

Abstract

The Oskarshamn nuclear power plant in Sweden intends to insert 80 fuel element with a mixture of uranium and plutonium, MOX fuel, in the Oskarshamn 3 nuclear reactor. The Swedish authorities have given their approval for the insertion, and the remaining issue is numerical calculations of the maximum fuel enthalpy during power spikes in the reactor.

In this report, parts of these numerical calculations are made. The main goal is to investigate if there are any differences between MOX fuel and uranium fuel and if the maximum fuel enthalpies stays within the limiting values.

The calculations are done using the program Simulate 3K from Studsvik-Scandpower. This numerical calculation program describes the neutron flux in the core in three dimensions, and also calculates the maximum power and enthalpy in each fuel rod.

The calculations are performed on three cores; two with MOX fuel inserted along the border and one with uranium fuel only. The cores loaded with MOX contain 40 or 80 fuel elements, while the rest is uranium dioxide. The core loaded with uranium fuel only, serves as a comparison to the ones with MOX to see if there are any significant differences between the two fuel types.

Three cases are investigated for each core. The first includes the case where a control rod is falling out during critical measurements, before the starting sequence of the reactor begins. These critical measurements are performed to see when the reactor enters the state of local criticality.

The second one treats the case when a control rod falls out of the core during the startup process. In the startup process, control rods are withdrawn four at the time and the assumption is that one control rod is stuck in the core. This control rod can then, under any time in the startup process, fall out of the core and add an unexpected raise in reactivity.

The third scenario is wrong withdrawal of the control rods. In this case the assumption is that the reactor operator withdraws the wrong control rods during the reactors startup session.

The results show that no significant difference could be seen between the two fuel types, and every case calculated in this report stays within the enthalpy limitations. The conclusion is that MOX fuel can be inserted in the Oskarshamn 3 nuclear reactor without any special precautions being made.

Innehållsförteckning

Abstract	1
Innehållsförteckning	2
1 Inledning	6
1.1 Historik	6
2 Några begrepp inom kärnfysiken	7
3 Lite kvantmekanik	7
4 Stark växelverkan	9
5 Sönderfall	10
5.1 α -sönderfall	10
5.2 β -sönderfall	11
5.3 γ -sönderfall	11
6 Tvärsnitt	11
6.1 Resonanser	11
6.2 Dopplerbreddning	12
7 Neutronfysik	12
8 Fission	13
8.1 Vätskedroppsmodellen	13
8.2 Fissionsväg och fissionsbarriär	14
8.3 Inducerad fission	15
8.4 Fissionsprodukter	15
8.5 Fission av uran	16
8.6 Fission av plutonium	16
9 Reaktorfysik	17
9.1 Moderatormaterial	17
9.2 Bränsle	18
9.3 Neutronkällor	18
9.3.1 Fördröjda neutroner	18
9.4 Multiplikationskonstanten	19
9.5 Reaktivitet	20
9.6 Void	20
9.7 Anrikning	20
9.8 Bränsleelement och bränslestavar	20
9.9 Uranoxidbränsle	21
9.10 MOX	21
9.11 Bränsletemperaturkoefficient	22
9.12 Bränsletidskonstanten	22
9.13 Utbränning	22
9.14 Skador på bränslestavar	23
9.15 BWR	23
9.16 Styrstavar	24
9.17 Snabbstopp	24
9.18 Avställningsmarginal	24
9.19 Uppstart av en kall reaktor	24
9.20 HC-flöde	25
10 Reaktivitetsolyckor	25
10.1 Händelser som kan leda till RIA	25
10.1.1 Fallande styrstav	25
10.1.2 Fallande styrstav vid lokal kritisk mätning	25

10.1.3	Fallande styrstav vid nukleär värmning.....	26
10.1.4	Fallande styrstav vid varma snabbstoppsprov	26
10.2	Fallhastighet på fallande styrstav	26
10.3	Felaktigt utmanövrerad styrstavsgrupp.....	26
10.3.1	Felaktigt utmanövrerad styrstavsgrupp vid nukleär värmning	26
10.3.2	Felaktigt utmanövrerad styrstav vid lokal kritisk mätning	27
10.4	Acceptansgränser för bränslet vid RIA.....	27
10.5	Långsam RIA	27
10.6	Snabba RIA.....	27
10.7	Utbränningstidens inverkan på skaderisken.....	28
10.8	Entalpigränser för RIA.....	28
10.9	Simulerade RIA	28
11	Beräkningsprogram.....	28
11.1	KIN.MUL-kortet i S3K.....	28
12	Utförande	29
12.1	Styrstavar i härdarna	29
12.2	Styrstavsgrupper i vit sekvens	29
12.3	Fallande styrstav vid kritisk mätning.....	29
12.4	Fallande styrstav vid uppstart	31
12.5	Felaktigt utdragen styrstavsgrupp	31
12.6	Härd1 – 40 knippen MOX	32
12.6.1	Första beräkningsserien Härd1 – fallande styrstav vid kritisk mätning....	32
12.6.2	Beräkningsområden – första beräkningsserien Härd1	32
	<i>Fall1; stav 11 och 12</i>	33
	<i>Fall2; stav 17 och 18</i>	33
	<i>Fall3; stav 19 och 20</i>	33
	<i>Fall4; stav 15 och 52</i>	33
	<i>Fall5; stav 35 och 36</i>	34
	<i>Fall6; stav 44 och 45</i>	34
	<i>Fall7; stav 52 och 53</i>	34
	<i>Fall8; stav 60 och 61</i>	34
12.6.2	Andra beräkningsserien Härd1 – fallande styrstav vid uppstart	34
12.6.3	Beräkningsområden – andra beräkningsserien Härd1	35
	<i>Område1 – stav 01 och 02</i>	36
	<i>Område2 – stav 03 och 04</i>	36
12.6.4	Tredje beräkningsserien Härd1 – felaktigt utdragen styrstavsgrupp	36
12.6.5	Beräkningsområden – tredje beräkningsserien Härd1	36
	<i>Område1 – grupp G58, G59 och G60</i>	36
	<i>Område2 – grupp G43, G38, G39 och G40.....</i>	37
	<i>Område3 – grupp G33, G32, G27 och G24.....</i>	38
12.7	Härd2 – 80 knippen MOX	38
12.7.1	Första beräkningsserien Härd2 – fallande styrstav vid kritisk mätning....	38
12.7.2	Beräkningsområden – första beräkningsserien Härd2	38
	<i>Fall1; stav 11 och 12</i>	39
	<i>Fall2; stav 17 och 18</i>	39
	<i>Fall3; stav 23 och 24</i>	40
	<i>Fall4; stav 11 och 36</i>	40
	<i>Fall5; stav 19 och 31</i>	40
12.7.3	Andra beräkningsserien Härd2 – fallande styrstav vid uppstart	40
12.7.4	Beräkningsområden – andra beräkningsserien Härd2	40

<i>Område1 – fallande styrstav vid uppstart Härd2</i>	40
<i>Område2 – fallande styrstav vid uppstart Härd2</i>	41
12.7.5 Tredje beräkningsserien Härd2 – felaktigt utdragen styrstavsgrupp	42
12.7.6 Beräkningsområden – tredje beräkningsserien Härd2	42
12.8 Härd3 – modifierad uranhärd utan MOX.....	42
12.8.1 Första beräkningsserien Härd3 – fallande styrstav vid kritisk mätning	43
12.8.2 Beräkningsområden – första beräkningsserien Härd3	43
<i>Fall1 – stav 11 och 12</i>	43
<i>Fall2 – stav 19 och 20</i>	44
<i>Fall3 – stav 60 och 61</i>	44
12.8.3 Andra beräkningsserien Härd3 – fallande styrstav under uppstart	44
12.8.4 Beräkningsområden – andra beräkningsserien Härd3	44
12.8.5 Tredje beräkningsserien Härd3 – felaktigt utdragen styrstav vid uppstart.....	44
12.8.6 Beräkningsområden – tredje beräkningsserien Härd3	45
13 Resultat	45
13.1 Fallande styrstav vid kritisk mätning	46
13.1.1 Härd1.....	46
<i>Fall1, stav 11 och 12</i>	46
<i>Fall2; stav 19 och 20</i>	46
<i>Fall8; stav 60 och 61</i>	46
13.1.2 Härd2.....	46
<i>Fall2; stav 17 och 18</i>	46
<i>Fall3; stav 23 och 24</i>	46
13.1.3 Härd3.....	47
<i>Fall1; stav 11 och 12</i>	47
<i>Fall2; stav 19 och 20</i>	47
<i>Fall3; stav 60 och 61</i>	47
13.2 Fallande styrstav vid uppstart	47
13.2.1 Härd1.....	47
<i>Område2 – Härd1</i>	47
13.2.2 Härd2.....	47
<i>Område2 – Härd2</i>	47
13.2.3 Härd3.....	48
13.3 Felaktigt utdragen styrstavsgrupp	48
13.3.1 Härd1.....	48
<i>Felaktigt utdragen styrstavsgrupp vid uppstart</i>	48
<i>För snabbt utdragen styrstavsgrupp vid kriticitetspassage</i>	49
13.3.2 Härd2.....	49
<i>Felaktigt utdragen styrstavsgrupp vid uppstart</i>	49
<i>För snabbt utdragen styrstavsgrupp vid kriticitetspassage</i>	49
13.3.3 Härd3.....	50
<i>Felaktigt utdragen styrstavsgrupp vid uppstart</i>	50
<i>För snabbt utdragen styrstavsgrupp vid kriticitetspassage</i>	50
14 Diskussion.....	50
14.1 Fallande styrstav vid kritisk mätning.....	50
14.2 Fallande styrstav vid uppstart	50
14.3 Felaktigt utdragen styrstavsgrupp	51
15 Slutsats	51
16 Referenser	52
Appendix1 - Hur Simulate 3K arbetar och exempel på programkod	54

<i>Simulate 3K</i>	54
Bilaga1 – Härd1 med avställningsmarginaler vid BOC	58
Bilaga2 – Härd2 med avställningsmarginaler vid BOC	59
Bilaga3 – Härd3 med avställningsmarginaler vid BOC	60
Bilaga4	61
Bilaga5	62
Bilaga6	63
Bilaga7	64
Bilaga8	65
Bilaga9	66
Bilaga10	67
Bilaga11	68
Bilaga12	69

1 Inledning

OKG AB har ansökt om och fått tillstånd av regeringen att sätta in ett begränsat antal bränsleelement med MOX i reaktorerna Oskarshamn 2 eller 3. Statens kärnkraftinspektion (SKI) konstaterar att OKG kan transportera, hantera, använda och förvara MOX-bränsle på ett säkert sätt och anser inte att MOX innebär en större risk gentemot stationens djupförsvar [13]. Dessutom har OKG redan erfarenhet av att hantera MOX, eftersom det redan 1974 sattes in tre bränsleelement med MOX i Oskarshamn 1.

Anledningen till att OKG vill sätta in MOX i en av sina reaktorer är ett gammalt kontrakt mellan OKG AB och British Nuclear Fuels Ltd. (BNFL), där 140 ton använt kärnbränsle från Oskarshamn 1 och 2 transporteras till Sellafield i Storbritannien för upparbetning. Upparbetningen resulterade i 833 kg plutonium varav 575 kg fissilt. Utöver detta utvanns 136 ton låganrikat uran vilket OKG har för avsikt att använda som kärnbränsle på nytt. Sammanlagt räcker detta plutonium till 80 bränsleknippen MOX vilka är tänkta att placeras i Oskarshamn 3.

Innan MOX-knippen sätts in i härden måste en licensiering utföras för att undersöka bränslets beteende i reaktorn. Därför görs teoretiska simuleringar av olika olyckor för att se om MOX skiljer sig från vanligt uranoxidbränsle i fråga om entalpitillskott vid ökande neutronflöde i härden.

Syftet med denna rapport är att klarlägga huruvida det föreligger en ökad risk att placera bränsleknippen innehållande MOX i reaktorn Oskarshamn 3. Numeriska beräkningar på effekttransienter i bränslet har utförts med programmet Simulate 3K från Studsvik-Scandpower, för att verifiera att MOX-bränsle klarar gällande gränsvärden för maxentalpier i bränslestavarna. Beräkningarna utfördes på tre olika härddar i Oskarshamn 3, där två innehöll olika andel MOX-knippen och den tredje endast uranoxidbränsle.

1.1 Historik

Under 1960- och 70-talen spåddes uranpriserna stiga exponentiellt tack vare den ökande energikonsumtionen i världen [10]. Nya sätt behövdes därför för att upprätthålla bränsletillgången till kärnkraftverken. Ett alternativ var att använda det utbrända kärnbränslet som redan fanns i reaktorerna för att framställa nytt bränsle. Eftersom produktionen av klyvbart plutonium sker kontinuerligt i reaktorn, kommer detta ämne att ackumuleras i det använda bränslet. Genom att avlägsna plutoniumet, tillsammans med rester av det uran 235 som finns kvar, kan en ny typ av bränsle sammanställas, MOX. MOX står för Mixed Oxide, det vill säga blandoxid. Till skillnad från det bränsle som vanligtvis används i kärnkraftverk, uranoxid, är MOX en blandning av uran och plutonium. Andelen plutonium kan vara så hög som tjugo procent av den totala vikten.

I Sverige tecknades avtal om tillverkning av MOX mellan OKG AB och BNFL i Storbritannien i början av 1970-talet [18]. Det var då tänkt att en större del av det framtida bränslebehovet skulle täckas av MOX och behovet av färskt uranbränsle skulle minska.

Det använda kärnbränsle som upparbetats till MOX kommer från reaktorerna Oskarshamn 1 och 2 och transporterades till Storbritannien mellan 1978-1982. Detta gjordes innan regeringen beslutade om att allt producerat kärnavfall skulle deponeras i djupförvar i Sverige.

I den brittiska upparbetningsanläggningen i Sellafield separerades plutonet från det använda kärnbränslet 1997 och blandades med nytt uran. Denna blandning har därefter väntat på att bli insatt i bränsleelement för vidare transport till Sverige. I

dagsläget verkar en transport med kärnbränslefartyget Sigyn bli aktuell under våren 2007. Eftersom MOX innehåller plutonium blir hanteringen av detta bränsle lite svårare än för normalt uranoxidbränsle. Plutonium är mycket mer radioaktivt än uran och kan inte hanteras och förvaras utan att speciella skyddsåtgärder vidtas.

2 Några begrepp inom kärnfysiken

Alla atomkärnor är uppbyggda av neutroner, som är oladdade, samt protoner, som har laddningen +1. Varje grundämne har ett atomnummer, Z , som anger antalet protoner i kärnan. Dessutom finns ett masstal, A , som anger det totala antalet neutroner och protoner i kärnan. Den gällande vedertagna nomenklaturen för att skriva ett givet grundämne X är ${}^A_Z X$. Som exempel kan tas uran-235 som innehåller 92 stycken protoner och 143 neutroner. Denna skrivs då ${}^{235}_{92}U$. Vanligtvis utesluts antalet protoner och grundämnet skrivs bara ${}^{235}U$.

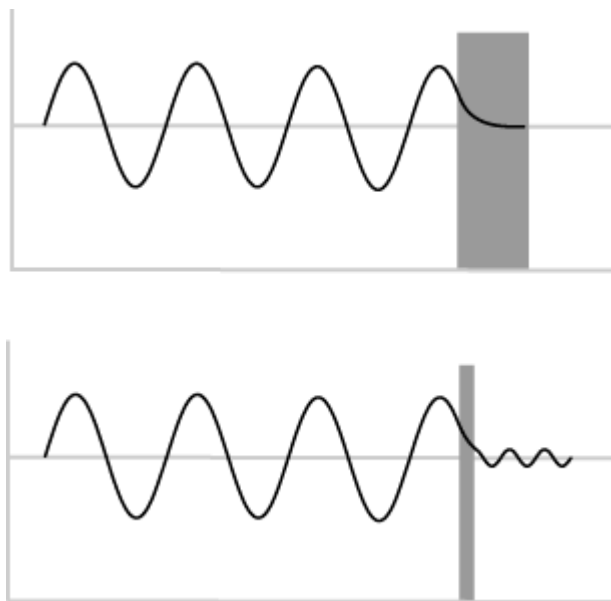
Atomkärnor som har samma antal protoner men olika antal neutroner kallas isotoper. På samma sätt kallas de grundämnena som har lika antal neutroner men olika antal protoner för isomerer. Dessutom finns det isobarer som definieras som ämnen med samma masstal A . Ett exempel på två isobarer är ${}^{14}_6C$ och ${}^{14}_7N$.

Inom kärnfysiken anges energier ofta i enheten eV (elektronvolt) eller MeV (megaelektronvolt), där $1eV \approx 1.6 \cdot 10^{-19} J$. Detta för att få enklare siffror att jobba med då energierna blir ohanterligt små i enheten Joule (J).

Endast tre av de fyra fundamentala naturkrafterna är intressanta i kärnfysiken; stark, svag och elektromagnetisk. Gravitationen har en så svag växelverkan att den inte inverkar på så små system som atomkärnor utgör. Den starka växelverkan har störst betydelse för kärnans sammanhållning och ett speciellt avsnitt i rapporten kommer att beröra denna kraft. Svag och elektromagnetisk växelverkan skiljer sig åt i form av respektive utbytespartikel. Elektromagnetisk kraft växelverkar med masslösa fotoner, medan den svaga kraften utbyter bosoner med relativt hög massa. Dessa bosoner kan inte mätas i laboratorier utan är virtuella, det vill säga de kan endast existera under korta tider som bestäms av kvantmekaniska lagar. Den största skillnaden är, som namnen antyder, hur kraftig växelverkan respektive kraft har vilket spelar in vid radioaktiva sönderfall.

3 Lite kvantmekanik

Enligt kvantmekaniken kan partiklar beskrivas som vågor eller vågpaket. Detta medför att en partikels läge och energi inte kan bestämmas exakt. Dessutom uppkommer vissa speciella fenomen som tunneling. Tunneling innebär att partikeln kan penetrera tunna potentialbarriärer som den egentligen inte har tillräcklig energi att ta sig över. Detta illustreras i Figur 1 där en inkommande våg stöter på två olika tjocka väggar. Den inkommande vågen kan ses som en partikel och väggen som en potential.



Figur1. Övre delen visar en våg som infaller mot en vägg (potential) och dämpas totalt. I den undre bilden dämpas vågen något, men fortsätter med minskad amplitud och frekvens på andra sidan (från [19]).

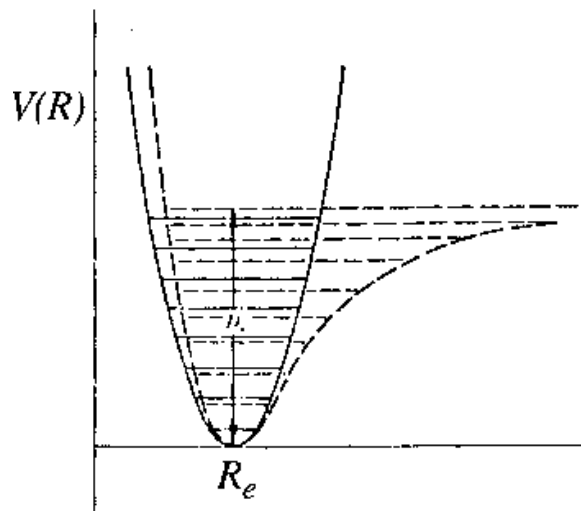
I det övre fallet i Figur1 är potentialen för stor för att partikeln ska kunna tunnla igenom den vilket gör att den stoppas upp. Det undre fallet visar dock hur partikeln penetrerar potentialen och fortsätter på andra sidan. Frekvensen på vågen är nu mindre vilket innebär att partikeln har förlorat energi på passagen genom potentialbarriären. Sannolikheten för en sådan händelse ges av vågfunktionens amplitud efter barriären i kvadrat. Detta medför att det även finns en liten sannolikhet för partikeln att tunnla genom den övre barriären i Figur1, eftersom amplituden avtar exponentiellt.

Tunneling har en viktig roll inom kärnfysiken då α -sönderfall uppkommer genom detta fenomen. Eftersom sannolikheten för tunneling inte är speciellt stor är också α -strålning ämnen mycket långlivade.

Inom kvantmekaniken används så kallade kvanttal för att beskriva vilka egenskaper partiklar har. Exempel på ett kvanttal är rörelsemängdsmomentet (ℓ), som bara kan anta vissa diskreta värden för en bunden partikel. Ett annat kvanttal är spinn (s), vilket kan beskrivas som partikelns rotation kring sin egen axel (jämför jordens rotation kring sin axel). Spinnkvanttalet kan anta halvtaligt eller heltaligt samt positivt eller negativt (rotation medsols eller motsols) värde. Dessutom kan det kopplas till rörelsemängdsmomentet i en så kallad spinn-ban koppling eller ls -koppling. Då rörelsemängdsmomentet endast antar positiva heltal kommer kopplingen mellan dessa två att bli $\ell+s$ och $\ell-s$. Spinn-ban kopplingen spelar även den en stor roll i kärnfysiken eftersom partiklar med halvtaligt spinn inte kan ha alla kvanttal lika när de befinner sig i ett bundet system (sannolikheten är noll att finna dem på samma plats). För ett givet värde på ℓ -kvanttalet kan två partiklar (positivt och negativt spinn) sitta i samma orbital. Det är dessa regler som bygger upp elektronskalen runt atomkärnan, men samma princip gäller även inuti kärnan där nukleonerna ligger i olika energinivåer. Således är ls -kopplingen orsak till att udda kärnor lätt fångar in en extra nukleon för att fylla en energinivå.

4 Stark växelverkan

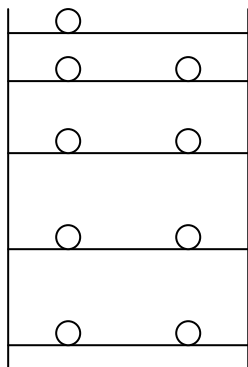
Atomkärnan är uppbyggd av neutroner och protoner vilka brukar kallas nukleoner med ett gemensamt namn. Nukleonerna tillhör i sin tur en större grupp av partiklar med namnet Fermioner. Gemensamt för dessa är att de har ett halvtaligt spinnkvanttal, vilket gör att de följer Pauliprincipen. Detta innebär till exempel att två neutroner med samma spinn inte kan ha samma energi. Populärt brukar detta beskrivas med hjälp av en potentialbrunn där nukleonerna endast kan ha vissa diskreta energier. I Figur 2 visas ett exempel på två sådana potentialbrunnar där de diskreta energinivåerna är utritade som streck. Den symmetriska brunnen är en så kallad harmonisk oscillator vilken har energinivåer som går relativt lätt att beräkna. Den andra brunnen beskriver en mer realistisk modell av en kärnpotential, Yukawapotentialen, med energinivåer som inte går att beräkna analytiskt [8].



Figur 2. Två olika potentialbrunnar med diskreta energinivåer. Den symmetriska är en harmonisk oscillator medan den andra, mer realistiska potentialen, är av Yukawa-typ (från [20]).

Potentialerna i Figur 2 uppvisar en repulsiv kraft för väldigt korta avstånd. Denna tillkommer eftersom kärnmateria är extremt svår att komprimera.

Den starka växelverkan verkar bara inom mycket korta avstånd vilka är i storleksordningen 1-2 fm (femtometer eller Fermi 10^{-15} m). Eftersom en atomkärna är cirka 10 fm i diameter innebär detta att den hålls ihop genom korrelerade krafter mellan nukleonerna. Således är det inte en utbytespartikel som står för den totala sammanhållningen av kärnan, utan varje nukleon kopplar till sina närmsta grannar som i sin tur växelverkar med sina grannar. Detta medför att kärnor med ett jämnt antal nukleoner är mycket mer stabila mot störningar än de med ojämnt antal, vilket visas i Figur 3.



Figur3. *Principskiss för hur nukleonerna i en udda kärna är placerade i potentialbrunnen.*

Den översta nukleonen i Figur3 har ingen nära granne att växelverka med. Den blir därmed lösare bunden till kärnan än övriga partiklar i potentialen. Ett sätt för kärnan att få lägre potentiell energi är att binda den sista nukleonen hårdare, det vill säga få den att växelverka starkare med övriga nukleoner. Detta kan ske genom infångning av ytterligare en nukleon.

Då den starka växelverkan endast verkar inom mycket korta avstånd, finns det en övre gräns för hur stora atomkärnor kan bli. När antalet protoner blir för stort kommer den sammanlagda Coulombrepulsionen mellan dem, tillsammans med kärnans allt större yta, uppväga kraften från den starka växelverkan. Resultatet blir då att kärnan delar sig, vilket börjar inträda vid masstal runt 240 [8]. Fenomenet kallas för spontanfission.

Även antalet neutroner i en kärna är begränsat vilket Yukawapotentialet i Figur2 visar. Till skillnad från den harmoniska oscillatorn har denna potential en ändlig utbredning i y -led. Det vill säga, den har begränsat djup där den klarar av att binda nukleoner. När antalet nukleoner i kärnan ökar, fylls potentialen på från botten enligt Figur3, men ju fler nukleoner som finns i kärnan desto högre upp i potentialbrunnen kommer de att ligga. Tillslut nås kanten av brunnen, det vill säga det tillstånd där bindningsenergin är noll (eller strax under) för nukleonen. Kärnan kan då inte binda fler nukleoner till sig och är dessutom mycket instabil, eftersom den lätt kan göra sig av med flertalet neutroner eller protoner då dessa är löst bundna. Detta tillstånd, då kärnan inte kan binda fler neutroner eller protoner, kallas the Neutron respektive Proton dripline [8]. Vanligtvis används separata potentialbrunnar till neutroner och protoner när de beskrivs i olika kärnmodeller, eftersom de båda partiklarna skiljer sig åt i vissa avseenden. Protonen har till exempel laddning och en lite mindre massa än neutronen.

