



Strål
säkerhets
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Patrick Anderson
Oscar Elison
Ola Jovall

Forskning

2015:44

Krav på funktion, konstruktion och
provning av reaktorinneslutningar

SSM perspektiv

Bakgrund

I Sverige behöver SSM skaffa vidare kunskap inom olika områden inom nukleära byggnadskonstruktioner bl.a. reaktorinneslutningar.

Syfte

Syftet med projektet ” Krav på funktion, konstruktion och provning av reaktorinneslutningar” är att sammanställa information för att belysa viktiga reaktorinneslutningsfrågor vid byggnation. Den sammanställda informationen presenteras utifrån ett generellt perspektiv vilket gör att det ej nödvändigtvis sammanfaller med Strålsäkerhetsmyndighetens (SSM) föreskrifter, råd och anvisningar eller uppfattningar och uttolkningar i olika sakfrågor.

Resultat

Rapporten redogör för reaktorinneslutningens

- Funktion – Avsnittet behandlar reaktorinneslutningens säkerhetsfunktion.
- Konstruktionsutformning – Avsnittet redovisar olika typer av reaktorinneslutningar.
- Dimensionering – Avsnittet redogör bl.a. för laster och lastkombinering, analysmetoder, material och tvärsnittsdimensionering av reaktorinneslutningar.
- Provning – Avsnittet beskriver provtryckning och täthetsprovning provning som genomförs före anläggningens drifttagande samt den återkommande täthetsprovningen. Vidare redovisas monitorering av reaktorinneslutningen.
- SC-konstruktioner – Avsnittet beskriver en möjlig byggmetod med modulverkande samverkanskonstruktioner av reaktorinneslutningar.

Rapporten resulterar i en checklista som kan användas som hjälp för utvärdering av befintliga anläggningar utifrån dagens kravbild. Checklistan innehåller frågor gällande grundläggande data avseende barriärfunktion och konstruktionsutformning, frågor gällande funktion enligt IAEA NS-R-1 samt frågor baserat på innehållet i rapporten.

Framtaget underlag kommer att bidra till att öka kunskapen för reaktorinneslutningskonstruktionen. Denna kunskap kan komma SSM till nytta vid framtagning av nya föreskrifter inom byggnadskonstruktioner och vid säkerhetsbedömningar t.ex. vid granskning av återkommande säkerhetsprovningar (PSR) av kärntekniska anläggningar.

Behov av ytterligare forskning

Mer forskning behövs bland annat inom området oförstörande provning.

Projekt information

Kontaktperson SSM: Sofia Lillhök

Referens: SSM 2013-1875



**Strål
säkerhets
myndigheten**

Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Patrick Anderson (kapitel 3), Oscar Elison (kapitel 5 och 6)
och Ola Jovall (kapitel 1, 2 och 4 samt redaktör),
Scanscot Technology AB, Lund

2015:44

Krav på funktion, konstruktion och provning av reaktorinneslutningar

Datum: Oktober 2015

Rapportnummer: 2015:44 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.

Innehållsförteckning

SAMMANFATTNING	3
ENGLISH SUMMARY	5
1. INLEDNING	7
2. FUNKTION	9
2.1 Inledning.....	9
2.2 Övergripande säkerhetsrelaterade funktionskrav	10
2.3 WENRAs nya referensnivåer för befintliga anläggningar ...	17
2.4 IAEAs föreslagna konstruktionsbas	18
2.5 System och funktioner	21
2.6 Nya anläggningar.....	32
3. KONSTRUKTIONSUTFORMNING	43
3.1 Inledning.....	43
3.2 Allmän beskrivning.....	43
3.3 Viktiga komponenter	45
3.4 Inverkan av åldrande	61
3.5 Exempel på inneslutningskonstruktioner.....	67
4. DIMENSIONERING	75
4.1 Dimensioneringsregler.....	75
4.2 Grundläggande dimensioneringsprinciper i DNB.....	80
4.3 Dimensioneringsprocess	85
4.4 Kritiska områden	108
5. PROVNING	115
5.1 Inledning.....	115
5.2 Provning före drifttagning.....	120
5.3 Provning under anläggningens driftstid.....	123
5.4 Instrumentering	126
5.5 Acceptanskriterier	133
5.6 Omnämmande av trycktester i utvalda guider	135
6. SC-KONSTRUKTIONER	139
6.1 Allmänt.....	139
6.2 Utformning	141

6.3	Fördelar och nackdelar gentemot RC-konstruktion	142
6.4	Dimensionering.....	143
6.5	Exempel på anläggningar med SC-konstruktioner	149
7.	REFERENSER.....	153
	BILAGA 1: LISTA PÅ FIGURER.....	163
	BILAGA 2: LISTA PÅ TABELLER.....	167
	BILAGA 3: FÖRKORTNINGAR	169
	BILAGA 4: BETECKNINGAR	171
	BILAGA 5: EXEMPEL PÅ ÖVERSLAGSBERÄKNING.....	173
	BILAGA 6: CHECKLISTA INNESLUTNINGSKÄRL.....	177

Sammanfattning

Reaktorinneslutningen innehar en av de viktigaste säkerhetsfunktionerna vid ett kärnkraftverk eftersom den utgör den yttersta barriären som upprättats enligt djupförsvarsprincipen för förhindrande av spridning av radioaktiva ämnen till omgivningen.

Syftet med föreliggande rapport är att belysa viktigare reaktorinneslutningsfrågor för befintliga anläggningar såväl som vid nybyggnation. Rapporten behandlar reaktorinneslutningar vid lättvattenreaktorer (kokvattenreaktorer såväl som tryckvattenreaktorer). Vidare fokuseras på reaktorinneslutningar av betong med en invändig tätplåt, och då företrädesvis spännarmerade konstruktioner.

Rapporten innehåller följande delar:

- Reaktorinneslutningens funktion beskrivs i kapitel 2. Här behandlas såväl inneslutningskärlets och den inre strukturens säkerhetsfunktioner som andra säkerhetssystem som direkt påverkar inneslutningens säkerhetsfunktion. Krav på funktion hos befintliga respektive nya anläggningar behandlas;
- I kapitel 3 redovisas inneslutningens utformning baserat på olika typer av befintliga inneslutningar, men även vad som idag erbjuds vid nykonstruktion. Viktigare frågor relaterade till val av utformning diskuteras, inklusive beständighet;
- Dimensionering av reaktorinneslutningar behandlas i kapitel 4. Först beskrivs kortfattat vilket regelverk som gäller. Fokus därefter är på frågor rörande laster och lastkombinering, analysmetoder, material och tvärsnittsdimensionering. Därutöver belyses ett antal speciella frågeställningar;
- Provning och monitorering behandlas i kapitel 5. Här beskrivs provning som genomförs före drifttagandet av en anläggning (provtryckning och täthetsprovning) och återkommande provning under anläggningens livstid (täthetsprovning). Vidare redovisas monitorering som kan nyttjas till exempel för uppföljning av tidsberoende effekter;
- I kapitel 6 behandlas en för inneslutningens inre struktur möjlig byggmetod med modultillverkade samverkanskonstruktioner. Aktuell status vad gäller dimensioneringsregler behandlas, tillsammans med en belysning av metoden som sådan och hur tillverkning, transport och montering går till.

Rapporten är upprättad på uppdrag av Strålsäkerhetsmyndigheten och har författats av en projektgrupp vid Scanscot Technology AB bestående av Patrick Anderson (kapitel 3), Oscar Elison (kapitel 5 och 6) och Ola Jovall (kapitel 1, 2 och 4 samt redaktör).

English summary

The containment holds one of the most important safety functions at a nuclear power plant since it is the last of the barriers set up under the defence in depth principle to prevent the spread of radioactive material into the environment.

The purpose of this report is to highlight the important reactor containment issues for existing plants as well as for new construction. The report addresses reactor containments in light water reactors (BWRs as well as PWRs). Focus is also on concrete reactor containments with an internal steel liner, especially prestressed structures.

The report contains the following sections:

- The containment function is described in Chapter 2. The safety function of the containment vessel and the inner structure is discussed as well as other safety systems that directly affect the containment safety features. Requirements for the function of existing and new facilities are reviewed;
- Chapter 3 describes the containment design based on the different types of containments that is operated today but also on the different types of containments currently offered on the market. Important issues related to the selection of the design are discussed, also including a durability perspective;
- Designs of reactor containments are reviewed in Chapter 4. Firstly, the section contains a brief introduction to which codes & standards that are applicable. Further, the focus is on questions concerning loads and load combinations, analytical methods, material and section design. In addition, a number of specific issues are examined;
- Testing, monitoring and inspections are covered in Chapter 5. The tests carried out before commissioning of the plant (pressure testing and leak testing) and regular testing during the plant's lifetime (leak-tightness test) are addressed. Also, the monitoring of time-dependent effects is discussed;
- Chapter 6 provides a review of the modular composite structures that can be used for e.g. the construction of the containment internal structures. The current status in terms of design rules is reviewed also covering the method as such and the manufacturing, transportation and installation procedure.

The report has been prepared on behalf of the Swedish Radiation Safety Authority and is written by a project team at Scanscot Technology AB, consisting of Patrick Anderson (Chapter 3), Oscar Elison (chapters 5 and 6) and Ola Jovall (Chapters 1, 2 and 4 and report editor).

1. Inledning

Reaktorinneslutningen innehar en av de viktigaste säkerhetsfunktionerna vid ett kärnkraftverk eftersom den utgör den yttersta barriären enligt djupförsvarsprincipen för att förhindra spridning av radioaktiva ämnen till omgivningen.

Syftet med föreliggande rapport är att sammanställa information för belysningen av viktigare reaktorinneslutningsfrågor för befintliga anläggningar såväl som vid nybyggnation. Frågeställningarna presenteras utifrån ett generellt perspektiv. Det ska därför noteras att vad som redovisas i föreliggande rapport ej nödvändigtvis sammanfaller med Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter, råd och anvisningar eller uppfattningar och uttolkningar i olika sakfrågor.

Rapporten behandlar reaktorinneslutningar vid lättvattenreaktorer av typerna kokvattenreaktor och tryckvattenreaktor. Vidare fokuseras på reaktorinneslutningar av betong med en invändig tätplåt, och då företrädesvis spännarmerade konstruktioner.

Reaktorinneslutningens funktion (kapitel 2), utformning (kapitel 3), dimensionering (kapitel 4) samt provning och monitorering (kapitel 5) behandlas. Vidare ges i kapitel 6 information om den för inneslutningens inre struktur möjliga byggmetoden med modultillverkade samverkanskonstruktioner.

Rapporten är upprättad på uppdrag av Strålsäkerhetsmyndigheten och har författats av en projektgrupp vid Scanscot Technology AB bestående av Patrick Anderson (kapitel 3), Oscar Elison (kapitel 5 och 6) och Ola Jovall (kapitel 1, 2 och 4 samt redaktör).

2. Funktion

2.1 Inledning

För att kärnkraftverken ska vara säkra krävs såväl fysiska barriärer som effektiva säkerhetssystem och en organisation med tillräckliga resurser och god säkerhetskultur.

Skyddet av kärnkraftreaktorn är uppbyggt med barriärer och skyddssystem i olika nivåer enligt den så kallade djupförvarsprincipen.

Syftet med djupförsvaret är att:

- Förebygga fel genom robusta konstruktioner av hög kvalitet;
- Motverka att tekniska eller organisatoriska fel leder till olyckor;
- Lindra konsekvenserna av en eventuell olycka genom god krisberedskap.

Djupförvarsprincipen består av fem säkerhetsnivåer, där de olika nivåerna ska vara oberoende av varandra, så att brister i en nivå inte påverkar en annan nivå. Utgångspunkten är att radioaktiviteten ska inneslutas, oavsett vad som händer på kärnkraftverket. De fem säkerhetsnivåerna (djupförvarsnivåerna) utgörs av:

- Nivå 1. Kvaliteten i anläggningen, dess drift och underhåll, för att förebygga driftstörningar som kan hota säkerheten;
- Nivå 2. Kontroll över driftstörningar och möjligheten att upptäcka fel;
- Nivå 3. Kontroll över förhållanden som kan uppkomma vid konstruktionsstyrande händelser;
- Nivå 4. Kontroll över och begränsning av förhållanden som kan uppkomma vid svåra haverier;
- Nivå 5. Lindrande av konsekvenser vid radioaktiva utsläpp till omgivningen.

Det finns fyra barriärer som omsluter varandra. Om en barriär inte fungerar tar nästa vid. De fyra barriärerna är:

- Barriär 1. Den första barriären är själva bränslekutsen, det vill säga materialet som binder fast de flesta radioaktiva ämnena;
- Barriär 2. Den andra barriären utgörs av bränslekapslingen som består av gastäta metallrör runt kärnbränslet;
- Barriär 3. Primärsystemet som omsluter bland annat själva reaktorhärden är den tredje barriären. Primärsystemet består av reaktortanken och de rörsystem som hör till den;
- Barriär 4. Reaktorinneslutningen, som är en gastät byggnad av armerad betong och tätplåt som innesluter reaktorn, utgör den fjärde barriären.

De svenska reaktorerna har dessutom ett säkerhetsfilter. Filtret tryckavlastar inneslutningen vid höga tryck, och skyddar därmed reaktorinneslutningen från att överbelastas om alla säkerhetssystem ändå skulle sluta att fungera.

Reaktorinneslutningen innehar alltså en av de viktigaste säkerhetsfunktionerna vid ett kärnkraftverk eftersom den utgör den yttersta barriären enligt djupförvarsprincipen för att förhindra spridning av radioaktiva ämnen.

2.2 Övergripande säkerhetsrelaterade funktionskrav

Såsom förklarats i inledningen ovan är inneslutningens primära säkerhetsfunktion att:

- Utgöra en barriär för att förhindra spridning av radioaktiva ämnen under drift såväl som vid olyckshändelser.

Vidare ska inneslutningen:

- Skydda reaktorn från yttre händelser som kan uppstå på grund av naturliga orsaker eller som orsakas av mänsklig aktivitet;
- Utgöra strålskydd vid normal drift och vid olyckshändelser.

Ursprungligen utgjordes djupförvarsprincipen av de tre första nivåerna (se kapitel 2.1 samt Tabell 2.1 nedan). Efterhand infördes även nivå 4 och nivå 5. De 5 nivåerna är de som gäller för befintliga anläggningar idag. För nya reaktorer har WENRA¹ [134] enats om säkerhetsprinciper som skiljer sig från de som gäller för dagens befintliga anläggningar. Man har för nya anläggningar infört krav på att hantera händelser som för befintliga anläggningar ej har utgjort konstruktionsstyrande händelser. Till exempel har införts "Design Extension Conditions" (DEC) och "multiple failure events". I Tabell 2.1 sammanfattas de olika djupförvarsnivåerna för befintliga respektive nya anläggningar.

De tilläggskrav som tillkommit för nya anläggningar avser naturligtvis nybyggnation, men WENRA pekar på att de nya kraven även kan användas för att hjälpa till att identifiera rimligt realiserbara säkerhetshöjande åtgärder vid de periodiskt återkommande säkerhetsutvärderingarna av befintliga anläggningar. Vidare bör noteras att Strålsäkerhetsmyndigheten har direktiv som bland annat anger att vid revideringar och framtagning av nya föreskrifter ska man så långt möjligt använda sig av IAEAs krav och rekommendationer samt WENRAs säkerhetsreferensnivåer (se avsnitt 2.3).

För de olika djupförvarsnivåerna ställs olika krav på de tre primära säkerhetsfunktionerna hos inneslutningen. Vad gäller barriärfunktionen ställs krav på inneslutningens täthet, för skydd av reaktorn ställs krav på inneslutningens bärförmåga, och för inneslutningens funktion som strålskydd ställs krav på dess tjocklek. För att kunna fullgöra de krav som ställs på täthet respektive strålskydd vid olika typer av händelser får naturligtvis inneslutningens bärförmåga inte överskridas. Kraven är differentierade och varierar beroende på vilken djupförvarsnivå som avses.

Krav på inneslutningens täthet styrs av maximalt tillåten radiologisk omgivningspåverkan för de olika djupförvarsnivåerna. WENRA [134] specificerar följande vad gäller radiologisk omgivningspåverkan för nya anläggningar:

- Nivå 1. Ingen radiologisk omgivningspåverkan utanför anläggningsområdet;
- Nivå 2. Ingen radiologisk omgivningspåverkan utanför anläggningsområdet;

¹ Western European Nuclear Regulators Association.

- Nivå 3. Nivå 3a och 3b: Ingen eller ringa radiologisk omgivningspåverkan utanför anläggningsområdet;
- Nivå 4. Den radiologiska omgivningspåverkan får endast medföra att begränsade skyddsinsatser i tid och rum är nödvändiga;
- Nivå 5. Den radiologiska omgivningspåverkan medför att skyddsinsatser är nödvändiga.

Notera att för nivå 3b skiljer sig WENRA från vad som anges i IAEA SSR-2/1 [54]. För nivå 3b tillåter IAEA att samma krav som för nivå 4 tillämpas.

Tabell 2.1: Djupförsvarsnivåer.

NIVÅ	BEFINTLIGA ANLÄGGNINGAR			NYA ANLÄGGNINGAR	
	Ursprungligen	Befintliga anläggningar	Anläggnings-tillstånd	Nya anläggningar	Anläggnings-tillstånd
1	Kvaliteten i anläggningen, dess drift och underhåll, för att förebygga driftstörningar som kan hota säkerheten	Ingen ändring i förhållande till den ursprungliga lydelsen	Normal drift	Ingen ändring i förhållande till befintliga anläggningar	Normal drift
2	Kontroll över driftstörningar och möjligheten att upptäcka fel	Ingen ändring i förhållande till den ursprungliga lydelsen	Driftstörning	Ingen ändring i förhållande till befintliga anläggningar	Driftstörning
3	Kontroll över förhållanden som kan uppkomma vid konstruktionsstyrande händelser	Ingen ändring i förhållande till den ursprungliga lydelsen	Konstruktionsstyrande händelser	Kontroll över olyckshändelser för att begränsa radioaktiva utsläpp och att förhindra uppkomsten av härdsälta: 3a. Enstaka inledande händelse inklusive yttre påverkan och inre händelser 3b. Multipelfels-händelse	Konstruktionsstyrande händelser "Design Extension Conditions" ¹⁾
4		Kontroll över och begränsning av förhållanden som kan uppkomma vid svåra haverier	Svåra haverier	Kontroll över och begränsning av förhållanden som kan uppkomma vid härdsälta	"Design Extension Conditions" inkluderande svåra haverier ²⁾
5		Lindrare av konsekvenser vid radioaktiva utsläpp		Ingen ändring i förhållande till befintliga anläggningar	

Not: En mörkare blå färg i tabellen ovan innebär att strängare krav än tidigare har införts.

1) Påflygning med stort passagerarflygplan ska enligt WENRA [134] beaktas med utsläppsbegränsningskrav motsvarande olycka utan härdsälta.

2) Enligt WENRA [134] ska även mycket osannolika yttre händelser beaktas.

Den maximalt tillåtna dosen av utsläpp av radioaktiva ämnen för befintliga anläggningar styrs av Strålsäkerhetsmyndighetens författningssamling SSMFS 2008:23 [96], föreläggande från Strålsäkerhetsmyndigheten för respektive anläggning (SSM 2008/1945 [95]), samt för nivå 5 av 1986 års regeringsbeslut för respektive anläggning samt SKI ref 7.1.24 1082/85 [90]. Maximalt tillåten dosbelastning till personalen regleras av Strålsäkerhetsmyndighetens författningssamling SSMFS 2008:51 [97]. 1986 års regeringsbeslut krävde installation av filtrerad tryckavlastning av alla svenska reaktorinneslutningar.

Baserat på de ovan angivna dokumenten kan de huvudsakliga nu gällande kraven på utsläppsbegränsningar sammanfattas, se Tabell 2.2.

Tabell 2.2: Sammanfattning av de huvudsakliga kraven på utsläppsbegränsningar.

Händelseklass enligt SSMFS 2008:17	H1 (normal drift)	H2 (förväntade händelser)	H3 (ej förväntade händelser)	H4 (osannolika händelser)	H5 (mycket osannolika händelser)
Källaktivitet ¹⁾ som kan ge långvarig markbeläggning		0,001·FILTRA	0,01·FILTRA	0,1·FILTRA	1·FILTRA
Effektiv dos	0,1 mSv ²⁾	1 mSv ³⁾	10 mSv ³⁾	100 mSv ³⁾	
Ekvivalent dos till sköldkörtel ⁴⁾		1 mSv	10 mSv	100 mSv	
Referens	5 § SSMFS 2008:23	SSM 2008/1945	SSM 2008/1945	SSM 2008/1945	Regeringsbeslut 27 februari 1986 SKI ref 7.1.24 1082/85 [90]

- 1) FILTRA-kraven har angivits av regeringen för svåra kärnkraftsolyckor motsvarande H5-händelser: Max. 0,1 % av härdinnehållet av cesiumisotoperna 134 och 137 i en reaktorhård av Barsebäcks storlek, dvs. 1800 MW termisk effekt, förutsatt att övriga nuklider av betydelse ur markanvändningssynpunkt, dvs. ädelgaser undantagna, avskiljs i motsvarande proportion som cesium.
- 2) Effektiv dos till någon individ i den kritiska gruppen av ett års luft- och vattenutsläpp av radioaktiva ämnen från alla anläggningar belägna inom samma geografiskt avgränsade område.
- 3) Gäller summan av effektiv dos från extern bestrålning från radionuklider i luften, intern bestrålning under 50 år från inhalerande radionuklider och extern bestrålning under 30 dagar från radionuklider på marken.
- 4) Gäller ekvivalent dos till sköldkörtel hos ettårigt barn från inhalerad radioaktiv jod.

I ett nyligen publicerat dokument [98] ingående i myndighetens svar på ansökan om uppförande av ESS-anläggningen² i Lund har Strålsäkerhetsmyndigheten redovisat nya krav på begränsning av radiologisk omgivningspåverkan, se Tabell 2.3. Dessa krav kan komma att gälla även för framtida byggnation av kärnkraftreaktorer i Sverige, men något formellt beslut att så är fallet finns för närvarande ej publicerat. Notera att referensvärdena för effektiv dos har skärpts i förhållande till vad som gäller idag för befintliga anläggningar. Notera även att för händelser i händelseklass H5 har ett referensvärde för effektiv dos införts.

² Forskningsanläggningen European Spallation Source (ESS).

Tabell 2.3: Sammanfattning av de huvudsakliga kraven på utsläpps begränsningar för ESS-anläggningen.

Händelseklass enligt SSMFS 2008:17	H1 (normal drift)	H2 (förväntade händelser)	H3 (ej förväntade händelser)	H4 (osannolika händelser)	H5 (mycket osannolika händelser)
Referensvärde ¹⁾	0,1 mSv	0,1 mSv	1 mSv	20 mSv	100 mSv

1) Med referensvärde avses den effektiv dos som den mest utsatta representativa personen erhåller under ett år, vid en händelse som inträffar inom ett visst frekvensintervall givet att inga skyddsåtgärder vidtas.

De i Tabell 2.2 och Tabell 2.3 angivna händelseklasserna redovisas i Tabell 2.4 och förklaras i det följande.

Vid konstruktionsarbeten för och vid drift av ett kärnkraftverk ska man enligt Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter ta hänsyn till möjliga driftsituationer och händelser. Dessa sträcker sig från olika driftlägen under normal drift till mycket osannolika händelser. De olika driftsituationer respektive olika inledande händelser som kan inträffa har dock mycket olika sannolikhet för inträffande.

För att erhålla en balanserad riskprofil delas olika driftsituationer, händelser och händelsesekvenser in i olika klasser, så kallade händelseklasser, där varje klass innefattar händelser inom ett givet frekvensintervall. Den händelseklassindelning som tillämpas redovisas i Tabell 2.4 och följer vad som anges i 2 § SSMFS 2008:17 [99].

För respektive kärnkraftsanläggning, baserat på utsläppsanalyser, vald konstruktionstyp för inneslutningen samt provning av inneslutningen före drifttagning, fastställs sedan dimensionerande (maximalt tillåten) läckagenivå för reaktorinneslutningen vid det dimensionerande inre övertrycket, dvs. det övertryck som maximalt kan uppstå vid en konstruktionsstyrande händelse. Den maximalt tillåtna totala läckagenivån för en reaktorinneslutning avser läckage över den bärande betongkonstruktionen med en invändig tätplåt, genomföringar, portar, slussar och demonterbara kupoler. Den maximalt tillåtna totala läckagenivån kan vara av storleksordningen 0.1 % - 1.5 % av i inneslutningen innesluten gas- och ångmassa per dygn vid dimensionerande övertryck.

Enligt SSMFS 2008:17 [99] ska inneslutningsfunktionen³ upprätthållas i den omfattning som behövs beroende på driftläget vid alla händelser till och med händelseklassen osannolika händelser. Inneslutningen ska för händelser i händelseklassen mycket osannolika händelser vara konstruerad med beaktande av de fenomen och belastningar som kan uppstå i den utsträckning som behövs för att begränsa utsläpp av radioaktiva ämnen till omgivningen. I SSMs allmänna råd om tillämpningen av SSMFS 2008:17 [99] anges att konstruktionsbasen för reaktorinneslutningen är händelser till och med händelseklassen osannolika händelser. För att uppfylla kraven som ställs i händelseklassen mycket osannolika händelser bör en säkerhetsutvärdering vara genomförd av händelser och fenomen som kan vara av betydelse för inneslutningens integritet.

³ Med inneslutningsfunktionen avses i SSM 2008:17 reaktorinneslutningens täthetsfunktion, men för kokvattenreaktorer även trycknedtagningfunktionen (PS-funktionen).

Tabell 2.4: Händelseklasser i enlighet med SSMFS 2008:17 2 §.

Händelseklass		Beskrivning	Frekvensintervall ¹⁾
H1	Normal drift	Inkluderar störningar som bemästras av ordinarie drift- och reglersystem utan driftavbrott.	Normala driftlägen
H2	Förväntade händelser	Händelser som kan förväntas inträffa under en kärnkraftreaktors livstid.	Frekvens $\geq 10^{-2}$
H3	Ej förväntade händelser	Händelser som inte förväntas inträffa under en kärnkraftreaktors livstid, men som kan förväntas inträffa om ett flertal reaktorer beaktas.	Frekvens F sådan att $10^{-2} > F \geq 10^{-4}$
H4	Osannolika händelser	Händelser som inte förväntas inträffa. Här inkluderas även ett antal övergripande händelser som oberoende av händelsefrekvens analyseras för att verifiera kärnkraftreaktors robusthet. Dessa händelser benämns ofta konstruktionsstyrande händelser.	Frekvens F sådan att $10^{-4} > F \geq 10^{-6}$
H5	Mycket osannolika händelser	Händelser som inte förväntas inträffa. Om händelsen ändå skulle inträffa kan den leda till stora härdsador. Dessa händelser utgör grunden för kärnkraftreaktors konsekvenslindrande system vid svåra haverier.	-
-	Extremt osannolika händelser	Händelser som är så osannolika att de inte behöver beaktas som inledande händelser i samband med säkerhetsanalys.	Restrisker

¹⁾ Förväntad sannolikhet för en händelse att inträffa under ett år.

WENRA [134] anger följande krav relaterade till inneslutningens barriärfunktion vid förhållanden som kan uppkomma vid härdsämta (djupförsvarsnivå 4):

- System och komponenter som erfordras för att säkerställa barriärfunktionen ska ha en tillförlitlighet motsvarande den funktion hos systemet eller komponenten som ska tillförsäkras. Till exempel kan redundans erfordras för aktiva komponenter;
- Det ska vara möjligt att under ett långtidsförlopp reducera trycknivån inuti inneslutningen på ett kontrollerat sätt med hänsyn tagen till icke-kondenserbara gaser;
- Säkerhetsmarginalerna vad gäller inneslutningens dimensionering ska vara så pass höga att tryckavlastningssystemet ej erfordras under den tidiga fasen av härdsämteförloppet, för att hantera de trycknivåer som uppstår på grund av att icke-kondenserbara gaser ansamlas i inneslutningen. Den tidiga fasens varaktighet är tills dess mängden radioaktivt material i inneslutningsatmosfären har reducerats betydligt;
- Värmebortförel från inneslutningen ska säkerställas under härdsämteförloppet. Tryckavlastningssystemet ska då ej utgöra det primära systemet för att föra bort restvärme från inneslutningen;

- Inneslutningen ska, med tillräckliga marginaler för att ta hänsyn till osäkerheter, kunna motstå de statiska och dynamiska laster som kan uppstå under olyckshändelser med härdsmläta. Detta gäller även slussar och öppningar, genomföringar och skalventiler. Åtgärder ska vidtas för att förhindra skador på inneslutningen orsakade av vätgasförbränning.

Vidare ställs följande krav vid förhållanden som kan uppkomma vid härdsmläta vad gäller att begränsa den radiologiska omgivningspåverkan:

- Det ska finnas motåtgärder för att reducera andelen fissionsprodukter i inneslutningsatmosfären;
- Det ska finnas motåtgärder för att reducera trycknivån inuti inneslutningen;
- Tryckavlastningssystemet ska vara försett med en filteranläggning;
- Inneslutningens genomföringar ska vara omgärdade av en sekundärinneslutning som samlar upp eventuellt läckage från inneslutningen.

Den instrumentering som erfordras för att kunna besluta om motåtgärder ska finnas monterad i anläggningen. Instrumenteringen ska vara säkerhetsklassad med erforderlig miljötålighet och ska ha en tillförlitlighet motsvarande den funktion hos systemet eller komponenten som ska tillförsäkras. Notera att djupförsvarsnivå 4 avser inre händelser men även yttre påverkan som kan leda till tidiga eller stora radioaktiva utsläpp, om den yttre påverkan ej kan påvisas vara eliminerad. Vidare ska enligt WENRA [134] påflygning med stort passagerarflygplan (klassificerad som DEC) beaktas med utsläppsbegränsningskrav motsvarande olycka utan härdsmläta.

För djupförsvarsnivå 1, 2 och 3a, motsvarande normal drift, driftstörning samt konstruktionsstyrande händelser ska inneslutningens bärförmåga och täthet påvisas. Detta görs normalt genom konservativa analyser och nyttjande av för ändamålet utgivna regelverk för dimensionering av reaktorinneslutningar, se vidare kapitel 4.

För nivå 3b gäller enligt WENRA [134] samma begränsning av utsläppsnivåer som för nivå 3a, men analysmetoder och randvillkor samt förutsättningar och säkerhetsanalyskrav kan för nivå 3b uppställas enligt en stegvis ansats, även baserad på information från probabilistiska analyser. "Best estimate"-metoder och mindre strikta regler än gällande för nivå 3a skulle kunna användas under förutsättning att sådana metoder då är vederbörligen motiverade.

Vidare kan nämnas att såväl inneslutningen som vissa delar av den inre strukturen utgör barriärer för att förhindra spridningen av en brand.

Det finns ett antal olika säkerhetssystem vars funktion vid en olyckshändelse antingen påverkar inneslutningen eller vars funktion direkt hjälper till att säkerställa inneslutningens barriärfunktion. Den bärande strukturen inuti inneslutningen har också säkerhetsrelaterade funktioner. Fokus i föreliggande rapport ligger på inneslutningen, d.v.s. den struktur som utgör täthetsbarriär (upprätthåller barriärfunktionen). Men den inre strukturen inuti inneslutningen samt vissa säkerhetssystem kommer också att behandlas. Specifika system och funktioner för ovanstående delar behandlas i avsnitt 2.5. I avsnitt 2.3 sammanfattas WENRAs referensnivåer för befintliga anläggningar och då speciellt rekommendationer avseende reaktorinneslutningen och i avsnitt 2.4 diskuteras kortfattat IAEAs krav och rekommendationer.

2.3 WENRAs nya referensnivåer för befintliga anläggningar

Målsättningen för WENRAs verksamhet är att ta fram ett mellan medlemsländerna harmoniserat angreppssätt vad gäller kärnsäkerhet. Ett led i detta arbete har varit framtagandet av kärnsäkerhetsreferensnivåer. Dessa utgör förväntad praxis att bli implementerad hos medlemsländerna. Sverige är ett av medlemsländerna och Strålsäkerhetsmyndigheten har vid förfrågan sagt att man enligt sina direktiv så långt möjligt inför revideringar och framtagning av nya föreskrifter kommer att använda sig av IAEAs krav och rekommendationer samt WENRAs referensnivåer.

I september 2014 utgav WENRA nya reviderade säkerhetsreferensnivåer ("Safety Reference Levels") för befintliga kärnkraftreaktorer [135]. De införda förändringarna i förhållande till den tidigare versionen baseras på en utvärdering av olyckshändelsen vid kärnkraftverket Fukushima Daiichi 2011, inkluderande även de genomförda europeiska stresstesterna av befintliga reaktorer. Man anger i förordet i den nya utgåvan att nya frågeställningar vad gäller yttre påverkan orsakade av naturfenomen har inkluderats och att andra delar av rapporten har genomgått signifikanta ändringar.

Enligt [102] har Strålsäkerhetsmyndigheten åtagit sig att uppdatera och harmonisera det svenska regelsystemet så att det är i linje med WENRAs nya reviderade säkerhetsreferensnivåer senast 2017.

Nedan sammanfattas viktigare delar som identifierats att ha direkt koppling till reaktorinneslutningens funktion. Det ska noteras att de av WENRA angivna referensnivåerna fokuserar på säkerhet relaterad till reaktorhärden och använt bränsle. Specifikt har exkluderats fysiskt skydd och strålsäkerhet, utom i något enstaka undantagsfall.

Generellt har man i den nya utgåvan av referensnivåer förtydligat kraven på lämplig implementering av rimligt genomförbara säkerhetshöjande åtgärder och en kontinuerlig förbättring och översyn av säkerheten vid kärnkraftverk. Man anger explicit att detta avser alla typer av säkerhetsåtgärder och inte endast vissa speciellt utpekade.

En reaktorinneslutning ska finnas som tillförsäkrar att en eventuell radiologisk omgivningspåverkan vid någon av de konstruktionsstyrande händelserna ej överskrider fastställda gränsvärden. Inneslutningen ska omsluta reaktortanken och övriga delar av primärsystemet och vara utformad så att inneslutningen utgör en tät barriär. Vidare ska inneslutningen vara så konstruerad att den kan isoleras vilket till exempel ställer krav på skalventiler. Inneslutningen ska vara försedd med säkerhetssystem som begränsar uppkomna tryck- och temperaturnivåer inuti inneslutningen. Slutligen ska system införas som reducerar luftburna partiklar, vätgas, syre eller andra substanser som kan frigöras till inneslutningens atmosfär.

För konstruktionsstyrande händelser ska acceptanskriterier fastställas för skydd av reaktorinneslutningens integritet. Fastställda kriterier (gränsvärden) ska inkludera temperatur, tryck och läckagehastighet. Vidare ska det finnas instrumentering som registrerar alla relevanta parametrar som menligt kan påverka inneslutningen, samt eventuellt andra parametrar som är av betydelse för en säker drift och för att fastställa anläggningens status under konstruktionsstyrande händelser.

Som ett led i djupförvarsprincipen ska analyser genomföras för "design extension conditions" (DEC), dvs. för förhållanden som ligger utanför de ursprungliga dimensioneringsförutsättningarna. Detta för att ytterligare förbättra säkerheten genom att öka anläggningens kapacitet att motstå mer utmanande händelser eller tillstånd än

de som täcks in av de konstruktionsstyrande händelserna och för att minimera den radiologiska omgivningspåverkan vid DEC så långt praktiskt möjligt. För beskrivning av DEC se avsnitt 2.2. Det finns två olika kategorier av DEC, DEC A respektive DEC B. DEC A motsvarar DEC på nivå 3 i Tabell 2.2, dvs. uppkomsten av en härdsmlta förhindras, medan DEC B motsvarar nivå 4 i samma tabell vilket innebär att man ska begränsa förhållanden som kan uppstå vid en härdsmlta. Svåra haverier ingår alltså i DEC B.

För båda DEC-kategorierna är målet att radioaktivt material innesluts. Därför krävs vid en DEC-händelse att inneslutningen isoleras så att den blir tät. Om detta ej kan ske tillräckligt snabbt eller om någon läckageväg ändå uppstår för en specifik händelse ska det visas med mycket stor sannolikhet att en härdsmlta förhindras. Tryck- och temperaturnivåerna i inneslutningen ska begränsas och inneslutningen ska skyddas mot överbelastning. Om tryckavlastning med hjälp av ventilering av inneslutningen då erfordras ska ventileringen vara filtrerad. Hot mot inneslutningens integritet från brännbara gaser ska hanteras. Att en härdsmlta penetrerar igenom inneslutningen ska förhindras eller motverkas så långt praktiskt möjligt. Utskjutning av en härdsmlta från reaktortanken under högt tryck ska förhindras att ske.

För DEC A ska den radiologiska omgivningspåverkan minimeras så långt praktiskt möjligt. För DEC B ska den radiologiska omgivningspåverkan begränsas i tid och omfattning så långt praktiskt möjligt så att tillräcklig tid finns för att genomföra skyddsåtgärder i kärnkraftverkets omgivning och för att undvika kontaminering av större områden under en längre tid.

Det ska vidare visas att tillräckliga marginaler finns för att undvika så kallade "cliff edge"-effekter som skulle kunna leda till oacceptabla konsekvenser. En "cliff edge"-effekt inträffar när en liten förändring av en förutsättning leder till en oproportionerlig ökning av konsekvenserna.

Tillräcklig instrumentering ska finnas tillgänglig under DEC-händelser för att kunna fastställa anläggningens och säkerhetssystemens status i tillräcklig omfattning så att korrekta beslut kan fattas.

2.4 IAEAs föreslagna konstruktionsbas

I tidigare avsnitt har såväl SSMs funktionskrav som WENRAs säkerhetsreferensnivåer och övriga funktionskrav kopplade till reaktorinneslutningar berörts. IAEA har upprättat motsvarande krav och rekommendationer på olika nivåer i olika typer av dokumentserier till exempel "Safety Standards", "Safety Guides" och "Technical Documents". I detta sammanhang kan speciellt nämnas [53] och [54], där den sistnämnda även om den är utgiven under 2012 huvudsakligen är skriven före olyckshändelsen vid Fukushima Daiichi 2011. IAEAs krav är mycket lika, om än ej identiska, med de krav som WENRA har ställt upp. Någon separat redovisning av IAEAs krav har därför ej ansetts nödvändig att införa i föreliggande rapport. Nedan redovisas emellertid en sammanfattning (från [60]) av en uttolkning av IAEAs krav på reaktorinneslutningar såsom de var specificerade i [100] före olyckshändelsen vid Fukushima Daiichi.

Vid konstruktionsstyrande händelser är inneslutningens primära funktion att begränsa radioaktivt läckage till omgivningen så att gällande gränsvärden innehålls. Maximalt tillåtna läckagenivåer får ej överskridas. För att påvisa inneslutningens täthetsfunktion ska det vara möjligt att täthetsprova

inneslutningen med jämna intervall under anläggningens livslängd. Vissa typer av genomföringar ska även kunna täthetsprovas separat.

Inneslutningens bärförmåga vid konstruktionsstyrande händelser måste påvisas med tillräckliga säkerhetsmarginaler. Det ska finnas möjligheter att genomföra tryckprovning såväl före driftsättning som under anläggningens livslängd. Tryck och temperatur vid konstruktionsstyrande händelser ska med hjälp av sprinklingssystem eller dylikt begränsas till acceptabla nivåer.

Vad gäller genomföringar ställs samma krav på dessa som på inneslutningskärlet självt. Antalet genomföringar ska minimeras. Vid konstruktionsstyrande haverier ska inneslutningen kunna isoleras, beroende på typen av genomföring igenom inneslutningskärlet krävs då att en eller två skalventiler stänger. Slussar ska vara utformade med dörrar som är kopplade på ett sådant sätt att minst en dörr alltid är stängd för en driftsatt anläggning och vid konstruktionsstyrande händelser.

Mängden väte, syre och andra substanser i inneslutningsatmosfären ska begränsas så att farliga koncentrationsnivåer ej uppnås med tanke på risken för deflagration eller detonationer vilka skulle kunna äventyra inneslutningens integritet. Fissionsprodukters spridning i inneslutningsatmosfären ska också kontrolleras så att en vidare spridning av dessa till omgivningen begränsas. Isolering, beläggningar etc. ska vara utformade på ett sådant sätt att de dels kan uppfylla sina säkerhetsfunktioner, och att de ej via nötning etc. kan äventyra säkerhetssystemens funktion.

Den inre strukturen ska vara utformad på ett sådant sätt att det vid konstruktionsstyrande händelser ej uppstår differenstryck som kan äventyra konstruktionens bärförmåga eller som kan skada andra system som tillgodoräknas vid händelsen.

För *svåra haverier* ska hänsyn tas till åtgärder som kan mildra konsekvenserna och därmed begränsa den radioaktiva omgivningspåverkan. Åtgärder för att bibehålla inneslutningens integritet ska då tas i beaktande. Exempelvis ska man ha kontroll över läckage av radioaktivt material, fissionsprodukter och andra substanser som kan genereras. Vidare måste även isoleringen av inneslutningen och slussarnas funktion vidmakthållas, den interna strukturen måste kunna motstå de lasteffekter som uppstår, samt temperaturnivåerna inuti inneslutningen begränsas.

Delar av inneslutningen fungerar även som strålskydd.

I IAEA anges även möjligheten att utrymmena utanför reaktorinneslutningen (primärinneslutningen) utformas så att de kan utgöra en sekundär inneslutning där man kan ta om hand eventuellt radioaktivt läckage från primärinneslutningen.

Emellertid har IAEA i [59] föreslagit⁴ hur konstruktionsbasen för kärnkraftsreaktorer, baserat på [54] men även inkluderande hänsyn tagen till Fukushima Daiichi-olyckan, kan tydliggöras. I [59] definieras begreppen konstruktionsbas ("design basis") och konstruktionsstyrande händelser ("design basis accidents"), och hur dessa begrepp förhåller sig till varandra:

⁴ Termen "föreslagits" har här valts eftersom [59] vid upprättandet av föreliggande rapport endast fanns tillgänglig i en "draft"-version.

- Konstruktionsbas ("design basis"): Tillstånd och händelser som explicit tas hänsyn till vid dimensioneringen och utformningen av anläggningen, enligt fastställda kriterier, för att anläggningen med hjälp av planerad funktion hos säkerhetssystemen ska kunna motstå händelserna utan att fastställda acceptanskriterier överskrids.
- Konstruktionsstyrande händelser ("design basis accidents"): Konstruktionsstyrande händelser är en uppsättning postulerade olyckstillstånd som anläggningen måste kunna motstå samtidigt som den uppfyller gällande kriterier och krav. Konstruktionsstyrande händelser utgör alltså tillsammans med andra faktorer konstruktionsbasen för anläggningen.

Därefter redovisas i [59] vad som kan anses vara konstruktionsbasen för kärnkraftreaktorer och hur konstruktionsbasen förhåller sig till händelser utanför konstruktionsbasen ("beyond design basis"), "cliff edge"-effekter⁵ och olika anläggningstillstånd. I Figur 2.1 sammanfattas dessa förhållanden och vilka övergripande krav som kopplar till konstruktionsbasen och respektive anläggningstillstånd. För att återkoppla till tidigare avsnitt har i Figur 2.1 införts benämningarna DEC A och DEC B som ej används i den ursprungliga redovisningen i [59]. Notera att det är endast benämningarna som införts, kategoriseringen i "no core melt" respektive "core melt" görs i [59]. Den ursprungliga engelska texten från [59] har för tydlighetens skull behållits i Figur 2.1.

DESIGN BASIS					BEYOND DESIGN BASIS	
OPERATIONAL STATES		ACCIDENTAL CONDITIONS			CONDITIONS PRACTICALLY ELIMINATED	
Normal operating conditions	Anticipated operational occurrences	Design basis accidents	Design extension conditions		NO CLIFF-EDGE EFFECTS	
NO	AOO	DBAs	DEC A No core melt	DEC B Severe accidents (core melt)		
CONDITIONS GENERATED BY INTERNAL AND EXTERNAL HAZARDS						
CRITERIA FOR NECESSARY CAPABILITY, RELIABILITY AND AVAILABILITY FOR EACH PLANT STATE						
Design basis of equipment for operational states	Design basis of safety systems including those SCCs necessary to control DBAs and some AOOs	Design basis of safety features for DECs including those SCCs necessary to control DECs				
		Design basis of the containment systems				

Figur 2.1: Konstruktionsbas föreslagen av IAEA i [59] och baserad på [54] samt på en utvärdering av Fukushima Daiichi-olyckan.

⁵ "Cliff edge" effekter definieras i avsnitt 2.3

2.5 System och funktioner

2.5.1 Inledning

I detta avsnitt redovisas utvalda system och funktioner med fokus på reaktorinneslutningens säkerhetsfunktion.

För att säkerställa inneslutningens primära säkerhetsfunktion, att utgöra en barriär för att förhindra spridning av radioaktiva ämnen under drift såväl som vid olyckshändelser nyttjas följande system och funktioner:

- Inneslutningskärlets täthet ska vara tillräcklig så att specificerade läckagenivåer ej överskrids vid en dimensionerande olyckshändelse;
- Reduktion av luftburna partiklar;
- Upprättande av en sekundärinneslutning för att ta om hand eventuellt oavsiktligt läckage från reaktorinneslutningen;
- Konstruktionslösningar i övrigt som begränsar utsläpp.

Under normal drift är slussar och portar stängda och den för kokvatteninneslutningar demonterbara kupolen är monterad. Emellertid är ett antal genomföringar igenom inneslutningskärlet i funktion, dvs. det finns en passage från inneslutningen till omkringliggande utrymmen. Vid en olyckshändelse isoleras inneslutningen genom att så kallade skalventiler vid tidigare öppna genomföringar stängs. Inneslutningen utgör då en tät barriär mot läckage av radioaktivt material.

De primära systemen och funktionerna för att på ett kontrollerat sätt begränsa trycknivåer och temperaturer inuti inneslutningen vid en dimensionerande olyckshändelse är för lättvattenreaktorer motsvarande de typer vi har i Sverige idag:

- Inneslutningens volym;
- Värmebortförel via strukturer och bassänger;
- Sprinklersystem inuti inneslutningen;
- Luftkylningssystem;
- Trycknedtagningssystem med kondensationsbassäng (kokvattenanläggningar);
- Extern kylning av recirkulerat vatten (sprinklersystem eller kondensationsbassäng).

För andra typer av inneslutningar finns ytterligare system och funktioner. För att förhindra ett katastrofalt brott hos reaktorinneslutningen vid mycket osannolika händelser, dvs. för trycknivåer som överskrider de som inneslutningen är dimensionerad för, är de svenska inneslutningarna försedda med ett tryckavlastningssystem. Detta system begränsar därmed de maximala trycknivåer som kan uppstå. Vidare ska reaktorhärden kunna täckas med vatten genom att reaktorinneslutningen vattenfylls.

Förhindrandet av uppkomsten av vätgasexplosioner inuti inneslutningen kan göras med hjälp av följande system och funktioner:

- Begränsning av mängden vätgas;

- Förhindrande av lokala vätgaskoncentrationer genom omblandning av luftvolymerna inuti inneslutningen;
- Minimera tillgången på syre i inneslutningens atmosfär.

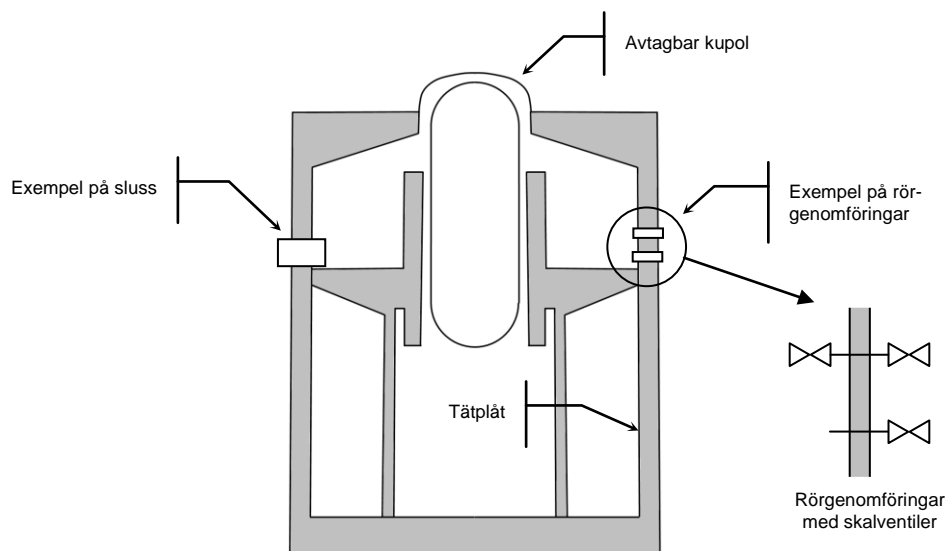
Ovanstående system och funktioner redovisas mer i detalj i följande avsnitt. Vidare har den inre strukturen olika typer av säkerhetsrelaterade uppgifter. Dessa redovisas också. Notera att i figurerna som är kopplade till redovisningen av system och funktioner i följande avsnitt har valts att visa en kokvattenreaktor. Detta beror på att kokvattenreaktorer har några specifika säkerhetsrelaterade system som ej finns hos tryckvattenreaktorer. De redovisade systemen är emellertid gällande för såväl tryckvattenreaktorer som kokvattenreaktorer om annat ej uttryckligen anges.

Utöver ovan angivna system och funktioner behövs även en omfattande instrumentering för mätning och monitorering av reaktorinneslutningen. Till exempel behöver information om tryck, temperatur och aktivitetsnivåer i olika delar av inneslutningen finnas tillgänglig, men även information om vattennivåer, vätgas- och syrgaskoncentrationer i inneslutningens atmosfär med mera.

2.5.2 Täthetsbarriär

2.5.2.1 Inneslutningskärlets täthet

Den primära täthetsbarriären för våra svenska reaktorinneslutningar utgörs av den på insidan monterade tätplåten och genomföringar, portar och slussar som passerar igenom inneslutningskärlet samt för kokvattenreaktorer en demonterbar kupol (Figur 2.2). Hos majoriteten av de svenska reaktorinneslutningarna är tätplåten på insidan skyddad av en invändig betonggjutning. Den invändiga betonggjutningens uppgift är att skydda tätplåten från mekanisk påverkan vid en olyckshändelse samt att via betongens direktkontakt med tätplåten reducera risken för tätplåtskorrosion.



Figur 2.2: Inneslutningens täthetsbarriär (tätplåt samt genomföringar med skalventiler, portar, slussar och för kokvattenreaktorer en demonterbar kupol).

För att säkerställa tätbarriärens funktion finns det ett allmänt krav på att antalet genomföringar ska minimeras. Trots detta är antalet genomföringar av nödvändighet

ganska stort eftersom de krävs för process- och säkerhetsfunktioner. De utgörs av rör genomföringar samt genomföringar för elkablar och kablage för mätutrustning. Vidare brukar ett begränsat antal reservgenomföringar finnas för eventuellt framtida behov. På varje rör som passerar genom rör genomföringar finns skalventiler monterade som via att de automatiskt stänger säkerställer inneslutningens täthet vid en olyckshändelse. Inneslutningen är då isolerad från omgivande utrymmen. Rör som är trycksatta av reaktorn samt rörledningar med direkt förbindelse med inneslutningens atmosfär har generellt två skalventiler, en på insidan och en på utsidan av inneslutningskärlet. Undantag finns för vissa säkerhetssystem som då endast har en yttre skalventil. Skalventilerna ska vara monterade så nära inneslutningskärlet som möjligt.

Vidare ställs krav på utformningen av slussar och portar, dels för att upprätthålla täthetsfunktionen när de är stängda och dels för att säkerställa att någon sluss eller port ej står öppen eller öppnas av misstag.

Tätplåten är hopsvetsad av mindre delar som är sammanfogade via täta svetsar dels på fabrik till moduler som är möjliga att transportera till byggarbetsplatsen, dels på plats vid uppförandet av kärnkraftverket då modulerna svetsas samman. Vidare är tätplåten tätsvetsad till genomföringarna och till karmarna för slussar, portar och kupoler. Dessa har sedan speciellt utformade tätningar mellan lucka och karm.

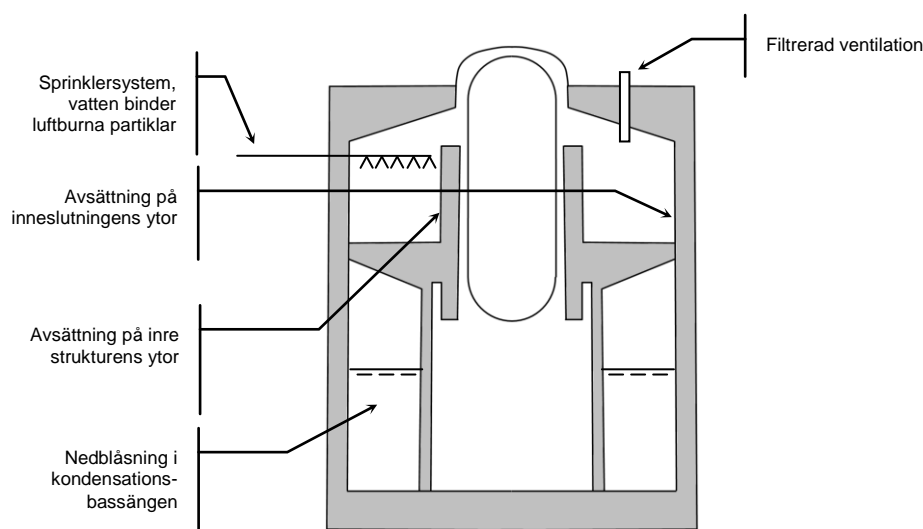
De primära läckagevägarna över tätbarriären uppträder normalt vid slussar, portar, kupoler och genomföringar, samt igenom tätplåtssvetsar. Svetsarna samt öppningarna och genomföringarna måste därför täthetsprovas så att det säkerställs att de är täta. För att kunna tätprova svetsar är vissa av dem försedda med tätprovningsskanaler som är placerade innanför tätplåten, dvs. de är ingjutna i den bakomliggande betongkonstruktionen. Många öppningar etc. är utformade så att de enskilt kan tätprovas separat utan att inneslutningsatmosfären i sin helhet trycksätts.

Det är även viktigt att säkerställa att åldrande tätningar (tätringar etc.) för olika typer av öppningar ej kan medföra en försämring av tätheten av sådan art att maximalt tillåtna läckagenivåer ej kan innehållas vid en olyckshändelse. Eventuella korrosionsskador på tätplåten kan dramatiskt reducera inneslutningens täthet, varför korrosion måste begränsas via ändamålsenliga konstruktionslösningar och byggmetoder.

2.5.2.2 Reduktion av luftburna partiklar

Reduktion av luftburna partiklar vid olyckshändelser sker på olika sätt. Luftburna partiklar avsätts på fria ytor på insidan av inneslutningskärlet och på ytorna av den inre strukturen inuti inneslutningen. Vattnet från det sprinklersystem som startar vid en olyckshändelse (se Figur 2.6), primärt för att begränsa uppkomna trycknivåer inuti inneslutningen, har även som uppgift att binda luftburna partiklar. Vidare kan partiklar i atmosfären minskas med hjälp av en filtrerad ventilation av inneslutningen. För kokvattenreaktorer binds partiklar genom att gasen i inneslutningen, som ju innehåller partiklarna, via övertryck släpps ut i vattnet i kondensationsbassängen där partiklarna binds till vattnet.

Reduktion av luftburna partiklar redovisas schematiskt i Figur 2.3.



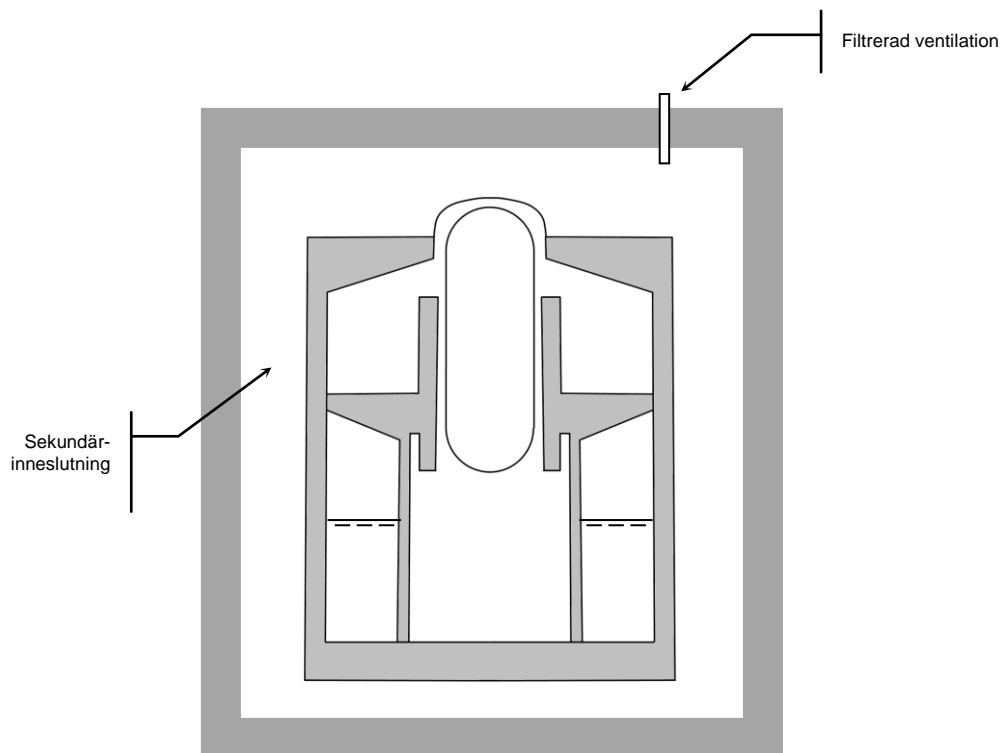
Figur 2.3: Schematisk redovisning av reduktion av luftburna partiklar.

2.5.2.3 Sekundärinneslutning

För att ta om hand eventuellt läckage från reaktorinneslutningen kan en sekundärinneslutning upprättas. Vid de befintliga anläggningarna utgörs sekundärinneslutningen av lokala utrymmen utanför viktigare genomföringar eller av hela den byggnad som omsluter reaktorinneslutningen. För vissa nya anläggningstyper finns en speciellt utformad sekundärinneslutning med i princip samma form som reaktorinneslutningen som då omsluter hela den primära inneslutningen. Sekundärinneslutningen har då även som uppgift att skydda primärinneslutningen och därmed reaktortanken och det övriga primärsystemet från yttre händelser såsom till exempel illvillig påflygning med ett stort kommersiellt passagerarflygplan (se avsnitt 2.6.2.7).

Sekundärinneslutningen har ett mindre undertryck i förhållande till omgivande utrymmen (men inte i förhållande till primärinneslutningen) för att förhindra läckage till omgivande utrymmen. Sekundärinneslutningen är i sin tur kopplad till en filtrerad ventilation.

I Figur 2.4 visas ett schematiskt exempel på en sekundärinneslutning.



Figur 2.4: Exempel på sekundärinneslutning, schematisk redovisning.

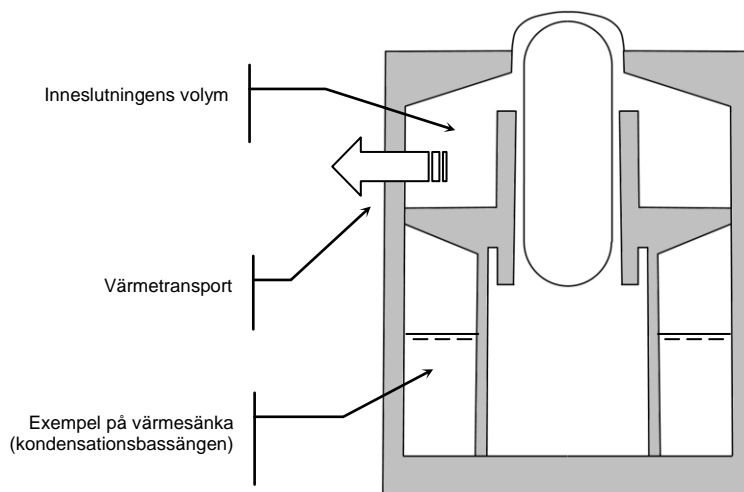
2.5.2.4 Konstruktionslösningar i övrigt som begränsar utsläpp

Sekundärinneslutningen, som beskrivs ovan, är en konstruktionslösning som begränsar utsläpp. Det finns ytterligare konstruktionslösningar som begränsar utsläpp i de fall inneslutningens isolering oavsiktligt bryts ("containment bypass") vid en olyckshändelse, eller som begränsar eventuella utsläpp från till exempel recirkulationssystem som nyttjas vid en olyckshändelse och vars dragning delvis går utanför primärinneslutningen. Sådana konstruktionslösningar varierar från fall till fall.

2.5.3 Begränsa trycknivåer och temperaturer

2.5.3.1 Inneslutningens volym och värmebortförel

Det i inneslutningen uppkomna trycket vid en dimensionerande olyckshändelse är direkt kopplat till inneslutningens volym. Ju större volym desto lägre maximalt tryck för en given olyckshändelse. Temperaturen inuti inneslutningskärlet påverkas av hur mycket värme som bortförs via inneslutningskärlet, vars utsida vetter mot utrymmen med lägre temperatur och av hur mycket värme som kan magasineras i inneslutningens interna struktur och i eventuella vattenmagasin inuti inneslutningen såsom till exempel kondensationsbassängen (värmesänka). Se Figur 2.5.

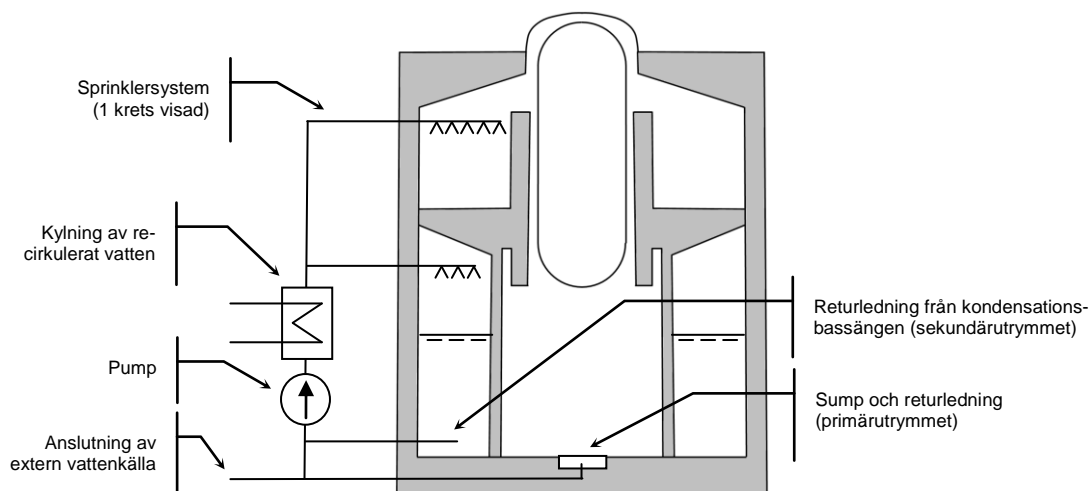


Figur 2.5: Inneslutningens volym och värmebortförel.

2.5.3.2 Sprinklersystem

Med hjälp av sprinkling med vatten inuti inneslutningen sänks trycket genom att ånga kondenseras. Sprinklersystemet kan förses med vatten från en invändig vattentank och från yttre vattenkällor. Sprinklat vatten från en inre vattentank eller från en yttre begränsad vattenkälla recirkuleras normalt genom att vattnet samlas upp i en sump och via ett recirkulationssystem kan det återanvändas för sprinkling. För en kokvattenreaktor recirkuleras vatten via kondensationsbassängen. Vattnet kyls vanligtvis via ett kylsystem som kan vara placerat utanför inneslutningen. För att säkerställa långvarig kylning, eller för att vattenfylla inneslutningen, finns även möjligheten att tillfälligt ansluta andra yttre vattenkällor.

Normalt består sprinklersystemet av flera separerade kretsar. Kretsarna är då såväl fysiskt som elektriskt separerade. Ett exempel på en sprinklersystemkrets redovisas i Figur 2.6.



Figur 2.6: Sprinklersystem inuti inneslutningen med utvändigt vattenrecirkulation (1 krets av normalt flera separerade parallella kretsar visad).

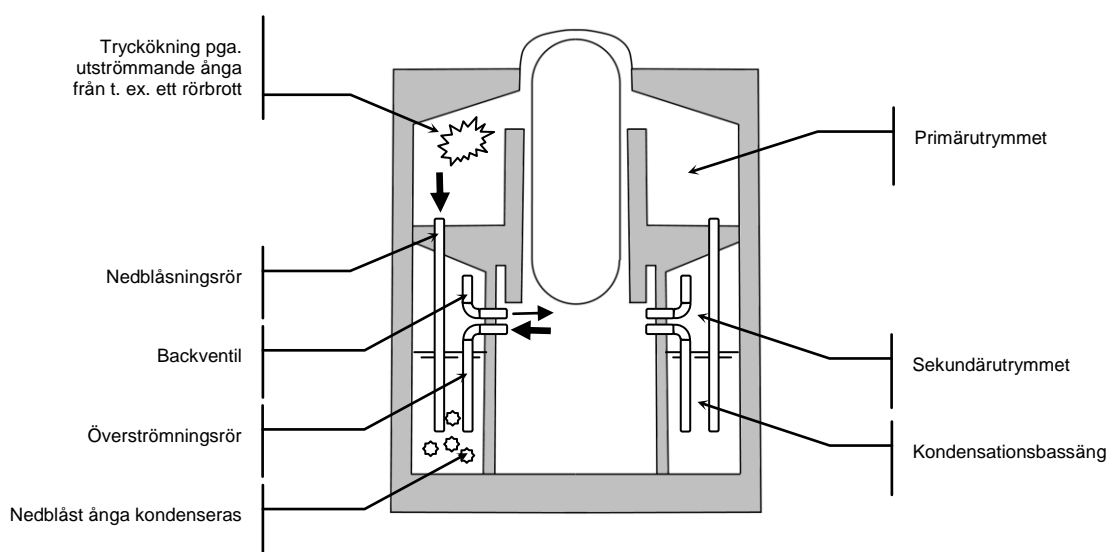
Notera att det under olycksförloppet ej är tillåtet att material frigörs, till exempel på grund av mekanisk påverkan av det vid rörbrott ur röret utströmmande mediet, som kan komma att sätta igen sumpen, och därmed försämra eller rentav förhindra sprinklersystemets funktion.

