



Strål
säkerhets
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Dennis Mennerdahl

Technical Note

2015:39

Granskning av KBS-3 avseende
nukleär kriticitetssäkerhet

Main Review Phase

SSM perspektiv

Bakgrund

Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) granskar Svensk Kärnbränslehantering AB:s (SKB) ansökningar enligt lagen (1984:3) om kärnteknisk verksamhet om uppförande, innehav och drift av ett slutförvar för använt kärnbränsle och av en inkapslingsanläggning. Som en del i granskningen ger SSM konsulter uppdrag för att inhämta information och göra expertbedömningar i avgränsade frågor. I SSM:s Technical note-serie rapporteras resultaten från dessa konsultuppdrag.

Projektets syfte

Det övergripande syftet med projektet är att ta fram synpunkter på SKB:s säkerhetsanalys SR-Site för den långsiktiga strålsäkerheten hos det planerade slutförvaret i Forsmark. Detta uppdrag avser granskning av nukleär kriticitetssäkerhet.

Författarnas sammanfattning

SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) ansökte 2011 om svenska regeringens tillstånd för en föreslagen lösning, här benämnd KBS-3, för slutförvaring av använt kärnbränsle från svenska kärnkraftverk och en del mindre kvantiteter av annat fisilt material. SKB har senare tagit fram uppdaterad och tilläggsdokumentation för att ytterligare ge stöd för (nukleär) kriticitetssäkerhet och för att bemöta specifika krav från Strålskyddsmyndigheten (SSM).

Denna Technical Note innehåller resultat från en nyligen genomförd granskning av SKB:s metoder, tillämpning av dessa metoder samt av SKB:s slutsatser. Granskningen delas i en mer fokuserad bedömning av den befintliga fristående förvaringsanläggningen Clab och en mer generell bedömning av inkapslingsanläggningen som planeras i anslutning till Clab liksom av slutföringsplats före och efter förslutning.

Internationella erfarenheter och pågående forskning har beaktats under granskningen. Det omfattar standarder och andra etablerade rutiner, beräkningsmetoder och test av deras noggrannhet och tillförlitlighet samt OECD/NEA-studier som identifierar problem och ger lösningar med användning av nya eller befintliga metoder.

Inga oöverstigliga förhinder som skulle kunna leda till väsentliga förseningar i KBS-3-projektet har identifierats. Några områden behöver bearbetas ytterligare för att få fram en fullständig och korrekt dokumentation avseende kriticitetssäkerhet:

- Utvalda standarder behöver tillämpas fullständigt (till exempel "bias"), såvida inte specifika noteringar om avvikelser dokumenteras tydligt. Detta är huvudsakligen av redaktionell karaktär men bedöms vara viktigt.
- Testning av beräkningsmetoder. Framsteg har visats upp men väsentliga frågor kvarstår. Korrelationer mellan benchmarks har nu fått hög prioritet även internationellt. Nya testmetoder har lett till tillfälliga problem orsakade av felaktiga nukleära data. En omfattande granskningsinsats genomfördes för att demonstrera effekter av dessa fel på några tillämpningar.

- Förhållandet mellan "deterministiska" kriterier såsom "double contingency principle" (minst två händelser för kriticitet) och underkriticitetskrav (två händelser underkritiska) kan kombineras med specifika sannolikheter. SKB bör klargöra sina avsikter.
- Föregående bedömning av säkerheten för BWR-bränsle baserades på utbränningskreditering. SKB:s nu aktuella bedömning baseras på kreditering för brännbar absorptor. Närvaro av gadolinium i det använda bränslet, med antagande av att det kan vara obestrålat, måste därför styrkas för deponering under lång tid.

Händelseförlopp med skadad kopparkapsel och inläckage av vatten, såväl som omfördelning av det fissila materialet inuti och utanför kapslarna, tycks vara utvärderade på ett rimligt sätt. SKB har utvärderat möjliga konsekvenser av en kriticitetsolycka under slutförvaring. Utan att gå in i detalj bedömer granskaren att diskussionen är trovärdig. Beroende på komplexiteten, behövs expertis inom andra områden än kriticitetssäkerhet för att bekräfta sådana slutsatser.

Den mänskliga faktorn erkänns som huvudorsaken till kriticitetsolyckor. Det finns en kvarstående möjlighet av ett allvarligt misstag i säkerhetsbedömningen. Oberoende bekräftelse av utvalda detaljerade säkerhetsfall, inklusive oberoende beräkningar, bör göras av SSM för att verifiera SKB:s resultat och slutsatser.

Projekt information

Kontaktperson på SSM: Mikael Kjellberg

Diarienummer ramavtal: SSM2011-4444

Diarienummer avrop: SSM2015-950

Aktivitetsnummer: 3030012-4400

SSM perspective

Background

The Swedish Radiation Safety Authority (SSM) reviews the Swedish Nuclear Fuel Company's (SKB) applications under the Act on Nuclear Activities (SFS 1984:3) for the construction and operation of a repository for spent nuclear fuel and for an encapsulation facility. As part of the review, SSM commissions consultants to carry out work in order to obtain information and provide expert opinion

Objectives of the project

The general objective of the project is to provide review comments on SKB's post-closure safety analysis, SR-Site, for the proposed repository at Forsmark. . [Infoga specifikt syfte för avropet] ...

Summary by the author

SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) in 2011 applied to the Swedish government for approval of a proposed solution, here referred to as KBS-3, for disposal of used nuclear fuel from Swedish nuclear power reactors and some relatively minor quantities of other fissile material. SKB has later provided revised and additional documentation to further support the (nuclear) criticality safety assessment and to respond to specific requests from the Swedish Radiation Safety Authority (SSM).

This Technical Note contains results of a recent review of SKB methods, applications of those methods and of the SKB conclusions. The review has been split into a more focused assessment of the existing Clab independent storage facility and a more general assessment of the encapsulation facility to be co-located with Clab as well as of the final disposal site before and after closure.

International experience and on-going research have been considered during the review. This covers standards and other established practices, calculation methods and their validation as well as OECD/NEA studies identifying problems and providing solutions using new or existing methods.

No major obstacles that could lead to significant delays in the KBS-3 project have been identified. Some areas need more work to establish a complete and correct criticality safety documentation:

- Selected standards need to be fully complied with (e.g. bias), unless specific notes of deviations are documented clearly. This is basically an editorial issue but is considered essential.
- Validation of calculation methods. Progress has been made but significant issues remain. Correlations between benchmarks are now internationally established as having high priority. New validation methods have led to temporary problems caused by incorrect nuclear data. An extensive review effort was made to demonstrate effects of these errors on some applications.
- The relationship between “deterministic” criteria such as the double contingency principle (at least two events for criticality) and subcriticality requirements (two events subcritical) may be combined with specific probabilities. SKB should clarify its intentions.

- The previous BWR fuel safety assessment by SKB was based on burnup credit. The current assessment is based on burnable absorber credit. The presence of gadolinium in the used fuel, assuming that it could be unirradiated, must thus be assured for the long-term final disposal.

Scenarios for copper canister damage with water inleakage, as well as of fissile material reconfigurations inside and outside of the canisters, appear to have been reasonably evaluated. SKB has evaluated potential consequences of a criticality accident in the final disposal. Without going into detail, the reviewer finds the discussions credible. Due to its complexity, expertise in other fields than criticality safety is needed to confirm such conclusions.

The human factor is recognized as the main contributor to criticality accidents. There is some remaining possibility for a serious mistake in the safety assessment. Independent confirmation of selected detailed safety cases, including independent calculations, should be made by SSM to verify the results and conclusions by SKB.

Project information

Contact person at SSM: Mikael Kjellberg



Strål
säkerhets
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Dennis Mennerdahl
E Mennerdahl Systems, Täby, Sweden

Technical Note 83

2015:39

Granskning av KBS-3 avseende
nukleär kriticitetssäkerhet

Main Review Phase

Datum: September 2015

Rapportnummer: 2015:39 ISSN: 2000-0456

Tillgänglig på www.stralsakerhetsmyndigheten.se

Denna rapport har tagits fram på uppdrag av Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM. De slutsatser och synpunkter som presenteras i rapporten är författarens/författarnas och överensstämmer inte nödvändigtvis med SSM:s.

Innehåll

1. Inledning	5
2. Nukleär kriticitetssäkerhet	7
2.1. Viktiga grunder avseende KBS-3	7
2.1.1. Omfattning och syfte avseende kriticitetssäkerhet	7
2.1.2. Standarder och guider	8
2.1.3. Nuklid, isotop, fissilt, klyvbart, fertilt, aktinid	8
2.1.4. Säkerhetsbegrepp	9
2.1.5. Osäkerhet, kovarians, korrelation, bias, validering, c_k	9
2.1.6. Underkritiskt, säkert, kriterier, USL, acceptansnivå	12
2.1.7. Beredskap för en oväntad kriticitetsolycka	14
2.2. Urval från SKB:s säkerhetsredovisning för KBS-3	14
2.2.1. Inledning	14
2.2.2. Tillämpning av standarder och guider	14
2.2.3. Nuklid, isotop och uttryck innehållande dessa begrepp.	15
2.2.4. BA- och BU-kreditering	15
2.2.5. Bias, validering, c_k -värden	16
2.2.6. Underkritiskt eller kritiskt vid två samtidiga händelser	16
2.2.7. Beredskap för en oväntad kriticitetsolycka	16
2.3. EMS bedömning	17
2.3.1. Inledning	17
2.3.2. Tillämpning av standarder och guider	17
2.3.3. Nuklid, isotop och uttryck innehållande dessa begrepp.	17
2.3.4. BA- och BU-kreditering	18
2.3.5. Bias, validering, c_k -värden	18
2.3.6. Underkritiskt eller kritiskt vid två samtidiga händelser	20
2.3.7. Beredskap för en oväntad kriticitetsolycka	20
3. Händelser och kriterier	21
3.1. Generellt	21
3.1.1. Bestämning av händelser	21
3.1.2. Kriterier för kriticitetssäkerhet vid händelser	21
3.1.3. Gränsvärden för effektiv neutronmultiplikationskonstant	21
3.1.4. Referensfall som underlag för säkerhetsanalys	22
3.1.5. Kreditering för brännbar absorptor eller för utbränning	22
3.2. SKB:s val och avsikter	23
3.2.1. Bestämning av händelser	23
3.2.2. Kriterier för kriticitetssäkerhet vid händelser	23
3.2.3. Gränsvärden för effektiv neutronmultiplikationskonstant	23
3.2.4. Referensfall utan kreditering för BA eller utbränning	23
3.2.5. Kreditering för brännbar absorptor eller för utbränning	23
3.3. Granskarens bedömning	24
4. Metodik - Beräkningsmetoder	27
4.1. Beräkningsmetoder och validering	27
4.1.1. Beräkningsmetoderna SCALE och CASMO	27
4.1.2. Metoder för validering	27
4.1.3. Benchmarks för validering	27
4.1.4. Val av enskilda benchmarks	28
4.1.5. Bearbetning av beräkningsresultat för benchmarks	28

4.1.6. Bestämning av bias och osäkerheter i bias	29
4.2. SKB:s metoder och validering	29
4.2.1. Beräkningsmetoderna SCALE och CASMO	29
4.2.2. Metoder för validering	29
4.2.3. Benchmarks för validering	30
4.2.4. Val av enskilda benchmarks	30
4.2.5. Bearbetning av beräkningsresultat för benchmarks	30
4.2.6. Bestämning av bias och osäkerheter i bias	30
4.3. EMS bedömning av metoder och validering	30
4.3.1. Beräkningsmetoderna SCALE och CASMO	30
4.3.2. Metoder för validering	31
4.3.3. Benchmarks för validering	33
4.3.4. Val av enskilda benchmarks	33
4.3.5. Bearbetning av beräkningsresultat för benchmarks	34
4.3.6. Bestämning av bias och osäkerheter i bias	34
5. EMS svar på specifika frågor av SSM	37
5.1. Metodik för kriticitetssäkerhetsanalyserna	37
5.1.1. Är beskrivning av metodiken tillräcklig och entydig?	37
5.1.2. Är metodiken (standarder, guider, etc.) korrekt tillämpad?	37
5.1.3. Händelser, händelseförlopp och scenarion?	38
5.1.3.1. För intakt kapsel i övrigt	38
5.1.3.2. Med annan reflektion eller neutronkoppling	39
5.1.3.3. Omfördelning av material inuti kapsel	39
5.1.3.4. Omfördelning utanför en eller flera kapslar	39
5.1.4. Beskrivning av tillämpning av BA-kreditering	39
5.1.4.1. Hur tillämpas metoden?	39
5.1.4.2. Har metoden tillämpats korrekt?	39
5.1.4.3. Internationellt etablerade standarder och guider?	40
5.1.4.4. Tillämpas standarder och guider på rätt sätt?	40
5.1.5. Beskrivning av tillämpning av BU-kreditering	40
5.1.5.1. Hur tillämpas metoden?	40
5.1.5.2. Har metoden tillämpats korrekt?	41
5.1.5.3. Internationellt etablerade standarder och guider?	41
5.1.5.4. Tillämpas standarder och guider på rätt sätt?	41
5.1.6. Metod för validering av kriticitetsberäkningar.	41
5.1.6.1. Är valideringsunderlaget av tillräcklig kvalitet?	41
5.1.7. Beskrivning av valideringsmetodik	41
5.1.8. Tillräckligt små osäkerheter?	41
5.1.9. Osäkerheter bland annat vid k_{eff} -beräkning	42
5.1.9.1. Korrekt hantering av osäkerheter?	42
5.1.10. Osäkerhetsinverkan för aktuell tillämpning	42
5.2. Konservatism av krav och acceptanskriterier	43
5.3. Utbränningsverifiering vid BA- och BU-kreditering	43
5.3.1. Har SKB beskrivit metoden för att verifiera utbränning?	43
5.3.2. Är beskrivningen tillräcklig och entydig?	44
5.3.3. Hur försäkras korrekt utbränning?	44
5.3.4. Tillräckligt små osäkerheter i utbränning	44
5.3.5. Har händelsen av felaktiga utbränningsdata beaktats	44
5.4. BA- och BU-kreditering: Felplacerat bränslet	44
5.4.1. Har sådana händelser analyserats?	44
5.4.2. Är analysen tillräckligt omfattande?	45
5.5. EMS:s samlade värdering av granskning	45
5.6. Funna brister och förbättringsförslag	45
5.6.1. Brist som gör BA- eller BU-kreditering vid Clab olämplig? ..	45

5.7. Granskning som inte täcks in av SSM:s frågor.	45
5.8. Förhållanden som kan hota KBS-3-metoden	45
5.9. Övrigt:	46
5.9.1. Frågor till SKB under granskningstid.....	46
5.9.2. Granskningsstöd till SSM under granskningstid.....	46
6. EMS övergripande utvärdering.....	47
6.1. EMS värdering av underlag för Clab	47
6.2. EMS värdering av underlag för Clink/slutförvar	49
6.3. Exempel på internationellt arbete	52
7. Referenser	53
APPENDIX 1.....	57
APPENDIX 2.....	59

1. Inledning

Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) har gett E Mennerdahl Systems (EMS, granskaren) i uppdrag att granska av Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) inlämnad redovisning i Ansökan om tillstånd enligt kärntekniklagen för en inkapslingsanläggning och slutförvarsanläggning för använt kärnbränsle. Uppdraget omfattar även kriticitetsanalys för Clab. SSM har lämnat specifika direktiv för uppdraget, med begränsningar motiverade av tidigare utförda granskningsuppdrag avseende kopparkapsel. Det finns dock förändringar i SKB:s metodik och redovisning för kopparkapsel sedan tidigare granskning. Speciellt avses kreditering för brännbar absorbator (BA) i stället för utbränning (BU) för BWR-bränsle.

SSM:s granskning avseende Clink och slutförvar avser under 2015 att ge underlag för ställningstagande om ”verksamheten kan förväntas bli lokaliserad, utformad och bedriven på ett sådant sätt att säkerhets- och strålskyddskraven samt de allmänna hänsynsreglerna uppfylls”.

Avseende Clab ska SSM, såvida anmälan om anläggningsändring inkommer, bedöma om krav enligt SSMFS (SSM:s föreskrifter och allmänna råd) uppfylls rörande kriticitetssäkerhet för befintlig anläggning.

SSM har i skrivelse till SKB 2012-10-03 begärt komplettering av ansökan om slutförvaring av använt kärnbränsle enligt fem punkter:

1. Utökad redovisning för användning av utbränningskreditering.
2. Systematisk identifiering av händelser och scenarier med avseende på risk för kriticitet.
3. Beskrivning av konsekvenserna vid kriticitet i slutförvaret.
4. Uppdatering av kriticitetssäkerhetsanalys SKBdoc 1193244.
5. Kriticitetssäkerhetsberäkning för bränsle för Ågesta och Studsvik.

De fem punkterna är besvarade av SKB med hänvisning till olika dokument som ingår i underlaget för denna granskning.

En samlande beteckning för kedjan från Clab till slutförvar är KBS-3. En väsentlig aspekt är att Clab har varit i drift cirka 40 år medan inkapslingsdel och slutförvaringsdel fortfarande är under design. Samordning av rutiner och redovisning för Clab och inkapslingsdel (gemensam beteckning ”Clink”), liksom anpassning av denna till slutförvaringslösning, innebär att även säkerhetsredovisning för Clab förändras. BU-kreditering för PWR-bränsle är en sådan förändring.

SKB:s redovisning avseende KBS-3 täcker olika säkerhetsområden liksom andra aspekter enligt svensk lagstiftning. Denna rapport avser ett specifikt område, nukleär kriticitetssäkerhet. Kopplingar mellan andra områden och kriticitetssäkerhet måste beaktas och dokumenteras för att en tillförlitlig och rimlig helhetsbedömning skall kunna göras. Detta görs inte vid denna granskning.

Rapporten fokuserar dels på ovan angivna övergripande granskning av möjligheter och förmåga att klara säkerhet för Clink (inklusive kopplingar mellan inkapslingsdel och nuvarande Clab) och slutförvar samt dels på granskning på mer detaljerad nivå av ändringar som förväntas kunna påverka utformning eller verksamhet vid nuvarande Clab.

Granskningen har varit upplagd i tre steg:

1. Generell bedömning av grunder, metoder och tillämpning
2. Granskning av SKB:s dokument
3. Svar på specifika frågor från SSM

Vissa väsentliga begrepp används ibland av SKB (och andra organisationer med anknytning till SKB:s redovisning) på ett något oklart sätt eller i strid med standardiserad användning. I de fall detta bedöms kunna bli viktigt för säkerheten så tas de upp i rapporten. Det finns ett antal andra missvisande eller icke standardbaserade formuleringar i redovisning med referenser. Detta bedöms vara på för detaljerad nivå för denna rapport.

SKB:s dokumentation av metodik och hur den avses tillämpas på KBS-3 tas upp i rapporten.

En viktig och stor del av granskningen har omfattat metoder för ”validering” (kvalitetskontroll) av beräkningsmetoder. Det omfattar bestämning av bias (avvikelser från korrekta resultat) och osäkerheter. Utöver denna validering är det också viktigt att undersöka potentiell bias och osäkerhet orsakade av användaren (avser både individ och organisation) med beaktande av användarens erfarenhet och inverkan av olika typer av belastning såsom tidsbrist, programfel, datorkrångel och ekonomi.

En komplicerad granskningsuppgift avser bedömning av SKB:s användning av känslighetsanalys avseende osäkerheter i beräkningsmetoder. Eftersom SKB direkt använder metoder och guider från amerikanska Nuclear Regulatory Commission (NRC) och Oak Ridge National Laboratory (ORNL) har även sådana referenser granskats till viss del.

Beräkningsmetoden SCALE 6.1 (ORNL/TM-2005/39) som används av SKB och som använts av NRC och ORNL vid framtagning av krav och rekommendationer för BU-kreditering för obestrålat bränsle, har nyligen upptäckts innehålla brister vid känslighetsanalys, speciellt när plutonium ingår. Det gäller vid bestämning av c_k -värden som används för att välja ut benchmarks för kontroll av beräkningsmetoder. Bristerna förväntas att ha åtgärdats i nästa version 6.2 av SCALE.

I början av april 2015 erhöles en testversion av SCALE 6.2 benämnd ”beta 4”. Den har använts intensivt av granskaren för att få ökad klarhet i bristerna med SCALE 6.1. SCALE 6.2 beta 4 är en metod under utveckling. Slutsatserna av beräkningarna är giltiga och förståeliga utan detaljresultat. Ansvarig för utveckling av SCALE 6.2 har nyligen (Rearden 2015) bekräftat att resultaten är representativa för de korrekationer av upptäckta brister som gjorts.

Referenserna till rapporten är ett urval av de mest aktuella dokumenten. Några av dessa har inte studerats ingående av tidsbrist men det finns hänvisningar till dem i rapporten. Det är klart att de är mycket relevanta för SSM:s granskning av KBS-3, både nu och speciellt senare vid förväntad detaljgranskning.

2. Nukleär kriticitetssäkerhet

2.1. Viktiga grunder avseende KBS-3

2.1.1. Omfattning och syfte avseende kriticitetssäkerhet

SKB:s redovisning avseende KBS-3 täcker olika säkerhetsområden liksom andra aspekter enligt svensk lagstiftning. Denna rapport avser ett specifikt område, nukleär kriticitetssäkerhet, vilket bestäms av följande definitioner som har stöd i standarder från American National Standards Institute/American Nuclear Society (ANSI/ANS), International Organization for Standardization (ISO) och International Atomic Energy Agency (IAEA):

Nukleär kriticitet

Ett tillstånd av exakt självupprätthållande nukleär kedjereaktion av fissioner (kärnklyvningar).

Nukleär kriticitetsolycka

Frigörelse av energi från oavsiktlig nukleär kriticitet.