5 Sönderfall

Om en atomkärna besitter ett överskott av energi kan den komma att göra sig av med den genom att sönderfalla. Tre olika typer av sönderfall finns inom kärnfysiken, α , β och γ , vilka styrs av tre fundamentala krafter; stark, svag och elektromagnetisk.

Vid sönderfall anges moder- och dotterkärna. Moderkärnan är helt enkelt den kärna som ska sönderfalla medan dotterkärnan är resultatet efter sönderfallet.

5.1 α -sönderfall

Det första sönderfallet kallas α -sönderfall och styrs av den starka kraften. Det betyder att kärnan minskar sin energi genom att göra sig av med nukleoner. Ett liknande fall

är spontan fission (se nedan), där kärnan delar upp sig i två halvor och med detta uppnår ett lägre energitillstånd. Vid α -sönderfall sänds dock en heliumkärna (två protoner och två neutroner) ut från moderkärnan. Varför heliumkärnor alltid sänds ut finns det inget bra svar på, men troligtvis skapas denna kärna inuti moderkärnan eftersom just helium är en mycket stabil konstruktion [4]. Således finns alltid en färdigskapad heliumkärna som försöker tunnla genom Coulombbarriären som omger moderkärnan. Eftersom tunneling är en ganska osannolik process (se avsnittet om kvantmekanik tidigare) tar det förhållandevis lång tid innan ett α -sönderfall äger rum. α -sönderfall sker undantagslöst med tyngre kärnor ($A > 150$).

5.2 β -sönderfall

Detta sönderfall styrs av den svaga växelverkan och är således en långsam process (i storleksordningen 1000-100 000 gånger långsammare än stark och elektromagnetisk). β -sönderfall är utsändande av elektroner eller positroner genom ombildande av neutroner till protoner och tvärtom i kärnan. I motsats till α -sönderfallet har β -sönderfallet lätt att penetrera Coulombbarriären runt kärnan eftersom dessa partiklar är lättare. Elektronen har dessutom negativ laddning vilket gör att den stöts bort av den positiva kärnan.

5.3 γ -sönderfall

Det tredje sönderfallet är av elektromagnetisk typ, det vill säga fotoner, och kallas för γ -sönderfall. Dessa fotoner är väldigt högenergetiska (MeV) och sänds ut när en nukleon faller från ett högre tillstånd till ett lägre i kärnan. Då detta sker sägs kärnan relaxera sig med gammasönderfall.

Gammafotoner kan även sändas ut efter så kallad elektroninfångning, då kärnan fångar in en av elektronerna i de lägre skalerna. När hålet efter denna elektron fylls kan fotoner i både gamma- och röntgenområdet utsändas.

6 Tvärsnitt

En atomkärnas tvärsnitt kan, enkelt sagt, beskrivas som den träffyta kärnan uppvisar mot en infallande partikel [4]. Tre typer av tvärsnitt är intressanta för den fortsatta diskussionen här, absorptions-, fissions- samt spridningstvärsnitt, vilka mäts i enheten *barn* ($1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$).

Absorptionstvärsnittet definieras som den sannolikhet en partikel har att fångas in när den träffar kärnan. På samma sätt definieras fissionstvärsnittet som sannolikheten för kärnan att fissionera då den träffas av en inkommande partikel. Kvoten mellan dessa kallas fissionsfaktor och är ett mått på hur stor sannolikheten för fission är givet ett visst antal absorptioner i materialet. Utanför resonansregionen (se nedan) avtar tvärsnittet med ökande energi (hastighet) på den infallande projektilen som $1/\sqrt{E}$.

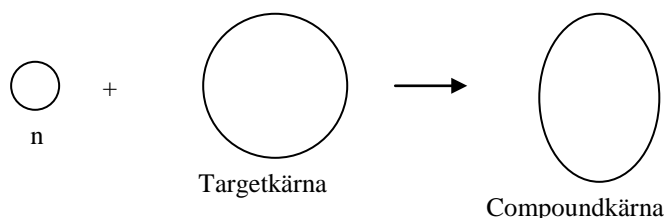
Den tredje typen av tvärsnitt, spridningstvärsnittet, anger sannolikheten för en nukleon att spridas när den träffar kärnan. Detta tvärsnitt används i samband med moderatormaterial (se detta avsnitt) där det är intressant att se hur bra spridningsegenskaper ett visst ämne har.

Beteckningen för tvärsnitt är den grekiska bokstaven sigma (σ).

6.1 Resonanser

Begreppet resonanser används ofta inom kärnfysiken och de spelar en stor roll för att en partikelinducerad kärnklyvning ska äga rum.

En resonans är en ökning av kärnans tvärsnitt, så att den blir mer mottaglig att fånga in till exempel en neutron. Resonanser uppstår då den inkommande partikeln och den träffade kärnans masscentrumenergi överensstämmer med en energinivå i compoundkärnan [14]. Compoundkärna kallas den atomkärna som bildas då en partikel absorberas i en kärna (se Figur4).



Figur4. *Principskiss över hur en compoundkärna bildas. Neutronen (n) absorberas i targetkärnan och bildar en ny kärna.*

Resonansenergierna kan vara så låga som delar av eV för tyngre grundämnen och sträcker sig upp mot 100 keV [14].

6.2 Dopplerbreddning

När en kärnas temperatur ökar kommer dess resonanser att breddas och täcka ett bredare energiintervall. Detta fenomen kallas dopplerbreddning [5]. Som kompensation för det bredare energiintervallet sjunker resonansens tvärsnitt, så att integranden för de båda fallen blir lika stor. När en kärnas resonanser dopplerbreddas innebär det att sannolikheten för att infånga en neutron i ett specifikt energiintervall minskar. Samtidigt ökar tvärsnittet över ett större energiintervall så att sannolikheten för infångning blir större i de områden som ligger precis utanför den ursprungliga resonansen.

7 Neutronfysik

De flesta kontrollerade kärnklyvningsprocesser använder sig av neutroner som inducerande partikel, det vill säga neutroner skjuts som projektiler mot kärnorna och får dem att fissionera. Beroende på vilken typ av kärnor som ska klyvas behövs neutroner med olika energi. En grov uppdelning av hur energirika neutroner är brukar göras i tre steg; termiska, intermediära och snabba [14]. I Tabell1 visas vilka energiintervall de olika grupperna tillhör.

Neutrongrupp	Energi
Termiska	< 1 eV
Intermediära	1 eV – 1 MeV
Snabba	> 1 MeV

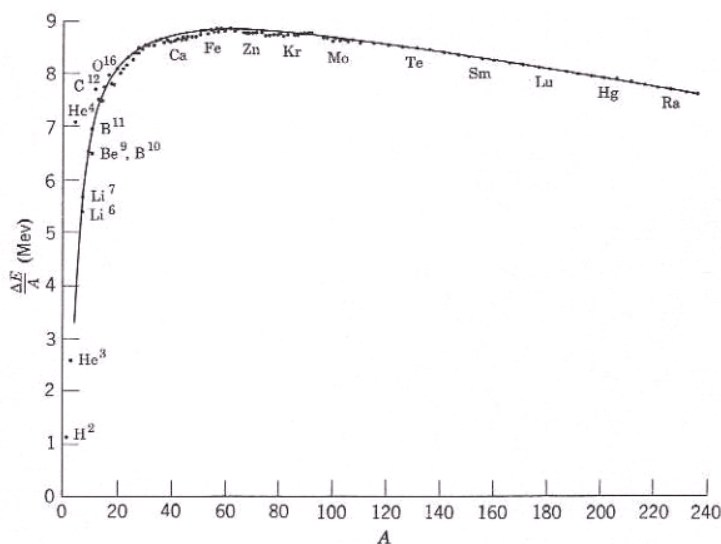
Tabell1. *Energiintervall för olika neutrongrupper.*

Som tidigare nämnts i avsnittet om tvärsnitt, avtar tvärsnittet med ökande energi på neutronerna (förutom vid resonanserna). Detta betyder att en termisk neutron har större sannolikhet att absorberas i en kärna än en snabb eller intermediär. För att uppnå hög neutronabsorption skall därför neutronflödet vara i det termiska området (i termisk jämvikt med det omgivande mediet).

För att bromsa ner snabba neutroner till önskvärda energier kan olika moderatormaterial användas. En moderator är ett ämne med lågt absorptionsvärde, där neutronerna bromsas in genom elastiska stötar mot molekylerna i ämnet. Ett optimalt moderatormaterial skall bestå av lätta molekyler med relativt stor utbredning. Både vatten och kol (grafit) har dessa egenskaper och kan användas som moderatormaterial i till exempel kärnreaktorer. Detta område behandlas mer utförligt i avsnittet om moderatormaterial.

8 Fission

Kärnklyvning, eller fission, kan äga rum för alla ämnen tyngre än järn. Principen är att bindningsenergin per nukleon måste bli större för kärnan som fissioneras, annars är processen inte fysikalisk möjlig. I Figur 5 visas bindningsenergin per nukleon som funktion av masstalet för samtliga ämnen i det periodiska systemet med masstal mindre än 240. Ur figuren ses att bindningsenergin är som störst för järn och nickel, medan den sjunker både för lättare och tyngre material. Detta innebär att exempelvis urankärna har mycket energi att vinna på att fissionera, men också att två vätekärnor (deuterium) vinner energi på att slå ihop sig till en heliumkärna.



Figur 5. Bindningsenergin per nukleon som funktion av masstalet (från [21]).

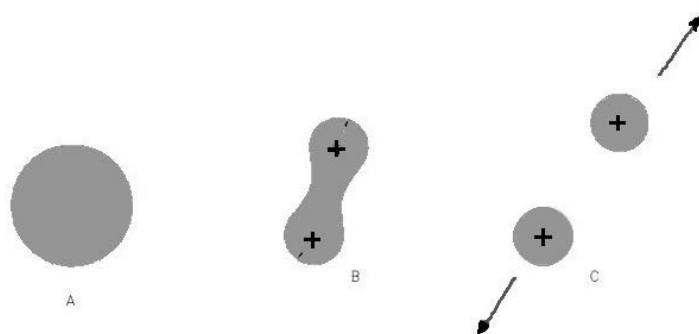
Fission kan uppkomma både spontant och inducerat till exempel med hjälp av neutroner. Den spontana fissionen nämndes tidigare och förekommer bara i exotiska material med höga masstal. Inducerad fission kan däremot ske i många naturliga grundämnen såsom uran, neptunium och torium och samtliga nuklider med $Z > 90$ har hög sannolikhet att klyvas om de utsätts för neutroner med energier på 1 MeV [14].

8.1 Vätskedroppsmodellen

Själva fissionsprocessen kan beskrivas med flera modeller, både kvantmekaniskt och klassiskt. En bild som både är lättförståelig och stämmer bra med verkligheten är vätskedroppsmodellen [8]. I denna beskrivs kärnan som en laddad vätskedroppe där ingen hänsyn tas till de individuella nukleonerna. Det vill säga, kärnan ses som en solid klump snarare än ett komplext sammansatt system av mindre partiklar.

En laddad vätskedroppe har en ytspänning som hindrar den från att falla sönder. På liknande sätt agerar den starka växelverkan genom att hålla ihop protoner och

neutroner i kärnan. När kärnan träffas av en inkommande partikel (till exempel en neutron eller proton) börjar den oscillera kraftigt och får en timglasliknande form (se Figur6B). Detsamma gäller för en laddad vätskedroppe. Om oscillationerna blir för kraftiga kommer coulombrepulsionen från protonerna att övervinna den starka växelverkan som håller ihop kärnan, och fission inträffar (Figur6C).



Figur6. Vätskedroppsmodellens beskrivning av hur fissionering av en kärna ser ut. A) Kärnan i sitt viloläge. B) Kraftiga oscillationer efter neutronträff. Antar en timglasliknande form. C) Fission inträffar som följd av att den starka växelverkan inte förmår hålla ihop kärnan. Från [22].

Bilden av atomkärnan som en laddad vätskedroppe är naturligtvis en förenkling. Exempelvis kommer en kärna som träffas av en infallande neutron att gå igenom flera nya stabila faser innan den fissionerar. Detta beror på kvantmekaniska fenomen som gör kärnan stabil vid olika deformationer (oblat eller prolat). Således kan en träffad kärna enbart deformeras eller komma i kraftig rotation istället för att bete sig som en laddad vätskedroppe [8]. Själva fissionsförloppet illustreras dock väl av Figur6A-C.

8.2 Fissionsväg och fissionsbarriär

Om fissionsprocessen granskas på en kvantmekanisk nivå kommer ett komplicerat förlopp att visa sig. Från det att kärnan träffas av en neutron och deformeras, följer den en så kallad fissionsväg [8]. Fissionsvägen kan ses som en karta med dalar och berg, där dalarna representerar stabila deformationer tillstånd och bergen höga potentialer. Genom att deformera sig till lämpliga former kan kärnan ta sig fram i det landskap av höga och låga potentialer som fissionsvägen utgör. Om deformationen blir för stor antar kärnan formen av ett timglas (se Figur6B), det vill säga den snörps ihop på mitten. I detta tillstånd kan kärnan antas vara två mindre kärnor med några nukleoner emellan som binder ihop de båda.

När kärnan är deformationerad till timglasform kan den antingen återgå till ett stabilt tillstånd eller fissionera. För att fissionera måste den dock passera den så kallade fissionsbarriären [8], vilken är den gräns där den starka växelverkan och coulombkraften tar ut varandra. Genom att deformera sig asymmetriskt kan kärnan hitta en lägre fissionsbarriär, där den har tillräckligt med energi för att klyvas. Det vill säga; en asymmetrisk deformation av kärnan är energetiskt gynnsamt för den eftersom fissionsvägen då går i ett område med lägre potential.

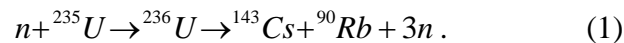
Vad som formar fissionsfragmenten blir därför en kombination av vilken asymmetrisk deformation kärnan måste anta för att få en så låg fissionsbarriär som möjligt, och behovet av fyllda skal i respektive kärnas potentialbrunn.

Utredningen om hur en kärna fissionerar är inte helt trivial och kräver en hel del förståelse av kvantmekanik och atomkärnors uppbyggnad. Det är heller inte avgörande för den fortsatta läsningen om läsaren i detalj förstår hela fissionsförloppet.

8.3 Inducerad fission

Inducerad fission går att åstadkomma med både neutroner och protoner. Neutroner är dock att föredra eftersom de är oladdade och inte känner av den coulombpotential som omger varje atomkärna. Protoninducerad fission kan därför endast inträffa för högenergetiska protoner som klarar av att penetrera coulombbarriären.

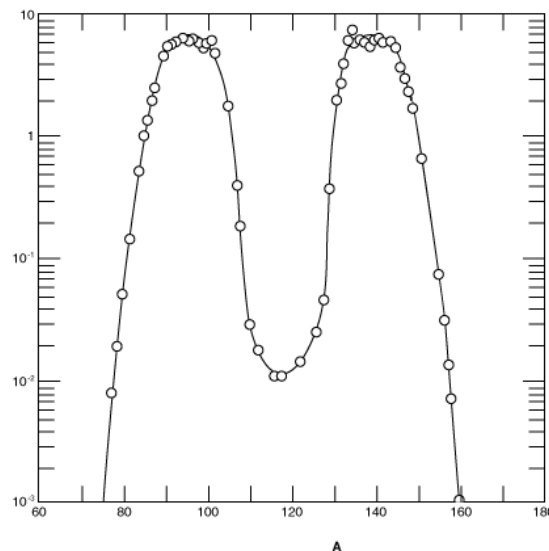
Neutroninducerad fission kan däremot ske vid alla typer av energier. Ett exempel är fission i ^{235}U :



I (1) ovan är även compoundkärnan, ${}^{236}\text{U}$, utsatt för att visa hela processen. Det bör påpekas att denna fission inte är den enda tänkbara för ${}^{235}\text{U}$. Fissionsprodukterna blir inte alltid desamma och ibland fissionerar inte kärnan alls utan förblir en ${}^{236}\text{U}$ -kärna. Compoundkärnan relaxerar sig då med ett gammasönderfall istället för att minska den överskottsenergi som tillförts.

8.4 Fissionsprodukter

I (1) ovan beskrivs ett exempel på vilka fissionsprodukterna blir vid klyvning av uranisotopen ${}^{235}\text{U}$. Som ses delas inte kärnan i två lika stora bitar utan det skiljer cirka 50 nukleoner mellan dem. I själva verket är det inte speciellt troligt att kärnan delar sig i två lika stora hälften, utan sannolikheten för vilka fissionsprodukter som bildas följer kurvan i Figur 7. Just denna figur visar hur fissionsprodukterna fördelas vid termisk fission av ${}^{235}\text{U}$. Fördelningen tenderar att jämnas ut då neutronenergin ökar.



Figur 7. Fördelning av fissionsprodukter vid termisk fission av ${}^{235}\text{U}$. Andelen nuklider visas i procent på y-axeln (från [23]).

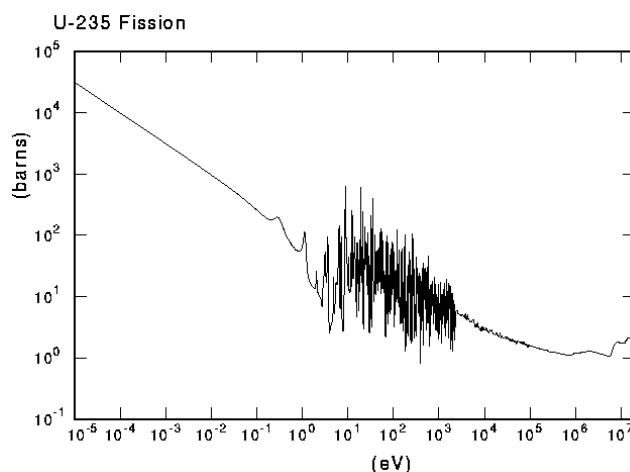
Anledningen till att fissionsprodukterna inte blir symmetriska (med samma A) är att fissionsbarriären blir lägre för moderkärnan om den delar sig asymmetriskt [8]. Det är således energetiskt gynnsamt för kärnan att fissionera med olika storlek på

fissionsprodukterna. Skillnaden i fissionsbarriär kan vara så stor som 2 MeV. För högenergetisk fission, det vill säga då kärnan bombarderas med väldigt energirika partiklar ($> 1\text{MeV}$), spelar energivinsten vid asymmetrisk fission mindre roll och kurvan i Figur7 jämnas gradvis ut.

8.5 Fission av uran

Det ämne som används flitigast för energiproduktion med fission är uran och då speciellt uranisotopen ^{235}U . Att just ^{235}U är så lämplig beror på att det är en kärna med udda antal neutroner och har därmed ett högt absorptionstvärnsnitt för neutroner i det termiska området (se Figur8). Dessutom är fissionstvärnsnittet för ^{235}U högt, vilket gör att den fissionerar lätt när en neutron absorberas.

Då en kärna av ^{235}U fissionerar frigörs cirka 200 MeV energi. Majoriteten av den (cirka 170 MeV) är rörelseenergi hos fissionsprodukterna medan resten är sönderfall och fördröjda neutroner [14]. I snitt frigörs också 2.5 stycken snabba neutroner vid varje fission av ^{235}U , vilka i sin tur kan åstadkomma nya kärnklyvningar i materialet.



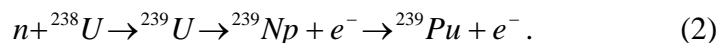
Figur8. Absorptionstvärnsnittet som funktion av masscentrumenergin för ^{235}U . Vid cirka 1 eV börjar resonanserna där tvärsnittet fluktuerar kraftigt. Observera de logaritmiska skalorna på x- och y-axeln (från [24]).

Fission i ^{238}U inträffar först vid högre energier då denna kärna är av jämn-jämn typ. Den första riktiga resonansen kommer vid 10 eV [14] varpå ett band liknande det som visas i Figur8 följer. Absorptionstvärnsnittet i resonanserna ligger upp mot 10^4 barn, vilket är i nivå med det termiska tvärsnittet för ^{235}U . Detta medför att ^{238}U är en mycket god absorbator för snabba neutroner. Det termiska absorptionstvärnsnittet ligger dock under 1 barn vilket är försvinnande lågt [14].

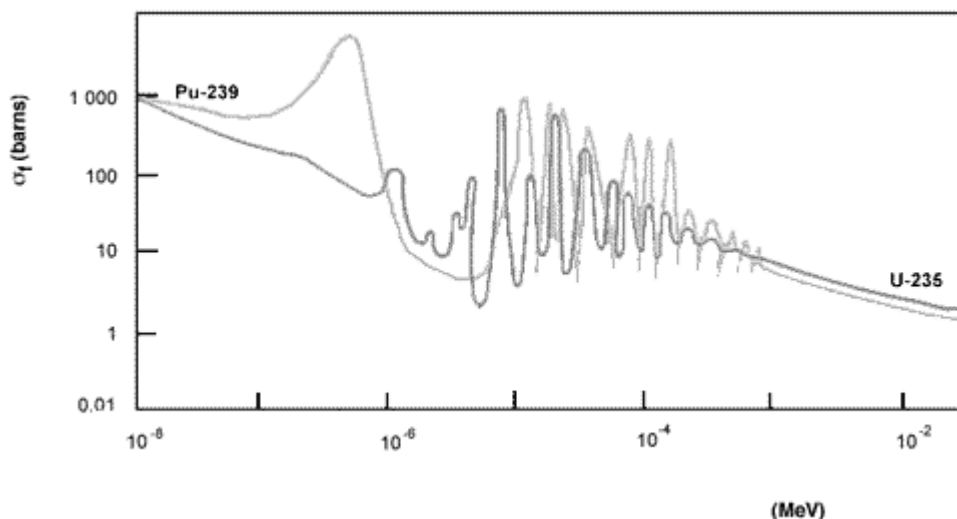
Det stora absorptionstvärnsnittet vid höga neutronenergier i ^{238}U medför däremot inte att fissionsfaktorn ökar. Andelen fissioner är således lågt även om antalet infångade neutroner är stort. Däremot kommer en viss del av det ^{238}U som fångar in neutroner att sönderfalla till ^{239}Pu vilket är en klyvbar kärna. Processen där ^{238}U omvandlas till fissilt ^{239}Pu kallas för breeding (efter engelskans breed = föröka) och sker konstant i kärnreaktorer [14].

8.6 Fission av plutonium

Plutonium är ett syntetiskt ämne som inte finns naturligt på jorden. Det produceras dock kontinuerligt i kärnreaktorer [14] genom neutroninfångning i ^{238}U enligt



Den bildade ${}^{239}\text{Pu}$ kärnan är udda i neutronantalet och således mycket fissil med termiska neutroner. Det termiska fissionstvärsnittet är faktiskt större än för ${}^{235}\text{U}$, vilket illustreras i Figur 9. Här ses att fissionstvärsnitten för de båda kärnorna följs åt ganska exakt för neutronenergies över 1 eV (intermediära neutroner). Däremot har ${}^{239}\text{Pu}$ en kraftig resonans i det termiska området, vilket gör att den har lättare att fånga in neutroner där än ${}^{235}\text{U}$.



Figur 9. Fissionstvärsnitt för ${}^{235}\text{U}$ och ${}^{239}\text{Pu}$ i det termiska och intermediära området. Observera den kraftiga resonansen för plutonium vid neutronenergies under 1 eV. På x-axeln anges neutronenergies i MeV (från [25]).

Största skillnaden mellan fission av plutonium och uran är antalet frigjorda neutroner i fissionsprocessen. För ${}^{235}\text{U}$ frigörs i snitt 2,5 neutroner per fission medan ${}^{239}\text{Pu}$ frigör 3 neutroner [14]. Detta kan tyckas som en liten skillnad men eftersom antalet fissioner är stort kommer även en liten förändring i antalet frigjorda neutroner att märkas.

I produktionen av plutonium i en kärnreaktor är det inte bara ${}^{239}\text{Pu}$ som tillverkas. Signifikanta mängder ${}^{240}\text{Pu}$ produceras också, vilken är en utmärkt absorberare av neutroner (liksom ${}^{238}\text{U}$). Neutronabsorptionen i ${}^{240}\text{Pu}$ medför att plutoniumisotopen ${}^{241}\text{Pu}$ tillverkas. Denna är, liksom ${}^{239}\text{Pu}$, en udda kärna och kan i sin tur fånga in en neutron och antingen fissionera eller bilda en annan plutoniumisotop.

9 Reaktorfysik

Fysiken i en reaktor involverar bränslet, moderatorn och neutronabsorberande material. Dessa tre saker påverkar hur en reaktor styrs och hur den reagerar på olika förändringar i till exempel tryck och vattenflöde. I detta avsnitt kommer i första hand kokreaktorer att behandlas och dessa förkortas BWR (engelska för Boiling Water Reactor).

9.1 Moderatormaterial

De neutroner som frigörs efter fission är snabba. För att de ska kunna inducera fission i bränslet krävs det att de bromsas ner till termiska energies (0,025 eV eller 2200 m/s). Därför behövs en moderator i reaktortanken som hjälper till att snabbt sänka energin på neutronerna. Anledningen till att energisänkningen måste ske fort är att

neutronerna annars har en hög sannolikhet att fastna i ^{238}U :s resonansbälte, som ligger mellan 10 och 10^4 eV. Lämpliga moderatormaterial är därför någorlunda lätta kärnor med litet absorptionstvärnsnitt, det vill säga neutronerna ska spridas istället för att absorberas.

