



Jämförelse av olika kraftslag som nödelförsörjning vid kärnkraftverk

Elforsk rapport 13:87



Magnus Lenasson

Augusti 2013

ELFORSK

Jämförelse av olika kraftslag som nödelförsörjning vid kärnkraftverk

Elforsk rapport 13:87

Förord

Detta projekt har genomförts av Solvina AB i Göteborg. Projektet har finansierats inom Elforsks kärnkrafttekniska forskningsprogram. Arbetet har följts av en styrgrupp bestående av:

- Monika Adsten, Elforsk
- Ari Kanerva, Fortum
- Magnus Knutsson, Vattenfall / Ringhals
- Per Lamell, Vattenfall / Forsmark
- Inge Pierre, Svensk Energi
- Lars-Olof Ståhle, E.ON / OKG

Utöver de personer som varit officiellt inblandade i projektet eller styrgruppen vill jag rikta ett särskilt tack till följande personer som bidragit med mycket kunskap, erfarenhet och vishet:

Sven Granfors, Bengt Johansson, Andreas Nordquist och Carl Ressel

Min förhoppning är att ni som läsare ska få en ögonöppnare gällande tillgängliga reservkraftalternativ och därtill en stunds trevlig läsning.

En sen kväll i Göteborg

Magnus Lenasson

Sammanfattning

I dagsläget används vid de svenska kärnkraftverken dieselgeneratorset samt i liten utsträckning gasturbiner som säkerhetsklassad växelspanningskälla och batterier som säkerhetsklassad likspänningskälla.

Inga särskilda kraftkällor föreskrivs i de lagar och föreskrifter som styr kärnkraftverkens verksamhet. Däremot påbjuds diversifiering av säkerhetsfunktioner, men även enkelhet och pålitlighet i säkerhetssystemen. Designen har hittills präglats av likriktning och därför ska detta arbete genomlysas ett antal alternativa kraftkällor och deras lämplighet som nödelförsörjning på kärnkraftverk.

Målen med projektet var att:

- Definiera de parametrar som anses viktiga för att en kraftkälla ska vara lämplig som nödelförsörjning på kärnkraftverk.
- Redovisa en rad olika kraftkällors egenskaper med avseende på de definierade parametrarna.
- Sammanställa de undersökta kraftkällornas lämplighet som nödelförsörjning.
- Ta fram implementeringsförslag för de okonventionella kraftslag som undersöks.

Sammantaget har 10 olika kraftkällor undersökts och i olika grad bedömts som lämpliga, resultatet sammanfattas i nedanstående tabell.

√=Lämplig, X=Lämplig under särskilda förutsättningar, -=Ej lämplig					
Kraftslag *	Applikation				
	Säkerhetsklassad växelspanningskälla	Säkerhetsklassad likspänningskälla	SBO-kraft liten	SBO-kraft stor	SBO-kraft mobil
Diesel-generator	√	-	√	X	√
Gasturbin	-	-	√	√	X
Ångturbin intern	-	-	X	-	-
Ångturbin extern	X	-	X	-	-
Vattenkraft	X	-	X	X	-
Batterier	-	√	-	-	-
Bränsleceller	-	-	-	-	-
Stirling-motorer	-	-	-	-	-
Termoelektriska element	-	X	-	-	-
Svänghjul	-	-	-	-	-

*) Se definitioner i avsnitt 1.1

Av de 10 kraftslagen ses dieselgeneratorer, batterier och i viss mån gasturbiner som konventionell teknik på kärnkraftverken. Så i relation till dem bedöms även eventuella diversifieringsvinster, främst med avseende på yttre händelser. De kraftslag som bedöms ha stora diversifieringsvinster är:

- Ångturbin intern
- Vattenkraft
- Termoelektriska element

Arbetet ska användas först och främst för att sätta fokus på att givet vissa förutsättningar finns kraftslag som kan komplettera konventionella kraftkällor och ge goda diversifieringsvinster.

I andra hand ska det användas som ett kunskapsunderlag, dels vid nyinvesteringar i kärnkraft, men också vid större reinvesteringar i nödelförsörjning på befintliga kärnkraftverk.

Fortsatt arbete utgörs lämpligtvis av mer detaljerade implementationsförslag men detta bör i så fall göras med ett enskilt kärnkraftsblock i åtanke.

Summary

Currently the Swedish nuclear power plants are using diesel generator sets and to some extent gas turbines as their emergency AC power sources and batteries as their emergency DC power sources.

In the laws governing Swedish nuclear activity, no specific power sources are prescribed. On the other hand, diversification of safety functions should be considered, as well as simplicity and reliability in the safety systems. So far the choices of emergency power sources have been similar between different power plants, and therefore this project will investigate a number of alternative power sources and if they are suitable for use as emergency power on nuclear power plants.

The goals of the project were to:

- Define the parameters that are essential for rendering a power source suitable for use at a nuclear power plant.
- Present the characteristics of a number of power sources regarding the defined parameters.
- Compile the suitability of the different power sources.
- Make implementation suggestions for the less conventional of the investigated power sources. (unconventional in the investigated application)

10 different power sources in total have been investigated and to various degrees deemed suitable, the results are compiled in the table below.

√=Suitable, X=Suitable under certain conditions, -=Not suitable					
Power source	Application				
	Emergency AC source	Emergency DC source	SBO power small	SBO power large	SBO power mobile
Diesel generator	√	-	√	X	√
Gas turbine	-	-	√	√	X
Internal steam turbine	-	-	X	-	-
External steam turbine	X	-	X	-	-
Hydro power	X	-	X	X	-
Batteries	-	√	-	-	-
Fuel cells	-	-	-	-	-
Stirling engines	-	-	-	-	-
Thermo-electric generators	-	X	-	-	-
Flywheel	-	-	-	-	-

Out of the 10 power sources, diesel generators, batteries and to some extent gas turbines are seen as conventional technology at the nuclear power plants. In relation to them the other power sources have been assessed regarding diversification gains, foremost with regards to external events. The power sources with the largest diversification gains are:

- Internal steam turbine
- Hydro power
- Thermoelectric generators

The work should first and foremost put focus on the fact that under the right circumstances there are power sources that can complement conventional power sources and yield substantial diversification gains.

Secondarily, it is to be used as a knowledge base, for new investments in nuclear power, but also for larger reinvestments in emergency power at the existing nuclear power plants.

Suitable continued work is more detailed implementation suggestions. But for that a specific power plant should be chosen since the digging into details gets futile when generality should be maintained.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Definitioner	1
1.2	Bakgrund	2
1.3	Mål	3
1.4	Metod	3
2	Nödelförsörjning på kärnkraftverk	4
2.1	Generiskt elförsörjningssystem	4
2.1.1	Olika applikationer för nödelförsörjning	5
2.2	Övergripande krav	6
2.3	Viktiga parametrar för att fungera som nödelförsörjning på kärnkraftverk	8
2.3.1	Effekttillgång	8
2.3.2	Energitillgång/-täthet	8
2.3.3	Maximal drifttid	9
2.3.4	Dynamiskt beteende	9
2.3.5	Starttid	10
2.3.6	Realiserbarhet inom respektive utanför skyddat område	10
2.3.7	Tillgänglighet och tillförlitlighet	11
2.3.8	Möjlighet till säkerhetsklassning	11
2.3.9	Känslighet för yttre händelser	12
2.3.10	Tillkommande vedervågningsrisker	12
2.3.11	DKV-aspekter	13
2.3.12	Mobilitet	13
2.3.13	Investerings- och driftkostnader	13
2.4	Undersökta kraftslag	14
2.4.1	Avfärdade kraftslag	14
3	Egenskaper kraftslag	15
3.1	Diesलगeneratorset	15
3.1.1	Effekttillgång	15
3.1.2	Energitillgång/-täthet	15
3.1.3	Maximal drifttid	16
3.1.4	Dynamiskt beteende	16
3.1.5	Starttid	17
3.1.6	Realiserbarhet inom respektive utanför skyddat område	17
3.1.7	Tillgänglighet och tillförlitlighet	17
3.1.8	Möjlighet till säkerhetsklassning	18
3.1.9	Känslighet för yttre händelser	18
3.1.10	Tillkommande vedervågningsrisker	19
3.1.11	DKV-aspekter	21
3.1.12	Mobilitet	22
3.1.13	Investerings- och driftkostnader	24
3.1.14	Sammanställning	24
3.2	Gasturbin	25
3.2.1	Effekttillgång	25
3.2.2	Energitillgång/-täthet	25
3.2.3	Maximal drifttid	26
3.2.4	Dynamiskt beteende	27
3.2.5	Starttid	28
3.2.6	Realiserbarhet inom respektive utanför skyddat område	28
3.2.7	Tillgänglighet och tillförlitlighet	28
3.2.8	Möjlighet till säkerhetsklassning	29
3.2.9	Känslighet för yttre händelser	29

	3.2.10	Tillkommande vedervågningsrisker	29
	3.2.11	DKV-aspekter	31
	3.2.12	Mobilitet	31
	3.2.13	Investerings- och driftkostnader	31
	3.2.14	Sammanställning	31
3.3	Ångturbin intern	32	
	3.3.1	Effekttillgång	32
	3.3.2	Energitillgång/-täthet	33
	3.3.3	Maximal drifttid	33
	3.3.4	Dynamiskt beteende	34
	3.3.5	Starttid	34
	3.3.6	Realiserbarhet inom respektive utanför skyddat område	35
	3.3.7	Tillgänglighet och tillförlitlighet	35
	3.3.8	Möjlighet till säkerhetsklassning	36
	3.3.9	Känslighet för yttre händelser	36
	3.3.10	Tillkommande vedervågningsrisker	37
	3.3.11	DKV-aspekter	38
	3.3.12	Mobilitet	38
	3.3.13	Investerings- och driftkostnader	38
	3.3.14	Sammanställning	39
3.4	Ångturbin extern	39	
	3.4.1	Effekttillgång	39
	3.4.2	Energitillgång/-täthet	40
	3.4.3	Maximal drifttid	40
	3.4.4	Dynamiskt beteende	40
	3.4.5	Starttid	41
	3.4.6	Realiserbarhet inom respektive utanför skyddat område	41
	3.4.7	Tillgänglighet och tillförlitlighet	41
	3.4.8	Möjlighet till säkerhetsklassning	42
	3.4.9	Känslighet för yttre händelser	42
	3.4.10	Tillkommande vedervågningsrisker	43
	3.4.11	DKV-aspekter	43
	3.4.12	Mobilitet	44
	3.4.13	Investerings- och driftkostnader	44
	3.4.14	Sammanställning	44
3.5	Vattenkraft	45	
	3.5.1	Effekttillgång	45
	3.5.2	Energitillgång/-täthet	46
	3.5.3	Maximal drifttid	46
	3.5.4	Dynamiskt beteende	46
	3.5.5	Starttid	47
	3.5.6	Realiserbarhet inom respektive utanför skyddat område	47
	3.5.7	Tillgänglighet och tillförlitlighet	48
	3.5.8	Möjlighet till säkerhetsklassning	48
	3.5.9	Känslighet för yttre händelser	48
	3.5.10	Tillkommande vedervågningsrisker	49
	3.5.11	DKV-aspekter	50
	3.5.12	Mobilitet	50
	3.5.13	Investerings- och driftkostnader	50
	3.5.14	Sammanställning	51
3.6	Batterier	51	
	3.6.1	Effekttillgång	52
	3.6.2	Energitillgång/-täthet	52
	3.6.3	Maximal drifttid	52
	3.6.4	Dynamiskt beteende	53
	3.6.5	Starttid	53
	3.6.6	Realiserbarhet inom respektive utanför skyddat område	53

3.6.7	Tillgänglighet och tillförlitlighet	54
3.6.8	Möjlighet till säkerhetsklassning	55
3.6.9	Känslighet för yttre händelser	55
3.6.10	Tillkommande vedervågningsrisker	56
3.6.11	DKV-aspekter	57
3.6.12	Mobilitet	58
3.6.13	Investerings- och driftkostnader	58
3.6.14	Sammanställning	59
3.7	Bränsleceller	59
3.7.1	Effekttillgång	60
3.7.2	Energitillgång/-täthet	60
3.7.3	Maximal drifttid	61
3.7.4	Dynamiskt beteende	61
3.7.5	Starttid	61
3.7.6	Realiserbarhet inom respektive utanför skyddat område	62
3.7.7	Tillgänglighet och tillförlitlighet	62
3.7.8	Möjlighet till säkerhetsklassning	62
3.7.9	Känslighet för yttre händelser	63
3.7.10	Tillkommande vedervågningsrisker	64
3.7.11	DKV-aspekter	65
3.7.12	Mobilitet	65
3.7.13	Investerings- och driftkostnader	65
3.7.14	Sammanställning	65
3.8	Stirlingmotorer	66
3.8.1	Allmän beskrivning	66
3.8.2	Sammanställning	67
3.9	Termoelektriska element	67
3.9.1	Effekttillgång	67
3.9.2	Energitillgång/-täthet	68
3.9.3	Maximal drifttid	68
3.9.4	Dynamiskt beteende	68
3.9.5	Starttid	70
3.9.6	Realiserbarhet inom respektive utanför skyddat område	70
3.9.7	Tillgänglighet och tillförlitlighet	70
3.9.8	Möjlighet till säkerhetsklassning	71
3.9.9	Känslighet för yttre händelser	71
3.9.10	Tillkommande vedervågningsrisker	72
3.9.11	DKV-aspekter	72
3.9.12	Mobilitet	72
3.9.13	Investerings- och driftkostnader	72
3.9.14	Sammanställning	73
3.10	Svänghjul	74
3.10.1	Effekttillgång	74
3.10.2	Energitillgång/-täthet	74
3.10.3	Sammanställning	75
4	Implementeringsförslag	76
4.1	Ångturbin intern	76
4.2	Termoelektriska element	79
5	Slutsatser	84
6	Referenser	86
Bilaga 1	- Föreskrifter	92

1 Inledning

Föreliggande rapport presenterar resultatet av Elforsk-projektet KK 010 / 25128 – Jämförelse av olika kraftslag som nödelförsörjning vid kärnkraftverk.

1.1 Definitioner och förkortningar

Anläggning:	Ett kärnkraftblock
Applikation:	Ett specifikt användningsområde för en undersökt kraftkälla. De olika applikationerna definieras var för sig.
Bevakat område:	Det område som omger en anläggning och avgränsas av ett områdesskydd. [4]
BWR:	Boiling Water Reactor, kokvattenreaktor, i Sverige: Ringhals 1, Forsmark 1-3 och Oskarshamn 1-3
CCF	"Common Cause Failure", fel med gemensam orsak.
Diversifiering:	Två eller flera alternativa system eller komponenter som oberoende av varandra utför samma säkerhetsuppgift men på principiellt olika sätt eller genom att ha olika egenskaper [5].
DKV	Driftklarhetsverifiering
Effekt:	När inget annat uttalas explicit avses aktiv effekt.
Fel med gemensam orsak:	Fel som samtidigt uppträder i två eller flera system eller komponenter på grund av en specifik händelse eller orsak [5].
Missil	Flygande föremål som kan vedervåga annan utrustning
Nödelförsörjning:	Samlingsnamn för SBO-kraft, säkerhetsklassad växelspanningskälla och säkerhetsklassad likspänningskälla.
PWR:	Pressurized Water Reactor, tryckvattenreaktor, i Sverige: Ringhals 2-4
RCPB:	Reactor Coolant Pressure Boundary, gränsen för de från reaktorn trycksatta systemen. På PWR-block även kallat primärsystemet.
SBO:	Station blackout, bortfall av yttre nät och all intern icke batterisäkrad växelspanning.
SBO-kraft liten:	Elförsörjning som vid SBO ersätter en säkerhetsklassad växelspanningskälla.

SBO-kraft mobil:	Som "SBO-kraft liten" fast mobil, i regel monterad på lastbil.
SBO-kraft stor:	Elförsörjning som vid SBO matar halva det interna nätet, säkerhetsklassat såväl som ordinarie.
Skyddat område:	De byggnader eller delar av byggnader som innehåller utrustning för anläggningens säkra drift eller i vilka kärnämne eller kärnavfall hanteras, bearbetas, lagras eller slutförvaras. [4]
Säkerhetsklassad likspänningskälla:	Elförsörjning som idag till största delen utgörs av batterier. Avbrott på spänningsmatningen accepteras ej.
Säkerhetsklassad växelspänningskälla:	Elförsörjning som idag till största delen utgörs av dieselgeneratorer. Avbrott på upp till ca 20 sekunder samt kortvariga störningar utanför stationärt tillåtna spänningsnivåer på försörjt elnät accepteras.
Säkerhetssystem:	System som har till uppgift att säkerställa reaktoravställning och resteffektkylning samt system som behövs för att begränsa konsekvenser vid händelser till och med händelseklassen osannolika händelser [5].

1.2 Bakgrund

I dagsläget används vid de svenska kärnkraftverken set med dieselmotorer och synkrogeneratorer (hädanefter kallade dieselgeneratorer) samt i liten utsträckning gasturbiner som säkerhetsklassad växelspänningskälla och batterier som säkerhetsklassad likspänningskälla.

De svenska lagar och föreskrifter som styr design av kärnkraftverk styr inte explicit val av nödelförsörjning [1], [2], [3], [5]. Inte heller de amerikanska lagar och föreskrifter som till stor del influerat designen av svenska kärnkraftverk specificerar vilken kraftkälla som ska användas [6]. Dock finns amerikanska guider som beskriver godtagbara sätt att uppfylla föreskrifter, där dieselgeneratorer förutsätts [7]. En mer detaljerad genomgång av relevanta föreskrifter, guider och normer ses i avsnitt 2.2.

Den svenska föreskrift som främst styr den tekniska konstruktionen av kärnkraftverk, SSMFS 2008:17 [5], anger i 10 § att rimliga tekniska och administrativa åtgärder ska vidtas för att motverka uppkomst av fel med gemensam orsak. Även 4§ (b) i samma föreskrift anger att redundans, inklusive diversifiering, samt fysisk och funktionell separation ska tillämpas i uppbyggnaden av säkerhetsfunktionerna.

Diversifiering är ett effektivt sätt att motverka uppkomst av fel med gemensam orsak. Teknisk diversifiering riskerar dock att göra en anläggning mer komplex. Ökad komplexitet kan utgöra ett negativt bidrag till säkerheten då anläggningen inte blir lika transparent, det blir fler sorters komponenter

som ska underhållas etc. Detta sammantaget gör att graden av diversifiering i praktiken alltid blir en bedömningsfråga, där olika värden delvis står mot varandra.

I denna kontext, där inga särskilda kraftkällor föreskrivs, där diversifiering av säkerhetsfunktioner, men även enkelhet och pålitlighet, påbjuds och där designen hittills präglats av likriktning ska detta arbete genomlysas ett antal alternativa kraftkällor och deras lämplighet som nödelförsörjning på kärnkraftverk.

1.3 Mål

Arbetet ska:

- Definiera de parametrar som anses viktiga för att en kraftkälla ska vara lämplig som nödelförsörjning på kärnkraftverk.
- Redovisa en rad olika kraftkällors egenskaper med avseende på de definierade parametrarna.
- Sammanställa de undersökta kraftkällornas lämplighet som nödelförsörjning.
- Ta fram implementeringsförslag för de okonventionella kraftslag som undersöks. (Okonventionella i undersökt applikation)

1.4 Metod

De parametrar som bedöms som viktiga för att ett kraftslag ska vara lämpligt som nödelförsörjning har efter inledande förslag från Solvina och diskussion med projektets styrgrupp beslutats till de som beskrivs i avsnitt 2.3.

De olika kraftslag som undersöks, och de som avfärdats, har även de efter inledande förslag och diskussion med projektets styrgrupp beslutats till de som anges i avsnitt 2.4.

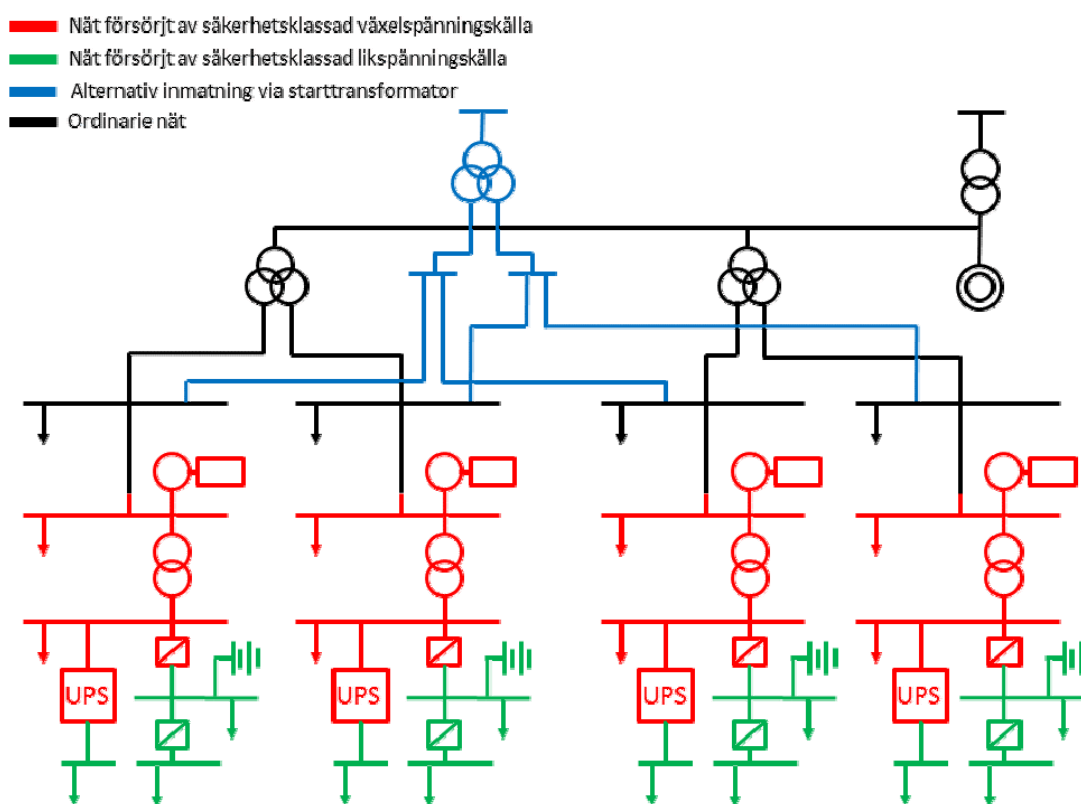
Egenskaperna för de undersökta kraftslagen undersöks huvudsakligen genom litteraturstudier och intervjuer. Gällande dynamisk prestanda finns för flera kraftslag mycket praktisk erfarenhet från provverksamhet internt på Solvina.

Kostnader i USD är omräknade till SEK med valutakurs per 2013-06-12: 6,54 SEK/USD.

2 Nödelförsörjning på kärnkraftverk

2.1 Generiskt elförsörjningssystem

Elförsörjningen på de svenska kärnkraftverken ser ut på olika vis, men det finns ett flertal gemensamma nämnare. Här presenteras ett generiskt elförsörjningssystem som har likheter med flera olika verk, utan att vara exakt lik något. Detta system används som utgångspunkt för studierna i denna rapport. Se enlinjeschema i Figur 2.1.



Figur 2.1. Enlinjeschema över generiskt elförsörjningssystem som används som utgångspunkt för studierna i denna rapport.

Lasterna i det generiska systemet ansätts till:

Ordinarie nät: 4·10 MW

Säkerhetsklassat växelspanningsnät: 4·2 MW

Säkerhetsklassat likspänningsnät: 4·0,2 MW

I den mån ström är dimensionerande för något kraftslag antas växelspanningslaster ha en effektfaktor på 0,8 vilket är konservativt även om lasterna till stor del består av asynkronmaskiner.

Spänningsnivåer definieras inte men är i de svenska verken typiskt:

Generatorskenstråk: 20-25 kV

Ordinarie yttre nät: 400 kV (i undantagsfall 130 kV)

Alternativt yttre nät som matar starttransformator: 70-130 kV

Skenor i ordinarie nät: 6-10 kV

Skenor i säkerhetsklassat växelspanningsnät, övre nivå: 6-10 kV*

Skenor i säkerhetsklassat växelspanningsnät, nedre nivå: 400-690 V

Likspänningsskenor försörjda av säkerhetsklassade likspänningskällor: 110 V

Växelspanningsskenor försörjda av säkerhetsklassade likspänningskällor: 230-500 V

**Den övre nivån i det säkerhetsklassade växelspanningsnätet finns inte alltid, det kan bestå av enbart det som ovan benämns "nedre nivå".*

Utöver ovanstående spänningsnivåer som ingår i det generiska systemet så finns i verken fler nivåer. T.ex. så finns det typiskt en lägre spänningsnivå i det ordinarie nätet (400-690 V) samt fler likspänningsnät med olika spänningsnivåer (24-110 V). Dessa har dock valts bort ur det generiska systemet då de inte bedöms tillföra någon principiell aspekt i studierna utan snarare komplicera dem och göra rapporten svårare att ta till sig.

2.1.1 Olika applikationer för nödelförsörjning

I dagens elförsörjningssystem på de svenska kärnkraftverken används olika kraftkällor i olika nödelapplikationer, alltså undantaget den ordinarie försörjningen via yttre nät och huvudgenerator. I detta arbete delas nödelförsörjningen upp i fem applikationer, vilka är:

- Säkerhetsklassad likspänningskälla
- Säkerhetsklassad växelspanningskälla
- SBO-kraft liten
- SBO-kraft mobil
- SBO-kraft stor

De säkerhetsklassade lik- och växelspanningskällorna är ofta implementerade i ett flertal redundanta enheter. SBO-kraft kan vara implementerad som en enskild enhet eller som flera redundanta enheter. För respektive kraftslag anges i sammanställningen om det är lämpligt att implementera som en enskild eller som flera redundanta enheter. Att ett visst kraftslag enbart är lämpligt att realisera som en enskild enhet diskvalificerar inte kraftslaget från att vara lämpligt som säkerhetsklassad lik- eller växelspanningskälla. Detta då de diversifieringsvinster som diskuteras förutsätter en kombination av olika kraftslag.

Säkerhetsklassad likspänningskälla

Säkerhetsklassad likspänningskälla är det som idag utgörs av batterier. Inga avvikelser från stationärt tillåtna spänningsnivåer accepteras i denna applikation, därmed tillåts heller inga starttider efter påkallat behov. Kraften måste finnas momentant tillgänglig vid bortfall av säkerhetsklassat växelspanningsnät. Lasterna definieras av att något av följande är uppfyllt:

- Deras funktion riskeras vid spänningsdippar eller kortvariga spänningsbortfall
- De krediteras inom ett fåtal sekunder efter bortfall av yttre nät
- De krediteras vid bortfall av säkerhetsklassat växelspanningsnät

Säkerhetsklassad växelspanningskälla

Säkerhetsklassad växelspanningskälla är det som idag till största delen utgörs av dieselgeneratorer. En kortare starttid efter påkallat behov accepteras i denna applikation. Även kortvariga spänningsdippar utanför de stationärt tillåtna spänningsnivåerna accepteras vid motorstarter. Lasterna definieras av att följande är uppfyllt:

- De krediteras vid bortfall av yttre nät
- De kan kortvarigt vara utan spänning under start av kraftkällan utan att deras uppgifter riskeras

SBO-kraft liten

Stationär SBO-kraft är det som idag främst utgörs av gasturbiner off-site, men kan även utgöras av dieselgeneratorer eller gasturbiner på skyddade området. De används när varken ordinarie yttre nät eller säkerhetsklassad växelspanningskälla finns tillgänglig. "SBO-kraft liten" ersätter en av de säkerhetsklassade växelspanningskällorna. Lasterna är alltså samma som för säkerhetsklassad växelspanningskälla.

SBO-kraft stor

"SBO-kraft stor" används under samma situationer som "SBO-kraft liten". Skillnaden är att den försörjer halva det interna nätet på ett kärnkraftblock, både säkerhetsklassat och ordinarie. Lasterna utgörs alltså både av de säkerhetsklassade växelspanningslasterna och ordinarie laster.

SBO-kraft mobil

"SBO-kraft mobil" fungerar på samma sätt som "SBO-kraft liten" med den skillnaden att den är mobil, oftast monterad på en lastbil, detta gör att den enkelt kan separeras fysiskt från de säkerhetsklassade subarna samt att den kan användas på olika block och även olika kärnkraftverk.

2.2 Övergripande krav

Här sammanställs de nukleära krav som inverkar på valet av nödelförsörjning. Andra krav, exempelvis på personsäkerhet, tas ej upp. De förutsätts kunna följas för kommersiellt tillgängliga aggregat.

Svenska kärnkraftverk lyder under lagen om kärnteknisk verksamhet [1] och förordningen om kärnteknisk verksamhet [2]. Dessa återger dock inga krav på detaljer i utformandet av kärnkraftverk. De pekar istället på den myndighet som utsetts att svara för lagens upprätthållande, strålsäkerhetsmyndigheten (SSM). SSM utfärdar föreskrifter som kärnkraftverken måste uppfylla för att få tillstånd till verksamheten.

De föreskrifter som styr kärnkraftverkens konstruktion är SSMFS2008:1 [3] och SSMFS2008:17 [5].

SSMFS2008:1 [3] ställer krav på övergripande nivå. De relevanta delarna ur konstruktionshänseende är föreskriftens kap 3, vilket återges i Bilaga 1, avsnitt 1. Inget av kraven påverkar direkt valet av nödelförsörjning.

SSMFS2008:17 [5] ställer mer detaljerade krav, men fortfarande i största utsträckning teknikneutralt. De paragrafer som har störst bärighet på detta arbete är § 4, § 10 och § 11. Dessa är återgivna i Bilaga 1, avsnitt 2. § 10 föreskriver att fel med gemensam orsak ska motverkas. §4 påbjuder diversifiering av säkerhetsfunktioner, men inte vilken grad av diversifiering som krävs.

Amerikanska lagar och föreskrifter har till stor del influerat designen av svenska kärnkraftverk. De som anses ha bäring på detta arbete är framförallt 10CFR50 [6] och Regulatory Guide 1.9 [6].

10CFR50 [6] är de amerikanska föreskrifterna för kärnkraftverk som ges ut av den amerikanska motsvarigheten till SSM, NRC. De särskilt intressanta delarna för detta arbete är 10CFR50.63 som redogör för hur verk ska hantera station blackout samt Appendix A – General Design Criteria där kriterierna 17 och 18 beskriver hur elsystem ska konstrueras, inspekteras och testas.

Enligt 10CFR50.63 (återges i Bilaga 1, avsnitt 3) ska ett kärnkraftverk kunna hantera en station blackout över en viss specificerad tid. Om detta inte kan hanteras med tillgång till enbart de säkerhetsklassade likspänningskällorna så ska det finnas tillgång till "alternate ac source" vilket motsvarar det som i denna rapport definieras som SBO-kraft (liten, mobil och stor). "Alternate ac source" definieras i 10CFR50.2 vilket återges i Bilaga 1, avsnitt 4.

Kriterierna 17 och 18 från 10CFR50 Appendix A – General Design Criteria återges i Bilaga 1, avsnitt 5. De ställer krav på dubbla inmatningar från yttre nät, men inga explicita krav på val av kraftkällor.

NRC tillhandahåller även Regulatory Guides (RG), de är inte obligatoriska att följa för vare sig amerikanska eller svenska kärnkraftverk. De är guider som exemplifierar godtagbara sätt att uppfylla amerikanska föreskrifter. Den enda RG som identifierats som relevant för det här arbetet är RG 1.9 [7] som behandlar dieselgeneratorer. Den förutsätter alltså att dieselgeneratorer används som säkerhetsklassade växelspänningskällor och är därmed inte applicerbar om dieselgeneratorer inte används. Inga motsvarande RG finns för andra kraftslag. För befintliga verk som gjort tolkningar av en RG och fört in detta i sin säkerhetsredovisning så gäller detta sedan som krav.

Även standardorganisationer som IEEE och IEC tillhandahåller standarder som beskriver implementering av dieselgeneratorer och batterier med kringssystem på ett kärnkraftverk. Inte heller dessa är obligatoriska att följa, utan ett stöd vid konstruktion av system med de aktuella kraftslagen. Exempelvis behandlar IEEE Std-387 [8] dieselgeneratorer och IEEE Std-535 [9], -650 [10] och -946 [11] olika aspekter av DC-system med batterier.