2.5.3.3 Luftkylningssystem

Temperaturen i inneslutningen styrs genom cirkulation och kylning av atmosfären. Detta görs vid normal drift av anläggningen men i vissa fall kan även luftkylningssystemet tillgodoräknas vid olyckshändelser. Ett kylbatteri står för kylningen och fläktar säkerställer cirkulationen.

2.5.3.4 Trycknedtagningssystem med kondensationsbassäng

Trycknedtagning med hjälp av en kondensationsbassäng är ett säkerhetssystem som lämpar sig för reaktorinneslutningar som har en mindre volym, dvs. för kokvattenreaktorer. Kondensationsbassängens uppgift är att ta emot och kondensera ånga som frigörs eller bildas vid en olyckshändelse. Härvid begränsas det maximala övertryck som kan uppstå. Systemet visas i Figur 2.7. Kondensationsbassängen har även andra uppgifter, till exempel att utgöra värmesänka vid en olyckshändelse, se vidare avsnitt 2.5.3.1.



Figur 2.7: Trycknedtagningssystem med kondensationsbassäng.

Systemet fungerar så att inneslutningen är indelad i två utrymmen som är gastäta, dvs. ånga kan ej oavsiktligt läcka från det ena utrymmet till det andra. Reaktortanken och resten av primärsystemet som kan ge upphov till ett inre övertryck vid en olycka är placerad i det ena utrymmet, det så kallade primärutrymmet. Kondensationsbassängen är placerad i det andra utrymmet, sekundärutrymmet. Vid en olyckshändelse kommer ånga från primärutrymmet på grund av övertryck att blåsas ned i kondensationsbassängen via nedblåsningssrör och överströmningsrör varefter ångan kondenseras och övertrycksnivån begränsas. Även ånga från primärsystemet kan vid vissa händelser avlastas ned i kondensationsbassängen.

Eftersom vissa gaser i ångan är okondenserbara kommer trycket i sekundärutrymmets atmosfär efterhand att öka. Samtidigt minskar trycket i primärutrymmet på grund av den sammantagna effekten av nedblåsningen och sprinklingen. I ett senare skede av nedblåsningsförloppet kan därför trycket i sekundärutrymmet vara större än i primärutrymmet. För att begränsa denna omvända tryckskillnad finns backventiler som möjliggör för gas att strömma från sekundärutrymmet tillbaka in i primärutrymmet.

2.5.3.5 Extern kylning av recirkulerat vatten

Vatten som används för att begränsa temperaturen inuti inneslutningen, till exempel tillhörande sprinklersystemet eller kondensationsbassängen, kan behöva kylas. Vattnet recirkuleras då ofta via en externt placerad kylanläggning. Se Figur 2.6.

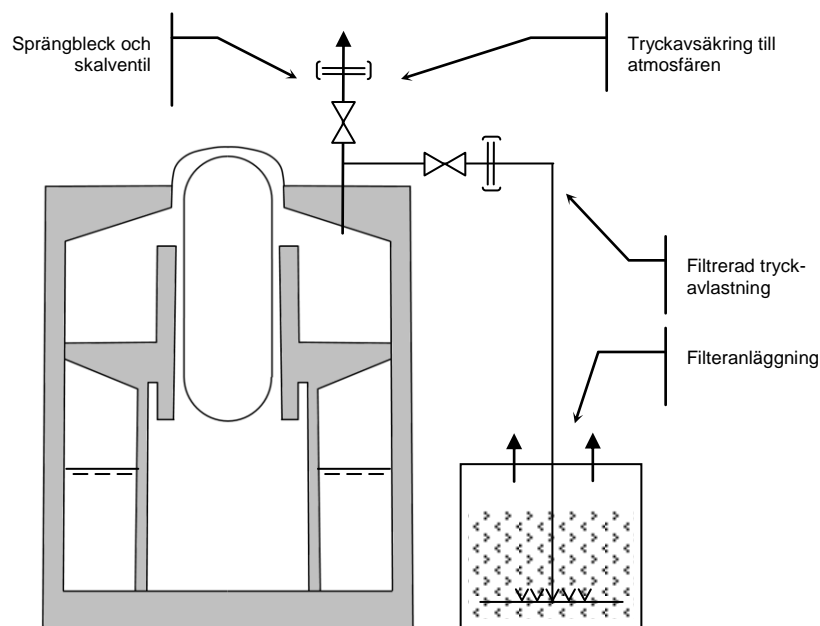
Det är då viktigt att eventuellt läckage från cirkulationssystemet i möjligaste mån förhindras, och om ett oavsiktligt läckage ändå skulle uppstå, att det läckta vattnet kan tas om hand.

2.5.3.6 Tryckavlastningssystem

Två typer av tryckavlastningssystem finns för hantering av svåra haverier (mycket osannolika händelser). Båda systemen har till uppgift att förhindra ett katastrofalt brott i inneslutningskärlet för de fall övertrycksnivån hotar att stiga till oacceptabla nivåer. Reaktorinneslutningens tryckavlastningssystem innebär en filtrerad tryckavlastning där ventilerad ånga leds via ett filter som rensar ångan från i princip alla radioaktiva partiklar. Reaktorinneslutningen kan även för vissa speciella händelseförlopp tryckavsäkras utan att ångan leds via något filter.

Båda systemen är normalt försedda med var sin skalventil och var sitt sprängbleck. Skalventilen är öppen så att ett eventuellt övertryck inuti inneslutningen belastar sprängblecket. Baserat på trycknivå och tryckökningshastighet öppnar sprängblecken om kritiska trycknivåer uppstår i inneslutningen. Kritiska trycknivåer uppnås när inneslutningens dimensionerande tryck framräknat för postulerade olyckshändelser överskrids med en viss fastställd marginal. Den kritiska trycknivån ska med tillräcklig säkerhetsmarginal underskrida inneslutningens maximala bärförmåga. Tryckavlastningen och tryckavsäkringen träder i kraft automatiskt utan operatöringripande och oberoende av andra säkerhetssystem. I första hand sker tryckavlastningen via den filtrerade tryckavlastningen, men om tryckstegringen sker för snabbt måste tryckavsäkringssystemet istället träda i kraft. Ångan ventileras då ofiltrerad till omgivande atmosfär. Detta är att se som en extrem sista säkerhetsåtgärd eftersom alternativet till en kontrollerad tryckavsäkring direkt till atmosfären är ett helt okontrollerbart utsläpp som skulle ske om inneslutningen rämnade för de ökande trycknivåerna.

Systemen redovisas i Figur 2.8.



Figur 2.8: Tryckavlastningssystem.

2.5.3.7 Vattenfyllning av inneslutningen

Inneslutningen ska vara så konstruerad att vid svåra haverier (mycket osannolika händelser) ska hela eller delar av inneslutningen kunna vattenfyllas. Detta för att kyla härden. För vissa olycksscenarioer behöver endast utrymmen lokalt vid reaktorhärden vattenfyllas medan för andra händelsesekvenser kan i princip hela inneslutningen behöva fyllas med vatten.

2.5.4 Förhindra vätgasexplosioner

2.5.4.1 Begränsning av mängden vätgas

Om vätgas och syre blandas i vissa koncentrationer kan så kallad knallgas bildas. Knallgas är explosiv. Därför är det viktigt att begränsa mängden vätgas för att förhindra knallgasexplosioner. Vid rekombinering sker en katalytisk förbränning av syre och väte varvid vatten bildas. Rekombinatorer finns monterade inuti inneslutningen för att begränsa mängden vätgas. En annan metod är att medvetet förbränna väte- och syrgas med hjälp av installerade antändare.

2.5.4.2 Omblandning av luftvolymerna

För att förhindra att lokal ansamling av vätgas uppstår används aktiva eller passiva system för omblandning av luftvolymerna inuti inneslutningen. Aktiva system består av fläktar eller liknande medan passiva system förlitar sig på naturlig cirkulation.

2.5.4.3 Minimera mängden syre i atmosfären

För att förhindra uppkomsten av knallgasexplosioner kan man som komplement till begränsningen av vätgas även minimera tillgången på syre i inneslutningsatmosfären.

Det kan göras genom att fylla inneslutningen med en inert gas såsom till exempel kvävgas.

2.5.5 Inre struktur inuti inneslutningen

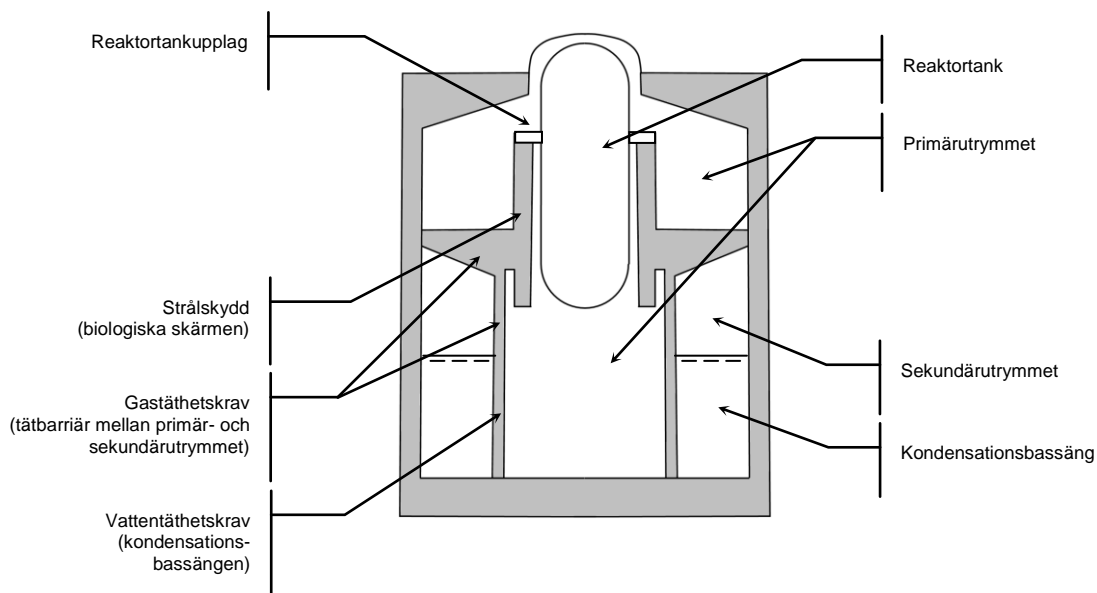
Den bärande strukturen inuti inneslutningen har ett antal säkerhetsrelaterade funktioner:

- Uppbärning av viktiga system samt undvikande av vedervågning;
- Avskiljning och skydd av system;
- Upprätthållande av gas- eller vattentäthet;
- Bassänger med säkerhetsfunktion;
- Utgöra strålskydd;
- Förhindra spridningen av en brand.

Vid svåra haverier (mycket osannolika händelser) kan den inre strukturen även ha till uppgift att begränsa skadeverkningarna av en uppkommen härds smälta.

2.5.5.1 Bärförmåga

Den inre strukturen har till uppgift att uppbära reaktortanken och övriga delar av primärsystemet, olika typer av säkerhetssystem samt andra system och komponenter (Figur 2.9). Vidare får vid en olyckshändelse rämnande byggnadsdelar inte vedervåga tillgodoräknade säkerhetsrelaterade system. Stora krav ställs därför på den inre strukturens bärförmåga vid de inre händelser och den yttre påverkan som kan uppkomma vid olika typer av olyckshändelser.



Figur 2.9: Exempel på vissa funktioner hos den inre strukturen inuti inneslutningen.

2.5.5.2 Avskiljande och skyddande funktion

Enligt gängse säkerhetsfilosofi för kärnkraftreaktorer ska vissa säkerhetssystem vara redundanta och avskilda från varandra på sådant sätt att de ej kan slås ut samtidigt vid en olycka. Vidare ska säkerhetssystem och andra viktiga system vara skyddade på sådant sätt att de ej under olycksförloppet utsätts för mekanisk påverkan eller annan miljöpåverkan som äventyrar systemets tillgodoräknade funktion.

Den inre strukturen har därför till uppgift att skydda primärsystemet och säkerhetsrelaterade system i erforderlig omfattning samt att separera redundanta säkerhetssystem från varandra. Separationen kan avse såväl strukturell integritet som tätet och förhindrande av spridning av brand. Gas- och vattentätet samt förhindrande av brandspridning diskuteras även i avsnitt 2.5.5.3 och avsnitt 2.5.5.5.

2.5.5.3 Gas- och vattentätet

I de fall som atmosfären eller trycknivåerna i ett område av reaktorinneslutningen kan ha en skadlig inverkan på strukturen, redundanta säkerhetssystem eller personal i angränsande utrymmen kan delar av den inre strukturen behöva utföras gastät. Detsamma gäller för utläckt vatten som kan behöva hindras från att spridas från ett utrymme till ett annat, varför delar av den inre strukturen därmed kan behöva utföras vattentät. För att kontrollera uppkomna lokala gas- eller vattentrycksnivåer kan speciella blås- eller avbördningsvägar behöva upprättas.

Andra exempel på gastäthetskrav är den täthetsbarriär mellan primär- och sekundärutrymmet som krävs för att säkerställa trycknedtagningsfunktionen (PS-funktionen) hos kokvattenreaktorer (BWR-anläggningar), se Figur 2.9. Olika typer av vattenfyllda bassänger med säkerhetsfunktion utgör även de exempel på konstruktioner med vattentäthetskrav (Figur 2.9).

2.5.5.4 Strålskydd

Permanent och ibland demonterbara strålskydd för att förhindra stråldos till personalen måste anordnas kring många av de strålkällor som finns inuti reaktorinneslutningen. Strålskydd byggs upp bland annat genom att avskiljande väggar och bjälklag utförs med tillräcklig tjocklek mellan utrymmen. I andra fall införs konstruktionsdelar som har som sin huvudsakliga uppgift att utgöra strålskydd. Även vattenfyllda bassänger kan utgöra strålskydd.

Ett av de viktigare systemen är det strålskydd som finns kring reaktortanken, den så kallade biologiska skärmen (Figur 2.9).

2.5.5.5 Brandcellsindelning

För att förhindra och begränsa skadlig inverkan av en brand indelas utrymmena inuti inneslutningen i olika brandceller. Spridning av brand mellan de olika cellerna ska då förhindras under en föreskriven tid.

Krav ställs då på den inre strukturen både vad gäller bärförmåga och vad gäller att förhindra att branden sprids till ett intilliggande utrymme.

2.5.5.6 Hantering av en härdsmälta

Såsom anges i avsnitt 2.2 ska man påvisa att man har kontroll över och kan begränsa förhållanden som kan uppkomma vid härdsmälta relaterad till svåra haverier (mycket

osannolika händelser). Den inre strukturen kan därför ha till uppgift att begränsa skadeverkningarna av en uppkommen härdsvälta eller som för nya anläggningar ha specifika konstruktionslösningar och system för att fånga upp och kyla en eventuell härdsvälta (se avsnitt 2.6.2.6).

2.6 Nya anläggningar

2.6.1 Inledning

För nya avancerade reaktortyper av typen lättvattenreaktorer som nu finns på marknaden har säkerhetsrelaterade system och funktioner utvecklats i förhållande till vad som är fallet för de befintliga svenska anläggningarna. Även om de svenska anläggningarna efterhand har uppgraderats vad gäller säkerheten, bland annat som följd av händelser i omvärlden och baserat på teknikutveckling och ny kunskap så har det av naturliga skäl ej alltid fullt ut varit möjligt att inkludera samma typ av funktionalitet som tas fram vid uppförandet av helt nya anläggningar.

I det följande redovisas en genomgång av system och funktioner med bäring på nya anläggningar.

2.6.2 Genomgång av system och funktioner

2.6.2.1 Övergripande säkerhetsrelaterade egenskaper

På ett övergripande plan kan U.S. Nuclear Regulatory Commission (USNRC) policy-dokument från oktober 2008 [117] anses sammanfatta vad som bland annat eftersträvas idag vid utformningen av nya kärnkraftreaktorer⁶. USNRC anger i sitt policy-dokument att nya reaktorer åtminstone ska ha samma säkerhetsnivå som befintliga lättvattenreaktorer. Dessutom förväntar sig kommissionen att de nya reaktorerna kommer att ha förbättrade säkerhetsmarginaler och/eller förenklade, inneboende, passiva, eller andra innovativa system och funktioner för anläggningen att verkställa sina säkerhetsuppgifter och för upprätthållandet av anläggningens fysiska skydd. De tillkommande egenskaper som bör beaktas vid utformningen av reaktorerna bör enligt kommissionen åtminstone innehålla:

- Mindre komplexa system med hög tillförlitlighet för att bringa anläggningen i ett säkert läge, med fokus på inneboende eller passiv säkerhetsfunktionalitet;
- Förenklade säkerhetssystem som tillåter enklare teknisk analys, som utför sin uppgift med färre operatörsingripanden och som ökar operatörens rådrum och som förbättrar dennes förståelse av aktuella reaktorförhållanden;
- Utformningen av anläggningen ska minimera risken för svåra haverier och deras följdverkningar genom att inneha tillräcklig säkerhet och tillförlitlighet samt tillhandahålla redundans, diversifiering och säkerhetssystemsoberoende;
- Samtidig hantering av säkerhetskrav och krav på fysiskt skydd som resulterar i skyddssystem mot illvilliga handlingar för vilka kravet på mänskligt ingripande reduceras;

⁶ Redovisningen ska endast ses som ett exempel på vad som eftersträvas vid utformningen av nya lättvattenreaktorer i världen idag. Exakt vilka krav som ska uppfyllas vid uppförandet av nya anläggningar i Sverige framgår av svenska lagar och förordningar samt Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter.

- Konstruktionslösningar som vid påflygning förhindrar en samtidig förlust av inneslutningens integritet och förlust av kylning av härden, eller som i sig fördröjer radiologiska utsläpp,
- Konstruktionslösningar som vid påflygning förmår bibehålla bränsleförvaringsbassängernas täthet.

Baserat på lärdomar från olyckan vid kärnkraftverket Fukushima Daiichi 2011 har IAEA [58] bland annat framhållit att djupförsvaret bör förbättras på följande två nivåer för att bättre kunna förhindra svåra haverier:

- Härdnöd kylning (behandlas ej i föreliggande rapport);
- Skydd av inneslutningens integritet.

Ett svårt haveri startar när alla passiva eller aktiva åtgärder som står till buds vid ett olycksscenario ej förmår att bibehålla härden kyld och att bibehålla den i en kylbar konfiguration. Hur sedan haveriscenariot utvecklar sig beror på typen av olyckshändelse och att bedöma scenariot är behäftat med stora osäkerheter. Vid svåra haverier ställer man krav på att olyckshändelser som kan leda till en tidig stor radiologisk omgivningspåverkan så långt praktiskt möjligt ska elimineras. Därför måste situationer som kan ge upphov till kritiska lasteffekter på inneslutningen antingen visas vara eliminerade⁷ eller så måste de förhindras att uppstå genom specifika konstruktionslösningar. Exempel på situationer som för inneslutningen bör förhindras är:

- Utskjuten härds smälta under högt tryck;
- Global knallgasexplosion;
- Högenergiångexplosion;
- Genomsmältning av inneslutningens bottenplatta.

Nedan beskrivs först tekniska system som skyddar inneslutningens integritet vid en olyckshändelse som innebär förhöjda tryck och temperaturer. Så långt möjligt är dessa utformade med en passiv funktion. Därefter redovisas passiva system och tekniska lösningar för att hantera ett urval andra situationer eller för att förhindra att kritiska situationer uppstår. Vissa av systemen finns redan vid svenska anläggningar (och beskrivs då i avsnitt 2.2), andra system finns i andra befintliga anläggningar och vissa finns endast implementerade i nya anläggningstyper.

2.6.2.2 Trycknedtagningssystem med kondensationsbassäng

Denna typ av system ingår i de svenska kokvattenreaktorerna. En beskrivning av systemet ges i avsnitt 2.5.3.4. Det bör i sammanhanget svåra haverier noteras att säkerställandet av trycknedtagningssystemet under lång tid kräver aktiva system.

2.6.2.3 Passiva trycknedtagningssystem

Helt passiva trycknedtagningssystem, som även är passiva under ett långtidsförlopp, bygger på principen att ha kylkretsar med naturlig cirkulation tillsammans med bassänger placerade tillräckligt högt upp i anläggningen. Notera att denna typ av

⁷ Att "så långt möjligt praktiskt eliminera" en situation är en fråga om bedömning och kan motiveras med hjälp av deterministiska och/eller probabilistiska resonemang, men inte via att enbart jämföra mot ett lägsta värde vad gäller sannolikhet för inträffande.

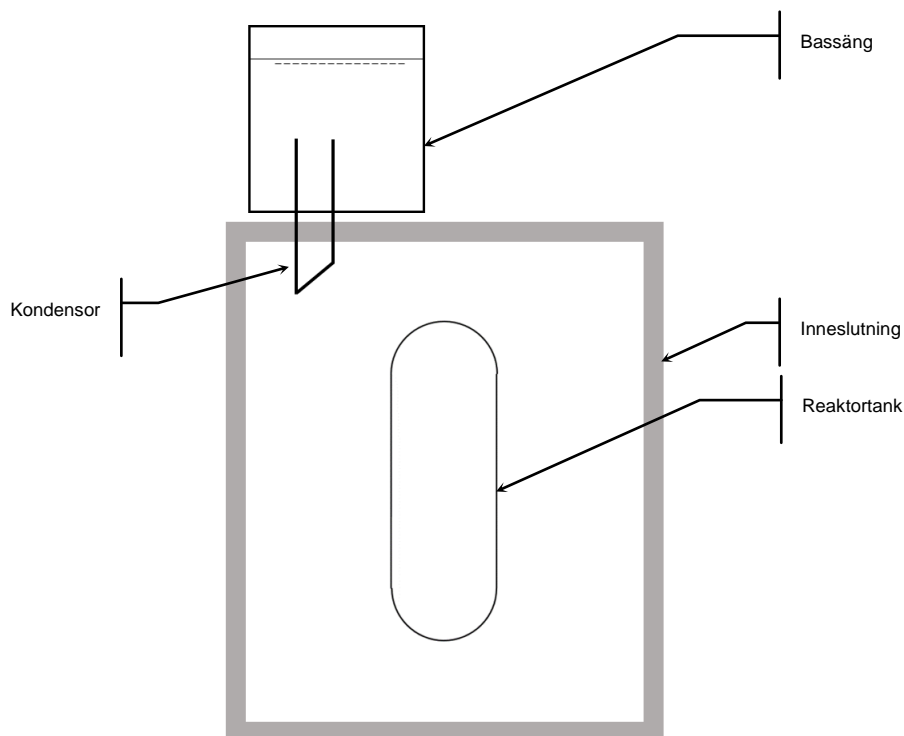
system under ett långtidsförlopp ändå ej är fullständigt passiva eftersom vatten som avdunstar från bassängerna måste ersättas med nytt.

Drivkraften för att upprätthålla den naturliga cirkulationen kan vara relativt låg så det ställs höga krav på systemens tekniska utformning för att säkerställa ett tillräckligt flöde. Nedan beskrivs kortfattat tre olika varianter av denna typ av system.

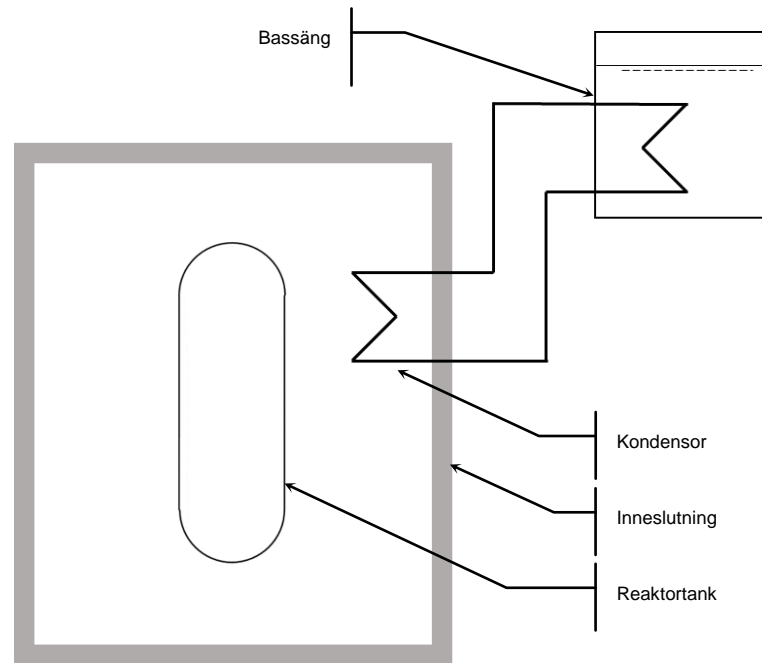
I Figur 2.10 redovisas en kondensor med lutande vattenfyllda tuber anslutna till en bassäng placerad ovanpå inneslutningen. Ånga frigjord inuti inneslutningen kondenserar på tubernas yta vilket medför en minskning av temperatur- och trycknivåer. Kylvattnet i tuberna cirkulerar naturligt på grund av att det uppvärmda vattnet stiger uppåt i tuberna. Denna typ av system ingår i vissa nya anläggningstyper och har även inkluderats i ett fåtal nybyggda anläggningar i världen.

Nästa system (Figur 2.11) utgörs av ett slutet system där kondensorn inuti inneslutningen är ansluten till en högt placerad extern bassäng som utgör värmeväxlare. Tack vare värmeväxlaren etableras en naturlig cirkulation i den slutna kylkretsen. Denna typ av system introducerades för vissa anläggningar i världen efter olyckan vid Three Mile Island 1979, i nyproducerade anläggningar men även som säkerhetshöjande åtgärd vid befintliga anläggningar.

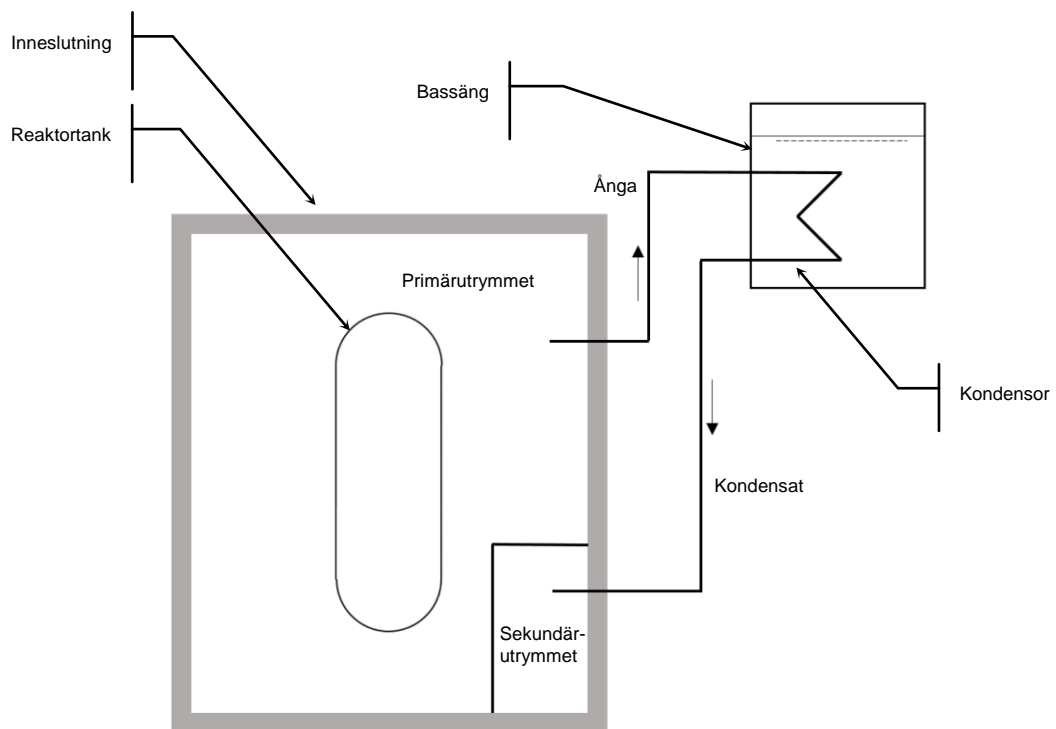
I det tredje systemet (Figur 2.12) leds den frigjorda ångan inuti inneslutningen till tuber placerade i en högt belägen bassäng. Ångan i primärutrymmet kondenserar inuti tuberna som passerar igenom bassängen varvid tryck och temperatur i inneslutningen reduceras. Den kondenserade ångan leds tillbaka in i en separat del av inneslutningen, sekundärutrymmet. Denna typ finns implementerad i nya anläggningstyper men ej vid någon anläggning i drift.



Figur 2.10: Inneslutning med kondensor bestående av lutande vattenfyllda tuber anslutna till en bassäng ovanpå inneslutningen.



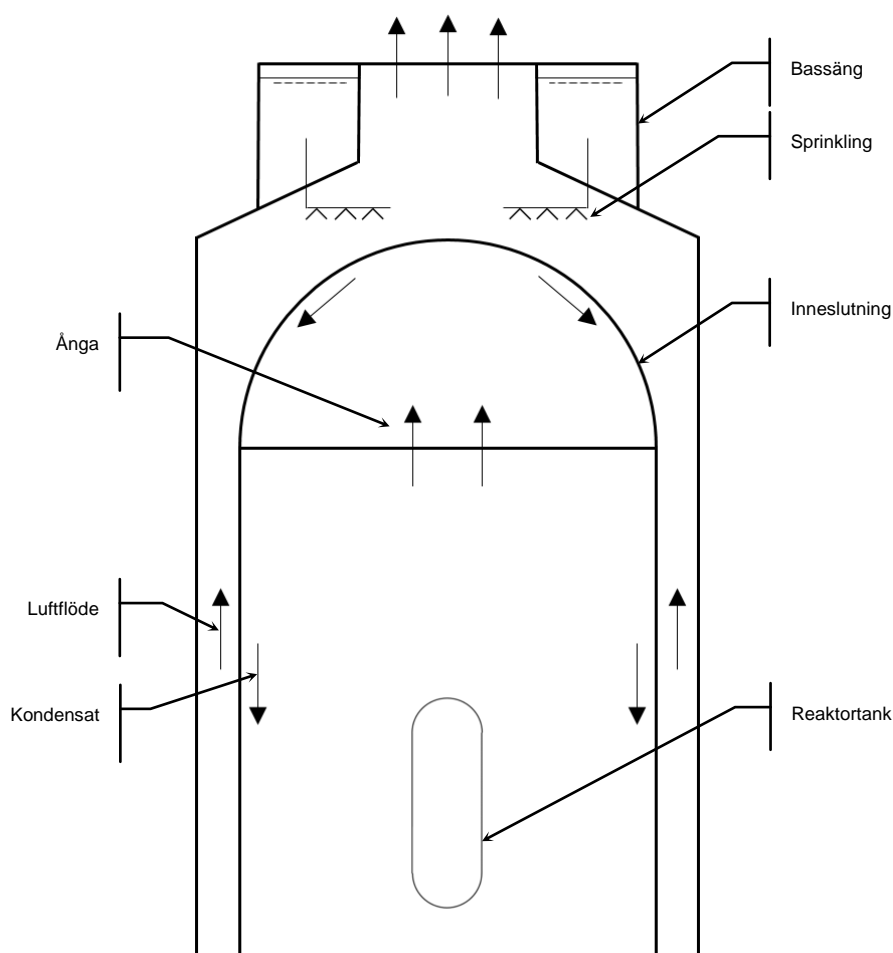
Figur 2.11: Inneslutning med slutet system där kondensorn inuti inneslutningen är ansluten till en högt placerad extern bassäng.



Figur 2.12: Inneslutning där bortledning och kylning av frigjord ånga sker med hjälp av tuber som leds igenom en extern bassäng.

2.6.2.4 Passiva sprinklersystem

I detta system utnyttjar man att den frigjorda ångan inuti en stålinslutning kondenserar vid kontakt med stålytan på insidan. Värmetransport sker igenom inneslutningsväggen till den omgivande luften så att kylning erhålls. Detta förutsätter att luften utanför inneslutningen kan stiga uppåt på grund av sin uppvärmning och släppas ut i ovankant samtidigt som den kontinuerligt ersätts med kall luft i underkant ("skorstenseffekt"). För att effektivisera kylningen under en viss tidsrymd kan en yttre bassäng placeras ovanpå inneslutningen som via gravitation sprinklar stålinslutningen på utsidan. Trots att sprinklingen sker via gravitation är denna del av systemet ej fullständigt passivt. För att släppa på vattnet måste en sprängventil aktiveras varvid el behövs för att sända en initieringssignal från säkringen placerad inuti inneslutningen till ventilens sprängladdning. Systemet visas schematiskt i Figur 2.13. Denna typ av system finns för nya anläggningstyper som för närvarande uppförs på olika håll i världen.



Figur 2.13: Passivt sprinklersystem där värme bortförs via stålinslutningens vägg och där kylningen påskyndas via sprinkling av inneslutningsväggens utsida.

2.6.2.5 Andra system och tekniska lösningar

Nedan ges exempel på andra tekniska lösningar som även de kan tillämpas för att öka skyddet av inneslutningens integritet:

- Inneslutningen kan dimensioneras och utformas på ett sådant sätt att den kan motstå högre tryck än vad som normalt varit brukligt, dvs. förhöjd maximal bärförmåga;
- Inneslutningen kan utformas så att lägre läckagenivåer erhålls än vad som normalt varit brukligt, vid tryck understigande den maximala bärförmågan men överstigande dimensioneringstrycket;
- Inneslutningen och dess inre struktur kan utformas på ett sådant sätt att en eventuell härdsmläta kan fångas upp, och därefter spridas ut kontrollerat för att underlätta dess kylning (Figur 2.14 och Figur 2.15). Detta diskuteras vidare i avsnittet 2.6.2.6 nedan. Alternativt kan konstruktionslösningar införas för reaktortanken som säkerställer att smältan stannar kvar och kyls inuti tanken;
- System för förhindrande av knallgasexplosioner inuti inneslutningen kan införas (se avsnitt 2.5.4). Vidare rekommenderas att säkerställd ventilation av den omkringliggande reaktorbyggnaden anordnas för att ventileras ut eventuella ansamlingar av knallgas;
- System för filtrerad tryckavlastning där ventilerad ånga leds via ett filter som rensar ångan från i princip alla radioaktiva partiklar samt eventuellt ett tilläggsystem som under vissa premisser tryckavsäkrar direkt till omgivningen, kan införas (se avsnitt 2.5.3.6).

Instrumenterings- och monitoreringssystem inuti inneslutningen kan utföras med miljötålighet även för de extrema tryck och temperaturer som kan uppstå under svåra haverier, detta så att överföringen av all väsentlig information och data till kontrollrumspersonalen säkerställs.

2.6.2.6 Uppfångningsanordning för härdsmläta

Traditionellt har hanteringen av en härdsmläta vid ett svårt haveri gått ut på att smältan landar och sprider ut sig på reaktorinneslutningens botten och att den där kyls genom vattentäckning ("core-on-the-floor"). En fördelning av resteffektspridningen uppåt till vattnet och nedåt genom inneslutningens betongkonstruktion sker då och analyser visar att man under en specifik tidsperiod (till exempel 24 timmar):

- Varken får en genomsmältning av inneslutningens betongkonstruktion eller att,
- Inneslutningen rämnar på grund av ackumulering av okondenserbara gaser som bildas under förloppet.

Efter olyckan vid Three Mile Island 1979 infördes vid de befintliga svenska verken system för att lindra konsekvenserna av en härdsmläta. Enligt nu gällande författningssamling (§5 SSMFS 2008:17) gäller att:

"Det skall vara möjligt vid alla händelser, till och med händelseklassen mycket osannolika händelser [svåra haverier], att uppnå ett stabilt sluttillstånd med vattentäckt härd/härdsmläta och etablerad resteffektkylning. En smält härd skall kunna kylas i ett långtidsförlopp."

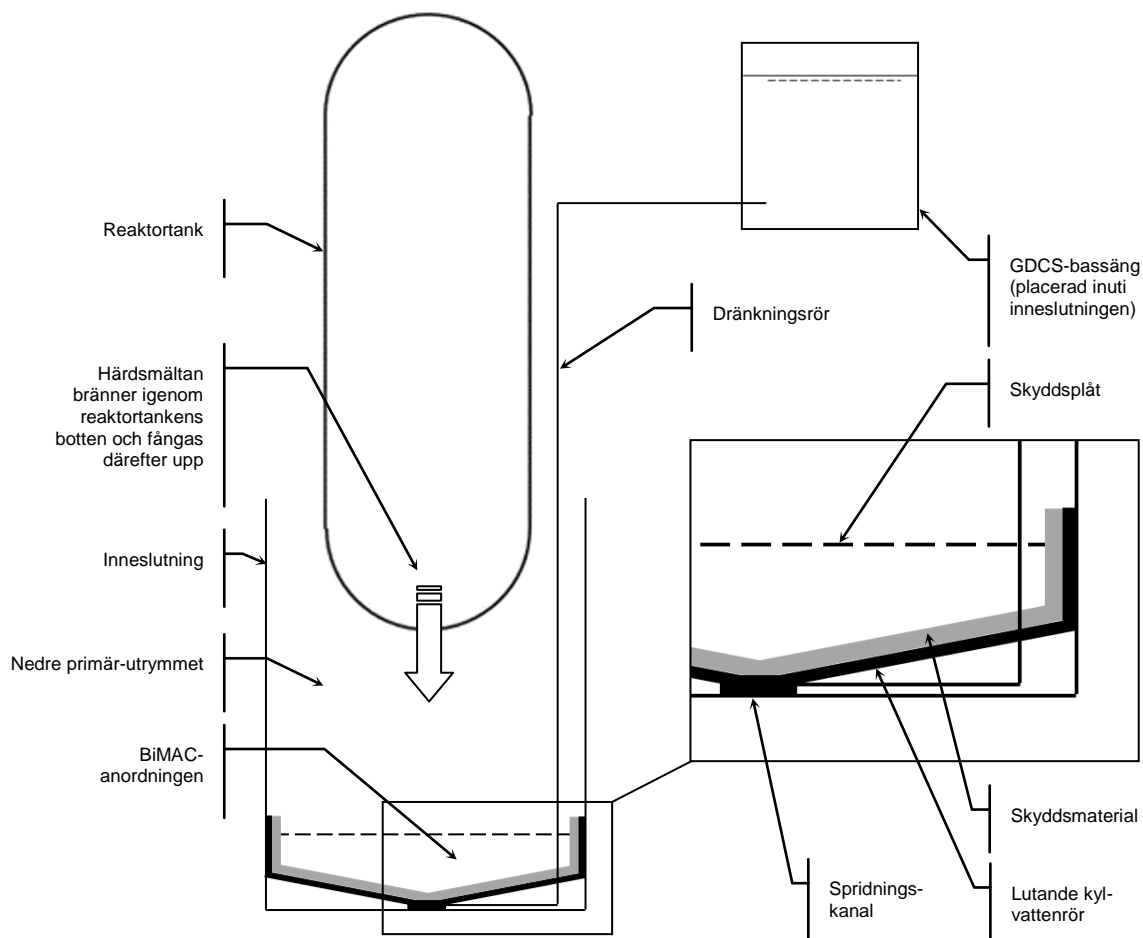
För nya anläggningstyper har man infört specifika system och konstruktionslösningar för att ta om hand en härdsmläta. I vissa fall tar man hand om härdsmlätan redan i

reaktortanken, smältan förhindras då att läcka ut från tanken och långtidskyls istället inuti densamma. I andra fall fångar man upp och långtidskylar härds smältan inuti inneslutningen efter det att smältan lämnat reaktortanken. Två sådana kommersiellt tillgängliga system redovisas nedan som exempel på hur denna typ av system kan vara utformade. Det ena systemet avser kokvattenreaktorer (BWR) och det andra tryckvattenreaktorer (PWR). Systemen ser till att kyla härds smältan i ett långtidsförlopp men också att skydda inneslutningens betongkonstruktion från att skadas av härds smältan.

Uppfångningsanordningen av typen BiMAC ("basemat internal melt arrest and coolability device") ingår i dagens ESBWR-anläggningar. Anordningen redovisas schematiskt i Figur 2.14. Beskrivningen nedan av BiMAC baseras på [49]. Nedre delen av primärutrymmet, direkt under reaktortanken, är utformad för att ta om hand en härds smälta. I detta område är ytorna klädda med ett stort antal lutande kylvattenrör placerade sida vid sida, vilka passivt kyler härds smältan via naturlig cirkulation. Kylrören är skyddade med ett lager keramiskt material. Delar av detta skyddsmaterialskikt utgör också offermaterial, dvs. det förstörs vid kontakt med härds smältan. Kylrören kommer emellertid aldrig att under förloppet komma i direktkontakt med smältan. Vatten till kylningen hämtas från de så kallade GDCS-bassängerna ("gravity-driven cooling system") vilka utgörs av stora vattenbassänger placerade i primärutrymmet ovanför och vid sidan av reaktorhärden. Systemet har som funktion att kyla reaktortanken vid ett olycksförlopp, men det förser alltså även BiMAC-systemet med kylvatten vid en härds smälta. GDCS-bassängerna förbinds med BiMAC-systemet via ett antal dränkingsrör och vattnet flödar från bassängerna till nedre delen av primärutrymmet helt passivt med hjälp av tyngdkraften. Dränkingsrören från GDCS-bassängerna är kopplade till en spridningskanal i botten av BiMAC-anordningen. Från spridningskanalen fördelas vattnet därefter upp igenom de många kylvattenrören och bräddar slutligen över så att den nedre delen av primärutrymmet fylls med vatten och härds smältan därmed blir täckt med vatten. När temperaturen stiger kommer vattnet i kylrören att förångas, ångan stiga uppåt och sedan kondensera i den vattenfyllda nedre delen av primärutrymmet.

Vattenflödet aktiveras via en sensor som medför att vattenkylningen startar i princip omedelbart när smältan har lämnat tanken men på ett sådant sätt att en för tidig vattendränkning av nedre delen av primärutrymmet förhindras. Detta är viktigt eftersom det annars finns risk för en ångexplosion på grund av att härds smältan landar i ett redan vattenfyllt utrymme.

Förutom att i den första fasen av härds smältescenario utgöra skydd mot nedfallande föremål har skyddsplåten ovan BiMAC-anordningen ingen säkerhetsfunktion utan tjänar endast som golv i detta utrymme vid normal drift. Vid en härds smälta så bränner den snabbt igenom skyddsplåten.



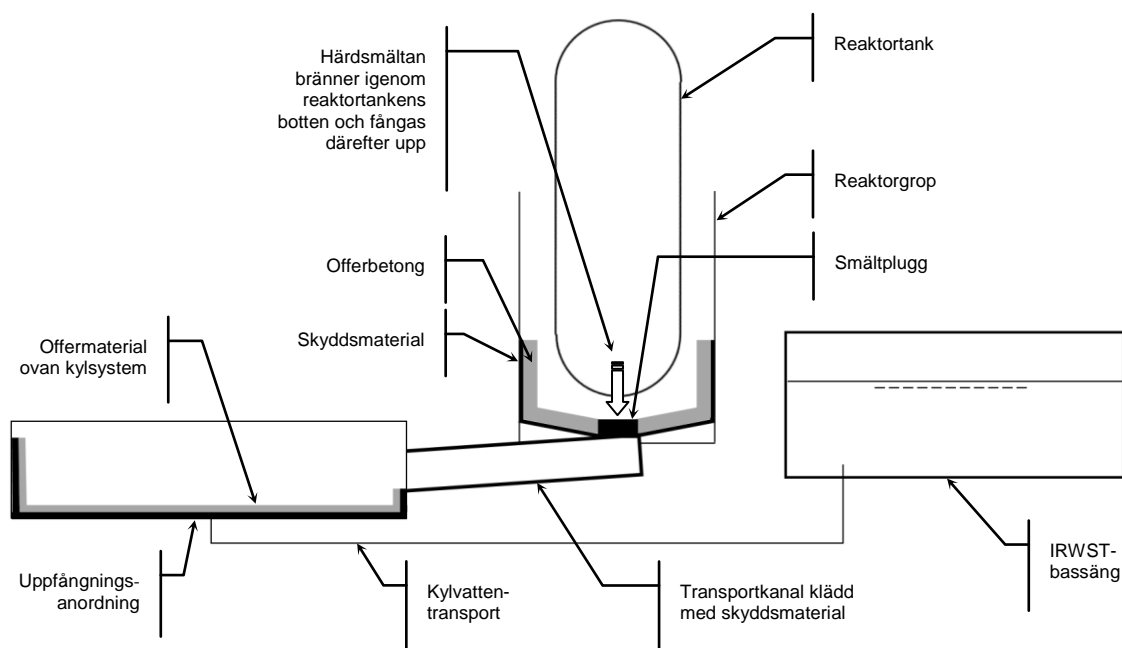
Figur 2.14: System för hantering av en eventuell härdsmlta – ESBWR "basemat internal melt arrest and coolability device" (BiMAC-anordning).

Kärnkraftreaktor av typen EPR (PWR) har en uppfångningsanordning som benämns "core melt stabilization concept". Anordningen redovisas schematiskt i Figur 2.15. Beskrivningen nedan av EPRs uppfångningsanordning baseras på [44]. Detta system är mer komplext än BiMAC-systemet i den meningen att det innehåller fler olika delsystem. Fördelen med detta är bland annat att man mer tydligt kan separera de komponenter och system som erfordras under normal drift, driftstörningar och konstruktionsstyrande händelser från de konsekvenslindrande system som tillgodoräknas vid svåra haverier.

Vid en härdsmlta så samlas smältan först upp i botten av reaktorgropen. Reaktorgropen är klädd med offerbetong samt ett underliggande skyddande lager av eldfast material som hindrar att den bakomliggande bärande konstruktionen skadas vid en eventuell lokal genombränning av offerbetongen. Botten av reaktorgropen är i sin tur förbunden via en transportkanal med härdsmltans slutliga uppfångningsanordning. En smältplugg placerad i botten av reaktorgropen fördröjer vidaretransporten av smältan såpass länge att allt smältmaterial hinner ansamlas innan pluggen öppnar, detta oavsett om förloppet är snabbt eller långsamt. När pluggen öppnar glider härdsmltan via en transportkanal ned till

uppfångningsanordningen. Transportkanalen är inklädd med skyddsmaterial så att den ej skadas under detta tidsbegränsade förlopp. Härdsmltan ansamlas och sprids ut i uppfångningsanordningen för att där hanteras i ett långtidsförlopp. Uppfångningsanordningen är isolerad från övriga inneslutningen vilket innebär att eventuellt kyl- eller sprinklingsvatten som frigjorts i inneslutningen under tidigare faser av olycksscenarioet ej har kunnat ansamlas i uppfångningsanordningen. Detta förhindrar att någon ångexplosion skulle kunna ske när smältan anländer till uppfångningsanordningen. Smältan sprids istället ut i torrhet.

Uppfångningsanordningen utgörs av gjutjärnselement med kylvattenkanaler täckta med ett lager offermaterial. När smältan har anlånt öppnas ventiler så att vatten kan flöda från den så kallade IRWST-bassängen ("internal refueling water storage tank") till uppfångningsanordningen med hjälp av tyngdkraften. Vattnet rinner först igenom gjutjärnskanalerna på botten och sedan upp längs väggarna för att sedan flöda över och vattenfylla området där härdsmltan ligger. Vattenflödet pågår tills dess att vattennivåerna i IRWST-bassängen och uppfångningsanordningen är lika. IRWST-bassängen har också till uppgift att förse CHRS-systemet ("containment heat removal system") med vatten för att tillförsäkra långtidskyllning av inneslutningen.



Figur 2.15: System för hantering av en eventuell härdsmlta – EPR core melt stabilization concept.

2.6.2.7 Skydd mot påflygning

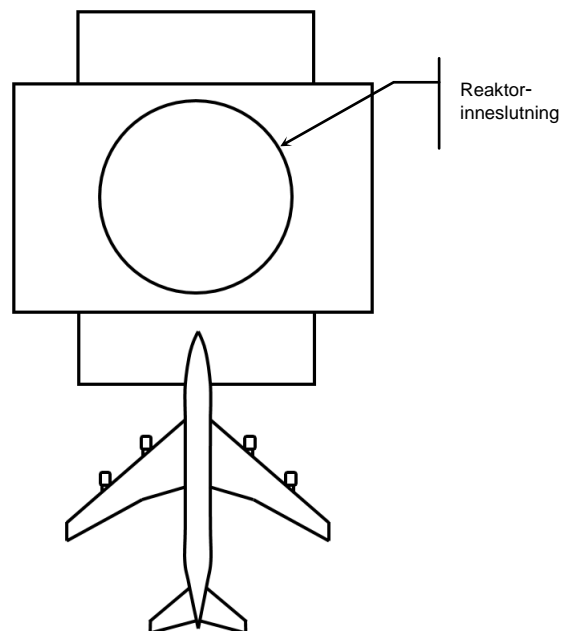
Enligt vad som redovisats i avsnitt 2.2 anger WENRA att olyckshändelser utanför vad som traditionellt har ingått inom ramen för konstruktionsstyrande händelser ("design extension conditions") ska beaktas. En för inneslutningen viktig sådan händelse är påflygning med stort passagerarflygplan varvid enligt WENRA utsläppsbegränsningskrav motsvarande olycka utan härdsmlta ska beaktas. I Figur 2.16 visas förhållandet mellan storleken på ett stort passagerarflygplan och ett typiskt kärnkraftverk (den del av verket som inrymmer reaktorinneslutningen). Även kravet på

multipelfelshändelse kan ha inverkan på anordningen av inneslutningsrelaterade säkerhetssystem.

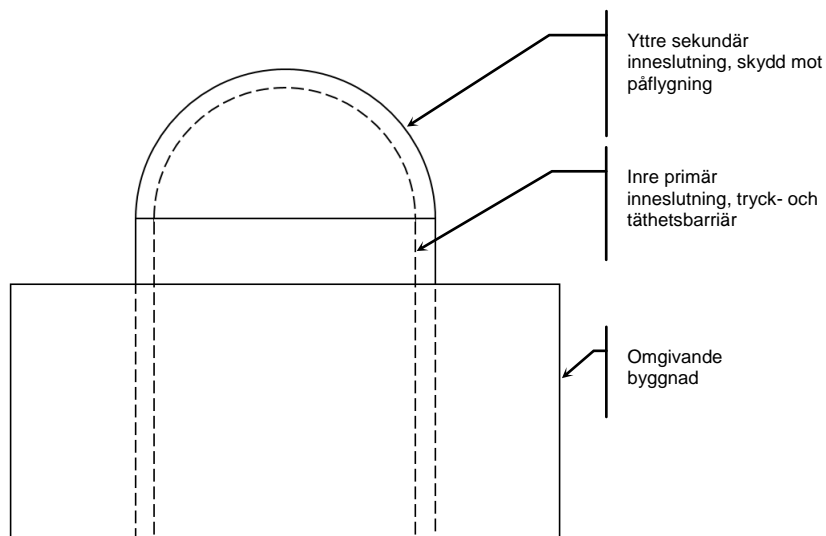
Vad gäller påflygning med stort passagerarflygplan så hanteras detta olika beroende på vilken typ av anläggning som avses. För anläggningar där inneslutningen är exponerad mot det fria kan den exponerade delen antingen dimensioneras för en direkträff eller så utförs en konstruktionslösning med dubbla inneslutningar (Figur 2.17). Den inre inneslutningen utgör då tryck- och täthetsbarriär medan den yttre huvudsakligen har till uppgift att stoppa flygplanet från att nå fram till och kunna skada primärinneslutningen eller primärsystemet inuti inneslutningen. Vidare måste tillses att säkerhetssystem som tillgodoräknas ej äventyras av en direkträff eller av träffen inducerade vibrationer.

Notera att frågan om inducerade vibrationer för inneslutningen och dess inre struktur även är av vikt för anläggningar där den av flygplanet träffade strukturen är frikopplad från inneslutningen. Detta på grund av att för nya anläggningar är det mycket vanligt att man har en stor bottenplatta som är gemensam för inneslutningen och de omgivande byggnaderna. Vibrationerna kan då fortlanta sig till inneslutningen via bottenplattan.

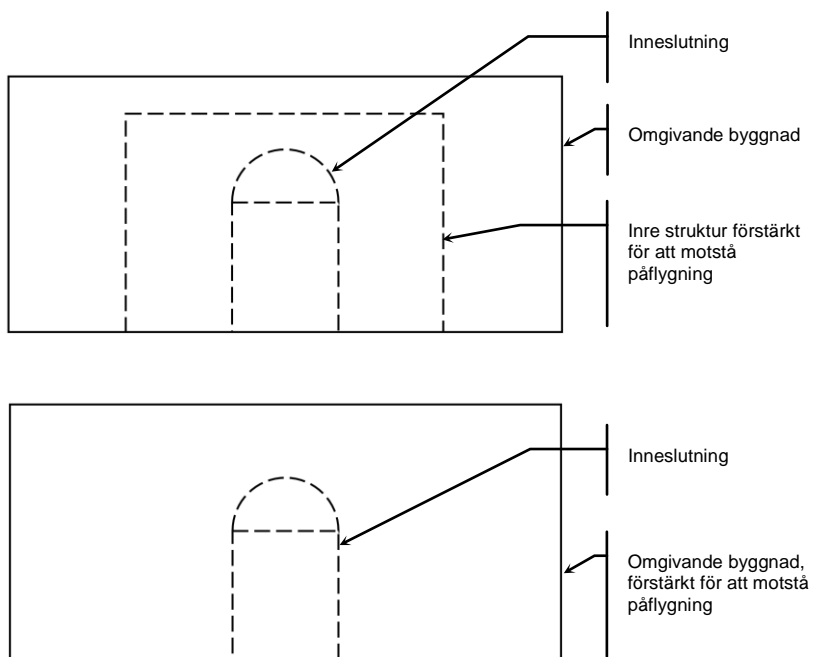
För anläggningar med invändig inneslutning kan antingen ytterskalet för byggnaden runt inneslutningen förstärkas så att det stoppar upp flygplanet (Figur 2.18) eller också så utformas den invändiga strukturen för att förhindra att flygplanet når fram till inneslutningen. I vissa fall identifieras och förstärks då vissa av innerväggarna etc. så att de utgör utpekade skydds konstruktioner (Figur 2.18).



Figur 2.16: Påflygning med stort kommersiellt passagerarflygplan, kärnkraftverk sett uppifrån.



Figur 2.17: Övergripande principer för att skydda mot otillbörlig påverkan av inneslutningen vid händelsen påflygning med stort passagerarflygplan: Dubbel inneslutning.



Figur 2.18: Övergripande principer för att skydda mot otillbörlig påverkan av inneslutningen vid händelsen påflygning med stort passagerarflygplan: Reaktorbyggnadens ytterväggar (undre figuren) eller innerväggar (övre figuren) förstärks.

3. Konstruktionsutformning

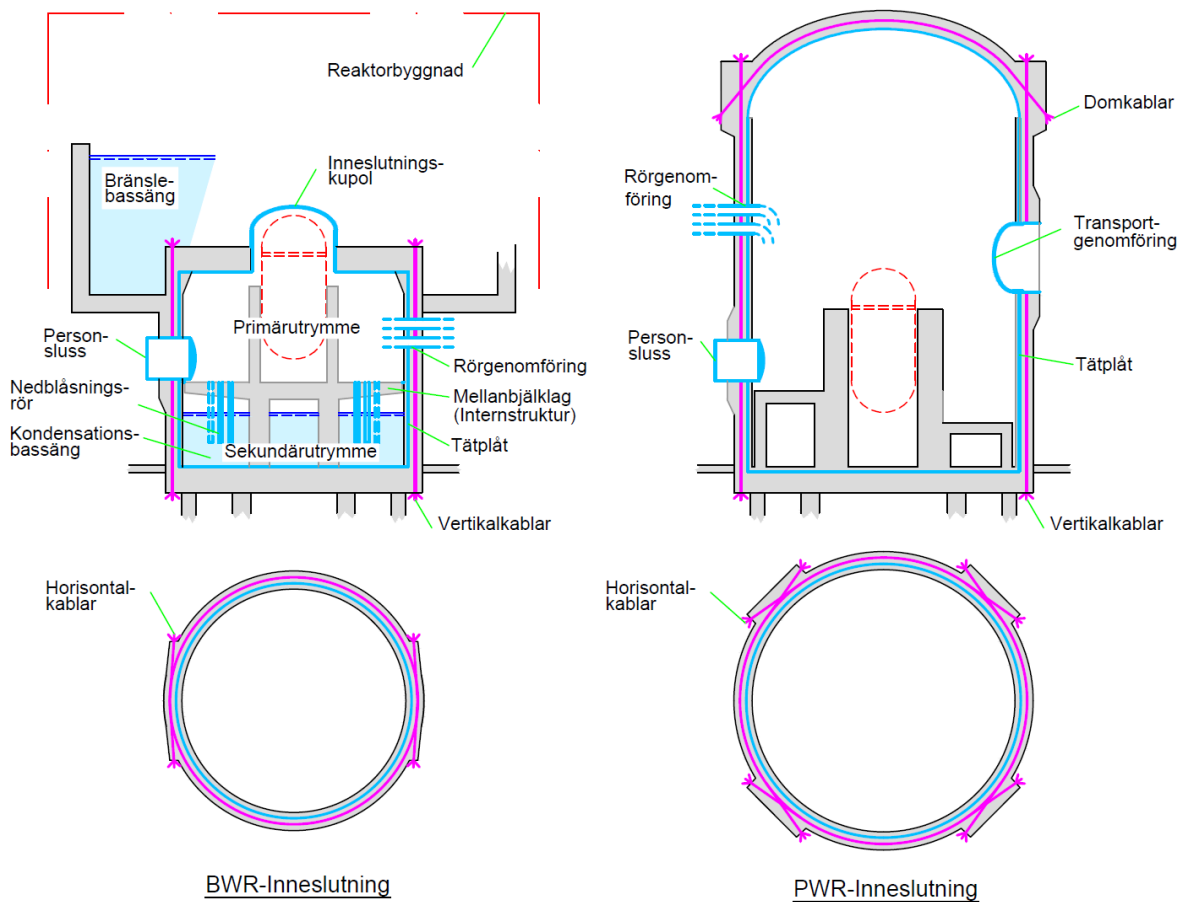
3.1 Inledning

Detta kapitel behandlar inneslutningens utformning, där täthetsbarriären samt för inneslutningsfunktionen viktiga konstruktionsdelar av den inre strukturen beskrivs. Kapitlet avgränsas till att behandla betonginneslutningar med tätplåt, företrädesvis spännarmerade. Beskrivningen av inneslutningens utformning avser lättvattenreaktorer och då främst befintliga svenska BWR och PWR inneslutningar som inte avsevärt skiljer sig från inneslutningar internationellt.

I kapitlet fokuseras på viktiga aspekter gällande konstruktionsutformning, installation (byggmetoder) samt åldring och degradering. I avsnitt 3.2 beskrivs den generella utformningen samt ingående komponenter. Avsnitt 3.3 behandlar utformning och installation av, för inneslutningsfunktionen, viktiga komponenter. En översikt av för integriteten viktiga åldrings- och degraderingsmekanismer beskrivs i avsnitt 3.4. Slutligen i avsnitt 3.5 ges exempel på utformningen gällande några befintliga och nya inneslutningar.

3.2 Allmän beskrivning

Inneslutningens primära funktion, att innesluta radioaktivt material vid ett reaktorhaveri, upprätthålls generellt av en yttre bärande konstruktion av betong samt en invändning tätsvetsad stålplåt (tätplåt), se Figur 3.1. Den primära lasten på inneslutningen är ett högt inre övertryck tillsammans med en ökad inre temperatur (se kapitel 2).



Figur 3.1: Principiell konstruktionsutformning gällande svenska inneslutningar för kokvatten- (BWR) och tryckvattenreaktorer (PWR).

Den bärande betongkonstruktionen för alla svenska och merparten av inneslutningarna internationellt är spännarmerade⁸. Spännarmeringen främsta uppgift är att reducera uppsprickning och deformation då strukturen belastas av ett inre övertryck. Kraften i spännarmeringen är dimensionerad så att tryckspänning upprätthålls i betongen vid det inre övertryck som specificerats för inneslutningen (konstruktionstrycket⁹). Betongkonstruktionen kan alltså i princip anses vara tät (fri från genomgående betongsprickor) upp till konstruktionstrycket¹⁰.

Alla svenska och merparten av inneslutningarna internationellt är förseglade med en tätplåt på insidan av den bärande betongkonstruktionen. Tätplåten utgör den primära täthetsbarriären medan betongen bildar en extra täthetsbarriär upp till dimensionerande belastningar (konstruktionstrycket). Vid belastning som överstiger konstruktionstrycket, då betongen spricker och blir otät, utgör tätplåten ensam täthetsbarriären för inneslutningen. Internationellt är tätplåten placerad innerst i

⁸ Vissa delar av inneslutningskärlat är normalt inte spännarmerade, t.ex. bottenplattan.

⁹ Konstruktionstrycket för svenska inneslutningar är specificerat kring 0.45 MPa övertryck (se t.ex. [89]).

¹⁰ För vissa befintliga inneslutningar (t.ex. i Frankrike och Canada) utgör betongen ensam täthetsbarriären, dvs. ingen tätplåt finns.

väggsektionen och är exponerad inne i inneslutningen. För svenska och för vissa finska inneslutningar är tätplåten helt eller delvis skyddad av ett inre betongskal, se Figur 3.1. Detta inre betongskal är generellt ej spännarmerat och inkluderas inte i den primärt bärande konstruktionen. Det inre betongskalet avser främst att skydda tätplåten mot missiler (t.ex. rörslag). Kringgjutningen utgör även ett korrosionsskydd för tätplåtens insida samt motverkar det inre betongskalet tvångsinducerad instabilitet hos tätplåten (buckling).

Inneslutningen är försedd med ett stort antal genomföringar som inkluderas i täthetsbarriären. Stora genomföringar används för att transportera installationer, material och personal in och ut ur inneslutningen. Mindre genomföringar används för olika typer av rör (t.ex. primärkretsar för vatten och ånga), men också elgenomföringar för driften av installationer inne i inneslutningen. BWR-inneslutningen är ensam om en stor genomföring i inneslutningens tak (inneslutningskupol), som bl.a. används vid bränslebyte. PWR-inneslutningen är ofta utrustade med en stor genomföring för in- och utförsel av utrustning (transportgenomföring)¹¹.

BWR-inneslutningar är generellt utrustade med en trycknedtagningsfunktion (PS-funktion), se avsnitt 2.5.3.4, vilket generellt medför att BWR-inneslutningen kan konstrueras med en mindre volym än PWR-inneslutningen. PS-funktionen innebär att utrymmen inom inneslutningen (primärutrymme och sekundärutrymme) skiljs och att stora tryckskillnader mellan dessa utrymmen uppkommer vid en olycka. Den tryckavskiljande konstruktionsdelen (mellanbjälklaget) ingår i BWR-inneslutningens inre struktur och är primär för inneslutningens funktion.

BWR-inneslutningen är generellt kringbyggd och omsluten av yttre byggnader (reaktorbyggnad) medan PWR-inneslutningen generellt inte är det (vissa byggnader ansluter mot). Detta medför att miljön kring en BWR-inneslutning kan ses som kontrollerad inomhusmiljö medan PWR-inneslutningen i vissa delar utsätts för utomhusmiljö.

Bassänger i och kring BWR-inneslutningar (kondensation- och bränslebassänger) är generell tätade från insidan med beklädnad av rostfri stålplåt.

Befintliga inneslutningskonstruktioner i Västeuropa och USA är generellt åtskilda konstruktivt från anslutande byggnader. Dilatationsfogar finns i anslutningar mellan inneslutningar och kringliggande byggnader, medan grundkonstruktionerna kan vara sammankopplade. För spännarmerade inneslutningar är fristående inneslutningskonstruktioner ett krav för att spännarmeringens funktion skall upprätthållas. Fristående inneslutningskonstruktioner medför också enklare beräkningsmodeller vid dimensionering. Vissa av BWR-koncepten som marknadsförs idag är konstruerade med sammangjuten inneslutning, inre struktur och reaktorbyggnad. Dessa koncept är inte spännarmerade.

3.3 Viktiga komponenter

I detta avsnitt beskrivs komponenter i inneslutningens konstruktion som är viktiga för funktionen. Generell utformning och byggmetoder beskrivs för betongkärn, spännarmering, tätplåt, genomföringar och inre struktur (BWR). Beskrivningen utgår från förhållanden för svenska befintliga inneslutningar där allmänna principer gällande

¹¹ Svenska PWR-inneslutningar är ej försedda med transportgenomföring, vilket inneburit att hål har tagits genom inneslutningsväggen då byte av stora komponenter utförts (ånggeneratorbyten).

utformning och byggmetoder behandlas. Mer anläggningsspecifik information gällande framförallt inneslutningskärlets utformning ges i [92]. Gällande inneslutningar internationellt ges en översikt gällande utformning och utförande i [43].

3.3.1 Betongkärn

Generellt omfattar inneslutningens betongkärn en cylindervägg, takkonstruktion och en bottenplatta. Nedan beskrivs den generella utformningen av dessa delar.

3.3.1.1 Cylindervägg

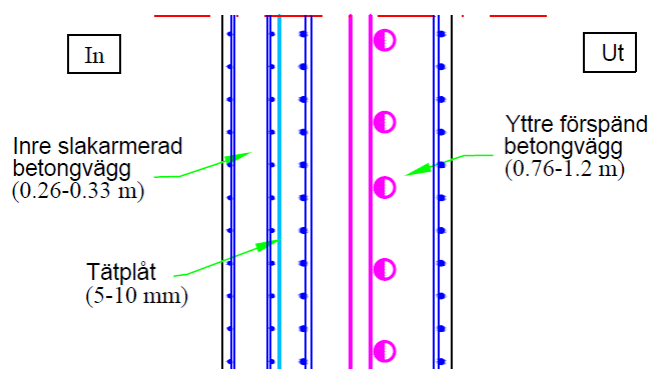
Innerdiametern för cylinderväggen för svenska inneslutningar varierar mellan ca 18 m för den minsta BWR inneslutningen till ca 35 m för PWR-inneslutningarna. Generellt har hög betongkvalitet använts i inneslutningsväggen, mellan K40 och K50 (se [92]). Slakarmeringen har generellt en nominell flytgräns på 400 MPa och består av kamstänger med diameter mellan 12 och 40 mm (se [92]).

I Figur 3.2 visas typisk utformning av en cylindervägg i en svensk inneslutning.

Innerst i de svenska inneslutningarna finns en slakarmerad betongvägg som primärt skyddar tätplåten. Detta inre skal är generellt kring 0.26 och 0.33 m tjockt och inkluderar slakarmering.

Tätplåten som ligger utanför den inre betongen beskrivs i avsnitt 3.3.3.

Den yttre bärande betongväggen är mellan 0.76 och 1.2 m tjock och inkluderar slak- och spännarmering både vertikalt och horisontellt. Spännarmeringen beskrivs i avsnitt 3.3.2.