I kärnreaktorer är det tre ämnen som används som moderatorer; lätt vatten (H_2O), kol (grafit) och tungt vatten (D_2O). Tungt vatten och grafit har båda ett lågt absorptionstvärnsnitt kring 0.001 barn, medan lätt vatten har ett absorptionstvärnsnitt på 0.66 barn [14]. Lätt vatten är således en sämre moderator än de två andra ämnena, men har andra fördelar som gör det till den mest använda moderatoren i kärnreaktorer för kommersiellt bruk. Det är till exempel betydligt billigare att använda än tungt vatten. Dessutom kan det även användas som kylmedel i reaktorn, vilket visserligen tungt vatten också kan göra, men däremot inte grafit. Vattenmodererade reaktorer har också den egenskapen att de till viss del är självreglerande, vilket betyder att effekten sjunker om temperaturen i reaktortanken blir för hög. Detta beror på att vattnets täthet bli mindre när det hettas upp vilket gör att modereringen försämras och andelen termiska neutroner minskar. Således leder en ökande temperatur till ett minskande antal fissioner. Denna negativa återkoppling kallas negativ moderatortemperaturkoefficient.

Den självreglerande effekten existerar givetvis även för tungt vatten. Detta ämne har dock en annan fördel gentemot vanligt vatten; dess modereringsegenskaper är så bra att det klarar att upprätthålla en kärnklyvningsprocess i naturligt uran. Med lätt vatten måste alltid bränslet anrikas något för att få upp halten av den fissila isotopen ^{235}U , vilket inte är nödvändigt då moderatormaterialet består av tungt vatten.

9.2 Bränsle

Bränslet i en reaktor kan bestå av uran eller plutonium eller en blandning av dem. I den här rapporten ska fokus ligga på bränsle av den senare typen, kallat MOX-bränsle. Nedan följer en genomgång av både MOX- och uranoxidbränsle, men också andra faktorer som rör bränsle såsom neutronkällor, anrikning, bränsleinslutning och kriticitet.

9.3 Neutronkällor

Vid uppstart av en reaktor krävs en neutronkälla som alstrar de neutroner nödvändiga för att kärnklyvningen ska initieras. Då bränslet är helt färskt, det vill säga vid första uppstart av reaktorn, måste en tillförd neutronkälla placeras i härden för att starta fissionsprocessen [5]. I en reaktor med en blandning av färskt och redan använt bränsle, kommer däremot det nödvändiga antalet neutroner produceras genom spontan fission och infångning av α -partiklar följt av neutronutsändning ((α, n) -reaktioner) [5]. Denna reaktion kan inträffa tack vare tyngre nuklidens α -sönderfall och infångning av dessa α -partiklar i andra nuklider.

9.3.1 Fördröjda neutroner

När en kärna klyvs frigör den också neutroner, i snitt 2.5 stycken för en ^{235}U kärna. Dessa neutroner fortsätter i sin tur att klyva kärnor och en kedjereaktion är startad. Då antalet neutroner ökar exponentiellt kommer effektutvecklingen i bränslet att göra detsamma.

En reaktor med detta beteende är mycket svår att få en kontrollerad, stabil effektutveckling i och om samtliga neutroner hade frigjorts samtidigt vid fission skulle konstruktionen av dagens reaktorer se annorlunda ut. Det förhåller sig dock så att en liten andel av de neutroner som frigörs är fördröjda, det vill säga de sänds inte

ut förrän fissionsprodukterna börjar sönderfalla. Denna fysikaliska egenskap saktar in effektökningen och gör fissionsprocessen mer lätthanterlig.

Andelen fördröjda neutroner varierar mellan olika nuklider och brukar betecknas med den grekiska bokstaven β (beta). Detta kan skapa viss förvirring då β även är en beteckning på radioaktivt sönderfall. Vanligtvis brukar det dock framgå av texten vilket β som avses. För ^{235}U är β i storleksordningen 0.0075 [14] vilket kan tyckas lite, men denna lilla andel av fördröjda neutroner gör att effektutvecklingen går betydligt lättare att kontrollera.

9.4 Multiplikationskonstanten

Multiplikationskonstanten, k , i en reaktor är ett mått på om effekten stiger eller sjunker. Om $k > 1$ ökar neutronflödet och därmed antalet fissioner, effekten stiger. Vid $k < 1$ minskar neutronflödet och effekten på grund av avtagande antal fissioner i bränslet. Då $k = 1$ är effekten och antalet fissioner konstant, reaktorn sägs då uppnått kriticitet eller vara kritisk (se Tabell2).

k	Antal fissioner	Reaktorns tillstånd
< 1	avtagande eller 0	Underkritisk
$= 1$	Konstant	Kritisk
> 1	Ökande	Överkritisk

Tabell2. En reaktors olika kriticitetstillstånd (från [4]).

Multiplikationskonstanten beror på hur många neutroner som finns i härden, moderatorns förmåga att sakta ner neutronernas hastighet, läckaget av neutroner ut ur reaktorn och hur många neutroner som absorberas utan att fission uppstår. Detta kan sammanfattas i formeln som definierar k [5] [14]

$$k = \eta f \varepsilon p P_{NL} \quad (3)$$

där

η = antalet bildade neutroner som kan ge fission per absorberad neutron i bränslet.

ε = snabba fissionsfaktorn. Denna beskriver hur stor del av det totala antalet neutroner, producerade vid fission, som kommer från icke fissilt material (till exempel ^{238}U).

f = andelen absorberade neutroner i det fissila bränslet.

P_{NL} = sannolikheten för att en neutron inte ska läcka ut ur bränslet utan att absorberas.

p = sannolikheten att en neutron inte ska absorberas i någon resonans under tiden den bromsas ner till termisk energi.

k för en verklig reaktor skrivs också k_{eff} [Stacey] och (3) blir då

$$k_{eff} = k = \eta f \varepsilon p P_{NL} = k_{\infty} \cdot P_{NL} \quad (4)$$

där k_{∞} (uttalas k-infinity eller k-öändligheten) betecknar multiplikationskonstanten för en öändligt stor reaktor.

9.5 Reaktivitet

I reaktorfysikaliska sammanhang är begreppet reaktivitet (ρ) ofta använt. Reaktiviteten beskriver hur långt ett system befinner sig från kriticitet och definieras som [5]

$$\rho = \frac{k - 1}{k} \quad (5)$$

där k är multiplikationskonstanten. Den anges vanligtvis i *pcm* (per cent mille = 10^{-5}).

När neutronflödet i reaktorn ökar gör oftast reaktiviteten detsamma och begreppet reaktivitetstillskott är centralt inom reaktorfysiken. Reaktivitetstillskottet anger hur k_{eff} ökar i tiden och ger även ett mått på hur effekten ökar. Även reaktivitetstillskottet anges i pcm.

För att exemplifiera begreppen pcm och reaktivitetstillskott kan ett system som går från $k_{eff} = 1$ (kritiskt) till $k_{eff} = 1.00800$ studeras. Reaktivitetstillskottet blir här 800 pcm om inte divisionen med $k_{eff} = 1.00800$ tas med. Reaktivitetstillskottet anges ofta enbart som ökningen av k_{eff} , vilket är en rimlig uppskattning så länge k_{eff} inte skiljer för mycket från 1.

9.6 Void

Även void-begreppet är centralt inom reaktorfysiken och beskriver andelen ångblåsor i reaktortanken [5]. Ett högt void-värde betyder att vattnet i reaktorn innehåller mycket ånga och kokning sker i stora delar av tanken. Vanligtvis är det bara i de övre delarna av bränslet som vattnet kokar. Vid för mycket void kommer reaktorns effekt att minska eftersom vattnets modereringsförmåga avtar kraftigt då det övergår till ånga.

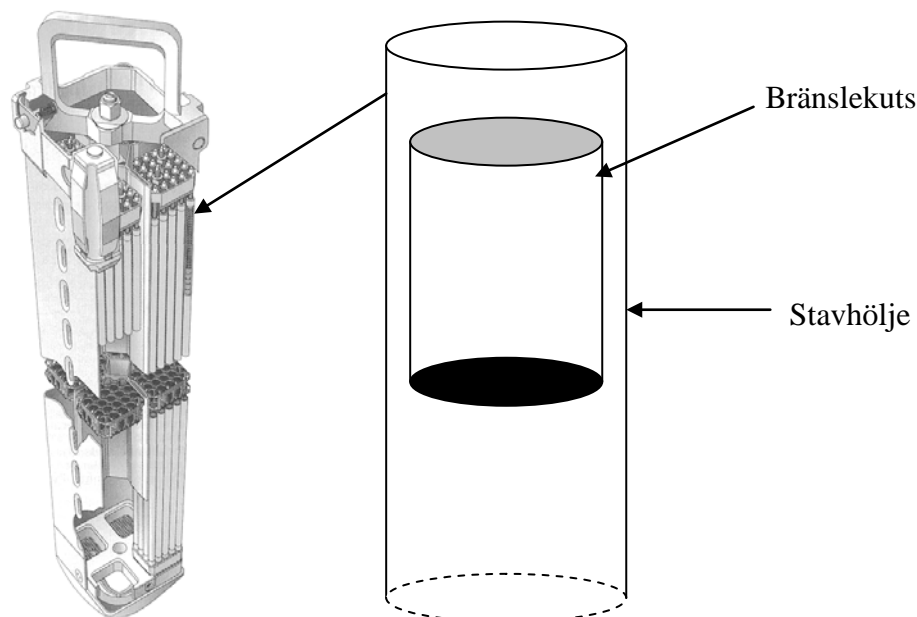
9.7 Anrikning

Naturligt uran innehåller 0.7 % av den fissila isotopen ^{235}U . Resterande 99.3 % är ^{238}U som har ett högt absorptionsvärnsnitt för snabba och intermediära neutroner. För att en kedjereaktion ska uppstå och kunna bibehållas måste andelen termiska neutroner vara tillräckligt stor. Är moderatormaterialet tungt vatten går det utmärkt att använda naturligt uran som bränsle, men med lätt vatten måste andelen ^{235}U höjas. Detta kallas anrikning av bränslet.

I en reaktor av kokartyp (se avsnittet om BWR) är en vanlig medelanrikning cirka 3.5 % ^{235}U [5]. Detta betyder dock inte att varje bränslestav har denna anrikning utan halten ^{235}U skiljer sig beroende på var i bränsleelementet staven sitter. Vid kanterna av bränsleknippet kommer modereringen att vara bättre eftersom det finns en större vattenspalta där. Därmed behövs inte samma anrikningshalt vid kanten som i mitten av elementet.

9.8 Bränsleelement och bränslestavar

Då reaktorn laddas med bränsle görs det i form av bränsleelement, även kallade bränsleknippen. Dessa är konstruerade som kvadratiska gitter med flera mindre stavar (engelska clad) inuti. I stavarna är bränslet placerat i små kutsar (engelska pellet). Stavarna är gjorda i en zirkoniumlegering och helt gastäta för att förhindra att radioaktiva gaser läcker ut i reaktortanken.



Figur10. Till vänster visas ett bränselement av typ Svea 96 från Westinghouse Atom. Elementet består av ett kvadratisk gitter med 10x10 stycken bränsestav (från [26]). Till höger är en schematisk bild av hur bränsekutsarna är placerade inuti en bränsestav.

Runt bränsestavarna flödar vatten som används till kylning och moderering. Vissa stavar i gittret är dessutom tomma, vilket gör att vatten kan flöda inuti dem och ytterligare förbättra modereringen. Bränselement av typ Svea är designade med ett plåtkors, som delar upp knippet i fyra lika stora delar, där vattnet kan transporteras.

Det finns flera anledningar till att låta bränslet vara paketerat i små cylindriska kutsar jämfört med att ha det i en homogen blandning med vattnet i reaktortanken. En homogen blandning är mycket opraktisk när bränslet ska bytas ut eftersom det inte finns någon specifik placering på de områden som har hög utbränning. Dessutom blir förhållandet mellan bränsle och moderator bättre med en heterogen blandning än en homogen.

9.9 Uranoxidbränsle

Bränslet i kärnreaktorer består vanligtvis av naturligt eller anriktat uran i form av uranoxid (UO_2). Uranoxiden packas ihop i kutsar som därefter placeras i härden. Kutsarna utgör ett första skydd mot att radioaktivt material sprids eftersom de har god motståndskraft mot vatten och värme. Dessutom stängs många av de fissionsgaser som bildas in i kutsen och stannar där såvida dess temperatur inte överstiger 1000 grader C [5]. En nackdel är den låga värmeledningsförmågan.

9.10 MOX

MOX är förkortning av Mixed OXide, blandoxid, och innebär att bränslet innehåller en blandning av uran och plutonium. Andelen plutonium i bränslet beror på var det ska användas, men den sträcker sig från 5 % ända upp till 20 % [3].

Det plutonium som blandas med uranet kommer antingen från utbränt kärnbränsle eller skrotade kärnvapen. Som tidigare nämnts bildas en signifikant mängd plutonium under normal drift av en kärnreaktor. Detta kan, efter bränslet förbrukats i reaktorn,

separeras från det kvarvarande uranet och blandas med nytt uran. Denna process kallas uppberedning och sker på ett fåtal ställen i världen.

Plutonet i bränslet består av flera isotoper med olika andel viktprocent. Den vanligaste och mest fissila isotopen är ^{239}Pu vilken bildas genom neutroninfångning i ^{238}U . I använt kärnbränsle utgör denna isotop ungefär 60 % av den totala mängden plutonium jämfört med vapenplutonium (plutonium från kärnvapen) där 95 % av plutonet består av ^{239}Pu [14]. Detta innebär att en relativt stor del av det plutonium som härstammar från använt kärnbränsle, innehåller icke-fissila isotoper som ^{240}Pu och ^{242}Pu . Dessa fungerar som neutronabsorberande ämnen eftersom de är kärnor av jämn-jämn typ. Även den fissila kärnan ^{241}Pu innebär ett problem eftersom den sönderfaller till ^{241}Am , vilken är en god neutronabsorbator men har dåligt fissionstvärnsnitt. Dessa faktorer av goda absorbatörer i plutonium medför att neutronspektrumet blir hårt, det vill säga det termiska neutronflödet blir mindre. Det hårda neutronflödet kan medföra att påfrestningarna på reaktormaterialet blir större än vid drift med uranoxidbränsle, framförallt om MOX-knippena placeras vid randen av härden.

Det MOX-bränsle som ska placeras i Oskarshamn 3 har en medelanrikning på cirka 5 % plutonium. Denna siffra gäller den totala mängden plutonium i bränslet och således inte enbart den fissila isotopen ^{239}Pu .

9.11 Bränsletemperaturkoefficient

När temperaturen på bränslet ökar kommer resonanserna för ^{238}U att bli bredare och därmed fånga in neutroner i ett större energiintervall. Detta resulterar i att andelen termiska neutroner i reaktor sjunker och därmed antalet fissioner i ^{235}U [5]. En ökande bränsletemperatur leder således till en minskande andel fissioner och därmed avtagande effekt. Denna negativa återkoppling av temperaturhöjningen kallas negativ bränsletemperaturkoefficient och är en önskvärd egenskap hos en kärnreaktor. En reaktor med positiv bränsletemperaturkoefficient ökar i effekt om temperaturen stiger, vilket kan leda till skador på bränsle och härd.

9.12 Bränsletidskonstanten

Vid effektändringar i bränslet kommer de centrala delarna av kutsen att uppleva en temperaturökning före de perifera delarna. Det tar helt enkelt en viss tid innan en effekthöjning märks i de yttre delarna av kutsen. Den tid det tar för temperaturen att stabilisera sig i kutsen kallas bränsletidskonstant och är i storleksordningen 3-4 sekunder för Svea-bränsle [5].

9.13 Utbränning

Den tid bränslet är i härden, det vill säga den tid som fission pågår i bränslet, kallas utbränningstid (engelska burnup). Eftersom neutronflödet och frigörandet av fissionsgaser sliter hårt på bränslestavarna, är utbränningstiden begränsad för att inte skada den zirkoniumlegering som omger kutsarna. Utbränningen är den totala energin som frigörs per massenhet och anges normalt i MWd/kgU [14], men även enheten efph [5] används. Förkortningen efph står för effective full power hours, på svenska fulleffektstimmar, och anger antalet timmar med full effekt som reaktor körts sedan senaste revisionsavställningen. En nyligen återstartad reaktor (precis efter revisionsavställning) sägs vara i Beginning Of Cycle (BOC).

9.14 Skador på bränslestavar

Vid för höga belastningar på bränslet eller genom mekanisk nötning kan skador på bränslestavarna uppstå. Dessa mister då inte bara sin förmåga att innesluta fissionsgaserna, utan även uran kan läcka ut i reaktortanken.

Mekanisk nötning kan uppstå genom skräp i reaktortanken som fastnar i bränsleelementen. På grund av det höga vattenflödet kan även ett litet metallspån snabbt borra sig igenom zirkoniumlegeringen som omger bränslekutsarna och orsaka ett hål i bränslestaven.

Om effektutvecklingen i kutsarna blir för kraftig frigörs mer fissionsgaser; dels via den större andelen fissioner, men också genom upphettning av kutsarna. Trycket ökar därmed i bränslestavarna och blir det för högt kan de spricka sönder.

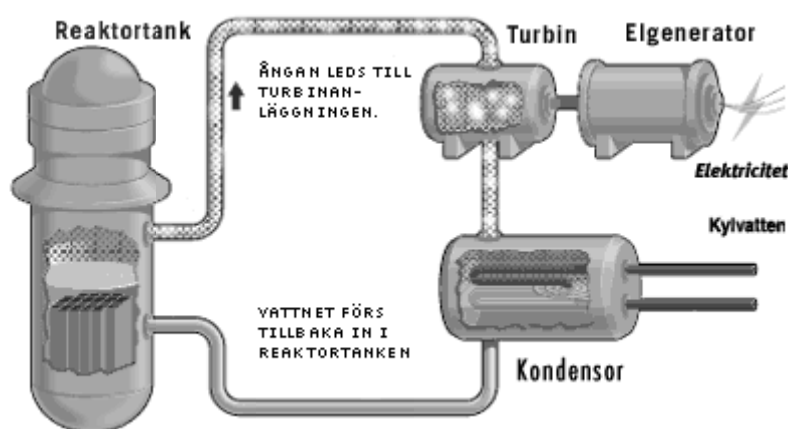
En kraftig effektutveckling kan även leda till att kutsen expanderar snabbare än bränslestaven och därmed kommer i kontakt med zirkoniumlegeringen. Är kutsens expansion tillräckligt stor kan spänningar uppstå i bränslestaven. Dessa i kombination med vatten och fissionsgaser kan få staven att bli spröd och slutligen spricka. Skador av den här typen kallas PCI (Pellet-Clad Interaction) som innebär att kutsen (pellet) kommer i kontakt med inneslutningen (clad).

Dagens bränslestavar är ofta konstruerade med ett rent zirkoniumskikt närmast bränslet, kallat liner, med större motståndskraft mot spänningspåkänningar från expanderande kutsar. Dessa bränslestavar har cirka 25 % större motståndskraft mot PCI-skador än stavar utan linerskikt.

Vid höga belastningar på enskilda bränslestavar kan värmeflödet bli för stort i förhållande till kylflödet och torrkokning (dry out) kan inträffa. Då den största voidbildningen sker i bränsleknippens övre del [5], sker torrkokningsskador i dessa områden. Det bör påpekas att skador på bränslestavar genom torrkokning är mycket sällsynt och har endast inträffat en gång på Oskarshamnsverket.

9.15 BWR

Flera olika typer av kärnreaktorer är i drift runt om i världen, men i denna rapport behandlas endast en typ nämligen BWR. BWR är förkortning av Boiling Water Reactor och beskriven en lättvattenmodererad kokareaktor. I en BWR används vanligt vatten som moderatör för neutronerna och samma vatten tillåts även koka i reaktortanken varefter ångan leds bort och används för att driva turbinen (se Figur 11).



Figur 11. Principskiss över hur en BWR fungerar (från [27]).

Vattnet kondenseras efter turbinen och leds tillbaka in i reaktortanken igen. Bränslet i en BWR består av knippen med uranoxid som innehåller cirka 3,5 % av den fissionerande

isotopen ^{235}U och resten ^{238}U (se tidigare avsnitt om Bränsle och Bränsleelement). Då kärnklyvningsprocessen startas börjar ^{235}U kärnorna att klyvas medan ^{238}U kärnorna absorberar neutroner. Fissionfragmenten överför sin rörelseenergi till det omgivande vattnet via kollisioner med vattenmolekylerna, varvid temperaturen höjs.

9.16 Styrstavar

För att kontrollera neutronflödet och därmed också effekten, används korsformade styrstavar. Dessa är placerade mellan fyra bränsleknippen och manövreras ut och in från botten av reaktortanken. Styrstaven sitter fast med en bajonettinfästning i ett drivdon som för styrstaven ut och in i härden. På drivdonet är en nivåmätare placerad vilken visar hur långt styrstaven är dragen.

Styrstavarna är gjorda av rostfritt stål med ett neutronabsorberande material inlagt i horisontella kanaler. Det neutronabsorberande materialet är främst borkarbid (B_4C) med ett absorptionsvärsnitt för termiska neutroner på 750 barn [5].

Borkarbiden förbrukas under styrstavens livstid då den bestrålas med neutroner. Speciellt utsatt är styrstavens övre del eftersom den alltid är inskjuten en liten bit i härden. Sprickor och korrosion uppstår i den delen på grund av de gaser som bildas när borkarbiden fångar in neutroner. Därför brukar styrstavarnas övre del vara tillverkade i hafnium (Hf) istället. Hafnium har ett absorptionsvärsnitt för termiska neutroner i samma storleksordning som B_4C , men även för snabba neutroner är hafniums tvärsnitt relativt högt. En fördel med hafnium är att det inte sväller (bildar gaser) vid neutronbestrålning, vilket bidrar till att sänka belastningen på styrstavarnas kapsling [5].

9.17 Snabbstopp

Om någonting går fel i reaktorn, exempelvis att effektutvecklingen blir för stor, kan den komma att snabbstoppas. Vid snabbstopp (engelska scram) förs samtliga styrstavar via hydraulik in i härden och avbryter kedjereaktionen. Förloppet tar drygt fyra sekunder.

På grund av fördröjda neutroner och spontan fission i bränslet kommer inte värmeutvecklingen att avta precis efter ett snabbstopp. Det är därför viktigt att kylningen fungerar tillförlitligt även efter en olycka som innebär att snabbstopp utlöses.

Styrstavarnas konstruktion är sådan att de ska klara av att hålla reaktorn underkritisk även om en styrstav skulle fastna i utdraget läge.

9.18 Avställningsmarginal

Då alla styrstavar är inskjutna i härden är den prompt underkritisk. Med detta menas att $k < 1$. I detta tillstånd definieras avställningsmarginalen som hur långt en styrstav måste dras innan reaktorn blir kritisk. Vanligtvis är en avställningsmarginal på två procent önskvärd men den får vara så låg som en procent. Kravet är att reaktorn ska kunna hållas prompt underkritisk, med den stav som sitter i området med lägst avställningsmarginal helt utdragen.

9.19 Uppstart av en kall reaktor

Vid uppstart av en reaktor dras styrstavarna ut i grupper om fyra enligt en speciell sekvens. Sekvensen är framtagen för att minimera påfrestningarna på bränslet i härden. Styrstavsmönstret i härden är uppdelat i två färger; svart och vit. Varannan

styrstav är svart och varannan vit och alla styrstavar i en färg dras ut innan stavarna i nästa färg börjar dras. Styrstavarna dras ut i grupper om fyra under uppstartsekvensen.

9.20 HC-flöde

För att kontrollera effekten i reaktorn används också flödet av vatten genom reaktortanken, det så kallade huvudcirkulationsflödet eller HC-flödet. Detta måste regleras samtidigt som styrstavarna dras ut för att hålla reaktorn innanför sitt driftområde. Driftområdet visar vilken effekt respektive HC-flöde som reaktorn är stabil och kan köras på ett lugnt sätt. Hamnar reaktorn utanför detta område kan effekttökningar ske mycket snabbt.

10 Reaktivitetsolyckor

Reaktivitetsolyckor kan inträffa vid uppstart och provning av reaktorn och innebär att styrstavarna manövreras på ett sätt som medför ökande reaktivitet i bränslet. Vid för stora belastningar kan bränslet eller härden skadas, vilket kan leda till radioaktiva utsläpp till omgivningen. Den engelska beteckningen på reaktivitetsolyckor är Reactivity Initiated Accident, förkortat RIA. Flera olika typer av händelser kan leda till RIA och de finns sammanfattade nedan.

10.1 Händelser som kan leda till RIA

Här följer en sammanställning på de RIA-händelser som kan inträffa i en lättvattenreaktor av kokartyp (BWR). De är mestadels hämtade från [17].

10.1.1 Fallande styrstav

Styrstavarna manövreras ut och in i reaktorn med hjälp av drivdon som de är fastsatta i med en bajonettinfattning. Denna fungerar så att styrstaven vrids till korrekt position varefter infästningen hakar i drivdonet. Det finns dock en risk att ihakningen inte sker fullständigt och därmed inte kommer att fungera tillförlitligt då den används. Vid utdragning kan styrstaven helt enkelt separera från drivdonet och fastna inne i härden.

På drivdonet sitter lägesindikatorer som anger hur långt det är utdraget. Om styrstaven sitter fast i sitt fäste är denna längd densamma som styrstavens utdragning. Skulle däremot styrstaven lossna från drivdonet och fastna inne i reaktorn, kommer indikatorn visa att styrstaven dras ut även om bara själva drivdonet rör sig. Resultatet blir att styrstaven hänger fritt utan något stöd underifrån. Skulle styrstaven lossna i detta läge kommer den falla till den nivå drivdonet är utmanövrerat, det vill säga så långt reaktoroperatören trodde sig ha dragit staven.