Nukleär kriticitetssäkerhet

Skydd mot konsekvenser av en nukleär kriticitetsolycka, företrädesvis genom förhindrande av olyckan.

Effektiv konstant för neutronmultiplikation, k_{eff}

En invertering av det egenvärde som i ett stationärt system ger exakt reproduktion av föregående fissionsfördelning. Detta är en kort men ändå kärnfylld definition (fritt lånat från fransk lagstiftning).

Kriticitet motsvaras av det tillstånd där egenvärdet och därmed k_{eff} blir exakt ett. Värdet säger inget om effektens storlek i absoluta tal.

Även om joniserande strålning är det primära säkerhetshotet från en kriticitetsolycka så kan det vara väsentligt att beakta hela energifrigörelsen vid ett kriticitetsförlopp. Det stöds av definitionen av kriticitetsolycka och av erfarenheter från kriticitetsolyckor.

KBS-3 omfattar nuvarande Clab i Simpevarp som tillsammans med tillkommande inkapslingsdel betecknas Clink samt mottagningsdel och slutdeponering i Forsmark. Dessutom ingår transportsystemet med fyllda kopparkapslar. Kedjan innan Clink, med bestämning av bränslets egenskaper och historik samt transporter till Clink, är också väsentlig för säkerheten i senare led.

2.1.2. Standarder och guider

Standarder och guider för kriticitetssäkerhet är baserade på erfarenhet. De väsentligaste med anknytning till KBS-3 är:

- Validering av beräkningsmetoder (ANSI/ANS 8.24),
- Utbränningskreditering (ANSI/ANS 8.27) samt
- NRC guide avseende utbränningskreditering (SFST ISG-8 Rev. 3).

2.1.3. Nuklid, isotop, fissilt, klyvbart, fertilt, aktinid

Dessa begrepp är väsentliga för materialbeskrivningar och har visat sig ge upphov till frågor eller oklarhet. De kan uppfattas som triviala begrepp men verkligheten visar att det blir oklarheter på grund av olika användning av begreppen. Det är inte bara i SKB:s redovisning utan även i internationella referenser som dessa begrepp används på ett oklart sätt.

Eftersom klarhet förväntas öka säkerhet, underlätta beredskap och underlätta planering så diskuteras några begrepp här. Det går naturligtvis inte att ändra allt missbruk men medvetenhet och försök till tydligare användning underlättar.

Från publicerade ordlistor (ANS 1986 och ISO-921) hämtas följande definition:

isotopes: nuclides having the same atomic number but different mass numbers

Att definitionen är i pluralis är signifikant. Isotop är ett meningslöst begrepp för en ensam atom. Det anknyter automatiskt till andra isotoper av samma grundämne. Isotophalt eller -sammansättning bestämmer förhållandet till andra isotoper av samma grundämne men säger ingenting om materialet eller andra grundämnen.

Eftersom en isotop är en nuklid (däremot gäller inte motsatsen) så bestämmer information om nukliden förhållanden till materialet och till andra grundämnen. Nuklidsammansättningen eller nuklidinnehållet ("nuclide inventory") kan innehålla tillräcklig information för att bestämma isotopinnehåll men ofta kanske bara en isotop av ett grundämne finns med. Då har man enbart information om nukliden, inte om isotopen. Data för isotoper är relativa värden medan data för nuklider är absoluta värden om inte speciella förhållanden specificeras (typ koncentration i något material).

Det bestrålade bränslets nuklidhalt (eller bara halt) av ^{238}U liksom dess innehåll av ^{238}U minskar genom bestrålning i reaktor medan dess isotophalt (koncentration i uran) av ^{238}U ökar genom bestrålning i reaktor. Anledningen är att isotopen ^{235}U (huvudsakligen fission) förbränns snabbare än ^{238}U (omvandling till ^{239}Pu , fission).

Ibland är isotophalt det väsentliga (typ anrikning ^{235}U) och ibland är nuklidhalt det väsentliga (typ koncentration av ^{10}B).

Fissil, klyvbar och fertil är olika begrepp som bör hållas isär.

En aktinid är beteckning för ett grundämne i en serie där uran och plutonium ingår. Ibland används aktinid missvisande som beteckning för en specifik aktinidnuklid. Det är till och med så att aktinider ibland missvisande används för att beteckna enbart nuklider ovanför uran och plutonium i aktinidserien.

2.1.4. Säkerhetsbegrepp

Med **händelse** avses här (EMS) ett scenario som avviker från normalt tillstånd och specificeras för att ligga till grund för en bedömning av kriticitetsfaran. Händelsen kan vara och är oftast en kedja av olika (del)händelser och andra avvikelser från avsedd anläggning och drift.

Händelsen som behöver beaktas är oftast konsekvenser av något som hänt tidigare. Exempel är utspillning av uran eller vatten i ett utrymme där detta inte bör finnas. Händelsen är då att det finns uran eller vatten i utrymmet. Tid, varaktighet och information om kvantiteter, fördelningar, etc. är ofta också väsentliga.

Det finns många andra uttryck med samma eller liknande betydelse. Det engelska ordet "contingency" avser en mindre sannolik händelse. Störning är ett begrepp som ofta används på liknande sätt som händelse.

Säkerhetskontroller behövs för att upprätthålla acceptabel kriticitetssäkerhet. Det kan gälla massa eller geometrisk form av det fissila materialet, uranets anrikning av ^{235}U , neutronmoderation, neutronabsorption, bestrålningsgrad i reaktor, avklingningstid efter reaktor användning, etc. Det finns också faktorer som i en beredskapssituation kan utnyttjas tillfälligt för att få en ökad säkerhetskontroll. Det förutsätter att underlag finns i form av information om situationen och om hur denna information kan användas vid utvärdering av det akuta säkerhetsläget. Exempel är en neutronabsorbator som inte utnyttjas för normal säkerhetskontroll men som skulle kunna utnyttjas vid en specifik händelse.

Kreditering används inom området kriticitetssäkerhet som ett tillgodoräknande av en specifik säkerhetskontroll. I SKB:s redovisning av KBS-3 är det speciellt två helt olika typer av kreditering som är intressanta: kreditering av brännbar absorbator (BA) och kreditering av utbränning (BU).

BA-kreditering ger störst effekt för obestrålat (färskt) bränsle. Det tillämpas också för sådant bränsle både vid tillverkning och vid transport eftersom bestrålning inte är något potentiellt problem. Vid tillämpning av BA-kreditering när bränslet kan vara bestrålat är beaktande av utbränning inte en kreditering utan motsatsen; ett möjligt "straff". Det finns inget val, utbränningen måste beaktas eftersom den kan ge en ökning av k_{eff} . Det gäller både BWR- och PWR-bränsle. Det finns inget samband med utbränningskreditering som är en valfri metod att beakta bestrålnings effekter från reaktordrift.

BU-kreditering är en möjlighet, inte ett krav, att beakta effekter av bestrålning av bränslet i reaktorhård vid utvärdering av kriticitetssäkerhet i senare led.

Samtidig BA- och BU-kreditering för samma bränsle är en möjlighet. Det gäller främst användning av BA-kreditering vid låga utbränningar och BU-kreditering vid högre utbränningar.

2.1.5. Osäkerhet, kovarians, korrelation, bias, validering, c_k

Osäkerhet är en möjlig avvikelse från det korrekta värdet. Tecken och storlek av avvikelsen är inte kända, åtminstone inte båda, medan sannolikhetsfördelningen för avvikelsen bör vara känd.

Kovarians för två osäkerheter (helst relaterad till specifik felkälla) anges ofta under antagande om linjära samband.

Korrelation för stokastiskt bestämda samband specificeras oftast som en korrelationskoefficient bestämd av kovariansen normerad med produkten av standardavvikelseerna (ofta i matrisform där huvuddiagonalen motsvaras av variansen varvid korrelationskoefficienten blir ett).

Den vanligaste korrelationskoefficienten är så kallad Pearsons korrelation. Den bestämmer linjär korrelation vilket kan vara mycket missvisande för icke-linjära samband. Ett exakt känt samband som en sinuskurva eller $y=x^2$ (symmetriska värden kring minimivärdet) ger en Pearson korrelation av noll. Det är inte den verkliga korrelationen som är ett (total).

Korrelation specificeras alltså bäst genom en exakt funktion om ett sådant samband är känt (Mennerdahl 2014). En observation av en ändring av ett visst värde leder då till en exakt bestämning av förändringen i det andra (korrelerade) värdet utan att förändringen behöver observeras.

Bias är en känd avvikelse från det korrekta värdet. Tecken och storlek av avvikelsen är kända, dock oftast med en viss kvarstående osäkerhet. Bias används i normalt språkbruk på liknande sätt avseende numeriska värden och i andra värderingar (typ favorisering). En bias kan vara avsiktlig. Ett uppskattat värde k_c ("calculated") innehåller korrekt värde k_b ("benchmark") inklusive bias β enligt Ekvation (1):

$$k_c = k_b + \beta \quad (1)$$

Osäkerheten i bias är inte specificerad i Ekvation (1). Det normala är då att definiera bias som skillnaden mellan beräknat och korrekt värde enligt Ekvation (2):

$$\beta = k_c - k_b \quad (2)$$

Med en bra benchmark kan det räcka med en enda beräkning för att bestämma bias noggrant. Ofta utförs dock ett stort antal beräkningar och någon typ av medelvärde erhålls (kan vara viktat mot en eller flera parametrar).

En överskattning av ett värde med positivt tecken, i detta fall k_c , ger alltså ett positivt tecken för biasen medan en underskattning ger ett negativt tecken. Eftersom en bias är en känd avvikelse kan man korrigera för en del eller hela avvikelsen om så önskas.

Ekvationerna (1) och (2) visas ofta med ett värde av exakt ett för k_b . Det gäller då endast om det korrekta benchmarkvärdet är exakt ett. Vid mer generell användning bör termerna i ekvationen normeras med k_b . Ekvation (2) blir då Ekvation (3):

$$\beta/k_b = k_c/k_b - 1 \quad (3)$$

där k_c/k_b ibland anges som C/E (beräknat värde genom experimentellt värde). Vid beräkningar bör det vara C/B (beräknat värde genom benchmark-värde). Normaliseringen av biasen är oftast oviktig då k_b är nära ett och osäkerheten är betydligt större än avvikelsen från ett.

I USA kräver NRC att positiv bias sätts till noll vid validering. Det innebär att

korrektionen för bias inte får leda till lägre k_{eff} än beräknat. ANSI/ANS-8.24 medger att positiv bias får beaktas.

I NUREG/CR-6698 anges i avsnitt 2.4.1 (sidan 8):

“ $Bias = \bar{k}_{eff} - 1$ if \bar{k}_{eff} is less than 1, otherwise $Bias = 0$

A positive bias may be non-conservative and the NRC has indicated that licensees would not be permitted to use a positive bias (Morey and Damon, 1999). Where the bias is found to be positive, an adjusted bias of zero is to be used.”

Medelvärde (kan vara ett enda värde) av beräkningsresultat avseende tillämpliga benchmarks betecknas ofta som k_c men i citat används \bar{k}_{eff} . En bias i form av ett önskat fel är ju något som observeras. Att använda (”use”) bias i citatet ovan innebär då att beakta bias. ”Adjusted bias” är en rimlig term som kan användas för korrigering av önskad bias.

ANSI/ANS-8.24 anger följande:

“bias: The systematic difference between calculated results and experimental data. Positive bias is where the calculated results are greater than the experimental data.³”

³ The sign of the bias is arbitrary, For the purpose of this standard, it has been defined to be positive when the calculated values exceed the experimental values, but it could be defined otherwise.”

En bias med positivt värde, bestämt enligt omvänd metod, kan då sättas till noll av någon som tillämpar standardmetod. En bias bestämd med negativt tecken enligt omvänd metod (och alltså underskattar k_{eff}) kan alltså bli icke-konservativ försummad.

Om bias med båda tecknen beaktas på ett korrekt sätt bör inga säkerhetsproblem uppkomma genom det. Om man däremot blandar ihop tecknen så är det svårt att förutse konsekvenserna.

Validering betyder i huvudsak styrkande av giltighet och omfattar bestämning av noggrannhet (bias) och precision (osäkerhet) samt specifikation av giltigt tillämpningsområde. Även inverkan av användaren ingår. Det är väsentligt att mätningens eller beräkningens karaktär förstås. Det är traditionellt att använda, till och med kräva, ett stort antal benchmarks för att bestämma bias och osäkerhet för en viss tillämpning. Varför räcker det inte med ett enda helt tillförlitligt och noggrant benchmark? Varför skulle statistisk bearbetning av ett stort antal fullt korrelerade och osäkra benchmarks ge ett tillförlitligare resultat?

c_k är en korrelation mellan osäkerheter i k_{eff} för tillämpning och k_{eff} för benchmark orsakade av osäkerheter i utvärderingar av grundläggande tvärsnittsdata. Korrelationen är linjär (Pearson-korrelation) och definieras enligt Ekvation (4).

$$C_k = \frac{\sigma_{AppExp}^2}{\sigma_{App}\sigma_{Exp}} \quad (4)$$

Det är inte så konstigt om många slutanvändare av SCALE uttrycker sig fel avseende betydelsen av c_k . ORNL uttrycker sig exempelvis så här i NUREG/CR-7109 avsnitt 3.1 (sidan 9):

”The TSUNAMI-IP (Ref. 14, Section M18) program was used to evaluate the similarity of critical experiments to application models”

Det stämmer alltså inte utan likheten avser enbart gemensamma, dominerande felkällor i grundläggande tvärsnittsdata, alltså till metoden, inte till likheter mellan experiment och avsedda system (tillämpningar).

Avsnitt 3.2.4 (sidan 12) i NUREG/CR-7109 ger rekommendationer avseende c_k :

“Oak Ridge National Laboratory (ORNL) experience (Ref. 25) with the SCALE S/U tools has indicated that a critical experiment is similar to an application model if the c_k value ≥ 0.9 . Critical experiments with c_k values between 0.8 and 0.9 are considered marginally similar, and use of experiments with c_k values below 0.8 is not recommended.”

2.1.6. Underkritiskt, säkert, kriterier, USL, acceptansnivå

Underkriticitet avser aktuellt tillstånd i ett system i en viss stationär situation. Det säger inget om framtiden (jämför kriticitetssäkert system).

Kriticitetssäkert avser aktuellt och framtida underkritiska tillstånd vid normala situationer och händelser. En geometri kan i sig självt vara underkritisk men knappast säker utan kompletterande information och kontroll.

Det finns två vanliga **kriterier** för säkerhet:

1. **Underkritiskt under två händelser:** Ett kriterium som ofta tillämpats i Sverige och Storbritannien är att två lågfrekventa, oberoende och samtidigt händelser inte får leda till kriticitet. Det har även varit ett krav vid tillståndsgivning för Clab. Det har inte tidigare varit kopplat till numeriska värden på sannolikheter utan varit en bedömningsfråga från fall till fall.

Citat från SKI:s beslut 1992 avseende Clab:

Det centrala säkerhetskravet ur kriticitetssynpunkt är att betryggande underkriticitet upprätthålls i Clab. Kvantitativt uttrycks detta genom att den effektiva neutronmultiplikationskonstanten (k_{eff}) får högst bli 0,95 inklusive osäkerheter. Vid missöden får inte kriticitet inträffa även om två sällsynta oberoende störningar sker. Detta kvantifieras genom att den effektiva neutronmultiplikationskonstanten får då högst bli 0,98 inklusive osäkerheter.

2. **Double Contingency Principle (DCP):** Principen innebär att minst två oberoende, osannolika och samtidigt händelser måste inträffa för att kriticitet skall kunna uppkomma. DCP nämns ofta i internationella och nationella standarder. Den är så etablerad att beteckningen inte översätts till svenska för att undvika missförstånd. Det är ofta en rekommendation (standarder, DOE i USA) men kan också vara en föreskrift (NRC i USA).

En väsentlig skillnad är alltså att DCP inte kräver underkriticitet vid de två samverkande händelserna.

Upper Subcritical Limit (USL) avser gränsvärde för viss metod vid bestämning av k_{eff} . Värdet är underkritiskt med viss konfidens/sannolikhet. Gränsen säger inte så mycket om säkerhet, bara underkriticitet för visst scenario. En extra marginal (Δ_{SM} nedan) läggs ofta till uppskattat värde för att täcka in exempelvis osäkerheter i beräkningsmodell, bristande tillgång till lämpliga benchmarks, osäkerheter i benchmarks, dålig noggrannhet i benchmarks samt korrelationer mellan möjliga felkällor i olika benchmarks.

Marginalen i USL är inte avsedd att täcka in osäkerhet i säkerhetsanalys som beror på annat än beräkningsmetoden. En sådan marginal kan inte läggas in i en metodmarginal eftersom felbedömningar kan bli hur stora som helst. Även en tom burk med k_{eff} av noll kan med ett enda misstag göras kritiskt.

I NUREG/CR-6698 anges i avsnitt 1.2 (sidan 2) en normal (ANSI/ANS-8.24) hantering av bias i ekvation (1):

“The USL is represented by the following equation:

$$USL = 1.0 + Bias - \sigma_{Bias} - \Delta_{SM} - \Delta_{AOA} \quad (1)”$$

Här syns direkt att beaktande av en bias med positivt tecken kan ge ett USL-värde större än 1,0. Det kan tydligen störa (exempelvis NRC) men ändrar inte faktum att sådant väl bestämt USL är klart underkritiskt även när värdet är större än 1,0. Det uppskattade USL-värdet kanske är 1,03 och så sätter man konservativt ned det till 1,02. Detta USL-värde är alltså konservativt fastställt. Jämför en klocka som konstant går fem minuter före. Man kan konservativt korrigera för detta och sätta på nyheterna på TV fyra minuter efter 21.00 varje dag utan att missa något någon gång. Rutinmässig användning ger också kontinuerlig kalibrering (validering).

I ett annat fall, med bias med negativt tecken, kanske USL bestäms till 0,97 utan att sättas ned ytterligare. Det är inte konservativt. En tillämpning av första metoden med beaktande av positiv bias ger i praktiken alltså hårdare säkerhetskrav än den andra metoden.

Acceptansnivå: Det finns flera sätt att sätta gränser för vad som är acceptabelt med avseende på marginaler till kriticitet. Vanligast är att använda k_{eff} som mått på säkerhet men det är inte alltid så informativt. Det är ofta bättre att använda kontrollparametrar för att bestämma säkerhet och säkerhetsmarginal. Det är vad både DCP och underkriticitet vid två oberoende, lågfrekventa och samtidiga händelser innebär.

Gränsvärdet 0,95, inklusive osäkerheter, tillämpas ofta för k_{eff} för relativt normala händelseförlopp. För mindre sannolika händelseförlopp har gränsvärden för k_{eff} av 0,98 och högre använts. Den sammanlagda sannolikheten för kriticitet, baserad på sannolikhet för händelsen kopplat till sannolikhet till förlorad säkerhetsmarginal, blir då kanske liknande för normala och osannolika händelser.

2.1.7. Beredskap för en oväntad kriticitetsolycka

Hotbild: En första insats är att bestämma potentiella hotbilder av olika kriticitetsförlopp.

Standarder: Det finns standarder och kriterier för beredskap mot en kriticitetsolycka. För bränslebassänger med bestrålat bränsle brukar inte specifik detektor för kriticitet i bassäng krävas. Anledningar är att vattnet skärmar personal i närheten att skadas akut samt att andra strålningsmonitorer för aktivitet i luft och i vatten förväntas avslöja en oväntad kriticitetsolycka. Vid långtidsdeponering finns det inga etablerade internationella kriterier eller standarder.

För den typ av hantering av bestrålat bränsle i inkapslingsdelen av Clink som planeras så gäller ofta vissa kriterier (exempelvis NRC 10 CFR 70.24) som kräver kriticitetsdetektering och -larm om inte speciella skäl kan åberopas. SKB har hänvisat till mycket låg sannolikhet för kriticitet i den torra hanteringen av bränsle i inkapslingsdelen av Clink.

En händelsefrekvens under 10^{-6} per år bedöms av SKB som en så kallad restrisk varvid kriticitetshot inte behöver beaktas i Clink eller vid drift av slutförvaringsdelen.

SKB har valt att redovisa säkerheten för upp till en miljon år. Eftersom säkerheten av intakt kopparkapsel är enkel att visa så gäller svårigheterna främst att bedöma kapselns integritet under denna långa tid samt att bedöma de fissila nuklidernas fördelning efter brott på kopparkapseln.

2.2. Urval från SKB:s säkerhetsredovisning för KBS-3

2.2.1. Inledning

Det är inte motiverat att diskutera SKB:s språkbruk i detalj. Under 2.1 har ett litet urval av väsentliga, belysande och tveksamma citat tagits med. Oftast finns det ingen möjlighet till feltolkning. Även andra dokument än de från SKB tas upp om de har stark anknytning till SKB:s redovisning.

2.2.2. Tillämpning av standarder och guider

SKB hänvisar till standarderna ANS/ANS-8.24 och ANSI/ANS-8.27. SKB definierar dock begreppet bias på ett avvikande sätt (motsatt tecken) i metodikrapport (SKBdoc 1369704 ver. 2.0). Oftast använder dock SKB begreppet bias så som standarderna specificerar och som överensstämmer med normalt språkbruk. Användning av begreppet bias diskuteras i 2.2.5.

Begreppen nuklid och isotop finns definierade i övergripande standarder och etablerade ordböcker. Begreppen används ibland motsägelsefullt både i SKB:s

redovisning och i flera av referenserna från NRC och ORNL. Användning av begreppen nuklid och isotop diskuteras i 2.2.3.