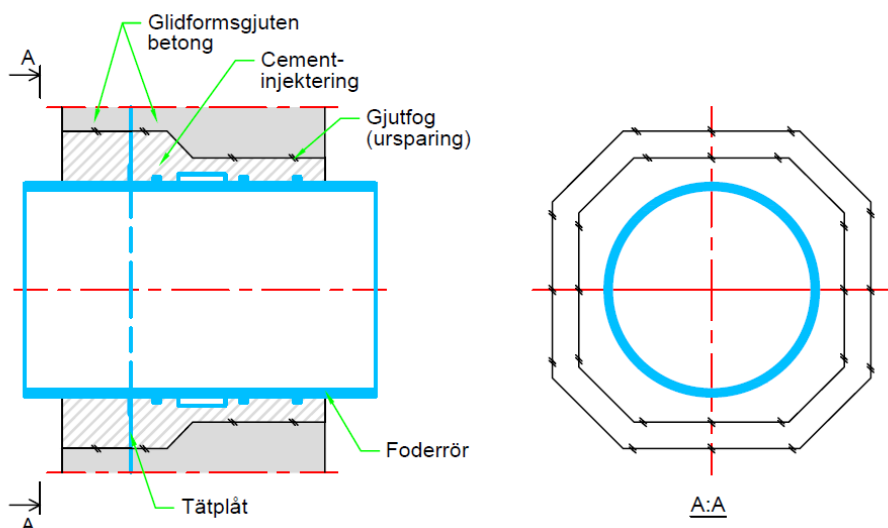
Figur 3.2: Principiell utformning av inneslutningsvägg för en svensk inneslutningskonstruktion (vertikalsnitt).

För vissa svenska inneslutningar är cylinderväggen strukturellt avskild från bottenplatta och takkonstruktionen via rörelsefogar. Fogarna är avsedda att ta upp translations- och i vissa fall rotationsrörelser. Fogarna kan vara utformade för att fungera under hela inneslutningens livslängd eller endast i byggskedet vid uppspänning av spännkablar. Syftet med fogarna är primärt att minska randeffekter i form av stora skjuv- och böjpåkänningar i cylinderväggens övre och undre delar. Randeffekterna uppkommer dels vid uppspänning av spännkablar, men också då inneslutningen belastas av stora inre övertryck. Fogarna utformas på olika sätt, där någon typ av neopren, gummi eller fettlager appliceras mot ingjutna plåtar. I de fall där rörelsemöjlighet skall finnas under drift måste även det täta skalet (tätplåten) vara utformat för detta, se avsnitt 3.3.3.

Inre och yttre betongvägg för samtliga svenska inneslutningar uppfördes med glidformsgjutning. Glidformsgjutning innebär att betongformen kontinuerligt flyttas uppåt utan uppehåll. Denna arbetsmetod var, vid tidpunkten då inneslutningarna uppfördes, en inarbetad och effektiv metod. En byggteknisk fördel med glidformsgjutning är att antalet gjutfogar i konstruktionen reduceras.

Två principiellt olika metoder användes då cylinderväggarna uppfördes. För en metod glidformsgjöts först betongväggarna separat med en spalt mellan yttre och inre vägg. Därefter svetsades sektioner (ringar) av tätplåten ihop och sänktes succesivt ned i spalten mellan betongväggarna. Slutligen injekterades utrymmena mellan tätplåt och betongväggar med cementbruk. För den andra metoden tillverkades först tätplåtsskalet antingen på plats eller vid sidan, där den lanserades på plats efter färdigställandet. Därefter glidformsgjöts båda betongväggarna (inre och yttre) mot det färdigställda tätplåtsskalet. Varianter av dessa två metoder har också använts. Exempelvis en metod där den inre betongväggen först glidformgjöts och därefter monterades och svetsades tätplåtsskalet utanför den inre betongväggen. Efter tätplåtens färdigställande glidformsgjöts den yttre väggen mot tätplåten och sist injekterades utrymmet mellan den inre betongväggen och tätplåten.

För genomföringar gjordes ursparingar vid glidformsgjutningen som cementinjekterades efter att foderrör monterats (se Figur 3.3). Generellt gjordes ursparingar i både inre och yttre betongvägg. Efter att betongväggar och tätplåt färdigställts enligt metoderna beskrivna ovan togs hål i tätplåten och foderrör svetsades mot tätplåten. Slutligen injekterades utrymmet mellan foderrör och ursparing i betongvägg. I vissa fall injekterades utrymmet mellan ursparing och foderrör i samband med att spalt mellan betongväggar och tätplåt injekterades. Utformning gällande genomföringar beskrivs vidare i avsnitt 3.3.3.



Figur 3.3: Typisk utformning av genomföring för en svensk inneslutningskonstruktion.

Internationellt varierar innerdiametern för cylinderväggen mellan 37 och 45 m för PWR- och 26 och 35 m för BWR-inneslutningar¹², se [43]. I [43] ges en översikt av

¹² Gäller för 1200 MW BWR-anläggningar.

cylinderväggens utförande. För inneslutningar med tätplåten på insidan av väggen, som är den vanligaste utformningen, anges att dessa vanligtvis gjuts med traditionell fristående form på utsidan och med tätplåten som form på insidan. Gjutetappens höjd avgörs av vilket gjuttryck som tätplåten klarar.

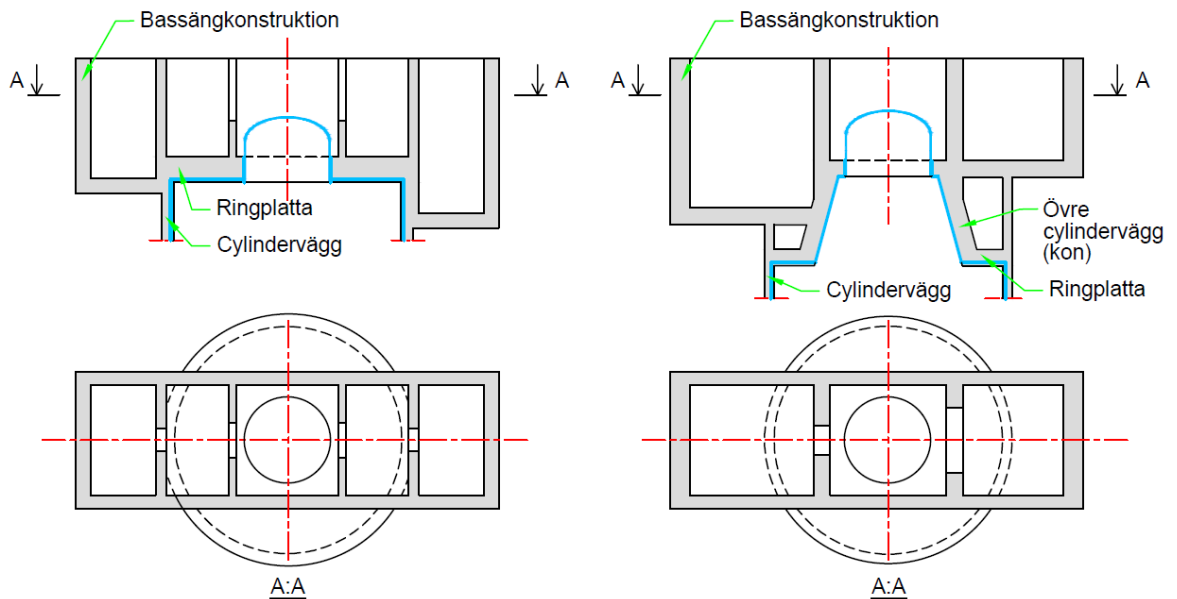
3.3.1.2 Takkonstruktion

Utformning och byggmetoder gällande cylinderväggen för svenska inneslutningar (se ovan) är ganska lika mellan olika anläggningar. Utformningen av takkonstruktionen skiljer sig däremot markant. Främsta skillnaden finns mellan PWR- och BWR-inneslutningar (se Figur 3.1). PWR-inneslutningens tak består av en kupolformad spännarmerad betongkonstruktion med en tvärsektion som till stora delar överensstämmer med cylinderväggens. BWR-inneslutningens tak skiljer sig från anläggning till anläggning där betongkonstruktionen antingen kan vara spännarmerad eller bara slakarmerad och är generellt sammangjuten med den ovanliggande konstruktionen för bränslebassänger. Generellt har hög betongkvalitet använts även för takkonstruktionen, mellan K40 och K50 (se [92]). Slakarmeringen har generellt en nominell flytgräns på 400 MPa och består av kamstänger med diameter mellan 12 och 32 mm (se [92]).

Takutformning för svenska BWR-inneslutningar kan delas in i två olika principiella konstruktionstyper, konstruktioner med endast horisontell ringplatta eller konstruktioner med ringplatta och övre cylindervägg (eller kon), se Figur 3.4. Den ovanliggande bassängkonstruktionen ingår generellt i takkonstruktionens bärande system, där de längsgående bassängväggarna utnyttjas som höga balkar. De längsgående väggarna är kraftigt armerade horisontellt i ovankant (slak eller spännarmering) samt förankrade ner i cylinderväggen för att ta upp lasten av höga inre övertryck i inneslutningen. Samtliga BWR-konstruktioner är i ovankant försedda med en avtagbar stålkupol (inneslutningskupol) som avlägsnas vid t.ex. bränslebyte. Inneslutningskupolens förankras med ett kraftigt bultförband i en sarg som i sin tur förankras ned i betongkonstruktionen med någon typ av påsvetsad dubb eller armering (se även avsnitt 3.3.3).

Tätplåten i takkonstruktionen sammanfogas med cylinderväggens tätplåt och ansluter för BWR-inneslutningar mot inneslutningskupolens sarg. I takkonstruktionen finns exempel på både ingjuten och exponerad tätplåt. Tätplåten beskrivs vidare i avsnitt 3.3.3.

Både ringplatta, övre cylindervägg och bassängkonstruktionen kan inkludera spännarmering, se avsnitt 3.3.2.



Figur 3.4: Typisk utformning av takkonstruktion för svenska BWR-inneslutningar. Vänster: endast ringplatta. Höger: ringplatta och övre cylindervägg (kon).

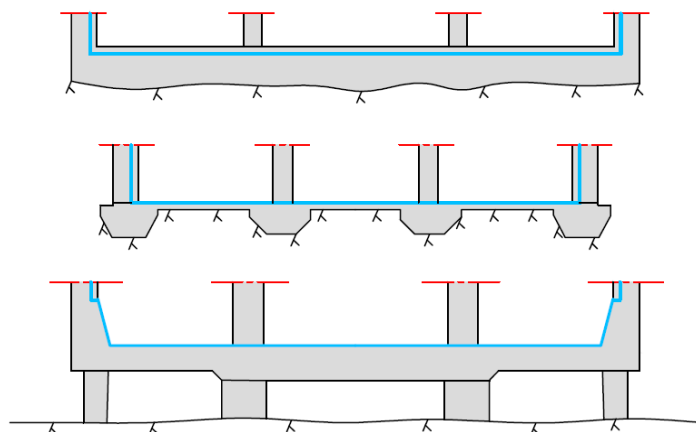
3.3.1.3 Bottenplatta

Bortsett från inneslutningarna vid Barsebäck (ej i drift) är svenska inneslutningar grundlagda direkt på berggrunden (se [92]). På ostkusten (Forsmark och Oskarshamn) består berggrunden av granit, generellt med god kvalitet. På västkusten (Ringhals) består berggrunden av gnejs som i vissa fall förstärkts med cementinjektering. Tre olika konstruktionstyper kan urskiljas för svenska inneslutningar; tjock bottenplatta, bottenplatta med förstävningar och bottenplatta på stödkonstruktion¹³ (se Figur 3.5 nedan). De tjocka bottenplattorna är kring 3 m tjocka medan övriga konstruktionstyper utförts med varierande dimensioner. Bottenplattorna är normalt kraftigt slakarmerade och är i vissa fall även partiellt spännarmerade (gäller vissa bottenplattor på stödkonstruktion). I vissa fall har grundkonstruktionen lagts upp på friktionsreducerande neoprenlager för att minska tvångspåkänningar i konstruktionen. Tjocka bottenplattorna har av gjuttekniska orsaker (hydratationsvärme) normalt gjutits i flera lager. För montering av tätplåten gjöts stålprofiler in i ovkant platta där tätplåten senare monterades via svetsning. Generellt har något lägre betongkvalitet använts för bottenplattan än för cylinderväggen, mellan K30 och K50 (se [92]). Slakarmeringen har generellt en nominell flytgräns på 400 MPa och består av kamstänger med diameter mellan 12 och 32 mm (se [92]).

Den vertikala spännarmeringen i cylinderväggen förankras på något sätt i bottenplattan. För spännkablar med cementinjekterade kabelrör har generellt passiva förankringar använts i bottenplattan, då dessa spännkablar normalt endast spänns från övre förankringen. För spännkablar vars kabelrör ej cementinjekterats har generellt aktiva förankringar använts, där förankringen utförs åtkomlig även efter färdigställande av byggnaden samt under drift (se även avsnitt 3.3.2).

¹³ Utförs även med en undre bottenplatta mot berg.

Bottenplattans tätplåt ligger för BWR-inneslutningar normal på insidan och är ej ingjuten. I de fall som tätplåten är i kontakt med kondensationsbassängens vatten är plåten tillverkad av rostfritt stålmaterial. För svenska PWR-inneslutningar är bottenplattans tätplåt generellt skyddad av en inre betong. Tätplåten beskrivs mer i detalj i avsnitt 3.3.3.



Figur 3.5: Typisk utformning av bottenplatta för svenska inneslutningar. Överst: hel bottenplatta. Mitt: bottenplatta med förstövningar. Nederst: bottenplatta på stödskonstruktion.

Internationellt finns en stor variation gällande konstruktionsutformning för inneslutningars grundkonstruktioner. I [43] anges tjocka hela bottenplattor som typiska för PWR-inneslutningar och uppdelade med övre och undre bottenplattor som typiska för BWR-inneslutningar. För anläggningar som är lokaliserade i område med sämre hållfasthet i undergrunden har jord- och bergförstärkning i form av injektering och i vissa fall har även pålning använts. Speciella krav ställs på grundkonstruktionerna i seismiskt aktiva områden, speciellt i kombination med sämre undergrund. Svenska befintliga anläggningar är generellt grundlagda på solid berggrund och seismiska laster har ej varit aktuella vid ursprunglig dimensionering¹⁴. Vid dessa gynnsamma förhållanden har lokala bottenplattor valts, där inneslutningarnas grundkonstruktion i stora delar avgränsas från kringliggande byggnader via rörelsefogar. För att öka stabiliteten för anläggningar i seismiskt aktiva områden och där undergrunden är sämre har ofta inneslutningens bottenplatta gjutits samman med kringliggande byggnader. Nackdelen med hela bottenplattor är främst att större krav ställs på att utforma plattan så att skador från tvångspåkänningar av temperatur-, krymprorelser och ojämn sättning undviks. Anläggningstyper som byggs idag är ofta konstruerade med gemensamma bottenplattor för inneslutning och kringliggande byggnader. I områden med kraftig seismisk aktivitet finns även exempel på konstruktionsutformning där bottenplattan isoleras från främst horisontella rörelser i undergrunden. Exempel på denna typ av konstruktion ges i [43], där bottenplattorna läggs upp på plintar med friktionslager och armerade neoprenkuddar.

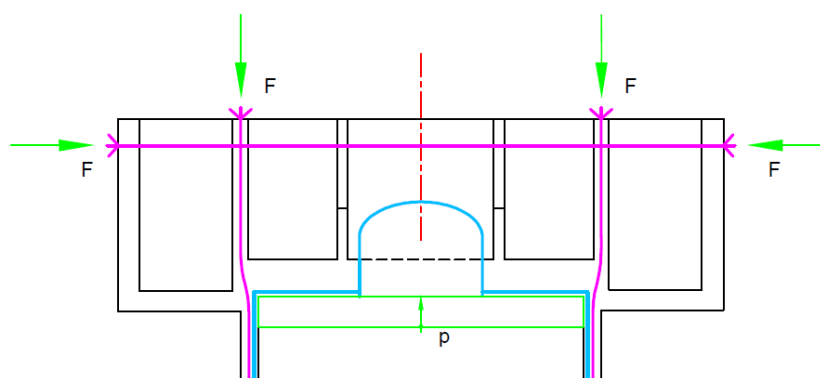
¹⁴ För de senast byggda svenska inneslutningarna har seismiska laster inkluderats i den ursprungliga dimensioneringen.

3.3.2 Spännarmering

I [22] och [92] beskrivs utformningen av spännkabelsystemet för svenska inneslutningskonstruktioner och detta avsnitt är främst baserat på dessa referenser. Samtliga cylinderväggar för svenska inneslutningar är kraftigt spännarmerade i två riktningar. Spännarmeringen är viktig för att upprätthålla en hög nivå på inneslutningens strukturella integritet. Spännarmeringens främsta uppgift är att reducera uppsprickning och deformation då strukturen belastas av högt inre övertryck. Kraften i spännarmeringen är dimensionerad så att den uppväger det inre övertryck som specificerats för inneslutningen (konstruktionstrycket). Generellt skall alltså dragpåkänningar ej uppkomma i betongen vid ett inre övertryck som motsvarar konstruktionstrycket. Ett överslag för en cylindervägg med diametern 30 m och konstruktionsövertryck på 0.6 MPa ger ett behov av spännkraft horisontellt på $30 \cdot 0.6 / 2 = 9$ MN/m och vertikalt på $30 \cdot 0.6 / 4 = 4.5$ MN/m (se [22]).

Gällande svenska PWR-inneslutningar inkluderas i princip tre typer av spännkablarna, vertikal-, horisontal- och domkablarna (se Figur 3.1). De horisontella spännkablarna går 180° runt inneslutningen och förankras i 4 olika kontreforer där kablarna förskjuts 90° . De vertikala kablarna förankras i utrymmen under bottenplattan samt i anslutning mellan cylindervägg och dom (ovankant domringen). Internationellt för PWR-inneslutningar finns stor variation av spännkabelutformning, se [43]. T.ex. finns det horisontella helvarvskablarna (förskjutna 180°) samt kombinerade vertikal-/domkablarna (s.k. hårnålskablarna) som löper från ena sidan av cylinderväggen upp över domen och ner i andra sidan av cylinderväggen.

Gällande svenska BWR-inneslutningar finns fler olika typer av spännkablarna. Förutom de spännkablarna som visas i Figur 3.1 (vertikal- och horisontalkablarna) finns för vissa anläggningar även spännkablarna i konstruktionen för bränslebassänger, i takkonstruktionen (i ringplatta och i övre cylindervägg) och i bottenplattan. Dessa typer av spännkablarna har funktioner som avser att upprätthålla den strukturella integriteten för den specifika inneslutningen. T.ex. används, i flera fall, horisontella spännkablarna i de längsgående väggarna för bränslebassängen. Dessa spännkablarna tillsammans med vertikala spännkablarna som förankras i ovankant av väggarna upprätthåller integriteten i takkonstruktionen (se Figur 3.6).

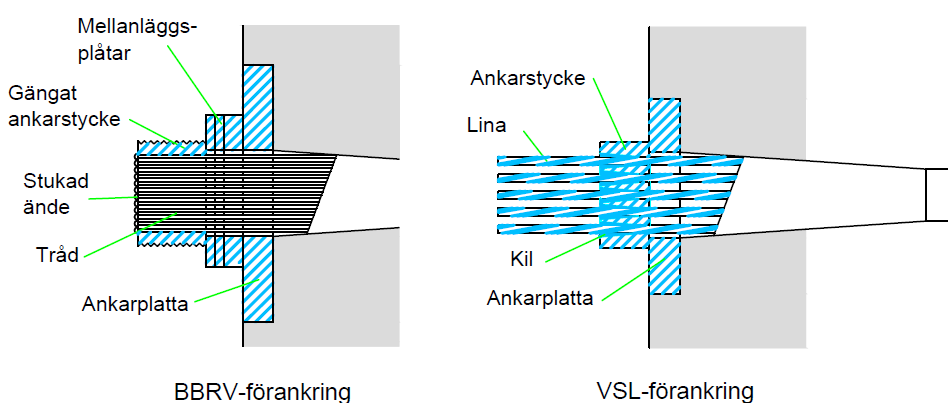


Figur 3.6: Principfigur gällande funktionen av spännkablarna i längsgående väggar i bränslebassänger för BWR-inneslutning (p: inre övertryck i inneslutning, F: spännkraft).

3.3.2.1 Spännkabelsystem

För inneslutningskonstruktioner används efterspända spännkabelsystem där spännkablarna löper i ursparingsrör (foderrör) som gjuts in i betongkonstruktionen. Spännkabelrören och förankringsenheter appliceras tillsammans med slakarmering och andra ingjutningsgods i gjutformen innan gjutning. Förankringsenheten består av en ankarplatta i stål samt ett konformat rör som ansluts mot foderröret (se Figur 3.7). Speciellt utformad armering läggs in kring förankringen för att förhindra spjälkning.

För svenska inneslutningar används två olika typer av spännkabelsystem, BBRV- och VSL system (se Figur 3.7). BBRV-kabeln består av ett stort antal enskilda trådar med fixerad längd. Uppspänningen av denna typ av kablar görs genom att en domkraft appliceras på det gängade ankarstycket som lyfts från ankarplatta. När erforderlig kraft uppnåts i kabeln appliceras mellanlägg för att fixera ankarstycket. VSL-kabeln består av ett antal linor (varje lina består normalt av 7 tvinnade trådar) där spännkabeln spänns genom att domkraften appliceras direkt på linorna. Linorna dras tills att erforderlig kraft uppnås i kabeln och fixeras därefter via kilar i ankarstycket som är i direkt kontakt med ankarplattan. En mer utförlig beskrivning av uppspanningsprocessen samt mätmetoder för att säkerställa att erforderlig spännkraft uppnåts ges i [22]. Typiska spännkablar i svenska inneslutningar är för BBRV en kabel med 139 trådar med diameter 6 mm (brottlast 7.1 MN) och för VSL en kabel med 19 st. linor (brottlast 3.4 MN). Kablarna har normalt spänts till ca 70 % av brottslasten.



Figur 3.7: Principfigur gällande förankring av spännkabelsystem i svenska inneslutningar.

Internationellt har för befintliga anläggningar ofta spännkabelsystemet Freyssinet använts, se [43]. En översikt gällande utformning och uppspanning av Freyssinet systemet och andra typer av spänsystem ges i [75].

3.3.2.2 Spännkraftsförlust

Olika typer av förluster som kan påverka spännkraften i en inneslutningskonstruktion är (se [124]):

- Initiala förluster (låsglidning, friktionsförluster och elastisk deformation i betong);
- Tidsberoende förlust (krypning och krympning av betong och relaxation i spännkabel);

- Andra effekter (skador i form av korrosion och defekter samt effekter av temperaturrörelse).

Faktorer som inverkar på de tidsberoende förlusterna samt riskfaktorer gällande korrosion på spännkablar behandlas översiktligt i avsnitt 3.4.

Låsglidning

Då kabeluppspänningen avslutas uppkommer någon typ av kraftminskning vid inlåsning av förankringen (låsglidning). Normalt för inneslutningskonstruktioner är att spännkabeln först spänns upp enligt instruktioner för att uppnå erforderlig spännkraft. Efter inlåsning utförs mätning av förankringskraften via ett så kallat "lift-off" test. Ett lift-off test innebär i princip att man med domkraft drar i förankringen och registrerar kraften då ankarstycket lättar från ankarplattan. Denna kraft registreras som ursprungligt inlåst kraft för spännkabeln, d.v.s. förlust av låsglidning inkluderas i registrerad ursprunglig kraft. Lift-off test används också vid regelbundna inspektioner av spännkabelkraft för spännkabelsystem som ej är cementinjekterade.

Friktionsförluster

Storleken på friktionsförlusten beror av spännkabelns krökning samt ytråheten för spännkabel och foderrör. Även nominellt raka spännkabelrör påverkas av friktion pga. toleranser i arbetsutförandet. Minskningen av kraft längs en spännkabel kan beräknas med följande exponentialfunktion (se t.ex. [75]).

$$F(x) = F_0 e^{-(\mu \alpha + K x)}$$

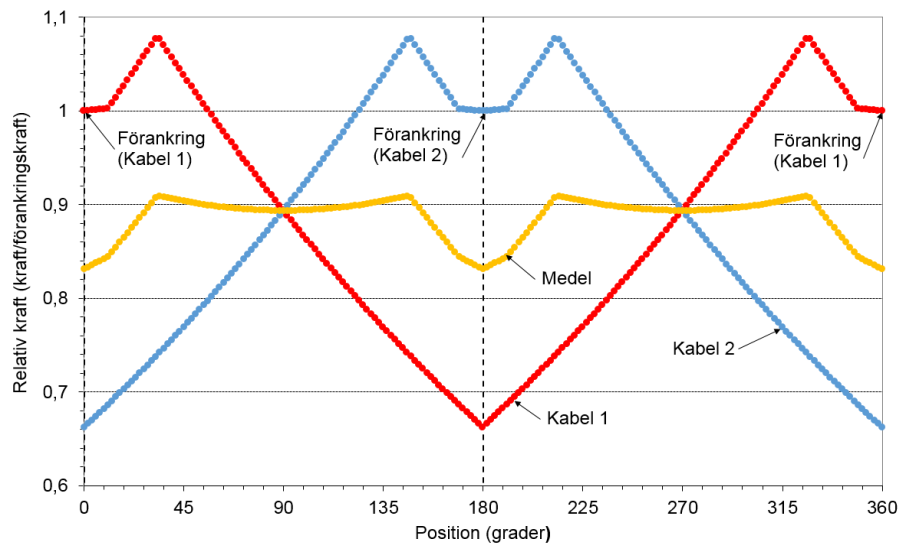
där F_0 är kraften vid förankringen, μ är friktionskoefficienten mellan kabel och rör, α är absolutvärdet av summerad vinkeländring, K är koefficienten som beaktar toleranser¹⁵ och x är avstånd mellan uppspänningsände och betraktat snitt. I BRO 94 anges friktionskoefficienterna till $\mu = 0.18$ och $K = 0.0022 /m$ (se [75]) och enligt SS-EN1992-1-1 [87] anges att om godkända intyg från leverantören ej finns kan $\mu = 0.18$ och $0.0009 < K < 0.0018 /m$ användas¹⁶. För befintliga svenska inneslutningar användes troligen uppgifter från leverantören gällande uppskattad friktion. I [22] anges att för Forsmark 1 och 2 användes friktionskoefficienterna $\mu = 0.15$ och $K = 0.0015 /m$ vid dimensionering. Den faktiska friktionen uppskattades normalt genom mätning vid uppspänning. Enligt [22] konstaterades vid Forsmark 1 att den faktiska medelfriktionen var något lägre än den som uppskattats vid dimensionering.

För långa spännkablar med stor krökning¹⁷ utgör friktionsförlusterna en betydande reduktion av den kabelkraft som appliceras i änden av kabeln (förankringskraft). För att utjämna spännkraften i konstruktionen används olika metoder. Långa spännkablar med stor krökning spänns oftast i båda ändar. Ett annat sätt att minska variationen är att "överspanna" kabeln och sedan göra ett avsiktligt eftersläpp vid inlåsning. Slutligen förskjuts förankringarna för horisontella spännkablar. I Figur 3.8 visas ett exempel på spännkraftfördelning för horisontella spännkablar med total krökning på 360° och som spänns i båda ändar. Förankringspositionen för Kabel 2 i exemplet är förskjuten 180° jämfört med Kabel 1 vilket gör att den lägsta effektiva spännkraften (medelkraften) längs inneslutningens omkrets ökar markant.

¹⁵ Faktorn K uttrycks ofta som en som $k \mu$ där k är oavsiktlig krökning per meter.

¹⁶ Angivna värden i SS-EN1992-1-1 [87] gäller för kalldragna linor som löper i insmorda foderrör av stål.

¹⁷ Horisontella spännkablar i inneslutningar kan kröka upp till 360°



Figur 3.8: Exempel på spännkabelfördelning för spännkablar med 360 graders krökning. Förankring för Kabel 1 är förskjutet 180 grader jämfört med Kabel 2.

Elastisk deformation i betong

Initialt kommer även kraften att minska pga. att betongen deformeras elastiskt då spännkraften appliceras. Storleken på denna kraftförlust beror på när en specifik kabel spänns i förhållande till andra spännkablar. Den först spända spännkabeln i en konstruktion får maximal förlust medan den sist uppspända kabeln ej får någon förlust. Medelförlusten av elastisk sammantryckning för en typisk inneslutning är relativt liten (mellan 1 och 2 % enligt [21]).

3.3.2.3 Metod för korrosionsskydd

För svenska inneslutningar och även internationellt används två principiellt olika typer av korrosionsskydd för spännkablarna:

- För *vidhäftande spännarmering* fylls utrymmet mellan spännkabel och foderrör med cementinjektering där injekteringen skyddar spännkabeln mot korrosion. För den här metoden fixeras spännkabeln till betongkonstruktionen efter att cementinjekteringen härdar.
- För *icke vidhäftande spännarmering* fylls utrymmet mellan spännkabel och foderrör med fett eller något annat medium som skyddar spännkabeln mot korrosion. För denna metod fixeras inte spännkabeln till betongkonstruktionen.

Vid korrekt utförd injekteringsarbete utgör cementinjekteringen ett tillförlitligt skydd mot korrosion. En annan fördel med cementinjektering är att spännkabeln blir mindre känslig för lokala skador eftersom vidhäftningen kan överföra spännkraft till betongkonstruktionen. Nackdelen med vidhäftande spännarmering är att det inte går att verifiera statusen hos spännsystemet. Det är inte möjligt att, som för icke vidhäftande armering, att mäta kvarvarande kraft eller att spänna ner kablarna för visuell inspektion.

För icke vidhäftande spännarmering i svenska inneslutningar används två olika typer av korrosionsskydd, fettinjektering samt ventilering med torrluft, se [22]. Internationellt

används antingen fettinjektering av foderrören eller någon typ av skyddande beläggning på spännrådarna (se [43]).

För vidhäftande spännkablar är arbetsutförandet av injekteringsarbetet avgörande för huruvida spännkablarna får ett fullgott skydd eller inte. Viktiga detaljer i injekterings utförande är:

- Säkerställande av rena rör utan kvarstående vatten innan påbörjad injektering;
- Korrekt konsistens på injekteringsbruket (löst \Rightarrow separation, styvt \Rightarrow dålig utfyllnad);
- Injekteringsarbetet skall genomföras utan avbrott;
- Luftning av högpunkter i kabelföringen;
- Observation av genomströmning i luftningsvägar;
- Korrekt trycksättning då injektering avslutas.

För spännarmerade konstruktioner generellt är vidhäftande spännkablar vanligast, speciellt för brokonstruktioner. Väl utarbetade och beprövade rutiner gällande injekteringsarbete fanns tillgängliga då de svenska inneslutningarna byggdes.

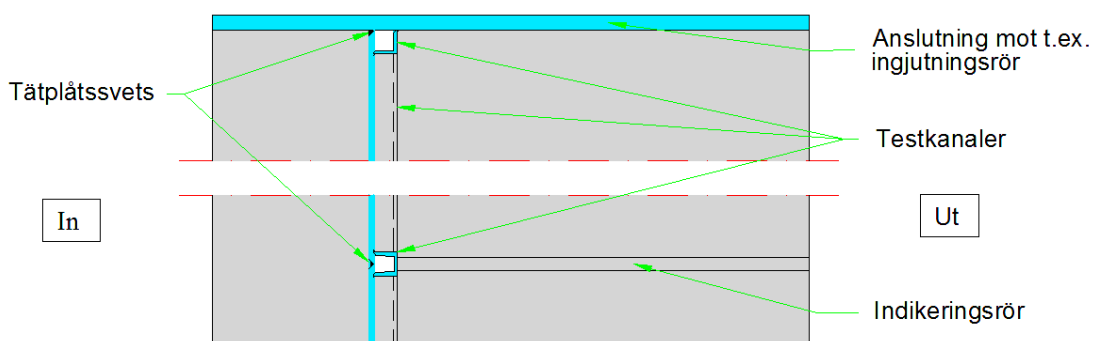
3.3.3 Täthetsbarriären

I detta avsnitt behandlas tätplåt (se avsnitt 3.3.3.1) och genomföringar (se avsnitt 3.3.3.2)

3.3.3.1 Tätplåt

En typisk tätplåt för inneslutningar i Sverige och internationell är tillverkad av 5-10 mm tjocka stålplåtar av mjukt kolstål. Som nämnts tidigare är tätplåtar i svenska inneslutningar generellt ingjutna, vilket skyddar plåten från att träffas av missiler och att buckling av tvångslaster skall uppstå.

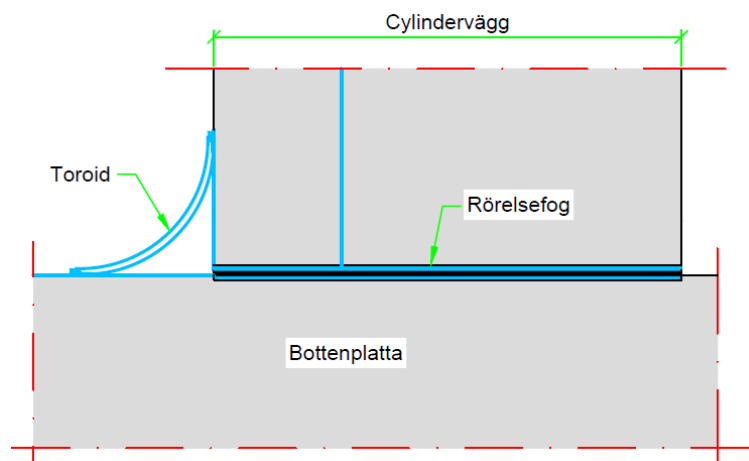
För vissa svenska inneslutningar har svetsar i tätplåten försetts med permanenta testkanaler för provtryckning (se t.ex. [89]). Testkanalerna kan bestå av stålprofiler (t.ex. u-profil) som svetsats mot utsidan av tätplåten, se Figur 3.9. Kanalerna förses med indikeringsrör så att testkanalerna kan trycksättas även efter att den motgjutna betongkonstruktionen färdigställts.



Figur 3.9: Principfigur gällande testkanaler för provtryckning av tätplåtens svetsar.

För en del inneslutningar är zoner av det täta skalet speciellt utformade för att kunna ta upp rörelser. Exempel på detta är kring rörelsefogar i ovan och underkant

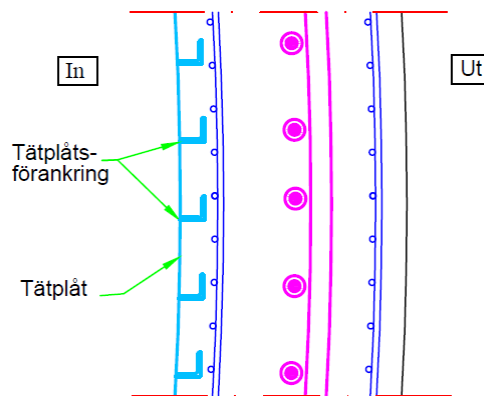
cylindervägg (se avsnitt 3.3.1.1), men kan också finnas på andra ställen i det täta skalet (t.ex. i anslutning mot inneslutningskupolens sarg). Dessa deformationszoner utformas vanligtvis med någon typ av dubbelkrökta plåtar, så kallade toroider. I Figur 3.10 visas ett exempel på principutformning av en toroid för rörelsefog mellan bottenplatta och cylindervägg. Toroiden i exempelfiguren är utformad med dubbla plåtar där utrymmet mellan plåtarna kan trycksättas för täthetskontroll.



Figur 3.10: Principfigur gällande toroid över rörelsefog mellan cylindervägg och bottenplatta (se t.ex. [89]).

För den internationellt vanligt förekommande ytliga tätplåten (ej ingjuten) krävs att plåten förankras mot betongen för att förhindra skadliga effekter av buckling. Förankringarna avser generellt att fixera tätplåten mot betongen i plåtens plan (skjuvning) samt ut ur plåtens plan (axiellt). Två olika typer av förankring används vanligen, kontinuerliga i form av vertikala stålprofiler (se Figur 3.11) och punktförankring i form av ståldubbar. Utformning och avstånd mellan förankring varierar mellan olika inneslutningar. Typiska exempel är 500 mm mellan vertikala längsgående profiler och 300 x 300 mm mellan punktförankringar (se [22]). I [133] görs en genomgång av tätplåtar för amerikanska förhållanden (ytlig tätplåt) med inriktning på utformning och funktion gällande olycksscenarioer med höga temperaturer och tryck i inneslutningen.

För ingjutna tätplåtar finns generell endast avsiktlig förankring i mindre omfattning. Dock utgör påsvetsade kanaler för provtryckning samt anslutningar mot genomföringar betydande skjuvförankring även för ingjutna tätplåtar. Axiellt kan den ingjutna tätplåten anses fixerad av det inre betongskalet.



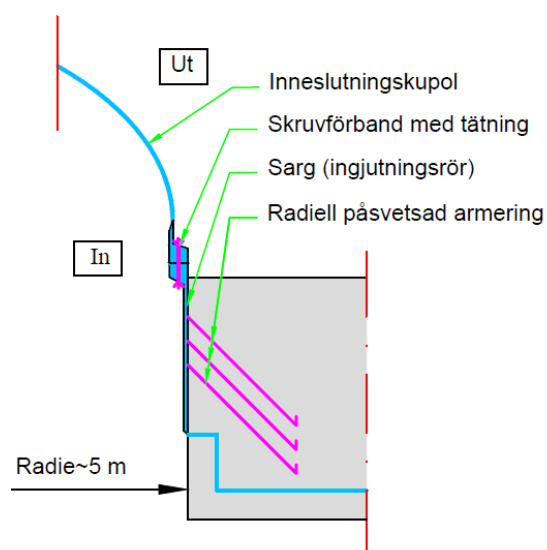
Figur 3.11: Principfigur gällande cylindervägg där vertikal kontinuerlig förankring av utanpåliggande tätplåt används (horisontalsnitt).

3.3.3.2 Genomföringar

En stor mängd olika typer av genomföringar finns genom täthetsbarriären för en typisk inneslutning. Stora genomföringar finns för passage av personal (personalsluss) samt transport av större utrustning (transportgenomföring). Mindre genomföringar finns i stor omfattning i form av rör- och elgenomföringar. I detta avsnitt beskrivs främst utformning av genomföringens foderrör och anslutning mot betong med fokus på större genomföringar och processrörsgenomföringar.

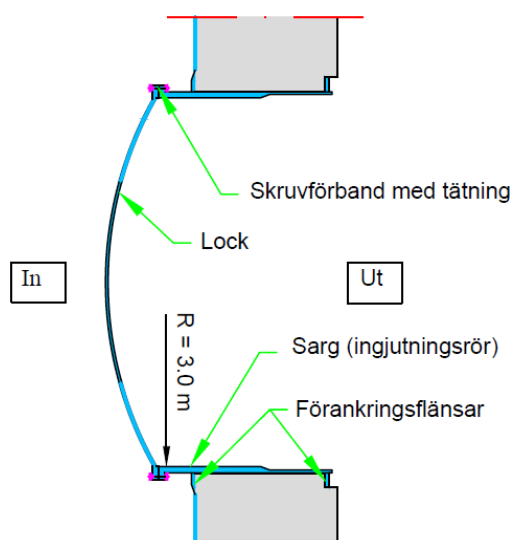
Stora genomföringar

Generellt består en transportgenomföring av en demonterbar del i form av en kupol och en fixerad del (ingjutningsrör) som förankras i betongkonstruktionen och svetsas mot tätplåten. Anslutningen mellan den demonterbara kupolen och ingjutningsröret utgörs av någon typ av kraftigt skruvförband och en tätning (ofta av polymerer). I Sverige finns transportgenomföringar endast för BWR-inneslutningar där inneslutningskupolen i takkonstruktionen generellt utgör den största genomföringen med en radie upp till 5 m (se Figur 3.1). Principutförande för en inneslutningskupol i en svensk inneslutning visas i Figur 3.12. Inneslutningskupolen består av en sarg i stål som är fixerad i takkonstruktionen med någon typ av påsvetsad förankring, t.ex. radiell påsvetsad armering. Sargens infästning i betong är i vissa fall utformad så att sargen tillåts deformera radiellt för att minska tvångspåkänningar av temperatur. Kupol, skruvförband och tätning utformas för att klara dimensionerande inre olyckslaster i form av temperatur och tryck. Kupolen är också dimensionerad för yttre vattentryck från bränslebassängen.



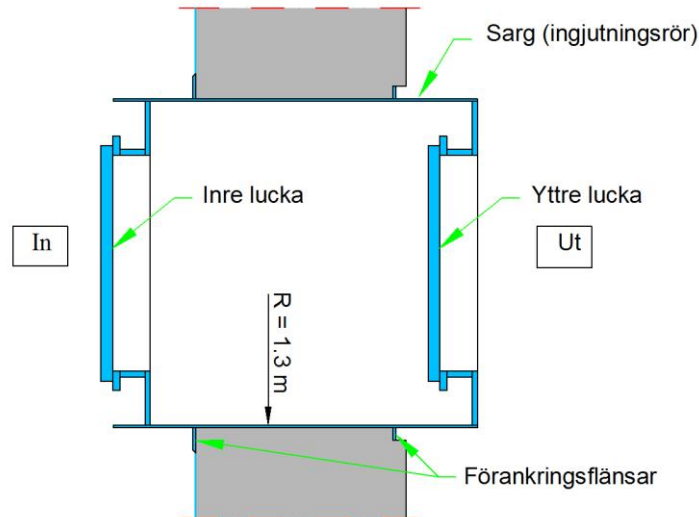
Figur 3.12: Principfigur av infästning för inneslutningskupol.

För PWR inneslutningar (ej för svenska inneslutningar) är transportgenomföringen den största genomföringen. I [125] visas utformningen av transportgenomföringen för den Japanska prototypen till testmodellen som behandlas i [125] (se Figur 3.13). Denna genomföring är mindre än en typisk inneslutningskupol (BWR-inneslutning) samt sitter locket på insidan av inneslutningen till skillnad mot BWR-inneslutningen där locket (kupolen) sitter på utsida (se Figur 3.12). En fördel med lock på insidan är att skruvförbandet utsätts för tryckkrafter vid inre övertryck vilket medför säkrare tätning. En nackdel med lock på insidan är att locket har större risk att buckla. Infästningen för transportgenomföringen i Figur 3.13 skiljer sig från exemplet som visat i Figur 3.12. Infästningen av transportgenomföringen i betongväggen utgörs av tjocka stålfänsor på in- och utsida av väggen.



Figur 3.13: Principfigur av transportgenomföring enligt [125].

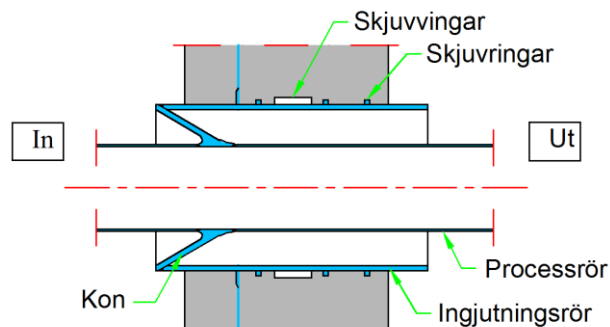
Personslussens utformning är mer komplex och stor variation finns mellan olika inneslutningar. Personslussen kan sitta ingjuten eller bultad mot ett ingjutningsrör som motsvarar utformningen för andra stora genomföringar. Slussfunktionen medför att genomföringen behöver två täthetsbarriärer. I [125] visas principutformningen för personslussen i en Japansk PWR-inneslutning (se Figur 3.14).



Figur 3.14: Principfigur av personsluss enligt [125].

Rör genomföringar

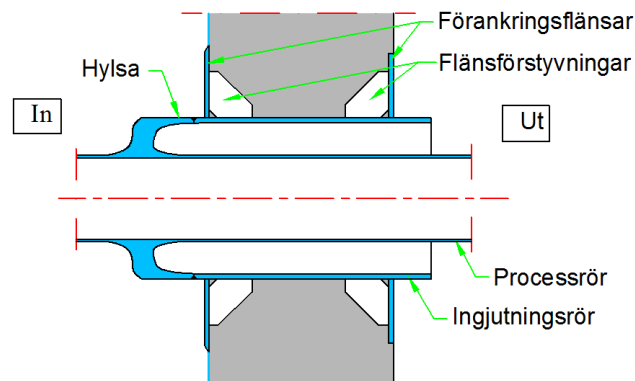
Genomföringar för processrör utsätts till skillnad från transportgenomföringar och personslussar inte enbart av generella olyckslaster i inneslutningen (inre temperatur och övertryck) utan även av stora laster från postulerade rörbrott. Dessa laster kan medföra att ingjutningsröret belastas av stora axial-, skjuv-, vrid- och böjkrifter. I Figur 3.15 nedan visas en principskiss för en typisk genomföring i en svensk inneslutning. Processröret är svetsat mot ingjutningsröret via en konformad del. Ingjutningsröret är förankrat i betongväggen via skjuvklackar svetsade mot rörets utsida. De så kallade skjuvringarna i Figur 3.15 avser främst ta upp axiella laster medan skjuvvingarna är avsedda för att ta upp vridkrifter från processröret.



Figur 3.15: Principfigur av typisk rör genomföring i svensk inneslutning (se t.ex. [89]).

I [125] visas principutformningen av rör genomföringar för en Japansk PWR-inneslutning, se Figur 3.16. För denna rör genomföring används en typ av hylsa som anslutning mellan processrör och ingjutningsrör. För att förankra ingjutningsröret i

betongväggen används förankringsflänsar på ut- och insida vägg som styvas upp av ett antal radiellt placerade flänsförstyvningar.



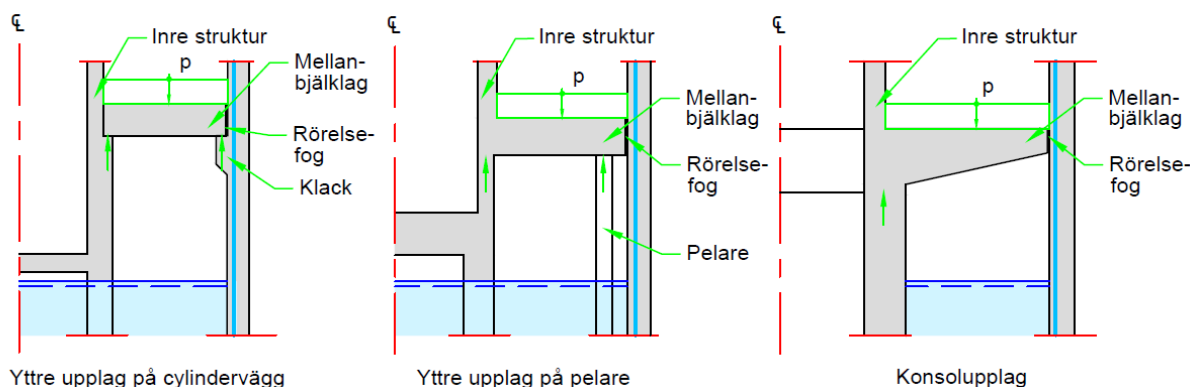
Figur 3.16: Principfigur av rörgenomföring enligt [125].

3.3.4 Inre struktur

Den inre strukturen för samtliga svenska BWR-inneslutningar inkluderar en betongkonstruktion som skiljer primärutrymmet och sekundärutrymmet i inneslutningen, ofta benämnt mellanbjälklag (se Figur 3.1). Den inre strukturen inkluderar även andra betongkonstruktioner som avser att bära reaktortanken samt att skydda områden i inneslutningen mot radioaktiv strålning.

Den primära funktionen för mellanbjälklaget är att bära en nedåtriktad last av det övertryck som bildas i primärutrymmet vid ett postulerat rörbrott. Grovt sätt kan det dimensionerande differenstrycket över mellanbjälklaget anses motsvara halva konstruktionstrycket för inneslutningen. Mellanbjälklaget kan också belastas med betydande uppåtriktad last av så kallat nivåhävning i kondensationsbassängen. Nedblåsningsrören är infästa i mellanbjälklaget och laster på rören belastar därmed mellanbjälklaget lokalt vid rörgenomföringen.

Mellanbjälklaget är försett med någon typ av rörelsefog mot inneslutningsväggen. Det är främst radiella rörelser i cylinderväggen från uppspanning och inre övertryck som rörelsefogen avser att ta upp. Olika typer av konstruktionslösningar har valts för mellanbjälklaget där samtliga har ett inre upplag mot inre strukturens kärna. Tre olika typer kan urskiljas för det yttre upplaget, vertikalt stöd på cylinderväggens insida, vertikalt stöd på t.ex. pelare, samt konsolupplag (dvs inget vertikalt yttre upplag), se Figur 3.17. Då mellanbjälklaget läggs upp på cylinderväggen utförs upplaget med någon typ av glidlager för att eliminera horisontella krafter från rörelser i cylinderväggen. Mellanbjälklaget är generellt slakarmerat.



Figur 3.17: Principfigur gällande upplagsförhållande för mellanbjälklaget.

Rörelsefogen är försedd med någon typ av tätning som utformas på olika sätt. I [89] ges exempel på en typ av tätning, där en armerad gummiduk spänns mot cylindervägg och mellanbjälklag med hjälp av plattjärn och expanderskruv.

3.4 Inverkan av åldrande

I detta avsnitt görs en översiktlig beskrivning av faktorer gällande åldrande som riskerar att försämra inneslutningens integritet. Beskrivningen görs med utgångspunkt från relevanta nedbrytningsmekanismer för betong och stål samt från utförda inventeringar av åldringsrelaterade skadefall i Sverige och internationellt.

De viktigaste materialen att beakta gällande den primära inneslutningsfunktionen är stål samt olika typer av cementprodukter (betong och injekteringsbruk). Även andra material ingår i täthetsfunktionen och då främst polymerer i olika typer av tätningar, som packningar i genomföringar. Sekundärt används också andra typer av material som korrosionsskydd, som t.ex. fettinjektering av spännkablar eller skyddsmålning av stålkomponenter. I utformningen av rörelsefogar har material som neoprenlager samt olika typer av isolering använts (t.ex. cellplast).

Omgivande miljön har stor inverkan på åldrandeprocesser. BWR-inneslutningar är skyddade från utomhusklimat av omgivande byggnader (se avsnitt 3.2). Generellt kan därför miljön kring en BWR-inneslutning betraktas som normal inomhusmiljö (eller något varmare). I [37] visar mätningar att temperaturen i inneslutningen för Ringhals 1 (under drift) ligger kring 45 °C i primärutrymmet och kring 35 °C i sekundärutrymmets torra delar. I olika utrymmen utanför inneslutningen ligger temperaturen mellan 20 och 30 °C i medeltal över året. Det konstateras också i [37] att den relativa luftfuktigheten (RF) är ganska låg utanför inneslutningen (generellt lägre än 40 %), men med stor variation beroende på årstid. I inneslutningen uppmättes något högre RF (ca 50 %)¹⁸. Både kondensationsbassängen samt de ovanliggande bränslebassängerna kan ge ökad fuktpåverkan på närliggande konstruktionsdelar i form av ökad luftfuktighet, men också av fritt vatten vid eventuella läckage genom bassängplåtarna. För PWR-anläggningar utsätts stora delar av inneslutningens utsida för utomhusklimat. Meteorologiska data för den platsen där anläggningen är uppförd ger värden på

¹⁸ Högre RF i inneslutningen antas bero på fuktavgivning från kondensationsbassängen [37].

temperatur och fuktförhållande för dessa delar¹⁹. Inverkan av yttre klimat kan även inkludera påverkan av klorider, speciellt vid kustnära anläggningar. Miljöförhållande för de delar av PWR-inneslutningen vid Ringhals 3 som ej utsätts för utomhusklimat redovisas i [37]. I utrymmen utanför PWR-inneslutningen visas på liknande förhållanden som utanför BWR-inneslutningen, d.v.s. temperatur mellan 20 och 30°C. I utrymmen inne i inneslutningen varierar temperaturen mellan 25 och 45°C. Lokalt i både PWR- och BWR-inneslutningar kan högre driftstemperaturer finnas t.ex. kring rör genomföringar.

En stor andel av konstaterade åldringsrelaterade skadefall för inneslutningskonstruktioner beror på brister i kvalitet och metoder för arbetsutförandet. Då åldrandeffekter studeras för en inneslutningskonstruktion är det därför mycket viktigt att beakta använda arbetsmetoder, rapporterade kvalitetsbrister och inventering av skadefall från liknande anläggningar.

En övergripande sammanställning av olika möjliga förändringsprocesser och nedbrytningsmekanismer för betongkonstruktioner vid kärnkraftverk ges i t.ex. [55] och [129]. I [83] ges en sammanställning av erfarenheter från USA gällande degradering för betonginneslutningar samt möjliga undersökningsmetoder.

Förändringsprocesser som kan anses viktiga gällande integriteten för svenska inneslutningskonstruktioner sammanfattas i tre områden:

- Hållfasthetsförändringar av betong (avsnitt 3.4.1);
- Korrosion av stål (avsnitt 3.4.2);
- Långtids förluster av spännkraft (avsnitt 3.4.3).

3.4.1 Hållfasthetsförändringar i betong

Den fortskridande hydratationen i cementpastan gör att betongens hållfasthet kan öka betydande med ålder efter gjutning. Hållfasthetsökningen vid en viss tidpunkt beror av cementtyp, betongrecept samt den omgivande miljön under härdningen. Denna process kan anses öka integriteten för inneslutningen och behandlas ej vidare här.

Nedbrytning av betong kan delas in i fysikalisk och kemisk nedbrytning. Frostsprängning och saltsprängning är exempel på fysikalisk nedbrytning. Karbonatisering, kloridangrepp och alkali-ballast reaktioner är exempel på kemisk nedbrytning. Betongen påverkas också av olika laster som konstruktionen utsätts för, t.ex. uppkommer normalt sprickor i områden med dragpåkänningar. I [92] diskuteras nedbrytning i samband med svenska reaktorinneslutningar och det konstateras att de förändringsprocesser i betongen som ökar risken för korrosion för armering och ingjutningsgods är viktigast att beakta (t.ex. karbonatisering och kloridinträngning, se avsnitt 3.4.2).

Faktorer som kan påverka betongens hållfasthet för inneslutningskonstruktion sammanfattas här i nedbrytning orsakad av:

- Förhöjd temperatur;
- Radioaktiv strålning;
- Alkalisilikareaktion.

¹⁹ Samtliga svenska PWR-reaktorer ligger vid Ringhals kärnkraftverk på västkusten.

Temperaturen i och kring inneslutningar kan anses ligga något över normal rumstemperatur (se [37]). Dessa temperaturnivåer anses dock inte skadliga för betongen. Lokalt kring rör genomföringar i inneslutningskonstruktioner kan förhöjda temperaturer upp till 100 °C förekomma, se [89]. Dessa temperaturnivåer kan ge negativ inverkan på betongens hållfasthet vid långvarig inverkan. Inga relevanta studier kring långvarig inverkan av dessa temperaturnivåer har dock hittats.

De områden där det finns osäkerhet kring betongens påverkan av radioaktiv strålning är biologiska skärmen som är i anslutning till reaktortanken, se [89]. Strålningen påverkar konstruktionen både genom strålningen i sig, men också av den uppvärmning som följer, se [8]. I [55] nämns strålningsnivåer som kan ge skadliga effekter på betongens hållfasthet. I [104] presenteras en litteraturstudie kring strålningsinducerad degradering av betong. Då skadliga effekter av strålning endast är aktuellt i områden närmast reaktortanken kan detta ses som ett begränsat problem för reaktorinneslutningar generellt.

Alkalisilikareaktioner uppkommer av att vissa ballasttyper (t.ex. flinta, opal och porfyr) reagerar med cement som har högt alkaliinnehåll (se t.ex. [38] och [32]). Skadan visar sig som ett tätt sprickmönster i betongens yta och kan ge kraftig nedsättning av hållfastheten vid allvarliga fall. Det finns olika grader av reaktiva ballastsorter och de ballasttyper som kan anses kraftigt reaktiva är sällsynta i Sverige. Även de vanligen använda cementtyperna i Sverige, som LH Limhamn och STD Degerhamn cement, anses vara lågreaktiva då de har låg alkalihalt (se [38]). I Skåne finns en del förekomst av flinta, vilket kan ge skador. Förekomsten av skador från alkalisilikareaktioner är troligen sällsynta vid svenska kärnkraftverk då lågreaktiva cement- och ballastsorter generellt använts i Sverige. Internationellt finns exempel på skador från alkalisilikareaktioner vid ett kärnkraftverk i USA, se [83].

3.4.2 Korrosion av stål

Här avses främst risk för skador på ståldelar som är helt eller delvis omslutna av betong. För ståldelar som lock till genomföringar och andra inspekterbara delar anses inte korrosion kunna äventyra inneslutningens integritet utan att dessa skador upptäcks. I [94] beskrivs korrosionsrisker i avseende på svenska reaktorinneslutningar. Här anges generellt att en hög relativ fuktighet krävs för att korrosion skall vara aktuellt och att korrosionshastigheten kan anses försumbart låg vid en relativ fukthalt under 70 %.

Betongens höga pH värde passiverar normalt stålytan från korrosion. Tre riskfaktorer för korrosion av ingjutet stål kan urskiljas (se [94]):

- Karbonatisering av betongen;
- Kloridinträngning i betongen;
- Hålrum och brister i anslutande betong.

Karbonatisering beror på att koldioxid i luft reagerar med cement som omvandlas till bland annat kalciumhydroxid till kalciumkarbonat. Denna process sänker pH värdet i betongen vilket ger ökad risk för korrosion. För betong av hög kvalitet sker karbonatiseringen mycket långsamt och når under livslängden för en inneslutning bara någon centimeter in i konstruktionen (se [94]). Kloridinträngning sker vid exponering av klorider, vilket endast kan anses aktuell för de svenska inneslutningarna som exponeras av utomhusklimat (PWR-inneslutningar). Klorider som tas upp i betongens cementstruktur sänker pH värdet i betongen. Precis som för karbonatisering skyddar

en tät betong av hög kvalitet mot inträngning. Även fuktförhållandena har stor inverkan på kloridinträngningshastigheten. Skvalpzoner för konstruktioner i havsvatten samt brokonstruktioner utgör högriskobjekt gällande kloridinträngning. Då betongen i svenska inneslutningar generellt är av hög kvalitet och att exponeringen är låg, anses i [94] risken liten för att karbonatisering och kloridinträngning skulle kunna medföra korrosionsskador.

Gällande hålrum och brister i anslutande betong kan tre anledningar urskiljas:

- Brister i metoder och utförande gällande betongarbeten, t.ex. injekteringsarbeten;
- Planerade hålrum, t.ex. kring rörelsefogar;
- Formändring av ståldetaljer, t.ex. buckling av utanpåliggande tätplåt.

Tre typer av betongarbeten har normalt utförts då svenska inneslutningar uppfördes, betonggjutning med traditionell form, glidformsgjutning och cementinjektering. Injektering utfördes främst kring genomföringar och av foderrör för spännkablar, men för vissa inneslutningar också mellan tätplåt och betongskal (se avsnitt 3.3). Gällande cementinjektering är svårigheten generellt att få full utfyllnad i högpunkter av utrymmet som injekteras (se avsnitt 3.3.2.3). Exempel på skadefall som kan härledas till bristande injektering är relativt få. För svenska inneslutningar gav en brist i injekteringen av en genomföring i Barsebäck 2 lokala korrosionsskador på tätplåten, se [89]. Hålrum i injekteringen av en genomföring upptäcktes även vid Barsebäck 1, dock utan tecken på korrosion (se [45])²⁰. För betonggjutning kan brister i betongens konsistens och vibreringsarbeten ge hålrum pga. dålig utfyllnad. Även brister från kvarlämnade föremål i betongen kan ge hålrum och brister i betongen. Exempel på detta finns gällande rapporterade skador i USA. Skador på tätplåten har orsakats av dålig utfyllnad kring t.ex. genomföringar, men också av träbitar, arbetshandskar och andra föremål som lämnats kvar i gjutformen, se t.ex. [83].

Planerade hålrum i betongen kring injutna ståldelar är relativt vanliga för svenska inneslutningar. Kring rörelsefogar separeras ofta tätplåten och spännkablar från betong och injektering för att skapa rörelsemöjlighet. För motgjutna delar skapas utrymmet mellan stål och betong ofta med någon typ av isoleringsmaterial (cellplast eller mineralull). Exempel på skadefall gällande denna typ av konstruktionslösning är korrosionsskadorna på så kallade toroider vid Forsmark 1 och vid Ringhals 2 (se [89] och [83]). Även icke vidhäftande spännarmering (ej cementinjekterade foderrör) kan nämnas i denna kategori även om de i princip är inspekterbara om de spänns ned och dras ut. Vid Forsmark 3 upptäcktes brott på spännkablar som orsakades av korrosion från kvarstående vatten från byggtiden [89].

Ytlig tätplåt används generellt för inneslutningar t.ex. i USA. Buckling av tätplåten kan ske även vid normal drift för denna typ av konstruktionslösning, vilket då ger hålrum mellan plåt och betong. Rapporter gällande formändring för tätplåt orsakat av buckling finns för inneslutningar i USA, se [83]. Det finns dock inga korrosionsskador rapporterade i samband med dessa upptäckta hålrum.

3.4.3 Långtidsförluster av spännkraft

Mekanismerna som orsakar långtidsförlust av spännkraft är:

²⁰ Upptäcktes vid oförstörande provning efter att driften av anläggningen avslutats.

- Betongens krympning;
- Betongens krypning;
- Spännkabelns relaxation.

Betongens krympning orsakas av cementpastans sammandragning då vattnet lämnar porssystemet (uttorkning). Krympningens storlek avgörs dels av uttorkningsförhållandena för konstruktionen, men också av volymandelen ballast/cementpasta och av sammansättningen för cementpastan.

Betongens krypning är en tidsberoende deformation som uppstår under kvarstående last. Krypningen delas upp i två delar, en del som beror av betongens uttorkning (sorptionskrypning) och en del som inte beror av uttorkningen (grundkrypning). Även krypningen beror starkt på uttorkningsförhållanden, men också på faktorer som betongens ålder vid pålastning, temperatur, lastnivån, mm.

Spännkabelns relaxation är en tidsberoende lastsänkning som uppstår under kvarstående deformation. Spännstålet kallbearbetning ger både hög hållfasthet och förhållandevis låg relaxation. Relaxationen beror främst av lastnivån (stålspänningen) samt den omgivande temperaturen.

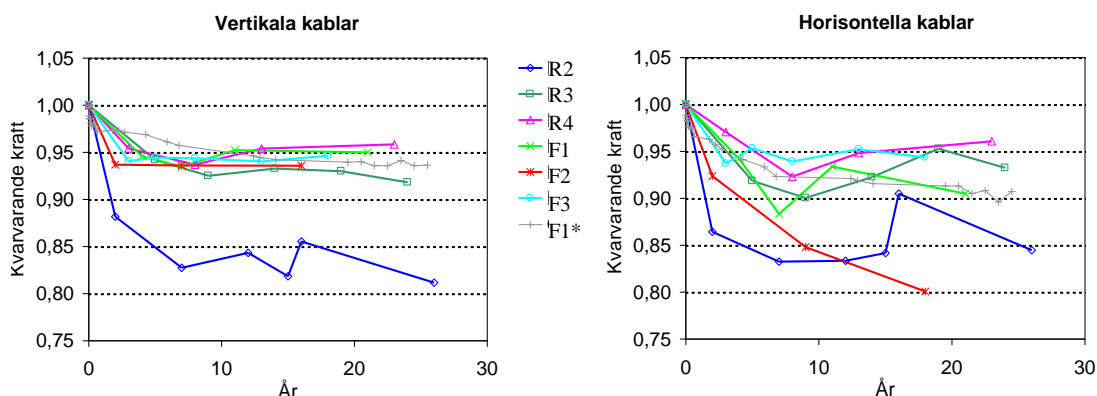
Summan av betongens krympning och krypning samt spännkabelns relaxation utgör den totala långtidsförlusten. Vid den ursprungliga dimensioneringen uppskattades storleken på långtidsförluster genom beräkningsmodeller aktuella vid den tiden. Det är därför bara förluster större än de förväntade som kan anses ge försämrad integritet hos inneslutningen.

Långtidsförlusterna är av komplex natur, där ett stort antal miljö- och materialfaktorer påverkar. Forskningen inom området är omfattande och har resulterat i en mängd rekommendationer och empiriska uttryck avsedda att bedöma dessa mekanismer. Följande faktorer anses ha stor inverkan på spännkraftsförlusterna och vara viktiga att beakta för inneslutningskonstruktioner (se [22]).

- Betongens ålder vid uppspanning av spännkablar. Jämfört med andra typer av spännarmerade konstruktioner (t.ex. broar) är inneslutningar spända sent, vilket generellt ger lägre bidrag av krympning och krypning. Effekterna av ålder vid pålastning ingår i de flesta beräkningsmodeller;
- Långsam uttorkning av inneslutningsväggen, vilket ger en låg krypning och krympning. Inneslutningsväggens yttre bärande del är tjock (kring 1 m) och förseglas på insidan av tätplåten. Den grova konstruktionen tillsammans med den inre förseglingen medför att inneslutningsväggens uttorkning blir mycket långsam. Effekterna av uttorkningsförhållandena (tjocklek och omgivande RF) inkluderas i de flesta beräkningsmodeller för krypning och krympning;
- Omgivande temperatur. Temperaturnivåer kring inneslutningskonstruktioner överstiger normal rumstemperatur. En ökad temperatur ökar både betongens krypning och spännkabelns relaxation. Temperatur inkluderas normalt inte som en parameter i beräkningsmodeller för krypning i betong. För relaxation i spännkablar ingår temperaturen ofta som en parameter vid relaxationstester som beaktas vid dimensioneringen. För inneslutningar är vissa delar, kring t.ex. genomföringar, utsatta för lokalt förhöjd temperatur där också lokalt förhöjd krypning och relaxation kan förväntas uppstå. En bieffekt av höjd temperatur är att luftens RF sänks om luftens fukthalt hålls konstant. Detta ökar uttorkningen och därmed förlusterna från krympning och krypning;

- Relaxationsegenskaper för spännkabel. Vid tiden då inneslutningar i Sverige byggdes användes i regel s.k. lågrelaxerande spännlinor/trådar. Stor skillnad i relaxationsegenskaper kan finnas beroende på vilken typ av spännlinor/trådar som använts. Tidigt byggda inneslutningar i forna Sovjetunionen har haft problem med stora relaxationsförluster (se [43]). Förklaring till dessa stora förluster kan vara hög temperatur och/eller dåliga relaxationsegenskaper för spännstålet.

