Höjden från vilken provskivor tas ut relativt gjutningen kan också påverka dragprovomätningar. Utskiljningar och porositet kan påverka de mekaniska egenskaperna och förväntas öka med höjden i gjutgodset (Fredriksson och Åkerlind 2006). De defekter som försämrar tøjbarheten, mätt som brottförlängning, är mest förekommande högst upp i insatsen, exempelvis från toppskivor för insatserna i54 och i56 (Dillström och Alverlind 2014, s 19). För i76 togs prover ut ifrån halva höjden 2,2 m. För i57 togs även dragprover ut ifrån toppen av gjutgodset för att undersöka en eventuell inverkan av höjden på hållfastheten.

2.3.2 Dynamisk deformationsåldring

Dynamisk deformationsåldring kan förekomma vid dragprovning vid förhöjd temperatur och den identifieras som taggar i dragprovskurvan och kallas Portevin-LeChatelier-effekten efter observationer i järn med låga halter av kol eller kväve (Portevin och Le Chatelier 1923). Enligt Honeycombe (1968) och Dieter (1988) inträffar detta även i andra metaller och taggar kan hänföras till att inlösta ämnen som interagerar med den fortgående deformationen av metallens kristallkorn. Ämnenas (kol och kväve) diffusion och deformationen är temperaturaktiverade. För temperaturer över 100 °C kan taggar visa sig vid dragprovning av järn (Honeycombe 1968).

Vid högre temperaturer förväntas dynamisk deformationsåldring enligt litteraturen. Exempelvis Yanagisawa och Lui (1983) observerade dynamisk deformationsåldring för segjärn vid 300 °C och 400 °C men inte vid 23 °C och 125 °C. En senare undersökning av segjärn visade en tydlig blåsprödhet vid dragprovning vid 400 °C (Lui och Chao 1989). Blåsprödheten beror dock på deformationshastigheten och effekten är starkare för hastigheter under 10^{-3} s^{-1} (Keh med flera 1968, Rao med flera 2021), som motsvarar en tid för deformationen på ungefär en minut. Draghastigheterna i denna rapport gavs av provningsstandarden (SS-EN 6892-2:2018).

För att undersöka segjärnets benägenhet till dynamisk deformationsåldring hos materialet från de två insatserna valdes 2 respektive 4 temperaturer och denna plan redovisades tidigare i Fud-programmet (SKB 2019). För insats i57 valdes temperaturerna 23 °C och 300 °C, där 23-gradersdata togs från mätningen av statisk deformationsåldring (se avsnitt 2.3.3). För insats i76 valdes temperaturerna 23 °C, 125 °C, 300 °C och 400 °C. För de två lägre temperaturerna 23 °C och 125 °C förväntades ingen deformationsåldring, däremot för de två högre 300 °C och 400 °C. I försöksplanen som redovisades i Fud-programmet fanns ett skrivfel för en i76-provskiva, men i denna rapport's tabell 2-4 har felet rättats till 2339. Dessutom skulle inte sista raden i tabell 9-1 i (SKB 2019) återges eftersom provet var från höjden 4494 mm och inget annat. Varmdragprovningen utfördes vid laboratorium 3.

Spridningen i mätningar var låg utifrån litteraturen och SKB:s tidigare mätningar, men i de undersökningarna ingick få faktorer som kunde påverka mätningarna. I föreliggande rapport's undersökningar ingår ytterligare faktorer som provläge och provskiva. Det totala antalet frihetsgrader ökades. Dessutom var ambitionen att kunna använda fler statistiska metoder än tidigare som till exempel variansanalys. Osäkerheten för ett medelvärde minskar med roten ur antal mätningar. Bergman och Klefsjö (2012) rekommenderar 4–6 mätningar. Därför ökades antalet mätningar från två till fyra för varje faktorskombination. Att fyra faktorsnivåer finns i varje undergrupp för insats i76 visas i försöksplanen i tabell 2-4.

Tabell 2-4. Försöksplan för varmdragprovning för dynamisk deformationsåldring.

Skiva	ID	Rate	Temperatur	Insats	Höjd	Provstav
i76 + 2306	m3	SR 2,8e-4	23 °C	i76	2,31 m	2
i76 + 2339	m12				2,34 m	5
i76 + 2377	m23				2,38 m	11
i76 + 2419	m34				2,42 m	14
i76 + 2419	m31		125 °C		2,42 m	2
i76 + 2306	m4				2,31 m	5
i76 + 2339	m13				2,34 m	11
i76 + 2377	m24				2,38 m	14
i76 + 2377	m21		300 °C		2,38 m	2
i76 + 2419	m32				2,42 m	5
i76 + 2306	m5				2,31 m	11
i76 + 2339	m14				2,34 m	14
i76 + 2339	m14-B				2,34 m	14 (extra)
i76 + 2339	m11		400 °C		2,34 m	2
i76 + 2377	m22				2,38 m	5
i76 + 2377	m22-B				2,38 m	5 (extra)
i76 + 2419	m33				2,42 m	11
i76 + 2306	m6				2,31 m	14
i57 + 2336	m41	SR 7,7e-5	300 °C	i57	2,34 m	2
i57 + 2336	m41-B	SR 7,7e-5			2,34 m	2 (extra)
i57 + 2336	m42	SR 2,8e-4			2,34 m	5
i57 + 2336	m43	SR 7,7e-5			2,34 m	11
i57 + 2336	m44	SR 2,8e-4			2,34 m	14
i57 + 2372	m53	SR 2,8e-4			2,37 m	2
i57 + 2372	m54	SR 7,7e-5			2,37 m	5
i57 + 2372	m55	SR 2,8e-4			2,37 m	11
i57 + 2372	m55-B	SR 2,8e-4			2,37 m	11 (extra)
i57 + 2372	m56	SR 7,7e-5			2,37 m	14
i57 + 4494	m61	SR 2,8e-4			4,49 m	2
i57 + 4494	m62	SR 7,7e-5			4,49 m	11
i57 + 4535	m63	SR 7,7e-5			4,54 m	2
i57 + 4535	m64	SR 2,8e-4			4,54 m	11

2.3.3 Statisk deformationsåldring

För att undersöka segjärnets benägenhet till statisk deformationsåldring valdes två åldringstemperaturer, 23 °C och 100 °C, samt två hålltider (tidsspänn mellan initial deformation och efterföljande mätning av parametrar relaterade till deformationsåldring), 1 timme och 100 timmar.

För att kunna utvärdera förekomst av statisk deformationsåldring mättes hållfastheten och tøjbarheten hos fyra prover för varje kombination av temperatur och hålltid för två insatser enligt försöksplanen i tabell 2-5. 28 mätningar gjordes av laboratorium 3 och 4 mätningar av laboratorium 1 för att undersöka inverkan av eventuella skillnader i mätmetoder mellan olika laboratorier. För åldring vid 100 °C användes kammarugnar med luftcirkulation.

Deformationen före åldringen valdes i denna undersökning till 3 % total tøjning, A_{gt} , för alla prover. Proven fördeformerades vid 23 °C och med deformationshastigheten $0,00025 \text{ s}^{-1}$. Som framgår av figur 2-1 är 3 % att betrakta som en kraftig deformation i förhållande till det elastiska området. Det är också en större deformation än den som kan uppkomma lokalt i segjärnsinsatsen vid ett skjuvlastfall i ett kommande slutförvar (Jonsson med flera 2018).

Tabell 2-5. Försöksplan för statisk deformationsåldring.

ID	Provläge	Insats	Tid	TT	Not	ID	Provläge	Insats	Tid	TT	Not
m17	A	i76	1 h	23 °C		m18	A	i76	1 h	100 °C	
k19	C	i76	1 h	23 °C	Lab. 1	m25	C	i76	1 h	100 °C	
m29	A	i76	1 h	23 °C		m30	A	i76	1 h	100 °C	
m35	C	i76	1 h	23 °C		k22	C	i76	1 h	100 °C	Lab. 1
m37	A	i57	1 h	23 °C		m38	A	i57	1 h	100 °C	
m45	C	i57	1 h	23 °C		m46	C	i57	1 h	100 °C	
m50	A	i57	1 h	23 °C		m49	A	i57	1 h	100 °C	
m60	C	i57	1 h	23 °C		m59	C	i57	1 h	100 °C	
m20	A	i76	100 h	23 °C		m19	A	i76	100 h	100 °C	
m28	A	i76	100 h	23 °C		k20	C	i76	100 h	100 °C	Lab. 1
m36	C	i76	100 h	23 °C		m26	C	i76	100 h	100 °C	
k23	C	i76	100 h	23 °C	Lab. 1	m27	A	i76	100 h	100 °C	
m40	A	i57	100 h	23 °C		m39	A	i57	100 h	100 °C	
m47	C	i57	100 h	23 °C		m48	C	i57	100 h	100 °C	
m51	A	i57	100 h	23 °C		m52	A	i57	100 h	100 °C	
m58	C	i57	100 h	23 °C		m57	C	i57	100 h	100 °C	

2.4 Tekniker för utvärdering av deformationsåldring

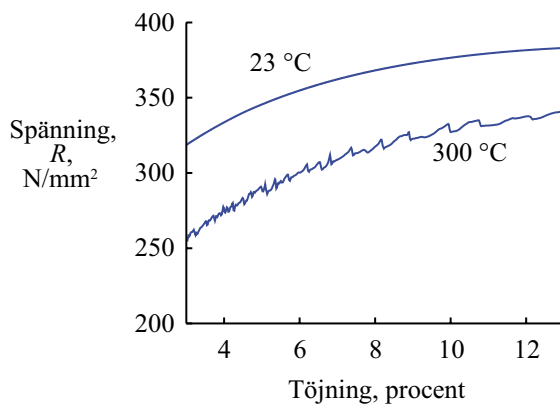
2.4.1 Kallåldring

Segjärn kallåldras relativt snart efter gjutning (Richards med flera 2004, Stefanescu 2017) och därefter avtar effekten (överåldring). SKB har sparat provstycken från provtillverkade insatser i uppvärmda lagerlokaler. För utvärdering av eventuell kallåldring jämfördes medelvärden av sträckgräns, brottgräns och brottförlängning för dragprovningar utförda av laboratorium 1 med mätningar 1, 2 respektive 4 år efter gjutning (i76) och 12 år efter gjutning (i57).

2.4.2 Dynamisk deformationsåldring

Som beskrivits i avsnitt 2.3.2 kan dynamisk deformationsåldring uppkomma vid dragprovning vid förhöjd temperatur och den identifieras som taggar i dragprovskurvan som i nedre kurvan i figur 2-10.

Temperaturens inverkan på dynamisk deformationsåldring utvärderades genom att rita och bedöma dragprovskurvornas jämnhet för segjärnsprover från insatserna i76 och i57.



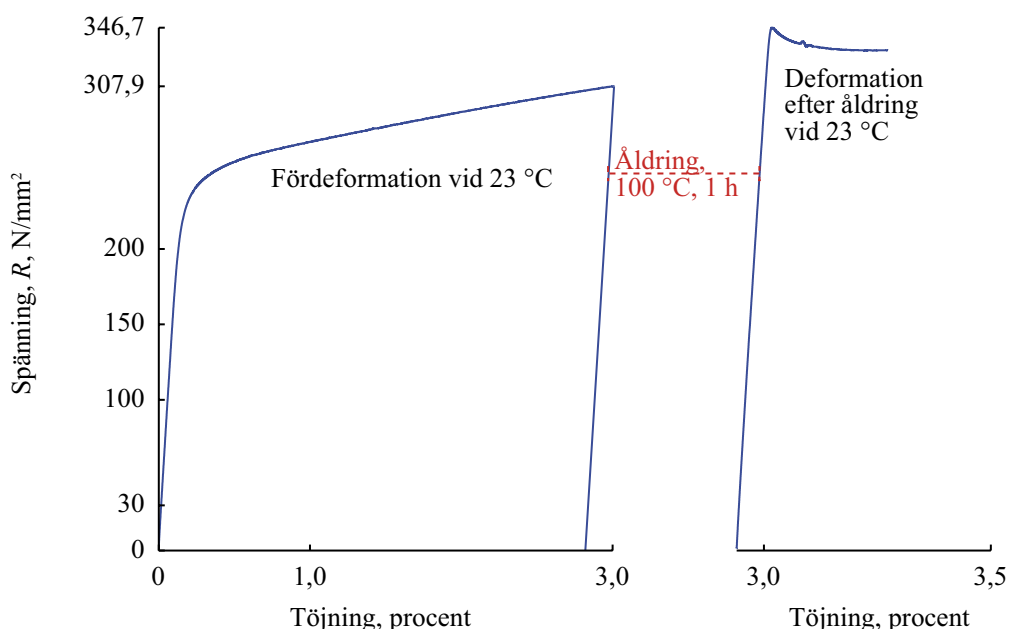
Figur 2-10. Dragprovskurvor av segjärn utan dynamisk deformationsåldring vid 23 °C och med dynamisk deformationsåldring 300 °C. Segjärnsinsats i76. Laboratorium 3.

Förutom inverkan av temperatur på den dynamiska deformationsåldringen utvärderades effekten av tøjningshastigheten. Skillnaden i dynamisk deformationsåldring mellan två draghastigheter (tøjningshastigheter) för hela dragprovet utvärderades genom att rita och bedöma dragprovkurvornas jämnhet för segjärn från insats i57.

Hastigheten för hela dragprovningen ingick inte som faktor i försöksplanen för i76 men kurvornas jämnhet före och efter byte av draghastighet gav två tøjningshastigheter att utvärdera. I standarddragprovning betecknas hastigheterna med koder som exempelvis A224, där första tvåan står för en tøjningshastighet på 10^{-3} s^{-1} vid materialets sträckgräns $R_{p0,2}$ eller eventuella markerade övre sträckgräns R_{eH} , andra tvåan står för en tøjningshastighet på 10^{-3} s^{-1} vid materialets eventuella nedre sträckgräns R_{eL} , och tredje siffran står för en tøjningshastighet på 10^{-2} s^{-1} vid den fortsatta dragprovningen och mätningen av brottgränsen. Varmdragproven för i76 utfördes med hastigheterna A224 alltså hastighet 2 (och 2) upptill 1,6 % och sedan med hastighet 4 fortsatt till brott. För att kunna utvärdera 125 °C ökades skalan på ordinatan (y-axeln) vid jämförelsen i resultatfigurerna 5-15 och 5-16.

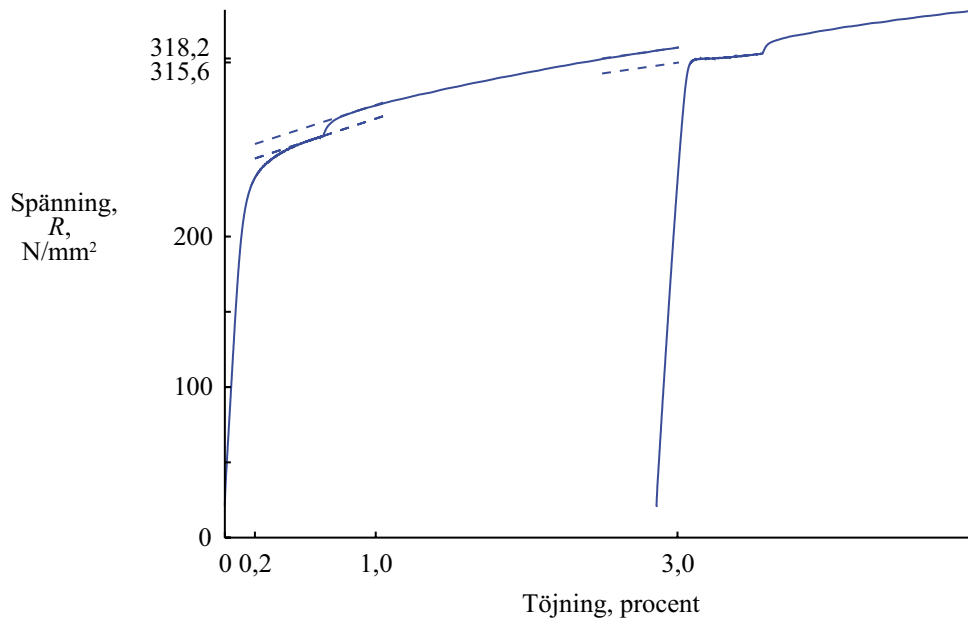
2.4.3 Statisk deformationsåldring

För att utvärdera hur stor effekt den statiska deformationsåldring hade på hållfastheten i form av markerad (övre) sträckgräns avlästes spänningen när 3 % tøjning uppnåts innan avlastning skedde, exempelvis 307,9 N/mm² som i figur 2-11. Efter den statiska åldringen pålastades provet igen och den förhöjda spänningen avlästes, exempelvis 346,7 N/mm². Provet drogs sedan till brott för att kunna mäta brottgräns och brottförlängning, men just de två mätningarna framgår inte av figur 2-11. Det förekommer att statisk deformationsåldring utvärderas genom den undre sträckgränsen, R_{eL} eller utsträckningen av området för den undre sträckgränsen, men en sådan utvärdering har inte varit möjlig i denna rapport på grund av att draghastigheten ändras vid 0,6 % eller 1,0 % enligt dragprovningstandard vid laboratorium 1 respektive laboratorium 3. De elastiska tøjningarna är små i förhållande till de plastiska och försummas därför i avläsningen av brottförlängningen.



Figur 2-11. Avläsning av spänningsmedelvärden statisk deformationsåldring, draghastighet 10^{-3} s^{-1} . Prov m18. Laboratorium 3.

Vid dragprovningen av de fyra kalibreringsproven vid laboratorium 1 förändrades draghastigheten efter bestämning av sträckgräns och när det elastiska området lämnats både under fördeformationen och den efterföljande deformationen. Som väntat ökar spänningen (flytspänningen) med draghastigheten. Skillnaden mellan flytspänning för den lägre draghastigheten och den högre draghastigheten (avståndet i y-led mellan de parallella streckade linjerna i figur 2-12) kallas här delta-spänningen. För att kunna utvärdera ökningen i spänning till följd av statisk deformationsåldring, justerades spänningsnivån för slutet av fördeformationen (3 %) ned med deltaspanningen från övergången mellan draghastigheterna.



Figur 2-12. Avläsningsteknik för dragprovkurva med byte av draghastighet, A224. Prov k19. Laboratorium 1.

3 Sammansättningens inverkan på hållfastheten

3.1 Skillnad i sammansättning och hållfasthet (sträckgräns) för segjärnsinsatserna i57 och i76

Den kemiska sammansättningen påverkar sträckgränsen. I tabell 3-1 och figur 3-1 jämförs mätningar av sträckgränsen för två insatser och provstyckena som funktion av en sammanfattande kolekvivalent.

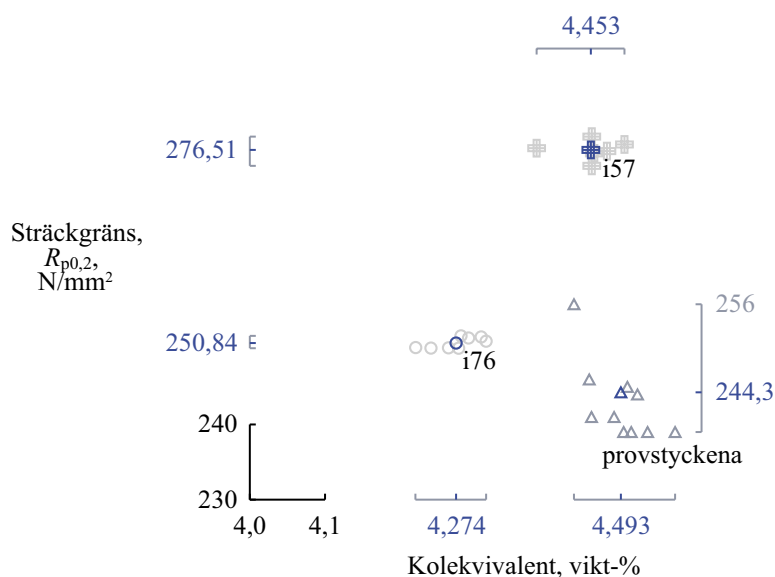
$$C_{eq} = \%C + \%Si/3 + \%Mn/6 + \%P/3$$

Legeringshalterna och de beräknade kolekvivalenterna för i57, i76 och provstyckena har små inomspridningar.

Tabell 3-1. Sträckgränser, kemisk sammansättning och beräknad kolekvivalent för två insatser (i57 och i76) och provstycken.

Insats	Dragprov		Sträckgräns N/mm ²			Kemisk sammansättning vikts-%							Kolekvivalent vikts-%		
	Läge	Stav	R _{p0,2}	Medel	Stdav	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ceq.	Medel	Stdav
i57	A	1	274,4	276,51	1,30	3,60	2,45	0,2	0,03	0	0,02	0,38	4,45	4,453	0,039
		10	278,3			3,60	2,45	0,2	0,03	0	0,02	0,38	4,45		
	C	3	276,7			3,53	2,44	0,2	0,03	0	0,02	0,39	4,38		
		4	276,1			3,62	2,40	0,2	0,03	0	0,02	0,39	4,46		
		12	277,2			3,66	2,40	0,2	0,03	0,01	0,02	0,39	4,50		
		13	276,4			3,62	2,45	0,2	0,03	0	0,02	0,38	4,47		
i76	A	6	251,6	250,84	0,73	3,53	2,23	0,2	0,02	0	0,01	0,40	4,31	4,274	0,032
		10	250,2			3,48	2,25	0,2	0,02	0	0,02	0,40	4,26		
		15	250,1			3,50	2,23	0,2	0,02	0	0,01	0,39	4,28		
	B	2	250,2			3,44	2,24	0,2	0,02	0	0,01	0,39	4,22		
		14	250,2			3,45	2,27	0,2	0,02	0	0,02	0,39	4,24		
	C	4	251,1			3,53	2,25	0,2	0,02	0	0,01	0,39	4,31		
		12	251,8			3,50	2,24	0,2	0,02	0	0,01	0,40	4,28		
		13	251,5			3,51	2,24	0,2	0,02	0	0,02	0,39	4,29		
		1836				244	244,3	5,9	3,76	2,17	0,2	0,02	0,01		
1840		245	3,74	2,19	0,2	0,02			0,01	< 0,01	0,03	4,50			
1847		239	3,77	2,18	0,2	0,02			0,01	< 0,01	0,02	4,53			
	3,81		2,17	0,2	0,02	0,01			< 0,01	0,02	4,57				
1849		239	3,76	2,14	0,2	0,02			0,01	0,01	0,03	4,51			
	3,75		2,14	0,2	0,02	0,01			0,01	0,03	4,50				
1820		256	3,64	2,25	0,2	0,03			0,01	0,01	0,02	4,43			
1826		241	3,74	2,11	0,2	0,03			0,01	< 0,01	< 0,02	4,48			
	3,71		2,11	0,2	0,03	0,01			< 0,01	< 0,02	4,45				
1828		246	3,69	2,16	0,2	0,03	0,01	0,01	0,02	4,45					

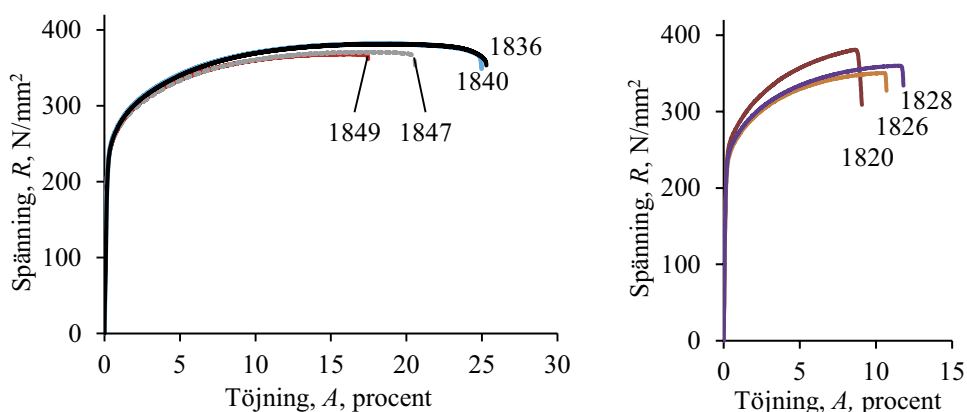
Det är förväntat att järnets sträckgräns ska öka med kolekvivalenten. De oberoende mätningarna av sträckgränser i i57 respektive i76 enligt tabell 3-1 som visas i figur 3-1 strider inte mot denna allmänna kunskap. Sträckgränsen för provstyckena från Muhmond, Tadesse och Fredrikssons arbete följer inte trenden för i57 och i76, men det kan bero helt på värmebehandlingen för att nå ferritisk struktur som provstyckena har fått. Det verkar möjlig att modulera hållfastheten med både med en sänkning av kolekvivalenten och med en värmebehandling.



