



DokumentID 1221567	Version 2.0	Status Godkänt	Reg nr	Sida 1 (25)
Författare Lennart Agrenius/Agrenius Ingenjörbyrå AB			Datum 2009-09-10	
Kvalitetssäkrad av Per Grahn (KG)			Kvalitetssäkrad datum 2010-12-21	
Godkänd av Olle Olsson			Godkänd datum 2010-12-21	
Kommentar Granskat enligt SKBdoc id 1226072				

SKB - Simulering av inkapsling av använt kärnbränsle för slutförvaring i KBS-3-förvar

Innehållsförteckning	Sida
1 Inledning, bakgrund	3
2 Krav	4
3 Metodik	5
3.1 Bränsleinventarium	5
3.2 Beräkning av resteffekter	5
3.3 Simulering av inkapsling	6
4 Beskrivning av kapslarna	8
5 Inventariet av använt bränsle	9
5.1 Inledning	9
5.2 Scenario 1 - Bränsleinventarium med 50/60 års drift och dagens målutbränning	11
5.3 Scenario 2 - Bränsleinventarium enligt plan 2008 – avgiftsgrundande drift 40 år	13
5.4 Scenario 3 - Bränsleinventarium med 50/60 års drift och ökad målutbränning	13
6 Begränsningar i hantering	16
7 Simulering av inkapsling	17
7.1 Förutsättningar	17
7.2 Scenario 1 –50/60 års drift av reaktorerna med dagens målutbränningar	17
7.3 Scenario 2 – Avgiftsgrundande drift av reaktorerna 40 år	20
7.4 Scenario 3 – 50/60 års drift av reaktorerna med ökad målutbränning	21
8 Diskussion och slutsats	24
9 Referensförteckning	25

Sammanfattning

Inkapslingsprocessen av använt kärnbränsle har simulerats utgående ifrån aktuella driftscenarier för reaktorerna. Målet är att genom en god strategi för fyllning av kapslarna innehålla kriteriet för maximal resteffekt i kapseln och att minimera antalet kapslar. I simuleringen har resteffekter för alla bränsleelement vid inkapslingstillfället utnyttjats. Metoden för resteffektberäkning har validerats med hjälp av mätdata från kalorimetriska mätningar i Clab.

Det framgår att ett bränsleinventarium baserat på reaktorernas planerade drifttider, termiska effekter samt ansatt inkapslingsperiod kommer att leda till ett antal delvis fyllda kapslar. Planerade drifttider av reaktorerna innebär 50 års drift av reaktorerna vid Forsmark och Ringhals samt 60 års drift av reaktorerna vid Oskarshamn.

Orsaken till att alla kapslar inte kan fyllas helt är den begränsning som uppkommer på grund av att resteffekten i kapslarna högst får vara 1700 W (1650 W med marginal för osäkerheter). Detta innebär, vid det aktuella bränsleinventariet och den ansatta inkapslingsperioden, att antalet kapslar kommer att bli fler än om alla kapslar kunnat fyllas helt och att inkapslingsperioden blir längre än förutsett i planarbetet.

I studien tas hänsyn till planerade effekthöjningar av vissa kärnkraftverk. Inverkan av planerade ökning av bränslets målutbränning har också studerats. Det visas att för den ansatta inkapslingstakten ökar både antalet kapslar och drifttid för KBS-3-systemet då utbränningsmålen ökas. Detta medför ökade kostnader för slutdeponeringen. Kostnaderna har inte utvärderats i denna rapport.

Begränsningen i resteffekt leder till att alla kapslar inte kan fyllas helt vid den ansatta inkapslingsperioden. Det är bränslets slututbränning och avklingningstid som styr resteffekten i bränslet. Resteffekten i det använda bränslet beror på kärnkraftverkens utbränningsmål. Avklingningstiden är den en tid som förflutit sedan bränslet tagits ut ur reaktorn till inkapsling sker.

En fördröjning av startidpunkten för inkapsling eller reduktion av inkapslingstakten medför ökade avklingningstider, därmed minskar resteffekten i bränsleinventariet vid inkapslingstillfället. Detta leder till att antalet delvis fyllda kapslar minskar. Ett annat sätt är att minska antalet delvis fyllda kapslar är att öka tillåten kapseffekt

Med ett bränsleinventarium baserat cirka 40 års drift av reaktorerna kan samtliga kapslar fyllas helt.

1 Inledning, bakgrund

Grundläggande krav vid fyllning av bränsleelement i kapslarna för deponering i slutförvaret är dels att bränslet i kapseln ska vara säkert underkritiskt och dels att sammanlagda resteffekten i kapseln inte får överskrida 1700 W (1650 W med marginal för osäkerheter).

Målsättningen är minimera totala antalet kapslar. Detta innebär att fyllningen av kapslarna ska ske så att det i inkapslingsperiodens slutskede finns så få bränsleelement som möjligt med höga resteffekter.

Syftet med denna rapport är att analysera och belysa strategier för fyllning av kapslarna med målet att uppfylla resteffektkravet och minimera antalet inte helt fyllda kapslar.

2 Krav

Effekten i en kapsel får inte överskrida 1700 W. Bakgrund och närmare beskrivning av detta kriterium finns i /SKBdoc 1070912/.

Med hänsyn till beräkningsosäkerheter har gränsvärdet satts till 1650 W vid beräkningarna som gjorts i denna rapport för att inte någon kapsel ska överskrida 1700 W. Marginalen 50 W grundar sig på den verifikation av beräkningsmetoderna som redovisats i /SKB 2006/.

3 Metodik

Syftet med analysen är att hitta en strategi för fyllning av kapslarna så att alla kapslar har maximal tillåten resteffekt vid inkapslingstillfället och att alla kapslar kan fyllas helt och antalet kapslar minimeras. Detta görs i följande steg:

1. Generering av det bränsleinventarium som ska kapslas in
2. Beräkning av bränsleelementens resteffekter
3. Simulering av fyllning av kapslarna

3.1 Bränsleinventarium

Flera olika inventarier av bränsleelement som ska kapslas in tas fram baserat på olika scenarier för reaktorernas drifttid och målutbränningar. Detta redovisas i avsnitt 5 nedan.

3.2 Beräkning av resteffekter

Resteffekten för alla bränsleelement beräknas med SAS2H/Origen-S i Scale5 /ORNL 2006/. Metoden för resteffektberäkning har verifierats mot kalorimetriska mätningar av resteffekten på bränsleelement i Clab. Överensstämmelsen mellan beräkningar och mätningar har befunnits mycket god /SKB 2006/.

