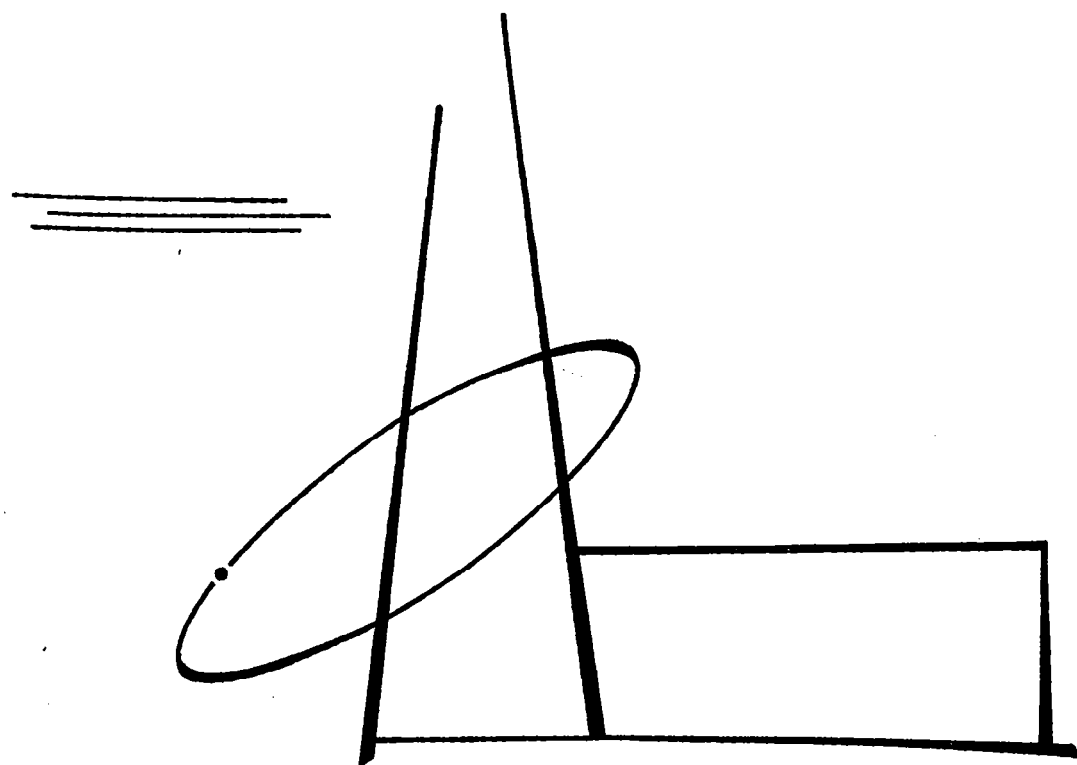


ELSAM-KRAFTIMPORT UNDERSØGELSEN

JUNI 1965



ELSAM-KRAFTIMPORT UNDERSØGELSEN

- EN ANALYSE AF

KRAFTVÆRKSUDBYGNINGEN i 1970erne

Undersøgelsen omfatter følgende rapporter:

KRAFTVÆRKSUDBYGNINGEN i 1970erne

KOORDINATIONSUDVALGET

PROGNOSEGRUPPEN

FJERNVARMESGRUPPEN

EFFEKTGRUPPEN

KRAFTVÆRKSGRUPPEN

BRÆNDSLSGRUPPEN

- There is no form of power
as expensive as no power.

H. J. Bhabha.

FORORD

=====

Denne rapport udgør en del af den samlede ELSAM/Kraftimportundersøgelse vedrørende kraftværksudbygningen i 1970'erne. Den behandler effektforholdene inden for undersøgelsesperioden og er udarbejdet af en arbejdsgruppe med følgende sammensætning:

Afdelingsingeniør H. Buhl, IFV.
Afdelingsingeniør J. Ehlert, NESA.
Direktør E. L. Jakobsen, ELSAM (formand).
Civilingeniør P. F. Bach Jensen, ELSAM (sekretær).
Civilingeniør S. Kruse, IFV.
Civilingeniør C.-E. Lundgren, Danatom.
Overingeniør H. V. Tornøe, Københavns Belysningsvæsen.

Herudover har følgende bidraget til gruppearbejdet:

Civilingeniør J. Rich. Hansen, NESA.
Civilingeniør E. Lassen, Danatom.
Civilingeniør J. Chr. Hansen, NESA.

Gruppen har afholdt 16 møder inden for perioden 3. marts 1964 - 21. april 1965.

Rapporten er opdelt i en tekstdel (I) og en bilagssamling (II).

INDHOLDSFORTEGNELSE

=====

Side

Nogle definitioner	IV
Enhedens driftssikkerhed	IV
Systemets produktionssikkerhed	IV
KAPITEL 1 EFFEKTARBEJDSGRUPPENS OPGAVER	1
1.1 Styringskomitéens opgaveformulering	1
1.2 Resumé af gruppens arbejde	1
KAPITEL 2 PÅLIDELIGHEDSTAL	4
Resumé	4
2.1 Alment	5
2.2 Driftsstatistik	5
2.3 Indsamlede resultater	6
2.4 Valg af undersøgelsens havarital	17
KAPITEL 3 PRODUKTIONSSIKKERHED	19
Resumé	19
3.1 Alment	19
3.2 Ydeevnerepræsentation	20
3.3 Sammenstilling af ydeevne og belastning - Risikoindeks	25
3.4 Program til beregning af risikoindeks	30
3.5 Sammenhæng mellem middelværdi, spredning, havarital og risikoindeks	30
3.6 Risikoindeksets afhængighed af systemets parametre	33
KAPITEL 4 RESERVEKRAV	39
Resumé	39
4.1 Tilladeligt risikoindeks	39
4.2 Tilfældige belastningssvingninger	40
4.3 Prognosens pålidelighed	43
4.4 Forsinket aflevering af nyanlæg	47
4.5 Samarbejdslinier	48
Alment	48
ELSAM	50
KRAFTIMPORT	53
Storebæltsforbindelsen	54
KAPITEL 5 ARBEJDETS FORLØB OG RESULTATER	55
Resumé	55
5.1 Beregning af fordelingsfunktioner	55
5.2 Beregning af risikoindeks for opstillede udbygningsplaner	56
5.3 Diskussion af resultaterne	58

LITTERATUROVERSIGT

62

Appendix Repræsentation af modtryksdrift på KB's værker

64

Indledning

64

Beregningsmodel

64

Beregningerne

65

FIGURER OG TABELLER: SE DEL II

Nogle definitioner

på begreber, som anvendes ved beregning
af et systems nødvendige reserveeffekt.

Enhedens driftssikkerhed

Som grundlag for en karakterisering af en enheds driftssikkerhed foretages en tidsmæssig inddeling efter enhedens driftstilstand:

t_{drift}	t_{res}	t_{hav}	t_{rep}	t_{rev}
t_{total}				

- t_{total} : antal timer, som omfattes af rådighedsstatistikken.
 t_{drift} : antal timer i normal drift.
 t_{res} : antal timer i reserve.
 t_{hav} : antal timer, hvor enheden tages ud af drift til uforudsete reparationer, som ikke kan udsættes til næste lavlastperiode.
 t_{rep} : antal timer, som anvendes til reparationer, der har kunnet udsættes til lavlastperioder.
 t_{rev} : antal timer, som er anvendt til planlagte eftersyn.

Heraf beregnes følgende karakteristiske størrelser:

$$\text{Havarital} \quad h = \frac{(t_{\text{hav}} + t_{\text{rep}})}{t_{\text{drift}} + (t_{\text{hav}} + t_{\text{rep}})} \quad (\text{Forced Outage Rate})$$

$$\text{Reparationstal rep} = \frac{t_{\text{rep}}}{t_{\text{drift}} + (t_{\text{hav}} + t_{\text{rep}})}$$

$$\text{Pålidelighedstal } p = 1 - h \quad (\text{Reliability})$$

$$\text{Rådighedstal} \quad R = \frac{t_{\text{drift}} + t_{\text{res}}}{t_{\text{total}}} \quad (\text{Operating Availability})$$

Systemets produktionssikkerhed

Ud fra oplysninger om systemets struktur og enhedernes pålidelighed beregnes ved hjælp af de for almindelig sandsynlighedsregning gældende regler:

Ydeevnens fordelingsfunktion:

Som funktion af en effekt aflæses sandsynligheden for, at ydeevnen er større end eller lig med denne effekt.

Belastningens fordelingsfunktion:

Som funktion af en effekt aflæses sandsynligheden for, at belastningen er større end eller lig med denne effekt.

Belastningen udgør i virkeligheden en todimensional fordeling. Dels skal beregningerne omfatte et vist tidsrum, inden for hvilket belastningen varierer, og dels er belastningen på et givet tidspunkt afhængig af en række ydre faktorer, som ikke umiddelbart kan forudbestemmes. I undersøgelsen er de to variable skilt ad, hvorfor der arbejdes med en fordelingsfunktion for belastningens variation inden for et tidsrum og en fordelingsfunktion for den prognoserede belastning på et givet tidspunkt.