SKB hänvisar till standarden ANSI/ANS-8.24 avseende BU-kreditering. Den innehåller flera olika metoder till validering. Den metod som SKB tillämpar avser separat bestämning av inverkan av utbränning på nuklidinnehåll och bestämning av k_{eff} . Den osäkerhet som fås vid bestämning av nuklidinnehåll blir då en osäkerhet i indata och inte i metoden för bestämning av k_{eff} . SKB har dock (SKBdoc 1422106 ver. 1.0), i avvikelse mot ANSI/ANS-8.27, placerat denna osäkerhetsterm (Δk_i) i USL (som motsvarar högra sidan av olikhet i ANSI/ANS-8.27).

2.2.3. Nuklid, isotop och uttryck innehållande dessa begrepp.

För det mesta använder antagligen SKB begreppen nuklid och isotop så som de definieras i standarder och ordböcker. Det finns dock många exempel, även i samma rapporter, på sammanblandning. Många av de referenser som SKB hänvisar till blandar också ihop begreppen nuklid och isotop. I SKBdoc 1417199 ver 1.0 hänvisas till "fertile material" i den betydelse som normalt används för "fissile material". Exempel är 3.4 "The fertile material remaining in a deposited canister (mainly the inventories of U-233, U-235 and Pu-239)".

2.2.4. BA- och BU-kreditering

Kreditering för brännbar absorber (BA) och kreditering för utbränning (BU) är helt olika begrepp. Flera internationella rapporter blandar ihop säkerhet (kreditering är säkerhetskontroll) med teknik (utbränning är en teknisk bestämning) så att BA-kreditering (tillgodoräknande av närvaro av stavar som åtminstone initialt innehöll viss mängd BA) specificeras som en typ av BU-kreditering (tillgodoräknande av viss minsta utbränning). Detta har i något fall "smittat av sig" på SKB:s redovisning.

SKB anger i SKBdoc 1369704 ver 2.0:

BA-krediterings kan ses som ett specialfall av utbränningskreditering men skiljer sig ifrån denna på ett principiellt mycket viktigt sätt.

SKB visar i praktiken att man har full förståelse för skillnaderna mellan BA- och BU-kreditering. Den principiella skillnaden är att i ena fallet (BU-kreditering) så krediteras utbränning medan i det andra fallet (BA-kreditering) bestraffas eventuell utbränning.

En nyligen utkommen NRC-rapport (NUREG/CR-7194) framtagen av ORNL är mycket intressant som underlag för SKB:s redovisning av BA-kreditering. Titeln innehåller uttrycket "peak reactivity burnup credit". Även på andra ställen anges "peak reactivity" vara en typ av BU-kreditering. Detta är som tidigare antytts motsägelsefullt.

NUREG/CR-7194 tar upp BU-kreditering i kombination med BA-kreditering som ett av två fall och det är en klar möjlighet.

2.2.5. Bias, validering, c_k -värden

Som nämnts under 2.2.2 så använder SKB och referenser från NRC och ORNL ibland begreppet bias med motsatt tecken från det som är normalt och som definieras i standarder. SKB, NRC och ORNL använder inte bias konsekvent utan byter tecken emellanåt, även inom samma dokument. Det gäller aktuell SKB-redovisning liksom SFST ISG-8 Rev. 3.

I metodikrapport (SKBdoc 1369704 ver. 2.0) har SKB vänt på definitionen av bias genom att sätta $\beta = 1 - k_c$. En positiv bias motsvarar då en underskattning av k_{eff} . Detta tas även upp i avsnitt 4.

Avseende validering så är det största problemet att det inte finns någon klart etablerad och kvalitativ praxis som kan implementeras i standarder. Ett exempel är beaktande av korrelationer mellan dominerande felkällor i olika benchmarks. SKB har gjort ett försök att beakta sådana korrelationer. ORNL erkänner emellanåt problemet men skjuter det åt sidan för att det inte finns någon klarhet i hur korrelationerna skall beaktas.

De korrelationer (kovarianser) mellan tvärsnittssäkerheter som finns specificerade i beräkningssystemet SCALE 6.1 har använts av SKB direkt och av NRC och ORNL vid framtagning av rekommendationer avseende BU-kreditering. Det gäller speciellt bestämning av c_k -värden. SKB, NRC och ORNL antyder ibland felaktigt att c_k -värden visar likheten (oftast avses neutronfysikaliskt) mellan tillämpning och benchmark. Det finns dessutom allvarliga brister i kvaliteten av kovariansdata i SCALE 6.1 och tidigare. Det har inte beaktats i redovisningen eftersom de uppmärksammats först ganska nyligen (något år sedan) och informationen inte verkar ha spridits tillräckligt.

SKB har anlitat ORNL för att göra utvärdering av inverkan av korrelationer mellan osäkerheter i benchmarks (SKBdoc 14331433410 och Marshal 2014). SKB finner inte någon större effekt men har lagt till extra osäkerhetsbeaktanden orsakade av korrelationer mellan benchmarks.

2.2.6. Underkritiskt eller kritiskt vid två samtidigt händelser

SKB hänvisar (SKBdoc 1369704 ver. 2.0) till båda de säkerhetskriterier som nämns i 2.1.6. Det ena gäller det i Sverige och för Clab etablerade kriteriet att två samtidigt, lågfrekventa och oberoende händelser skall klaras utan kriticitet. Det andra gäller DCP som rekommenderar att det skall behövas minst två samtidigt, lågfrekventa och oberoende händelser för att få kriticitet.

2.2.7. Beredskap för en oväntad kriticitetsolycka

SKB har, bland annat efter begäran om komplettering från SSM, redovisat uppskattning av kriticitet i olika delar av KBS-3.

2.3. EMS bedömning

2.3.1. Inledning

SKB:s redovisning verkar klar och komplett med avseende på omfattning och syfte. Även i övrigt verkar logiken och strukturen av redovisningen i stort sett vara tydlig och lätt att följa. I 2.3 tas några begrepp från 2.1 och 2.2 upp eftersom oklar användning bedöms kunna påverka möjligheten att skapa och upprätthålla kriticitetssäkerhet i KBS-3.

2.3.2. Tillämpning av standarder och guider

Standarder är för det mesta baserade på lång erfarenhet och ingående diskussioner om formuleringar och innehåll. Avvikelse från standarder är möjliga men bör då motiveras, speciellt om hänvisningar gjorts till sådana standarder.

Säkerhetsaspekter av avvikelser av begreppen nuklid och isotop diskuteras i 2.3.3 medan begreppet bias tas upp i 2.3.5.

”Slarv” med användning av säkerhetsrelaterade uttryck som finns definierade i standarder kan bidra till oklarheter som blir säkerhetshotande.

2.3.3. Nuklid, isotop och uttryck innehållande dessa begrepp.

Använt kärnbränsle innehåller så många beståndsdelar att klarhet avseende begreppen nuklid och isotop är nödvändig. Isotopfördelning och nuklidinnehåll är exempel på viktiga uttryck som berörs av denna diskussion.

Exempel på grundämnen med potentiellt komplicerade isotopsammansättningar är uran, plutonium, bor och gadolinium. Om isotopen, typ ^{235}U , ^{240}Pu , ^{10}B eller ^{155}Gd är beskriven med halt och kvantitet så ger det information om hela grundämnet och ofta om andra isotoper. Anrikning är ett standardiserat uttryck för ökad halt av en specifik isotop (inte nödvändigtvis ökad halt av nukliden). För uran och bor som huvudsakligen bara innehåller två isotoper ger alltså information om den ena isotopen motsvarande information för den andra.

Beskrivning av material, kemiska och fysikaliska processer där begreppet isotop används innehåller alltså information om ett visst grundämne. Användning av begreppet nuklid ger inte samma klarhet utan mer omfattande specifikationer.

De två termerna har olika betydelser så det är onödigt att slarva bort distinktionerna.

Om skillnaderna mellan isotophalt och nuklidhalt är väldigt stora så framgår den avsedda halten av värdet i sig. Är skillnaderna mindre men ändå betydande med avseende på kriticitetssäkerhet så kan misstag vara säkerhetshotande. Om man anger att isotophalten av ^{235}U i UO_2 -kutsar eller -pulver är 4,0 vikt-% så innebär det att uranets anrikning av ^{235}U också är 4,0-vikt-%. Nuklidhalten av ^{235}U i UO_2 -kutsar eller -pulver är dock bara cirka 3,5 vikt-%. Liknande kan gälla anrikning/isotophalt av ^{10}B i det vanliga absorptionsmaterialet B_4C .

Isotophalt (i detta fall även anrikning eftersom ^{10}B anrikas för att få effektivare absorption i samma volym) är oberoende av vilken kemisk sammansättning det gäller. Nuklidhalten bestäms av kemisk sammansättning och isotophalt. Känner man enbart nuklidhalten vet man vare sig kemisk sammansättning eller anrikning. När det gäller uran är anrikningen avgörande för säkerheten, medan nuklidhalten inte behöver vara det. Exempelvis kan vätska med låg koncentration av anrikat uran där koncentrationen kan öka vid händelse (sedimentation) vara farlig medan metall med naturligt uran inte är det trots att nuklidhalten ^{235}U kan vara högre.

2.3.4. BA- och BU-kreditering

BA-kreditering och BU-kreditering är två väsensskilda säkerhetskontroller avseende kriticitetssäkerhet. Det kan vara mycket viktigt för säkerheten i KBS-3 att dessa kontroller hanteras korrekt.

BU-kreditering såsom den avses i SKB:s redovisning innebär en kontroll av att en viss minsta utbränning (kan vara noll i vissa fall) erhållits för det använda kärnbränsle som hanteras. Denna kontroll kan vara kopplad till andra säkerhetskontroller såsom initial anrikning ^{235}U och närvaro av specifik neutronabsorbator.

BA-kreditering såsom den avses i SKB:s redovisning innebär en kontroll av en neutronabsorbator i bränslekomponenter. Den initiala närvaron av dessa komponenter måste bevaras under hela tillämpningen av kontrollen. Möjliga förändringar av närvaron av denna neutronabsorbator måste beaktas. Fysisk eller kemisk skada på bränslet som gör att närvaron eller fördelningen av absorbatorn förändras är exempel. Radioaktivt sönderfall kan också behöva beaktas. Användning av bränslet i en kärnreaktor ger en förbränning av absorbatorn och det är ett annat exempel på förändring som måste beaktas. Beaktande av bränslets utbränning är alltså ett "straff" och inte en kreditering.

Det går att kombinera BA-kreditering och BU-kreditering. Ett exempel på betydelsen av att skilja på begreppen är att om enbart BA-kreditering tillämpas så måste denna upprätthållas under hela slutförvaringstiden. Uttag av bränslestavar från bränsle efter avslutad bestrålning i reaktor måste hanteras med försiktighet. Om BA-innehållande bränslekomponenter visar sig kunna påverkas annorlunda av tiden än andra bränslekomponenter så kan det motivera beaktande även av utbränningen.

Krav på mätning av utbränning som funnits för tillämpning av BU-kreditering i transportbestämmelser och i andra regelverk har ingen relevans för BA-kreditering. Det skapar förvirring och kan leda till säkerhetshotande misstag att blanda ihop BA-kreditering med BU-kreditering.

2.3.5. Bias, validering, c_k -värden

Granskaren har tidigare (Mennerdahl 2013) framfört synpunkten att en positiv bias bör få beaktas genom att dra av en rimlig del från beräknat k_{eff} . Genom att inte tillåta det uppmuntrar NRC till användning av gamla, ofta opålitliga, metoder bara för att de ger lämplig bias. En sådan kan innebära noll eller negativt värde och kanske bestämningen av bias kanske redan är godkänd. Då blir det inget straff, bara en neutral korrektion.

Tonvikten borde ligga på att uppmuntra användning av metoder som simulerar verkligheten väl under normala situationer och vid händelser samt som inte så lätt kan missbrukas eller misstolkas av användaren under situationer av stress. En korrekt simulering med noggrant bestämd bias och osäkerhet är väsentligt medan storlek och tecken på korrekt bias inte är väsentligt.

Väljs en pålitlig metod med signifikant positiv bias, med känd orsak, blir det ett hårt straff när justering inte får ske, alltså ett straff som inte är neutralt. Samtidigt ”vet” alla användare att metoden ger konservativa resultat vilket kanske leder till viss kompensation, kanske felaktigt (farligt) i vissa tillämpningar.

Frågan om korrektion för bias med positivt eller negativt tecken kan jämföras med kalibrering av en våg som visar för högt eller för lågt värde. Olika personer kan välja att använda ”glädjevåg” respektive ”skrämselvåg”. Liknande gäller kalibrering av klocka. En person kan välja att ställa klockan några minuter före för att kompensera att personen ofta kommer för sent. Det kan fungera under kort tid men så småningom blir det en automatisk kompensation för det kända felet. Störst problem blir det när många personer använder samma instrument och var och en ställer in det enligt personliga önskemål och inte enligt bästa tillgängliga data.

Det kan vara bättre att göra korrektioner för väl bestämd bias (oavsett tecken) i stället för att ändra instrumentet varje gång det ger en avvikelse vid kalibrering. Det gäller även bestämning av k_{eff} .

Att tecknet för bias ändras från normalt och standardiserat språkbruk till omvänt tecken i olika rapporter, även inom samma rapport, är oroväckande. Speciellt gäller detta när biaser på grund av olika felkällor bestämts med olika definitioner som grund för att sedan kombineras. En kombination av ovan nämnda problem, avseende beaktande av positiv bias genom att sätta den till noll, med problemet att låta underskattning av k_{eff} beskrivas med positivt tecken på bias skulle kunna bli ödesdiger för säkerheten.

Någon allvarlig konsekvens av sammanblandning mellan olika definitioner av bias har inte hittats. Däremot är det normalt att en standard som refereras till följs om inte annat anges. SKB har alltså i vissa delar av redovisningen använt motsatt tecken jämfört med ANS/ANS-8.24. Det är också normalt att använda samma definition i hela redovisningen för att undvika missförstånd. Här föreslås att SSM uppmanar SKB att följa definition i ANSI/ANS-8.24 om inte goda skäl till avvikelse finns (några sådana skäl framgår inte av redovisningen).

Bias och osäkerheter är mycket grundläggande begrepp för kriticitetssäkerhet. De måste behandlas med stor respekt och användningen bör kontrolleras ordentligt. Avvikelser från standarder bör korrigeras eller åtminstone motiveras.

Validering av beräkningsmetoder är komplicerat. Problemet med potentiella korrelationer mellan andra felkällor än de i utvärderade tvärsnitt har blivit internationellt uppmärksammat. Någon praxis har ännu inte etablerats. Bestämning av bias och osäkerheter genom statistiska metoder är tveksam eftersom osäkerheter i benchmarks inte beaktats tillräckligt. En enda noggrann och direkt tillämplig benchmark (system med samma neutronfysikaliska egenskaper som tillämpningen) kan vara mer tillförlitlig än hundratal olämpliga och starkt korrelerade benchmarks.

Det är viktigt att förstå vad c_k -värde innebär. Specialister på kriticitets säkerhet har ofta missuppfattat betydelsen och det har lett till allvarliga felbedömningar. Denna granskningsrapport innehåller preliminära resultat med en testversion (beta 4) av SCALE 6.2 som rättar till väsentliga brister i kovariansdata i SCALE 6.1, speciellt avseende plutonium (Rearden WPNCs 2014). Det påverkar bestämning av c_k -värden för använt kärnbränsle. Detta är ett stort och viktigt problem för SKB att hantera.

2.3.6. Underkritiskt eller kritiskt vid två samtidiga händelser

Som framgår av 2.2.6 så har SKB hänvisat till två något motstridiga kriterier för kriticitets säkerhet. Det är svårt att se hur detta görs, speciellt med beaktande av bestämning av frekvenser för händelser och händelsekedjor.

2.3.7. Beredskap för en oväntad kriticitetsolycka

Det är önskvärt att ha så tydlig information som möjligt tillgänglig som beredskap inför händelser. Exempel är information om utbränning för BWR-bränsle. Trots att det inte krediteras för normal drift så kan välgrundad information om verklig utbränning utnyttjas för att kompensera effekter av händelser och för att underlätta åtgärder för att undanröja hot från händelser.

3. Händelser och kriterier

3.1. Generellt

3.1.1. Bestämning av händelser

Med händelse avses här (EMS) alla säkerhetsminskande avvikelser från normal drift. En definierad händelse består nästan alltid av, eller kan vid utvärdering indelas i, en kombination av flera delhändelser. Dessa kan vara av olika typer såsom oberoende, samtidigt, sekventiella, etc. Med oberoende avses uppkomsten av två eller flera (del)händelser. Vid utvärdering av en händelsekombination antas naturligtvis inte konsekvenserna av händelserna vara oberoende. Ordningföljden inom en händelsekedja kan naturligtvis vara avgörande för konsekvenserna. Resultatet blir en optimering av kombinationsmöjligheterna, med beaktande av rimlighet av helheten.

3.1.2. Kriterier för kriticitetssäkerhet vid händelser

Ett kriterium som ofta tillämpats i Sverige och Storbritannien är att två lågfrekventa, oberoende och samtidigt händelser inte skall leda till kriticitet. Ett annat kriterium, "double contingency principle" (DCP) är ofta en rekommendation och inte ett krav. Principen innebär att minst två oberoende, lågfrekventa och samtidigt händelser måste inträffa för att kriticitet skall kunna uppkomma.

3.1.3. Gränsvärden för effektiv neutronmultiplikationskonstant

Gränsvärden för den effektiva neutronmultiplikationskonstanten k_{eff} används ofta som acceptanskriterier för kriticitetssäkerhet. I Sverige liksom i många andra länder används olika gränsvärden för olika säkerhetsbedömningar. Dessa gränsvärden kan kopplas till säkerhetskriterierna i 3.1.2.

Eftersom säkerhetsanalys innehåller en uppskattning av kvarstående (inte beaktad på annat sätt) osäkerhet så är konfidens och sannolikhet för överskridande av gränsvärdet väsentliga indata. I USA används ofta 95 % sannolikhet till 95 % konfidensnivå för att det riktiga värdet på k_{eff} skall ligga under angivet värde. Det motsvaras av ett tillägg av ungefär två standardavvikelser när normalfördelning föreligger. Ofta används en term innehållande två standardavvikelser utan att bestämma konfidens/sannolikhet. I Sverige och Europa är det antagligen vanligare att använda tre standardavvikelser vilket motsvarar högre sannolikhet och konfidensnivå (cirka 99 %).

Gränsvärde för beräkningsmetoden (exempelvis USL) skall i princip inte påverkas av bias och osäkerheter i säkerhetsanalysen utan endast av bias och osäkerheter i metoden. Validering av beräkningsmetoden ger underlag för gränsvärde för metoden. Tillämpningsområde för metoden skall vara specificerat. Om metoden används utanför detta tillämpningsområde kan användningen eventuellt accepteras om en lämplig extra marginal läggs till.

Gränsvärde för en tillämpning av en metod på en säkerhetsanalys måste beakta bias och osäkerheter i säkerhetsanalysen som beror på annat än beräkningsmetoden. De kan betraktas som bias och osäkerheter på grund av sådana indata som inte ingår i beräkningsmetoden (typ tvärsnitt). Denna uppskattning av bias och osäkerheter beror naturligtvis på aktuell tillämpning. Ofta bakas en marginal på 0,05 in i USL för beräkningsmetoden för relativt normala händelser medan marginalen 0,02 kan användas för lågfrekventa händelser eller händelsekombinationer. Det är kanske inte helt "rent" men fungerar så länge som inte mindre marginaler önskas. Skulle bias eller osäkerheter i indata motivera större marginaler så kräver standarderna att detta beaktas.

3.1.4. Referensfall som underlag för säkerhetsanalys

Ett sätt att reducera antalet beräkningar och analyser är att göra en referensberäkning och tillhörande säkerhetsanalys för en potentiellt begränsande händelse. Det är då vanligt att välja en enkel och väl specificerad typ av bränsle för att minska osäkerheten i indata.

Även för att bestämma dimensionerande bränslespecifikationer är det lämpligt att ta fram ett grundfall (också en typ av referensfall) som sedan används för att jämföra med andra och även senare tillkommande bränsletyper.

Den analys som görs med jämförelse av en specifik händelse med ett referensfall betecknas ibland delta-analys. Delta (Δ) används ofta som beteckning för skillnad.

Vid delta-analys är det mycket viktigt att beakta bias och osäkerheter innan jämförelser med gränsvärden eller andra referensvärden görs och slutsatser dras.

3.1.5. Kreditering för brännbar absorptor eller för utbränning

För bestrålat bränsle av typ BWR och PWR är kreditering av brännbar absorptor (BA) och/eller av utbränning (BU) etablerade alternativ. BA-kreditering för BWR-bränsle har tillämpats av SKB för CLAB sedan mitten av 1990-talet och har tillämpats vid förvaringsbassänger vid svenska BWR-anläggningar sedan början av 1980-talet. För färskt bränsle har BA-kreditering tillämpats sedan mycket länge vid bränsletillverkning, vid transporter och vid förvaring i speciella förråd vid kärnkraftverken.

Det finns internationella standarder och guider för BA- och BU-kreditering. Av speciellt intresse är därvid kommande uppdatering av ANSI/ANS-8.27 som kommer att innehålla ett appendix med BA-kreditering för BWR-bränsle. För bara några dagar sedan kom en ny NRC-rapport NUREG/CR-7194 i den långa serie av rapporter som ORNL framställt med stöd av NRC. Den ger underlag även för uppdateringen av ANSI/ANS-8.27.

NUREG/CR-7194 innehåller två metoder för BA-kreditering av BWR-bränsle varav den ena är en kombination av BU-kreditering (högre utbränning) och BA-kreditering (lägre utbränning).

