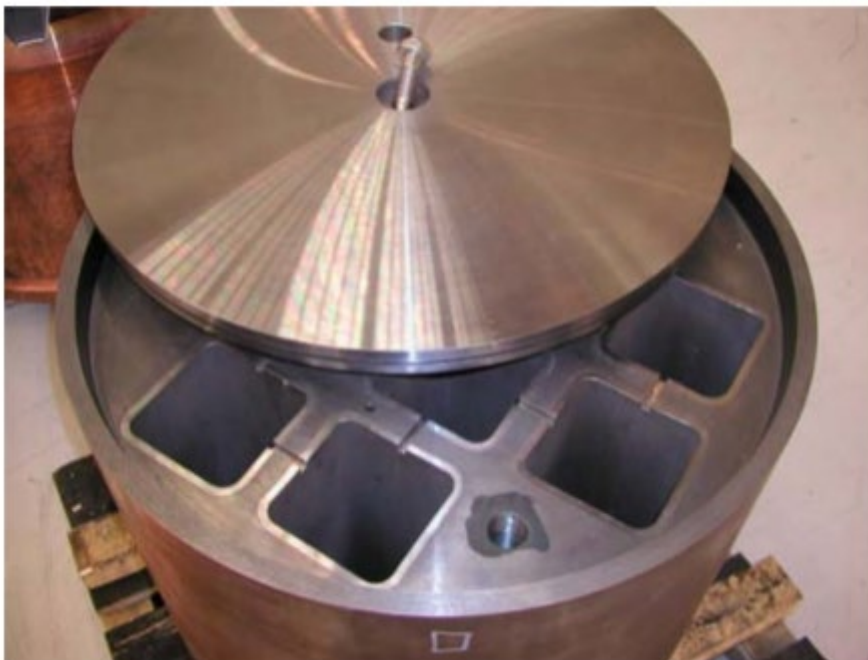




Miljörelsens kärnavfallssekretariat, Milkas
The Swedish Environmental Movement's Nuclear Waste Secretariat
Tegelviksgatan 40, 116 41 Stockholm, Sweden
Tel. +46-70 298 97 47 | info@milkas.se
www.milkas.se | www.nonuclear.se

Segjärnet i kopparkapslar för använt kärnbränsle enligt KBS-3 metoden, en tidslinje 2010-2021



Figur 1. Segjärnsinsatsen, med stållock.

Bild: SKB, från "Design, production and initial state of the canister" TR-10-14, s. 61.

Jessica Lindén, Miljörelsens kärnavfallssekretariat, Milkas
Civilingenjörstudent vid Luleå tekniska universitet. 19 september 2021

Finns på nonuclear.se/segjarnet-i-kopparkapslar-kbs3-jessica-linden2021

Innehåll

Introduktion	3
Segjärnets komposition och egenskaper	3
Strålningspåverkan på segjärnet i Fud-2010 och Fud-2013	4
Potentiell spänningskorrosion, kryp i Fud-2010 och Fud-2013	4
Mildrade krav i Fud-2016.....	5
Strålningsinducerad försprödning i Fud-2016.....	5
Fosfor i korngränserna i segjärnet	6
SSM kommenterar tillverkning och kopparhalt	6
Kärnavfallsrådet kommenterar blåsprödhet och kopparhalt.....	7
SSM begär komplettering om blåsprödhet 2017.....	7
Kunskap om segjärnsinsatsen 2018 och yttrande av Mark- och miljödomstolen (MMD).....	7
Kunskap om segjärnsinsatsen 2019.....	8
Strålningsinducerad försprödning i Fud-2019	8
Blåsprödhet i Fud-2019	9
Oförstörande provning, tillverkning och mildare krav i Fud-2019	9
Krypning och väteförsprödning Fud-2019	9
Kärnavfallsrådets synpunkter på Fud-2019	10
SSM om Fud-2019	10
2020 och framåt	11
Avslutande kommentar	11
Referenser	12
Appendix 1:	
SKB:s plan för dragprovs-experiment relaterad till dynamisk deformationsåldring.....	14
Appendix 2:	
Begreppsförklaringar.....	15

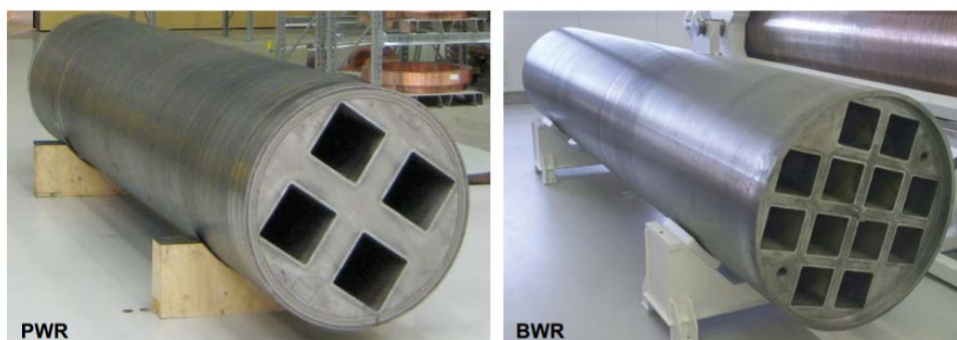
Introduktion

Här följer en redogörelse av vad som har undersökts gällande segjärnet i kopparkapslar för använt kärnbränsle enligt KBS-3 metoden från 2010 och framåt samt vilka frågor som återstår att få svar på, med utgångspunkt i Svensk Kärnbränsle Hanterings (SKB:s) Forsknings, utvecklings och demonstrations (Fud)-program samt yttranden från Kärnavfallsrådet och Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM). De områden som diskuterats i granskningsrapporter och yttranden gällande segjärnet berör försprödningsmekanismer, krypning och tillverkningsrelaterade frågeställningar.