Fordelingsfunktionen for et tidsrum fremkommer ved, at belastningsvarighedskurvens tidsakse omregnes til relativ tid (per unit).

Sikret effekt:

Af ydeevnens fordelingsfunktion aflæses ud for en vedtagen sandsynlighed den tilsvarende effekt. En "sikret" effekt er således altid knyttet til én sandsynlighed.

Risikoindeks:

Ved kombination af ydeevnens fordelingsfunktion med belastningens fordelingsfunktion for et tidsrum beregnes sandsynligheden for, at man inden for dette tidsrum vil have utilstrækkelig disponibel effekt.

KAPITEL 1 EFFEKTARBEJDSGRUPPENS OPGAVE

=====

1.1 Styringskomitéens opgaveformulering

Ifølge Styringskomitéens program for ELSAM-KRAFTIMPORT-undersøgelsen vedrørende den fremtidige kraftværksudbygning har Effektarbejdsgruppen fået til opgave at fastlægge krav om forsyningssikkerheden, at vurdere enhedernes pålidelighed samt at sammenligne forsyningssikkerheden i de af undersøgelsens Koordinationsudvalg opstillede udbygningsplaner. Hovedtrækkene i programmet for Effektarbejdsgruppen er blevet givet således:

Ved sammenligning mellem de forskellige strukturer for udbygningen må det forudsættes, at disse indebærer samme sikkerhed for effektlevering. Dette kan opnås ved, at en ny enheds størrelse eller idriftsætnings-tidspunkt bestemmes ud fra et opstillet kriterium for pålideligheden af elforsyningen. - En bearbejdelse af historiske data kan sammen med erfaringer herhjemme og i udlandet give en vis rettesnor for valget af kriterium.

Der må fastsættes pålidelighedstal for alle betragtede enheder, konventionelle som nukleare. Materialet hertil er endnu for spinkelt her i landet, hvorfor erfaringsmateriale fra udlandet må indsamles og benyttes.

Samarbejdsliniens værdi som reserve må endvidere vurderes, og disse må tildeles pålidelighedstal.

Når de fornødne forudsætninger er gjort, kan den nødvendige installerede effekt til et givet tidspunkt beregnes. Herunder kan hensyn tages til revision af enhederne.

1.2 Resumé af gruppens arbejde

Effektgruppen har gennem sit arbejde fremskaffet det nødvendige grundlag for, at udbygningsstrukturer med vidt forskellig karakter og opbygning kan opstilles på en sådan måde, at man uanset forskellige anlægstyper og betydelige variationer i maskinstørrelser tilfredsstiller et valgt krav til minimal produktionssikkerhed.

Som mål for produktionssikkerheden er anvendt begrebet "risikoindeks", der giver sandsynligheden for, at den disponible maskineffekt inden for et år vil være utilstrækkelig. Det har været en del af gruppens arbejde at fastlægge en nøjagtig definition af risikoindekset og udlede en metode til dets beregning. Risikoindekset er en funktion af produktionsanlæggenes pålidelighed, antallet af maskinenheder samt størrelsen af disse enheder. Endvidere afhænger et "risikoindeks" af belastningens størrelse og variation.

Hvis man søger begrebet risikoindeks sat i relation til mere kendte størrelser, finder man, at risikoindekset udtrykker forholdet mellem den sandsynlige tid, hvor aflastning må finde sted, og totaltiden. Et risikoindeks på 10^{-4} kan derfor tydes således, at den sandsynligste tid, hvor belastningen er større end ydeevnen, er ca. 1 time ud af 10^4 timer.

Som kriterium for størrelsen af den nødvendige maskinreserve har det været nødvendigt at bestemme en øvre grænse for risikoindekset. Denne grænse bør vælges ud fra økonomiske og samfundsmæssige overvejelser, men dette har ikke vist sig gennemførligt. Man har til belysning af problemet beregnet risikoindekser for danske forsyningsområder i forløbne år. Disse beregninger har ført til det skøn, at et risikoindeks på $2 \cdot 10^{-4}$ vil være et fornuftigt kriterium. Overholdelsen af dette risikoindeks skal sikre, at undersøgelsens udbygningsstrukturer er lige gode med hensyn til produktionssikkerhed. Der vil herhjemme og fra udlandet blive indsamlet statistisk materiale til nærmere belysning af problemet. Man håber derved at kunne reducere usikkerheden omkring begrebet risikoindeks, og først når et mere omfattende erfaringsmateriale foreligger, vil man kunne udarbejde regler for fastlæggelse af risikoindekset.

For at kunne beregne et systems produktionssikkerhed må man som nævnt kende pålideligheden af systemets enkelte komponenter, i det aktuelle tilfælde kedler og turbogeneratorer, idet der for andre anlægsdele ikke er taget hensyn til driftssikkerheden i denne undersøgelse.

En enheds pålidelighed karakteriseres ved et pålidelighedstal (jvf. definition side IV). Effektgruppen har gennemgået en række udenlandske og danske havaristatistikker og har fundet havarital på 2 % for blokanlæg i USA og på 6,5 - 9,5 % for blokanlæg i England, Frankrig og Vesttyskland, svarende til pålidelighedstallene henholdsvis 0,98 og 0,935 - 0,905. Her i landet foreligger kun oplysninger om blokanlæg på Asnæsværket, der har et havarital på 5,6 % (pålidelighedstal 0,944). For værker med dampsamler har man fundet havarital på 4,5 - 8 % for kedelanlæg og på 4,5 - 6,7 % for turbineanlæg.

På grundlag af disse oplysninger har Effektgruppen valgt at ansætte pålidelighedstal for fremtidige blokanlæg til 0,93. For anlæg med dampsamler er for såvel kedler som turbiner anvendt pålideligheden 0,95, idet de eksisterende værker, der i dag har en lidt dårligere pålidelighed, i de fremtidige strukturer vil være reduceret til reserve- og spidsbelastningsanlæg og derfor vil være udsat for færre havarier.

For nukleare enheder foreligger endnu kun sparsomme havaristatistikker, men under indtryk af den omhu, der lægges for dagen ved planlægning og drift af disse værker, er der næppe rimelig grund til at vente en ringere pålidelighed af disse anlæg end af konventionelle kraftværker, og Effektgruppen har derfor vedtaget at benytte pålideligheden 0,93 også for nukleare enheder. Herved opnås den umiddelbare fordel, at det ikke i beregningen af risikoindeks er nødvendigt at skelne mellem konventionelle og nukleare enheder.

Til ELSAM-Kraftimport-undersøgelsen er der af Koordinationsudvalget opstillet en række udbygningsplaner. For hver af disse har Effektgruppen kontrolleret produktionssystemets sikkerhed ved at beregne et risikoindeks for hvert år, der omfattes af undersøgelsen, og - hvor det har været nødvendigt - korrigeret udbygningen, således at den fastsatte minimalproduktions-sikkerhed stort set blev opnået.

Til disse beregninger, som er foretaget på cifferregnemaskine, er anvendt de før nævnte pålidelighedstal samt hvert års belastningsvarighedskurve, der er fastlagt ved, at alle punkter på en karakteristisk varighedskurve er multipliceret med en sådan konstant, at årets maksimum har fået den værdi, som er angivet i den forudsatte prognose for maksimalbelastning.

I Effektgruppens reserveberegninger er der kun taget hensyn til prognoseusikkerheden ved, at man har fulgt den øvre grænse af det variationsområde, som Prognosegruppen har angivet for den fremtidige belastning. Effektgruppen har dog foretaget en vurdering af prognoseringens betydning for

reserven. Det er vist (i afsnit 4.2), at i den daglige driftstilrettelæggelse kan fejlforudsigelser af belastningen under visse forhold udgøre en større usikkerhed for produktionssikkerheden end maskinhavarier. Også ved den mere langsigtede planlægning kan en fejlprognosering (afsnit 4.3) udgøre et væsentligt usikkerhedsmoment; selv ved en prognosering over så kort tid som 5 år må der regnes med muligheden for en betydelig fejl på resultatet, idet man har fundet en spredning på 7 % ved betragtning af historiske forhold. Dette forhold er af stor betydning, særligt for udbygningsplaner med små reserveprocenter.

Udlandsforbindelsernes reservemæssige værdi har været genstand for en række overvejelser, og man har i undersøgelsen forudsat, at udlandsforbindelserne udbygges svarende til de krav, som valg af maskinstørrelse medfører. Hvorvidt en sådan udbygning af udlandsforbindelserne er mulig i hele den betragtede periode, har ikke været nærmere overvejet, ligesom man heller ikke har medtaget en undersøgelse af, hvilke krav den forudsatte udbygning af udlandsforbindelserne vil medføre for samkøringspartnerne.