I efterspelet efter Fukushima förs i branschen diskussioner om införandet av ett nytt krav, Extended Loss of AC Power, som troligen skulle postulera bortfall av de flesta av dagens SBO-kraftkällor [83]. Detta krav används dock inte i rapporten då det inte är definierat exakt vad det kommer att innebära.

2.3 Viktiga parametrar för nödelförsörjning på kärnkraftverk

I detta avsnitt beskrivs vilka parametrar som undersöks, varför de är med samt i oklara fall hur redovisning sker.

För varje parameter anges vad som är acceptanskriterier för att ett kraftslag ska bli aktuellt som nödelförsörjning. Detta görs uppdelat på de fem olika applikationer som beskrivs i avsnitt 2.1.1.

Acceptanskriterierna är i första hand baserade på det generiska nätet presenterat i avsnitt 2.1. När acceptanskriterier anges med siffror som inte direkt kan härledas från avsnitt 2.1 är det bedömningar baserade på dagens kravnivåer på främst Ringhals samt i vissa fall förväntade kommande krav. Dessa acceptanskriterier är enbart till för att på ett adekvat sätt kunna bedöma lämpligheten hos ett visst kraftslag. I verkliga implementeringar kan acceptanskriterierna skilja sig avsevärt från de som anges här. I de fall ett kraftslag med små marginaler klarar/inte klarar ett acceptanskriterium bedöms det som "lämpligt under särskilda förutsättningar", en diskussion införs då om vilka förutsättningar kraftslaget är lämpligt under.

2.3.1 Effekttillgång

Parametern avser klargöra inom vilka effektintervall det finns tillgängliga kraftkällor. För inga applikationer behövs kraftkällor med högre effekt än några tiotals MW, maximal effekt anges därför bara upp till 50 MW, därutöver anges endast 50+ MW. Parametern klargör även ifall kraftkällan är beroende av kärnkraftverkets driftläge (t.ex. effektdrift eller kall avställning). Acceptanskriterierna är baserade på det generiska elförsörjningssystemet i avsnitt 2.1.

Acceptanskriterier för olika applikationer:

- Säkerhetsklassad likspänningskälla: >200 kW
- Säkerhetsklassad växelspänningskälla: >2 MW
- SBO-kraft liten: >2 MW
- SBO-kraft mobil: >2 MW
- SBO-kraft stor: >20 MW

2.3.2 Energitillgång/-täthet

Parametern ska klargöra hur stora lager av primär energibärare som krävs för att producera 1 MWh elektrisk energi. Eftersom energin är lagrad i olika former så får parametern beskrivas individuellt för respektive kraftslag. Energiåtgången beräknas för ett enskilt aggregat. I det fall flera behövs får mängden bränsle multipliceras med antal aggregat.

Acceptanskriterier för samtliga applikationer: Lagret av primär energibärare ska få plats i lämplig anslutning till kraftkällan. Erforderligt lager av primär energibärare anges baserat på fullast under följande tider:

- Säkerhetsklassad likspänningskälla: 8 h, den tid som styrgruppen är överens om att svenska verk i dagsläget avser uppnå.
- Säkerhetsklassad växelspänningskälla: 72 h, den tid som anläggningen är avskuren från tunga transporter utifrån (bränsle och annan förbrukningsmateriel) enligt [82]
- SBO-kraft liten: 72 h [82]
- SBO-kraft mobil: 72 h [82]
- SBO-kraft stor: 72 h [82]

2.3.3 Maximal drifttid

Parametern ska klargöra ifall det finns begränsningar på hur länge kraftkällor kan vara i drift utan uppehåll. Därtill ska det klargöras ifall särskilda underhållsinsatser krävs under drifttiden.

Acceptanskriterier för olika applikationer:

- Säkerhetsklassad likspänningskälla: Inget specifikt värde anges. Tiden då kraftkällan levererar effekt begränsas i regel av energitillgången, se avsnitt 2.3.2. Säkerhetsklassade likspänningskällor är i regel inkopplade mot nät även under standby, det läget måste de kunna befinna sig i en hel driftsäsong om inte extra redundans finns för att möjliggöra underhåll under effektdrift.
- Säkerhetsklassad växelspänningskälla: >30 dygn [7]
- SBO-kraft liten: >30 dygn [7]
- SBO-kraft mobil: >30 dygn [7]
- SBO-kraft stor: >30 dygn [7]

2.3.4 Dynamiskt beteende

Parametern ska klargöra hur kraftkällan kan regleras. Detta sker genom beskrivning av frekvens- och spänningsreglerande system samt beskrivning av hur kraftkällan reagerar på till exempel motorstarter och lastfrånslag.

Acceptanskriterier för olika applikationer:

- Säkerhetsklassad likspänningskälla: Ska momentant kunna gå från att konsumera effekt (hålladdning) till att försörja nätet med maximal effekt utan att spänningen går utanför sina stationärt tillåtna värden.
- Säkerhetsklassad växelspänningskälla: Ska klara av att starta motorer med en nominell effekt i storleksordningen några hundra kW oavsett grundlast. Spänning och frekvens får kortvarigt vara utanför de stationärt tillåtna värdena.
- SBO-kraft liten: Samma acceptanskriterier som för säkerhetsklassad växelspänningskälla gäller.

- SBO-kraft mobil: Samma acceptanskriterier som för säkerhetsklassad växelspänningskälla gäller.
- SBO-kraft stor: Ska klara av att starta motorer med en nominell effekt på minst ca 4 MW oavsett grundlast. Spänning och frekvens får kortvarigt vara utanför de stationärt tillåtna värdena.

2.3.5 Starttid

Parametern ska klargöra hur snart efter nätbortfall det säkrade nätet är spänningssatt. Därtill ska det klargöras ifall försörjda laster behöver startas i sekvens.

Acceptanskriterier för olika applikationer:

- Säkerhetsklassad likspänningskälla: Ska vara spänningssatt omedelbart, ingen sekvensstart får behövas.
- Säkerhetsklassad växelspänningskälla: Ska kunna spänningssätta nätet inom 20 sekunder. Startsekvenser får förekomma. Acceptanskriteriet kan i verkligheten skilja sig betydligt från 20 sekunder beroende på vilka laster som försörjs av kraftkällan.
- SBO-kraft liten: Avgörs av hur länge anläggningen klarar ett station blackout-scenario. Ingen specifik tid definieras som acceptanskriterium.
- SBO-kraft mobil: Avgörs av hur länge anläggningen klarar ett station blackout-scenario. Starttiden kommer här i praktiken till största delen utgöras av tiden för att forsla kraftkällan till inkopplingsstället och koppla in den. Ingen specifik tid definieras som acceptanskriterium.
- SBO-kraft stor: Avgörs av hur länge anläggningen klarar ett station blackout-scenario. Ingen specifik tid definieras som acceptanskriterium.

2.3.6 Realiserbarhet inom respektive utanför skyddat område

Parametern ska klargöra hur stor plats kraftkällan tar och vilka särskilda förutsättningar den kräver.

Acceptanskriterier för olika applikationer:

- Säkerhetsklassad likspänningskälla: Ska vara realiserbar inuti anläggningen
- Säkerhetsklassad växelspänningskälla: Ska företrädesvis vara realiserbar inom kärnkraftverkets skyddade område. Även säkerhetsklassad växelspänningskälla belägen utanför skyddat område kommer dock att diskuteras.
- SBO-kraft liten: Ska vara realiserbar inom det skyddade området, bevakade området eller inom kärnkraftverkets närområde (inom en radie på ett fåtal mil). Företrädesvis bör den vara belägen inom det skyddade området.

- SBO-kraft mobil: Givet att kraftkällan kan göras mobil ställs inga andra särskilda krav på geografisk realiserbarhet.
- SBO-kraft stor: Ska vara realiserbar på skyddade området, bevakade området eller inom kärnkraftverkets närområde (inom en radie på ett fåtal mil). Företrädesvis bör den vara belägen på skyddade området.

2.3.7 Tillgänglighet och tillförlitlighet

Parametern ska klargöra kraftslagets driftsäkerhet. Två parametrar används, tillgänglighet och tillförlitlighet. Redovisningen av dessa parametrar kan göras på ett flertal sätt. I detta arbete beräknas enbart ett tillgänglighetsvärde, för fel inträffade både under standby och drift. Tillförlitlighet är sannolikheten för lyckad start vid startförsök.

Definitioner:

Tillgänglighet = 1-Otillgänglighet

Otillgänglighet = $\frac{\text{Antal timmar påtvingad avställning under drift och standby}}{\text{Totalt antal timmar i drift och standby}}$

Tillförlitlighet = $\frac{\text{Antal starter}}{\text{Antal startförsök}}$

Huvudsakligen används två källor för tillgänglighets- och tillförlitlighetsdata, en databas över amerikanska kraftproducenter [13] och den nordiska sammanställning av drifterfarenhet som används som underlag för de nordiska kärnkraftverkens PSA-analyser, T-boken [12]. I de fall båda anger data för samma typ av kraftkälla skiljer sig värdena betydligt åt. Detta antas bero på att de amerikanska kraftverken i databasen [13] skiljer sig mycket åt i både ålder, kvalitet, underhåll och drifttid. Komponenterna i T-boken [12] som sitter i kärnkraftverk har både låg nyttjandegrad och ett regelbundet noga styrt underhåll, vilket kan förklara deras högre tillgänglighetssiffror.

På grund av detta är det vanskligt att jämföra tillgänglighet på till exempel dieselgeneratorer från T-boken [12] med tillgänglighet på vattenkraftverk från databasen [13]. Även att sätta exakta acceptanskriterier blir vanskligt med så skiftande indata, istället förs en diskussion för respektive kraftslag där tillgängligheten bedöms som lämplig eller inte.

2.3.8 Möjlighet till säkerhetsklassning

Denna parameter ska klargöra om aktuellt kraftslag säkerhetsklassats tidigare och i annat fall om det finns förutsättningar för att göra det i framtiden.

För bedömning om möjlig framtida säkerhetsklassning kommer främst kraftslagets ackumulerade drifttid att beaktas.

Acceptanskriterier för olika applikationer:

- Säkerhetsklassad likspänningskälla: Ska kunna säkerhetsklassas
- Säkerhetsklassad växelspänningskälla: Ska kunna säkerhetsklassas
- SBO-kraft (liten, mobil och stor): Dessa applikationer kommer troligtvis inte att säkerhetsklassas, men tillräcklig drifterfarenhet för att kunna säkerhetsklassas bör ändå ses som ett minimikrav.

2.3.9 Känslighet för yttre händelser

Parametern ska klargöra vilka särskilda behov eller andra karakteristika kraftslaget har som gör det extra känsligt för olika sorters yttre händelser. SSMFS 2008:17 [5] redogör i allmänna råd till §14 för exempel på händelser som ska beaktas, men i säkerhetsanalyserna beaktas avsevärt många fler och mer detaljerade händelser. Här grupperas ett antal utvalda yttre händelser in i nedanstående grupperingar för att olika typer av principiell påverkan ska kunna analyseras oberoende av vilket fenomen som gett upphov till denna påverkan.

Gruppering av yttre händelser:

- Mekanisk påverkan. Exempelvis extrem vind, extrem nederbörd (snö), trombmissil, explosion, flygplanskrasch och jordbävning
- Påverkan av vatten. Exempelvis extrem nederbörd, extrema havsvågor, extrem vattennivå och översvämning.
- Igensättning av galler och spjäll. Exempelvis extrem nederbörd (snö), isstorm, snörök/påisning och missil.
- Påverkan av hög respektive låg temperatur.

Acceptanskriterier:

Generellt ska kraftslaget utan orimliga tillkommande konstruktioner kunna göras tåligt mot de dimensionerande yttre händelser som idag tillämpas på de svenska kärnkraftverken och eventuellt kända tillkommande händelser.

Det är ur diversifieringsperspektiv en styrka om känslighet för vissa yttre händelser inte delas med andra kraftslag som kan bli aktuella som redundant diversifierad kraftförsörjning.

2.3.10 Tillkommande vedervågningsrisker

Parametern ska klargöra vilka vedervågningsrisker kraftkällan tillför anläggningen och hur de kan hanteras. Vedervågningsrisker delas upp i följande grupper:

- Explosiva ämnen
- Brandbelastning
- Stora roterande massor

- Farliga ämnen, som vid läckage gör ett område obeträdbart
- Elektriska transienter värre än normala kopplingstransienter som kraftslaget kan ge upphov till

Acceptanskriterier:

Generellt ska kraftslaget utan orimliga tillkommande konstruktioner kunna göras tåligt mot de eventuella tillkommande vedervågningsriskerna.

2.3.11 Underhålls- och DKV-aspekter

Parametern ska klargöra om särskilda underhållsåtgärder eller åtgärder för att verifiera driftklarheten hos kraftkällan krävs, och om de i så fall bedöms utgöra något hinder för drift. Särskilt beaktas om det krävs prover som svårligen låter sig göras eller om det krävs prover under driftsäsong och ifall de i så fall kan göras med bibehållen driftklarhet hos kraftkällan.

Acceptanskriterier:

Generellt ska kraftslaget vara möjligt att prova utan orimliga förberedelseåtgärder. De ska inte heller behöva göras icke driftklara under driftsäsong.

2.3.12 Mobilitet

Parametern ska klarställa om kraftkällan går att göra mobil. Särskilt beaktas vilka transportmedel som krävs för att flytta den och vilka anslutningsmöjligheter som krävs för att koppla in den.

Acceptanskriterier för olika applikationer:

- Säkerhetsklassad likspänningskälla: Behöver ej kunna göras mobil
- Säkerhetsklassad växelspänningskälla: Behöver ej kunna göras mobil
- SBO-kraft liten: Behöver ej kunna göras mobil
- SBO-kraft mobil: Ska kunna göras mobil. Det är även en fördel om kraftkällan utan orimliga insatser kan transporteras mellan olika kärnkraftverk.
- SBO-kraft stor: Behöver ej kunna göras mobil

2.3.13 Investerings- och driftkostnader

Parametern ska klargöra hur mycket kraftkällan kostar att investera i inklusive nödvändig kringutrustning och hur mycket den kostar att driva. Merparten av de undersökta kraftslagen finns inte implementerade på kärnkraftverk och därför kan kostnader för en säkerhetsklassad kraftkälla i regel inte anges. För att resultaten ska bli jämförbara redogörs kostnader för att köpa respektive kraftslaget i en konventionell tillämpning. Förutom extra kostnader associerade till säkerhetsklassning av komponenter tillkommer

även kostnader för projekten som installerar komponenterna, dessa kan ofta utgöra en betydande del av den totala investeringskostnaden.

Inga acceptanskriterier anges för kostnader, men informationen är naturligtvis viktig när kostnad jämförs med nytta.

2.4 Undersökta kraftslag

Följande kraftslag undersöks:

- Dieselgeneratorer
- Gasturbiner
- Ångturbin med intern ångkälla
- Ångturbin i externt kraftverk
- Vattenkraftverk
- Batterier
- Bränsleceller
- Stirlingmotorer
- Termoelektriska element
- Svänghjul

2.4.1 Avfärdade kraftslag

Vissa kraftslag har i förväg kunnat avfärdas på grund av uppenbar olämplighet, dessa är:

- Vindkraftverk – Tillgång till erforderlig effekt kan ej garanteras
- Vågkraftverk – Tillgång till erforderlig effekt kan ej garanteras
- Solceller – Tillgång till erforderlig effekt kan ej garanteras
- Ångackumulator – Kräver mycket energi för värmehållning. Befintlig ånga tillgänglig i processen behandlas i kraftslag "Ångturbin med intern ångkälla".
- Superkondensator – Dagens superkondensatorer har inga fördelar mot konventionella batterier i aktuell tillämpning. Största fördelen mot batterier är snabb upp- och urladdning, vilket inte är något självändamål, i sammanhanget är hög energidensitet viktigare.

Ytterligare två kraftslag har kommit upp under arbetets gång, som inte uppenbart är olämpliga men som inte hunnit tas med i arbetet. De är:

- Lagrad tryckluft, CAES
- Supraleadande magnetisk energilagring, SMES

3 Egenskaper kraftslag

3.1 Dieselgeneratorset

3.1.1 Effekttillgång

De största tillverkarna levererar dieselgeneratorer i följande storlekar:

Caterpillar	12 - 5 720 kW*	[19]
Wärtsilä	1 032 - 17 080 kW	[20]
Cummins	6 - 2 660 kW	[21]
FG Wilson	5,5 - 2 000 kW	[22]
MTU	129 - 10 000 kW	[23]

**Upp till denna effekt levereras dieselgeneratorer avsedda som stand by-kraft på den europeiska marknaden. Caterpillar har dieselgeneratorer som kan leverera upp till 17 460 kW i andra delar av sitt sortiment.*

Vid parallellkoppling av flera dieselgeneratorer kan tillräcklig effekt för att agera "SBO-kraft stor" uppnås, exempelvis Wärtsilä bygger kraftverk på flera 100 MW baserade på flera dieselgeneratorer [24]. Dock ska tillgängligheten beaktas, den försämras då antalet komponenter som kan felar flerfaldigas.

3.1.2 Energitillgång/-täthet

För dieselgeneratorer är dieselolja den primära energibäraren, och energin lagras i kemisk form. Datablad för två 2 MW dieselgeneratorer har studerats och de har följande bränsleförbrukning:

Caterpillar 2 MWe, 400 V, Standby:	525,5 l/h	[19]
FG Wilson P2500-1, 2 MWe, Standby:	527 l/h	[22]

Dessa likvärdiga förbrukningar innebär att en dieselgenerator av den här storleken behöver knappt 265 l dieselolja per MWh.

För att köra en sådan diesel vid fullast i 72 h krävs därmed $72 \cdot 2 \cdot 265 = 38\,160$ l dieselolja. Detta kräver en tank som vid kubisk form har sidmåttet 3,4 m. Detta bedöms vara en rimlig storlek på tank vid installation på skyddade området.

Mängden bränsle som krävs för att agera säkerhetsklassad likspänningskälla eller "SBO-kraft stor" beräknas ej då dieselgeneratorer på grund av starttiden ej är lämpliga som säkerhetsklassad likspänningskälla och på grund av effekttillgång ej är lämpliga som "SBO-kraft stor".

3.1.3 Maximal drifttid

Då dieselgeneratorer regelmässigt används på kärnkraftverk idag utgås från att det finns dieselgeneratorer på marknaden som kan vara i drift minst 30 dygn i sträck utan avbrott för planerat underhåll. Givet den FU-plan från Cummins som redovisas i 3.1.11 så skulle byte av bränslefilter samt vattendränage från bränsletank behöva göras under drift för att uppnå 30 dygns kontinuerlig drift, detta bedöms som uppnåbart med hjälp av t.ex. två parallella bränslefilter.

3.1.4 Dynamiskt beteende

Frekvensreglering

Som för samtliga beskrivna växelspänningskällor regleras effekten från dieselgeneratoren av en frekvensregulator när den agerar i ö-drift. Ö-drift är den normala drifttillämpningen vid nödelförsörjning. I regel finns även möjlighet att reglera effekten mot en viss nivå, vilket tillämpas när dieselgeneratoren är inkopplad mot yttre nät för provning.

Dieselgeneratorer reglerar effekten genom dieselmotorns pådrag. Vid en stegändring på regulatorns utsignal (pådragets börvärde) öppnas först pådragsventilen/spjället med en viss tidskonstant, därefter ökar motorn effekten. Parallellt med motorns effekttökning varvar turbon upp och ökar trycket på förbränningsluften vilket ytterligare ökar effekten. Pådragsventilen/-spjället och motorn har i regel korta tidskonstanter jämfört med turbon, typiskt några tiondels sekunder för de förra och någon enstaka sekund för den senare.

Vid en motorpålastning kommer effekt momentant att börja tas från dieselgeneratoren. Eftersom det tar tid för motorn att öka avgiven effekt tas effekten istället från den energi som lagras i motorn och generatorns roterande massor (svängmassor), även andra roterande laster i samma elnät bidrar med energi. På grund av detta effekttuttag sänks frekvensen i nätet, vilket är den signal som ger upphov till påkallad ökning av effekt via frekvensregulatorn.

Säkerhetsklassade växelspänningskällor utgörs till största delen av dieselgeneratorer. De klarar bevisligen av att starta motorer i storleksordningen några hundra kW. I Regulatory Guide 1.9 [7] anges riktlinjer för vilka frekvensavvikelser som är tillåtna och de förmodas innehållas på de verk som antagit guiden som krav.

Spänningsreglering

Spänningen regleras av en spänningsregulator som använder spänning uppmätt i närheten av generatorn som insignal och lämnar ett börvärde för fältspänning eller fältström som utsignal. Magnetiseringsutrustningen tillhandahåller begärd fältström/fältspänning till generatorn, vars magnetisering påverkas och därmed även generatorns klämspänning. Det finns två huvudsakliga typer av magnetiseringsutrustning (alt. matare), roterande och statisk. Den roterande mataren är en separat mindre generator som sitter på samma axel som huvudgeneratoren. Så länge axeln roterar kommer magnetiseringsmaskinen att ha tillgänglig energi att magnetisera huvudgeneratoren med. Den statiska magnetiseringsutrustningen är en

kraftelektronikbrygga som överför energi från en extern källa till generatorns fältlindning. Normalt är den externa källan generatorskenan och en delmängd av den ström generatorn producerar går alltså tillbaka för att magnetisera generatorn.

Säkerhetsklassade växelspanningskällor utgörs till största delen av dieselgeneratorer. De klarar bevisligen av lastfrånslag och pålastningar. I Regulatory Guide 1.9 [7] anges riktlinjer för vilka spänningsavvikelser som är tillåtna och dessa krav förmodas innehållas på de verk som antagit guiden som krav.

Hur stora på- respektive avlastningar som spänningsregleringssystemet kan hantera skiljer sig stort mellan olika dieselgeneratorer. Detta kravställs vid respektive installation.

3.1.5 Starttid

Dieselgeneratorer installerade på kärnkraftverk har normalt krav på sig att starta inom 10-20 sekunder. I vissa fall rekommenderar tillverkaren långsammare starter utom i nödfall, i de fallen är startutrustningen konstruerad så att både snabb och långsam start kan erhållas, vid automatisk start erhålls snabb start och vid manuell start (provning) erhålls långsam start (mjukstart). Dieselgeneratorer är regelmässigt utrustade med motorvärmare för att minska slitaget vid starter.

Dieselgeneratorer skulle kunna vara tillgängliga omedelbart om de hela tiden var i drift parallellt med nätet som enkelt skulle kunna isoleras vid störningar. Detta är dock ej tillåtet på grund av risken för CCF.

3.1.6 Realiserbarhet inom respektive utanför skyddat område

Dieselgeneratorer realiseras regelmässigt inne på skyddade området. Oftast är de belägna i egna byggnader tillsammans med eller i närheten av dieseloljetankarna.

Det finns inget geografiskt hinder mot att realisera dieselgeneratorer utanför skyddade området. Detta medför dock, som för alla undersökta kraftslag, svårigheter med till exempel fysiskt skydd av dieselgeneratorerna och ledningen därifrån.

3.1.7 Tillgänglighet och tillförlitlighet

Tillförlitlighetsdata beskrivs och beräknas i T-boken med hjälp av en komponentmodell. Där finns data för bland annat dieselkraftverk, gasturbiner och batterier. För att jämföra tillförlitlighetsdata för andra kraftslag (se 3.2.7, 3.4.7, 3.5.7) används i denna rapport driftinformation från databasen GADS [13]. Nedan följer en jämförelse mellan T-bokens angivna värden och värden som beräknas baserat på data från GADS för dieselgeneratorer.

Otillgänglighet

I T-boken anges sannolikheten för utebliven start som $\lambda_s = \text{"felintensitet under standby"}$ och sannolikheten för obefogat stopp $\lambda_d = \text{"felintensitet under"}$

drift". Genom att addera sannolikheterna fås en summerad sannolikhet för avbrott (anges per timma).

För dieselgeneratorer gäller att $\lambda_s = 14,7E-6$ / timme och $\lambda_d = 18,2E-4$ / timme.

Otillgänglighet beräknas med data från GADS som ("*Forced outage hours*" + "*Maintenance outages*") / ("*Total available hours*"). Data från den senaste 5-årsperioden (2007-2011) ger en otillgänglighet på $9,65E-2$ /timme. Att detta värde anger en större sannolikhet för fel jämfört med T-bokens värden kan förklaras med skillnader i underlaget för data. GADS baseras på ett stort antal kraftverk (framför allt amerikanska) av olika kvalitet och övervägande med mycket större belastning jämfört med T-bokens data som baseras uteslutande på data från reservkraft installerad på kärnkraftverk i Sverige och Finland.

Otillförlitlighet

Otillförlitlighet anges i T-boken som sannolikheten för utebliven start som $q_0 = \text{"sannolikheten för behovsrelaterade fel per behov"}$ vilket oftast är det samma som "*sannolikheten för behovsrelaterade fel vid test*". För dieselgeneratorer anges $q_0 = 3,1E-4/\text{behov}$.

Otillförlitlighet beräknas med data från GADS som ("*Attempted unit starts*" – "*Actual unit starts*") / "*Attempted unit starts*". Med data från den senaste 5-årsperioden (2007-2011) fås en tillförlitlighet på $2,5E-3$ /startförsök.

3.1.8 Möjlighet till säkerhetsklassning

Dieselgeneratorer säkerhetsklassas regelmässigt på kärnkraftverk runt om i världen.

3.1.9 Känslighet för yttre händelser

Mekanisk påverkan

Dieselgeneratorer installeras i nödkraftapplikationer regelmässigt i egna byggnader/byggnadsdelar tillsammans med eller i närheten av dieseloljetankarna. Normalt är antingen att dieselgeneratorerna är placerade en och en i direkt anslutning till byggnadskomplexet som utgör själva kärnkraftblocket eller att de är grupperade ett antal tillsammans i ett fristående byggnadskomplex. Dessa byggnader kan dimensioneras för att tåla kravställd mekanisk påverkan. Den enda mekaniska påverkan som byggnaden inte kan skydda mot är jordbävning, där det krävs att även utrustningen i byggnaden är dimensionerade för jordbävning. Ett flertal nyare dieselgeneratorer är i Sverige kvalificerade för att tåla jordbävning.

Vid mekanisk påverkan utöver dimensionerande värden beror konsekvenserna på hur långt över de dimensionerande värdena påverkan är, säkerhetsfaktorer i konstruktionen samt hur lokal påverkan är. Till exempel verkar missiler enbart lokalt, medan exempelvis jordbävning verkar på samtliga installerade dieselgeneratorer på området samtidigt.

Påverkan av vatten

Varken luftintag för förbränningsluft eller de elektriska komponenterna på en dieselgenerator tål att utsättas för vatten. Dock kan placering och utförande

av byggnad göras så att interna översvämningar ej kan uppträda. Luftintag kan utföras så att inblandning av vatten i förbränningsluften ej kan uppträda.

Vid vattenrelaterade händelser utöver dimensionerande värden är det främst översvämning och extrem havsvattennivå som kan ge konsekvenser på flera redundanta dieselgeneratorer samtidigt. Detta kan motverkas genom att ha dieselgeneratorer installerade på betryggande höjd över dimensionerande havsnivå och att ej saminstallera dem med processsystem anslutna till stora mängder vatten.

Igensättning av galler och spjäll

Dieselgeneratorer tål inte igensättning av vare sig luftintag eller skorstenar, luftintag är dock känsligast på grund av sugverkan. Extrema snöfall och påisning riskerar att blockera luftintag. De kan dock konstrueras så att dimensionerande värden för dessa händelser innehålls, till exempel med olika skärningsåtgärder och med värmning av galler. Även HVAC-komponenter på utsidan av byggnaderna kan sättas igen av is och snö, exempelvis kylbord, dessa skiljer sig inte principiellt från luftintagen i detta sammanhang.

Missiler kan sätta igen luftintag eller skorstenar, antingen genom lätta skrymmande missiler som byggskivor eller genom tunga missiler som bilar. Missiler drabbar lokalt och bedöms inte kunna slå ut flera redundanta dieselgeneratorer.

Vid igensättande händelser utöver dimensionerande värden drabbar missiler fortfarande bara lokalt, däremot kan snö eller isstormar utöver dimensionerande värden sätta igen luftintagen för flera redundanta dieselgeneratorer.

Temperatur

Hög temperatur drabbar dieselgeneratorer ur två aspekter. Uteluft är i regel den slutgiltiga värmesänkan för kylningen av dieselgeneratoren, hög temperatur kan därmed påverka förmågan att kyla dieselgeneratoren. Den andra aspekten är att varm luft har lägre densitet än kall, förbränningsluften kommer alltså att ha ett lägre syreinhåll än vid kall temperatur och därmed minska maximal uttagbar effekt från dieselgeneratoren. Båda fenomenen går att dimensionera för.

Det finns inga uppenbara risker med låg temperatur. Värmning av byggnad kan enkelt dimensioneras efter dimensionerande utomhustemperatur.

Vid temperaturer utanför de dimensionerande ses hög temperatur som det värsta då kylning av dieselgeneratoren ej kan upprätthållas. Detta kan undvikas genom administrativa föregreningar av hur högt dieselgeneratoren får belastas vid olika temperaturer.

3.1.10 Tillkommande vedervågningsrisker

Explosioner

En dieselgenerator med erforderliga kringssystem innehåller inga explosiva ämnen. Ifall tryckluft används som startmetod kan trycklufttanken explodera.

Byggnaden bedöms enkelt kunna konstrueras så att den tryckökning som uppkommer på grund av en sådan explosion inte vedervågar mer än den enskilda dieseln.

Brandbelastning

Bränslet till en dieselgenerator, dieseloljan, utgör en stor tillkommande brandbelastning. Byggnaderna där dieselgeneratorer och dieseloljetankar finns kan konstrueras med tillräckliga brandbarriärer för att brand vid en generator eller tank inte ska kunna påverka någon redundant enhet. I vissa fall är lagerhållningen av dieselolja uppdelad i dagoljetankar och förrådsoljetankar, de förra är då specifika för varje dieselgenerator och håller bränsle för en kortare tids drift. De senare är gemensamma för flera dieselgeneratorer och lagerhåller det resterande bränslet som krävs för att komma upp i 72 timmars kapacitet. Vid brand i en förrådsoljetank drabbas bränsleförsörjningen för flera redundanta dieselgeneratorer på en gång. För att totalt bortfall av säkerhetsklassade växelspanningskällor ska uppkomma krävs dock att denna händelse kombineras med långvarigt bortfall av yttre nät samt svårigheter att med tankbil nå fram till dieselgeneratorerna.

Stora roterande massor

Vevaxeln, generatorns rotor och en eventuell roterande matare utgör roterande massa i en dieselgenerator. Vevaxeln utgör en förhållandevis liten del av svängmassan. Energin i en roterande massa fås av

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2$$

Där I är svängmassan och ω är vinkelhastigheten. Svängmassan uppskattas för en dieselgenerator i relevant storlek till ca 200 kgm² efter kontroll av de olika dieselgeneratorerna på Ringhals. Vid ett varvtal på 1500 rpm ger det en kinetisk energi på

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot 200 \cdot \left(\frac{1500}{60} \cdot 2\pi \right)^2 \approx 2,5 MJ$$

Eftersom dieselgeneratorer regelmässigt används på kärnkraftverk förutsätts deras byggnader kunna göras tåliga mot missiler som uppkommer vid haverier. Den här beräknade energimängden används som jämförelse mot andra kraftslag med stora roterande massor.

Farliga ämnen

De farliga ämnen som identifierats kring en dieselgenerator är dieselolja och avgaser.

Vid större läckage av dieselolja kan ett område bli tillfälligt ej beträdbart på grund av brandrisk och ångor, detta medför att den aktuella dieselgeneratoren betraktas som icke driftklar. Läckaget kan dock relativt enkelt begränsas till utrymmen i byggnaden så att utsläpp till mark och vedervågning av redundanta enheter undviks.

Vid läckage av avgaser internt i dieselgeneratorns byggnad bedöms utrymmet bli ej beträdbart och dieselgeneratoren icke driftklar. Ventilationssystem kan dock enkelt byggas med sådan separation att avgaserna inte riskerar att göra utrymmen med redundanta enheter icke driftklara. Läckage av avgaser utanför byggnaden bedöms påverka atmosfären marginellt och inte påverka möjligheten att vistas runt byggnaden.