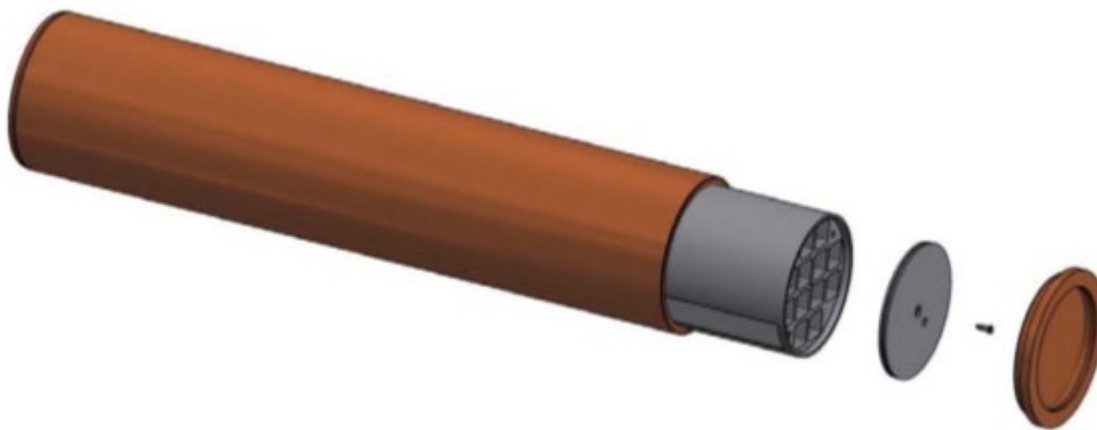
Segjärnets komposition och egenskaper

Segjärn är det material som valts för insatsen i kopparkapseln i SKB:s KBS-3-koncept för kärnbränsleförvaret. Det finns två typer av segjärnsinsatser, en utformad för bränsleelement från tryckvattenreaktorer och den andra utformad för bränsleelement från kokvattenreaktorer. SKB:s Fud-2010 kom ut i september 2010 [1]. Halterna av olika grundämnen i segjärnet specificerades av SKB under 11.1.1 "Barriärfunktion i Kärnbränsleförvaret". Segjärnet skulle ha en järnhalt på över 90 %, en kolhalt mindre än 4,5 % och en kiselhalt på under 6 %. Dessa ämneshalter finns i materialspecifikationen "Design, production and initial state of the canister" [2] av SKB 2010, där siffrorna sedan reviderats i december 2011. De nya ändringarna 2011 visar en järnhalt på fortsatt över 90 % men kolhalten har ändrats till under 6 %, och kiselhalten har ändrats till under 4 %. Dessa halter finns för att motverka kriticitet i kapseln, vilket beskrivs mer under 4.11.5 "Prevention of criticality", där det står att halterna av kol och kisel bör hållas låga eftersom de i jämförelse med järn inte absorberar neutroner särskilt bra, och neutronabsorption är önskvärt. Enligt SSM:s granskningsrapport av SKB:s Fud-program 2019 [3] så användes materialspecifikationen från 2011 fortfarande under 2019. I den materialspecifikationen är värdena för sträckgräns (yield strength), styrka (ultimate strength), brottseghet (fracture toughness) samt längdförändring (elongation) för segjärnet och stållocket specificerade för rumstemperatur. Enligt materialspecifikationen från 2011 så kommer atmosfären inuti kapseln vara över 90 % argon (SKB, TR-10-14, s. 22), för att minska mängden salpetersyra som kan bildas (till skillnad från om det är luft i kapseln).

SKB uppgav i Fud-2019 under 9 "Kapsel för använt kärnbränsle" att det behövs mer utveckling av tillverkningsprocessen så att materialkrav och specifikationer kan fastställas.



Figur 2. Två typer av segjärnsinsatser: PWR och BWR (Fud-2016, s. 123).



Figur 3. Segjärnsinsatsen i kopparkapseln [4, s. 9].

Strålningspåverkan på segjärnet i Fud-2010 och Fud-2013

SKB beskrev i Fud-2010 [1] under 22.2 "Processer i bränsle/hålrum" att det kommer finnas restgaser i hålrummet i segjärnsinsatsen som kan utsättas för radiolys, vilket potentiellt kan orsaka spänningskorrosion av segjärnsinsatsen. Under 22.2.5 "Vattenradioanalys" i Fud-2010 skriver SKB om oxidanter bildade från radiolys av vatten som kan orsaka korrosion på bränslet och segjärnet. Enligt Fud-2010 planeras ingen mer forskning på korrosion av segjärnet i syrefritt vatten under strålningspåverkan, däremot planeras en studie på alfaradiolys vid Chalmers. SKB beskriver vidare under 23.2.5 "Strålpåverkan" att fosfor som segregeras till korngränser i segjärnet kan orsaka försprödning av korngränserna, och SKB skriver även strax under att kravet på maximal kopparhalt i segjärnet är 0,05 % i segjärnets specifikation. Det är materialspecifikationen för segjärnet från 2010 som avses [2] under 4.8 "Additional design premises derived from the safety assessment", där det står att kopparhalten bör vara under 0,05 % så att gammastrålning inte orsakar försprödning och ökad hårdhet i segjärnet. SKB beskrev i Fud-2013 [5] under 24.2.6 "Strålpåverkan" att de planerade att börja undersöka Late blooming phases på inrådan av SSM.

Potentiell spänningskorrosion, kryp i Fud-2010 och Fud-2013

SKB skrev 2010 [1] att 600 g vatten i kapseln kan korrodera järnet och skapa en icke-försumbar mängd vätgas. SKB skriver vidare under 23.2 "Kapselprocesser" i Fud-2010 att den mest betydelsefulla korrosionen av segjärnet sker om det skulle vara ett hål i kopparhöljet.

SKB beskrev i Fud-2013 i 24.2.7 under "Spänningskorrosion hos insats" en analys som gjord i en komplettering till SSM, inlämnad 2012-02-02 "Komplettering ang. kapselredovisning" SKBdoc 1333256, vilket är ett opublicerat dokument enligt en annan komplettering till SSM [6]. SKB återger en bit av denna analys i Fud-2013 och menar att de inte har kunnat hitta exempel på spänningskorrosion under de förhållanden som skulle krävas, de har bara kunnat hitta allmän korrosion. Eftersom det krävs dragspänningar utöver en korrosiv miljö för att spänningskorrosion ska ske, och det kommer vara endast små dragspänningar lokalt i segjärnet, så anser inte SKB att det behöver undersökas mer.