En forbindelse over Storebælt har været inddraget i overvejelserne, men vil med de forudsatte kraftige udbygninger af udlandsforbindelserne kun få betydning i forbindelse med en koordineret dansk udbygning med meget store enheder. Det er dog gruppens opfattelse, at spørgsmålet om en forbindelse over Storebælt må tages op til nærmere overvejelse som en separat undersøgelse, hvor man går nærmere ind i spørgsmålet om udlandsforbindelsernes værdi sammenlignet med værdien af en forbindelse over Storebælt.

Resultatet af gruppens arbejde fremgår af bilagene 48-56, men i øvrigt skal fremhæves bilag 21, der for et system uden udlandsforbindelse viser den nødvendige reserveeffekt som funktion af maskinstørrelsen ved lige store maskiner og beregnet for risikoindeks 10^{-3} , 10^{-4} og 10^{-5} , idet man har angivet havaritallet som parameter. Med et valgt havarital på 7 % og et risikoindeks på 10^{-4} vil der ved en maskinstørrelse på 10 % af den installerede effekt kræves en reserveeffekt på 50 %. Forøges risikoindeks til 10^{-3} , vil en maskinstørrelse på 10 % af installeret effekt ved et havarital på 7 % kræve en installeret reserveeffekt på 27 %, og endelig vil man ved et risikoindeks på 10^{-5} og maskinstørrelse 5 % af installeret effekt have et reserveeffektkrav på 38 % ved et havarital på 7 %. De her refererede krav til reserveeffekt i forhold til risikoindeks viser, hvilken kraftig indflydelse valget af risikoindeks får på den nødvendige udbygningsgrad, og det understreger nødvendigheden af, at man i de kommende år indsamler oplysninger om erfaringer, der kan benyttes til en nøjagtig fastlæggelse af det nødvendige risikoindekstal.

Rapporten slutter med nogle økonomiske overvejelser til antydning af muligheden for at vurdere sammenhængen mellem risikoindekset i en udbygningsstruktur og strukturens anlægsomkostninger.

KAPITEL 2 PÅLIDELIGHEDSTAL

=====

Resumé: Bestemmelse af et systems driftssikkerhed kræver kendskab til de enkelte systemkomponenters pålidelighed. I det aktuelle tilfælde har der været tale om kedler og turbogenerators, idet der for andre anlægsdele, herunder distributionsanlæg, ikke er taget hensyn til driftssikkerheden i denne undersøgelse.

En enheds pålidelighed karakteriseres ved et pålidelighedstal (jfr. foranstående definition). Dette pålidelighedstal må bestemmes på grundlag af driftsstatistikker.

Da de her i landet førte driftsstatistikker ikke har kunne udgøre et tilstrækkeligt stort materiale til en blot nogenlunde sikker bestemmelse af pålidelighedstallet, har Effektgruppen gennemgået en række udenlandske og danske havaristatistikker og har fundet havarital på 2 % på blokanlæg i USA og på 6,5 - 9,5 % på blokanlæg i England, Frankrig og Vesttyskland, svarende til pålidelighedstallene henholdsvis 0,98 og 0,935 - 0,905.

Her i landet foreligger kun oplysninger om blokanlæg på Isefjordværket, der har et havarital på ca. 7 % (pålidelighedstal 0,93), og for de øvrige danske værker med dampsamlere har man fundet havarital på 5 - 8 % for kedelanlæg og på 5,5 - 6,7 % for turbineanlæg.

På grundlag af disse oplysninger har Effektgruppen valgt at ansætte pålidelighedstallet for fremtidige blokanlæg til 0,93; for anlæg med dampsamlere er for såvel kedler som turbiner anvendt pålideligheden 0,95, idet de eksisterende værker, der i dag har en lidt dårligere pålidelighed, i de fremtidige strukturer vil være reduceret til reserve- og spidsbelastningsanlæg og derfor vil være udsat for færre havarier.

For nukleare enheder foreligger endnu kun sparsomme havaristatistikker, men under indtryk af den omhu, der lægges for dagen ved planlægning og drift af disse værker, er der næppe grund til at vente en ringere pålidelighed end for de konventionelle værker. Effektgruppen har derfor skønnet, at man for nukleare enheder med rimelighed kan benytte pålideligheden 0,93, hvilket har haft den umiddelbare fordel, at det ikke i beregningen af risikoindeks er nødvendigt at skelne mellem konventionelle og nukleare enheder.

2.1 Alment

Et produktionssystems forsyningssikkerhed afhænger af pålideligheden af systemets enkelte komponenter. For hver komponent kan der defineres et pålidelighedstal (se definitionen foran). Da undersøgelsens formål er en vurdering af de primære værkers udbygning og en beregning af produktionssikkerheden, vil kun de komponenter, som indgår i værkernes produktionsanlæg, blive undersøgt.

Derfor vurderes alene muligheden for, at forsyningsafbrydelser opstår som følge af havarier på kraftværkernes kedler og turbogeneratorer, medens der ikke tages hensyn til mulige havarier i distributionssystemet.

Fastlæggelse af pålidelighedstal til brug for undersøgelsen sker på grundlag af statistiske oplysninger om eksisterende danske og udenlandske maskiner.

2.2 Driftsstatistik

Til bestemmelse af en enheds pålidelighedstal må man foretage en tidsmæssig registrering af enhedens driftstilstande gennem en observationsperiode. Totaltiden (t_{total}) opdeles for hver enhed efter de retningslinier, som er angivet i foranstående definitioner:

t_{drift}	t_{res}	t_{hav}	t_{rep}	t_{rev}
t_{total}				

Som havarier betragtes skader, som medfører en øjeblikkelig reduktion af enhedens ydeevne. Naturligvis forekommer der grænsetilfælde, som ikke klart kan henføres til en af ovennævnte driftstilstande. Imidlertid sker det næppe så hyppigt, at det i kendelig grad påvirker statistikens tilforladelighed. Placeringen af t_{rep} er forskellig fra statistik til statistik. Ofte betragtes denne reparationstid som "tid i kold reserve", da man ikke ser nogen grund til at regne med havarier, som ikke medfører noget effektsavn.

En statistik er ført siden 1956 i ELSAM's område og siden 1960 på IFV's værker. Pr. 1.1.64 har man udvidet den igangværende indsamling af driftsstatistiske oplysninger til at omfatte samtlige primære værker i Danmark ud fra en fælles rapportformular. Denne nye statistik vil dels resultere i ensartede oplysninger om anlæggenes pålidelighed, og dels muliggøre en analyse af fejlårsagerne.

Til undersøgelsens brug er der indsamlet statistiske oplysninger om udenlandske anlæg. På grund af uoverensstemmende definitioner er tal fra dette materiale ikke uden videre sammenlignelige indbyrdes og med de danske tal.

2.3 Indsamlede resultater

Hovedresultaterne af de danske statistikker fremgår af nedenstående tabel, som er et resumé af tabellerne på bilag 1 og 2:

DANMARK	h %	rep %	R %
Kyndbyværket, kedler	4,48	2,44	86,1
" , turbiner	4,48	2,09	85,8
Asnæsværket, blokke	5,55	1,43	82,3
København, kedler	8,0		
" , turbiner	5,5		
ELSAM, kedler	5,43	3,04	84,7
" , turbiner	6,71	1,61	87,6

Man bemærker her, at spredningen på tallene er temmelig stor. Da en enkelt maskines mindre heldige resultater kan give et mærkbart udslag i det samlede resultat, må det danske materiale endnu betragtes som værende for spinkelt til, at der ud fra det kan drages talværdier for maskineriets pålidelighed.

I det følgende skal derfor kort refereres nogle udenlandske kilder.

1. AIEE Transactions, Vol. 68 part I 1949 p. 450-457.
OUTAGE RATES OF STEAM TURBINES
AND BOILERS AND OF HYDRO UNITS

Denne artikel er antagelig den første offentliggørelse af resultater for indsamlinger af driftstatistiske oplysninger.

Det materiale, der omtales, er indsamlet i perioden 1939-44 og omfatter for turbinernes vedkommende ca. 2400 enhedsår, for kedlernes vedkommende ca. 1800 enhedsår.

Ved udmåling af tider er der anvendt hele døgn, idet forholdene

under maksimum er anset karakteristiske for et døgn. Der er for kedler og turbiner benyttet lidt afvigende fremgangsmåder ved klassificeringen af havarierne. Fælles for anlæggene gælder, at havarier, der optræder og udbedres under lavlastperioder, ikke rapporteres.