För BWR används bränsletypen Svea96 Optima 2 för O3 MOX används Atrium 10B och för PWR F17x17. Data för dessa bränsletyper har hämtats från /Alladin reg nr BR91-446, SKBdoc 1059174 och SKBdoc id 1221579, ver 1.0 konfidentiellt, endast tillgängligt för Strålsäkerhetsmyndigheten./, se tabell 1.

Tabell 1 – Huvuddata för bränsletyper

Parameter	F17x17	Svea 96 Optima 2	Atrium10B MOX (O3)
Referens	Alladin reg nr BR91-446	SKBdoc 1059174	*
Bränsletyp	17x17	4x(5x5)	10x10
Stavdelning, medel (mm)	12.6	12.78	12.95
Stavdiameter ytter (mm)	9.5	9.84	10.05
Stavdiameter inner (mm)	8.36	8.63	8.9
Kapslingstjocklek (mm)	0.57	0.605	0.525
Kutsdiameter (mm)	8.19	8.48	8.67
Kapslingsmaterial	Zr 4	Zr2	Zr2
Aktiv längd (mm)	3658	3 680	3680
Densitet HM (g/cc)	10.45	10.60	10.45
Ledrör diameter ytter (mm)	12.05		
Ledrör diameter inner (mm)	11.25		
Ledrör kapslingstjocklek (mm)	0.40		
Instrumentrör diameter ytter (mm)	12.05		
Instrumentrör diameter inner (mm)	0.40		
Instrumentrör kapslingstjocklek (mm)	11.25		
Box yttermått (mm)		139.6	138.85
Boxvägg, tjocklek (mm)		1.1	2.3
Del box innermått (mm)		65.9	
Korset väggstjocklek (mm)		0.8	
Vattenspalt i kors (mm)		4.0	
Initialanrikning	4.0 %U235	3.6% U235	4.6 % Pu+ 0.2 % U-235

*) SKBdoc id 1221579, ver 1.0 konfidentiellt, endast tillgängligt för Strålsäkerhetsmyndigheten.

Resteffekten som funktion av tiden beräknas för alla bränsleelement i respektive scenario. Med dessa data genereras tabeller med resteffekter för alla bränsleelement för alla de år som inkapsling kan antas

ske. Avklingningstiden för respektive bränsleelement beräknas från ”datum ut ur härd” för de aktuella slututbränningarna. För bränsle som finns i Clab används verkliga slututbränningar och resteffekten beräknas för varje enskilt bränsleelement. För tillkommande bränsle används slututbränningar enligt antagna driftscenarion, se avsnitt 5 nedan. För dessa baseras resteffektberäkningen på medelutbränningen, dvs alla bränsleelement har samma utbränning i respektive batch.

Beträffande anrikningarna har det antagits 3.6% U-235 för BWR och 4.0 % U-235 för PWR. Antagandet är baserat på de anrikningar som utnyttjats de senaste åren med dagens utbränningsmål. För framtida ökade utbränningsmål kommer högre anrikningar att utnyttjas. Högre anrikningar leder till lägre resteffekter vid samma utbränning och avklingningstid, vilket innebär att de använda anrikningarna är konservativa ur resteffektsynpunkt.

3.3 Simulering av inkapsling

För är att hitta en strategi för fyllning av kapslarna har en simuleringsmodell utvecklats som tar hänsyn till de individuella bränsleelementens resteffekt vid olika tidpunkter. Med detta menas att hitta en ordning för hur bränsleelementen ska placeras i kapslarna för att minimera antalet kapslar som inte kan fyllas helt på grund av resteffektbegränsningen med en given årlig produktionstakt av kapslar.

Vid inkapsling är det flera faktorer som avgör i vilken ordning som bränsleelementen ska väljas för att kapslas in. Dels rymmer varje kapsel ett visst antal bränsleelement (12 st för BWR respektive 4 st för PWR), dels får den totala resteffekten av alla bränsleelement i kapseln ej överskrida 1700 W (1650 W med marginal för osäkerheter). Varje bränsleelement har olika resteffekt som beror på bränsleelementets utbränning vid tidpunkten då det togs ut ur reaktorn och den tid som förslutit till dess inkapsling sker, den så kallade avklingningstiden (resteffekten avklingar i princip exponentiellt med tiden).

Bränsleelementens resteffekter måste vara kända vid inkapslingstillfället för att kunna kombineras ihop på ett sådant sätt att 1700 W (1650 W med marginal för osäkerheter) ej överskrids. I simuleringsmodellen hämtas resteffekten vid inkapslingstillfället för de olika bränsleelementen från resteffektstabeller som har räknats fram enligt ovan.

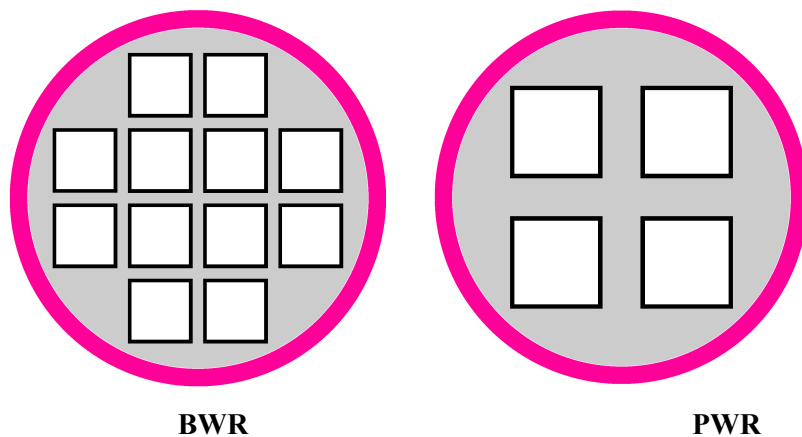
Då inkapslingen antas starta finns det bränsleelement som tagits ur reaktorerna 1976. Dessa bränsleelement har fått ”svalna” under den förflutna tiden, dvs resteffekten har avtagit, sedan de togs ur reaktorn. Varje år kommer det dock nya bränsleelement från reaktorerna med hög resteffekt fram till dess alla reaktorer har ställts av. Dessa nya bränsleelement har i regel så hög resteffekt att det inte går att placera dessa bränsleelement i en och samma kapsel utan att överskrida 1700 W (eller 1650 W med marginal för osäkerheter). Svårigheten består alltså i att kombinera ihop bränsleelementen på ett sådant sätt att det blir få kapslar som inte är helt fyllda, samt att utföra inkapslingen under den antagna tiden. Det ska också noteras att delar av sista härdarna har låg utbränning. Dessa lågutbrända bränsleelement är en fördel ur resteffektsynpunkt.