10.1.2 Fallande styrstav vid lokal kritisk mätning

Lokala kritiska mätningar utförs innan reaktorn startas upp. Förfaringssättet är dra ut en styrstav (Stav1) till 35 % av sin längd. Därefter dras en intilliggande styrstav (Stav2) ut så långt att lokal kriticitet uppnås. Detta läge är förberäknat innan mätningen börjar och skulle kriticitet inte uppnås här, får staven dras till ett läge som är beräknat att ge ytterligare 800 pcm i reaktivitetstillskott. Om kriticitet inte uppnåtts härefter ska en undersökning göras innan fortsatt stavdragning genomförs.

En anledning till att kriticitet inte uppnås då styrstavarna dras ut kan vara att en styrstav har fastnat inne i reaktorn. Det värsta fallet är att denna styrstav faller ut när dess drivdon är draget till sitt maxläge. Två tänkbara scenarier kan uppstå i det fallet; antingen faller Stav1 från 0 till 35 %, eller Stav2 från 0 % till kriticitet + 800 pcm.

Vid beräkningar av händelsen fallande styrstav vid kritisk mätning antas ett fel på 500 pcm i då Stav2 dras ut. Således görs simuleringarna så att Stav2 får falla till den nivå där reaktivitetstillskottet blir 1300 pcm över kriticitet. Detta för att ha en god säkerhetsmarginal om programmet skulle räkna fel.

10.1.3 Fallande styrstav vid nukleär värmning

När reaktorn värms dras styrstavarna ut i grupper om fyra enligt en specifik sekvens. Likt händelsen i avsnitt zxxzxx, kan en av dessa styrstavar vara dåligt infäst i sitt drivdon. Denna stav kan någon gång under värmningen falla ut och orsaka ett oväntat reaktivitetstillskott i bränslet. Eftersom styrstavsgруппerna dras ända ut kommer staven att falla från 0 till 100 % utdrag.

10.1.4 Fallande styrstav vid varma snabbstoppsprov

Vid varma snabbstoppsprov görs reaktorn kritisk genom att dra styrstavarna i speciella snabbstoppsgrupper. En grupp involverar fyra stycken stavar. När reaktorn uppnått kriticitet utlöses snabbstopp.

Vid värmningen antas det att en styrstav faller på samma sätt som i avsnitt fhsjkdksf.

10.2 Fallhastighet på fallande styrstav

Accelerationen på en styrstav som faller fritt sätts normalt till 7.4 m/s^2 [7], då vattnet i reaktorn antas ha en viss bromsande effekt på det fallande föremålet. Tidigare simuleringar (se [7]) visar dock att en hastighetskurva som följer Tabell3 är mer konservativ än en konstant ökande hastighet. Därför används värdena i Tabell3 när simuleringar med fallande styrstav görs.

Tidsintervall (s)	Hastighet (cm/s)
0.00 - 0.10	48
0.10 - 0.15	119
0.15 - 0.20	166
0.20 - 0.25	214
0.25 - 0.30	260
0.30 - 0.35	300
0.35 - 0.40	350
> 0.40	400

Tabell3. *Hastighet vid olika tidsintervall för fritt fallande styrstav (från [7]).*

Från studier gjorda i [7] framgår också att styrstavens hastighet har liten betydelse för den totala effektutvecklingen i härden

10.3 Felaktigt utmanövrerad styrstavsgрупп

Vid uppstart dras styrstavsgруппerna ut enligt en speciell sekvens. Om sekvensen bryts, det vill säga om fel styrstavsgрупп dras, kan ett stort reaktivitetstillskott tillföras reaktorn.

10.3.1 Felaktigt utmanövrerad styrstavsgрупп vid nukleär värmning

Denna händelse skulle kunna inträffa om reaktoroperatören drar ut en styrstavsgрупп som inte ska dras under nukleär värmning. Flera olika fall kan inträffa vilka beskrivs

nedan. Styrstavsförreglingen, som hindrar att styrstavsgruppen dras för långt eller att fel grupp dras ut, antas inte fungera vid denna händelse.

Styrstavsgruppen kan dras ut

- enligt sekvensen.
- i avvikelser från sekvensen men inom samma färg.
- i avvikelser från sekvensen och motsatt färg.

Händelsen blir särskilt allvarlig om styrstaven dras ut intill en redan utdragen stav.

10.3.2 Felaktigt utmanövrerad styrstav vid lokal kritisk mätning

Lokala kritiska mätningar genomförs med en styrstav utdragen till 35 %. Staven bredvid utmanövreras till kriticitet uppnås. Om denna stav skulle dras ut för långt kan reaktivitetstillskottet i bränslet bli otillåtet stort.

Händelsen kan tänkas inträffa om operatören av oförsiktighet drar staven mer än de 800 pcm över kriticitet som är tillåtet. Värsta fallet är om staven dras helt ut.

10.4 Acceptansgränser för bränslet vid RIA

Reaktivitetshändelser ger upphov till ökande entalpitillskott i bränslet som kan ge skador på bränslestavar och härd. Därför finns gränser för hur stort entalpitillskott som kan accepteras vid en viss typ av olycka.

Acceptansgränserna delas upp i tre kategorier benämnda H2, H3 och H4. Vilka gränsvärden som gäller för de olika kategorierna anges nedan.

10.5 Långsam RIA

Reaktivitetsolyckor delas normalt upp i två kategorier; långsamma och snabba. Definitionen på en långsam RIA är att transienten ska vara längre än bränslets tidskonstant.

Skador som kan uppstå under långvariga transienter är sprickor i bränslestavar orsakat av spänningskorrosion. I bränsle med liner, det vill säga ett rent zirkoniumskikt närmast kutsarna, kan sprickor som bildats på kapslingens utsida börja propagera inåt genom inträngande väte. Detta fenomen sker främst i högutbränt bränsle [11].

Bildandet av sprickor enligt de mekanismer som beskrivs här, sker på en tidskala i timmar. Detta betyder att kortare effekttransienter, det vill säga transienter som pågår under några minuter, är mindre skadliga för bränslet än långa (transienter i tidskala).

10.6 Snabba RIA

I snabba RIA sker transienten under tidsintervall på tiondels sekunder och händelsen är oftast över efter en sekund. Påfrestningarna på bränslet skiljer sig åt jämfört med en långsam transient eftersom entalpin i kutsarna inte kommer vara jämnt fördelad under händelsen.

Då transienten är kortvarig kan högre gränser för maximalt tillförd entalpi tillåtas, eftersom spänningarna på kapslingsmaterialet sker under en kortare tid [11]. Skademekanismer är i övrigt desamma som vid långsamma transienter.

10.7 Utbränningstidens inverkan på skaderisken

Då bränslestavarna används i reaktorn utsätts de för mekanisk förslitning orsakat av neutroner och fissionsgaser. Detta gör att gränserna för hur hög belastning stavarna kan utsättas för, minskar då tiden de varit insatta i reaktorn ökar.

10.8 Entalpigränser för RIA

I Tabell4 visas entalpigränsvärden för långsamma och snabba transienter vid olika utbränningar i bränslet. Utbränningstiden anges här i MWd/kgU som är en omräkning från MWd/kgUO₂. Med detta skrivsätt blir entalpigränserna mindre vid en given utbränningstid.

Utbränning (MWd/kgU)	Långsam H2 (cal/g)	Långsam H3 (cal/g)	Snabb H3 (cal/g)	H4 (cal/g)
0	81.1	103.4	140	230
16	69.6			
33		96.8	140	230
40		75.7	75.7	100
50				60
60				30
70	51.3	63.1	63.1	

Tabell4. Maxentalpi i bränslet vid H2-, H3- och H4-händelser för olika utbränningstider (från [11]).

Maxentalpierna som visas i Tabell4 gäller vid rumstemperatur. Motsvarande gränsvärden vid drifttemperatur är något högre, men i denna rapport används uteslutande gränserna vid rumstemperatur eftersom de är mer konservativa. Observera att skrivsättet MWd/kgU även används då bränslet utgörs av MOX.

10.9 Simulerade RIA

De reaktivitetsolyckor som valdes att simulera inkluderar tre fall; fallande styrstav vid kritisk mätning, fallande styrstav vid uppstart samt felaktigt utdragen styrstav. Att just dessa händelser valdes beror på att de är troligast samt att de inkluderar i stort sätt alla händelser beskrivna ovan. Förfaringssättet för dessa simuleringar beskrivs utförligt under avsnittet Utförande nedan.

11 Beräkningsprogram

Beräkningarna utförs med programmet Simulate 3K (S3K) från Studsvik-Scandpower, vilket simulerar härden i tre dimensioner. Programmet är särskilt lämpat att utföra transienta beräkningar med och passar därför bra till de beräkningsserier som behandlas i denna rapport. Mer om Simulate 3K kan läsas i Appendix 1.

11.1 KIN.MUL-kortet i S3K

När statiska beräkningar på reaktivitetstillskottet görs i fallen med fallande styrstav, är det önskvärt att det blir precis 800 eller 1300 pcm [7]. För att göra finjusteringar av reaktivitetstillskottet används KIN.MUL-kortet i S3K [7] som justerar styrstavens tvärsnitt med en multiplikationsfaktor. Denna är inte direkt proportionell mot reaktiviteten varför många simuleringar behöver göras för att testa fram rätt värde på den. I beräkningsserierna som görs i denna rapport används alltid KIN.MUL-kortet för att justera reaktivitetstillskottet så att det blir precis 800 eller 1300 pcm.

12 Utförande

Simuleringarna görs på tre olika härdar; två med MOX och en utan. De två härdarna som innehåller MOX skiljer sig åt genom antalet knippen som är insatta i härden. I den ena sitter 40 och den andra 80 knippen längs med semiranden eller randen. Den tredje härden används som jämförelse med MOX-härden som innehåller 40 knippen för att få en bild av hur MOX skiljer sig från uranoxidbränsle.

12.1 Styrstavar i härdarna

Styrstavarna i de härdar som simuleringar utförs på har inte samma numrering som i den verkliga härden i Oskarshamn 3. Anledningen till detta är att den numrering som används i beräkningsserierna är lättare att jobba med rent beräkningstekniskt när inputprogrammen skrivs till S3K. Styrstavarnas numrering, så som den är i verkligheten, anges i respektive simuleringsfall.

12.2 Styrstavsgupper i vit sekvens

I beräkningarna nedan hänvisas ofta till vissa styrstavsgupper som tillhör, eller inte tillhör, vit sekvens. De styrstavsgupper som tillhör den vita sekvensen är i ordning grupp G56, G36, G50, G22, G34, G48, G28, G52, G30, G42, G54, G26, G44, G46, G38, G58, G32, G60, G40 samt G24 och ses i Figur12 nedan.

				60										
			40		52		22		24					
		34		44		58		26		28				
	28		38		50		30		32		34			
	24		32		42		56		36		38		40	
		26		36		48		46		42		44		
		22		30		46		54		48		50		52
60		58		56		54		54		56		58		60
		52		50		48		54		46		30		22
			44		42		46		48		36		26	
		40		38		36		56		42		32		24
			34		32		30		50		38		28	
				28		26		58		44		34		
					24		22		52		40			
								60						

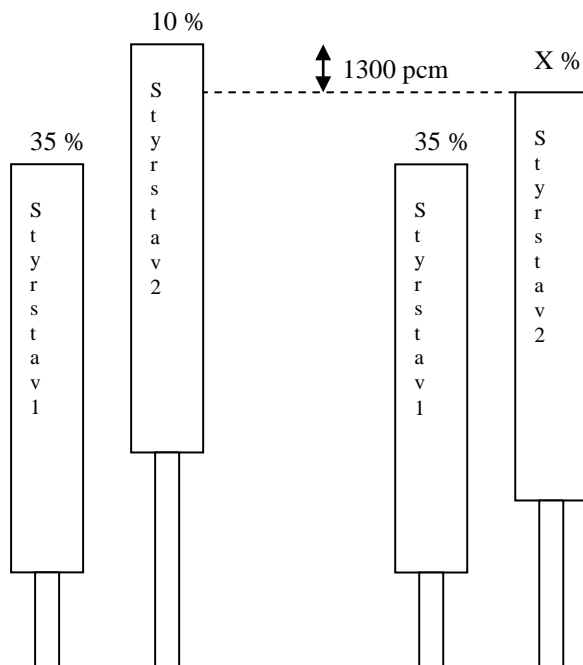
Figur12. Schematisk bild över härden i Oskarshamn 3 där varje ruta markerar en styrstav. Samtliga styrstavsgupper i vit färg är utsatta.

Det finns egentligen ingen anledning att börja med styrstavsdragningen enligt vit sekvens, men detta är det gängse vedertagna vid Oskarshamnsverket. Vanligtvis går reaktorn kritisk före styrstavsgupperna i svart sekvens börjar dras. Observera skillnaden i att en styrstavsgrupp dras i vit färg eller vit sekvens. Samtliga styrstavsgupper i Figur12 tillhör vit färg, men för att följa vit sekvens måste de dras i den ordning som nämns ovan.

12.3 Fallande styrstav vid kritisk mätning

Vid simuleringar med fallande styrstav under kritisk mätning antas två fall; antingen att den styrstav som dras till 35 % (hädanefter benämnd Stav1) faller eller att dess granne (Stav2) faller. Beräkningarna görs genom att initialt dra ut Stav1 till 35 % och

Stav2 till 10 %. Därefter görs statistiska beräkningar av reaktivitetstillskottet för varje steg om 1 % som Stav2 dras ut. I outputfilen ses vid vilken utdragningslängd reaktiviteten ökat med 1300 pcm över initialvärdet (då Stav1 är utdragen 35 % och Stav2 10 %). Det är denna nivå som Stav2 får falla till när fallande styrstav simuleras. Proceduren visas schematiskt i Figur13.



Figur13. Principen för hur styrstavsdragningen går till i simuleringarna. Till vänster visas hur styrstavarna är dragna initialt; Styrstav1 till 35 % och Styrstav2 till 10 %. Till höger visas styrstavarnas placering efter att reaktiviteten stigit med 1300 pcm. Styrstav1 står fortfarande kvar på 35 % medan Styrstav2 fallit till X % utdragen längd.

Liknande statistiska beräkningar av reaktivitetstillskottet görs även med Stav1. Förfaringssättet då är att utgå från den nivå där Stav2 är som mest utdragen och dra Stav1 i steg om 1 % från cirka 10 % till 35 % utdragen längd. Initialvärdet från vilket Stav1 ska falla fås sedan genom att subtrahera 1300 pcm från det värde k_{eff} har med Stav1 och Stav2 i sina yttersta lägen. Simuleringar utförs därefter på Stav1 då denna faller fritt.

Beräkningar görs även på Stav1 och Stav2 då förhållandena är de omvända, det vill säga då Stav2 är stationär på 35 % utdragen längd och Stav1 får falla från 10 % till reaktivitetstillskottet blir 1300 pcm.

I beräkningarna ovan antas det att reaktorn går kritisk då Stav1 är 35 % och Stav2 10 % utdragen. Detta stämmer inte i själva verket utan k_{eff} är oftast i storleksordningen 0.96-0.98 initialt. Anledningen till detta är att de flesta stavar måste dras orimligt långt för att uppnå kriticitet i reaktorn, vilket skulle skapa orealistiska beräkningsfall. I två av fallen har dock k_{eff} varit så pass högt att detta förfaringssätt använts. Reaktorn antas då gå kritisk vid $k_{eff} = 0.9875$. Dessa beräkningar redovisas inte här eftersom de inte gav tillräckligt höga entalpitillskott i bränslet. De finns däremot beskrivna i en annan rapport som även gör jämförelser med uranoxidbränsle.

Reaktorns perifera delar, såsom höjning av vattentemperaturen samt tryckökningar, simuleras inte i beräkningarna eftersom transienten anses vara så kort att dessa faktorer inte hinner påverka förloppet. Av samma skäl modelleras inte heller

snabbstopp. Samtliga beräkningar gjordes vid en vattentemperatur på 30 grader C. Tidigare simuleringar har visat att varierande inloppstemperaturer under 50 grader C har liten inverkan på entalpitillskottet i bränslet [7].

Samtliga reaktivitetstillskott är justerade med $K_{IN.MUL}$ -kortet i S3K för att motsvara precis 1300 pcm. Simuleringarna görs i härdar vid BOC.

Fallande styrstav vid kritisk mätning är en snabb effekttransient och klassas som en H4-händelse, det vill säga entalpivärdena i bränslet får inte överstiga H4-kurvan i Tabell4.

12.4 Fallande styrstav vid uppstart

För att hitta det värsta fallet för händelsen fallande styrstav vid uppstart, utfördes flera beräkningsserier på olika platser i härdarna. Undersökningarna koncentrerades till de områden där avställningsmarginalen är låg samt koncentrationen av MOX-knippen relativt hög.

Simuleringarna utförs genom att först välja ett lämpligt område i härden och ange ett visst antal styrstavar som kan falla. Därefter görs beräkningsserier där styrstavsgруппerna dras ut enligt sekvensen för vit färg. Vid några utvalda styrstavsgруппer dras endast tre stavar ut, då den fjärde antas ha fastnat inne i reaktorn. Därefter görs beräkningar på reaktivitetstillskottet i härden om denna styrstav faller ut någon gång under resten av sekvensen. Reaktivitetstillskottet justeras i samtliga fall med $K_{IN.MUL}$ -kortet i S3K till att precis motsvara 800 pcm enligt förberäkningar vid konstruktion av styrstavssekvensen [7].

Eftersom flera styrstavar används i simuleringarna blir beräkningarna tillslut ganska långa. Antagandet är fortfarande att en styrstav kan falla ut när som helst under hela sekvensen och om tre styrstavar råder under detta villkor, kommer åtta beräkningar krävas för en utdragen styrstavsgрупп. Då tas visserligen en del osannolika fall med såsom att tre styrstavar fastnat samtidigt inne i reaktorn, men likväl blir beräkningarna snabbt väldigt stora. Därför analyseras vissa delar av härden för sig och endast tre valda styrstavar tillåts falla i samma beräkningsserie. Beräkningarna utförs på härdar med 0, 2000, 4000, 6000 samt 8000 efph och vid en temperatur på 30 grader C. Till reaktorns perifera delar tas ingen hänsyn.

Utförandet för respektive härd presenteras mer utförligt nedan där även respektive styrstavs verkliga numrering anges.

Även fallande styrstav vid nukleär värmning är en snabb effekttransient och klassas som H4-händelse, det vill säga det är acceptabelt att entalpigränsen för bränsleskada (H3) passeras (se Tabell4).

12.5 Felaktigt utdragen styrstavsgрупп

Simuleringarna för denna händelse genomförs genom att först dra ut en styrstavsgрупп enligt sekvensen. Därefter dras styrstavarna i grupper om fyra, både enligt och skilt från sekvensen, där även styrstavsgруппer i fel färg dras. Efter att en grupp dragits beräknas det statistiska reaktivitetstillskottet varpå samma styrstavsgрупп skjuts in i härden igen. Proceduren återupprepas därefter för nästa styrstavsgрупп i sekvensen. Det värsta fallet, det vill säga det fall som ger störst reaktivitetstillskott i bränslet, analyseras sedan för att se vilket entalpitillskott det ger upphov till. Beräkningsserier utförs på härdar med 0, 2000, 4000, 6000 samt 8000 efph. I simuleringarna antas att snabbstopp inträder och avbryter effektutvecklingen vid 1 % reaktoreffekt. Den styrstavsgрупп som dras fortsätter dock ut och antas således felfungera.

Simuleringar utförs också då en styrstavsgrupp dras enligt sekvensen, men för snabbt, vid kriticitetsspassage. Vid denna händelse antas det att operatören drar ut aktuell styrstavsgrupp för långt så att ett större reaktivitetstillskott än väntat inträffar. Simuleringarna utförs genom att låta styrstavsgруппerna dras ut enligt sekvensen varvid det statistiska reaktivitetstillskottet beräknas efter varje utdragen grupp. Den styrstavsgrupp där reaktorn går kritisk, det vill säga då k_{eff} skiftar från < 1 till > 1 under gruppens utdragning, identifieras därefter och en beräkning genomförs då denna dras helt ut ur härden.

Händelsen att en styrstavsgrupp dras ut för snabbt enligt sekvensen klassas som en H2-händelse (enstaka operatörfel) [11]. Vid dragning av styrstavsgrupp i fel färg klassas händelsen som H3 (flera operatörfel) [11]. Acceptansgränser anges i Tabell4. Båda händelserna ger upphov till en långsam effekttransient i bränslet.

12.6 Härd1 – 40 knippen MOX

Den första härden benämns Härd1 och innehåller 40 knippen med MOX, placerade längs semiranden i härden (se Bilaga1). Denna härd har den lägsta avställningsmarginalen av de båda MOX-härdarna och fick därför agera som mall för de simuleringar som utfördes, det vill säga beräkningarna gjordes först på denna härd innan de andra två användes. Beräkningarna som gjorts kan delas upp i två kategorier; händelser vid kritiska mätningar och händelser vid uppstartsekvenser.

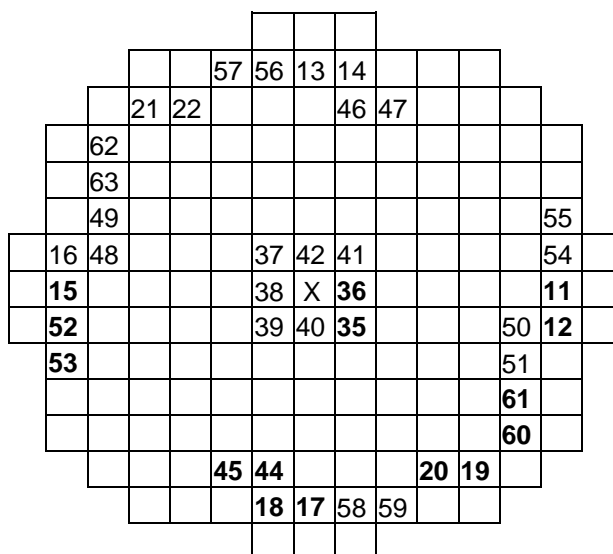
12.6.1 Första beräkningsserien Härd1 – fallande styrstav vid kritisk mätning

Den första beräkningsserien i Härd1 sker på fallande styrstav vid kritisk mätning. Händelsen fallande styrstav kan inträffa vid kritiska mätningar. Simuleringar på denna händelse är gjorda för samtliga stavar markerade med fet stil i Figur14.

12.6.2 Beräkningsområden – första beräkningsserien Härd1

Avställningsmarginalen på samtliga ställen i Härd1 har beräknats tidigare med programmet Fineload. Utefter dessa beräkningar valdes lämpliga ställen, med låg avställningsmarginal, att utföra beräkningar på. För att förenkla programskrivningen har numreringen av styrstavarna gjorts om helt.

Aktuella områden med respektive styrstavs nummer finns i Figur14. Eftersom härden är rotationssymmetrisk kommer varje stavpar ha en tvilling på motsatt sida av härden. Därför behöver simuleringarna bara göras för halva härden.



Figur14. Schematisk bild över styrstavsfördelningen i Oskarshamn 3 där varje ruta motsvarar en styrstav. Stavar involverade i beräkningarna för Härd1 är markerade med fet stil. Övriga är respektive stavpars symmetriska tvillingar. Numreringen skiljer sig från normalt, då styrstavarna dras i grupper om fyra.

Fall1; stav 11 och 12

Simuleringarna för de olika stavparen beskrivs i olika fall. Det första involverar stavarna 11 och 12 i Figur14, vilka har beteckningen O80 och M80 i härden. Kring stav 11 (O80) sitter endast ett MOX-element, men detta är granne till två element på rad som sitter kring stav 12 (M80). Avställningsmarginalen vid stav 11 är 1.8 % och vid stav 12 1.5 %. Detta är därför ett lämpligt område att göra simuleringar på eftersom avställningsmarginalen är låg och MOX-tätheten hög. Samtliga fall beskrivna under avsnittet Fallande styrstav vid kritisk mätning simuleras för de båda stavarna för att undersöka vilket som ger det största entalpitillskottet i bränslet.

Fall2; stav 17 och 18

Stavparet 17 och 18 ligger i ett område med endast ett MOX-knippe och avställningsmarginaler på 2.3 respektive 2.7 %. Detta stavpar togs med eftersom det ingår i samma styrstavsgrupper som stav 11 och 12. Dess benämning i härden är G50 och G45. Samtliga fall beskrivna i avsnitt Fallande styrstav vid kritisk mätning utförs med dessa stavar.

Fall3; stav 19 och 20

Stav 19 och 20 har de egentliga beteckningarna H70 och H65 i härden. Avställningsmarginalerna är 1.8 respektive 1.6 %, men styrstavarna är bara omgärdade av ett MOX-knippe var och dessa sitter relativt långt ifrån varandra. Detta stavpar är dock lämpligt ur beräkningssynpunkt tack vare dess låga avställningsmarginal. Även i detta fall genomförs alla tänkbara scenarion som beskrivs under avsnittet Fallande styrstav vid kritisk mätning ovan.

Fall4; stav 15 och 52

Stav 15 motsvarar samma styrstav som stav 11 men är placerad på andra sidan av härden och benämns O20. Avställningsmarginalen är densamma som för stav 11, det vill säga 1.8 %. Stav 52 (M20) är intressant eftersom två MOX-knippen är placerade

kring denna styrstav och avställningsmarginalen är relativt låg (2.2 %). Kombinationen av stav 15 och 52 ger tre MOX-knippen inom ett begränsat område, vilket är bra när MOX-bränslets egenskaper ska undersökas. Förhållandet är dock inte detsamma som för stav 11 och 12 där tre MOX-knippen sitter på rad efter varandra. I detta fall är ett knippe mellan MOX-knippena uranoxidbränsle. Samtliga fall beskrivna under avsnittet Fallande styrstav vid kritisk mätning ovan genomförs för dessa stavar.