Figur 3-1. Sträckgränsmätningar mot dragprovets kolekvivalent.

3.2 Några mätningar av kvävehaltens inverkan på deformationsåldring eller sprödhet

Kväve ingår med låga halter i segjärn och är därför ett så kallat spårämne (eng. residual element). Det kommer in i segjärnet genom råmaterialet, skrotet, och kan tas upp från atmosfären vid gjutning. Kväve kan öka perlithalten och därmed hållfastheten, på bekostnad av den mjuka ferriten, bilda mikroporositet vid stelningen och påverka grafitformen. Inverkan av kvävehalten på hållfasthet och tøjbarhet för ferritiska segjärn undersöktes av Muhmond, Tadesse och Fredriksson (2019) i ett ännu inte publicerat arbete. Provstyckenas (SS-EN-1563) kvävehalter höjdes med tillsats och uppmättes i arbetet till 40–60 ppm för provblock 1 och 80 ppm för provblock 3. Dragprovkurvor för de sju proverna i figur 3-2 visar på en mjuk övergång mellan det elastiska till plastiska området. Som väntat kan inga tecken på deformationsåldring som markerad sträckgräns och inga ojämnheter (sågtandsmönster) observeras i dragprovkurvan vid rumstemperatur.

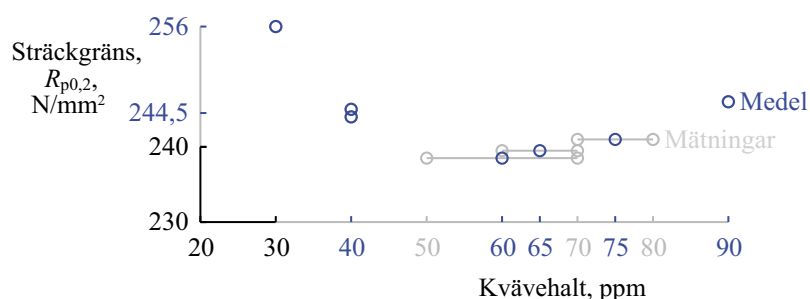


Figur 3-2. Dragprovkurvor segjärnsprover med hög och låg kvävehalt dragprovat vid laboratorium 2 från Muhmond, Tadesse och Fredriksson (2019).

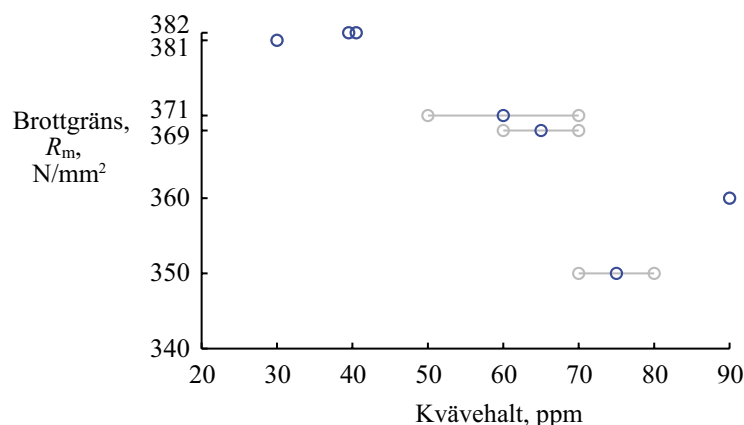
Även om det är osäkert med hänsyn till att endast sju prover har dragprovats, visar figur 3-2 att flytspänningen och brottgräns, höjden på kurvan, skiljer sig åt mellan proverna med låg kvävehalt 40 ppm (1836 och 1840) mot en medelhög halt på 60–65 ppm (1849 och 1847) från provblock 1 och en högre halt på 75–90 ppm (1826 och 1828) från provblock 3. Prov 1820 från provblock 3 har inte kvävelegerats. Dragprov- och kvävehaltmätningarna i Muhmond, Tadesse och Fredriksson (2019) har i denna rapport kompletterats med nya mätningar av provstavarnas kvävehalt som redovisas i tabell 3-2 och använts till beräkningarna av medelhalter i figurerna 3-3, 3-4 och 3-5. I figur 3-3 och figur 3-4 framgår en minskning av hållfastheten med kvävehalten. Sträckgränsen är i medeltal 244,5 N/mm² för 40 ppm, 239,0 N/mm² för 60 ppm och 241 N/mm² för 75 ppm. Brottgränsen är i medeltal 382,0 N/mm² för 40 ppm, 370,0 N/mm² för 60 ppm och 350 N/mm² för 75 ppm.

Tabell 3-2. Dragprovsmätningar (Muhmond med flera 2019) och analyseringar av kemisk sammansättning i viktsprocent för provstycken.

Smälta	Prov	$R_{p0,2}$	R_m	A_5	C	Si	Mn	P	N
	1836	244	382	25,3	3,76	2,17	0,15	0,020	0,0040
	1840	245	382	25,0	3,74	2,19	0,15	0,020	0,0040
1	1847	239	371	20,6	3,77	2,18	0,15	0,020	0,0070
					3,81	2,17	0,15	0,020	0,0050
	1849	239	369	17,5	3,76	2,14	0,16	0,020	0,0060
					3,75	2,14	0,16	0,020	0,0070
	1820	256	381	9,6	3,64	2,25	0,19	0,027	0,0030
3	1826	241	350	10,7	3,74	2,11	0,19	0,027	0,0070
					3,71	2,11	0,19	0,027	0,0080
	1828	246	360	11,8	3,69	2,16	0,19	0,028	0,0090



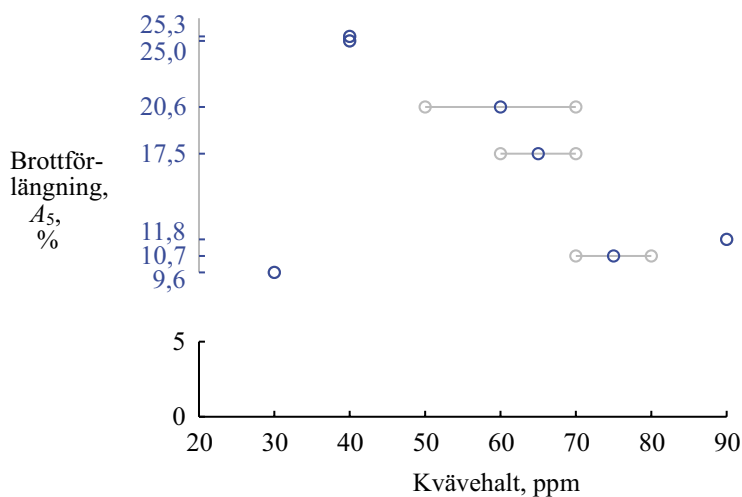
Figur 3-3. Sträckgränsmätningar (Muhmond med flera 2019) och medelvärden (blåa) för segjärnsprovblock som funktion av kvävehalten.



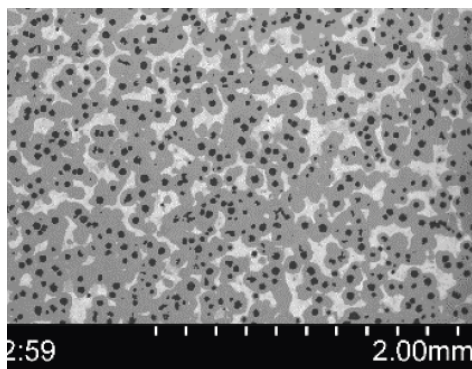
Figur 3-4. Brottgränsmätningar (Muhmond med flera 2019) och medelvärden för segjärnsprovblock som funktion av kvävehalten.

Minskningen i brottgräns för kvävehalter 60–90 ppm var inte väntad. Brottförlängningen, kurvans utsträckning i töjningsled, minskar också för prover med ökande kvävehalt. De lägsta brottförlängningarna på 10,7 % och 11,8 % i figuren har proverna med en kvävehalt på 60–90 ppm. Däremot har smälta 3:s referensprov med 30 ppm kväve en låg brottförlängning med 9,6 %. Minskningen i förlängning skulle kunna förklaras av ökad andel mikrodefekter. Provblocket har dock en kortare stelningstid och den utförda värmebehandlingen kan ha medfört en ökning av brottförlängningen jämfört med prover uttagna från provtillverkade segjärnsinsatser.

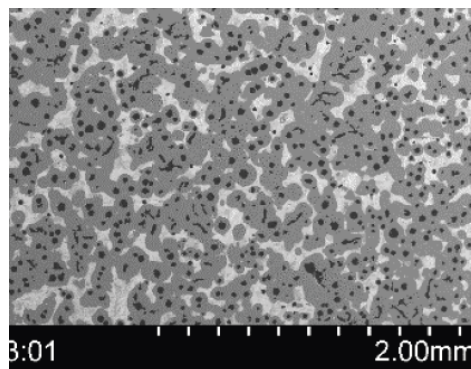
Muhmond med flera (2019) har dokumenterat provstyckenas strukturer med ett svepelektronmikroskop. Den högre kvävehalten i figur 3-6b kan ha påverkat grafitens form och minskat dess nodularitet. De sist stelnade områdena innehåller långsträckta porer fyllda med grafit. Grafitandelen är också mindre i dessa områden jämfört med de mörka områdena som är de först stelnade. Orsaken är en minskad kärnbildning av nodulär grafit under stelningprocessen till följd av att magnesiumhalten löst i smältan blivit för låg. Bildning av nya kärnbildare, vilka utgörs av magnesiumoxider, kan inte ske på grund av oxidation av smältan under gjutning, eftersom oxidationen förbrukar magnesium genom bildning av magnesiumoxid. Normalt kompenserar grafiten för stelningsskrumpningen, men eftersom ingen ny grafit bildas och svalningen är långsam hinner kol diffundera till nodulerna i de först stelnade områdena. Man får då volymutvidgning i dessa områden och krympning eller dragspänningar i de sist stelnade delarna med porer som följd. Man måste under gjutning kunna kontrollera processen så att man får så lite oxidation av magnesium som möjligt eller se till att ha tillräckligt mycket löst i smältan från början (Fredriksson och Åkerlind 2005, Muhmond, Tadesse och Fredriksson 2019).



Figur 3-5. Brottförlängningsmätningar (Muhmond med flera 2019) och medelvärden för segjärnsprovblock som funktion av kvävehalten.



Figur 3-6a. SEM-bild av mikrostruktur segjärnsprov 1840 med kvävehalt 40 ppm från Muhmond med flera (2019).



Figur 3-6b. SEM-bild av mikrostruktur segjärnsprov 1847 med kvävehalt 60 ppm från Muhmond med flera (2019).

4 Kallåldring

För att kunna undersöka kallåldring i SKB:s segjärn togs nya prover ut från två insatser, i57 och i76, som tidigare dragprovats vid laboratorium 1. Insatserna har förvarats i uppvärmda lagerlokaler. Tekniken för uttag av provstycken har ändrats från kallsågning 2007 till vattenskarning 2015–2019. Svarvning av provstycken till runda dragprovstavar och dess mått har varit liknande.

4.1 Kallåldring i57

Mätningar av sträckgränsen för insats i57 har kunnat jämföras för de två provtillfällena, åren 2007 och 2019, för två höjder i insatsen och två provlägen. Av praktiska skäl vid mätning av sträckgränsen som var ett delresultat vid de statistiska åldringsförsöken, provades 2019 de fyra proverna från 2,2 m vid *laboratorium 3* i stället för laboratorium 1. Mätvärdena från *laboratorium 3* har kursiverats i tabell 4-1. Eventuella skillnader mellan laboratorierna antas vara små med motiveringen att variationerna i mätning av sträckgräns mellan de två laboratorierna för insats i76 var låga. I medelvärdestabellen 4-1 framgår att sträckgränsmätningarna är lägre högst upp i insatsen, 4,6 m. För båda höjderna är sträckgränsen lägre vid mätningarna 2019.

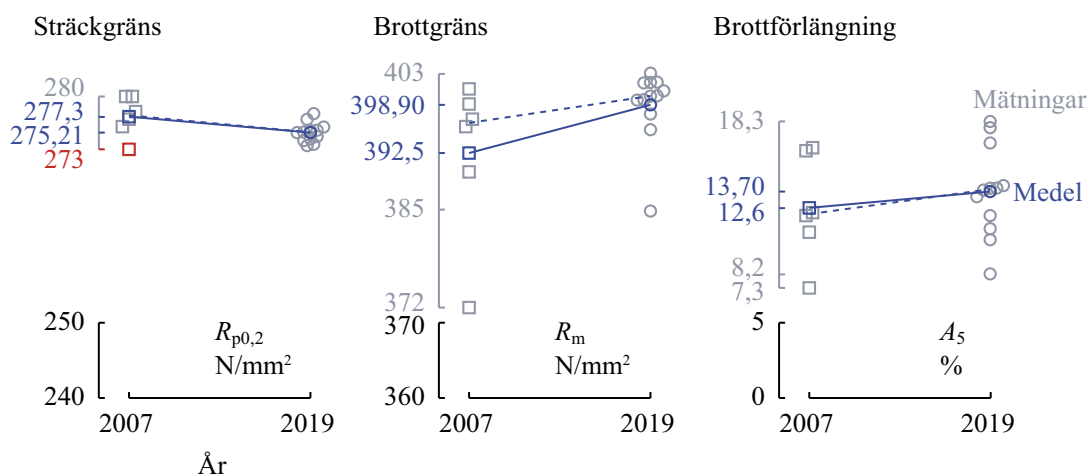
Tabell 4-1. Sträckgränsjämförelser mellan två provningstillfällena och mellan två höjder i gjutgodset, insatsen.

Sträckgräns, $R_{p0,2}$, N/mm ² , insats i57									
	År 2007				2019				Medel
	Provläge A		C		A		C		
	1	6	3	4	1	6	3	4	
Höjd 2,2 m	282	286	286	291	274,4	281,1	276,7	275,9	281,64
4,6 m	280	278	280	277	277,7	277,0	275,2	275,3	277,53
Medel	282,5				276,67				279,58

Minskningen i sträckgränsmätningarna mellan år 2007 och 2019 är större för höjden 2,2 meter än för 4,6 meter. Att mätningarna vid 2,2 m från 2019 har mätts vid laboratorium 3 bör inte ha bidragit till resultatet.

Av figur 4-1 framgår att de 12 sträckgränsmätningarna ritade med gråa cirklar från 2019 är i medeltal (blåa cirklar) 2,1 N/mm² lägre än mätningarna från 2007. Brottgränsmätningarna, som redovisas i figur 4-2 är 6,4 N/mm² högre 2019 jämfört med 2007. Mätningarna av brottförlängning ritade i figur 4-3 ökar från 12,62 % till 13,70 %.

Uppmätta värden av sträckgränsen varierar inte mycket mellan eller inom mätningarna vid de olika tillfällena. Däremot varierar brottgräns och brottförlängning något mer och det finns åtminstone två avvikande brottgränsmätningar. Medelvärdena påverkas av dessa avvikande värden och därför har även ökningen av medianerna ritats in med blå streckad linje.



Figur 4-1. Sträckgräns mätt med **Figur 4-2.** Brottröns mätt med **Figur 4-3.** Brottrörlängning mätt med 12 års intervall för insats i57. 12 års intervall för insats i57. 12 års i för insats i57.

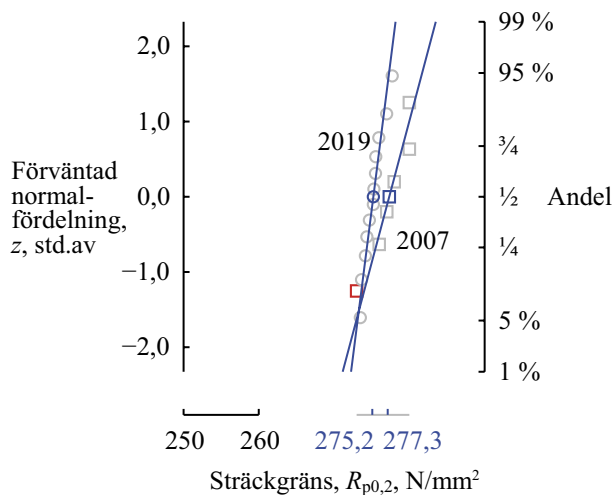
För att belysa och beskriva variationer i mätningar kan så kallade normalfördelningsdiagram konstrueras och ritas. Som exempel, betrakta sträckgränsmätningarna givna med heltal respektive två decimaler på höjden 4,6 m för i57 i tabell 4-2. Därefter storleksordna mätvärdena och inför de två variablerna y och z beräknade som anges i tabell 4-2 där Φ är fördelningsfunktionen för standard normalfördelning (Blom och Holmquist 1998).

Tabell 4-2. Sträckgränser för i57 mätta år 2007 och 2019.

Ordningsnummer	Stav, läge	Sträckgräns (N/mm ²), x_i , 2007	$y_i = (i - 1/3)/(n + 1/3)$, $n = 6$	$z_i = \Phi^{-1}(y_i)$	Ordningsnummer	Stav, läge	Sträckgräns, x_i , 2019	y_i , $n = 12$	z_i
1	2, B	273	0,11	-1,252	1	5, B	273,49	0,05	-1,607
2	5, B	276	0,26	-0,634	2	5, B	273,66	0,14	-1,102
3	4, C	277	0,42	-0,199	3	14, B	274,16	0,22	-0,785
4	6, A	278	0,58	0,199	4	12, C	274,37	0,30	-0,532
5	1, A	280	0,74	0,634	5	14, B	274,69	0,38	-0,310
6	3, C	280	0,89	1,252	6	3, C	275,21	0,46	-0,102
Medel		277,3			7	4, C	275,29	0,54	0,102
Stdav		2,7			8	10, A	275,50	0,62	0,310
					9	13, C	275,54	0,70	0,532
					10	15, A	275,95	0,78	0,785
					11	6, A	276,98	0,86	1,102
					12	1, A	277,73	0,95	1,607
					Medel		275,21		
					Stdav		1,27		

Mätningarna x_i plottas mot $y_i = (i - 1/3)/(n + 1/3)$ och $z_i = \Phi^{-1}(y_i) = \dots, n = 6$ respektive $n = 12$ som i figur 4-4. Skalan på vänstra vertikala axeln är linjär i z . Som framgår ansluter sig de ritade mätpunkterna från 2019 väl till räta linjer. Detta innebär att rimliga statistiska beskrivningar och modeller för variationen inom provlängerna ges av normalfördelningar.

Bland mätningarna från 2007 finns ett avvikande värde 273 N/mm² som inte ansluter väl till en normalfördelning och bidrar till en större standardavvikelse. Tas denna inte med i beräkningen minskar standardavvikelsen från 2,7 till 1,8 N/mm², i tabell 4-2. Den avvikande mätningen har behållits i figur 4-4.



Figur 4-4. Normalfördelningsdiagram för sträckgränsmätningarna från 2007 respektive 2019. Mätvärden (gråa), medelvärden (blåa) och teoretiska normalfördelningar (blå linjer).

Systematiska skillnader mellan provtillfällena (2007/2019) och provlägen kan statistiskt säkerställas med variansanalys (Blom och Holmquist 1998). Vid variansanalys uppdelas den totala kvadratvariationen för sträckgränsen kring medelvärdet och den blir 70,96 från 4 delar som svarar mot de två faktorerna *år* och *provläge*, samspel mellan dem och en rest som framgår av tabell 4-3. Faktorer med signifikanta skillnader har markerats med röd teckenfärg i tabellen. Sträckgränsmätningarna skiljer sig systematiskt från varandra för tillfället för provningen (året) och provläget (A, B eller C). Bidrag till variationen från andra faktorer som perlithalt och grafit skulle för sträckgränsen ingå i restmedelkvadratsumman 1,31 N/mm² som ger en inomvariation och standardavvikelse på 1,14 N/mm² för insats i57.

Tabell 4-3. Variansanalysschema för insats i57:s sträckgräns.

Faktor	Kvadratsumma	Frihetsgrader	Medelkvadratsumma	F-kvot	p-värde	Kommentar
År	17,96	1	17,96	13,748	0,003	(**) signifikant
Provläge	31,48	2	15,74	12,048	0,001	(**) signifikant
Samspel	5,84	2	2,92	2,233	0,150	inte signifikant
Rest	15,68	12	1,31	-		$\sqrt{1,31} = 1,14$
Total	70,96	17	4,17			$\sqrt{4,17} = 2,04$

Standardavvikelsen $\sqrt{1,31} = 1,14$ N/mm² är ett mått på variation efter korrigering av inverkan från provningsår, provlägen och samspel. Denna variation har bidrag både från segjärns materialet och dragprovningmetoden hos laboratorium 1. Den skulle kunna vara ett konservativt mått på precisionen för dragprovningmetoden, $1,14/275,9\% = 0,4\%$.

Även om brottgränsens medelvärde och median ökar mellan provningstillfällena 2007 och 2019 enligt figur 4-2 och 4-5a kan det inte formellt visas att brottgränsen skiljer sig enligt variansanalysen i tabell 4-4 beroende på variationen i brottgräns inom mätningarna för de enskilda åren.

Tabell 4-4. Variansanalysschema för insats i57:s brottgräns.