3.2. SKB:s val och avsikter

3.2.1. Bestämning av händelser

SKB har valt (SKBdoc 1422108 och SKBdoc 1369704) att tillämpa händelseklasserna H1-H5 för Clink enligt följande:

	Undre gräns för frekvens		Övre gräns för frekvens
H1:	10^0 per år	< X	
H2:	10^{-2} per år	< X <	10^0 per år
H3:	10^{-4} per år	< X <	10^{-2} per år
H4:	10^{-6} per år	< X <	10^{-4} per år
H5:	10^{-7} per år	X <	10^{-6} per år

För slutdeponering kommer antagligen inte händelseklasser att tillämpas på detta sätt.

3.2.2. Kriterier för kriticitetssäkerhet vid händelser

SKB har valt att tillämpa både krav på underkriticitet vid två samtidiga händelser och DCP som medger möjlighet till kriticitet. Det är inte helt klart hur DCP tillämpas eller hur kriterierna kombineras. För båda kriterierna är kopplingen till händelseklasser väsentlig men något oklar.

3.2.3. Gränsvärden för effektiv neutronmultiplikationskonstant

SKB har valt att tillämpa gränsvärdet 0,95 för k_{eff} för relativt normala händelseförlopp, händelseklasserna H1 och H2. För mindre sannolika händelseförlopp, händelseklasserna H3 och H4 har gränsvärdet 0,98 för k_{eff} använts.

För händelseförlopp enligt händelseklass H5 har kriticitet bedömts endast som en restriktion. Något gränsvärde för underkriticitet krävs inte.

3.2.4. Referensfall utan kreditering för BA eller utbränning

SKB har tillämpat metoden med referensfall för att underlätta säkerhetsanalysen och för att minska komplexiteten och därmed potential för misstag.

3.2.5. Kreditering för brännbar absorptor eller för utbränning

SKB har under många år vid internationella möten och för SSM presenterat planer för BU-kreditering både för BWR- och PWR-bränsle.

Under senare tid har dessa planer ändrats och det är nu endast BA-kreditering som planeras för BWR-bränsle. Detta bör leda till viss uppdatering av redovisning för kopparkapsel och svar på hypotetiska frågor om kemisk separation av den brännbara absorptorn från annat material eller av fysisk separation av BA-kutsar eller av hela bränslestavar med BA från BA-fria delar av bränslet. Om inte BU-kreditering

tillämpas alls för BWR-bränsle så måste möjligheten att allt BWR-bränsle är helt färskt beaktas vid bedömning av separation av BA från BA-fritt uran.

För PWR-bränsle planeras framförallt BU-kreditering men tillämpning av BA-kreditering för PWR-bränsle vid Ringhals 3 och 4 nyligen visar att detta är en möjlighet i något fall med låg utbränning.

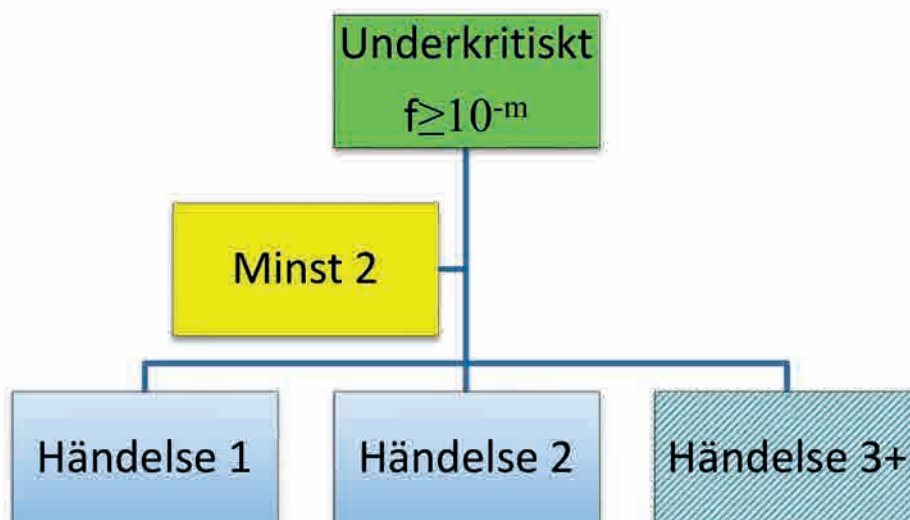
3.3. Granskarens bedömning

SKB:s indelning i händelseklasser med koppling av specifika händelser (inklusive kombinationer händelser) till säkerhetskriterier och acceptansnivåer är viktigt men något oklart.

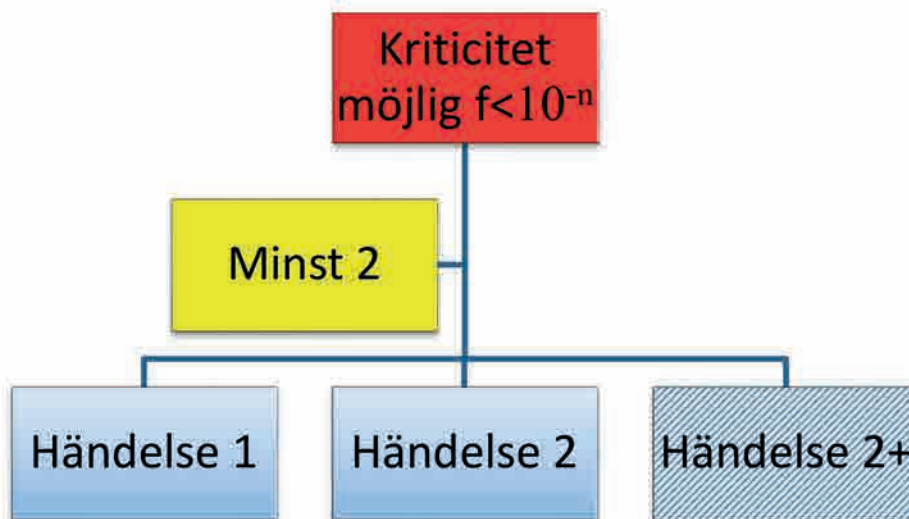
Ett klagörande om vilka säkerhetskriterier som skall gälla vid kombination av händelser bör göras av SKB. Avses DCP tillämpas enligt amerikansk praxis?

DCP enligt tolkningen att två händelser "får" leda till kriticitet bör undvikas för händelser vars förlopp och frekvens är svåra att bedöma. Inverkan av mänskliga faktorn har tidigare visat sig vara en dominerande orsak till kriticitetsolyckor. Det bör också noteras att i USA så tillämpas DCP oftast mycket konservativt där många parametrar kan ha orimliga värden utan att beaktas som händelser ("contingencies"). I USA finns också ett regelverk för anläggning, drift samt utbildning av personal som inte motsvaras av det som finns i Sverige.

Ett sätt att betrakta två-händelse-underkriticitet gentemot DCP är att jämföra Fig. 1 med förenklat händelsetråd (vad leder olika händelsekedjor till och med vilken sannolikhet) relativt Fig. 2 med förenklat felträd (vad behövs för att ett visst fel skall inträffa och vilken sannolikhet har det). Gul ruta avser villkor och blå rutor är kopplade med "och-grindar". Båda metoderna är lämpliga att användas samtidigt. DCP är oftast utformat som en rekommendation. Frekvenserna per år bestämda genom talen "m" och "n" skall kunna varieras för olika tillämpningar (värdet 6 används dock ofta). Streckad blå ruta avser att den kan behövas (minst två).



Figur 1: Underkriticitet krävs för minst två samtidigt pågående händelser med viss frekvens.



Figur 2: För möjlig kriticitet krävs minst två samtidigt pågående händelser med lägre frekvens.

Ett huvudskäl för att upprätta en utförlig sammanställning av förväntade och potentiella händelser är att det skall kunna följas upp kontinuerligt. Bristande identifiering av allvarliga händelser kan leda till skärpta krav medan en uppvisad pålitlighet kan ge viss lindring av de tidigt, kanske mycket konservativt satta kraven.

En tolkning av redovisningen (speciellt SKBdoc 1422108 och SKBdoc 1369704) inklusive koppling till säkerhetskriterier och acceptansnivåer samt användning av kriticitetsdetektorer och –larm har gjorts av EMS i Tabell 1. Kriterierna avser två samtidigt, lågfrekventa och oberoende händelser som antingen skall vara underkritiska (<1) eller kunna leda till kriticitet (DCP). En händelse enligt klasserna H1, H2 eller H3 specificeras som delhändelse i Tabell 1 och bör kombineras med andra händelser för att komma nära frekvensen 10^{-6} per år.

Larmkriterium har satts som beroende av potentiella konsekvenser för människa eller miljö av energifrigörelse vid en potentiell kriticitetsolycka. Det är etablerat, åtminstone i USA (NRC 10CFR 70.24), att kriticitet i en förvaringsbassäng normalt inte kräver kriticitetslarm. Vid andra anläggningar kan kriticitetslarm krävas baserat på kvantitet fissilt material av viss typ som hanteras och är då inte kopplat till händelser och potentiella konsekvenser av olycka.

Citat från NRC 10 CFR 70.24:

This section is not intended to require underwater monitoring when special nuclear material is handled or stored beneath water shielding or to require monitoring systems when special nuclear material is being transported when packaged in accordance with the requirements of part 71 of this chapter.

Ett sätt att definiera restrisk avseende kriticitetssäkerhet är att koppla det till krav på detektering, larm, utrymningsplanering och annan beredskap. Då bör restrisk kopplas till kombinationen av frekvens och potentiella konsekvenser om kriticitet

trots allt skulle uppkomma. Detta är kanske vad SKB avser. Det gör att det kan bli en överlappning mellan övre frekvensgränser för händelseklass H5 och restrisk.

Tabell 1.

Klass	Frekvens (per år)		Kriterium ($<1/DCP$)	Acc.-nivå (k_{eff})	Larmkriterium
	Undre gräns	Övre gräns			Delhändelse
H1	10^0		<1	$<0,95$	Delhändelse
H2	10^{-2}	10^0	<1	$<0,95$	Delhändelse
H3	10^{-4}	10^{-2}	<1	$<0,98$	Delhändelse
H4	10^{-6}	10^{-4}	<1	$<0,98$	Konsekvenser?
H5	$10^{-7?}$	10^{-6}	DCP	-	Konsekvenser?
Rest		$10^{-6?}$	DCP	-	Nej

BU-kreditering är en möjlighet, inte ett krav att beakta utbränning. BA-kreditering ger ofta ett "straff" om utbränning är realistisk. Det gäller hela KBS-3. Detta har tagits upp i avsnitt 2. Det är viktigt att skillnaderna mellan BA-kreditering och BU-kreditering förstås och beaktas i säkerhetsredovisning, kvalitetskontroll, utbildning, hanteringsinstruktioner och beredskap för händelser.

4. Metodik - Beräkningsmetoder

4.1. Beräkningsmetoder och validering

4.1.1. Beräkningsmetoderna SCALE och CASMO

Beräkningsmetoderna SCALE och CASMO går tillbaka till 1970-tal och till viss del även tidigare.

Båda beräkningsmetoderna är internationellt använda i mycket stor omfattning. Utvecklingen av SCALE vid ORNL finansieras huvudsakligen av de statliga organisationerna NRC och DOE i USA. SCALE är tillgänglig utan kostnad från NEA Data Bank. CASMO som utvecklas av Studsvik Scandpower är ett kommersiellt program.

Den senaste officiella versionen av SCALE är 6.1.3 som nyligen utkommit (samma funktioner som SCALE 6.1.2). Utvecklingen av en ny version SCALE 6.2 har presenterats under flera år men den blir klar tidigast under slutet av 2015. Betaversioner (testversioner) av SCALE 6.2 görs tillgängliga av ORNL för intresserade användare av SCALE. Avsikten är att hjälpa ORNL att hitta problem så tidigt som möjligt under utvecklingen samtidigt som användaren får information från de nya, förbättrade och ofta korrigerade metoderna i SCALE.

4.1.2. Metoder för validering

Validering av en beräkningsmetod omfattar hela kedjan från indataförberedelser till användning av metoden och till tolkning av resultaten. Olika delar av kedjan kontrolleras separat men det brukar gå under beteckningen verifiering. Oavsett hur noggrann verifieringen av olika steg har varit så är det ofta mycket vanskligt att göra en helhetsbedömning, en validering, utgående från sammansättning av delarna. Detta gäller i hög grad vid bestämning av k_{eff} och vid bestämning av inverkan av utbränning på bränslets egenskaper.

Inom området kriticitetssäkerhet är det praxis att göra validering genom beräkning av ett antal benchmarks som är baserade på kritiska eller nära kritiska experiment eller mätningar (här avses bland annat normal reaktordrift som inte direkt är experiment). Även reaktivitetsmätningar kan användas för validering. I princip bör det också gå att göra validering mot en metod som tidigare validerats tillförlitligt.

4.1.3. Benchmarks för validering

Sedan mitten av 1990-talet har OECD/NEA publicerat en sammanställning av utvärderade experiment tillsammans med benchmarks som baseras på experimenten. Sammanställningen görs i en årligen uppdaterad "handbok" (ICSBEP handbook) som ibland betecknas IHECSBE handbook baserat på den officiella titeln.

Under de sista tio åren har OECD/NEA publicerat en annan sammanställning av utvärderade reaktorfysikaliska experiment och mätningar. Även denna sammanställning görs årligen i en ”handbok” (IRPhEP handbook) Denna handbok kommer att innehålla mer benchmark för utbrännings- och BA-kreditering och en del kritiska experiment utförda i reaktormiljö överförs från ICSBEP-handboken till IRPhEP-handboken.

Ett tredje OECD/NEA-projekt (SFCOMPO) är också väsentligt för BA- och BU-kreditering. Det gäller sammanställning av utvärderade radiokemiska bestämningar av prover från bestrålat bränsle. Sammanställningen initierades först i Japan på 1990-talet. Här är avsikten främst att bestämma nuklidinventarier som ofta är en del av metodiken vid utbränningskreditering,

Electric Power and Research Institute (EPRI) har tagit fram och publicerat (EPRI 1022909, EPRI 1025203, EPRI 3002000306, EPRI 3002001948, EPRI 3002003073, NEI 12-16 Rev. 1, NEI brev till NRC 2015) mycket intressanta benchmarks baserade på mätningar vid rutinmässig kraftreaktordrift. Dessa mätningar ligger till grund för förslag till publicerat utkast i IRPhEP-handboken.

ORNL har gjort validering för utbränningskreditering av PWR-bränsle baserad på statistisk kombination av osäkerheter i mätningar och data för nuklider som ingår i använt bränsle. Denna validering har accepterats av NRC och ingår som underlag för SFST ISG-8 Rev.3. I detta ingår även beaktande av felladdning av bränsle med för låg utbränning.

4.1.4. Val av enskilda benchmarks

Traditionellt så baseras validering av beräkningsmetoder mer på specialistkänsla än på vetenskapliga kriterier. Olika typer av likheter mellan tillämpning och benchmark har uttolkats, ofta mycket subjektivt, för att välja ut vilka benchmarks som är lämpliga.

Känslighetsanalys kan visa hur variation i en viss parameter påverkar k_{eff} -värden för en tillämpning och en benchmark. Om båda är känsliga för denna parameter och osäkerheten är dominerande över andra parameterosäkerheter så kan ett enda benchmark ge en bra bild av bias och osäkerhet i beräkningsmetoden. Det kan vara svårt att skilja på bias och osäkerhet. Det finns alltid en viss osäkerhet i benchmarkvärden (specifikationerna är oftast exakta men inte resultaten).

Värden på c_k bestäms genom känslighetsanalys och kopplas till osäkerheter där dock endast kovarianser i utvärderade tvärsnitt beaktas. Värden på c_k har under de sista tio åren etablerats genom ORNL som den viktigaste metoden att välja ut benchmarks för validering av beräkningsmetoder.

Urvalsmetoden för att bestämma lämpligt benchmark för en tillämpning kan vara mycket viktig. Brister i metoden kan göra att farliga och kostsamma misstag görs.

4.1.5. Bearbetning av beräkningsresultat för benchmarks

Det är praxis, speciellt i USA, att kräva beräkningar av ett stort antal benchmarks för att sedan bearbeta beräkningsresultaten statistiskt. Det finns statistiska metoder som tydligt visar hur många experiment som behövs för att få en viss statistisk ”kvalitet”.

Standardavvikelsen multipliceras med en täckningsfaktor ("coverage factor") för att få önskad konfidens/sannolikhet att det "riktiga" värdet ligger inom ett visst område. I USA används ofta en faktor av ungefär 2 medan det i Europa är vanligt med en faktor 3. Ibland används tabeller i handböcker för att få "rätt" faktor.

För en specifik tillämpning är indata exakt specificerade och det korrekta värdet är en konstant. Varför används statistiska metoder för att bestämma denna konstant om det finns en noggrann mätning? Hur detta behandlas i redovisning och granskning framgår i avsnitt 4.2 respektive 4.3.

4.1.6. Bestämning av bias och osäkerheter i bias

En utvärderad bias i en metod för ett visst tillämpningsområde bestäms normalt som medelvärdet av den bias som erhålls för varje beräkning av en benchmark. En osäkerhet i biasen fås genom standardavvikelsen för avvikelserna mellan beräkningar och benchmarks. Dessutom finns en osäkerhet i varje benchmark och den har uppskattats i den utvärdering som finns i ICSBEP- eller IRPhEP-handböckerna.

En annan metod är att anpassa indata, i första hand tvärsnitt, till beräkningsresultaten så att dessa blir så bra som möjligt utan att ändra data utanför rimliga osäkerhetsgränser. Sekvensen TSURFER i SCALE baseras på denna metod.

4.2. SKB:s metoder och validering

4.2.1. Beräkningsmetoderna SCALE och CASMO

SKB har dokumenterat vilka versioner av SCALE och CASMO som använts liksom vilka tvärsnittsbibliotek.

SCALE 6.1 med tvärsnitt från ENDF/B-VII.0 har använts genomgående i den nya redovisningen för bestämning av referensfall (k_{eff}) och vid utbränningsberäkningar för PWR-bränsle. Även avklingning efter avslutad användning av bränslet i reaktor ingår.

CASMO 5 med tvärsnitt från ENDF/B-VII.0 har använts vid jämförelser av BWR-bränsle i grundfall (motsvarande referensfall) för olika bränsletyper och vid bestämning av antal BA-stavar och Gd_2O_3 -halter för bränsle med viss anrikning ^{235}U . Inverkan av utbränning är en väsentlig faktor där en topp av k_{eff} ofta nås innan utbränningen 15 GWd/tU (uran) nås. CASMO 5 används för bestämning av bränslets sammansättning (nuklidinnehåll) och för bestämning av k_{eff} för olika bränsletyper som funktion av utbränning. Även avklingning efter avslutad användning av bränslet i reaktor ingår.

4.2.2. Metoder för validering

SKB tillämpar valideringsmetoder som tagits fram av NRC i USA med starkt stöd från ORNL. Det innebär bestämning av bias och osäkerheter samt ett USL-värde som beräknas både med och utan extra marginal.

SCALE 6.1 har använts för känslighetsberäkningar, inklusive bestämning av c_k -värden. Även beräkning av USL-värden har gjorts med program som länkas till SCALE-paketet. SKB har beaktat korrelationer mellan benchmarks genom en subjektiv extra marginal. SKB har anlitat ORNL för användning av sekvensen SAMPLER i betaversion av SCALE 6.2 (Marshal 2014).

4.2.3. Benchmarks för validering

SKB har använt ICSBEP-handboken som underlag för benchmarks att testa SCALE med.

4.2.4. Val av enskilda benchmarks

SKB använder både direkt och indirekt (genom att använda NRC- och ORNL-dokumentation) c_k -värden för att bestämma gemensamma felkällor mellan tillämpning och benchmark.

4.2.5. Bearbetning av beräkningsresultat för benchmarks

För bestämning av USL-värden har SKB tillämpat programmet USL-1. Utvärdering av trender enligt praxis och standarder har tillämpats av SKB.

4.2.6. Bestämning av bias och osäkerheter i bias

Avseende korrektion för positiv bias har SKB valt att följa NRC:s exempel och inte beakta denna bias. Den sätts till noll.

Avseende tecknet för bias så har det redan diskuterats i avsnitt 2. SKB har vänt på definitionen av bias genom att sätta $\beta = 1 - k_c$. En positiv bias motsvarar då en underskattning av k_{eff} .

SKB tillämpar SFST ISG-8 Rev. 3 för BU-kreditering.

Behandlingen av bias kommenteras ytterligare i avsnitt 4.3.6.

4.3. EMS bedömning av metoder och validering

4.3.1. Beräkningsmetoderna SCALE och CASMO

Båda dessa metoder är så internationellt välkända och använda att någon ingående utvärdering inte är motiverad. Problem upptäcks emellanåt i SCALE och hanteras enligt granskarens mening mycket öppet och bra av ORNL. Problemen tas upp vid internationella arbetsgruppsmöten (typ OECD/NEA) men publiceras även vid konferenser, facklitteratur och i SCALE Newsletter. En del av problemen har varit allvarliga och kunnat påverka säkerheten om de inte upptäckts och diskuterats i tid.

SCALE utvecklas hela tiden med användarvänliga och kraftfulla metoder. Dessutom finns ofta flera alternativ för beräkningar som gör att utvärdering av specifika beräkningsrutiner underlättas utan att gå till ett helt oberoende programsystem.

Även om CASMO är kommersiellt så diskuteras även det vid arbetsgruppsmöten, vid internationella konferenser och i facklitteratur.

Granskaren har använt SCALE från första version SCALE-0 från 1980 och ingående program och tvärsnitt även något tidigare. I ett speciellt projekt under början av 1980-talet användes även CASMO version 2. Det finns nu liknande program som CASMO i SCALE men de har hittills varit mycket långsammare, inte lika enkla att använda och inte lika kraftfulla. Nya versioner av SCALE förbättrar detta hela tiden.