Kärnavfallsrådet gav ut en granskningsrapport [7] baserad på Fud-2013 och kommenterar inte spänningskorrosion i segjärnsinsatsen specifikt, men nämner att effekten av väte på segjärnets materialegenskaper behöver studeras, eftersom korrosion på segjärnet orsakas vätgasbildning. Med tanke på maxgränsen som är satt till 600 g så blir det relevant att studera vätetets påverkan

på segjärnet. Kärnavfallsrådet nämner också att väte påverkar de mekaniska egenskaperna och i synnerhet krypegenskaperna.

SKB skrev i Fud-2010 att de inte presenterade någon forskning på kryp i gjutjärn i Fud-2007. SKB genomförde krypprovning av segjärnet mellan 2007-2010, beskrivet i Fud-2010. Krypprovningen skedde vid rumstemperatur, 100°C samt 125°C. SKB bedömde att krypningen sker på ett liknande sätt som för olegerat stål och att krypningen som sker kommer ha liten påverkan på segjärnsinsatsens egenskaper. SKB laddade gjutjärnet med väte och genomförde dragprov samt krypprov med resultatet att duktiliteten minskade, dvs. hållfastheten blev lägre. Kärnavfallsrådet beskrev också efter Fud-2007 att det behövs mer forskning på hur gjutjärnet påverkas av väte. SKB skrev i Fud-2010 att de planerade att följa upp med mer forskning kring kryp samt vätehalter i gjutjärn, och relatera det till vätgashalter inducerade av korrosion av segjärnsinsatsen.

I Fud-2013 framkom det i 24.2.2 "Deformation av insats" att SKB inte gjort några fler experiment på krypprovning, utan bara slutrapporterat data från det experimentet, och de bedömde att den maximala töjningen som följd av krypning i segjärnet blev under 0,1 % och drog därmed slutsatsen att krypningen har en försumbar inverkan. Slutrapporten från krypexperimentet på segjärn heter "Creep testing of nodular iron at ambient and elevated temperatures", SKB R-10-64 (Martinsson, Andersson-Östling et al 2010). SKB medgav i Fud-2013 att de inte planerade fler krypprovningar av segjärnet eftersom de ansåg att det var av lägre prioritet.

SKB skrev vidare under 24.2.2 i Fud-2013 att de gjort fler experiment med vätehalter i segjärn, och tittade då på hur väte tar sig in i segjärnet när det laddas, där preliminära resultat visade att det kan bli 50 gånger mer väte i segjärnets yta jämfört med ursprungstillståndet. SKB planerade att slutrapportera dessa resultat och eventuellt göra en modell över väteinträngningen i segjärnet, och identifiera om väteinträngningen har någon betydelse för lastfallen för segjärnet. Ingen sådan modell för segjärnet verkar finnas redovisad i Fud-2016, och det är inte tydligt redovisat i Fud-2016 om det finns lastfall där väteinträngning kan påverka hållfastheten för segjärnet.

Mildrade krav i Fud-2016

I Fud-2016 [8] under sektion 5.5 "Kapsel för använt kärnbränsle" beskriver SKB vilken forskning som behövs för att kunna ta hand om det använda kärnbränslet på ett bra sätt. Under 5.5.2 "Konstruktion och tillverkning" beskriver SKB att de planerar att uppdatera design- och defektanalysen för segjärnet, med en uppdaterad materialmodell och bättre processförståelse. Detta för att kunna ställa krav på kopparhalten i segjärnet. SKB berättar att kraven som satts upp gällande maximal defektstorlek och mekaniska egenskaper varit någorlunda enhetlig i kapseln, men att experiment tyder på att kapseln belastas på olika sätt i slutförvarsmiljön – varav det finns möjlighet att ändra kraven så att de blir mer precisa. SKB beskriver i Fud-2016 under 8.3 "Konstruktion" att de har kommit fram till att några mekaniska egenskaper kan mildras, framförallt kravet på brottförlängning samt kraven på defekter i segjärnet, vilket SKB planerar att utreda mer.

Strålningsinducerad försprödning i Fud-2016

SKB skriver under 8.3.3 "Krav på maximal kopparhalt i segjärn" i sitt Fud-2016 att strålning kan påverka segjärnet, och att utfällning av kopparpartiklar som följd av strålning kan försämra segjärnets mekaniska egenskaper.

SKB skriver vidare att omfattningen av detta behöver studeras så krav kan ställas på kopparhalten i segjärnet. SKB refererar i Fud-2016 till en komplettering de lämnade till SSM

2014 [9] där det beskrivs hur strålning förväntas påverka segjärnet. Det är punkt 10 "Inverkan av bestrålning på den gjutna segjärnsinsatsens materialegenskaper" i kompletteringen som avses. SKB beskriver där en studie de gjort i december 2013 [10] de utfört med elektronbestrålning, där två segjärnsprov med olika kopparhalt bestrålas. Bestrålningen gav i det experimentet ingen påverkan på materialegenskaperna i gjutjärnet, enligt SKB. Vidare skriver SKB att de kommer fortsätta utföra experiment för att verifiera dessa resultat, och att de även kommer undersöka fosfor i korngränserna:

"SKB avser att fortsätta de experimentella studierna för att verifiera att strålningen inte inverkar på gjutjärnets egenskaper. Eventuell segring av fosfor till korngränserna och dess effekter kommer vara en del av frågeställningen". – SKB, i "Svar till SSM på begäran om komplettering avseende degraderingsprocesser för kapseln" s.13.

Fosfor i korngränserna i segjärnet

SKB nämner fosfor i gjutjärnet i kompletteringen till SSM 2014 [9]: *"SKB har inte specifikt undersökt segringar av fosfor i gjutjärnet, men för bulkanalys av smältan är uppmätta halter fosfor lägre än vad som krävs för bildning av en spröd fas av Fe_3P . Modelleringen av segring av fosfor till korngränser under bestrålning i Sandberg och Korzhavyi (2009) bygger på antaganden att fosfor fälls ut på samma sätt som koppar, och de experimentella resultaten i bilaga 6 indikerar att effekterna av bestrålning är små".* – SKB:s komplettering till SSM 2014.