Vid normal drift har en dieselgenerator exempelvis högre NO_x-utsläpp än en gasturbin. Exempelvis Wärtsilä har reningssteg att köpa till som inte påverkar effekten nämnvärt, men det görs enligt [24] nästan aldrig för stand by-maskiner då de går så kort tid per år.

Elektriska transienter

Användning av kraftelektronik, till exempel i statiska matare eller likriktare till batterier dedikerade till dieselgeneratoren, kan orsaka försämrade elkvalité men bedöms inte hindra säker drift av elsystemet. Kraftelektronik används i stor utsträckning på kärnkraftverk idag, i motordrifter, UPS'er och DC-system.

I övrigt orsakar dieselgeneratorer inga särskilda transienter vid normal drift.

3.1.11 Underhålls- och DKV-aspekter

För att bevisa att en dieselgenerator kan starta sina laster bör den helst testas med samtliga laster inkopplade vid sina dimensionerande driftpunkter. Detta kan dock ofta vara svårt på grund av lågt tryck i reaktortanken under revisioner (långt mottryck ger ökad effekt för pumpar med direktdrivna motorer och minskad effekt för pumpar med varvtalsstyrda motorer) och att nödkylsystem inte kan köras hur som helst under drift. Verifikat på att de dimensionerande lasterna kan startas kan i så fall fås från simuleringar.

Simuleringarna är bara giltiga så till vida dieselgeneratorns förmåga att leverera effekt inte degraderats. Att maximal effekt kan levereras bör därför testas regelbundet, detta kan dock testas när det säkerhetsklassade växelspanningsnätet är anslutet till yttre nät och effekten regleras manuellt. Denna typ av tester tjänar också som förebyggande underhåll då de ser till att bränsle används innan det degraderas av ålder, att maskinen hålls smord och att elektriska kontakter inte oxiderar.

Enligt en av de större tillverkarna, Cummins Power, bör följande förebyggande underhåll genomföras på en dieselgenerator [21]:

Generell inspektion	Varje dag
Kontroll av kylvätskevärmare	Varje dag
Kontroll av nivå kylvätska	Varje dag
Kontroll av nivå motorolja	Varje dag
Kontroll av nivå bränsle	Varje dag
Kontroll av laddlufttrör	Varje dag
Kontroll av luftrenare	Varje vecka
Kontroll av batteriladdare	Varje vecka

Töm bränslefilter	Varje vecka
Töm vatten från bränsletank	Varje vecka
Kontroll av koncentration kylvätska	Varje månad
Kontroll att drivrem är spänd	Varje månad
Töm kondensat i avgassystem	Varje månad
Kontrollera startbatterier	Varje månad
Byt motorolja och oljefilter	Varje halvår
Byt kylvätskefilter	Varje halvår
Rengör vevhusventilation	Varje halvår
Byt luftrenarelement	Varje halvår
Kontroll av kylarslangar	Varje halvår
Byt bränslefilter	Varje halvår
Rengör kylsystem	Varje år

I Regulatory Guide 1.9 definieras ett antal tester och när de ska utföras [7] vilket de som antagit RG 1.9 som krav är bundna att följa. De sammanfattas i Tabell 1.

Tabell 1. Testsammanfattning från RG 1.9 [7]

Reference: IEEE 387 Clause	Tests	Site Acceptance tests (7.2)	Pre- operational tests (7.3)	Availability tests (7.4.2.1) (Surveillance)		System operation tests: shutdown/ refueling (7.4.2.2)	Independence tests 10 years (7.4.2.3)
				Monthly	6 Month		
7.2.1.1	Starting	X		X			
7.2.1.2	Load acceptance	X		X			
7.2.1.3	Rated load	X		X			
7.2.1.4	Load rejection	X					
7.2.1.5	Electrical	X					
7.2.1.6	Subsystem	X					
7.3.3	Reliability		X				
7.5.1	Start		X	X			
7.5.2	Load run		X	X			
7.5.3	Fast start		X		X	X	

7.5.4	LOOP ¹		X			X	
7.5.5	SIAS ²		X				
7.5.6	Combined SIAS and LOOP		X			X	
7.5.7	Largest load rejection		X			X	
7.5.8	Design load rejection		X			X	
7.5.9	Endurance and load margin		X			X	
7.5.10	Hot restart		X			X	
7.5.11	Synchronizing		X			X	
7.5.12	Protective trip bypass		X			X	
7.5.13	Test mode override		X			X	
7.5.14	Independence		X				X

¹) LOOP=Loss Of Offsite Power [7]

²) SIAS=Safety Injection Actuation System [7]

3.1.12 Mobilitet

Det finns ett antal exempel på mobila dieselgeneratorer på de svenska kärnkraftverken. Antingen är de monterade på lastbilar eller från början integrerade i ett fordon. Trafikförordningen [26] tillåter normalt fordonsvikter upp till 60 ton, detta går att söka dispens ifrån men är ändå ett lämpligt värde att utgå ifrån. Själva fordonet bedöms uppta ca 10 ton, vilket lämnar ca 50 ton att utnyttja till mobil kraftkälla. I dessa 50 ton ska det ingå kraftkälla, bränslesystem samt nödvändig utrustning för att anslutna kraftkällan till anläggningen. Det senare bedöms väga lite i sammanhanget.

Några dieselgeneratorer av lämpliga storlekar har följande vikter:

Caterpillar 2 MW	9,1 t (torrvikt)	[18]
Wärtsilä 2,64 MW	53 t	[20]
Cummins 2,66 MW	25,8 t	[21]
FG Wilson 2 MW	14,5 t	[22]

Som synes är det stora skillnader och Wärtsiläs modell är den enda här som är för tung. Utöver dieselgeneratoren ska som tidigare nämnt även bränsle ingå på fordonet. De 38 m³ dieselolja som nämns i avsnitt 3.1.2 skulle för vissa lättare motorer kunna härbärgeras på samma fordon som dieselgeneratoren, dieseloljan skulle väga runt 31 ton (densitet för dieselolja är ca 0,82 kg/dm³).

Slutsatsen är att dieselgeneratorer mycket väl kan göras mobila.

3.1.13 Investerings- och driftkostnader

Enligt [25] som undersökt ett antal amerikanska investeringar i dieselgeneratorer år 1998-2003 så är kostnaden för själva dieselgeneratoren (set med motor, generator, reglerutrustning, kylning) i snitt \$205 per kW för de 10 fall där dieselgeneratorerna var nya och inget extra arbete var inkluderat i priset. Dessa 10 fall inkluderar totalt 52 dieselgeneratorer som hade storlekar mellan 0,9 och 2,0 MW,.

\$205/kW motsvarar 1 340 kr/kW vilket för en 2 MW enhet motsvarar 2,68 Mkr.

Samma studie [25] anger den genomsnittliga underhållskostnaden för en 1,8 MW dieselgenerator till \$5 000/år vilket motsvarar 32 700 kr/år.

Dessa kostnader är för enheter som installerats utanför kärnkraftverk. Deras totala investeringskostnader har i genomsnitt varit 1,8 ggr kostnaden för själva dieselgeneratoren. Denna faktor bedöms vara väsentligt högre vid säkerhetsklassad installation på ett kärnkraftverk på grund av:

- Större projektorganisationer
- Mer analys och övrig projektdokumentation
- Robustare byggnader
- Administration kring säkerhetsklassning
- Administration kring installationer inne på skyddat område
- Mer provdrift

3.1.14 Sammanställning

Dieselgeneratorers lämplighet i olika applikationer ses i Tabell 2.

Dieselgeneratorer är lämpliga att implementera som flera redundanta enheter.

Tabell 2. Dieselgeneratorers lämplighet

Dieselgeneratorer			
Applikation	Lämplig	Lämplig under särskilda förutsättningar	Olämplig
Säkerhetsklassad växelspanningskälla	X		
Säkerhetsklassad likspänningskälla			X ¹
SBO-kraft liten	X		
SBO-kraft stor		X ²	
SBO-kraft mobil	X		

¹) Olämplig på grund av starttid > 0, se avsnitt 3.1.5.

²) Lämplig vid parallellkoppling av flera enheter, se avsnitt 3.1.1.

3.2 Gasturbin

3.2.1 Effekttillgång

De största tillverkarna levererar gasturbiner i följande storlekar:

Siemens	5-375 MW (50 Hz)	[27]
General Electric	11,25-126,1 MW	[28]
Alstom	113-326 MW	[29]
OPRA Turbines	1,6-2 MW	[30]
Kawasaki	1,5-18 MW	[31]

Siemens minsta turbin samt OPRA och Kawasaki's turbiner är de som kan vara aktuella för att agera säkerhetsklassad växelspanningskälla. Alstoms minsta turbin är även för stor att agera "SBO-kraft stor" då den skulle gå på alltför låg belastningsgrad.

3.2.2 Energitillgång/-täthet

Gasturbiner kan köras både på naturgas/biogas och olika oljebaserade flytande bränslen. För flytande bränslen blir volymen bränsle som behövs i samma storleksordning som för dieselgeneratorer då de har liknande verkningsgrad.

Vid användning av gas som bränsle kan gasen antingen lagras lokalt eller levereras via en pipeline. Då externa leveranser är svåra att garantera förutsätts ett lokalt gaslager.

Antaget att verkningsgraden är 35% (normalt mellan 30-40%) och att naturgas används som bränsle fås en bränsleförbrukning på 2,85 MWh kemisk energi för produktion av 1 MWh elektrisk energi. Med ett värmevärde för naturgas på 15 kWh/kg (12kWh /Nm³) [14] blir förbrukningen av naturgas 190 kg/MWh (237,5 Nm³/MWh).

För att använda gasturbin som säkerhetsklassad växelspanningskälla med en belastning på 2 MW i 72 h skulle det krävas $2 \cdot 72 \cdot 190 = 27,4$ t.

Med Ideala gaslagen ges att volymen som detta tar i anspråk är

$$V = \frac{nRT}{p}$$

där

n =molantal. En mol ren metan väger 16 g, så 27,4 t motsvarar $1,71 \cdot 10^6$ mol

R =Gaskonstanten= $8,3145$

T =Temperatur i K. Rumstemperatur antas, vilket motsvarar 293 K

P =Tryck i Pa. Tryck som i en normal gasolflaska i rumstemperatur antas, vilket är 8,5 bar = 850 000 Pa.

V =Volym i m^3 .

$$V = \frac{1,71 \cdot 10^6 \cdot 8,3145 \cdot 293}{8,5 \cdot 10^5} = 4901 m^3$$

Detta motsvarar en kub med sidan 17 m. Volymen minskar proportionellt mot ökat tryck, vilket därmed minskar sidan på volymen med exponenten 1/3. En tryckhöjning till exempelvis 200 bar minskar sidan på kuben till knappt 6 m.

Om gasturbinen istället används som "SBO-kraft stor" så ökar bränslebehovet (och därmed bränslets volym) med en faktor 10 (=20 MW/2 MW). 72 h är fortfarande en rimlig tid att dimensionera bränsle efter [80]. Denna volymökning med en faktor 10 ger en ökning av sidan på en kubformad tank till 37 m, alltså drygt det dubbla.

Ett annat sätt att minska gasvolymen är att förvara den i flytande form, LNG (Liquified Natural Gas), detta bedöms dock som allt för komplicerat och kostsamt på grund av behovet att kyla gasen till -160°C .

Slutsatsen är att det behövs antingen mycket stora bränsletankar eller mycket högt tryck för att kunna förvara tillräcklig mängd naturgas vid gasturbinen. Därmed förespråkas användande av flytande bränsle vilket ger samma storleksordning på erforderliga tankar som för dieselgeneratorer, se avsnitt 3.1.2.

3.2.3 Maximal drifttid

Exempelvis Siemens gasturbiner följer ett serviceschema där service av olika omfattning sker vid bestämda tidpunkter. Skalan som servicetillfällena anges i är antalet ekvivalenta drifttimmar som aggregatet gått. De ekvivalenta drifttimmarna tar exempelvis hänsyn till bränsletyp, antal starter och hur abrupta starter som genomförs. Det minsta intervallet mellan servicetillfällen är 10 000 ekvivalenta drifttimmar, vilket gott och väl överstiger 30 dygn, även om aggregatet startas snabbt, lasten är varierande och bränslet är av en ofördelaktig typ. [32]

Servicescheman för fler fabrikat har inte undersökts då detta räcker för att visa att gasturbiner inte har några principiella hinder för att drivas

kontinuerligt under långa perioder. Hur lång drifttid som krävs får kravställas i varje specifik tillämpning.

3.2.4 Dynamiskt beteende

Frekvensreglering

Som för samtliga beskrivna växelspanningskällor regleras effekten från gasturbinen av en frekvensregulator när den agerar i ö-drift. Ö-drift är den normala drifttillämpningen vid nödelförsörjning. I regel finns även möjlighet att reglera effekten mot en viss nivå, vilket tillämpas när gasturbinen är inkopplad mot yttre nät för provning.

Gasturbiner reglerar effekten via turbinens bränsleventiler. Vid en stegändring på regulatorns utsignal (pådragets börvärde) öppnas först bränsleventiler med en viss tidskonstant, därefter ökar effekten i förbränningskamrarna vilket i sin tur driver på turbinen som då ökar effekten. Gasturbiner kan antingen ha en lös kompressor för att komprimera förbränningsluften eller en kompressor som sitter på samma axel som turbinen.

Vid en motorpålastning kommer effekt momentant att börja tas från gasturbinen. Eftersom det tar en viss tid för turbinen att öka avgiven effekt tas effekten istället från den energi som lagras i turbinens och generatorns roterande massor (svängmassor), även andra roterande laster i samma elnät bidrar här med energi. På grund av detta effekttuttag sänks frekvensen i nätet, vilket är den signal som ger upphov till påkallad ökning av effekt via frekvensregulatorn.

Solvina har provat ett flertal gasturbiner i Sverige med avseende på ö-driftförmåga, däribland gasturbinerna i Gunnarsbo utanför Forsmark, Lahall utanför Ringhals, Helsingborg, Uppsala, Kimstad och Stallbacka. De klarar samtliga att reglera i ö-drift, men skiljer sig åt gällande hur stora pålastningar som kan göras. Aggregatet med bäst prestanda i det avseendet klarar belastningsökningar runt 25 % av märkeffekt utan att frekvensen sjunker mer än 2 Hz.

I regel kan gasturbiner gå vid dellast utan problem, på vissa av de gasturbiner Solvina har provat har dock en viss ryckighet i frekvensregleringen noterats vid specifika effektnivåer där avtappningsventiler öppnar/stänger. Det bör därför säkerställas i kravställningen att en gasturbin är stabil och inte slits onödigt fort vid de effektnivåer som är aktuella för en specifik installation.

Spänningsreglering

Gasturbiner för kraftgenerering använder precis som dieselgeneratorer uteslutande synkrongeneratorer för elgenerering.

Spänningsreglering och magnetiseringsutrustning fungerar likadant på en gasturbin som på en dieselgenerator, se avsnitt 3.1.4.

Hur stora på- respektive avlastningar som spänningsregleringssystemet kan hantera skiljer sig stort mellan olika gasturbiner. Detta kravställs vid respektive installation. Inga principiella hinder ses för stabil spänningsreglering även vid stora strömsteg.

3.2.5 Starttid

Gasturbinerna på OKG förser objekt som får ha spänningsbortfall på 2,5 min, vilket innebär att dessa måste kunna starta snabbare, ca 2 min.

De största tillverkarna, Siemens [27], GE [28] och Alstom [29], anger inga starttider under 10 minuter. Enligt [36] är typiska starttider för gasturbiner framtagna för industriellt bruk (frame gas turbines alt. heavy duty gas turbines) 10-15 minuter. För gasturbiner från början framtagna som flygplansmotorer (aeroderivative gas turbines) är starttiden ca 10 minuter. Dessa värden gäller bara för gasturbiner som inte omhändertar värmen i avgaserna (single cycle gas turbines alt. open cycle gas turbines), de som även utnyttjar värmen i avgaserna (combined cycle gas turbines) har enligt [36] betydligt längre starttid.

Givet ovanstående verkar det uteslutet att gasturbiner ska kunna uppfylla acceptanskriteriet för att agera säkerhetsklassad växelspanningskälla, vilket är start inom 20 sekunder. Däremot kan de agera SBO-kraft.

3.2.6 Realiserbarhet inom respektive utanför skyddat område

Ifall flytande bränsle används upptar bränslet lika stor plats som för dieselgeneratorer. Själva gasturbinen är för en given effektstorlek i regel mindre än motsvarande dieselgenerator. Till exempel väger GE's gasturbin PGT16 ca 19 ton [28], fullt jämförbart med dieselgeneratorerna i avsnitt 3.1.12, men då har den en effekt på drygt 14 MW, en faktor 5-7 högre än givna dieselgeneratorer.

Givet detta bedöms det som fullt rimligt att installera gasturbiner inne på skyddat områden. Även gasturbiner i applikationen SBO-kraft är rimliga att få plats med inne på skyddade området.

Utanför skyddade området är gasturbiner realiserbara så gott som var som helst. Problemet vid en sådan installation blir som för samtliga andra kraftslag svårigheten att upprätthålla fysiskt skydd av ledningen till aktuellt kärnkraftverk.

3.2.7 Tillgänglighet och tillförlitlighet

Otillgänglighet

I T-boken anges sannolikheten för utebliven start som $\lambda_s = \text{"felintensitet under standby"}$ och sannolikheten för obefogat stopp $\lambda_d = \text{"felintensitet under drift"}$. Genom att addera dessa båda sannolikheter fås en summerad sannolikhet för avbrott (anges per timma).

För gasturbiner gäller att $\lambda_s = 3,7E-5$ / timme och $\lambda_d = 6,9E-3$ / timme.

Otillgänglighet beräknas med data från GADS som (*"Forced outage hours" + "Maintenance outages"*) / (*"Total available hours"*). Data från den senaste 5-årsperioden (2007-2011) ger en otillgänglighet på $9,65E-2$ / timme. Att detta värde anger en större sannolikhet för fel jämfört med T-bokens värden kan förklaras med skillnader i underlaget för data. GADS baseras på ett stort antal kraftverk (framför allt amerikanska) av olika kvalitet och övervägande med

mycket större belastning jämfört med T-bokens data som baseras uteslutande på data från reservkraft installerad på kärnkraftverk i Sverige och Finland.

Otillförlitlighet

Otillförlitlighet anges i T-boken som sannolikheten för utebliven start som $q_0 = \text{"sannolikheten för behovsrelaterade fel per behov"}$ vilket oftast är det samma som $\text{"sannolikheten för behovsrelaterade fel vid test"}$). För gasturbiner anges $q_0 = 1,8E-3/\text{behov}$.

Otillförlitlighet beräknas med data från GADS som ($\text{"Attempted unit starts"}$ – $\text{Actual unit starts}$)/ $\text{"Attempted unit starts"}$. Med data från den senaste 5-årsperioden (2007-2011) fås en tillförlitlighet på $5,8E-2$ /startförsök.

3.2.8 Möjlighet till säkerhetsklassning

Gasturbiner är ett högst konventionellt kraftslag i reservkraftsammanhang och har därmed som kraftslag gott om drifterfarenhet. Som för all annan utrustning så finns det en risk att tillverkarna med mest total drifterfarenhet är ovilliga att genomgå en säkerhetsklassningsprocess då de har lätt att få avsättning för sina produkter på annat håll.

På OKG finns redan idag säkerhetsklassade gasturbiner.

3.2.9 Känslighet för yttre händelser

Resonemangen för gasturbiners känslighet för yttre händelser är desamma som för dieselgeneratorer med ett undantag; det finns ej seismiskt kvalificerade gasturbiner på de svenska kärnkraftverken idag. Det finns dock seismiskt kvalificerade gasturbiner att köpa på marknaden, exempelvis har Mitsubishi Nuclear Energy Systems seismiskt kvalificerade gasturbiner i sitt standardsortiment [32].

3.2.10 Tillkommande vedervågningsrisker

Gasturbiner har i stort sett samma tillkommande vedervågningsrisker som dieselgeneratorer. Endast det som skiljer tas upp här.

Explosioner

Om naturgas används som bränsle föreligger explosionsrisk. Beroende på hur högt tryck gasen lagras vid kan den potentiella skadeverkan från en sådan explosion vara mycket varierande. Då gas tar större plats än motsvarande energimängd med flytande bränsle vid rimliga trycknivåer så förutsätts flytande bränslen (ej LNG) användas, explosion är därmed inget problem.

Brandbelastning

Bränslet till en gasturbin, dieselolja eller fotogen om flytande bränsle används, utgör en stor tillkommande brandbelastning. Byggnaderna där gasturbiner och bränsletankar finns kan konstrueras med tillräckliga brandbarriärer för att brand vid en generator eller tank inte ska kunna påverka någon redundant enhet. I fall en gemensam bränsletank för flera redundant enheter används gäller här samma resonemang som för dieselgeneratorer, se avsnitt 3.1.10.

Stora roterande massor

Turbinen, kompressorn, generatorns rotor och en eventuell roterande matare utgör roterande massa i en gasturbin. Om kompressorn roterar fritt från turbinen utgör den en mindre roterande massa än turbinen med generatorrotor och eventuell matare. Gasturbiner arbetar vid ett högre varvtal än dieselgeneratorer, till exempel har Siemens gasturbiner varvtal mellan 3000 rpm och 17384 rpm [27] och GE's gasturbiner har varvtal mellan 3000 rpm och 11000 rpm [28]. Detta gäller dock bara turbinen och den eventuellt sammankopplade kompressorn, vid höga varvtal används växellåda för att få ett mer lämpligt varvtal för generatoren (750, 1500 eller 3000 rpm i 50 Hz-system).

De turbiner Solvina har testat har samtliga haft en svängmassekonstant (H) kring 2 s. Svängmasskonstanten är svängmassan relaterad till aggregatets skenbara effekt enligt

$$H = \frac{I \cdot \omega^2}{2 \cdot VA_{base}} = \frac{E_k}{VA_{base}} \Rightarrow E_k = H \cdot VA_{base}$$

där

VA_{base} är aggregatets skenbara effekt

H är svängmassekonstanten

Liksom i tidigare avsnitt är I svängmassan, ω vinkelhastigheten och E_k energin i en roterande massa.

Detta ger en kinetisk energi i den roterande massan på ungefär 50 MJ för ett aggregat som agerar "SBO-kraft stor" (ca 25 MVA) och 5 MJ för ett aggregat som agerar säkerhetsklassad växelspanningskälla (ca 2,5 MVA).

På grund av gasturbiners stora utbredning och frånvaron av stora olyckor förutsätts turbinens inneslutning kunna göras tillräckligt stabil för att hålla den roterande massan på plats vid ett haveri. Dock bör det verifieras att eventuella missiler inte vedervågar redundanta enheter.

Farliga ämnen

De farliga ämnen som identifierats kring en gasturbin är bränsle och avgaser, bränslet antas vara flytande, exempelvis dieselolja eller fotogen.

Vid större läckage av bränsle kan ett område bli tillfälligt ej beträdbart på grund av brandrisk och ångor, detta medför att den aktuella gasturbinen betraktas som icke driftklar. Läckaget kan dock relativt enkelt begränsas till utrymmen i byggnaden så att utsläpp till mark och vedervågning av redundanta enheter undviks.

Vid läckage av avgaser internt i gasturbinens byggnad bedöms utrymmet bli ej beträdbart och gasturbinen icke driftklar. Ventilationssystem kan dock enkelt byggas med sådan separation att avgaserna inte riskerar att göra

utrymmen med redundanta enheter icke driftklara. Läckage av avgaser utanför byggnaden bedöms påverka atmosfären marginellt och inte påverka möjligheten att vistas runt byggnaden.

Elektriska transienter

Användning av kraftelektronik, till exempel i statiska matare eller likriktare till batterier dedikerade till gasturbinen, kan orsaka försämrade elkvalité men bedöms inte hindra säker drift av elsystemet. Kraftelektronik används i stor utsträckning på kärnkraftverk idag, i motordrifter, UPS'er och DC-system.

I övrigt orsakar gasturbiner inga särskilda transienter vid normal drift.

3.2.11 Underhålls- och DKV-aspekter

De tester som rekommenderas av tillverkaren är att testa en riktig snabbstart om detta är vad som avses göras. Det finns fel som kan uppstå som är kopplade till uppstartssättet som inte skulle uppträda vid en långsammare start. Normalt testas gasturbinen genom att den startas och tiden till full effekt loggas. En tid som överstiger tidigare uppmätt tid är en indikation på att något inte fungerar som det ska. [16]

Förutom det förebyggande underhåll som föreskrivs i [32] så föreskriver Siemens även dagliga kontroller av instrument och visuella kontroller efter läckage etcetera under drift. Detta krav borde kunna relaxeras när aggregatet står i stand by-läge. Förutom test av snabbstart bör det även testas att aggregatet kan leverera specifierad effekt med jämna mellanrum. Precis som dieselgeneratorer bör gasturbiner krävas så att frekvensregleringen kan reglera mot en manuellt inställd effektnivå, på det viset kan avgiven effekt enkelt provas med aggregatet inkopplat till yttre nät.

3.2.12 Mobilitet

Exempelvis Kawasaki Heavy Industries erbjuder färdiga mobila gasturbinaggregat upp till 3,2 MW elektrisk effekt [34], vilket är tillräckligt för att agera som "SBO-kraft mobil". Detta inkluderar dock inte bränslet, så för att kunna drivas vid fullast i 72 timmar krävs en separat lösning för bränslet.

3.2.13 Investerings- och driftkostnader

Enligt [35], som samlar in data från en stor mängd amerikanska kraftverksinvesteringar, är investeringskostnaden för ett nominellt gasturbinkraftverk på 85 MW \$973/kW vilket motsvarar 6363 kr/kW, detta är enbart kostnad för själva utrustningen. För mindre gasturbiner är kostnaderna något högre. Underhållskostnaderna för samma kraftverk uppges vara \$7,34/kW·år + \$15,45/MWh (fast + rörlig D&U-kostnad), vilket motsvarar 48 kr/kW·år + 101 kr/MWh.

3.2.14 Sammanställning

Gasturbiners lämplighet i olika applikationer ses i Tabell 3. Gasturbiner är lämpliga att implementera som flera redundanta enheter.

Tabell 3. Gasturbiners lämplighet

Gasturbiner			
Applikation	Lämplig	Lämplig under särskilda förutsättningar	Olämplig
Säkerhetsklassad växelspanningskälla			X ¹
Säkerhetsklassad likspänningskälla			X ¹
SBO-kraft liten	X		
SBO-kraft stor	X		
SBO-kraft mobil		X ²	

¹) Olämplig på grund av starttid > 20 s, se avsnitt 3.2.5.

²) Lämplig förutsatt att mindre än 72 timmars bränsle accepteras alternativt att separat lösning för bränsle tillhandahålls.

3.3 Ångturbin intern

Kraftslag "ångturbin intern" avser en ångturbin som försörjs med ånga från kärnkraftverkets egen ångproduktion. Husturbindrift skulle i någon mån kunna falla under det här begreppet, men eftersom kärnkraftverkens huvudturbiner ej är säkerhetsklassade och eftersom husturbinövergång inte kan garanteras så avses här en annan turbin. Denna turbin installeras enklast med ångförsörjning från huvudångledningarna på insidan om skalventilerna. Den kommer att vara beroende av säkerklassad likspänningskälla för att manövrera ventiler och driva styrsystem. Därtill kommer den bara att fungera när ånga produceras i reaktor/ånggeneratorn. Ett mer detaljerat implementeringsförslag ses i avsnitt 4.1.

3.3.1 Effekttillgång

Effekttillgången bedöms översiktligt genom uppskattning av resteffekten och verkningsgraden hos en ångturbin. Eftersom yttre nät måste falla bort och husturbinövergång misslyckas för att det säkerhetsklassade växelspanningsnätet ska bli spänningslöst och reservkraft påkallas bedöms enbart effekttillgången i ett scenario där reaktorns styrsavar är inskjutna och huvudturbinen/-turbinerna ej är i drift.

Resteffekten hos en lättvattenreaktor beror på under hur lång tid reaktor drivits samt hur lång tid som gått sedan reaktor stoppades. Omedelbart efter reaktorstopp är den ca 5-7 % av nominell effekt, efter 1 timme har den sjunkit till ca 1 % av nominell effekt och efter en månad är den drygt 0,1 % av nominell effekt. För ett kärnkraftblock med termisk effekt på 3000 MW så innebär det alltså en termisk effekt på 30 MW efter en timme och ca 4 MW efter en månad. Resteffekten beror förutom ursprunglig effekt även på hur lång tid härden körts, eftersom längre drifttid ger mer radioaktiva klyvningsprodukter[38].

Ångturbinerna på de svenska kärnkraftverken har verkningsgrader på ca 35 %. För konservatism ansätts en verkningsgrad på 25 % för en liten turbin.

Det skulle i så fall vid fullständigt utnyttjande av resteffekten ge en tillgänglig effekt på 7,5 MW en timme efter den inledande händelsen och ca 1 MW en månad efter den inledande händelsen. Från början är effekten alltså med råge tillräcklig för att agera säkerhetsklassad växelspanningskälla, dock inte tillräckligt för "SBO-kraft stor". Efter en månad är effekten däremot starkt begränsad. Om den är tillräcklig för att agera säkerhetsklassad växelspanningskälla beror på hur lasterna utvecklas under tiden efter den inledande händelsen.

För PWR-block måste ångledningar från samtliga ånggeneratorer tappas på ånga för att all resteffekt ska vara tillgänglig. För BWR-block räcker det att en av huvudångledningarna ansluts till turbinen för att all resteffekt ska kunna användas.

För PWR-block finns ånga tillgänglig ned till och med drifttillstånd 3. När reaktorkylmedlet kylts av tillräckligt (medeltemperatur under 177°C) övergår stationen till drifttillstånd 4 och resteffektkylningen går över till RH-pumparna som kyler primärsystemet direkt, därmed produceras ej längre ånga i ånggeneratorerna. Efter nätbortfall och turbintripp nås drifttillstånd 4 efter i storleksordningen 6 timmar [37].

För BWR-block erhålls efter nätbortfall och misslyckad husturbinövergång turbintripp med dumpförbud vilket leder till reaktorsnabbstopp. Efter det produceras ånga i reaktortanken. Ångtrycket begränsas till normalt drifttryck eller strax därunder, vid övertryck blåses ånga till antingen inneslutningen ovan mellanbjälklaget eller via rör direkt ner i kondensationsbassängen. Vattennivån i reaktorn hålls konstant av hjälpmatarvattensystem och spädmatarvattensystem. Efterhand som kylningen fortgår och resteffekten minskar kommer tryck och temperatur att minska i reaktortanken. Ångturbinen bör därför vara anpassad för drift vid ett brett spektrum av olika ångtryck.

Vid rörbrott i av från reaktortanken trycksatta system kan trycket till stor del försvinna, i en sådan situation minskar kraftigt den för ångturbinen tillgängliga effekten. Detta gör ångturbinen dåligt lämpad som en av de ordinarie säkerhetsklassade växelspanningskällorna, den kan dock ändå ha en plats som "SBO-kraft liten".

Det är även viktigt att påpeka att när reaktorn är kallt avställd, finns ingen effekt tillgänglig i den interna ångturbinen. Den övergripande designen av anläggningen måste därmed tillåta att en av växelspanningskällorna är otillgänglig under detta förhållande.

3.3.2 Energitillgång/-täthet

Energitillgången i form av kärnbränslets resteffekt finns per automatik tillgänglig i stationen. Begränsningen i det här fallet är den efter hand sjunkande tillgängliga effekten, se avsnitt 3.3.1.

3.3.3 Maximal drifttid

Enligt resonemang i avsnitt 3.3.1 så kommer ångproduktionen i ett PWR-block enbart att upprätthållas i storleksordningen 6 timmar efter turbintripp.

I ett BWR-block bedöms maximal drifttid begränsas av när den tillgängliga effekten blir mindre än den konsumerade effekten. Eftersom den elektriska belastningen består både av laster som är beroende av tiden efter reaktorstopp och laster som inte är det kommer belastningen vid någon tidpunkt att plana ut. Detsamma gäller inte för tillgänglig effekt eftersom resteffekten konstant fortsätter sjunka.