For turbinernes vedkommende skelnes der mellem "Scheduled Outages" (planlagt måneder i forvejen), "Transferable Outages" (reparationer, der kunne være flyttet til lavlastperioder af passende længde, hvis ikke driftsforholdene havde tilladt reparation under dagbelastning) og "Forced Outages" (øvrige havarier). For kedlernes vedkommende anvendes derimod udtrykkene "Overhaul Outages" (planlagt måneder i forvejen), "Maintenance Outages" (planlagt uger i forvejen) og "Emergency Outages" (øvrige havarier). I praksis må "Emergency Outages" for kedler og "Forced Outages" for turbiner kunne siges at udgøre grundlaget for beregning af havarital, ligesom man i den senere tid oftest anvender betegnelsen "Scheduled Outages" for den resterende del af de rapporterede havarier, hvad enten der er tale om kedler eller turbiner.

Hovedresultaterne er samlet i nedenstående tabel:

KEDLER	tryk < 65 ato		tryk > 65 ato	
	havarital	rådighedstal	havarital	rådighedstal
1940	1,0	88,3	1,5	91,0
1941	0,8	90,6	2,3	88,2
1942	0,9	88,9	1,8	88,5
1943	1,3	90,0	1,6	88,1
1944	1,5	89,2	2,1	89,4

TURBINER	tryk < 65 ato		tryk > 65 ato	
	havarital	rådighedstal	havarital	rådighedstal
1939	1,8	91,7	4,3	90,8
1940	1,2	93,3	3,3	92,3
1941	1,0	94,8	1,8	94,4
1942	0,9	92,8	2,0	92,6
1943	1,1	94,7	1,4	93,6
1944	0,7	94,4	1,0	93,0

Tallene er beregnet i % af totaltiden. Enhederne for lavere tryk end 65 ato udgør det største antal og dermed det bedste statistiske materiale. Gennemsnitlige havarital for disse enheder ligger omkring 1-2 % af totaltiden for såvel kedler som turbiner.

2. AIEE Transactions 1954, p. 1438-42.FORCED OUTAGE RATES OF HIGH-
PRESSURE STEAM TURBINES AND BOILERS

Denne rapport kan betragtes som en fortsættelse af den foran omtalte. Det indsamlede materiale omfatter perioden 1950-52 og andrager for turbinernes vedkommende ca. 900 enhedsår, for kedlernes vedkommende ca. 1220 enhedsår. Der er ikke indsamlet materiale for enheder med damptryk under 45 ato og ydeevner lavere end ca. 20 MW eller 100 t damp/time.

HAVARITAL %	KEDLER		TURBINER	
Trykområde	Ukorrigeret	Korrigeret	Ukorrigeret	Korrigeret
45-65 ato	0,86	0,74	0,95	0,81
65-95 "	1,65	1,45	1,20	1,07
>95 "	0,98	0,75	0,65	0,58
Alle	1,11	0,95	1,00	0,88
Rådighedstal	90,0		92,6	

Ved den i tabellen viste korrektion udelukkes havarier, som forekommer i lavlastperioder og weekends. Dette skal ses i forbindelse med den amerikanske sædvane ved beregning af risikoindeks, idet man kun betragter forholdene under døgnmaksimum. Ifølge amerikansk erfaring er havariernes middelvarighed for såvel kedler som turbiner større end 1 døgn.

3. AIEE Transactions 1957, p. 338-342.FORCED OUTAGE RATES OF HIGH-
PRESSURE STEAM TURBINES AND BOILERS

Denne rapport omhandler materiale indsamlet i perioden 1950-54 og inkluderer således det foran omtalte materiale. Der er foretaget opdeling efter damptrykket på samme måde som nævnt foran. Talmaterialet er yderligere opdelt efter rapportår. Imidlertid er der ikke nogen sikker tendens at spore i havaritallets variation med årene. Variationerne med damptryk og rapportår fremgår af denne tabel:

Havarital

KEDLER	45 - 65 ato	65 - 95 ato	> 95 ato
1950	0,90	1,70	0,95
1951	0,55	1,30	0,70
1952	0,78	1,37	0,70
1953	0,89	1,14	0,82
1954	1,20	1,22	1,18
Gennemsnit	0,84	1,33	0,90

Havarital

TURBINER	45 - 65 ato	65 - 95 ato	> 95 ato
1950	1,43	1,58	0,15
1951	0,67	1,82	0,75
1952	0,45	1,83	0,70
1953	0,70	0,45	1,08
1954	0,68	1,88	0,99
Gennemsnit	0,78	1,10	0,89

Som gennemsnitsværdier for hele materialet findes:

	Havarital	Rådighedstal
Kedler	1,00 %	90,7 %
Turbiner	0,90 %	92,3 %

4. Edison Electric Institute, Publication No. 62-44.

SUMMARY 1960 EQUIPMENT AVAILABILITY
REPORT INCLUDING AVERAGES AND TRENDS
FOR SIX-YEAR PERIOD 1955-60

Rapporten omhandler det foreløbigt senest offentliggjorte materiale fra EEI's driftsstatistik, hvorfra også det tidligere omtalte materiale er hentet.

I modsætning til de ovenfor omtalte rapporter, hvor man har udmålt tiden i hele dage, er man her gået over til at anvende timer (rapportformularen er ændret med henblik herpå i 1955). De nye danske statistikker udarbejdes efter meget nær de samme retningslinier.

Materialet er bearbejdet med henblik på bestemmelse af bl.a. følgende størrelser:

Havarital (Forced Outage Rate)
Rådighedstal (Operating Availability).

Indsamling af oplysninger er gennemført for ca. 460 turbiner og 500 kedler, idet enheder under 50 MW og med dampdata lavere end ca. 56 ato og 480° C ikke er rapporteret. Materialet er fortrinsvis angivet for blok-enheder. I et enkelt tilfælde er dog værdier for kedler og turbiner hver for sig anført til sammenligning.

Man har ved en opdeling af anlæggene søgt at vurdere havari- og rådighedstallenes variation med mærkeydelse, damptryk, damptemperatur og rapportår. Variationen med tiden viser ingen klar tendens, hvorfor disse tal ikke gengives her.

Middeltal for perioden 1955-60:

Mærkeydelse MW	50-89	90-129	130-199	200-325	
Antal enheder	160	132	75	35	
Havarital %	1,6	2,2	2,8	4,2	
Rådighedstal %	92,1	91,2	89,0	87,2	
Damptemp. °C	482-513	538-544	560-572	> 593	
Antal enheder	150	158	65	10	
Havarital %	1,4	2,1	3,5	8,0	
Rådighedstal %	92,3	90,8	88,8	81,5	
Damptryk ato	53-63	85-97	102-116	127-133	140-173
Antal enheder	55	82	106	60	45
Havarital %	0,6	1,6	2,5	2,1	4,2
Rådighedstal %	93,0	91,6	90,7	90,0	88,0

For samtlige blokenheder ligger middelværdien for havaritallet omkring 2,1 %. Havaritallet stiger noget med voksende mærkeydelse og damptryk (til ca. 4 % for enheder over 200 MW eller med damptryk over 140 ato), men væsentligt stærkere ved stigende damptemperatur (til 8% ved damptemperaturer på omkring 600°C). Imidlertid må der påregnes meget stærk korrelation mellem mærkeeffekt og dampdata, og det kan derfor næppe afgøres, hvor meget voksende mærkeeffekt og øget damptryk rent faktisk bidrager til forringelse af driftssikkerheden.

For samtlige enheder tager under ét findes rådighedstal på ca. 91 %. Rådighedstallet varierer ligesom havaritallet med ændret mærkeeffekt, damptryk og damptemperatur, og der kan konstateres de samme tendenser for rådighedstallet som for havaritallet, idet største damptryk og mærkeydelse kun giver anledning til mindre sænkning af rådighedstallet, medens temperaturens indflydelse er meget mærkbar.

5. Federal Power Commission. Advisory Committee Report No. 24.
OUTAGE RATES FOR ELECTRIC GENERATING UNITS

Rapporten giver retningslinier for, hvilke havarital man bør anvende for fremtidige blokenheder. Der regnes med en vis stigning af havaritallet for stigende mærkeeffekt, men til gengæld må havaritallet påregnes at aftage noget for en given enhedsstørrelse i tidens løb. Hermed har man søgt at tage hensyn til driftsmæssige vanskeligheder ved nye enhedsstørrelser. I tilfælde, hvor man må forvente, at mærkeeffekten yderligere forøges, inden mindre enhedsstørrelser endnu er helt indarbejdet, tilrådes en fordobling af havaritallet i enhedens to første leveår.

Havarital %.

Install. år	Mærkeeffekt MW						
	< 100	101-300	301-500	501-800	801-1100	1101-1400	>1400
1960	1,5	3,9	5,5*				
1970	1,5	3,3	4,4	5,2*	5,9*		
1980	1,5	3,0	4,0	4,8	5,3*	5,7*	6,0*

* angiver, at tallet bør fordobles i enhedens første to leveår.