Faktor	Kvadratsumma	Frihetsgrader	Medelkvadratsumma	F-kvot	p-värde	Kommentar
År	163,81	1	163,81	3,026	0,108	inte signifikant
Provläge	66,84	2	33,42	0,617	0,556	inte signifikant
Samspel	118,84	2	59,42	1,098	0,365	inte signifikant
Rest	649,68	12	54,14	-		$\sqrt{54,14} = 7,36$
Total	999,17	17	58,77			$\sqrt{58,77} = 7,67$

Metoden med variansanalys förutsätter normalfördelade variabler och det framgår av figur 4-5a att brottgränsmätningarna från 2007 eller 2019 inte är normalfördelade. Tas de 2 + 2 avvikande mätvärdena bort ansluter värdena till normalfördelningar som i figur 4-5b, men då måste orsaken till avvikelserna ha utretts och fastslagits.

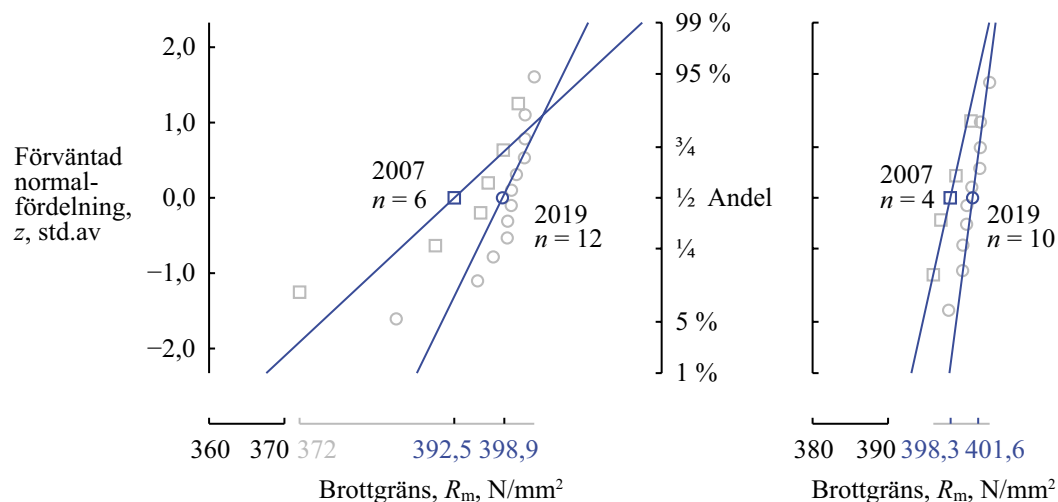
Även om brottförlängningens medelvärde och median ökar mellan provningstillfällena 2007 och 2019 enligt figur 4-3 kan det inte formellt visas att brottförlängningen skiljer sig enligt variansanalysen i tabell 4-5.

Tabell 4-5. Variansanalysschema för insats i57:s brottförlängning.

Faktor	Kvadratsumma	Frihetsgrader	Medelkvadratsumma	F-kvot	p-värde	Kommentar
År	4,65	1	4,65	0,466	0,508	inte signifikant
Provläge	32,71	2	16,36	1,638	0,235	inte signifikant
Samspel	7,90	2	3,95	0,396	0,682	inte signifikant
Rest	119,83	12	9,99			$\sqrt{9,99} = 3,16$
Total	165,10	17	9,71			$\sqrt{9,71} = 3,12$

Segjärnsinsatsen i57:s sträckgräns kan formellt visas minska mellan provningstillfällena 2007 och 2019. Brottgräns och brottförlängningen tycks öka mellan 2007 och 2019. Man kan inte utesluta en förbättrande kallåldring eller avspänning av segjärnsinsatsen men effekten kan inte formellt fastställas med variansanalys.

Laboratorium 1 som utfört dragprovningarna har påpekat att de har utförts på olika sätt, spänningsstyrt (2007) respektive töjningsstyrt (2019). Detta skulle kunna i tillägg till eventuell kallåldring medföra att mätningarna skiljer sig åt systematiskt. Men det är mindre troligt än åldringseffekter eftersom insats i57 sträckgräns och brottgräns minskar respektive ökar.



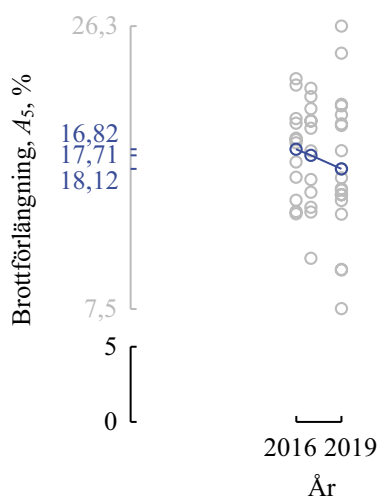
Figur 4-5. Normalfördelningsdiagram för brottgränsmätningar a) alla mätningar b) (till höger) utan avvikande mätningar.

4.2 Kallåldring i76

Brottförlängningens medelvärde varierar mellan provningstillfällena 2016, 2017 och 2019 enligt tabell 4-6 och figur 4-6. Det kan inte formellt visas att brottförlängningen skiljer sig systematiskt åt mellan provningstillfällena. För provlägena A och B varierar mätningarna av brottförlängningen marginellt. Provläge C har för i76 systematiskt lägre mätningar av brottförlängningen och några från en normalfördelning avvikande mätvärden.

Tabell 4-6. Brottförlängningsmätningar vid tre olika tillfällen 1, 2 och 4 år efter gjutning och tre kantprovlägen.

	Skiva	Brottförlängning, A_s , %												Medel
		Provläge A				B				C				
		1	10	6	15	2	5	11	14	3	4	12	13	
170 dagar	2160	18,9	22,8	18,5	14,7	19,9	17,3	20,2	18,8	22,4	16,3	14,0	13,8	18,12
	Medel	18,7				19,0				16,6				
530 dagar	2112	19,5	14,3	16,1	18,0	20,0	20,0	15,3	20,8	21,6	22,2	10,9	13,9	17,71
	Medel	17,0				19,0				17,1				
1270 dagar	2306	19,7	15,1	20,4	24,5	21,0				14,7	16,8	16,2	15,1	16,82
	2339	13,8	10,1	26,3	18,0		21,1			15,4	15,5	10,1	7,5	
	2377							19,8						
	2419								15,1					
	Medel	18,5				19,3				13,9				
	Alla, Medel	18,17				19,09				15,40				17,42



Figur 4-6. Brottförlängning mätt med 1, 2 och 4 års intervall av laboratorium 1 för insats i76.

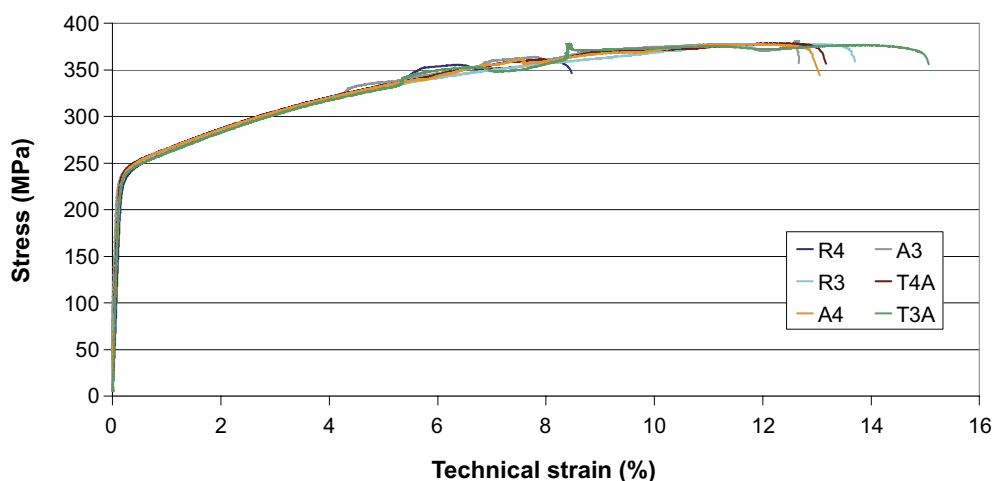
5 Dynamisk deformationsåldring

Ett järn eller stål som är åldringssäkert ska vid en säker temperatur och töjningshastighet inte visa en ökning i kurvan eller puckel för brottgränsens temperaturberoende eller en minskning av brottförlängningen eller sågtandsmönster (serrationer) i dragprovkurvan under dragprovning. Dragprovning av ferritiskt segjärn vid förhöjd temperatur finns redovisat i litteraturen (Yanagisawa och Lui 1983, Lui och Chao 1989) och i en finsk masteruppsats (Pihlajamäki 2017) och de visar sågtandsmönster vid 200–300 °C respektive 300 °C. SKB lät tidigare varmdragprova segjärn vid 125 °C (Martinsson och Larsson 2009). Ojämnheterna i spänning-töjningskurvorna som framgår av figur 5-1 är inte väntade jämfört med slutsatsen i litteraturen att deformationsåldring bara sker i vid temperaturerna 150–350 °C för segjärn.

För SKB:s tidigare mätningar kunde en viss minskning i brottförlängning vid 125 °C jämfört med rumstemperatur enligt tabell 5-1 observeras även om en del kan bero på en lägre töjningshastighet för 125 °C-provningen. För deformationer över 5 procent kan en viss ojämnheter i spänningskurvan noteras i figur 5-1 och en dynamisk deformationsåldringseffekt enligt Portevin och Le Chatelier (1923) kan inte uteslutas.

Tabell 5-1. Hållfasthet för SKB:s segjärn från insats i55 provläge B (prov 2 och 5 respektive R3 och R4) vid 20 °C (SweCast 2007) och 125 °C (Martinsson och Larsson 2009).

Temperatur	Laboratorium	Hastighet	Sträckgräns, $R_{p0,2}$			Brottgräns, R_m			Brottförlängning, A_5		
					Medel			Medel			Medel
20 °C	1 (2007)	$10^{-3}/10^{-2} \text{ s}^{-1}$	273	277	275,0	397	401	399,0	14,7	16,3	15,50
125 °C	2 (2009)	10^{-3} s^{-1}	244	247	245,5	378	379	378,5	13,5	13,0	13,25
Medel			260,3 N/mm ²			388,8 N/mm ²			14,38 %		

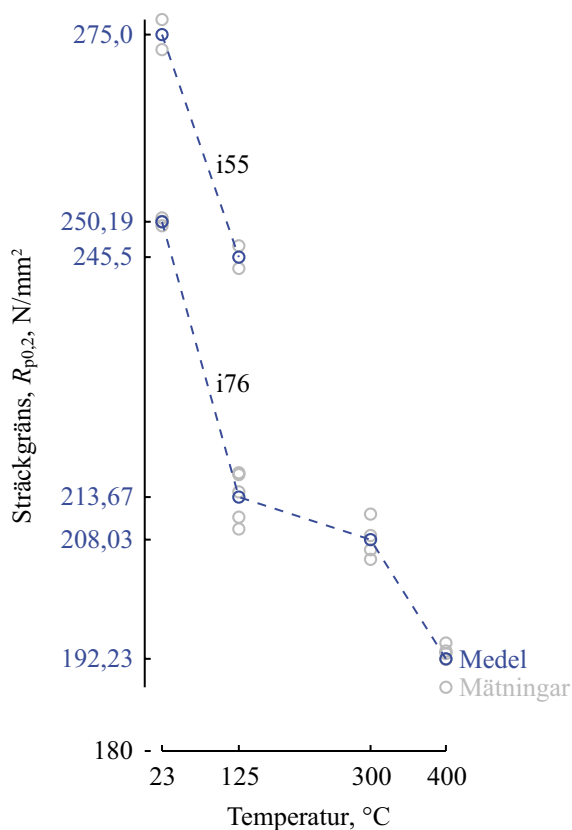


Figur 5-1. Varmdragprov vid 125 °C från provskiva i toppskivan på höjden 4,6 m för segjärnsinsats i55 (Martinsson och Larsson 2009). Provad vid laboratorium 2. Tillstånd från Swerim att publicera diagrammet.

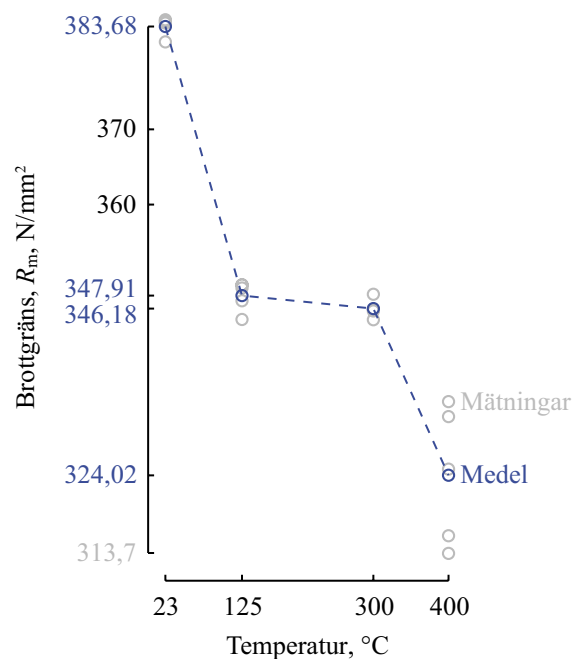
5.1.1 Nya mätningar av hållfasthetsdata, 23–400 °C

Sedan förra redovisningen av SKB (2017) inklusive underlag av Sarnet och Holst (2017) har SKB utfört ytterligare varmdragprovning på segjärn. Segjärnsmaterialet har tagits från två provtillverkade insatser, i57 tillverkad 2007 och i76 tillverkad 2015, se avsnitt 2.3.2.

Segjärnsmaterial från insats i76 dragprovades vid 23 °C, 125 °C, 300 °C och 400 °C. Det provades fyra gånger för var och en av de fyra temperaturerna. Ytterligare två prover togs ut från en av skivorna och möjliggjorde ytterligare en mätning av sträckgräns och brottgräns för 125 °C och 400 °C. Figur 5-2 och figur 5-3 visar som väntat att hållfastheten minskar med ökande temperatur. Minskningen med temperaturen för de äldre i55-sträckgränserna liknar den för i76. Överraskande nog är brottgränsen vid 300 °C nära den för 125 °C på grund av den kraftiga deformationsåldringen vid 300 °C.



Figur 5-2. Sträckgränsens variation med temperaturen för segjärn (insats i76). Provad vid laboratorium 3. Insats i55 provad vid laboratorium 2 (Martinsson och Larsson 2009).

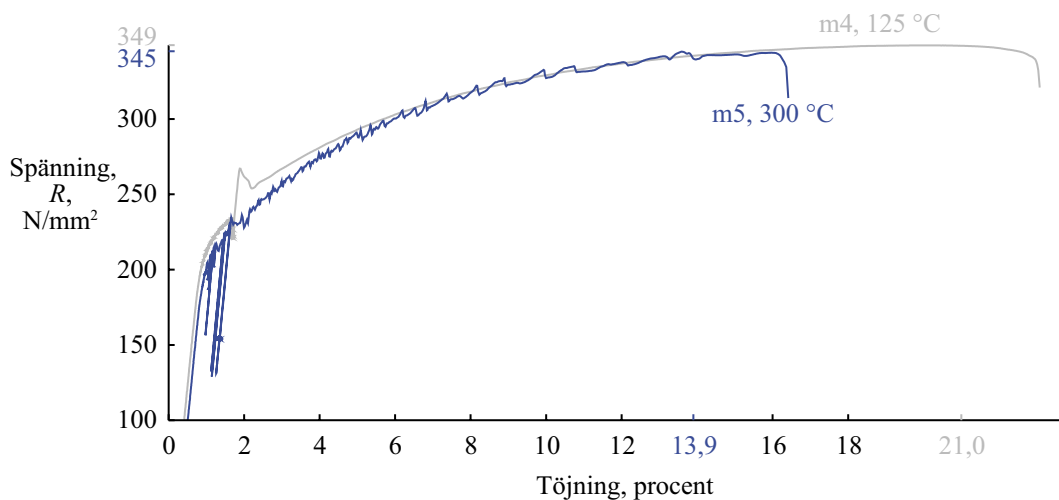


Figur 5-3. Brottgränsens variation med temperaturen för segjärn (insats i76).

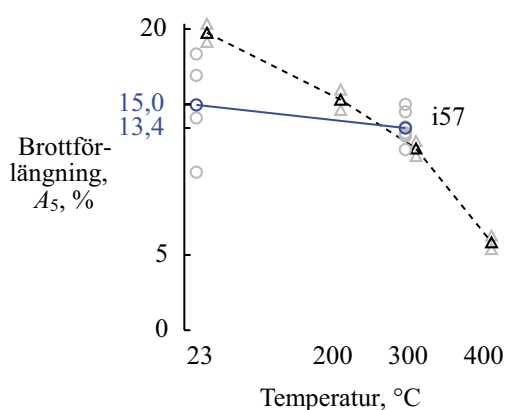
Det framgår av figur 5-4 att segjärnets flytspänning ökar (deformationshårdnar) starkare med töjningen för 300 °C (blå linje) än för samma material vid 125 °C (grå linje). Hårdnandet sammanfaller med en kraftig deformationsåldring vid 300 °C i den ferritiska kristallstrukturen.

Av figur 5-5 och figur 5-6 framgår att segjärnets medelbrottförlängning minskar med ökande temperatur.

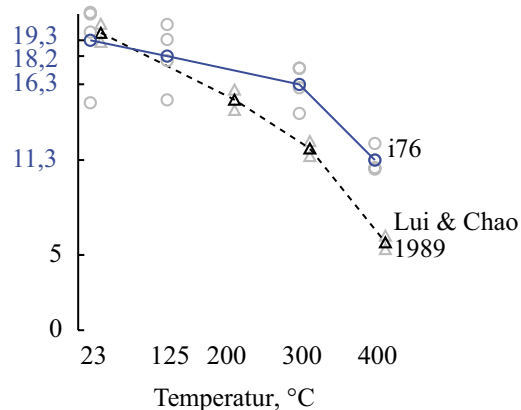
I figur 5-5 och figur 5-6 jämförs brottförlängningsmätningar för SKB:s segjärn utförda av laboratorium 3 med mätningar ur litteraturen. I figuren har mätvärdena flyttats isär något för ökad läsbarhet. Laboratorium 3 mäter betydligt högre brottförlängningar för 300 °C respektive 125–400 °C än Lui och Chao och det kan bero på olika definitioner av förlängningen A eller skillnad i materialstruktur och -defekter. Däremot är mätningarna vid 23 °C lägre, framförallt för insats i57, än för segjärnet som Lui och Chao har undersökt och möjligtvis kan denna skillnad tyda på olika legeringssammansättning eller struktur. Deras gjutgods hade tunnare godstjocklek och detta borde givit snabbare stelningshastighet och en gynnsammare struktur än för SKB:s undersökta segjärnsinsatser.



Figur 5-4. Spännings-töjningskurvor vid 125 och 300 °C. Laboratorium 3.



Figur 5-5. Brottförlängningens variation med temperatur enligt Lui och Chao (1989) och för SKB:s segjärn (insats i57).



Figur 5-6. Brottförlängningens variation med temperatur enligt Lui och Chao (1989) och för SKB:s segjärn (insats i76).

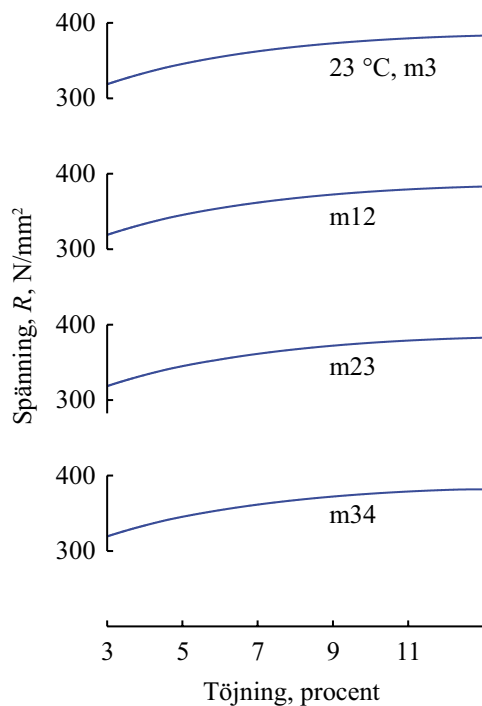
5.1.2 Ojämnheter i kraftkurvan (dragprovkurvan), 23–400 °C

Förutom mätningarna av hållfasthetsdata vid olika temperaturer har dragprovkurvornas jämnhet studerats för att upptäcka ojämnheter som tyder på dynamisk deformationsåldring. Segjärn från insats i76 har dragprovats vid 4 temperaturer. För varje temperatur har 4 dragprov från liknande provposition utförts.

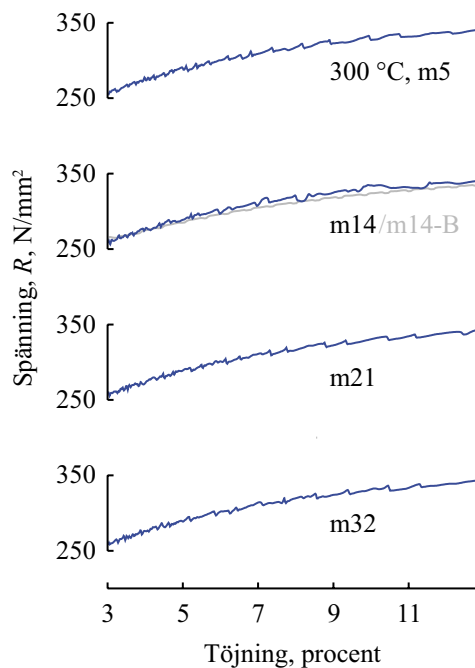
Dragprovkurvorna för segjärn vid 23 och 125 °C i figurerna 5-7 och 5-9 är släta och det finns inga ojämnheter eller oscillationer som tyder på dynamisk deformationsåldring. Vid de högre temperaturerna 300 och 400 °C kan tydliga oscillationer ses i figurerna 5-8 och 5-10. För 125 °C och lägre kan ingen dynamisk deformationsåldring påvisas vid standardprovningens töjningshastighet, $0,007 \text{ s}^{-1}$. För de högre temperaturerna syns oscillationerna som är karakteristiska för Portevin-Le Chantelier-effekten av deformationsåldring tydligt.

Amplituden för oscillationerna är uppskattningsvis 5 N/mm^2 för varmdragprovning vid 300–400 °C.