Under våren 2014 testade granskaren SCALE 6.2 betaversion 2 och i början av april 2015 erhöles betaversion 4 som nu installerats på flera datorer och har använts mycket flitigt vid denna granskning för känslighetsanalys och speciellt för bestämning av c_k -värden. Flera tidigare problem (Rearden WPNCS 2014) med SCALE 6.1 som har stor betydelse för SKB:s redovisning kan utvärderas med betaversion 4. Resultaten är preliminära eftersom det är en testversion men problemen är redan kända och kan således beläggas ytterligare.

Även SAMPLER som avses ingå i SCALE 6.2 har använts i version beta 2 under våren 2014 i samband med OECD/NEA-studier. Detta arbete fortsätter och avsikten är att göra nya beräkningar med SAMPLER i version beta 4. SAMPLER är ett mycket kraftfullt och flexibelt verktyg som dock kräver mycket datorkraft och många beräkningar.

Eftersom det fortfarande är en testversion av SCALE 6.2 så bör inte resultat accepteras som grund för säkerhetsavgörande beslut. Problemen med bestämning av c_k -värden har dock redan presenterats av ORNL och är beroende av felaktiga (alldeles för stora värden) kovarianser för plutoniumdata. Resultaten med beta 4 är därför av stort värde för att belässa problem med bestämning av c_k -värden.

Vid beräkningar med SCALE 6.2 beta 4 har utvärderade tvärsnitt från biblioteket ENDF/B-VII.1 använts.

En del resultat presenteras i Appendix 2.

4.3.2. Metoder för validering

Eftersom ett k_{eff} -värde för en exakt specificerad händelse är en konstant så bör den kunna bestämmas mycket exakt om så önskas. En enda bra mätning bör räcka som underlag för validering. Kvaliteten på mätningen kan bestämmas på olika sätt men så länge mätresultatet bekräftats vara korrekt så bör inget annat krävas.

För att detta skall gälla måste naturligtvis tillämpningen avse samma system med fissilt material.

Varför skulle en validering förbättras av att man tar ytterligare ett 50-tal mätningar med dålig kvalitet (stor osäkerhet) som grund för benchmarks? Praktiserade metoder ger dessutom större osäkerhet om många benchmarks med dålig kvalitet utnyttjas.

Exempel: en avståndsmätning görs med lasermetod och ger noggrannhet inom någon millimeter. Användning och avläsning av instrumentet är verifierade. Resultat av tidigare mätningar av objekt några millimeter närmare och några lite längre bort har bekräftats hålla angiven noggrannhet och precision. Om man tar in 50 personer som med ögonmått uppskattar avståndet i meter med flera hundra meters variation i svaren, vad ger det? Det försämrar i alla fall inte värdet av den noggranna mätningen och kan eventuellt användas för att hitta eller utesluta inverkan av mänskliga faktorn (exempelvis mycket grova redaktionella fel i dokumentationen).

Det finns en fara i att använda en enda benchmark och det är att dess utvärderade noggrannhet (bias) och precision (osäkerhet) inte är korrekta. Sådant händer och kan hänföras till den mänskliga faktorn. I det aktuella exemplet har denna kunnat uteslutas genom bekräftelser av resultatet.

Om flera benchmarks har en korrelerad osäkerhet, alltså samma felkälla, och denna är dominerande så hjälper det inte att ha många sådana benchmarks för att bestämma bias. Det blir en systematisk effekt av osäkerheten.

Problemet med potentiell inverkan av korrelationer mellan felkällor har fått ett mycket bra exempel. Det gäller den alldeles för höga osäkerheten som tilldelats värdet för ^{239}Pu nubar (medelantal neutroner per fission). Det påverkar samtidigt alla c_k -värden för benchmarks och tillämpningar där plutonium ingår. Acceptanskriterier för urval av benchmarks som tidigare trots uppfyllda visar sig nu inte vara det.

Det är i princip möjligt att många andra typer av felkällor än de som används för att bestämma c_k -värden (osäkerheter i utvärderade tvärsnitt) kan dominera fel i k_{eff} -värden. Ursprungsidén med användning av c_k -värden är att det är just dessa tvärsnitt som dominerar felen i k_{eff} . Det stämmer antagligen inte när det gäller riktigt stora fel (flera procent i k_{eff}).

Validering bör beakta användarrelaterad felfrekvens vid förberedelse av indata och vid tolkning av resultat.

Ett exempel på misstag vid beräkningar avseende utbränningskreditering och BA-kreditering avser en specifik aktion som görs specifikt för att få underlag för kriticitetssäkerhet. Bränslets nuklidsammansättning från viss beräkning tas direkt vid avstängning av reaktorn. Då skall halten ^{135}Xe sättas till noll direkt. I svenska säkerhetsrapporter har man några gånger missat att sätta halten ^{135}Xe till noll. Det har gjort att k_{eff} underskattats. Felen har upptäckts senare av författarna själva.

Vid beräkningar av benchmarks finns det facit som avslöjar när grova indatafel gjorts. Då är det bara att korrigera felet och göra om beräkningen. Valideringsarbetet kan i princip innehålla många sådana korrigeringar som inte avslöjas i slutrapporten eller beaktas i bias och osäkerheter. Oupptäckta eller av annan anledning okorrigerade användarfel vid beräkningar av benchmark kommer dock att ingå i den bias och osäkerhet som tillställs beräkningsmetoden.

Det är svårt för specialister på kriticitetssäkerhet utan tillgång till lämpliga resultat från mätningar från kraftreaktordrift att testa hur väl simulering av reaktordrift kan göras med tillgängliga metoder. EMS bedömer att de benchmarks som EPRI tagit fram och som i något annorlunda form föreslagits för IRPhEP-handboken är mycket realistiska och värdefulla. Förutom att de baseras på mycket omfattande mätningar

så använder de beräkningssystem där CASMO ingår. Det finns andra mätningar från kraftreaktor drift men inte tillgängliga som lätt användbara benchmarks.

4.3.3. Benchmarks för validering

ICSBEP- och IRPhEP-handböckerna innehåller många benchmarks som kan användas för test av metoder som kan tillämpas på färskt bränsle. När det gäller kreditering för BA och utbränning anser granskaren att mätningar från normal reaktordrift är bättre som underlag för test av beräkningsmetod i praktiken, åtminstone hittills. Om metoderna tillämpas rutinmässigt för design och utvärdering av sådana mätningar så fås mycket värdefull information om metodernas användbarhet, noggrannhet och tillförlitlighet även under stress. Metoderna kan anses bli validerade kontinuerligt.

Det är inte bara k_{eff} som är en viktig parameter för validering. Alla andra mätningar och beräkningar som använder en viss metod kan användas för testning. Detta gäller exempelvis beräkningar av effektfördelningar i reaktor vid drift. Bestämning av k_{eff} med alla beräkningsmetoder baseras, åtminstone i princip, på bestämning av neutronflöden med avseende på fördelning och energispektrum.

4.3.4. Val av enskilda benchmarks

Användning av SCALE 6.1 och TSUNAMI för bestämning av c_k -värden för fissilt material innehållande plutonium är suspekt. Problemorsak och direkta konsekvenser för HTC-experiment (NUREG/CR-6979) och MOX-experiment har redovisats av ORNL (Rearden WPNCs 2015). Det gäller även bestrålat bränsle. SKB har använt SCALE 6.1 och TSUNAMI direkt och även baserat redovisningen på sådana beräkningar gjorda för NRC av ORNL.

Huvudproblemet verkar vara data för ^{239}Pu och speciellt medelvärdet för antalet neutroner per fission ($\bar{\nu}$, betecknat som "nubar" på engelska). Enligt information från utvecklarna av SCALE är värdet alldeles för högt.

Validering av beräkningsmetoder är viktigt vid samarbete (ISO 11311:2011 och ANSI/ANS-8.12-1987) avseende standarder för tillämpning på MOX-pulver som är mer eller mindre modererat med vatten. Ett stort antal beräkningar med SCALE och dess TSUNAMI-verktyg har tidigare genomförts (Mennerdahl 2013).

Nyss erhållen betaversion 4 av SCALE 6.2 har använts för att få bättre information om problemen med c_k -värden. En del av detta redovisas i Appendix 2 eftersom sådana benchmarks och tillämpningar har studerats ganska ingående och då MOX är viktigt för validering av metoder för utbränningskreditering. SKB baserar sin metodik på utvärderingar och resultat från ORNL och NRC samt använder beräkningsmetoder framtagna av ORNL och NRC. Eftersom beräkningar av c_k -värden är väsentliga för slutsatser och rekommendation som ORNL/NRC lämnat så finns det anledning att vara försiktig. SKB:s kombinerade validering baserad på egna och ORNL:s beräkningar är inte så solid som antagits. Denna slutsats gäller inte bara SKB utan även anläggningsinnehavare och myndighetsansvariga i olika länder.

4.3.5. Bearbetning av beräkningsresultat för benchmarks

Den metod som SKB använder för att bestämma USL verkar mycket konservativ. Det beror till stor del på att man valt en stor extra marginal (0,05). Sannolikheten för kriticitet bör bestämmas med beaktande av att USL ligger långt ifrån kriticitet.

Samtidigt är urvalet av benchmarks och hantering av möjliga korrelationer (även odokumenterade) mycket subjektivt.

De felaktiga kovarianser, speciellt för ^{239}Pu nubar, som behandlas under 4.3.4 ger en mycket stark illustration av möjliga effekter av korrelation mellan dokumenterade mätresultat (experiment). Kovarianserna avser utvärderade mätresultat av tvärsnittsdata. De används inte som benchmarks utan som direkta indata till beräkningar av k_{eff} . Även benchmarks ingår som indata i bestämning av k_{eff} , dock inte i den direkta beräkningen utan i bestämningen av bias och osäkerhet i k_{eff} .

Felet i kovariansen för ^{239}Pu nubar gör att ett mycket stort antal c_k -värden samtidigt sänks från att ha indikerat bra benchmarks till att göra dem olämpliga eller knappt användbara. Det gäller även bestrålat bränsle och utbränningskreditering enligt data presenterade av ORNL. SKB baserar delvis sin redovisning på detta fel.

4.3.6. Bestämning av bias och osäkerheter i bias

SKB använder NRC:s guider som till stor del är baserade på ORNL:s arbete och metoder. Det är därför motiverat att även granska relevanta referenser.

SFST ISG-8 Rev. 3, avsnitt 4, sidan 7:

“Determination of the bias and bias uncertainty associated with actinide-only burnup credit should be performed according to the guidance in NUREG/CR-6361, Criticality Benchmark Guide for Light-Water-Reactor Fuel in Transportation and Storage Packages.”

NUREG/CR-6361 definierar och använder bias normalt. SFST ISG-8 Rev 3 använder dock bias med motsatt tecken, exempelvis överst på sidan 6:

” β_1 values should be added to the calculated system k_{eff} ”.

SKB har vänt på definitionen av bias genom att sätta $\beta = 1 - k_c$. Det ser inte bra ut och kan kanske bli ett säkerhetsproblem. Det bör åtminstone noteras i redovisningen att denna definition skiljer sig från de ANSI/ANS-standarder som hänvisas till.

I NUREG/CR-7108 finns i början (längst ned sidan xi) en ”Executive summary” som i stort sett diskuterar ”bias” och anger värden på bias utan att definiera vad som avses. Det finns dock en beskrivning:

”The results show that the PWR nuclide concentrations calculated with the SCALE 6.1 code system and the ENDF/B-VII nuclear cross-section data produce a small positive k_{eff} bias (**i.e., slight overprediction of k_{eff}**)”.

Detta är normal användning av bias och motsvaras av användning av bias i rapporten utom i ekvation (1) och när denna ekvation refereras till. Senare i avsnitt 2, sidan 3 i samma rapport anges:

“a bias that reduces the calculated value of k_{eff} is not considered in Eq. (1)”

Denna text anger att en underskattning av k_{eff} inte beaktas (biasen är ju något som ”automatiskt” ingår i det beräknade värdet). Avsikten är den motsatta; att en överskattning av k_{eff} inte beaktas (normalt av NRC). Denna text och ekvation (1) använder beteckningen bias som en bias-korrektion, alltså med motsatt tecken som normal bias (som i SFST ISG-8 Rev 3 och av SKB).

Ekvation (1) i NUREG/CR-7108 och ekvation (3.1) i NUREG/CR-7109 specificeras på samma sätt (en olikhet):

$$k_p + \Delta k_p + \beta_i + \Delta k_i + \beta + \Delta k_\beta + \Delta k_x + \Delta k_m \leq k_{\text{limit}}$$

NUREG/CR-7109 anger att termerna från ANSI/ANS-8.27 används i ekvationen, dock i ett något annorlunda format. Det stämmer dock inte; tecknet för bias är omvänt.

NUREG-7108 avsnitt 6.1.4 (sidan 33) ger ytterligare exempel på begreppsförvirringen med bias:

” The difference between the reference value, $k_{\text{eff-REF}}$, (i.e., k_{eff} for the calculated nuclide concentrations with no adjustments) and \bar{k}_{eff} represents the bias in the application k_{eff} resulting from isotopic bias,

$$k_{\text{eff}} \text{ bias} = k_{\text{eff-REF}} - \bar{k}_{\text{eff}} \quad (9)''$$

Här är alltså bias definierad på normalt sätt. Innebörden är att \bar{k}_{eff} ger en typ av benchmark-värde (medelvärde som visar uppskattning av korrekt värde). Bara några rader längre ned i ekvation (11) har bias i k_{eff} (β_i) använts på ett motsatt sätt. Helt klart är att här avses bias-korrektion. Avsnitt 6.2 ekvation (12) ger samma definition av bias som ekvation (9). Text, tabell 6.3 och figur 6.3 i samma avsnitt visar att bias används normalt (bias 0,002 ger en överskattning av k_{eff}).

I inledningen av avsnitt 7 i NUREG/CR-7108 anges:

” The k_{eff} bias [i.e., the term β_i in Eq. (1)] and k_{eff} bias uncertainty [i.e., the term Δk_i in Eq. (1)] were determined as a function of assembly average burnup.”

Detta är alltså motsägelsefullt, β_i används inte som k_{eff} bias i detta avsnitt utan som bias-korrektion. Extra tydligt blir det i tabellerna 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 och 7.6 i NUREG/CR-7108 där värden för bias anges korrekt (positiva värden eftersom k_{eff} överskattas, utom för ENDF/B-V i tabell 7.6). Det intressantaste är kanske en fotnot till alla tabellerna:

”Positive k_{eff} bias values are typically not credited in criticality safety analyses”

Detta stämmer oftast med NRC-licensiering. Det stämmer inte med ekvation (1) om β_i aldrig är positivt. I texten efter figurerna är det också korrekt:

”The calculation results for SCALE 6.1 and the ENDF/B-VII nuclear data indicate:

1. The calculated nuclide concentrations result in a slight overprediction of k_{eff} . The positive bias is significantly smaller than the uncertainty in the bias.”

Fotnot f till tabell 7.6 avser användning av ENDF/B-V som ger negativ bias.

”The values of bias and bias uncertainty in k_{eff} [(i.e., $\beta_i + \Delta k_i$ in Eq. (1))] are 0.0136, 0.0168, and 0.0205 for the assembly average burnup values of 10, 25, and 40 GWd/MTU, respectively”

Siffrorna visar återigen att β_i i ekvation (1) använts som en bias-korrigerings, inte som en beteckning för bias.

Även NUREG/CR-7109 specificerar bias på ett korrekt sätt utom i ekvation (3.1). Ett exempel är avsnitt 3.2.5 (sidan 13):

”the *Bias* is the calculated k_{eff} minus the critical experiment evaluator expected k_{eff} ”

Avsnitt 3.2.6 (sidan 19) i NUREG/CR-7109 ger en bra översikt om ORNL:s egentliga inställning till bias (till skillnad mot de motsägande tillämpningarna i NUREG-rapporterna) och ger en förklaring om hur komplicerat läget skulle bli om ett stort antal partiella bias-värden skall kombineras från olika källor:

“The bias is the best-estimate difference between calculated and expected k_{eff} values. A bias is called positive when the computational method calculates higher k_{eff} values than are expected. In general, credit is not taken for positive biases in safety analyses. This does not mean that every positive contributor toward the bias should be discarded. The overall bias is a combination of many positive and negative biases. Discarding positive partial biases just because they have been explicitly quantified is not appropriate.”

Avsnitt 6.2.2 (sidan 51) i NUREG/CR-7109 ger inkorrekt information:

”Table 6.9 presents combined bias and bias uncertainty results when nonparametric analysis techniques are used to account for the non-normality of the distribution, which would replace $\beta + \Delta k_\beta$ in Eq. (3.1).”

Tabell 6.9 ger “bias and bias uncertainty (Δk)” som negativa värden, exempel: ” -3.06×10^{-2} ”. Sätter man in detta värde i ekvation (3.1) får man det lättare att klara gränsvärdet vilket knappast är avsikten. Det är direkt fel. Ekvation (3.1) och texten kring den verkar vara skriven av andra personer än de som skrivit resten av rapporten. Motsvarande gäller även för ekvation (1) i NUREG/CR-7108.

En slutsats av alla dessa citat och kommentarer är att om bias definieras med olika tecken i olika källor så blir en sammanställning av säkerhetsredovisning komplicerad och misstag troliga. En underskattning av k_{eff} (uppskattat värde är lägre än det sanna värdet) som kallas positiv bias kan av misstag sättas till noll av en annan person än den som gjort bestämningen av underskattningen.

5. EMS svar på specifika frågor av SSM

5.1. Metodik för kriticitetssäkerhetsanalyserna

5.1.1. Är beskrivning av metodiken tillräcklig och entydig?

Metodiken beskrivs i huvudsak både tillräckligt och entydigt av SKB. Undantag har delvis diskuterats i föregående avsnitt. De avser:

- Det är svårt att förstå hur händelser och speciellt händelsekombinationer bestäms med avseende på frekvenser. Detta har inte gjorts av SKB i tidigare redovisning för Clab och är alltså nytt.
- SKB hänvisar till två kriterier för kriticitets säkerhet. Ett för Clab etablerat kriterium om att två lågfrekventa, samtidiga och oberoende händelser skall klaras utan kriticitet. Dessutom hänvisas till Double Contingency Principle (DCP) som medger att kriticitet inträffar vid liknande kombination av händelser. Hur görs detta?
- Validering av beräkningsmetoder är inte komplett. Testning av användning under någon sorts belastning (tid, ekonomi, programproblem, datorproblem, etc.) kan skapa problem som skulle märkas vid rutinmässig användning men inte vid valideringsprojekt. Detta kan vara speciellt viktigt för utbränningsberäkningar. Erfarenheter från rutinmässig tillämpning av beräkningsmetoderna bör dokumenteras.

5.1.2. Är metodiken (standarder, guider, etc.) korrekt tillämpad?

Metodiken är i huvudsak korrekt tillämpad av SKB. Undantag har delvis diskuterats i föregående avsnitt. De avser:

- ANSI/ANS-8.27 innehåller en ekvation där beräkningsbias finns med som en metodrelaterad term. SKB definierar bias med motsatt tecken och använder denna definition i en ekvation men inte i övrigt.
- I samma ekvation i ANSI/ANS-8.27 finns osäkerhetstermen Δk_i avseende nuklidinnehåll med som en indatarelaterad term (vid den metod som SKB tillämpar). SKB inkluderar indataosäkerheten Δk_i i metodens osäkerhet (USL-värde). Avsikten i standarden, vid SKB:s val av alternativet med separat bestämning av nuklidsammansättning, är att denna sammansättning är indata till metoden och därför beror på användare och tillämpning. Osäkerhet i dessa indata beror på vilken metod som använts för att få fram dem, inte på metoden att bestämma k_{eff} .
- SKBdoc 1422106 gör ett påslag till k_{eff} för att ta hänsyn till osäkerhet i nuklidinnehållet som presenteras i tabell 10-1 och som är hämtat från NRC-guiden. Det aktuella värde som tas från tabellen motsvarar Δk_i i metodikrapporten (SKBdoc 1369704).
 - En förutsättning för att värden från SFST ISG-8 Rev 3 skall användas är att det finns likhet mellan aktuell tillämpning och den fiktiva transportbehållaren GB-32. Detta uttrycks i Appendix A av

SFST ISG-8, avsnitt 5 sidorna A-20 och A-21 som:

“It is acceptable for the applicant to use the β_i and Δk_i values from Tables A-3 and A-4 directly, in lieu of an explicit depletion validation analysis, provided the following conditions are met:

- ...
- the applicant can justify that its design is similar to the hypothetical GBC-32 system design used as the basis for the NUREG/CR-7108 isotopic depletion validation, and
- ...

... Demonstration of system similarity to the GBC-32 should consist of a comparison of materials and geometry, as well as neutronic characteristics such as H/X ratio, EALF, neutron spectra, and neutron reaction rates. In case the actual design is significantly different from the GBC-32 cask, or ..., the applicant should use the direct difference or isotopic correction factor methods discussed previously. ”

Enligt SKBdoc 1422106 avsnitt 10.5 verkar SKB ha begränsat jämförelsen med GBC-32 till bestämning av c_k . Denna koefficient visar likheten mellan dominerande felkällor i de båda systemen. Likheter i fysikaliska parametrar, såsom det beskrivs ovan, täcks inte av så väl av c_k . SKB hänvisar till c_k -värden över 0,90. Efter korrektion för kända brister i SCALE 6.1 kan dessa värden sjunka, kanske till och med under 0,80.

5.1.3. Händelser, händelseförlopp och scenarion?

Clab har varit i drift under drygt fyrtio år utan att, såvitt granskaren känner till, något väsentligt ifrågasättande av godkänd säkerhetsanalys gjorts. För nuvarande Clab bedöms därför inventering och beskrivning av händelser, händelseförlopp och scenarion som tillräckligt heltäckande även på detaljerad nivå.