För de inneslutningar där foderrören inte är cementinjekterade²¹ har inspektioner av spännkablar utförts regelbundet. Kabelinspektioner i Sverige utförs enligt den amerikanska guiden NRC, Regulatory Guide 1.35 [127]. I [22] presenteras resultat från samtliga utförda spännkabelinspektioner samt från ett antal fasta givare vid inneslutningen vid Forsmark 1, se Figur 3.18 nedan.



*Fasta givare

Not, Variationskoefficienten (COV) för inspektionstillfällena varierar mellan 1,5 % och 8 %.

Figur 3.18: Uppmätta spännkabelkrafter vid svenska inneslutningar relativt initial kraft. Värdena motsvarar medelvärde vid respektive inspektion. (från [22]).

De uppmätta kraftförlusterna för svenska inneslutningar visar att spännkraftsförlusten ligger kring 5 % av ursprungskraften för vertikalkablar samt mellan 5 och 10 % för horisontalkablar (se Figur 3.18). Detta kan anses lågt i jämförelse med de ursprungligt beräknade förlusterna²². De fasta givarna vid Forsmark 1, som finns monterade på 8 st. vertikalkablar och 5 st. horisontalkablar, visar på samma tendenser som kabelinspektionerna generellt gör. Förlusterna för de vertikala kablarna är generellt mindre än för de horisontella, vilket förklaras med att betongtryckspänningarna är större horisontellt än vertikalt (ger lägre krypning). Förlusterna för två av inneslutningarna (Forsmark 2 och Ringhals 2) skiljer sig från de övriga (se Figur 3.18). Orsaker till detta diskuteras i [22] och det konstateras att de större förluster för Forsmark 2 (endast horisontella kablar) troligen beror på omfördelning av kraft längs kablarna och de större förlusterna för Ringhals 2 (både vertikala och horisontella kablar) möjligen kan orsakas av tidigt förhöjd värmepåverkan pga. tidig driftstart.

²¹ Gäller samtliga inneslutningar på Forsmarks kärnkraftverk samt Ringhals 2 till 4.

²² Ursprungligen beräknade förluster varierar beroende på kabeltyp och inneslutning, men kan anses ligga mellan 15 och 25 %.

Uppmätta förluster som överskrider de ursprungligen förväntade finns exempelvis för ett antal inneslutningar i USA, där den dominerande orsaken anses vara förhöjd relaxation pga. högre temperaturer än förväntat [83].

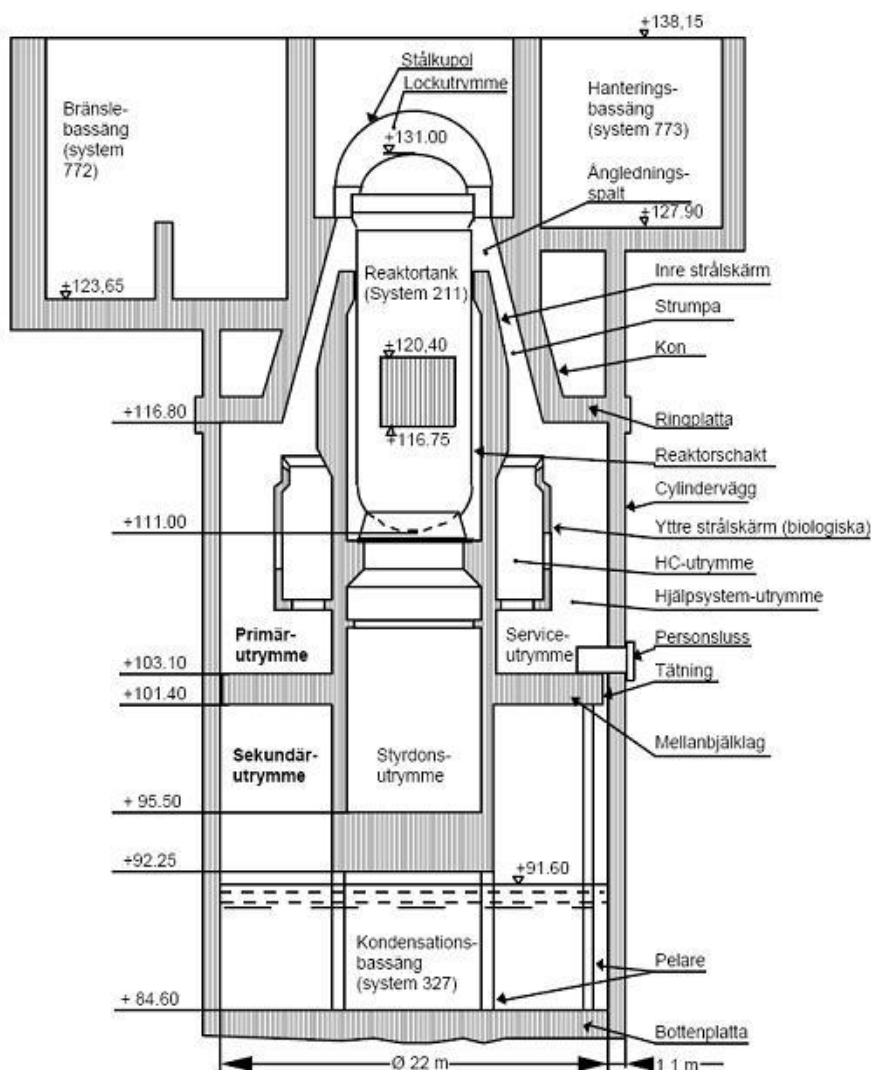
3.5 Exempel på inneslutningskonstruktioner

I detta avsnitt visas översiktligt utformningen för BWR- och PWR-inneslutningar (avsnitt 3.5.1 respektive 3.5.2). Översikten görs för en befintlig svensk och en amerikansk inneslutning samt för inneslutningar som ingår i anläggningskoncept som marknadsförs idag. Fullständigt underlag för utformningen finns ej tillgänglig för de presenterade anläggningarna.

3.5.1 BWR

3.5.1.1 Svensk befintlig anläggning

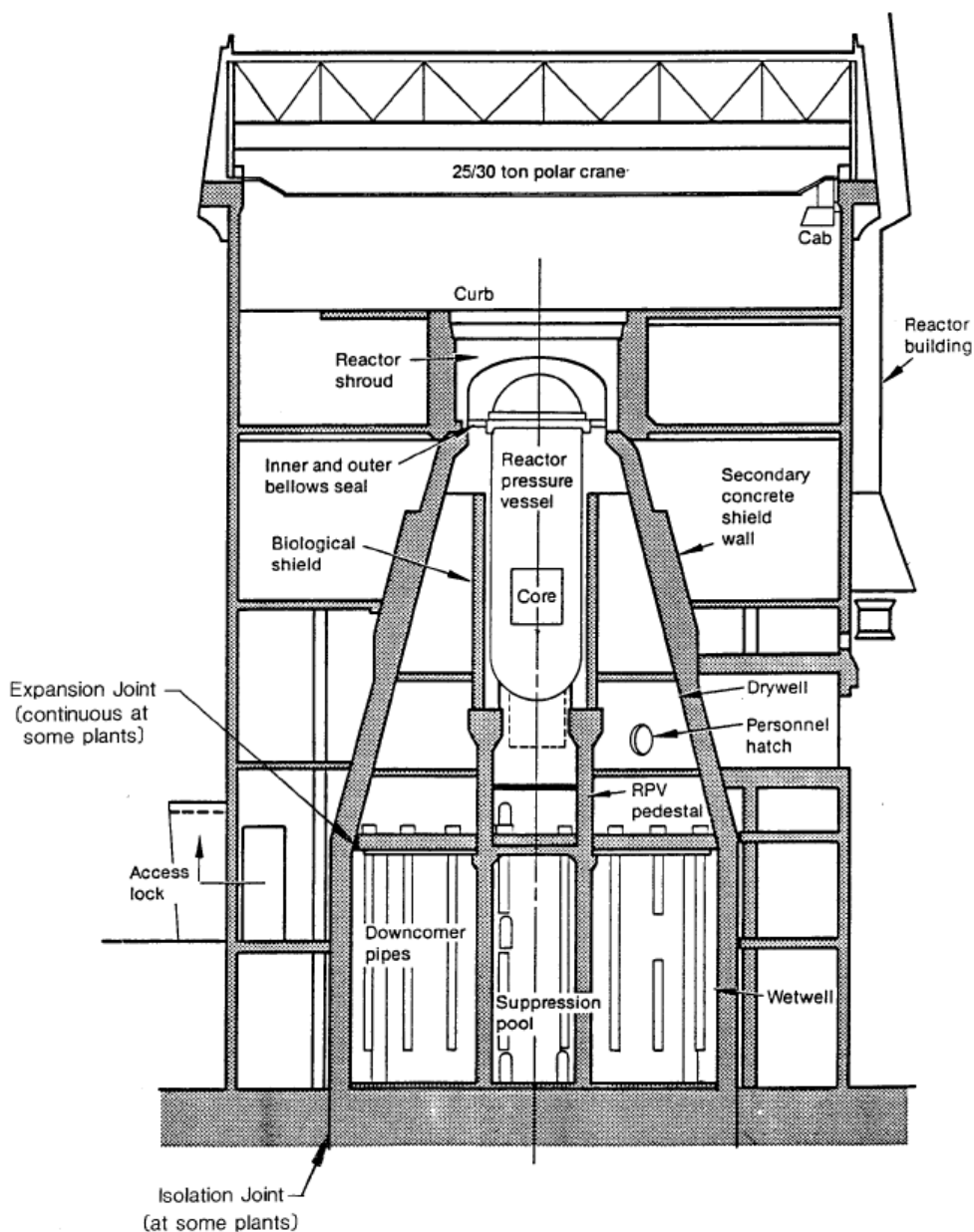
Figur 3.19 visar en vertikalsektion genom inneslutningen för Ringhals 1 som är en av de äldsta svenska anläggningarna (driftsatt 1976). Inneslutningskärlet består av en tjock bottenplatta, cylindervägg, ringplatta, kon (övre cylinder) och en stålkupol överst (se även avsnitt 3.2 och 3.3). Inneslutningens cylindervägg är förspänd i två riktningar och försedd med tätplåt. Konstruktionen för hanterings- och bränslebassängerna är integrerade med inneslutningskärlet. Mellanbjälklaget bärs av pelare i den yttre randen. Mer ingående beskrivning av inneslutningskonstruktionen för denna anläggning ges i [89] och [92].



Figur 3.19: Principskiss av inneslutningen vid Ringhals 1 [89].

3.5.1.2 Amerikansk befintlig anläggning

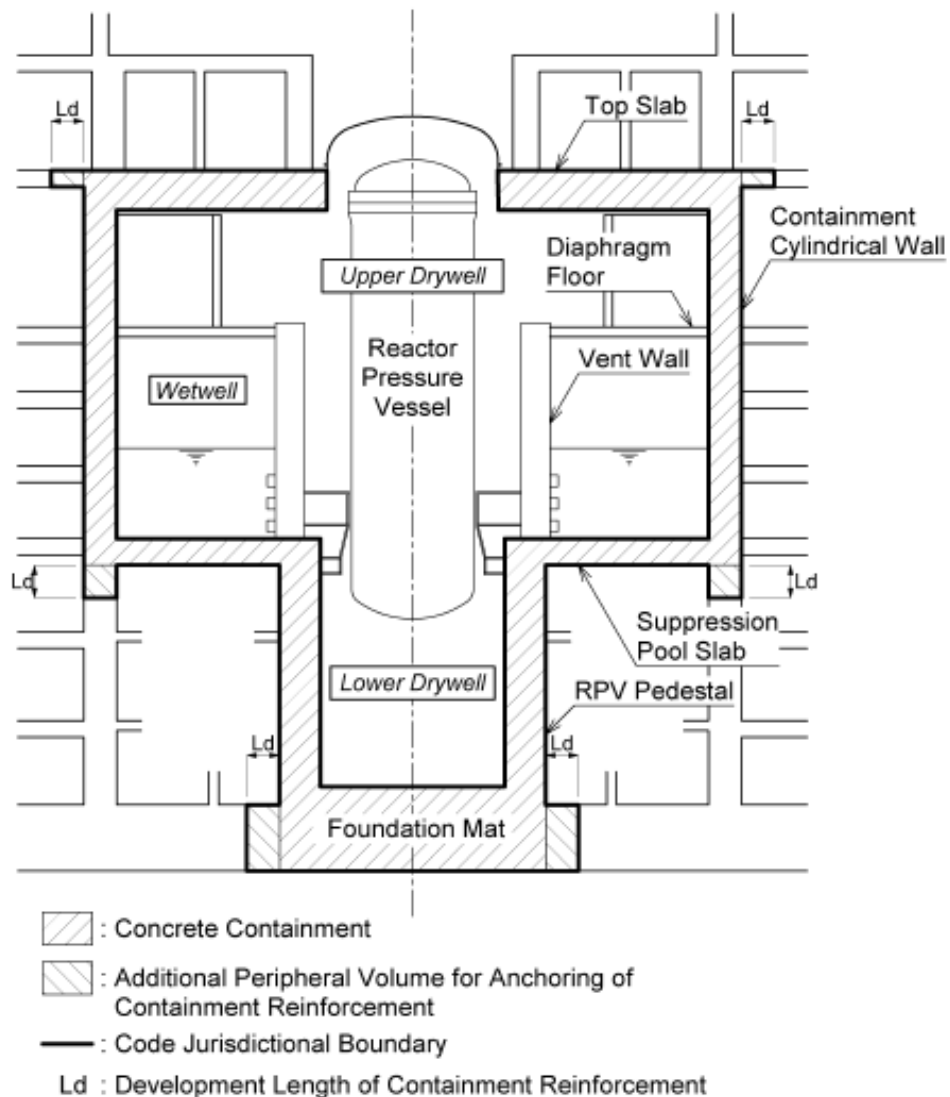
Figur 3.20 visar en typisk BWR-inneslutning för en Mark II reaktor i USA. Inneslutningskärlet består av en tjock bottenplatta, cylindervägg, kon (övre cylinder) och en stålkupol överst. Denna typ av inneslutningen kan vara spännarmerad eller endast slakarmerad och är försedd med tätplåt på insidan av inneslutningskärlet. Mellanbjälklaget bärs av pelare i den yttre randen. Mer ingående beskrivning av denna typ av inneslutningskonstruktion ges t.ex. i [39].



Figur 3.20: Principskiss av inneslutningen för en typisk Mark II [39].

3.5.1.3 Ny anläggning

Figur 3.21 visar en principskiss över inneslutning för ESBWR som marknadsförs av GE Hitachi. Utformningen skiljer sig mot tidigare byggda inneslutningar (se avsnitt 3.5.1.1 och 3.5.1.2) Exempelvis är kondensationsbassängen placerad högre upp i inneslutningen, vilket medför att mellanbjälklaget ersätts med en cylindrisk vägg ("vent wall"). Inneslutningskärlet består av en tjock bottenplatta ("foundation mat"), undre och övre cylindervägg ("RPV pedestal/cylindrical wall"), undre och övre bjälklag ("suppression pool slab/top slab") samt en inneslutningskupol överst. Denna inneslutning är slakarmerad och integrerad reaktorbyggnad och inre struktur. Inneslutningskärlet är försett med tätplåt på insidan.

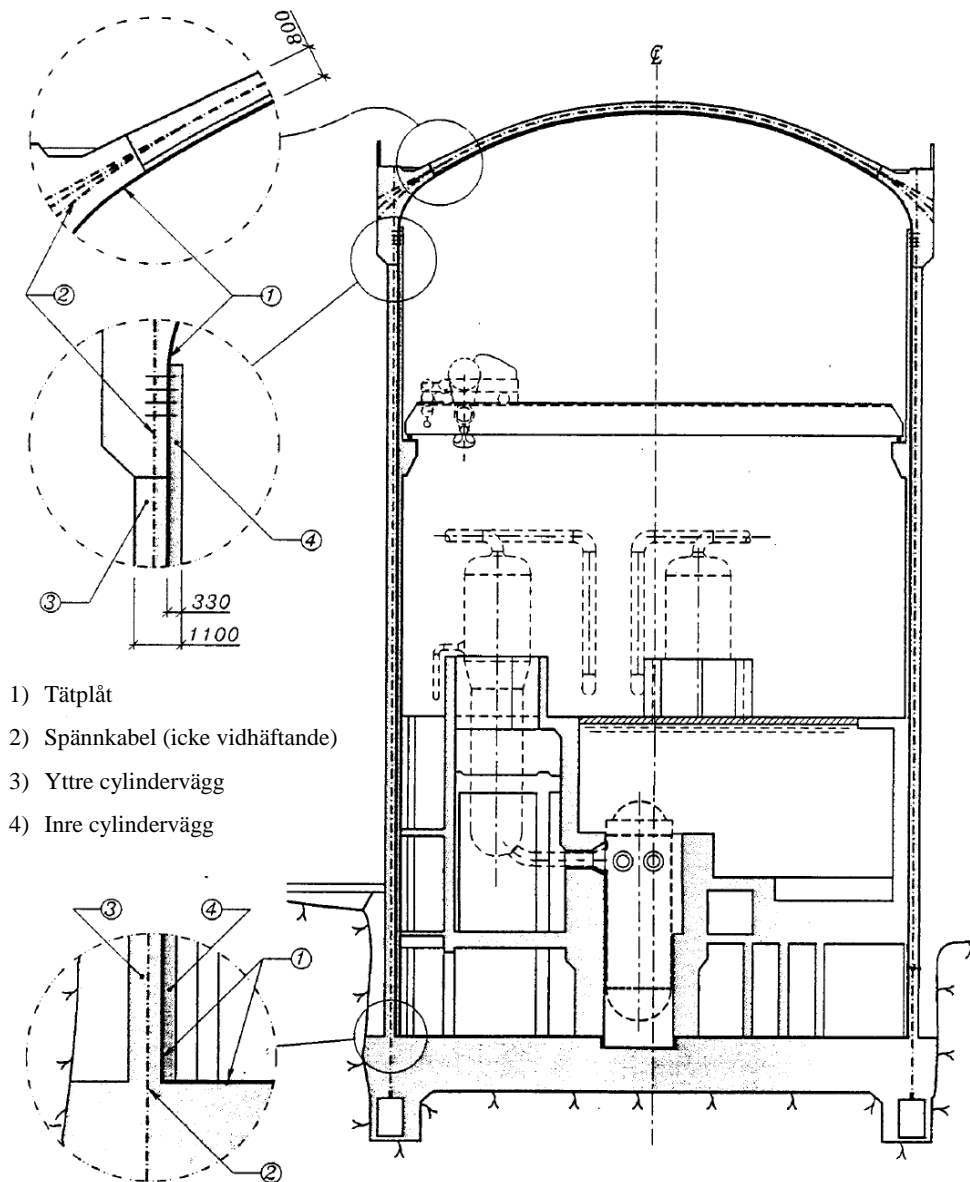


Figur 3.21: Principskiss av inneslutningen för ESBWR [50].

3.5.2 PWR

3.5.2.1 Svensk befintlig anläggning

Figur 3.22 visar en sektion genom inneslutningen för Ringhals 3 som driftsattes 1981²³. Inneslutningskäret består av en tjock bottenplatta, cylindervägg, och en dom överst (se även avsnitt 3.2 och 3.3). Inneslutningens cylindervägg och dom är förspänd i två riktningar och försedd med tätplåt. Mer ingående beskrivning av inneslutningskonstruktionen för denna anläggning ges i [89] och [92].



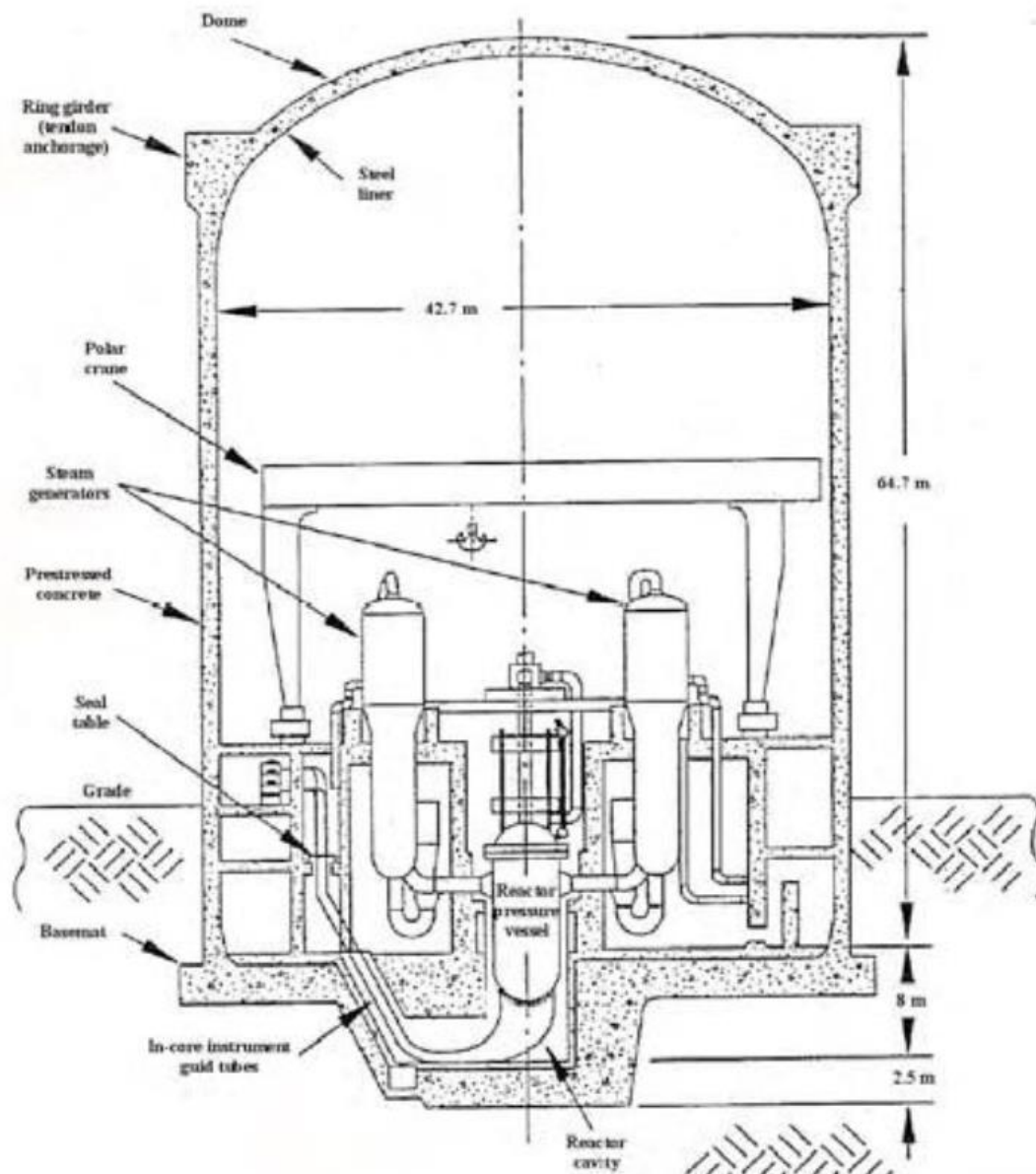
- 1) Tätplåt
- 2) Spännkabel (icke vidhäftande)
- 3) Yttre cylindervägg
- 4) Inre cylindervägg

Figur 3.22: Principskiss av inneslutningen vid Ringhals 3 [89].

²³ Ringhals 3 är i princip identisk med Ringhals 4 som driftsattes två år senare.

3.5.2.2 Amerikansk befintlig anläggning

Figur 3.23 visar en sektion genom en typisk amerikansk PWR-inneslutning. Inneslutningskärlet består av en tjock bottenplatta, cylindervägg, och en dom överst. Inneslutningens cylindervägg och dom är förspänd i två riktningar och försedd med tätplåt på insidan av inneslutningskärlet. Mer ingående beskrivning av denna typ av inneslutningskonstruktion²⁴ ges t.ex. i [128].

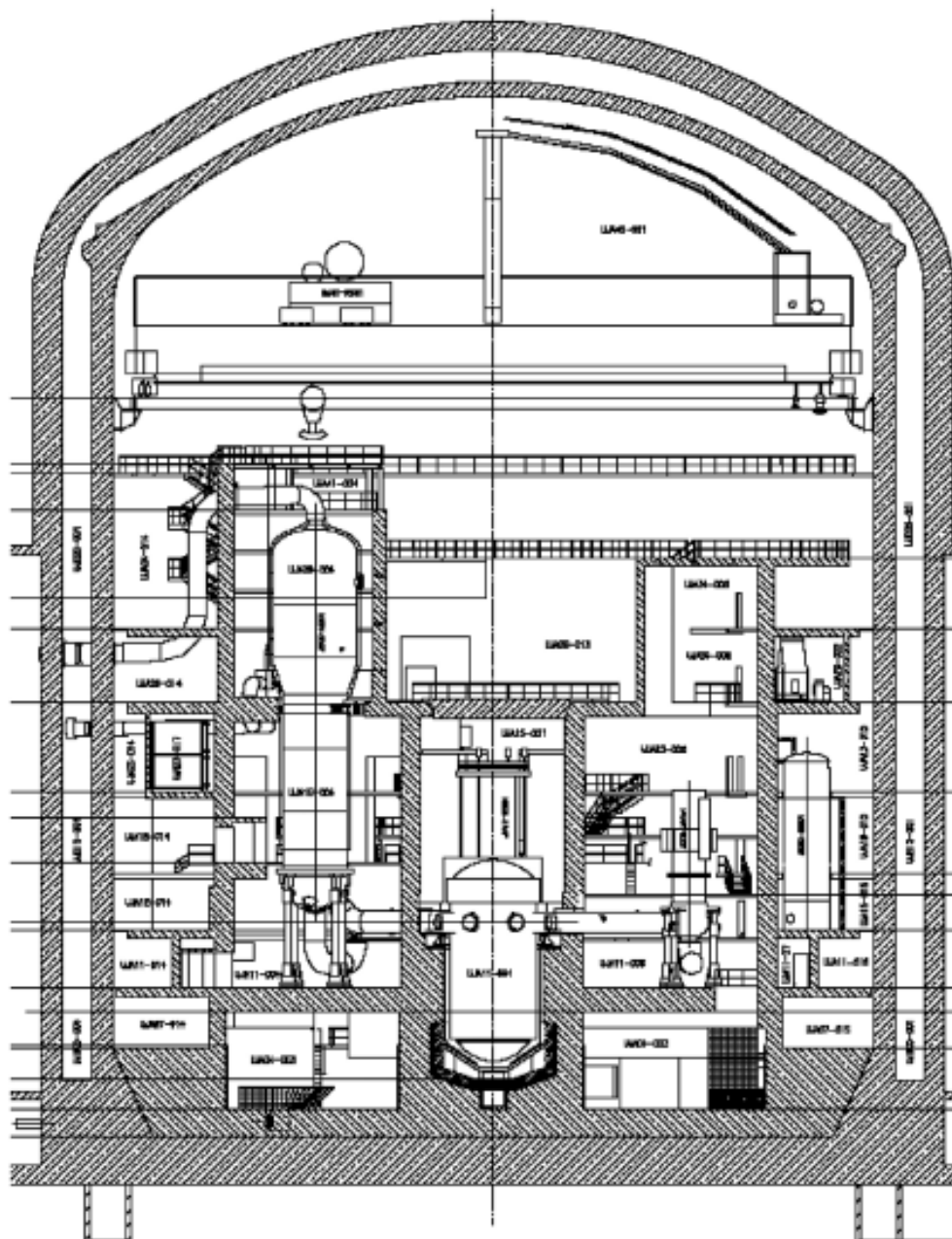


Figur 3.23: Principskiss av en typisk PWR-inneslutning [129].

²⁴ Så kallad "large dry containment".

3.5.2.3 Ny anläggning

Figur 3.24 visar en principskiss över inneslutning för EPR som marknadsförs av AREVA. Inneslutningen består av en tjock bottenplatta, cylindervägg, och en dom överst. Cylindervägg och dom består av dubbla skal. Det yttre skalet är slakarmererat och har som huvuduppgift att skydda anläggningen mot yttre påverkan (t.ex. påflygning). Det inre skalet, som utgör täthetsbarriär, är förspänt i två riktningar och försedd med tätplåt på insidan. Mer ingående beskrivning av inneslutningen för EPR ges i [23].

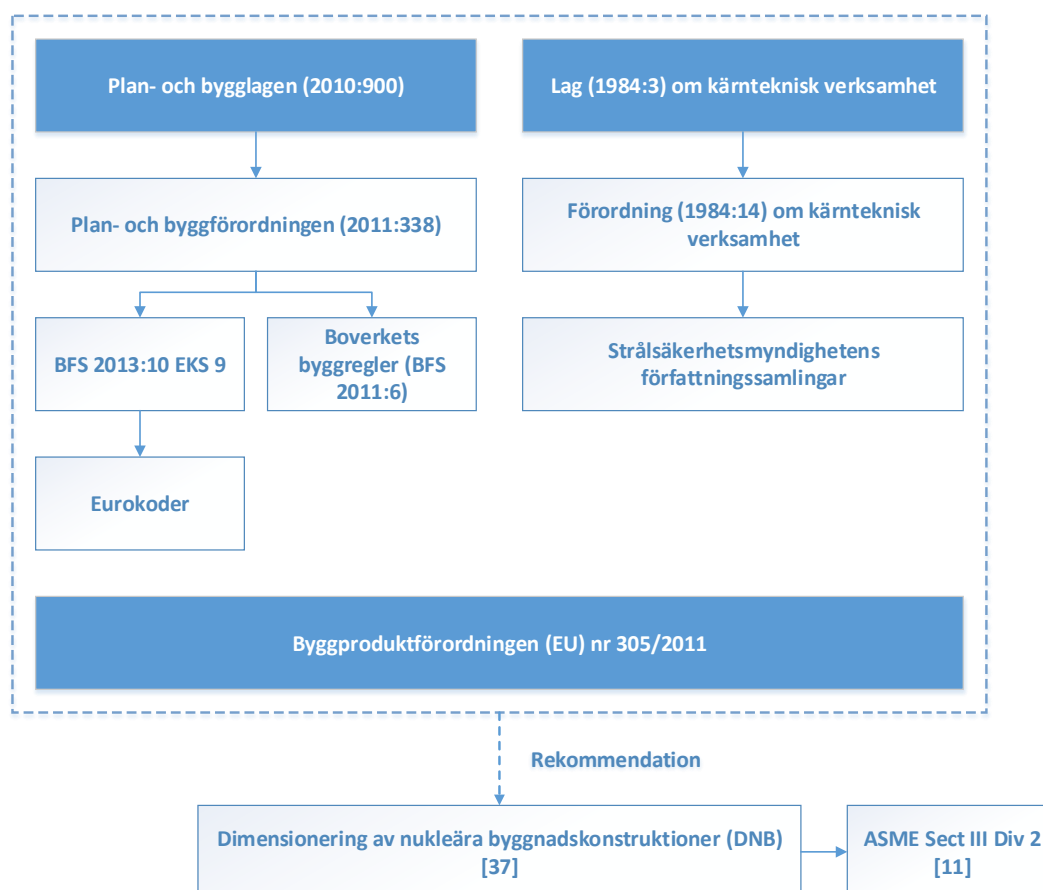


Figur 3.24: Principskiss av EPR-inneslutningen [23].

4. Dimensionering

4.1 Dimensioneringsregler

Svenska myndigheters regler och föreskrifter för inneslutningar och andra byggnadskonstruktioner i kärntekniska anläggningar utgörs dels av de regelverk som gäller för konventionella byggnadskonstruktioner, dels av de regelverk som gäller för kärnteknisk verksamhet. Strålsäkerhetsmyndigheten har i en utredning [102] illustrerat detta på ett tydligt sätt. I samma SSM-utredning ges rekommendationen att anvisningarna i DNB [63] bör användas som grund vid såväl dimensionering av nya som vid verifiering av befintliga betongkonstruktioner. DNB [63] hänvisar i sin tur vad gäller inneslutningar till ASME Sec III Div 2 [18]. En sammanfattning ges i Figur 4.1. Nedan behandlas kortfattat detaljerade dimensioneringsregler för reaktorinneslutningar av betong samtidigt som de dimensioneringsregler som redovisas i Figur 4.1 introduceras.



Figur 4.1: Svenska myndigheters regler och föreskrifter för inneslutningar och andra byggnadskonstruktioner i kärntekniska anläggningar, samt SSMs rekommendation avseende dimensioneringsregler (från [102]).

Dimensioneringsregler för reaktorinneslutningar av betong har av författarna till föreliggande rapport redovisats i tidigare utgivna SSM-rapporter. En övergripande

genomgång redovisas i rapporten SSM 2010:37 "Utvärdering av regler och normer för betongkonstruktioner i svenska kärnkraftsanläggningar" [100] medan detaljerade dimensioneringsanvisningar ges i SSM 2014:06 "Dimensionering av nukleära byggnadskonstruktioner (DNB)" [63]. I föreliggande rapport redovisas därför endast en kortfattad översyn av dimensioneringsregler för inneslutningar av betong samt en sammanfattning av de grundläggande dimensioneringsprinciperna för DNB [63].

Det ledande internationella regelverket för dimensionering av reaktorinneslutningar av betong är ASME Sec III Div 2 "Code for Concrete Containments" [18]. Antingen används det som direkt referens eller så har hela eller delar av regelverket inarbetats i andra dokument eller så används ASME-normen som referens mot vilken andra föreslagna regelverk jämförs. ASME-normen används i olika skeden vid ett antal nybyggnadsprojekt. I Europa har ASME-normen tillämpats i exempelvis Finland, Storbritannien, Spanien, Slovenien och Sverige, i Asien i Sydkorea, Japan och Taiwan och i Nordamerika i USA. Den uppsättning av regelverk som tillämpats vid dimensioneringen av de svenska kärnkraftverken är unika för varje block och skiljer sig från varandra. För vissa anläggningar, men ej för alla, har delar av ASME-normen tillämpats vid den ursprungliga dimensioneringen och vid därefter följande verifieringar, moderniseringsprojekt och effekthöjningar.

I Europa kan specifikt nämnas det anläggningsspecifika regelverket ETC-C [46] som är gällande för säkerhetsrelaterade byggnadskonstruktioner vid AREVAs anläggningstyp "European Pressurized Reactor" (EPR). ETC-C [46] baseras på Eurokoderna. Detta regelverk behandlar bland annat EPRs spännarmerade reaktorinneslutning. ETC-C används för EPR-anläggningar i Frankrike och i Storbritannien (då tillsammans med en mycket omfattande "UK Companion Guide"). För närvarande pågår ett arbete som bedrivs av AFCEN²⁵ att baserat på ETC-C [46] ta fram ett mer generellt gällande regelverk som då bland annat behandlar spännarmerade inneslutningar. Detta dokument har titeln RCC-CW och planeras att ges ut under 2015. Inom CEN²⁶ har nyligen en tre-årig workshop startats med syftet att ge rekommendationer hur ETC-C/RCC-CW på lite längre sikt skulle kunna utvecklas till att eventuellt bli ett regelverk att användas mer generellt i Europa, oberoende av anläggningstyp.

Även i vissa andra länder finns dimensioneringsregler för reaktorinneslutningar upprättade, till exempel kan nämnas Kanada som har nya uppdaterade regler [33] dock gällande endast för CANDU²⁷-reaktorer som nyttjas i Kanada samt i andra länder med CANDU-reaktorer och Tyskland där den tidigare äldre pre-standarderna nyligen är utgiven som en gällande standard [34].

Generellt för byggnadskonstruktioner i Sverige gäller Eurokoderna. Dessa är emellertid inte formellt gällande för speciella anläggningar såsom till exempel kärnkraftverk. I DNB [63] har ändringar och tillägg till Eurokoderna införts så att dessa kan tillämpas även för denna typ av anläggningar. Vad gäller reaktorinneslutningar har i DNB [63] införts kravet att i tillägg till Eurokoderna ska även ASME Sec III Div 2 [18] visas vara uppfylld med vissa justeringar och lättnader för anpassning till svenska förhållanden. Till exempel behöver, enligt svensk praxis, lasteffekterna av

²⁵ Association Française pour les règles de Conception, de construction et de surveillance en exploitation des matériels des Chaudières Electro Nucléaires.

²⁶ European Committee for Standardization.

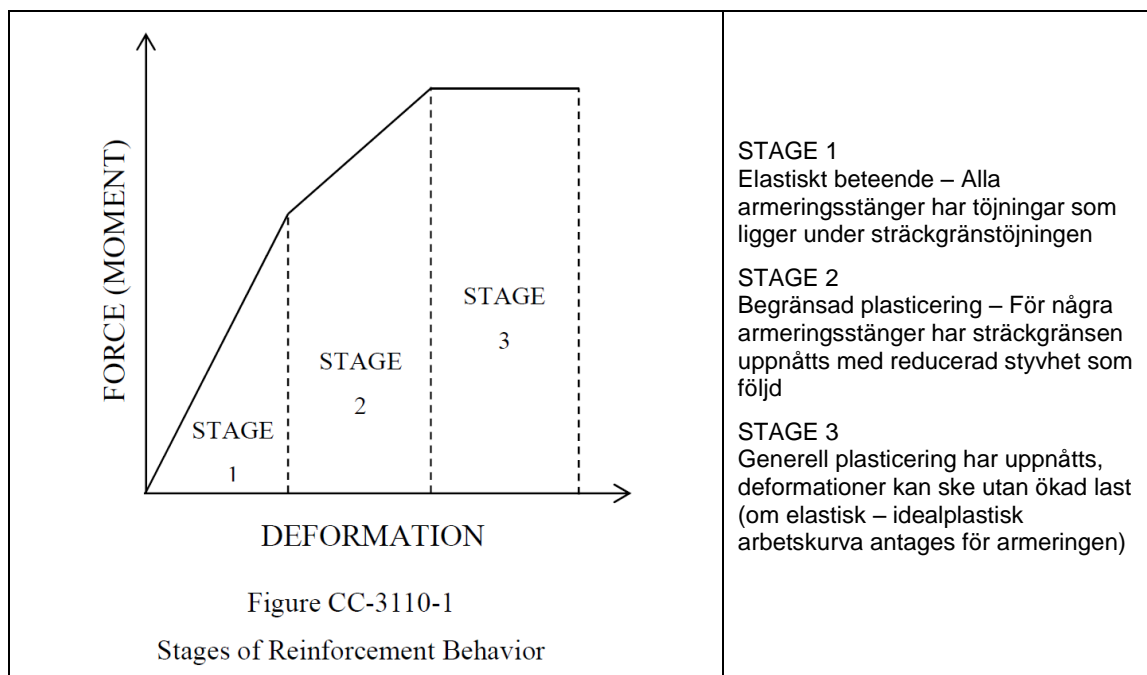
²⁷ Canada Deuterium Uranium.

dimensionerande jordbävning inte kombineras med tryck- och temperaturlaster som uppkommer vid en så kallad "loss-of-coolant-accident" (LOCA) händelse²⁸. ASME Sec III Div 2 [18] använder tillåtna spänningar som utvärderingsmetod till skillnad från Eurokoderna som baseras på partialkoefficientmetoden med utvärdering i så kallade gränstillstånd. Därför har hållfasthetsdimensioneringen enligt ASME Sec III Div 2 [18] inarbetats i DNB [63] på ett sådant sätt att i princip två dimensioneringar genomförs, en för Eurokoderna och en för ASME-normen. Därefter väljs den mest konservativa konstruktionslösningen. Vad gäller täthetskrav täcks dessa ej in av Eurokoderna utan dimensioneringen genomförs istället enligt ASME-normen.

Den grundläggande dimensioneringsfilosofin i ASME Sec III Div 2 [18] för att erhålla en tillräcklig säkerhetsmarginal och robusthet är att strukturanalyserna ska vara elastiska för bestämning av lasteffekter såsom exempelvis snittkrafter, deformationer och stabilitet samtidigt som endast begränsad plasticering vid tvärsnittsdimensioneringen tillåts, se nedan.

Vid tvärsnittsdimensionering enligt ASME Sec III Div 2 [18] ska inneslutningen för brukslaster uppvisa ett elastiskt beteende ("stage 1" i Figur 4.2) och för konstruktionsstyrande händelser ska generell plasticering av dragna tvärsnitt undvikas ("stage 2" i Figur 4.2). Detta inkluderar de trycknivåer som kan uppstå vid en LOCA-händelse multiplicerad med lastfaktorn 1.5. Vidare säkerställs inneslutningsfunktionen via duktila materialval och duktila konstruktionslösningar och detaljer så att en plastisk respons ("stage 3" i Figur 4.2) kan hantera en eventuell dynamisk lastnivå som ligger utanför (över) den dimensionerande lastnivån. För inneslutningens täthet föreskrivs att den ska säkerställas via en tätplåt monterad på inneslutningens insida. För denna har konservativt valda mekaniska acceptanskriterier uppställts i ASME [18] så att en tillräcklig säkerhetsmarginal och robusthet mot överskridande av de maximalt tillåtna läckagenivåerna erhålls.

²⁸ Någon typ av LOCA-händelse är normalt den avgörande konstruktionsstyrande händelsen för reaktorinneslutningen vad gäller inneslutningens täthetsfunktion.



Figur från [62]

Beskrivning

Figur 4.2: Inneslutningens respons.

Slutligen ska i detta avsnitt nämnas något om gränsdragningen mellan olika regelverks giltighet. Här finns för reaktorinneslutningen två viktiga gränsdragningar:

- Gränsdragningen mellan olika byggnadskonstruktioner för vilka olika dimensioneringsregler är gällande;
- Gränsdragningen mellan byggnadskonstruktioner och mekaniska komponenter.

Det första fallet avser vilka delar av byggnadskonstruktionen som vid dimensioneringen ska klassificeras som tillhörande inneslutningskonstruktionen eller ej. Anläggningens utformning och speciellt placeringen av konstruktiva dilatationsfogar styr på vilket sätt och i vilken omfattning som olika byggnadsdelar samverkar med varandra. I detta sammanhang är vi intresserade av i vilken omfattning som omkringliggande byggnader eller strukturen inuti inneslutningen via samverkan utgör stöd för inneslutningen på ett sådant sätt att om de ej fanns där skulle påkänningarna i inneslutningen vid en konstruktionsstyrande händelse väsentligen öka. Här finns alla typer av varianter:

- Inneslutningen är via dilatationsfogar både på insidan och utsidan, inklusive fogar i bottenplattan, helt frikopplad;
- Som ovan, men bottenplattan är sammangjuten med bottenplattan för omkringliggande byggnader (se Figur 4.3a);
- Omkringliggande byggnader och/eller den inre strukturen inuti inneslutningen är helt integrerad med inneslutningskärlet (se Figur 4.3b).

I de fall gränsdragningen mellan inneslutning och andra byggnadskonstruktioner ej är helt uppenbar, som för det första fallet ovan, är detta något som måste utredas och avgöras från fall till fall. Normalt faller denna gränsdragning på anläggningsägaren. I vissa fall kan omkringliggande byggnadskonstruktioner ha en relativt stor inverkan på inneslutningens respons. Ett exempel ses i Figur 4.3b där mycket styva

bassängväggar passerar ovan inneslutningens takkonstruktion som är hopgjuten med dessa. Väggarna bidrar till inneslutningstakets totala bärförmåga och motverkar att större deformationer hos taket kan uppstå. I avsnitt 2.3 i DNB [63] ges följande rekommendation vad gäller gränsdragning för hur konstruktionsberäkningarna kan genomföras (men ej nödvändigtvis vad som gäller för gränsdragningen för vilka utförandekrav som ställs i byggskedet):

För byggnad som samverkar med annan byggnadsdel för vilken mindre konservativa dimensioneringsregler är gällande, och där denna byggnadsdel signifikant bidrar till byggnadens möjlighet att uppfylla gällande krav, rekommenderas att dimensioneringen genomförs enligt det mest konservativa regelverket.

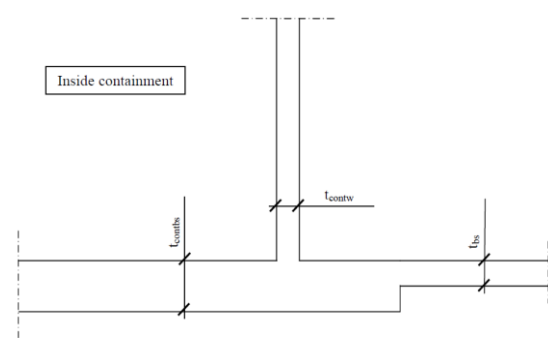
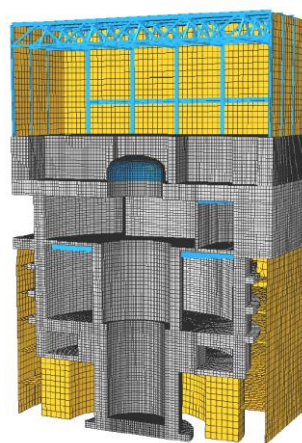


Figure 2: Main geometry, detail of the common baseslab at the connection to the containment cylindrical wall.



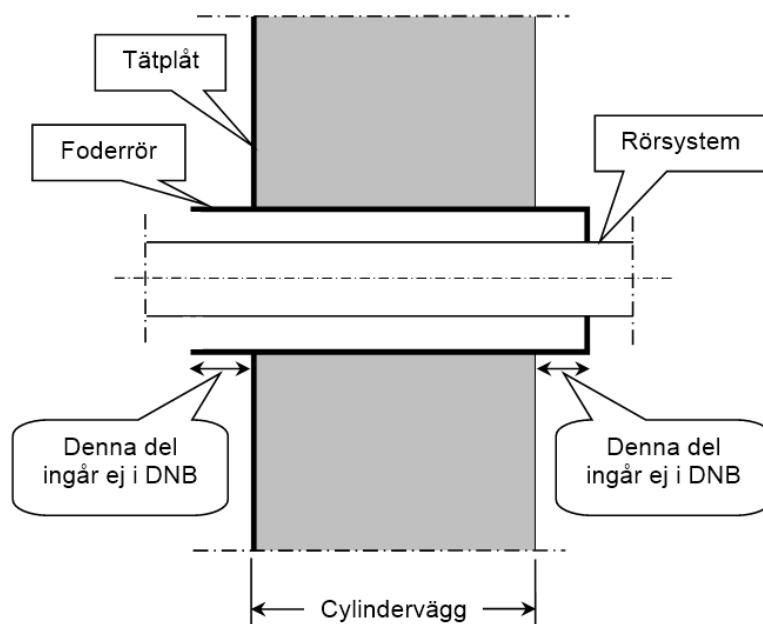
a) Omkringliggande bottenplatta, från [41]

b) Omkringliggande byggnader och den inre strukturen inuti inneslutningen, från [41]

Figur 4.3: Exempel på samverkan mellan inneslutningen och andra byggnadsdelar.

Vad gäller gränsdragningen mellan de delar av reaktorinneslutningen som ska klassificeras som byggnadskonstruktioner och de som ska klassificeras som mekaniska komponenter (tryckkärl av stål), redovisar vi här den gränsdragning som anges i ASME Sec III Div 2 [18] (se till exempel CC-3830). De stålkomponenter (till exempel tätplåt samt konstruktioner vid öppningar, slussar och genomföringar) som inte understöts av betong klassificeras som tryckkärl av stål, dvs. de utgör samtidigt täthetsgräns och tryckupptagande konstruktion. Sådana konstruktionsdelar ska enligt ASME Sec III Div 2 [18] dimensioneras enligt ASME Sec III Div 1 [92]. ASME-normen anges också som en tillåten norm i SSMs allmänna råd till sina författningssamlingar om kärntekniska anläggningar. Den indelning som anges ovan har också införts i DNB [63]. Man ska i sammanhanget notera att detta kan medföra att vad som till synes verkar vara en typ av komponent kan komma att behöva dimensioneras enligt två olika regelverk. Som exempel kan ges foderrör vid rörgenomföringar: Den del som är ingjuten i cylinderväggens betongkonstruktion är understödd av betong och då gäller DNB [63] medan den del av foderröret som sticker ut i omgivande utrymmen hamnar under ASME Sec III Div 1 [92] så länge den kan bli trycksatt vid en konstruktionsstyrande händelse (se Figur 4.4).

I föreliggande rapport behandlas dimensionering av byggnadskonstruktioner.



Den ingjutna delen av foderröret dimensioneras enligt DNB [63] medan den del som sticker ut från cylinderväggen, och som blir trycksatt vid en olyckshändelse, dimensioneras enligt ASME Sec III Div 1 [19]

Figur 4.4: Exempel på gränsdragning mellan normer.

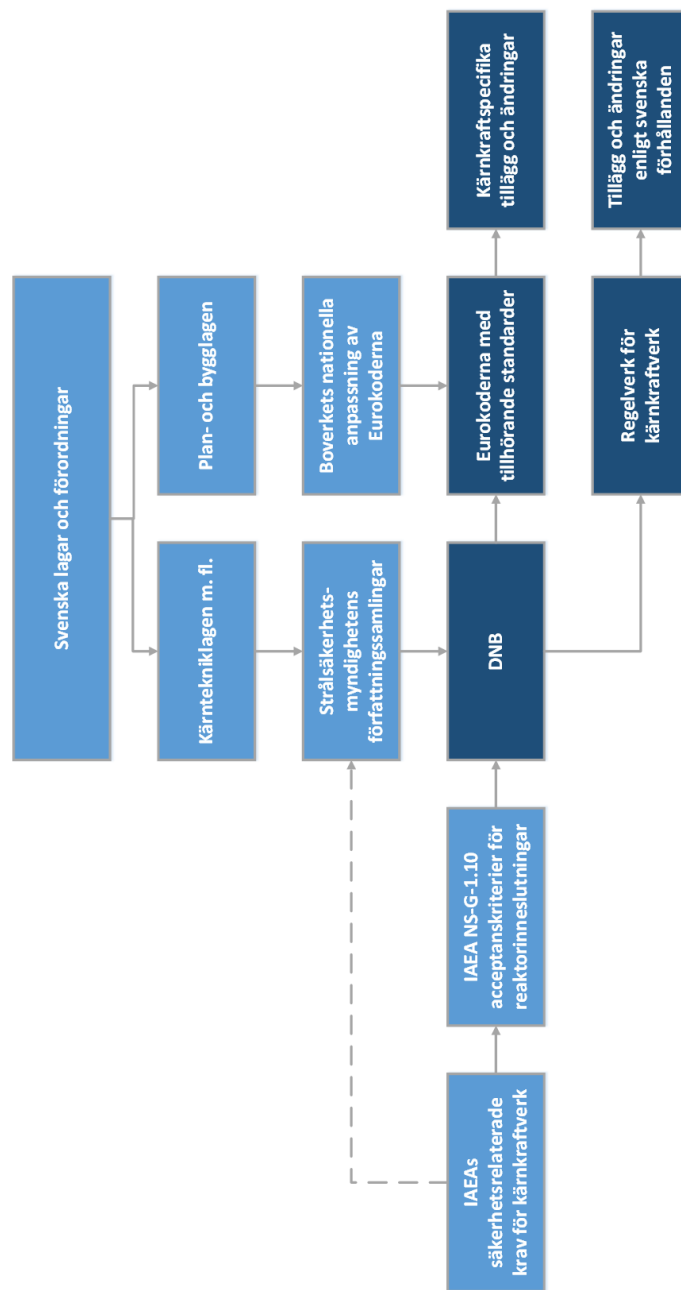
4.2 Grundläggande dimensioneringsprinciper i DNB

I en bakgrundsrapport [30] redovisas de grundläggande dimensioneringsprinciperna för DNB [63] i detalj. I detta avsnitt ges en sammanfattning.

Hur DNB [63] förhåller sig till svenska lagar och förordningar, Strålsäkerhetsmyndighetens författningssamlingar, Boverkets anvisningar, IAEAs säkerhetsrelaterade krav för kärnkraftverk, regelverk för såväl konventionella byggnadskonstruktioner som kärnkraftverk samt specifika svenska förhållanden redovisas schematiskt i Figur 4.5. Mer detaljerad information ges i följande avsnitt.

DNB [63] följer de grundläggande krav som ställs av Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) att man vid dimensionering såväl som vid drift av ett kärnkraftverk ska beakta möjliga driftsituationer och händelser. Härvid avses allt från olika driftlägen och drifttillstånd vid normal drift till mycket osannolika händelser. De olika driftsituationer respektive olika inledande händelser som kan inträffa har dock helt olika sannolikhet för inträffande. För att erhålla en balanserad riskprofil delas därför olika driftsituationer, händelser och händelsesekvenser vid kärnkraftverk in i olika klasser, s.k. händelseklasser, där varje klass innefattar händelser inom ett givet frekvensintervall. Den händelseklassindelning som tillämpas i DNB följer vad som anges i SSMFS 2008:17 [99] och som återges i Tabell 4.1.

Indelningen av händelser i händelseklasser har en direkt inverkan på vilka krav som ställs på byggnadskonstruktionerna för respektive händelse. Ju mer sannolik en händelse är desto strängare acceptanskriterier tillämpas. Vad gäller dimensionering av byggnadskonstruktionerna är de säkerhetsrelaterade kraven normalt kopplade till antingen bibehållen strukturell integritet eller täthet.



Figur 4.5: Grundläggande dimensioneringsprinciper för DNB.

I IAEA [53] anges för strukturell integritet respektive täthet övergripande acceptanskriterier för reaktorinneslutningar enligt följande:

- Strukturell integritet:

- Nivå I: Elastiskt beteende
- Nivå II: Små permanenta deformationer
- Nivå III: Större permanenta deformationer

- Täthet:
 - Nivå I: Tät konstruktion
 - Nivå II: Begränsad ökning av läckagehastigheten
 - Nivå III: Stor eller mycket stor ökning av läckagehastigheten

I IAEA [53] görs alltså en koppling mellan de övergripande säkerhetskraven för kärnkraftsanläggningar och de acceptanskriterier som gäller för respektive lastkombination för reaktorinneslutningen.

Vad gäller strukturell integritet så kan för spännarmerade inneslutningskonstruktioner av betong de tre nivåerna exemplifieras enligt nedan:

- Nivå I: Väggen har ett elastiskt beteende med endast begränsad lokal uppsprickning. Detta acceptanskriterie tillämpas vanligtvis för händelser vid normal drift, driftstörning och provning samt för dimensionerande inre övertryck.
- Nivå II: Väggen beter sig i huvudsak elastiskt. Spännkraften ska tillse att betongen förblir tryckt i ostörda områden. Detta acceptanskriterie tillämpas vanligtvis för konstruktionsstyrande händelser förutom dimensionerande inre övertryck. Under vissa förutsättningar kan denna nivå emellertid tillämpas även för det dimensionerande inre övertrycket.
- Nivå III: Kvarstående sprickor vid avlastning efter ett olycksscenario kan vara acceptabelt. Detta acceptanskriterie tillämpas vanligtvis för händelser utanför anläggningens konstruktionsbas, i de fall strukturell integritet måste påvisas.

För täthet kan de tre nivåerna beskrivas enligt nedan:

- Nivå I: Läckaget från inneslutningen ska visas vara under fastställda dimensionerande värden. Denna nivå tillämpas för alla händelser ingående i anläggningens konstruktionsbas.
- Nivå II: Här tillåts att läckagenivån kan överstiga dimensionerande värden men läckaget ska vara predikterbart samt beaktat vid dimensioneringen av anläggningen. För mycket osannolika händelser kan nivå II tillämpas eftersom läckagenivån är predikterbar och man därför vid dimensioneringen av anläggningen kan tillförsäkra att icke acceptabel radiologisk omgivningspåverkan ej uppstår.
- Nivå III: Denna nivå tillämpas ej eftersom okontrollerbart läckage kan uppstå.

För reaktorinneslutningar av betong tillförsäkras säkerhetsrelaterad täthet med hjälp av en tätplåt av stål. De övergripande acceptanskriterierna för täthet översätts till maximalt tillåtna spännings- eller töjningsnivåer i tätplåten. För att undvika större töjningskoncentrationer i tätplåten bör även sprickvidden hos sprickor i den bakomliggande betongkonstruktionen begränsas.

Dimensioneringsreglerna i DNB [63] är i linje med ovan redovisade övergripande acceptanskriterier för strukturell integritet och täthet enligt IAEA [53] och SSM. I tabell 2.2 sammanfattas hur de övergripande acceptanskriterierna ingående i anläggningens konstruktionsbas kopplar ihop med respektive händelseklass H1 t.o.m. H4 och med de dimensioneringsanvisningar som ges i DNB [63]. Notera att för strukturell integritet i samband med dimensionerande inre övertryck (händelseklass H4) redovisar IAEA [53] att nivå I ska tillämpas. I DNB [63] tillåts emellertid den mindre restriktiva nivå II. Detta beroende på att DNB [63] anger att ASME Sect III Div 2 [18] ska uppfyllas vilket

innebär en lastfaktor på 1,5. För fallet att en lastfaktor på 1,5 används tillsammans med normspecificerade acceptanskriterier tillåter EUR [42] att nivå II tillämpas, istället för den mer restriktiva nivå I.

Vidare ges i DNB [63] vägledning vad gäller hantering av händelser utanför konstruktionsbasen för anläggningen, det vill säga för mycket osannolika händelser (händelseklass H5). I DNB [63] har för denna händelseklass svåra haverier inkluderats men även annan inre påverkan eller andra yttre händelser i enlighet med exempelvis WENRA [134]. Dessa händelser benämns sammantaget "design extension conditions". I Tabell 4.1 redovisas hur ovanstående övergripande acceptanskriterier kopplar ihop med mycket osannolika händelser (händelseklass H5) och med de dimensioneringsanvisningar som ges i DNB [63].

Tabell 4.1: Kombinerings av händelseklasser enligt SSM och övergripande acceptanskriterier enligt IAEA, tillsammans med exempel på inneslutningsdimensionering enligt DNB.

SSM	Händelseklass	H1, H2		H3, H4		H5	
		Normal drift och förväntade händelser		Ej förväntade händelser och osannolika händelser		Mycket osannolika händelser (design extension conditions)	
IAEA	Strukturell integritet	Nivå I: Elastiskt beteende		Nivå II: Små permanenta deformationer ¹⁾		Nivå III: Större permanenta deformationer ²⁾	
	Täthet	Nivå I: Tät konstruktion		Nivå I: Tät konstruktion		Nivå II: Begränsad ökning av läckagehastigheten ²⁾	
DNB	Dimensionering av betongkonstruktionen	Norm	Eurokoderna och ASME Sect III Div 2			Eurokoderna	
		Strukturanalys	Huvudsakligen elastiskt strukturbeteende			Plastisk analys	
		Respons (tvärsnittsdimensionering)	Zon 1 Elastiskt beteende	Zon 2 Begränsad plasticering		Zon 3 Generell plasticering	
	Dimensionering av tätplåten	Norm	ASME Sect III Div 2			Extrapolerade krav baserade på ASME	
		Tätplåtskrav	Begränsning av maximal töjningsnivå				
		Krav på betong	Begränsning av maximal sprickvidd				

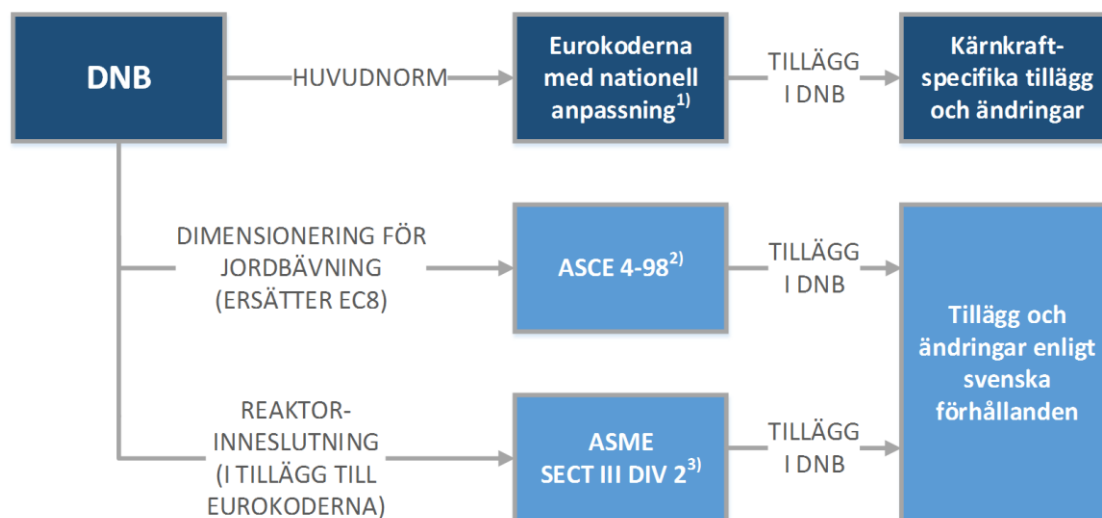
- 1) Nivå II tillåten att tillämpa (istället för den mer restriktiva nivå I) på grund av lastfaktorn 1,5 för dim. inre övertryck.
- 2) Avser postulerade händelser för vilka det har fastställts att strukturell integritet och täthet behöver påvisas.

För att visa att de övergripande acceptanskriterierna i Tabell 4.1 avseende strukturell integritet på nivå I och nivå II och för täthet på nivå I är uppfyllda tillämpas i DNB [63] för bruksgräns- och brottgränstillståndet accepterade dimensioneringsnormer för byggnadskonstruktioner och reaktorinneslutningar (Eurokoderna och ASME Sect III

Div 2 [18]). För betongkonstruktioner bör då ett huvudsakligen elastiskt strukturbeteende eftersträvas. För bruksgränstillståndet undviks vid tvärsnittsdimensioneringen att plasticering av armeringen uppstår (zon 1) medan för brottgränstillståndet kan accepteras begränsad plasticering (zon 2). För uppfyllande av acceptanskriterierna gällande för mycket osannolika händelser (nivå III för strukturell integritet; nivå II för täthet) tillämpas i DNB [63] tillåtna påkänningar för olyckslaster enligt ovan angivna dimensioneringsnormer eller på en extrapolering av de krav som anges i dessa normer. För betongkonstruktioner tillåts härvid plastisk analys. Vid tvärsnittsdimensioneringen accepteras då generell plasticering (zon 3).

Dimensioneringsanvisningarna i DNB [63] baseras på Eurokoderna tillsammans med det svenska anpassningsdokument EKS [31]. Reaktorinneslutningar och övriga byggnader vid kärnkraftverk ska alltså uppfylla de krav och anvisningar som ges i Eurokoderna tillsammans med de kärnkraftspecifika tillägg och ändringar som anges i DNB [63]. För reaktorinneslutningar ska i tillägg till Eurokoderna ASME Sect III Div 2 [18] uppfyllas. Vad gäller dimensionering för jordbävning ersätter ASCE 4-98 [17] EC8 [88]. Vidare ges tillägg och ändringar enligt svenska förhållanden. DNBs dimensioneringsanvisningar redovisas schematiskt i Figur 4.6.

ASME Sect III Div 2 [18] är ett internationellt accepterat regelverk för dimensionering av reaktorinneslutningar av betong. Det återopas i DNB [63] eftersom Eurokoderna ej har dimensioneringsanvisningar för denna typ av konstruktioner. ASCE 4-98 [17] är en internationellt accepterad standard för seismisk analys av säkerhetsrelaterade byggnader vid kärntechniska anläggningar och ger därför en mera stringent kravbild för DNB än vad motsvarande analyskrav i konventionella byggnormer såsom EC8 [88] kan ge.



- 1) Boverket, BFS 2011:10 – EKS 8 Boverkets föreskrifter och allmänna råd om tillämpning av europeiska konstruktionsstandarder (eurokoder)
- 2) ASCE, ASCE 4-98 Seismic analysis of safety-related nuclear structures and commentary
- 3) ASME, ASME Sect III Div 2 Code for concrete containments

Figur 4.6: Dimensioneringsanvisningar i DNB.

4.3 Dimensioneringsprocess

4.3.1 Inledning

Rekommendationer och beskrivningar avseende dimensionering av reaktorinneslutningar som ska uppfylla kraven i ASME Sec III Div 2 [18] finns redovisade i olika typer av dokument såsom myndighetsdokument (exempelvis [118] och [119]), handböcker (exempelvis [62] och [24]) och projektrelaterade dokument (exempelvis [82]).

I avsnitt 4.3.2 – 4.3.6 ges en sammanfattning av den övergripande dimensioneringsprocessen medan i avsnitt 4.3.7 redovisas utvalda speciella frågeställningar. Redovisningen baseras i första hand på [82] men även på några av de andra dokumenten angivna ovan samt på erfarenhet från genomförda projekt, vid befintliga reaktorinneslutningar såväl som vid nybyggnadsprojekt. Genomgången ska endast betraktas som ett exempel på hur en dimensioneringsprocess enligt DNB [63] kan genomföras, i praktiken varierar tillvägagångssättet från fall till fall. Beskrivningen avser dimensioneringsprocessen för konstruktionsstyrande händelser. Hanteringen av DEC²⁹ behandlas ej, förutom en kortfattad beskrivning av analysmetoder och acceptanskriterier i avsnitt 4.3.7. Fokus ligger på laster och lastkombinering, analysmetoder, material och tvärsnittsdimensionering. Andra typer av krav avseende till exempel detaljutformning, beständighet, sprickviddsbegränsning, deformationsbegränsning, temperaturbegränsning osv. har utelämnats i nedanstående genomgång.

4.3.2 Laster och lastkombinering

Dimensionerande laster är site-beroende såväl som anläggningsberoende. För de globala laster som är avgörande för inneslutningen, bortsett från egentygnd och eventuell spännkraft, så är den dominerande site-beroende lasten jordbävning medan den för anläggningstypen avgörande lasten är tryck- och temperaturökning vid en LOCA-händelse med för BWR-anläggningar tillhörande pooldynamiska laster. Vidare kan trycknivån vid den i samband med driftsättning genomförda provtryckningen (1,15 gånger det för anläggningen specificerade LOCA-trycket) vara avgörande. Utöver det finns viktiga lokala belastningar i form av reaktionskrafter från röstöd till exempel vid rörbrott, laster från infästningar av tunga komponenter såsom skalventiler och kranar samt missillaster till exempel vid rörbrott samt för vissa anläggningstyper även påflygning. Övriga laster som verkar på inneslutningen ska naturligtvis beaktas men är vanligtvis ej av avgörande betydelse.

För en och samma last kan olika lastuppställningar vara dimensionerande. En uppsättning lastuppställningar ska alltså väljas som kan anses täcka in alla av betydelse förekommande fall. För varje last och för varje lastkombination kan alltså flera olika lastuppställningar vara nödvändiga att kontrollera. Hanteringen av laster, lastuppställningar och lastkombinationer i systemanalysen underlättas av att man normalt kan använda sig av linjärelastiska analyser för vilken superponering är möjlig, se vidare avsnitt 4.3.3.