Foruden de her nævnte procentsatser til havarier må der regnes med ca. 8,5 % tidsforbrug af totaltiden til eftersyn og andre planlagte driftsstop. Man ser af tabellen, at havaritalleene for de relativt små enhedsstørrelser er i god overensstemmelse med det foran omtalte materiale fra USA. I de første leveår for enheder over ca. 200 MW må man imidlertid regne med havarital på mindst 10 %, hvilket må anses for meget pessimistisk efter amerikanske forhold.

6. UNIPED - Rapport II 1.

EXPERIENCE RESULTING FROM THE OPERATION
OF HIGH POWER THERMAL UNITS

Rapporten omhandler driftserfaringer fra europæiske enheder med mærkeydelse over 100 MW. For en del af disse enheder er rådighedstallene angivet. Derimod forekommer ingen havarital i rapporten. De anførte rådighedstal er i flere tilfælde meget lave - tal ned til 40 % forekommer. Dette kan næppe forklares ud fra almindelige årseftersyn alene, men må i nogen grad dels tilskrives vanskeligheder i forbindelse med bygning af nye enhedstyper, dels at en del af de anlæg, rapporten beskæftiger sig med, kun er iagttaget et kort tidsrum (nogle få år) efter idriftsættelsen, således at "børnesygdomme" og eventuelle garantieftersyn kan spille en afgørende rolle for rådighedstallets størrelse. Det fremgår da også af rapporten, at enheder af mere indarbejdet størrelse og konstruktion og med nogle års drift bag sig (f.eks. 10 stk. 150 MW enheder på RWE's værk "Frimmersdorff") som helhed opnår rådighedstal på omkring 78%. Ved vurdering af rådighedstallene for disse enheder må man imidlertid tage hensyn til, at anvendelsen af dårlige brændselskvaliteter (her brunkul) nødvendiggør hyppige kedelrensninger og derigennem er i stand til at sænke rådighedstallet noget i forhold til olie- eller stenkulsfyrede anlæg af samme art.

(Se tabel næste side).

Enhedens navn	Rapportperiode	Mærkeeffekt MW	Rådighedstal %
Champagne-sur-Oise	21/6.61 til 30/4.63	250	51
Vaires-sur-Marne	28/1.62 " 31/5.63	250	46
Genoa	31/7.60 " 30/4.63	160	63
Frimmersdorf 1	12/9.57 " 30/4.63	150	70
" 2	18/11.58 " 30/4.63	150	70
" 3	15/8.59 " 30/4.63	150	79
" 4	15/11.59 " 30/4.63	150	78
" 5	15.8.60 " 30/4.63	150	58
" 6	15/12.60 " 30/4.63	150	75
" 7	15/10.61 " 30/4.63	150	74
" 8	1/5.62 " 30/4.63	150	78
" 9	1/6.62 " 30/4.63	150	84
" 10	15/10.62 " 30/4.63	150	81
Napoli	9/2.61 " 30/4.63	150	65
Compostilla	15/5.61 " 30/4.63	140	40

7. UNPEDE Comité d'Etudes des Statistique.

INDISPONIBILITÉS DES EQUIPMENTS DE PRODUCTION ET DE TRANSPORT D'ELECTRICITÉ

For 125 MW genoverhedningsenheder i Frankrig og Belgien samt for alle dampkraftenheder i England og Vesttyskland er der angivet den procentdel af den installerede effekt, der gennemsnitligt har været ude af drift i december måned i 1962 og 1963. For Vesttysklands vedkommende er dog kun tredje onsdag i december betragtet.

Følgende talværdier er anført:

Frankrig	1962	11,7 %	1963	7,4 %
Belgien	"	18,6 %	"	7,2 %
England	"	8,0 %	"	11,7 %
Vesttyskland	"	4,0 %	"	7,0 %

For Hollands vedkommende er der angivet havari- og eftersynstid (begge i procent af totaltiden) for kedler og turbiner hver for sig. Tallene er indsamlet i tidsperioden 1960-62. For turbinerne andrager havaritallene i gennemsnit 2,3 % og for kedler 1,7 %. Dette svarer til havarital på rundt regnet 5 % for blokke.

For turbinerne antager eftersynsprocenterne værdier mellem 9,6 og 11,3 %; for kedler mellem 11,5 og 12,5 %. Der kan ikke ud fra dette sluttes noget sikkert om rådighedstallene for blokanlæg, men disse må antages at ligge i nærheden af $100 - (12 + 5) = 83 \%$, idet eftersynsarbejder må påregnes at foregå samtidigt på både kedel og turbine.

8. Fédération Professionnelle des Producteurs et Distributeurs
d'Électricité de Belgique.

ANNAIRE STATISTIQUE (1962 og 1963)

I disse årsberetninger er angivet årsgennemsnittene for havaritallene for kedler og turbiner med mærkeeffekt på 60 og 120 MW i Belgien. Materialet omfatter årene 1952-63 (incl.). Foruden tallene for hvert år er angivet gennemsnittet af havaritallene for de foregående fire år. Gennemsnittet af samtlige observationer ligger for kedlernes vedkommende på ca. 4 %, for turbinernes vedkommende på ca. 4,5 % og varierer indtil ca. 1 % til begge sider for disse værdier.

HAVARITAL %	Kedler		Turbiner	
år	årsværdier	4 års gennemsnit	årsværdier	4 års gennemsnit
1952	5,7	4,1	4,9	5,1
1953	4,6	4,2	4,5	5,1
1954	4,2	4,5	4,7	5,0
1955	3,2	4,3	4,2	4,7
1956	4,4	4,1	4,3	4,4
1957	4,6	4,1	4,3	4,4
1958	4,0	4,2	3,8	4,2
1959	3,8	4,2	3,8	4,1
1960	4,6	4,3	3,7	3,9
1961	4,1	4,1	5,6	4,2
1962	3,1	3,9	5,4	4,6
1963	3,1	3,8	4,3	4,7

Havaritallene beregnes i % af totaltiden.

9. Brev fra "Fédération Professionnelle des Producteurs et Distributeurs
d'Électricité de Belgique af 25/3 1964.

Dette brev er vedlagt to bilag, hvoraf det første angiver fordelingen af fejl på forskellige anlægsdele i kedel og turbine. Det andet bilag, som i denne sammenhæng har større interesse, angiver rådighedstal for belgiske blokenheder med mærkeydelse mellem 60 og 120 MW. Materialet er gengivet nedenfor. Der er angivet talværdier for 13 enheder i 1962 og 15 enheder i 1963. En enkelt (nyinstalleret) enhed viser i et af årene rådighedstal på 67,6 %, medens de øvrige værdier varierer mellem 70 og 95 % med gennemsnitsværdier på ca. 87 %. I bilaget er anført fordelingen af driftstimer, reservetimer og timer, i hvilke enhederne ikke er disponible. Det viser sig, at i hvert af de to år har kun én enhed haft reservetid større end nul.

Rådighedstal %.

Enhed	1962	1963
Drogenbos 11	77,2	85,0
Merxem 8	98,7	98,7
Ruilen 1	88,0	98,8
Ruilen 2	93,8	94,7
Bressoux 8	93,5	93,2
Auvelais 3	93,8	99,1
Marchiennes	91,2	95,3
Pont-Brulé 1	79,8	81,8
Pont-Brulé 2	83,5	70,7
Baudeur	81,5	92,2
CETEL	82,1	77,9
Langerbrugge 19	86,4	89,5
Péronnes	90,2	78,9
Mol 11		84,5
Awrirs 3		67,6

10. Brev fra Deutsche Verbundgesellschaft e.V. af 30/7 1964.

I et bilag til brevet er angivet en tabel over driftstilstanden for de vesttyske elproduktionsanlæg omfattende både hydrauliske og termiske kraftværker. Oversigten gælder for 3. onsdag i december årene: 1953, 1960, 1961, 1962 og 1963. Af tabellen fremgår bl.a. rådighedstallet, idet man har målt den procentdel af den installerede effekt, der har været ude af drift af en eller anden årsag. Dette rådighedstal bliver formodentlig uden indflydelse af eftersyn.

	%
1953	93,3
1960	93,0
1961	92,3
1962	96,7
1963	93,0

11. Brev fra Electricité de France af 22/7 1964.

Brevet er bilagt en oversigt over stilstandstider for 125 MW enheder med over ét års levetid. For hver måned er stilstandstiden opdelt i

hverdags høj- og lavlastperioder samt weekend-perioder. På fig. 2.1 er materialet samlet og registreret grafisk. Gennemsnittet af rådighedstallene bliver for de her givne talstørrelser ca. 84 %. Havarier og andre drift-stop, der ikke er planlagt forud, lægger i gennemsnit beslag på ca. 9,5 % af totaltiden.