Fall5; stav 35 och 36

Dessa stavar är centralt placerade i härden och har således ingen relation till MOX-bränslet. De togs med i beräkningarna för att se hur entalpitillskottet i bränslet blev för de centrala delarna av härden och om MOX kan ha någon inverkan där. Avställningsmarginalen för stav 35 (M55) är 2.1 % och för stav 36 (O55) 2.8 %. För dessa stavar simuleras bara ett fall och det är när stav 36 faller och stav 35 är stationär vid 35 % utdragen nivå.

Fall6; stav 44 och 45

Stav 44 (H45) och 45 (H40) är inte heller omgärdade av några MOX-knippen och har höga avställningsmarginaler. För stav 45 är den 3.1 %. Anledningen till att dessa stavpar analyserades var återigen för att se om MOX-bränslet har någon effekt på uranbränslestavar. Även för dessa stavar genomfördes bara en simulering där stav 45 får falla fritt medan stav 44 är stationär vid 35 % utdrag.

Fall7; stav 52 och 53

Stav 52 (M20) har en avställningsmarginal på 2.2 % och innehåller två MOX-knippen. Stav 53 (L20) innehåller ett MOX-knippe, men denna stav är placerad i den allra yttersta randen och har mycket hög avställningsmarginal. Detta fall är ändå intressant eftersom det innefattar tre MOX-knippen inom ett litet område. Endast en beräkning genomfördes för detta stavpar nämligen att stav 53 fick falla medan stav 52 var stationär på 35 % utdragen längd.

Fall8; stav 60 och 61

Dessa båda stavar har samma avställningsmarginal (2.2 %) och omgärdas av ett MOX-knippe var. Deras verkliga benämning i reaktorn är I75 (60) och K75 (61). För detta stavpar genomfördes samtliga beräkningsfall som beskrivs under avsnittet Fallande styrstav vid kritisk mätning.

12.6.2 Andra beräkningsserien Härd1 – fallande styrstav vid uppstart

Det andra stora beräkningsfallet i Härd1 innefattar händelsen fallande styrstav vid nukleär värmning. Nukleär värmning sker vid uppstart av reaktorn då styrstavarna dras i grupper om fyra. Liksom i fallet med fallande styrstav under kritisk mätning, kan även här en styrstav ha lossnat från sin infästning i drivdonet och fastna inne i reaktorn när övriga styrstavar i gruppen dras ut.

De styrstavar som är involverade i beräkningarna tillhör vit färg. Styrstavsmönstret glesas ut enligt sekvensen för denna färg och då en grupp dragits där en stav sitter kvar inne i härden, kan denna stav falla ut när som helst under den kommande stavdragningen. Därmed blir beräkningsserierna relativt långa även om bara ett fåtal styrstavar inkluderas i fallen. En schematisk bild över samtliga styrstavsgupper (svart och vit färg) finns i Figur15.

					53	60	21												
					63	40	45	52	59	22	23	24	61						
					29	34	39	44	51	58	25	26	27	28	29				
					61	28	33	38	43	50	57	30	31	32	33	34	63		
					24	27	32	37	42	49	56	35	36	37	38	39	40		
					23	26	31	36	41	48	55	46	40	42	41	44	45		
					21	22	25	30	35	46	47	54	47	48	49	50	51	52	53
					60	59	58	57	56	55	54	62	54	53	56	55	58	59	60
					53	52	51	50	49	48	47	54	47	46	35	30	25	22	21
					45	44	43	42	41	46	55	48	41	36	31	26	23		
					40	39	38	37	36	35	56	49	42	37	32	27	24		
					63	34	33	32	31	30	57	50	43	38	33	28	61		
					29	28	27	26	25	58	51	44	39	34	29				
					61	24	23	22	59	52	45	40	63						
					21	60	53												

Figur15. Schematisk bild över härden i Oskarshamn 3 där varje ruta motsvarar en styrstav. Samtliga styrstavsgrupper är utsatta.

I Härd1 utförs beräkningar på områden där avställningsmarginalen är låg och koncentrationen av MOX-knippen hög. Kring styrstavsgrupperna G59 och G39 uppfylls dessa krav och fallande styrstavar hämtas ur grupperna G52, G22, G34 samt G44. I beräkningarna benämns de 01, 02, 03 och 04 eftersom det blir lättare att skilja dem åt från övriga stavar i gruppen på det sättet. Dess placering i Härd1 visas schematiskt i Figur16.

						60														
							40		52		22		24							
							34		44		58		26		28					
							28		38		50		30		32		34			
							24		32		42		56		36		38		40	
								26		36		48		46		42		44		
								22		30		46		54		48		50	02	
							60		58		56		54		54		56		58	60
								52		50		48		54		46		30	01	
								44		42		46		48		36		26		
							40		38		36		56		42		32		24	
								34		32		30		50		38		28		
								28		26		58		04		03				
								24		22		52		40						
									60											

Figur16. Schematisk bild över Härd1 (även Härd3) där samtliga styrstavsgrupper i vit färg är utsatta. Varje ruta motsvarar en styrstav. De stavar som faller är markerade med **fet stil**. Stavar skrivna med kursiv stil är utdragna när beräkningsserierna startar.

12.6.3 Beräkningsområden – andra beräkningsserien Härd1

Två beräkningsområden valdes i Härd1 när simuleringar av fallande styrstav vid nukleär värmning skulle utföras. Det första involverade stav 01 och 02 kring grupp G59 (se Figur16 ovan), det andra stav 03 och 04 kring grupp G39.

Område1 – stav 01 och 02

Avställningsmarginalen för stav 01 (M80) är 1.5 % och för stav 02 (P80) 2.2 %. Andelen MOX-knippen kring stav 01 är två medan stav 02 endast omgärdas av ett. Den styrstav ur grupp G59 som omges av stav 01 och 02 omgärdas även den av två MOX-knippen. Således blir koncentrationen av MOX hög kring de aktuella styrstavarna, samtidigt som avställningsmarginalen är låg.

Område2 – stav 03 och 04

Stav 03 (H70) har en avställningsmarginal på 1.8 % och stav 04 (H60) på 2.9 %. Endast ett MOX-knippe omger stav 03 och stav 04 har enbart uranoxidbränsle kring sig. Dessutom är bara ett MOX-knippe placerat kring styrstaven mellan dem (H65 ur grupp G39), vilket gör att MOX-tätheten är förhållandevis låg i detta beräkningsområde.

12.6.4 Tredje beräkningsserien Härd1 – felaktigt utdragen styrstavsgrupp

Det tredje fallet som simuleras på Härd1 inkluderar felaktigt utdragen styrstavsgrupp vid nukleär värmning, samt för snabb utdragnings av styrstavsgrupp enligt sekvensen vid kriticitetspassage. I det första fallet antas att fel styrstavsgrupp dras ut ur härden under uppstartsekvensen, varefter ett oväntat tillskott av reaktivitet i bränslet sker.

12.6.5 Beräkningsområden – tredje beräkningsserien Härd1

I den tredje beräkningsserien för Härd1 valdes tre områden i härden ut som lämpliga simuleringsplatser. Metoden är att låta tre eller fyra styrstavsgrupper som inte tillhör sekvensen, dras ut enligt proceduren ovan. Dessa grupper är valda efter sin placering i områden med låg avställningsmarginal och hög koncentration av MOX-knippen. Beräkningsserierna startar med tre grupper (G56, G36 och G50) i vit sekvens redan utdragna. Detta för att k_{eff} ska bli lite högre och fallen mer realistiska. De individuella styrstavarnas benämning i härden står inom parentes efter respektive styrstavsgrupp i avsnitten nedan.

I fallet med för snabbt utdragen styrstavsgrupp i sekvensen vid kriticitetspassage, utfördes denna med samtliga styrstavar i vit sekvens för att se vid vilken utdragen styrstavsgrupp som reaktorn går kritisk.

Område1 – grupp G58, G59 och G60

Det första området i Härd1 där simuleringar med felaktigt utdragen styrstavsgrupp görs, visas i Figur17. Inblandade grupper är G58 (O25, U50, O75 samt H50), G59 (O20, V50, O80 samt G50) och G60 (O15, X50, O85 samt F50), vilka är markerade med **fet** stil i Figur17.

					60									
			40		52	59	22		24					
		34		44		58		26		28				
	28		38		50		30		32	34				
	24		32		42		56		36	38	40			
		26		36		48		46		42	44			
	22		30		46		54		48		50	52		
60	59	58		56		54		54		56		58	59	60
	52		50		48		54		46		30		22	
		44		42		46		48		36		26		
	40		38		36		56		42		32		24	
		34		32		30		50		38		28		
			28		26		58		44		34			
				24		22	59	52		40				
							60							

Figur17. Schematisk bild över Härd1 (Härd3) där samtliga styrstavsgrupper i vit färg samt några grupper i svart färg är utsatta. Varje ruta motsvarar en styrstav. Styrstavarna dras enligt sekvensen för vit färg. De styrstavar markerade med **fet** stil dras ut skilt från sekvensen och markerar vilka områden där simuleringar utförs. Stavar i kursivt är redan dragna då simuleringarna börjar.

Grupperna G56, G36 samt G50, vilka är utdragna då simuleringarna börjar, ses skrivna med kursiv stil i Figur17.

Område2 – grupp G43, G38, G39 och G40

Det andra beräkningsområdet innefattar grupperna G43 (L30, T40, R70 samt I60), G38 (K30, T35, S70 samt I65), G39 (K25, U35, S75 samt H65) och G40 (K20, V35, S80 samt G65). Dessa grupper är markerade med **fet** stil i Figur18.

						60							
				40		52		22		24			
		34	39	44		58		26		28			
	28		38	43	50		30		32		34		
	24		32		42		56		36		38	39	40
		26		36		48		46		42	43	44	
	22		30		46		54		48		50		52
60	58		56		54		54		56		58		60
	52		50		48		54		46		30		22
		44	43	42		46		48		36		26	
	40	39	38		36		56		42		32		24
		34		32		30		50	43	38		28	
			28		26		58		44	39	34		
				24		22		52		40			
							60						

Figur18. Schematisk bild över Härd1 (Härd3) där samtliga styrstavsgrupper i vit färg samt några grupper i svart färg är utsatta. Varje ruta motsvarar en styrstav. Styrstavarna dras enligt sekvensen för vit färg. De styrstavar markerade med **fet** stil dras ut skilt från sekvensen och markerar vilka områden där simuleringar utförs. Stavar i kursivt är redan dragna då simuleringarna börjar.

Likt tidigare är de redan utdragna grupperna G56, G36 samt G50 är skrivna med kursiv stil i Figur18.

Område3 – grupp G33, G32, G27 och G24

Det sista beräkningsområdet för Härd1 i fallet felaktigt utdragen styrvastavgrupp, görs med grupperna G33 (T30, T70, I70 samt I30), G32 (S30, T65, K70 samt I35), G27 (S25, U65, K75 samt H35) och G24 (S20, V65, K80 samt G35). Dessa ses markerade med **fet** stil i Figur19.

					60									
			40		52		22		24					
		34		44		58		26	27	28				
		28	33	38		50		30		32	33	34		
		24	27	32		42		56		36		38		40
			26		36		48		46		42		44	
		22		30		46		54		48		50		52
60		58		56		54		54		56		58		60
		52		50		48		54		46		30		22
			44		42		46		48		36		26	
		40		38		36		56		42		32	27	24
			34	33	32		30		50		38	33	28	
			28	27	26		58		44		34			
				24		22		52		40				
								60						

Figur19. Schematisk bild över Härd1 (Härd3) där samtliga styrvastavgrupper i vit färg samt några grupper i svart färg är utsatta. Varje ruta motsvarar en styrvastav. Styrvastavarna dras enligt sekvensen för vit färg. De styrvastavar markerade med **fet** stil dras ut skilt från sekvensen och markerar vilka områden där simuleringar utförs. Stavar i kursivt är redan dragna då simuleringarna börjar.

Återigen är grupperna G56, G36 samt G50 är skrivna med kursiv stil i Figur19, vilket markerar att de är utdragna då beräkningarna startar.

12.7 Härd2 – 80 knippen MOX

Härd2 innehåller 80 knippen med MOX-bränsle insatta längsmed randen av härdens i Oskarshamn 3 (se Bilaga2). Avställningsmarginalen i denna härd är generellt betydligt högre än för Härd1.

12.7.1 Första beräkningsserien Härd2 – fallande styrvastav vid kritisk mätning

Första beräkningsserien i Härd2 innefattar, precis som i fallet med Härd1, fallande styrvastav vid kritisk mätning. Händelsen är densamma som den beskrivs gällande Härd1, men de styrvastavar som är inblandade i simuleringarna skiljer sig från tidigare. Dessutom simuleras inte fallet då en styrvastav får falla från kriticitet ($k_{eff} = 0.9875$) utan endast fall från 10 % utdragen längd (för den stav som dras ut) undersöks.

12.7.2 Beräkningsområden – första beräkningsserien Härd2

Även för Härd2 har avställningsmarginalen för varje styrvastav beräknats på förväg av Fineloadprogrammet. Utifrån dessa resultat valdes lämpliga områden att genomföra

Fall3; stav 23 och 24

Stav 23 (H70) har även den en avställningsmarginal på 2.2 % men omgärdas inte heller av några MOX-knippen. Kring stav 24 (H75) finns däremot två MOX-knippen och avställningsmarginalen för denna styrstav är 2.8 %. Detta medför att Fall2 och Fall3 är väldigt lika varandra sett till avställningsmarginal och antal MOX-knippen kring styrstavarna. Trots likheterna tillhör de inte samma styrstavsgrupper, men är placerade i samma del av härden.

Fall4; stav 11 och 36

Avställningsmarginalen för stav 11 (R80) är 2.6 % och för stav 36 (S80) 3.5 %. Kring de båda styrstavarna sitter sammanlagt fyra bränsleknippen med MOX varav två stycken runt stav 11 och två kring stav 36.

Fall5; stav 19 och 31

Detta stavpar tillhör samma styrstavsgrupper som stav 11 och 12 men har andra avställningsmarginaler. För stav 19 (F50) är den 3.6 % och för stav 31 (F55) 3.5 %. Andelen MOX-patroner kring de båda styrstavarna skiljer sig också från fallet med stavarna 11 och 12 då de omgärdas av två knippen var.

12.7.3 Andra beräkningsserien Härd2 – fallande styrstav vid uppstart

Metodikerna för dessa simuleringar följer den som beskrevs för Härd1. Återigen utförs beräkningar på områden i härden där avställningsmarginalen är låg och MOX-koncentrationen hög. Reaktivitetstillskottet justeras med KIN.MUL-kortet i S3K till att precis motsvara 800 pcm då en styrstav faller ut ur härden.

12.7.4 Beräkningsområden – andra beräkningsserien Härd2

Även i Härd2 utförs beräkningar på två ställen i härden i fallet fallande styrstav vid uppstart. Det är dock samma styrstavsgrupper som är inblandade i de båda fallen. Anledningen till detta är att avställningsmarginalen och MOX-koncentrationen var sammansatt så, att dessa områden passade bäst att utföra beräkningar på. Detta medför också att benämningen på de styrstavar som faller i de olika områdena är densamma. Således betecknas de tre styrstavar som faller i de båda områdena 01, 02 och 03, vilket kan orsaka förvirring. Återigen var det av beräkningstekniska skäl som denna numrering användes

Område1 – fallande styrstav vid uppstart Härd2

I Figur21 visas vilka styrstavar som används i beräkningarna i det första området som analyseras. Stavarna tillhör grupperna G52, G44 samt G40, men är här betecknade med 01, 02 respektive 03. Dess benämning i reaktorn Oskarshamn 3 är P80, R75 samt S80 och markeras med **fet** stil i Figur21.

					60									
			40		52		22		24					
		34		44		58		26		28				
	28		38		50		30		32		34			
	24		32		42		56		36		38	03		
		26		36		48		46		42		02		
	22		30		46		54		48		50	01		
60		58		56		54		54		56		58		60
	52		50		48		54		46		30		22	
		44		42		46		48		36		26		
	40		38		36		56		42		32		24	
		34		32		30		50		38		28		
			28		26		58		44		34			
				24		22		52		40				
							60							

Figur21. Schematisk bild över Härd2 som visar det första området i härden, där simuleringar med fallande styrstav under uppstart genomförs. Varje ruta motsvarar en styrstav och samtliga stavar i vit färg är utsatta. Fallande stavar är markerade med **fet** stil. Stavar skrivna med kursiv stil är utdragna när beräkningsserierna startar.

Eftersom simuleringarna blir intressanta först då en stav kan falla ut ur reaktorn, dras stavarna enligt sekvensen fram till G28. Denna grupp blir således den första att dras ut i beräkningsserien.

Område2 – fallande styrstav vid uppstart Härd2

Det andra området som beräkningar utfördes på i Härd2 visas i Figur22. Stavarna som faller tillhör samma grupper som i det första fallet och har, som nämnts tidigare, även samma numrering (01, 02 och 03). Deras beteckningar i reaktorn Oskarshamn 3 är G55, H60 samt G65 och visas utsatta med **fet** stil i Figur22.

					60									
			40		52		22		24					
		34		44		58		26		28				
	28		38		50		30		32		34			
24		32		42		56		36		38		40		
	26		36		48		46		42		44			
	22		30		46		54		48		50		52	
60		58		56		54		54		56		58		60
	52		50		48		54		46		30		22	
		44		42		46		48		36		26		
	40		38		36		56		42		32		24	
		34		32		30		50		38		28		
			28		26		58		02		34			
				24		22		01		03				
							60							

Figur22. Schematisk bild över Härd2 som visar det andra området i härden, där simuleringar med fallande styrstav under uppstart genomfördes. Varje ruta motsvarar en styrstav och samtliga stavar i vit färg är utsatta. Fallande stavar är markerade med **fet** stil. Stavar skrivna med kursiv stil är utdragna när beräkningsserierna startar.

Simuleringarna startades även i detta fall, av samma anledning som beskrivs ovan, då alla grupper fram till G28 var utdragna.

12.7.5 Tredje beräkningsserien Härd2 – felaktigt utdragen styrstavsgrupp

När denna händelse simuleras dras styrstavsgrupperna ut enligt vit sekvens. Efter att en grupp dragits görs statistiska beräkningar av reaktivitetstillskottet då en annan grupp, skild från sekvensen och i valfri färg, dras ut. Denna skjuts därefter in i härden igen varefter en annan styrstavsgrupp dras ut och det statistiska reaktivitetstillskottet beräknas på nytt. Proceduren upprepas till samtliga grupper i härden gått igen varefter nästa styrstavsgrupp i sekvensen dras ut och allting upprepas igen. På detta sätt gås samtliga styrstavsgrupper i härden igenom och det västa fallet, det vill säga det som ger störst reaktivitetstillskott i bränslet, identifieras. Värt att påpeka här är att även styrstavar som inte har några MOX-knippen kring sig deltar i beräkningarna. I detta fall tas alltså inte hänsyn till om den styrstavsgrupp som ger störst reaktivitetstillskott omgärdas av MOX-bränsle eller ej.

Givetvis utfördes även simuleringen med för snabbt utdragen styrstavsgrupp i sekvensen vid kriticitetspassage, också i fallet med Härd2.

12.7.6 Beräkningsområden – tredje beräkningsserien Härd2

Eftersom samtliga styrstavar i härden ingår i simuleringarna finns det bara ett beräkningsområde i denna beräkningsserie; hela härden.

12.8 Härd3 – modifierad uranhärd utan MOX

Härd3 är modifierad för att få liknande avställningsmarginaler som Härd1 på de platser där simuleringar utförs (se Bilaga3). Detta medför att Härd3 inte kan anses vara en realistisk uranoxidhärd eftersom färskt bränslelement sitter tätt ihop på semiranden av härden. Detta är inte en normal laddning av en reaktorhärd utan sker exempellöst i denna beräkningsserie för att få de två härdarna att likna varandra.

Fall2 – stav 19 och 20

Även för stavparet 19 (H70) och 20 (H65) är avställningsmarginalerna väldigt lika de i Härd1. För stav 19 är den fdhfdshj % jämfört med 1.8 % i Härd1 och för stav 20 fdjfdj % jämfört med 1.6 %.

Fall3 – stav 60 och 61

Det tredje beräkningsområdet involverar styrstavarna 60 (I75) och 61 (K75). Detta område modifierades inte för att efterlikna Härd1 utan har en annan avställningsmarginal. För stav 60 i Härd3 är den fshjsfdhj % och för stav 61 i samma härd dfsjkdsfkj %. Detta ska jämföras med avställningsmarginalen i Härd1 som är 2.2 % för båda styrstavarna.

12.8.3 Andra beräkningsserien Härd3 – fallande styrstav under uppstart

Även i detta fall användes samma styrstavar som i Härd1 vid simuleringarna. Återigen genomfördes beräkningarna på Härd3 efter att resultaten från Härd1 blivit klara och således det värsta fallet därifrån konstaterat. Därmed behövde endast en simulering i fallet fallande styrstav vid uppstart göras för Härd3.

12.8.4 Beräkningsområden – andra beräkningsserien Härd3

Då beräkningarna på Härd3 genomförs efter de på Härd1, används bara ett beräkningsområde i detta fall. Den styrstav som faller är markerad med **fet** stil i Figur24 nedan och är den stav som ger störst entalpitillskott i Härd1. Därmed inte sagt att den skulle ge det i Härd3, men dessa simuleringar har endast som uppgift att påvisa skillnader mellan MOX- och uranoxidbränsle i specifika delar av härdens.

					60									
			40		52		22		24					
		34		44		58		26		28				
	28		38		50		30		32		34			
	24		32		42		56		36		38		40	
		26		36		48		46		42		44		
	22		30		46		54		48		50		52	
60		58		56		54		54		56		58		60
	52		50		48		54		46		30		22	
		44		42		46		48		36		26		
	40		38		36		56		42		32		24	
		34		32		30		50		38		28		
		28		26		58		04		34				
		24		22		52		40						
						60								

Figur24. Schematisk bild över Härd3 (även Härd1) där samtliga styrstavgrupper i vit färg är utsatta. Varje ruta motsvarar en styrstav. Den stav som faller är markerad med **fet** stil. Stavar skrivna med kursiv stil är utdragna när beräkningsserierna startar.

12.8.5 Tredje beräkningsserien Härd3 – felaktigt utdragen styrstav vid uppstart

Återigen genomförs samma simuleringar som i fallet med Härd1. Undantaget gäller fallet då rätt styrstavgrupp dras ut för snabbt vid kriticitetspassage. Eftersom denna händelse sker precis vid kriticitetspassage, var det nödvändigt att göra en egen

beräkningsserie för det statiska reaktivitetstillskottet vid utdragning av styrstavsgrupperna enligt vit sekvens i Härd3.

12.8.6 Beräkningsområden – tredje beräkningsserien Härd3

Simuleringen med felaktigt utdragen styrstavsgrupp i Härd3 involverar grupp G59 samtidigt som grupperna G56, G36, G50 och G22 är utdragna. Detta är samma som Område1 i beräkningsserierna för Härd1, men utan styrstavsgrupperna G58 och G60. Vilka styrstavsgrupper som är inblandade i beräkningarna för Härd3 ses i Figur25, där den felaktigt utdragna gruppen markerats med **fet** stil. Kursiverade nummer anger de grupper som är dragna då händelsen felaktigt utdragen styrstav sker, alltså inte vid beräkningsseriernas början.

					60										
			40		52	59	22		24						
		34		44		58		26		28					
	28		38		50		30		32		34				
	24		32		42		56		36		38		40		
		26		36		48		46		42		44			
		22		30		46		54		48		50		52	
	60	59	58		56		54		54		56		58	59	60
		52		50		48		54		46		30		22	
		44		42		46		48		36		26			
	40		38		36		56		42		32		24		
		34		32		30		50		38		28			
		28		26		58		44		34					
			24		22	59	52		40						
						60									

Figur25. Schematisk bild över Härd3 (Härd1). Varje ruta motsvarar en styrstav och samtliga stavar i vit färg är utsatta. Den styrstavsgrupp som dras ut i simuleringen är markerad med **fet** stil. Grupperna G56, G36, G50 samt G22 är redan dragna och markerade med kursiv stil.

För att simulera händelsen snabbt utdragen styrstavsgrupp vid kriticitetspassage, gjordes beräkningar av det statiska reaktivitetstillskottet då samtliga styrstavsgrupper i vit färg dras ut enligt sekvensen. Således är beräkningsområdet för denna beräkningsserie hela Härd3.

13 Resultat

För att få en bättre överblick av resultaten presenteras de olika fallen för sig och inte samtliga fall för en härd under samma avsnitt. Valet att presentera resultaten på detta sätt beror på att jämförelser mellan de olika härdarna blir mer överskådliga på detta sätt. Endast de värsta fallen, det vill säga de som ger störst entalpitillskott i bränslet, visas här. Således kommer inte samtliga fall som genomgått under utförandeavsnittet att presenteras i resultatdelen. Detta eftersom endast de fall som ger högst entalpitillskott i bränslet kan anses som intressanta för denna rapport.

13.1 Fallande styrstav vid kritisk mätning

13.1.1 Härd1

De fall som gav störst entalpitillskott i bränslet för Härd1 var Fall1, Fall3 och Fall8. Således är det styrstavsparen 11 och 12, 19 och 20 samt 60 och 61 som ger störst påfrestningar på bränslet vid fallande styrstav under kritisk mätning för Härd1. Resultaten för respektive stavpar presenteras mer noggrant nedan.