I DNB [63] ges en detaljerad redovisning av olika typer av laster som kan behöva beaktas för en kärnkraftsanläggning, tillsammans med en redovisning av hur

²⁹ "Design extension conditions", se avsnitt 2.2.

lastkombinering av de olika lasterna ska ske. Framtagning av laster och lastkombinering följer intentionerna i Eurokoderna men är anpassade till att vara kompatibla med huvuddelen av de krav som ställs i ASME Sec III Div 2 [18]. Att en sådan anpassning har gjorts underlättar betydligt dimensioneringen av inneslutningen eftersom samma dimensionerande snittkrafter i kritiska områden kan användas såväl för snittkraftskontroll enligt Eurokoderna som för ASME-normen. Man behöver alltså ej hantera två olika kompletta systemanalyser, utan det räcker med att en genomförs.

4.3.3 Analysmetoder

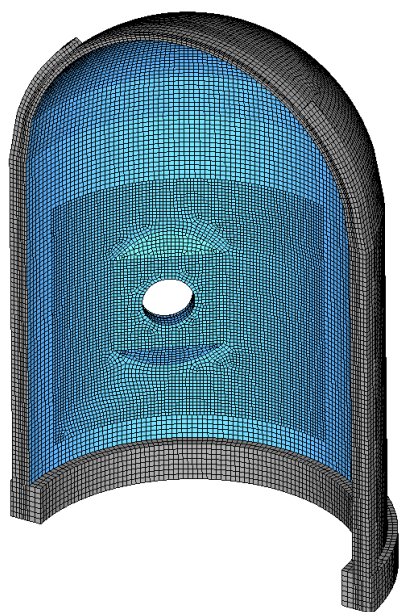
Vanligtvis utnyttjas linjärelastiska finita elementanalyser vid systemanalyser av inneslutningar. En global modell representerande hela reaktorinneslutningen och en tillräckligt noggrann representation av anslutande omkringliggande byggnader används som huvudmodell med vilken alla relevanta lastkombinationer studeras. Modellen kan även behöva innehålla den inre strukturen inuti inneslutningen. Detta styrs av vilken samverkan som kan finnas mellan inneslutningskärlet och den inre strukturen. För att erhålla tillräckligt hög upplösning i resultaten upprättas normalt lokala modeller för "singulariteter" och diskontinuiteter, dvs. i områden inkluderande större slussar, öppningar och genomföringar men även av anslutningsområden till domen och bottenplattan samt eventuella spännkabelklackar. På senare tid har emellertid på ett effektivt sätt börjat användas så detaljerade globala modeller att även singulara områden och diskontinuiteter kan utvärderas direkt i den globala modellen vilket gör många av de lokala modellerna överflödiga. Detta har den fördelen att man undviker problemet med att säkerställa att de lokala modellerna på sin rand verkligen är kompatibla med den globala modellens beteende. Exempel på globala och lokala modeller ges i Figur 4.7 respektive Figur 4.8. För öppningar, slussar och genomföringar etc. upprättas också normalt finita elementmodeller (Figur 4.9) för dimensionering av de trycksatta stålkonstruktionerna enligt till exempel ASME Sec III Div 1 [92]. I detta sammanhang ska noteras att eventuell icke försumbar samverkan mellan byggnadsstrukturen och de mekaniska konstruktionerna måste tas hänsyn till vid dimensioneringen.

Eftersom analyserna är linjärelastiska kan superponering tillämpas. Därför kan lasteffekter av enskilda lastuppställningar baserat på karakteristiska lastvärden först beräknas var för sig, sedan summeras lasteffekterna i enlighet med gällande lastkombinationer med hänsyn tagen till lastfaktorer och lastreduktionsfaktorer. Vid bestämning av lasteffekterna måste tas hänsyn till effekten av betongens uppsprickning. Härvid avses såväl negativa effekter som minskad styvhet och ökande deformation som, om de kan visas vara konservativa, positiva effekter såsom reduktion av tvångskrafter orsakade av till exempel temperaturolyckslaster. Det senare är ofta nödvändigt för att erhålla rimliga krav på armeringsbehov.

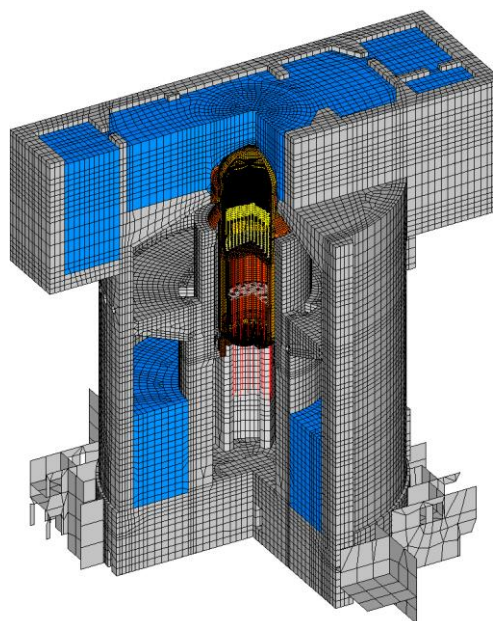
Någon plastisk omlagring av snittkraftsfördelningen bör ej göras, jämför den övergripande dimensioneringsfilosofin för ASME-normen redovisad i avsnitt 4.1 ovan.

Normalt är bottenplattan av sådan tjocklek att den bör modelleras med solidelement. Generella delar av cylinderväggen och domen skulle kunna modelleras med skalelement, men för att minimera antalet lokala modeller förespråkas att även vägg och dom modelleras med solidelement. Effektiva postprocesseringsverktyg finns idag tillgängliga som gör en sådan utvärdering både möjlig och effektiv speciellt vid nyttjandet av kritiska områden (se avsnitt 4.4). Eventuella spännkablak kan modelleras genom infogande av stånelement som då representerar en enskild kabel. Dessa stånelement spänns upp så att korrekt förspänningskraft erhålls direkt i

analysmodellen. Med denna modelleringsteknik kan även den positiva effekten av att spännkraften ökar vid töjning av spännkabeln på grund av inneslutningens expansion av andra pålagda laster automatiskt tillgodoräknas.

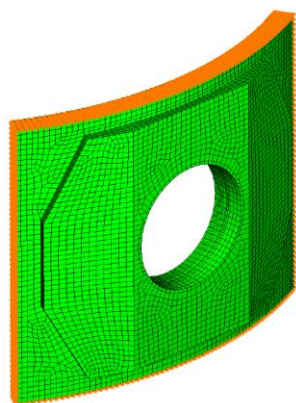


PWR-anläggningstyp, med förtätad elementdensitet i området med en stor öppning för att minimera antalet lokala modeller (bottenplattan exkluderad i figuren) [41]

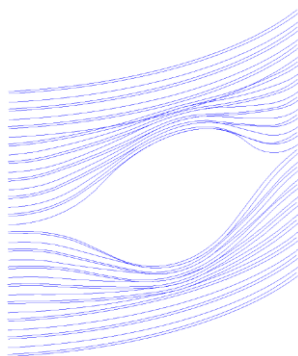


BWR-anläggningstyp, med samverkande inre struktur inkluderad tillsammans med en förenklad beskrivning av anslutande byggnadsstrukturer i nedre delen (delvis beskuren i figuren) [41]

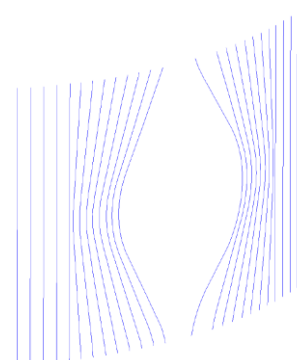
Figur 4.7: Exempel på globala finita elementanalysmodeller av reaktorinneslutningar.



Betongelement med randnoder markerade som drivs av resultat från den globala FEA-modellen



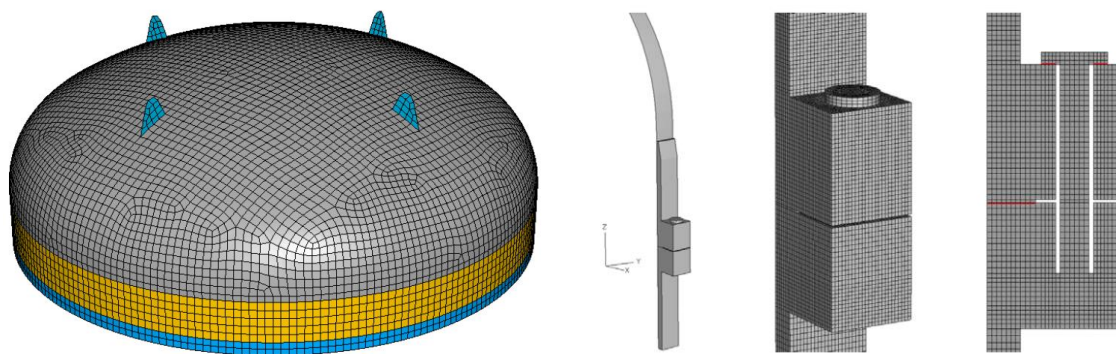
Horisontella spännkabelelement



Vertikala spännkabelelement

För att tydliggöra vad som ingår i modellen har betongelement och spännkabelelement separerats i figurerna ovan.

Figur 4.8: Exempel på lokal finita elementanalysmodell för en reaktorinneslutning.



Kupol, från [41]

Bultförband, från [41]

Figur 4.9: Exempel på lokala finita elementmodeller av öppningar och slussar.

Generellt ska i analyserna tas hänsyn till jord-struktursamverkan (så kallade SSI-effekter, "soil-structure interaction") vid jordbävning, se exempelvis avsnitt 7.5.2.7 i DNB [63]. SSI-analyserna genomförs för en uppsättning av anläggnings-specifika jordbävningstidshistorier representerade de olika jordförhållandena som kan råda på anläggningsplatsen. Resultatet från SSI-analyserna kombineras sedan med resultaten från den statiska analysen i enlighet med gällande lastkombineringsregler. Under vissa förutsättningar, så kallade "hard rock conditions" kan SSI-effekter bortses ifrån vilket markant underlättar genomförandet av systemanalyserna. "Hard rock conditions" beskrivs närmare i ASCE 4-98 [17]. För befintliga svenska anläggningar brukar "hard rock conditions" med responspektra enligt SKI 92:3 [91] normalt ansättas vid jordbävninganalyser.

I DNB [63] ges i kapitel 5 anvisningar avseende analysmetoder genom hänvisning till ASME-normen men även till Eurokoderna, samtidigt som kompletterande ändringar och tillägg har införts. Jordbävninganalyser behandlas i kapitel 7 i DNB [63] inkluderande hänvisning till ASCE 4-98 [17].

4.3.4 Material

Betong-, armerings- och spännstålskvaliteter samt armerings- och spännstålsdetaljer väljs i enlighet med svenska och europeiska standarder som är accepterade av Eurokoderna. Eftersom DNB [63] för inneslutningen anger att som komplement till Eurokoderna ska även ASME Sec III Div 2 [18] visas vara uppfylld uppstår följande fråga: Vilka värden på materialparametrar (hållfasthet etc.) ska användas i dimensioneringsekvationerna i ASME-normen som ju baseras på materialval enligt amerikanska standarder? I kapitel 5 i DNB [63] ges rekommendationer hur dessa val kan göras. Men om man ej har tillgång till provningsresultat som visar att betonghållfastheten uppfyller kraven i ASME-normen så redovisas i avsnitt 5.9.5.2 i DNB [63] en försiktig ansats för betongens hållfasthet som är konservativ.

Här redovisas en sammanfattning av och slutsatserna från en utredning [130] som genomförts efter det att DNB [63] utgivits. Utredningen kan anses motsvara vad som i avsnitt 5.9.5.2 i DNB [63] betecknas som provningsresultat som visar att betonghållfastheten även uppfyller kraven i ASME-normen. Studien baseras på en jämförelse mellan Eurokoderna och ASME-normen avseende hur betongens hållfasthet bestäms genom provningsmetoder enligt standarder för respektive norm.

Gällande provningsmetoden är det endast pålastningshastigheten (av de undersökta parametrarna) som tydligt skiljer sig mellan regelverken. Föreliggande skillnad i pålastningshastighet skulle enligt [68] ge 3 % högre hållfasthet vid testning enligt SS-EN 1992-1-1 [87] än ASME Sec III Div 2 [18], vilket kan anses försumbart. Slutsatsen gällande provningsmetoder är att dessa kan anses likvärdiga mellan regelverken.

Gällande utvärderingsmetod är en entydig slutsats svår att göra för hur slutligt bedömd hållfasthet förhåller sig mellan regelverken. Gemensamt för regelverken är att man skiljer mellan utvärdering initialt i produktionen (baserat på fåtal prover) och utvärdering fortskridande i produktionen (baserat på många prover). För utvärdering initialt är ASME Sec III Div 2 [18] striktare och ger för samma betong en lägre specificerad tryckhållfasthet. För fortskridande produktion påvisas motsatsen, d.v.s. SS-EN 1992-1-1 [87] är striktare, även om skillnaden är ganska liten. Gällande jämförelsen av regelverken antas fortskridande produktion vara mest relevant och då är slutsatsen att SS-EN 1992-1-1 [87] är striktare än ASME Sec III Div 2 [18] gällande utvärderingsmetod även om skillnaden kan anses liten.

En faktor som skiljer sig mellan regelverken är hur skillnaden mellan hållfasthet vid test och för färdig konstruktion beaktas. En påvisad skillnad mellan test och in situ-hållfasthet finns för betong, bl.a. beroende på läge i konstruktionen, härdningsförhållande, etc., det kan dock finnas oenighet i hur stor denna skillnad är. I SS-EN 1992-1-1 [87] beaktas denna skillnad genom en reduktion av testresultatet med faktor 0.85 (in situ-faktor). I ASME Sec III Div 2 [18] har ingen explicit faktor gällande detta kunnat utläsas. I ACI 214.4R [4] antyds dock att in situ-effekten skulle beaktas i val av fraktil (10 %) i utvärderingsmetoden. Enligt SS-EN 1992-1-1 [87] använd dock 5 % fraktilen som vilket ger ett lägre hållfasthetsvärde och dessutom används faktorn 0.85 för att beakta in situ-effekten.

Provning- och utvärderingsmetod av betonghållfastheten i ASME Sect III Div 2 [18] och SS-EN 1992-1-1 [87] bedöms (enligt ovan) vara likvärdiga. För att inte underskatta in-situ effekten rekommenderas dock att faktorn 0.85 används då det specificerade tryckhållfasthetsvärdet f'_c bestäms utifrån karakteristisk tryckhållfasthet f_{ck} i SS-EN 1992-1-1 [87].

För tätplåten och dess förankringar bör enligt DNB [63] material väljas som är i överensstämmelse med ASME Sec III Div 2. Eftersom ingen kontroll enligt Eurokoderna görs för tätplåten är valet av materialparametrar rättframt och görs då enligt ASME-normen med tillhörande standarder.

4.3.5 Tvärsnittsdimensionering

Eftersom Eurokoderna tillämpas fullt ut i Sverige för konventionella byggnader och att dimensioneringsmetoderna därmed borde vara kända, fokuserar detta avsnitt på tvärsnittsdimensionering enligt ASME Sec III Div 2 [18]³⁰. Det ska dock noteras att det ej förhåller sig så att ASME-normen alltid envelopperar Eurokoderna, eller vice versa. Detta har framkommit vid en utredning [131] där Eurokoderna och ASME-normens

³⁰ För vägledning vid användandet av Eurokoderna för dimensionering av betongkonstruktioner finns till exempel Svenska Betongföreningens handbok [105] att tillgå.

dimensioneringsavsnitt jämfördes i detalj paragraf för paragraf tillsammans med att ett antal typiska inneslutningskontroller genomförts så att en numerisk jämförelse kunde göras mellan normerna³¹.

I ASME-normen specificeras två typer av lastkategorier, "service loads" och "factored loads". "Service loads" avser laster som uppstår vid uppförande av anläggningen, vid provning och vid normal drift och avställning inkluderande driftstörningar. Vidare ingår klimatrelaterade laster och annan yttre påverkan som förväntas uppstå under anläggningens livslängd. För dessa lastkategorier med tillhörande lastkombinationer genomförs i ASME-normen endast spänningsrelaterade kontroller som kan jämföras med en bruksstadiekontroll eftersom de maximalt tillåtna spänningsnivåerna ligger långt under dimensionerande bärförmåga. Det ska dock noteras att man för "service loads" i princip kontrollerar för samma typer av påkänningar som vid en brottkontroll (tryckpåkänning i betongen, skjuvpåkänning, dragspänning i armering och spännstål osv.). "Factored loads" avser inre händelser och yttre påverkan som inträffar mer sällan än vad som anges för "service loads". För "factored loads" genomförs hållfasthetskontroller baserat på tillåtna spänningar.

Factored loads

Nedan redovisas de acceptanskriterier som ska tillämpas vid tvärsnittskontroll för "factored loads". Notera att det är en generell genomgång och att andra kompletterande och mer detaljerade krav kan finnas än de som sammanfattas nedan.

Betong

Membrantryckpåkänning, dragning och böjning

I avsnitt CC-3421.1 och tabell CC-3421-1 i ASME-normen specificeras tillåtna betongspänningar för enbart membranspänningar respektive kombinerade membran- och böjspänningar. De tillåtna spänningarna är definierade för såväl enbart primära laster som för en kombination av primära och sekundära laster. Primära och sekundära laster definieras i CC-3136 i ASME-normen. Primära laster är resultatet av yttre mekanisk last, medan sekundära laster uppstår på grund av inre tvång och är därmed självavlastande. Temperaturgradienter igenom tvärsnittstjockleken är ett exempel på när sekundära laster av typen böjande moment kan uppstå om krökningen är förhindrad.

Maximalt tillåten tryckpåkänning varierar mellan 0.60 – 0.85 gånger betongens specificerade tryckhållfasthet beroende på kombination av spänningstillstånd och lasttyp.

Såsom anges i CC-3421.2 ska inte betongens draghållfasthet tillgodoräknas för att uppta membrankrafter eller dragkrafter på grund av böjning.

Skjuvning

Den totala skjuvkapaciteten utgörs generellt av summan av två komponenter, den första utgörs av betongens kapacitet (V_c) och den andra av armeringens kapacitet (V_s). Betongkomponenten redovisas i CC-3420 medan armeringskomponenten specificeras i CC-3521. Beroende på vilken typ av

³¹ Följande delar av ASME Sec III Div 2 [18] ingick i den numeriska studien: "Radial shear", "peripheral shear", "tangential shear", "bending moment and tension capacity", "concrete compression capacity", "detailing", "minimum reinforcement and concrete cracking" och "prestressing".

skjuvning som avses fastställs kapaciteten med hjälp av olika samband, men även hur de två komponenterna V_c och V_s ska summeras skiljer sig åt.

Tvärkraft i tjockleksriktningen ("Radial shear")

Denna kontroll avser tvärkraft i konstruktionsdelens tjockleksriktning. För denna kontroll kan 100 % av respektive betong- och armeringskomponent summeras för att bestämma den totala tvärkraftskapaciteten.

Skjuvspänning i skalets plan ("Tangential shear")

Denna kontroll utförs för skjuvspänningar i skalets plan. Kapaciteten är här antingen betongens kapacitet eller armeringens kapacitet. De båda komponenterna summeras alltså ej. För att få utnyttja betongens kapacitet så krävs att betongen har en resulterande tryckande normalkraft, inkluderande effekten av temperatur. Detta innebär i praktiken att en tillräckligt stor spännkraft måste finnas. Om så ej är fallet måste skjuvspänningen upptas av armeringen enbart.

Tvärkraft vid lokala lastinföringar ("Peripheral shear")

Denna typ av skjuvning uppstår till exempel vid genomföringar eller vid förankringsanordningar av kranbalksupplag. För detta fall kan maximalt 50 % av betongkomponenten adderas till armeringskomponenten vid bestämning av den totala tvärkraftskapaciteten.

Skjuvspänning på grund av vridbelastade anslutningar ("Torsional shear")

Denna typ av skjuvspänning uppstår till exempel för en vridbelastad genomföring. Kapaciteten är här antingen betongens kapacitet eller armeringens kapacitet. De båda komponenterna summeras ej. Överskrider betongens kapacitet så måste all last upptas av armeringen.

Armering

Dragning och tryck

Tillåten maximal drag- och tryckspänning i armeringen begränsas till 0.9 gånger specificerad sträckgräns, se CC-3422.1 och CC-3422.2 i ASME-normen. Anvisningar finns i ASME-normen att under vissa förutsättningar överskrida 0.9 gånger sträckgränsen. För dragbelastning gäller detta till exempel lokalt vid vissa typer av diskontinuiteter såsom större öppningar som ger upphov till samtidigt verkande böjande moment. För tryckbelastning kan värdet överskridas om detta erfordras för att betongen ska kunna mobilisera sin maximala tryckkraftskapacitet.

Skjuvning

Se avsnitten om skjuvning under rubriken "Betong" ovan.

Dragning i radiell riktning

Avsnitt CC-3545 i ASME-normen redovisar krav vad gäller anordning av armering i tvärsnittets tjockleksriktning för de fall dragkrafter i radiell riktning uppstår. Sådana krafter kan uppstå på grund av avlänkningskrafter från spännkablar. Även om det ej är formellt krav i ASME-normen rekommenderas att alla radiella krafter som uppstår i konstruktionen tas av radiell armering. En anledning till detta är att man vill minimera risken för en eventuell delaminering av konstruktionen på grund av spännkrafter. Andra positiva effekter av en sådan

lösning finns också, se avsnittet "Service loads – Betong - Membrantryckpåkänning, dragning och böjning" nedan.

Spjälkarmering vid spännkabelförankringar

Krav på inläggande av lokal armering vid spännkabelförankringar redovisas i avsnitt CC-3543 i ASME-normen. Normen tillåter att antingen beräkningar eller provning ligger till grund för bestämning av erforderlig armeringsmängd.

Spännarmering

Dragning

Tillåten dragspänning är maximerad till 90 % av den specificerade sträckgränsen enligt CC-3423 i ASME-normen.

Service loads

Nedan redovisas de acceptanskriterier som ska tillämpas vid tvärsnittskontroll för "service loads". Notera att det är en generell genomgång och att andra kompletterande och mer detaljerade krav kan finnas än de som sammanfattas nedan.

Betong

Membrantryckpåkänning, dragning och böjning

I avsnitt CC-3431.1 och tabell CC-3431-1 i ASME-normen specificeras tillåtna betongspänningar för enbart membranspänningar respektive kombinerade membran- och böjspänningar. De tillåtna spänningarna är definierade för såväl enbart primära laster som för en kombination av primära och sekundära laster. Primära och sekundära laster definieras i CC-3136 i ASME-normen, se även motsvarande sektion ovan under rubriken "Factored loads".

Maximalt tillåten tryckpåkänning varierar mellan 0.30 – 0.60 gånger betongens specificerade tryckhållfasthet beroende på kombination av spänningstillstånd och lasttyp.

Maximalt tillåten tryckpåkänning under spännkabellarnas förankringsplatta redovisas i CC-3431.1 i ASME-normen.

Såsom anges i CC-3431.2 ska inte betongens draghållfasthet tillgodoräknas för att uppta membrankrafter eller dragkrafter på grund av böjning.

Notera att i fotnot (2) och (3) i tabell CC-3431-1 anges att om radiell dragarmering anordnas i den cylindriska väggen och/eller domen kan tillåten tryckpåkänning vid uppspanning av spännkablar ökas från 0.35 gånger specificerad tryckhållfasthet hos betongen till 0.40 gånger densamma, och vid färdig konstruktion från 0.30 till 0.35. Detta kan eventuellt utnyttjas till att om radiell armering inläggs antingen reducera konstruktionens tjocklek eller att reducera erforderlig betonghållfasthet.

Skjuvning

Som allmän regel kan sägas att tillåten skjuvspänning för "service loads" är 50 % av vad som tillåts för "factored loads". Men som framgår av CC-3431.3 finns en mängd detaljerade undantag från denna allmänna regel, där vissa undantag innebär en lättnad.

Armering

Dragning och tryck

Tillåten maximal drag- och tryckspänning i armeringen begränsas till 50 % av sträckgränsen, se CC-3432.1 och CC-3432.2 i ASME-normen. Under vissa förutsättningar kan lättnader göras.

Skjuvning

Detaljerade anvisningar ges i avsnitt CC-3522. Det enda generella som kan sägas är att man i många fall följer de tidigare huvudprinciperna att spänningen i armeringen begränsas till 50 % av sträckgränsen eller att kapaciteten ska vara 50 % av den som gäller för "factored loads".

Spännarmering

Dragning

Tillåten dragspänning anges i CC-3433 i ASME-normen. Det är tillåtet att spänna upp en enskild kabel så att den efter förankring har en spänning motsvarande 73 % av brottgränsen. Detta för att kompensera för elastiska förluster, men spänningsmedelvärdet för en grupp av spännkablar får ej överstiga 70 % av brottgränsen.

4.3.6 Tätplåtssystemet

Eurokoderna behandlar ej dimensioneringen av tätplåtssystem, därför har i DNB [63] införts hänvisning direkt till ASME Sec III Div 2 [18]. Avsnitt CC-3600, CC-3700 och CC-3800 i ASME-normen redovisar hur tätplåten ska analyseras, utvärderas och utformas.

Vid dimensionering av tätplåten kan samma lastkombinationer som anges för "service loads" och "factored loads" användas men alla lastfaktorer sätts till 1.0. Notera att acceptanskriterierna för tätplåtssystemet är indelat baserat på de enskilda lastkombinationerna och inte alltid enligt gränsdragningen mellan "service" och "factored". Vissa speciella särdrag för tätplåtssystemet redovisas i avsnitt 4.3.7. Nedan behandlas de acceptanskriterier som finns uppställda för tätplåtssystemet.

Vid utvärderingen av tätplåtssystemet finns två uppsättningar acceptanskriterier, en baserad på tillåtna spänningar och en på tillåtna töjningar/deformationer. För tätplåten används spänningsbaserade acceptanskriterier för de laster som kan uppstå under byggskedet medan för alla andra lastkombinationer används töjningsbaserade acceptanskriterier. Dessa redovisas i tabell CC-3720-1 i ASME-normen. För tätplåtsförankringarna används spänningsbaserade acceptanskriterier vid yttre mekanisk last medan deformationsbaserade acceptanskriterier används för deformationsbegränsade laster. Acceptanskriterierna redovisas i tabell CC-3730-1 i ASME-normen.

Notera att för tätplåtssystemet kan det ofta vara nödvändigt att genomföra provningar för att fastställa systemets förmåga att motstå statisk eller cyklisk belastning.

Avsnitt CC-3750 i ASME-normen behandlar bland annat hur i tätplåten insvetsade förankringsplåtar ska dimensioneras. Förutom att de ska uppfylla de acceptanskriterier (maximalt tillåten töjning) som specificeras för tätplåten för att tillförsäkra täthet ska de även dimensioneras för de mekaniska laster som införs från anslutande profiler via förankringsplåten in i bakomliggande betongkonstruktion. ASME-normen hänvisar då vad gäller förankringsplåten till amerikanskt regelverk för konventionella stålkonstruktioner [11]. Här rekommenderas att även tillämpa

kärntekniskt regelverk för stålkonstruktioner, [9] är kompatibel med [11]. DNB [63] tillåter att svenska regelverk för dimensionering av stålkonstruktioner vid kärnkraftverk tillämpas, emellertid finns ej i skrivande stund sådana regelverk framtagna. Vad gäller förankringsplattans förankring till betongkonstruktionen anger ASME-normen att tillämpliga regelverk ska specificeras i dimensioneringsförutsättningarna för anläggningen, man ger alltså ej någon ledning vad gäller vilket regelverk som bör tillämpas. Anvisningarna i DNB [63] för dimensionering av betongförankringar kan här tillämpas.

4.3.7 Speciella frågeställningar

4.3.7.1 Inledning

I de följande avsnitten tas upp ett urval speciella frågeställningar vad gäller dimensionering som ej redovisats i den översiktliga genomgången i föregående avsnitt.

4.3.7.2 Validering av finita elementprogramvara och tillhörande analysmodeller

Det är viktigt att använd finita elementanalysprogramvara är validerad för det syftet den används. Valideringen kan rent praktiskt genomföras enligt någon av följande metoder eller kriterier:

- Programvaran är en erkänd produkt som finns publikt tillgänglig på marknaden och har tillräckliga meriter och referenser för att motivera dess tillämplighet och tillförlitlighet för det aktuella fallet utan ytterligare undersökningar eller motiveringar;
- Programvaran har via ett antal för det aktuella fallet representativa testproblem visats ge väsentligen identiska resultat som för en liknande programvara som tillhör gruppen ovan;
- Programvaran har via ett antal för det aktuella fallet representativa testproblem visats ge väsentligen identiska resultat som för klassiska analysmetoder eller erkända provningsresultat från relevanta experiment.

Notera att i ett specifikt projekt kan mer formella krav på validering krävas, till exempel i enlighet med vissa standarder.

Vidare måste det tillförsäkras att även använd finita elementanalysmodell är tillfyllest för det syfte den används. Detta kan principiellt göras enligt följande schema:

- Bestäm krav på modellen, till exempel vilka fenomen den är tänkt att beakta och vilka resultatkomponenter den ska presentera;
- Studera och få förståelse för strukturens beteende via inledande handberäkningar³², överslag och eventuellt inledande mer förenklade finita elementmodeller än den som slutligen ska tillämpas vid dimensionering;
- Bestäm med vilken noggrannhet resultatkomponenterna måste fastställas i analysen;

³² I bilaga 5 i föreliggande rapport redovisas en överslagsberäkning av viktigare snittkrafter för en typisk reaktorinneslutning (tryckvattenreaktor).

- Baserat på ovanstående punkter upprättas analysmodellen av personal med tillräcklig erfarenhet och kunskap om den aktuella analystypen;
- Analyser genomförs och analysmodellen uppdateras kontinuerligt under dimensioneringsprocessen baserat på de resultat som framkommer tills dess trovärdiga resultat har erhållits;
- Att trovärdiga resultat erhålls kontrolleras med hjälp av gängse metoder såsom känslighetsstudier, jämförande (hand)beräkningar, kontroll av jämvikt etc.;
- Validera att i punkt 3 fastställda krav på noggrannhet hos resultatkomponenterna verkligen har uppfyllts.

En viktig aspekt vad gäller analysmodellen är att det måste tillförsäkras att storleken på de finita elementen väljs tillräckligt små så att tillförlitliga resultat erhålls. Nedan ges några handfasta råd vad gäller valet av elementstorlek för en statisk analys av inneslutningen:

- Minska elementstorleken tills dess att resultatet konvergerar för aktuell resultatstorhet, till exempel spänning;
- Om förändringen i beräknad storhet, såsom till exempel spänning, är mindre än 10 % i förhållande till angränsande element indikerar detta att elementstorleken är tillräckligt liten;
- För slussar, öppningar och genomföringar är det kritiska snittet placerat halva väggjockeleken ut från foderröret. Detta ska beaktas vid val av elementstorlek;
- För en given tillämpning kan programtillverkaren konsulteras vad gäller lämpligt val av elementstorlek för den elementtyp som används;
- Det finns inga fixa regler och varje analystillämpning har skilda krav. Men situationen förenklas vid dimensioneringen av en inneslutning eftersom det endast finns en mindre mängd olika analysområden såsom: Den generella skalkonstruktionen, bottenplattan, diskontinuiteter vid anslutning till bottenplattan och domen, spännklackar och singulariteter såsom öppningar, slussar och genomföringar.

Noggrannare konvergensstudier och jämförande kontrollberäkningar kan vara nödvändiga att genomföra dels för att tillförsäkra en korrekt analysmodell, dels för att uppfylla mer formella krav som kan vara gällande i ett specifikt projekt.

4.3.7.3 Ojämn sättning under bottenplattan

För säkerhetsklassade byggnader vid kärnkraftverk bör hänsyn tas till de snittkrafter som uppstår på grund av ojämn sättning. Speciellt för nya anläggningar, men även för vissa befintliga, kan inneslutningen vara placerad på en stor gemensam bottenplatta som även omfattar omkringliggande delar av reaktorbyggnaden samt andra anslutande byggnader. Ett problem är då hur man ska hantera effekten av ojämn sättning i systemanalyserna och vid lastkombineringen. Frågan kompliceras av att man har två olika typer av sättningsförlopp, det ena är de sättningar som uppstår under byggtiden, det andra är de sättningar som uppstår över tiden efter det att byggnaderna har färdigställts. Under byggtiden har man en sekventiell byggprocess där de olika byggnaderna uppförs efter varandra vilket naturligtvis påverkar vilken snittkraftsfördelning man får i byggnaderna av sättning.

För att beakta de olika skedena under byggprocessen och de sättningar som uppstår under anläggningens livslängd kan en sekventiell FE-analys genomföras med den

FEA-modell som finns upprättad för de sammanhängande byggnaderna. Man simulerar då hela förloppet från byggstart fram till slutet på anläggningens livslängd. De envelopperade snittkrafterna från en sådan specialanalys kan sedan jämföras med de snittkrafter som fås vid en FE-analys (referensanalys) som varken inkluderar byggprocessen eller inverkan av sättningar. Med hjälp av en sådan jämförelse kan skillnaden i snittkrafter bestämmas för varje punkt i FE-modellen. Den framräknade skillnaden ansätts sedan att utgöra lasten ojämn sättning (lasten δ_s sättning enligt DNB:s [63] nomenklatur).

Den enligt ovan bestämda lasten sättning kan sedan hanteras som vilken last som helst, med tillhörande lastfaktorer och lastreduktionsfaktorer, vid den superponering som görs för att beräkna lasteffekterna i byggnaderna för de olika lastkombinationerna där sättning ingår.

4.3.7.4 Snittkraftsbestämning vid temperaturgradient

Temperaturgradienter över inneslutningsskalets tjocklek kan på grund av tvång ge upphov till stora snittkrafter i en linjärelastisk analys med en styvhet motsvarande betongens ospruckna styvhet. Det är därför vanligt att snittkrafterna i ett tvärsnitt reduceras på grund av att betongen spricker upp³³. Eftersom detta är ett olinjärt beteende och på grund av att uppsprickningen är beroende av den totala lastbilden i studerat snitt, och inte bara av temperaturlastens storlek, ger detta problem vid tillämpningen av superponering vid lastkombinering (se avsnitt 4.3.3). Ett sätt att lösa detta är att för olika konstruktionsdelar via utredningar och känslighetsstudier av uppsprickningens inverkan fastställa en temperaturlastreduktionsfaktor som tar hänsyn till styvhetsminskningen orsakad av betongens uppsprickning. Denna faktor kan då användas för att reducera snittkrafter för temperaturlasten erhållna från linjärelastiska analyser vid lastkombinering genom superponering. Detta förenklar dimensioneringen betydligt. Notera att för spännarmerade konstruktioner så medför spännkraften att betongens uppsprickning begränsas. Om metoden ovan tillämpas rekommenderas att för vissa identifierade styrande lastkombinationer via olinjära analyser påvisa att de använda temperaturlastreduktionsfaktorerna är konservativt valda.

Alternativt, men naturligtvis mycket mer arbetskrävande, är att för varje studerat snitt genomföra olinjära analyser för alla lastkombinationer av betydelse som innehåller en icke försumbar temperaturlastandel. Man kan naturligtvis också dimensionera för de temperaturlastsnittkrafter som fås i den linjärelastiska systemanalysen, men detta kan i många fall vara mycket oekonomiskt.

Speciellt vid olyckshändelser kan temperaturfördelningen igenom inneslutningens tvärsnitt vara olinjärt. I ACI 349.1R [7] redovisas en metod för att linearisera en sådan temperaturlast, detta för att underlätta det följande dimensioneringsarbetet.

³³ Vad som diskuteras i detta avsnitt är den snittkraftsreduktion av tvångsmoment som fås vid uppsprickning i studerat snitt, men inte den eventuella snittkraftsomlagring som kan uppstå på grund av att konstruktionens relativa styvhetsfördelning skulle kunna ändras på grund av en ojämn uppsprickning av betongkonstruktionen.

4.3.7.5 Tätplåtsdimensionering för inducerade tryckspänningar

Tätplåten ska dimensioneras för de i huvudsak uppkomna dragpåkänningarna i samband med inneslutningskonstruktionens expansion vid ett förhöjt inre övertryck. Detta kan göras med konventionella metoder och behandlas ej vidare här.

Dimensioneringen av ett tätplåtssystem skiljer sig på ett avgörande sätt från dimensioneringen av andra strukturer eftersom att för en tätplåt tillåter man att buckling sker när den belastas i tryck. Därmed sker också utvärderingen i ett post-bucklingstadie, se Figur 4.11. Det är alltså normalt att tätplåten åtminstone för den maximalt dimensionerande lasten tillåts buckla. För att begränsa bucklornas storlek kan införas extra förankringar placerade emellan tätplåtens huvudinfästningar. Det är i detta sammanhang viktigt att bucklorna ej kan ge upphov till en ökad risk för tätplåtskorrosion.

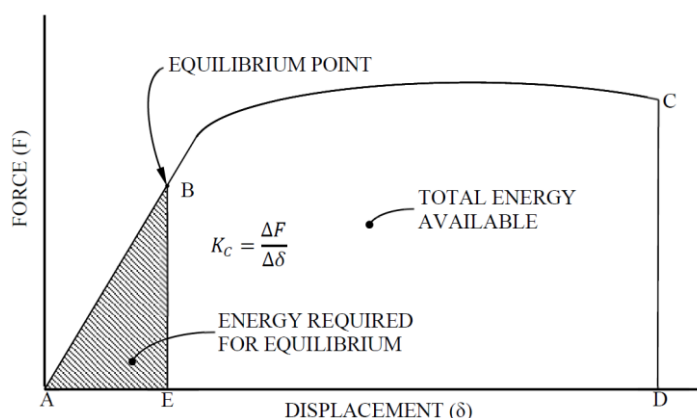
Den dimensionerande lasten för tryckpåkänning utgörs normalt av en kombination av höga temperaturer vid olyckshändelser och en sammantryckning av inneslutningens struktur på grund av spännkraft och betongens krympning och krypning. Betongens sammantryckning gör att tryckspänningar också introduceras i tätplåten via tätplåtsförankringarna. En transient temperaturökning i inneslutningsatmosfären kan ge stora tryckpåkänningar i tätplåten på grund av tvång. Eftersom tätplåten utgörs av en relativt tunn stålplåt (typisk tjocklek är 5-10 mm) kan den komma att buckla för de inducerade tryckspänningarna.

Eftersom buckling kan uppstå i tätplåten ska hänsyn tas till imperfektioner och deformationer som kan uppstå under byggskedet såsom gjuttryck mot tätplåten om den används som form. Enligt ASME-normen behöver ej töjningar från deformationer som uppstår under byggskedet beaktas i de dimensionerande analyserna för drift- och olycksfall. Detta innebär att initialimperfektioner ska tas hänsyn till vid dimensionering av tätplåtssystemet i de fall de har en negativ inverkan, men att tätplåten kan ansättas spännings- och töjningsfri för sin initiala utböjningsform.

Tryckspänningarna tillsammans med bucklingen av tätplåten medför att en obalanskraft kan uppstå över tätplåtsförankringarna. Vidare ger bucklingen upphov till att även böjspänningar fås i tätplåten utöver de redan inducerade tryckspänningarna. Eftersom de påförda tryckspänningarna i ovan beskrivna fall är deformationsstyrda tillåter ASME-normen att tätplåten utvärderas gentemot maximalt tillåtna töjningar, som ligger över sträckgränsen, och att tätplåtsförankringarna utvärderas gentemot maximalt tillåtna deformationer, vilket förklaras tydligare nedan.

Eftersom förankringssystemets kapacitet för en deformationsstyrd last beror av såväl dess förskjutning som av dess lastupptagande förmåga måste båda dessa parametrar tas hänsyn till när förankringarna utvärderas. Förskjutning och kraft kan beaktas samtidigt via en energibetraktelse vilket är det samma som att fastställa för vilken punkt på kraft-förskjutningskurvan för vilken jämvikt erhålls, se Figur 4.10. Figur 4.10 visar en typisk kraft-förskjutningskurva ("force – displacement") för en kontinuerlig tätplåtsförankring belastad med en skjuvkraft i tätplåtens plan. Den totala energiupptagningsförmågan för tätplåtsförankringen utgörs av ytan (ABCD) under kurvan. För en viss specifik last kan den punkt (B) på kurvan för vilken jämvikt uppnås bestämmas. Ytan (ABE) under kurvan fram till denna punkt (B) representerar då den energi som förbrukas för det aktuella lastfallet för att uppnå jämvikt. Om man dividerar den totala ytan (ABCD) med jämviktsarean (ABE) fås den säkerhetsfaktor mot brott man har baserat på den maximala energiupptagningsförmågan. Denna typ av energibetraktelse har sedan i ASME Sec III Div 2 [18] förenklats till att innebära ett

krav på maximalt tillåten förskjutning som en funktion av förankringens maximala förskjutningskapacitet.

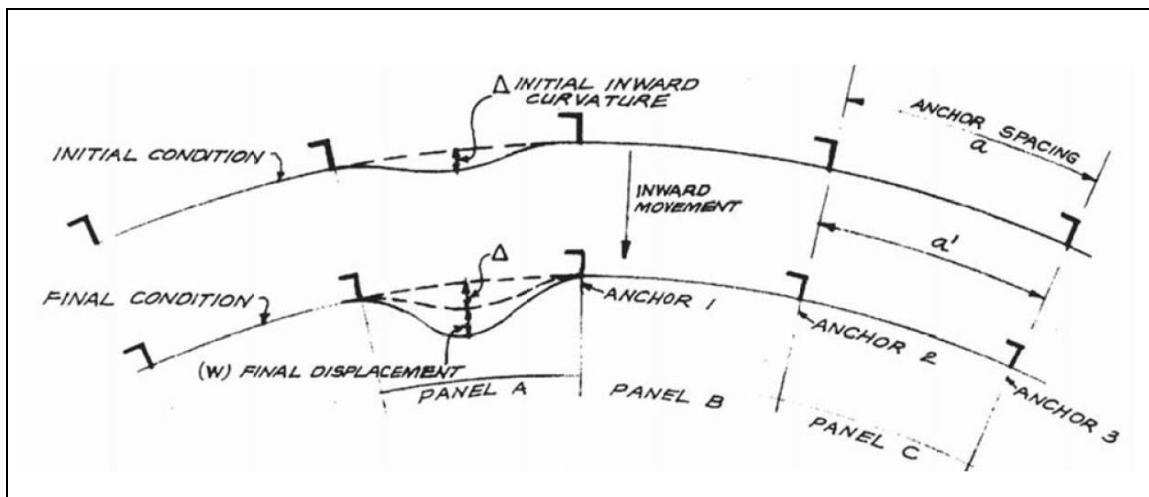


Figur 4.10: Kraft-förskjutningskurva för tätplåtsförankring, från [62].

I avsnitt 5.9.7 - 5.9.9 i DNB [63] ges anvisningar för dimensionering av tätplåten i enlighet med ovanstående beskrivning.

I de flesta befintliga svenska anläggningar är tätplåten kringgjuten på båda sidor vilket medför att den förhindras att buckla ut. Detta är emellertid en relativt ovanlig konstruktionslösning ur ett internationellt perspektiv där både befintliga och nya anläggningar vanligtvis har en tätplåt som är fri mot inneslutningens atmosfär (förutom i området för den inre strukturens bottenplatta).

I avsnitt 6.6.7.2 i DNB [63] anges vidare att för reaktorinneslutningar bör betongsprickors bredd begränsas oberoende av om aktuell exponeringsklass kräver det eller ej (beständighetskrav). Detta för att förhindra att oacceptabla töjningsnivåer uppstår lokalt i tätplåten. Såsom beskrivits i [22] inkluderande en jämförelse med en modell i skala 1:4 av en inneslutning provtryckt till brott kan på grund av att tätplåten är infäst i diskreta punkter en betongspricka emellan två infästningar medföra att lokalt höga plastiska töjningar i tätplåten kan uppstå. En studie nyttjande metoden framtagen i [22] har genomförts i [62] för typiska mått för en verklig anläggning. Härvid framkom att töjningsökningen var större för provningsmodellen än för en anläggning med verklig geometri, men att töjningsökningen vid en spricka ej alltid är försumbar.



Horisontellt snitt igenom tätplåten på insidan av inneslutningens cylindervägg, utdrag ur [62]

Figur 4.11: Tätplåt belastad i tryck: Buckling.

4.3.7.6 Summeringsmetoder för seismisk last

Som en del av dimensioneringsprocessen är det nödvändigt att summera strukturens respons som erhålls vid excitering av byggnaden i de tre riktningar för vilken jordbävningens last ska appliceras (två vinkelräta horisontella riktningar och vertikalt). Om en seismisk tidshistorieanalys genomförs med tre okorrelerade tidshistorier som indata kan kombineringsmetoden göras genom algebraisk summering för varje tidssteg. Men om man istället genomför en ekvivalent statisk analys eller en responspektrumanalys för att bestämma jordbävningens respons så är ej algebraisk summering applicerbar. Den summeringsmetod som traditionellt har använts för kärntekniska anläggningar vid denna typ av analyser är den så kallade SRSS-metoden ("square-root-of-the-sum-of-the-squares"). Under senare tid har den så kallade 100-40-40-metoden accepterats [121] och börjat brukas för kärntekniska anläggningar. Anledningen till att den har blivit accepterad är att den har visats att nästan alltid vara något konservativ jämfört med SRSS-metoden (upp till ca 15 %) [69]. I de få fall där metoden formellt ej är konservativ (i förhållande till SRSS-metoden) har underskridandet endast varit av storleksordningen någon procent.

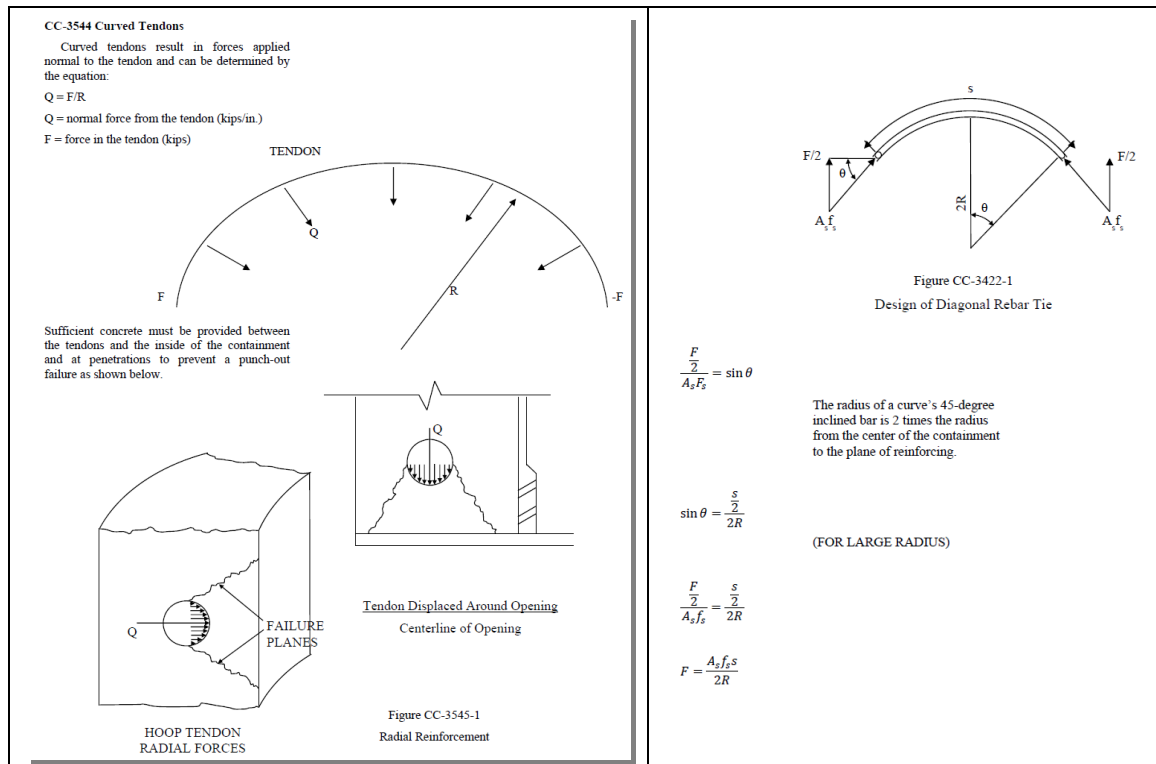
100-40-40-metoden är rättfram när den tillämpas för de tre exciteringsriktningarna tillsammans med endast en resultatkomponent. Men för betongkonstruktioner generellt kan det ofta vara nödvändigt att summera flera resultatkomponenter³⁴. I sådana fall skiljer sig kombineringsmetoden från hur den tillämpas för en enskild resultatkomponent. Detta beskrivs närmare i till exempel [69].

³⁴ Komponenterna T_x (kraft i skivans plan i x-riktningen), T_y (kraft i skivans plan i y-riktningen), T_{xy} (skjuvkraft i skivans plan), M_x (böjning kring y-axeln med utbredning längs x-axeln), M_y (böjning kring x-axeln med utbredning längs y-axeln), M_{xy} (vridande moment), N_x (tvärkraft i tjockleksriktningen med utbredning längs x-axeln) och N_y (tvärkraft i tjockleksriktningen med utbredning längs y-axeln).

4.3.7.7 Delaminering av inneslutningsskalet

Från rapporterade skadefall internationellt, se till exempel [67], [29] och [120], har det visats att det under vissa förutsättningar kan finnas risk för delaminering av reaktorinneslutningens betongskal. Den första referensen redovisar de två första delamineringsfallen i USA för inneslutningsdomen och den andra för ett motsvarande fall i Indien. Den tredje referensen redovisar det första fallet med delaminering i cylinderväggen.

En bidragande orsak till möjlig delaminering (men ej den enda, andra samverkande orsaker har varit fallet) är att de avläkningskrafter som uppstår för krökta spännkablarna ger upphov till dragkrafter i skalets tjockleksriktning, se Figur 4.12. Ett sätt att förhindra möjligheten för uppkomst av delaminering är att införa armering i tvärsnittets tjockleksriktning. Även om ASME-normen ej formellt kräver detta så har en sådan rekommendation införts i avsnitt 4.3.5 ovan. I detta sammanhang bör noteras att uppspänningsfasen av spännkablarna under byggskedet, eller en eventuell avspänningsfas under anläggningens drifttid till exempel vid utbyte av stora komponenter, kan vara den situation som ger de högsta radiella avläkningskrafterna.



Avläkningskraft respektive dimensionering av armering i tjockleksriktningen, utdrag ur [41]

Figur 4.12: Avläkningskraft från krökt spännkabel.

4.3.7.8 Impuls- och stötlaster, acceptanskriterier

ASME Sec III Div 2 [18] hanterar dimensioneringen för impuls- och stötlaster kortfattat i avsnitt CC-3900. Mer detaljerad information kan i sammanhanget hämtas från ACI 349 [5] vilken ingår i samma normpaket som ASME Sec III Div 2 [18] som ju också är en ACI-norm med beteckningen ACI 359. Hur impuls- och stötlaster ska hanteras och

utvärderas i detalj för antingen global eller lokal respons finns redovisat i många olika publikationer och kommer ej att behandlas närmare här.

Emellertid bör här påpekas att ASME-normen i avsnitt CC-3923 definierar de maximalt tillåtna duktilitetsgränserna som ska innehållas vid dimensioneringen av en reaktorinneslutning på ett inte helt entydigt sätt. Man anger att för impulslaster ska utnyttjad duktilitet ej överskrida en tredjedel av duktiliteten hos konstruktionen vid brott, medan man för stötlaster accepterar att två tredjedelar av duktiliteten vid brott kan utnyttjas. Denna skillnad kan förklaras såsom följer. Eftersom det för en stötlast finns en övre gräns för den energi som tillförs inneslutningen har en säkerhetsfaktor på 1,5 ansetts tillräcklig. För impulslaster å andra sidan kan en måttlig ökning av beräknad lastnivå ge en signifikant ökning av kravet på duktilitet hos konstruktionen. Därför har här säkerhetsfaktorn satts till 3,0.

Problemet är istället att på ett entydigt sätt fastställa "duktiliteten vid brott". Hur ska detta värde definieras för strukturell integritet respektive för upprätthållande av täthetsfunktionen? Detta lämnas utan vidare ledning till den enskilde konstruktören att avgöra.

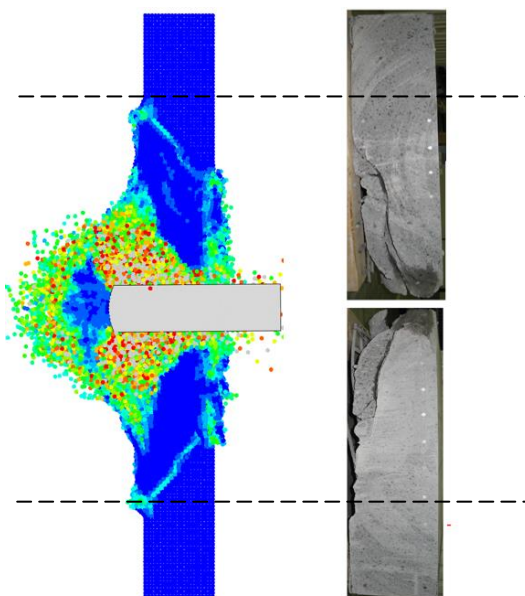
För närvarande pågår ett arbete [2] att först samordna och i framtiden uppdatera och förbättra stöt- och impulslastavsnitten i ASME Sec III Div 2 [18] och ACI 349 [5]. Som ett led i detta arbete har identifierats behovet av att specificera kvantitativa acceptanskriterier och till dessa koppla förväntad skada hos konstruktionen. Tre nivåer på skador ("superficial", "moderate" och "severe") har införts, där den lägsta kopplar till att bibehålla tätheten hos en inneslutning för "service loads" och den andra kan nyttjas till att påvisa tätheten vid "factored loads" och den strukturella integriteten. Den tredje kategorin kan eventuellt användas för andra byggnader vid kärnkraftverk för vilka mycket stora skador kan tillåtas, men ej för reaktorinneslutningen.

4.3.7.9 Impuls- och stötlaster, koppling mellan lokal och global respons

En ytterligare aspekt som bör uppmärksammas vad gäller impuls- och stötlaster är kopplingen mellan lokal och global respons för denna typ av händelser. Den lokala skada som åsamkas den träffade strukturen (betongpanelen) för en stötlast kan också ha en inverkan på strukturens globala respons för en samtidigt verkande impulslast eftersom betongen lokalt kan vara kraftigt demolerad över en ändå ganska stora yta. I avsnitt CC-3931 i ASME-normen påpekas också mycket riktigt att denna effekt ska tas hänsyn till. I samma avsnitt anges hur den lokala skadans utbredning kan bestämmas, den ska ansättas vara det minsta av 10 gånger missilens diameter och 2,76 gånger roten ur väggjockleken angiven i meter. Skadan kan ha inverkan på såväl den träffade betongpanelens hållfasthet som på dess styvhet. Styvheten bestämmer vilka deformationer som den träffade strukturen får. Vad gäller hållfastheten så kan den påverkas dels på grund av skadade armeringsstänger inom missilens direkta träffyta, men också på grund av att armeringens vidhäftning till betongen kan gå förlorad över en större yta motsvarande maximalt det skadade området angivet ovan. Ytterligare försämring av hållfastheten kan uppstå om armeringsskarvar finns inom det skadade området. Nyligen genomförd forskning sammanfattad i [2] visar att skjuvarmering i tjockleksriktningen kraftigt begränsar det skadade området så att kopplingen mellan lokal och global analys i detta avseende troligtvis kan försummas.

Ett problem är att normen ej anger hur stor del av tvärsnittet i tjockleksriktningen som ska antas vara skadat. En lösning på detta vid studie av händelser av större betydelse kan vara att genomföra en olinjär finita elementanalys, diskreta elementanalys eller en kombination av de båda, inkluderande såväl missilen, den träffade strukturen och

impulslasten. En sådan analys visas i Figur 4.13 tillsammans med motsvarande provningsresultat. I figuren ses att för just detta fall är betongen demolerad i det skadade området upp till halva vägg tjockleken.



FE-analys, predikterad skada [41] (vänster), och provningsresultat [72] (höger). Markerad är också den i avsnitt CC-3931 i ASME-normen föreskrivna ytstorleken på skadat område (streckade linjer).

Figur 4.13: Exempel på olinjär finita elementanalys av missil träffande betongpanel.

4.3.7.10 Begränsad plastisk omlagring av framräknade snittkrafter

De snittkrafter som erhålls vid en linjärelastisk analys kan under vissa förutsättningar vid dimensionering i brottgränstillståndet omfördelas med avseende på begränsad plastisk omlagring. Eurokoderna har i avsnitt 5.5 i EC2 [87] beskrivit en förenklad metod för begränsad omlagring. För icke spännarmerade konstruktioner med "normal" armeringsutformning kan en omlagring motsvarande åtminstone 40 % av stödmomentet för till exempel ett kontinuerligt bjälklag accepteras. I ACI 349 [5], som är gällande för kärntekniska anläggningar förutom inneslutningskärlet, anges att maximalt tillåten omlagring är 25 %. Anvisningarna i ACI 349 [5] baseras på de konventionella byggreglerna ACI 318 [6], och inför ändringar och tillägg i den omfattning som är nödvändiga för kärntekniska anläggningar. Anvisningarna i ACI 318 [6] avser i första hand att förenkla dimensioneringen av kontinuerliga bjälklag med någorlunda lika spännvidder i alla fack [74]. I nuvarande utgåva av ACI 349 [5] har man valt att ej ändra på de anvisningar som ges i ACI 318 [6]. Men förnärvarande diskuteras i normkommittén om inte anvisningarna i ACI 318 [6] är för gynnsamma, och om därför en skärpning borde införas i ACI 349 [5] att ej tillåta en så stor omlagring. ASME Sec III Div 2 [18] anger att för inneslutningen bör en linjärelastisk systemanalys tillämpas, dvs. någon omlagring av framräknade snittkrafter kan ej tillgodoräknas.

I avsnitt 6.6.6.1 i DNB [63] anges, i enlighet med intentionerna angivna ovan, att för till exempel den inre strukturen inuti inneslutningen (exklusive den tryckbärande strukturen mellan primär- och sekundärutrymmet i BWR-anläggningar) bör ett elastiskt strukturbeteende i allmänhet eftersträvas, men att en viss plastisk omlagring kan

accepteras. För reaktorinneslutningar anges i DNB [63], i enlighet med ASME-normen, att en sådan omlagring ej är tillåten.

4.3.7.11 Inverkan av tidsberoende effekter

Förväntade tidsberoende effekter ska tas hänsyn till vid dimensioneringen, härvid avses i första hand betongens krympning och krypning samt spännkablar relaxation men även ojämn stödsättning över tiden (se avsnittet "Ojämn sättning" ovan).

Betong och spännkablar tidsberoende effekter är väl kända och hur de ska beaktas är specificerat i detalj i till exempel Eurokoderna. Men eftersom en reaktorinneslutning är en relativt ovanlig konstruktionstyp med relativt tjockt tvärsnitt med en tätplåt på insidan kan det i vissa sammanhang vara befogat att mer detaljerat undersöka betongens tidsberoende effekter. Vidare anges i avsnitt CC-2424 i ASME Sec III Div 2 [18] att för inneslutningens spännkablar krävs att relaxationsegenskaperna fastställs genom provning.

Icke förväntad degradering över tiden ska förhindras genom ändamålsenligt materialval och konstruktionsutformning (se kapitel 3) samt en genomtänkt byggprocess. Det har visat sig via rapporterade skadefall³⁵ att det ofta är en ej upptäckt defekt introducerad redan i byggskedet, eller vid ombyggnation/reparation, som kan ge upphov till accelererad degradering som på sikt kan äventyra inneslutningens funktion, eller att det brustit i materialval, konstruktionsutformning eller byggprocess. Det är ovanligt att degradering utan att någon av de ovan angivna faktorerna skulle ge upphov till kritiska tillstånd i inneslutningskonstruktionen. Istället visar provning genomförd på svenska anläggningar att betongens kvalitet varit mycket god i ostörda områden, se till exempel [45].

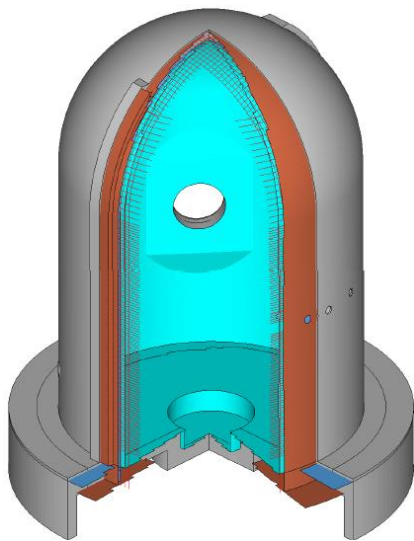
4.3.7.12 Analysmetoder och acceptanskriterier vid DEC

Två av de viktigaste DEC-händelserna vad gäller inneslutningens integritet är tryck- och temperaturökning vid svåra haverier samt, för nya anläggningar, påflygning med stort kommersiellt passagerarflygplan. Båda dessa händelser brukar ofta behöva utvärderas med hjälp av olinjära finita elementanalysmodeller (Figur 4.14).

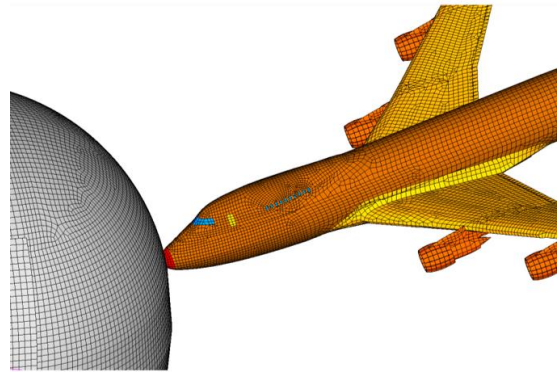
Inneslutningen modelleras då med solidelement för bottenplatta, cylindervägg och dom, dessa element beskriver betongen. Betongen ges en olinjär materialbeskrivning som tar hänsyn till såväl betongtryckbrott som uppsprickning vid dragbelastning. I dessa element inbäddas armering och eventuella spännkablar beskrivna med en- eller tvådimensionella element som också de ges en olinjär materialbeskrivning. Vidare brukar inneslutningens tätplåt ingå i modellen, den är då kopplad till betongelementens insida. Materialmodellen för stålkomponenterna beskriver materialets elasto-plastiska beteende åtminstone bilinjärt samt dess brottegenskaper.

För att genomföra denna typ av olinjära analyser krävs ett stort kunnande och stor erfarenhet för att tillförsäkra att korrekta analysresultat erhålls. Vanligtvis krävs att programvara och analysmodeller men också de metoder som nyttjas vid analys och utvärdering valideras via jämförelser med provningsresultat.

³⁵ För svenska förhållanden se till exempel [92] och [89], för internationell rapportering se till exempel [83].



Global modell (elementlinjer släckta för att öka tydligheten) för tryck- och temperaturökning vid svåra haverier samt för studie av påflygning, från [41]



Påflygning med stort kommersiellt passagerarflygplan: Modellering av flygplan, från [41]. Notera att i många sammanhang beskrivs flygplanet istället med hjälp av en last-tidshistoria.

Figur 4.14: Exempel på olinjära finita elementanalyser för utvärdering av DEC-händelser.

Vad gäller svåra haverier kan vanligtvis lastens (tryck- och temperaturökning) inverkan på strukturen analyseras kvasi-statiskt med den typ av modell som angivits ovan. Samma resonemang som har beskrivits för dimensionerande laster vad gäller global modell kontra lokala modeller (avsnitt 4.3.3) kan även tillämpas för svåra haverier. Rekommendationer och ansatser vad gäller denna typ av analyser ges till exempel i [84], [85], [122] och [119]. Vidare ges följande rekommendationer i avsnitt 5.5.3 i DNB [63] för denna analystyp:

I tillägg till ovan ska, ..., en olinjär finit elementanalys genomföras för att bestämma den yttersta gränslastkapaciteten för inneslutningen. Härvid ska effekten av den förhöjda temperatur som kan förväntas uppkomma vid svåra haverier beaktas för de fall effekten ej kan påvisas vara försumbar. Notera att de töjningskriterier som anges i [122] och [109] avser helt ostört område ("free field"). Om mer detaljerade analysmodeller och utvärderingsmetoder tillämpas kan andra kriterier för brott uppställas. ... De acceptanskriterier som uppställs ska vara förenliga med den analysmodell och de utvärderingsmetoder som används, och med de resultatvärden som utnyttjas. Samtliga möjliga brottmoder bör identifieras och utvärderas.

Vad gäller påflygning så är analysen i högsta grad dynamisk och olinjär. Ytterligare krav på materialmodellering än vad som angivits ovan ställs vid denna typ av analys, både vad gäller beskrivningen av betongen och av de ingående stålkomponenterna (tätplåt, armering, spännkablar, flygplansmotormissil och eventuell flygplanskroppsmissil³⁶). Även den finita elementformuleringen kan behöva justeras. Denna typ av analys ska även inkludera effekten av den koppling mellan lokal och global respons som beskrivs i avsnittet "Impuls- och stötlaster, koppling mellan lokal

³⁶ Notera att i många sammanhang beskrivs flygplanet (flygplanskroppen) med hjälp av en last-tidshistoria tillsammans med en träffyta som varierar över tiden.

och global respons” ovan. Rekommendationer och ansatser för utvärdering av påflygning med stort kommersiellt passagerarflygplan ges i till exempel [40] och [109].

För denna typ av analyser är det helt nödvändigt att parallellt även genomföra handberäkningskontroller samt jämförande beräkningar baserade på empiriska ekvationer. Se vidare avsnittet ”Validering av finita elementprogramvara och tillhörande analysmodeller” ovan.

Såsom anges i avsnitt 2.2 kan under vissa förutsättningar simuleringar för DEC genomföras nyttjande ”best estimate”-metoder. Det ska emellertid noteras att det samtidigt ställs krav på att inneslutningen, *med tillräckliga marginaler för att ta hänsyn till osäkerheter*, ska kunna motstå de statiska och dynamiska laster som kan uppstå vid svåra haverier. Detta gäller även slussar och öppningar, genomföringar och skalventiler. I avsnitt 5.6.3 i DNB [63] har därför för mycket osannolika händelser angivits att det är till fyllest att vid denna typ av händelser påvisa att kapaciteter i enlighet med gällande dimensioneringsnormer för olyckslast ej överskrids. Men man anger också i DNB [63] att andra tillvägagångssätt kan vara tillämpliga, vilket öppnar för möjligheten att påvisa att till exempel mindre konservativa ansatser ändå skulle vara acceptabelt.