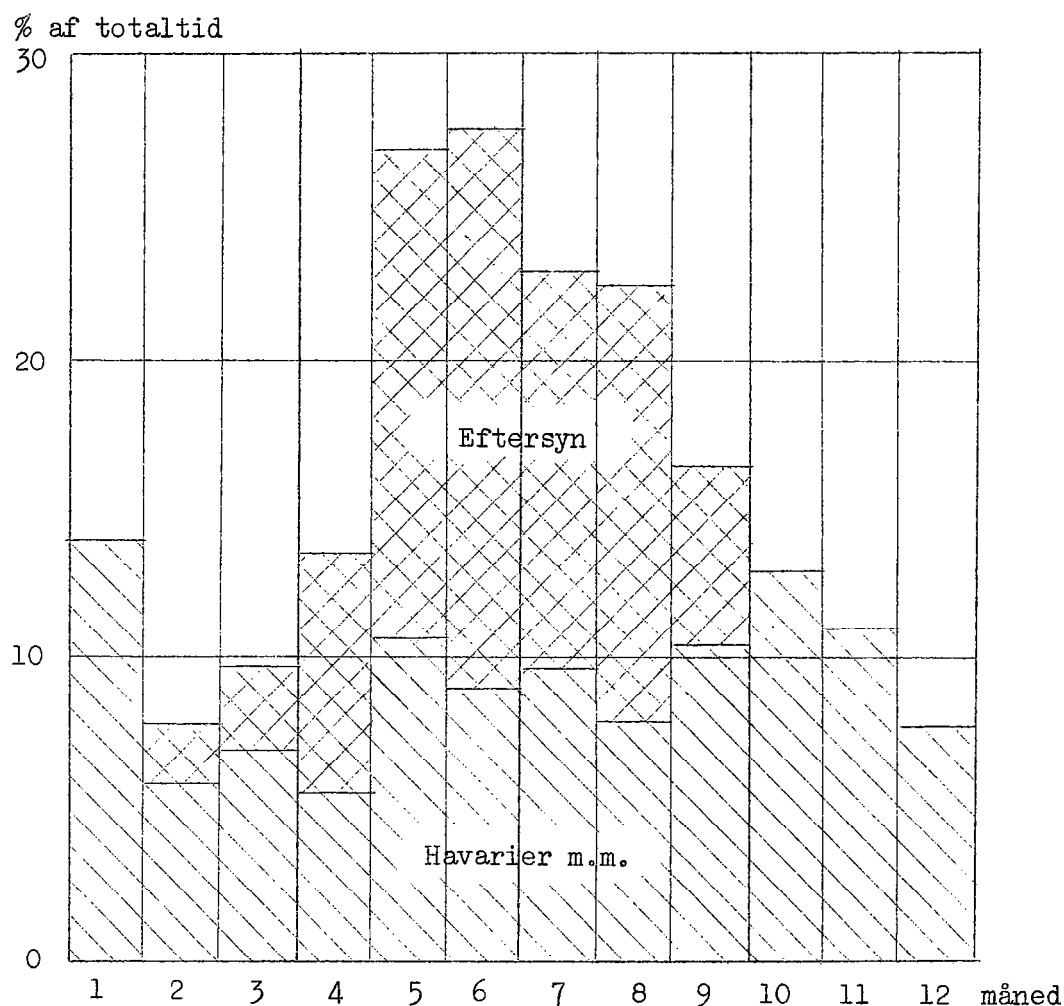


Fig. 2.1. Frankrig. Stilstandstider for 125 MW enheder.

12. Brev fra Central Electricity Generating Board, England, af 5/8 1964.

For årene 1960/61 og 1961/62 samt for december måned i 1960 og 1961 er der i et bilag til brevet angivet den del af den installerede effekt, der i gennemsnit har været ude af drift på grund af havarier eller eftersyn. For de to år andrager dette tal mellem 19 og 20 %, medens det for december måned, hvor der ikke finder eftersyn sted, ligger på 8-9 %. Rådighedstallene for maskinerne må derfor antages at ligge på ca. 80 %. Af de angivne 8-9 % for december måned er det i rapporten anført, at 6,5-7 % skyldes direkte havarier.

Brevet er bilagt en oversigt for perioden 1957-63 (incl.). Her er der for hver måned angivet den del af den installerede effekt, der i

gennemsnit har været udsat for havarier, været til eftersyn etc. Dette materiale er bearbejdet og vist på fig. 2.2 og 2.3, idet fig. 2.2 for hver måned angiver middelværdi og middelværdi ± 2 gange spredning for havaritallet, medens fig. 2.3 viser variationsområdet for rådighedstallene i den betragtede periode. Middelværdien for samtlige havarital ses at ligge på omkring 7 %, medens rådighedstallene varierer omkring en middelværdi på ca. 80 %. Rådighedstallets variation med årstiden er tydelig. Tages der ved vurderingen af havaritallet hensyn til, at den til rådighed stående effekt er væsentligt forringet i sommerhalvåret som følge af revision, fås i disse måneder en vis forøgelse af havaritallet (10-20 %) i forhold til det på fig. 2.2 angivne.

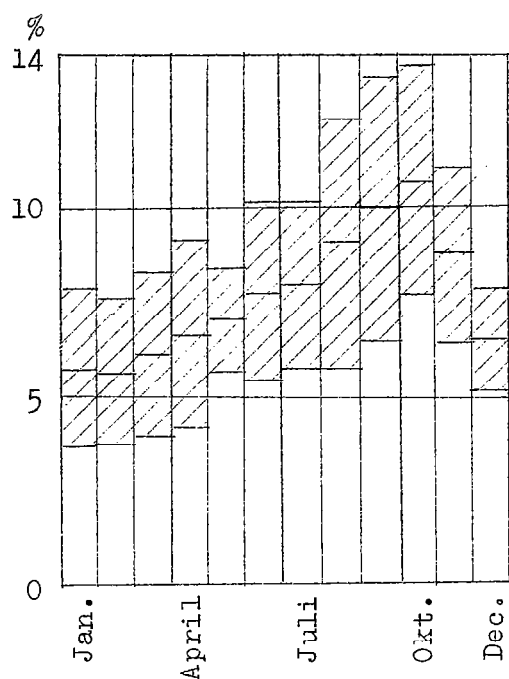


Fig. 2.2

Middelværdi og spredning
for havarital

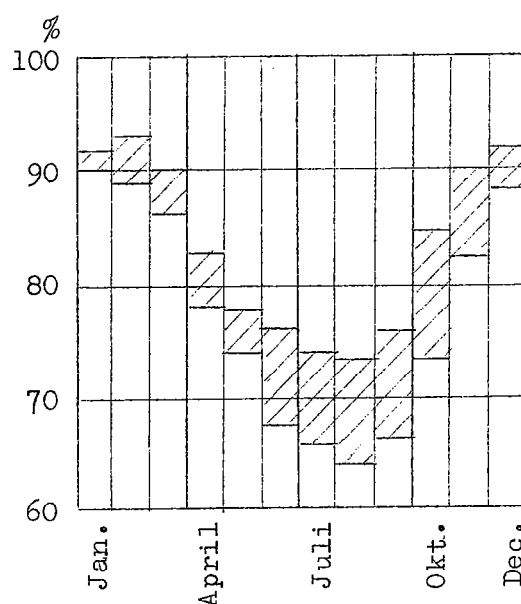


Fig. 2.3

Variationsområde for
rådighedstal

2.4 Valg af undersøgelsens havarital

Hovedindtrykket fra de refererede statistikker er samlet i nedenstående tabel:

Land	Havarital %			Rådighedstal %
	Kedler	Turbiner	Blokke	Blokke
USA	1,0	0,9	2,1	91
Belgien	4,0	4,5		87
Holland	1,7	2,3		
England			8,5	80
Frankrig			>9,5	84
Vesttyskland			6,5	
Isefjordværket	4,5	4,5	5,6	82
København	8,0	5,5		
ELSAM	5,4	6,7		

Disse tal bygger på så forskellige forudsætninger, at de ikke uden videre er sammenlignelige.

Alligevel finder man ved vurderingen af tallene nogle forskelle, som ikke kan forklares ved forskelle i metoderne til bestemmelse af havarital. Effektarbejdsgruppen har diskuteret disse forhold indgående, men har ikke kunnet påpege nogen sikker årsag til disse afvigelser. Diskussionen har bl.a. omfattet spredning på resultaterne, definition af afgrænsning mellem havari og reparation, driftsform, revisionspolitik, enhedernes alder m.v.

Her skal i første række fremhæves de meget gunstige amerikanske resultater. De anførte værdier for blokke er bestemt efter retningslinier, som stemmer nøje overens med de her i landet anvendte.

I Belgien optages statistikkerne efter samme retningslinier som i Danmark. Endvidere er produktionsapparatets struktur næsten den samme, hvorfor man ved vurderingen har lagt særlig vægt på de belgiske resultater. Dog er havaritalene beregnet i % af totaltiden.

I de engelske statistikker angives havaritallet som den procentdel af maskineffekten, der i gennemsnit er ude af drift i december måned, medens man i Vesttyskland nøjes med at betragte forholdene på én bestemt dag - den tredie onsdag i december.