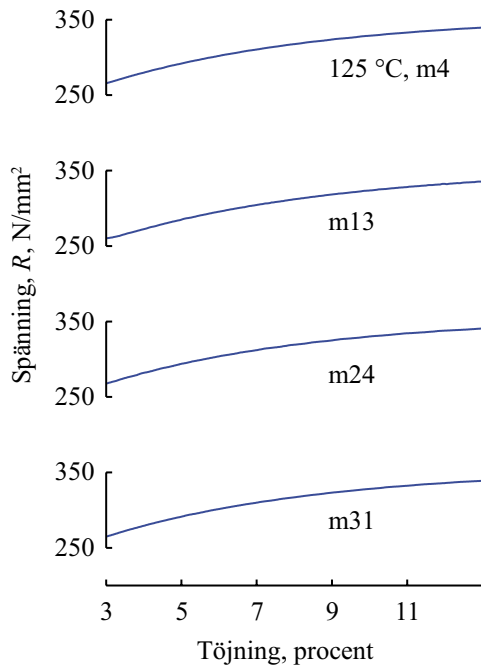
Vid jämförelse med i55 varmdragprovad tidigare kan en skillnad påvisas genom att dragprovkurvan för 125 °C i figur 5-1 visar ojämnheter medan det inte kan ses för insats i76 i figur 5-9. Vid extrem förstoring av kurvorna i figur 5-9 skulle en oscillation med amplituden $0,05 \text{ N/mm}^2$ kunna anas i dragprovkurvan i figur 5-15. Laboratorium 2 redovisar en töjningshastighet på $0,001 \text{ s}^{-1}$ som är jämförbar med de nya provningarna hos laboratorium 3. Skillnaden mellan de tidigare och de i denna undersökning aktuella varmdragprovskurvorna skulle kunna bero på skillnad i provuttag och därav följande skillnader i legeringshalter, till exempel kvävehalt.



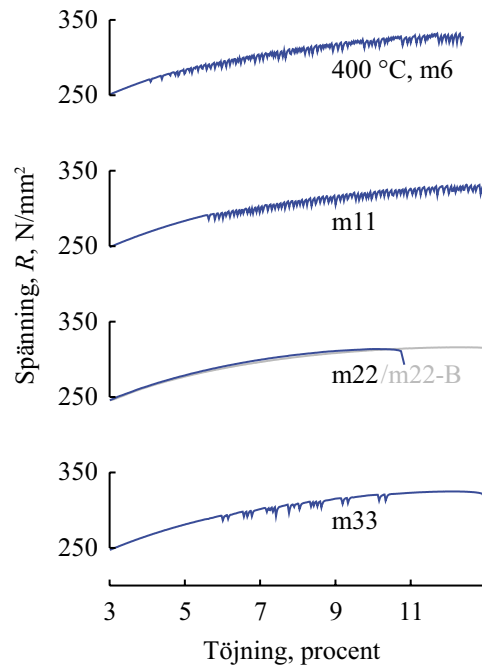
Figur 5-7. Del av dragprovkurva för segjärnsinsats i76 vid rumstemperatur.



Figur 5-8. Del av dragprovkurva för segjärnsinsats i76 vid 300 °C.



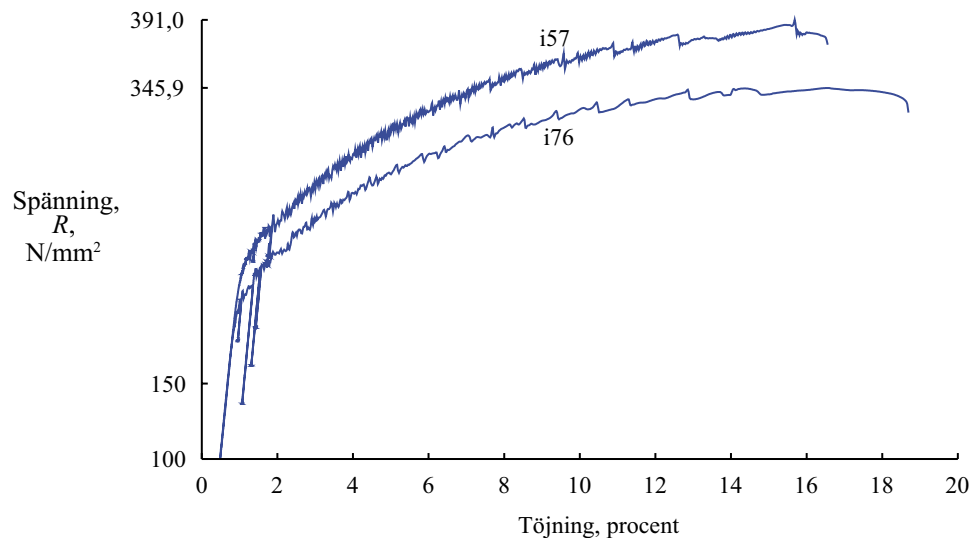
Figur 5-9. Del av dragprovkurva för segjärnsinsats i76 vid 125 °C.



Figur 5-10. Del av dragprovkurva för segjärnsinsats i76 vid 400 °C.

Vid 400 °C krävs en kritisk töjning innan oscillationen startar och för ett prov m22 kan inga oscillationer observeras. I figur B1-4 visas även de inledande delarna av kurvorna som drogs med en lägre töjningshastighet och då uppkommer oscillationer direkt.

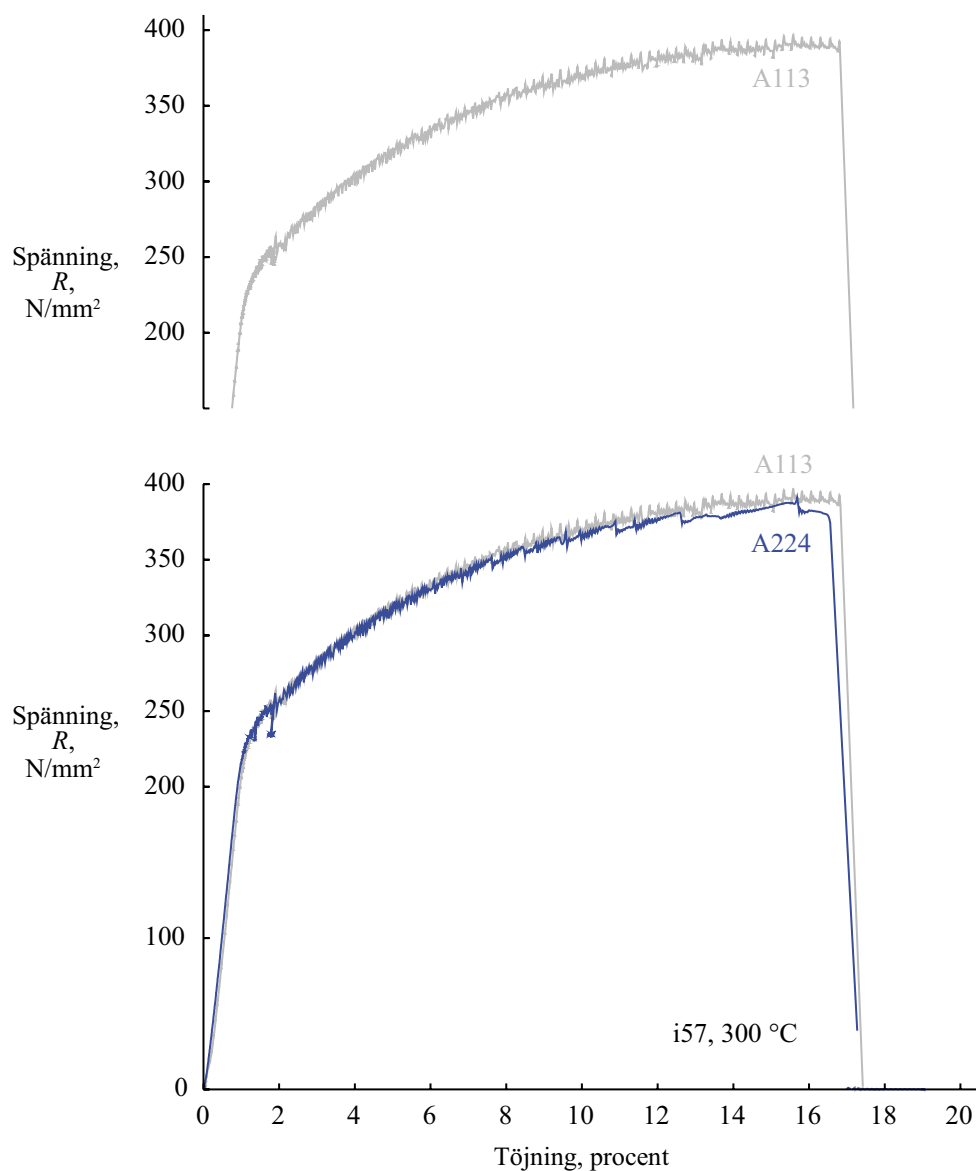
Flytspänningskurvan för i57 i figur 5-11 är generellt högre än den för i76. Materialet för i57 ser också ut att deformationshärda (hårdna) starkare med töjningen. Detta kan bero på den högre halten kisel som redovisas i tidigare tabell 2-1. Men som framgår av figur 5-11 skiljer sig också tecknen för den dynamiska deformationsåldringen med antal och storlek av oscillationer vid varmdragprovning vid en temperatur 300 °C mellan segjärnsinsats i57 och i76. Med det större antalet oscillationer visar i57 den starkaste dynamiska deformationsåldringen. Skillnaden kan bero på skillnader i legeringshalt eller föroreningshalt och kristallstruktur. I medeltal har proverna från i57 48 ppm kväve och från i76 39 ppm kväve.



Figur 5-11. Varmdragprov för segjärnsinsatser i57 och i76 vid 300 °C. Prov m61 och m32.

Material från i57 dragprovades med två olika draghastigheter. Exempel på kurvan vid den lägre hastigheten visas både som överlagd grå kurva mot den blåa för den högre hastigheten och som parallellförflyttad som grå, självständig kurva. Som framgår av figur 5-12 skiljer sig den dynamiska deformationsåldringen till en viss del med antal och storlek av oscillationer vid varmdragprovning vid en temperatur 300 °C mellan en hög draghastighet, A224, $de/dt = 0,007 \text{ s}^{-1}$ och en låg draghastighet, A113, $de/dt = 0,002 \text{ s}^{-1}$.

Trots den lägre draghastigheten är inte (flyt)spänningen lägre för A113 och detta kan bero på ett härdningsbidrag från den dynamiska deformationsåldringen eller att skillnaden mellan den två hastigheterna är för liten för att kunna inverka på flytspänningen.

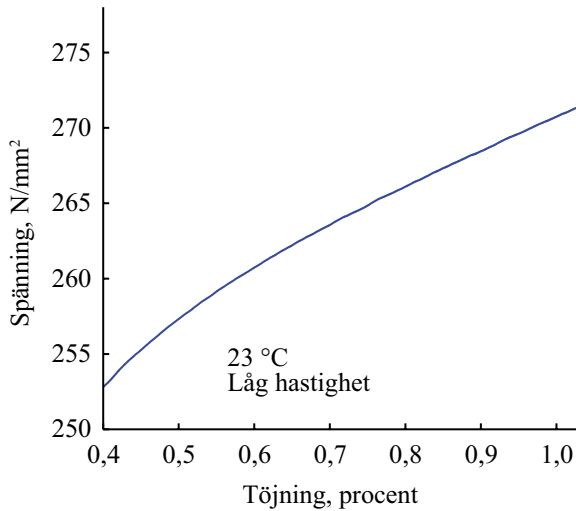


Figur 5-12. Varmdragprov vid 300 °C för segjärn (i57) med två olika draghastigheter A224 (hög) och A113 (låg).

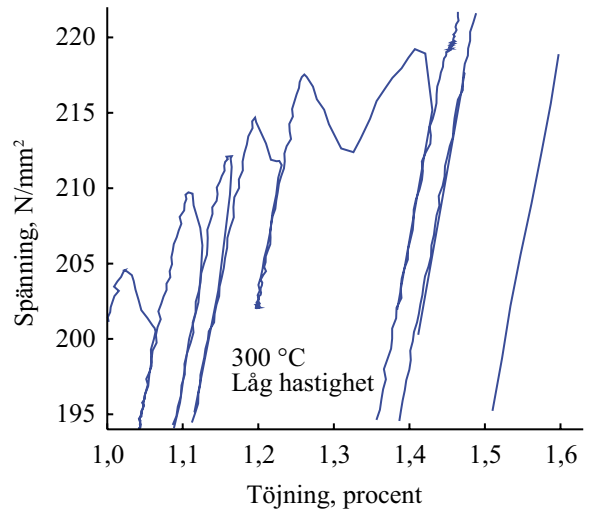
Vid detaljerade utvärderingar av dragprovkurvornas form förstördes skalningen på y-axeln från 10 N/mm² per mm i figurerna 5-7 till 5-9 till 0,5 N/mm² per mm i diagrammen i figur 5-13 till 5-16. Draghastigheten och töjningshastigheten hålls medvetet låga upp till ca 2 % töjning och ökas till en högre nivå därefter. Ingen deformationsåldring är synlig i figur 5-13 vid 23 °C, men betydande deformationsåldring kan ses i figur 5-14 vid 300 °C.

Det är logiskt att det krävs en kritisk töjning för att en dynamisk deformationsåldring ska starta vid 23 °C men ingen provning med låg hastighet för hela dragprovningen har utförts.

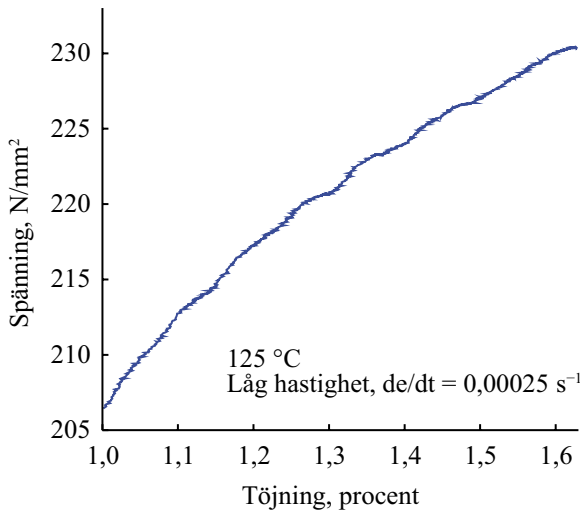
Genom att jämföra de två olika hastigheterna inom en dragprovning för 125 °C enligt A224 kan en mycket liten deformationsåldringseffekt anas i figur 5-15 vid den lägre hastigheten 0,00025 s⁻¹, men vid den högre hastigheten 0,0067 s⁻¹ i figur 5-16 har denna effekt försvunnit.



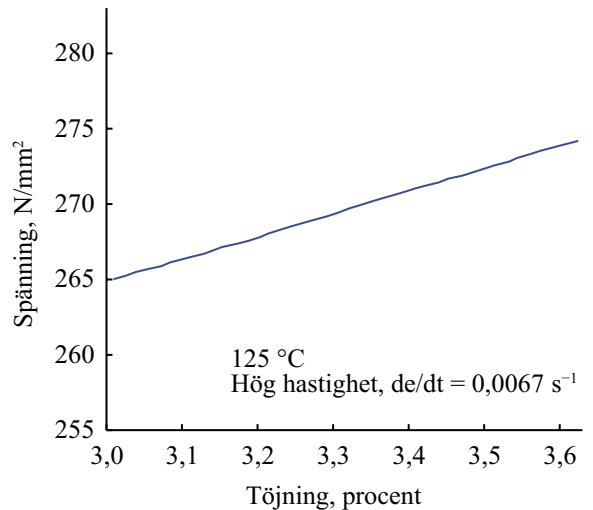
Figur 5-13. Slät dragprovkurva för 23 °C, insats i76, prov m3.



Figur 5-14. Hackig dragprovkurva för 300 °C, i76, m5.



Figur 5-15. Dragprovkurva med vågighet för en låg draghastighet vid 125 °C, insats i76 prov m31.

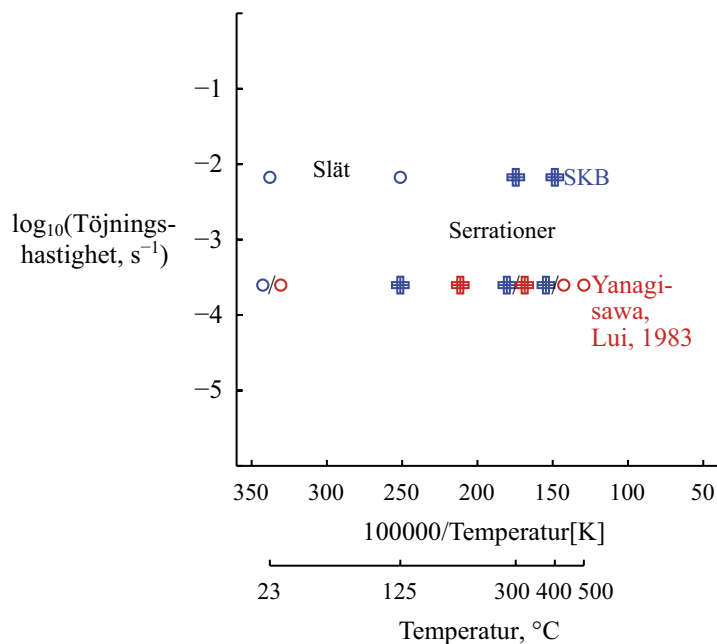


Figur 5-16. Slät dragprovkurva för en högre hastighet vid 125 °C, insats i76 prov m31.

Vid 300 °C för den lägre hastigheten, 10^{-3} s^{-1} , kan den dynamiska deformationsåldringens amplitud uppskattas till storleksordningen 10 N/mm^2 enligt figur 5-14. För den högre hastigheten, 10^{-2} s^{-1} kan den uppskattas till 5 N/mm^2 enligt tidigare figur 5-8.

Vid 125 °C är amplituden mycket mindre och uppskattas till $0,5 \text{ N/mm}^2$ för den låga hastigheten enligt figur 5-15 och uppskattningsvis $0,05 \text{ N/mm}^2$ för den höga hastigheten enligt figur 5-16.

Temperaturens och töjningshastighetens påverkan på oscillationerna har undersökts för stål (Rao med flera 2021). För SKB:s mätningar på segjärn och data från litteraturen visas områdena med dynamisk deformationsåldring med kors i figur 5-17. Med skillnaden i beteende för provning vid 125 °C kan ett samspel mellan temperatur och töjningshastighet anas.



Figur 5-17. Tecken på dynamisk deformationsåldring som funktion av inversen av kelvintemperaturen och den logaritmiska töjningshastigheten i denna rapports mätningar och data från litteraturen.

6 Statisk deformationsåldring

Statisk deformationsåldring med markerad sträckgräns efter deformation och *lagring* är ett fenomen som är känt sedan år 1866 enligt Hultgren (1966). SKB:s mätningar och analys av statisk deformationsåldring för segjärn i denna rapport avsnitt 6.1 kan jämföras med resultaten i en finsk masteruppsats av Björklund (2021) i avsnitt 6.2.

6.1 SKB:s mätningar av statisk deformationsåldring

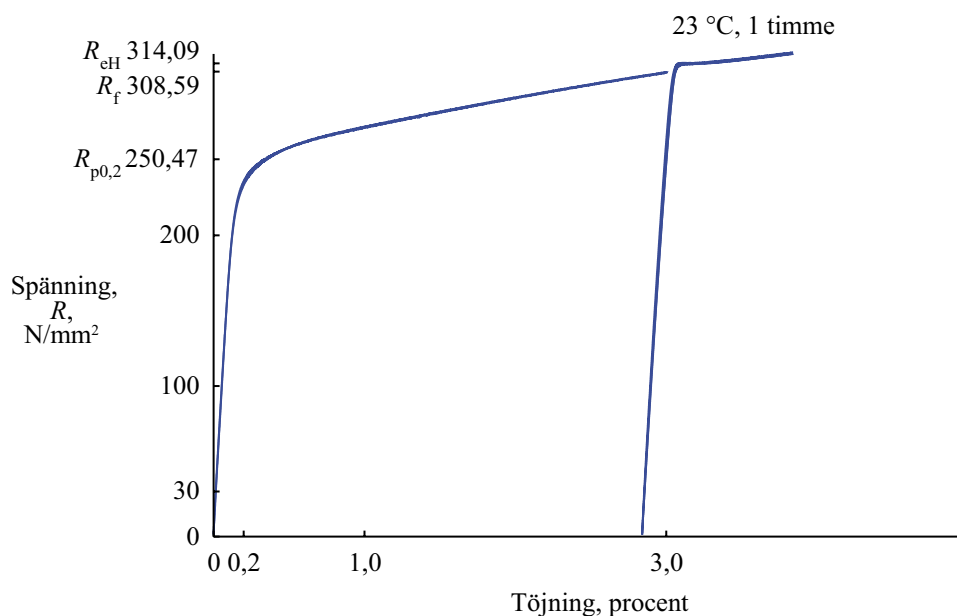
6.1.1 Statisk åldrings inverkan på sträckgräns

Figur 6-1, figur 6-2, figur 6-3 och en tidigare figur 2-11 visar spänning-töjningskurvor för segjärn vid två på varandra följande kraftiga deformationer med mellanliggande lagring (paus) under 1 timme respektive 100 timmar vid rumstemperatur respektive 100 °C. Materialet kommer från segjärnsinsatsen i76 och sträckgränsen för de 12 proverna var i medeltal 250,86 N/mm².

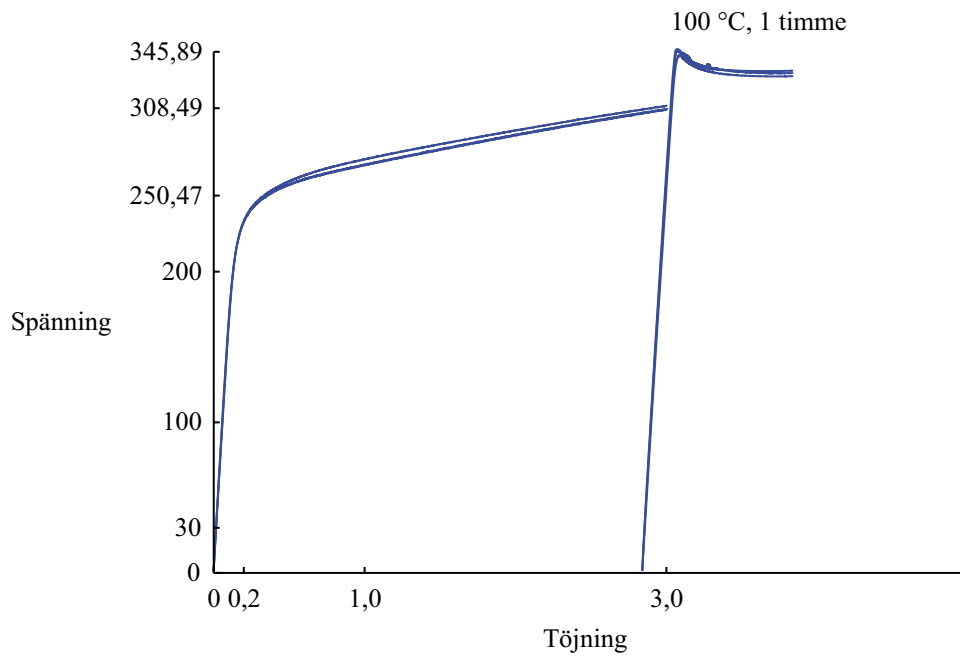
Dragproven fördeformerades till 3 % total deformation för att sedan avlastas och åldras med efterföljande deformation till brott. Som framgår av de tre dragprovkurvorna i figur 6-1 ökar spänningen som krävs för fortsatt deformation, töjning. Efter en paus på 1 timme hade de flytspänningar, $R_{3\%}$, som krävs för fortsatt plastisk deformation ökat i medeltal från 308,59 N/mm² till en markerad sträckgräns, R_{cH} , på 314,09 N/mm² genom den statiska deformationsåldringen.