Olika strategier har testats för att analysera och simulera hur bränsleelement kan kombineras i kapslarna vid de olika scenarierna så att resteffektkravet innehålls under hela inkapslingsperioden. Den gemensamma utgångspunkten för de olika strategierna var att simulera inkapsling av bränsleelement med relativt hög resteffekt tidigt i syfte att så långt som möjligt ha kvar bränsleelement med låg resteffekt att kombinera ihop med de bränsleelement med hög resteffekt som tagits ur reaktorerna sent. En metod som testades var att ”gå baklänges” och börja med det sista året och stega bakåt. Fördelen med denna metod var att man säkert kan hantera bränsleelement med hög resteffekt i slutet av inkapslingsperioden. Dessvärre visade det sig att metoden inte lyckades fylla kapslarna optimalt då det uppstod problem att kombinera kapselinnehåll i början av perioden.

Det visade det sig lämpligare att använda den första ansatsen, arbeta från början av inkapslingen till slutet. Metoden som slutligen användes och som gav tillförlitliga resultat innebar att man stegade fram ett år i taget, läste in alla tillgängliga bränsleelement i datorprogrammet och sedan fyllde antalet begärda kapslar med bränsleelement. Elementen kombineras så att nära maximal tillåten resteffekt erhålls i kapseln. Val av bränsleelement med relativt hög resteffekt prioriteras för att spara de med låg resteffekt så länge som möjligt.

4 Beskrivning av kapslarna

Det finns två typer av kapslar, en för BWR-bränsle som innehåller 12 bränsleelement och en för PWR-bränsle som innehåller 4 bränsleelement, se figur 1. Detaljer om kapslarnas konstruktion finns i /SKB 2010/. I Clab finns ett antal udda bränsletyper såsom Ågestabränsle, tyskt MOX-bränsle och bränslerester från Studsvik. Detta bränsle placeras i BWR- eller PWR-kapslar.



Figur 1 – Principskisser av BWR- och PWR-kapsel

5 Inventariet av använt bränsle

5.1 Inledning

Antalet slututbrända bränsleelement till dags dato är känt avseende antal, initialanrikning, slututbränning och övriga data. Det antal slututbrända bränsleelement som kommer att produceras i framtiden beror på hur länge reaktorerna drivs och till vilken utbränning bränslet körs. Tendensen är idag att kärnkraftverken strävar efter att öka bränslets utbränning, vilket innebär att färre bränsleelement används men att dessa kommer att ha en högre resteffekt.

I denna analys utnyttjas data för bränsle som förvaras i Clab. Data för dessa hämtas från Clab:s dataregister (Dark) daterat 2007-12-31. För alla dessa bränsleelement är data såsom utbränningar och avklingningstider kända, vilket utnyttjas i denna analys.

Beräkningen av antalet tillkommande bränsleelement grundar sig på reaktoreffekter enligt tabell 2 samt planerade höjningar av reaktorernas termiska effekter enligt tabell 3.

Tre scenarion analyseras:

Scenario 1:

I detta scenario antas drifttiden för reaktorerna vara 50 år för reaktorerna vid Forsmark och Ringhals och 60 år för reaktorerna vid Oskarshamn, se tabell 2. Det antas att kraftverken driver reaktorerna med oförändrade målutbränningar (se tabell 4) för bränslet.

Scenario 2

Scenario 2 baseras på det bränsleinventarium som uppstår vid så kallad avgiftsgrundande drift av reaktorerna /SKB 2009/. Detta innebär ca 40 års drifttid se tabell 2. I övrigt är förutsättningarna desamma som i scenario 1, se ovan.

Scenario 3

Scenario 3 baseras liksom scenario 1 på 50/60 års drift av reaktorerna (tabell 2). Beträffande utbränningsmålen ökas dessa enligt kärnkraftverkens planer redovisade i SKBdoc 1219727, ver 2.0 (Konfidentiell information. Endast tillgänglig för Strålsäkerhetsmyndigheten). Det ska noteras att angivna värden för utbränningsmål är medeltal för slututbränt bränsle. Utbränningen för enskilda bränsleelement antas vara normalfördelade kring de angivna medelvärdena och ha en spridning på ± 3 MWd/kgU.

Tabell 2– Drifftid och data för reaktorerna

Block	Reaktor- typ	Termisk effekt (MW _{th})	Antal bränsle- element i härden	Start	50/60 års drift		40 års drift	
					Ur drift	Drifftid (år)	Ur drift	Drifftid (år)
B1	BWR	1800	444	1975-07-01	1999-11-30	24	1999-11-30	24
B2	BWR	1800	444	1977-07-01	2005-05-31	28	2005-05-31	28
R1	BWR	2540	648	1976-01-01	2025-12-31	50	2015-12-31	40
O1	BWR	1375	448	1972-02-06	2032-02-05	60	2015-12-31	44
O2	BWR	1800	444	1974-12-15	2034-12-14	60	2015-12-31	41
O3	BWR	3300	700	1985-08-15	2045-08-14	60	2025-08-14	40
F1	BWR	2928	676	1980-12-10	2030-12-09	50	2020-12-09	40
F2	BWR	2928	676	1981-07-07	2031-07-06	50	2021-07-06	40
F3	BWR	3300	700	1985-08-22	2035-08-21	50	2025-08-21	40
R2	PWR	2652	157	1975-05-01	2025-04-30	50	2015-04-30	40
R3	PWR	2992	157	1981-09-09	2031-09-08	50	2021-09-08	40
R4	PWR	2775	157	1983-11-21	2033-11-20	50	2023-11-20	40

Tabell 3 – Ansatta höjningar av reaktorernas termiska effekter

Reaktor	Termisk effekt (MW _{th})					
	2008	2009	2010	2011	2012	2013
B1						
B2						
R1						
O1						
O2					2300	
O3		3900				
F1			3255			
F2		3255				
F3				3775		
R2						
R3		3144				
R4					3300	

Tabell 4 – Antagna utbränningsmål i scenario 1 och 2

Reaktor	Utbränningsmål (MWd/kgU)
O1	45
O2	45
O3	45
F1	42.5
F2	42.5
F3	42.5
R1	45.7
R2	53.5
R3	42
R4	42.5

I de bränsleinventarier som redovisas i de olika scenarierna ingår följande bränsleelement.

I samtliga BWR- inventarier ingår stavmagasin, 3 MOX-bränsleelement som har använts i O1 och 80 MOX-bränsleelement som planeras att användas i O3. Det ingår också 184 SWAP MOX-bränsleelement från Tyskland samt 222 bränsleelement från Ågesta.

I samtliga PWR-inventarier ingår 33 PWR SWAP MOX-bränsleelement från Tyskland.