I Frankrig beregnes havarital i % af totaltiden. De franske havarital beregnes ud fra tiden for "havarier og andre ikke-planlagte driftsafbrydelser".

Af disse bemærkninger fremgår det, at der i de nævnte lande findes ret uensartede regler for bestemmelse af havarital. Talværdierne kan dog anvendes ved en forsigtig sammenligning. Således vil de engelske og tyske tal uden videre kunne overføres, hvis man forudsætter, at disse lan-

des statistikker er baseret på et stort antal nogenlunde lige store enheder. Da man netop i december måned søger at have hele det installerede maskineri disponibelt, vil den gennemsnitlige effekt ude af drift taget i forhold til totalydelse give en talværdi, som nogenlunde svarer til vor opfattelse af begrebet "havarital".

På grundlag af disse oplysninger har Effektgruppen valgt at ansætte pålidelighedstal for fremtidige blokanlæg til 0,93. For anlæg med damp-samlere er for såvel kedler som turbiner anvendt pålideligheden 0,95, i det de eksisterende værker, der i dag har en lidt dårligere pålidelighed, i de fremtidige strukturer vil være reduceret til reserve- og spidsbelastnings-anlæg og derfor vil være udsat for færre havarier.

Hvad angår driftssikkerheden for nukleare værker er anvendeligt erfaringsmateriale endnu for sparsomt til at give et fulgyldigt billede af kernekraftværkers pålidelighed, dels fordi kun få værker har været i drift igennem flere år, dels fordi de har skullet overstå deres begyndelsesvanskeligheder, og endelig fordi de ofte helt eller delvist tjener andre formål end kommerciel elproduktion.

Dersom man imidlertid går ud fra de foreløbige erfaringer og vurderer dem under hensyntagen til ovenstående forbehold, da ser det ud til, at man for fremtidige kernekraftværker kan opnå et rådighedstal af samme størrelse som for konventionelle værker. Til belysning heraf kan anføres følgende rådighedstal (%) hentet fra officielle driftsstatistikker (pålidelighedstal har ikke kunnet fremskaffes):

	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964
Calder Hall	77	61	85	86	89	92	93	92
Chapelcross			77	85	87	93	94	92
Shippingport		60	45	50	62	70	Ombygning	
Dresden						79	76	81
Yankee					89	68	78	89

For Dresden og Yankee bemærkes specielt, at brændselsudskiftningen er blevet stærkt rationaliseret, således at den nu kan gennemføres inden for den 4 ugers periode, der normalt afsættes til et hovedeftersyn. Konstruktive forbedringer vil yderligere nedsætte den nødvendige tid til brændselsudskiftning for de letvandsreaktorer, der i dag er under bygning og i ordre.

Selv om disse data indlysende nok ikke kan give sikkerhed for, at en tilstrækkelig høj rådighedsfaktor kan opnås, synes de aller seneste års driftserfaringer dog ret gunstige, og i betragtning af den omhu, der udvises ved konstruktion og bygning af kernekraftværker, kan man have begrundet tiltro til, at rådighedstallet ikke bliver ringere end for konventionelle værker. I denne forbindelse skal det også nævnes, at det er en almindelig erfaring fra konventionelt kraftværksbyggeri, at rådighedstallet for nye typer er lavere for de første anlæg end for de senere, og at rådighedstallet for en bestemt enhed er lavere i de første par år end i de følgende.

Det er herefter fundet rimeligt at gennemføre de økonomiske beregninger under antagelse af samme pålidelighedstal som for konventionelle værker, 0,93.

KAPITEL 3 PRODUKTIONSSIKKERHED

=====

Resumé: Produktionssikkerheden for et system er dels bestemt af anlæggenes pålidelighedstal og dels bestemt af den overskydende effekt (reserveeffekt), der er installeret i systemet. Effektgruppen har i stedet for reserveprocent anvendt begrebet "risikoindeks", der angiver sandsynligheden for, at den disponible maskineffekt inden for et år er utilstrækkelig til at dække de forventede belastninger. Ved at anvende begrebet "risikoindeks" har man haft mulighed for at opstille udbygningsstrukturer af vidt forskellig karakter og opbygning på en sådan måde, at man uanset forskellen i anlægstyper og maskinstørrelser kunne opnå samme forsyningssikkerhed for de forskellige strukturer.

Det har været en del af Effektgruppens arbejde at fastlægge en nøjagtig definition af risikoindekset og udlede en metode til dets beregning.

Risikoindekset er beregnet ved at sammenholde ydeevnens fordelingsfunktion med den forventede belastningsfordelingsfunktion. Ydeevnens fordelingsfunktion er beregnet på cifferregnemaskine efter et program, som gruppen har udviklet, og hvor man har sammenkoblet systemets enheder ved serie- og parallelkoblinger efter regler, som i dette kapitel er forklaret ved enkelte eksempler. Der er ved beregningen af ydeevnens fordelingsfunktion ikke korrigeret for ydeevnereduktioner, som skyldes maskineftersyn. Belastningen er beskrevet ved en trappeformet varighedskurve, der indregnes som en generator med negativ effekt; denne varighedskurve er således belastningens fordelingsfunktion.

Ved at sammenholde ydeevnens fordelingsfunktion med belastningens fordelingsfunktion har man bestemt en fordelingsfunktion for overskydende effekt med såvel positive som negative værdier (fig. 3.9). De negative værdier udgør tilfældene med utilstrækkelig effekt, og den tilsvarende tid divideret med totaltiden er risikoindekset. I et eksempel er vist, hvorledes en tilsvarende beregning kan gennemføres med en varighedskurve, som dannes ved, at en række punkter på kurven forbindes med rette linier. I denne undersøgelse er anvendt en varighedskurve af samtlige årets timebelastninger, og kurven har med god nøjagtighed kunnet sammensættes af 5 rette liniestykker.

På grundlag af et andet af gruppen udviklet cifferregnemaskineprogram til beregning af risikoindeks efter de nævnte retningslinier er der foretaget en undersøgelse af risikoindeksets variation med de vigtigste parametre, som f.eks. pålidelighedstal, antal enheder, variation i enhedsstørrelser inden for samme system, varighedskurvens form m.m.

3.1 Alment

Ved tilrettelæggelsen af udbygningen af et elproduktionssystem er det af stor værdi at kunne beregne et tal til vurdering af systemets produktionssikkerhed. Der er udviklet adskillige begreber til karakterisering af produktionssikkerheden, og til hvert begreb knytter sig en eller flere beregningsmetoder.

Princippet i samtlige metoder er en sammenligning mellem ydeevne og belastning og en vurdering af sandsynligheden for, at sidstnævnte bliver størst. Metoderne adskiller sig fra hinanden ved forskelle i repræsentationen af såvel ydeevne som belastning. Alle de bedste metoder kan siges at være lige gode, for så vidt som de følsomt registrerer alle ændringer, som kan

influere på systemets forsyningskvalitet. Det vil i reglen ikke være muligt at sammenligne tal, der er beregnet på forskellige måder, ligesom en oversættelse af talværdierne til noget mere konkret (f.eks. afbrydelse 2 timer om året eller 1 dag hvert tiende år) oftest vil give misvisende resultater.

Ved beregning af reserveprocenten (reserveeffekten i % af belastningen) sammenholdes produktionsanlæggets totale ydeevne med én belastning (normalt årsmaksimum). Begrebet er anskueligt, men lidet egnet ved en sammenligning af forsyningskvaliteter, idet det ikke på nogen måde afspejler maskineriets egenskaber eller struktur.

Ofte vurderes den installerede reserve i forhold til systemets største enhed. Som reservekriterium kan man da (evt. i forbindelse med andre krav) forlange, at der skal installeres reserve til dækning af udfald af denne enhed.

En bedre repræsentation af ydeevnen opnås ved hjælp af en fordelingsfunktion for ydeevnen. Den beregnes på basis af oplysninger om pålideligheden af hver af systemets enheder og udtrykker som funktion af belastningen sandsynligheden for, at effekt svarende til denne belastning eller mere er disponibel. Der tages herunder normalt kun hensyn til egentlige havarier og ikke de årlige eftersyn.

Denne kurve kan sammenholdes med en belastning på ét tidspunkt, og resultatet aflæses direkte. Normalt kan man ikke forudsige belastningen på et givet tidspunkt nøjagtigt, men må angive en fordelingsfunktion for belastningen på dette tidspunkt, som f.eks. er maksimum. Efter sandsynlighedsregningens regler beregnes på dette grundlag en resulterende sandsynlighedsfordeling for reserven.

Vil man vurdere produktionssikkerheden over længere tid, kan man repræsentere belastningen over en periode ved dens varighedskurve og betragte denne som en fordelingsfunktion for belastningen i det pågældende tidsrum. En resulterende fordeling for reserven beregnes som ovenfor nævnt. I ELSAM-KRAFTIMPORT-undersøgelsen er sidstnævnte metode anvendt. Varighedskurverne opstilles på grundlag af timebelastninger.