Fall1, stav 11 och 12

Värsta fallet inträffade när stav 11 var utdragen till 35 % och stav 12 föll från 10 % till 15 % utdragen längd. Reaktivitetstillskottet blir, efter justering med $K_{IN.MUL}$ -kortet i S3K, exakt 1300 pcm. Entalpitillskottet (cal/g) som funktion av utbränningen (MWd/kgU) för denna beräkning ses i Figur31 i Bilaga4.

Ur Figur31 ses att gränsvärdet för kapslingsskada (H3) innehålls.

Fall2; stav 19 och 20

Beräkningsserierna för detta stavpar visade att störst entalpitillskott i bränslet uppnåddes då stav 20 är utdragen till 35 % och stav 19 faller från 10 % till 16 %. Även i detta fall är reaktivitetstillskottet justerat med $K_{IN.MUL}$ -kortet i S3K till att bli precis 1300 pcm. Resultatet från denna beräkning visas i Figur32 i Bilaga4.

Gränsvärdet för kapslingsskada (H3) innehålls inte i detta fall, men kurvan överskrids endast av tre punkter.

Fall8; stav 60 och 61

Störst entalpitillskott uppnåddes här då stav 60 var utdragen 35 % och stav 61 fick falla från 10 % till 17 % utdragen längd. Reaktivitetstillskottet är justerat till 1300 pcm med $K_{IN.MUL}$ -kortet i S3K. Resultatet visas i Figur33 i Bilaga5.

Även i detta fall innehålls inte kurvan för kapslingsskada, men återigen överskrids den endast av tre punkter.

13.1.2 Härd2

De fall som gav störst entalpitillskott i bränslet i Härd2 var Fall2 och Fall3, alltså styrstavsparen 17 och 18 samt 23 och 24. Resultaten för dessa stavpar presenteras nedan.

Fall2; stav 17 och 18

Då stav 17 var utdragen till 35 % och stav 18 fick falla fritt från 10 % till 15 % utdragen längd, blev entalpitillskottet i bränslet som störst för detta styrstavpar. Resultatet från beräkningen visas i Figur34 i Bilaga5.

Kurvan för kapslingsskada innehålls inte i detta fall utan överskrids av flertalet punkter.

Fall3; stav 23 och 24

Värsta fallet uppstod då stav 23 föll från 10 % till 15 % utdragen längd medan stav 24 var stationär vid 35 %. Resultatet från beräkningen visas i Figur35 i Bilaga6.

Även här överskrids H3-kurvan av flertalet punkter.

13.1.3 Härd3

Vilka fall som ger störst entalpitillskott i bränslet för Härd3 är inte känt. Däremot kan resultaten från de beräkningar som involverade styrstavsparen 11 och 12, 19 och 20 samt 60 och 61, alltså samma som för Härd1, redovisas här. Fallen namngavs i tur och ordning Fall1, Fall2 och Fall3.

Fall1; stav 11 och 12

I detta fall uppnåddes ett reaktivitetstillskott på 1300 pcm (justerat med KIN.MUL-kortet i S3K) då stav 11 var utdragen 35 % och stav 12 fick falla från 10 % till 17 %. Entalpitillskottet (cal/g) som funktion av utbränningstiden (MWd/kgU) visas i Figur36 i Bilaga6.

Händelser av H3-typ innehålls inte i denna beräkning utan överskrids av flertalet punkter.

Fall2; stav 19 och 20

Här uppnåddes ett reaktivitetstillskott på 1300 pcm när stav 19 föll från 10 % till 20 % utdraget läge samtidigt som stav 20 är stationär på 35 %. Resultatet visas i Figur37 i Bilaga7.

Händelser av H3-typ innehålls i detta fall men marginalen till kurvan är mycket liten.

Fall3; stav 60 och 61

För detta stavpar erhöles ett reaktivitetstillskott på 1300 pcm då stav 60 var utdragen 35 % och stav 61 föll från 11 % till 17 %. Anledningen till att stav 61 inte fick falla från 10 % är att k_{eff} var mycket lågt för denna simulering. Resultatet av beräkningen ses i Figur38 i Bilaga7.

Entalpvärdena tangerar precis gränsen för kapslingskada men överskrider dem inte. Händelser av H3-typ innehålls med mycket liten marginal.

13.2 Fallande styrstav vid uppstart

Återigen är det bara de värsta fallen för respektive härd som presenteras här.

13.2.1 Härd1

Av de två beräkningsområden som analyserades i Härd1, gav Område2 upphov till det största entalpitillskottet i bränslet.

Område2 – Härd1

Värsta fallet uppstod när stav 04 (H60) föll ut ur härden precis efter att grupp G60 dragits vid 6000 efph. Entalpitillskottet (cal/g) som funktion av utbränningstiden (MWd/kgU) ses i Figur39 i Bilaga8.

Händelserna för bränsleskada (H3) innehålls inte utan överskrids av flertalet punkter. För höga utbränningstider tangeras kurvan för härdskada (H4), men överskrids inte.

13.2.2 Härd2

Även för Härd2 uppnåddes det värsta fallet vid beräkningar på Område2, det vill säga med styrstavar G55, H60 och G65 inblandade.

Område2 – Härd2

Störst entalpitillskott erhöles då stav 02 (H60) föll ut ur härden strax efter grupp G44 dragits. Utbränningen i bränslet var 8000 efph och resultatet från beräkningen ses i Figur40 i Bilaga8.

Gränsvärdena för bränsleskada (H3) innehålls i detta fall med god marginal för bränsle med låg utbränning. Däremot blir marginalerna mindre då utbränningstiden överstiger 40 MWd/kgU. Bränsle- och härdskadegränsen innehålls dock även i detta område.

13.2.3 Härd3

Eftersom denna härd konstruerades för att fungera som jämförelse med Härd1, genomförs endast det fall då styrstav 04 (H60) faller ut precis efter grupp G60 dragits. Resultatet av denna beräkning ses i Figur41 i Bilaga9.

Ur Figur41 ses att kutsentalpierna håller sig betydligt under gränsen för bränsleskada (H3).

13.3 Felaktigt utdragen styrstavsgrupp

Händelserna i detta avsnitt delas upp i felaktigt utdragen styrstavsgrupp vid uppstart samt för snabbt utdragen grupp vid kriticitetsspassage. De båda fallen presenteras under respektive härd nedan.

13.3.1 Härd1

Felaktigt utdragen styrstavsgrupp vid uppstart

Det värsta fallet uppnåddes här då grupp G59 (styrstav O20, V50, G50 samt O80) drogs ut strax efter att grupp G22 dragits. Sekvensen är då precis inledd och endast fyra grupper är dragna (se Figur26).

					60										
			40		52	59	22		24						
		34		44		58		26		28					
	28		38		50		30		32		34				
	24		32		42		56		36		38		40		
		26		36		48		46		42		44			
		22		30		46		54		48		50		52	
	60	59	58		56		54		54		56		58	59	60
		52		50		48		54		46		30		22	
		44		42		46		48		36		26			
		40		38		36		56		42		32		24	
		34		32		30		50		38		28			
		28		26		58		44		34					
		24		22		59	52		40						
						60									

Figur26. Schematisk bild över Härd1 (Härd3). Varje ruta motsvarar en styrstav och samtliga stavar i vit färg är utsatta. Den styrstavsgrupp som dras ut i simuleringen är markerad med **fet stil**. Grupperna G56, G36, G50 samt G22 är redan dragna och skrivna i kursiv stil.

Resultatet från simuleringen visas som kutsentalpin (cal/g) som funktion av utbränningen (MWd/kgU) i Figur42 i Bilaga10.

Händelser av H2-typ innehålls med god marginal trots att den utdragna styrstavsgruppen tillhör fel färg.

För snabbt utdragen styrstavsgrupp vid kriticitetspassage

I fallet då rätt styrstavsgrupp dras ut för snabbt vid kriticitetspassage ses resultatet i Figur43 i Bilaga10. Den styrstavsgrupp som drogs ut i detta fall var G42 (styrstavar K60, L35, S40 samt R65), alltså grupp tio i vit sekvens.

Entalpi gränserna ligger även här långt under H2-kurvan.

13.3.2 Härd2

Felaktigt utdragen styrstavsgrupp vid uppstart

I Härd2 uppnåddes det värsta fallet då grupp G47 (styrstavarna M45, P45, M55 samt P55) drogs ut precis efter det att grupp G46 dragits. Hela fjorton grupper är då dragna i sekvensen, vilka visas i Figur27.

					60									
			40		52		22		24					
		34		44		58		26		28				
	28		38		50		30		32		34			
	24		32		42		56		36		38		40	
		26		36		48		46		42		44		
	22		30		46	47	54	47	48		50		52	
60		58		56		54		54		56		58		60
		52		50		48	47	54	47	46		30		22
			44		42		46		48		36		26	
	40		38		36		56		42		32		24	
		34		32		30		50		38		28		
			28		26		58		44		34			
				24		22		52		40				
								60						

Figur27. Schematisk bild över Härd2. Varje ruta motsvarar en styrstav och samtliga stavar i vit färg är utsatta. Den styrstavsgrupp som dras ut i simuleringen är markerad med **fet** stil. Grupperna G56, G36, G50, G22, G34, G48, G28, G52, G30, G42, G54, G26, G44 samt G46 är redan dragna och markerade med kursiv stil.

Resultatet av simuleringen ses i Figur44 i Bilaga11, där kutsentalpin (cal/g) som funktion av utbränningen (MWd/kgU) då grupp G47 dras ut visas.

Händelser av H3-typ innehålls med god marginal. Däremot överskrids H2-kurvan av flertalet punkter.

För snabbt utdragen styrstavsgrupp vid kriticitetspassage

Resultatet av händelsen då rätt styrstavsgrupp dras ut för snabbt i Härd2 visas i Figur45 i Bilaga11. Även här ses kutsentalpin (cal/g) på y-axeln och utbränningstiden (MWd/kgU) på x-axeln. I detta fall skedde kriticitetspassage då grupp G30 (styrstavar P30, T55, M70 samt I45) drogs ut, det vill säga då den nionde gruppen dragits.

Återigen hålls entalpitillskottet långt under H2-gränsen.

13.3.3 Härd3

Felaktigt utdragen styrstavsgrupp vid uppstart

I värsta fallet med Härd3 drogs exakt samma styrstavsgupper som i Härd1. Således kommer grupp G59 dras ut även här, samtidigt som grupperna G56, G36, G50 samt G22 är utdragna (se Figur26). Resultatet ses i Figur46 i Bilaga12.

Entalpigränserna överskrider inte H2-kurvan.

För snabbt utdragen styrstavsgrupp vid kriticitetspassage

I fallet då rätt styrstavsgrupp drogs ut för snabbt enligt sekvensen, kunde inte samma styrstavar som i Härd1 användas och en ny beräkningsserie fick göras. Resultaten från denna ses i Figur47 i Bilaga12. I detta fall var det styrstavsgrupp G26 som drogs ut ur härden.

Ur Figur47 ses att H2-händelsen innehålls med mycket god marginal även i detta fall. Maxentalpierna uppnår knappt 2 cal/g, vilket endast ses som ett tjockt streck i botten av Figur47.

14 Diskussion

Diskussionen är uppdelad och behandlar varje fall för sig.

14.1 Fallande styrstav vid kritisk mätning

Resultaten från beräkningsserierna visar att gränsen för kapslingsskada (H3) överskrids i flertalet av fallen. Jämfört med tidigare analyser på Oskarshamn 3 [7] samt Oskarshamn 1 och 2 [6] är inte dessa resultat unika. Påpekas bör dock att de simuleringar som utförts här sker i de perifera delarna av härden till Oskarshamn 3. Resultaten presenterade i [6] och [7] kommer från beräkningar av mer centralt placerade styrstavsgupper, vilket kan ses som en förmildrande omständighet i sammanhanget. Centralt placerat bränsle utsätts för ett högre neutronflöde och därmed snabbare entalpiökningar vid reaktivitetstransienter. Detta är inte fallet vid randen av härden där neutronflödet är lägre och således inte borde ge upphov till samma entalpinivåer som i de centrala delarna av härden.

Det ska dock poängteras att fallande styrstav vid kritisk mätning klassas som en H4-händelse, vilket medför att entalpitillskott på maximalt 230 cal/g kan tillåtas i bränsle med en utbränningstid som understiger 33 MWd/kgU. Händelser av H4-typ innehålls med god marginal i samtliga fall, vilket innebär att risken för bränslefragmentering är liten. Däremot kan omfattande skador på bränslet inträffa till följd av torrkokning och PCI-påkänningar.

14.2 Fallande styrstav vid uppstart

I samtliga fall som simulerats här har reaktivitetstillskottet vid fallande styrstav under nukleär värmning endast varit några tiotal pcm. Detta har justerats med KIN.MUL-kortet i S3K att motsvara precis 800 pcm, vilket medför att värdet på multiplikationsfaktorn blir ganska högt i somliga fall. Vissa resultat kan därför ses som orimliga och ge högre entalpitillskott i bränslet än vad fallet skulle vara i verkligheten.

I beräkningarna av det statiska reaktivitetstillskottet var även en del orimliga fall med, såsom att två eller tre styrstavar skulle falla ut ur härden på samma gång. Dessa ger visserligen ett högre reaktivitetstillskott i reaktorn, men togs inte med i

beräkningarna på fallande styrstav vid nukleär värmning eftersom de kan anses som alltför osannolika.

Anmärkningsvärt är skillnaden i entalpitillskott i bränslet mellan Härd1 och Härd3. Anledningen till detta kan vara att avställningsmarginalen för stav 04 (H60) är 2.9 % i Härd1 men 3.5 % i Härd3. Dessutom har grannstaven, H65, 0.2 % högre avställningsmarginal i Härd3. Om skillnaden i avställningsmarginal kan svara för hela skillnaden i entalpitillskott, eller om MOX-bränslet bidrar till detta kräver dock mer utredning för att säkerställa. Klart är dock att entalpitillskottet i bränslet skiljer sig markant åt i de båda fallen.

Observerbart är även det faktum att samma styrstav (H60) föll ut ur härden i alla tre fallen.

14.3 Felaktigt utdragen styrstavsgrupp

Entalpvärdena i samtliga simuleringar som presenteras här ligger under gränsvärdet för respektive händelse. Analyserna av felaktigt utdragen styrstavsgrupp skedde även med grupper ur samma färg som sekvensen (vit), men i denna rapport togs endast de fall som gav störst reaktivitetstillskott i bränslet med. Det kan därför finnas fall där entalpigränserna överskrids, eftersom utdragning av fel styrstavsgrupp i rätt färg klassas som en H2-händelse [11]. En analys av detta fall är inte gjord här.

Vidare kan nämnas att den styrstavsgrupp som dras ut i värsta fallet i Härd2 sitter centralt placerad i härden. Detta kan tyckas märkligt eftersom analyserna här ska inrikta sig på områden med MOX-bränsle. De omfattande beräkningsserierna i Härd2 gällande detta fall gjorde det dock möjligt att plocka ut det värsta fallet i hela härden, vilket var när grupp G47 drogs ut relativt sent i sekvensen. Just detta fall gav störst reaktivitetstillskott vid de statiska beräkningarna, varefter ett antagande gjordes att områdena med MOX-bränsle inte skulle bidra med högre entalpitillskott. En studie av de perifera delarna av härden (där MOX-knippen sitter) hade kanske varit bättre för att studera just MOX-bränslets egenskaper, men bedömningen gjordes att det var intressantare att studera det värsta fallet i härden. Det ska dessutom tilläggas att både avställningsmarginal och koncentration av MOX-knippen är högre respektive lägre för Härd2 än Härd1. På Härd1 utfördes simuleringar på semiranden där MOX-knippen är placerade.

15 Slutsats

Samtliga resultat som presenteras i denna rapport visar att acceptansgränserna innehålls i alla simuleringar. I något fall skiljer sig entalpitillskotten i bränslet åt mellan MOX- och uranhärden, men det kan inte sägas att en generell skillnad mellan de olika härdarna föreligger. Slutsatsen blir, baserad på de beräkningar som gjorts här, att MOX-knippen insatta i reaktor Oskarshamn 3 inte bidrar till ökande entalpitillskott i bränslet vid reaktivitetsolyckor.

16 Referenser

- [1] Demazière Christophe, *Analyses of the Reactivity Coefficients and the Stability of a BWR loaded with MOX Fuel*, Chalmers Tekniska Högskola, CTH-147, Göteborg, 2000
- [2] Demazière Christophe, *Reactor physics calculations on MOX fuel in boiling water reactors (BWRs)*, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg
- [3] IAEA, *Status and Advances in MOX Fuel Technology*, IAEA, Wien, 2003
- [4] Krane Kenneth S., *Introductory Nuclear Physics*, John Wiley & Sons, USA, 1987
- [5] Lundberg Sten, *PRAKTISK REAKTORFYSIK*, KF-Sigma, Lund, 1992
- [6] Netterbrant Christer, *Oskarshamn 1 och 2 – Licensiering av Optima 2 – Analys av fallande styrtstav*, Rapport 2004-04673 OKG AB, 2004
- [7] Netterbrant Christer, *Oskarshamn 3 – Projekt PULS – Referensrapport till ESAR – Analys av fallande styrtstav*, Rapport 2004-01872 OKG AB, 2004
- [8] Nilsson Sven Gösta och Ragnarsson Ingemar, *Shapes and Shells in Nuclear Structure*, Cambridge University Press, USA, 2005
- [9] Nuclear Energy Agency, *CRISSUE-S WP-2 Neutronics/Thermal-hydraulics Coupling in LWR Technology: State-of-the-art Report (REAC-SOAR)*, Nuclear Energy Agency och OECD, Rapport 5436, 2004
- [10] Regeringskansliet, *Sweden's first national report under the Joint Convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management*, ISBN 91-38-21997-2, Elanders Gotab AB, Stockholm, 2003
- [11] Rönnberg Gunnar, *Förslag till acceptansgränser för bränsle vid analys av reaktivitetstransienter*, Rapport 2004-01312 OKG AB, 2004
- [12] Seltborg Per, *UVÄRDERING AV KALLA UNDERKRITISKA MÄTNINGAR MED SIMULATE-3*, Examensarbete KTH, 1999
- [13] Statens Kärnkraftsinspektion, *YTTRANDE ÖVER OKG AB:S ANSÖKAN OM TILLSTÅND ATT INFÖRA OCH ANVÄNDA MOX-BRÄNSLE I OSKARSHAMN 2 ELLER 3*, Rapport 8.26-981480 SKI, 1999-06-30
- [14] Stacey Weston M., *Nuclear Reactor Physics*, John Wiley & Sons, USA, 2001
- [15] Wiksell Göran, *Oskarshamn 3 – Atrium 10XM – Analys av felaktig styrtstavsmanövrering vid uppstart*, Rapport 2004-02567 OKG AB, 2004
- [16] Wiksell Göran, *Oskarshamn 3 – SVEA 96S Optima 2 – Analys av fallande styrtstav med Simulate – 3K*, Rapport 2001-04508 OKG AB, 2001

[17] Wiksell Göran, *Oskarshamn 1 – Reaktivitetsmissöden i samband med avställning*, Rapport 2005-12954 OKG AB, 2005

Internet

[18] SKI:s hemsida: <http://www.ski.se>

Bilder

[19] <http://www.nanoscience.com/education/STM.html>

[20] <http://www.nat.vu.nl/~wimu/MolPhys.html>

[21] <http://universe-review.ca/I14-01-bindingenergy.jpg>

[22] http://www.coloradocollege.edu/dept/ev/courses/EV212/Block5_2002/fission.htm

[23] <http://www.science.uwaterloo.ca/~cchieh/cact/nucfig/fissionyield.gif>

[24] <http://t2.lanl.gov/tour/sch002.html>

[25] <http://www.uic.com.au/uicphys.htm>

[26] http://www.neutron.kth.se/gallery/power_reactors/

[27] <http://www.ski.se/page/1/41.html?32157>

Appendix1 - Hur Simulate 3K arbetar och exempel på programkod

Simulate 3K

Simulate är ett numeriskt beräkningsprogram för statistiska beräkningar av reaktivitet i kärnreaktorer. I grunden bygger Simulate på programmeringsspråket Fortran och började utvecklas under 1970-talet. Sedan dess har programmet utvecklats och kan nu ta hänsyn till samtliga delar av en reaktor som påverkar neutron- och effekttäthet.

Vid transienta beräkningar av reaktivitetstillskott används programmet Simulate 3K (S3K), som analyserar härden i tre dimensioner. Den version av S3K som används på OKG är 2.02, vilken även klarar av beräkningar på MOX.

Simulate genomför beräkningar enligt metoden för Pin Power Reconstruction, där effektutvecklingen i varje bränslestav kan beräknas. Tvärsnittsbiblioteket kommer från TABLES-3 som definierar tvärsnitten enligt specifikationer från respektive användare.

Koden i Simulate och S3K skrivs i blockform där varje block innehåller flera kort (engelska card). Block- och kortnamnen skrivs med tre bokstäver och blocknamnet skrivs alltid först.

Exempel:

Blocknamn = ett.

Kortnamn = två.

Inputkoden för denna operation blir:

'ett.två'

För de numeriska beräkningarna av neutronflödet i reaktorn använder sig S3K av en tredimensionell neutrodiffusionsekvation, där neutronenergierna beräknas i två grupper; termiska och icke-termiska. Radiellt delas härden upp i noder, där varje bränsleelement representerar en nod. Även axiellt är härden uppdelad i noder som här representerar ett plan. Totalt är härden således uppdelad i små kuber där beräkningar på neutronflödet inom kuben görs. Genom denna metod kan approximationer av effektfördelningen i varje bränslestav fås och därmed effekten i samtliga bränslestavar i härden. Det är detta som går under benämningen Pin Power Reconstruction.

För transienta beräkningar tillkommer en tidsderivationsoperator till neutrodiffusionsekvationen. Dessutom tas här hänsyn till fördröjda neutroner samt externa neutronkällor. Det totala neutronflödet i varje nod beräknas därefter för varje tidssteg, genom iterationer av tidigare neutronflöden. Det vill säga, resultatet från beräkningen innan tas som begynnelsevärde för kommande beräkning.

Programexempel

Nedan visas ett exempel på hur ett program som ska användas i S3K kan se ut. I det här fallet är det statistiska beräkningar av k_{eff} vid kritiska mätningar som beräknas. Invid de olika korten finns en kort beskrivning av vad de gör (skriven i **fet** stil). Detta Appendix är dock inte avsett att ses som en beskrivning av hur programuppbyggnaden i Simulate går till, utan snarare en översikt av hur inputkoden till programmet ser ut. I det här fallet är det styrstavarna 60 och 61 som studeras, men metodiken är densamma för samtliga fall med kritiska mätningar som finns i rapporten.

Vilka stavar som är inblandade i beräkningen ses vid kortet 'CRD.GRP' i programmet. Denna del visar alla styrestavar i härden och vilken position de har. Numreringen kan väljas fritt beroende på vilken typ av beräkning som ska göras. Här är majoriteten av stavarna benämnda 01 för att förenkla programskrivningen.

Sist i programmet anges vad som ska beräknas under kortet 'CRD.BNK'. I det här fallet utförs statistiska beräkningar av reaktiviteten för olika utdragningslängder av stav 61. Utdragningslängden räknas här i procent, vilket kan ändras, och statistiska beräkningar görs i steg om 1 % med start från 10 % utdragen stav. Stav 60 är utdragen till 35 %. Stavar markerade med 0 innebär att de är helt inskjutna i härden.