Resultaten i bilaga 6 som SKB hänvisar till är den tidigare nämnda studien med elektronbestrålning från december 2013 [10]. I rapporten från Sandberg och Korzhavyi (2009) står det att fosfor kan orsaka korngränsförsprödning i ferritiska stål, och att segring av fosfor till korngränserna i järn kan vara ett problem för segjärnsinsatsen, det är dock många osäkerheter att ta hänsyn till [11].

I Fud-2016 hänvisar SKB även till en experimentell studie på KTH (avdelningen Reaktorfysik) där resultatet visade liten påverkan på segjärnet av strålning. SKB beskriver också i Fud-2016 en förstudie om late blooming phases, där resultatet blev att det finns faser som är termodynamiskt stabila, vilket skulle kunna betyda att det finns en risk att det blir utfällningar. SKB kommenterar dock att närvaro av termodynamiskt stabila faser inte behöver betyda att det blir utfällningar.

"Att faserna är termodynamiskt stabila betyder dock inte nödvändigtvis att de kommer att falla ut" – SKB i Fud-2016 s.136.

SKB beskriver vidare i Fud-2016 att de kommer fortsätta studera kopparutfällning i segjärnet, samt göra mer beräkningar och möjligen experiment kring late blooming phases.

SSM kommenterar tillverkning och kopparhalt

23 mars 2017 kommer SSM:s granskningsrapport för FUD-2016 [12]. SSM lägger fokus på bland annat tillverkningsprocessen – hur materialegenskaper och defekter varierar i materialet som en följd av gjutningen är något som behöver kartläggas mer. Under 5.3.3 "Konstruktion" skriver SSM att SKB bör försöka minska osäkerheterna för hur egenskaperna i segjärnet kan komma att variera från tillverkningen. SSM uppmanar SKB till mer forskning om strålningsinducerad försprödning på segjärnet:

"SSM är vidare positiv till att SKB avser fortsätta forskning av gamma- och neutronförsprödning av insatsen men att man även vid inverkan av utskiljning av kopparpartiklar beaktar förändringen av segjärnets förmåga till stabil spricktillväxt" - s. 90 i SSM:s granskningsrapport för Fud-2016.

Vidare skriver SSM under 5.3.3 "Konstruktion" under "SSM:s bedömning" att kopparhalten kan vara ojämnt fördelad i segjärnet, som en effekt från tillverkningen, och att SKB behöver ha detta i åtanke när de sätter en gräns för tillåten kopparhalt i segjärnet. Bland övriga remissinstanser som lämnat yttranden till SSM så var det inga synpunkter på segjärnet gällande SKB:s Fud-2016.

Kärnavfallsrådet kommenterar blåsprödhet och kopparhalt

I juni 2017 publicerade Kärnavfallsrådet sin granskningsrapport av SKB:s Fud-2016 [13]. Kärnavfallsrådet skriver under 8.3 "Konstruktion" att blåsprödhet och dess effekt på segjärnets mekaniska egenskaper i princip inte har studerats alls och att SKB behöver göra en litteraturstudie om blåsprödhet i Fud-2019, för att kunna avgöra hur blåsprödhet på sikt kommer påverka kapselns integritet, vilket har med säkerheten över lång tid att göra. Kärnavfallsrådet skriver vidare att det behövs mer forskning om kopparhalten i segjärn relaterat till strålningsinducerad försprödning. De skriver även att det behövs fler experiment utöver beräkningsstudierna kring bl.a. kopparinnehåll i strålningsinducerad försprödning. Kärnavfallsrådet nämner inget om effekten av fosfor i korngränserna för segjärnet och huruvida det bör undersökas eller ej.

SSM begär komplettering om blåsprödhet 2017

Efter Kärnavfallsrådets yttrande, så begär SSM i juli 2017 en komplettering [14] från SKB om blåsprödhet:

"SSM önskar att SKB kommenterar processerna statisk och dynamisk deformationsåldring (static and dynamic strain aging) och deras möjliga koppling till segjärnsinsatsens hållfasthet utifrån nyligen rapporterade studier (Pihlajamäki, 2017) som lyfts fram av Kärnavfallsrådet i sitt yttrande över SKB:s Fud-program 2016. Processerna beskrivs även utförligt i (Honeycomb, Bhadeshia, 1995)." – SSM, i "Svar till SSM på begäran om komplettering kring försprödningsmekanismer för kapseln", s. 1.

SKB svarar SSM i september 2017 med att kapseln inte kommer att utsättas för plastisk deformation, såvida det inte sker stora skjuvlaster och SKB menar att det inte är sannolikt.

"Efter genomgång av tillgänglig litteratur och av lastfallen i slutförvaret bedömer SKB att varken statisk eller dynamisk deformationsåldring äventyrar kapselinsatsens mekaniska egenskaper eller funktioner i slutförvaret. Dels krävs plasticerande laster för att fenomenen ska uppstå medan kapselinsatsen är dimensionerad så att plasticering inte uppnås utom i osannolika fall, dels är temperaturen i slutförvaret betydligt lägre än de temperaturer vid vilka särskilt dynamisk åldring uppträder." – SKB, i "Svar till SSM på begäran om komplettering kring försprödningsmekanismer för kapseln", s. 3.

Kunskap om segjärnsinsatsen 2018 och yttrande av Mark- och miljödomstolen (MMD)

I Kärnavfallsrådets kunskapslägesrapport från 2018 [15] under 3.1.1 "Sammanfattande beskrivning" så beskrivs de tre försprödningsmekanismerna väteförsprödning, blåsprödhet samt strålningsinducerad försprödning. Kärnavfallsrådets motivering för att undersöka dessa försprödningsmekanismer är att det finns risk för att kopparhöljet går sönder, om den lastbärande segjärnsinsatsen på något sätt ger vika. Kärnavfallsrådet vill se mer forskning om dessa försprödningsmekanismer samt hur de tillsammans med krypning påverkar kapselns

hållfasthet. Kärnavfallsrådet menar också att vätehalter i gjutjärnet behöver specificeras och att forskningen som publicerats av SKB gällande gjutjärnsinsatsen är begränsad.