Vid kombination med inkapslingsdelen i Clink-anläggningen kommer verksamheten att ändras något. Säkerhetsredovisningen kommer att uppdateras väsentligt med avseende på BU-kreditering för PWR-bränsle och modifierad tillämpning av BA-kreditering. Verksamheten är inte helt fastställd. För Clink bedöms dock inventering och beskrivning av händelser, händelseförlopp och scenarion som tillräckligt heltäckande i den övergripande fas som aktuell ansökan avser. Eventuella brister kommer att hittas vid ingående granskning på detaljnivå och lämpliga lösningar som klarar kriticitetssäkerheten förväntas inte ge några svårigheter.

Avseende försluten kopparkapsel med antaget kapselbrott blir frågan mer komplicerad:

5.1.3.1. För intakt kapsel i övrigt

så ger in-läckage av vatten och extremt goda reflektoregenskaper av gjutjärn ett nära optimalt scenario. Skulle det uppkomma håligheter i

gjutjärn mellan bränslepositioner kan k_{eff} öka vilket också beaktats i SKB:s säkerhetsredovisning. Kvalitetskontroll kommer att visa om gjutjärnsinsatserna har den höga medeldensitet och likformighet som antagits i säkerhetsredovisningen.

5.1.3.2. Med annan reflektion eller neutronkoppling

med andra kapslar så bedöms redovisningen för intakt kapsel vara tydlig och korrekt. Det blir mycket svag inverkan på k_{eff} från reflektion eller neutronkoppling med andra kapslar. Koppar är en mycket bra neutronreflektor, i stort sett bättre än alla andra möjliga material, förutom gjutjärn.

5.1.3.3. Omfördelning av material inuti kapsel

ger teoretisk potential för kriticitet. Sådana scenario med rimlig sannolikhet verkar ha beaktats av SKB. Analyser av ytterligare scenario kan vara motiverade men förväntas kunna lösas på ett säkert sätt. En fråga avser huruvida stavar med BA-kutsar kan skadas lättare än BA-fria stavar under lång tid (kan potentiellt göra bränslet BA-fritt). Andra potentiella parametrar är separation av plutonium och uran i bränslet samt förlust av gjutjärn mellan bränslepatroner. SKB har beaktat dessa frågor men det kräver ingående kunskaper om kemiska och geologiska förhållanden för att bedöma rimligheten. En hög grad av subjektivitet kan inte undvikas.

5.1.3.4. Omfördelning utanför en eller flera kapslar

ger ännu större teoretisk fara för kriticitet. Sådana scenario med rimlig sannolikhet verkar ha beaktats av SKB. Analyser av ytterligare scenario kan vara motiverade men förväntas kunna lösas på ett rimligt säkert sätt. I praktiken verkar de kombinationer av geometri och koncentration av fissila nuklider som krävs för kriticitet mycket osannolika. Även här kan en hög grad av subjektivitet inte undvikas.

5.1.4. Beskrivning av tillämpning av BA-kreditering

5.1.4.1. Hur tillämpas metoden?

Den tillämpas i aktuell redovisning endast för BWR-bränsle med en anrikning ^{235}U över en viss nivå. Om BA-kreditering för PWR-bränsle blir aktuellt (som vid Ringhals 3 och 4) så kan metoden behöva anpassas till detta. Metoden är konservativ genom att ett maximalt värde för k_{eff} under konservativa reaktordriftförhållanden bestäms. Allt bränsle antas kunna ha samma maximala sammansättning samtidigt. Mycket hög voidhalt antas kunna förekomma i den bränslekonfiguration som endast finns i nedre delen av bränslet.

5.1.4.2. Har metoden tillämpats korrekt?

Utbränningsinverkan har bestämts med CASMO, alltså samma metod som används normalt vid kärnkraftverk runt hela världen. Validering av denna metod sker kontinuerligt genom rutinemässig tillämpning på verklig drift med verifikation av att resultaten är som förväntade. Eventuella svagheter i användarvänlighet, tillförlighet och effektivitet har slipats bort genom metodens kommersiella karaktär. Valideringen är antagligen mer tillförlitlig än för traditionell validering av metoder för kriticitetssäkerhet.

Referenser till detta underlättar, liksom de som fanns som villkor för nuvarande BA-kreditering vid Clab. Det finns möjligheter till inverkan av mänskliga faktorn vid beräkningar (exempelvis genom glömd närvaro av ^{135}Xe) men genom att så stort antal beräkningar av olika bränsletyper gjorts så är det inte troligt att mycket stora fel gjorts och sedan upprepats. Det finns numera möjlighet att göra oberoende kontrollberäkningar med bra metoder som är avsedda för kriticitetssäkerhet. Sådana bra metoder fanns inte vid tiden för granskning av tidigare BA-kreditering vid Clab. Administrativ kontroll av bränslets initiala sammansättning kommer att krävas liksom tidigare.

5.1.4.3. Internationellt etablerade standarder och guider?

Det finns ingen internationellt etablerad standard specifikt avsedd för BA-kreditering. ANSI/ANS-8.27 som avser BU-kreditering är dock avsedd att täcka in beräkningsaspekter (inte säkerhetsaspekter) avseende BA-kreditering. Nästa version (endast redaktionella förändringar efterfrågas, maj 2015) och innehåller ett appendix som avser typisk BA-kreditering för BWR-bränsle i USA. SKB hänvisar till ANSI/ANS-8.27 och förväntas beakta det exempel (inte normerande) som ett appendix till standarden kommer att innehålla.

5.1.4.4. Tillämpas standarder och guider på rätt sätt?

En färskt utkommen (april 2015) NRC-rapport, NUREG/CR-7194, framtagen av ORNL behandlar BA-kreditering utförligt. Förhållandena skiljer sig något från de som tillämpas av SKB och det finns underligheter men i stort sett är rapporten värdefull och tillämplig på BA-kreditering inom KBS-3. Någon avgörande brist i SKB:s BA-kreditering har inte observerats vid genomgång av ANSI/ANS-8.27 och NUREG/CR-7194.

5.1.5. Beskrivning av tillämpning av BU-kreditering

5.1.5.1. Hur tillämpas metoden?

Metoden avses tillämpas enbart för PWR-bränsle enligt NRC guide (handledning) SFST ISG-8 rev. 3 samt ANSI/ANS-8.27. Det innebär traditionell BU-kreditering dock med ökad handledning och flexibilitet (jämfört med tidigare utgåvor av SFST ISG-8) avseende krav på verifiering av utbränning. Direkta mätningar krävs inte nödvändigtvis och ISG-8 rev.3 ger handledning genom att specificera hur potentiell felladdning kan hanteras. Dessutom finns omfattande underlag för validering av beräkningsmetod för tillämpning av full BU-kreditering med många aktinidnuklider och fissionsprodukter. Tillämpning av handledningen förutsätter enligt NRC att användaren har tillgång till kommersiella franska benchmarks i serien HTC. Tillämpningen underlättas av användning av SCALE 6.1 (kan betecknas som NRC:s metod eftersom de initierat och sponsrat utvecklingen). SKB har möjlighet att verifiera utbränningen på olika sätt, inklusive kontroll av bokföring vid verken. Vissa former av mätningar avsedda för andra syften kan också användas.

5.1.5.2. Har metoden tillämpats korrekt?

Det är tveksamt om valideringen av beräkningsmetoden SCALE 6.1 är tillräcklig. Bestämningen av c_k -värden med SCALE 6.1, speciellt för system innehållande plutonium (typ använt bränsle), har visat sig leda till stora fel åt det negativa hållet. MOX-bränsle och speciellt HTC-experimenten som använts av ORNL och NRC skall ha mycket lägre c_k -värden än vad som SFST ISG-8 Rev.3 baseras på. SKB verkar inte heller hänvisa till rättigheter att använda HTC-experimenten för validering i Sverige. Det finns knappast några tvivel om att SCALE kommer att kunna användas för tillförlitlig utbränningskreditering av PWR-bränsle. Bättre validering kan dock behövas.

5.1.5.3. Internationellt etablerade standarder och guider?

ANSI/ANS-8.27 och SFST ISG-8 Rev. 3 har tillämpats. Det är en modern standard och en modern guide.

5.1.5.4. Tillämpas standarder och guider på rätt sätt?

Som nämnts under 5.1.2 och 5.1.3 finns det vissa brister som kan åtgärdas eller kompenseras för innan detaljerad redovisning behöver sammanställas.

5.1.6. Metod för validering av kriticitetsberäkningar.

5.1.6.1. Är valideringsunderlaget av tillräcklig kvalitet?

Det beror på hur stor extra säkerhetsmarginal som sätts till kriticitet. Med ett gränsvärde för k_{eff} av 0,95 inklusive beaktande av osäkerheter så är säkerhetsmarginalen mycket stor och viss osäkerhet i validering av beräkningsmetoder kan anses ingå. Det är dock oklart hur SKB tillämpar DCP vilket kan påverka nödvändig noggrannhet i beräkningsmetoder. Det går antagligen att minska osäkerheten genom användning av förbättrade metoder i SCALE 6.2 som förväntas utkomma under slutet av 2015.

5.1.7. Beskrivning av valideringsmetodik

Det finns ingen klarhet i vilken metodik som använts och hur den validerats. Referens till ANSI/ANS-8.24, ANSI/ANS-8.27 samt speciellt till SFST ISG-8 Rev. 3 leder i sin tur till mer detaljerat underlag. Detta betyder dock inte att användningen av valideringsmetodiken är fullständig eller korrekt, se tidigare kommentarer om c_k -värden, validering under rutinmässiga former samt avsaknad av jämförelser med HCT-benchmarks.

5.1.8. Tillräckligt små osäkerheter?

Om osäkerheterna som behandlas statistiskt enligt 95/95 % konfidens/sannolikhet vid jämförelse med acceptansnivå för k_{eff} skulle vara stora i förhållande till säkerhetsmarginalen så skulle de kunna bedömas som oacceptabla. En standardavvikelse av cirka 0,01 i k_{eff} -värdet är en rimlig gräns för ”stor” osäkerhet. Det verkar inte som om sådana stora osäkerheter finns kvar utan de som eventuellt har funnits har beaktats på ett konservativt sätt.

5.1.9. Osäkerheter bland annat vid k_{eff} -beräkning

Oftast används konservativa värden för ingående parametrar. Osäkerheter blir därmed beaktade. Vid statistisk bearbetning av osäkerheter tillämpas normalt 95/95 % konfidens/sannolikhet och krav på normalfördelning. Om fördelningen är skev så finns andra metoder.

5.1.9.1. Korrekt hantering av osäkerheter?

Bland annat avses om osäkerheter i k_{eff} -beräkning gjorts på rätt sätt? Ja, i stort sett. Olika typer av korrelationer är fortfarande en öppen fråga. De påverkar främst validering och är lättare att beakta vid tillämpningar.

5.1.10. Osäkerhetsinverkan för aktuell tillämpning

Bestämning av dominerande osäkerhetskällor i tvärsnitt är en svag punkt som visat sig efter att SKB gjort sin redovisning. Känslighetsstudier som använder så kallade kovarianser i utvärderade tvärsnitt och är baserade på SCALE 6.1 är inte tillförlitliga. Speciellt gäller det system innehållande plutonium (alltså även använt kärnbränsle). Kommande version SCALE 6.2 förväntas ha åtgärdat dessa brister. Hur stor betydelse de har för SKB:s redovisning är oklart. ORNL har dock meddelat att c_k -värden där MOX-benchmarks och HTC-benchmarks ingår överskattats betydligt. Detta gäller antagligen också vid jämförelse av ORNL:s transportbehållare (NUREG/CR-6747 för PWR) som används som underlag för SFST ISG-8 Rev.3 (NUREG/CR-7157 för BWR är väsentlig för granskningen). Problemet har bekräftats för MOX-benchmarks inom ramen för aktuell granskning genom EMS-beräkningar med SCALE 6.2 beta 4.

Användningen av c_k -värden förutsätter att den dominerande osäkerheten i beräkningar beror på osäkerheter i utvärderade tvärsnittsmätningar. Erfarenheterna är nu omfattande avseende större osäkerheter på grund av andra brister och felaktig användning av metoder. Ytterligare känslighetsanalyser som visar hur potentiella fel i olika parametrar påverkar säkerhetsmarginalen är motiverade. SKB:s försök att beakta korrelationer mellan osäkerheter i benchmarks visar att SKB:s avsikter är att få full klarhet om osäkerheter. Det är möjligt att minska dessa osäkerheter betydligt.

Direkta erfarenheter från jämförelser mellan mätningar och beräkningar i samband med reaktordrift är mycket värdefulla. Ofta föregår beräkningar mätningar (design) vilket ger en mycket hård test. Den redovisning som SKB (och andra såsom ABB Atom, Vattenfall och Studsvik) avseende styrkande av metodernas tillförlitlighet är mycket värdefull. Även om den baseras på konfidentiell information så bör informationen kunna sammanställas utan att avslöja sådana detaljer. Publicerade benchmarks baserade på rutinmässig reaktordrift och uppföljning kan också vara mycket värdefulla. Här avses bland annat EPRI benchmarks (exempelvis EPRI 1022909) och många studier i samband med det nu nedlagda slutförvaringsprojektet Yucca Mountain i USA.

Helhetsintrycket är att SKB trots allt gjort rimliga känslighetsanalyser med tanke på konservativa antaganden och valda säkerhetsmarginaler. Undantaget är bestämning av c_k -värden för jämförelse av benchmark och tillämpning där bestrålat bränsle eller MOX ingår.

5.2. Konservatism av krav och acceptanskriterier

Som tidigare nämnts är det lite oklart vilka kriterier som använts. Det kan vara så att tidigare etablerat kriterium för Clab om underkriticitet vid två samtidiga, lågfrekventa och oberoende händelser fortfarande kommer att användas. Double Contingency Principle (DCP) som ofta hänvisas till i USA kanske inte avses tillämpas av SKB på det sätt som görs i USA. SKB hänvisar till båda kriterierna.

Avseende acceptanskriterier så är det vanligen mycket konservativt att använda gränsvärdet 0,95 för k_{eff} . Även gränsvärdet 0,98 kan vara konservativt om enbart underkriticitet krävs. Konservatism kan dock bara slutgiltigt bedömas genom att undersöka vilka avvikelser som krävs för att få kriticitet. Enbart värden på k_{eff} räcker inte. SKB:s beräkningsresultat ger oftast direkt eller indirekt parameterinformation.

Någon annan väsentlig brist än den avseende DCP har inte hittats i SKB:s avsikt att tillämpa krav och acceptansnivåer konservativt. Om något fel skulle upptäckas vid detaljerad säkerhetsredovisning eller vid granskning av sådan så kan felet lätt åtgärdas.

5.3. Utbränningsverifiering vid BA- och BU-kreditering

Med den metod för BA-kreditering för BWR-bränsle som tillämpats vid Clab och som föreslås för hela KBS-3 så finns det ingen anledning att kräva verifiering av utbränning. Det kan dock vara bra att känna till utbränningen av beredskapsskäl inför oväntade händelser. Frågan och följande underfrågor är därför relevanta enbart för framtida BU-kreditering för PWR-bränsle som hanteras eller kommer att hanteras i Clab och vid placering av bränsle i kopparkapslar i Clink.

5.3.1. Har SKB beskrivit metoden för att verifiera utbränning?

Avseende planerad användning av metod för BU-kreditering för PWR-bränsle så hänvisar SKB till SFST ISG-8 Rev.3 (ger rimliga alternativ till mätning) samt nämner även eventuella kompletterande mätningresultat motiverade av andra skäl än BU-kreditering.

Drift av kärnkraftverk förutsätter kontroll av bränslets utbränning innan återstarter efter omladdningar. Det förekommer fel, ibland mycket grova enligt internationella presentationer. I reaktorn finns instrument som kan avslöja oavsiktlig kriticitet under omladdning. Vid hantering i Clab och senare har det funnits mycket lång tid att upptäcka felaktiga transporter av lågutbränt bränsle. Hur allvarlig felaktig placering av bränsle kan bli i KBS-3 beror på vilket bränsle som levererats och vilka marginaler som finns.

Det är rimligt att anta att SKB tillsammans med reaktorinnehavare kan dokumentera och identifiera varje bränslepatron under lång tid utan dramatiska fel. SKB har beskrivit hur bränslepatroner med starkt avvikande specifikationer kan behandlas separat. Detta är rimligt eftersom framtida avvikelser inte är kända.

Detta är en detaljfråga där möjligheten uppfattas som mycket god att klara utnyttjande av databaser från kraftverken utan att vara beroende av mätningar för varje bränslepatron.

5.3.2. Är beskrivningen tillräcklig och entydig?

Det finns ingen detaljerad beskrivning av utbränningsverifiering. Principerna och praxis baserade på SFST ISG-8 Rev. 3 kan anses vara beskrivna tillräckligt och entydigt.

5.3.3. Hur försäkras korrekt utbränning?

Detta kommer att variera för olika utbränningskrav för Clab och för kopparkapsel. Det finns många sätt att styrka att nominella specifikationer från kraftverken stämmer tillräckligt. Vid bestämning av reaktivitetstopp vid BA-kreditering kan beräkningsfel uppkomma som gör att den utbränning som motsvarar verklig reaktivitetstopp avviker något från den beräknade. Sådana osäkerheter beaktas i redovisningen för Clab och även för Clink. Som nämnts tidigare så ger det ingen anledning att verifiera utbrännings för BWR-bränsle.

5.3.4. Tillräckligt små osäkerheter i utbränning

Som nämnts ovan så är detta inget problem vid BA-kreditering eftersom utbränningen är ointressant (utom vid beredskapsåtgärder vid extrema händelser då utbränningen skulle kunna krediteras tillfälligt).

SKB:s möjligheter att klara tillräcklig begränsning av osäkerheterna i utbränning bedöms mycket goda.

5.3.5. Har händelsen av felaktiga utbränningsdata beaktats

SKB avser att följa guiden SFST ISG-8 Rev.3 som behandlar flera olika fall av felplacering av ett eller flera bränslepatroner av typ PWR. Huruvida denna guide är tillräcklig för tillämpning i Sverige har inte bedömts än. Det är rimliga krav och de kan vid behov anpassas till svenska förhållanden. Detta kräver en detaljerad säkerhetsredovisning av BU-kreditering för PWR-bränsle. Det krävs normalt inte i detta stadium av behandling av SKB:s ansökan.

5.4. BA- och BU-kreditering: Felplacerat bränslet

Avseende BA-kreditering för BWR-bränsle så är enda möjligheten till felplacering av bränsleelement att detta innehåller högre anrikning ^{235}U , mindre närvaro av BA eller annan variation av bränsledesign från de som säkerhetsbedömts och godkänts för transport från kraftverken. En anledning till annan design skulle kunna vara att stavar tagits ut från bränslepatron. SKB har planer för hur sådana fall kommer att beaktas. Det går att räkna på när det finns sådana fall i Clab eller vid kraftverken.

5.4.1. Har sådana händelser analyserats?

Det finns beräkningar som visar effekten av uttagna stavar från BWR-patroner och den är inte så dramatisk så länge det inte gäller uttag av BA-stavar från färskt eller lågutbränt bränsle.

Avseende BU-kreditering finns omfattande säkerhetsanalys i underlaget för NRC:s guide SFST ISG-8 Rev.3. En så detaljerad granskning för KBS-3 har inte bedömts motiverad på nuvarande stadium.

5.4.2. Är analysen tillräckligt omfattande?

Avseende BA-kreditering för intakt BWR-bränsle bedöms analysen vara tillräckligt omfattande och det är nödvändigt eftersom sådan kreditering tillämpas vid Clab sedan länge. För slutförvaring kan stabiliteten i postulerad närvaro av BA (i bestrålat bränsle kan BA vara helt borta) behöva redovisas ytterligare.

Avseende BU-kreditering för PWR-bränsle är, liksom ovan, bedömningen att det är för tidigt att kräva detaljerad analys. SKB:s möjligheter att klara tillräckligt omfattande analys är mycket goda. Vid Clab förväntas behovet av BU-kreditering vara lågt och det gör en tillräckligt omfattande analys enkel att genomföra. För kopparkapseln behövs mer detaljerad redovisning som visar hur analysen ges stöd genom tillräcklig verifiering av utbränningen (betydligt högre utbränning än i Clab kommer att krävas). Det verkar dock rimligt att detta klaras utgående från aktuell redovisning.

5.5. EMS:s samlade värdering av granskning

Denna samlade värdering görs under 6.1 för Clab och under 6.2 för inkapslingsdel av Clink och för slutförvar.

5.6. Funna brister och förbättringsförslag.

Denna sammanställning ingår i avsnitt 6.1 och 6.2.. Där ingår även förslag till SSM.

5.6.1. Brist som gör BA- eller BU-kreditering vid Clab olämplig?

Ingen sådan potentiell brist har hittats.

5.7. Granskning som inte täcks in av SSM:s frågor.

Grundläggande begrepp som behövs för en tydlig säkerhetsredovisning, kvalitetskontroll, utbildning, instruktioner, olycksberedskap med mera diskuteras i avsnitt 2. En del av de viktigaste begreppen tas upp även i avsnitt 3 och avsnitt 4. Anledningen är att vissa oklarheter hittats i redovisning och att sådana oklarheter kan bidra till säkerhetshotande händelser. SKB uppmanas att gå igenom användningen av vissa begrepp för att öka klarheten.

5.8. Förhållanden som kan hota KBS-3-metoden

Inga sådana förhållanden har identifierats.

5.9. Övrigt:

5.9.1. Frågor till SKB under granskningstid.

Inga specifika frågor har lämnats till SSM för vidarebefordran till SKB under granskningen.

5.9.2. Granskningsstöd till SSM under granskningstid.

SSM har erhållit svar på en del frågor under granskningen.