I dag finns 19 transportboxar med bränslerester från Studsvik. Det bedöms att det kommer att produceras totalt 25 transportboxar. Bränsleresterna från Studsvik kommer att placeras i separata PWR-kapslar. Dessa sju kapslar ingår inte i det här redovisade bränsleinventariet.

5.2 Scenario 1 - Bränsleinventarium med 50/60 års drift och dagens målutbränning

I detta scenario antas drifttiden för reaktorerna vara 50 år för reaktorerna vid Forsmark och Ringhals och 60 år för reaktorerna vid Oskarshamn, se tabell 2. Det antas att kraftverken driver reaktorerna med oförändrade målutbränningar (se tabell 4) för bränslet.

Dessa förutsättningar ger 50685 BWR-bränsleelement och 6375 PWR-bränsleelement.

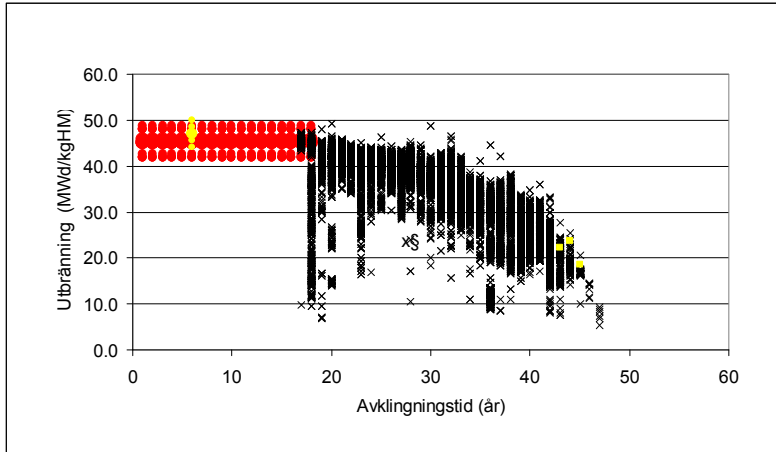
Medelutbränningen för detta inventarium blir:

BWR 38.0 MWd/kgU

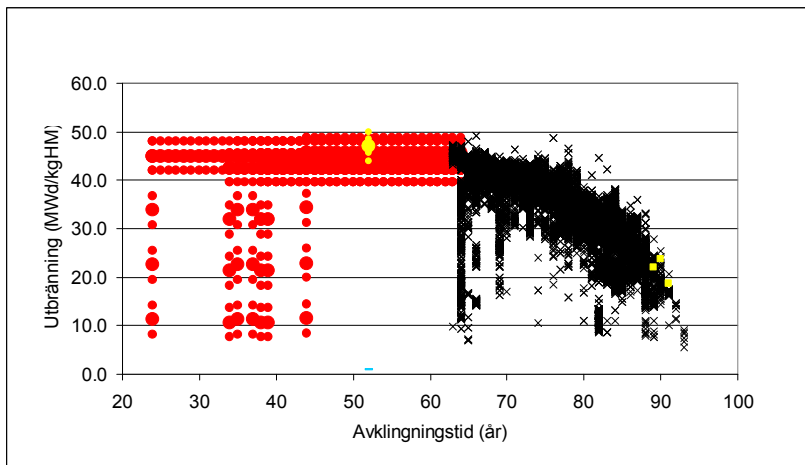
PWR 42.2 MWd/kgU

I figur 2 visas utbränning och avklingningstid för de BWR-bränsleelement som producerats då inkapsling startar år 2023. De svarta markeringarna visar det bränsle som fanns i Clab 2007-12-31. De röda utgör tillkommande bränsleelement där varje markering kan innefatta flera bränsleelement. För dessa markeras batchmedelvärdet med en spridning på ± 3 MWd/kgU. De gula markeringarna är MOX-element från O1 och O3. I figur 3 visas avklingningstid och utbränning för BWR-bränsleinventariet år 2069.

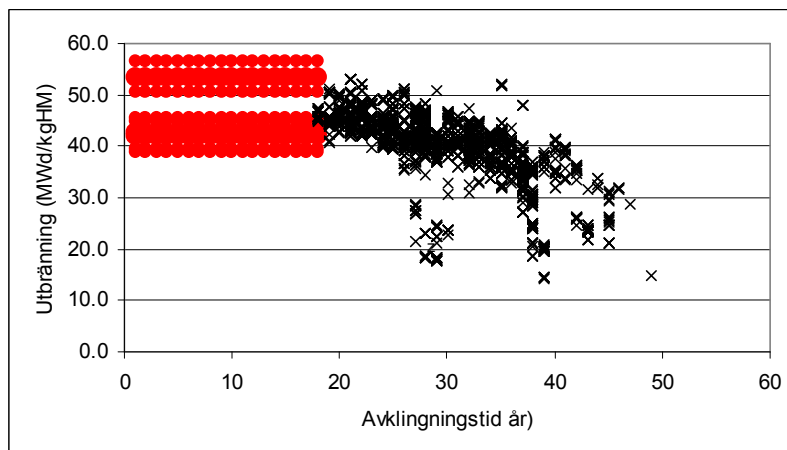
I figur 4 och 5 visas motsvarande diagram för inventariet av PWR-bränsle.



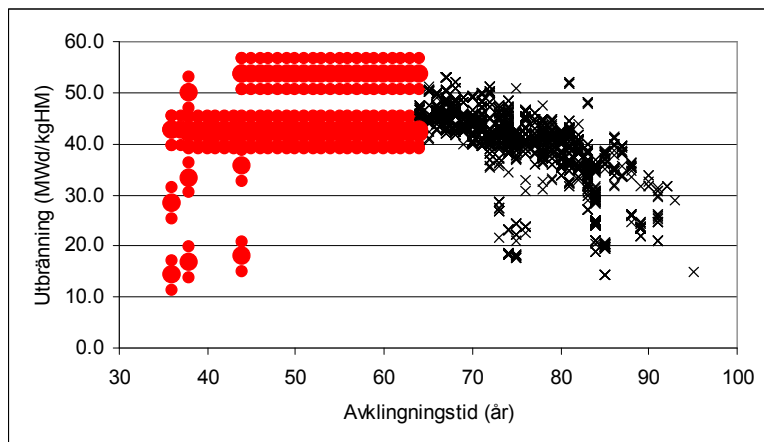
Figur 2 - Avklingningstid och utbränning för BWR-bränsleinventariet år 2023



Figur 3- Avklingningstid och utbränning för BWR-bränsleinventariet år 2069



Figur 4 – Avklingningstid och utbränning för PWR-bränsleinventariet år 2023



Figur 5 – Avklingningstid och utbränning för PWR-bränsleinventariet år 2069

5.3 Scenario 2 - Bränsleinventarium enligt plan 2008 – avgiftsgrundande drift 40 år

Scenario 2 baseras på det bränsleinventarium som uppstår vid s.k. avgiftsgrundande drift av reaktorerna. Detta innebär ca 40 års drifttid. I övrigt är förutsättningarna desamma som i scenario 1.