SSM tillstyrkte SKB:s ansökan 23 januari 2018, och Mark- och miljödomstolen (MMD) lämnade in sitt yttrande [16] vid samma datum. MMD nämner bland annat väteförsprödning samt påverkan av strålning på gropkorrosion, spänningskorrosion och väteförsprödning generellt för hela kapselns skyddsförmåga. MMD menar att det finns betydande osäkerheter runt dessa mekanismer, under 1.5 "Ytterligare underlag behövs om kapselns skyddsförmåga".

Vätediffusion i segjärnet nämndes i MMD:s yttrande [16]: *"Vatten inuti kapseln kan ge upphov till väte, som kommer att diffundera in i segjärnsinsatsen men inte in i kopparmaterialet eftersom detta kräver temperaturer på över 600 grader"*. – Mark- och miljödomstolens yttrande 2018, s. 293.

Effekter på segjärnets mekaniska egenskaper som följd av diffusionen diskuteras dock inte vidare i MMD:s yttrande.

I juni 2018 skrev regeringen att de ville ha en komplettering från SKB gällande de frågor MMD pekat ut. SKB kompletterade 4 april 2019 [17], och sa bland annat under 8 "Radioaktiv strålningens inverkan på gropkorrosion, spänningskorrosion och väteförsprödning" att stråldoserna är för små för att kunna mäta effekter på de mekaniska egenskaperna hos kapseln.

30 september 2019 skickade SSM ut en granskningsrapport [18] som syftade till att granska om SKB:s kompletteringar svarar på MMD:s frågor. Under "Strålningens inverkan på gropkorrosion, spänningskorrosion och väteförsprödning" så kommenterar SSM följande angående strålningens effekt på de mekaniska egenskaperna:

"SSM konstaterar att SKB redovisar nytt underlag även för den direkta effekten av neutron- och gammastrålning inuti kapselmaterialet (både koppar och gjutjärn), en fråga som inte specifikt nämns i mark- och miljödomstolens fem punkter. Myndigheten bedömer att de nya beräkningarna och försöken på ett trovärdigt sätt bekräftar att eventuella strålningsinducerade skador i kapselmaterialet inte har någon mätbar betydelse för materialets mekaniska egenskaper, elektriska ledningsförmåga eller kemiska sammansättning" – SSM, i "SSM:s granskning av SKB:s komplettering till regeringen om kapselintegritet", s. 5.

Det verkar som att SSM därmed anser frågan om strålningsinducerad försprödning av segjärnet besvarad.

Kunskap om segjärnsinsatsen 2019

Strålningsinducerad försprödning i Fud-2019

I september 2019 skickade SKB ut Fud-2019 [19] där SKB nämner att de har utfört mer forskning kring strålskador [20] [21]. SKB drar slutsatserna att de beräknade strålskadorna är likadana som vid tidigare forskning, även om man försummar den s.k. "självläkningseffekten" som kan ske på material som bestrålas. SKB har slutfört förstudien på late blooming phases i segjärn som resulterade i en databas med termodynamiska data för faser i järnlegeringar, med referens till rapporten "Ab-initio based search for late blooming phase compositions in iron alloys" (Delandar, Gorbатов, Selleby et al. 2018). SKB skriver i avsnitt 9.2.3 "Strålningseffekter på koppar och segjärn" under "Program" i Fud-2019 att SKB inte kommer fortsätta forskningen om strålskador, men beräkningarna som erhållits kommer användas för att planera experiment för undersökning av eventuella kopparutfällningar i segjärnet, samt effekten av strålning på stålkanalrören och utfällning av andra faser i segjärnet.

Blåsprödhet i Fud-2019

I 9.4.2 "Gjutning av kapselns insats" i Fud-2019 beskriver SKB sitt resonemang kring blåsprödhet. SKB skriver att statisk och dynamisk deformationsåldring inte bedöms påverka de mekaniska egenskaperna, efter att ha gått igenom litteratur och tittat på lastfall. Motiveringen är att plasticerande laster behövs för att det ska uppstå, något som SKB inte bedömer kommer ske i slutförvaret, samt att temperaturen kommer vara för låg i kärnbränsleförvaret för att dynamisk deformationsåldring ska ske. SKB ställer sig dock inte emot att undersöka blåsprödhet vidare, och visar en tabell med temperatur och hastighetsparametrar för kommande experiment som ska visa hur segjärnet beter sig vid dragprov vid höga temperaturer, bifogad som appendix 1 i detta dokument. Kärnavfallsrådet efterfrågade en litteraturstudie, och i Fud-2016 hänvisar SKB till Yanagisawa och Lui 1983 samt Sarnet och Holst 2017.

Oförstörande provning, tillverkning och mildare krav i Fud-2019

Kärnavfallsrådet skriver i sin kunskapslägesrapport för 2018 [15] under "Sammanfattning om insatsen och slutsatser" att mildrade krav för mekaniska egenskaper och defekter kräver nya skadetålighetsanalyser för olika lastfall. SKB skrev redan i Fud-2016 att några mekaniska krav kan mildras, och skriver fortsatt i Fud-2019 under 9.3 "Konstruktion" att det finns förutsättningar att mildra kraven på brottförlängning i de centrala delarna av insatsen och att de kommer utreda det mer.

SKB har enligt Fud-2019 under 9.4.2 "Gjutning av kapselns insats" undersökt möjligheter att utveckla gjutprocessen och planerar att jämföra kvaliteten av segjärnsinsatserna som fås från olika gjuterier samt mäta segjärnets hållfasthet genom att undersöka densitet, ultraljudsegenskaper samt kemisk sammansättning. SKB planerar att undersöka vilken påverkan på segjärnet som fås då kanalrören av stål gjuts in i segjärnet samt vilka tillverkningskrav som ska finnas och även vilka defekter som kan bli aktuella med tillverkningsmetoderna som väljs.