4.3.7.13 Verifiering av befintlig byggnad med identifierad degradering

Om degradering identifieras för en befintlig anläggning kan det vara nödvändigt att genomföra nya dimensioneringsberäkningar med uppdaterad indata som tar hänsyn till degraderingens inverkan på konstruktionens mekaniska parametrar. I CONMOD-projektet³⁷ [45] redovisades bland annat inom vilka formella ramar vad gäller påvisande av säkerhet relaterande till mekaniska parametrar en sådan korrigerad hållfasthetsutvärdering schematiskt skulle kunna gå till. En sammanfattning ges nedan.

För en säkerhetsrelaterad byggnad vid ett kärnkraftverk, såsom reaktorinneslutningen, dimensionerad enligt gällande regelverk finns normalt inbyggt en marginal mellan de påkänningar som verkligen uppstår i konstruktionen för postulerade olyckshändelser och den påkänningsnivå som utgör den kritiska påkänningen ur säkerhetssynpunkt. Den inbyggda marginalen kan bestå av följande delar:

1. Acceptanskriterier enligt gällande regelverk har av myndigheten, standardiseringsorganisation etc. valts med en viss marginal till den säkerhetskritiska påkänningsnivån (”safety margin”);
2. Marginalen mellan de konservatismerna som införts i de beräkningsansatser som ligger till grund för anläggningens nuvarande licensiering, och de krav som uppställts i gällande regelverk (”conservative margin”);
3. Den matematiska modellen som representerar strukturens mekaniska verkningssätt har valts konservativt (”analytical margin”);
4. Laster och lasteffekter har bestämts konservativt (”influence margin”).

Om dessa fyra delar adderas fås den minsta inbyggda marginalen i förhållande till den kritiska säkerhetsnivån, se Figur 4.15. Av dessa delar utgör de tre sista konservatismerna som införts under dimensioneringsprocessen.

³⁷ För en mycket kortfattad beskrivning av CONMOD-projektet [45] se avsnitt 4.4.3.

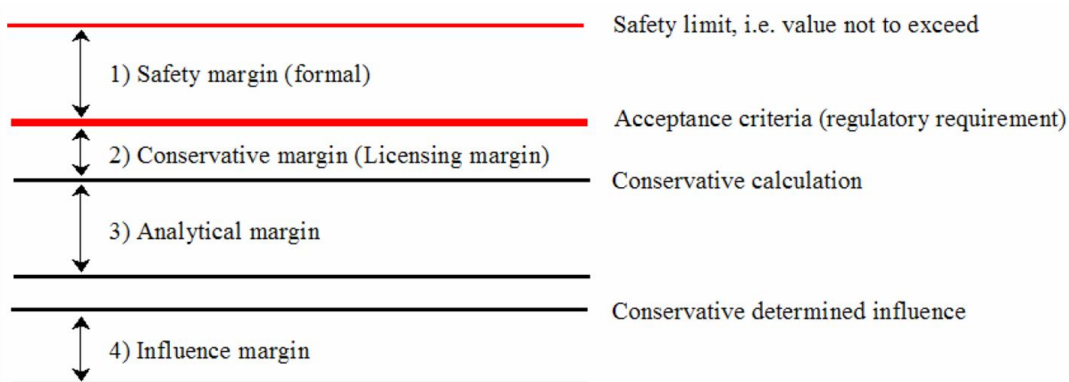
Vid genomförandet av strukturanalyser har de matematiska modellerna valts konservativt, detta på grund av att man i modellen måste göra förenklande antaganden vilka ska väljas på säkra sidan. Även val av materialparametrar, randvillkor och laster/lasteffekter kan introducera konservatism. Ju mer förenklingar desto enklare blir dimensioneringsarbetet men samtidigt ökar risken för att fler och fler konservatismers byggs in.

Om mer avancerade analyser genomförs kan konservatismen i olika led plockas bort. Denna reduktion i konservatism kan utnyttjas vilket visas schematiskt i Figur 4.16 (för visat fall en ökning av kapaciteten med 15 %).

Om strukturen har en defekt i ett kritiskt område (se avsnitt 4.4) kan detta medföra att säkerhetshöjande åtgärder måste genomföras, se Figur 4.17a. Å andra sidan, om defekten inte är placerad i ett kritiskt område kan det vara så att påkänningsnivån ändå inte blir kritiskt trots defekten, se Figur 4.17b.

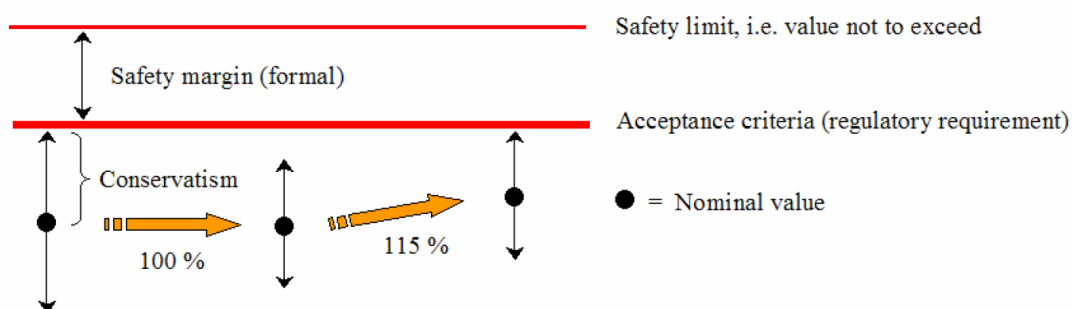
Om defekten är placerad i ett kritiskt område kan man utnyttja vad som visades i Figur 4.16, nämligen att konservatismerna kan minskas via till exempel mer avancerade analyser, och då eventuellt kunna påvisa att konstruktionen trots defekter är acceptabel utan ändringar (Figur 4.17c).

Deterministic approach



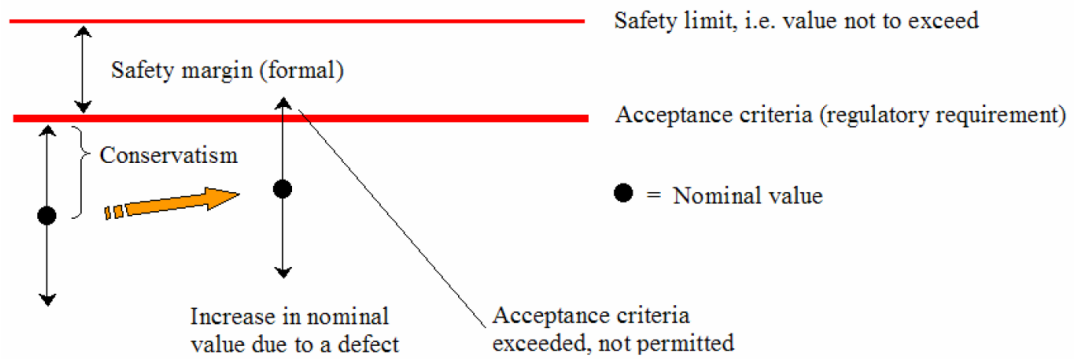
Figur 4.15: Exempel på marginaler vid en dimensionering, från [45].

More advanced calculations

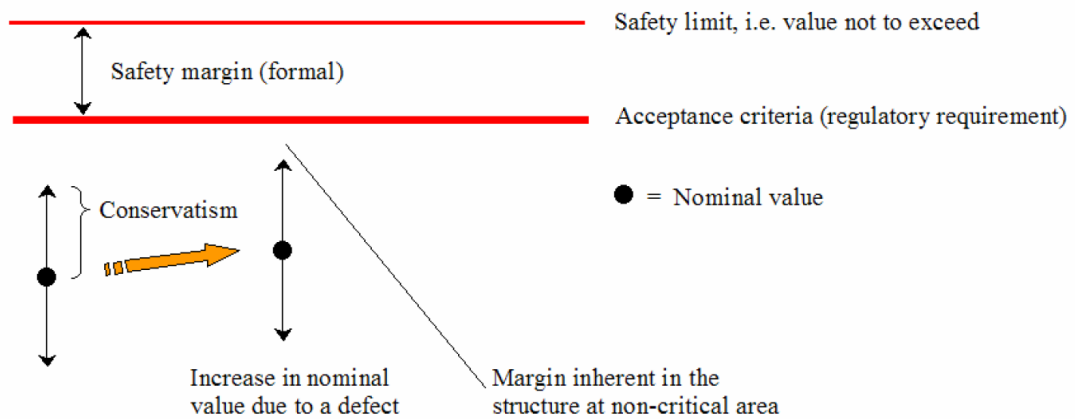


Figur 4.16: Exempel på effekten av minskad konservatism om mer avancerade analyser nyttjas till exempel vid verifiering av en befintlig byggnad, från [45].

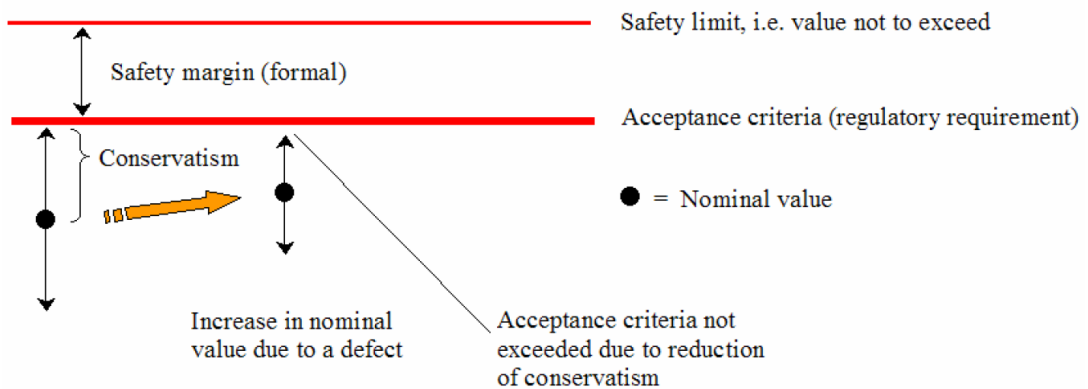
Defect at critical area



Defect at non-critical area



Defect at critical area, reduced conservatism



Figur 4.17: Exempel på effekt av en defekt i kritiskt område a), icke kritiskt område b) och kritiskt område med reducerad konservatism c), från [45].

4.4 Kritiska områden

4.4.1 Inledning

För säkerhetsrelaterade byggnadskonstruktioner vid ett kärnkraftverk kan man för att begränsa erforderlig arbetsinsats såväl vid verifiering av befintliga byggnader som vid dimensionering av nya anläggningar välja att genomföra kontrollen av att acceptanskriterier är uppfyllda för ett begränsat antal utvalda kritiska områden. Hur dessa områden ska väljas skiljer sig något åt om man har att göra med en verifiering av en befintlig byggnad eller om man dimensionerar en ny anläggning. I följande avsnitt ges exempel på hur kritiska områden kan identifieras för såväl befintliga byggnader som för nya anläggningar. Exempelen baseras på två genomförda projekt.

För nya anläggningar (AREVA [86]) baseras valet av kritiska områden primärt på viktighetsgrad, utnyttjandegrad inkluderande förväntade åldringsprocesser och ingenjörsmässiga bedömningar. För befintliga anläggningar (CONMOD [45]) ingår samma selekteringsprocesser som för nya anläggningar ovan men det tillkommer kritiska områden baserat på dels var risken för oförväntade åldringsprocesser, degradering och defekter är störst, dels på var de kan ha störst negativ inverkan på inneslutningens funktion.

Föreliggande rapport behandlar reaktorinneslutningar samt den inre strukturen inuti inneslutningen, men de redovisade metoderna kan användas för alla typer av säkerhetsrelaterade byggnader vid ett kärnkraftverk.

4.4.2 Nya anläggningar

I samband med ansökningsprocessen för att få nya reaktortyper godkända för uppförande i USA ska ansökaren identifiera kritiska områden för vilka viktiga analysresultat ska redovisas. Urval och antal kritiska områden ska då väljas på ett sådant sätt att en väsentligen fullständig dimensionering ur säkerhetssynpunkt erhålls. Normalt utgörs kritiska områden av kritiska tvärsnittssektioner igenom bärande konstruktionsdelar. Hur ett sådant urval ska genomföras är upp till ansökaren att definiera och därefter redovisa vilka kritiska områden som valts. Något enhetligt angreppssätt har ej kunnat urskiljas vid studie av de ansökningar som tidigare har sänts in till USNRC³⁸. Normalt har valet av kritiska områden huvudsakligen baserats på ingenjörsmässiga bedömningar av erfarna konstruktörer och på ad hoc-procedurer.

AREVA har tagit fram en metod för hur de kritiska områdena kan identifieras och väljas på ett mer systematiskt sätt, detta i samband med deras licensiering av anläggningstypen U.S. EPR i USA. Det ska emellertid noteras att även med denna metod så måste ett antal av de kritiska områdena ändå bestämmas baserat på ingenjörsmässiga bedömningar. Nedan sammanfattas deras metodik på ett generellt plan baserat på vad som redovisas i [86].

Generellt utgörs kritiska områden av delar av individuella byggnadsstrukturer (väggskivor, bjälklag, takkonstruktioner, förankringskonstruktioner osv.) som krediteras för att förhindra eller mildra konsekvenserna av konstruktionsstyrande händelser, eller som vid sådana händelser förväntas att utsättas för de största påkänningarna, eller som på annat sätt behövs för att erhålla en väsentligen fullständig dimensionering.

³⁸ United States Nuclear Regulatory Commission.

Först grupperas byggnaderna utifrån om de är placerade på samma gemensamma bottenplatta eller om de är grundlagda fristående från varandra. Detta för att man vanligtvis genomför en gemensam strukturanalys för de byggnader som är placerade på samma bottenplatta, dvs. byggnaderna utvärderas med hjälp av en gemensam beräkningsmodell där alla byggnader ovan bottenplattan ingår. Vad gäller inneslutningen och den inre strukturen inuti inneslutningen är de för nya anläggningar vanligtvis placerade på en stor gemensam bottenplatta under hela reaktorbyggnaden och andra anslutande byggnader. För befintliga anläggningar kan emellertid dilatationsfogar finnas i bottenplattan mellan inneslutningen och omkringliggande byggnader.

Efter det att ovanstående gruppering gjorts genomförs selekteringsprocessen genom att identifiera kritiska områden inom följande tre kategorier:

- Kategori 1. Kvalitativt urval av kritiska områden (dvs. baserat på säkerhetsfunktioner);
- Kategori 2. Kvantitativt urval av kritiska områden (dvs. baserat på snittkraftsfördelning);
- Kategori 3. Kompletterande kritiska områden (dvs. baserat på ingenjörsmässiga bedömningar).

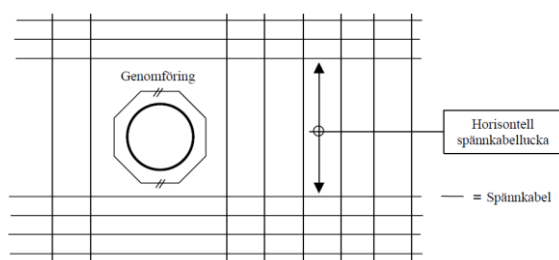
Dessa kategorier beskrivs i följande avsnitt.

Kategori 1: Kvalitativt urval av kritiska områden

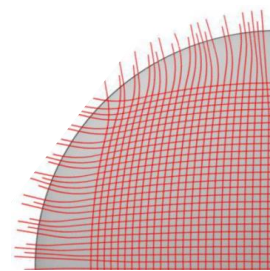
Detta steg tillämpas för de byggnadsstrukturer som tillgodoräknas vid en dimensionerande olyckshändelse för att skydda personal och allmänheten med hjälp av fysiska barriärer, eller som om de ej fungerar äventyrar funktionen hos säkerhetssystem som krediteras under eller efter olycksförloppet. De kritiska områdena i denna kategori inkluderar exempelvis de delar av byggnadsstrukturen som utgör upplag för, som utgör skydd av, eller som utgör någon av de fysiska barriärerna för inneslutande av radioaktivitet (se avsnitt 2.1). Här ingår inneslutningen samt delar av den inre strukturen inuti inneslutningen. Baserat på varje byggnadsdel unika och specifika funktion kan varje byggnadsstruktur sedan brytas ned i mindre delar vilka utgör ett kritiskt område. Exempel på sådana kritiska områden är:

- Inneslutningen
 - Betongtvärsnitt
 - Typisk del av takplatta/kupol och eventuell ringbalk;
 - Typisk del av cylinderväggen;
 - Eventuella spännkabelklackar och spännkabelförankringar;
 - Typisk anslutning av inneslutningsväggen till bottenplattan;
 - Typisk del av inneslutningens bottenplatta;
 - Anslutning till större kupoler, slussar och öppningar.
 - Stålkomponenter
 - Kupoler, slussar och öppningar;
 - Typisk del av tätplåten;
 - Tätplåtens anslutning till större kupoler, slussar och öppningar;

- Tätplåtens anslutning till större förankringsplattor.
 - Övrigt
 - Områden där placeringen av spännkablar indikerar att effekten av spännkraft ej blir isotropisk. Exempel (se Figur 4.18): De spännkabellockor som finns vid vissa befintliga anläggningar i höjd med större öppningar eller de områden i domen som har spännkablar endast i en riktning om inte ringkablar anordnas i den nedre delen av domen.
- Inre strukturen inuti inneslutningen
- Reaktortankupplaget;
 - Typisk del av biologiska skärmen;
 - Typiska delar för tryckbarriär mellan primär- och sekundärutrymmet (BWR);
 - Typisk del av den inre strukturens bottenplatta inuti inneslutningen.
- Övriga delar
- Typiska delar av väggar och bottenplattor i bränslebassänger;
 - Typisk del av bränslebassängers tätplåt.



Elevation av del av inneslutningens cylindervägg. Spännkabellocka vid större genomföring.



En fjärdedel av inneslutningsdomen sedd uppifrån: Spännkabel-arrangemang utan ringkablar i nedre delen. Detta ger fyra zoner med spännkablar endast i en riktning.

Figur 4.18: Exempel på områden där placeringen av spännkablar indikerar att effekten av spännkraft ej blir isotropisk.

I detta urval ingår till viss del implicit att hänsyn tas till bedömd snittkraftsfördelning i olika områden, även om ett sådant kriterium formellt tillhör kategori 2.

Kategori 2: Kvantitativt urval av kritiska områden

Genom en noggrann utvärdering av snittkrafter erhållna vid detaljerade strukturanalyser av byggnaderna med hjälp av finita elementmodeller identifieras mest påkända områden baserat på framräknad snittkraftsfördelning. Notera att man här ej tar hänsyn till konstruktionens tvärsnittshöjd och armeringsinnehåll utan endast till storleken på snittkrafterna. Snittkrafterna i de finita elementen extraheras från FEA-modellen och sorteras automatiskt efter vissa kriterier så att de element med störst³⁹

³⁹ Med störst värde avses största absolutbelopp av framräknad snittkraft eller armeringsdimensionerande snittkraftskomponent. Beroende på

snittkrafter identifieras. Selektionsprocessen för att identifiera kritiska områden genomförs i följande steg:

- Steg 1: Den specifika byggnaden eller byggnadsdelen att utvärdera identifieras;
- Steg 2: Tillämpliga lastkombinationer identifieras;
- Steg 3: Snittkrafter⁴⁰ per längdenhet längs med varje elements mittlinje i ett kartesiskt koordinatsystem (x-y) extraheras för alla element i studerad byggnadsdel. Detta görs för alla de identifierade lastkombinationerna;
- Steg 4: Alla element för väggar och bjälklag sorteras i fallande ordning för respektive snittkraft;
- Steg 5: För varje lastkombination identifieras element i väggar och bjälklag med störst armeringsdimensionerande snittkraftskomponent⁴¹. Denna process upprepas tills alla lastkombinationer har gått igenom varvid en delmängd av potentiella kritiska element har erhållits⁴²;
- Steg 6: Delmängden med potentiella kritiska element reduceras ytterligare genom att dubletter av element för varje typ av armeringsdimensionerande snittkraftskomponent tas bort. Det som sedan återstår är en uppsättning unika styrande kritiska element;
- Steg 7: De kritiska elementen plottas i modellen för respektive byggnadsdel. Genom att successivt ta bort de kritiska element med lägst armeringsdimensionerande snittkraftskomponenter utkristalliseras inom vilka områden som de gränssättande kritiska elementen är lokaliserade. Dessa områden utgör de kritiska områdena enligt kategori 2.

För inneslutningen belastad med ett inre övertryck kan följande generella exempel på denna typ av kritiska områden ges:

- Områden med stora deformationer, vilket ger höga dragpåkänningar;
- Områden med förhindrad möjlighet till deformation, vilket ger upphov till moment och tvärkraft;
- Diskontinuiteter och singulariteter;

Notera att vissa av de kritiska områdena som identifieras med ovan beskrivna metod kan sammanfalla med områden tillhörande kategori 1.

konstruktionsutformningen kan det vara nödvändigt att hålla reda på i vilken riktning kraften verkar, dvs. vilket tecken den har.

⁴⁰ I denna redovisning av metoden fokuseras på skalelement med de 6 snittkraftskomponenterna T_x (kraft i skivans plan i x-riktningen), T_y (kraft i skivans plan i y-riktningen), T_{xy} (skjuvkraft i skivans plan), M_x (böjning kring y-axeln med utbredning längs x-axeln), M_y (böjning kring x-axeln med utbredning längs y-axeln), M_{xy} (vridande moment), N_x (tvärkraft i tjockleksriktningen med utbredning längs x-axeln) och N_y (tvärkraft i tjockleksriktningen med utbredning längs y-axeln).

⁴¹ Armeringsdimensionerande snittkraftskomponenter beräknas med hjälp av erhållna snittkrafter, se till exempel [81].

⁴² Detta förutsätter att konstruktionsdelar har en konstant tjocklek, vilket ej framgår av [86]. En annan metod är att istället antingen studera dragkrafter i armeringslagrat vilket innebär att konstruktionens tjocklek även beaktas, eller att studera utnyttjandegrader där tjocklek såväl som armeringsinnehåll beaktas (se avsnitt 4.4.3).

Kategori 3: Kompletterande kritiska områden

I tillägg till de kritiska områden som tillhör kategori 1 och kategori 2 identifieras ytterligare områden baserat på en genomgång av byggnadskonstruktionerna och ingenjörsmässiga bedömningar. Fem olika typer av kritiska områden utgör huvuddelen av de områden som faller inom denna kategori:

- Säkerhetspåverkande områden
 - Områden som är säkerhetspåverkande men som ändå inte tillhör kategori 1.
- Områden som förväntas få stora påkänningar
 - Områden som via till exempel inspektion eller baserat på tidigare erfarenhet från liknande konstruktioner förväntas få stora påkänningar.
- Områden med exceptionell geometri
 - Områden med exceptionell geometri såsom stora diskontinuiteter, oregelbunden geometri och stora öppningar.
- Unika eller ovanliga konstruktionslösningar
 - Konstruktionslösningar som är unika eller ovanliga och därmed skiljer sig från övriga delar samt konstruktionslösningar som är mycket utmanande och besvärliga att analysera, dimensionera och tillverka.
- Spatial fördelning av kritiska områden
 - Vid framtagning av kritiska områden enligt kategori 1 och kategori 2 kan det bli så att stora ytor hos de studerade byggnadskonstruktionerna ej kommer att innehålla något kritiskt område. Eftersom de kritiska områdena ska medföra att en väsentligen fullständig dimensionering erhålls kan kompletterande kritiska områden behöva läggas in på "tomma ytor" för att erhålla en rimlig spatial fördelning av områden för vilka en strukturell verifiering genomförs.

Slutligen måste konstruktören förutsättningslöst tänka igenom om något ytterligare kritiskt område kan behöva adderas till listan över områden att studera.

4.4.3 Befintliga byggnader

Vid en verifiering av befintliga byggnader kan kritiska områden enligt kategorierna 1, 2 och 3 enligt avsnitt 4.4.2 tillämpas. Den av AREVA i avsnitt 4.4.2 redovisade processen för kategori 2 kan då förfinas ytterligare, till exempel genom att justera utvärderingen av kritiska element så att den istället för att baseras på snittkrafter baseras på utnyttjandegrader. En sådan process kan automatiseras med hjälp av script eftersom väggars och bjälklags tjocklekar redan finns definierade i den finita elementmodellen. Information om generellt armeringsinnehåll och materialkvaliteter hos olika grupper av byggnadsdelar måste emellertid då införas i analysmodellen.

I vissa utvärderingar av befintliga byggnader kan även inverkan av eventuella oförväntade åldrings- och degraderingsprocesser ingå. Urvalet av kritiska områden blir då mer komplex. I CONMOD-projektet [45] har beskrivits en metodik för att kombinera oförstörande provning med finita elementanalyser för att utgöra ett hjälpmedel vid utvärderingen av aktuell kondition hos en befintlig reaktorinneslutning och vid beslut om och när eventuella åtgärder behöver genomföras i de fall aktuell

eller bedömd framtida kondition ej anses vara tillfyllest. Som en del av CONMOD-projektet utvecklades en metodik för att bestämma kritiska områden, kopplade till såväl strukturanalyser som inspektion och provning. Nedan sammanfattas "CONMOD-metodiken" för identifiering av kritiska områden.

Syftet med CONMOD-metodiken är att med hjälp av inspektion och provning av inneslutningen skapa sig en *profil* av den befintliga betongkonstruktionen som sedan används för att konstruktivt utvärdera inneslutningens förmåga att uppfylla sin barriärfunktion (täthet och bärförmåga). Alla faktorer som relaterar till konstruktionens geometri, detaljutformning, nuvarande kondition och åldrandeprocesser utgör tillsammans konstruktionens profil. Konstruktionens profil beskriver alltså

- Konstruktionens överensstämmelse med ritning;
- Konstruktionens kondition och kvalitet samt;
- Pågående åldrande- och degraderingsprocesser.

Det är ej praktiskt möjligt att undersöka alla delar av en inneslutningskonstruktion för att fastställa dess profil i alla områden. Istället måste inspektion och provning fokuseras till kritiska områden. En metodik för att fastställa kritiska områden togs därför fram inom CONMOD-projektet att användas i en interaktiv process där analyser och provning samverkade i flera steg. Följande metoder för att identifiera kritiska områden i olika skeden av den interaktiva processen identifierades:

- Genom FE-analyser fastställs inneslutningens nominella säkerhetsnivåer (i olika positioner) vad gäller säkerhetsfunktionerna täthet och bärförmåga;
- Genom FE-analyser identifieras de mest ansträngda områdena (svaga delar);
- Områden som är typiska generellt för strukturen identifieras;
- En översyn görs av detaljlösningar för att identifiera kritiska områden (avseende strukturellt beteende).

De fyra ovanstående metoderna, även om ej lika detaljerat specificerade, kan sägas motsvara vad som ingår i kategorierna 1-3 beskrivna i sektion 4.3.2 ovan för nya anläggningar. Dvs. de avser den nominella strukturen såsom den anges på ritning, utan hänsyn tagen till ej förväntade åldrandeprocesser, degradering eller defekter.

- Inverkan av åldrande såsom krympning och krypning i betongen samt relaxation i spännkablar baserat på teoretiska modeller;
- Genomgång av byggmetoder, detaljlösningar, driftshistorik och resultat från genomförda rutinmässiga provningar och inspektioner inklusive täthetsprovningar samt om sådana har genomförts speciella provningar och inspektioner.

De två ovanstående metoderna har till syfte att dels identifiera områden för vilka defekter kan ha uppstått redan i byggskedet eller områden där degradering kan pågå, dels att identifiera områden som är extra känsliga för eventuella defekter eller degraderingsprocesser.

- I FE-analyser utvärderas hur aktuell kondition fastställd genom för ändamålet planerad provning inkluderande identifierade ej förväntade åldrings- och degraderingsprocesser och defekter påverkar inneslutningens säkerhetsnivåer;

- Med hjälp av teoretiska modeller och uppföljningsmätningar predikteras inneslutningens framtida säkerhetsnivå vid kritiska tidpunkter med hänsyn tagen till identifierade åldrings- och degraderingsprocesser och defekter.

De två ovanstående punkterna tar hänsyn till nuvarande och bedömd framtida kondition hos konstruktionen vilket kan nyttjas för att omvärdera valet av kritiska områden.

Förutom de exempel på kritiska områden som listas under kategori 1 och 2 i avsnitt 4.4.2 för inneslutningen, den inre strukturen inuti inneslutningen samt övriga delar ges nedan exempel på andra möjliga kritiska områden för inneslutningen:

- Områden med högt armeringsinnehåll som försvårar gjutning;
- Områden där annan konstruktionsdel (exempelvis tätplåt) motgäts där svårigheter kan finnas för betongen att helt fylla ut hela det planerade utrymmet, till exempel vid en lutande nedre del av cylinderväggen vid anslutning mot bottenplattan;
- Områden som av andra orsaker är svåra att tillverka, utföra eller montera;
- Områden där tillfälliga arrangemang under byggprocessen måste återställas för att en acceptabel slutlig konstruktion ska erhållas;
- Områden för vilken det kan misstänkas att reaktiv ballast kan ha använts, skadliga alkali-silikareaktioner kan då uppstå;
- Högpunkter vid injektering av spännkablar;
- Högpunkter vid injektering kring genomföringar, öppningar och slussar;
- Områden där det för kritiska stålkomponenter (exempelvis tätplåten) finns risk för att korrosiv miljö kan uppstå;
- Undergjutning av horisontell eller lutande tätplåt i botten- eller takplatta eller i till dessa anslutande områden;
- Områden till vilka man kan identifiera förhöjt läckage under täthetsprovning;
- Områden där man identifierat icke förväntat läckage av vatten;
- Områden med icke förväntad omfattning av uppsprickning vid provtryckning;
- Områden med icke förväntad omfattning av deformationer vid provtryckning;
- Områden med icke förväntad omfattning av töjning vid provtryckning;
- Områden som vid inspektion identifieras ha icke förväntad omfattning av uppsprickning eller annan typ av skada eller icke förväntade förändringar;
- Anomalier som finns registrerade under byggprocessen;
- Anomalier som finns registrerade under alla typer av driftsskeden och driftstillstånd;
- Anomalier som finns registrerade vid rutinmässig planerad inspektion och provning;
- Anomalier som finns registrerade vid för specifika ändamål och orsaker planerad inspektion och provning (här avses såväl sedan länge planerade insatser som eventuella mer akuta insatser);
- osv.

5. Provning

5.1 Inledning

I detta kapitel redovisas en sammanfattning av konventionella provningar som idag genomförs för reaktorinneslutningar med tillhörande monitorering samt permanent monitorering för bedömning av vissa tidsberoende effekter. Ett annat område i detta sammanhang är provningar vad gäller bedömning av oförväntade åldrandeprocesser, defekter och degradering, där till exempel oförstörande provning av inneslutningens betongkonstruktioner är en viktig del. Denna typ av provning behandlas ej i föreliggande rapport, men ett pågående forskningsprojekt inom detta område (CONSAFESYS) kommer att slutrapporteras under 2015 av författarna till föreliggande rapport. Tidigare svenska utredningar inom detta område inkluderar CONMOD-projektet [45] samt utredningar från SSM [93], [101] och Elforsk [35], [36]. Inom ramen för det pågående CONSAFESYS-projektet har en delrapportering genomförts under 2014 [28], [83].

5.1.1 Generellt om de lagstadgade kraven i U.S. NRC 10 CFR [112]

Nuclear Regulatory Commission (NRC) är ett oberoende organ inom USA:s regering. NRC är en tillsynsmyndighet för, bland annat, övervakning av reaktorsäkerhet och för licensiering av kärnkraftreaktorer.

I U.S. NRC Title 10, CFR [112], Part 50 - Tillstånd för produktion och användning av anläggningar, så står det i avsnitt 50.34 att det ska visas att inneslutningen har förmåga att motstå tryck som uppgår till 1.10 och 1.15 gånger (respektive för stål- och betonginneslutningar) det tryck som beräknas uppstå vid inpumpande av en inert gas.

Vidare så står det i avsnitt 50.54 att den primära inneslutningen i vattenkylda reaktorer ska möta de krav som specificeras i appendix J till kapitel 50 i [112].

Appendix J i [112] erbjuder två alternativa tillvägagångsätt för att möta de krav som specificeras:

1. Option A: Föreskrivande krav;
2. Option B: Prestandabaserade krav.

Vidare så omfattar Appendix J i [112] följande gällande inneslutningstester:

- Krav på läckagetester:
 - Typ A-test (mätning av den primära inneslutningens läckage);
 - Typ B-test (upptäcka och mätning av läckage vid genomföringar och slussar i den primära reaktorinneslutningen);
 - Typ C-test (mätning av läckage i skalventiler);
- Schema för periodisk inspektion;
- Speciella krav på tester:
 - Vid modifiering av inneslutningen;
 - För inneslutningar med multipla läckagebarriärer;
- Inspektion och testrapportering:

- Inspektion av inneslutningen;
- Rapportering av testresultat.

Enligt avsnitt III.A.3 i Appendix J i [112], för Option A, gäller att Typ A-tester skall utföras i enlighet med bestämmelserna i ANSI N45.4-1972 [12]. Metoderna i [12] för att beräkna läckagehastighet kompletteras i Appendix J i [112] med ytterligare en metod: "Mass Point Method". I Appendix J i [112] hänvisas till ANSI/ANS-56.8-1987 [14] för en beskrivning av metoden. För Option B hänvisas till U.S. NRC RG 1.163 [123] för vägledning av hur Typ A-tester skall utföras.

Enligt [103] infördes Option B i [112] på grund av att bara ett fåtal läckage avslöjats med Option A. Enligt avsnitt III.D i 10 CFR 50 Appendix J [112], för Option A, gäller att tre stycken Typ A-tester skall utföras vid ungefärligt jämna intervaller inom varje 10-årsperiod efter det att testerna innan drifttagning är utförda. Enligt U.S. NRC RG 1.163 [123] skall testintervallerna för Option B fastställas enligt specifikationerna i NEI 94-01 [70]. Enligt [70] kan, baserat på testhistorik, frekvensen för Typ A-tester minskas från 3 tester på 10 år till minst 1 test på 15 år.

5.1.1.1 Notiser angående referenser i Appendix J i [112]

För Option A

Som nämns i avsnittet ovan, så specificeras i Appendix J i [112], att Typ A-tester skall utföras i enlighet med bestämmelserna i ANSI N45.4-1972 [12]. Industristandarden ANSI N45.4-1972 togs fram med sponsring av American Nuclear Society (ANS).

För att inbegripa erfarenheter från inneslutningsprovningar och utvecklingen av provningsteknologin så återutgavs ANSI N45.4-1972 som ANSI/ANS-56.8-1981 [13].

Oak Ridge National Laboratory (ORNL) tog fram en rapport, NUREG/CR-3549 [71], med syfte att fungera som underlag för NRC i NRC:s process att eventuellt revidera Appendix J till att referera till ANSI/ANS-56.8-1981 istället för N45.4-1972. Slutsatserna i NUREG/CR-3549 konstaterar att det finns direkta konflikter mellan ANSI/ANS-56.8-1981 och Appendix J. Vidare står det i NUREG/CR-3549 att Appendix J troligtvis inte kommer att referera direkt till ANSI/ANS-56.8-1981.

För Option B

Som nämns i avsnittet ovan, så specificeras i Appendix J i [112], att Typ A-tester skall utföras i enlighet med bestämmelserna i U.S. NRC RG 1.163 [123].

U.S. NRC RG 1.163 hänvisar, med ett antal undantag, till NEI 94-01 [70] som i sin tur, med specifika ändringar, hänvisar till ANSI/ANS-56.8-1994 [15].

För att eliminera behovet av att referera till tre st. olika dokument ([123], [70] och [15]), så utgavs ANSI/ANS-56.8-2002 [16] som slår samman riktlinjerna för provning enligt Option B till ett dokument. Se även avsnitt 5.1.3 nedan.

5.1.1.2 Svenska kärnkraftverk

Enligt avsnitt 6.1 i SKI-rapporten 02:58 [89], så baseras tryck- och läckagetester av svenska inneslutningar på den provningsmetodik, frekvens och omfattning som specificeras i det amerikanska regelverket 10 CFR 50 Appendix J [112].

I Sverige har det utretts om Option B kan tillämpas istället för Option A för svenska anläggningar, se [103] och avsnitt 5.1.1 ovan. Dock finns vissa avgörande skillnader mellan svenska och amerikanska kärnkraftverk (se [103]):

- Tätplåten i de amerikanska reaktorinneslutningarna är frilagd medan i de svenska inneslutningarna är den ingjuten i betong;
- Tätplåten i amerikanska inneslutningar är åtkomlig för visuell inspektion, vilket är omöjligt för svenska reaktorinneslutningar;
- Hälften av de dokumenterade skadorna av läckagekaraktär på svenska reaktorinneslutningar (6 stycken) upptäcktes i samband med tillämpningen av option A och resten vid visuella inspektioner;

Slutsatsen av utredningen är, enligt [103], att de svenska reaktorinneslutningarnas konstruktion och den svenska skadestatistiken inte styrker en övergång från Option A till Option B.

5.1.2 Generellt om standarden ANSI N45.4-1972 [12]

American National Standards Institute (ANSI) är en amerikansk standardiseringsorganisation. American Nuclear Society har sponsrat framtagandet av ANSI N45.4-1972 [12], "Leakage-Rate Testing of Containment Structures for Nuclear Reactors". Dokumentet är en amerikansk nationell standard och refereras till i Appendix J i U.S. NRC 10 CFR [112], se avsnitt 5.1.1 ovan.

I ANSI N45.4-1972 [12] definieras en läcka som en öppning i inneslutningen som släpper igenom en fluid och som är detekterbar genom användandet av beskrivna metoder. Läckage definieras som den mätbara mängd fluid som passerar genom en läcka. Läckagehastighet definieras som det läckage som uppträder under en specificerad tidsperiod.

ANSI N45.4-1972 [12] omfattar följande gällande läckagetester:

- Förberedelser inför läckagetest;
- Acceptabla metoder för mätning av läckagehastighet;
- Utrustning och instrumentering;
- Testprocedur;
- Testprocedurer för lokala läckagetester;
- Beskrivning av föreslagen metod för verifiering av testets noggrannhet.

Notera att ANSI N45.4-1972 [12] inte omnämner strukturella integritetstester annat än att ett strukturellt integritetstest (trycktest) skall föregå ett läckagetest och att trycktestet måste uppfylla fastställda acceptanskriterier (innan ett läckagetest påbörjas).

Notera att ANSI N45.4-1972 [12] inte specificerar acceptanskriterier för läckagetest, dvs. det fastställs ingen övre gräns för läckagehastigheten. Acceptanskriterierna ska vara stipulerade i specifikationen för den enskilda inneslutningen.

5.1.3 Generellt om standarden ANSI/ANS-56.8-2002 [16]

American Nuclear Society har tagit fram och publicerat ANSI/ANS-56.8-2002 [16], "Containment System Leakage Testing Requirements". Detta dokument är godkänt av ANSI som en amerikansk nationell standard, American National Standard (ANS).

ANSI/ANS-56.8-2002 [16] omfattar följande gällande läckagetester:

- Förutsättningar och krav;

- Instrumentering;
- Testprocedurer;
- Acceptanskriterier;
- Analys av data;
- Inspektion och hantering av testresultat.

Denna standard ger ett underlag för att fastställa läckage genom de primära reaktorinneslutningssystemen för lättvattenkylda kärnkraftverk. ANSI/ANS-56.8-2002 [16] är avsedd att användas med Option B i appendix J i U.S. NRC 10 CFR [112], se även avsnitt 5.1.1.1 ovan.

5.1.4 Generellt om standarden ASME Sec III Div 2 Article CC-6000 [18]

"American Society of Mechanical Engineers" (ASME) är en oberoende icke vinstdrivande organisation i USA som bland annat utvecklat en standard med riktlinjer för design, tillverkning och inspektion av oljepannor och tryckkärl: ASME "Boiler and Pressure Vessel Code" (BPVC). Standarden är av ANSI krediterad som en ANS.

ASME Sec III Div 2 Article CC-6000 [18] är en del av BPVC och omfattar följande gällande strukturella integritetstester för inneslutningar av betong:

- Generella krav;
- Testprocedur;
- Krav gällande det strukturella integritetstestet;
- Evaluering av testresultat inkl. acceptanskriterier.

Notera att det strukturella integritetstestet enbart görs innan drifttagning.

5.1.5 Generellt om IAEA Safety Standards [53], [56], [57]

International Atomic Energy Agency (IAEA) är en internationell organisation med högkvarter i Wien i Österrike och har som uppdrag att främja fredlig användning av kärnenergi inom dess medlemsländer, implementera skyddsåtgärder för att kontrollera att kärnkraften inte används för militära ändamål och att främja en hög standard för kärnsäkerhet.

IAEA Safety Guide NS-G-1.10 [53] innefattar riktlinjer för design av reaktorinneslutningar och omfattar följande gällande strukturella integritetstester och läckagetester av inneslutningen:

- Provning före drifttagning:
 - Strukturellt integritetstest;
 - Integrerade läckagetester;
 - Lokala läckagetester av genomföringar, personalslussar etc.
- Provning under anläggningens drifttid:
 - Strukturella integritetstester;
 - Integrerade läckagetester.

IAEA Safety Guide NS-G-2.6 [56] omfattar följande gällande periodisk inspektion:

- Underhåll, övervakning och periodisk inspektion och deras inbördes förhållande;
- Funktioner, ansvar och gränssnitt;
- Organisatoriska aspekter;
- Implementering av underhålls-, övervaknings- och inspektionsprogram;
- Analys av resultat och återkoppling av erfarenheter;
- Områden där speciella hänsynstaganden krävs;
- Överväganden specifika för underhåll;
- Överväganden specifika för övervakning;
- Överväganden specifika för periodisk inspektion.

IAEA Specific Safety Guide SSG-28 [57] omfattar följande gällande driftsättning:

- Processen för driftsättning;
- Organisation och ledning för driftsättning;
- Implementering av driftsättningsprogrammet;
- Dokumentering för driftsättning.

5.1.6 Generellt om standarden för EPR: AFCEN ETC-C [1]

De franska bolagen AREVA NP (tidigare Framatome) och Electricité de France (EDF) samt det tyska bolaget Siemens AG ingick i ett samarbete för att gemensamt utveckla och dimensionera en tredje generation av tryckvattenreaktorer som fick namnet "European Pressurized Reactor" (EPR) - Europeisk Tryckvattenreaktor. I samband med detta togs det fram en norm för EPR: ETC-C [1].

Kapitel 3 i [1] omfattar följande gällande trycktester av inneslutningen:

- Allmänna bestämmelser;
- Läckagetester:
 - Läckagetester innan drifttagning;
 - Läckagetester vid periodiska inspektioner;
 - Särskilda tester i händelse av allvarliga olyckor;
 - Testrapportering;
- Strukturella integritetstester och tillsyn av inneslutningen:
 - Trycktest innan drifttagning;
 - Strukturella integritetstester vid periodiska inspektioner;
 - Testrapportering;
 - Mätning under byggskedet;
 - Mätning under drift;
 - Experimentell tillsyn;
 - Mätningensinstrument;

- Mätfrekvens.

5.2 Provning före drifttagning

5.2.1 ANSI/ANS-56.8-2002 [16]

ANSI/ANS-56.8-2002 [16] avsnitt 3.2.2 specificerar att den primära inneslutningen ska genomgå följande tester innan drifttagning (i specificerad ordning):

1. Strukturellt integritetstest, "Structural Integrity Test" (SIT);
2. Typ B- och Typ C-test;
3. Integrerat läckagetest, "Containment Integrated Leak Rate Test" (CILRT).

Ett SIT är ett test för att påvisa den primära inneslutningens förmåga att motstå gastrycket när det höjs till ett specificerat dimensioneringstryck.

Ett Typ B-test är ett test där gastrycket höjs för att detektera eller mäta ett eventuellt läckage över tryckhållande eller läckagebegränsande gränser annat än ventiler.

Ett Typ C-test är ett test där gastrycket höjs för att mäta läckage från inneslutningens skalventiler, vilka är potentiella gasläckagevägar från inneslutningen under en designbaserad olyckslast.

Ett CILRT består av följande faser eller aktiviteter:

1. Inspektion av den primära inneslutningen;
2. Trycksättning av det primära inneslutningssystemet;
3. Stabilisering av inneslutningens atmosfär;
4. Utförande av ett Typ A-test;
5. Utförande av ett verifikationstest;
6. Tryckavlastning av den primära inneslutningen.

Ett Typ A-test är ett test för att mäta inneslutningssystemets totala läckage under förhållanden som representerar inneslutningstryck och systemanpassningar vid ett designbaserat olycksfall, "Design Basis Accident" (DBA). Om drifttagningen av reaktorn försenas med mer än 36 månader efter Typ A-testet så skall ett andra Typ A-test utföras innan drifttagning.

Kravspecifikationer är givna i kapitel 3, proceduren för ett CILRT är specificerad i kapitel 5 och procedurerna för Typ B- och Typ C-test är specificerade i kapitel 6 i [16].

De gastryck som specificeras i [16] för de olika trycktesterna presenteras i Tabell 5.1 nedan.

Tabell 5.1: Inneslutningens gastryck vid trycktester [16].

Test	Tryck	Kommentar
SIT	$P = P_d$	-
Typ B	$P \geq P_a$	Om en ökning av trycket (P) resulterar i förhöjd tätning, så gäller att: $P_a \leq P \leq 1.1P_a$
Typ C	$P \geq P_a$	
Typ A	$P \geq 0.96P_a$	Om $P_a \leq 172.33$ kPa så gäller att $P \geq P_a - 6.89$ kPa

Notera att P_d är inneslutningens dimensioneringstryck och att P_a är beräknat maximalt tryck i inneslutningen vid designbaserad olyckslast.

5.2.2 ASME Sec III Div 2 Article CC-6000 [18]

ASME Sec III Div 2 Article CC-6000 [18] avsnitt CC-6100 specificerar att inneslutningen skall trycktestas som en förutsättning för att inneslutningen skall normgodkännas.

Gastrycket för det strukturella integritetstestet specificeras i Tabell 5.2 nedan. Trycket ska hållas vid dimensioneringstrycket i minst en timme.

Tabell 5.2: Inneslutningens gastryck vid initialt trycktest [18].

Test	Tryck	Kommentar
SIT	$P = 1.15P_d$	Om designdifferenstrycket mellan primärutrymmet och sekundärutrymmet ger upphov till spänningar i inneslutningen så skall differenstrycket inkluderas i det strukturella integritetstestet. Differenstrycket skall uppgå till minst 1.0 gånger designdifferenstrycket.

De inneslutningskonfigurationer för vilka kriterierna i [18] är applicerbara specificeras i avsnitt CC-6310 [18] och sammanfattas nedan:

- a) Fristående inneslutningar bestående av en betongcylinder med en dom på toppen. Cylindern står på en bottenplatta av armerad betong. Inneslutningen kan antingen vara konventionellt armerad eller förspänd. Kan vara av typen PWR eller BWR med primärutrymmesstrukturen stödd av bottenplattan och omsluten av inneslutningen;
- b) Betongcylinder stående på en bottenplatta av armerad betong och med en stympad kon av betong på toppen. Toppen av den stympade konen är stängd med en stålkupol. Är av typen BWR. Konen utgör primärutrymmet och cylindern utgör sekundärutrymmet vilka ska var åtskilda med ett mellanbjälklag. Inneslutningen kan antingen vara konventionellt armerad eller förspänd;
- c) Hybridinneslutningar bestående av en mix av konstruktioner av stål och armerad betong;
- d) Övriga typer av inneslutningar med konfigurationer av vertikala och horisontella (inklusive krökta) tryckgränser som inte inbegrips ovan.

En rapport gällande det strukturella integritetstestet skall upprättas där direkta jämförelser mellan uppmätta värden och predikterade värden skall finnas. Eventuella diskrepanser skall förklaras. Minimumkraven för rapporten specificeras i avsnitt CC-6520 [18] och återges nedan:

- a) Beskrivning av testproceduren och instrumenteringen;
- b) Jämförelse mellan uppmätta förskjutningar och töjningar och predikterade värden;
- c) En summering och diskussion av uppmätta sprickvidder;
- d) En evaluering av mätningarnas estimerade noggrannhet;
- e) En evaluering av varje avvikelse, avvikelens disposition och behovet av korrigerande åtgärder.

5.2.3 IAEA Safety Standards [53], [56], [57]

I NS-G-1.10 [53] specificeras att ett strukturellt integritetstest samt ett integrerat läckagetest skall utföras innan drifttagning:

- Strukturellt integritetstest:
 - Ett trycktest skall utföras för att demonstrera den strukturella integriteten hos inneslutningen och dess system;
 - Trycktestet skall utföras med ett tryck som minst uppgår till dimensioneringstrycket;
- Integrerat läckagetest:
 - Läckagetest skall utföras efter det strukturella integritetstestet och utförs för att demonstrera att läckahastigheten understiger den specificerade maximala läckagehastigheten;
 - För att erhålla ett referensvärde för läckage så skall testtrycket väljas så att det är konsistent med de trycktester som görs vid periodiska inspektioner, se Tabell 5.3 nedan.

Tabell 5.3: Inneslutningens gastryck vid trycktester [53].

Test	Tryck	Kommentar
Integritetstest	$P \geq P_d$	-
Läckagetest	$P_{ISI,L} < P < P_d$	Gäller endast om trycket vid läckagetesterna vid periodiska inspektioner understiger dimensioneringstrycket. $P_{ISI,L}$ = Tryck för läckagetester under drifttiden.
Läckagetest	$P = P_d$	Gäller endast om trycket vid läckagetesterna vid periodiska inspektioner är lika med dimensioneringstrycket.

En metod för att fastställa inneslutningens läckagehastighet är absoluta tryckmetoden där läckageflödet bestäms genom att mäta tryckminskningen som funktion av tid. Om

konstruktionen har dubbla inneslutningsväggar och om läckt vatten eller gas inte samlas upp i utrymmet mellan väggarna så kan läckaget fastställas genom beräkningar. Beräkningarna skall fastställa skillnaden mellan:

- a) Den totala läckagehastigheten från den inre inneslutningsväggen vilken fastställs från trycktestet (innehåller både flödet från den inre inneslutningen till det ringformiga utrymmet samt flödet från den inre inneslutningen till atmosfär) och:
- b) Läckagehastigheten från den inre inneslutningsväggen till det ringformiga utrymmet, erhålls efter att ventileringen av det ringformiga utrymmet har stoppats (beräknas vanligen genom att subtrahera det normala flödet från det ringformiga utrymmets ventiler från flödet under läckagetesterna).

I SSG-28 [57] specificeras att driftsättningsprocessen kan delas in i två steg: icke kärnrelaterade tester samt kärnrelaterade tester. I icke kärnrelaterade tester så ingår strukturella integritetstester och läckagetester av inneslutningen.

5.2.4 AFCEN ETC-C [1]

I ETC-C [1] specificeras att följande läckagetester skall utföras före drifttagning:

- Typ A-test: Utförs för att mäta inneslutningens läckagehastighet. Inneslutningens täthet mäts enligt den så kallade "absoluta" metoden vilken går ut på att mäta tryckvariationer i den torra luften i inneslutningen och att korrigera mätvärdena med hjälp av uppmätta variationer i medeltemperatur och luftfuktighet;
- Typ B-test: Lokala trycktester utförs för att bestämma läckagehastigheten vid genomföringar i inneslutningen med tätningar;
- Typ C-test: Lokala trycktester utförs för att bestämma läckagehastigheten vid genomföringar i inneslutningen med skalventiler.

Testsekvensen är 1) Typ B-test 2) Typ C-test och 3) Typ A-test. Trycket i Typ A-testet byggs upp gradvis med tre platåer vid: 0.1 MPa, 0.5 MPa och vid P_a (tryck vid designbaserad olyckslast). Mätningar skall utföras vid varje platå och varje platå ska hållas fram till stabilisering i minst 4 h. Trycktestet skall utföras med inpumpad ren luft som är filtrerad och avoljad och som har relativt låg fuktighet.

Ett strukturellt integritetstest skall utföras i samband med läckagetesterna innan drifttagning. Trycket vid detta test utförs vid normala temperaturförhållanden. För att ta hänsyn till den temperatur som råder vid olyckslast så utförs det strukturella integritetstestet med ett tryck som är 10 % högre än trycket vid designbaserad olyckslast, $P = 1.1P_a$. Trycktestet skall minst bestå av följande trycknivåer:

0 - 0.5 P_a - P_a - 1.1 P_a - P_a - 0.5 P_a - 0

5.3 Provning under anläggningens driftstid

5.3.1 ANSI/ANS-56.8-2002 [16]

ANSI/ANS-56.8-2002 [16] avsnitt 3.2.13 specificerar med vilken frekvens CILRT-testerna ska utföras under inneslutningens livslängd. Avsnitt 3.3.4 i [16] specificerar frekvensen för Typ B- och Typ C-testerna. I Tabell 5.4 nedan presenteras en sammanställning av testfrekvenserna.

Tabell 5.4: Intervaller för trycktester vid periodiska inspektioner [16].

Test	Intervall	Kommentar
Typ A	Inom 48 månader efter det att det senaste Typ A-testet innan drifttagning utfördes.	-
	Efterföljande tester ska utföras med intervaller på 48 månader.	Kan förlängas med upp till 15 månader; se avsnitt 3.2.13.2 i [16]. Om kriterierna specificerade i avsnitt 3.2.1.3.4 [16] uppfylles så kan intervallerna förlängas från 48 månader till 10 år.
CILRT	Lägsta testfrekvens är en gång per 10 år.	Baserat på acceptabel resultathistorik. Kan förlängas med upp till 15 månader; se avsnitt 3.2.13.3 i [16]
Typ B	Inom 30 månader efter det att det senaste Typ B-testet innan drifttagning utfördes.	Kan förlängas med upp till 120 månader; se avsnitt 3.3.4.1 i [16].
	Efterföljande tester ska utföras med intervaller på 30 månader.	Kan förlängas med upp till 120 månader; se avsnitt 3.3.4.1 i [16].
Typ B (specifikt för luftslussar)	Inom 30 månader efter det att det senaste Typ B-testet innan drifttagning utfördes.	Kan förlängas med upp till 25 %; se avsnitt 3.3.4.2 i [16].
	Efterföljande tester ska utföras med intervaller på 30 månader.	Kan förlängas med upp till 25 %; se avsnitt 3.3.4.2 i [16].
Typ C	Inom 30 månader efter det att det senaste Typ C-testet innan drifttagning utfördes.	Kan förlängas med upp till 60 månader; se avsnitt 3.3.4.1 i [16].
	Efterföljande tester ska utföras med intervaller på 30 månader.	Kan förlängas med upp till 60 månader; se avsnitt 3.3.4.1 i [16].

5.3.2 IAEA Safety Standards [53], [56], [57]

I NS-G-1.10 [53] specificeras att periodiska strukturella integritetstest bör utföras under anläggningens drifttid:

- Trycket bör vara det samma som trycket vid det initiala strukturella integritetstestet innan drifttagning;
- I vissa stater i USA utförs strukturella integritetstester vart 10:e år;
- Vid varje strukturellt integritetstest så bör ett läckagetest utföras.

I NS-G-1.10 [53] specificeras att periodiska läckagetester bör utföras under anläggningens drifttid. Trycket skall väljas antingen så att tillräcklig noggrannhet erhålles vid extrapolering av uppmätt läckagehastighet till tryck vid designbaserad olyckslast eller till att uppgå till dimensioneringstrycket.

I NS-G-2.6 [56], gällande trycktester av inneslutningar, specificeras övervakningsåtgärder som är nödvändiga för att kontrollera inneslutningsintegriteten. Dessa inkluderar, men är inte nödvändigtvis begränsade till:

- Läckagetester av inneslutningen;
- Läckagetester av genomföringar i inneslutningen;

- Inspektioner gällande inneslutningens strukturella integritet såsom inspektion av tätplåt och spännkablar;
- Övervakning av förhållandena i inneslutningen såsom temperatur, tryck och atmosfärens sammansättning.

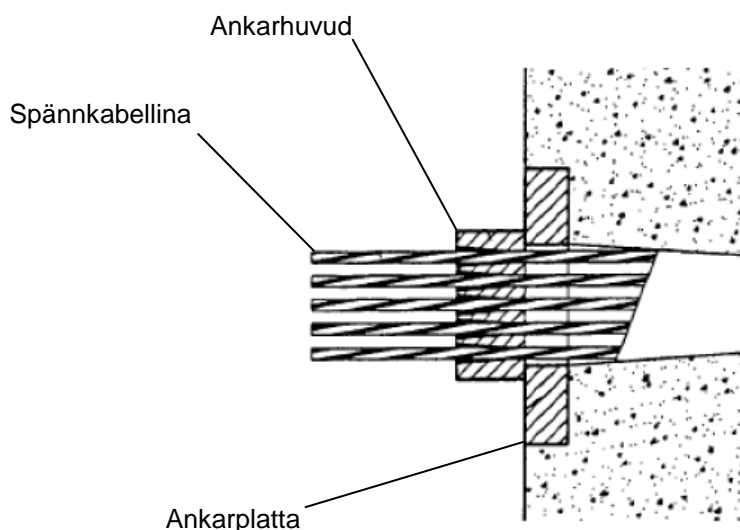
5.3.3 AFCEN ETC-C [1]

Under inneslutningens drifttid ska återkommande trycktester utföras. Varje trycktest ska bestå av ett Typ A-, ett Typ B- och ett Typ C-test. Strukturella integritetstester behöver ej utföras efter det att anläggningen har tagits i drift.

5.3.4 Hantering av åldrandeprocesser

Inneslutningar är ofta spännarmerade för att förhindra dragspänningar i betongen som kan uppstå på grund av inre övertryck vid olyckslaster. För spännarmerade inneslutningar är det följaktligen viktigt att monitorera spännkraftsförlusterna under inneslutningens drifttid för att säkerställa att de understiger de estimerade förlusterna som ligger till grund för designen. Spännkraftsförlusterna är ett resultat av relaxation i spännstålet samt krympning och krypning i betongen, se avsnitt 3.4.3 i föreliggande rapport.

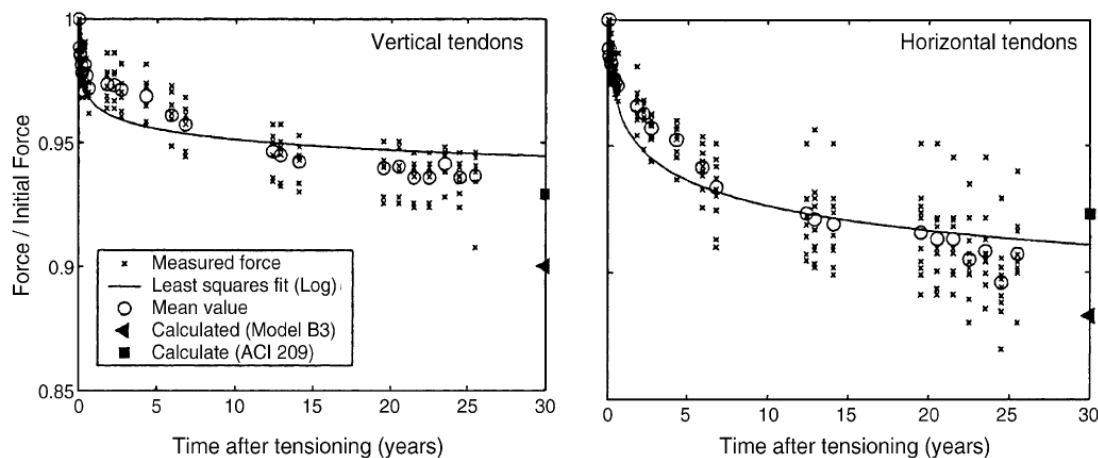
För inneslutningar med spännkablar som inte är cementinjekterade går det att mäta spännkraften direkt i respektive spännkabel med en teknik som heter "lift-off" där en domkraft används för att vid spännkabelförankringen lyfta änden på spännkabeln och mäta den kraft som krävs för att få ankarhuvudet att lämna ankarplattan, se Figur 5.1 nedan. Vissa inneslutningar med cementinjekterade spännkablar har ett antal injekterade spännkablar för att kunna monitorera spännkraften.



Figur 5.1: Schematisk bild av förankring i ett VSL-system. Bild hämtad från [20].

"Lift-off"-tester görs i samband med de periodiska inspektionerna. Eftersom det inte är entydigt när ankarhuvudet är fritt från ankarplattan samt att det är relativt lång tid mellan de periodiska inspektionerna, så kan det vara stor spridning i uppmätta spännkrafter. Ett alternativ, eller komplement, till "lift-off"-metoden är att installera permanenta lastceller i spännkabelförankringen som kan mäta spännkraften

kontinuerligt eller med tätare intervall, se Figur 5.2 nedan och avsnitt 5.4.4.3 i föreliggande rapport.



Figur 5.2: Med permanenta lastceller uppmätta spännkrafter de första 30 åren efter uppspänning av Forsmark 1. I diagrammen jämförs uppmätta resultat med, enligt standarder, teoretiskt framräknade förluster efter 30 år⁴³. Diagram hämtade från [21].

Vidare går det att mäta töjningen direkt i betongen med hjälp av trådtöjningsgivare fästa på inneslutningens yta eller på armeringsjärnen eller med i betongen ingjutna vibrerande sträng-töjningsgivare, se avsnitt 5.4.4.1 nedan. För att kunna utvärdera långtidsförlusterna så finns temperaturgivare kopplade till töjningsgivarna för termisk korrigering av töjningsdata. De uppmätta töjningsförlusterna i betongen jämförs med de teoretiskt framräknade förlusterna som gjordes vid den ursprungliga designen för att på så sätt indirekt säkerställa att de faktiska spännkraftsförlusterna understiger dimensionerande värden.

5.4 Instrumentering

5.4.1 Läckagetest: ANSI/ANS-56.8-2002 [16]

De olika mätningar som ska utföras under läckagetesterna specificeras i avsnitt 4.3 i [16] och presenteras i Tabell 5.5 nedan.

⁴³ Det ska noteras att de i diagrammen presenterade teoretiska förlusterna inte är att likställa med dimensionerande värden (dimensionerande värden räknades fram med en annan standard).

Tabell 5.5: Mätningar vid läckagetest [16].

Mätning
Torr temperatur
Daggpunktstemperatur <i>eller</i> Relativ luftfuktighet
Absoluttryck i inneslutningen
Flöde
Tid
Ambient tryck
Vattennivåer

5.4.2 Integritetstest: ASME Sec III Div 2 Article CC-6000 [18]

De olika mätningar som ska utföras under det strukturella integritetstestet specificeras i avsnitt CC-6200 i [18] och presenteras i Tabell 5.6 nedan.

Tabell 5.6: Mätningar vid strukturellt integritetstest [18].

Mätning	Kommentar
Tryck i inneslutningen	-
Ambient tryck	-
Förskjutningar av inneslutningsskalet	Är mätutrustningen fäst på tätplåten så skall hänsyn tas till eventuell separation mellan tätplåt och betong.
Töjning	Ett krav endast för prototypinneslutningar.
Sprickvidder	-
Betongtemperatur	Temperaturer skall mätas i samband med töjningsmätningarna. Temperaturgivare som är ingjutna i betong ska vara designade för långtidsdrift i gällande miljö.
Inneslutningens lufttemperatur	Inget krav.
Ambient lufttemperatur	Inget krav.

5.4.3 Läckage och integritetstester: AFCEN ETC-C [1]

Specifikt för läckagetesterna är följande instrumentering nödvändig:

- Temperatursensorer;
- Hygrometrar;
- Tryckmätare.

För tillsyn av inneslutningen under drifttiden samt för evaluering av trycktesterna ska följande instrumentering installeras:

- Topografiska riktmärken för att indikera:
 - Strukturens sättning i förhållande till externa fixpunkter kopplade till ett nationellt referenssystem;
 - Strukturens lutning;
- Utrustning för att mäta nedböjningen av bottenplattan;
- Pendlar för att mäta inneslutningens horisontella förskjutning och utrustning för att mäta inneslutningens vertikala förskjutning:
 - Deformation vid förspänning och trycktester;
 - Deformation pga. betongens krympning och krypning samt pga. spännkablar relaxation;
 - Deformation pga. variationer i temperatur.
- Utrustning för att med tillräcklig densitet mappa förskjutningarna i det förspända området i utrustningsslussens periferi. Mätningarna ska också ge data på variationer i utrustningsslussens geometri i tre riktningar (vertikalt, ringled och radiellt) vid anslutningen till inneslutningsväggen;
- Utrustning för att mäta förspänningen i fyra st. vertikala kablar vilka inte är injekterade med cement. De fyra kablarna ska inte ha några deviationer på grund av genomföringar etc. och de ska inte sträcka sig in i domen;
- Utrustning för att mäta töjningen inne i betongen. Mätningarna ska kunna användas för att estimeras betongens elasticitetsmodul och tvärkontraktionstal;
- Termometrar. Kan delas in i två grupper:
 - Termometrar kopplade till töjningsgivarna för termisk korrigering av töjningsdata;
 - Termometrar för att kunna uppskatta temperaturfördelningen genom inneslutningsväggen samt över hela strukturen;
- Inklinometrar för att mäta rotationen vid de zoner som är utsatta för böjmoment, t.ex. vid övergången mellan vägg och bottenplatta samt vid övergången mellan vägg och dom;
- Tryckmätare;
- Prober injutna i betongväggen för att sondera fukt- eller vattenhalt.

I Tabell 5.7 nedan visas tabell 3.4.7-1 i ETC-C [1] som sammanställer den instrumentering som krävs för reaktorinneslutningen under dess drifttid.

Tabell 5.7: Mätutrustning för EPR, utdrag ur [1].

Instrumentation to be used for each Reactor Building operating lifetime			
Instrumentation	Resistance test and Leaktightness test	Monitoring during construction	Monitoring during operation
Topographic benchmarks		x*	x
Devices for measuring basemat levelling under the structure	x**		
Devices for measuring radius or diameter variation	x	x*	x
Devices for measuring height variation	x	x*	x
Devices for locally mapping displacements and deformations	x		x
Devices for measuring the tendon tension		x*	x
Strain gauges	x	x*	x
Pressure gauges	x		x
Thermometers	x	x*	x
Inclinometers	x	x*	x
Moisture or water content probes		x*	x
x denotes instrumentation used at the time of the corresponding phase. * measurements shall be taken as soon as possible before beginning prestressing of the structure. ** measurements are optional except for in the case of acceptance test.			

5.4.4 Mätutrustning

I följande avsnitt ges exempel på ett urval av den utrustning som ingår i ett ISI⁴⁴-system för monitorering av en inneslutning.