3.3.4 Dynamiskt beteende

Frekvensreglering

En ångturbin reglerar i ö-drift utmatad aktiv effekt utifrån uppmätt frekvens. Regulatoren är likvärdig de som används i dieselgeneratorer och gasturbiner. Regulatorens utsignal styr turbinens pådrag vilket är en inloppsventil på inkommande ångledning. Givet att turbinen implementeras i en BWR (PWR olämpligt enligt avsnitt 3.3.1) så kommer utloppet från turbinen att ledas vidare till kondensationsbassängen / wet-well. Trycket på utloppssidan behöver ej regleras utan blir samma som trycket i kondensationsbassängen undantaget tryckförändringar i ledningen dit.

Spänningsreglering

Ångturbiner använder precis som gasturbiner och dieselgeneratorer synkrongeneratorer för elgenerering.

Spänningsreglering och magnetiseringsutrustning fungerar likadant på en ångturbin som på en gasturbin eller dieselgenerator, se avsnitt 3.1.4.

Hur stora på- respektive avlastningar som spänningsregleringssystemet kan hantera skiljer sig stort mellan olika ångturbininstallationer. Detta kravställs vid respektive installation. Inga principiella hinder ses för stabil spänningsreglering även vid stora strömsteg.

3.3.5 Starttid

För att starta ångturbinen behöver erforderliga ångventiler öppnas, luft behöver evakueras ur ångledningen och turbinen behöver rullas upp. Ångventiler kan ha mycket varierande gångtid beroende på användningsområde, men ett fåtal sekunder är rimligt. Även tiden för evakuering av luft ur ångledningen kan antas vara någon enstaka sekund, för den turbindrivna pumpen på en svensk BWR-anläggning anges den till ca 5 sekunder. För upprullningstid kan antas att nominellt ångflöde ger konstant vridmoment under upprullningen, d.v.s. att den avgivna mekaniska effekten kommer öka proportionellt mot varvtalet. Vid en antagen svängmassekonstant $H=4$ (typiskt 2,5-6,0 enligt [49]) för ett aggregat på 2 MW / 2,5 MVA är svängmassan ca 200 kgm² vilket ger en upprullningstid på ca 10 sekunder via förhållandet

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T}{J}$$

där ω betecknar den mekaniska vinkelhastigheten, T det accelererande momentet och J svängmassan. Här har även antagits att turbinen direktdriver generatoren med varvtalet 3000 rpm ($\omega=100\pi$ rad/s).

Teoretiskt är starttiden för en ångturbin alltså 10-20 sekunder om ingen långsam uppvärmning och/eller upprullning krävs.

Ångturbiner för kontinuerlig kraftproduktion har dock normalt mycket lång starttid på grund av att de måste värmas långsamt för att inte orsakas onödigt slitage. Ångturbiner för stand-by-drift bör till största del kunna undantas sådana hänsyn på grund av sin korta totala drifttid under sin livstid. Till exempel har en ångturbindriven pump på en svensk BWR-anläggning krav på sig att pumpa vatten in till reaktorn inom 90 s.

Starttiden kan eventuellt nå under 20 sekunder om en robust design används, så att turbinen snabbt kan gå från inget till fullt ångflöde utan oacceptabelt slitage.

3.3.6 Realiserbarhet inom respektive utanför skyddat område

På grund av att ångturbinen tappar ånga från huvudprocessen måste turbinen realiseras i eller strax utanför reaktorinneslutningen. Exempelvis Siemens tillhandahåller set med ångturbin och generator i lagom storlek. Deras SST-060 som kan hantera effekter upp till 6 MW har totala mått på 2,5·2,5·1,5 m för hela setet [27]. Utöver själva aggregatet tillkommer rörledningar, ventiler och ledningar till ställverksrum.

På grund av sin närhet till reaktorinneslutningen ökar risken för att rumsmiljön som aggregatet måste klara är avsevärt mycket svårare än den för aggregat placerade mer perifert i anläggningen. Det finns dock redan mycket elektrisk utrustning, främst pumpar, i samma typ av utrymmen som kan tänkas användas till en ångturbin. Eftersom de är kvalificerade för att tåla sin miljö ses inga principiella hinder för att en ångturbin skulle klara detsamma.

3.3.7 Tillgänglighet och tillförlitlighet

Otillgänglighet för ångturbiner beräknas med data från GADS. Eftersom felkällor inom respektive kraftkälla inte anges får statistiken för hela termiska kraftverk användas. Detta gör angivna värden konservativa då de även innehåller fel i panna, ångreglering och bränslesystem, fel som inte är applicerbara på aktuell ångturbin.

Otillgänglighet

Otillgänglighet för ångturbiner beräknas med data från GADS som ("*Forced outage hours*" + "*Maintenance outages*") / ("*Total available hours*"). Data från den senaste 5-årsperioden (2007-2011) ger en otillgänglighet på 9,56E-2 /timme.

Otillförlitlighet

Otillförlitlighet beräknas med data från GADS som ("*Attempted unit starts*" – "*Actual unit starts*") / "*Attempted unit starts*". Med data från den senaste 5-årsperioden (2007-2011) fås en otillförlitlighet på 2,0E-2 /startförsök.

3.3.8 Möjlighet till säkerhetsklassning

Ångturbiner, liksom synkrogeneratorer, har mycket drifterfarenhet och kan ur det hänseendet säkerhetsklassas. Förutsättningen är att de enskilda fabrikaten och produkterna har tillräckligt med drifterfarenhet och att tillverkaren vill underkasta sig en klassningsprocedur, vilket mycket väl kan vara den trånga sektorn. Inga principiella hinder för säkerhetsklassning ses dock.

3.3.9 Känslighet för yttre händelser

Mekanisk påverkan

Ångturbinen installeras troligtvis i reaktorbyggnad utanför reaktorinneslutning alternativt i intilliggande byggnad. Aktuella byggnader förutsätts tåla dimensionerande mekanisk påverkan från yttre händelser.

Vid mekanisk påverkan utöver dimensionerande värden beror konsekvenserna på hur långt över dimensionerande värden påverkan är, säkerhetsfaktorer i konstruktionen samt hur lokal påverkan är. Till exempel verkar missiler enbart lokalt, medan exempelvis jordbävning verkar på samtliga installerade ångturbiner på området samtidigt.

Påverkan av vatten

De elektriska komponenterna tillhörandes turbinen tål inte vatten. Placering av turbinen bör därför göras så att översvämningar ej kan uppträda.

Vid vattenrelaterade yttre händelser utöver dimensionerande värden kan översvämningar uppträda åtminstone upp till markplan. Ju högre över markplan turbinen placeras, desto säkrare är den från översvämningar orsakad av yttre händelser. Även översvämningar orsakad av inre händelser behöver beaktas, genom miljökvalificering.

Igensättning av galler och spjäll

Ångturbinen kräver ingen förbränningsluft och producerar inga avgaser. Kylningen av maskinen, vilken troligast åstadkoms genom cirkulation av färskvatten från lämpligt färskvattensystem samt eventuellt ett annat kylmedium i själva maskinen, kan falla genom igensättning av värmeväxlare eller ledningar. Detta är dock att betrakta som enkelfel och ingår i den normala otillgängligheten. HVAC-komponenter på utsidan av byggnaderna kan sättas igen av is och snö, exempelvis kylbord. För att erhålla så stora diversifieringsvinster som möjligt med ångturbinen bör den inte vara beroende av HVAC-komponenter för sin drift, då dessa delar CCF-modet med exempelvis dieselgeneratorer och gasturbiner. Maskinen bör därmed konstrueras för att tåla den omgivande temperatur som uppstår utan rumskylning.

Missiler kan sätta igen luftintag eller skorstenar, antingen genom lätta skrymmande missiler som byggskivor eller genom tunga missiler som bilar. Missiler drabbar dock lokalt och bedöms inte kunna slå ut flera redundanta ångturbiner.

Vid igsättande händelser utöver dimensionerande värden drabbar missiler fortfarande bara lokalt, däremot kan snö eller isstormar utöver dimensionerande värden sätta igen luftintagen för flera redundanta ångturbiner.

Temperatur

Hög utomhustemperatur påverkar HVAC-systemets förmåga att hålla rätt inomhustemperatur, men eftersom turbinen bör klara sig helt utan rumskylning är utomhustemperaturen av mindre vikt.

Likaså låg temperatur påverkar turbinen marginellt. Värmning av turbinens utrymme kan enkelt dimensioneras efter dimensionerande utomhustemperatur. Vid bortfall av HVAC-systemet riskeras främst hög temperatur på grund av närheten till de olika varma processsystemen.

3.3.10 Tillkommande vedervågningsrisker

Explosioner

Inga explosionsfarliga ämnen används i en ångturbin.

Brandbelastning

Inga stora brandbelastningar tillkommer till följd av turbinen, dock mindre mängder smörjolja i turbin och generator.

Stora roterande massor

Turbinen, generatorns rotor och en eventuell roterande matare utgör roterande massa i en ångturbin. Här förutsätts en turbin användas som direktdriver generatorn vid varvtalet 3000 rpm.

Enligt [49] har ångturbiner en svängmassekonstant mellan 2,5 och 6,0. Antaget att $H=4$ fås den roterande energin enligt:

$$H = \frac{I \cdot \omega^2}{2 \cdot VA_{base}} = \frac{E_k}{VA_{base}} \Rightarrow E_k = H \cdot VA_{base}$$

där

VA_{base} är aggregatets skenbara effekt, H är svängmassekonstanten, I är svängmassan, ω vinkelhastigheten och E_k energin i en roterande massa. Detta ger en kinetisk energi i den roterande massan på ungefär 10 MJ för ett aggregat som agerar "SBO-kraft liten" (ca 2,5 MVA).

På grund av ångturbiners stora utbredning och frånvaron av stora olyckor förutsätts turbinens inneslutning kunna göras tillräckligt stabil för att hålla den roterande massan på plats vid ett haveri. Det bör verifieras att eventuella missiler inte vedervågar redundanta enheter, men detta bedöms vara ett litet problem då ångturbinen inte är belägen i anslutning till exempelvis dieselgeneratorer eller gasturbiner.

Farliga ämnen

Det farliga ämne som identifierats är den radioaktiva ånga som driver turbinen (BWR-applikation förutsätts). Vid ångläckage kring turbinen blir aktuellt utrymme obeträdbart. Med hänsyn till de översiktliga beräkningarna i avsnitt 3.3.1 bedöms enbart en turbin kunna installeras vid aktuella effektnivåer för säkerhetsklassad växelspänningskälla, detta gör att inga redundanta enheter finns som riskerar att slås ut vid ångläckage.

Elektriska transienter

Användning av kraftelektronik, till exempel i statiska matare eller likriktare till batterier dedikerade till ångturbinen, kan orsaka försämrade elkvalité men bedöms inte hindra säker drift av elsystemet. Kraftelektronik används i stor utsträckning på kärnkraftverk idag, i motordrifter, UPS'er och DC-system.

I övrigt orsakar ångturbinen inga särskilda transienter vid normal drift.

3.3.11 Underhålls- och DKV-aspekter

Enligt [40] är det underhåll och de kontroller som behöver göras ofta på ångturbiner väldigt likt oavsett fabrikat och storlek, det handlar om kontroll av oljenivåer och motionering av stillastående ventiler. Kontroll av oljenivåer och motionering av stillastående ventiler kan till stor del göras under drift. Det som kan utgöra en begränsning är motionering av avstängningsventiler och skalventiler på in- och utloppet i de fall de inte är samma som pådragsventilen. Detta får i aktuella fall stämmas av med tillverkaren så att tillräcklig oavbruten drifttid erhålls.

Test av ångturbinens maximala effekt kan ur elektriskt perspektiv utföras mot yttre nät likt hur dieselgeneratorer testas idag. Beteendet under pålastningssekvenser testas med fördel skarpt åtminstone vid installation, men är inte lasterna tillgängliga vid sin dimensionerande driftpunkt kan pålastningssekvenser verifieras via simuleringar.

För att testa ångturbinen behöver driften medge att ånga tappas från huvudångledningen.

3.3.12 Mobilitet

På grund av ångturbinens applikation integrerad i huvudångsystemet är det inte aktuellt att göra den mobil.

3.3.13 Investerings- och driftkostnader

EPA anger i [41] att investeringskostnaderna för en 3 MW ångturbin 2008 i genomsnitt är

- \$834 000 (5,45 MSEK) för utrustningen (turbin, generator, växellåda, ställverk och kontrollutrustning)
- \$1 425 000 (9,32 MSEK) för turbinen färdiginstallerad, alltså inkluderat projektkostnader

3.3.14 Sammanställning

Intern ångturbins lämplighet i olika applikationer ses i Tabell 4. Intern ångturbin är endast lämplig att installera som en enskild enhet på grund av begränsad effekttillgång, se avsnitt 3.3.1.

Tabell 4. Intern ångturbins lämplighet

Ångturbin intern			
Applikation	Lämplig	Lämplig under särskilda förutsättningar	Olämplig
Säkerhetsklassad växelspänningskälla			X ¹
Säkerhetsklassad likspänningskälla			X ²
SBO-kraft liten		X ³	
SBO-kraft stor			X ⁴
SBO-kraft mobil			X ⁵

1) Olämplig då effekttillgången vid rörbrott i primärsystemet begränsas, se avsnitt 3.3.1.

2) Olämplig på grund av starttid > 0, se avsnitt 3.2.5.

3) Lämplig om tillräcklig effekttillgång kan verifieras, se avsnitt 3.3.1

4) Olämplig på grund av otillräcklig effekttillgång, se avsnitt 3.3.1

5) Olämpligt kraftslag att göra mobilt, se avsnitt 3.3.12.

3.4 Ångturbin extern

Med "ångturbin extern" avses ett termiskt kraftverk installerat någonstans i närheten av kärnkraftverket som kontinuerligt producerar el till det nationella elsystemet, men har snabbomkopplingssystem för att kunna kopplas bort från det yttre nätet och istället börja försörja de interna lasterna på ett kärnkraftverk. Fördelarna med detta är att kraftverket, förutom den utrustning som är dedikerad till att försörja kärnkraftverket, kan bära sina egna kostnader samt att turbinen alltid är i drift, åtminstone under kärnkraftverkets driftsäsong, så att ingen upprullningstid behövs.

Det finns även ett antal problem med detta koncept. Till exempel kan kraftverksägaren vid tidpunkter med lågt elpris eller låg avsättning för värme vilja stänga av kraftvärmeverket. Då måste de kompenseras för kostnaderna för att hålla det igång på åtminstone delast. Är värmeavsättningen väldigt låg under vissa perioder behövs dessutom kylutrustning så att kraftvärmeverket kan fungera som kondenskraftverk. Om kraftvärmeverket är större än vad som motiveras av kärnkraftverkets behov kommer överkoppling till nödelförsörjning av kärnkraftverket även medföra minskad värmeproduktion vilket kan påverka fjärrvärmekunderna negativt.

3.4.1 Effekttillgång

Ångturbiner finns i effektstorlekar som väl täcker in alla här undersökta applikationer, från <200 kW till >20 MW.

Begränsande för implementeringen blir kommersiella hänsyn, det ska i aktuellt kärnkraftverks närhet vara attraktivt att investera i ett termiskt kraftverk. De termiska kraftverk (förutom kärnkraftverk) som byggs i Sverige är uteslutande kraftvärmeverk, de producerar alltså både el och värme, detta för att kunna tillgodogöra sig så mycket som möjligt av energin i bränslet. För att kunna bygga ett termiskt kraftvärmeverk behöver det finnas avsättning för värmen i form av bostäder eller industri i behov av uppvärmning.

Det byggs för närvarande kraftvärmeverk i både Varberg och Oskarshamn, vardera om ca 20-30 MWt. Det i Varberg är enbart tänkt som spetsproduktion när spillvärmen från Södra Cell Värö inte räcker till för att värma fjärrvärmenätet. Kraftvärmeverket i Oskarshamn är tänkt att kunna försörja hela fjärrvärmenätet och kommer ha en elektrisk effekt på 8 MW. Om kraftverket i Oskarshamn ses som typisk och tätorten Oskarshamn har ca 17 000 invånare behövs drygt 4 000 invånare i ett samhälle för att få värmeavsättning för ett kraftvärmeverk med 2 MW elektrisk effekt och på motsvarande sätt ca 40 000 invånare för ett kraftverk med 20 MW elektrisk effekt. Inom 3 mil från de svenska kärnkraftverken finns inga orter med mer än 40 000 invånare, men ett antal med mer än 4 000 invånare:

Kring Forsmark: Östhammar

Kring OKG: Oskarshamn

Kring Ringhals: Varberg, Kungsbacka, Onsala

3.4.2 Energitillgång/-täthet

Ett kommersiellt drivet kraftverk kommer att ha bränsletillförsel för kontinuerlig drift. Det är dock troligt att lagren på plats är relativt små för att hålla nere mängden bundet kapital. Här behöver det avtalas om att den som driver kraftverket ska ha minimumlager motsvarande vad som krävs för att driva kraftverket vid dimensionerande last i 72 h.

3.4.3 Maximal drifttid

Kommersiella termiska kraftverk byggs precis som kärnkraftverk för i det närmaste kontinuerlig drift. Kontinuerlig drift i mer än 30 dygn sker regelmässigt. Revisionsavställningar av kraftvärmeverket måste anpassas till kärnkraftverket.

3.4.4 Dynamiskt beteende

Frekvensreglering

En ångturbin reglerar i ö-drift utmatad aktiv effekt utifrån uppmätt frekvens. Regulatoren är likvärdig de som används i dieselgeneratorer och gasturbiner. Regulatorns utsignal styr turbinens pådrag vilket är en inloppsventil på inkommande ångledning. Hur stora objekt som kan startas beror mest på turbinens storlek, ju större turbin, desto större objekt kan startas. Däremot kommer turbiner betydligt större än behovet från kärnkraftverket troligtvis drivas mindre effektivt, detta är dock ett litet problem då bränsleekonomi är en lågt prioriterad fråga vid nödelförsörjning.

Spänningsreglering

Ångturbiner använder precis som gasturbiner och dieselgeneratorer synkrongeneratorer för elgenerering.

Spänningsreglering och magnetiseringsutrustning fungerar likadant på en ångturbin som på en gasturbin eller dieselgenerator, se avsnitt 3.1.4.

Hur stora på- respektive avlastningar som spänningsregleringssystemet kan hantera skiljer sig stort mellan olika ångturbininstallationer. Detta krävs vid respektive installation. Inga principiella hinder ses för stabil spänningsreglering även vid stora strömsteg.

3.4.5 Starttid

Konceptet innebär att ångturbinen redan producerar effekt ut på nätet, vid påkallat behov erhålls snabbomkoppling och anpassning av aktiv effekt. Snabbomkopplingen tar i storleksordningen ett par sekunder inkluderat lite tid för att känna av underspänning och bryttid för ett fåtal brytare som ska slå till/från i sekvens. Hur lång tid anpassningen av effekt tar beror på hur mycket effekt turbinen producerade innan påkallat behov och hur stor lasten på kärnkraftverket är, men ett fåtal sekunder är rimlig maximal gångtid för pådragsventilen. Detta behöver dock inte inkluderas i starttiden eftersom omkopplingen redan är gjord, mindre frekvensavvikelser är dock förväntade under sekunderna närmast efter snabbomkoppling.

Sammanfattningsvis innebär detta att ångturbinen har en "starttid" på 2-3 sekunder, vilket väl uppfyller kravet på säkerhetsklassad växelspanningskälla.

3.4.6 Realiserbarhet inom respektive utanför skyddat område

Konceptet förutsätter ett kommersiellt drivet kraftvärmeverk med bränsleförsörjningssystem, vilket gör det komplicerat att ha inne på skyddat område. Diversifieringsvinsterna består till stor del av att det inte ligger i omedelbar anslutning till kärnkraftverket.

3.4.7 Tillgänglighet och tillförlitlighet

Otillgänglighet för termiska kraftverk beräknas med data från GADS.

Otillgänglighet

Otillgänglighet för ångturbiner beräknas med data från GADS som ("*Forced outage hours*" + "*Maintenance outages*") / ("*Total available hours*"). Data från den senaste 5-årsperioden (2007-2011) ger en otillgänglighet på $9,56 \times 10^{-2}$ /timme. Dessa värden gäller hela det termiska kraftverket och alltså inte bara själva ångturbinen.

Otillförlitlighet

Otillförlitlighet för termiska kraftverk blir här irrelevant, eftersom det förutsätts vara i drift kontinuerligt under kärnkraftverkets driftsäsong. Otillförlitligheten kommer istället från risken för turbintripp vid anpassning av magnetisering och aktiv effekt efter snabbomkopplingen. Risken för det blir högst individuell, men bedöms som låg om överkoppling kan ske med goda marginaler från det värsta produktions- och lastläget.

3.4.8 Möjlighet till säkerhetsklassning

Stora svårigheter med att säkerhetsklassa detta koncept föreligger då det är ett komplett kraftverk som ligger utanför skyddade området. För att kunna göra det borde åtminstone likvärdigt fysiskt skydd finnas på kraftverket som på själva kärnkraftverket. Även ledningen mellan de två kraftverken behöver skyddas. Därtill behöver kraftverket i aktuell uppsättning ha lång drifterfarenhet, alla komponenter behöver vara seismiskt kvalificerade och leverantören måste underkasta sig en kvalificeringsprocess.

3.4.9 Känslighet för yttre händelser

Mekanisk påverkan

Hela det termiska kraftverket installeras i byggnadskomplex utanför kärnkraftverkets skyddade område. Dessa byggnader förutsätts kunna tåla dimensionerande mekanisk påverkan från yttre händelser. Det är viktigt att hela konstruktionen skyddas från yttre händelser, alltså även transformatorer, ställverk, ledningar, bränslelager etc.

Vid mekanisk påverkan utöver dimensionerande värden beror konsekvenserna på hur långt över dimensionerande värden påverkan är och säkerhetsfaktorer i konstruktionen. Då enbart en sådan här enhet förutsätts byggas på grund av bristande värmeavsättning för flera så kan inte CCF uppträda på olika termiska kraftverk, däremot kan CCF uppträda på det enda termiska kraftverket och de redundanta kraftkällorna inne på skyddade området. Här bedöms avståndet från skyddade området vara en stark diversifieringsvinst. Till exempel har effekterna av en jordbävning kraftigt avtagit ett par mil från epicentrum. För att kunna tillgodogöra sig den diversifieringsvinsten måste dock ställverken inne på kärnkraftverket klara jordbävningsmagnituder utöver de dimensionerande för att kunna tillgodogöra sig kraften från det termiska kraftverket som klarat jordbävningen.

Påverkan av vatten

Många komponenter i det termiska kraftverket tål inte vatten, det måste därför göras tåligt mot de dimensionerande värdena för regn och andra översvämningar som kärnkraftverket ska klara.

Vid vattenrelaterade yttre händelser utöver dimensionerande värden beror konsekvenserna på hur långt över dimensionerande värden påverkan är och säkerhetsfaktorer i konstruktionen. Även här bedöms avståndet från kärnkraftverket utgöra en diversifieringsvinst, åtminstone så länge det termiska kraftverket inte förläggs i anslutning till någon kust eller något vattendrag som även kärnkraftverket ligger i anslutning till. Översvämningar till följd av regn kan däremot drabba båda anläggningarna samtidigt.

Igensättning av galler och spjäll

Det externa termiska kraftverket kräver förbränningsluft och producerar avgaser. Kylningen av verket vilken troligast åstadkoms genom cirkulation av färskvatten från lämpligt färskvattensystem samt eventuellt ett annat kylmedium i maskinerna, kan falla genom igensättning av värmeväxlare eller ledningar. Detta är dock att betrakta som enkelfel och ingår i den

normala otillgängligheten. HVAC-komponenter på utsidan av byggnaderna kan sättas igen av is och snö, exempelvis kylbord. Det termiska kraftverket delar alltså CCF-moder med andra kraftkällor baserade på förbränning, exempelvis dieselgeneratorer och gasturbiner. En diversifieringsvinst är avståndet mellan kärnkraftverket och det termiska kraftverket, det är dock troligt att vädersystem med extremt snöfall eller isstormar kan ha en utbredning på flera mil, så diversifieringsvinsten här är begränsad.

Missiler bedöms inte kunna slå ut redundanta enheter ens inom skyddade området, så i det fallet ger skilda anläggningsplatser ingen diversifieringsvinst.

Temperatur

Hög utomhustemperatur påverkar förmågan att kyla komponenterna i det termiska kraftverket, men kylsystem kan enkelt dimensioneras efter dimensionerande utomhustemperatur. Vid högre utomhustemperatur än dimensionerande kan effekten i kraftverket begränsas. Detta är samma beteende som för andra kraftkällor baserade på förbränning.

Låg temperatur påverkar kraftverket marginellt då spillvärme värmer kraftverket. En eventuell risk med låga temperaturer är att bränslet fryser ihop, särskilt ifall fasta bränslen lagrade utomhus används. Denna risk bedöms dock som relativt enkel att konstruera bort.

3.4.10 Tillkommande vedervågningsrisker

Explosioner, Brandbelastning, Stora roterande massor, Farliga ämnen

Inget av ovanstående fenomen vedervågar utrustning på kärnkraftverket då de enbart verkar lokalt, så avståndet mellan anläggningarna skyddar kärnkraftverket.

Elektriska transienter

De elektriska transienter som kan skapas i det termiska kraftverket är av samma art som övriga turbiner/motorer med synkrogenerator och kringliggande mindre DC-system. Vid en turbin som är mycket större än vad som motiveras av kärnkraftverkets laster kan högre överspänningar erhållas vid fel på spänningsregleringen på grund av den större kapaciteten att producera reaktiv effekt än vad som är fallet för enheter som enbart är dimensionerade för att försörja kärnkraftverkets laster. Detta bör dock sättas i relation till kärnkraftverkens huvudgeneratorer som är mycket stora (typiskt 500-1500 MVA).

3.4.11 Underhålls- och DKV-aspekter

För att kraftkällan ska bedömas som driftklar måste den vara i drift och tillräckliga bränslelager måste finnas på plats. Underhållsåtgärder som kräver avställning måste därmed planeras samtidigt som kärnkraftverkets revisionsavställningar. Allt underhåll som måste utföras under kärnkraftverkets driftsäsong måste kunna utföras under drift.

Som nämnts i avsnitt 3.3.11 är de viktigaste kontrollpunkterna som behöver utföras ofta kontroll av oljenivåer och motionering av ventiler.

3.4.12 Mobilitet

Konceptet bedöms inte som lämpligt att göra mobilt.

3.4.13 Investerings- och driftkostnader

Investeringskostnaden innefattar i det här konceptet inte själva kraftkällan utan enbart den utrustning som drivs av att kraftverket agerar nödelförsörjning till kärnkraftverket, den utrustningen kan exempelvis omfatta:

- Snabbomkopplingsutrustning
- Ledning till kärnkraftverket
- Eventuell kylutrustning i fall av otillräcklig avsättning för värme
- Kompletterande fysiskt skydd

Energimarknadsinspektionens normvärdeslista [42] anger värdet på ett 12 kV brytarfack inomhus till 277 300 kr (kod R-NR-SF-1-3) och för 12-24 kV jordkabel PEX 3·95 mm² (kod RD15314) anges värdet till 112 062 kr/km. Ingen dimensionering är gjord utan detta är bara en fingervisning om vad kostnaden för de elektriska komponenterna kan hamna på.

Eventuell kylutrustning i form av en dumpkondensor kan variera mycket i pris beroende på lokala förhållanden, närhet till vatten som får användas som värmesänka är en kostnadsmässig fördel.

Driftkostnaderna innefattar eventuell kompensation för utebliven värmeproduktion om mindre värme produceras vid nödelförsörjning än vad som annars varit fallet samt eventuella tillkommande bevakningskostnader.

3.4.14 Sammanställning

Konceptet med extern ångturbin kännetecknas av:

- Relativt stora diversifieringsvinster på grund av en förläggning skild från kärnkraftverkets
- Säkert ur vedervågningsperspektiv
- Mycket som ska stämma för att kunna realisera ett projekt: Möjlig avsättning för lagom mängd värme, villighet till investering i kraftvärmeverk, villighet till att agera nödelförsörjning till kärnkraftverk
- Svårt att säkerklassa
- Fysiskt skydd-frågan gällande ledningen mellan anläggningarna måste lösas

Ångturbin extern kan realiseras som flera redundanta enheter förutsatt att flera lämpliga aggregat finns tillgängliga och att separationskrav mellan dem kan upprätthållas.

Tabell 5. Extern ångturbinens lämplighet

Ångturbin extern			
Applikation	Lämplig	Lämplig under särskilda förutsättningar	Olämplig
Säkerhetsklassad växelspanningskälla		X ¹	
Säkerhetsklassad likspänningskälla			X ²
SBO-kraft liten		X ³	
SBO-kraft stor			X ⁴
SBO-kraft mobil			X ⁵

1) Lämplig förutsatt att lämpligt kraftvärmeverk finns/byggs och att säkerhetsklassning kan genomföras, se avsnitt 3.4.8.

2) Olämplig på grund av starttid > 0, se avsnitt 3.4.5.

3) Lämplig förutsatt att lämpligt kraftvärmeverk finns/byggs

4) Olämpligt på grund av otillräcklig effekttillgång, se avsnitt 3.4.1.

5) Olämpligt kraftslag att göra mobilt, se avsnitt 3.4.12.

3.5 Vattenkraft

Med vattenkraft avses att ett befintligt vattenkraftverk producerar el kommersiellt men har snabbomkopplingsutrustning för att kunna kopplas bort från det yttre elnätet och istället börja försörja ett kärnkraftverks interna laster vid påkallat behov. Likt konceptet "Ångturbin extern" är fördelarna att kraftverket, förutom den utrustning som är dedikerad till att försörja kärnkraftverket, kan bära sina egna kostnader samt att turbinen alltid är i drift så att ingen upprullningstid behövs.

Problemen med detta koncept är generellt mindre än med "Ångturbin extern". Den rörliga kostnaden för att producera el vid ett vattenkraftverk är mycket låg, så att ägaren kommer ytterst sällan vilja stänga av kraftverket av kommersiella skäl, det är inte heller beroende av avsättning för någon restvärme. Inga kunder kommer heller att märka av att ett litet vattenkraftverk kopplas bort från elnätet.

3.5.1 Effekttillgång

Eftersom utbyggnad av vattenkraft är starkt reglerad begränsas konceptet till befintliga vattenkraftverk belägna nära de svenska kärnkraftverken. Här nedan följer ett urval av närbelägna verk där det finns aggregat större än 2 MW.

Forsmark:

- Älvkarleby, 5 mil bort, 125 MW, 6 aggregat, Vattenfall [43]
- Söderfors, 5 mil bort, 20 MW, 2 aggregat, Vattenfall [43]
- Lanforsen, 5 mil bort, 44 MW, 3 aggregat, Fortum Generation [17]
- Untra, 5 mil bort, 42 MW, 5 aggregat, Fortum Generation [17]

Ringhals:

- Ätrafors, 4 mil bort, 13 MW, 3 aggregat, E.ON Vattenkraft [18]
- Yngeredsfors, 5 mil bort, 18,8 MW, 2 aggregat, E.ON Vattenkraft [18]
- Bällforsen, 5 mil bort, 8,4 MW, 2 aggregat, E.ON Vattenkraft [18]
- Skogsforsen, 5 mil bort, 7,6 MW, 2 aggregat, E.ON Vattenkraft [18]

OKG:

- Finsjö nedre, 4 mil bort, 2,1 MW, 1 aggregat, E.ON Vattenkraft [18]
- Högsby, 5 mil bort, 3,5 MW, 2 aggregat, (osäker effektfördelning mellan aggregaten), E.ON Vattenkraft [18]

3.5.2 Energitillgång/-täthet

Produktion av 2 MW kräver ett flöde på 34 m³/s med en fallhöjd på 10 m (antaget en verkningsgrad på 60%). För respektive vattenkraftverk som används i den här applikationen måste det vatten som krävs för att kunna producera 2 MW (alternativt 20 MW vid "SBO-kraft stor") i 72 h som minimum finnas i magasinet. Eventuellt kan ett minimalt tillflöde tillgodoräknas om det kan visas att sannolikheten att det understigs är mycket låg.