De markerade sträckgränserna, R_{cH} , **ökar** med åldringstemperaturen och -tiden jämfört med den högsta flytspänningen före åldringen. Ökningen vid 23 °C är en faktor 1,018 för 1 timme och en faktor 1,10 vid 100 timmar.

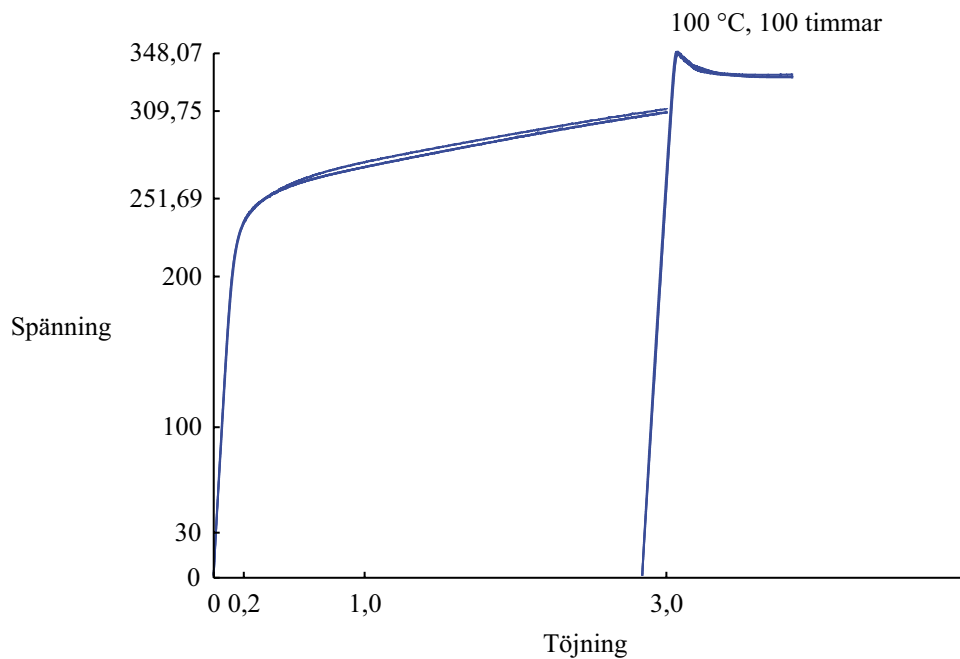
Ökningen vid 100 °C är en faktor 1,12 i praktiken **samma** för tiden 1 timme i figur 6-2 och 100 timmar i figur 6-3.



Figur 6-1. Fördeformation till 3 procent och fortsatt deformation efter 1 timmes åldring vid 23 °C för 3 dragprover från insats i76. Prov m17, m29 och m35.



Figur 6-2. Fördeformation till 3 procent och fortsatt deformation efter 1 timmes åldring vid 100 °C för 3 dragprover från insats i76. Prov m18, m25 och m30.



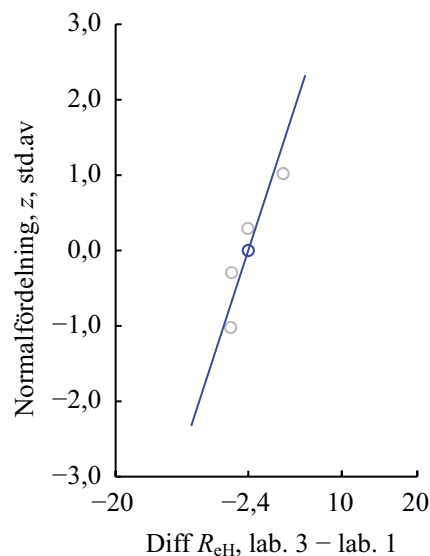
Figur 6-3. Fördeformation till 3 procent och fortsatt deformation efter 100 timmars åldring vid 100 °C för 3 dragprover från insats i76. Prov m19, m26, m27.

Dragprovnings utfördes av laboratorium 3. Vid fyra mätningar av statisk deformationsåldring vid laboratorium 1 ändrades hastigheten under fördeformationen vid 1,6 % töjning kunde bara R_{eH} efter åldring jämföras. Det gick inte att jämföra den relativa ökningen från flytspänningen R_f vid 3,0 % töjning.

Man kan jämföra (kalibrera) mätningarna av R_{eH} för insats i76 vid laboratorium 1 och 3. I tabell 6-1 jämförs mätningar från provläge C eftersom endast dessa dragprovades hos laboratorium 1. I medeltal är mätningarna 2,4 N/mm² lägre för mätningar från laboratorium 3 än de för laboratorium 1. Som framgår av figur 6-4 kan differenserna rimligt passas till en normalfördelning. Förklaringen kan vara att segjärnet har deformationshårdnat mer under fördeformationen hos laboratorium som resultat av den högre deformationshastigheten från 1,6 % till 3,0 %.

Tabell 6-1. Skillnader i mätning av markerad sträckgräns för deformationsåldrat segjärn.

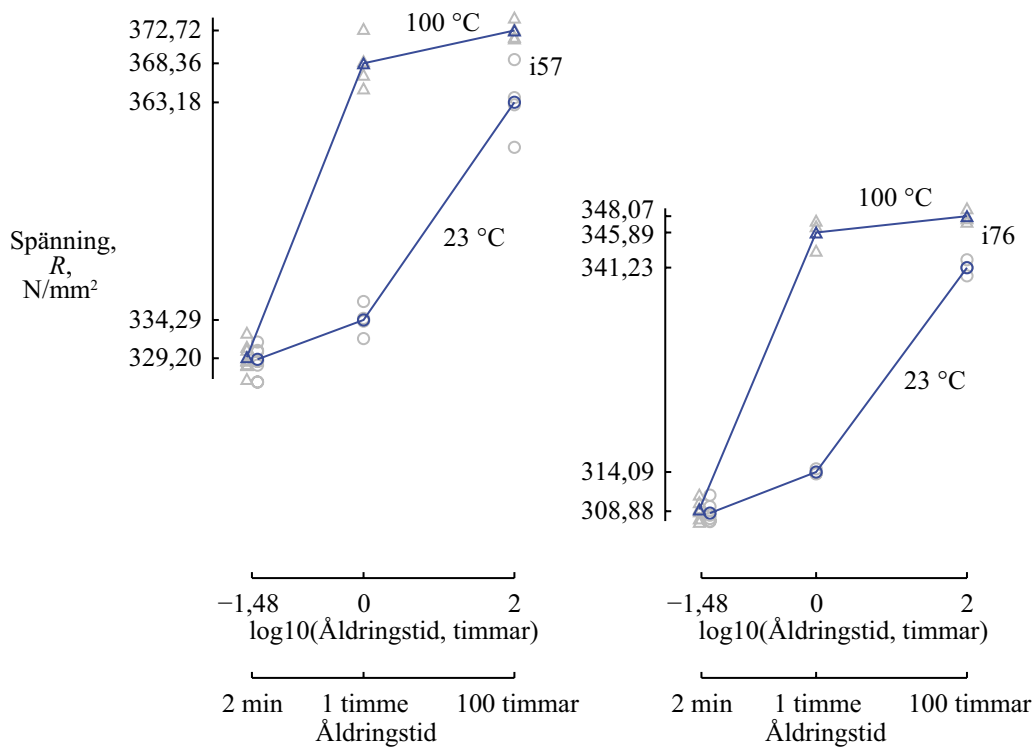
Temp.	Tid	Lab.	ID	R_{eH}	Differens N/mm ²
23 °C	1 h	Lab. 1	k19	312,30	
		Lab. 3	m35	314,52	2,22
23 °C	100 h	Lab. 1	k23	346,91	
		Lab. 3	m36	342,29	-4,62
100 °C	1 h	Lab. 1	k22	349,93	
		Lab. 3	m25	347,47	-2,46
100 °C	100 h	Lab. 1	k20	353,84	
		Lab. 3	m26	349,10	-4,74



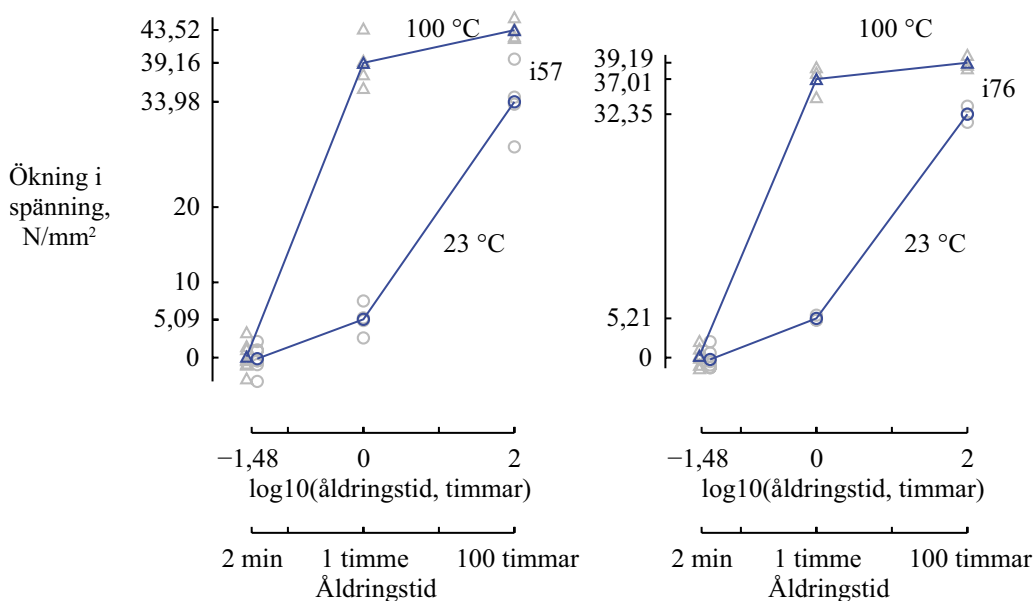
Figur 6-4. Normalfördelningsdiagram för differenserna för mätningar av markerad sträckgräns, R_{eH} , mellan laboratorium 3 och 1.

Spännings-töjningskurvorna för de statistiska deformationsåldringsförsöken för i57 finns i bilaga 2. Segjärnsinsatsen i57 har högre sträckgräns än i76 vid 0,2 % deformation och högre flytspänning vid 3 %. Insatsen i57 har i medeltal flytspänningen 329,20 N/mm² och i76 i medeltal 308,88 N/mm² vid dragprovning. Flytspänningen ökar efter åldring för båda insatserna. Mätningarna av flytspänningarna vid 3 % fördeformation och de markerade sträckgränserna från tidigare figurer 6-1 till 6-3 och liknande har ritats som funktion av åldringstiden. Medelvärdena är förbundna med linjer för bättre läsbarhet. Linjerna påminner om en kinetik för en omvandling men ökningen har inte modellerats. Det framgår i figur 6-5 att segjärnet åldras snabbare vid 100 °C jämfört med vid rumstemperatur, 23 °C.

Uppmätta värden av sträckgränsen för insats i57 är systematiskt högre än för i76. Genom att subtrahera medelvärdena för flytspänningen vid 3 % fördeformation från den markerade sträckgränsen efter åldring kan den absoluta ökningen i markerad sträckgräns beräknas. Figur 6-6 visar att sträckgränsen ökar 40 N/mm² för 100 °C och 100 timmar för båda segjärnsinsatserna och ökningen ser ut att nå ett mättnadsvärde. För 23 °C räcker inte 100 timmar för att nå upp på en plattå. Ökningen är störst för i57 som har den högre legeringssammansättningen. Relativt sett är skillnaden inte stor men även i den relativa jämförelsen ökar sträckgränsen för materialet från i57 mest.



Figur 6-5. Den statistiska deformationsåldringens tidsberoende för 23 °C (cirklar) respektive 100 °C (trianglar) för insats i57 och i76.



Figur 6-6. Differenserna mellan medelvärdena av de markerade sträckgränserna efter åldring och flytspänningarna vid 3 % fördeformation.

För att kunna jämföra och analysera skillnader mellan insatserna normerades åldringseffekten genom att bilda en spänningskvot mellan den markerade sträckgränsen efter åldringen och flytspänningen vid 3 % fördeformation.

Variansanalys (Blom och Holmquist 1998) kan användas för att statistiskt säkerställa eventuella systematiska skillnader i spänningskvot mellan olika åldringstemperaturer, åldringstider, provlängen och insatser. Tabell 6-2 visar att temperatur och tid är faktorerna som styr deformationsåldringen. Inga skillnader i deformationsåldring kan ses utifrån provlängde och material från två olika insatser. Samspelseffekter kan påvisas mellan temperatur och tid och mellan provlängde och insats.

Tabell 6-2. Variansanalysschema för spänningskvoten vid statisk deformationsåldring.

Faktor	Kvadratsumma	Frihetsgrader	Medelkvadratsumma	F-kvot	p-värde	Kommentar
{1} Temperatur	265,902	1	265,902	978,031	0,000	(***) signifikant
{2} Tid	167,562	2	83,781	308,160	0,000	(***) signifikant
{3} Provlänge	0,004	1	0,004	0,015	0,905	inte signifikant
{4} Insats	0,010	1	0,010	0,036	0,852	inte signifikant
Temperatur*Tid	105,155	1	105,155	386,778	0,000	(***) signifikant
Temperatur*Provlänge	0,014	1	0,014	0,050	0,826	inte signifikant
Tid*Provlänge	0,163	1	0,163	0,598	0,454	inte signifikant
Temperatur*Insats	0,497	1	0,497	1,826	0,201	inte signifikant
Tid*Insats	0,095	1	0,095	0,349	0,566	inte signifikant
Provlänge*Insats	1,626	1	1,626	5,981	0,031	(*) signifikant
Temperatur*Tid*Provlänge	0,195	1	0,195	0,718	0,413	inte signifikant
Temperatur*Tid*Insats	0,796	1	0,796	2,927	0,113	inte signifikant
Temperatur*Provlänge*Insats	0,319	1	0,319	1,172	0,300	inte signifikant
Tid*Provlänge*Insats	0,323	1	0,323	1,189	0,297	inte signifikant
Temperatur*Tid*Provlänge*Insats	0,603	1	0,603	2,219	0,162	inte signifikant
Rest	3,262	12	0,272			
Total	546,526	28	19,519			

6.1.2 Statisk åldrings inverkan på brottgräns

För segjärns materialet från insatsen i76 finns flera mätningar från år 2019 både före och efter åldring utförda av laboratorium 3. Av tabell 6-3 framgår att medelvärdena av brottgränsen ökar med åldring vid 23 °C eller 100 °C. Förbättringen av brottgräns är ytterligare något större om bara prov som åldrats vid 100 °C tas med i medelvärdesberäkningen. Ökningen av R_m är dock mindre än ökningen i $R_{p0,2}$.

Tabell 6-3. Brottgränsmätningar för insats i76, N/mm².

Materialtillstånd	Höjd	Brottgränsmätningar i76, R_m , N/mm ²								Medel
		Provlänge, A/C								
		A				C				
		1	10	6	15	3	4	12	13	
Gjutet	2,31 m		381,1		385,5		385,2		385,5	
	2,34 m	380,2		386,4		383,2		371,3		
	Medel		383,29				381,31			382,30
Gjutet, deformerad 3 %, åldrat i 23–100 °C	2,38 m	384,6	389,3	391,1	385,5		382,4		389,1	
	2,42 m	393,0	385,4	386,8	387,1		384,6		366,9	
	Medel		387,85				380,76			385,48
Gjutet, deformerad 3 %, åldrat i 100 °C	2,38 m		389,3	391,1			382,4		389,1	
	2,42 m	393,0			387,1					
	Medel		390,11				385,77			388,66

Formella variansanalyser som i tabell 6-4 för alla prover åldrade 23–100 °C och tabell 6-5 för prover åldrade 100 °C kan dock bara påvisa (signifikant) skillnad i brottgräns för prover åldrade i 100 °C mot gjutna prover som inte åldrats. Medelbrottgärnsen i tabell 6-3 varierar mellan provlägena A och C men ingen systematisk skillnad kan påvisas med variansanalyserna i tabell 6-4 eller tabell 6-5.

Tabell 6-4. Variansanalysschema för brottgränsmätningar 23–100 °C.

Faktor	Kvadratsumma	Frihetsgrader	Medelkvadratsumma	F-kvot	p-värde	Kommentar
Gjutstruktur/åldrad	18,29	1	18,29	0,576	0,459	inte signifikant
Provläge: A/C	94,02	1	94,02	2,960	0,105	inte signifikant
Samspel	29,84	1	29,84	0,940	0,347	inte signifikant
Rest	508,15	16	31,76	-		
Total	650,29	19	34,23			

Tabell 6-5. Variansanalysschema för brottgränsmätningar 100 °C.

Faktor	Kvadratsumma	Frihetsgrader	Medelkvadratsumma	F-kvot	p-värde	Kommentar
Gjutstruktur/åldrad	138,72	1	138,72	6,722	0,027	(**) signifikant
Provläge: A/C	28,50	1	28,50	1,381	0,267	inte signifikant
Samspel	4,46	1	4,46	0,216	0,652	inte signifikant
Rest	206,36	10	20,64	-		
Total	378,03	13	29,08			

För fyra brottgränsmätningar vid laboratorium 1 minskar brottgränsen med åldringen som visas i tabell 6-6.

Tabell 6-6. Brottgränsmätningar för insats i76, N/mm².

R_m , N/mm ²	i76, provläge C, lab. 1				Medel	R_m , N/mm ²	i76, provläge C, lab. 1			Medel
	3	4	12	13			1 h	100 h	12	
Gjuten						Åldrad				
2,31 m	384,5		386,8			23 °C	2,38 m	380	2,42 m	355
2,34 m		385,1		363,9		100 °C	2,42 m	360	2,38 m	357
Medel	384,82		375,35		380,09	Medel	370,0		356,0	363,0

6.1.3 Statisk åldringens inverkan på brottförlängningen

För fyra brottförlängningsmätningar vid laboratorium 1 minskar brottförlängningen med åldringen som visas i tabell 6-7.

Tabell 6-7. Brottförlängningsmätningar vid laboratorium 1 år 2019 av gjutna och statistiskt deformationsåldrade dragprover från insats i76.

A_s , %	i76, provläge C, lab. 1				Medel	A_s , %	i76, provläge C, lab. 1			Medel
	3	4	12	13			1 h	100 h	12	
Gjuten						Åldrad				
2,31 m	14,7		16,2			23 °C	2,38 m	11,7	2,42 m	8,80
2,34 m		15,5		7,5		100 °C	2,42 m	9,4	2,38 m	7,90
Medel	15,10		11,87		13,49	Medel	10,55		8,35	9,45

För mätningarna i tabell 6-8 av brottförlängningen kan ingen systematisk skillnad mellan obehandlat segjärn och segjärn som åldrats vid 23 °C eller 100 °C påvisas.

Tabell 6-8. Brottförlängningsmätningar vid laboratorium 3 för insats i76, %.

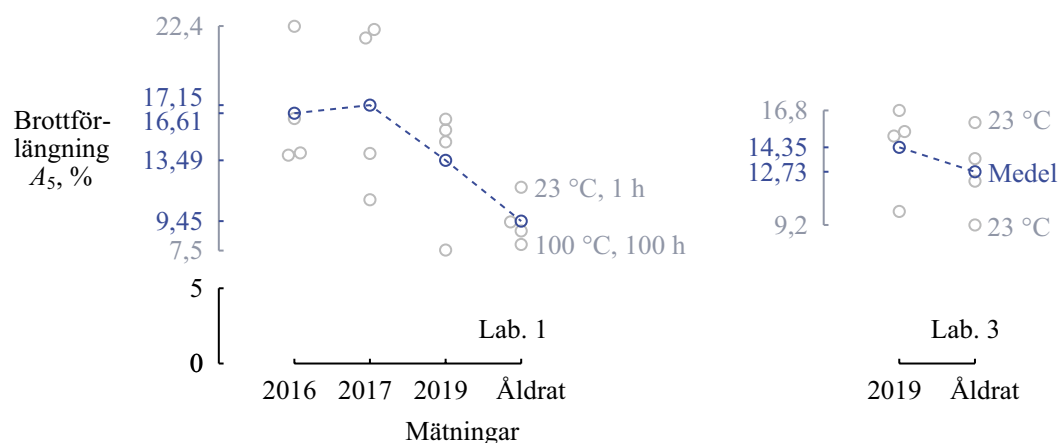
Materialtillstånd	Höjd	Brottförlängningsmätningar i76, A ₅ , %								Medel
		Provläge, A/C								
		A				C				
		1	10	6	15	3	4	12	13	
Gjutet	2,31 m		15,1		24,5		16,8		15,1	
	2,34 m	13,8		26,3		15,4		10,1		
	Medel		19,93				14,35			17,14
Gjutet, deformerad 3 %, åldrat vid 23–100 °C	2,38 m	15,7	20,5	17,8	22,4		12,1		13,6	
	2,42 m	22,3	16,3	25,1	22,3		16,0		9,2	
	Medel		20,30				12,73			17,78
Gjutet, deformerad 3 %, åldrat vid 100 °C	2,38 m		20,5	17,8			12,1		13,6	
	2,42 m	22,3			22,3					
	Medel		20,73				12,85			18,1

Medelbrottförlängningen i tabell 6-8 varierar mellan provlägena A och C och en systematisk signifikant skillnad kan påvisas med variansanalysen i tabell 6-9.

Tabell 6-9. Variansanalyschema för brottförlängningsmätningar vid laboratorium 3, 23–100 °C.