Drifttiden enligt 40 års drift i tabell 2 och samma målutbränningar som i scenario 1 ger 39313 BWR-bränsleelement och 5059 PWR-bränsleelement.

Medelutbränningen för detta inventarium blir:

BWR 36.3 MWd/kgU

PWR 41.1 MWd/kgU

5.4 Scenario 3 - Bränsleinventarium med 50/60 års drift och ökad målutbränning

Scenario 3 baseras liksom scenario 1 på 50/60 års drift av reaktorerna enligt tabell 2. Enligt kärnkraftverken planeras utbränningsmålen att utökas enligt SKBdoc 1219727, ver 2.0 (Konfidentiell information. Endast tillgänglig för Strålsäkerhetsmyndigheten).

Dessa målutbränningar och i övrigt samma förutsättningar som i scenario 1 ovan ger 47904 BWR-bränsleelement och 6049 PWR-bränsleelement.

Medelutbränningen för detta inventarium blir:

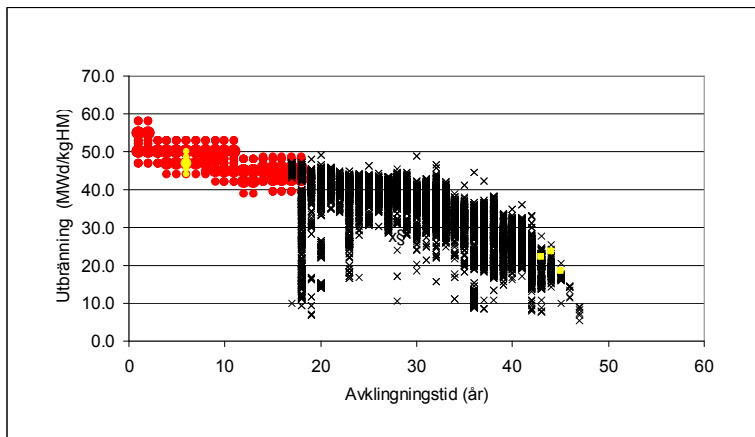
BWR 40.4 MWd/kgU

PWR 44.8 MWd/kgU

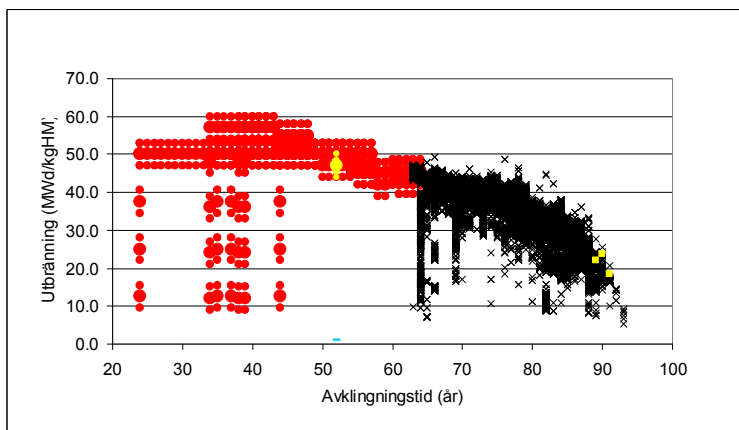
I figur 6 visas utbränning och avklingningstid för de BWR-bränsleelement som producerats då inkapsling startar år 2023. De svarta markeringarna visar det bränsle som fanns i Clab 2007-12-31. De röda utgör tillkommande bränsleelement där varje markering kan innefatta flera bränsleelement. För dessa markeras batchmedelvärdet med en spridning på ± 3 MWd/kgU. De gula markeringarna är

MOX-element från O1 och O3. I figur 7 visas avklingningstid och utbränning för BWR-bränsleinventariet år 2069.

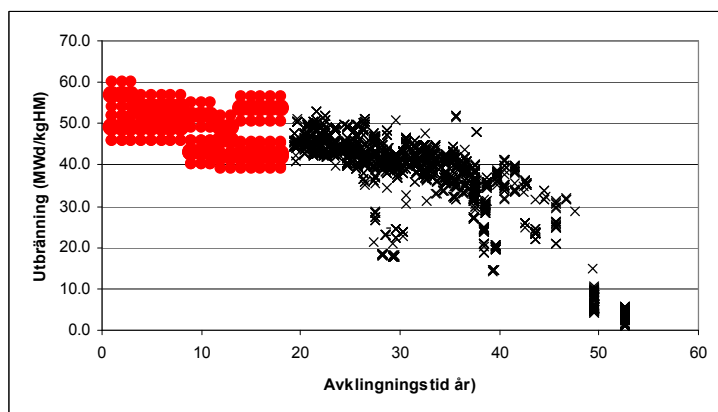
I figur 8 och 9 visas motsvarande diagram för inventariet av PWR-bränsle.



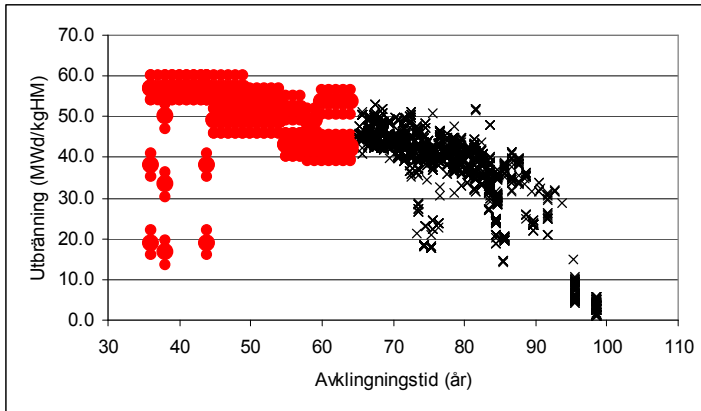
Figur 6 – Avklingningstid och utbränning för BWR-bränsleinventariet år 2023



Figur 7 – Avklingningstid och utbränning för BWR-bränsleinventariet år 2070



Figur 8 – Avklingningstid och utbränning för PWR-bränsleinventariet år 2023



Figur 9 – Avklingningstid och utbränning för PWR-bränsleinventarier år 2070

6 Begränsningar i hantering

Beroende på fördelningen av bränsleelement med olika avklingningstid och utbränning i förvaringskassetterna i Clab kommer det att vara svårt att finna enstaka kassetter med bränsleelement, som går att kombinera ihop så att resteffekten högst 1700 W (1650 W med marginal för beräkningsosäkerheter). Därför behöver bränsleelement till en kapsel hämtas från flera kassetter. Det planeras för 12 kassettpositioner i inkapslingsanläggningen. Dessa kommer att behövas för att ha ett tillräckligt stort urval av bränsleelement så att kapslarna kan fyllas med bränsleelement som tillsammans ger 1700 W. Det finns även möjlighet att sorterna bränsleelementen i Clab innan kassetten tas till inkapslingsanläggningen.