6. EMS övergripande utvärdering

6.1. EMS värdering av underlag för Clab

Clab har varit i drift under lång tid och någon information har inte hittats som ger upphov till tveksamhet om möjligheten att upprätthålla fortsatt kriticitetssäkerhet under överskådlig tid.

Den nya redovisningen avseende BA-kreditering för BWR-bränsle är tydlig och baseras på mycket erfarenhet och användning av etablerade beräkningsmetoder. Detta är speciellt viktigt avseende utbränningsberäkningar som validerats genom rutinmässig tillämpning på kraftreaktordrift. Motsvarande validering med traditionella benchmarks baserade på kritiska experiment är svår att genomföra och skulle inte bli lika tillförlitlig.

BU-kreditering för BWR-bränsle har tidigare utvärderats av SKB men är inte längre aktuell.

För PWR-bränsle finns det vare sig BA- eller BU-kreditering vid Clab. Den nya redovisningen där Clab ingår som en del av KBS-3 innehåller BU-kreditering för PWR-bränsle. Det är en etablerad metod där amerikanska standarder och NRC guide tillämpas av SKB. De resultat som finns i granskad redovisning visar att ganska liten BU-kreditering möjliggör alla förutsedda bränsletyper i Clab.

I samband med tidigare ansökningar om uppförande och drift av Clab liksom vid förändringar har identifiering av händelser och händelsekombinationer som skulle kunna hota kriticitetssäkerheten genomförts för nuvarande verksamhet vid Clab.

I samband med SSM:s granskning av KBS-3 har det framgått att en uppdatering av redovisningen avseende kriticitetssäkerhet vid Clab är motiverad. SKBs sammanställning av standarder, säkerhetskriterier och acceptansnivåer som avses tillämpas på KBS-3 bör tillsammans med en samlad inventering och utvärdering av identifierade händelser tillämpas på uppdaterad redovisning för pågående verksamhet vid Clab. Uppdateringen inkluderar förändringar av BA-kreditering för BWR-bränsle och ny tillämpning av BU-kreditering för PWR-bränsle.

Det finns anledning för SSM att kontrollera några av de säkerhetsbedömningar som gjorts tidigare och som kan påverkas av nya eller reviderade metoder (BU- och BA-kreditering) liksom av nya kriterier och eventuellt nya acceptansnivåer. Följande punkter bör beaktas:

1. Den validering (bestämning av bias och osäkerheter) i beräkningsmetoder som SKB utfört eller hänvisar till (dokument och direkt samarbete med NRC och ORNL) avseende utbränningskreditering och kanske BA-kreditering innehåller brister. Det gäller speciellt de slutsatser som baseras på beräkningar av c_k -värden för benchmarks och tillämpningar innehållande plutonium. Även andra beräkningar som använder data för kovarianser mellan nukleära data (speciellt ^{239}Pu medelantal neutroner vid fission) baserade på SCALE 6.1.3 eller tidigare är suspekta. SKB bör göra en utvärdering av hur dessa brister eventuellt kan påverka slutsatserna. Detta

- gäller Clab men i större utsträckning den högre utbränningskreditering som avses för kopparkapsel i Clink och slutförvar.
2. Potentiella geometriska förändringar i bränslepatroner som inte klassats som skadade och därmed specialhanterats. Det finns mycket nya erfarenheter och forskningsresultat avseende sådana förändringar. En del uppkommer under reaktordrift, typ böjda stavar och minskade kapslingsdimensioner. En händelse som redan ingår i säkerhetsredovisningen är tappad PWR-bränslepatron som hamnar i botten av bassäng med plåtklädd betong på två sidor. Om bränslepatronen tappas, eventuellt efter mekanisk påverkan, hur mycket kan stavgittret i någon del av bränslepatronen expandera? En PWR-bränslepatron kan nå kriticitet vid betydande expansion. Detta kan inte ske inuti förvaringskassetten. Om det är så att stora geometriska förändringar endast är möjliga för bränsle med hög utbränning så kan denna eventuellt beaktas i en typ av BU-kreditering.
 3. Den nya redovisningen av BA-kreditering för BWR-bränsle bör kontrolleras med oberoende kontrollberäkning. Det finns vissa potentiella möjligheter till fel i redovisningen som orsakas av annorlunda tillämpning än i reaktorsammanhang. Det är inte alls troligt men det är ändå en central punkt vid granskning att förankra den med sådan kontrollberäkning.
 4. BU-kreditering som möjlig metod för BWR-bränsle med utplockade stavar redovisas i SKBdoc 1392248 Rev 2.0 (VNF rapport för Clab). Detta har inte granskats som en del av ansökan. Om det blir aktuellt med uttag av stavar som har eller kan ha haft BA så bör SSM göra viss granskning, beroende på omfattningen.
 5. Om införande av BU-kreditering ansöks om så bör även i detta fall en eller ett fåtal kontrollberäkningar genomföras. Det kan gälla den punkt 1 ovan med förändrad geometri och det kan gälla inverkan av axiell variation i utbränningen som påverkar tidigare så kallat överlappningsfall där PWR-bränsle i kassetten under förflyttning kommer i närlinjekontakt med bränsle i normal förvaring. Detta fall kompliceras av BU-kreditering. SKBdoc 1422106 ver. 1.0 anger att inverkan av axiell utbränningsfördelning är negativ vid den tillämpning som görs i Clab. Underlag med typiska och extrema axiella fördelningar finns men slutsatsen bör kontrolleras i oberoende kontrollberäkning.
 6. Om säkerhetsredovisningen för Clab görs om och uppdateras med nya standarder, kriterier, acceptansnivåer och händelsebeskrivningar är det väsentligt att all tidigare utvärdering beaktas så att inte väsentliga händelser eller utvärderingar av dem missas. Det kan finnas bedömningar som inte dokumenterats så tydligt. Den övergripande sammanställning som finns i den nu granskade dokumentsamlingen ger inte tillräckligt underlag men styrker att SKB:s avsikter är acceptabla.
 7. Problemet med felaktiga kovarianser för ^{239}Pu som funnits i SCALE 6.1 och tidigare är ytterligare ett exempel på att grova fel kan finnas även i metoder som använts under lång tid. Det kan i värsta fall vara sådana fel som inte rimligtvis kan avslöjas vid normal validering eller verifiering av metoden. En orsak kan vara att en viss kombination av indata och valda beräkningsvägar inte tidigare förutsetts eller använts. Det måste alltid finnas ett visst ifrågasättande av beräkningsresultat och hur de dokumenterats. Detta föranleder ingen direkt åtgärd av SKB men bör ge stöd för SSM:s insikt om att oberoende kontrollberäkningar behövs även när de inte förväntas avslöja brister.

6.2. EMS värdering av underlag för Clink/slutförvar

Även om Clab ingår i Clink så lämnas värderingen av Clab-delen både före och efter sammanslagning med inkapslingsdelen under 6.1. Här värderas underlaget för inkapslingsdelen samt slutförvaret före och efter förslutning. Det ger en stark fokus på förslutna kopparkapslar.

Säkerhetsunderlag för kopparkapslar har granskats tidigare och tas inte upp här förutom att BA-kreditering ersätter BU-kreditering som primär säkerhetskontroll för BWR-bränsle. Det gör att långtidsinverkan avseende förändringar av gadoliniumnärvaro (BA) bör tas upp av SKB, oavsett hur troligt det är.

Hantering av bränsle i inkapslingsdelen avser delvis våt hantering men det nya avser den torra hanteringen. Frågan om kriticitetsdetektering, -larm och evakueringsplanering gäller i princip denna typ av anläggning. Det har tagits upp vid tidigare SSM-granskning och SKB har motiverat varför sådan beredskap inte behövs. Det bedöms som rimligt.

SKB avser att genomgående för hela KBS-3 tillämpa BA-kreditering för BWR-bränsle och BU-kreditering för PWR-bränsle. Behovet av utbränningskreditering för PWR-bränsle är betydligt större för kopparkapsel än för Clab. Detta kompenseras delvis av att den administrativa kontrollen bör vara enklare för kopparkapsel. Krav på dokumentation och verifikation av att rätt bränsle tillförs kapseln blir, av flera skäl, betydligt strängare än vid förflyttning av bränsle inom Clab.

SKB:s metoder och lösningar avseende kriticitetssäkerhet för Clink och slutförvar är i stort sett klart redovisade. Det finns inga frågor som inte förväntas kunna lösas på ett säkert sätt i enlighet med riktlinjer i redovisningen.

Möjligheten att skapa förutsättningar för en miljon år utan väsentlig fara för kriticitet kommer alltid att behöva bedömas med subjektiv "ingenjörskänsla". Med tanke på detta är det väsentligt att SKB redovisat extrema scenarier där kriticitet postuleras och effekter uppskattas. De resonemang om begränsad inverkan på omgivningen som redovisas verkar rimliga enligt EMS bedömning. Under kommande år kan detta resonemang finslipas, med stöd från internationell expertis.

Frågor som bör belysas tydligare av SKB och behov av speciell kontroll av SSM listas nedan:

1. BA-kreditering utan någon BU-kreditering för BWR-bränsle innebär att bränslet kan behöva beaktas som helt färskt i vissa utvärderingar som avser möjligheten att uran och gadolinium separeras på något sätt. Tidigare redovisning som granskats av EMS baserades på BU-kreditering för kopparkapseln. SKB bör komplettera redovisningen med potentiella fördelningar av uran och gadolinium under hela slutförvaringstiden, alltså upp till en miljon år. SSM bör kontrollera sådan redovisning då den kan vara komplicerad (frågeställningar avseende kemi och eventuellt geologi är aktuella).
2. En specifik fråga till SKB avser bestämning av densitet för BA-bränsle med halten Gd_2O_3 som parameter. En sådan formel har setts vid tidigare granskning (kan ha avsett Clab). Aktuell redovisning bör innehålla tillräcklig information för att en oberoende beräkning skall kunna göras av SSM om så önskas. SKBdoc 1391444 ver. 1.0 (VNF-2000007123/01) anger: "Bränslestavens densitet för Gd-stavar reduceras enligt formeln [5]".

Lägre densitet (avser kuts spelare, inte hel stav) ger lägre BA-halt vilket bör beaktas och har beaktats.

3. Avseende kopparkapsel med PWR-bränsle har mycket redovisning, oberoende kontrollberäkningar, liksom beräkningar av utländska organisationer med intresse av SKB:s lösning, visat att inverkan av utbränning bestämts med rimlig osäkerhet (någon procent i k_{eff}). Det som saknas är redovisad validering av SKB:s metod (och egentligen för de oberoende beräkningarna), delvis beskriven för Clab under 6.1 och som beaktar de problem med c_k -värden som tagits upp. Det är ORNL och SKB som valt att tillämpa vissa gränsvärden för c_k . Om det visar sig att man kanske inte klarar de gränser man satt upp så bör det åtgärdas. Kanske valideringen inte heller är så oberoende eftersom det inte finns så mycket publicerade benchmarks.
4. SKB:s redovisning (MTO-rapporter) av hantering av bränsle och anknytande insatser för att undvika misstag som gör att bränsle blir felplacerat eller oavsiktligt förflyttat hänvisas till i SKBdoc 1369704. Vid den tidpunkten var redovisningen inte helt klar. Det är viktiga bedömningar som bör granskas och följas upp av SSM.
5. SKB bör ställa samman en bedömning av använda beräkningsmetoder som visar hur de fungerat i praktisk användning. När det gäller beräkning av utbränningsinverkan är erfarenheter från härddesign och uppföljning av reaktordrift mycket viktiga. Sådana erfarenheter bör dessutom kunna bli värdefulla vid styrkande av bränslehistorik (utbränning, driftdata, avklingningstider, eventuella driftproblem som påverkat utbränning, etc.), SSM:s godkännande av BA-kreditering baseras till stor del på sådana erfarenheter som i sammanfattning redovisats för SSM (egentligen SKI). Tidigare erfarenheter från flera svenska organisationer har exempelvis visat att det går att ”glömma” att sätta närvaron av ^{135}Xe till noll vid BA-kreditering (normal tillämpning av BA-kreditering). Vid de studier som genomförs av OECD/NEA visar det sig ofta att personer som använder exakt samma metoder får ganska olika resultat för samma tillämpning. Det visar att det finns en osäkerhet kopplad till användaren. Det kan även finnas problem kopplade till specifik datorinstallation eller programinstallation. Hur stort kan ett redaktionellt fel (typ omkastade siffror i beräkningsresultat) bli utan att det upptäcks genom jämförelse med andra resultat eller förståelse för fysiken?
6. Standarder, kriterier och acceptansnivåer bör sammanställas av SKB med stöd av direktiv från SSM. Därefter bör de implementeras konsekvent av SKB och kontrolleras av SSM. Just avslutad Workshop (ORACS 2015) visar att det finns behov av att förstå de olika tillämpningar av standarder, kriterier och acceptansnivåer som finns runt om i världen, även i samma land. Double Contingency Principle (DCP) togs upp flera gånger. En gemensam slutsats verkar vara att inte låsa fast kriterierna till specifika acceptansnivåer utan att en anpassning till aktuell tillämpning bör göras. NRC och en del andra tryckte också på att DCP endast avser processförändringar, inte säkerhetskontroller. Det begränsar dess användning. DCP tas upp i redovisningen och i denna granskning. Det går att förena DCP med tidigare kriterium om olika grad av underkriticitet för relativt normala förhållanden och för dimensionerande händelser. Det verkar inte vara lämpligt med fasta gränser för k_{eff} , exempelvis 0,95 och 0,98 utan att den totala osäkerheten beaktas. Det gäller både SKB och SSM. I praktiken är det naturligtvis nödvändigt att ha en enkel och förutsägbar ram för design, kontroll och översikt. SKB bör göra sådana bedömningar

- där SSM sedan kan bedöma om tillräcklig säkerhetsnivå nås utan ”onödiga” komplikationer.
7. SKB har i SKBdoc 1433410 (avsnitt 10) två alternativ för att bestämma övre gräns för underkriticitet i beräkningsmetod (USL). Den ena innehåller en stor administrativ marginal 0,05 som det inte är helt klart vad den avser. Eftersom den skall gälla beräkningsmetoden skall inte osäkerheter i aktuell tillämpning vägas in. Sådana osäkerheter kan bli hur stora som helst. Inte ens värdet noll på k_{eff} behöver betyda underkriticitet vid en händelse där fissilt material kan tillföras system som (felaktigt) bedömts alltid vara fritt från sådant material.
 8. Korrelation mellan fel i olika benchmarks har tagits upp av SKB och det är positivt. Det finns inte så mycket internationell praxis att gå efter. Granskaren har sedan 1970-talet beaktat sådana korrelationer vid granskning och kontrollberäkningar. Det problem med felaktiga c_k -värden som nämnts ovan är ett nytt, mycket dramatiskt exempel på hur en enda felaktigt bestämd korrelation kan leda till omfattande konsekvenser. I det fallet är det en överskattning av osäkerheten som gör att andra osäkerheter och direkta fel ”drunknar” och därmed underskattas i fall där de har stor betydelse för säkerheten. SKB och SSM uppmanas att söka efter andra korrelationer (inklusive gemensamma händelseorsaker som också är ett exempel på korrelation).
 9. SKB och SSM bör sätta in större resurser på att göra terminologin mer enhetlig, med stöd av internationella standarder. Direkta exempel i SKB:s redovisning är bias, isotoper, double contingency principle, fertilt/fissilt, övre gräns för underkriticitet (USL). Speciellt gäller det den omvända definitionen av bias gentemot de standarder som SKB hänvisar till.
 10. Känslighetsanalys av väsentliga parametrar och formulering av de säkerhetsmarginaler som ges av ”påtagliga” kontroller (till skillnad mot säkerhetskontroller baserade på k_{eff} -värden) kan underlätta identifikation av händelser som annars kan vara svåra att identifiera. Detta ställs mot mer abstrakta kontroller baserade på begränsning av k_{eff} .
 11. Vad behövs för att kriticitet skall uppkomma? Sådan utvärdering kan leda till ytterligare identifiering av händelser, speciellt sådana som orsakas primärt av den mänskliga faktorn. Ett exempel där SKB bör förtydliga kriterierna är den konfidens och sannolikhet som SKB sätter för osäkerheter. I USA används oftast 95 % konfidens med 95 % sannolikhet. Det motsvarar cirka två standardavvikelser. Den verkar ha valts av SKB. I Europa är det vanligt att lägga till tre standardavvikelser. Om osäkerheten är stor (flera procent) så blir frågan om konfidens/sannolikhetsintervall mycket viktiga för säkerheten. Acceptansnivån för k_{eff} kan påverkas.
 12. EMS har uppfattningen att ”Generalized Linear Least Squares Method” (GLLSM) är lämplig för validering av beräkningsmetoder. Alla mätningar som ger värdefull information skall då kunna användas för att hitta bästa möjliga resultat och därmed grund för bestämning av bias och osäkerhet. Det behöver alltså inte enbart vara benchmarks baserade på kritiska experiment och inte ens avseende bestämning av k_{eff} . Det är ingen ny metod men tillämpning vid validering av beräkningsmetoder för användning vid utvärdering av kriticitetssäkerhet är ännu i sin början. I SCALE ingår programmet TSURFER, som använder resultat från beräkningar med TSUNAMI. Det behöver etableras ytterligare innan metoden kan bedömas som tillförlitlig. EMS avser att använda TSURFER i större utsträckning. Vid OECD/NEA:s Workshop ORACS 2015 diskuterades användning av TSURFER, med ett direkt exempel avseende inverkan av klor (saltvatten) på k_{eff} som grund.

6.3. Exempel på internationellt arbete

Vid SSM:s kommande granskning av KBS-3 på detaljnivå finns det mycket att beakta. Några av de viktigaste punkterna följer:

1. Användning av rutinmässiga mätningar och beräkningar vid härddesign och reaktordrift för att validera beräkningsmetoder för bestämning av utbränningsinverkan uppmuntras. För SKB finns sådana metoder tillgängliga men för SSM är det komplicerat att göra motsvarande validering av oberoende metoder. Benchmarks för sådan validering har börjat publiceras (exempelvis av EPRI) och detta bör uppmuntras och utnyttjas av SSM.
2. SSM bör fortsätta att utnyttja internationellt arbete och erfarenheter (främst avses OECD/NEA Nuclear Science Committee) för att få information om svårigheter och möjligheter avseende beräkningsmetoder. Det har varit mycket värdefullt vid denna och tidigare granskningar av EMS för SSM. Nyligen avslutat projekt (Suyama 2014) avseende BA- och BU-kreditering för BWR-bränsle innehåller resultat och erfarenheter av stort intresse, speciellt då beräkningar med både SCALE och CASMO ingår. Ett nytt projekt direkt knutet till slutförvaring och BU-kreditering avser effekter av blandning av använt bränsle med material i omgivningen (simulerat med SiO₂) och har nyss påbörjats (Yamamoto 2014). Deadline för bidrag med beräkningar är slutet av maj 2015 (EMS deltar).
3. Aktuella tillämpningsmetoder avseende BA- och BU-kreditering, speciellt avseende validering av beräkningsmetoder, är i en relativt tidig fas. Bevakning av internationella rapporter, konferenser samt licensiering av verkliga tillämpningar ger mycket värdefull information. En del tidigare nämnda rapporter (EPRI, NEI) ingår men även andra mycket intressanta dokument har nyligen observerats och delvis lästs (NET-300067-01, Rev. 1) men inte tillräckligt för att utnyttjas direkt i granskningsarbetet för SSM.
4. En aktuell sammanställning (Rechard 2015, Parts I and II) ger bra underlag för läget i USA avseende kriticitetssäkerhet vid slutförvaring. Dessa referenser har inte utnyttjats vid granskningen av tidsbrist.
5. United States Nuclear Regulatory Commission (NRC) har mycket information och handledning (guidning) både för internt bruk och för sökare och innehavare av licenser som berör nukleär kriticitetssäkerhet. Även om granskaren (EMS) har många synpunkter på NRC:s sätt att agera nu och tidigare så kvarstår faktum att de täcker in många viktiga områden, sponsrar forskning och utveckling av metoder samt är mycket öppna om sin verksamhet. NRC:s policy som den uttalas och praktiseras får stor inverkan på kriticitetssäkerhet i hela världen. I texten och i referenserna finns många hänvisningar till NRC. Under nyligen avslutad workshop (ORACS 2015) presenterade NRC information av intresse för SSM:s granskning av KBS-3. Speciellt en snart (hösten 2015?) kommande revision 2 av NUREG 1520 verkar intressant. Det betyder inte att dess metoder och slutsatser nödvändigtvis bedöms vara bra, bara att det är värdefullt referensmaterial. Liksom NRC 10 CFR 70.24 är också NRC 10 CFR 70.61 och NRC 10 CFR 70.64 av direkt intresse för SSM:s granskning av KBS-3.

7. Referenser

ANS, *Glossary of Terms in Nuclear Science and Technology*, Revision, American Nuclear Society (1986).

ANSI/ANS-8.12-1987; R1993; R2002; R2011 (R=Reaffirmed): *Nuclear Criticality Control and Safety of Plutonium-Uranium Fuel Mixtures Outside Reactors*, American Nuclear Society.

ANSI/ANS-8.24-2007:R2012, *Validation of Neutron Transport Methods for Nuclear Criticality Safety Calculations*, American Nuclear Society.

ANSI/ANS-8.27-2008: *Burnup Credit for LWR Fuel*, American Nuclear Society.

Rearden B, Personlig kommunikation med D. Mennerdahl. Avser rimligheten i resultat och slutsatser i appendix 2 och användning av resultat av version beta 4 av SCALE 6.2. 2015-05-21.

EPRI 1022909, *Benchmarks for Quantifying Fuel Reactivity Depletion Uncertainty*. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 2011.