Faktor	Kvadratsumma	Frihetsgrader	Medelkvadratsumma	F-kvot	p-värde	Kommentar
Provläge	221,45	2	110,72	7,641	0,004	(**) signifikant
Gjutstruktur/åldrad	1,08	1	1,08	0,075	0,787	inte signifikant
Samspel	4,57	1	4,57	0,315	0,581	inte signifikant
Rest	275,32	19	14,49	-		
Total	502,42	23	21,84			

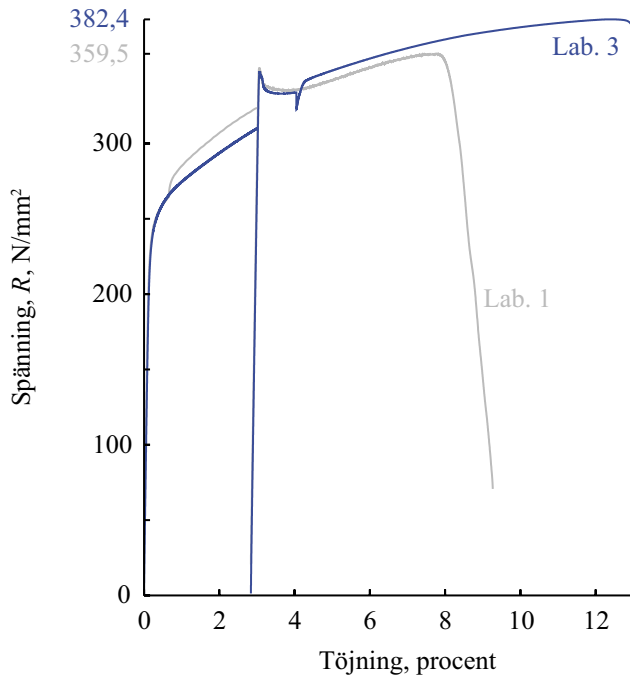
Som framgår av figur 6-7 är mätningarna av brottförlängningarna efter statisk deformationsåldring lägre. Baserat på jämförelse mellan fyra prover före och fyra prover efter statisk deformationsåldring sjunker brottförlängningen från 13,5 % till 9,5 % vid laboratorium 1 respektive 14,4 % till 12,7 % vid laboratorium 3.



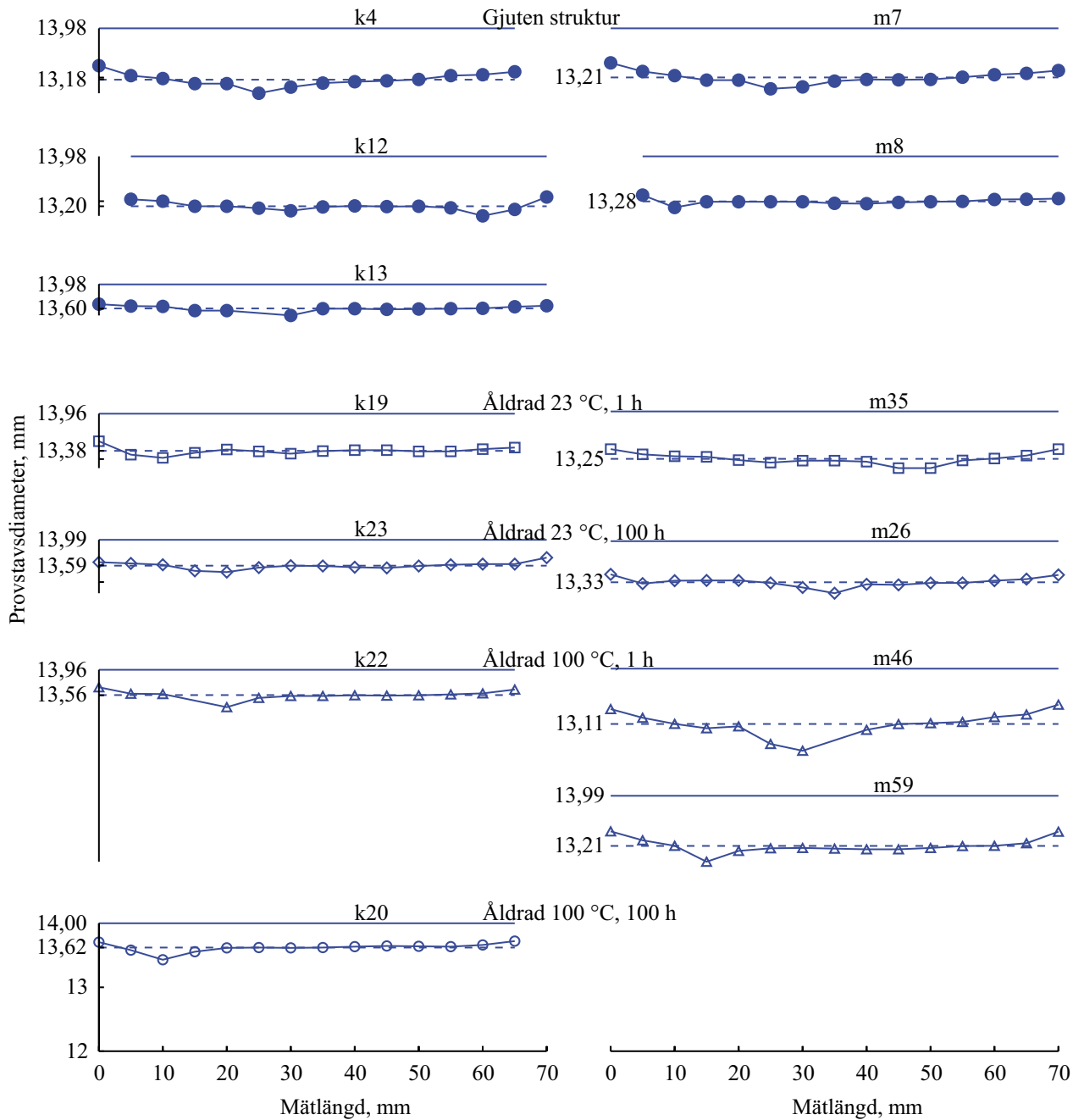
Figur 6-7. Brottförlängningar vid laboratorium 1 och 3 före och efter statisk deformationsåldring.

För liknande dragprov ur samma segjärnsmaterial jämförs mätningar av statisk deformationsåldring i figur 6-8. Laboratorium 1 (grå kurva) mäter lägre brottgränser och brottförlängningar jämfört med laboratorium 3 (blå kurva). Det kraftigare deformationshårdnandet för provning vid laboratorium 1 på grund av höjning av draghastighet vid 0,6 % töjning kan bidra till en minskning av töjbarhet.

Antalet mätningar av brottförlängningen vid laboratorium 1 är begränsat till fyra och figur 6-7 och figur 6-8 visar på en skillnad mellan laboratorierna 1 och 3. För att överpröva att förlängningarna inte hade mätts på olika sätt i samband med dragprovningen mättes också minskningen i diameter från originaldiametern d_0 till diametern d_u för att beräkna den likformiga förlängningen e under det att volymkonstans antogs. Deformationen av provstavarna har enligt figur 6-9 skett relativt likformigt och visar på rimligheten att använda medeldiametern efter dragprovning som diametern d_u .

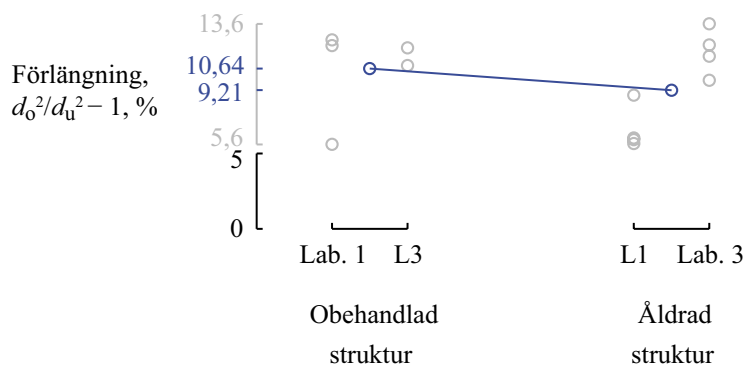


Figur 6-8. Skillnad i dragprovkurvor för liknande dragprovstavar 4 och 3, i samma provläge, C med fördeformation till 3 procent och dragning till brott efter statisk deformationsåldring vid 100 °C i 100 timmar. Prov k22, lab. 1 och m25, lab. 3.



Figur 6-9. Diametermätningar av dragprovens mätlängd för statistiska deformationsförsök.

Av figur 6-10 framgår att endast en marginell minskning av medelbrottförlängningen mellan alla mätningar för obehandlad struktur respektive åldrad struktur.



Figur 6-10. Minskning i förlängning för gjuten struktur vid åldring.

6.2 Sammanfattning av Björklund (2021)

Töjbarheten (brottförlängningen) skulle kunna minska vid statisk deformationsåldring. I en masteruppsats studerar Björklund (2021) statisk åldring för ett ferritiskt segjärn och diskuterar en sådan minskning. Tabell 6-10 redovisar uppsatsens faktorer och responser. Studien adderar dock inte fördeformation till deformation efter åldring. Att brottförlängningen minskar något vid statisk deformationsåldring motiveras i den finska studien genom jämförelse av en (1) mätning av brottförlängningen före statisk deformationsåldring på 12,5 % med medelvärdet 8,92 % för summan av fördeformationen och efterdeformation för 20 mätningar. I den finska studien undersöktes inverkan av flera faktorer på den statistiska deformationsåldringen. Ingen av faktorerna fördeformation, åldringstemperatur och åldringstid kan visas systematiskt påverka den totala brottförlängningen mer än någon annan faktor. Ökas fördeformationen minskar efterdeformationen. Som framgår av tabell 6-10 är den totala brottförlängningen snarare konstant för de prover som åldrats.

Tabell 6-10. Resultat av försök för statisk åldring (Björklund 2021).

ID	T °C	Tid tim	R_p N/mm ²	Fördeformation %	R_m N/mm ²	Förlängning %	Total brottförlängning %
2	25	2106	311	1	364	8,4	9,40
3	25	2106	336	2	376	10,1	12,10
4	25	2106	353	3	377	7,6	10,60
12	100	24	323	1	373	8	9,00
5	100	263	322	1	Defekt (322)	Defekt (0,24)	Defekt (1,24)
13	100	24	344	2	364	5,5	7,50
6	100	263	344	2	379	7,4	9,40
15	100	24	364	3	383	7	10,00
7	100	263	363	3	376	5,4	8,40
16	200	24	323	1	367	7,1	8,10
8	200	263	321	1	367	7,1	8,10
17	200	24	345	2	383	9,2	11,20
9	200	263	342	2	374	6,9	8,90
18	200	24	363	3	370	4,5	7,50
10	200	263	362	3	380	5,5	8,50
11	300	24	318	1	365	6,2	7,20
14	300	24	337	2	371	6,3	8,30
19	300	24	352	3	374	5,4	8,40
20	400	24	304	1	370	9,6	10,60
21	400	24	317	2	365	6,4	8,40
22	400	24	331	3	354	3,8	6,80
Medel			336,9		371,6	6,87	8,92

En multipel regression på datan i tabell 6-10 har utförts av SKB i statistikmjukvaran Statistica. Dragprovstav ID 5 uppvisade starkt avvikande låg brottgräns och brottförlängning och i masteruppsatsen konstaterades att orsaken var gjutdefekter. Provets resultat och materialundersökningen av detta är intressanta i sig men bidrar inte till beskrivningen av den statistiska åldringen och har därför utelämnats i den multipla regressionen. Responserna brottförlängningen A har passats till faktorerna fördeformation, åldringstemperatur och åldringstid. Exempel på passningskoefficienter, b , ges i tabell 6-11. Transformationer av faktorerna som övervägts är $\log_{10}(\text{deformation})$, $1/\text{Temperatur(K)}$ och $\log_{10}(\text{tid})$. Som framgår av tabell 6-11 kunde ingen faktor eller transformerad faktor formellt visas ha en säkerställd regressionsfaktor (p-värde $< 0,05$).

Tabell 6-11. Multipel regression för den totala brottförlängningen i temperaturområdet 23–200 °C.

N = 14 Regression Summary for Dependent Variable: Agttot (Ville -200 °C)						
R = ,60397087 R ² = ,36478081 Adjusted R ² = ,17421505						
F(3,10) = 1,9142 p < ,19127 Std.Error of estimate: 1,2488						
	b*	Std.Err.	b	Std.Err.	t(10)	p-värde
logDef	0,150262	0,253170	1,0425	1,756	0,593523	0,566 inte signifikant
1/TK	0,131064	0,460024	365,4228	1282,599	0,284908	0,782 inte signifikant
Tid	0,474552	0,460198	0,0008	0,001	1,031192	0,327

7 Diskussion

7.1 Allmänt

Segjärn är det gjutjärn som har den högsta åldringsbeständigheten mot åldringsfenomen som blåsprödhet (dynamisk deformationsåldring). Dragprovning vid rumstemperatur av SKB:s segjärn har inte visat någon markerad sträckgräns eller sågtandsmönster i dragprovkurvan vid rumstemperatur vilket hade varit ett utslag av åldringsbenägenhet. Eftersom det fanns litteratur som visade att dynamisk deformationsåldring uppträder för segjärn vid temperaturer över 200 °C och att sågtandsmönster (eng. serration) i flytspänningskurvan möjligen kunde påvisas för högre temperaturer utfördes dragprov-mätningar för att utvärdera kallåldring, statisk deformationsåldring och blåsprödhet.

Den slumpmässiga variationen mellan prover som utsatts för samma försöksförhållanden är relativt låg. Som väntat är inom-variationen för sträckgränsmätningar mycket låg. Töjbarheten som mäts som brottförlängning varierar mer än sträckgräns och brottgräns.

Åldring beror på inlösta ämnen vars atomer interagerar med metallkornens deformation och både ämnenas (kol och kväve) diffusion och metallens deformation är temperaturaktiverade. De kemiska sammansättningarna finns analyserade från några prover i denna rapport. Kvävehalten skiljer något mellan insatserna. Insatsen i57 har i medeltal 48 ppm kväve och i76 har i medeltal 39 ppm kväve. Kväves inverkan på draghållfastheten undersöktes av Muhmond, Tadesse och Fredriksson (2019) genom att segjärnsprovstycken enligt SS-EN 1563 göts med kvävehalter 40–90 ppm och dragprovades. Teoretiskt kan kvävet bilda partiklar som komplexa magnesiumnitrider som ger ett härdningsbidrag till materialet och svavel och syre kan påverka grafitens form. Partiklarna kan fungera som sprickinitiering och därmed försämra mekaniska egenskaper, men detta är inget fenomen som förändras över tid. Fritt löst kväve skulle kunna ge åldringseffekter. Överraskande nog sjönk såväl sträckgräns, brottgräns som brottförlängning något med kvävehalten när de mätte hållfastheten för prover vid tre nivåer av kvävehalter 30–40 ppm, 60–65 ppm och 75–90 ppm. Men högre halter behövs för att kväve ska härda genom ökad perlit (Stefanescu 2017) eller nitrider. Med detta försök och i detta intervall kunde inget samband mellan kvävehalt och åldring påvisas.

7.2 Kallåldring

De aktuella dragprovningmätningarna på SKB:s segjärn antyder en svag kallåldring som avtar med tiden mellan mättillfällena (överåldring). Effekten av den övergående kallåldringen efter gjutning är att materialet blir mindre sprött.

Segjärnsinsatsen i57:s sträckgräns kan formellt visas minska mellan provningstillfällena 2007 och 2019. Brottgräns och brottförlängningen tycks öka mellan 2007 och 2019. Man kan inte utesluta en övergående kallåldring eller avspänning av segjärnsinsatsen. Laboratorium 1 som utfört dragprovningarna har påpekat att de har utförts på olika sätt, spänningsstyrt (2007) respektive töjningsstyrt (2015 och senare). Detta skulle kunna i tillägg till eventuell kallåldring medföra att mätningarna skiljer sig åt systematiskt. Liknande mätningar av hållfasthet och töjbarhet för insats i76 2015, 2016 och 2019 visar däremot en viss minskning av brottgräns och brottförlängning mellan mättillfällena. Medelvärdena skiljer sig åt mellan de provskivor som tagits ut för att utvärdera kallåldring och för i57 kan en svag kallåldring fastställas.

7.3 Dynamisk deformationsåldring

7.3.1 SKB:s mätningar

Vid 23 °C kan ingen dynamisk deformationsåldring påvisas för segjärnsinsats i76. Vid de högre temperaturerna 300 och 400 °C syns oscillationerna som är karakteristiska för Portevin-Le Chatelier-effekten av deformationsåldring tydligt. Vid 125 °C är åldringseffekten mycket liten och knappt detekterbar ens vid den lägre deformationshastigheten, 0,00025 s⁻¹. Vid jämförelse med den tidigare av laboratorium 2 varmdragprovade insatsen i55 kan en dynamisk deformationsåldring tolkas in genom att dragprovkurvan för 125 °C i figur 5-1 visar ojämnheter. Deformationshastigheten var låg vid provningen vid 125 °C. Oscillationer kan inte ses för insats i76 i figur 5-9 eller figur 5-16. Endast små oscillationer kan anas för den låga hastigheten i figur 5-15.

Den dynamiska deformationsåldringen skiljer sig med antal och storlek av oscillationer vid varmdragprovning vid en temperatur 300 °C mellan segjärnsinsats i57 och i76. Trots det begränsade materialet kan mätningarna tyda på att i57 visar den starkaste dynamiska deformationsåldringen. Skillnaden skulle kunna bero på skillnad i provuttag eller legeringshalter, till exempel kvävehalt.

7.3.2 Resultat från Pihlajamäki (2017)

Pihlajamäki observerade en dynamisk deformationsåldringseffekt enligt Portevin och Le Chatelier. Pihlajamäki refererar i sin masteruppsats (2017) till Lui och Chao (1989) där man observerar en minskning av brottförlängningen vid dragprovning av segjärn vid förhöjd temperatur. Från de mätningar på segjärn som redovisas av Lui och Chao kan man se en mätbar minskning av brottförlängningen om temperaturen ökas till 200 °C. Pihlajamäki redovisade däremot inte mätningar av brottförlängningen (engelska: elongation) eller kontraktionen som funktion av temperaturen.

7.3.3 Förväntad effekt av dynamisk deformationsåldring för segjärn i slutförvaret

Eftersom segjärnsinsatsens temperatur inte kommer att överstiga cirka 110 °C i ett planerat slutförvar (Ikonen 2020) och att deformationshastigheten är hög (Jonsson med flera 2018) kan ingen dynamisk deformationsåldring förväntas vid en skjuvdeformation av kapseln.

7.4 Statisk deformationsåldring

7.4.1 SKB:s mätningar

Resultaten i denna rapport visar att åldringstemperatur och åldringstid är faktorerna som påverkar sträckgränsen genom den statiska deformationsåldringen. Sträckgränsen ökar och förändras kvalitativt från en mjuk övergång mellan elastisk och plastisk deformation till en markerad sträckgräns. De två segjärnsinsatser som undersöktes i denna rapport hade olika hållfasthet och därför normerades åldringseffekten genom att relatera den markerade sträckgränsen till segjärnets flytgräns vid 3 % fördeformation. Som väntat är det faktorerna åldringstemperatur och åldringstid som ger effekt på den statiska deformationsåldringen. Inga skillnader i deformationsåldring kan ses utifrån provläge och material från två olika insatser. Samspelseffekter kan påvisas mellan temperatur och tid och från provläge och insats.

SKB:s mätningar som redovisas ovan i avsnitt 6.1.3 visar en liten minskning av brottförlängning med åldring (även om det statistiska underlaget från laboratorium 1 är begränsat). Det är noterbart att laboratorium 1 mäter systematiskt lägre brottförlängningar, i medeltal 9,5 % brottförlängning mot laboratorium 3:s 12,7 %. Åldrade prover från båda insatserna i57 och i76 visar goda brottförlängningar i nivå med riktvärdena i materialstandarderna (SS-EN 1563:2018).

7.4.2 Resultat från Björklund (2021)

Töjbarheten (brottförlängningen) skulle kunna minska vid statisk deformationsåldring. Den finska studien redovisar en sådan minskning. Studien adderar dock inte fördeformation till deformation efter åldring. Att brottförlängningen minskar något vid statisk deformationsåldring stöds i den finska studien bara genom jämförelse mellan en (1) mätning av brottförlängningen före statisk deformationsåldring

med 27 mätningar för efterdeformation. Mätvärdet sjunker från 12,5 % till ett medelvärde på 8,92 %. Den finska studien undersöker inverkan av flera faktorer på den statiska deformationsåldringen. Ingen av faktorerna fördeformation, åldringstemperatur och åldringstid kan visas systematiskt påverka den totala brottförlängningen mer än någon annan faktor. Ökas fördeformationen minskar efterdeformationen. Den totala brottförlängningen är snarare konstant för de prover som åldrats.

7.4.3 Förväntad effekt av statisk deformationsåldring för segjärn i slutförvaret

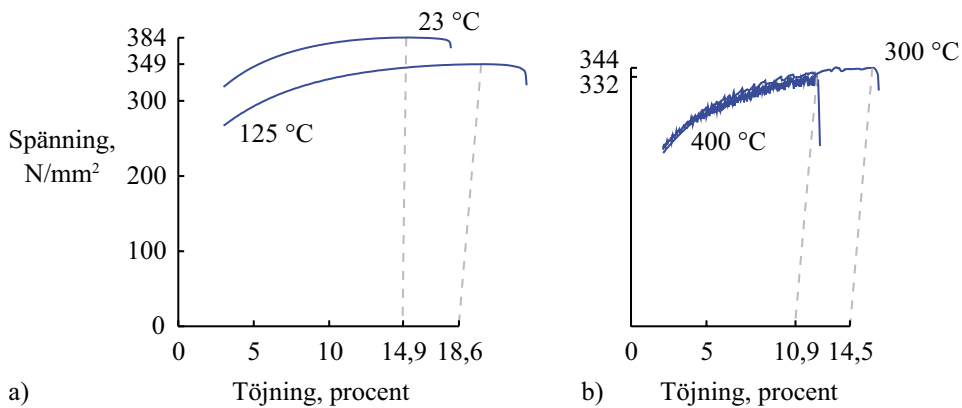
Statisk deformationsåldring är möjlig för segjärnet men inte trolig i slutförvaret. Det skulle krävas två på varandra följande stora deformationer på grund av jordbävningar om en kapsel oavsiktligt deponerats i en olämplig position i förvaret. Men stora jordbävningar är mycket sällsynta vilket medför att ingen statisk deformationsåldring förväntas. Om segjärnet skulle deformationsåldras i slutförvaret skulle ändå en tillräcklig töjbarhet kvarstå i förhållande till töjningarna i insatsen (Jonsson med flera 2018).

8 Slutsatser

Vid mätningar av draghållfastheten för ferritiskt segjärn vid rumstemperatur eller en trolig eller möjlig temperatur i ett framtida slutförvar kan få tecken på dynamisk åldring observeras. Däremot ger provningen en indikation på en avtagande kallåldring. Statisk deformationsåldring kan observeras redan vid rumstemperatur men förutsätter en kraftig fördeformation för att uppkomma.

Möjligtvis kan en försumbar och avtagande kallåldring (överåldring) observeras för långa tider mellan mätningar. Man kan inte utesluta en övergående kallåldring eller avspänning av segjärnsinsatsen som förmodligen kommer att höja insatsens töjbarhet och seghet.