3.5.3 Maximal drifttid

Vattenkraft är regelmässigt konstruerade för kontinuerlig drift >30 dygn. Revisionsavställningar av vattenkraftverket måste anpassas till kärnkraftverket.

3.5.4 Dynamiskt beteende

Frekvensreglering

I Sverige används främst två typer av vattenkraftturbiner, Kaplan- och Francisturbiner. Den tredje turbintypen, Peltonturbinen, används knappt i Sverige på grund av generellt låga fallhöjder. Både Kaplan- och Francisturbiner reglerar inflödet av vatten till turbinen med ledskenor. Francisturbiner har sedan ett fast turbinhjul, medan Kaplanturbinens turbinhjul (löphjul) liknar en propeller med vinklingsbara blad. Så för Kaplanturbinen regleras två parametrar, vinkeln på bladen i löphjulet samt läget på ledskenorna. Dessa dubbla parametrar ställer större krav på bra parametrisering av regleringen samt prover av de olika gångtiderna i systemet.

Vattenkraftverk är generellt sett väl lämpade för ö-drift, både Kaplan- och Francis-turbiner. De ö-driftprover som Solvina utfört på vattenkraftverk, (ca 15 kraftverk med 1-3 aggregat vardera) av olika storlek och typ visar dock att ingen garanti för stabil ö-drift finns, de individuella skillnaderna mellan olika aggregat är större än skillnaderna mellan exempelvis olika turbintyper eller olika storlek på aggregat. När stabil ö-drift med stora pålastningar ej erhållits har det generellt berott dåligt anpassad frekvensreglering och/eller för långa dödtider mellan regulator och ändring av pådrag (någon av parametrarna nämnda ovan). Förutom hur stor del av maximal effekt som ett aggregat klarar i maximal pålastning i ö-drift finns ofta även begränsningar i hur långt upp i effekt aggregatet kan reglera stabilt i ö-drift. De bästa aggregaten kan köras i ö-drift nära sin maximala effekt och klara pålastningar runt 20-25 % av sin maximala effekt. De sämsta (av de som klarar stabil ö-driftreglering) å andra sidan klarar stabil reglering upp till ca 25 % av sin maximala effekt och pålastningar på under 10 % av sin maximala effekt.

För att säkerställa att ett aggregat är lämpligt ur frekvensregleringshänseende måste det provas praktiskt vid de effektnivåer och med de pålastningar som kärnkraftverkets laster påbjuder.

Spänningsreglering

Vattenkraftverk använder precis som gasturbiner, dieselgeneratorer och ångturbiner synkrongeneratorer för elgenerering.

Spänningsreglering och magnetiseringsutrustning fungerar likadant på en ångturbin som exempelvis på en dieselgenerator, se avsnitt 3.1.4.

Hur stora på- respektive avlastningar som spänningsregleringssystemet kan hantera skiljer sig stort mellan olika installationer. Detta kravställs vid respektive installation. Inga principiella hinder ses för stabil spänningsreglering även vid stora strömsteg.

3.5.5 Starttid

I principer gäller samma situation som för "Ångturbin extern", starttiden består av tid för att konstatera behovet av inkoppling, tiden för ett antal brytaromslag och innan ett stationärt tillstånd inträder ska även den aktiva effekten anpassas. Sannolikt har även vattenkraftverket olika reglermoder och går vid nödelförsörjning av kärnkraftverket över till sin ö-driftsmod.

3.5.6 Realiserbarhet inom respektive utanför skyddat område

Med värdena i avsnitt 3.5.2 erhålls att mängden vatten som krävs för att producera 2 MW i 72 timmar är $34 \cdot 3600 \cdot 72 \approx 9\,000\,000 \text{ m}^3$ vilket motsvarar en kub med en sida på drygt 200 m vilket bedöms orimligt att husera inom eller i omedelbar närhet av skyddade området. Vattenkraftverket får av vedervåningsskäl ej heller ligga så att en brusten damm vedervågar kärnkraftverket.

Eftersom etablering av vattenkraftverk är starkt reglerad rekommenderas att fokus ligger på befintliga vattenkraftverk.

3.5.7 Tillgänglighet och tillförlitlighet

Otillgänglighet

Otillgänglighet för vattenkraft beräknas med data från GADS som ("*Forced outage hours*" + "*Maintenance outages*") / ("*Total available hours*"). Data från den senaste 5-årsperioden (2007-2011) ger en otillgänglighet på $9,56E-2$ /timme.

Otillförlitlighet

Otillförlitlighet beräknas med data från GADS som ("*Attempted unit starts*" – "*Actual unit starts*") / "*Attempted unit starts*". Med data från den senaste 5-årsperioden (2007-2011) fås en tillförlitlighet på $2,0E-2$ /startförsök.

3.5.8 Möjlighet till säkerhetsklassning

På samma sätt som för "Ångturbin extern" föreligger vissa svårigheter med att säkerhetsklassa vattenkraftverk då det är ett komplett kraftverk som ligger utanför skyddade området. För att kunna göra det borde åtminstone likvärdigt fysiskt skydd finnas på kraftverket som på själva kärnkraftverket. Även ledningen mellan de två kraftverken behöver skyddas. Därtill behöver kraftverket i aktuell uppsättning ha lång drifterfarenhet och alla komponenter behöver vara seismiskt kvalificerade. Däremot har ett vattenkraftverk färre komponenter än ett termiskt kraftverk, och mycket av konstruktionen är rent passiva komponenter som damm, inlopp och utlopp.

3.5.9 Känslighet för yttre händelser

Mekanisk påverkan

De för mekanisk påverkan känsliga delarna av ett vattenkraftverk installeras i byggnadskomplex utanför kärnkraftverkets skyddade område. Dessa byggnader förutsätts kunna tåla dimensionerande mekanisk påverkan från yttre händelser. Det är viktigt att hela konstruktionen skyddas från yttre händelser, alltså även transformatorer, ställverk och ledningar. Eftersom främst befintliga vattenkraftverk avses kan förstärkningar av byggnader och andra strukturer behöva göras ifall de inte klarar dimensionerande påverkan.

Vid mekanisk påverkan utöver dimensionerande värden beror konsekvenserna på hur långt över dimensionerande värden påverkan är och säkerhetsfaktorer i konstruktionen. CCF på flera aggregat på samma vattenkraftverk kan uppkomma, däremot bedöms ej CCF på olika vattenkraftaggregat i olika vattenkraftverk eller CCF på vattenkraftaggregat och redundanta kraftkällor inne på kärnkraftverket kunna uppträda på grund av det fysiska avståndet dem emellan. Här bedöms avståndet från skyddade området vara en stark diversifieringsvinst. Till exempel har effekterna av en jordbävning kraftigt avtagit ett par mil från epicentrum. För att kunna tillgodogöra sig den diversifieringsvinsten måste dock ställverken inne på kärnkraftverket klara jordbävningsmagnituder utöver de dimensionerande för att kunna tillgodogöra sig kraften från vattenkraftverket som klarat jordbävningen.

Påverkan av vatten

Många komponenter i vattenkraftverket tål inte vatten. Däremot är det byggt för att tåla höga flöden och dammen avlastas vid för höga damnivåer. Byggnader innehållande elektriska komponenter förutsätts kunna göras tåliga mot de dimensionerande värdena för regn som kärnkraftverket ska klara.

Vid vattenrelaterade yttre händelser utöver dimensionerande värden beror konsekvenserna på hur långt över dimensionerande värden påverkan är och säkerhetsfaktorer i konstruktionen. Även här bedöms avståndet från kärnkraftverket utgöra en diversifieringsvinst även om kraftigt regn kan drabba båda anläggningarna samtidigt.

Igensättning av galler och spjäll

Vattenkraftverket kräver ingen förbränningsluft och producerar inga avgaser. Kylningen av generator och övrig utrustning kan åstadkommas med det flödande vattnet som värmesänka, så att beroende av kylaggregat utomhus undviks. Rensgaller och liknande i dammen kan sättas igen och omöjliggöra produktion, denna händelse bedöms dock vara en helt annan felmod än igensättning av galler och spjäll på redundanta kraftkällor på kärnkraftverket. Vattenkraftverket har alltså tydliga diversifieringsvinster mot andra kraftkällor baserade på förbränning, exempelvis dieselgeneratorer och gasturbiner.

Temperatur

Hög utomhustemperatur, och därmed hög vattentemperatur, påverkar förmågan att kyla komponenterna i vattenkraftverket, men kylsystem kan enkelt dimensioneras efter dimensionerande vattentemperatur. Vid högre vattentemperatur än dimensionerande kan effekten i kraftverket begränsas. Om kylningen har vattnet som värmesänka är kortvariga värmeböljor ett mindre problem än för kraftkällor med kylning till uteluften, på grund av vattnets värmetröghet.

Frysning kan påverka vattenkraftverket vid låg temperatur. Genom att vattnet alltid är i rörelse och inloppen i svenska vattenkraftverk i regel är placerade en bit under ytan undviks risk för frysning vid normala temperaturer, men risken kan ej uteslutas vid extremt låga temperaturer.

3.5.10 Tillkommande vedervågningsrisker

Explosioner, Brandbelastning, Stora roterande massor, Farliga ämnen

Inget av ovanstående fenomen vedervågar utrustning på kärnkraftverket då de enbart verkar lokalt, så avståndet mellan anläggningarna skyddar kärnkraftverket.

Elektriska transienter

De elektriska transienter som kan skapas i vattenkraftverket är av samma art som övriga turbiner/motorer med synkrogenerator och kringliggande mindre DC-system. Vid en turbin som är mycket större än vad som motiveras av kärnkraftverkets laster kan högre överspänningar erhållas vid fel på spänningsregleringen på grund av den större kapaciteten att producera reaktiv effekt än vad som är fallet för enheter som enbart är dimensionerade för att försörja kärnkraftverkets laster. Detta bör dock sättas i relation till

kärnkraftverkens huvudgeneratorer som är mycket stora (typiskt 500-1500 MVA).

3.5.11 Underhålls- och DKV-aspekter

För att kraftkällan ska bedömas som driftklar måste den vara i drift och tillräckligt med vatten måste finnas i magasinet. Underhållsåtgärder som kräver avställning måste därmed planeras samtidigt som kärnkraftverkets revisionsavställningar. Allt underhåll som måste utföras under kärnkraftverkets driftsäsong måste kunna utföras under drift. Detta bedöms som ett mindre problem än för termiska kraftverk då vattenkraftverk har färre komponenter, och de spjäll som riskerar att fastna används aktivt under drift (ledskenor och eventuellt ställbara löphjul).

3.5.12 Mobilitet

Konceptet bedöms inte som lämpligt att göra mobilt.

3.5.13 Investerings- och driftkostnader

Investeringskostnaden innefattar i det här konceptet inte själva kraftkällan utan enbart den utrustning som drivs av att kraftverket agerar nödelförsörjning till kärnkraftverket, den utrustningen kan exempelvis omfatta:

- Snabbomkopplingsutrustning
- Ledning till kärnkraftverket
- Kompletterande skydd mot jordbävningar och annan mekanisk påverkan
- Kompletterande fysiskt skydd

Energimarknadsinspektionens normvärdeslista [42] anger värdet på ett 12 kV brytarfack inomhus till 277 300 kr (kod R-NR-SF-1-3) och för 12-24 kV jordkabel PEX 3·95 mm² (kod RD15314) anges värdet till 112 062 kr/km. Ingen dimensionering är gjord utan detta är bara en fingervisning om vad kostnaden för de elektriska komponenterna kan hamna på.

Kostnad för förstärkning av byggnader och andra strukturer är helt beroende av vilken nivå förstärkningarna ska göras ifrån.

Driftkostnaderna innefattar eventuella tillkommande bevakningskostnader.

3.5.14 Sammanställning

Konceptet med vattenkraft kännetecknas av:

- Stora diversifieringsvinster på grund av en förläggning skild från kärnkraftverkets och att den ej baserad på förbränning
- Säkert ur vedervågningsperspektiv
- Svårt att bedöma ett specifikt vattenkraftverks lämplighet utan att prova dess ö-driftförmåga
- Svårt att säkerhetsklassa
- Frågan om fysiskt skydd av ledningen mellan anläggningarna måste lösas

Vattenkraft kan realiseras som flera redundanta enheter förutsatt att flera lämpliga aggregat finns tillgängliga och att separationskrav mellan dem kan upprätthållas.

Tabell 6. Vattenkraftverks lämplighet

Vattenkraft			
Applikation	Lämplig	Lämplig under särskilda förutsättningar	Olämplig
Säkerhetsklassad växelspanningskälla		X ¹	
Säkerhetsklassad likspanningskälla			X ²
SBO-kraft liten		X ³	
SBO-kraft stor			X ⁴
SBO-kraft mobil			X ⁵

1) Lämplig förutsatt att lämpligt kraftverk finns och att säkerhetsklassning kan genomföras, se avsnitt 3.5.8.

2) Olämplig på grund av starttid > 0, se avsnitt 3.5.53.4.5.

3) Lämplig som förutsatt att lämpligt kraftverk finns

4) Olämpligt på grund av otillräcklig effekttillgång, se avsnitt 3.5.1.

5) Olämpligt kraftslag att göra mobilt, se avsnitt 3.5.12.

3.6 Batterier

Ett batteri består av en eller flera celler som vardera har en typisk cellspänning på 1-4 V framför allt beroende på batteriets kemiska komponenter. För att uppnå önskad effekt och total energi kopplas celler samman i serie och parallellt. Det finns flera batterityper som lämpar sig som energilager för att agera säkerhetsklassad likspanningskälla. Generellt gäller att batteriet måste vara uppladdningsbart och lämpligt för hålladdning, dvs kontinuerlig laddning med en relativt låg ström och konstant spänning.

I detta arbete studeras följande batterityper:

- Blybatterier, fritt ventilerade
- Blybatterier, ventilreglerade s.k. VRLA (Valve Regulated Lead Acid)

- Nickel-kadmiumbatteri
- Litiumjonbatteri

I befintliga anläggningar används idag blybatterier för att agera säkerhetsklassad likspänningskälla, både fritt ventilerade och ventilreglerade.

3.6.1 Effekttillgång

Uppladdningsbara blybatterier finns tillgängliga från många tillverkare som enstaka celler (2 V) och som paket med flera seriekopplade celler (t.ex. 6, 12 eller 48 V). Ett batteripaket kan lätt dimensioneras att generera en maximal effekt på 2 MW eller mer. Nickel-kadmiumbatterier och litiumjonbatterier finns tillgängliga som uppladdningsbara batterier från flera tillverkare och kan kopplas samman på liknande sätt för att generera tillräcklig effekt.

3.6.2 Energitillgång/-täthet

Tabell 7 visar den specifika energin och energitätheten för respektive batterityp som undersökts i detta arbete.

Ett teoretiskt fritt ventilerat blybatterisystem dimensionerat för att generera 200 kW under 8 timmar, dvs 1600 kWh kräver minst en volym på 23 m³ och väger minst 80 ton. Motsvarande volymer för övriga undersökta batterityper anges i Tabell 7. [57]

Tabell 7 Olika batteritypers specifika energi och energitäthet [57].

Batterityp	Typisk nominell cellspänning (V)	Specifik energi, (Wh / kg)	Energitäthet (Wh / l)	Batterisystemets minsta volym för 200 kW under 8 timmar (m³)
Bly, fritt ventilerade	2,0	10-20	50-70	23
Bly, VRLA	2,0	30	90	17
Nickel-kadmium (Pocket plate-typ)	1,2	20-30	40-50	32
Litiumjon	4,0	100-200	300-600	3

3.6.3 Maximal drifttid

Här undersöks hur långsamt batterierna kan laddas ur, och därmed hur länge de kan gå i ett sträck, utan hänsyn till dimensionering av tillgänglig energi.

Många av de undersökta tillverkarna anger urladdningshastigheter på upp till 20 timmar för sina batterier. Hos en tillverkare har data på 100 timmars urladdningshastighet för blybatterier hittats [58].

Batteriets självurladdningshastighet kan eventuellt påverka den totala drifttiden vid långsam urladdning. Självurladdning är störst för VRLA med 0,27 %/24 h men bör inte utgöra några problem.

Eftersom att fritt ventilerade blybatterier regelmässigt används på kärnkraftverk idag förutsätts att dessa kan vara i drift tillräckligt lång tid utan avbrott för planerat underhåll. För VRLA, Nickel-Kadmium och Litiumjonbatterier är underhålls- och testbehovet mindre eller i princip obefintligt och ger således inga problem med förväntad drifttid.

I stand by-drift används batterier regelmässigt på kärnkraftverk hela driftsäsonger utan avbrott för underhåll.

3.6.4 Dynamiskt beteende

En enkel elektrisk modell av ett batteri består av en ideal spänningskälla och en inre resistans. Strömmen som maximalt kan levereras till lasten från batteriet beror på den inre resistansens storlek samt på ledningarnas resistans. Den inre resistansen ökar ofta med batteriets ålder. Detta gäller för alla batterityper undersökta i detta arbete.

Mot slutet av urladdningen avtar normalt batteriets spänning, och därmed effekt. Blybatterier och Nickel-kadmiumbatterier har en flat urladdningsprofil där spänningen är relativt konstant under hela urladdningen. Litiumjonbatterier har en något mer lutande urladdningsprofil och spänningen avtar hastigt vid nära 100% urladdning.

Batterier som ska agera säkerhetsklassad likspänningskälla måste vara inkopplade i den aktuella kretsen även under stand by för att kunna aktiveras momentant vid nätbortfall. Lasten strömförsörjs normalt från det säkerhetsklassade växelspänningsnätet via en likriktare. Säkerhetsklassade likspänningskällor utgörs idag av blybatterier (fritt ventilerade eller VRLA). Dessa klarar bevisligen av att försörja lasten utan avbrott och med tillräcklig spänning under specificerad drifttid. I Regulatory Guide 1.212 (och IEEE Std 485-1997) anges riktlinjer för hur mycket batterikapaciteten maximalt får sjunka innan batteriet ska bytas ut och dessa krav förmodas uppfyllas på de verk som antagit guiden som krav.

3.6.5 Starttid

Alla batterityper berörda i detta arbete kan kopplas direkt i kretsen och hålladdas kontinuerligt och har därmed förutsättningar att agera säkerhetsklassad likspänningskälla utan någon starttid.

3.6.6 Realiserbarhet inom respektive utanför skyddat område

Blybatterier som agerar säkerhetsklassad likspänningskälla installeras regelmässigt inne på skyddade området. Ofta är de belägna i ett särskilt

batterirum nära de skenor som de ska försörja och med särskilda krav på ventilation.

Nickel-kadmiumbatterier har något lägre energitäthet och kan kräva upp till dubbelt så stor yta jämfört med blybatterier.

Litiumjonbatterier tar generellt mycket mindre plats och bör därför utan problem kunna ersätta blybatterier.

Det finns inget geografiskt hinder mot att realisera batterisystem utanför skyddade området. På grund av spänningsfall vid aktuella systemspänningar är dock ledningslängden starkt begränsande. Som för alla undersökta kraftslag innebär en placering utanför skyddat området även svårigheter med till exempel fysiskt skydd av batterierna och ledningen därifrån.

3.6.7 Tillgänglighet och tillförlitlighet

Tillgänglighet

Enligt T-boken gäller för batterier att felintensitet under standby (λ_s) är $68,2E-7$ / timme och felintensitet under drift (λ_d) är $\lambda_d = 2,6E-7$ / timme. Enligt tidigare resonemang beräknas i detta arbete:

$$\text{Tillgänglighet} = 1 - (\lambda_s + \lambda_d) = 0,999993$$

Dessa värden baseras på drifterfarenhet från installerade batterier på de nordiska kärnkraftverken och antas till huvudsak utgöras av batterier av typen fritt ventilerade blybatterier.

Tillförlitlighet

Enligt T-boken gäller för batterier att sannolikheten för behovsrelaterade fel (q_0) är $= 7,0E-4$ / behov vilket ger en tillförlitlighet på $1 - q_0 = 0,9993$

Tillförlitligheten hos batterimoduler kopplade i serie är naturligtvis beroende av det enskilda batteriets tillförlitlighet men också av hur hela serien av batterier påverkas av ett fel på ett batteri. Ett fel som orsakar kortslutning i ett batteri är oftast inte så fatalt då resterande batterier i serien kan upprätthålla spänningen genom att en högre effekt tas ut från resterande celler. Ett fel som orsakar ett avbrott i ett batteri innebär däremot att hela batterislingan slutar att fungera. Nickel-kadmiumbatterier har mycket låg sannolikhet att få ett avbrottsfel. Fritt ventilerade blybatterier har något större risk för avbrottsfel och VRLA har i detta sammanhang den största risken att drabbas av detta fel på grund av t.ex. ventilfel, tryckförlust och temperaturstegringar.

För Litiumjonbatterier gäller att varje batteri måste ha skyddselektronik som kontinuerligt övervakar batteriet med avseende på laddnings- och urladdningsstatus och temperaturavvikelser. Om en cell inte fungerar som den ska stängs hela batterislingan av. För dessa batterier ökar därför tillgängligheten drastiskt om parallella slingor installeras [58][60].

3.6.8 Möjlighet till säkerhetsklassning

Blybatterisystem säkerhetsklassas regelmässigt på kärnkraftverk runt om i världen.

Nickel-kadmiumbatterier används i många säkerhetskritiska applikationer som reservkraft till exempel inom Telecom, UPS-system för stora datorsystem och för reservkraft i sjukhus för operationssalar och annan kritisk utrustning.

Litiumjonbatterier har funnits på marknaden sedan 1991 men framför allt i primära batterier för hemelektronik. Mellan 2010-2020 förespås stor utveckling och användning att ske inom applikationsområdet elbilar [57]. Användningen av Litiumjon-tekniken i uppladdningsbara batterier för energilager utvecklas på flera håll idag och finns installerade i testanläggningar [61], men är ännu att betrakta som en ny teknik.

3.6.9 Känslighet för yttre händelser

Mekanisk påverkan

Batterisystem för 110 V säkerhetsklassad likspänningskälla installeras ofta i separata batterirum i kärnkraftsanläggningens byggnader. Dessa byggnader är dimensionerade för att tåla kravställd mekanisk påverkan. Den enda mekaniska påverkan som byggnaden inte kan skydda mot är jordbävning, där det krävs att även utrustningen i byggnaden tål dimensionerande jordbävning. Det finns seismiskt kvalificerade batterier med kringutrustning installerade på kärnkraftverken idag.

Vid mekanisk påverkan utöver dimensionerande värden beror konsekvenserna på hur långt över dimensionerande värden påverkan är, säkerhetsfaktorer i konstruktionen samt hur lokal påverkan är. Till exempel verkar missiler enbart lokalt, medan exempelvis jordbävning verkar på samtliga på området installerade batterier samtidigt.

Alla enskilda batterier som finns på marknaden har genomgått säkerhetstester för bland annat vibration krosspåverkan och fritt fall. [ANSI C 18.1M, Part 2].

Påverkan av vatten

Batterier tål inte att bli blöta på grund av risken för extern kortslutning. Det är heller inte bra om vatten läcker in i batteriet. Dock kan placering och utförande av byggnad göras så att interna översvämningar ej kan uppträda.

Vid vattenrelaterade händelser utöver dimensionerande värden är det främst översvämning och extrem havsvattennivå som kan ge konsekvenser på flera redundanta batterisystem samtidigt. Detta motverkas genom att ha batterier installerade på betryggande höjd över dimensionerande havsnivå och att ej saminstallera dem med processsystem anslutna till stora mängder vatten.

Igensättning av galler och spjäll

Batterier som avger gaser (se 3.6.10 för mer detaljer) kräver en viss luftomsättning. Där stora batterier installeras på relativt små utrymmen kan det krävas en frånluftsfläkt för att hålla vätgasnivån på en lämpligt låg nivå

för att eliminera risk för explosion. Fritt ventilerade blybatterier avger relativt stora mängder gas som måste ventileras bort medan VRLA-, Nickel-kadmium- och litiumjonbatterier normal avger mycket små mängder gas. Igensättning av luftintag och skorstenar kan därför vara en riskfaktor som dock initialt inte äventyrar funktionen hos batterierna. Om igensättning sker och gas får ansamlas under en längre tid och över givna gränsvärden så kan en explosion förstöra batterierna.

Exempel på igensättning av galler och spjäll som kan påverka ventilationen samt åtgärder som vidtas för att undvika dessa är samma som för dieselgeneratorer, se avsnitt 3.1.9.

Temperatur

Låg temperatur kan påverka batterier genom att effektuttaget begränsas. Vid temperaturer $>0^{\circ}\text{C}$ är denna påverkan dock marginell för alla undersökta batterityper och kan lätt kompenseras för vid dimensionering av batterisystemet. Fritt ventilerade blybatterier fungerar ner till ca -10°C medan VRLA och Nickel-kadmiumbatterier typiskt tål ännu lägre temperaturer. Litiumjonbatterier laddas endast vid temperaturer $>0^{\circ}\text{C}$ men urladdning kan ske ner till -20°C [57].

I normalfall kan värmning av byggnad enkelt dimensioneras efter dimensionerande utomhustemperatur för att låga temperaturer inte ska vara något problem.

Bly- och Nickel-kadmiumbatterier är mycket tåliga för höga temperaturer och fungerar väl upp till 40°C eller mer. För litiumjonbatterier gäller att dessa inte ska cyklas vid interna temperaturer $>60^{\circ}\text{C}$. För att skydda batteriet och för att motverka säkerhetsrisk är litiumjonbatterier ofta utrustade med elektronik som kan inaktivera batteriet vid höga temperaturer [57].

Hög temperatur ses här inte som något problem för någon av de undersökta batterityperna vid dimensionerande temperaturförhållanden.

3.6.10 Tillkommande vedervågningsrisker

Explosioner

I fritt ventilerade blybatterier utvecklas vätgas och syrgas under laddning och överladdning. Dessa utgör i höga koncentrationer en explosiv blandning varför det är mycket viktigt att rum som rymmer sådana batterisystem är väl ventilerade. I VRLA-batterier minskas gasutsläppet med ca 95% genom att all syrgas rekombineras under normala laddningsförhållanden och endast små mängder vätgas och koldioxid avges. VRLA-batterier är utrustade med en ventil som släpper ut gaser från batteriets innandöme vid behov. Dessutom är plasthöljet som innesluter batterierna till viss del gaspermeabelt. Vätgas som normalt släpps ut från ett VRLA-batteri kan om koncentrationen uppgår till över 4% i blandning med omgivande atmosfär utgöra en explosiv blandning, till exempel om laddningen inte fungerar och batteriet kraftigt överladdas. Av denna anledning bör batterirum alltid vara väl ventilerade så att vätgas inte ackumuleras [57].

Brandbelastning

VRLA-batterier har en låg intern impedans och kan därför orsaka höga strömmar om de kortsluts. Höga kortslutningsströmmar kan vara en brandrisk [57].

Litiumjonbatterier som inte innehåller vatten saknar en naturlig regleringsmekanism vid överladdning och höga strömmar och riskerar att självupphettas genom att den negativa elektroden börjar reagera med elektrolyten i en reaktion som avger värme. Vid ca 80°C tilltar reaktionen exponentiellt och kan orsaka att batteriet förstörs och eventuellt fattar eld. Elektrolyten är i sig brandfarlig och kan antändas om den släpps ut i luften. Litiumjonbatterier utrustas av denna anledning alltid med skyddselektronik som automatiskt stänger av batteriet vid risk för överhettning. För större batterisystem med många litiumjonceller krävs mer komplicerad kontrollelektronik ofta i flera nivåer [62].

Farliga ämnen

Fritt ventilerade blybatterier kan lätt läcka svavelsyra medan VRLA är väl slutna och utgör en avsevärt minskad risk för läckage. Vissa typer av fritt ventilerade blybatterier kan även generera toxiska gaser såsom arsin och stibin.

Elektriska transienter

Batterier har i någon mån liknande beteende som en kondensator, om än mycket långsammare. Deras möjlighet att ta upp laddning vid överspänningar, och släppa ifrån sig laddning vid låga spänningar gör att de till viss del dämpar spänningsavvikelser. Batterier används i stor utsträckning på kärnkraftverken idag och orsakar inga särskilda transienter vid normal drift.

3.6.11 Underhålls- och DKV-aspekter

För blybatterier rekommenderas av många tillverkare följande typer av testning:

- Kapacitetsprov där batteriet laddas ur under en bestämd tidsperiod (3-5 timmar) och kapaciteten mäts vid bestämda tidpunkter under urladdningen. Batteriets livslängd anses uppnådd när kapaciteten understiger 80% av märkkapaciteten.
- Funktionsprov där normal last utnyttjas. Detta test verifierar att den dimensionerade reservtiden kan uppnås.
- Provning av batteristatus genom mätning med "intelligenta mätinstrument". Olika metoder mäter resistans, kapacitans eller induktans.

Dessutom bör batterierna okulärbesiktigas och rengöras regelbundet [63] [65].

I IEEE 450 2002 beskrivs följande inspektioner och urladdningstest för fritt ventilerade blybatterier:

- Verifiera terminalspänning en gång/vecka
- Verifiera laddarens spänning, ström och kapacitet en gång/1,5 år
- Verifiera batteriets kapacitet i ett servicetest en gång/1,5 år
- Verifiera flytström en gång/vecka
- Verifiera flytspänning i en utvald cell en gång/månad
- Verifiera elektrolytnivå och korrigera vid behov en gång/månad
- Verifiera temperaturen i en utvald cell en gång/månad
- Verifiera flytspänning i alla celler en gång/månad
- Verifiera att batteriets kapacitet är $\geq 80\%$ av tillverkarens gradering när det utsätts för ett urladdningstest eller ett modifierat urladdningstest en gång/5 år eller oftare

Litiumjonbatterier utrustade med lämplig kontrollelektronik är helt fria från underhållsbehov och behöver bara regelbunden övervakning så att felande celler byts ut vid behov.

3.6.12 Mobilitet

Batterier är inte aktuella som "SBO-kraft mobil" då ett batterisystem som hypotetiskt skulle kunna generera en drifttid på >72 timmar skulle bli orimligt stort. Däremot kan batterier i mindre mängder göras mobila och därmed agera mobil ersättning för andra batterisystem. Dock kan inte 200 kW försörjas i 8 h från ett mobilt batterisystem, åtminstone inte med blybatterier, som enligt avsnitt 3.6.2 väger ca 80 ton plus kringutrustning. Detta givet samma kriterier för mobilitet som i avsnitt 2.3.12.

3.6.13 Investerings- och driftkostnader

Blybatterier är generellt det mest etablerade och billigaste alternativet för uppladdningsbara batterier för reservkraftsapplikation. Nickel-kadmium är dyrare än bly men billigare än litiumjonbatterier som har rapporterats kosta drygt tre gånger så mycket som blybatterier i ett reservkraftslager på 220 V och 210 Ah [65].

Underhållsbehov och livslängd för de olika batterityperna sammanfattas i Tabell 8. Livslängden beror på batteriets konstruktion, men också på handhavande. Till exempel har varje batterityp olika rekommenderade laddningsförfarande och det är viktigt att anpassa laddare och inställningar vid val av ny batteriteknik. Fritt ventilerade blybatterier kräver kontinuerligt översyn och underhåll bl.a. genom påfyllning av vatten. VRLA har ett mycket lägre behov av underhåll men också en kortare livslängd. För nickel-kadmiumbatterier anges av flera tillverkar en livslängd på >20 år vilket är tack vare en mekaniskt stark design, utesluten risk för korrosion samt förmåga att motstå överladdning och långtidsförvaring. Att underhållsbehovet

är mycket lågt visas t.ex. i [67] där det konstateras att vattenpåfyllning var 5:e år är den enda nödvändiga underhållsåtgärden. Litiumjonbatterier saknar lång drifterfarenhet i reservkraftsapplikationer, men förespås en mycket lång livslängd [65].

Tabell 8 Batteriers livslängd och underhållsbehov, [63], [64], [65].

Batterityp	Konstruktions-livslängd (år)	Underhållsbehov
<i>Bly</i>	<i>12</i>	<i>hög</i>
<i>Bly, VRLA</i>	<i>8*-10</i>	<i>låg</i>
<i>Nickel-kadmium</i>	<i>>20</i>	<i>låg</i>
<i>Litiumjon</i>	<i>15-25**</i>	<i>ingen</i>

*VRLA på kontinuerlig hålladdning [57], **extrapolerat från 5 års drifterfarenhet [65].