Bränsleelementen transporteras till inkapslingsanläggningen i förvaringskassetter. Dessa kommer att väljas så att bränsleelementen i kassetterna kan placeras i kapslar så att resteffekten i varje kapsel ligger så nära den maximalt tillåtna resteffekten som möjligt.

Urvalet kan dock begränsas av hanteringen i Clab, exempelvis långa hanteringstider och driftläggningar i Clab. I denna rapport tas ingen hänsyn till sådana hanteringsbegränsningar. Det ska noteras att svårigheten att kombinera ihop bränsleelement som ger 1700 W (1650 W med marginal för beräkningsosäkerheter) i en kapsel är betydligt större för PWR än BWR beroende på att det är färre antal bränsleelement i en kapsel för PWR än i en BWR.

Begränsningar i hanteringen ingår inte i beräkningarna.

7 Simulering av inkapsling

7.1 Förutsättningar

För scenario 1 och 3 antas vid simulering av fyllning av kapslarna att inkapsling startar 2023 med inkapslingstakt enligt tabell 6. Det ska noteras att inkapslingsperiodens längd för dessa scenarier beror på hur många delvis fyllda kapslar som produceras i respektive scenario.

För scenario 2 antas en inkapslingstakt enligt tabell 7.

Tabell 6 – Inkapslingstakt, scenario 1 och 3

År	Inkapslingstakt (kapslar/år)		
	BWR	PWR	Tot
2023	17	6	23
2024	58	22	80
2025	87	33	120
2026	87	33	120
2027	87	33	120
2028	109	41	150
...
2054	109	41	150
2055+	73	27	100

Tabell 7 – Inkapslingstakt, scenario 2

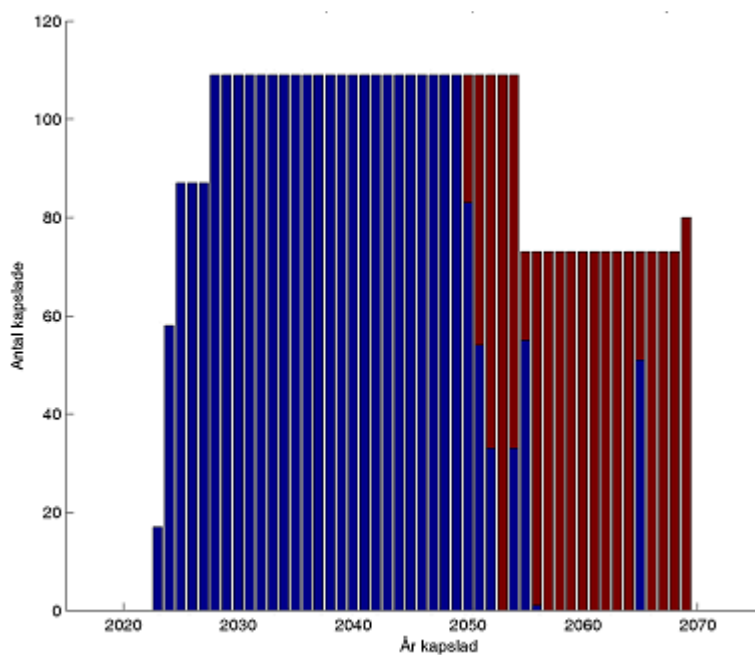
År	Inkapslingstakt (kapslar/år)		
	BWR	PWR	Tot
2023	17	6	23
2024	58	22	80
2025	87	33	120
2026	87	33	120
2027	87	33	120
2028	109	41	150
...
2053	109	41	150
2054	107	43	150
2055		29	29

7.2 Scenario 1 – 50/60 års drift av reaktorerna med dagens målutbränningar

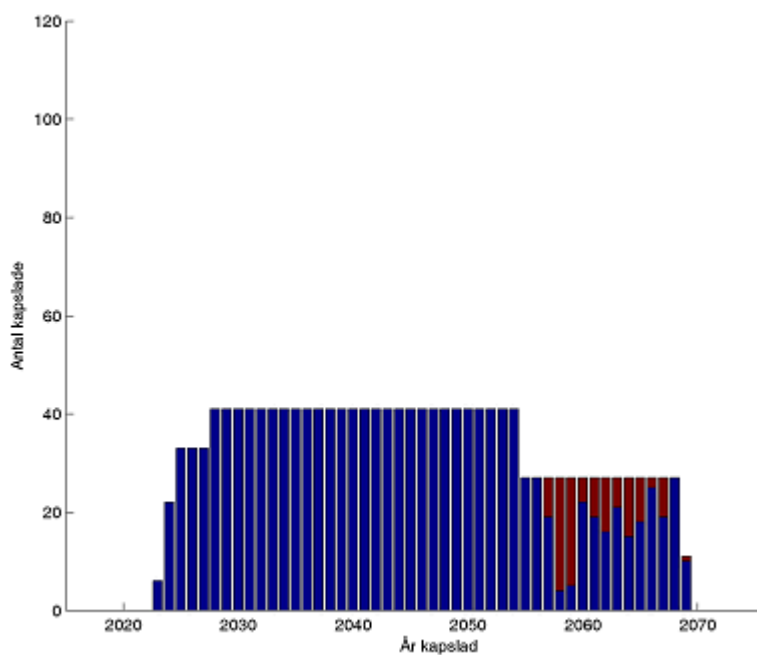
Resultaten av simuleringarna för bränsleinventarium enligt scenario 1 sammanställs i tabell 8. Förloppet under inkapslingen visas i figur 10 där blått markerar helt fyllda kapslar och rött delvis fyllda kapslar.

I BWR-scenariot kommer delvis fyllda kapslar att börja produceras år 2052. Inkapslingsperioden avslutas år 2069, då de 80 sista BWR-kapslarna produceras.

I PWR-scenariot kommer delvis fyllda kapslar att börja produceras år 2057. Inkapslingsperioden avslutas år 2069, då de 11 sista PWR-kapslarna produceras.