I sektion 9.4.4 "Kontroll och provning" beskriver SKB hur defekter ska kunna upptäckas i segjärnet, och det anses vara lämpligt att använda ultraljud, magnetism och röntgen för att detektera defekterna. SKB skriver också att de har kommit fram till att kravet på brottförlängning bör vara 3 % för segjärnet, baserad på beräkningar med finita elementmetoden. De hänvisar till "Mechanical design analysis for the canister" [4] från vilken det går att utläsa slutsatser baserade på en studie av Hernelind och Börgesson 2018 "Global analyses to validate buffer properties corresponding to swelling pressures of 3-10 MPa and sensitivity analyses of buffer and steel tube properties".

"The findings are summarised as the following: (...) The ductility requirement of a minimum of 3 % elongation at failure is judged to be sufficient for the steel channel tubes, which is the same for the nodular cast iron". – s.128, Mechanical design analysis for the canister (2018).

Krypning och väteförsprödning Fud-2019

Kärnavfallsrådet skriver i kunskapslägesrapporten för 2018 [15] under "Designanalys och krav för gjutjärnsinsatsen" att det finns risk för att krypning sker i gjutjärnet, eftersom gjutjärnet belastas under lång tid, och att risken för detta beror av faktorer såsom geometrin, halten av väte samt eventuella restspänningar från tillverkningen. Kärnavfallsrådet kommenterar också att resultaten från de krypprovningar som skett har varit begränsade och att de resultat som erhållits används för att motivera att krypning i segjärnet inte kommer orsaka skada på segjärnsinsatsen i förvarsförhållanden. SKB nämner inte något om krypning i segjärnet i Fud-2019.

SKB nämner väteförsprödningens effekt på metall generellt i Fud-2019 i samband med väteförsprödning i koppar under 9.2.2 "Väteförsprödning": *"Väte kan i metaller förekomma både*

atomärt (H) eller som vätgasmolekyler (H₂). Om koncentrationen av väte är tillräckligt hög kan det påverka metallens mekaniska egenskaper negativt” – SKB, i Fud-2019 s. 197.

SKB skriver under ”Program” att de kommer fortsätta undersöka vätehalt i koppar. SKB nämner dock inget om kommande eller befintlig forskning på vätehalt i segjärnet i Fud-2019.

Kärnavfallsrådet efterfrågade i sin kunskapslägesrapport från 2018 data om krypning i kombination med försprödningsmekanismer i segjärnet, samt mer kunskap om väteförsprödning för segjärnet. Information om väteförsprödning för segjärnet har inte kunnat hittas i Fud-2019, SKB verkar bara ha behandlat blåsprödhet och strålningsinducerad försprödning i segjärnet i Fud-2019. SKB har heller inte specificerat vätehalter i gjutjärn, som Kärnavfallsrådet efterfrågade. Kärnavfallsrådet efterfrågade även i sitt yttrande över Fud-2016 verifierade experimentella försök gällande kopparhalt gällande strålningsinducerad försprödning. SKB skriver i Fud-2019 att de planerar att använda beräkningar om strålskador för att planera experiment på kopparutfällningar, för att kunna ställa krav på en kopparhalt i segjärnet.

Kärnavfallsrådets synpunkter på Fud-2019

I juni 2020 lämnade Kärnavfallsrådet ett yttrande om Fud-2019 [22]. Kärnavfallsrådet påpekar återigen att det saknas forskning om hur väte i gjutjärn påverkar de mekaniska egenskaperna, och att det behövs forskning samt krav på tillåten vätemängd i gjutjärnet senast i Fud-2022. Kärnavfallsrådet påpekar att det finns en rekommendation om max 600 g vatten i en sluten kapsel, och att denna rekommendation behöver undersökas med hänsyn till gränsvärdet för väte i gjutjärnet. Kärnavfallsrådet rekommenderar att SKB i Fud-2022 bör titta på vad den maximala vattenmängden i en sluten kapsel bör vara.

Kärnavfallsrådet ställer sig emot att SKB avslutat forskningen om strålskador gällande strålningsinducerad försprödning och menar att mer forskning kring detta behöver redovisas i Fud-2022: *”SKB bör ytterligare verifiera seghet och plastiska egenskaper hos gjutjärnsinsatsen med nya försök genom att karakterisera strålskador i gjutjärnet. Detta för att kunna ställa krav på maximalt tillåten kopparhalt i gjutjärnsinsatsen. Resultaten av dessa föreslagna försök bör redovisas i Fud-2022.”* – Kärnavfallsrådet, i Kärnavfallsrådets yttrande över SKB:s Fud-program 2019, s. 33.

Kärnavfallsrådet har också synpunkter på de mildrade kraven på de mekaniska egenskaperna under ”Kommentarer till Fud-avsnitt 9.4 Tillverkning, kontroll och provning” (Fud-2019). De menar att SKB i Fud-2022 bör redovisa den minskade toleransen i samband med de mildrade kraven, om de har mildrats. Kärnavfallsrådet har även synpunkter på SKB:s plan för att undersöka dynamisk deformationsåldring (se Appendix 1 i detta dokument) och de anser att den vetenskapligt sätt inte uppfyller kraven. Kärnavfallsrådet menar att det behöver ske fler tester över temperatintervall 25-200°C och att experimentet ska genomföras med flera olika draghastigheter, något som enligt Kärnavfallsrådet bör redovisas i Fud-2022.

Kärnavfallsrådet skickade inte ut någon kunskapslägesrapport för 2019 med anledning av Fud-2019-granskningen.

SSM om Fud-2019

I SSM:s granskningsrapport för Fud-2019 [3] kommenterar SSM indirekt strålningsinducerad försprödning genom att ställa sig positiva till SKB:s arbete med att försöka ställa krav på kopparhalten i segjärnet, under 7.3.2 ”Materialegenskaper hos kopparmaterial” under ”SSM:s bedömning”.