EPRI 1025203, *Utilization of the EPRI Depletion Benchmarks for Burnup Credit Validation*, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 2012.

EPRI 3002000306. *Depletion Reactivity Benchmark for the International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments*, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 2013.

EPRI 3002001948, *PWR Fuel Reactivity Depletion Verification Using Flux Map Data*, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 2014.

EPRI 3002003073, *Sensitivity Analyses for Spent Fuel Pool Criticality*, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 2014.

IAEA Safety Glossary, 2007 Edition, International Atomic Energy Agency.

ICSBEP handbook, *International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments*, International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project (ICSBEP), NEA/NSC/DOC(95)03, NEA Nuclear Science Committee, 2014.

IRPhEP handbook, *International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments*, International Reactor Physics Experiment Evaluation Project (IRPhEP), NEA-1765/10, NEA Nuclear Science Committee, 2014.

ISO 11311:2011, *Nuclear criticality safety -- Critical values for homogeneous plutonium-uranium oxide fuel mixtures outside of reactors*, International Organization for Standardization.

ISO 921-1997, Second edition (withdrawn 2014-12-10), *Nuclear energy - Vocabulary*, International Organization for Standardization (1997).

Johansson F., Liljenfeldt H., Junell H., *Use of Tsunami in validation of Scale 6.1 for the Swedish spent fuel repository – Selection of experiments*, NCSD Topical Meeting 2013, Nuclear Criticality Safety Division, American Nuclear Society, 2013.

Marshall B.J., Rearden B.T., *Determination of Experimental Correlations Using the Sampler Sequence Within SCALE 6.2*, Transaction of ANS Winter Meeting 2014, American Nuclear Society, 2014.

Mennerdahl D., *Validation of 108 MOX Powder Applications for ANS and ISO Standards*, NCSD Topical Meeting 2013, Nuclear Criticality Safety Division, American Nuclear Society, 2013.

Mennerdahl D., *Correlations of Error Sources and Associated Reactivity Influences*, Transaction of ANS Annual Meeting 2014, American Nuclear Society, 2014.

NEI 12-16 Rev. 1, *Guidance for Performing Criticality Analyses of Fuel Storage at Light-Water Reactor Power Plants*, Nuclear Energy Institute, April 2014.

NEI brev till NRC 2015, *Responses to Requests for Additional Information for EPRI Reports 1022909 and 1022503 Referenced in NEI 12-16*, Cummings K.W (NEI) till Holonich Jr. J (NRC), brev med två bilagor, Nuclear Energy Institute, 2 Mars 2015.

NET-300067-01, Rev. 1, *Criticality Safety Analysis of the Indian Point Unit 2 Spent Fuel Pool with Credit for Inserted Neutron Absorber Panels (Rev. 1)*, Prepared by NETCO for Entergy Nuclear Operations, Inc., February 2015.

NRC 10 CFR 70.24, Code of Federal Regulations (CFR) Chapter 10 Part 70 § 24 *Criticality accident requirements*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Juli 2014.

NRC 10 CFR 70.61, Code of Federal Regulations (CFR) Chapter 10 Part 70 § 24 *Criticality accident requirements*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Juli 2014.

NRC 10 CFR 70.64, Code of Federal Regulations (CFR) Chapter 10 Part 70 § 64, *Requirements for new facilities or new processes at existing facilities*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Juli 2014.

NUREG-1520, Revision 2, *Standard Review Plan for License Applications for Fuel Cycle Facilities*, Draft, May 2014.

NUREG/CR-6361 (ORNL/TM-13211), *Criticality Benchmark Guide for Light-Water-Reactor Fuel in Transportation and Storage Packages*, J. J. Lichtenwalter, S. M. Bowman, M. D. DeHart, and C. M. Hopper, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Oak Ridge National Laboratory, March 1997.

NUREG/CR-6698, *Guide for Validation of Nuclear Criticality Safety Computational Methodology*, J.C. Dean, R.W. Tayloe, Jr., U.S. Nuclear Regulatory Commission, Science Applications International Corporation, 2001.

NUREG/CR-6747 (ORNL/TM- 2000/306), *Computational Benchmark for Estimation of Reactivity Margin from Fission Products and Minor Actinides in PWR Burnup Credit*, J. C. Wagner, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Oak Ridge National Laboratory, 2001.

NUREG/CR-6979 (ORNL/TM-2007/083), *Evaluation of the French Haut Taux de Combustion (HTC) Critical Experiment Data*, D. E. Mueller, K. R. Elam, and P. B. Fox, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Oak Ridge National Laboratory, September 2008.

NUREG/CR-7108 (ORNL/TM-2011/509), *An Approach for Validating Actinide and Fission Product Burnup Credit Criticality Safety Analyses – Isotopic Composition Predictions*, G. Radulescu, I. C. Gauld, G. Ilas, and J. C. Wagner, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Oak Ridge National Laboratory, April 2012.

NUREG/CR-7109 (ORNL/TM-2011/514), *An Approach for Validating Actinide and Fission Product Burnup Credit Criticality Safety Analyses – Criticality (k_{eff}) Predictions*, D. E. Mueller, J. M. Scaglione, J. C. Wagner, and W. J. Marshall, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Oak Ridge National Laboratory, April 2012.

NUREG/CR-7157 (ORNL/TM-2012/96), *Computational Benchmark for Estimated Reactivity Margin from Fission Products and Minor Actinides in BWR Burnup Credit*, D. E. Mueller, J. M. Scaglione, J. C. Wagner, and S. M. Bowman, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Oak Ridge National Laboratory, 2013.

NUREG/CR-7194 (ORNL/TM-2011/514), *Technical Basis for Peak Reactivity Burnup Credit for BWR Spent Nuclear Fuel in Storage and Transportation Systems*, B. J. Marshall et al., U.S. Nuclear Regulatory Commission, Oak Ridge National Laboratory, April 2015.

ORACS 2015, *International Workshop on Operational and Regulatory Aspects of Criticality Safety*, 19-21 May 2015, OECD Nuclear Energy Agency (NEA) Committee on the Safety of Nuclear Installations (CSNI) Working Group on Fuel Cycle Safety (WGFCS). Hosted by United States Nuclear Regulatory Commission and the United States Department of Energy, May 2015

ORNL/TM-2005/39, *Scale: A Comprehensive Modeling and Simulation Suite for Nuclear Safety Analysis and Design*, Version 6.1, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, June 2011.

Rearden B, Svar genom officiell SCALE support på förfrågan från Mennerdahl D., Scale Help, Oak Ridge National Laboratory, 21 Maj 2015.

Rearden WPNCS 2014, *SCALE 6.2 Cross-Section Covariance Libraries*, Wiarda D., Williams M., Marshall B.J., Dunn M., Rearden B., Oak Ridge National Laboratory, Presentation to Working Party on Nuclear Criticality Safety, Expert Group on Uncertainty Analysis for Criticality Safety Assessment, NEA Nuclear Science Committee, September 2014.

Rechard R.P., *Probability and Consequences of Nuclear Criticality at a Geologic Repository—I: Conceptual Overview for Screening*, Pages 97-126, Nuclear Technology, Volume 190, Number 2, May 2015

Rechard R.P., *Probability and Consequences of Nuclear Criticality at a Geologic Repository—II: Potential Repository in Volcanic Tuff as an Example*, Pages 127-160, Nuclear Technology, Volume 190, Number 2, May 2015

SFCOMPO, *SFCOMPO - Spent Fuel Isotopic Composition Database*, NEA Nuclear Science Committee, under utveckling, 2011.

SFST-ISG-8 Rev. 3, Division of Spent Fuel Storage and Transportation Interim Staff Guidance – 8 Revision 3, *Burnup Credit in the Criticality Safety Analyses of PWR Spent Fuel in Transportation and Storage Casks*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2012.

Suyama K., Uchida Y., Ito T., Miyaji T., *Benchmark Phase IIIC: Nuclide Composition and Neutron Multiplication Factor of BWR Spent Fuel Assembly for Burnup Credit and Criticality Control of Damaged Nuclear Fuel*, OECD/NEA Inter-Code Comparison for BWR Fuel Assembly Burnup Calculation Problem, Draft Report, Prepared for NEA Nuclear Science Committee, September 2014.

Yamamoto K., Suyama K., *Problem Specification for Benchmark Study on the Reflector Effect of Silicon Dioxide (SiO₂) for the Criticality Safety of Direct Disposal of Used Nuclear Fuel*, Rev. 2 of specifications prepared for NEA Nuclear Science Committee, November 2014

Täckning av SKB-dokument

Tabell A1:1

Granskat dokument	Granskade delar	Kommentarer
SKBdoc 1369704 ver. 2.0, Kriticitetsanalys och utbränningskreditering – Metodikrapport	Hela dokumentet	
SKBdoc 1397015 ver. 2.0, SKB validation of Scale 6.1 for fresh fuel	Hela dokumentet	
SKBdoc 1433410 ver. 1.0, SKB burn up validation with Scale 6.1	Hela dokumentet	
SKBdoc 1422106 ver. 1.0, Kriticitetsanalys för KBS-3- systemet och slutförvaring av använt kärnbränsle	Hela dokumentet	
SKBdoc 1417199 ver. 1.0, What if criticality in the final repository?	Hela dokumentet	
SKBdoc 1391444 ver. 1.0 (VNF-2000004347//01), Clab – Kreditering av BA i BWR-bränsle för BWR kompakt- och normalkassett	Hela dokumentet	
SKBdoc 1437058 ver. 1.0 (VNF-2000007123/01), CLINK – Kreditering av BA i BWR-bränsle för transportkassetten och kapsel för slutförvar	Hela dokumentet	
SKBdoc 1392248 ver. 2.0, Clab – Projektrapport – Kreditering av BA i BWR- bränsle för BWR kompakt- och normalkassett	Hela dokumentet	
SKBdoc 1453207 ver. 1.0, Sannolikheten för kriticitet i den torra delen av Clink- anläggningen	Hela dokumentet	

Brister i SCALE 6.1

När detta skrivs är beräkningarna baserade på version beta 4 av SCALE 6.2. Det är ett programpaket under utveckling och kan potentiellt innehålla stora brister. De avvikelser mellan beta 4 av SCALE 6.2 och SCALE 6.1 som diskuteras här är dock kända av utvecklarna av SCALE 6.2 (Rearden 2015) och har presenterats vid internationellt möte av arbetsgrupp. Resultatet bör därför ses som en stark varning att SCALE 6.1 inte bör användas för bestämning av c_k -värden för tillämpningar och benchmarks som innehåller plutonium. De resultat som presenteras här bör inte citeras som ”de riktiga” eller som erhållna från publicerad version av SCALE 6.2.

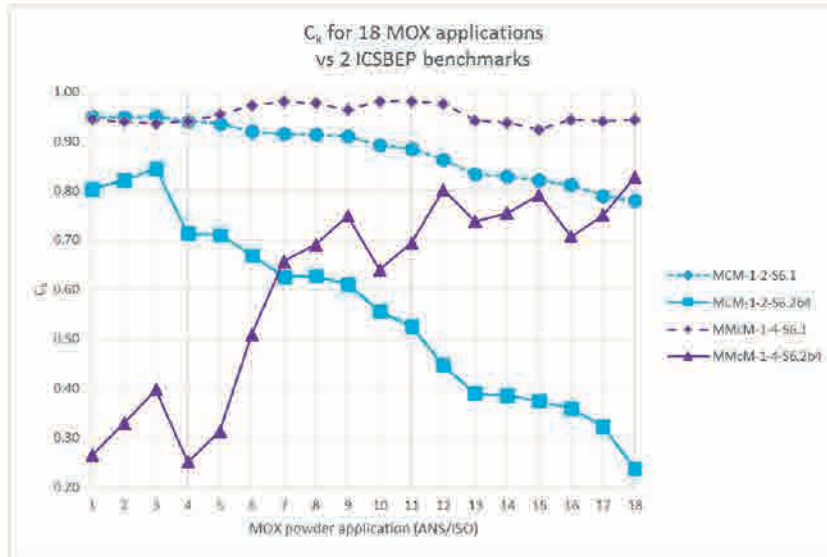
Vid beräkning av c_k -värden med SCALE 6.2 beta 4 finns det flera beräkningsmetoder att välja emellan. Nya tekniker för känslighetsbestämning har tagits fram för beräkningar med tvärsnitt i kontinuerlig (till skillnad mot gruppindelade tvärsnitt) energiform. Dessa har testats under några veckor i april 2015. Standardmetoden betecknas IFP men den kräver så mycket datorminne och tid att den inte är lämplig för ett så stort antal beräkningar som behövs göras. Ett alternativ betecknas CLUTCH-metoden som kräver väsentligt mycket mindre minne och tid. Den är något mindre noggrann och kräver lite mer indataförberedelser men har visat sig mycket effektiv. Resultaten med tidigare gruppbaseade metoder men nya kovariansdata ger liknande resultat som för CLUTCH.

Figur 1 visar beräkningsresultat för de 18 första av totalt 108 MOX-system i publicerad ISO-standard och i pågående uppdatering av ANSI/ANS-standard. De 18 systemen (”tillämpningarna”) är undermodererade. Punkterna i figuren är sammanbundna med linjer för att underlätta identifikation av metoden, inte för att visa samband. Väsentliga parametrar är:

- Plutoniets isotopsammansättning: Fall 1-6 är enbart ^{239}Pu , fall 7-12 innehåller 95 vikt-% ^{239}Pu medan fall 13-18 innehåller cirka 70 vikt-% ^{239}Pu .
- Geometrisk form: Sfär (fall 1, 4, 7, 10, 13 och 16), cylinder (fall 2, 5, 8, 11, 14 och 17) samt skiva (fall 3, 6, 9, 12, 15 och 18).
- Reflektion: 30 cm vatten (fall 1-3, 7-9 samt 13-15) eller 2,5 cm vatten (fall 4-6, 10-12 samt 16-18).

Värden för c_k är beräknade med två benchmarks från ICSBEP-handboken som grund. MIX-COMP-MIXED-001 fall 2 (MCM-001-2) är baserat på ett gammalt experiment (1970-talet) och ingår i en stor serie med korrelerade experiment. Plutonet innehåller cirka 86 vikt-% ^{239}Pu . MIX-MISC-MIXED-001 fall 4 (MMcM-001-4) är ett ryskt experiment från cirka 2005 och speciellt framtaget för validering av metoder för beräkning av MOX-pulver. Plutonet innehåller drygt 95 vikt-% ^{239}Pu . Dessa benchmarks har tidigare bedömts ge höga c_k -värden för tillämpningsfall 1-18.

SCALE 6.1 (S6.1) och SCALE 6.2 betaversion 4 (S6.2b4) har använts.



Figur 1: Värden på c_k för undermodererat MOX-pulver från SCALE 6.1 och SCALE 6.2 beta-4

De två streckade linjerna i Figur 1 visar de gamla resultaten från SCALE 6.1. De heldragna linjerna i Figur 1 visar de nya, preliminära resultaten från SCALE 6.2 betaversion 4. Skillnaderna är mycket dramatiska.

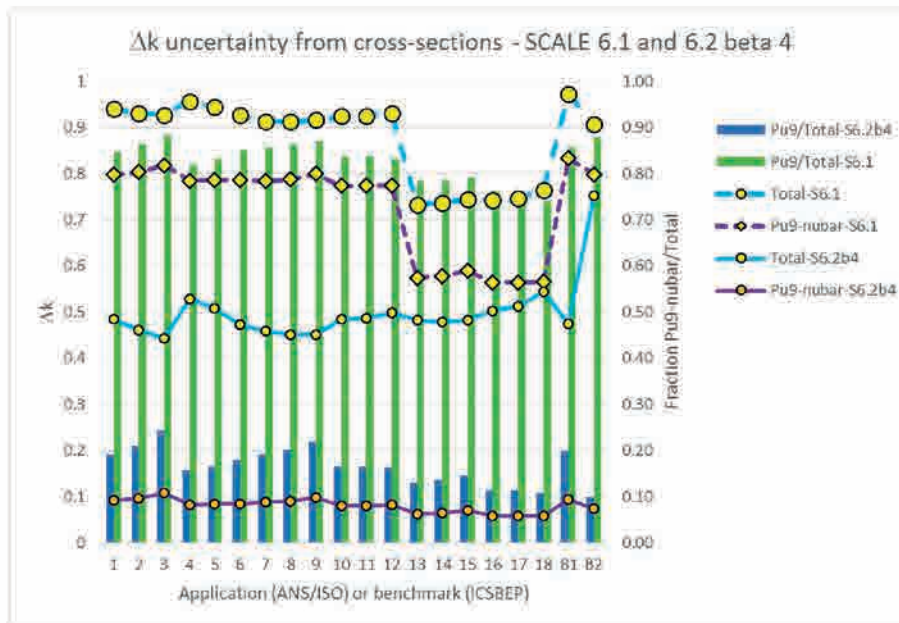
De gamla c_k -resultaten är bra (över 0,80), speciellt för det ryska MMcM-001-4 som ger mycket bra resultat (över 0,90) för alla tillämpningsfall. Det är intressant att de ryska experimenten rekommenderades av ett speciellt projekt inom OECD/NEA 2004 och 2005. Tidigare version av SCALE/TSUNAMI låg till grund för rekommendation av de ryska experimenten och nedvärdering av andra experiment.

De nya resultaten visar starka förändringar till det sämre avseende c_k . Trenderna mot isotophalten av ^{239}Pu är starka och helt olika för de två benchmarkfallen.

ORNL har presenterat liknande resultat för benchmarks och tillämpningar avseende utbränningskreditering (Rearden WPNCs 2014). ORNL:s slutsats har varit att c_k -värdena blir betydligt lägre än man tidigare trott och att ^{239}Pu nubar varit huvudorsaken. Detta har nu bekräftats.

De resultat som visas i Figur 2 avser osäkerhet i k_{eff} orsakade av total osäkerhet på grund av utvärderade tvärsnitt (alla kovarianser) samt osäkerhet i k_{eff} orsakad av osäkerhet i ^{239}Pu -nubar.

Problemet med felaktiga kovarianser (osäkerheter) för utvärderade tvärsnittsdata i SCALE 6.1 (och tidigare) är mycket allvarligt eftersom c_k -värdena legat till grund för urval respektive avfärdande av benchmarks, till och med för design av kritiska experiment (OECD/NEA MOX-diskussioner 2004-2005). Felen påverkar inte direkt beräknade värden på k_{eff} (ofta betecknat k_p). Däremot påverkar det uppskattad bias och korrektion för denna och beaktande av osäkerheter. Det slutliga värdet på k_{eff} blir därför påverkat. Allvarligare är att en falsk känsla av trygghet kan infinna sig om man tror att man gjort en rimlig validering.



Figur 2: Δk osäkerhet totalt och av ^{239}Pu nubar från SCALE 6.1 och SCALE 6.2 beta-4

För SCALE 6.1 syns klart hur den totala osäkerheten bestäms av osäkerheten orsakad av ^{239}Pu -nubar. För SCALE 6.2 beta 4 är sambandet mycket svagt. För applikationerna 13-18 är dock även här osäkerheten i k_{eff} från osäkerhet i ^{239}Pu -nubar något lägre.

Staplarna visar hur stor andel (sekundär ordinata) av den totala tvärsnittosäkerheten i k_{eff} som orsakas av osäkerhet ^{239}Pu -nubar (direkt relaterade till linjekurvorna och med värdet ett som maximalt möjlig andel). Från att ha varit totalt dominerande i SCALE 6.1 och tidigare ger den nu med SCALE 6.2 betaversion 4 bara ett mycket litet bidrag. Osäkerheterna adderas i SCALE/TSUNAMI som varianser (alltså "kvadratisk addition" av standardavvikelse). Bidraget till totala osäkerheten som varje stapel anger blir alltså mindre för små andelar (SCALE 6.2 betaversion 4) och större för stora andelar (SCALE 6.1).

Alla beräkningsresultat visas inte här men för SCALE 6.2 beta-4 så varierar den största osäkerhetskällan från fall till fall. Inte någon gång är ^{239}Pu -nubar störst. Liknande värden har bestämts med SCALE 6.2 beta-4 för samtliga 108 tillämpningsfall. För väl modererade tillämpningar blir effekterna inte speciellt dramatiska.



2015:39

Strålsäkerhetsmyndigheten har ett samlat ansvar för att samhället är strålsäkert. Vi arbetar för att uppnå strålsäkerhet inom en rad områden: kärnkraft, sjukvård samt kommersiella produkter och tjänster. Dessutom arbetar vi med skydd mot naturlig strålning och för att höja strålsäkerheten internationellt.

Myndigheten verkar pådrivande och förebyggande för att skydda människor och miljö från oönskade effekter av strålning, nu och i framtiden. Vi ger ut föreskrifter och kontrollerar genom tillsyn att de efterlevs, vi stödjer forskning, utbildar, informerar och ger råd. Verksamheter med strålning kräver i många fall tillstånd från myndigheten. Vi har krisberedskap dygnet runt för att kunna begränsa effekterna av olyckor med strålning och av avsiktlig spridning av radioaktiva ämnen. Vi deltar i internationella samarbeten för att öka strålsäkerheten och finansierar projekt som syftar till att höja strålsäkerheten i vissa östeuropeiska länder.

Strålsäkerhetsmyndigheten sorterar under Miljödepartementet. Hos oss arbetar drygt 300 personer med kompetens inom teknik, naturvetenskap, beteendevetenskap, juridik, ekonomi och kommunikation. Myndigheten är certifierad inom kvalitet, miljö och arbetsmiljö.

Strålsäkerhetsmyndigheten
Swedish Radiation Safety Authority

SE-171 16 Stockholm
Solna strandväg 96

Tel: +46 8 799 40 00
Fax: +46 8 799 40 10

E-mail: registrator@ssm.se
Web: stralsakerhetsmyndigheten.se