Figur 10 – BWR-inkapsling enligt scenario 1



Figur 11 – PWR- inkapsling enligt scenario 1

Tabell 8 – Sammanställning av resultat för BWR och PWR, scenario 1

Scenario	Antal BWR- kapslar	Antal PWR- kapslar	Totalt antal kapslar	Antal driftår	Antal extra kapslar
1	4381	1623	6004	46.9	186

Detta scenario leder till 6004 kapslar varav flera är delvis fyllda, se tabell 9 och 10. Om alla kapslar kunde fyllas helt skulle det bli 5818 kapslar. Det blir alltså 186 extra kapslar i detta scenario.

Tabell 9 – BWR – Antal bränsleelement i kapslarna, scenario 1

Antal kapslar	Antal bränsleelement i kapseln
3044	12
794	11
542	10
1	3

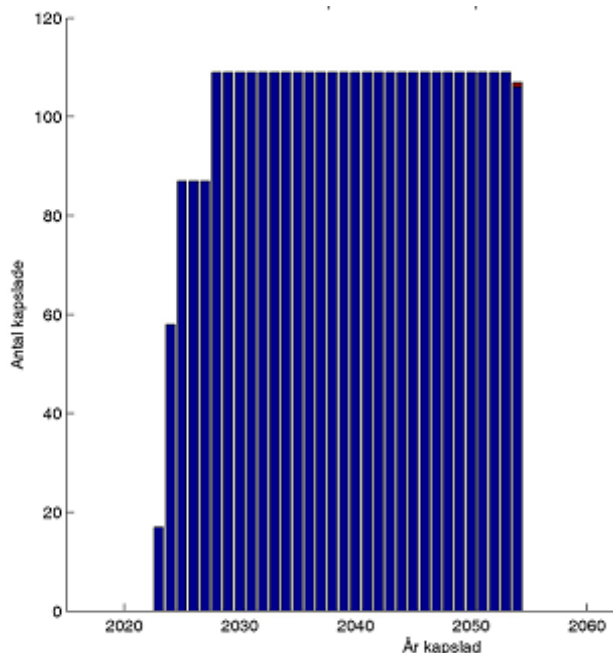
Tabell 10 – PWR – Antal bränsleelement i kapslarna, scenario 1

Antal kapslar	Antal bränsleelement i kapseln
1508	4
114	3
1	1

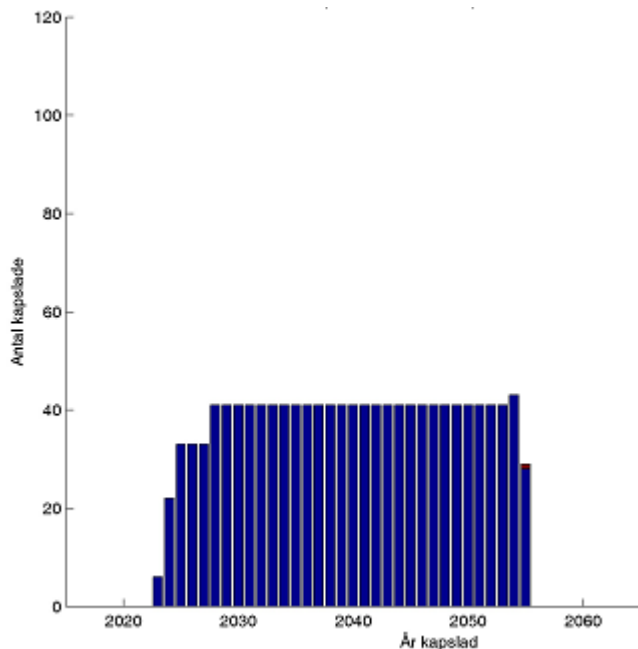
7.3 Scenario 2 – Avgiftsgrundande drift av reaktorerna 40 år

Scenario 2 baseras på det bränsleinventarium som uppstår vid s.k. avgiftsgrundande drift av reaktorerna. Detta innebär ca 40 års drifttid. I övrigt är förutsättningarna desamma som i scenario 1.

Som framgår av figurerna 12 och 13 kan alla kapslar, både BWR och PWR fyllas i detta scenario.



Figur 12 – BWR- inkapsling enligt scenario 2



Figur 13 – PWR- inkapsling enligt scenario 2

Resultatet för scenario 2 är sammanställt i tabellerna 11, 12 och 13.

Tabell 11 – Sammanställning av resultat för BWR och PWR, scenario 2

Scenario	Antal BWR-kapslar	Antal PWR-kapslar	Totalt antal kapslar	Antal driftår
2	3277	1265	4542	32.7

Tabell 12 – BWR - Antal bränsleelement i kapslarna, scenario 2

Antal kapslar	Antal bränsleelement i kapseln
3276	12
1	1

Tabell 13 – PWR - Antal bränsleelement i kapslarna, scenario 2

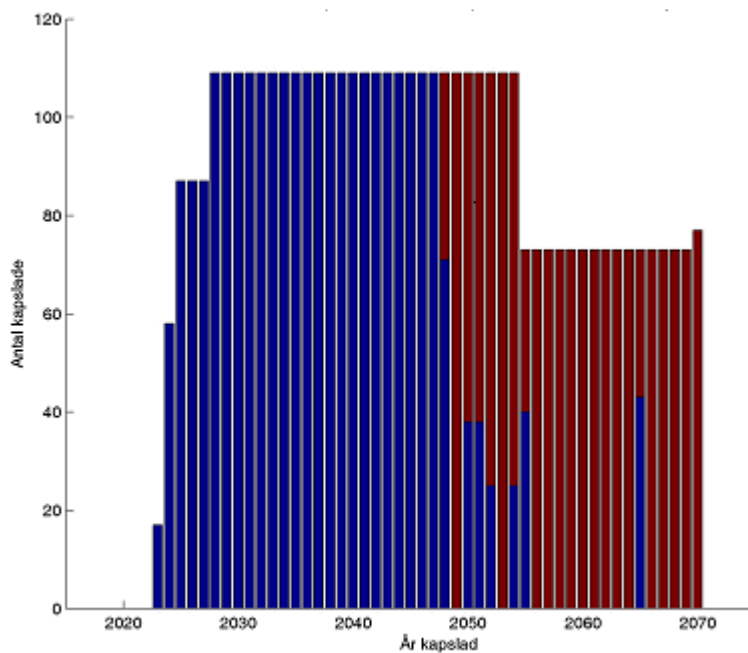
Antal kapslar	Antal bränsleelement i kapseln
1264	4
1	3