Metoden som beskrivs här är densamma för samtliga lokala kritiska beräkningar som utförts i den här rapporten. Det som skiljer är vilka stavar som används vid beräkningarna.

```
'DIM.BWR' 30 15 14/ Inleder varje Simulateprogram. Anger reaktortyp (BWR),
antalet rader i härden (30), antalet rader med
styrstavar (15) samt antalet rader med detektorer (14).
'DIM.CAL' 25 4 1/ Anger antalet noder i härden (25), vilket typ av härd
som används för beräkningarna (4 = helhärd) samt antalet
noder per beräkningspunkt (1).
'RES' '/home/cm/o3/mox/mx40/ref/dis/boc.res' 0 / Startfil som anger utbränningen i
härden som ska simuleras. Här BOC.
'LIB' '/home/cm/o3/mox/cas/cell/xs.lib '/ Bibliotek innehållande
fissionsprodukter och tvärsnitt.
'SEG.SET' 0 0/ Hot (total) library Anger vilket typ av bibliotek som används
(0 = hela biblioteket).
'ERR.CHK' 'ON' / Kontrollerar fel i inputfilen och skriver ut dessa i
outputfilen (ON = denna funktion tillåts).
'BWR.BAL' 'OFF' / Beräknar härdens inloppstemperatur. Används inte här (OFF).
'BWR.DLP' 'OFF' / Beräknar flödesdistributionen i härden. Används inte här.
'PIN.EDT' 'ON' / Pin-Power reconstruction
'BAT.EDT' 'OFF' /
'DET.EDT' 'OFF' / So S3POST can display cold TIP shapes Beräkningar av
detektorernas responstid som kan användas vid jämförelse med
verkliga data.
'CRD.SYM' 4 0/ Anger styrestavarnas härd och symmetri, 4 = helhärd och 0 = ingen
symmetri.
'PRI.STA' '2FLO' / Skriver data till outputfilerna. Här flödet i 2-D (2 = antalet
dimensioner, FLO = flödet).
'PRI.LIS' 'ON' / Skriver ut det som efterfrågas under 'PRI.STA'.
'TLM.LIB' /
'TLM.EDT' 'OFF' /
'COM' XKEFF IFLAT DXLU EPSSRC NSIMAX NSMAX NHMAX NCMAX NQMAX
'ITE.LIM' 0.99 1 1.0E-7 1.0E-6 25 25 90 300 300 /
'ITE.EXT' 0.011/
'KIN.FXS' 'NON' /
'HYD.HOT' 'PIN' /
'HYD.MXE' 5 0, 81.1 16, 69.6 33, 63.8 40, 61.1 70, 51.3 / Slow H2
'CMS.EDT' 'ON' 'DEF' 'FUEL' 'PIN' 'LPRM' /
'DEP.FPD' 7/ Används för att välja andra möjligheter till
fissionsproduktdata än de som är grundinställda. Här är i, Xe,
Pm och Sm satta till 0.0 i koncentration (7).
'BWR.WLT' 2 2 Antalet flödes- (2) respektive effektpunkter (2) i härden.
Kolonnen längst till vänster anger reaktoreffekten (%), raden
längst upp anger flödet (%). Värdena i matrisen är det
kringgående flödet.
0.010 100.0
0.010 0.142 0.142
100.0 0.142 0.142 /
```

```

'COM' SIRM-detector positions Detektorernas position i härden.
'DET.LOC' 1 00 00 00 00 00 0 0 0 0 0 /
,2 00 00 00 0 0 0 0 0 0 0 /
,3 00 00 0 0 0 0 0 0 0 0 /
,4 00 0 0 1 0 3 0 0 0 5 0 /
,5 00 0 0 0 0 0 0 0 0 0 /
,6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 7 0 /
,7 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 /
,8 0 0 0 6 0 0 0 0 0 0 0 /
,9 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 /
,10 00 0 0 0 0 0 0 2 0 0 /
,11 00 0 0 0 0 0 0 0 0 0 /
,12 00 00 0 8 0 0 0 0 0 0 /
,13 00 00 00 0 0 0 0 0 0 0 /
,14 00 00 00 00 00 0 0 0 0 0 /

'DET.LAB' 1 2 3 4 5 6 7 8 / En länk mellan de nummer detektorerna har i
'DET.LOC' samt de riktiga värden de har i
reaktors mätsystem.

'PIN.DET' 92235 92235 0 200.0 1 220.0 0 375/

'COM' *****
'COM' * Zone Cards To Correctly Calculate Inlet Contraction &
'COM' Exit Expansion Loss Coefficients
'COM' *****
'BWR.ZON' Beskriver bränsle med olika tjocklek på kutsarna, det vill säga olika
typer av bränsle.
'COM' Nhyd AFL DHY PH Z
'BWR.ZON' 2 96.05 0.959 296.77 124.00
96.05 0.959 284.40 136.15
99.10 1.021 284.40 245.00
99.10 1.021 259.67 264.25
105.18 1.157 259.67 360.00
105.18 1.157 0.000 398.89
200.000 13.0 0.000 416.000/
'BWR.ZON' 3 94.3064 1.06969 287.310 232.51
100.653 1.22976 262.060 360.00
100.653 1.22976 0.0 398.89
200.0 13.0 0.0 416.00 / ATRIUM-10 A1C-1305801-0

'COM' *****
'COM' * HYD.CND Pin Heat Conduktion Physical Data *
'COM' *****
'COM' NHYD RFUEL RCLADI RCLADO [GAPTYP]/
'COM' FUE.ZON cm cm cm
'HYD.CND' 2 0.4240 0.4315 0.4920 / Bränslestavarnas inner- och
ytterdiameter samt kutsarnas
diameter för de två bränsletyperna.
'HYD.CND' 3 0.4335 0.4420 0.5025 /

'COM' *****
'COM' * PER.CAL BWR Peripheral System Model *
'COM' *****
'PER.CAL' 'OFF' / Beräknar effekten av de perifera systemen. Används inte här
(OFF).

'TIT.CAS' 'Local criticallity: Deltak CR-out for rod 61 and 62 at E0 30 C'/Titel
'COR.TIN' 86 / 30 C Inloppstemperatur i Fahrenheit (86 F = 30 C).
'COR.OPE' 0.01 50.0 15.95 / 15.95 110000 pascal Initial effekt (%), HC-flöde
(%) och tryck (psi) i reaktorn.
'CRD.DAT' 100 3.645/ Antalet steg styrstavarna är uppdelade i. Här 100 steg
om 3.645 cm var.

```


Bilaga1 – Härd1 med avställningsmarginaler vid BOC

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30			
1												OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP												1		
2												OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP													2	
3							OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP							3	
4						OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP					4	
5					OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP					5	
6				OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP					6
7			OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP					7
8			OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP					8
9			OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP					9
10			OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP					10
11			OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP					11
12	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP					12
13	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP					13
14	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP					14
15	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP					15
16	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP					16
17	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP					17
18	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP					18
19	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP					19
20			OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP					20
21			OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP					21
22			OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP					22
23			OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP					23
24			OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP					24
25			OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP					25
26			OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP					26
27			OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP					27
28			OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP					28
29																																29	
30																																30	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30			
																																08.42.45	
																																SS15856	
																																HC12500	
																																1.00301	

Figur28. Härd1 med samtliga bränsleelement samt alla avställningsmarginaler under 4.0 % utsatta (vid BOC). MOX-knippena är markerade med MX och insatta längsmed semiranden av härden.

Bilaga2 – Hård2 med avställningsmarginaler vid BOC

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
1												OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP														1
2												OP	35	36	36	36	36	36	OP													2
3							OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	3
4						OP	MX	MX	39	27	22	32	23	23	23	23	23	23	OP	MX	MX	MX	MX	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	4	
5						OP	MX	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	5	
6						OP	MX	OP	28	22	37	26	22	25	25	25	25	25	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	6		
7						OP	MX	OP	21	37	34	25	37	25	25	25	25	25	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	7		
8						OP	MX	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	8		
9						OP	MX	OP	37	36	34	36	26	26	26	26	26	26	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	9		
10						OP	MX	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	10		
11						OP	MX	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	11		
12	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	12		
13	OP	MX	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	13		
14	OP	MX	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	14		
15	OP	MX	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	15		
16	OP	MX	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	16		
17	OP	MX	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	17		
18	OP	MX	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	18		
19	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	19		
20						OP	MX	OP	26	28	27	39	34	34	34	34	34	34	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	20		
21						OP	MX	OP	35	35	36	36	29	25	25	25	25	25	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	21		
22						OP	MX	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	22		
23						OP	MX	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	23		
24						OP	MX	OP	40	24	38	39	25	37	25	25	25	25	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	24		
25						OP	MX	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	25		
26						OP	MX	OP	29	23	23	23	25	22	26	26	26	26	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	26		
27						OP	MX	MX	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	27		
28						OP	MX	MX	37	37	37	23	32	22	27	39	39	39	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	28		
29												OP	MX	MX	MX	MX	MX	MX	OP												29	
30												OP	MX	MX	MX	MX	MX	MX	OP												30	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	10.26.15 SS15336 HC11999 0.99767	

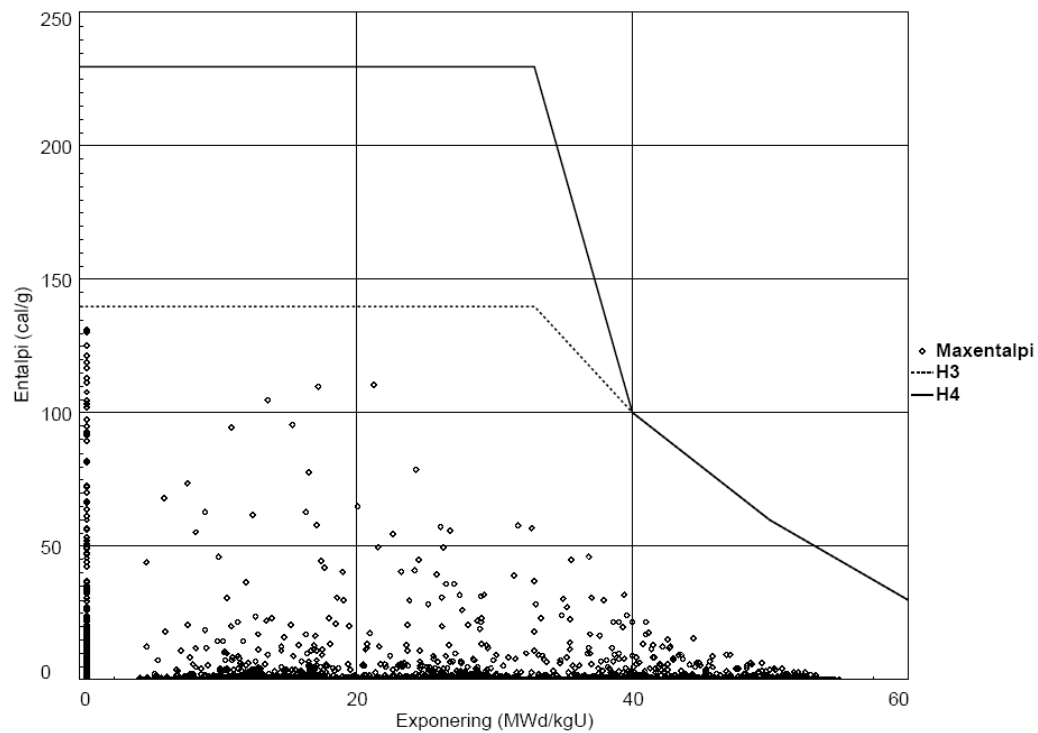
Figur29. Hård2 med samtliga bränsleelement samt alla avställningsmarginaler under 4.0 % utsatta (vid BOC). MOX-knippena är markerade med MX och insatta längsmed randen av hård.

Bilaga3 – Hård3 med avställningsmarginaler vid BOC

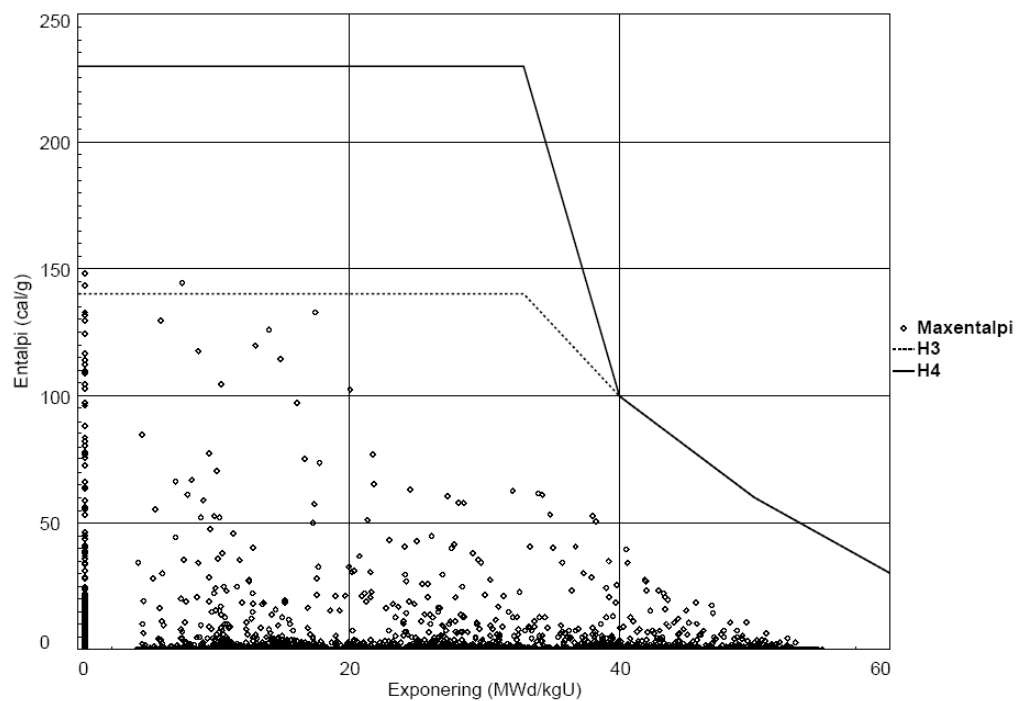
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1											OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP											1	
2											OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP												2
3							OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP					3
4					OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP					4
5				OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP				5
6			OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP			6
7		OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP			7
8		OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP			8
9		OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP			9
10		OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP			10
11		OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP			11
12	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP			12
13	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP			13
14	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP			14
15	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP			15
16	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP			16
17	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP			17
18	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP			18
19	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP			19
20		OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP			20
21		OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP			21
22		OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP			22
23		OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP			23
24		OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP			24
25			OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP			25
26			OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP			26
27				OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP			27
28					OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP			28
29																															
30																															14.53.35
																															SS16060
																															HC11999
																															0.99676

Figur30. Hård3 med samtliga bränsleelement samt alla avställningsmarginaler under 4.0 % utsatta (vid BOC).

Bilaga4

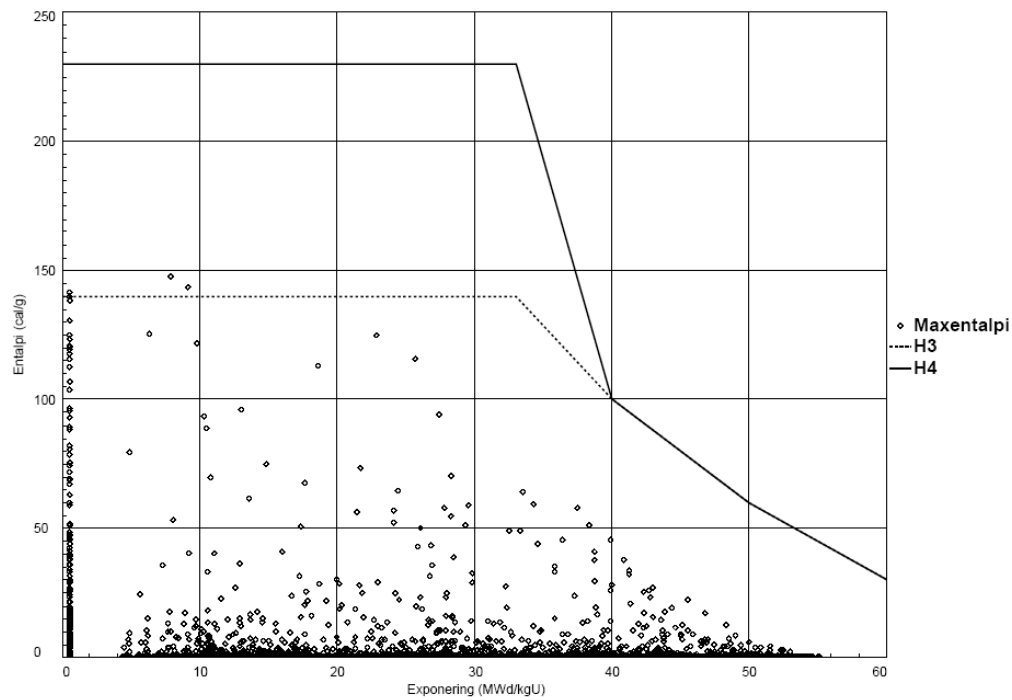


Figur31. Kutsentalpin (cal/g) som funktion av utbränningstiden (MWd/kgU) då stav 12 faller från 10 % till 15 % utdragen längd.

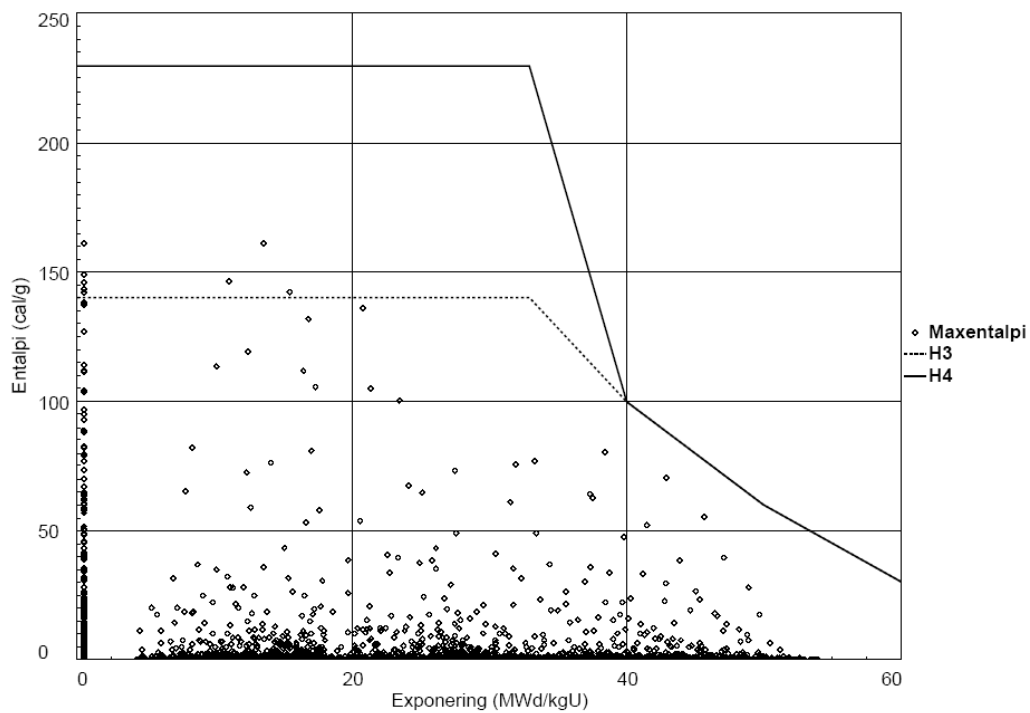


Figur32. Kutsentalpin (cal/g) som funktion av utbränningen (MWd/kgU) då stav 19 faller från 10 % till 16 % utdragen längd.

Bilaga5

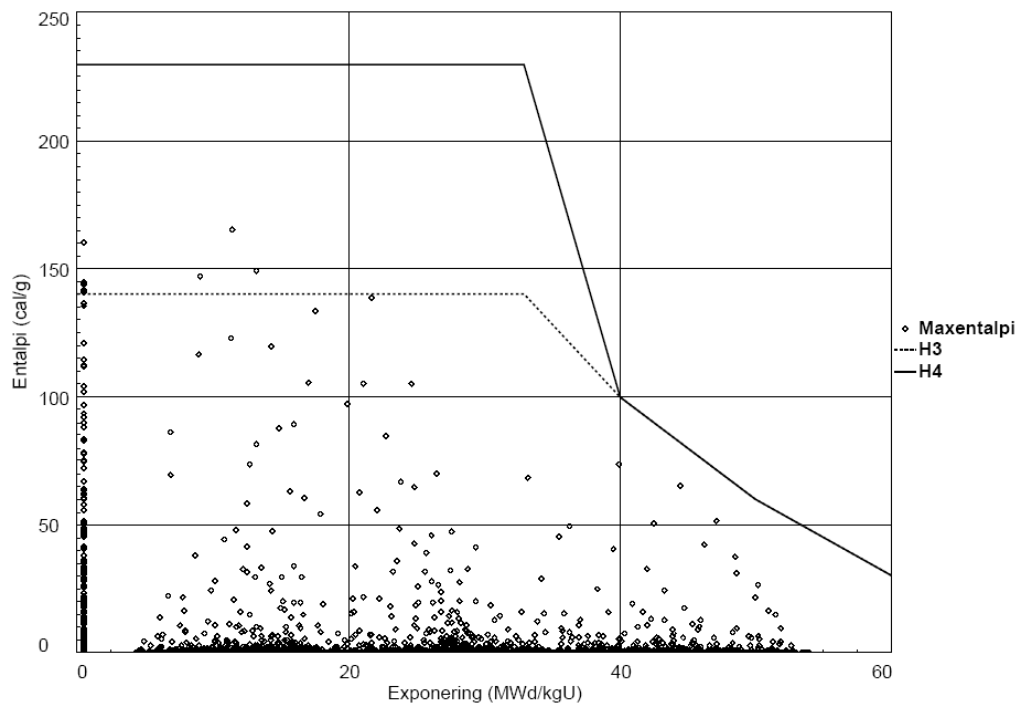


Figur33. Kutsentalpin (cal/g) som funktion av utbränningen (MWd/kgU) då stav 61 faller från 10 % till 17 % utdragen längd.

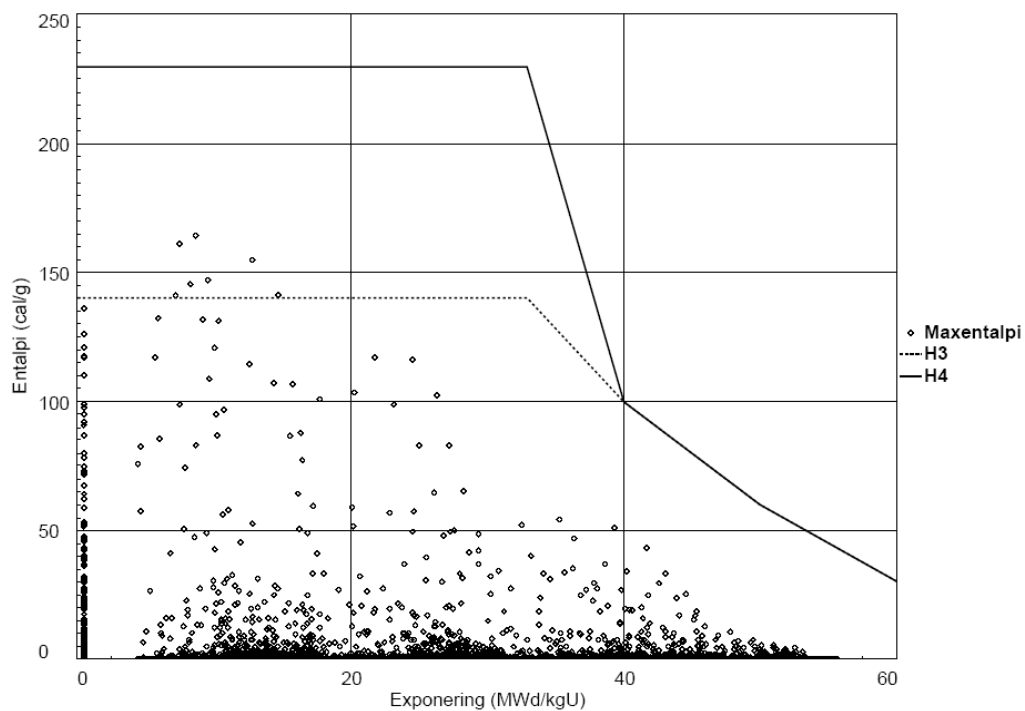


Figur34. Kutsentalpin (cal/g) som funktion av utbränningen (MWd/kgU) då stav 18 faller från 10 % till 15 % utdragen längd.

Bilaga6

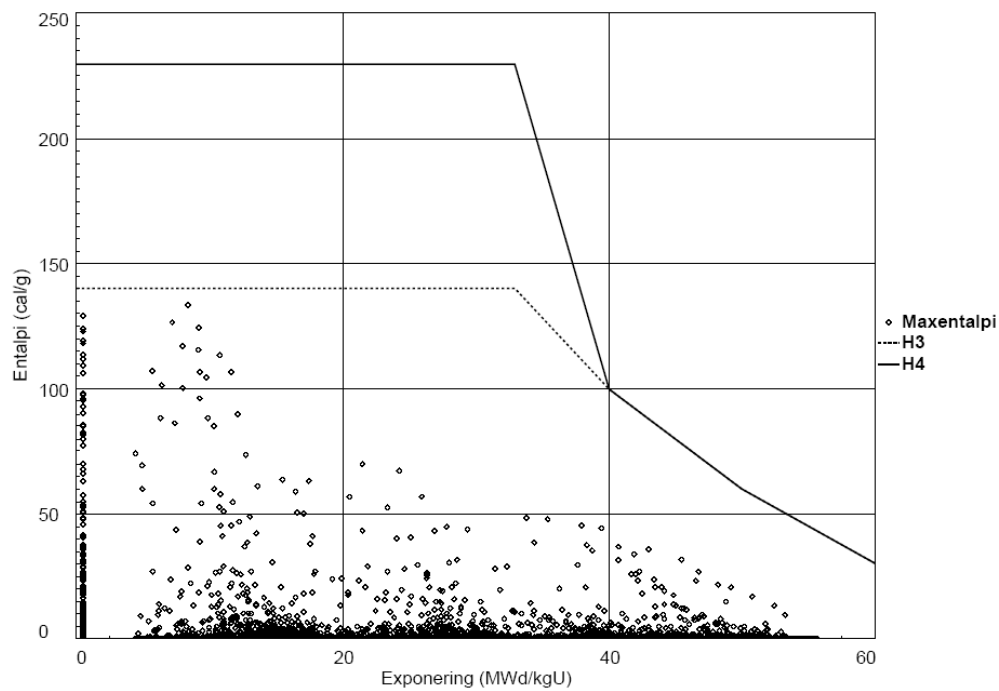


Figur35. Kutsentalpin (cal/g) som funktion av utbränningen (MWd/kgU) då stav 23 faller från 10 % till 15 % utdragen längd.