3.6.14 Sammanställning

Batterier kännetecknas av:

- Drifttid för batterier är normalt <24 timmar.
 - Modulärt dimensionerbar effekt- och energitillgång.
 - Laddas kontinuerligt och kan generera kraft omedelbart.
 - Väl etablerad teknologi med ständig utveckling av nya batterityper.
- Batterier realiseras redan idag som flera redundanta enheter.

Tabell 9 Batteriers lämplighet

Batterier			
Applikation	Lämplig	Lämplig under särskilda förutsättningar	Olämplig
Säkerhetsklassad växelspanningskälla			X ¹
Säkerhetsklassad likspänningskälla	X		
SBO-kraft liten			X ¹
SBO-kraft stor			X ¹
SBO-kraft mobil			X ¹

¹) Olämplig på grund av drifttid <72 timmar, se avsnitt 3.6.2.

3.7 Bränsleceller

En bränslecell kan liknas ett batteri som tankas med bränsle, vätgas eller naturgas, och därigenom omvandlar kemisk energi till elektrisk energi. En ensam bränslecell producerar generellt 0,6-0,7 V men genom att sätta ihop flera enheter till ett system fås en högre spänning och effekt. För att systemet ska fungera krävs även komponenter som sköter bränsletillförsel, kylning och reglering. [70]

Verkningsgraden hos en bränslecell är uppskattningsvis 30-60%, vilket kan jämföras med 40% hos en gasturbin. Dessutom genererar bränsleceller värme då bränsle omvandlas till elektricitet, detta kan utnyttjas i ett kraftvärmeverk, CHP – combined heat and power. Verkningsgraden hos ett bränslecellsbaserat kraftvärmeverk är 60-70%. [9]

Bränsleceller produceras i olika typer, oftast namngivna efter vilken elektrolyt som används. Bland tillgängliga modeller finns polymerelektrolys-bränslecell (PEMFC) samt smältkarbonat-bränslecell (MCFC).

3.7.1 Effekttillgång

Ett urval av tillverkare levererar bränsleceller i följande storlekar:

Ballard	1,5 – 500 ¹ kW [71]
Fuel Cell Energy Solutions	250 – 2800 ² kW [72]
Ceramic Fuel Cells	0,5 - 1,5 kW [73]
ClearEdge Power	5 - 400 kW [74]

Svenska tillverkarna erbjuder småskaliga bränsleceller:

Power Cell	1-6 kW [75]
Cellkraft	50 – 3000 W [76]

3.7.2 Energitillgång/-täthet

Bränsleceller finns i ett flertal modeller som drivs på olika typer av bränslen. Vätgas är det mest använda bränslet men även kolvätebaserade bränslen förekommer som naturgas, metanol och DME (dimetyleter).

Bränsleförbrukning hos två typer av bränsleceller med en effekttillgång på >200 kW har sammanställts; bränsleceller från leverantörerna Ballard och Fuel Cell Energy Solutions. På samma sätt har en bränslecellstyp med effekttillgång på >2 MW producerad av Fuel Cell Energy Solutions, listats med avseende på bränsleförbrukning. Likt gasturbiner, se avsnitt 3.2.2 är det möjligt att förse en bränslecell med gas lagrad lokalt eller via en pipeline men för att kunna garantera tillgång föredras ett lokalt gaslager.

Ballard (PEMFC, drivs på vätgas): En 1 MW enhet behöver en bränslemängd på 700 m³/h (atmosfärstryck) och är skalbar i steg om 500 kW. [69]. Vid användande som säkerhetsklassad växelspanningskälla används alltså 700 m³/h·2=1 400 m³/h vilket ger en total volym för 72 timmars produktion på 1400 m³/h·72 h=100 800 m³. Vid lagring i samma tryck som en normal gasolflaska (8,5 bar) motsvarar det ca 100 800 m³/8,5=11 859 m³ vilket motsvarar en kub med sidan 23 m.

Fuel Cell Energy Solutions (MCFC, drivs på naturgas): En bränslecell som kan producera 250 kW el konsumerar 55 m³/h och modellen som producerar

¹ Kan skalas upp till 1 MW

² Kan skalas upp till 50 MW

2,8 MW el konsumerar $614 \text{ m}^3/\text{h}$. Volymen är beräknad för atmosfärstryck. [70]

En 250 kW bränslecell från Fuel Cell Energy Solutions vilken agerar säkerhetsklassad likspänningskälla behöver en tank som vid 8,5 bars tryck rymmer $8 \cdot 55/8,5 = 52 \text{ m}^3$. Detta motsvarar en kubisk tank med sidmåttet 3,7 m.

Används en 2,8 MW bränslecell som säkerhetsklassad växelspänningskälla eller "SBO-kraft liten" behövs tillgång till $72 \cdot 614 \text{ m}^3 = 44\,208 \text{ m}^3$ naturgas, vilket vid 8,5 bar kräver en $44\,208 \text{ m}^3/8,5 = 5\,201 \text{ m}^3$ stor tank. Det motsvarar en kubisk tank med sidmåttet 17 m.

3.7.3 Maximal drifttid

På grund av att själva bränslecellen helt saknar rörliga delar behöver den relativt lite underhåll, däremot finns en rad kringssystem som behöver underhåll, vilka beror på typ av bränslecell och typ av bränsle.

Tillverkarna anger inga specifika underhållsintervaller, de använder däremot frekvent "pålitlighet" som en fördel gentemot gasturbiner och dieselgeneratorer.

3.7.4 Dynamiskt beteende

En bränslecells spänning är i hög grad beroende av faktorer som temperatur, tryck, relativ fuktighet och bränsleflöden. För att kunna reglera spänningen kan en DC/DC-omvandlare användas vilken kan reglera utspänningen så att en stabil utspänning erhålls. En DC/DC-omvandlare har generellt en verkningsgrad mellan 85-98 % [70].

I de fall bränsleceller agerar säkerhetsklassad växelspänningskälla behövs växelriktare eftersom bränsleceller enbart producerar likspänning.

Bränslecellsystem har generellt trögare respons än till exempel batterier. Utan ett energilager som kan omhänderta snabba laständringar rör sig svarstiden om sekunder upp till hundratals sekunder. Däremot om ett sådant energilager installeras fås en reglering inom millisekunder. [70]. En bränslecell av typen PEMFC har en regleringshastighet på ungefär 10% laständring per sekund under förutsättning att bränslecellen är uppe i drifttemperatur [77].

3.7.5 Starttid

Av de olika typer av bränsleceller som finns har en polymerelektrolysbränslecell (PEMFC) kortast starttid, individuella celler kan starta på under 1 sekund. Detta beror på att en PEMFC arbetar under relativt låg temperatur, under 90°C . [70]

Starttiden diskvalificerar bränsleceller som säkerhetsklassad likspänningskälla. Med förvärmning bör starttiden kunna göras tillräckligt kort för att bränslecellen ska kunna agera säkerhetsklassad växelspänningskälla.

3.7.6 Realiserbarhet inom respektive utanför skyddat område

Då en bränslecell ska installeras bör hänsyn tas till platsen bränslecellmodulen samt bränsletanken tar. Bränslecellsmodulerna har storlekar enligt Tabell 10. Bränsletankarna ges exempel på i avsnitt 3.7.2.

Tabell 10. Dimensioner och vikt för bränslecellsystem [71][72]

	Moduler	Dimensioner bränslecellmodul	Vikt
Ballard 1 MW	3 enheter (2 bränsleceller och 1 elektrisk modul)	2 enheter à 2,9·2,4·9 m 1 enhet à 2,9·2,4·6,3 m	15 000 kg + <40 000 kg
Fuel Cell Energy Solutions 250 kW	2 enheter (1 bränslecell och 1 elektrisk modul)	1 enhet à 7,69·3,06·3,90 m 1 enhet à 4,90·0,8·2,20 m	25 000 kg
Fuel Cell Energy Solutions 2,8 MW	6 enheter (2 bränsleceller)	Ca 1 000 m ²	160 000 kg

De mindre enheterna för säkerhetsklassad likspänningskälla kan eventuellt vara realiserbara inne i själva kärnkraftverkets byggnadskomplex, men är i största laget. Utanför anläggningen men på skyddade området bedöms även den större enheten för säkerhetsklassad växelspänningskälla möjlig att realisera, åtminstone på de verk där det finns gott om ytor på skyddade området.

3.7.7 Tillgänglighet och tillförlitlighet

Det finns mycket lite oberoende undersökningar av bränslecellers tillgänglighet. Tillverkare anger ofta pålitlighet som en av de stora fördelarna med bränsleceller, men U.S. Department of Energy anger livslängd (durability) och tillgänglighet (reliability) som en av de stora utmaningarna att förbättra för att skapa ett kommersiellt genombrott för bränsleceller [55]. Detta kan knappast tolkas som annat än att tillgängligheten hos de produkter som finns att köpa idag lämnar en del i övrigt att önska.

3.7.8 Möjlighet till säkerhetsklassning

Inga bränsleceller används idag på de svenska kärnkraftverken och inga har därför säkerhetsklassats.

De stora tillverkarna ovan har en del total drifterfarenhet, t.ex. anger Fuel Cell Energy sin totala produktion till 1,5 TWh, men det är fördelat på ett antal olika produkter. Möjlighet att säkerhetsklassa någon produkt kan finnas om:

- Man väljer en tillräckligt "gammal" produkt som hunnit uppnå mycket ackumulerad drifttid.
- Leverantören går med på att underkasta sig en kvalificeringsprocess
- De kan uppvisa tillräcklig tillgänglighet på sina produkter

3.7.9 Känslighet för yttre händelser

Mekanisk påverkan

Bränsleceller kan byggas in i byggnader som skyddar dem mot mekanisk påverkan. Inga seismiskt kvalificerade produkter har hittats, men den robusta designen av själva bränslecellen utan rörliga delar har goda möjligheter att klara skakprover.

Användandet i bilar och bussar ger också en viss indikation att tekniken inte är särskilt skakkänslig.

Påverkan av vatten

Bränsleceller behöver i regel ett luftflöde på katodsidan för att försörja den elektrokemiska processen med syre. Det kan även åstadkommas genom försörjning med ren syrgas, men då behövs ett ytterligare gasförråd utöver bränslet.

Varken luften som bränslecellen använder i sin process eller de elektriska komponenterna tål vatten. Dock kan placering och utförande av byggnad göras så att interna översvämningar ej kan uppträda. Luftintag kan utföras så att inblandning av vatten i intagsluften ej kan uppträda.

Vid vattenrelaterade händelser utöver dimensionerande värden är det främst översvämning och extrem havsvattennivå som kan ge konsekvenser på flera redundanta bränsleceller samtidigt. Detta motverkas genom att ha dem installerade på betryggande höjd över dimensionerande havsnivå och att ej saminstallera dem med processsystem anslutna till stora mängder vatten.

Igensättning av galler och spjäll

Bränsleceller tål inte igensättning av vare sig luftintag eller utblås, luftintag är dock känsligast på grund av sugverkan som drar till sig materia. Extrema snöfall och påsning riskerar att blockera luftintag. De kan dock konstrueras så att dimensionerande värden för dessa händelser innehålls, till exempel med olika skärningsåtgärder och med värmning av galler. Även HVAC-komponenter på utsidan av byggnaderna kan sättas igen av is och snö, exempelvis kylbord, dessa skiljer sig dock inte principiellt från luftintagen i detta sammanhang.

Missiler kan sätta igen luftintag eller utblås, antingen genom lätta skrymmande missiler som byggskivor eller genom tunga missiler som bilar. Missiler drabbar dock lokalt och bedöms inte kunna slå ut flera redundanta bränsleceller.

Vid igensättande händelser utöver dimensionerande värden drabbar missiler fortfarande bara lokalt, däremot kan snö eller isstormar utöver

dimensionerande värden sätta igen luftintagen för flera redundanta bränsleceller.

Bränsleceller delar alltså gällande igensättning av galler och spjäll felmoder med kraftkällor baserade på förbränning (som dieselgeneratorer och gasturbiner), även om ingen förbränning sker i processen.

Temperatur

En bränslecell bör skyddas från extrem kyla då den invändiga konstruktionen kan skadas. Vatten produceras i en bränslecell i drift och finns även i viss mängd i några av de bränslen som används. Kyla bränslecellen ner till så låg temperatur att vattnet fryser kan detta skada beståndsdelarna. För att undvika detta krävs bara att bränslecellen hålls varm när den är ur drift alternativt att vattnet tas ur systemet. [56]

3.7.10 Tillkommande vedervågningsrisker

Explosioner

Då bränsleceller drivs på vät- eller naturgas föreligger explosionsrisk. För att undvika detta krävs att ingen luft tar sig in i behållaren för gasen, inte heller att antändningskällor finns i närheten. Trycket vid vilken gasen förvaras vid spelar en stor roll för explosionsrisken.

Brandbelastning

Brandbelastningen för vät- och naturgas är stor. Därför måste tankar där bränslet förvaras inneha brandbarriärer. Tankarna bör separeras för att undvika att bränslet till flera redundanta enheter försvinner vid en brandhändelse. Eventuellt kan samma lösning användas som för dieselgeneratorer idag, med individuella mindre bränsleförråd och ett större gemensamt.

Stora roterande massor

En bränslecell har inga rörliga delar och roterande massor utgör därför ingen risk. [79]

Farliga ämnen

Då en bränslecell i princip är fri från utsläpp av farliga ämnen så som NO_x- och SO_x-gaser är det endast bränslet i form av vät- och naturgas som bör betraktas i denna mening. Vid läckage av dessa gaser kan fara för brand eller explosion förekomma. Ämnena betraktas ej som farliga att inandas vid läckage, dock kan kolmonoxid bildas vid ofullständig förbränning av naturgas. [80]

Elektriska transienter

Då bränsleceller har långsam dynamik, se avsnitt 3.7.4, så producerar de inga plötsliga över- eller underspänningar vid till exempel stegändringar i bränsletillförseln. Fel i spänningsregleringen i DC/DC-omvandlaren kan orsaka över- respektive underspänning i systemet.

3.7.11 Underhålls- och DKV-aspekter

Uppgifter om driftklarhet samt vilka prover och kontroller som bör göras för ett bränslecellssystem i drift har inte kunnat finnas. Detta kan bero på att utvecklingen av bränslecellssystem pågår för fullt, dagens modeller har inte varit befintliga på marknaden eller används som stationär kraftresurs någon längre tid. Ett bränslecellssystem kan dock antas kräva relativt liten underhåll av den andledning att inga eller få rörliga delar finns i cellen.

3.7.12 Mobilitet

En bränslecell som används som blackout-kraft kräver så pass stort utrymme och så pass stort bränslelager att det inte är rimligt att göra systemet mobilt.

3.7.13 Investerings- och driftkostnader

Att installera en bränslecell är i dagens läge relativt dyrt, materialkostnad för typen av bränslecell samt val av bränslesort är faktorer som styr kostnaden. Det är svårt att finna aktuella uppskattade kostnadssiffror för bränsleceller i drift så det finns risk att följande information hämtade från 2009 inte ger en generell bild av dagens prisläge.

En installationskostnad kan uppskattas till mer än \$4000 per kW, vilket motsvarar 26 160 kr. I takt med att bränslecellsmarknaden utvecklas hoppas man i framtiden kunna nå kostnader runt \$1500 per kilowatt, motsvarande 9 810 kr. [86]

3.7.14 Sammanställning

Bränsleceller har sammantaget allt för många osäkerheter eller brister för att de ska kunna rekommenderas som nödelförsörjning. Tillgängligheten är tveksam enligt avsnitt 3.7.7, det dynamiska beteendet är tveksamt enligt avsnitt 3.7.4 och diversifieringsvinsterna med tanke på yttre händelser är små enligt avsnitt 3.7.9.

Tabell 11. Bränslecellers lämplighet

Bränsleceller			
Applikation	Lämplig	Lämplig under särskilda förutsättningar	Olämplig
Säkerhetsklassad växelspanningskälla			X
Säkerhetsklassad likspänningskälla			X
SBO-kraft liten			X
SBO-kraft stor			X
SBO-kraft mobil			X

3.8 Stirlingmotorer

3.8.1 Allmän beskrivning

Stirlingmotorer fungerar genom att låta en gas hettas upp och svalna av, tryckskillnader som uppstår därav driver motorns kolvar. Motorn tillförs värme för att hetta upp gasen, även ett kylflöde kan krävas för att kyla av gasen. Värmen kan komma från vilken källa som helst.

Kommersiellt tillgängliga stirlingmotorer kräver en temperaturskillnad på 700-800°C mellan den kalla och varma sidan för att fungera effektivt. Med en temperaturskillnad mellan 200-300°C är det tveksamt om någon effekt alls går att få ur en stirlingmotor. [39]

Det finns stirlingmotorer som klarar mindre temperaturskillnader, men de är ännu ej kommersiellt tillgängliga. I [81] tas prototyper för låga temperaturskillnader fram, men de är mycket små och har även dålig verkningsgrad. Det framtida målet i den avhandlingen anges vara maskiner på 2-3 kW med en termisk-elektrisk verkningsgrad på 16 %.

På ett kärnkraftverk är den naturliga tillgången på värme efter reaktorstopp och övergång till nödelförsörjning den resteffekt som härden utvecklar, mer noggrant beskriven i avsnitt 3.3.1. Ångan som genereras i härden alternativt ånggeneratorerna kommer att vara mättad, och den tillgängliga temperaturen kommer därmed bero av trycket. I både reaktorn i BWR-block och i ånggeneratorerna i PWR-block regleras trycket med hjälp av olika typer av avblåsningssystem för att det ska hållas under designtryck. Med ett maximalt tryck erhålls även en maximal temperatur givet mättad ånga. För tryck kring 70 bar och 155 bar vilket är normala drifttryck för de svenska BWR-respektive PWR-anläggningarna har ångan en mättningstemperatur på ca 286°C respektive 345 °C.

Stirlingmotorer är alltså inte lämpliga för användning som nödelförsörjning på kärnkraftverk på grund av att tillräckligt höga temperaturer inte finns tillgängliga i processen.

Stirlingmotorer skulle kunna implementeras med en egen värmekälla, d.v.s. extern förbränning. De diversifieringsfördelar som stirlingmotorer hade kunnat ha om de kunde drivas från processen går då om intet. En kraftkälla driven av förbränning av kolbaserade bränslen har samma känslighet för yttre händelser som dieselgeneratorer och gasturbiner, d.v.s. främst igensättning av galler och spjäll.

3.8.2 Sammanställning

Stirlingmotorers lämplighet i olika applikationer ses i Tabell 12.

Tabell 12. Stirlingmotorers lämplighet

Stirlingmotorer			
Applikation	Lämplig	Lämplig under särskilda förutsättningar	Olämplig
Säkerhetsklassad växelspanningskälla			X ¹
Säkerhetsklassad likspanningskälla			X ¹
SBO-kraft liten			
SBO-kraft stor			X ¹
SBO-kraft mobil			X ¹

¹) Olämplig på grund av att den i processen tillgängliga värmen ej är tillräcklig, se avsnitt 3.8.1.

3.9 Termoelektriska element

Termoelektriska element eller termoelektriska generatorer är komponenter som utan rörliga delar producerar el från värmeskillnader. De bygger på Seebeck-effekten som i vissa material skapar ett elektriskt fält vinkelrätt mot en temperaturgradient. [44]

Ett färdigt termoelektriskt element kan grovt modelleras som en ideal likspanningskälla bakom en inre resistans, på liknande vis som ett batteri. Skillnaden mot ett batteri blir att den ideala spanningskällan varierar sin spänning med temperaturskillnaden mellan den varma och kalla sidan, medan motsvarande spanningskälla hos ett batteri varierar sin spänning med graden av urladdning. [44]

De två största problemen med elproduktion i större skala från termoelektriska element är den dåliga verkningsgraden och den höga inre resistansen. [45]

En ytterligare komplicerande faktor är att de termoelektriska elementen inte kan laddas som ett batteri. Säkerhetsklassade likspanningskällor har i det här arbetet krav på energitillgång för 8 h drift, men det är baserat på att växelspanningskällor sedan kan ta över, och samtidigt ladda de säkerhetsklassade likspanningskällorna inför eventuella ytterligare avbrott på växelspanningsnätet. De termoelektriska elementen levererar bara effekt så länge tillräckligt med värme (resteffekt) finns tillgänglig.

3.9.1 Effekttillgång

Termoelektriska generatorer är ofta små. Antingen säljs de som små plattor på några få watt eller som färdiga generatorer på ett fåtal hundra watt där flera termoelektriska element förpackats tillsammans med anslutningar för värmekälla och värmesänka.

Exempel på försäljare och deras produkter ses i

Tabell 13.

Tabell 13. Tillverkare och produkter, termoelektriska element [84][85]

Tillverkare	Exempel-produkt	Storlek (mm)	Effekt (W)	Spänning tomgång (VDC)	Anslutning värmekälla och värmesänka
Tellurex	G2-56-0375	56·56·4,3	14,1	8,4	Metallplattor
TEG Power	Fluid to Fluid Heat Transfer TEG	120·140·180	200	96	Rör för varm och kall vätska

Termoelektriska element har i regel en verkningsgrad mellan 1-15 % beroende på produkt, implementationsmetod och temperaturskillnad. Ett normalvärde är enligt [45] 5 %. För att komma upp i den effekt som krävs för att agera säkerhetsklassad likspänningskälla skulle alltså en termisk effekt på ca $200 \text{ kW} / 0,05 = 4\,000 \text{ kW}$ krävas. Med hänsyn till tillgänglig resteffekt (se avsnitt 3.3.1) så kan effekttillgången i processen vara tillräcklig för drift i 8 h, som är kravet för säkerhetsklassad likspänningskälla. Detta förutsätter dock att en stor del av resteffekten kan utnyttjas i de termoelektriska elementen.

Det är även viktigt att påpeka att när reaktorn är kallt avställd, finns ingen effekt tillgänglig i de termoelektriska elementen. Den övergripande designen av anläggningen måste därmed tillåta att en av likspänningskällorna är otillgänglig under dessa förhållanden.

3.9.2 Energitillgång/-täthet

Termoelektriska element som drivs av resteffekten i ett kärnkraftverk har per automatik tillgänglig energi i kärnbränslet. Den begränsande faktorn är hur länge resteffekten är hög nog för att upprätthålla produktion av tillräcklig elektrisk effekt.

3.9.3 Maximal drifttid

Termoelektriska element är extremt driftsäkra, exempelvis drivs rymdfarkosterna inom Pioneer- och Voyagerprogrammen av termoelektriska element. Voyager 1 sköts upp 1977 och beräknas ha fungerande elförsörjning till ca 2025. [46]

Begränsning i maximal drifttid förutsatt att det finns tillgänglig värme beror på installationen, det är kringutrustningen som troligtvis blir underhållsdrivande. Se vidare i avsnitt 4.2 angående implementation av termoelektriska element.

3.9.4 Dynamiskt beteende

Ett termoelektriskt element beter sig ungefär som ett batteri vid urladdning, se en enkel elektrisk modell i Figur 3.1. **Fel! Hittar inte referenskälla..** Spänningen E i figuren är beroende på temperaturdifferensen över elementet, givet konstant temperatur är även den konstant. R_s betecknar elementets inre resistans, V_s utspänningen från elementet och R_{load} den ekvivalenta

lastresistansen. Precis som för batterier fås den teoretiska maxeffekten i lasten när $R_s = R_{load}$, men då är spänningen över lasten endast hälften av tomgångsspänningen. För att hålla sig inom 85-110 % av nominell spänning när 110 % av nominell spänning motsvarar tomgångsspänningen så är randvillkoret för hur resistanserna förhåller sig till varandra enligt följande

$$E = 1,1 \text{ p.u.}$$

$$V_s = 0,85 \text{ p.u.}$$

$$\frac{V_s}{R_{load}} = \frac{E - V_s}{R_s} \Rightarrow \frac{R_{load}}{R_s} = \frac{V_s}{E - V_s} = \frac{0,85}{1,1 - 0,85} = 3,4$$

R_{load} måste alltså minst vara 3,4 gånger större än R_s , och detta givet att temperaturdifferensen hålls absolut konstant och inget spänningsfall sker mellan det termoelektriska elementet och lasterna.

Eftersom effektangivelser på termoelektriska element ofta anges vid "matchad last", d.v.s. $R_s = R_{load}$, måste detta förhållande beaktas. Vid angiven effekt gäller följande:

$$E = 1,1 \text{ p.u.}$$

$$V_s = \frac{E}{2} = 0,55 \text{ p.u.}$$

$$R_{load} = 1 \text{ p.u.}$$

$$P_{load} = \frac{V_s^2}{R_{load}} = \frac{0,55^2}{1} \approx 0,3 \text{ p.u.}$$

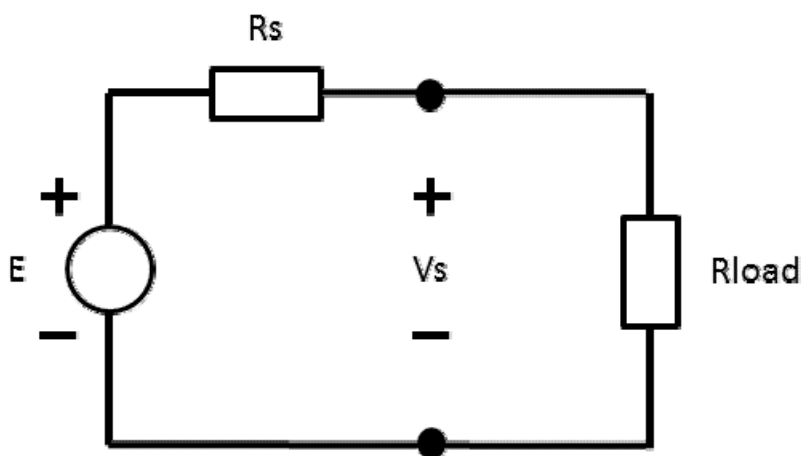
Vid användbar effekt på grund av ovan beskrivet förhållande gäller istället följande:

$$V_s = 0,85 \text{ p.u.}$$

$$R_{load} = 3,4 \text{ p.u.}$$

$$P_{load} = \frac{V_s^2}{R_{load}} = \frac{0,85^2}{3,4} \approx 0,2 \text{ p.u.}$$

Om effekt anges vid matchad last behöver de alltså överdimensioneras med minst 50 %.



Figur 3.1 Enkel elektrisk modell av ett termoelektriskt element och dess last.

Behovet av överdimensionering kan undanröjas om lasterna matas via en DC/DC-omvandlare, då kan utspänningen hållas konstant även vid maximal last. Nackdelen är att det innebär ännu en elektrisk komponent och därmed minskad tillgänglighet.

3.9.5 Starttid

Om det termoelektriska elementet kontinuerligt är kopplat till sin värmekälla och värmesänka så är det omedelbart tillgängligt på samma sätt som ett batteri. Detta orsakar vissa värmeförluster under den tid behov ej är påkallat.

Om värmekällan och värmesänkan istället kopplas till när behov påkallas så minskar man värmeförlusterna, men skapar istället en ledtid som, om än liten, diskvalificerar kraftkällan för användning som säkerhetsklassad likspänningskälla.

3.9.6 Realiserbarhet inom respektive utanför skyddat område

Termoelektriska element är ofta små, men har i gengäld liten effekt. Exempelen i avsnitt 3.9.1 upptar för en effekt på 300 kW (200 kW + 50 % enligt resonemang i avsnitt 3.9.4) volymer enligt Tabell 14.

Tabell 14. Storlek på termoelektriska element [84], [85].

Fabrikat	Storlek enskilt element	Effekt enskilt element	Antal erforderade element	Total volym
Tellurex	$0,056 \cdot 0,056 \cdot 0,043 = 13\,484 \text{ mm}^3$	14,1 W	$300\,000/14,1 = 21\,276 \text{ st}$	$13\,484 \text{ mm}^3 \cdot 21\,276 \text{ st} = 0,3 \text{ m}^3$
TEG Power	$120 \cdot 140 \cdot 180 = 3\,024\,000 \text{ mm}^3$	200 W	$300\,000/200 = 1\,500 \text{ st}$	$3\,024\,000 \text{ mm}^3 \cdot 1\,500 \text{ st} = 4,5 \text{ m}^3$

Självva de termoelektriska elementen tar alltså inte särskilt stor plats, utan det är utrustningen runt omkring för att säkerställa temperaturdifferensen som tar plats. Den stora skillnaden mellan de två typerna ovan beror på att den senare till viss del har utrustningen för att hålla temperaturdifferensen inbyggd i form av rör.

Eftersom konceptet innebär utnyttjande av resteffekten måste installationen ske nära eller i anslutning till reaktorinneslutningen. Se vidare under implementeringsförslag i avsnitt 4.2.

3.9.7 Tillgänglighet och tillförlitlighet

Inga större undersökningar av tillgängligheten hos termoelektriska element har hittats, men deras huvudsakliga användning som kraftproducenter är idag i applikationer som kräver extrem tillförlitlighet, exempelvis drift av kontrollutrustning på otillgängliga platser och kraftförsörjning på rymdfarkoster utom räckvidd för tillräcklig solenergi [47].

Detta gör att tillgänglighet inte bedöms vara ett hinder för användande av termoelektriska element, snarare tvärtom. Tillförlitlighet är näst intill irrelevant då elementen likt batterier är konstant inkopplade.

3.9.8 Möjlighet till säkerhetsklassning

Termoelektriska element som kraftproducenter är inget som används på svenska kärnkraftverk, däremot används de i viss utsträckning som temperatursensorer.

Som kraftproducenter har enklare termoelektriska element mycket drifterfarenhet, till exempel har världens största tillverkare Global TE levererat generatorer sedan 1975 [48]. Det genomförs även mycket forskning på området för att få upp verkningsgraden på termoelektriska element, främst genom användande av nano-teknologi [44]. I den mån sådana element är kommersiellt tillgängliga har de liten drifterfarenhet och bedöms därför inte som intressanta.

3.9.9 Känslighet för yttre händelser

Mekanisk påverkan

Termoelektriska element som realiseras i eller i närheten av reaktorinneslutningen förutsätts vara skyddade mot yttre mekanisk påverkan. Deras avsaknad av rörliga delar gör att de enkelt bör kunna kvalificeras för tålighet mot seismisk påverkan. Erforderliga kringssystem för att upprätthålla temperaturdifferenser bedöms vara den kritiska punkten för att uppnå god tålighet mot seismisk påverkan.

Påverkan av vatten

Själva termoelektriska elementen kan kapslas så att de blir tåliga mot vatten, men de elektriska installationerna kring dem tål inte vatten.

Vid vattenrelaterade yttre händelser utöver dimensionerande värden kan översvämningar uppträda åtminstone upp till markplan. Ju högre över markplan elementen placeras, desto säkrare är de från översvämningar orsakad av yttre händelser. Även översvämningar orsakade av inre händelser behöver beaktas, genom miljökvalificering.

Igensättning av galler och spjäll

De termoelektriska elementen kräver ingen förbränningsluft och producerar inga avgaser eller andra gaser. Beroende på hur implementationen ser ut kan en ökad värmning av utrymmet de installeras i uppträda till följd av värmningen av deras varma sida, om inte kylningen av den kalla sidan motverkar detta fenomen behöver HVAC-systemen kyla utrymmet, igensättning av dem orsakar därmed förhöjd temperatur i installationsutrymmet.

Ifall installationen använder flytande eller gasformig media för att värma respektive kyla elementen kan igensättning orsaka förlorad funktion hos elementet, detta drabbar dock lokalt och är ej en effekt av yttre händelser.

Temperatur

Hög utomhustemperatur påverkar HVAC-systemens förmåga att kyla installationsutrymmet. Vid högre utomhustemperatur än dimensionerande kan eventuellt värmetillflödet till installationsutrymmet minskas genom avstängning av vissa element, detta minskar i så fall bara tillgänglig effekt istället för att produktionen helt uteblir.

Låg utomhustemperatur påverkar elementen marginellt. Värmning av installationsutrymmet kan enkelt dimensioneras efter dimensionerande utomhustemperatur. Vid bortfall av HVAC-systemet riskeras främst hög temperatur på grund av närheten till de olika varma processsystemen.