7.4 Scenario 3 – 50/60 års drift av reaktorerna med ökad målutbränning

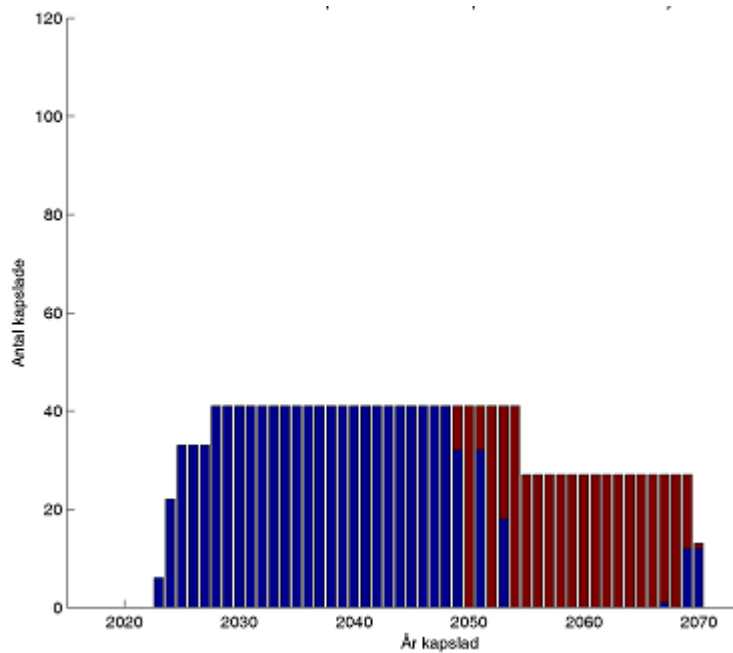
I detta scenario är inkapslingstakten samma som i scenario 1 men bränsleinventariet är baserat på planerade ökning av kraftverkens målutbränning. Resultatet redovisas i tabell 14 och i figurerna 14 för BWR och 15 för PWR.

I BWR-scenariot kommer delvis fyllda kapslar att börja produceras år 2049. Inkapslingsperioden avslutas år 2070, då de 77 sista BWR-kapslarna produceras.

I PWR-scenariot kommer delvis fyllda kapslar att börja produceras år 2049. Inkapslingsperioden avslutas år 2070, då de 13 sista PWR-kapslarna produceras.



Figur 14 – BWR- inkapsling enligt scenario 3



Figur 15 – PWR-inkapsling enligt scenario 3

Tabell 14 – Sammanställning av resultat för BWR och PWR

Scenario	Antal BWR- kapslar	Antal PWR- kapslar	Totalt antal kapslar	Antal driftår	Antal extra kapslar
3	4451	1652	6103	47.9	598

Detta scenario leder till 6103 kapslar varav flera är delvis fyllda, se tabell 15 och 16. Om alla kapslar kunde fyllas helt skulle det bli 5505 kapslar. Det blir alltså 598 extra kapslar i detta scenario.

Tabell 15 – BWR - Antal bränsleelement i kapslarna, scenario 3

Antal kapslar	Antal bränsleelement i kapseln
2796	12
10	11
173	10
738	9
733	8
1	6

Tabell 16 – PWR - Antal bränsleelement i kapslarna, scenario 3

Antal kapslar	Antal bränsleelement i kapseln
1095	4
556	3
1	1

8 Diskussion och slutsats

Det framgår att inkapslingstakten med 150 kapslar per år från 2028 och 100 kapslar per år från 2054 kommer att leda till ett antal icke helt fyllda kapslar för scenario 1 och 3. Orsaken till detta är den begränsning som uppkommer på grund av att resteffekten i kapslarna högst får vara 1700 W (1650 W med marginal för osäkerheter). I och med att antalet kapslar ökar kommer inkapslingsperioden att bli längre än om alla kapslar kunde fyllas helt.

Det visas att antalet kapslar och drifttid för KBS-3-systemets anläggningar ökar om utbränningsmålen ökas.

Samtliga scenarier är baserade på reaktorernas nuvarande termiska effekter och planerade effekthöjningar. I scenario 1 förutsätts 50 års drifttid för R1, R2, R3, R4, F1, F2 och F3 samt 60 års drifttid för O1, O2 och O3 med dagens utbränningsmål. Scenario 2 baseras på det bränsleinventarium som uppstår vid så kallad avgiftsgrundande drift av reaktorerna dvs ca 40 års drifttid och dagens utbränningsmål. Scenario 3 innebär samma drifttider för reaktorerna som scenario 1 men med höjda utbränningsmål.

Följande resultat erhöles:

Scenario 1

Det blir 6004 kapslar varav 1452 kapslar är delvis fyllda. Om alla kapslar kunde fyllas skulle det bli 5818, dvs 186 extra kapslar krävs.

Scenario 2

Det blir 4542 kapslar, samtliga kapslar kan fyllas helt, med undantag av den sista BWR-respektive PWR-kapseln.

Scenario 3

Det blir 6103 kapslar varav 2116 kapslar är delvis fyllda. Om alla kapslar kunde fyllas skulle det bli 5505, dvs 598 extra kapslar krävs.

Antalet kapslar som inte kan fyllas helt är beroende av resteffekt, startdatum för inkapsling, inkapslingstakt och inkapslingsperiod. Resteffekten styrs av kraftverkens utbränningsmål och avklingningstiden vid inkapslingstillfället.

En fördröjning av starttidpunkten för inkapsling eller reduktion av inkapslingstakten (förlängd drifttid) minskar resteffekten i bränsleinventariet och minskar eller eliminerar antalet delvis fyllda kapslar. Ett annat sätt är att öka tillåten kapseffekt, vilket också leder till att antalet delvis fyllda kapslar minskar eller elimineras.

9 Referensförteckning

ORNL, 2006. SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluations, ORNL/TM-2005/39, Version 5.1, Vols. I-III, November 2006. Available from Radiation Safety Information Computational Center at Oak Ridge National Laboratory as CCC-732.

SKB, 2006. Measurements of decay heat in spent nuclear fuel at the Swedish interim storage facility, Clab. SKB-R-05-62, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2009. Plan 2008. Costs starting in 2010 for the radioactive residual products from nuclear power. Basis for fees and guarantees in 2010 and 2011. SKB TR-09-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010. Design, production and initial state of the canister. SKB TR-10-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Icke publicerade dokument

SKBdoc id, version	Titel	Utgivare, år
1070912, 1.0	Termisk optimering av slutförvaret Layout D2	SKB, 2007
1059174, 1.0	Clab – Verifikation av SVEA-96 Optima 2 och Optima 3	SKB, 2006
Alladin, reg nr BR91-446	Criticality Calculations: PWR Compact Canisters (CLAB 96)	ABB Atom, 1991