Vid rumstemperatur kan ingen dynamisk deformationsåldring observeras. Däremot kan en tydlig deformationsåldring som förväntat observeras vid högre temperaturer som 300–400 °C. Den dynamiska deformationsåldringen observeras i form av en puckel i brottgränsens temperaturberoende och sågtandsmönster i dragprovkurvorna till höger i figur 8-1b vid dessa högre temperaturer. Vid utförliga undersökningar vid 125 °C uppvisar segjärnsinsats i76 en mycket liten dynamisk deformationsåldring vid den lägre av två hastigheter.

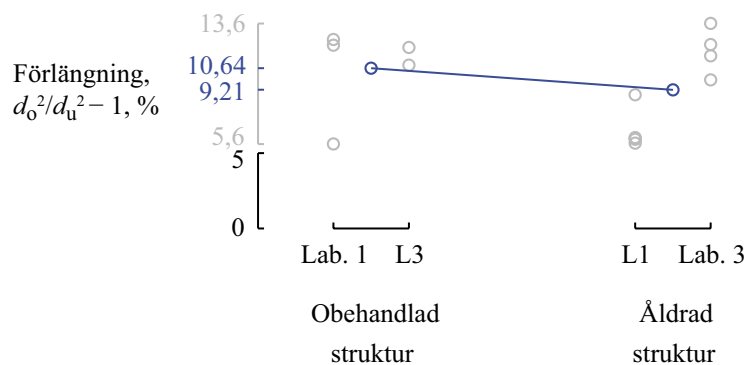


Figur 8-1 a) och b). Segjärns dragprovkurvor vid rumstemperatur jämfört med förhöjda temperaturer. Insats i76.

Om segjärn deformeras kraftigt kan även en statisk deformationsåldring ske vid rumstemperatur. Förbättringen av hållfastheten var något större jämfört med tillgängliga litteraturdata, särskilt vid temperaturer som är relevanta för slutförvaret. Proverna uppvisade endast en måttlig försämring i tøjbarhet.

Försämringen av brottförlängningen var i denna undersökning jämförbar med den som observerats i en finsk mastersuppsats om statisk deformationsåldring. Brottytorna i uppsatsen visade att materialet fortfarande var segt, det vill säga det hade inte blivit sprött av åldringen.

SKB:s tidigare slutsatser av den begränsade betydelsen av åldringsfenomen för kapselns funktion i Kärnbränsleförvaret kvarstår. Varken kallåldring eller dynamisk deformationsåldring förväntas påverka funktionen under förvarsförhållanden. Statisk deformationsåldring kan endast uppträda om kapselns insats först utsätts för en deformation på 3 % vilket visats vara mycket sällsynt i ett miljonårsperspektiv. En eventuell statisk deformationsåldring kan leda till en förbättrad hållfasthet och en måttlig försämring i tøjbarhet. Negativ inverkan skulle endast uppkomma om samma kapsel skulle utsättas för ännu en kraftig deformation, något som bedöms som extremt osannolikt.



Figur 8-2. Minskning i förlängning för gjuten struktur vid åldring.

9 Författarens tack

Haji Muhmond, Abel Tadesse och professor emeritus Hasse Fredriksson, Stockholm har utfört de praktiska och teoretiska undersökningarna kring kvävehaltens inverkan på hållfastheten. De har också ritat figur 2-9 och figur 3-2 och bidragit med svepelektronbilderna av segjärnsstrukturen i figur 3-6. Hasse Fredriksson har också formulerat texten om magnesiumhaltens inverkan på grafiten under segjärnets stelning.

Shahrad Amerioun har handlagt dragprovningarna 2019.

RISE har bidragit med mikrostrukturbilderna i figurerna 1-1 och 2-7.

Swerim har bidragit med dragprovkurvorna i figur 5-1.

Idén att reducera linjer, ramar och rutnät i diagrammen och tabellera mätningar och medelvärden på diagrammens axlar kommer från en bok av Edward Tufte (1983).

Allan Hedin har bidragit med redaktionella synpunkter och formuleringar av slutsatser. Rikard Källbom, Mikael Jonsson, Johan Andersson, Timo Salonen, Håkan Persson, Lennart Sibeck och Stefan Jonsson har granskat och väsentligt förbättrat rapporten.

Professor emeritus Lars Holst, Uppsala har instruerat rapportförfattaren i statistiska metoder och föreslagit den aktuella försöksplanen (avsnitt 2.3) för dragprovsundersökningar av åldring för i57 och i76. För brister i försöksplanen är dock författaren själv ansvarig. Dessutom har Lars skrivit text i avsnitten 4.1–4.2 tillsammans med rapportförfattaren.

Tack för all hjälp.

Jan Sarnet

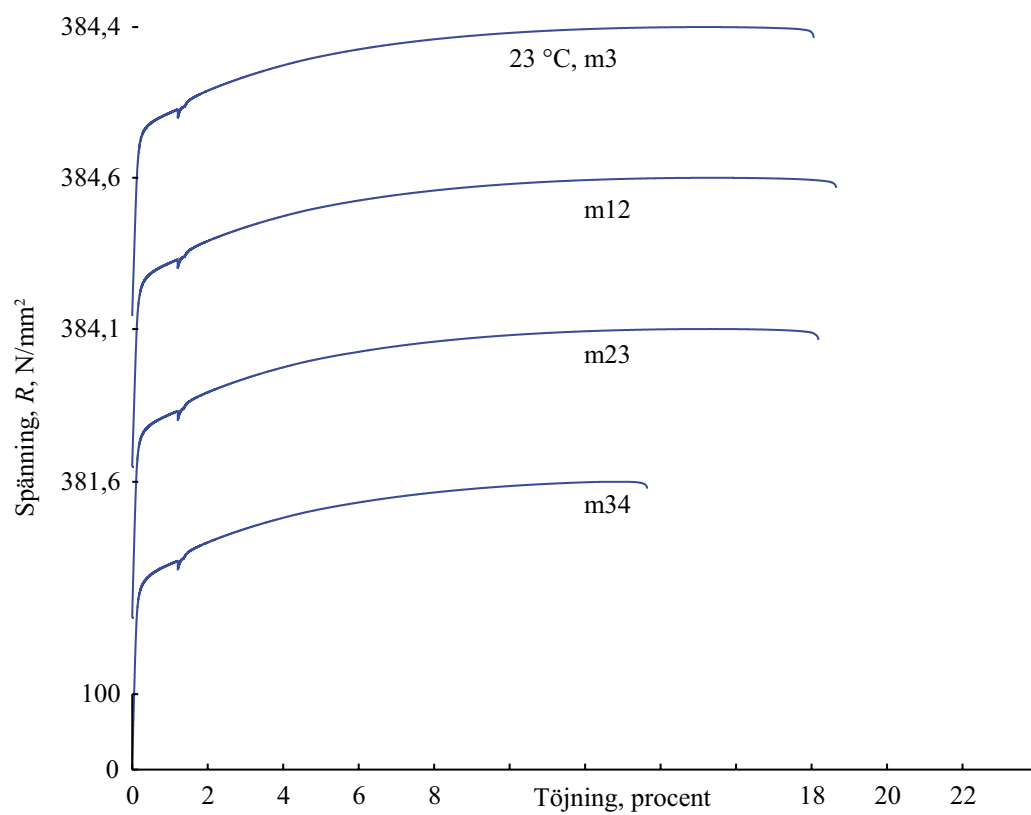
Referenser

Publikationer utgivna av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) kan hämtas på www.skb.se/publikationer. SKBdoc-dokument lämnas ut vid förfrågan till dokument@skb.se.

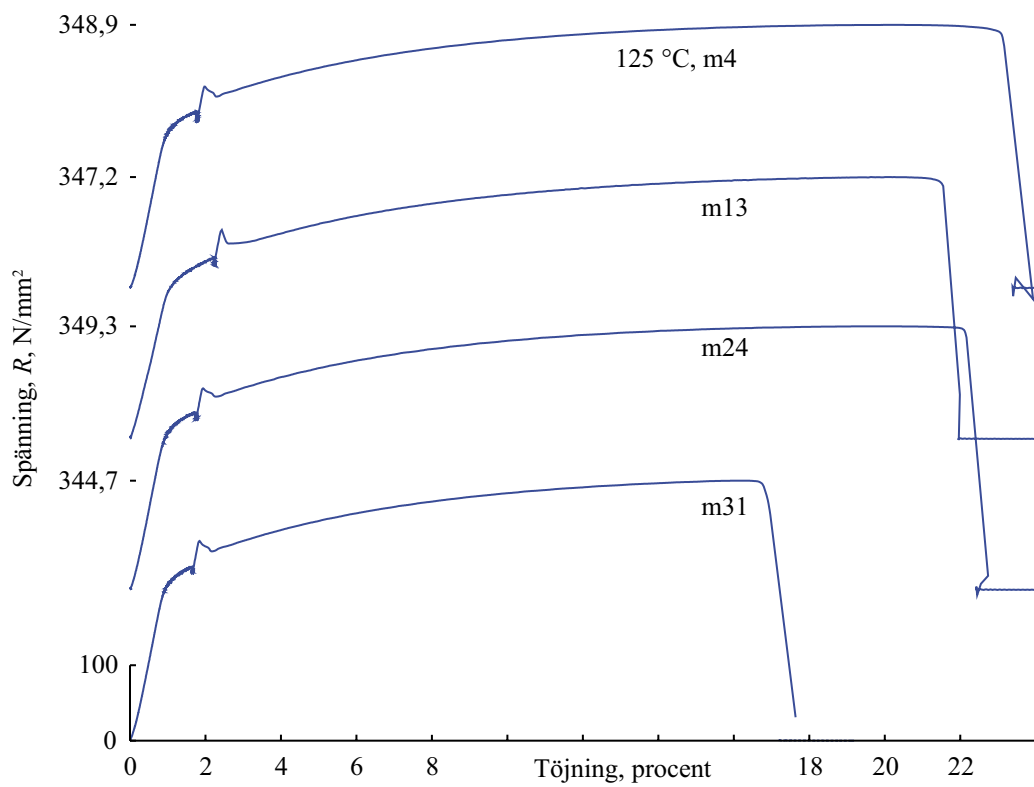
- ASTM E1019-18:2018.** Standard Test Methods for Determination of Carbon, Sulfur, Nitrogen, and Oxygen in Steel, Iron, Nickel, and Cobalt Alloys by Various Combustion and Inert Gas Fusion Techniques. West Conshohocken, PA: ASTM.
- ASTM E1999-18:2018.** Standard Test Method for Analysis of Cast Iron by Spark Atomic Emission Spectrometry. West Conshohocken, PA: ASTM.
- Bergman B, Klefsjö B, 2012.** Kvalitet från behov till användning. 5. uppl. Lund: Studentlitteratur.
- Björklund V, 2021.** The effects of static strain aging on the mechanical performance of nodular cast iron. Masteruppsats. Aalto-universitetet, Helsingfors.
- Blom G, Holmquist B, 1998.** Statistikteori med tillämpningar. 3. uppl. Lund: Studentlitteratur.
- Carlsson J, 1976.** Brottmekanik. Stockholm: Ingenjörskyrkans förlag.
- Charpy G, 1914.** Sur la fragilité produite dans les fers et aciers par déformation à différentes températures. Comptes rendus de l'Académie des sciences 158, 311–313.
- Dieter G E (red), 1984.** Workability testing techniques. Metals Park, OH: ASM.
- Dieter G E, 1988.** Mechanical metallurgy. 3. uppl. London: McGraw-Hill.
- Dillström P, Alverlind L, 2014.** Defect distributions for BWR- and PWR-insert material. Report 50017480-1, Revision 2, Inspecta Technology AB. SKBdoc 1417759 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Edwards C A, Phillips D L, Jones H N, 1940.** Influence of some special elements upon strain-ageing and yield-point characteristics of low-carbon steels. Journal of Iron & Steel Institute 142, 199–222.
- Edwards C A, Phillips D L, Liu Y H, 1943.** The yield point in steel. Journal of Iron & Steel Institute 147, 145–167.
- Fredriksson H, Åkerlind U, 2006.** Materials processing during casting. Chichester: Wiley.
- Honeycombe R W K, 1968.** The plastic deformation of metals. London: Edward Arnold.
- Honeycombe R W K, 1984.** The plastic deformation of metals. 2. uppl. London: Edward Arnold.
- Honeycombe R W K, Bhadeshia H K D H, 1995.** Steels: microstructure and properties. 2. uppl. London: Edward Arnold.
- Hultgren A, 1966.** Metallografins utveckling i Sverige under åren 1817–1966. Jernkontorets Annaler 150, 942–990.
- Ikonen K, 2020.** Temperatures inside SKB and Posiva type disposal canisters for spent fuel. Posiva SKB Report 12, Posiva Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Jalava K, Laine J, Vaara J, Frondelius T, Orkas J, 2020.** Investigation on dynamic strain aging behaviour of ferritic-pearlitic ductile cast irons. Materials Science and Technology 36, 160–167.
- Jonsson M, Emilsson G, Emilsson L, 2018.** Mechanical design analysis for the canister. Posiva SKB Report 04, Posiva Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Keh A S, Nakada Y, Leslie W C, 1968.** Dynamic strain aging in iron and steel. I Rosenfield A R (red). Dislocation dynamics: [Proceedings of the 2nd] Battelle institute materials science colloquia, Seattle, Washington, and Harrison, British Columbia, Canada, 1–6 May 1967. New York: McGraw-Hill, 381–408.
- Kocks U F, Argon A S, Ashby M F, 1975.** Thermodynamics and kinetics of slip. Prog. Mater. Sci. 19, 1–281.
- Lui T S, Chao C G, 1989.** High-temperature properties of ferritic spheroidal graphite cast iron. Journal of Material Science 24, 2503–2507.

- Löhe D, Vöhringer O, Macherauch E, 1982.** Dynamic strain aging of cast iron. *Strength of Metals and Alloys (ICSMA 6)*, 199–204.
- Martinsson Å, Larsson M, 2009.** Hot tensile testing of nodular cast iron. Swerea KIMAB AB. SKBdoc 1196833 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Muhmond H M, Tadesse A, Fredriksson H, 2019.** The effect of nitrogen and hydrogen on the graphite morphology and mechanical properties in nodular cast iron – a pre study. FreCast AB. SKBdoc 1864633 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pihlajamäki T, 2017.** Characterization of strain aging with full-field strain measurements. Masteruppsats. Aalto-universitet, Helsingfors.
- Portevin A, Le Chatelier F, 1923.** Sur un phénomène observé lors de l'essai de traction d'alliages en cours de transformation. *Comptes rendus de l'Académie des sciences* 176, 507–517.
- Rao G S, Yagodzinskyy Y, Que Z, Spätig P, Seifert H P, 2021.** Study on hydrogen embrittlement and dynamic strain ageing on low-alloy reactor pressure vessel steels. *Journal of Nuclear Materials* 556, 153161. doi:10.1016/j.jnucmat.2021.153161
- Richards V L, Van Mereau D C, Aken O P, Nicola W M, 2004.** Effects of room temperature aging on ductile iron. *American Foundry Society Transactions* 112, 801–812.
- Sarnet J, 2022.** Dragprovningmätningar åldring segjärn i57 i76. SKBdoc 1957705 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sarnet J, Holst L, 2017.** Åldring, deformationsåldring, blåsprödhet av segjärn. SKBdoc 1602640 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2017.** Svar till SSM på begäran om komplettering kring förspärningsmekanismer för kapseln. SKBdoc 1602500 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2019.** Fud-program 2019. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SS-EN 1563:2018.** Gjutna material – Segjärn, Founding – Spheroidal graphite cast irons. Stockholm: Svenska institutet för standarder.
- SS-EN ISO 6892-1:2019.** Metalliska material – Dragprovning – Del 1: Testmetod vid rumstemperatur. Stockholm: Svenska institutet för standarder.
- SS-EN ISO 6892-2:2018.** Metalliska material – Dragprovning – Del 2: Provningsmetod vid förhöjd temperatur. Stockholm: Svenska institutet för standarder.
- Stefanescu D M (red), 2017.** Cast iron science and technology. Materials Park, OH: ASM International.
- Storåkers B, 1985.** Grundläggande plasticitetsteori med krypmekanik. 3. uppl. Stockholm: Institutionen för hållfasthetslära, Tekniska högskolan (KTH).
- SweCast, 2007.** I55 – Materialundersökningsrapport segjärnsinsats. SKBdoc 1078594 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Swerea SweCast, 2015.** Materials testing of nodular cast iron insert I76M, axial position 2 160 mm from bottom. Investigation 4374-1. SKBdoc 1526911 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Tadesse A, Fredriksson H, 2018.** On the solidification and structure formation during casting of large inserts in ferritic nodular cast iron. *Metallurgical and Materials Transactions B* 49, 1223–1235.
- Thelning K-E, 1975.** Steel and its heat treatment: Bofors handbook. London: Butterworths.
- Tufte E R, 1983.** The visual display of quantitative information. Cheshire, CT: Graphic Press.
- Yanagisawa O, Lui T S, 1983.** Influence of the structure on the 673 K embrittlement of ferritic spheroidal graphite cast iron. *Transactions of the Japan Institute of Metals (JIM)* 24, 858–867.
- Yanagisawa O, Lui T S, 1985.** Effect of carbon content and ferrite grain size on the tensile flow stress of ferritic spheroidal graphite cast iron. *Metallurgical Transaction A* 16, 667–673.

Dynamisk deformationsåldring 1 (2)

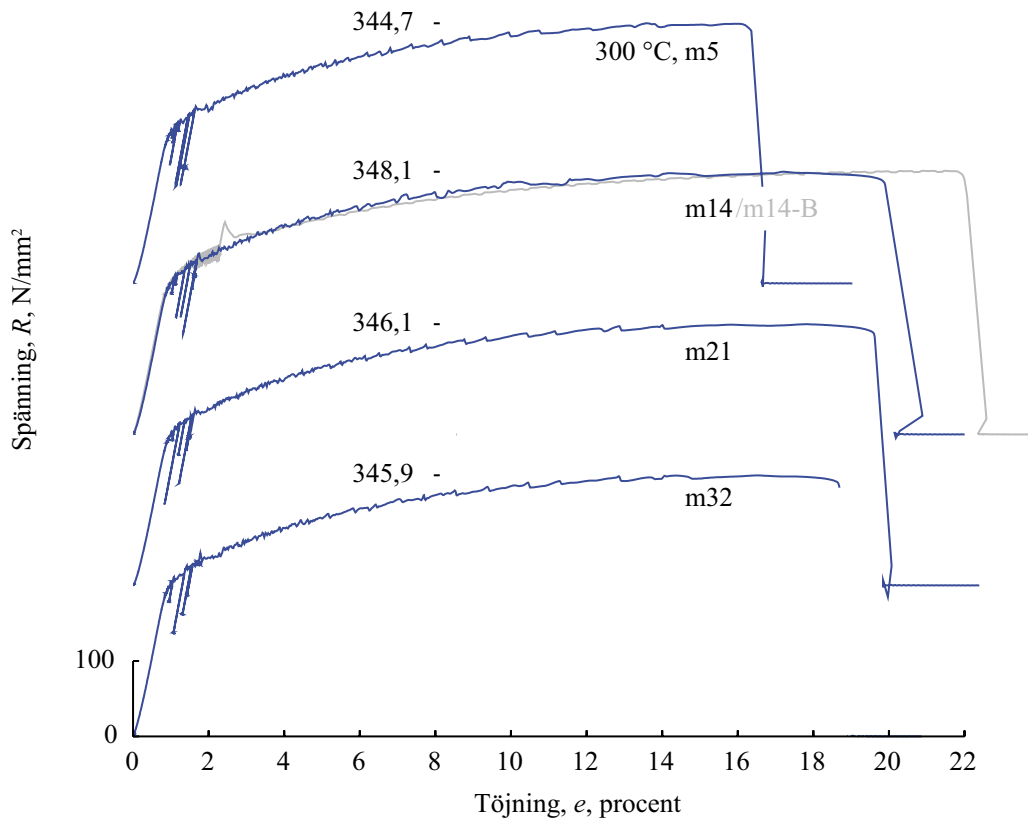


Figur B1-1. Dragprovning vid 23 °C, $de/dt = 0,00025 \text{ s}^{-1}$ för $e < 1,6 \%$, $0,0067 \text{ s}^{-1}$ för $e > 1,6 \%$.

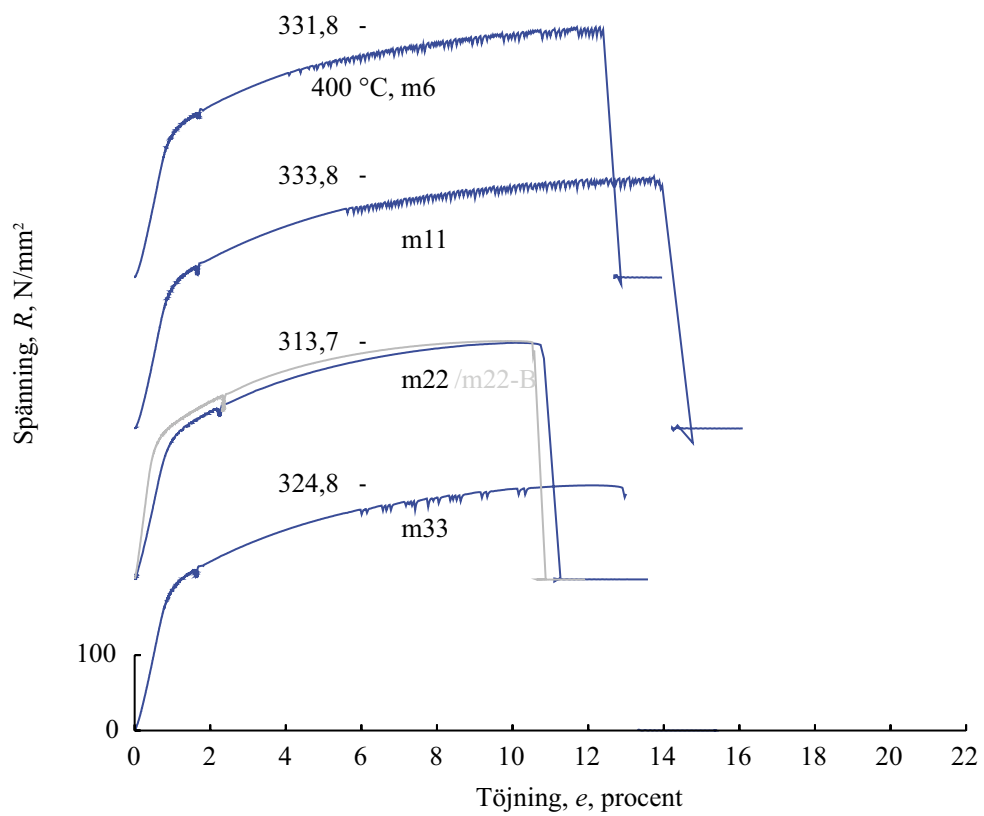


Figur B1-2. Dragprovning vid 125 °C, $de/dt = 0,00025 \text{ s}^{-1}$ för $e < 1,6 \%$, $0,0067 \text{ s}^{-1}$ för $e > 1,6 \%$.