3.9.10 Tillkommande vedervågningsrisker

Explosioner

Inga explosiva material finns i installationen.

Brandbelastning

Mycket liten extra brandbelastning tillförs i form av elektrisk utrustning.

Stora roterande massor

Inga roterande massor finns i installationen.

Farliga ämnen

Inga farliga ämnen finns i installationen

Elektriska transienter

Gällande elektriska transienter betar sig de termoelektriska elementen som batterier, fast troligtvis med högre inre resistans vilket ger lägre kortslutningseffekt.

3.9.11 Underhålls- och DKV-aspekter

Underhåll av de termoelektriska elementen fokuserar på kringssystemen då inte mycket på själva elementen finns att underhålla. Rimligt är att vid en viss temperaturdifferens mäta tomgångsspänningen för att upptäcka åldringsfenomen.

Global TE anger en till två timmars underhåll vid ett tillfälle per år på sina system, och då är det kompletta system med brännare (som värmer den varma sidan), bränsleförsörjningssystem och kylning. [48]

3.9.12 Mobilitet

På grund av sin värmeförsörjning från huvudprocessen bedöms systemet ej lämpligt att göra mobilt.

3.9.13 Investerings- och driftkostnader

Priset för ovan angivna element har kostnader enligt Tabell 15, lägre kostnader åstadkoms säkert vid de stora volymer det handlar om. Tillkommer

gör all utrustning för att hålla temperaturdifferensen och den elektriska utrustning som behövs för att ansluta generatorerna till aktuellt likspänningsnät.

Tabell 15. Pris termoelektriska element.

Fabrikat	Effekt enskilt element	Antal erforderade element	Pris enskilt element	Totalt pris
Tellurex	14,1 W	300 000/14,1 = 21 276 st	\$110 ≈ 719 kr	719 kr · 21 276 st ≈ 15,3 Mkr
TEG Power	200 W	300 000/200 = 1 500 st	\$1520 ≈ 9941 kr	9941 kr · 1 500 st ≈ 14,9 Mkr

Driftkostnaderna domineras helt av den värme som krävs för att driva elementen. För att driva dessa element vid 200 kW med 5 % verkningsgrad åtgår 4 MW värmeenergi. Antaget att kärnkraftverkets turbin har en verkningsgrad på 35 % motsvarar det 1,4 MW elektrisk effekt som vid en tillgänglighet på 90 % under året och ett elpris på 30 öre/kWh motsvarar ca 3,3 Mkr/år.

3.9.14 Sammanställning

Konceptet med termoelektriska element kännetecknas av:

- Relativt stora diversifieringsvinster på grund av avsaknad av gasbildning och tålighet mot låga temperaturer
- Säkert ur vedervågningsperspektiv
- Svårt att skapa en robust och enkel konstruktion som kan värma tillräckligt många element
- Orsakar värmeförluster i processen
- Går ej att "ladda upp" när växelspänning är tillgänglig

Termoelektriska element är endast lämpligt att realisera som en enskild enhet på grund av begränsad effekttillgång, se avsnitt 3.9.1.

Tabell 16. Termoelektriska elements lämplighet

Termoelektriska element			
Applikation	Lämplig	Lämplig under särskilda förutsättningar	Olämplig
Säkerhetsklassad växelspänningskälla			X ¹
Säkerhetsklassad likspänningskälla		X ²	
SBO-kraft liten			X ¹
SBO-kraft stor			X ¹
SBO-kraft mobil			X ³

¹) Olämplig på grund av otillräcklig effekttillgång, se avsnitt 3.9.1.

²) Lämplig förutsatt tillräcklig tillgång på värmning och kylning, samt att avsaknaden av uppladdning kan accepteras.

³) Olämplig på grund av otillräcklig effekttillgång, se avsnitt 3.9.1 och olämplig att göra mobil enligt avsnitt 3.9.12.

3.10 Svänghjul

3.10.1 Effekttillgång

Svänghjul lagrar energi i sin roterande massa vilken sedan kan levereras ut på nätet med samma maskin som driver svänghjulet. Den elektriska maskinen är ofta från början integrerad med själva svänghjulet. Svänghjul är väl lämpade för snabba upp- och urladdningar, då de inte åldras av vare sig grunda eller djupa urladdningscykler. Detta gör dem i någon mån till en mer robust teknologi än batterier[49].

Själva svänghjulet kan teoretiskt leverera all sin lagrade energi på mycket kort tid, begränsande för effektuttaget är det elektriska systemet. Exempel på svänghjul med stora möjliga effektuttag är de som delvis försörjer Tokamak-reaktorn JET, de kan leverera maximalt 400 MW per svänghjul. De lagrar sin energi i stora, men relativt långsamma svänghjul. De har en svängmassa på 13,5 kt/m² (vikt 775 t) och roterar med maximalt 225 rpm[53].

Modern utveckling av svänghjul fokuserar på lättare hjul med högre rotationshastighet, eftersom den lagrade energin är proportionell mot rotationshastigheten i kvadrat enligt

$$E_k = \frac{1}{2} I * \omega^2.$$

Till exempel gör Volvo personvagnar försök med lätta svänghjul (vikt 6 kg) av kolfiber som roterar med en hastighet på 60 000 rpm. Svänghjulet kan ge bilen en extra effekt på 80 hk=59 kW [52].

Den senare varianten med svänghjul som roterar mycket fort kräver att svänghjulet görs av kolfiber eller andra material med hög draghållfasthet, stål håller inte. De kräver även vakuum i sin inneslutning och magnetisk upphängning för att förlusterna inte ska bli orimligt stora. [49]

Stora leverantörer av svänghjul:

- Beacon Power
- Active Power
- Pentadyne Power

3.10.2 Energitillgång/-täthet

Enligt föregående avsnitt beräknas energin i ett svänghjul enligt:

$$E_k = \frac{1}{2} I * \omega^2.$$

För att fungera som säkerhetsklassad likspänningskälla respektive säkerhetsklassad växelspänningskälla behövs 0,2 MW·8 h = 1,6 MWh respektive 2 MW·72 h=144 MWh.

Långsamma tunga svänghjul som de vid JET-reaktorn bedöms här som orimliga, då ett sådant 775 t tungt svänghjul enbart lagrar 1,04 MWh.

Beacon Power har levererat en svänghjulspark som kan leverera 20 MW effekt, den består av ett flertal 25 kWh/100 kW-svänghjul som roterar med

hastigheter mellan 8 000 och 16 000 rpm. För att sådana ska kunna användas som säkerhetsklassad likspänningskälla behövs $1,6/0,025=64$ stycken oaktat förlusterna [54].

Vidare anges tomgångsförlusterna till 0,03 MWh/MW/h [54] vilket för en 100 kW-enhet som ska urladdas under minst 8 h innebär $0,03 \text{ MWh/MW/h} \cdot 8 \text{ h} \cdot 0,1 \text{ MW} = 24 \text{ kWh}$ i förluster, vilket alltså bara lämnar 1 kWh som kan levereras till nätet. Detta är konservativt eftersom förlusterna troligtvis minskar vid minskande rotationshastighet. Men det pekar ändå på att $1,6 \text{ MWh}/0,001 \text{ MWh} = 1\,600$ svänghjul skulle behövas, vilket bedöms som en orimligt stor kraftkälla för att agera säkerhetsklassad likspänningskälla i en sub.

Bedömningen att det på grund av förlusterna är orimligt att använda svänghjul för så långa urladdningstider stärks av [51] där det anges att svänghjul i regel inte används för applikationer med längre urladdningstid än en timme. Ett extremfall anges där NASA tagit fram ett svänghjul som ska kunna laddas ur under 90 minuter, vilket fortfarande är långt från de erfordrade 8 timmarna.

3.10.3 Sammanställning

Svänghjul kännetecknas av:

- Klarar stora effektuttag och många stora och små urladdningar
- Klarar enbart korta urladdningstider

Tabell 17. Svänghjuls lämplighet

Svänghjul			
Applikation	Lämplig	Lämplig under särskilda förutsättningar	Olämplig
Säkerhetsklassad växelspanningskälla			X ¹
Säkerhetsklassad likspänningskälla			X ¹
SBO-kraft liten			X ¹
SBO-kraft stor			X ¹
SBO-kraft mobil			X ¹

¹) Olämplig på grund av otillräcklig urladdningstid, se avsnitt 3.10.2.

4 Implementeringsförslag

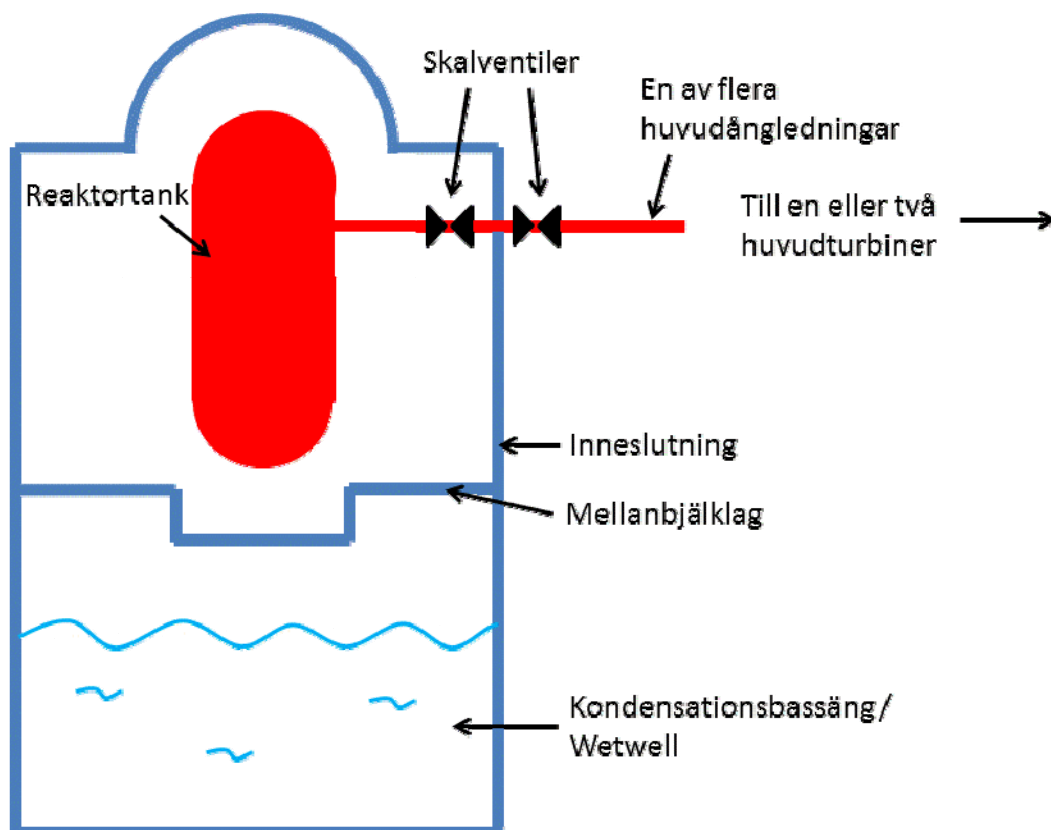
I följande avsnitt ges förslag på de kraftslag som innebär någon slags interaktion mellan huvudprocessen i kärnkraftverket och kraftkällan för nödelförsörjning. Då Stirlingmotorer visat sig olämpliga återstår bara ångturbin intern och termoelektriska element.

Övriga kraftkällor kopplas på konventionellt sätt till skenan de är satta att försörja.

4.1 Ångturbin intern

Då ångturbin intern bara visat sig lämplig för användande i BWR-block kommer bara sådana att behandlas.

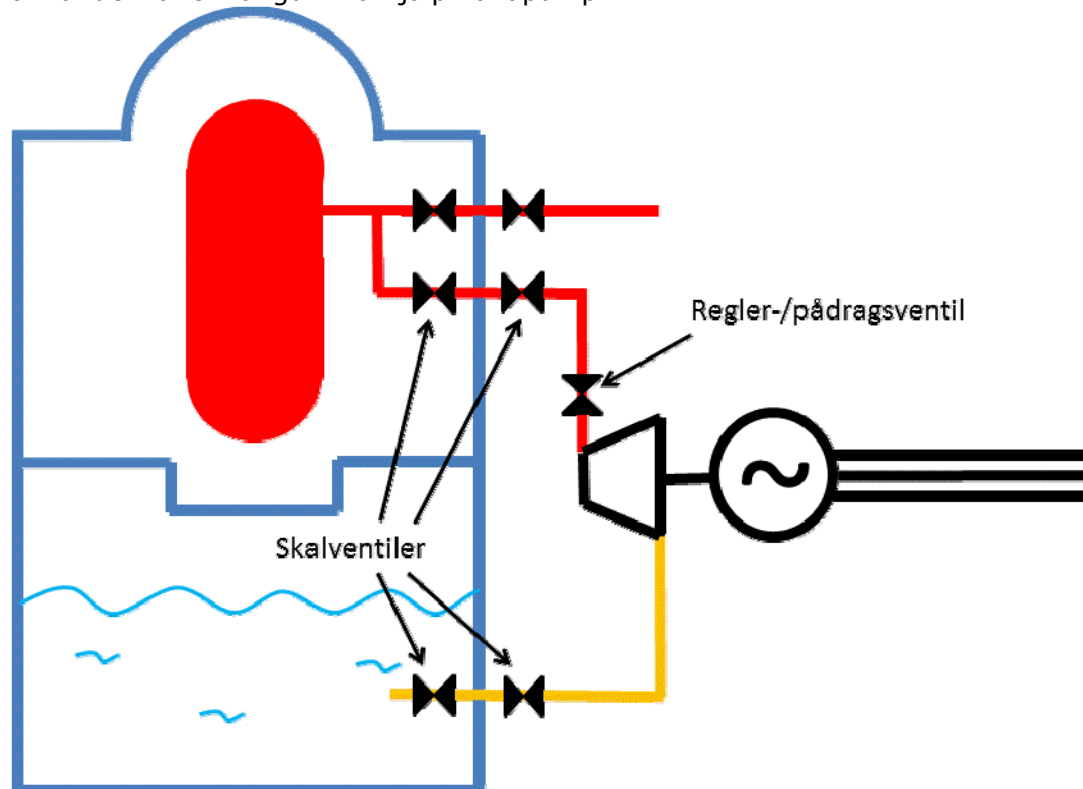
En rudimentär skiss av inneslutningen i en BWR och tillgänglig ånga ses i Figur 4.1.



Figur 4.1. Enkel skiss av en BWR-inneslutning

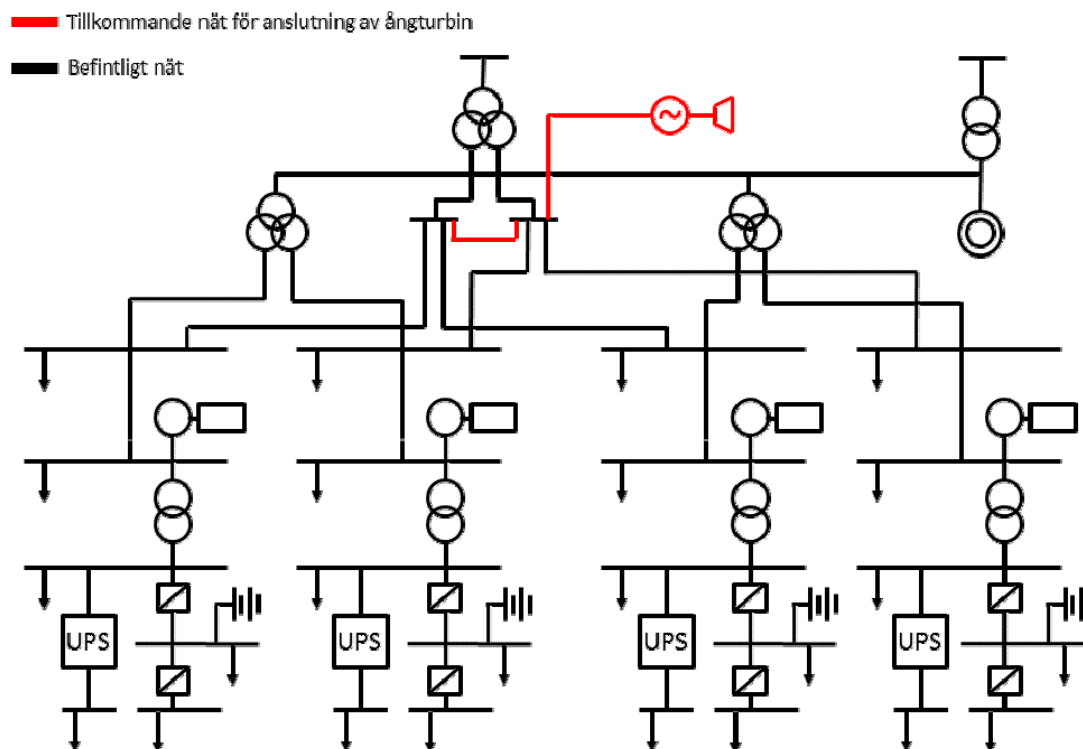
Ånga finns tillgänglig i överdelen av reaktortanken, huvudångledningarna och i turbinanläggningen. Eftersom nödelturbinen behöver vara tillgänglig efter en isolering av inneslutningen måste ångan till den tappas av innanför skalventilerna på någon av huvudångledningarna. Eftersom ångan är

radioaktiv måste ångan från turbinens utlopp omhändertas, lämpligtvis leds den in till kondensationsbassängen. Ångledningen till turbinen behöver även den skalventiler, den behöver dessutom en reglerventil för att reglera turbinens pådrag. Se skiss av lämplig implementering i Figur 4.2. Implementationen är i stort sett lik den som en svensk BWR-anläggning redan använder för sin ångdrivna hjälpmavapump.



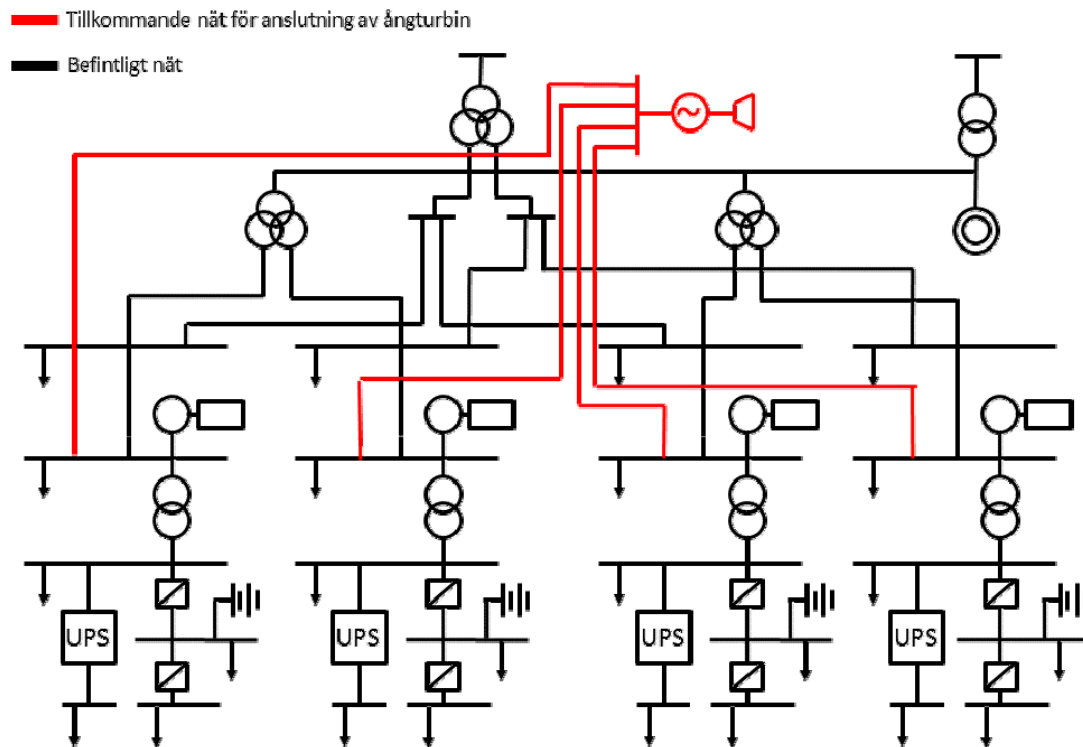
Figur 4.2. Skiss på implementeringsförslag, intern ångturbin

Eftersom det är ytterst tveksamt om intern ångturbin kan användas som säkerhetsklassad växelspanningskälla enligt avsnitt 3.3.1 återstår "SBO-kraft liten". För att kunna ha flexibilitet i vilken sub som ska ersättas kopplas turbinen enklast in högre upp i nätet, se skiss i Figur 4.3. Ifall det inte finns möjlighet att koppla ihop ångturbinen med vilken säkerhetsklassad växelspanningsskena som helst behöver även den funktionen installeras, se röd hopkoppling av de båda 6 kV-skenorna i Figur 4.3. Denna typ av inkoppling kräver möjlighet att rensa de ordinarie skenor som berörs innan inkoppling av ångturbinen.



Figur 4.3. Enlinjeschema, förslag inkoppling av ångturbin

En alternativ inkoppling för att slippa rensning av ordinarie nät vore att koppla in turbinen direkt till samtliga säkerhetsklassade växelspanningsskenor. Det går åt betydligt mer kabel, fler ställverksfack samt kräver ett eget ställverk för turbinen. För enlinjeschema, se Figur 4.4.



Figur 4.4. Enlinjeschema, alternativt förslag inkoppling av ångturbin

4.2 Termoelektriska element

Termoelektriska element behöver värmas på ena sidan och kylas på den andra. Temperaturdifferensen över elementet bör vara minst 100°C , men högre effektivitet uppnås ju större temperaturdifferensen är [45]. I kärnkraftverken finns temperaturer upp till knappt 300°C att tillgå.

Tre huvudsakliga sätt att leda värme till elementen har identifierats:

- Avleda varm ånga/varmt vatten från primärsystemet
 - o Utökar RCPB*, ställer stora krav på material och täthet i rören.
 - o Effektiv värmeledning.
 - o Ångan/Vattnet måste ta vägen någonstans, att i en BWR leda av ångan till kondensationsbassängen kräver, för att inte slösa mer än nödvändigt med energin, att det mesta av värmen i ångan tas om hand i de termoelektriska elementen, vilket gör att de sista elementen sannolikt inte kan drivas vid maximal temperaturdifferens.
- Värmeledning genom massiv metall från primärsystemet
 - o Robust lösning, inga ingrepp i RCPB.
 - o Dålig värmeledning då ingen konvektion kan utnyttjas. Kräver mycket korta avstånd och stora metallareor för att fungera.
- Värmerör/"heatpipe", ett slutet rör innehållande lämplig vätska

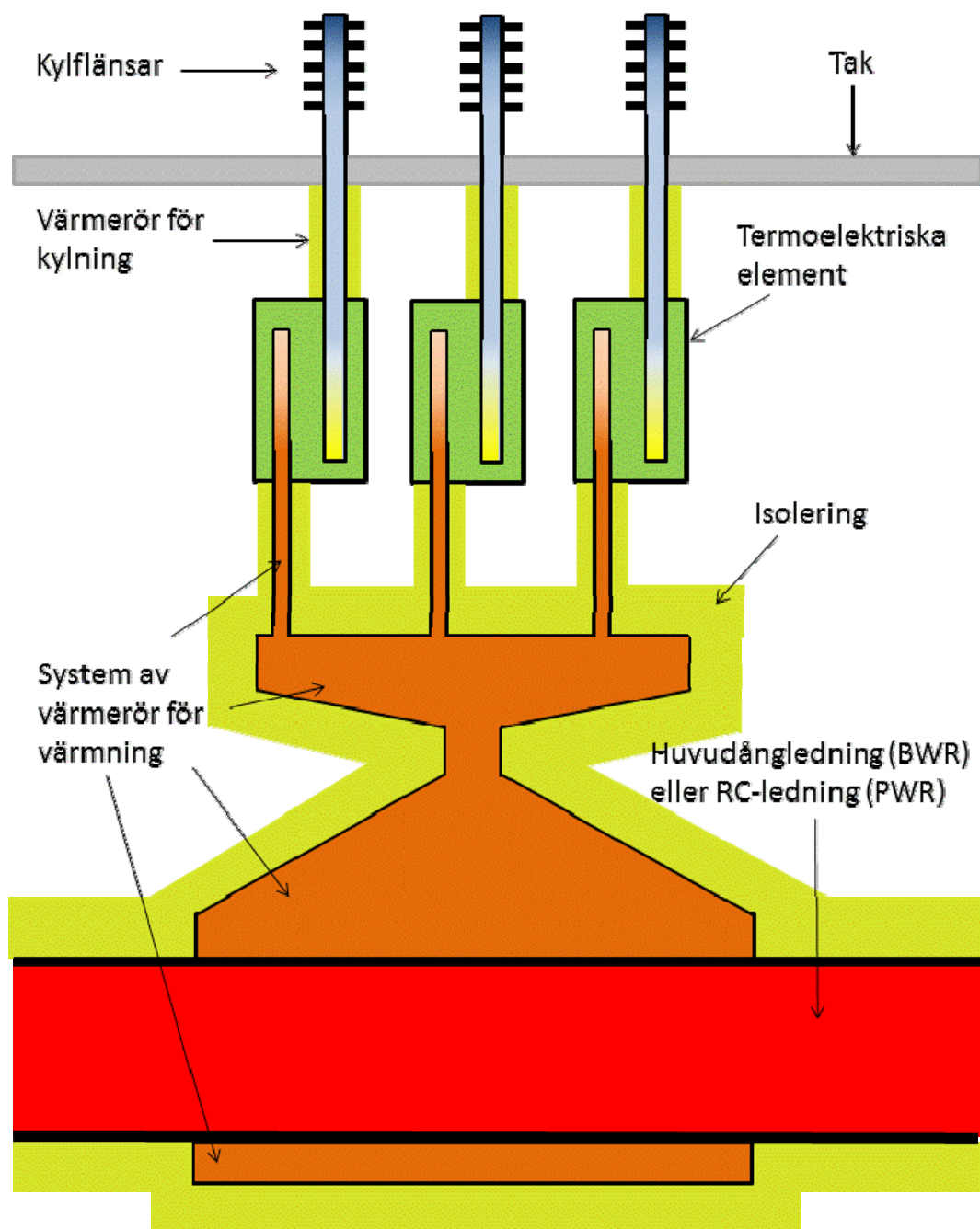
*) Reactor Coolant Pressure Boundary, gränsen för de system som är trycksatta från reaktorn. Har högsta mekaniska säkerhetsklass vilket ställer mycket höga krav på utförande och inspektioner

- o Kan göras med eller utan ingrepp i RCPB, antingen är den varma änden på värmeröret inuti en ångledning, vilket medför ingrepp i RCPB och en viss påverkan på ångflödet eller så är den varma änden fäst utanpå en ångledning så att värmen från ångledningen effektivt leds in i värmeröret.
- o Kräver att de termoelektriska elementen är placerade ovanför ångledningen då värmerör enbart kan leda värme uppåt.

På motsvarande sätt har tre huvudsakliga sätt att kyla elementens kalla sida identifierats:

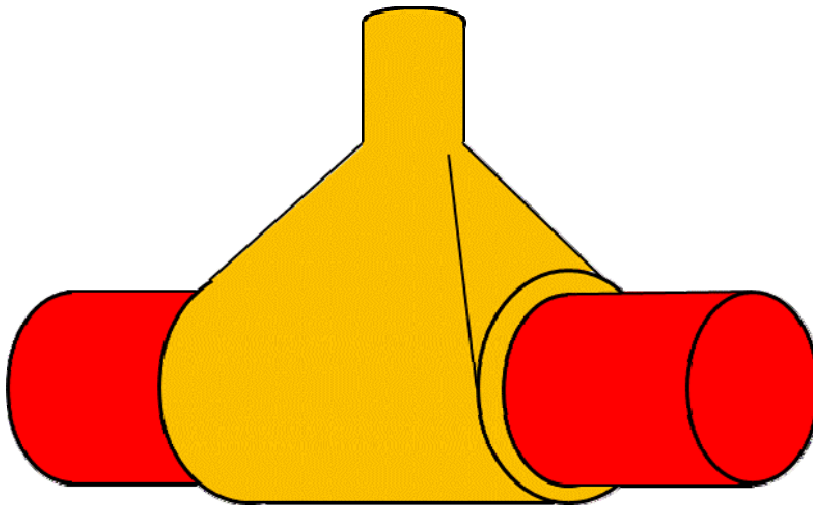
- Avleda vatten från något av de befintliga vattenflödena
 - o Effektiv värmeledning bort från elementen.
 - o För högst verkningsgrad krävs kallt vatten. MAVA-vattnet som är 150-200 °C kan dock vara tillräckligt kallt. Under normal drift är MAVA-vattnet det enda stora och rimligt kalla vattenflödet inne i inneslutningen. Vid olika typer av nödkylning finns ett antal system med kallvatten, dessa är dock inte tillgängliga omedelbart efter en inledande händelse.
- Med kylflänsar avleda värmen till kringliggande atmosfär
 - o Kylflänsarna måste vara belägna i omedelbar anslutning till elementen för effektiv värmeledning.
 - o Kräver att kringliggande atmosfär kan garanteras ha en högsta temperatur.
- Värmerör/"heatpipe", ett slutet rör innehållande lämplig vätska, med kylflänsar i kalla änden
 - o Ett värmerör kan användas även för kylningen, dock med en annan vätska med lägre kokpunkt än vad som krävs på den varma sidan.
 - o Ett värmerör kan bara leda värme uppåt, i den kalla änden monteras kylflänsar så att omkringliggande atmosfär blir den slutgiltiga värmesänkan.

Sammantaget föreslås nedan i Figur 4.5 en schematisk implementering av termoelektriska element där värmerör används både för värmning och kylning. Detta för att placeringen av elementen blir friare jämfört med om massiv metall använts som värmeledare och för att ingrepp i RCPB undviks.



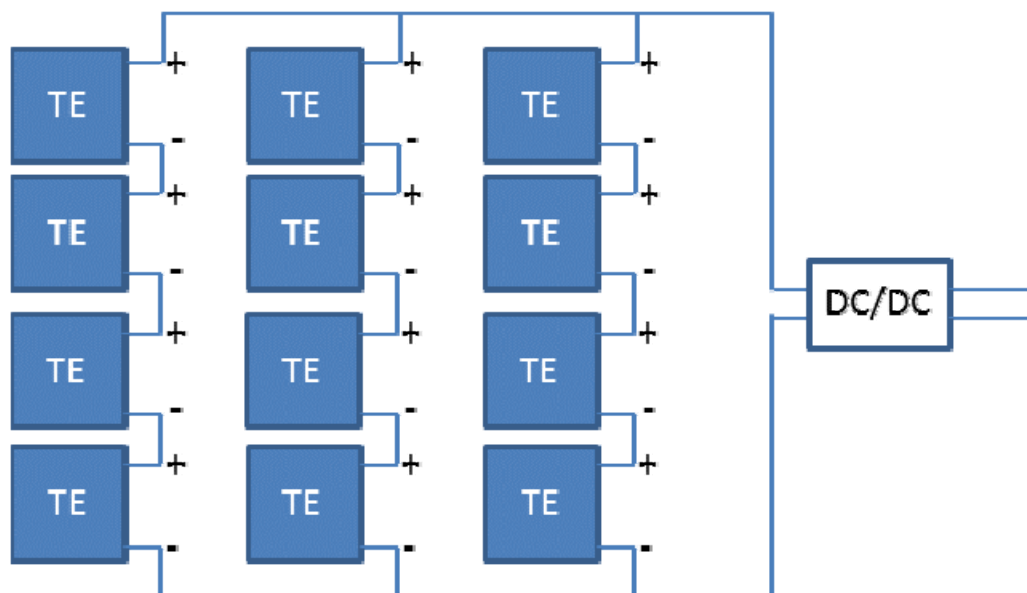
Figur 4.5. Schematiskt förslag på implementation av termoelektriska element värmda och kylda av värmerör.

Den nedre delen av värmeröret för värmning, som ansluter till huvudångledningen (BWR) innanför skalventiler och avblåsningsventiler alternativt RC-ledningen (PWR), föreslås göras som ett platt rektangulärt rör som böjs runt om den varma ledningen för att få stor kontaktyta, se förklarande skiss i Figur 4.6.