Precis som kärnavfallsrådet påpekade i ”Särskilda synpunkter på Fud-program 2016” så anser SSM att SKB bör sätta upp krav på kopparhalten i segjärnet:

"Eftersom bestrålning kan ha en försprödande effekt på segjärnet är det viktigt att studera materialets beteende och ställa väl underbyggda krav på maximal kopparhalt i materialspecifikationen". SSM, "Granskning och utvärdering av Fud-program 2019" s. 115.

SSM skriver återigen under 7.3.3 "Konstruktion" att SKB bör ta hänsyn till eventuell inhomogen fördelning av koppar i segjärnet när de ställer krav på kopparhalten och lägger till att SKB bör göra en tydlig materialspecifikation med krav på t.ex. perlithalt samt krav på defekter som t.ex. oxidinneslutningar och porer.

Det var inga synpunkter från övriga remissinstanser gällande segjärnet för Fud-2019.

2020 och framåt

I Kärnavfallsrådets kunskapslägesrapport för 2020 [23] så påpekar rådet återigen att det behövs mer forskning på gjutjärnsinsatsen, även om Mark- och miljödomstolen inte la vikt vid det i sitt yttrande i januari 2018 så anser Kärnavfallsrådet att forskningen kring gjutjärnet behöver fortsätta:

"Föroreningar i gjutjärnet i form av t.ex. koppar och väte, och åldrande under påverkan av joniserande strålning, har visat sig påverka gjutjärnets mekaniska egenskaper negativt i olika former av försprödningsmekanismer. Detta skulle kunna resultera i att om gjutjärnsinsatsen skulle spricka, så minskar också kopparkapselns mekaniska stabilitet. Ytterligare forskningsinsatser på gjutjärnsinsatsens mekaniska egenskaper över tid i en miljö med hög strålningsintensitet synes därför nödvändiga även om dessa frågor inte tagits upp av mark- och miljödomstolen". – Kärnavfallsrådet, i Kunskapslägesrapport på kärnavfallsrådet 2020, s. 76.

Avslutande kommentar

Det behöver göras mer forskning gällande segjärnet, i synnerhet strålningsinducerad försprödning och blåsprödhet. När det gäller strålningsinducerad försprödning är det värt att hålla utkik på vilken kopparhalt som specificeras i segjärnet med hänsyn till late blooming phases och kopparutfällningar.

Gällande blåsprödhet så kan det vara värt att hålla utkik i kommande Fud-program och forskningsrapporter huruvida SKB följt Kärnavfallsrådets rekommendationer gällande temperaturintervallen och draghastigheterna för experimentet som rör dynamisk deformationsåldring.

Det behöver även startas forskning på påverkan av mekaniska egenskaper som en följd av väteupptag och diffusion i segjärn samt kombinationseffekter av mekanismer, som t.ex. krypning i segjärnet och försprödningsmekanismerna. Det är viktigt att förstå tillverkningsprocessens inverkan på segjärnets hållfasthet och hur defekter och osäkerheter kan minskas, något SSM har påpekat och som förhoppningsvis blir mer klart framöver. Kärnavfallsrådet efterfrågade också en redovisning av minskade toleranser som följd av mildrade krav på de mekaniska egenskaperna hos segjärnet. Eftersom SSM också efterfrågade en tydlig materialspecifikation så kan det förhoppningsvis tydliggöras framöver mer precist på vilket sätt SKB mildrat kraven och hur kravet på brottförlängning förändrats. Förhoppningsvis kan mer information erhållas kring dessa punkter i SKB:s forsknings- och utvecklingsprogram för 2022.

Referenser

- [1] SKB, "Fud-program 2010," 2010. [Online]. Available: <https://skb.se/publication/2043728/Fud+2010webb.pdf>.
- [2] SKB, "Design, production and initial state of the canister," 2010. [Online]. Available: <https://www.skb.se/publikation/2151522/TR-10-14.pdf>.
- [3] SSM, "Granskning och utvärdering av Fud-program 2019," 2020. [Online]. Available: https://www.mkg.se/uploads/SSM_rapport_granskning_utvardering_Fud-program_2019_200330.pdf.
- [4] SKB, "Mechanical design analysis for the canister," 2018. [Online]. Available: <https://www.skb.se/publikation/2492071/Posiva+SKB+Report+04.pdf>.
- [5] SKB, "Fud-program 2013. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall.," 2013. [Online]. Available: https://www.skb.se/publication/2641578/Fud_2013.pdf.
- [6] SKB, "Svar till SSM angående förtydligande om information i ansökan om slutförvaring av använt kärnbränsle och kärnavfall - bränslets initialtillstånd," 2012. [Online]. Available: https://www.mkg.se/uploads/Arende_SSM2011_2426/SSM20112426_036_Komplettering_enligt_begaran_om_branslets_initialtillstand_daterad_120320_bilaga.pdf.
- [7] Kärnavfallsrådet, "Kärnavfallsrådets yttrande över SKB:s Fud-program 2013," 2014. [Online]. Available: https://www.karnavfallsradet.se/sites/default/files/documents/sou_2014_42_webb_publicerad_16_juni_1.pdf.
- [8] SKB, "Fud-program 2016," 2016. [Online]. Available: <https://www.skb.se/publikation/2484681/Fud+2016.pdf>.
- [9] SKB, "Svar till SSM på begäran om komplettering avseende degraderingsprocesser för kapseln.," 2014. [Online]. Available: https://skb.se/wp-content/uploads/2015/05/1398013-Svar-till-SSM-pa-begaran-om-komplettering-avseende-degraderingsprocesser-for-kapseln_7.pdf.
- [10] P. Olsson *et al.*, "Electron irradiation accelerated Cu-precipitation experiment. Testing of canister insert cast iron and an FeCu model alloy.," 2013. [Online]. Available: https://www.mkg.se/uploads/Arende_SSM2011_2426/SSM20112426_195_Bilaga_6_R-13-50_electron_irradiation_accelerated_cu-precipitation_experiment.pdf.
- [11] N. Sandberg and P. Korzhavyi, "Theoretical study of irradiation induced hardening and embrittlement in spent nuclear fuel holders, relevant for the Swedish long-term storage," 2009. [Online]. Available: <https://www.skb.com/publication/1930415/R-09-15.pdf>.
- [12] Strålsäkerhetsmyndigheten, "2017:17. Granskning och utvärdering av SKB:s redovisning av Fud-program 2016," 2017. [Online]. Available: <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/contentassets/966665fd1b9446fe9f3a35ac35fa3c0f/201717-granskning-och-utvardering-av-skbs-redovisning-av-fud-program-2016>.
- [13] Kärnavfallsrådet, "Kärnavfallsrådets yttrande över SKB:s Fud-program 2016," 2017. [Online]. Available: https://www.karnavfallsradet.se/sites/default/files/documents/sou_2017_62_webb.pdf.
- [14] SKB, "Svar till SSM på begäran om komplettering kring förspärningsmekanismer för kapseln," 2017. [Online]. Available: https://www.mkg.se/uploads/Arende_SSM2011_2426/SSM20112426_231_SKB_svar_pa_begaran_komplettering_DSA_170904.pdf.