5.4.4.1 Betongtöjning

Spänningar i betongen ger upphov till töjningar som vanligen mäts med (i betongen) ingjutna vibrerande sträng-töjningsgivare. Töjningsgivaren, se Figur 5.3 nedan, består av två flänsar med en tråd emellan. Deformationer i betongen framkallar variationer i avståndet mellan de två flänsarna vilket resulterar i att trädens vibrationsfrekvens ändras. Förhållandet mellan frekvens, trådlängd och givarens karakteristik resulterar att en töjning kan räknas fram.

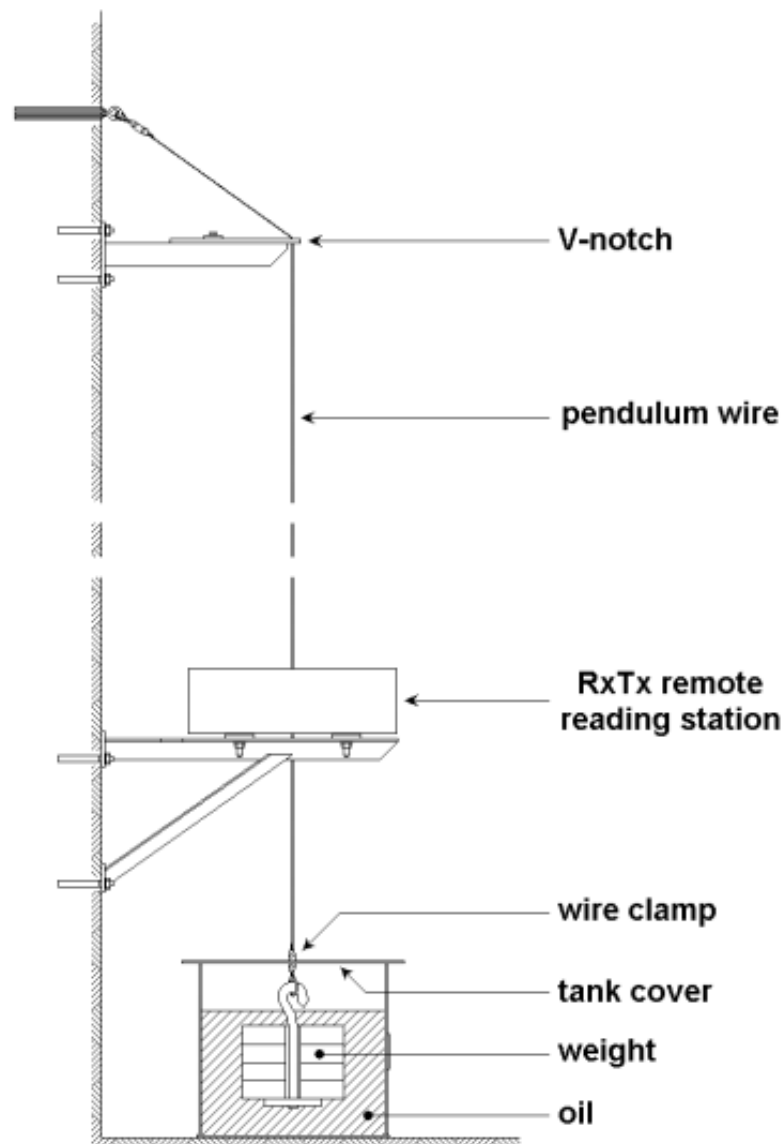
⁴⁴ ISI = "in-service inspection" - periodisk inspektion.



Figur 5.3: Vibrerande sträng-töjningsgivare. Telemac Model C-110 [80].

5.4.4.2 Inneslutningens förskjutning

Ett sätt att mäta inneslutningens relativa radiella eller vertikala förskjutning vid t.ex. ett trycktest är att installera pendlar. Pendeln kan antingen vara så kallad direkt eller inverterad. Figur 5.4 nedan visar hur en direkt pendel är installerad. En direkt pendel består av en vajer upphängd på inneslutningsväggen med en tillhörande mätstation fixerad på exempelvis bottenplattan eller nedre delen av inneslutningsväggen. Vajern hålls sträckt med hjälp av en vikt som är nedsänkt i en behållare med olja (för dämpning av viktens rörelse).



Figur 5.4: Direkt pendelsystem installerat på utsidan av en vägg [79].

Deformationer kan också mätas upp med hjälp av laser. Reflektorer placeras på utsidan (eller insidan) av inneslutningen på de punkter som mätdata önskas. Mätdata består av 3D-koordinater för varje punkt. Ett system med laserstationer och reflektorer är fördelaktigt då systemet kan automatiseras och är väl anpassat för stora strukturer.

5.4.4.3 Kraft i spännkablarna

Kraften i änden av en oinjekterad spännkabel kan mätas med en lastcell som placeras vid spännkabelns förankring. Den vanligaste typen av lastceller för mätning av kraft i spännkablarna är konstruerade med vibrerande sträng-töjningsgivare. I Figur 5.5 visas en lastcell bestående av 6 st. töjningsgivare monterade i en stålcylinder parallellt med cylinderns axel. Figur 5.6 visar en lastcell installerad vid en spännkabelförankring på Sandias 1:4 testinneslutning [110].



Figur 5.5: Lastcell: Geosense VWLC 5000 [48].



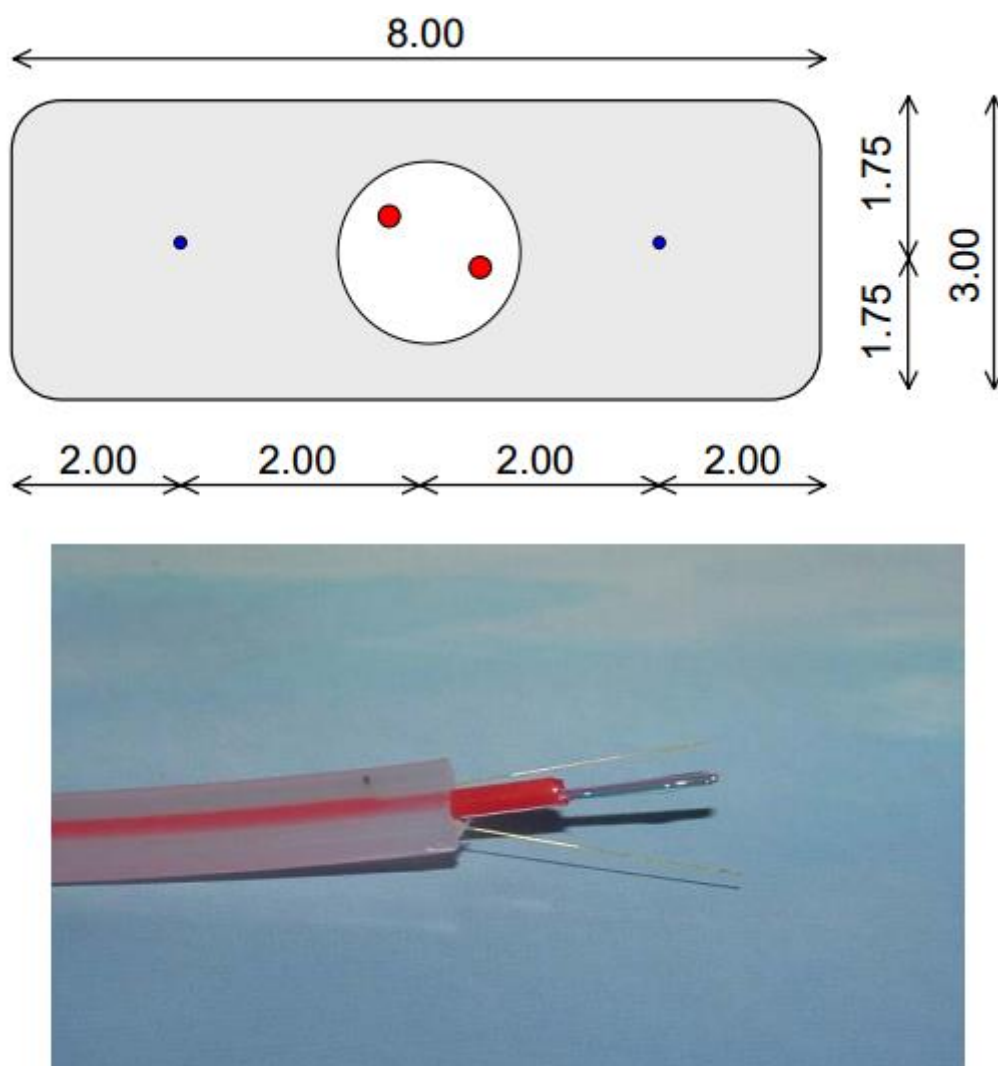
Figur 5.6: Lastcell: HBM C6-100t, Sandia 1:4 [110].

5.4.4.4 Töjningar i tätplåt

Det finns ett flertal metoder att mäta töjningar i tätplåten, t.ex. trådtöjningsgivare, fiberoptiska sensorer etc. I OL3-inneslutningen i Finland används 1 500 m av fiberoptiska sensorer distribuerade längs med tätplåten för att mäta töjningar och temperaturer längs tätplåten [106].

Figur 5.7 visar Telemac DiTeSt SMARTprofile som är en sensor speciellt framtagen för töjnings- och temperaturmonitorering över långa sträckor. Sensorn består av två bundna (för töjningsmätning) och två fria (för temperaturmätning) optiska fibrer i en

profil av polyeten som antingen limmas eller svetsas fast direkt på tätplåten. I den övre bilden i Figur 5.7 är de bundna töjningsgivarna blåmarkerade och de fria temperaturgivarna rödmarkerade. Temperaturgivarna ligger i ett rör mitt i profilen, se nedre bilden i Figur 5.7.



Figur 5.7: Schematiskt tvärsnitt av en SMARTprofile-sensor och en provbit. Bild hämtad från [52].

5.5 Acceptanskriterier

5.5.1.1 ANSI/ANS-56.8-2002 [16]

Acceptanskriterierna för läckagehastigheten i [16] för de olika trycktesterna specificeras enligt:

Typ A-test:

- Läckagehastigheten vid P_a får inte överstiga L_a ;
- Vid Typ A-test utfört efter reparation eller justeringar så får läckagehastigheten inte överstiga $0.75L_a$;

Verifikationstest (ingår i CILRT):

$$-(L_0 + L_{am} - 0.25L_a) \leq L_C \leq (L_0 + L_{am} - 0.25L_a)$$

Typ B- och Typ C-test:

- Kombinerad läckagehastighet för samtliga penetrationer ska vara lika med eller understiga $0.60L_a$. Detta kriterium behöver bara uppfyllas vid de fall som specificeras i avsnitt 6.5 i [16];
- Kombinerad läckagehastighet för samtliga Typ B- och Typ C-tester skall understiga $0.60L_a$ vid alla tillfällen då inneslutningen krävs vara driftduelig.

5.5.1.2 ASME Sec III Div 2 Article CC-6000 [18]

Acceptanskriterierna för evaluering av inneslutningens strukturella integritet specificeras i avsnitt CC-6400 [18] och sammanfattas nedan:

- Plastiska töjningar i slakarmeringen utifrån analys av uppmätta sprickvidder, töjningar eller förskjutningar får inte uppkomma;
- Inga synliga tecken på permanent skada av antingen betongstrukturen eller tätplåten får finnas;
- Kvarvarande förskjutningar vid positioner för predikterade maximala radiella och vertikala deformationer får efter slutförandet av trycksänkningen eller 24 h därefter inte överstiga följande:
 1. För konventionellt armerade inneslutningar eller konventionellt armerade riktningar av partiellt förspända inneslutningar: det största av 30 % av uppmätta eller predikterade förskjutningar vid maximalt testtryck plus 0.25 mm plus mättolerans;
 2. För förspända inneslutningar eller förspända riktningar av partiellt förspända inneslutningar: 20 % av uppmätta eller predikterade förskjutningar vid maximalt testtryck plus 0.25 mm plus mättolerans;
- De uppmätta förskjutningarna vid positioner för predikterade maximala radiella och vertikala deformationer får vid maximalt testtryck inte överstiga predikterade värden med mer än 30 % plus mättolerans. Kravet kan frångås om de kvarvarande förskjutningarna efter 24 h understiger 10 % för förspända inneslutningar och 20 % för konventionellt armerade betongstrukturer.

Uppmätta töjningar skall ses över av designer för evaluering av det övergripande testresultatet.

5.5.1.3 AFCEN ETC-C [1]

Acceptanskriterierna för läckagehastigheten i ETC-C [1] för de olika trycktesterna specificeras enligt:

Typ A-test:

- Testet skall anses acceptabelt om den uppmätta läckagehastigheten, L_{rm} , inklusive mättningsfelet, $d(L_{rm})$, uppfyller följande villkor i förhållande till maximalt acceptabel läckagehastighet vid ett faktiskt olycksfall, L_{ra} :

$$L_{rm} + d(L_{rm}) < 0.75 * 0.69 * L_{ra}$$

Typ B- och Typ C-test:

- Kombinerad läckagehastighet för samtliga penetrationer skall begränsas till:

$$L_{rm} + d(L_{rm}) \leq 0.75 * 0.60 * 0.69 * L_{ra}$$

Inneslutningsstrukturen anses ha klarat det strukturella integritetstestet om:

- Mätningarna visar att inneslutningens deformation under trycktestet är elastisk i enlighet med de strukturella beräkningarna;
- Inneslutningsväggen och dess anslutningar till den interna strukturen inte har tagit skada av testet.

5.6 Omnämmande av trycktester i utvalda guider

5.6.1 UK: HSE Safety Assessment Principles for Nuclear Facilities [51]

Nuclear Installations Inspectorate (NII) är en del av Office for Nuclear Regulation (ONR) som är en del av Health and Safety Executive (HSE) och är den myndighet som reglerar säkerheten hos kärntekniska installationer i Storbritannien. I [51] fastställs de principer som inspektorerna använder sig av i processen för tillståndsbedömning.

De tekniska principerna för bedömning av den strukturella integriteten hos byggnader såsom inneslutningen med hänsyn till inspektion och tester specificeras enligt paragraferna:

- ECE.20: Det bör finnas möjlighet för inspektion under drift som klarar av att visa att konstruktionen kan uppfylla kraven för säkerhetsfunktioner.
- ECE.21: Förspända tryckkärl och inneslutningsstrukturer av betong bör trycktestas, vilket kan upprepas under anläggningens drifttid.
- ECE.22: Anläggningskonstruktioner som bibehåller eller förhindrar läckage bör testas mot läckagetäthetskraven före drifttagning för att visa att designsyftena är uppfyllda.

5.6.2 USA: U.S. NRC Regulatory Guide 1.90 [113]

Regulatory Guide 1.90 [113] beskriver de metoder som U.S. NRC anser vara acceptabla för att ta fram ett ändamålsenligt program för periodisk inspektion av förspända inneslutningar med injekterade spännkablar. Tillståndshavaren ska visa att spännkablar prestanda upprätthåller en tillräcklig säkerhetsmarginal i reaktorinneslutningen. Ett program för periodisk inspektion (ISI) skall innehålla följande tre element:

1. Tillsyn av kraft i icke-injekterade spännkablar: Ett antal spännkablar förblir icke-injekterade under inneslutningens livslängd och används för att med lift-off tester evaluera omfattningen av betongens krypning och krympning samt spännkablar relaxation;
2. En av följande alternativa metoder för tillsyn av spännkablar prestanda:
 - A. Tillsyn av inneslutningens förspänningsnivå med hjälp av instrumentering och trycktester: Dragtöjningar i de injekterade spännkablar trådar övervakas och förspänningsnivån i olika sektioner evalueras med hjälp av i betongen ingjutna töjningsgivare. I metod A ingår också det som specificeras för metod B nedan;

- B. Tillsyn av inneslutningens förskjutning under trycktester: Inneslutningens elastiska respons kan utvärderas genom att jämföra olika positioners förskjutningar vid trycktester som utförs vid de periodiska inspektionerna med de förskjutningar som uppmättes vid det strukturella integritetstestet som genomfördes innan drifttagning;

3. Visuell undersökning.

Oavsett om metod A eller metod B väljs så behövs trycktester genomföras. Efter det initiala strukturella integritetstestet som utförs innan drifttagning så ska trycktester genomföras efter 1, 3 och 5 år under den första femårsperioden av drift. Därefter ska ett trycktest genomföras vart 10:e år om metod A väljs och vart 5:e år om metod B väljs.

Innan drifttagning ska trycktester göras med trycken $1.15P_d$ samt P_a . Trycktesterna som utförs vid de periodiska inspektionerna görs med trycket P_a . Avläsning av mätinstrumenten ska göras både för $1.15P_d$ och för P_a vid trycktesten innan drifttagning. Dessa mätningar utgör referensvärden för framtida mätningar.

Om förskjutningarna uppmätta under provtrycket vid de periodiska inspektionerna överstiger med mer än 5 % av det som uppmättes vid trycktesterna innan drifttagning så kan det indikera onormal degradering av inneslutningen och föranleder rapportering till tillsynsmyndigheterna.

5.6.3 Finland: STUK YVL-Guides A.5 [76], B.6 [77] and E.6 [78]

STUK är en finländsk myndighet som definierar regler för driften av landets kärnkraft samt kontrollerar att kraftbolagen följer reglerna. YVL är en uppsättning dokument som innehåller de reglerande riktlinjerna för kärnsäkerhet.

Kraven för driftsättning av kärnkraftverk specificeras i YVL A.5 [76]. Specifikt för integritets- och läckagetester så specificeras i avsnitt 3.14 paragraf 350 i YVL B.6 [77] att inneslutningen skall trycktestas innan driftsättning för att demonstrera dess strukturella integritet. Övertrycket skall vara $1.15P_d$. I paragraf 351 specificeras att läckagetester skall utföras regelbundet på:

- Inneslutningen;
- Genomföringar;
- Personalslussar;
- Utrustningsluckor.

Läckagetesterna skall utföras med ett gstryck som uppgår till det maximala trycket i den postulerade olycka som resulterar i den högsta lasten på inneslutningen, dvs. designbaserad olyckslast. Vidare i paragraf 352 specificeras att inneslutningen skall designas så att läckagetesterna vid de periodiska inspektionerna inte äventyrar inneslutningens funktion eller funktionen hos de strukturer och komponenter inom inneslutningen. Läckagetesterna får heller inte avsevärt förkorta livslängden hos inneslutningen och de strukturer och komponenter inom inneslutningen.

I YVL E.6 [78] specificeras programmet för periodisk inspektion ska inkludera följande:

- Inspektion av förskjutningar, töjningar och täthet vid specificerade intervaller och i samband med trycktester;
- Inspektion av spännkablar och förankringar vid specificerade intervaller;

- Inspektion av strukturer som är essentiella för inneslutningens funktion.

I paragraf 731 [78] står det att inneslutningen skall ha en instrumentering som ger information om förskjutningar och töjningar av inneslutningsskalet samt bottenplattan. Instrumenteringen ska också ge information om temperatur och luftfuktighet under trycktester. Vid de fall inneslutningen är förspänd så skall förspänningskraften kunna mätas i åtminstone några av spännkablarna.

I paragraf 732 [78] specificeras att programmet för trycktester skall presentera entydiga acceptanskriterier för åtminstone följande:

- Inneslutningens förskjutningar vid olika trycknivåer;
- Inneslutningens töjningar vid olika trycknivåer;
- Kvarvarande förskjutningar;
- Kvarvarande töjningar;
- Sprickor och mappning av dessa;
- Temperaturer;
- Läckage.

6. SC-konstruktioner

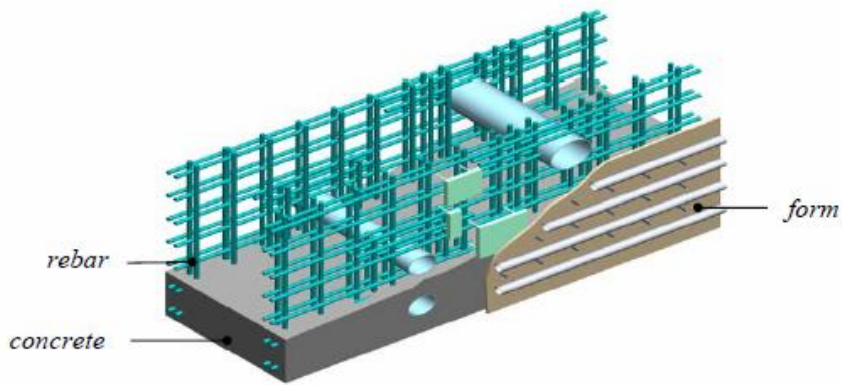
6.1 Allmänt

Bärverk på kärnkraftsanläggningar består ofta av tjocka armerade betongkonstruktioner för att ge tillräckligt strålskydd. Konventionellt används "RC-konstruktioner" (Reinforced Concrete Structure) vilket resulterar i långa byggtider och stora insatser med fältarbete. För att spara tid och kostnader i byggskedet är det därför fördelaktigt att bygga dessa konstruktioner i separata moduler som sedan monteras ihop på plats. Bygghastighet, tillsammans med strukturell effektivitet, ekonomi och säkerhet, har därför medfört att byggmetoden med "SC-konstruktioner" (Steel Plate Reinforced Concrete Structure) har vuxit i popularitet i den tredje generationen av kärnkraftsanläggningar.

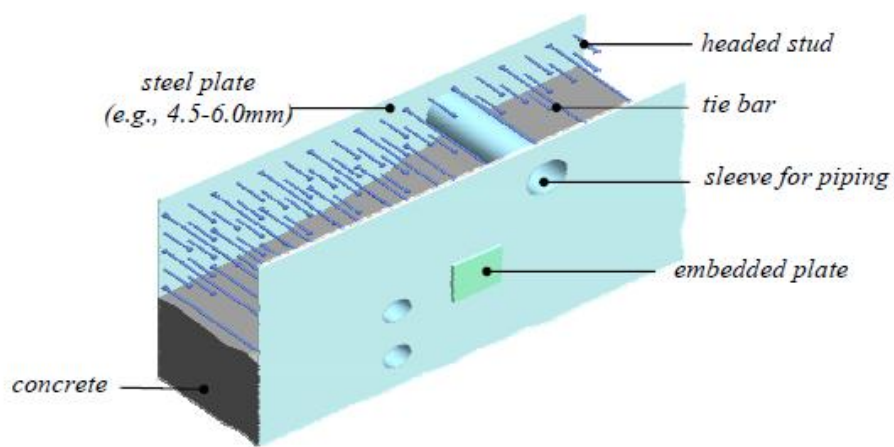
Med en SC-konstruktion avses en bärande kompositkonstruktion av stål och betong där betongstrukturen har förstärkts med stålplåt på någon eller båda sidorna av betongen.

Stålplåten och betongen samverkar med hjälp av skjuvelement, t.ex. dubbar eller förstyrningsplåtar som fästs på insidan av stålplåten. För att undvika buckling av stålplåten kan förbindningselement mellan stålplåtarna användas. Dessa element, t.ex. dragstänger eller skiljeväggar förstärker även konstruktionen för skjuvning ut ur planet. Under byggskedet används dessa förbindningselement dessutom som tillfälliga avskiljare medan stålplåtarna fungerar som permanent formsättning vid betonggjutningen.

Figur 6.1 visar skillnaden mellan en konventionell RC-konstruktion och en SC-konstruktion, medan Figur 6.2 schematiskt visar den ekonomiska vinningen med en SC-konstruktion framför en RC-konstruktion.


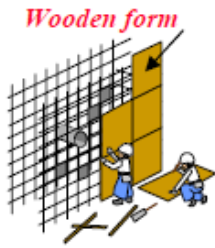
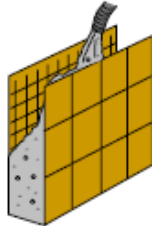

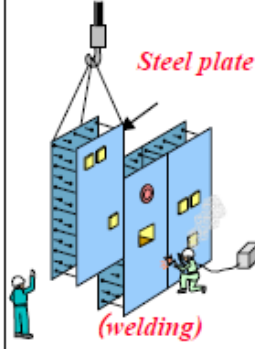
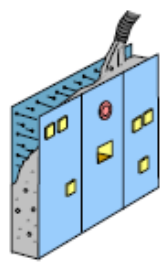


Reinforced Concrete



Steel-Plate Reinforced Concrete

Figur 6.1: Skillnad mellan en SC och en RC konstruktion. Figur från [108].

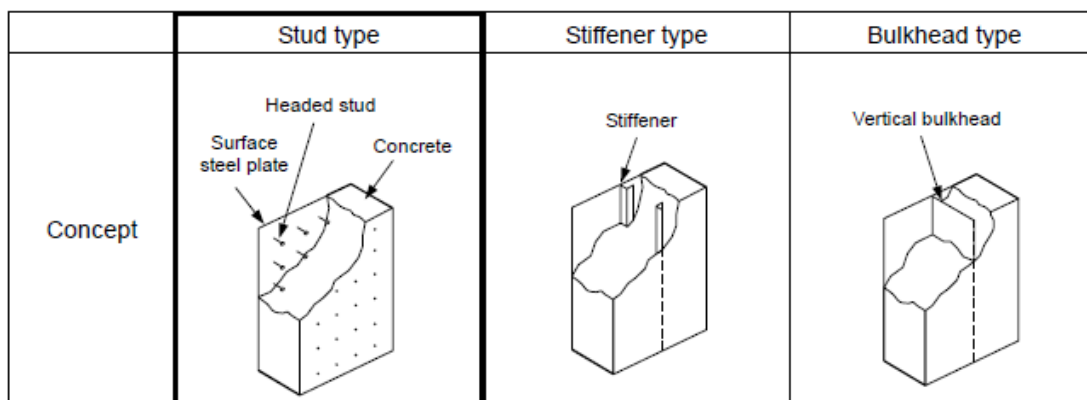
<i>Work Structure</i>	<i>Rebar arrangement</i>	<i>Form work (assembling)</i>	<i>Placing concrete</i>	<i>Form work (removal)</i>
<i>RC</i>		 <i>Wooden form</i>		
<i>28days</i>	<i>13days</i>	<i>7days</i>	<i>4days</i>	<i>4days</i>
<i>SC</i>	—	 <i>Steel plate</i> <i>(welding)</i>		—
<i>14days</i>	—	<i>10days</i>	<i>4days</i>	—

Figur 6.2: Schematiskt bild av den ekonomiska vinningen med en SC-konstruktion framför en RC-konstruktion. Figur från [108].

6.2 Utformning

6.2.1 Konstruktionstyper

Som nämns i avsnittet ovan så finns det olika metoder för att få stålplåten och betongen att samverka. Av de tre olika metoder som redovisas i Figur 6.3 så är huvudförsedda dubbar ("headed studs") den vanligaste metoden. Det är även möjligt att kombinera olika samverkningsmetoder.



Figur 6.3: Olika typer av samverkan mellan stålplåt och betong. Figur från [61].

Det finns huvudsakligen två konstruktionstyper, SC-konstruktion och halv SC-konstruktion (half-SC structures). Skillnaden mellan de två konstruktionstyperna är att för en SC-konstruktion så har betongen förstärkts med en stålplåt på båda sidorna av betongen, medan en halv SC-konstruktion endast är förstärkt med stålplåt på ena sidan av betongen. På andra sidan samverkar då armeringsstänger med betongen. Huvudsakligen används SC-konstruktioner för väggar medan halva SC-konstruktioner används för bjälklag.

Olika typer av SC-konstruktioner för väggar och bjälklag, liksom kopplingar mellan bjälklag och väggar och mellan väggar och bottenplattor beskrivs och illustreras i [61].

6.3 Fördelar och nackdelar gentemot RC-konstruktion

I Tabell 6.1 redovisas de fördelar och nackdelar som finns med SC-konstruktioner jämfört med RC-konstruktioner.

Tabell 6.1: Fördelar och nackdelar med SC-konstruktioner jämfört med RC-konstruktioner. Från [132] om annat ej anges.

Fördelar	Nackdelar
+ Reducerat arbete på anläggningen	- Brist på tillämpliga designkoder/regelverk
+ Reducerad utförandetid på anläggningen	- Svårt att ta fram en gemensam standard/norm eftersom flera tillverkare har tagit fram olika designer av SC-konstruktioner med olika typer av skjuv- och förbindelseelement
+ Eliminering av armeringsjärn och ramverk	- Försvårad inspektion av betong [108]
+ Möjliggör storskalig modularisering	- Brand kan utgöra en större fara då stålplåtarna är direkt exponerade vilket kan resultera i en degradation av hållfasthetsegenskaperna.
+ Överlägset motstånd mot missil- och explosionslast	
+ Överlägsna hållfasthets- och styvhetssegenskaper	
+ Överlägsen duktilitet	
+ Förbättrad kvalitet på gjuten betong	
+ Genomföringar kan hanteras relativt enkelt	
+ Ökat strålskydd på grund av yttre stålplåtar	
+ Mindre infästningar kan hanteras enkelt	
+ Andra aktiviteter kan påbörjas innan betonggjutningen har slutförts	

6.4 Dimensionering

6.4.1 Bakgrund

I brist på specifika dimensioneringsregler för SC-konstruktioner har man tidigare varit tvungen att för betongen i en SC-konstruktion använda designkoder för armerade betongkonstruktioner och då konservativt bortse från skjuvkapaciteten i planet hos stålplåtarna. Likaså har man vid design av stålplåtarna i en SC-konstruktion varit tvungen att använda designkoder för stålkonstruktioner och konservativt bortse från betongens skjuvkapacitet i planet [61].

I USA där det saknas tillämpbara regelverk för SC-konstruktioner har ACI 349 [3] använts, vilket är en standard för säkerhetsrelaterade betongkonstruktioner på kärnkraftsanläggningar. För att ACI 349 ska vara tillämpbar har stålplåtarna likställts med armeringsjärn, för vilken ACI 349 innehåller väldefinierade krav [10].

6.4.2 Behov av specifika dimensioneringsregler för SC-konstruktioner

Det strukturella beteende hos en SC-konstruktion är på många sätt likt det hos en RC-konstruktion. För till exempel drag, tryck, böjning och skjuvning ut ur planet är beteendet väldigt likt det som gäller för RC-konstruktioner. Däremot kan beteendet skilja sig avsevärt för skjuvning i planet, för kombinationer av skjuvning i och ur planet, för termiska effekter o.s.v. För SC-konstruktioner behöver dessutom till exempel lokal buckling av stålplåtar, överföring av skjuvkrafter mellan plåt och betong och delamineringsbrott hanteras, vilket inte är aspekter som behöver beaktas vid design

av RC-konstruktioner. Generellt begränsas kapaciteten hos en SC-konstruktion av sträckgränsen på stålplåtarna medan för RC-konstruktioner kan brottmoder hos betongen vara gränssättande. På grund av dessa skillnader i dimensionering kan det finnas behov att använda specifika dimensioneringsregler för SC-konstruktioner [10].

6.4.3 Tillgängliga dimensioneringsregler

I dagsläget finns det dimensioneringsregler för SC-konstruktioner i Japan och Sydkorea. I USA håller man på att ta fram regelverk för SC-konstruktioner. Nedan beskrivs de dimensioneringsregler som finns tillgängliga i skrivande stund.

6.4.3.1 ANSI/AISC N690-12

I USA pågår arbete med att ta fram ett tillägg till AISC N690-12 [9], en designkod för säkerhetsrelaterade stålkonstruktioner på kärnkraftsanläggningar, för att hantera krav på SC-väggar. I förslaget på tillägg till AISC N690 som är specificerat i [10] finns ännu inga dimensioneringsregler för SC-bjälklag (eller en halv SC-konstruktion som ofta används som bjälklagskonstruktion), däremot finns det vägledning för dimensionering av anslutningar mellan en SC-vägg och ett SC-bjälklag. Tillägget är i skrivande stund på allmän remiss. Enligt plan ska tillägget godkännas av ANSI (American National Standards Institute) i februari 2015.

Tillägget av SC-väggar [10] inkluderas huvudsakligen som en bilaga (N9) i AISC N690-12 [9]. Utöver det innehåller [10], förslag på krav vid tillverkning av SC-väggar med avseende på måttoleranser (i kapitel NM), förslag på krav på inspektion av kompositkonstruktion (i kapitel NN), samt en kommentarsdel som innehåller utredningar och detaljerade motiveringar till de utökade kraven i kapitel NM och NN, samt bilaga N9. Bilaga N9 innehåller fyra delar med omfattning enligt nedan.

N9.1 Dimensioneringskrav (Design Requirements)

Denna del innehåller allmänna villkor, som t.ex.:

- Max. och min. tjocklek på SC-väggsektion;
- Max. och min. tjocklek på stålplåtar;
- Max. och min. förhållande mellan tjocklek på plåt och SC-väggsektion;
- Max. och min. hållfasthet på stålplåtar och betong;
- Slankhetskrav för stålplåtar;
- Krav på skjuvelement för samverkansfunktion (t.ex. sträckgräns och fördelning);
- Krav på förbindningselement mellan stålplåtar (t.ex. sträckgräns och fördelning);
- Krav på skarvning av stålplåtar.

Avsnittet innehåller även dimensioneringsregler för stöt- och kollisionslaster, liksom dimensioneringskrav för genomföringar i SC-väggen.

N9.2 Analyskrav (Analysis Requirements)

Denna del redovisar analysförutsättningarna för SC-väggar. Avsnittet fastställer att finita element analyser ska användas vid analys av SC-väggar. Dessutom föreslås val av t.ex. elementtyper i analysen, bestämmande av styvhets- och dämpningsvärden samt val av materialegenskaper att användas i finita elementanalysen. Även

analysförutsättningar för lastkombinationer som innehåller termiska olyckslaster diskuteras. Slutligen fastställs hur snittkrafter i SC-väggen ska beräknas i analyserna.

N9.3 Dimensionering av SC-väggar (Design of SC Walls)

Denna del fastställer acceptanskriterier för:

- Enaxlig draghållfasthet;
- Tryckhållfasthet;
- Hållfasthet för böjning ut ur planet;
- Skjuvhållfasthet i planet;
- Skjuvhållfasthet ut ur planet;
- Hållfasthet för kombinerade belastningar;
- Hållfasthet på linjära kompositdelar i kombination med SC-väggar.

N9.4 Dimensionering av anslutningar till SC-väggar (Design of SC Wall Connections)

Denna del fastställer krav för:

- Skarvar mellan SC-väggsektioner;
- Skarvar mellan SC- och RC-väggsektioner;
- Anslutningar vid korsningarna av SC-väggar;
- Anslutningar vid korsningarna mellan SC- med RC-väggar;
- Förankring av SC-väggar i RC-bottenplatta;
- Anslutningar för SC-väggar till RC-bjälklag.

6.4.3.2 JEAG 4618-2005

JEAG 4618-2005 [61] innehåller tekniska riktlinjer för seismisk design av SC-konstruktioner, och är framtagen av Obayashi Corporation och Westinghouse Electric Company med tillstånd av Japan Electric Association. Denna designkod är i motsats till AISC N690-12 [9] ej begränsat till enbart SC-väggar utan inkluderar även halva SC-konstruktioner där endast ena sidan av konstruktionen är förstärkt med en stålplåt, t.ex. ett SC-bjälklag. Dokumentet, som fokuserar på dimensionering utifrån seismiskt perspektiv, är indelat i tre huvudkapitel. Därefter finns en referensdel som ger bakgrund till och motiverar de riktlinjer som ges i huvuddelen. Innehållet i de tre huvudkapitlen redovisas i korthet nedan.

Kapitel 1: Grundprinciper (Fundamentals)

Det första kapitlet innehåller en del som till stor del definierar och beskriver olika SC-konstruktioner samt redovisar vilka material som får användas i de olika delarna av konstruktionen.

Den andra delen innehåller allmänna principer och tillvägagångssätt för dimensionering med avseende på seismisk last. I princip följer principer och tillvägagångssätt de metoder som gäller för RC-konstruktioner, men eftersom armering har ersatts av stålplåtar skiljer sig utvärderingen av SC-konstruktioner något från RC-konstruktioner. Denna del specificerar även laster, lastkombinationer samt acceptanskriterier för ingående delar i en SC-konstruktion.

Kapitel 2: Seismisk responsanalys (Seismic Response analysis)

Den första delen av kapitel 2 fastställer att jordbävningenslasten, liksom val av dämpning, beaktande av SSI (Soil-Structure Interaction), analysmetod samt utredningar kring byggnadens stabilitet ska följa de förutsättningar som gäller för RC-konstruktioner. Material- och styvhetsgenskaper ska dock följa SC-konstruktionens verkliga förhållanden.

Den andra delen av kapitlet behandlar utvärdering av kvarvarande resteffekt i konstruktionen efter belastning i skjuvning och böjning. Det fastställs även att utvärderingsmetoder för cykliska belastningar i skjuvning och böjning hos RC-konstruktioner också är tillämpbara för SC-konstruktioner, då experiment påvisat likartade beteenden för båda konstruktionstyperna.

Kapitel 3: Spänningsanalys och strukturell dimensionering

Kapitel 3 innehåller 6 underkapitel.

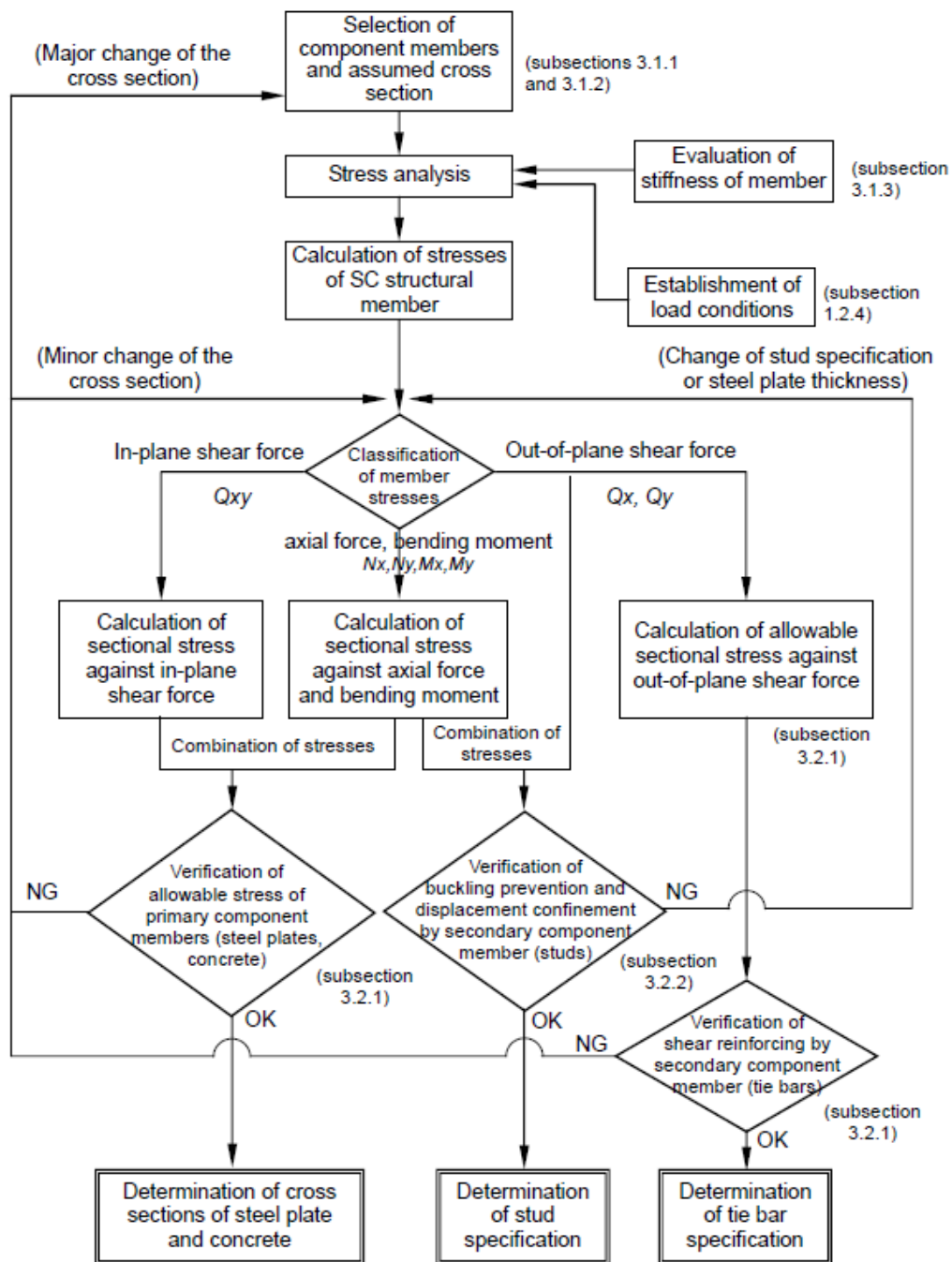
I kapitel 3.1 redogörs för grundprinciperna vid strukturell dimensionering. Detta omfattar bland annat specificering av konstruktionens primära och sekundära strukturdelar med avseende på dess funktion för olika belastningssituationer, typiskt flöde vid dimensionering av en SC-konstruktion (se Figur 6.4), specifika krav på stålplåtens tjocklek, dimensioner och fördelning av dubbar, funktionskrav på dragstänger, anvisningar för undvika buckling av stålplåten etc. Dessutom innehåller kapitlet grundläggande förutsättningar för spänningsanalys och spänningsutvärdering. Detta omfattar t.ex. styvhetsberäkningar av ingående strukturdelar, samt grundläggande antaganden för spänningskontroll mot skjuvkrafter i planet, mot normalkraft och böjmoment och mot skjuvkraft ut ur planet.

Kapitel 3.2 och 3.3 innehåller anvisningar för verifiering av stålplåtar, betong och dubbar för SC-väggar respektive SC-bjälklag (halv SC-konstruktion). Eftersom halva SC-konstruktioner innehåller armering finns det även vägledning för spänningsutvärdering av armeringsstänger i kapitel 3.3.

I kapitel 3.4 finns dimensioneringsanvisningar för håltagning i SC-väggar, för förankring av SC-väggar, för anslutningar till andra sektioner t.ex. anslutning av en vägg till ett bjälk-lag, samt dimensionering av andra sektionstyper, t.ex. pelare och balkar.

Kapitel 3.5 beskriver behovet av utredningar kring funktionellt underhåll ("functional maintenance") för områden där det finns krav på speciella funktioner, t.ex. strålskydd eller täthet.

I kapitel 3.6 redovisas hur tillåten kapacitet i strukturen kan beräknas utifrån säkerhetsmarginal mot statisk respektive dynamisk seismisk last.



Figur 6.4: Typiskt flöde vid dimensionering av en SC-konstruktion. Figur från [61].

6.4.3.3 Dimensioneringsregler från KSSC

KSSC (Korean Society of Steel Construction) tog under åren mellan 2005 och 2008 fram förutsättningar och regler för SC-konstruktioner, som publicerades i en standard 2009. En engelsk översättning av denna designkod har inte funnits tillgänglig under arbetet med denna rapport och har därför inte beaktats.

6.4.4 Speciella utredningar

6.4.4.1 Brand

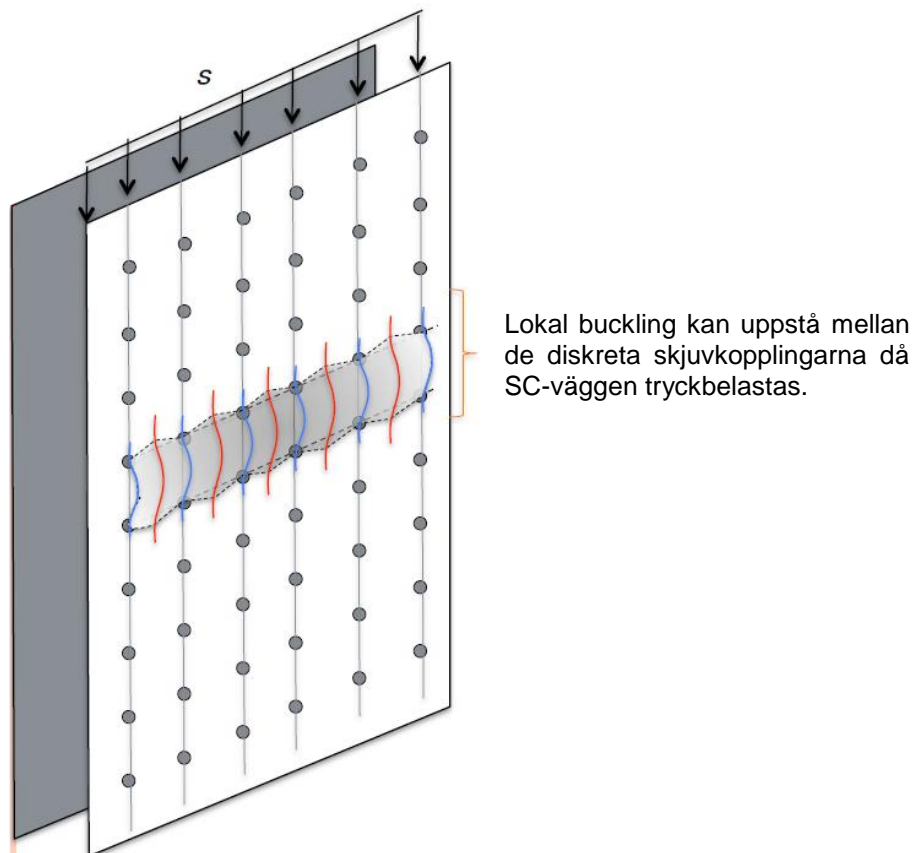
En svaghet hos SC-väggar är att stålplåtarna som omsluter betongen och utgör en viktig strukturell del i kompositkonstruktionen kan vara direkt exponerade mot brand, vilket resulterar i degradering av materialens hållfasthetsparametrar.

Ett antal utredningar har gjorts där det utförts standardbrandtester på SC-väggar och halva SC-väggar med och utan penetrationer, se [64], [65] och [66]. Testerna har utförts i enlighet med "Standard test methods for fire tests of building construction and materials" [25], "Standard test methods for fire tests of penetration fire-stop systems" [26] och U.S. NRC Regulatory Guide 1.189, "Fire protection for operating nuclear power plants" [114]. Utredningarna har visat att SC-konstruktionerna möter kraven vid ett 3-timmars brandmotståndstest.

6.4.5 Kritiska områden

Restspänningar och initiala imperfektioner kan uppstå i stålplåtarna som ett resultat av betongpåfyllningen. Detta kan i sin tur leda till en ökad risk för lokal buckling av stålplåtarna i SC-konstruktionen då den belastas med tryckspänningar, se Figur 6.5. Enligt [132] får inte stålplåtarna ha en nominell sträckgräns under 345 MPa eftersom:

1. Lokal buckling kan ske i förtid på grund av att residualspänningarna som följd av betonggjutningen kan utgöra den största andelen av total lastspänning i förhållande till sträckgränsen.
2. Förhöjda temperaturer vid olyckslast kan orsaka tryckspänningar i stålplåtarna som överstiger sträckgränsen och potentiell lokal buckling.



Figur 6.5: Lokal buckling av stålplåten. Figur och text hämtad från [132].

6.5 Exempel på anläggningar med SC-konstruktioner

6.5.1 Westinghouse Electric Company AP1000

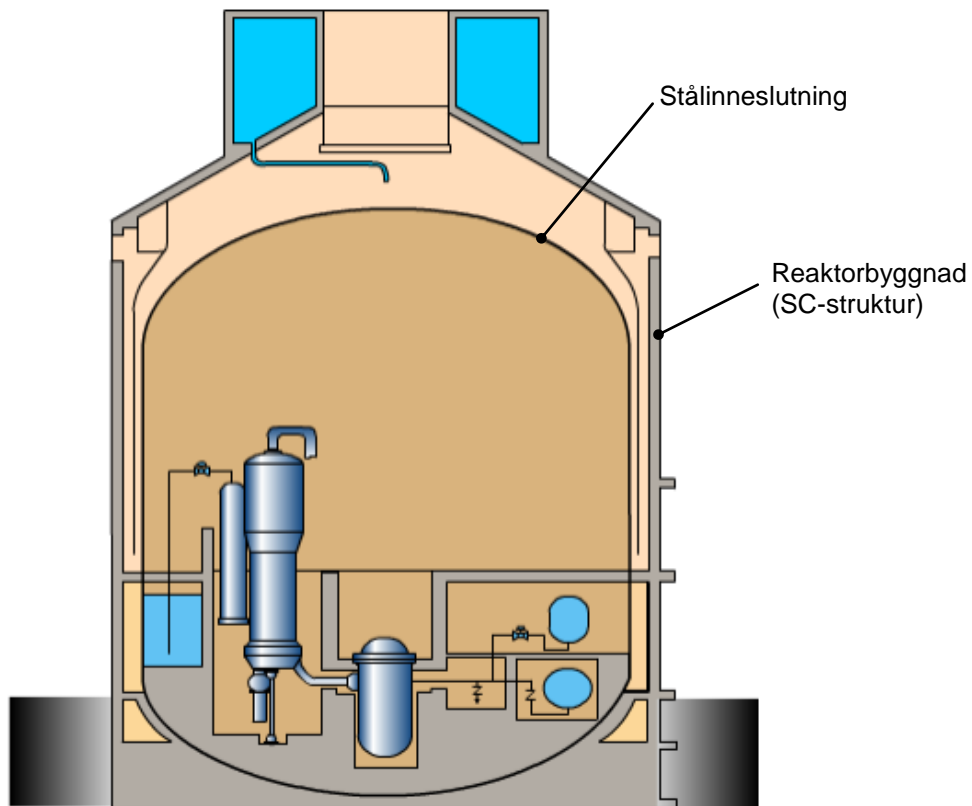
Westinghouse har utvecklat ett kärnkraftverk som heter AP1000 vilket är en PWR med en elektrisk effekt på 1 110 MW. AP1000 har designats för att kunna utnyttja modulbyggnadsteknik.

Westinghouse har skickat in ett "Design Control Document" (DCD) gällande AP1000 till U.S. NRC [137]. NRC slutförde sin granskning av [137] år 2011 och utfärdade den slutliga säkerhetsutvärderingsrapporten [111] samma år med slutsatsen att [137] möter alla krav specificerade i underkapitel B till 10 CFR Part 52 [112].

I kapitel 3.3 i [137] står det att reaktorbyggnaden som omger stålslutningen är en SC-struktur förutom den del av byggnaden som omges av hjälpsystembyggnaden. Reaktorbyggnaden fungerar som en yttre skyddande struktur, se Figur 6.6 nedan.

Westinghouse har som målsättning att bygga ett antal AP1000 i Storbritannien. HSE/ONR har följaktligen publicerat en bedömning av den generiska designen [73]. I bedömningen går det att läsa att SC-strukturerna sannolikt är mer än tillräckligt robusta för de aktuella lasterna som strukturerna ska stå emot. Vidare står det skrivet i bedömningen att även om det inte finns någon erkänd internationell standard för

design av SC-konstruktioner, så anser ONR att Westinghouse sannolikt kan komma att styrka att designen möter de krav som ställs.



Figur 6.6: Tvärsnitt av AP1000 [136].

I Kina byggs för närvarande 4 st. AP1000 jämnt fördelade på Sanmen kärnkraftverksanläggning i Zhejiang och Haiyang kärnkraftverksanläggning i Shandong. Alla fyra kärnkraftverk beräknas vara i drift år 2016.

I USA byggs för närvarande 4 st. AP1000 jämnt fördelade på Vogtle kärnkraftverksanläggning i Georgia och VC Summer i South Carolina. Alla fyra kärnkraftverk beräknas vara i drift år 2017.

6.5.2 GE Hitachi Economic Simplified BWR (ESBWR)

General Electrics och Hitachi har tillsammans under namnet GE Hitachi Nuclear Energy (GEH) utvecklat en kokvattenreaktor med namnet ESBWR som har en elektrisk effekt på cirka 1 600 MW.

En ESBWR, Shimane 3, är för närvarande under konstruktion på Shimane kärnkraftsanläggning i Japan. Anläggningen var klar till 94 % i mars 2011 då byggandet avbröts efter olyckan vid Fukushima [138]. På Shimane 3 används SC-moduler för konstruktionen av rummet med det hydrauliska systemet för drivdonen [47], se Figur 6.7.



Figur 6.7: Modul konstruerat av SC-väggar och som innehåller det hydrauliska systemet för drivdonen lyfts på plats på Shimane 3. Bild från [47].

I september 2014 så certifierade U.S. NRC ESBWR:s design för användning i USA [116]. I kapitel 3.8.4.3.4 i den slutliga säkerhetsutvärderingsrapporten [115] så står det att i tidigare utgåvor av DCD-rapporten att SC-bjälklag skulle användas för merparten av reaktorbyggnadens bjälklag. Kompositbjälklagen var tänkta att konstrueras av armeringsjärn, stålplattor, stålbalkar och betong. GEH beräknade hållfastheten av kompositbjälklagen på samma sätt som för vanliga RC-strukturer förutom att stålplattan beskrevs som ekvivalent med två ortogonala armeringsjärn med samma tvärsnittsarea som stålplattan. GEH designade stutsarna enligt ANSI/AISC N690 [9] och beräknade spänningar i armeringsjärn, stålplattor och i betong mötte kriterierna för tillåtna spänningar enligt Subsection CC i ASME Section III Division 2 [18]. Eftersom det inte finns någon vägledning i [18] för hur kompositbjälklag ska designas ombads GEH att lämna en mer detaljerad beskrivning av kompositbjälklagens design inklusive grunden för att behandla stålplattorna som två ortogonala armeringsjärn eftersom stålplattorna belastas biaxialt vilket inte är fallet för individuella armeringsjärn. Vidare ombads GEH visa hur man beräknade krafterna som verkar i olika riktningar vid design av stutsarna och hur tillåtna spänningar bestämdes då Subsection CC i ASME inte behandlar föreliggande typer av stålstrukturdelar. Som följd valde GEH att ersätta alla kompositbjälklag med RC-strukturer för certifieringen av ESBWR i USA.

7. Referenser

- [1] AFCEN. ETC-C, EPR Technical Code for Civil Works - Design and Construction Rules for Nuclear Power Generating Stations. 2010 Edition.
- [2] Adediran A., Jovall O., Orbivic N., Report on the Design for Impactive and Impulsive Loads for Nuclear Safety Related Structures (to be published by ACI).
- [3] American Concrete Institute, ACI. ACI 349-01, Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures. September 2007.
- [4] American Concrete Institute ACI, Guide for Obtaining Cores and Interpreting Compressive Strength Results, ACI 214.4R-10, 2003.
- [5] American Concrete Institute ACI, Code Requirements for Nuclear Safety-Related Concrete Structures (ACI 349-13) and Commentary, ACI 349-13, 2014.
- [6] American Concrete Institute ACI, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary, ACI 318-08, 2008.
- [7] American Concrete Institute ACI, Reinforced Concrete Design for Thermal Effects on Nuclear Power Plant Structures, ACI 349.1R-07, 2007.
- [8] ACI, Hilsdorf H.K. et al. The Effects of Nuclear Radiation on the Mechanical Properties of Concrete, SP 55-10, 1978.
- [9] American Institute of Steel Construction, AISC. ANSI/AISC N690-12, Specification for Safety-Related Steel Structures for Nuclear Facilities. January 31, 2012.
- [10] American Institute of Steel Construction, AISC. ANSI/AISC N690s1-12, Specification for Safety-Related Steel Structures for Nuclear Facilities Supplement No. 1. Draft dated May 1, 2014.
- [11] American Institute for Steel Construction AISC. Specification for the Design, Fabrication and Erection of Structural Steel for Buildings, November 1, 1978.
- [12] American National Standards Institute, ANSI. ANSI N45.4-1972, Leakage-Rate Testing of Containment Structures for Nuclear Reactors. March 1972.
- [13] American Nuclear Society, ANS. ANSI/ANS-56.8-1981, American National Standard for Containment System Leakage Testing Requirements. February, 1981.
- [14] American Nuclear Society, ANS. ANSI/ANS-56.8-1987, American National Standard for Containment System Leakage Testing Requirements. January 20, 1987.
- [15] American Nuclear Society, ANS. ANSI/ANS-56.8-1994, American National Standard for Containment System Leakage Testing Requirements. August 4, 1994.
- [16] American Nuclear Society, ANS. ANSI/ANS-56.8-2002, American National Standard for Containment System Leakage Testing Requirements. November 2002.
- [17] American Society of Civil Engineers, ASCE. Standard No. 004-98, Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary (ASCE 4-98).

- [18] American Society of Mechanical Engineers, ASME. Boiler and Pressure Vessel Code, Section III - Rules for Construction of Nuclear Facility Components, Division 2 - Code for Concrete Containments. 2007.
- [19] American Society for Mechanical Engineers ASME, ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III Rules for Construction of Nuclear Facility Components Division 1 Subsection NE Class MC Components 2013, 1 July 2013.
- [20] Anderson P. et al., Average force along unbonded tendons: a field study at nuclear reactor containments in Sweden, Nuclear Engineering and Design 235 (2005) 91–100.
- [21] Anderson P., Thirty years of measured prestress at Swedish nuclear reactor containments, Nuclear Engineering and Design 235 (2005) 2323–2336.
- [22] Anderson P., Structural integrity of prestressed nuclear reactor containments, Ph. D. Thesis, Lund University, 2007.
- [23] AREVA, Ostermann D., Krumb C. and Wienand B., The inner containment of an EPR Pressurized Water Reactor, New build and innovation, 2014.
- [24] Ashar H., Containment Structures of U.S. Nuclear Power Plants Background, Regulations, Codes and Standards, and Other Considerations, ASME 2013.
- [25] ASTM International, ASTM E119, Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials, 2009.
- [26] ASTM International, ASTM E814, Standard Test Method for Fire Tests of Penetration Firestop Systems, 2010.
- [27] Auluck R., “Containment Degradation Issues With U.S. Nuclear Power Plants – Lessons Learned”, Transactions SMiRT 21, Paper ID# 614, New Delhi, India, November 2011.
- [28] Baggens O., Rydén N., Systematic errors in Impact-Echo thickness estimation due to near field effects, NDT&E International 69 (2015) 16-27, Elsevier, Published online September 2014.
- [29] Basu P., Gupchup V., Bishnoi L., Containment Dome Delamination, SMiRT 16, Washington D.C., August 2001.
- [30] Bakgrundsrapport till DNB [63] (levererad till SSM 23 januari 2015).
- [31] Boverket, BFS 2011:10 – EKS 8 Boverkets föreskrifter och allmänna råd om tillämpning av europeiska konstruktionsstandarder (eurokoder).
- [32] CBI, Lagerblad B. och Trädgårdh J., Alkaliska reaktioner I svensk betong, CBI rapport 4:92, 1992.
- [33] CSA Group, N287.x, Standard i 7 delar avseende reaktorinneslutningar av betong (x = 1, 2, ..., 7), utgivningsår 2008-2014.
- [34] DIN Standard, DIN 25459:2014-11 Sicherheitsbehälter aus Stahlbeton und Spannbeton für Kernkraftwerke, november 2014.
- [35] Elforsk, rapport 08:24 Utvärdering av oförstörande provningsmetoder med möjliga tillämpningar inom kärntekniska betongkonstruktioner, januari 2008.
- [36] Elforsk, rapport 10:85 Litteraturstudier och test av oförstörande provningsmetoder (OFP) med möjliga tillämpningar inom kärnkraftens betongkonstruktioner, maj 2010.

- [37] Elforsk, Nilsson L.O., Johansson P., Förändringsprocesser i reaktorinneslutningar. Klimatförhållanden och uttorkning, Elforsk 09:100, 2009.
- [38] Elforsk, Kalinowski M., et al., Risker för alkalisilikareaktion i dammar av betong med lågalkaliska cement och ballast från fjällbergarter, Elforsk rapport 13:55, 2013.
- [39] Electric power research institute (EPRI), BWR containment license renewal, Industry report, rev 1, EPRI TR-103840s, 1994.
- [40] Erin Engineering Inc., Methodology for performing aircraft impact assessments for new plant designs, NEI 07-13, Revision 8P, April 2011.
- [41] Exempel på finita elementanalyser tagna från projekt genomförda av Scanscot Technology AB.
- [42] European Utility Requirements, EUR, Volume 2 General Nuclear Island Requirements Chapter 9 Containment System, Rev. C, April 2001.
- [43] Nuclear containments (2001), fib Bulletin 13, State-of-art report.
- [44] Fischer M., The severe accident mitigation concept and the design measures for core melt retention of the European Pressurized Reactor (EPR), Nuclear Engineering and Design 230 169-180, 2004.
- [45] Force Technology/Scanscot Technology/Electricité de France (EDF)/Barsebäck NPP CONMOD – Main Report, Euratom FIKS-CT 2001-00204.
- [46] French Association for Design, Construction and In-Service Inspection Rules for Nuclear Island Components AFCEN, EPR Technical Code for Civil Works ETC-C, 2012.
- [47] Fushiki K. et al., HCU Room Module Supplied to The Chugoku Electric Power Co., Inc. Shimane Nuclear Power Plant Unit No. 3, Hitachi Review Vol. 57 (2008), No. 6.
- [48] Geosense, Vibrating Wire Anchor Load Cell, VWLC 5000 Series, V1.1, December 2012.
- [49] GE Hitachi Nuclear Energy, License Topical Report ESBWR Certification Probabilistic Risk Assessment, Revision 6, October 2010.
- [50] GE Hitachi Nuclear Energy. 26A6642AJ, ESBWR Design Control Document Tier 2. Revision 9. December 2010.
- [51] Health and Safety Executive, HSE. Safety Assessment Principles for Nuclear Facilities. 2006 Edition.
- [52] Inaudi D. et al., SMARTEC, Long-Range Pipeline Monitoring by Distributed Fiber Optic Sensing, Proceedings of IPC2006: 6th International Pipeline Conference, September 25 - 29, 2006, Calgary, Alberta, Canada.
- [53] International Atomic Energy Agency, IAEA. Safety Guide No. NS-G-1.10, Design of Reactor Containment Systems for Nuclear Power Plants. September 2004.
- [54] International Atomic Energy Agency IAEA, Safety Standards Safety of Nuclear Power Plants: Design, Specific Safety Requirements No. SSR-2/1, 2012.

- [55] IAEA, Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety: Concrete containment buildings, TECDOC-1025, 1998.
- [56] International Atomic Energy Agency, IAEA. Safety Guide No. NS-G-2.6, Maintenance, Surveillance and In-service Inspection in Nuclear Power Plants. October 2002.
- [57] International Atomic Energy Agency, IAEA. Specific Safety Guide No. SSG-28, Commissioning for Nuclear Power Plants. May 2014.
- [58] International Atomic Energy Agency IAEA, IAEA Report on Reactor and Spent Fuel Safety in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, 2012.
- [59] International Atomic Energy Agency IAEA, Technical Document DRAFT TECDOC Considerations of the Application of the IAEA Safety Requirements for Design of Nuclear Power Plants, DRAFT for comments Rev 7b, September 2014.
- [60] International Atomic Energy Agency, IAEA Safety Standard Series Requirements NS-R-1 Safety of Nuclear Power Plants: Design, 2000.
- [61] Japan Electric Association. Technical Guidelines for Aseismic Design of Steel Plate Reinforced Concrete Structures - Building and Structures - Translation of JAEG 4618-2005. August 2006.
- [62] Johnson T.E., Hovis B., Jovall O., Munshi J., Stevenson J.D., Commentary on Article CC-3000 Design 2013 ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III Division 2 Code for Concrete Containments (to be published by ASME).
- [63] Jovall O., Kölfors J., Anderson P., Larsson J.-A., Thelandersson S., Dimensionering av nukleära byggnadskonstruktioner (DNB) 2014:06, Strålsäkerhetsmyndigheten SSM, januari 2014.
- [64] Lee C.S. et al., An experimental study on the fire resistance of SC wall, Structural Engineers World Congress 2007, Bangalore, India, November, 2007.
- [65] Moon I. et al., A Consideration on Fire Resistance of Compartment Through Penetration in Steel Concrete (SC) Structure, Transactions SMiRT 21, 6-11 November, 2011, New Delhi, India.
- [66] Moon I. et al., Performance-based Design of Stiffened Steel Plate Concrete Wall in Fire, SMiRT 20, Espoo, Finland, August, 2009.
- [67] Moreadith F., Pages R., Delaminated Prestressed Concrete Dome: Investigation and Repair, ASCE, 1983.
- [68] Neville A.M., Properties of concrete, fourth edition, Pearson Education, 2003.
- [69] Nie J. et al., On the correct application of the 100-40-40 rule for combining responses due to three directions of earthquake loading, Brookhaven National Laboratory, July 2010.
- [70] Nuclear Energy Institute, NEI. NEI 94-01, Industry Guideline for Implementing Performance-Based Option of 10 CFR Part 50, Appendix J, Revision 3-A.
- [71] Oak Ridge National Laboratory, ORNL. NUREG/CR-3549, Evaluation of Containment Leak Rate Testing Criteria. March 1984.

- [72] OECD Nuclear Energy Agency Committee on the Safety of Nuclear Installations OECD NEA CSNI, NEA/CSNI/R(2014)5 Improving Robustness Assessment Methodologies for Structures Impacted by Missiles (IRIS_2012) Final Report, June 2014.
- [73] Office for Nuclear Regulation, ONR. ONR-GDA-SR-11-002, New nuclear reactors: Generic Design Assessment - Westinghouse Electric Company LLC AP1000® nuclear reactor, Revision 0, 14 December 2011.
- [74] Personlig korrespondens med Dr. Javeed Munshi, Bechtel Power Corporation, oktober 2014.
- [75] Petersson T. och Sundquist H.(2003), Spännbetong, utg. 4, TRITA-BKN Rapport 46, KTH, Byggkonstruktion.
- [76] Radiation and Nuclear Safety Authority, STUK. Guide YVL A.5, Construction and Commissioning of a Nuclear Facility. June 2014.
- [77] Radiation and Nuclear Safety Authority, STUK. Guide YVL B.6, Containment of a Nuclear power Plant. November 2013.
- [78] Radiation and Nuclear Safety Authority, STUK. Guide YVL E.6, Buildings and Structures of a Nuclear Facility. November 2013.
- [79] Roctest Limited, Instruction Manual, Direct and Inverted Pendulums Model DP & RP, 2006.
- [80] Roctest Limited, Instrumentation of Nuclear Power Plants, NUCENAN Nuclear Power Plant Application Note.
- [81] Scanscot Technology AB, BRIGADE Standard Theory Manual Version 4.2, 2010.
- [82] Scanscot Technology AB, Report 08410/FR-01 Canadian Nuclear Safety Commission, CNSC: R397.1 Recommendations on Assessing Civil Structures for New Nuclear Power Plants, 15 June 2009 (confidential).
- [83] Scanscot Technology AB, Report 09416 DJN-14-01, CONSAFESYS – Dan Naus: U.S: Nuclear Power Plant Containments: Description, Testing and Inspection, Operating Experience, and License Renewal Considerations, July 2014.
- [84] Scanscot Technology AB, Report 03402/TR-01, ISP48: Post-test analysis of the NUPEC/NRC 1:4-scale prestressed concrete containment vessel model, Edition 2, February 2005.
- [85] Scanscot Technology AB, Report 10503/R-01, Standard Problem Exercise Performance of Containment Vessel under Severe Accident Condition (Phase 1), Edition 1, mars 2011.
- [86] Se-Kwon Jung et al, Critical Section Selection Methodology for the U.S. EPR Standard Nuclear Power Plant, Journal of Pressure Vessel Technology Vol. 135, August 2013.
- [87] SS-EN 1992-1-1, Eurokod 2: Dimensionering av betongkonstruktioner – Del 1-1: Allmänna regler och regler för byggnader.
- [88] SS-EN 1998, Eurokod8: Dimensionering av bärverk med avseende på jordbävning.