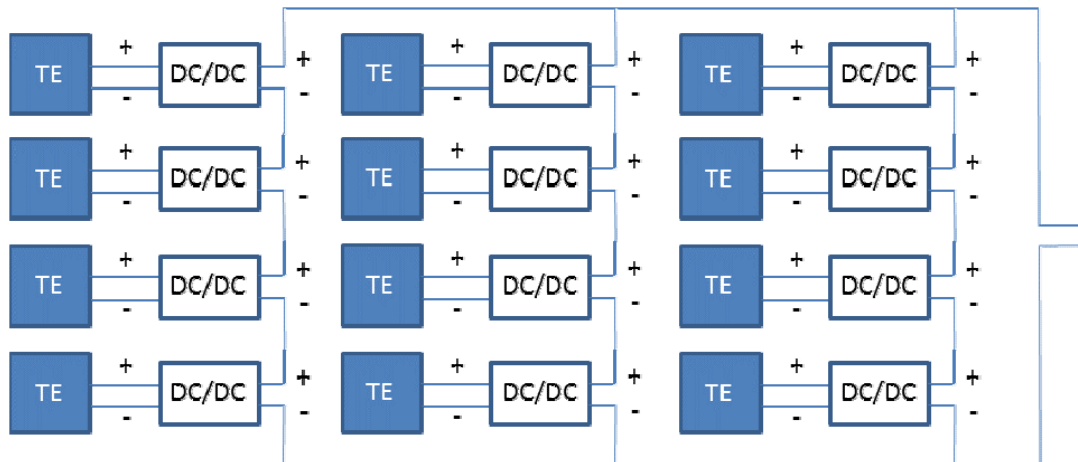


Figur 4.6. Nedre delen av värmerör som omsluter ångledning eller RC-ledning.

Den elektriska implementeringen av termoelektriska element förutsätter en mängd termoelektriska element kopplade både i serie och parallellt samt en till flera DC/DC-omvandlare. I Figur 4.7 och Figur 4.8 syns två inkopplingsalternativ som är de två extremerna gällande användning av DC/DC-omvandlare, en matris med termoelektriska element där enbart en gemensam omvandlare används, och en matris där samtliga element använder en egen omvandlare. Sen finns naturligtvis mellanlägen där en delmängd av elementen delar på en omvandlare. Ju fler omvandlare desto fler komponenter som kan gå sönder, men individuella omvandlare ger också bättre kontroll på varje element och möjlighet att infoga viss automatik gällande vad som ska hända vid exempelvis låg spänning från något element.



Figur 4.7. Inkopplingsschema för en matris av termoelektriska element som ansluter till DC-systemet via en gemensam DC/DC-omvandlare.



Figur 4.8. Inkopplingsschema för en matris av termoelektriska element som ansluter till DC-systemet via individuella DC/DC-omvandlare.

5 Slutsatser

Sammantaget har 10 olika kraftkällor undersökts och i olika grad bedömts som lämpliga, resultatet sammanfattas i Tabell 18.

Tabell 18. Sammanfattning av olika kraftslags lämplighet

√=Lämplig, X=Lämplig under särskilda förutsättningar, -=Ej lämplig					
Kraftslag	Applikation				
	Säkerhetsklassad växelspannings-källa	Säkerhets-klassad likspänningskälla	SBO-kraft liten	SBO-kraft stor	SBO-kraft mobil
Diesel-generator	√	-	√	X	√
Gasturbin	-	-	√	√	X
Ångturbin intern	-	-	X	-	-
Ångturbin extern	X	-	X	-	-
Vattenkraft	X	-	X	X	-
Batterier	-	√	-	-	-
Bränsleceller	-	-	-	-	-
Stirling-motorer	-	-	-	-	-
Termoelektriska element	-	X	-	-	-
Svänghjul	-	-	-	-	-

Av de 10 kraftslagen ses dieselgeneratorer, batterier och i viss mån gasturbiner som konventionell teknik på kärnkraftverken. Så i relation till dem bedöms även eventuella diversifieringsvinster, främst med avseende på yttre händelser.

De kraftslag som bedöms ha stora diversifieringsvinster som säkerhetsklassad växelspanningskälla alternativt SBO-kraft är:

- Ångturbin intern
- Vattenkraft

Det kraftslag som bedöms ha stora diversifieringsvinster som säkerhetsklassad likspänningskälla är:

- Termoelektriska element

De nackdelar dessa kraftslag dras med är:

- Ångturbin intern
 - o Vid stora rörbrott kraftigt minskad effekttillgång
 - o Kräver noggrann analys av lastens utveckling över tid samt effekttillgångens utveckling över tid

- Vattenkraft
 - o Svårt att säkerhetsklassa och svårt att upprätthålla fysiskt skydd
 - o Kräver noggranna analyser och prover av dynamisk prestanda och omkopplingar till nödelförsörjning.
- Termoelektriska element
 - o Kan ej laddas upp när växelspanning är tillgänglig, måste alltid ha tillgänglig värme. Otillgänglig vid kall hård samt vid låg resteffekt.
 - o Krångligt införande

Rapporten har inte beaktat att kraftslag i vissa fall kan kombineras för att ta ut varandras svagheter. Exempel på sådana kombinationer är bränsleceller kombinerat med svänghjul eller batterier kombinerat med termoelektriska element.

De fyra målen med arbetet enligt avsnitt 1.3 anses uppfylla.

Fortsatt arbete utgörs lämpligtvis av mer detaljerade implementationsförslag, men detta bör i så fall göras med ett enskilt block i åtanke, att försöka gå in i mer detalj men samtidigt hålla arbetet generellt för alla block blir inte meningsfullt.

6 Referenser

- 1 Lagen (1984:3) om kärnteknisk verksamhet
- 2 Förordningen (1984:14) om kärnteknisk verksamhet
- 3 SSM (2008), SSMFS 2008:1, Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd om säkerhet i kärntekniska anläggningar
- 4 SSM (2008), SSMFS 2008:12, Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om fysiskt skydd av kärntekniska anläggningar
- 5 SSM (2008), SSMFS 2008:17, Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd om konstruktion och utförande av kärnkraftsreaktorer
- 6 NRC, 10CFR50, Domestic licensing of production and utilization facilities
- 7 NRC (1993), Regulatory Guide 1.9, Selection, design, qualification and testing of emergency diesel generator units used as class 1E on site electric power systems at nuclear power plants, 3 revision
- 8 IEEE (1995), IEEE 387-1995, Standard criteria for diesel-generator units applied as standby power supplies for nuclear power generating stations
- 9 IEEE (2006), IEEE 535-2006, Standard for qualification of class 1E lead storage batteries for nuclear power generating stations
- 10 IEEE (2006), IEEE 650-2006, Standard for qualification of class 1E static battery chargers and inverters for nuclear power generating stations
- 11 IEEE (2004), IEEE 946-2004, IEEE Recommended practice for the design of DC auxiliary power systems for generating systems
- 12 T-boken, version 6
- 13 North American Electric Reliability Center (NERC), Generating Availability Data System, [http://www.nerc.com/pa/RAPA/gads/Pages/Generating-Availability-Data-System-\(GADS\).aspx](http://www.nerc.com/pa/RAPA/gads/Pages/Generating-Availability-Data-System-(GADS).aspx)
- 14 Svenska Kraftnät (2013), (Hämtad 2013-09-23), www.svk.se
- 15 Persson, C., Olsson, J., (2002), Jämförelse mellan olika kraftvärmeteknologier, Svenskt Gastekniskt Center, 2002
- 16 Geir Nevestveit (2013), Siemens
- 17 Fortum (2013), Vattenkraftverk, (Hämtad 2013-09-23), <http://www.fortum.com/countries/se/om-fortum/energi-och-produktion/vattenkraft/vattenkraftverk/pages/default.aspx>
- 18 E.on (2013), Våra vattenkraftverk, (hämtad 2013-09-23), <http://www.eon.se/om-eon/Om-energi/Energikallor/Vattenkraft/Vara-vattenkraftverk-/>

- 19 Caterpillar (2013), Products, (hämtad 2013-09-23)
http://www.cat.com/en_US/products/new/power-systems/electric-power-generation.htmlwww.cat.com
- 20 Wärtsilä (2013), Products, (hämtad 2013-09-23)
<http://www.wartsila.com/en/engines/gensets>
- 21 Cummins Power Systems (2013), Commercial Standby Generators, (hämtad 2013-09-23)
<http://www.powersystems.cummins.com/generators/standby-power-generators.html>
- 22 FG Wilson (2013), Select Power, (hämtad 2013-09-23)
<http://www.fgwilson.com/>
- 23 MTU (2013), Products, Diesel engines overview, (hämtad 2013-09-23),
<http://www.mtu-online.com/mtu/products/diesel-engines-overview/>
- 24 Tage Sunngren (2013), Wärtsilä
- 25 Electric Power Research Institute (EPRI), (2013), Costs of Utility Distributed Generators, 1-10 MW, (hämtad 2013-09-23)
<http://www.publicpower.org/files/Deed/FinalReportCostsofUtilityDistributedGenerators.pdf>
- 26 Trafikförordning (1998:1276)
- 27 Siemens (2013), Siemens gas turbines, (hämtad 2013-09-23),
<http://www.energy.siemens.com/hq/en/mechanical-drives/gas-turbines/>
- 28 General Electric (2013), Products & Services, Gas Turbines – Aeroderivative (hämtad 2013-09-23), http://www.ge-energy.com/products_and_services/products/gas_turbines_aeroderivative/index.jsp
- 29 Alstom (2013), Alstom Power Gas Turbines, (hämtad 2013-09-23)
<http://www.alstom.com/power/gas-power/gas-turbines/>
- 30 Opra Turbines (2013), Products (hämtad 2013-09-23)
<http://www.opra.nl/en/OPRA-WEB---Products---Products/>
- 31 Kawasaki Gas Turbines (2013), Products (hämtad 2013-09-23)
http://www.kawasakigasturbines.com/index.php/our_products/
- 32 Mitsubishi Nuclear Energy Systems (2013), Nuclear services, Gas turbine generator, (hämtas 2013-09-23), (<https://www.mnes-us.com/nuclear-services/gas-turbine-generator>)
- 33 Siemens, Maintenance General Information Power Generation, Dokument-ID 1CS17559
- 34 Kawasaki heavy industries (2013), Products and services, Mobile generator set, (hämtad 2013-09-23)
<http://www.khi.co.jp/english/gasturbine/product/industry/move.html>
- 35 U.S. Energy Information Administration (eia), "Updated Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity Generating Plants", tillgänglig:
<http://www.eia.gov/forecasts/capitalcost/>

- 36 Wacek, Edward, General Electric, Aeroderivative Technology: A more efficient use of gas turbine technology, (hämtad 2013-09-23)
<http://www.worldenergy.org/documents/congresspapers/110.pdf>
- 37 Ringhals AB, R3 Säkerhetstekniska driftförutsättningar, STF
- 38 Analysgruppen vid Kärnkraftsäkerhet och Utbildning AB (2011), "Faktaserien – Hur stänger man av en reaktor", Nummer 49
- 39 Niclas Davidsson, Cleanergy
- 40 Latcovich et al, (2005), Maintenance and Overhaul of Steam Turbines, International Association of Engineering Insurers 38th Annual Conference, Moscow 2005, (hämtad 2013-08-01)
http://www.imia.com/downloads/imia_papers/wgp42_2005.pdf
- 41 Environmental Protection Agency (2008)- Combined Heat and Power Partnership Program, Technology Characterization: Steam Turbines Washington, (hämtad 2013-09-23) tillgänglig:
http://www.epa.gov/chp/documents/catalog_chptech_steam_turbines.pdf
- 42 Energimarknadsinspektionen (2013), Normvärdeslista 2013-03-05, (hämtad 2013-09-23)
http://ei.se/Documents/Forhandsreglering_el/Viktiga_dokument/Normvar_deslista_2013-03-05.xls
- 43 Vattenfall (2013), Dalälven (hämtad 2013-09-23),
http://corporate.vattenfall.se/sv/file/dalalvensvpdf_11336652.pdf
- 44 D.M. Rowe (2012), Thermoelectrics and its Energy Harvesting – Materials, Preparation, and Characterization in Thermoelectrics, CCR Press
- 45 D.M. Rowe (2012), Thermoelectrics and its Energy Harvesting – Modules, Systems, and Applications in Thermoelectrics, CCR Press
- 46 Wikipedia (2013), (hämtad 2013-09-23),
http://en.wikipedia.org/wiki/Voyager_1
- 47 Riffat, S.B., Ma, X., (2003), Thermoelectrics – a review of present and potential applications, Applied Thermal Engineering, 23:8, 913–935
- 48 Global Thermoelectric (2013), (hämtad 2013-09-23),
<http://www.globalte.com>
- 49 Kundur, Prabha, (1994), Power System Stability and Control, McGraw-Hill
- 50 Bolund, B., Bernhoff, H., Leijon, M., (2005), Flywheel energy and power storage systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews 11 : 235–258
- 51 Hearn, C. S., Lewis, M.C., Hebner, R.E., (2012), Sizing Advanced Flywheel Energy Storage, Center of Electromechanics, University of Texas at Austin (hämtad 2013-09-23)
<http://www.utexas.edu/research/cem/images/GCEP%20Program.pdf>
- 52 Ny Teknik (2013), (hämtad 2013-09-23),
http://www.nyteknik.se/nyheter/fordon_motor/bilar/article3687505.ece

- 53 European Fusion Development Agreement (EFDA), (2013), Power supply and flywheels, (hämtad 2013-09-23), <http://www.efda.org/fusion/jet-tech/jet%E2%80%99s-flywheels/>
- 54 Beacon Power, Flywheel Energy Storage System – Technical Data Sheet, (hämtad 2013-09-23), http://www.beaconpower.com/files/FESS_Tech_Data_Sheet.pdf
- 55 U.S. department of energy (2013), Energy efficiency and renewable energy, Fuel Cells, (hämtad 2013-09-23), http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_challenges.html
- 56 U.S. department of energy (2001), Module 4: Fuel cell engine technology, (hämtad 2013-09-23), http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm04r0.pdf
- 57 Reddy, Thomas B., (2011), Linden's Handbook of Batteries, Edition 4.
- 58 Trojan Battery (2013), Renewable energy product specification guide, (hämtad 2013-09-23), http://www.trojanbatteryre.com/pdf/TRJN0171_REProdSpecGuide.pdf
- 59 McDowall, Jim, (2005), Lies, damned lies and statistics: the statistical treatment of battery failures, Battcon 2005, (hämtad 2013-09-23), <http://www.battcon.com/PapersFinal2005/McDowallPaper2005.pdf>
- 60 Mc Dowall, J., Lippert, M., (2010), Sophistication versus simplicity – system design considerations for lithium-ion batteries in standby power applications, Battcon 2010, (hämtad 2013-09-23), http://www.battcon.com/PapersFinal2010/McDowallPaper2010Final_6.pdf
- 61 Krohn, P., Nygren B., Beyer, T., (2007), Field experience from the world's largest lithium-ion battery, Battcon 2007, (hämtad 2013-09-23), <http://www.battcon.com/PapersFinal2007/KrohnPaper2007.pdf>
- 62 Arora, A., Harris, j., Pinnangudi, B., Lithium ion batteries for stationary applications: a safety perspective, Battcon 2011, (hämtad 2013-09-23), http://www.battcon.com/PapersFinal2011/AroraPaperDONE2011_17.pdf
- 63 SAFT Batteries (2013), (hämtad 2013-09-23), <http://www.saftbatteries.com/solutions/products/battery-search>
- 64 Servicepoolen (2013), Stationära batterier, (hämtad 2013-09-23), <http://www.servicepoolen.com/batterier.shtml>
- 65 Enersys (2013), Reserve power, Products, (hämtad 2013-09-23), <http://www.enersysreservepower.com/products.asp>
- 66 Leksell, M., Krohn, P., Nygren, B., Beyer, T., Long-term field experience with a stationary Lithium-ion battery in a sub-station application, Battcon 2012, (hämtad 2013-09-23), <http://www.battcon.com/PapersFinal2012/Mats%20Leksell%20-%20long%20term%20field%20experience%20with%20a%20stationary%20lithium%20ion%20battery%20in%20a%20sub%20station%20app.pdf>

- 67 Lansburg, S., (2001), Ni-Cd field experience confirms low maintenance and their operating characteristics in telecom applications, Intelec 2001.
- 68 IEEE (2002), IEEE 450-2002, Recommended practice for maintenance, testing, and replacement of vented lead-acid batteries for stationary applications
- 69 Portnoy, Meir, (2011), Are lithium ion batteries on the way to replace lead acid batteries in UPS systems?, UPSONNet Newsletter, (hämtad 2013-09-23), <http://www.upsonnet.com/Newsletter2011/July-Pros-and-Cons-Li-Ion-v-VRLA-UPS-Battery.html>
- 70 O'Hayre, Ryan P., Cha, Suk-Won, Colella, Whitney G., Prinz, Fritz B., (2009), Fuel Cell Fundamentals, Second Edition, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- 71 Ballard (2013), Fuel cell products, (hämtad 2013-09-23), <http://www.ballard.com/fuel-cell-products/>
- 72 Fuel cell energy solutions (2013), Products and services, (hämtad 2013-09-23), <http://www.fc-es.de/products-services/products/?lang=en>
- 73 Ceramic Fuel cells (2013), Products, Gennex fuel cell module, (hämtad 2013-09-23), [http://www.cfcl.com.au/Assets/Files/Gennex_Brochure_\(EN\)_Apr-2010.pdf](http://www.cfcl.com.au/Assets/Files/Gennex_Brochure_(EN)_Apr-2010.pdf)
- 74 Clear edge power power, Energy solutions, (hämtad 2013-09-23), <http://www.clearedgepower.com/energy/>
- 75 Powercell (2013), (hämtad 2013-09-23), <http://www.powercell.se/products/datasheets/>
- 76 Cellkraft AB (2013), Fuel cells, Products, (hämtad 2013-09-23), <http://cellkraft.se/fuelcells/products-2/>
- 77 Akkaynak Derya, (2005), Use of Fuel Cells for Improving On-Site Emergency Power Availability and Reliability at Nuclear Power Plants, Massachusetts Institute of Technology, (hämtad 2013-09-23), <http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/32444/61719553.pdf?sequence=1>
- 78 Fuel cell markets (2013), (hämtad: 2013-09-23), http://www.fuelcellmarkets.com/fuel_cell_markets/
- 79 National fuel cell research center (2013), Fuel cell components, (hämtad 2013-09-23), http://www.nfcr.c.uci.edu/2/FUEL_CELL_INFORMATION/FCexplained/FC_Comp.aspx
- 80 Swedegas (2013), hämtad 2013-09-23), <http://www.swedegas.se/gas/naturgas>
- 81 Minassians, A., D., (2007), Stirling engines for low-temperature solar-thermal-electric power generation, University of California, (hämtad 2013-09-23) <http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2007/EECS-2007-172.pdf>

- 82 European safety regulation group (ENSREG), (2011), EU Stress Tests Specifications, (hämtad 2013-09-23)
http://www.ensreg.eu/sites/default/files/EU%20Stress%20tests%20specifications_1.pdf
- 83 NRC (2013), Rulemaking for Station Blackout Mitigation Strategies, (hämtad 2013-09-23) 2013-09-23:
<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1307/ML13077A453.pdf>
- 84 Tellurex, G2-56-0375 Thermoelectric Module Specifications, (hämtad 2013-09-23), <http://www.tellurex.com/pdf/G2-56-0375-Specifications.pdf>
- 85 TEG Power (2013), (hämtad 2013-09-23), <http://tegpowers.com/pro7.htm>, 2013-09-23
- 86 National Fuel Cell Research Center (2013), Fuel cells explained / challenges, (hämtad 2013-10-30), http://www.nfrcr.edu/2/FUEL_CELL_INFORMATION/FCexplained/challenges.aspx

Bilaga 1 - Föreskrifter

1 SSMFS 2008:1 - 3 kap. Anläggningens konstruktion

1 §

En kärnteknisk anläggning ska vara konstruerad så att den har

- tålighet mot felfunktioner hos komponenter och system,
- tillförlitlighet och driftstabilitet, samt
- tålighet mot sådana händelser eller förhållanden som kan påverka anläggningens barriärer eller säkerhetsfunktioner.

Anläggningen ska vidare vara konstruerad på ett sådant sätt att de system, komponenter och anordningar som behövs med hänsyn till säkerheten är möjliga att underhålla, kontrollera och prova. Konstruktionen ska så långt som det är möjligt och rimligt underlätta strålskyddet och det fysiska skyddet. Vid konstruktionen ska dessutom säkerhet och strålskydd vid en framtida avveckling av anläggningen beaktas.

Konstruktionen av kärnbränsle ska vara anpassad till den specifika reaktor-anläggning där kärnbränslet används, till anordningar för hantering och förvaring vid reaktor-anläggningen och till de befintliga eller planerade system som används för transport, mellanlagring, bearbetning och slutförvaring av använt kärnbränsle.

Ytterligare bestämmelser om konstruktion av kärnkraftsreaktorer finns i Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter (SSMFS 2008:17) om konstruktion och utförande av kärnkraftsreaktorer.

2 §

Konstruktionsprinciper och konstruktionslösningar ska vara beprövade under förhållanden som motsvarar dem som kan förekomma under den avsedda användningen i en anläggning. Om detta inte är möjligt eller rimligt ska konstruktionsprinciperna och konstruktionslösningarna vara utprovade eller utvärderade på ett sätt som visar att de har den tålighet, tillförlitlighet och driftstabilitet som behövs med hänsyn till de-ras funktion och betydelse för anläggningens säkerhet.

3 §

En anläggnings konstruktion ska vara anpassad till personalens förmåga att på ett säkert sätt kunna övervaka och hantera anläggningen samt de driftstörningar och haverier som kan inträffa. Konstruktionslösningar ska vara utvärderade i dessa avseenden.

Närmare bestämmelser om kontrollrumsutformning samt reserv-övervakningsplats för kärnkraftsreaktorer finns i Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter (SSMFS 2008:17) om konstruktion och utförande av kärnkraftsreaktorer.

4 §

Byggnadsdelar, system, komponenter och anordningar ska vara konstruerade, tillverkade, monterade, kontrollerade och provade enligt krav som är anpassade till deras funktion och betydelse för anläggningens säkerhet. Ett klassningssystem ska tillämpas för styrning av kraven på konstruktion, tillverkning, installation samt kvalitetssäkringsåtgärder.

Ytterligare bestämmelser om konstruktion och utförande samt om in-delning i säkerhetsklasser för kärnkraftsreaktorer finns i Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter (SSMFS 2008:17) om konstruktion och utförande av kärnkraftsreaktorer.

2 SSMFS 2008:17

4§

Vid utformningen av reaktorns djupförsvar ska följande konstruktionsprinciper tillämpas i den omfattning som är möjlig och rimlig:

- (a) Enkelhet och tålighet i uppbyggnaden av säkerhetssystemen.
- (b) Redundans, inklusive diversifiering samt fysisk och funktionell separation i uppbyggnaden av säkerhetsfunktionerna.
- (c) Automatisk styrning eller passiv funktion vid nödvändiga aktiveringar och driftomläggningar av säkerhetsfunktionerna.
- (d) Fel i säkerhetsklassad utrustning leder till ett för säkerheten acceptabelt läge.
- (e) Fel i driftklassad utrustning får inte påverka funktionen hos utrustning med säkerhetsfunktion.
- (f) Vid delning av säkerhetssystem mellan reaktorer får ett fel i en av reaktorerna inte påverka möjligheten att genomföra avställning och resteffekt kylning av andra reaktorer.

Manuella åtgärder vid nödvändiga aktiveringar och driftomläggningar av reaktorns säkerhetsfunktioner får tillämpas endast om personalen ges tillräcklig tid - rådrum - för att genomföra åtgärderna på ett säkert sätt

§10

Vid konstruktion, tillverkning, installation, idrifttagning, drift och underhåll av säkerhetssystem ska rimliga tekniska och administrativa åtgärder vidtas för att motverka uppkomst av fel med gemensam orsak

Allmänna råd till §10

Med tekniska åtgärder avses åtgärder för diversifiering. En lämplig och rimlig diversifiering bör tillämpas vid konstruktionen av säkerhetsfunktionerna enligt 3 §, med anpassade analysförutsättningar och acceptanskriterier, för händelser till och med händelseklassen ej förväntade händelser, där rörbrotten dock kan undantas. Vid utformningen av en sådan diversifiering kan den befintliga elförsörjningen av anläggningens samtliga system tillgodoräknas

§11

För att motverka samtidig utslagning av redundanta delar av säkerhetssystem, ska kärnkraftsreaktorn vara konstruerad så att de redundanta delarna och dess stödfunktioner har en tillräcklig fysisk och funktionell separation. Graden av separation ska bestämmas med utgångspunkt från konsekvenserna i anläggningen av de inledande händelser som medför att säkerhetssystemet behöver tas i bruk.

3 10CFR50.63

§ 50.63 Loss of all alternating current power.

(a) Requirements. (1) Each light-water-cooled nuclear power plant licensed to operate under this part, each light-water-cooled nuclear power plant licensed under subpart C of 10 CFR part 52 after the Commission makes the finding under § 52.103(g) of this chapter, and each design for a light-water-cooled nuclear power plant approved under a standard design approval, standard design certification, and manufacturing license under part 52 of this chapter must be able to withstand for a specified duration and recover from a station blackout as defined in § 50.2. The specified station blackout duration shall be based on the following factors:

- (i) The redundancy of the onsite emergency ac power sources;
- (ii) The reliability of the onsite emergency ac power sources;
- (iii) The expected frequency of loss of offsite power; and
- (iv) The probable time needed to restore offsite power.

(2) The reactor core and associated coolant, control, and protection systems, including station batteries and any other necessary support systems, must provide sufficient capacity and capability to ensure that the core is cooled and appropriate containment integrity is maintained in the event of a station blackout for the specified duration. The capability for coping with a station blackout of specified duration shall be determined by an appropriate coping analysis. Licensees are expected to have the baseline assumptions, analyses, and related information used in their coping evaluations available for NRC review.

(b) Limitation of scope. Paragraph (c) of this section does not apply to those plants licensed to operate prior to July 21, 1988, if the capability to withstand station blackout was specifically addressed in the operating license proceeding and was explicitly approved by the NRC.

(c) Implementation. (1) Information Submittal. For each light-water-cooled nuclear power plant licensed to operate on or before July 21, 1988, the licensee shall submit the information defined below to the Director of the Office of Nuclear Reactor Regulation by April 17, 1989. For each light-water-cooled nuclear power plant licensed to operate after July 21, 1988, but before September 27, 2007, the licensee shall submit the information defined in this section to the Director of the Office of Nuclear Reactor Regulation, by 270 days after the date of license issuance. For each light-water-cooled nuclear power plant operating license application submitted after September 27, 2007, the applicant shall submit the information defined below in its final safety analysis report.

(i) A proposed station blackout duration to be used in determining compliance with paragraph (a) of this section, including a justification for the selection based on the four factors identified in paragraph (a) of this section;

(ii) A description of the procedures that will be implemented for station blackout events for the duration determined in paragraph (c)(1)(i) of this section and for recovery therefrom; and

(iii) A list of modifications to equipment and associated procedures, if any, necessary to meet the requirements of paragraph (a) of this section, for the specified station blackout duration determined in paragraph (c)(1)(i) of this section, and a proposed schedule for implementing the stated modifications.

(2) Alternate ac source: The alternate ac power source(s), as defined in § 50.2, will constitute acceptable capability to withstand station blackout provided an analysis is performed which demonstrates that the plant has this capability from onset of the station blackout until the alternate ac source(s) and required shutdown equipment are started and lined up to operate. The time required for startup and alignment of the alternate ac power source(s) and this equipment shall be demonstrated by test. Alternate ac source(s) serving a multiple unit site where onsite emergency ac sources are not shared between units must have, as a minimum, the capacity and capability for coping with a station blackout in any of the units. At sites where onsite emergency ac sources are shared between units, the alternate ac source(s) must have the capacity and capability as required to ensure that all units can be brought to and maintained in safe shutdown (non-DBA) as defined in § 50.2. If the alternate ac source(s) meets the above requirements and can be demonstrated by test to be available to power the shutdown buses within 10 minutes of the onset of station blackout, then no coping analysis is required.

(3) Regulatory Assessment: After consideration of the information submitted in accordance with paragraph (c)(1) of this section, the Director, Office of Nuclear Reactor Regulation, will notify the licensee of the Director's conclusions regarding the adequacy of the proposed specified station blackout duration, the proposed equipment modifications and procedures, and the proposed schedule for implementing the procedures and modifications for compliance with paragraph (a) this section.

(4) Implementation Schedule: For each light-water-cooled nuclear power plant licensed to operate on or before June 21, 1988, the licensee shall, within 30 days of the notification provided in accordance with paragraph (c)(3) of this section, submit to the Director of the Office of Nuclear Reactor Regulation a schedule commitment for implementing any equipment and associated procedure modifications necessary to meet the requirements of paragraph (a) of this section. This submittal must include an explanation of the schedule and a justification if the schedule does not provide for completion of the modifications within two years of the notification provided in accordance with paragraph (c)(3) of this section. A final schedule for implementing modifications necessary to comply with the requirements of paragraph (a) of this section will be established by the NRC staff in consultation and coordination with the affected licensee.

[53 FR 23215, June 21, 1988 as amended at 63 FR 50480, Sept. 22, 1998; 72 FR 49501, Aug. 28, 2007]

4 10CFR50.2

Alternate ac source means an alternating current (ac) power source that is available to and located at or nearby a nuclear power plant and meets the following requirements:

- (1) Is connectable to but not normally connected to the offsite or onsite emergency ac power systems;
- (2) Has minimum potential for common mode failure with offsite power or the onsite emergency ac power sources;
- (3) Is available in a timely manner after the onset of station blackout; and
- (4) Has sufficient capacity and reliability for operation of all systems required for coping with station blackout and for the time required to bring and maintain the plant in safe shutdown (non-design basis accident).

5 10CFR50 – Appendix A, GDC – Criterion 17-18

Criterion 17—Electric power systems. An onsite electric power system and an offsite electric power system shall be provided to permit functioning of structures, systems, and components important to safety. The safety function for each system (assuming the other system is not functioning) shall be to provide sufficient capacity and capability to assure that (1) specified acceptable fuel design limits and design conditions of the reactor coolant pressure boundary are not exceeded as a result of anticipated operational occurrences and (2) the core is cooled and containment integrity and other vital functions are maintained in the event of postulated accidents.

The onsite electric power supplies, including the batteries, and the onsite electric distribution system, shall have sufficient independence, redundancy, and testability to perform their safety functions assuming a single failure.

Electric power from the transmission network to the onsite electric distribution system shall be supplied by two physically independent circuits (not necessarily on separate rights of way) designed and located so as to minimize to the extent practical the likelihood of their simultaneous failure under operating and postulated accident and environmental conditions. A switchyard common to both circuits is acceptable. Each of these circuits shall be designed to be available in sufficient time following a loss of all onsite alternating current power supplies and the other offsite electric power circuit, to assure that specified acceptable fuel design limits and design conditions of the reactor coolant pressure boundary are not exceeded. One of these circuits shall be designed to be available within a few seconds following a loss-of-coolant accident to assure that core cooling, containment integrity, and other vital safety functions are maintained.

Provisions shall be included to minimize the probability of losing electric power from any of the remaining supplies as a result of, or coincident with, the loss of power generated by the nuclear power unit, the loss of power from the transmission network, or the loss of power from the onsite electric power supplies.

Criterion 18—Inspection and testing of electric power systems. Electric power systems important to safety shall be designed to permit appropriate periodic inspection and testing of important areas and features, such as wiring,

insulation, connections, and switchboards, to assess the continuity of the systems and the condition of their components. The systems shall be designed with a capability to test periodically (1) the operability and functional performance of the components of the systems, such as onsite power sources, relays, switches, and buses, and (2) the operability of the systems as a whole and, under conditions as close to design as practical, the full operation sequence that brings the systems into operation, including operation of applicable portions of the protection system, and the transfer of power among the nuclear power unit, the offsite power system, and the onsite power system.

ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS - ELFORSK - AB

Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 25 30, Telefax: 08-677 25 35
www.elforsk.se