- [15] Kärnavfallsrådet, "Kunskapsläget på kärnavfallsområdet 2018. Beslut under osäkerhet.," 2018. [Online]. Available: <https://www.regeringen.se/491289/contentassets/fe486d5caaa481d985ce588d97a0e5e/kunskapslaget-pa-karnavfallsområdet-2018---beslut-under-osakerhet-sou-20188>.
- [16] M. Miljödomstolen, "Mark- och miljödomstolens yttrande," 2018. [Online]. Available: <https://www.regeringen.se/4ada4f/globalassets/regeringen/dokument/miljodepartementet/pdf/m1333-11-yttrande-till-regeringen-2018-01-23.pdf>.
- [17] SKB, "Komplettering om kapselintegritet," 2019. [Online]. Available: https://www.skb.se/wp-content/uploads/2019/04/02_Bilaga-1a_Kapselintegritet-svensk-sammanfattning_1718509.pdf.
- [18] SSM, "SSM:s granskning av SKB:s komplettering till regeringen om kapselintegritet," 2019. [Online]. Available: <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/contentassets/1b958871705a4d61b58a415cd1d5027b/stralsakerhetsmyndighetens-granskning-av-skbs-komplettering-till-regeringen-om-kapselintegritet.pdf>.
- [19] SKB, "Fud-program 2019. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall.," 2019. [Online]. Available: https://www.mkg.se/uploads/SKB_Fud-program_2019_191001.pdf.
- [20] SKB, "Analysis of radiation damage in the KBS-3 canister materials. Technical Report TR-19.14.," 2019. [Online]. Available: /SKBdoc 1175208/.
- [21] C. Padovani *et al.*, "Assessment of microstructural changes in copper due to gamma radiation damage. Technical report TR-19-12.," 2019. [Online]. Available: <https://www.skb.se/publikation/2492831/TR-19-12.pdf>.
- [22] Kärnavfallsrådet, "Kärnavfallsrådets yttrande över SKB:s Fud-program 2019," 2020. [Online]. Available: https://www.karnavfallsradet.se/sites/default/files/documents/sou_2020_39_webb.pdf.
- [23] Kärnavfallsrådet, "Kunskapsläget på kärnavfallsområdet 2020," 2020. [Online]. Available: https://www.karnavfallsradet.se/sites/default/files/documents/s_2020_9_webb.pdf.

**Appendix 1:
SKB:s plan för dragprovs-experiment relaterad till dynamisk
deformationsåldring**

Insats	Höjd (mm)	Provstav	Temperatur (°C)	Hastighet (1/s)
i76	2306	2	20	$2,8 \times 10^{-4}$
i76	2306	5	125	$2,8 \times 10^{-4}$
i76	2306	11	300	$2,8 \times 10^{-4}$
i76	2306	14	400	$2,8 \times 10^{-4}$
i76	2336	2	400	$2,8 \times 10^{-4}$
i76	2336	5	20	$2,8 \times 10^{-4}$
i76	2336	11	125	$2,8 \times 10^{-4}$
i76	2336	14	300	$2,8 \times 10^{-4}$
i76	2377	2	300	$2,8 \times 10^{-4}$
i76	2377	5	400	$2,8 \times 10^{-4}$
i76	2377	11	20	$2,8 \times 10^{-4}$
i76	2377	14	125	$2,8 \times 10^{-4}$
i76	2419	2	125	$2,8 \times 10^{-4}$
i76	2419	5	300	$2,8 \times 10^{-4}$
i76	2419	11	400	$2,8 \times 10^{-4}$
i76	2419	14	20	$2,8 \times 10^{-4}$
i57	2336	2	300	$7,7 \times 10^{-5}$
i57	2336	5	300	$2,8 \times 10^{-4}$
i57	2336	11	300	$7,7 \times 10^{-5}$
i57	2336	14	300	$2,8 \times 10^{-4}$
i57	2372	2	300	$2,8 \times 10^{-4}$
i57	2372	5	300	$7,7 \times 10^{-5}$
i57	2372	11	300	$2,8 \times 10^{-4}$
i57	2372	14	300	$7,7 \times 10^{-5}$
i57	2372	2	300	$2,8 \times 10^{-4}$

Figur 4. SKB:s planerade experiment för dynamisk deformationsåldring (Fud-2019, s.204).

Appendix 2: Begreppsförklaringar

brottseghet: materialets förmåga att stå emot spricktillväxt.

deformationsåldring: ett material kan få ökad hårdhet och sprödhet som en följd av deformation.

diffusion: transport av molekyler från ett område med hög koncentration molekyler till låg koncentration av molekyler.

dynamisk deformationsåldring: då deformationsåldring av materialet sker under deformationen.

elastisk deformation: materialet deformeras under last och återgår till sin ursprungsform då lasten tas bort.

korngränser: områden mellan kristallkorn i t ex metaller.

kryp: deformation av material under last vid en viss temperatur, som funktion av tid.

plastisk deformation: materialet deformeras under last och förändringen är permanent även när lasten tagits bort.

radiolys: kemisk interaktion mellan molekyler och joniserande strålning.

statisk deformationsåldring: då deformationsåldring av materialet sker efter deformationen.

sträckgräns: gränsen då ett material går från elastisk deformation till plastisk deformation.