- [89] Statens kärnkraftinspektion, SKI. Rapport 02:58, Utredning kring reaktorinneslutningar - konstruktion, skador samt kontroller och provningar. Januari 2003.
- [90] Statens kärnkraftinspektion SKI, SKI ref 7.1.24 1082/85 Utsläppsbegränsande åtgärder vid svåra hårdhaverier.
- [91] Statens kärnkraftinspektion SKI, Project SEISMIC SAFETY. Characterization of seismic ground motions for probabilistic safety analyses of nuclear facilities in Sweden, SKI Technical Report 92:3, 1992.
- [92] Statens kärnkraftinspektion SKI, Betonginneslutningar i svenska kärnkraftverk, SKI rapport 02:59, december 2002.
- [93] Statens kärnkraftinspektion SKI, Elektrokemiska aspekter på korrosion i svenska reaktorinneslutningar, SKI rapport 2007:13, oktober 2006.
- [94] Statens kärnkraftinspektion SKI, M. Ullberg, Elektrokemiska aspekter på korrosion i svenska reaktorinneslutningar. SKI Rapport 2007:13, 2007.
- [95] Strålsäkerhetsmyndigheten SSM, beslut SSM 2008/1945 -6, -7 och -8, Föreläggande avseende analys av radiologiska omgivningskonsekvenser för kärnkraftreaktorerna Ringhals 1, Ringhals 2, Ringhals 3 och Ringhals 4/Oskarshamn 1, Oskarshamn 2 och Oskarshamn 3/Forsmark 1, Forsmark 2 och Forsmark 3, 2 april 2009.
- [96] Strålsäkerhetsmyndigheten SSM, författningssamling SSMFS 2008:23 Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om skydd av människors hälsa och miljön vid utsläpp av radioaktiva ämnen från vissa kärntekniska anläggningar, 19 december 2008.
- [97] Strålsäkerhetsmyndigheten SSM, författningssamling SSMFS 2008:51 Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om grundläggande bestämmelser för skydd av arbetstagare och allmänhet vid verksamhet med joniserande strålning, 19 december 2008.
- [98] Strålsäkerhetsmyndigheten SSM, beslut 2014-972-31 Händelseklassindelning och referensvärden för ESS-anläggningen, 26 juni 2014.
- [99] Strålsäkerhetsmyndigheten SSM, författningssamling SSMFS 2008:17 Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd om konstruktion och utförande av kärnkraftsreaktorer, 19 december 2008.
- [100] Strålsäkerhetsmyndigheten SSM, rapport Utvärdering av regler och normer för betongkonstruktioner i svenska kärnkraftsanläggningar 2010:37, december 2010.
- [101] Strålsäkerhetsmyndigheten SSM, utredningsrapport SSM2011-800-2 Utredningsrapport avseende oförstörande provningsmetoders förutsättningar och möjligheter för kontroll av betongkonstruktioner vid kärnkraftverk, maj 2012.
- [102] Strålsäkerhetsmyndigheten SSM, presentationer vid Inspectas kärnteknikdagar 2014 Utredning av regler om inneslutningar och andra byggnadskonstruktioner i kärntekniska anläggningar samt Review of regulations for nuclear installations and certain other activities involving radiation, november 2014.
- [103] Strålsäkerhetsmyndigheten SSM, Xanthopoulos K., Lillhök S., Utredning av regler om inneslutningar och andra byggnadskonstruktioner i kärntekniska anläggningar, 2014-11-20.

- [104] Strålsäkerhetsmyndigheten SSM, Degradering i betong och armering med avseende på be-strålning och korrosion, SSM 2014:31, 2014.
- [105] Svenska Betongföreningen, Betongrapport 15 volym I och volym II Svenska Betongföreningens handbok till Eurokod 2, 2010.
- [106] Telemac, Hemsida, www.telemac.fr/en/Ref/Olkiluoto-3-Nuclear-power-plant/, oktober 2014.
- [107] Timoshenko S. P., Woinowsky-Krieger S., Theory of Plates and Shells, McGraw-Hill Book Company, Second Edition, 1959.
- [108] U.S. Department of Energy, DOE. MPR-2610, Application of Advanced Construction Technologies to New Nuclear Power Plants. Revision 2. September 24, 2004.
- [109] U.S. Department of Energy DOE, DOE Standard Accident analysis for aircraft crash into hazardous facilities, May 2006.
- [110] U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. NRC. NUREG/CR-6810, Overpressurization Test of a 1:4-Scale Prestressed Concrete Containment Vessel Model, March 2003.
- [111] U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. NRC. NUREG-1793 Supplement 2, Final Safety Evaluation Report Related to Certification of the AP1000 Standard Plant Design, Docket No. 52-006, August 5 2011.
- [112] U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. NRC. NRC Regulations: Title 10, Code of Federal Regulations. August 2014.
- [113] U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. NRC. Regulatory Guide 1.90, Inservice Inspection of Prestressed Concrete Containment Structures with Grouted Tendons. November 2012.
- [114] U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. NRC. Regulatory Guide 1.189, Fire Protection for Nuclear Power Plants. Revision 2, October 2009.
- [115] U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. NRC. Final Safety Evaluation Report For The Economic Simplified Boiling Water Reactor Design, Docket No. 52-010, March 9 2011.
- [116] U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. NRC. NRC News No: 14-060, NRC Certifies GE-Hitachi New Reactor Design, September 16 2014.
- [117] U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. NRC. 10 CFR Part 50 NRC 2008-02-37 Policy Statement on the Regulation of Advanced Reactors, 13 November 2008.
- [118] U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. NRC. NUREG-0800 Standard Review Plan 3.8.1 Concrete Containment Rev. 3, May 2010.
- [119] U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. NRC. Regulatory Guide 1.136 Design Limits, Loading Combinations, Materials, Construction, and Testing of Concrete Containments Rev. 3 mars 2007.
- [120] U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. NRC. Crystal River Unit 3, Containment Delamination Update by Progress Energy, November 2009.

- [121] U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. NRC. Regulatory Guide 1.92 Combining Modal Responses and Spatial Components in Seismic Response analysis, Rev. 2 July 2006.
- [122] U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. NRC. Regulatory Guide 1.216 Containment Structural Integrity Evaluation for Internal Pressure Loadings above Design-Basis Pressure, Rev. 0, August 2010.
- [123] U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. NRC. Regulatory Guide 1.163 Performance-Based Containment Leak-Test Program, September 1995.
- [124] U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. NRC. Regulatory Guide 1.35.1 (1990), Determining prestressing forces for inspection of prestressed concrete containments. 1990.
- [125] U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. NRC. Hessheimer M. F., et al., Overpressurization test of a 1:4-Scale prestressed concrete containment vessel model NUREG/CR-6810, 2003.
- [126] U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. NRC. D. J. Naus et al., Report on Aging of Nuclear Power Plant Reinforced Concrete Structures, NUREG/CR-6424, 1996.
- [127] U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. NRC. Regulatory Guide 1.35, In-service inspection of ungrouted tendons prestressed concrete containments, 1990.
- [128] U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. NRC. Hessheimer M. F. and Dameron R. A., Containment integrity research at Sandia national laboratories. NUREG/CR-6906, 2006.
- [129] U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. NRC. Naus D. J., Ellingwood B. R., Report on Aging on Nuclear Power Plant Reinforced Concrete Structures, NUREG/CR-6424, 1996.
- [130] Utredning utförd av Scanscot Technology AB i samband med ett uppdrag åt Strålsäkerhetsmyndigheten SSM att motivera vissa delar av DNB [63], SSM delaktivitetsnummer 2070003-24.
- [131] Utredning utförd av Scanscot Technology AB inom ramen för ett kommersiellt uppdrag åt en kärnkraftsleverantör från Asien, 2014 (konfidentiell).
- [132] Varma A, Purdue University. Steel-Plate Composite (SC) Design for Nuclear Facilities. 8/9/11.
- [133] von Riesemann W.A. and Parks M.B, Current state of knowledge on the behavior of steel liners in concrete containments subjected to overpressurization loads. Nuclear Engineering and Design, v157, pp. 481-487, 1995.
- [134] Western European Nuclear Regulators Association WENRA, Report Safety of new NPP designs, Study by Reactor Harmonization Working Group RHWG, mars 2013.
- [135] Western European Nuclear Regulators Association WENRA, WENRA Report Safety Reference Levels for Existing Reactors Update in relation to lessons learned from TEPCO Fukushima Dai-Ichi accident, 24 September 2013.
- [136] Westinghouse Electric Company LLC, AP1000® Overview, 2011.

- [137] Westinghouse Electric Company LLC, ML11171A500, Westinghouse AP1000 Design Control Document, Rev. 19, June 21 2011.
- [138] World Nuclear Association, Homepage, Information Library, Nuclear Power in Japan, Updated 30 September 2014.

Bilaga 1: Lista på figurer

Figur 2.1:	Konstruktionsbas föreslagen av IAEA i [59] och baserad på [54] samt på en utvärdering av Fukushima Daiichi-olyckan.....	20
Figur 2.2:	Inneslutningens täthetsbarriär (tätplåt samt genomföringar med skalventiler, portar, slussar och för kokvattenreaktorer en demonterbar kupol).....	22
Figur 2.3:	Schematisk redovisning av reduktion av luftburna partiklar.	24
Figur 2.4:	Exempel på sekundärinneslutning, schematisk redovisning.	25
Figur 2.5:	Inneslutningens volym och värmebortförel.....	26
Figur 2.6:	Sprinklersystem inuti inneslutningen med utvändig vattenrecirkulation (1 krets av normalt flera separerade parallella kretsar visad).....	26
Figur 2.7:	Trycknedtagningssystem med kondensationsbassäng.....	27
Figur 2.8:	Tryckavlastningssystem.	29
Figur 2.9:	Exempel på vissa funktioner hos den inre strukturen inuti inneslutningen.....	30
Figur 2.10:	Inneslutning med kondensator bestående av lutande vattenfyllda tuber anslutna till en bassäng ovanpå inneslutningen.....	34
Figur 2.11:	Inneslutning med slutet system där kondensorn inuti inneslutningen är ansluten till en högt placerad extern bassäng.....	35
Figur 2.12:	Inneslutning där bortledning och kylning av frigjord ånga sker med hjälp av tuber som leds igenom en extern bassäng.	35
Figur 2.13:	Passivt sprinklersystem där värme bortförs via stål inneslutningens vägg och där kylningen påskyndas via sprinkling av inneslutningsväggens utsida.	36
Figur 2.14:	System för hantering av en eventuell härdsmälta – ESBWR "basemat internal melt arrest and coolability device" (BiMAC-anordning).....	39
Figur 2.15:	System för hantering av en eventuell härdsmälta – EPR core melt stabilization concept.	40
Figur 2.16:	Påflygning med stort kommersiellt passagerarflygplan, kärnkraftverk sett uppifrån.....	41
Figur 2.17:	Övergripande principer för att skydda mot otillbörlig påverkan av inneslutningen vid händelsen påflygning med stort passagerarflygplan: Dubbel inneslutning.....	42
Figur 2.18:	Övergripande principer för att skydda mot otillbörlig påverkan av inneslutningen vid händelsen påflygning med stort passagerarflygplan: Reaktorbyggnadens ytterväggar (undre figuren) eller innerväggar (övre figuren) förstärks.	42
Figur 3.1:	Principiell konstruktionsutformning gällande svenska inneslutningar för kokvatten- (BWR) och tryckvattenreaktorer (PWR).....	44

Figur 3.2:	Principiell utformning av inneslutningsvägg för en svensk inneslutningskonstruktion (vertikalsnitt).	46
Figur 3.3:	Typisk utformning av genomföring för en svensk inneslutningskonstruktion.	47
Figur 3.4:	Typisk utformning av takkonstruktion för svenska BWR-inneslutningar. Vänster: endast ringplatta. Höger: ringplatta och övre cylindervägg (kon).....	49
Figur 3.5:	Typisk utformning av bottenplatta för svenska inneslutningar. Överst: hel bottenplatta. Mitt: bottenplatta med förstävningar. Nederst: bottenplatta på stödkonstruktion.	50
Figur 3.6:	Principfigur gällande funktionen av spännkablar i längsgående väggar i bränslebassänger för BWR-inneslutning (p: inre övertryck i inneslutning, F: spännkraft).	51
Figur 3.7:	Principfigur gällande förankring av spännkabelsystem i svenska inneslutningar.....	52
Figur 3.8:	Exempel på spännkabelfördelning för spännkablar med 360 graders krökning. Förankring för Kabel 1 är förskjuten 180 grader jämfört med Kabel 2.....	54
Figur 3.9:	Principfigur gällande testkanaler för provtryckning av tätplåtens svetsar.	55
Figur 3.10:	Principfigur gällande toroid över rörelsefog mellan cylindervägg och bottenplatta (se t.ex. [89])......	56
Figur 3.11:	Principfigur gällande cylindervägg där vertikal kontinuerlig förankring av utanpåliggande tätplåt används (horisontalsnitt).....	57
Figur 3.12:	Principfigur av infästning för inneslutningskupol.	58
Figur 3.13:	Principfigur av transportgenomföring enligt [125]......	58
Figur 3.14:	Principfigur av personsluss enligt [125].	59
Figur 3.15:	Principfigur av typisk rör genomföring i svensk inneslutning (se t.ex. [89]).....	59
Figur 3.16:	Principfigur av rör genomföring enligt [125].	60
Figur 3.17:	Principfigur gällande upplagsförhållande för mellanbjälklaget.....	61
Figur 3.18:	Uppmätta spännkabelkrafter vid svenska inneslutningar relativt initial kraft. Värdena motsvarar medelvärde vid respektive inspektion. (från [22]).....	66
Figur 3.19:	Principskiss av inneslutningen vid Ringhals 1 [89]......	68
Figur 3.20:	Principskiss av inneslutningen en för typisk Mark II [39].	69
Figur 3.21:	Principskiss av inneslutningen för ESBWR [50]......	70
Figur 3.22:	Principskiss av inneslutningen vid Ringhals 3 [89]......	71
Figur 3.23:	Principskiss av en typisk PWR-inneslutning [129].	72
Figur 3.24:	Principskiss av EPR-inneslutningen [23].	73

Figur 4.1:	Svenska myndigheters regler och föreskrifter för inneslutningar och andra byggnadskonstruktioner i kärntekniska anläggningar, samt SSMs rekommendation avseende dimensioneringsregler (från [102]).	75
Figur 4.2:	Inneslutningens respons.	78
Figur 4.3:	Exempel på samverkan mellan inneslutningen och andra byggnadsdelar.	79
Figur 4.4:	Exempel på gränsdragning mellan normer.	80
Figur 4.5:	Grundläggande dimensioneringsprinciper för DNB.	81
Figur 4.6:	Dimensioneringsanvisningar i DNB.	84
Figur 4.7:	Exempel på globala finita elementanalysmodeller av reaktorinneslutningar.	87
Figur 4.8:	Exempel på lokal finita elementanalysmodell för en reaktorinneslutning.	87
Figur 4.9:	Exempel på lokala finita elementmodeller av öppningar och slussar.	88
Figur 4.10:	Kraft-förskjutningskurva för tätplåtsförankring, från [62].	98
Figur 4.11:	Tätplåt belastad i tryck: Buckling.	99
Figur 4.12:	Avlänkningskraft från krökt spännkabel.	100
Figur 4.13:	Exempel på olinjär finita elementanalys av missil träffande betongpanel.	102
Figur 4.14:	Exempel på olinjära finita elementanalysmodeller för utvärdering av DEC-händelser.	104
Figur 4.15:	Exempel på marginaler vid en dimensionering, från [45].	106
Figur 4.16:	Exempel på effekten av minskad konservatism om mer avancerade analyser nyttjas till exempel vid verifiering av en befintlig byggnad, från [45].	106
Figur 4.17:	Exempel på effekt av en defekt i kritiskt område a), icke kritiskt område b) och kritiskt område med reducerad konservatism c), från [45].	107
Figur 4.18:	Exempel på områden där placeringen av spännkablar indikerar att effekten av spännkraft ej blir isotropisk.	110
Figur 5.1:	Schematisk bild av förankring i ett VSL-system. Bild hämtad från [20].	125
Figur 5.2:	Med permanenta lastceller uppmätta spännkrafter de första 30 åren efter uppspanning av Forsmark 1. I diagrammen jämförs uppmätta resultat med, enligt standarder, teoretiskt framräknade förluster efter 30 år. Diagram hämtade från [21].	126
Figur 5.3:	Vibrerande sträng-töjningsgivare. Telemac Model C-110 [80].	130
Figur 5.4:	Direkt pendelsystem installerat på utsidan av en vägg [79].	131
Figur 5.5:	Lastcell: Geosense VWLC 5000 [48].	132
Figur 5.6:	Lastcell: HBM C6-100t, Sandia 1:4 [110].	132

Figur 5.7:	Schematiskt tvärsnitt av en SMARTprofile-sensor och en provbit. Bild hämtad från [52].	133
Figur 6.1:	Skillnad mellan en SC och en RC konstruktion. Figur från [108].	140
Figur 6.2:	Schematiskt bild av den ekonomiska vinningen med en SC-konstruktion framför en RC-konstruktion. Figur från [108].	141
Figur 6.3:	Olika typer av samverkan mellan stålplåt och betong. Figur från [61].	142
Figur 6.4:	Typiskt flöde vid dimensionering av en SC-konstruktion. Figur från [61].	147
Figur 6.5:	Lokal buckling av stålplåten. Figur och text hämtad från [132].	149
Figur 6.6:	Tvärsnitt av AP1000 [136].	150
Figur 6.7:	Modul konstruerat av SC-väggar och som innehåller det hydrauliska systemet för drivdonen lyfts på plats på Shimane 3. Bild från [47].	151

Bilaga 2: Lista på tabeller

Tabell 2.1:	Djupförsvarsnivåer.	12
Tabell 2.2:	Sammanfattning av de huvudsakliga kraven på utsläpps begränsningar.	13
Tabell 2.3:	Sammanfattning av de huvudsakliga kraven på utsläpps begränsningar för ESS-anläggningen.	14
Tabell 2.4:	Händelseklasser i enlighet med SSMFS 2008:17 2 §.	15
Tabell 4.1:	Kombinering av händelseklasser enligt SSM och övergripande acceptanskriterier enligt IAEA, tillsammans med exempel på inneslutningsdimensionering enligt DNB.	83
Tabell 5.1:	Inneslutningens gastryck vid trycktester [16].	121
Tabell 5.2:	Inneslutningens gastryck vid initialt trycktest [18].	121
Tabell 5.3:	Inneslutningens gastryck vid trycktester [53].	122
Tabell 5.4:	Intervaller för trycktester vid periodiska inspektioner [16].	124
Tabell 5.5:	Mätningar vid läckagetest [16].	127
Tabell 5.6:	Mätningar vid strukturellt integritetstest [18].	127
Tabell 5.7:	Mätutrustning för EPR, utdrag ur [1].	129
Tabell 6.1:	Fördelar och nackdelar med SC-konstruktioner jämfört med RC- konstruktioner. Från [132] om annat ej anges.	143

Bilaga 3: Förkortningar

ANS	American National Standard
ANSI	American National Standards Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineers
BiMAC	Basemat internal Melt Arrest and Coolability device
BPVC	Boiler and Pressure Vessel Code
BWR	Boiling Water Reactor - Kokvattenreaktor
CANDU	Canada Deuterium Uranium
CHRS	Containment Heat Removal System
CILRT	Containment Integrated Leak Rate Test - Integrerat läckagehastighetstest för inneslutningen
DBA	Design Basis Accident - Designbaserad olycka
DCD	Design Control Document
DEC	Design Extension Conditions
EDF	Electricité de France
EPR	European Pressurized Reactor - Europeisk tryckvattenreaktor
ESBWR	Economic Simplified Boiling Water Reactor - Ekonomisk förenklad BWR
ESS	European Spallation Source
GDCS	Gravity-Driven Cooling System
GEH	GE Hitachi Nuclear Energy
HSE	Health and Safety Executive
IAEA	International Atomic Energy Agency
IRWST	Internal Refuelling Water Storage Tank
ISI	In-service Inspection - Periodisk inspektion
NII	Nuclear Installations Inspectorate
NRC	Nuclear Regulatory Commission
ONR	Office for Nuclear Regulation
PWR	Pressurized Water Reactor - Tryckvattenreaktor
RC	Reinforced Concrete Structure - Armerad betongstruktur
SC	Steel Plate Reinforced Concrete Structure - Stålplattearmerad betongstruktur
SIT	Structural Integrity Test - Strukturellt integritetstest
SKI	Statens kärnkraftinspektion
SSM	Strålsäkerhetsmyndigheten
SSMFS	Strålsäkerhetsmyndighetens författningssamling

WENRA Western European Nuclear Regulators Association

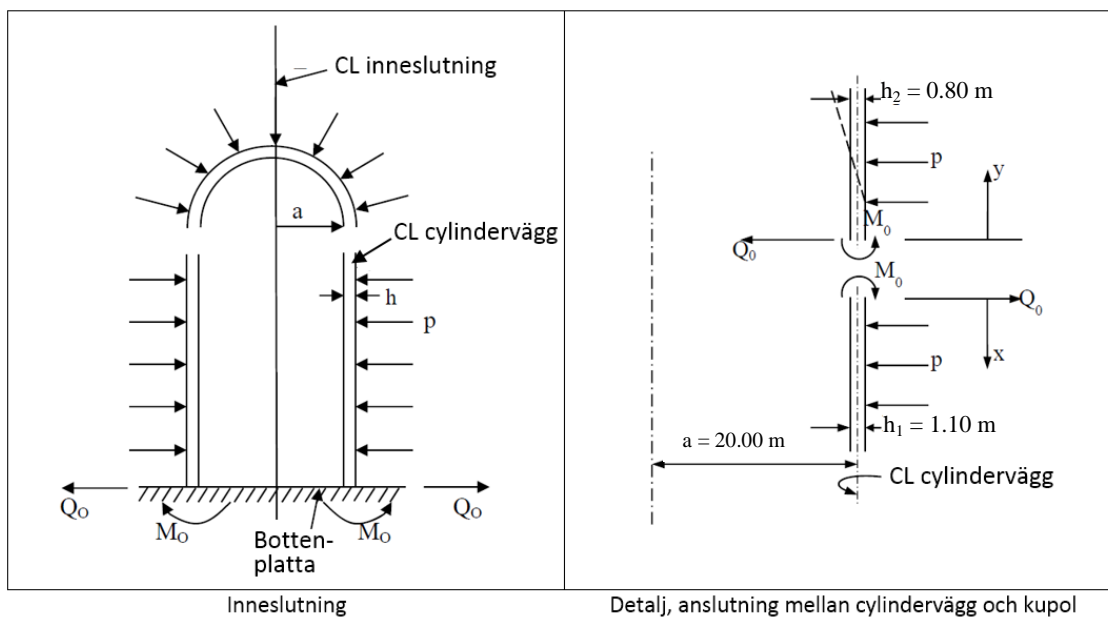
Bilaga 4: Beteckningar

L_0	Känd läckagehastighet överlagrad på inneslutningen vid verifikationstestet.
L_a	Maximalt acceptabel läckagehastighet vid trycket P_a under ett Typ A-test.
L_{am}	Estimerad av läckagehastighet.
L_c	Sammanfattad läckagehastighet: summering av L_a och L_0 .
L_{ra}	Maximalt acceptabelt läckage vid olycka.
L_{rm}	Totalt inneslutningsläckage erhållet från medelvärdet vid mätning under tryckplåtå vid trycket för läckagetestet.
P	Tryck
P_a	Maximalt tryck vid designbaserad olyckslast.
$P_{ISI,L}$	Tryck för läckagetester vid periodiska inspektioner
P_d	Dimensioneringstryck ("design pressure").

Bilaga 5: Exempel på överslagsberäkning

Nedan följer ett exempel på en överslagsberäkning för tvärsnittskontroll av inneslutningsväggen.

Inneslutningsskalet studeras med hjälp av klassisk skalteori. Här antas att inneslutningen utgörs av en cylinder som är fast inspänd vid sin nedre rand (mot bottenplattan) och anslutande mot en kupol i sin överkant, se figur nedan (från [62]).



Följande indata nyttjas i beräkningsexemplet:

- Cylinderns radie: $a = 20.00 \text{ m}$
- Cylinderväggens tjocklek: $h = h_1 = 1.10 \text{ m}$
- Kupolens tjocklek: $h_2 = 0.80 \text{ m}$
- Betongens elasticitetsmodul: $E = 28 \text{ GPa}$
- Betongens tvärkontraktionstal: $\nu = 0.17$
- Inre övertryck (teckenregler enligt figur ovan): $p = -450 \text{ kPa}$

Utdata från beräkningarna är (teckenregler enligt figur ovan):

- Inspänningsmoment vid nedre rand: M_0
- Tvärkraft vid nedre rand: Q_0
- Inspänningsmoment vid anslutning mot kupol: M_0
- Tvärkraft vid anslutning mot kupol: Q_0
- Normalkraft i omkretsled i ostört område: N

Snittkrafter i inspänningssnittet vid den nedre randen (anslutning mot bottenplattan)

Lösningen på differentialekvationen för ett halvoändligt cylindriskt skal, är enligt [107]:

$$w = e^{-\beta x}(C_3 \cos \beta x + C_4 \sin \beta x) + f(x) \text{-----} 1)$$

där w är den radiella förskjutningen (positiv inåt) och $f(x)$ partikulärlösningen beroende av lasten. I vårt fall är det konstant tryck såsom visas i figuren ovan och $f(x)$ är konstant.

Genom att sätta M_0 och Q_0 som randlast vid $x = 0$ elimineras konstanterna på grund av att:

$$-D \frac{d^2 w}{dx^2} (at x = 0) = M_0 \quad och \quad -D \frac{d^3 w}{dx^3} (vid x = 0) = Q_0$$

Detta resulterar i följande ekvationer:

$$w = -\frac{e^{-\beta x}}{2\beta^3 D} [\beta M_0 (\cos \beta x - \sin \beta x) + Q_0 \cos \beta x] + f(x) \text{-----} 2)$$

$$\theta = \frac{dw}{dx} = \frac{e^{-\beta x}}{2\beta^2 D} [2\beta M_0 \cos \beta x + Q_0 (\cos \beta x + \sin \beta x)] + f'(x) \text{-----} 3)$$

$$M_x = -D \frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{e^{-\beta x}}{\beta} [\beta M_0 (\cos \beta x + \sin \beta x) + Q_0 \sin \beta x] - D f''(x) \text{-----} 4)$$

$$Q_x = -D \frac{d^3 w}{dx^3} = e^{-\beta x} [Q_0 (\cos \beta x - \sin \beta x) - 2\beta M_0 \sin \beta x] - D f'''(x) \text{-----} 5)$$

Notera att $f'(x) = f''(x) = f'''(x) = 0$ för en konstant trycklast. Vidare så blir då $f(x)$ lika med den fria inåtriktade förskjutningen orsakad av trycklasten, förskjutningen är konstant.

Av ekvation 2) och 3), med antagandet av full inspänning vid $x = 0$, fås:

$$w (at x = 0) = -\frac{1}{2\beta^3 D} [\beta M_0 + Q_0] + f(x) = 0 \text{-----} 6)$$

$$\theta (at x = 0) = \frac{1}{2\beta^2 D} [2\beta M_0 + Q_0] = 0 \text{-----} 7)$$

där

$$f(x) = \frac{p a^2}{E h} \left(1 - \frac{\nu}{2}\right)$$

för ekv. 6) och 7)

$$M_0 = -\frac{2-\nu}{12} \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} h a p$$

$$Q_0 = \frac{2-\nu}{6} \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} \beta h a p$$

För angiven trycklast fås vid det nedre inspänningssnittet följande snittkrafter:

- $M_0 = 1510 \text{ kNm/m}$
- $Q_0 = 841 \text{ kN/m}$

Snittkrafter i gränssnittet mellan cylindervägg och kupol

Motsvarande ekvationer kan härledas för moment och tvärkraft vid övergången mellan cylinderväggen och kupolen. Härledningen utelämnas emellertid.

För angiven trycklast fås vid övergången mellan cylinderväggen och kupolen:

- $M_0 = 56 \text{ kNm/m}$
- $Q_0 = 112 \text{ kN/m}$

Notera att det maximala böjmomentet ej uppträder i detta snitt, utan ca 2.5 m ned på cylinderväggen ($M = 161 \text{ kNm/m}$).

Dragande normalkraft i omkretsled för cylinderväggen i ostört område

Via en enkel jämviktsbetraktelse fås att $N = ap = 20 \cdot 450 = 9000 \text{ kN/m}$

För angiven trycklast fås i ett ostört område följande dragande normalkraft i cylinderväggens omkretsled:

- $N = 9000 \text{ kN/m}$

Bilaga 6: Checklista inneslutningskärl

I denna bilaga redovisas en checklista avseende inneslutningskärlet. I de två första delarna (del A och del B) sammanfattas grundläggande data. I de därefter följande delarna (del C och del D) fokuseras på ett urval av kritiska frågor som bör besvaras vid en granskning av dimensionerings- eller verifieringsdokument för en reaktorinneslutning. Checklistan ska ses som en generell ansats, vilka positioner i checklistorna som bör ingå vid en viss granskning, och vilka ytterligare frågor som då skulle kunna vara av intresse, får avgöras från fall till fall.

Del C av checklistan täcker in de övergripande krav avseende reaktorinneslutningskärlets säkerhetsfunktion baserat på de principer som ges i IAEA:s dokument NS-R-1 IAEA "Safety Standards Series Requirements Safety of Nuclear Power Plants: Design" såsom de uttolkats i rapporten [100]. I denna del har även den engelska originaltexten, på vilka de införda frågorna i checklistan baseras, infogats för att underlätta förståelsen av vad som avses att kontrolleras.

I del D redovisas kompletterande frågor samt ytterligare frågeställningar företrädesvis baserade på vad som redovisas i föreliggande rapport i den mån frågorna ej redan ingår i del A, B eller C.

Följande beteckningar används i checklistan:

(xxx) = förklarande text

[X; Y] = tillåtna alternativ i kolumnen "Värde" i del A och del B

A. GRUNDLÄGGANDE DATA - BARRIÄRFUNKTION

Pos.	Uppgift	Värde	Enhet
A.1	Specificerat tryck P_{aL} (se avsnitt 4.2.3 i DNB [63] för definition)		kPa
A.2	Maximal temperatur som uppstår i inneslutningsatmosfären i samband med att trycket uppnår värdet P_{aL}		°C
A.3	Maximalt tillåten läckagenivå vid trycknivån P_{aL}		%/dygn
A.4	Maximalt differenstryck vid svåra haverier $Z_{SA,P}$ (se avsnitt 4.2.4 i DNB [63] för definition)		kPa
A.5	Maximal temperatur som uppstår i inneslutningsatmosfären i samband med att trycket uppnår värdet $Z_{SA,P}$		°C
A.6	Maximal bärförmåga, differenstryck (se avsnitt 5.5.3 i DNB [63] för definition)		kPa
A.7	Differenstryck när täthetskrav ej längre kan visas uppfyllas (se avsnitt 5.6.3 i DNB [63] för definition)		kPa

B. GRUNDLÄGGANDE DATA - KONSTRUKTIONSUTFORMNING⁴⁵

Pos.	Uppgift	Värde	Enhet
B.1	Anläggningstyp [BWR; PWR]		...
B.2	Enkel eller dubbel inneslutning [E = enkel; D = dubbel]		...
B.3	Bottenplatta [F = fri; I = integrerad]		...
B.4	Bottenplatta, tjocklek i ostört område		m
B.5	Bottenplatta, spännarmerad [Ja; Nej]		...
B.6	Cylindervägg [F = fri; I = integrerad]		...
B.7	Cylindervägg, invändig radie i ostört område		m
B.8	Cylindervägg, tjocklek i ostört område		m
B.9	Cylindervägg, spännarmerad [Ja; Nej]		...
B.10	Tak/kupol [F = fri; I = integrerad]		...
B.11	Tak/kupol, tjocklek i ostört område		m
B.12	Tak/kupol, spännarmerad [Ja; Nej]		...

⁴⁵ Avser inre inneslutning för anläggning med dubbel inneslutning (se Figur 2.17)

C. CHECKLISTA – FUNKTION ENLIGT IAEA NS-R-1

Pos.	Fråga
C.1	<p><u>KONSTRUKTION AV INNESLUTNINGSSYSTEMET</u></p> <p><i>“DESIGN OF THE CONTAINMENT SYSTEM A containment system shall be provided in order to ensure that any release of radioactive materials to the environment in a design basis accident would be below prescribed limits. This system may include, depending on design requirements: leaktight structures associated systems for the control of pressures and temperatures; and features for the isolation, management and removal of fission products, hydrogen, oxygen and other substances that could be released into the containment atmosphere.</i></p> <p><i>All identified design basis accidents shall be taken into account in the design of the containment system. In addition, consideration shall be given to the provision of features for the mitigation of the consequences of selected severe accidents in order to limit the release of radioactive material to the environment.”</i></p>
C.1.1	Begränsar inneslutningen spridningen av radioaktivt material till omgivningen vid konstruktionsstyrande händelser till en sådan nivå att gällande utsläppsacceptanskriterier ej överskrids?
C.1.2	Finns inuti inneslutningen system för kontroll (begränsning) av tryck- och temperaturnivåer så att de ej överskrider kritiska nivåer vid konstruktionsstyrande händelser? Om ja, i så fall vilka?
C.1.3	Är inneslutningen utformad så att den kan isoleras vid en konstruktionsstyrande händelse?
C.1.4	Finns system för reduktion av luftburna partiklar inuti inneslutningen vid en konstruktionsstyrande händelse? Om ja, i så fall vilka?
C.1.5	Finns system för att begränsa vätgaskoncentrationen inuti inneslutningen? Om ja, i så fall vilka?
C.1.6	Finns system för att begränsa mängden syre inuti inneslutningen? Om ja, i så fall vilka?
C.1.7	Finns system för att begränsa mängden av andra substanser inuti inneslutningen som skulle kunna ge upphov till otillåten påverkan vid en konstruktionsstyrande händelse? Om ja, i så fall vilka?
C.1.8	Har alla identifierade konstruktionsstyrande händelser beaktats vid dimensioneringen och utformningen av inneslutningskärlet?
C.1.9	Har hänsyn tagits till åtgärder som kan mildra konsekvenserna och därmed begränsa den radioaktiva omgivningspåverkan vid svåra haverier?

C.2	<p><u>INNESLUTNINGENS HÅLLFASTHET</u></p> <p><i>“STRENGTH OF THE CONTAINMENT STRUCTURE</i></p> <p><i>The strength of the containment structure, including access openings and penetrations and isolation valves, shall be calculated with sufficient margins of safety on the basis of the potential internal overpressures, underpressures and temperatures, dynamic effects such as missile impacts, and reaction forces anticipated to arise as a result of design basis accidents. The effects of other potential energy sources, including, for example, possible chemical and radiolytic reactions, shall also be considered. In calculating the necessary strength of the containment structure, natural phenomena and human induced events shall be taken into consideration, and provision shall be made to monitor the condition of the containment and its associated features.</i></p> <p><i>Provision for maintaining the integrity of the containment in the event of a severe accident shall be considered. In particular, the effects of any predicted combustion of flammable gases shall be taken into account.”</i></p>
C.2.1	<p>Har hållfastheten hos reaktorinneslutningen, inkluderande öppningar, genomföringar och skalventiler, beräknats med tillräckliga säkerhetsmarginaler baserat på konstruktionsstyrande händelser inkluderande effekterna av till exempel:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Över- och undertryck, temperaturförändringar, dynamiska effekter såsom stötlaster samt reaktionskrafter? • Andra potentiella energikällor, inklusive till exempel möjliga kemiska och radiolytiska reaktioner? • Naturfenomen samt mänsklig aktivitet och handlingar?
C.2.2	<p>Har åtgärder vidtagits för att övervaka tillståndet i inneslutningen samt dess funktion?</p>
C.2.3	<p>Har åtgärder vidtagits för att vid svåra haverier vidmakthålla reaktorinneslutningens integritet? Om ja, har effekterna av eventuell predikterad förbränning av brännbara gaser därvid beaktats?</p>
C.3	<p><u>MÖJLIGHETEN ATT GENOMFÖRA PROVTRYCKNING</u></p> <p><i>“CAPABILITY FOR CONTAINMENT PRESSURE TESTS</i></p> <p><i>The containment structure shall be designed and constructed so that it is possible to perform a pressure test at a specified pressure to demonstrate its structural integrity before operation of the plant and over the plant’s lifetime.”</i></p>
C.3.1	<p>Är inneslutningen utformad på ett sådant vis att en provtryckning till ett specificerat tryck för att påvisa inneslutningens strukturella integritet är möjlig att genomföra såväl före driftsättning som när som helst under anläggningens hela driftstid?</p>

C.4	<p><u>LÄCKAGE FRÅN INNESLUTNINGEN</u></p> <p><i>"CONTAINMENT LEAKAGE</i></p> <p><i>The containment system shall be designed so that the prescribed maximum leakage rate is not exceeded in design basis accidents. The primary pressure withstanding containment may be partially or totally surrounded by a secondary confinement for the collection and controlled release or storage of materials that may leak from the primary containment in design basis accidents.</i></p> <p><i>The containment structure and equipment and components affecting the leaktightness of the containment system shall be designed and constructed so that the leak rate can be tested at the design pressure after all penetrations have been installed. Determination of the leakage rate of the containment system at periodic intervals over the service lifetime of the reactor shall be possible, either at the containment design pressure or at reduced pressures that permit estimation of the leakage rate at the containment design pressure.</i></p> <p><i>Adequate consideration shall be given to the capability to control any leakage of radioactive materials from the containment in the event of a severe accident."</i></p>
C.4.1	Är inneslutningen utformad så att föreskriven maximalt tillåten läckagehastighet ej överskrids vid en konstruktionsstyrande händelse?
C.4.2	Är hela eller delar av den primära inneslutningen omgärdad av en sekundärinneslutning i den omfattning som krävs för att samla upp och kontrollerat avge eller lagra (radioaktivt) material som eventuellt kan läcka från den primära inneslutningen vid konstruktionsstyrande händelser?
C.4.3	Är inneslutningen samt utrustning och komponenter påverkande inneslutningens täthetsfunktion tillverkade och utformade på ett sådant sätt att efter det att genomföringar har installerats en täthetsprovning vid specificerat tryck kan genomföras för att kontrollera läckagehastigheten?
C.4.4	Kan inneslutningen täthetsprovas vid regelbundna intervall under anläggningens hela drifttid vid provtrycknivåer för vilka inneslutningens läckagehastighet vid det specificerade trycket kan uppskattas?
C.4.5	Har adekvat hänsyn tagits till möjligheten att begränsa eventuellt läckage av radioaktivt material från inneslutningen vid ett svårt haveri?
C.5	<p><u>GENOMFÖRINGAR IGENOM INNESLUTNINGSKÄRLET</u></p> <p><i>"CONTAINMENT PENETRATIONS</i></p> <p><i>The number of penetrations shall be kept to practical minimum.</i></p> <p><i>All penetrations through the containment shall meet the same design requirements as the containment structure itself. They shall be protected against reaction forces stemming from pipe movement or accidental loads such as those due to missiles, jet forces and pipe whip.</i></p> <p><i>If resilient seals (such as elastomeric seals or electrical cable penetrations) or expansion bellows are used with penetrations, they shall be designed to have the capability for leak testing at the containment design pressure, independent of the determination of the leak rate of the containment as a whole, to demonstrate their continued integrity over the lifetime of the plant.</i></p> <p><i>Adequate consideration shall be given to the capability of penetrations to remain functional in the event of a severe accident."</i></p>
C.5.1	Har antalet genomföringar begränsats till ett praktiskt minimum?
C.5.2	Uppfyller genomföringarna de krav som ställs på inneslutningen som sådan?

C.5.3	Är genomföringarna skyddade mot reaktionskrafter som kan uppstå på grund av rörelser hos rörsystemen eller på grund av olyckshändelser såsom missiler, jetstrålkrafter eller rörslag?
C.5.4	Finns det genomföringar som är utformade med fjädrande tätningar (såsom elastomertätningar eller elektriska kabelgenomföringar) eller expansionsbälgar? Om ja, kan dessa genomföringar täthetsprovats separat för specificerat tryck för att påvisa deras integritet under anläggningens hela drifttid oberoende av läckagehastighetsprovningen av hela inneslutningen?
C.5.5	Har adekvat hänsyn tagits till genomföringarnas förmåga att fortsätta att fungera vid ett svårt haveri?
C.6	<p><u>ISOLATION AV INNESLUTNINGEN</u></p> <p><i>"CONTAINMENT ISOLATION</i></p> <p><i>Each line that penetrates the containment as part of the reactor coolant pressure boundary or that is connected directly to the containment atmosphere shall be automatically and reliably sealable in the event of a design basis accident in which the leaktightness of the containment is essential to preventing radioactive releases to the environment that exceed prescribed limits. These lines shall be fitted with at least two adequate containment isolation valves arranged in series (normally with one outside and the other inside the containment, but other arrangements may be acceptable depending on the design), and each valve shall be capable of being reliably and independently actuated. Isolation valves shall be located as close to the containment as is practicable. Containment isolation shall be achievable on the assumption of a single failure. If the application of this requirement reduces the reliability of a safety system that penetrates the containment, other isolation methods may be used.</i></p> <p><i>Each line that penetrates the primary reactor containment and is neither part of the reactor coolant pressure boundary nor connected directly to the containment atmosphere shall have at least one adequate containment isolation valve. This valve shall be outside the containment and located as close to the containment as practicable.</i></p> <p><i>Adequate consideration shall be given to the capability of isolation devices to maintain their function in the event of a severe accident."</i></p>
C.6.1	Är alla genomföringar tillhörande primärsystemet och alla genomföringar som har direktkontakt med inneslutningens atmosfär försedda med två skalventiler, en på insidan och en på utsidan? Om inte, är de identifierade undantagen ändå acceptabla?
C.6.2	Är alla andra genomföringar än de som specificeras under punkt C.6.1 försedda med en utvändig skalventil?
C.6.3	Kan skalventilerna för respektive genomföring aktueras på ett pålitligt sätt, och om två skalventiler för en genomföring, oberoende av varandra?
C.6.4	Är skalventilerna placerade tillräckligt nära inneslutningskärlet?
C.6.5	Har adekvat hänsyn tagits till isoleringsfunktionens förmåga att fortsätta att fungera vid ett svårt haveri?

C.7	<p><u>SLUSSAR TILL INNESLUTNINGEN</u></p> <p><i>"CONTAINMENT AIRLOCKS</i></p> <p><i>Access by personnel to the containment shall be through airlocks equipped with doors that are interlocked to ensure that at least one of the doors is closed during reactor operations and in design basis accidents. Where provision is made for entry of personnel for surveillance purposes during certain low power operations, provisions for ensuring the safety of personnel in such operations shall be specified in the design. These requirements shall also apply to equipment air locks, where provided.</i></p> <p><i>Adequate consideration shall be given to the capability of containment air locks to maintain their function in the event of a severe accident."</i></p>
C.7.1	Sker all in- och utpassage av personal genom lufttäta slussar?
C.7.2	Är dörrarna i personalslussarna ihopkopplade på ett sådant sätt att det säkerställs att alltid åtminstone en av dörrarna är stängd under drift och vid konstruktionsstyrande händelser?
C.7.3	Hur är andra öppningar utformade?
C.8	<p><u>VÄRMEBORTFÖRSEL FRÅN INNESLUTNINGEN</u></p> <p><i>"REMOVAL OF HEAT FROM THE CONTAINMENT</i></p> <p><i>The capability to remove heat from the reactor containment shall be ensured. The safety function shall be fulfilled of reducing the pressure and temperature in the containment, and maintaining them at acceptably low levels, after any accidental release of high energy fluids in a design basis accident. The system performing the function of removing heat from the containment shall have adequate reliability and redundancy to ensure that this can be fulfilled, on the assumption of a single failure.</i></p> <p><i>Adequate consideration shall be given to the capability to remove heat from the reactor containment in the event of a severe accident."</i></p>
C.8.1	Är funktionen borttransport av värme från inneslutningen säkerställd?
C.8.2	Har värmeborttransportfunktionen adekvat pålitlighet och redundans?
C.8.3	Är säkerhetsfunktionen reducering av tryck-och temperaturnivåer inuti inneslutningen till acceptabla nivåer och bibehållandet av dessa nivåer över tid säkerställd för konstruktionsstyrande händelser?
C.8.4	Har adekvat hänsyn tagits till värmeborttransportfunktionens förmåga att fortsätta att fungera vid ett svårt haveri?
C.9	<p><u>HANTERING AV FRIGJORDA PARTIKLAR OCH ANDRA SUBSTANSER</u></p> <p><i>"CONTROL AND CLEANUP OF THE CONTAINMENT ATMOSPHERE</i></p> <p><i>Systems to control fission products, hydrogen, oxygen and other substances that may be released into the reactor containment shall be provided as necessary:</i></p> <p><i>(1) to reduce the amount of fission products that might be released to the environment in design basis accidents; and</i></p> <p><i>(2) to control the concentration of hydrogen, oxygen and other substances in the containment atmosphere in design basis accidents in order to prevent deflagration or detonation which could jeopardize the integrity of the containment.</i></p> <p><i>Systems for cleaning up the containment atmosphere shall have suitable redundancy in components and features to ensure that the safety group can fulfil the necessary safety function, on the assumption of a single failure.</i></p> <p><i>Adequate consideration shall be given to the control of fission products, hydrogen and other substances that may be generated or released in the event of a severe accident."</i></p>

C.9.1	Finns det system för att reducera och ha kontroll över mängden i inneslutningsatmosfären frigjorda radioaktiva partiklar vid en konstruktionsstyrande händelse?
C.9.2	Finns det system för att reducera och ha kontroll över mängden väte, syre och andra substanser i inneslutningsatmosfären vid en konstruktionsstyrande händelse som annars skulle kunna ge upphov till en deflagration eller en detonation som äventyrar inneslutningens integritet?
C.9.3	Har systemen för att reducera radioaktiva partiklar, väte, syre och andra substanser tillräcklig redundans och funktionalitet?
C.9.4	Har adekvat hänsyn tagits till förmågan att reducera radioaktiva partiklar, väte, syre och andra substanser vid ett svårt haveri?
C.10	<u>INKLÄDNADER OCH YTBEHANDLINGAR</u> <i>"COVERINGS AND COATINGS</i> <i>The coverings and coatings for components and structures within the containment system shall be carefully selected, and their methods of application specified, to ensure fulfilment of their safety functions and to minimize interference with other safety functions in the event of deterioration of coverings and coatings."</i>
C.10.1	Är ytbehandlingar och inklädnader valda på ett sådant sätt att deras säkerhetsfunktion uppfylls?
C.10.2	Är ytbehandlingar och inklädnader valda på ett sådant sätt att deras negativa inverkan på andra säkerhetsfunktioner minimeras för den händelse att mekanisk eller annan påverkan på ytbehandlingar och inklädnader inträffar?

D. CHECKLISTA – BASERAD PÅ INNEHÅLL I FÖRELIGGANDE RAPPORT

Pos.	Fråga
D.1	<p><u>FUNKTION</u> (kapitel 2)</p> <p>Här avses de primära säkerhetsrelaterade funktionskraven hos inneslutningen såsom dess strukturella integritet och täthet, begränsning av tryck- och temperaturnivåer inuti inneslutningen, reduktion av luftburna partiklar och andra substanser, monitorering av aktuella tillstånd, samt möjligheten att genomföra provtryckning och täthetsprovning.</p> <p>Denna del täcks i huvudsak in av checklista C ovan. Nedan anges kompletterande frågor.</p>
D.1.1	Finns det ett filtrerat tryckavlastningssystem?
D.1.2	Finns det ett tryckavsäkringssystem direkt till omgivningen (utan att ångan leds via ett filter)?
D.1.3	Finns det en speciellt utformad uppfångningsanordning för en härdsmälta?
D.2	<p><u>KONSTRUKTIONSUTFORMNING</u> (kapitel 3)</p> <p>Här avses i första hand koppling mellan konstruktionsutformning och åldrande effekter hos inneslutningskärlet (avsnitt 3.4).</p>
D.2.1	Finns dokumentation gällande arbetsmetoder för uppförandet av inneslutningskonstruktionen?
D.2.2	Finns dokumentation gällande rapporterade kvalitetsbrister vid uppförandet av inneslutningskonstruktionen?
D.2.3	Finns rapporterade åldringsrelaterade skador för inneslutningen eller för inneslutningar med liknande konstruktionsutformning?
D.2.4	Finns uppmätta driftstemperaturer dokumenterade? Generellt på in- och utsida av inneslutningskärlet samt lokalt kring varma rör genomföringar.
D.2.5	Kan alkali-silika reaktioner (ASR) uteslutas? Finns dokumentation kring använd ballast- och cementtyp?
D.2.6	Vilka arbetsmetoder och konstruktionslösningar används för cementinjektering kring genomföringar?
D.2.7	Vilka arbetsmetoder och konstruktionslösningar använts för cementinjektering av spännkabelrör?
D.2.8	Finns detaljlösningar med avsedda hålrum mellan betong och stålkomponenter (tätplåt och spännkablarna)?
D.2.9	Finns ståldelar som kan formändras under normal drift och därmed ge hålrum mot betong (t.ex. utanpåliggande tätplåt)?
D.2.10	Finns mätresultat från spännkraftsmätning tillgängliga?
D.2.11	Finns uppställda krav på spännkraft?
D.2.12	Finns dokumenterade relaxationsegenskaper för aktuell spännarmering?

D.3	<p><u>DIMENSIONERING</u> (kapitel 4)</p> <p>Här avses i första hand de dimensioneringsberäkningar för inneslutningskärlets betongkonstruktion och dess tätplåt av stål som har att göra med påvisande av inneslutningens strukturella integritet och täthet samt inneslutningens beständighet. I checklistan har införts frågor som direkt kopplar till den övergripande beräkningsgången i DNB [63] (klassificering, funktionskrav, grundvariabler, bärverksanalys, verifiering och dimensioneringsprocessen) med referenser till tillhörande avsnitt i DNB [63].</p>
	KLASSIFICERING OCH GRÄNSDRAGNING
D.3.1	Har gränsdragning fastställts mellan de byggnadskonstruktioner som utgör inneslutning som då ska uppfylla gällande krav för inneslutningsdimensionering och vilka byggnadskonstruktioner som ej ingår? (DNB avsnitt 2.3)
D.3.2	Har gränsdragning fastställts mellan de byggnadskonstruktioner som utgör inneslutning som då ska uppfylla gällande krav för inneslutningsdimensionering och mekaniska konstruktionsdelar fast monterad i byggnaden för vilka andra normer är tillämpliga? (DNB avsnitt 2.3)
D.3.3	Har alla relevanta händelser som direkt eller indirekt kan påverka reaktorinneslutningskärlet identifierats och händelseklassindelats? (DNB avsnitt 3.4)
D.3.4	Har alla system, strukturer och komponenter ingående i reaktorinneslutningskärlet identifierats och klassificerats vad gäller radiologisk omgivningssäkerhet i enlighet med gällande regelverk? (DNB avsnitt 3.2)
D.3.5	Har byggnader och byggnadsdelar tilldelats en säkerhetsklass i enlighet med krav för konventionella byggnadskonstruktioner? (DNB avsnitt 3.3)
D.3.6	Typ av last: Har laster klassificerats med hänsyn till deras ursprung (direkta eller indirekta), med hänsyn till deras variation i rummet (bundna eller fria) och med hänsyn till deras eller bärverkets reaktion (statiska eller dynamiska)? (DNB avsnitt 3.8.1.1)
D.3.7	Typ av last: Har laster indelats i primära respektive sekundära laster/lasteffekter? (DNB avsnitt 5.9.2)
	FUNKTIONSKRAV
D.3.8	Har till klassificeringen tillhörande säkerhetsrelaterade funktionskrav identifierats för alla system, strukturer och komponenter för respektive händelseklass? (DNB avsnitt 3.6)
D.3.9	Har brukbarhetskriterier identifierats för alla system, strukturer och komponenter? (DNB avsnitt 3.10.4.2)
D.3.10	Har beständighetskrav och miljötålighetskrav identifierats för alla system, strukturer och komponenter? (DNB avsnitt 3.6.7)
	GRUNDVARIABLER

D.3.11	Har alla relevanta laster identifierats och adekvata lastvärden i enlighet med gällande regelverk fastställts för respektive händelseklass för alla händelser och relevanta dimensioneringssituationer? (DNB avsnitt 3.8.1 och 4.2)
D.3.12	Har alla relevanta lasteffekter fastställts i enlighet med gällande regelverk för respektive händelseklass för alla händelser och relevanta dimensioneringssituationer?
D.3.13	Har påverkan från miljön identifierats och dess inverkan på konstruktionernas beständighet beaktats vid materialval och materialspecifikationer, vid konstruktionsutformningen och vid den detaljerade dimensioneringen? (DNB avsnitt 3.8.1)
D.3.14	Har material och produkttegenskaper såsom exempelvis hållfasthet, bärförmåga, styvhet, temperaturberoende och tidsberoende effekter fastställts i enlighet med gällande regelverk? (DNB avsnitt 3.8.2)
D.3.15	Har geometriska storheter såsom mått och spännvidder, imperfektioner samt toleranser fastställts i enlighet med gällande regelverk? (DNB avsnitt 3.8.3)
	BÄRVERKSANALYS
D.3.16	Är använda bärverksmodeller tillämpliga för att prediktera bärverkets beteende för aktuella lasttyper med tillräcklig noggrannhet för studerade gränstillstånd? (DNB avsnitt 3.8.1.1 och 3.9.1)
D.3.17	Inkluderar bärverksmodellerna en adekvat del av det bärande systemet tillsammans med relevanta randvillkor, laster och andra variabler, samt tar bärverksmodellen hänsyn till alla relevanta effekter? (DNB avsnitt 3.9.1)
D.3.18	Är bärverksmodellerna upprättade i enlighet med vedertagen ingenjörsexpraxis, och om så erfordras verifierade experimentellt? (DNB avsnitt 3.9.1)
D.3.19	Har kritiska områden identifierats, och urvalet motiverats, för vilka en verifiering är nödvändig att genomföra?
D.3.20	Har identifiering av relevanta brottmoder med tillhörande resultatextrahering och resultatutvärdering genomförts på ett adekvat sätt?
D.3.21	Har jämförande beräkningar och rimlighetskontroller genomförts i erforderlig omfattning?
D.3.22	Är bärverksanalysen genomförd linjärelastisk vid bestämmande av snittkrafter? (DNB avsnitt 5.9.4 och 6.6.6)
D.3.23	Har jämviktskontroll genomförts för att säkerställa att ett korrekt resultat har erhållits från bärverksanalysen? (DNB avsnitt 5.9.4)
D.3.24	Har samverkan mellan inneslutningens betongkonstruktion och genomföringar, slussar och öppningar beaktats? (DNB avsnitt 5.9.4)
D.3.25	Har finita elementmetodprogramvara och tillhörande analysmetoder validerats? Har dessa utvärderats i "benchmark"-analyser?
	VERIFIERING

D.3.26	Har dimensioneringsvärden för laster, lasteffekter, material- och produkttegenskaper, geometriska storheter och bärförmåga för relevanta gränstillstånd fastställt i enlighet med gällande regelverk baserade på framtagna grundvariabler? (DNB avsnitt 3.10.3)
D.3.27	Har alla relevanta lastkombinationer identifierats och adekvata lastfaktorer och lastreduktionsfaktorer bestämts i enlighet med gällande regelverk för respektive händelseklass för alla händelser och relevanta gränstillstånd? (DNB avsnitt 3.10.4, 3.10.5, 4.2 och 4.3)
D.3.28	Uppfylls alla specificerade brukbarhetskriterier i bruksgränstillståndet? (DNB avsnitt 5.4)
D.3.29	Uppfylls alla specificerade beständighetskrav i bruksgränstillståndet? (DNB avsnitt 5.4)
D.3.30	Uppfylls alla miljötålighetskrav? (DNB avsnitt 3.6.7)
D.3.31	Uppfylls alla krav på bärförmåga och jämvikt i brottgränstillståndet? (DNB avsnitt 5.5)
D.3.32	Uppfylls alla krav på barriärfunktion och annan säkerhetsrelaterad täthet i brottgränstillståndet? (DNB avsnitt 5.6 och 6.4)
D.3.33	Uppfylls alla krav på begränsning av säkerhetsrelaterade deformationer eller vibrationer i brottgränstillståndet? (DNB avsnitt 5.7)
D.3.34	Uppfylls alla krav vad gäller fysiskt skydd? (DNB avsnitt 3.6.5)
D.3.35	Uppfylls alla krav vad gäller begränsning av brandspridning? (DNB avsnitt 3.6.1)
D.3.36	Uppfylls alla krav vad gäller strålskydd? (DNB avsnitt 3.6.1)
D.3.37	Spännarmerad inneslutning: Undviks resulterande normaldragpåkänningar över inneslutningens tvärsnitt vid det dimensionerande övertrycket? (DNB avsnitt 5.6.2)
D.3.38	Spännarmerad inneslutning: Uppstår endast lokal uppsprickning i inneslutningen vid det dimensionerande övertrycket? (DNB avsnitt 5.6.2)
D.3.39	Uppvisar inneslutningen ett huvudsakligen elastiskt beteende för laster i bruksgränstillståndet inkluderande provtryckningslasten samt undviks för dragarmeringen generell plasticering för primära laster i brottgränstillståndet inkluderande det dimensionerande inre övertrycket? (DNB avsnitt 5.3 och 5.9.5)
D.3.40	Vilka tillvägagångssätt har använts för att påvisa att gällande krav för mycket osannolika händelser uppfylls? (DNB avsnitt 5.5.3 och 5.6.3)
D.3.41	Baseras använda analysmetoder på vedertagen ingenjörsexpraxis och är metoderna applicerbara vid dimensioneringen av en reaktorinneslutning? (DNB avsnitt 5.9.4)
D.3.42	Har adekvata acceptanskriterier för stöbelastning eller impulslaster specificerats och motiverats i de fall sådana laster av betydelse ska beaktas? (DNB avsnitt 5.9.10)
	DIMENSIONERINGSPROCESSEN

D.3.43	Har personal med adekvat utbildning, kompetens och erfarenhet genomfört dimensioneringen?
D.3.44	Har egenkontroll och interngranskning genomförts?
D.3.45	Har extern tredjepartsgranskning genomförts?
D.3.46	Har en tredje part genomfört jämförande beräkningar?
D.3.47	Har ett adekvat kvalitetsledningssystem tillämpats? (DNB avsnitt 3.5.6)
	DIVERSE
D.3.48	Har gränslastanalyser genomförts för att fastställa maximal kapacitet hos inneslutningen vad gäller täthet respektive strukturell integritet? (DNB avsnitt 5.5.3 och 5.6.3)
D.3.49	Har tidsberoende effekter för undergrund, betong och spännstål beaktats vid dimensioneringen? (DNB avsnitt 5.9.4)
D.3.50	Har betongens uppsprickning beaktats vid bestämmande av förskjutningar och töjningsnivåer? (DNB avsnitt 5.9.4 och 6.6.6)
D.3.51	Har hållfasthetsvärden för material enligt europeiska standarder korrekt översatts till hållfasthetsvärden att nyttjas vid dimensionering i enlighet med ASME Sect III Div 2? (DNB avsnitt 5.9.5)
D.3.52	Innehålls de krav som ställs på maximalt tillåten sträckgräns och minsta duktilitet för armeringen? (DNB avsnitt 5.9.5, 5.9.6 och 6.6.4)
D.3.53	Spännarmerad inneslutning: Finns radiell armering för att minimera risken för delaminering på grund av spännkabelns avlänkningskrafter? (DNB avsnitt 5.9.6)
D.3.54	Är detaljutformningen (förankring, skarvning, minimumavstånd, sprickbredds begränsning och täckande betongskikt) för armering och spännkablar korrekt utförd? (DNB avsnitt 5.10)
D.3.55	Är materialkvaliteter och produkter valda i enlighet med de krav som gäller? (DNB avsnitt 5.11)
D.3.56	Har imperfektioner, formändring och utböjningsformer för tätplåten tillsammans med tillhörande böj deformationer i plåten och obalanskrafter i tätplåtsförankringarna tagits hänsyn till vid dimensioneringen av tätplåten? (DNB avsnitt 5.9.7 och 5.9.8)
D.3.57	Hur har tätplåtsförankringarnas maximala kapacitet fastställts? (DNB avsnitt 5.9.8)
D.3.58	Har det påvisats att punktförankringar ger efter innan det uppstår en reva i tätplåten? (DNB 5.9.8)
D.3.59	Är det föreskrivet provning av tätplåtssvetsar i erforderlig omfattning?
D.3.60	Har svetsar i tätplåten försetts med täthetsprovtryckningskanaler i erforderlig omfattning?
D.3.61	Har tätplåtar i bassänger försetts med läckageuppsamlings- och läckageindikeringsystem i erforderlig omfattning?

D.3.62	Har dimensionering och utformning av tätplåten vid anslutningar och sektionsovergångar vid förankringsplattor, genomföringar, slussar och öppningar genomförts på ett korrekt sätt? (DNB avsnitt 5.9.7, 5.9.8 och 5.9.9)
D.3.63	Hur sprickbredden i betongen bakom tätplåten begränsats till acceptabla nivåer? (DNB avsnitt 6.6.7)
D.3.64	Är materialval och detaljutformningen av tätplåt och anslutande betongkonstruktion utförd på ett sådant sätt att framtida korrosion av tätplåten förhindras?
D.3.65	Har för bottenplatta hopgjuten med omkringliggande byggnader ojämn sättning beaktats?
D.3.66	Hur har temperaturlaster hanterats i bärverksanalyser och vid tvärsnittsdimensionering? (DNB avsnitt 6.6.3)
D.3.67	Är omkringliggande byggnader som konstruktionsmässigt ej är tänkta att samverka separerade på ett adekvat sätt? (DNB avsnitt 5.9.6)
D.3.68	Spännarmerad inneslutning: Har spännstålets relaxationsegenskaper fastställts genom provning? (DNB avsnitt 6.6.4)
D.3.39	Har duktil detaljutformning anordnats i erforderlig omfattning för de fall stötbelastning eller impulslaster av större storleksordning ska beaktas? (DNB avsnitt 6.6.9)
D.3.70	Har eventuell koppling mellan lokal och global response beaktats för stötbelastning och impulslaster i de fall sådana laster av betydelse ska beaktas? (DNB avsnitt 5.9.10)
D.3.71	Har adekvata analysmetoder och acceptanskriterier använts vid utvärderingen för mycket osannolika händelser? (DNB avsnitt 5.5.3 och 5.6.3)
	DIMENSIONERING MED AVSEENDE PÅ JORDBÄVNING
D.3.72	Har den dimensionerande jordbävningen definierats? Ska dimensionering genomföras för DBE eller DEE jordbävning? (DNB avsnitt 7.2.3.1)
D.3.73	Har erforderliga säkerhetsfunktioner med tillhörande system som måste upprätthållas vid den dimensionerande jordbävningen identifierats? Kategoriseringen bör inkludera de tre klasserna 1, P och N. Finns en sådan seismisk klassificering redan gjord? (DNB avsnitt 7.2.3.2)
D.3.74	Har markresponsspektra definierats? Vanligtvis tillämpas markresponsspektra enligt SKI Technical report 92:3. (DNB avsnitt 7.2.3.3)
D.3.75	Studera de allmänna grundläggande kraven i ASCE 4-98, avsnitt 3.1.1 avseende strukturmodellering. Är dessa krav uppfyllda? (DNB avsnitt 7.5.1.2)
D.3.75	Är materialvärden i strukturen beaktade enligt DNB avsnitt 7.5.1.3?
D.3.76	Är styvhetsreduktion med avseende på uppsprickning i betong beaktat enligt DNB avsnitt 7.5.1.4?

D.3.77	Är modellering av massfördelning i strukturen beaktat enligt DNB avsnitt 7.5.1.5?
D.3.78	Är modellering av dämpning i strukturen beaktat enligt DNB avsnitt 7.5.1.6?
D.3.79	Är hydrodynamiska effekter beaktade enligt DNB avsnitt 7.5.1.7?
D.3.80	Är krav på tidshistorieanalys beaktat enligt DNB avsnitt 7.5.2.2?
D.3.81	Är krav på responspektrummetod beaktat enligt DNB avsnitt 7.5.2.3?
D.3.82	Är krav på ekvivalent statisk metod beaktat enligt DNB avsnitt 7.5.2.4?
D.3.83	Är krav på tidshistorier för multipla supportsystem beaktat enligt DNB avsnitt 7.5.2.5?
D.3.84	Är krav på kombination av moder och komponentriktningar beaktat enligt DNB avsnitt 7.5.2.6?
D.3.85	Är krav på hantering av mark-struktur samverkan beaktat enligt DNB avsnitt 7.5.2.7?
D.3.86	Är krav på indata till subsystem analys beaktat enligt DNB avsnitt 7.5.3.1?
D.3.87	Är kraven på dimensionering för jordbävning DBE enligt DNB avsnitt 7.6.2 uppfyllda?
D.3.88	Är kraven på jordbävning DEE enligt DNB avsnitt 7.6.3 uppfyllda?
D.4	<u>PROVNING</u> (kapitel 5) Här avses såväl den provtryckning och täthetsprovning som genomförs före drifttagandet av anläggningen som den provning som genomförs under anläggningens drifttid.
D.4.1	Följer det adopterade regelverket för provning de riktlinjer som gäller för svenska inneslutningar?
D.4.2	Har en plan för provning innan drifttagning tagits fram?
D.4.3	Är predikterade värden framräknade och presenterade innan provtryckning?
D.4.4	Har en plan för provning under drift tagits fram?
D.4.5	Är inneslutningens instrumentering tillräcklig för de uppmätningar som krävs för att visa att acceptanskriterierna är mötta?
D.4.6	Har en plan för eventualiteten att acceptanskriterierna inte är mötta tagits fram?
D.4.7	Har en plan för hantering av effekter från åldrande tagits fram?



2015:44

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-17116 Stockholm
Solna strandväg 96

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

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