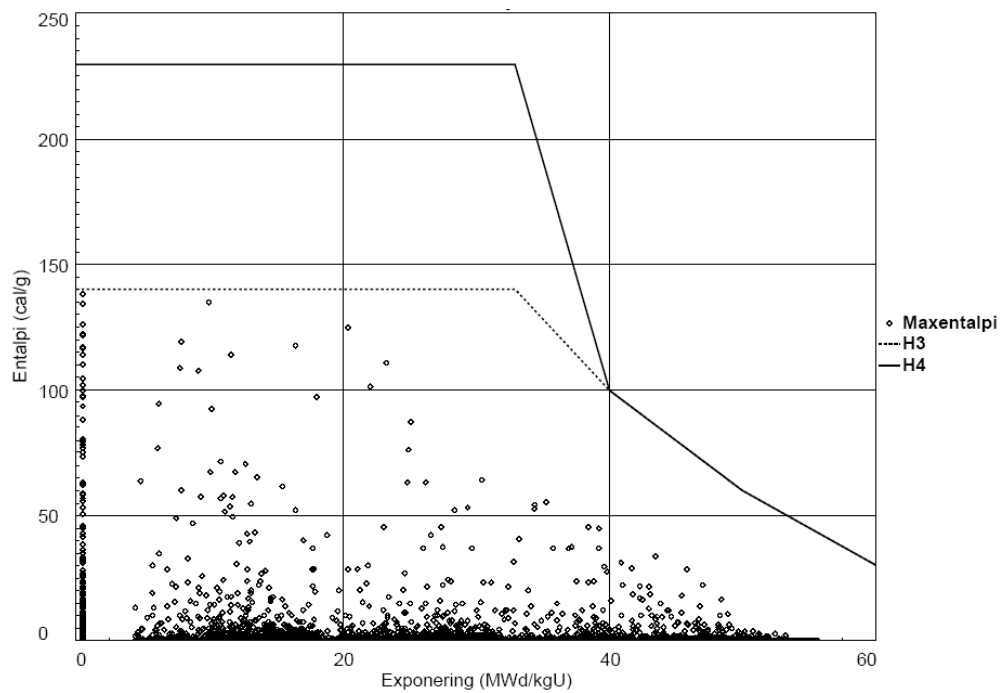


Figur36. Kutsentalpin (cal/g) som funktion av utbränningen (MWd/kgU) då stav 12 faller från 10 % till 17 % utdragen längd.

Bilaga 7

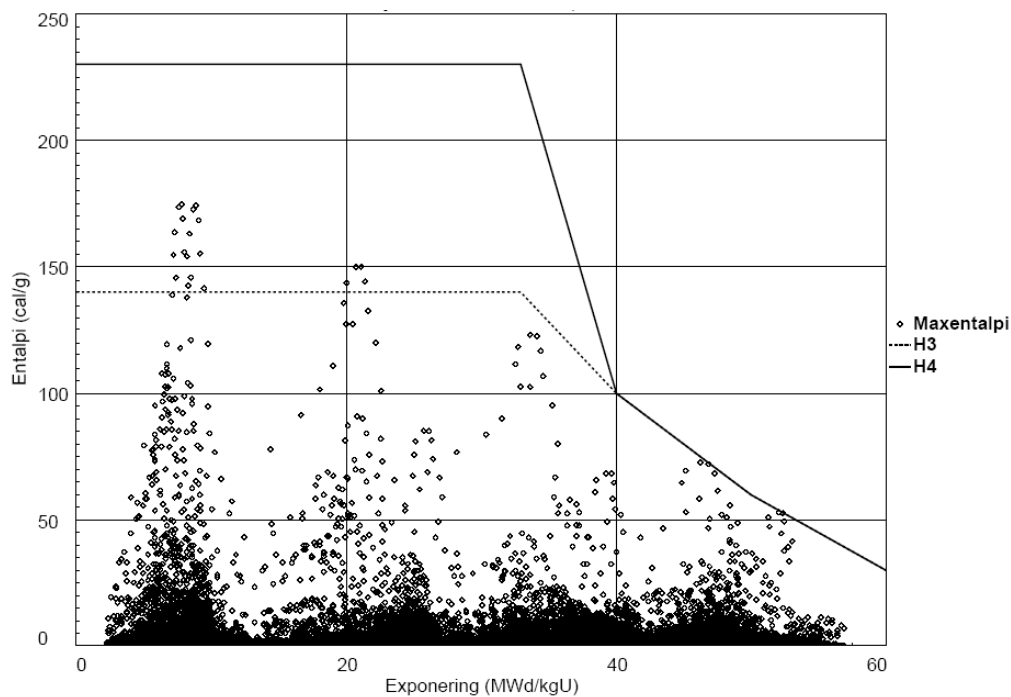


Figur37. Kutsentalpin (cal/g) som funktion av utbränningen (MWd/kgU) då stav 19 faller från 10 % till 20 % utdragen längd.

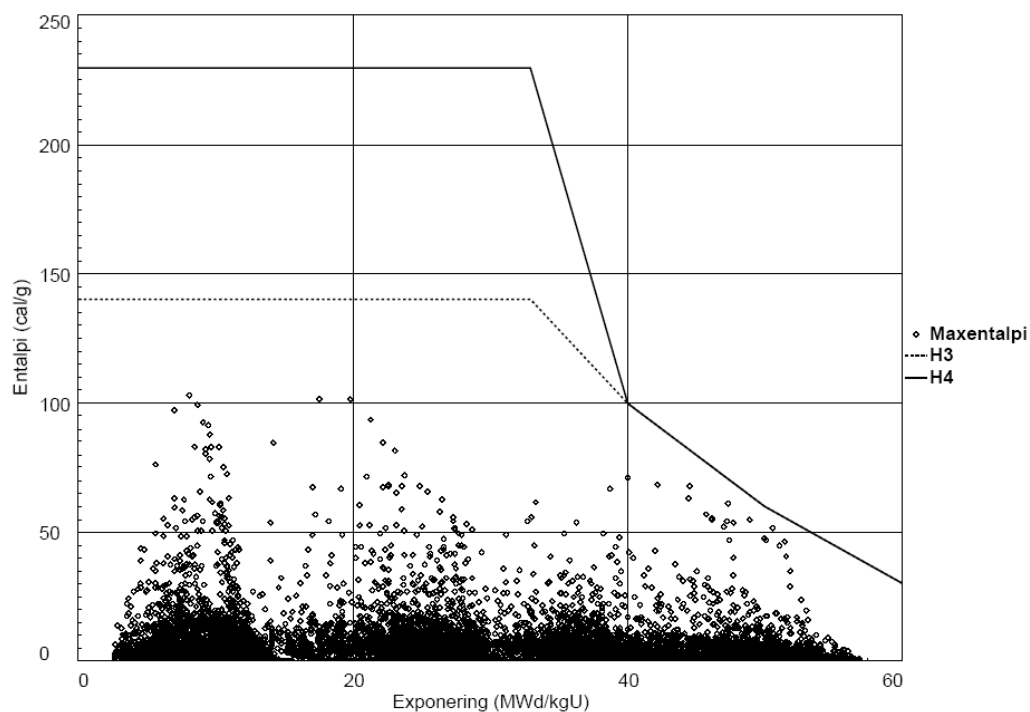


Figur38. Kutsentalpin (cal/g) som funktion av utbränningen (MWd/kgU) då stav 61 faller från 11 % till 17 % utdragen längd.

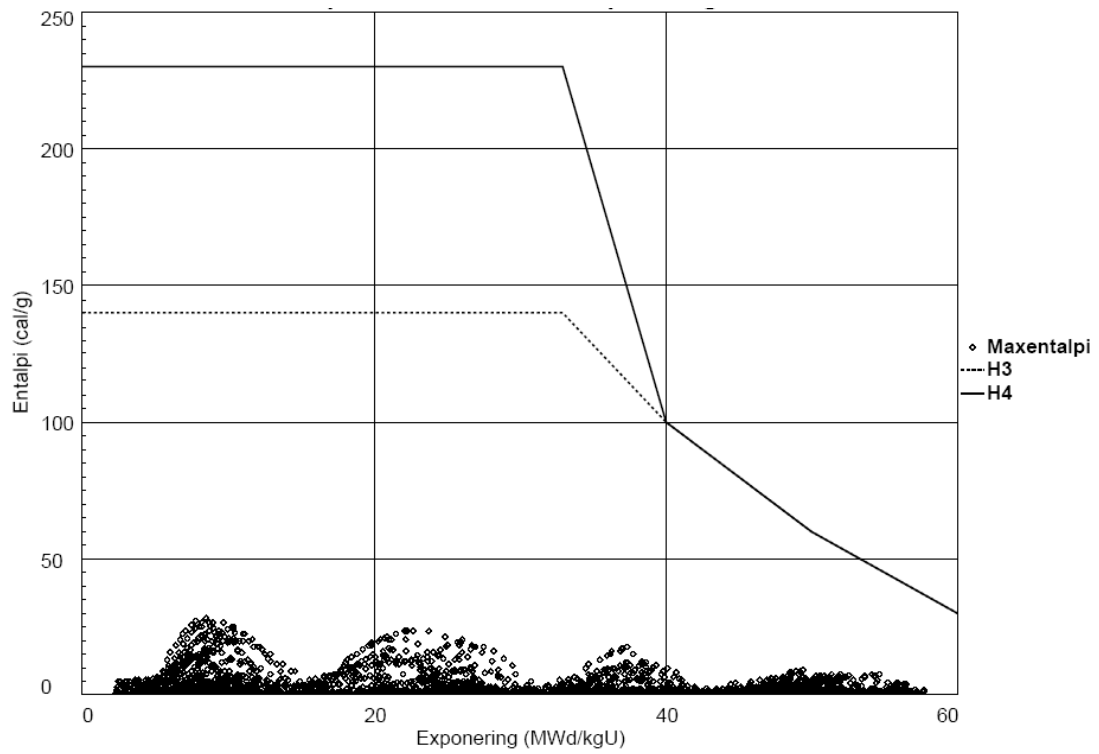
Bilaga8



Figur39. Kutsentalpin (cal/g) som funktion av utbränningen (MWd/kgU) då stav 04 faller ut ur Härd1 precis efter grupp G60 dragits. Utbränningen i bränslet är 6000 efph.

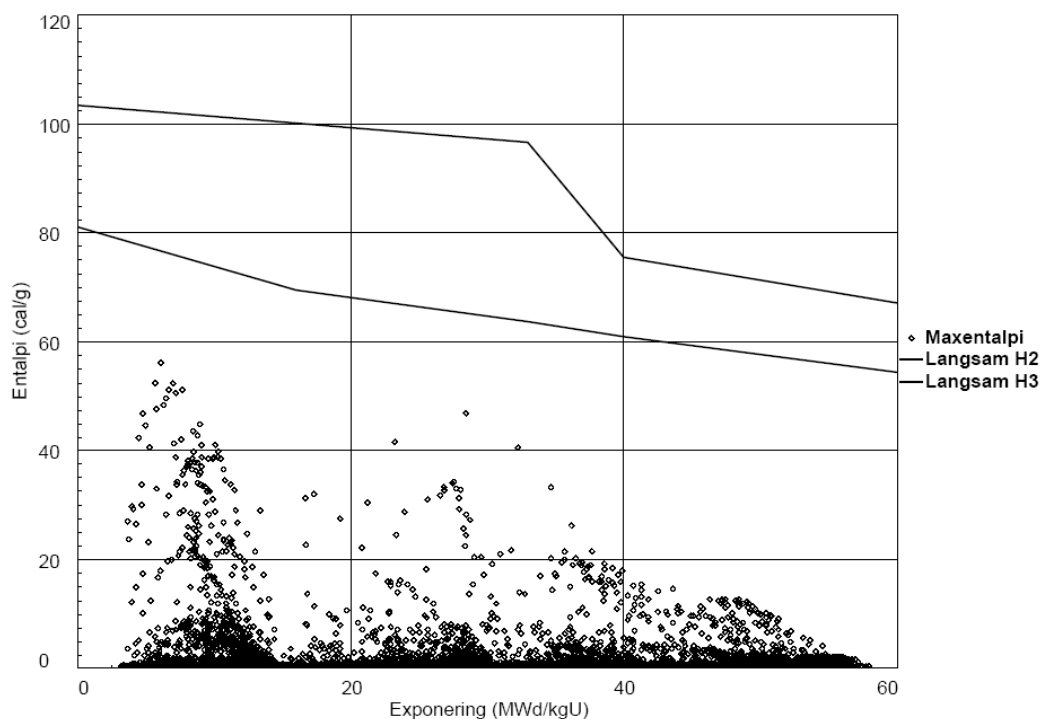


Figur40. Kutsentalpin (cal/g) som funktion av utbränningen (MWd/kgU) då stav 02 faller ut ur Härd2 precis efter grupp G44 dragits. Utbränningen i bränslet är 8000 efph.

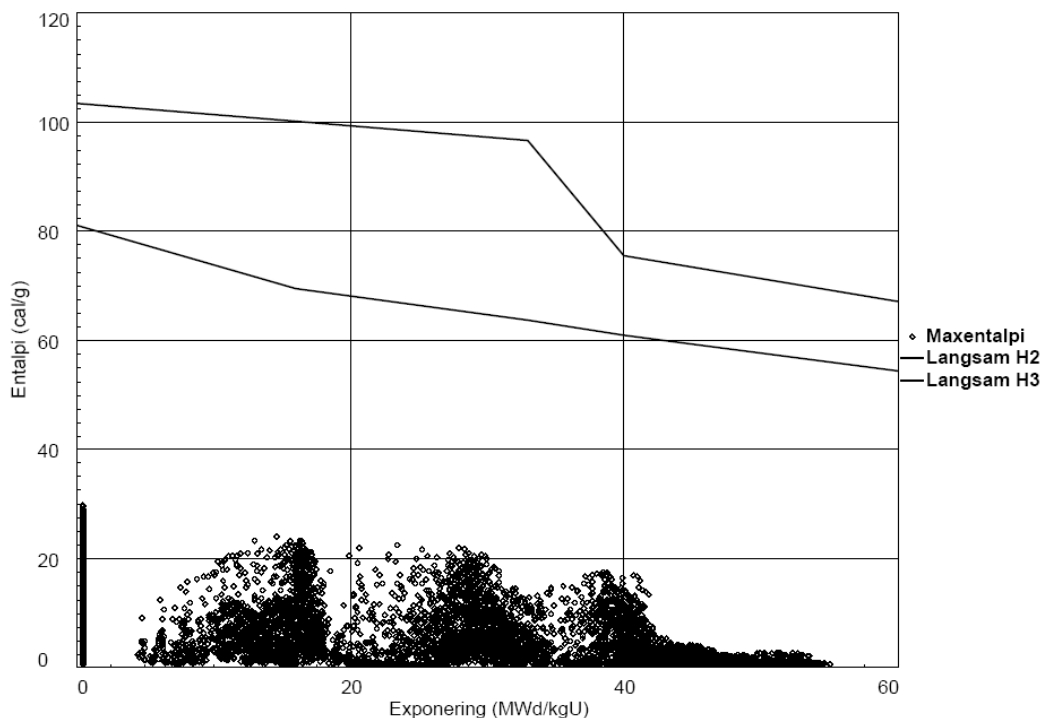
Bilaga9

Figur41. Kutsentalpin (cal/g) som funktion av utbränningen (MWd/kgU) då stav 04 faller ut ur Härd3 precis efter grupp G60 dragits. Utbränningen i bränslet är 6000 efph.

Bilaga10

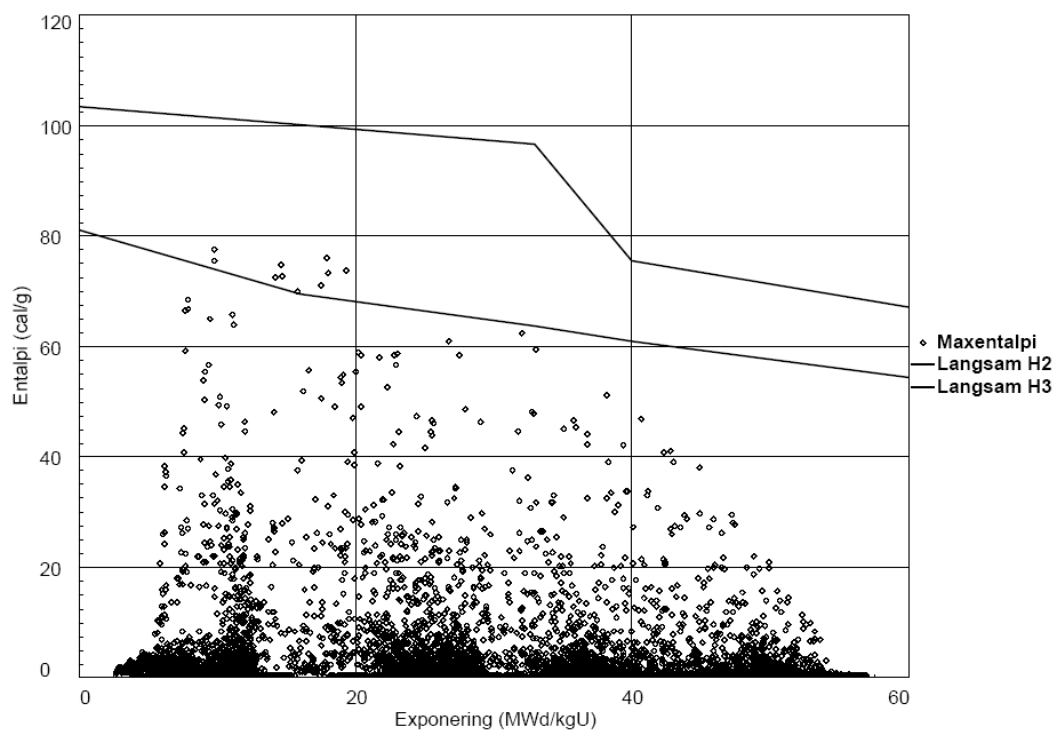


Figur42. Kutsentalpin (cal/g) som funktion av utbränningen (MWd/kgU) då styrstavsgrupp G59 dras ut. Denna händelse klassas som H3, men trots det innehålls begränsningarna för H2-händelse, vilket är den undre kurvan.

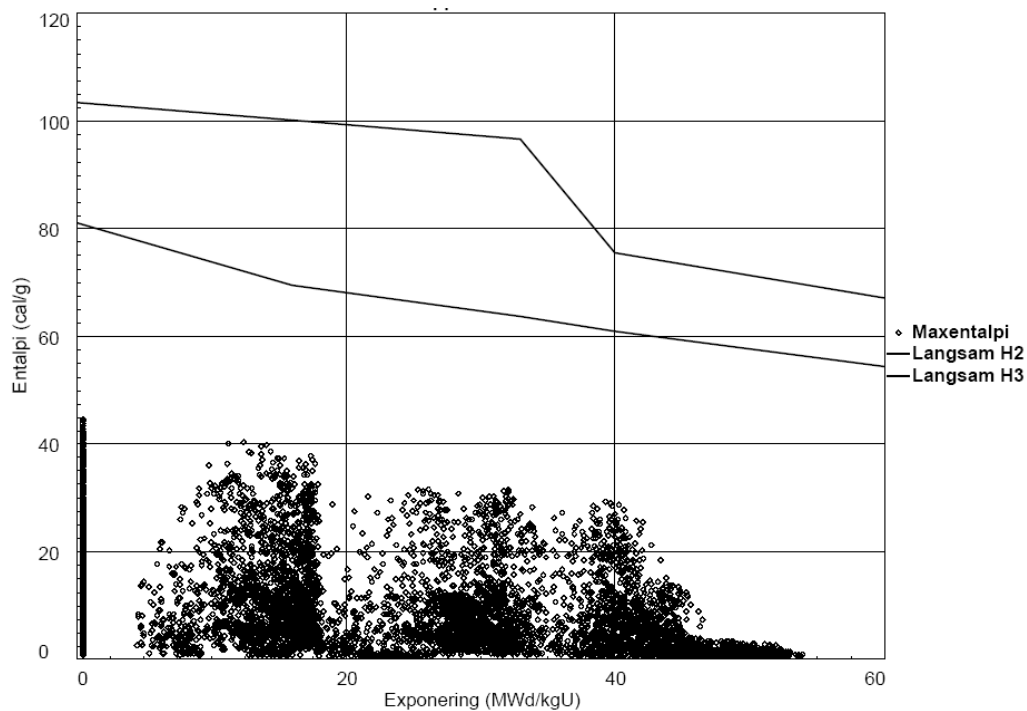


Figur43. Kutsentalpin (cal/g) som funktion av utbränningen (MWd/kgU) då grupp G42 dras för långt vid kriticitetspassage. Händelsen klassas som H2 och denna begränsningskurva, vilken är den undre, innehålls med god marginal.

Bilaga11

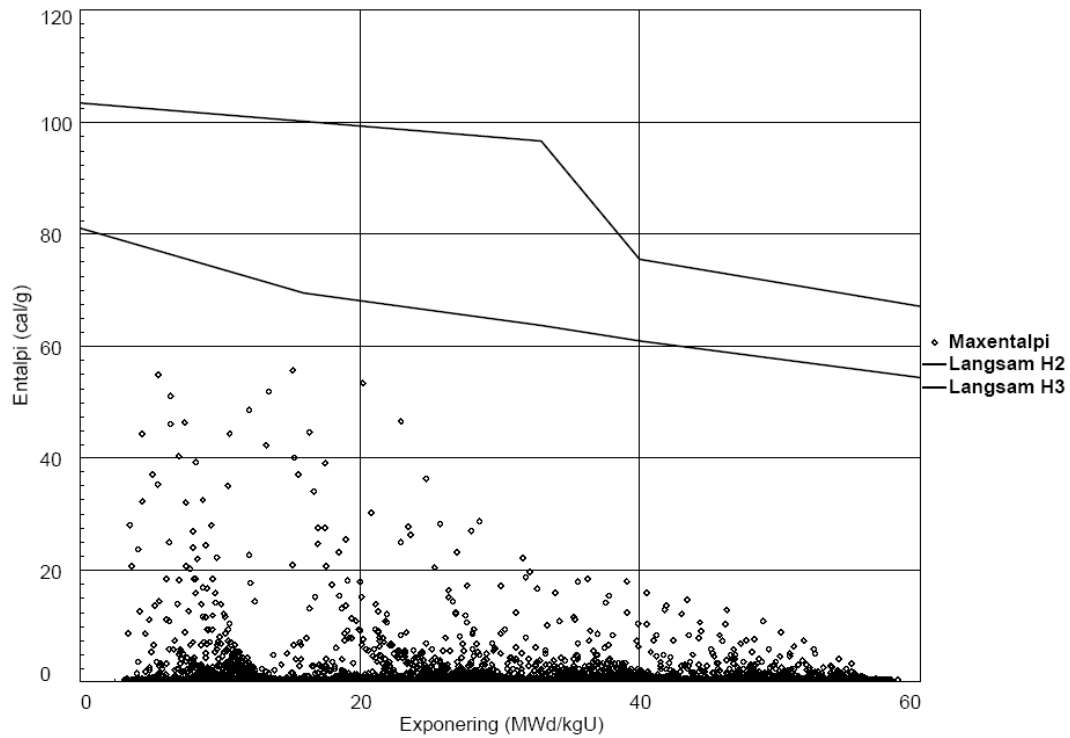


Figur44. Kutsentalpin som funktion av utbränningen då grupp G47 dras ut ur Hård2. Händelsen klassas som H3 och denna begränsningskurva, vilken är den övre, innehålls med god marginal.

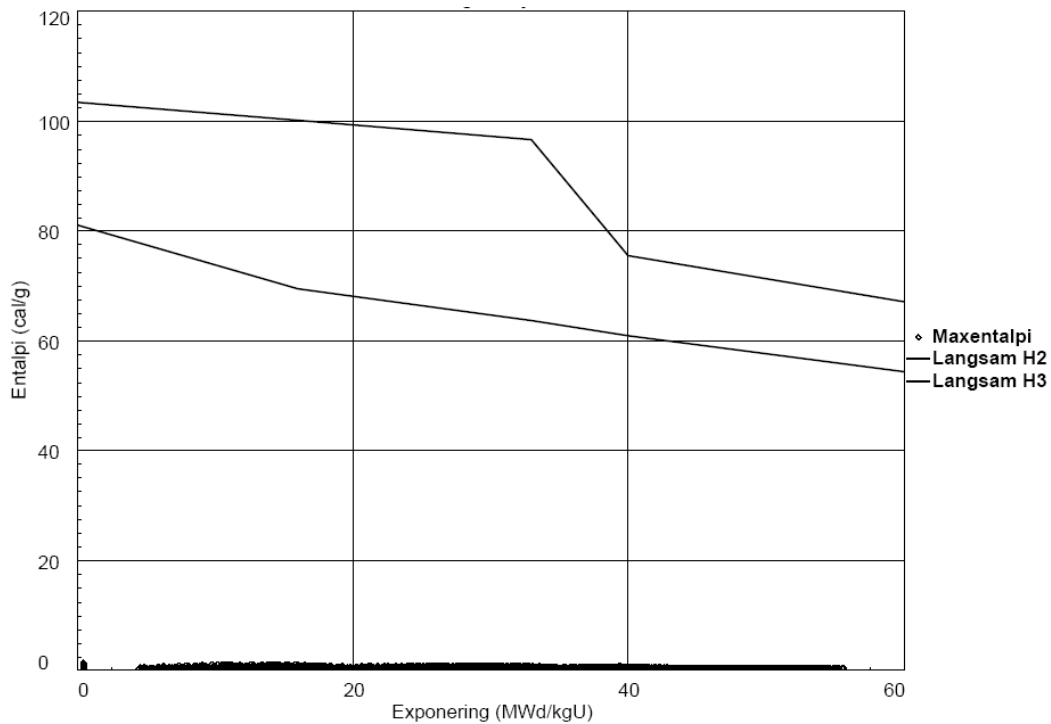


Figur45. Kutsentalpin som funktion av utbränningen då grupp G30 dras ut ur Hård2 vid kriticitetsspassage. Händelsen klassas som H2 och denna begränsningskurva, vilken är den undre, innehålls med god marginal.

Bilaga12



Figur46. Kutsentalpin som funktion av utbränningen då grupp G59 dras ut ur Härd3. Denna händelse klassas som H3, men trots det innehålls begränsningarna för H2-händelse, vilket är den undre kurvan.



Figur47. Kutsentalpin som funktion av utbränningen då grupp G26 dras ut ur Härd3 vid kriticitetsspassage. Händelsen klassas som H2 och denna begränsningskurva, vilken är den undre, innehålls med god marginal.