Dynamisk deformationsåldring 2 (2)

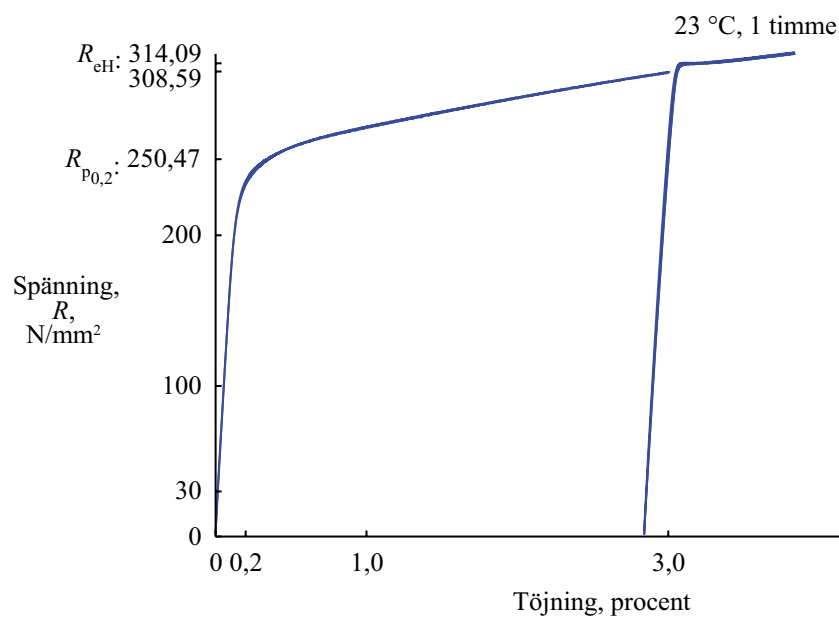


Figur B1-3. Dragprovning vid 300 °C, $de/dt = 0,00025 \text{ s}^{-1}$ för $e < 1,6 \%$, $0,0067 \text{ s}^{-1}$ för $e > 1,6 \%$.

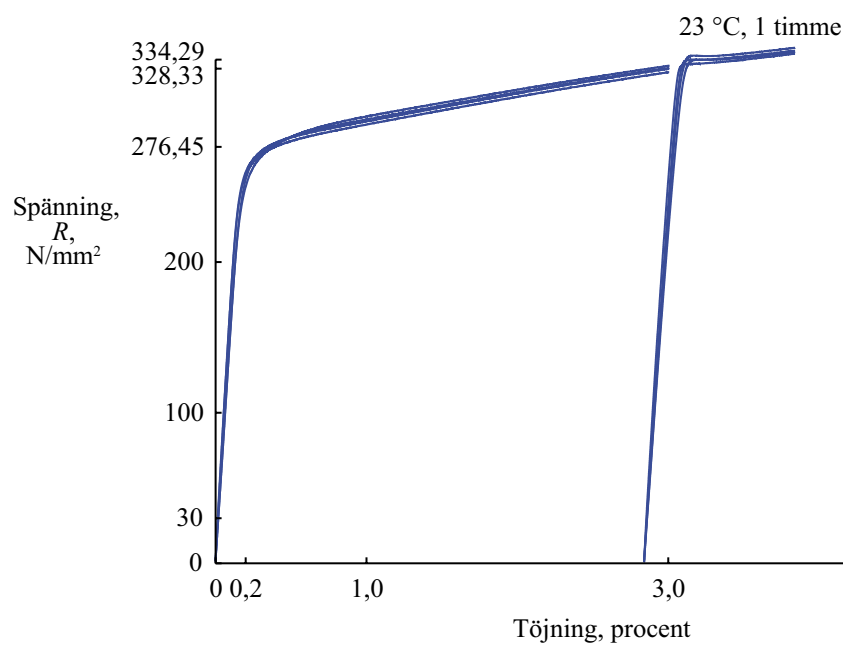


Figur B1-4. Dragprovning vid 400 °C, $de/dt = 0,00025 \text{ s}^{-1}$ för $e < 1,6 \%$, $0,0067 \text{ s}^{-1}$ för $e > 1,6 \%$.

Statisk deformationsåldring 1 (5)

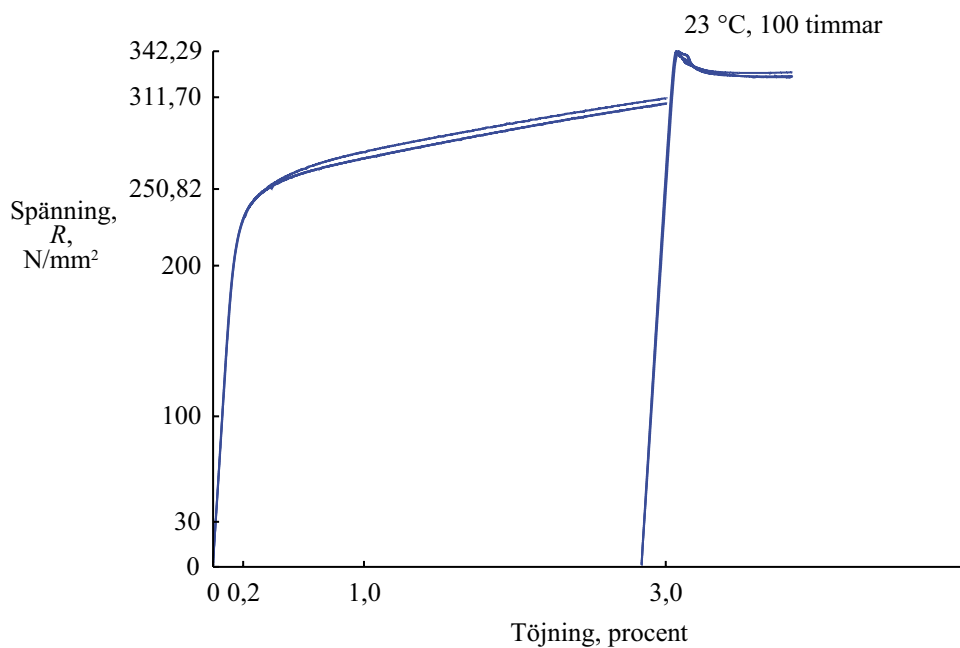


Figur B2-1. Dragprovkurva för deformation och åldrat segjärn insats i 23 °C i 1 timme. Prov m17, m29, m35. Kurvorna har provats av laboratorium 3, $de/dt = 0,00025 \text{ s}^{-1}$.

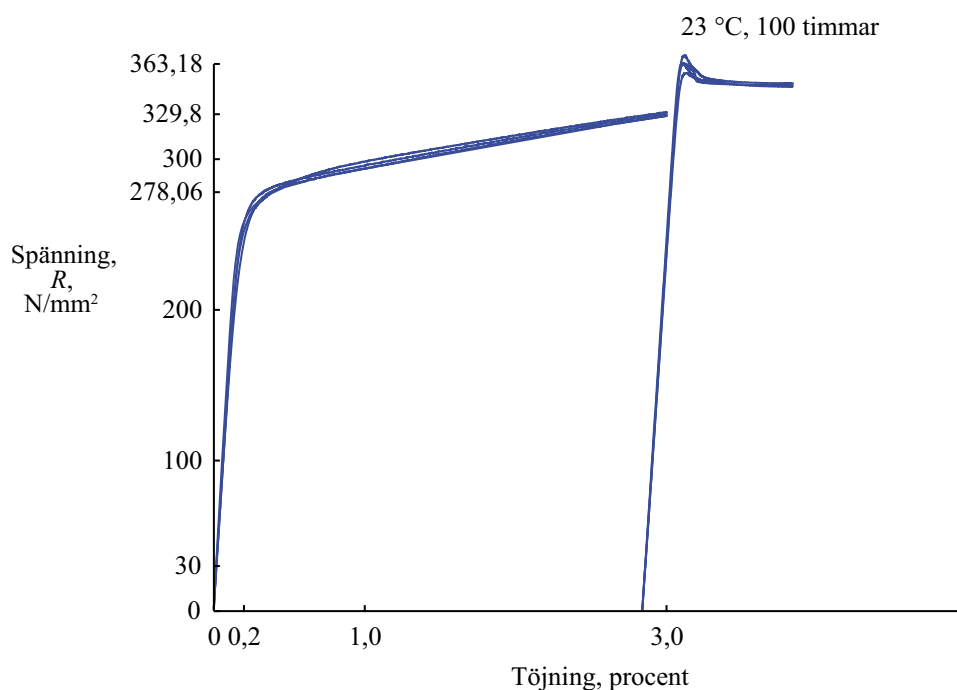


Figur B2-2. Dragprovkurva för deformation och åldrat segjärn insats i 23 °C i 1 timme. Prov m37, m45, m50, m60.

Statisk deformationsåldring 2 (5)

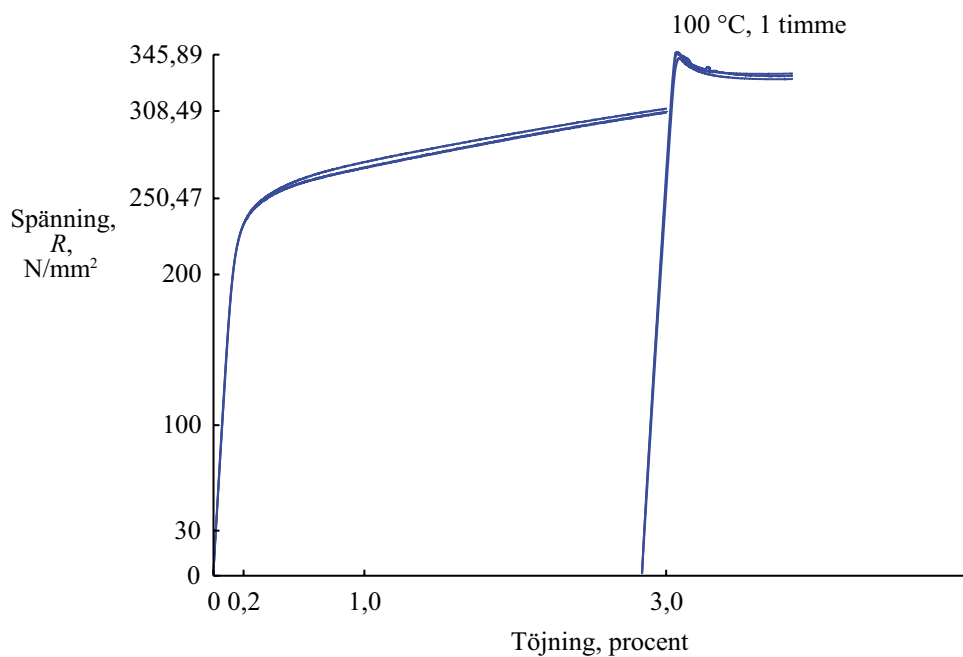


Figur B2-3. Dragprovkurva fördeformation och åldrat segjärn insats i 76 23 °C i 100 timmar. Prov m20, m28, m36.

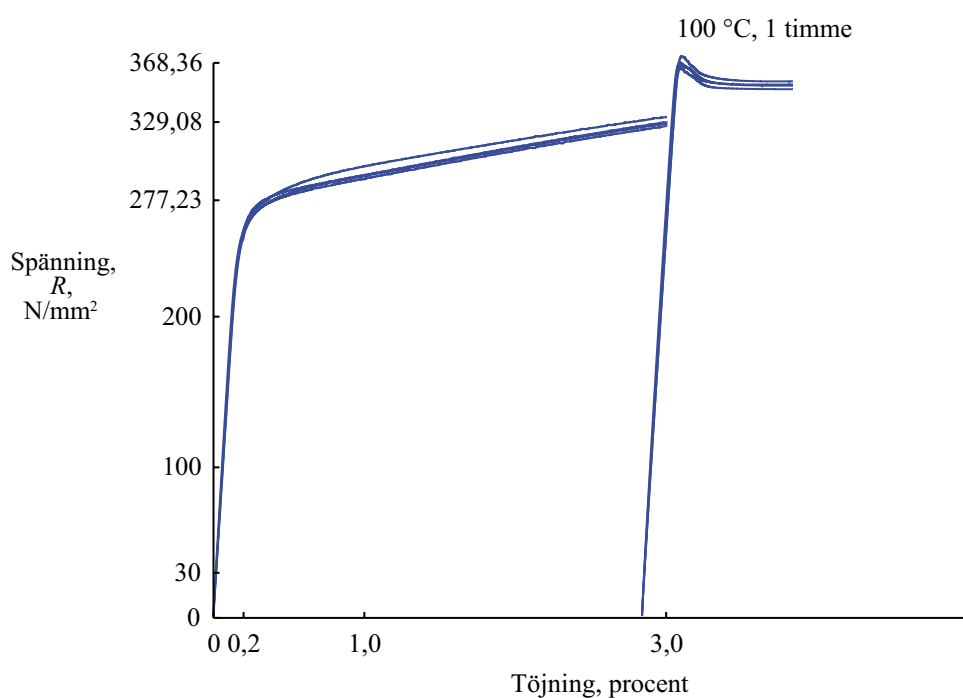


Figur B2-4. Dragprovkurva fördeformation och åldrat segjärn insats i 57 23 °C i 100 timmar. Prov m40, m47, e51, m58.

Statisk deformationsåldring 3 (5)

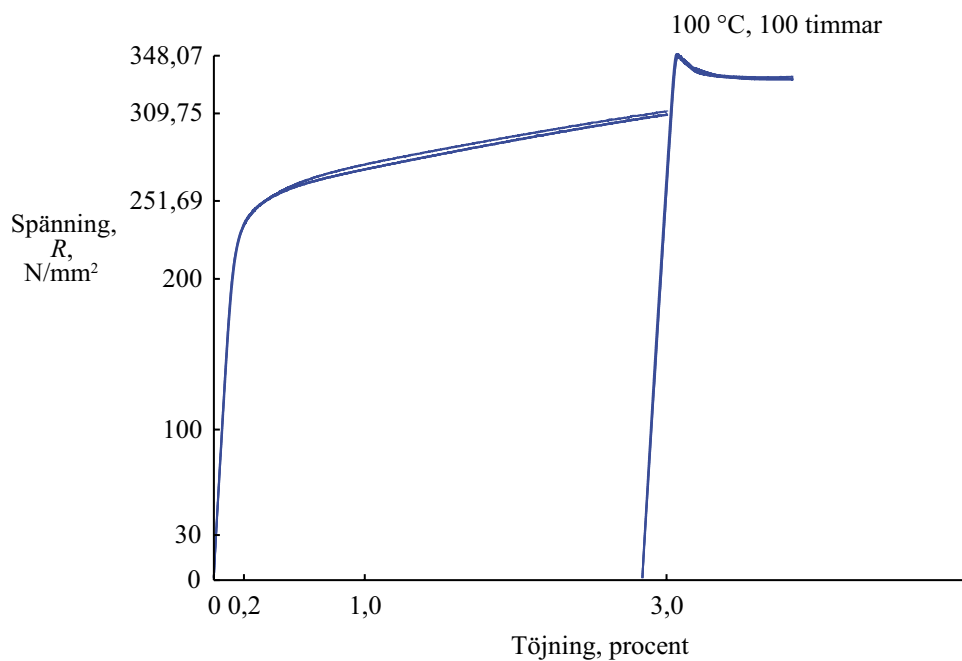


Figur B2-5. Dragprovkurva för deformation och åldrat segjärn insats i 76 100 °C i 1 timme. Proven m18, m25, m30.

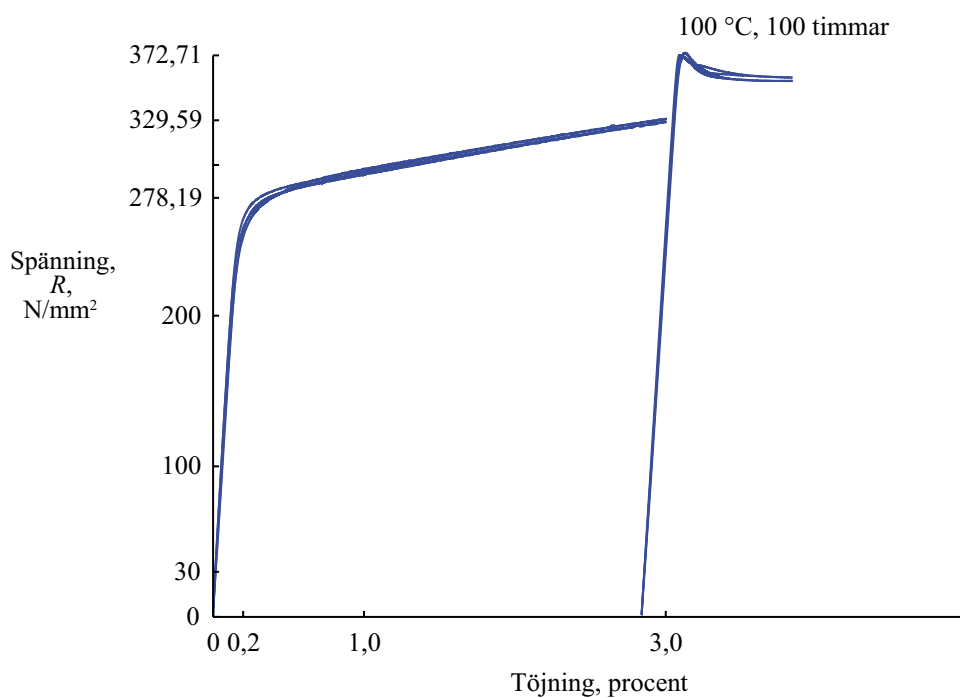


Figur B2-6. Dragprovkurva för deformation och åldrat segjärn insats i 57, 100 °C i 1 timme. Proven m38, m46, m49, m59.

Statisk deformationsåldring 4 (5)

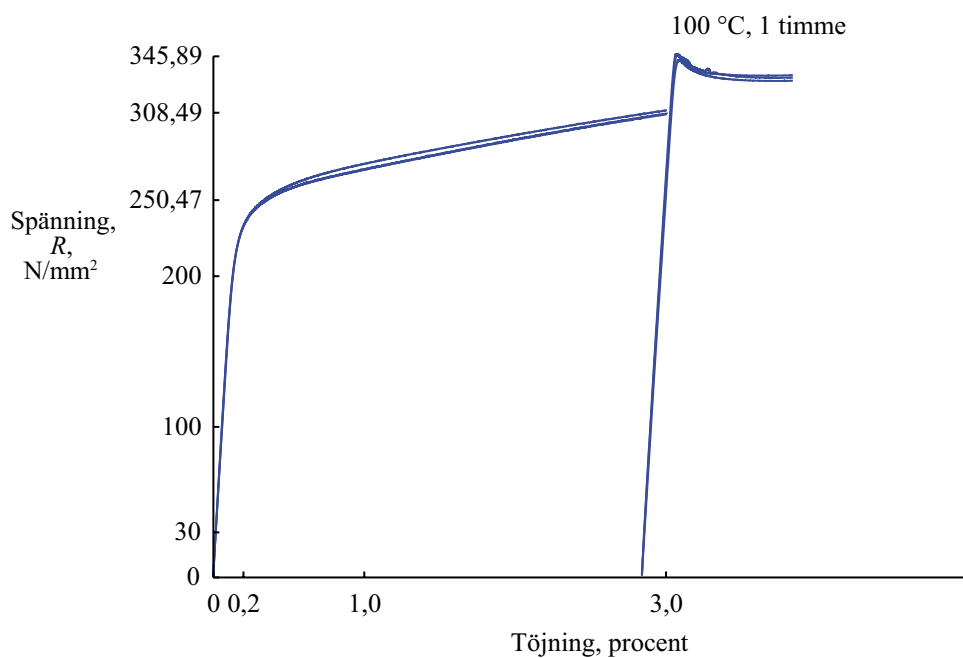


Figur B2-7. Dragprovkurva fördeformation och åldrat segjärn insats i76 100 °C i 100 timmar. Prov m19, m26, m27.

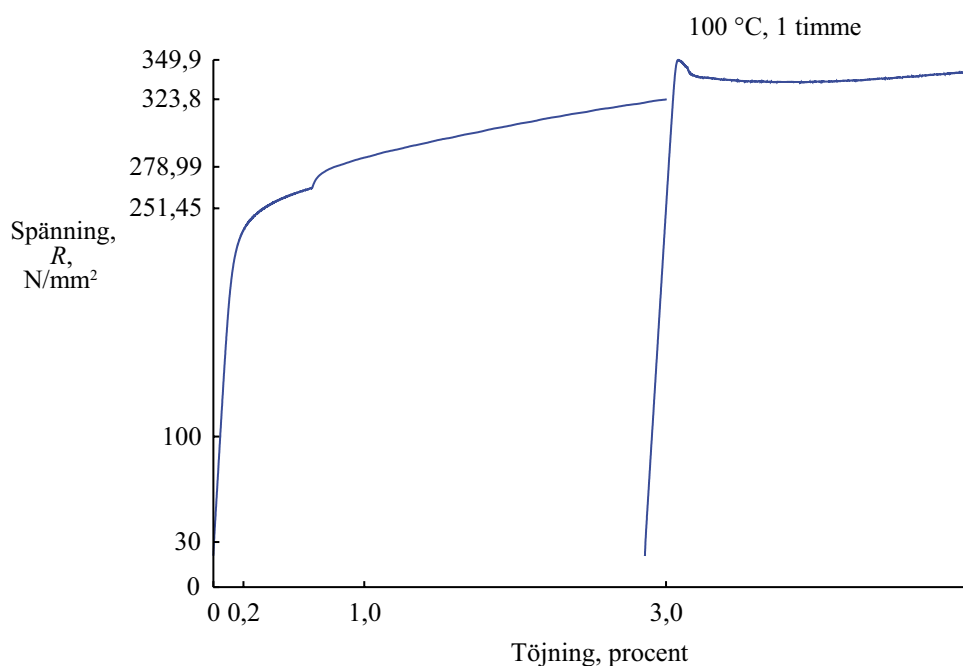


Figur B2-8. Dragprovkurva fördeformation och åldrat segjärn insats i57 100 °C i 100 timmar. Prov m39, m48, m52, m57.

Statisk deformationsåldring 5 (5)



Figur B2-9 (repeterad). Laboratorium 3, dragprovkurva för deformation och åldrat segjärn, 100 °C i 1 timme. Prov m18, m25, m30.



Figur B2-10. Laboratorium 1, dragprovkurva för deformation och åldrat segjärn, 100 °C i 1 timme. Höjning av draghastigheten vid 0,5 % deformation. Prov k22, mätt av laboratorium 1, $de/dt = 0,00025 \text{ s}^{-1}$ ($e < 0,6 \%$ och $e > 3 \%$), $de/dt = 0,0067 \text{ s}^{-1}$ ($0,6 \% < e < 3 \%$).

SKB:s uppdrag är att ta hand om använt kärnbränsle och radioaktivt avfall från de svenska kärnkraftverken så att människors hälsa och miljö skyddas på kort och lång sikt.

skb.se