3.2 Ydeevnerepræsentation

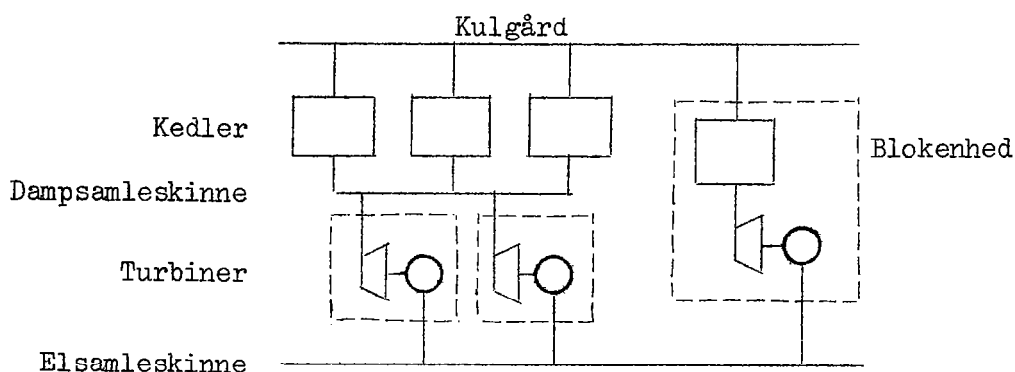


Fig. 3.1. Eksempel på kombination af enheder.

Et system består af en samling af enheder (kedler, turbiner eller kombinationer: blokke), som sammenknyttes ved serie- og parallelkoblinger. Systemets ydeevne vil til enhver tid afhænge af, hvilke enheder der er disponible. Man ønsker at foretage en vurdering af denne størrelse og tager

hertil sandsynlighedsregningen til hjælp, idet det forudsættes, at haverier kan betragtes som tilfældige hændelser, som optræder uafhængigt af hinanden. Som stokastisk variabel (d.v.s. tilfældigt varierende størrelse) betragtes systemets ydeevne. Den er en funktion af samtlige enheders ydeevner. Hvis en stokastisk variabel kan antage en vilkårlig værdi i et givet interval, danner den en kontinuert fordeling, som vi ikke her skal komme nærmere ind på. Hvis den kun kan antage enkelte værdier, danner den en diskret fordeling.

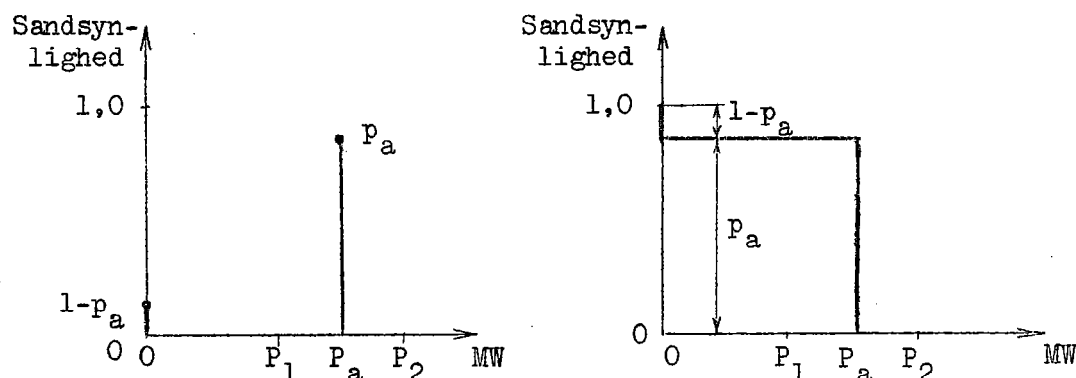


Fig. 3.2. Eksempel på frekvensfunktion (t.v.) og fordelingsfunktion (t.h.) for en enhed.

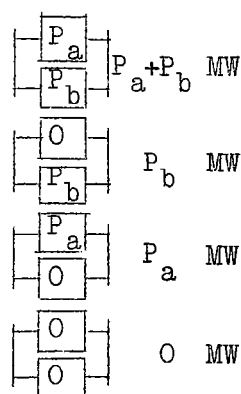
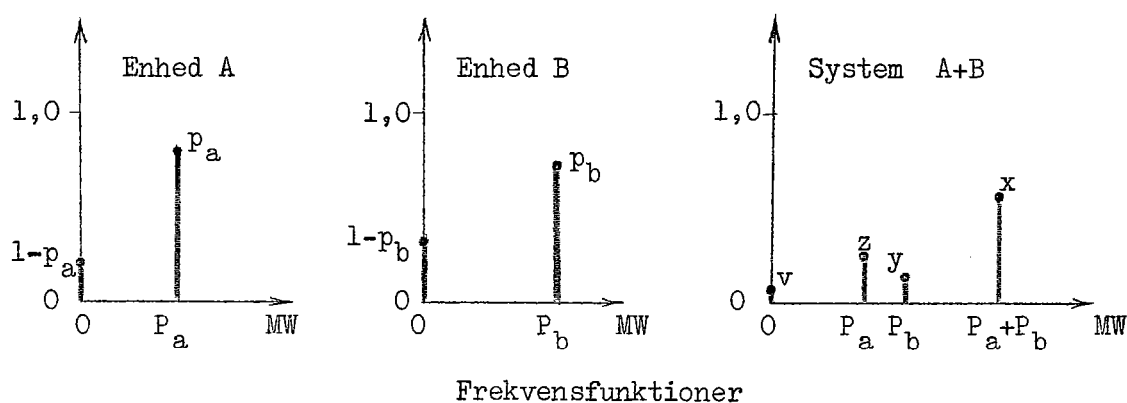
Hvis en enhed antages kun at have to mulige ydeevner, nemlig 0 og den nominelle ydeevne (P_a MW), udgør enhedens ydeevne således en diskret fordeling. Grafisk vises det på fig. 3.2. Den stokastiske variabel afsættes på abscisseakserne. Af figuren til venstre aflæses ud for hver af de to mulige ydeevner

sandsynligheden for, at den stokastiske variabel antager den pågældende værdi.

Her betyder det, at sandsynligheden for, at enheden har en ydeevne på P_a MW er p_a , medens sandsynligheden for, at ydeevnen er 0 MW, er $(1-p_a)$. Denne afbildning vil vi benævne frekvensfunktionen. På afbildningen til højre aflæses ud for hver effekt

sandsynligheden for, at den stokastiske variabel (d.v.s. ydeevnen) er større end eller lig med den betragtede effekt.

Altså aflæser man sandsynligheden for, at systemet (her enheden) kan dække en betragtet effekt. Man ser, at man i intervallet 0 til den nominelle ydeevne, P_a MW, har sandsynligheden p_a for, at i det mindste den betragtede effekt (f.eks. P_1) er disponibel. Sandsynligheden for, at en effekt over P_a (f.eks. P_2) er disponibel, er nul. Denne afbildning kalder vi fordelingsfunktionen (her ydeevnens fordelingsfunktion). En diskret fordeling har altid en trappeformet fordelingsfunktion. I beregningerne indsættes hver enheds pålidelighedstal for p_a .



Sandsynligheder:

$$x = p_a \cdot p_b$$

$$y = p_b(1-p_a)$$

$$z = p_a(1-p_b)$$

$$v = (1-p_a)(1-p_b)$$

$$x+y+z+v = 1$$

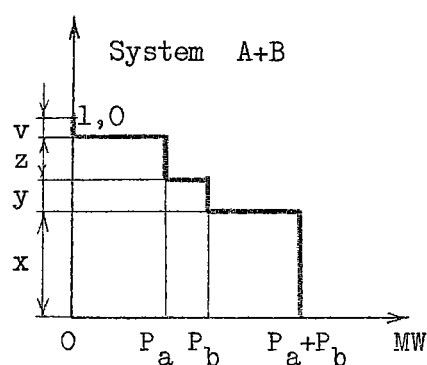


Fig. 3.3. Eksempel på parallelkobling af to enheder.

Når systemet består af mere end én enhed, kan man ved at bestemme alle mulige kombinationer af enhedernes driftstilstande finde flere mulige ydeevner. Fig. 3.3 viser, hvorledes frekvens- og fordelingsfunktion for to parallelkoblede enheder fremkommer. For hver af enhederne er der to muligheder (disponibel eller ikke). Det sammenkoblede system får således fire mulige ydeevner, nemlig effekterne $P_a + P_b$, P_b , P_a og 0 MW. De tilsvarende sandsynligheder bestemmes som vist på figuren.

Ved en seriekobling fås kun to mulige ydeevner, f.eks. P_a og 0 MW (se fig. 3.4), hvis man forudsætter $P_b \geq P_a$

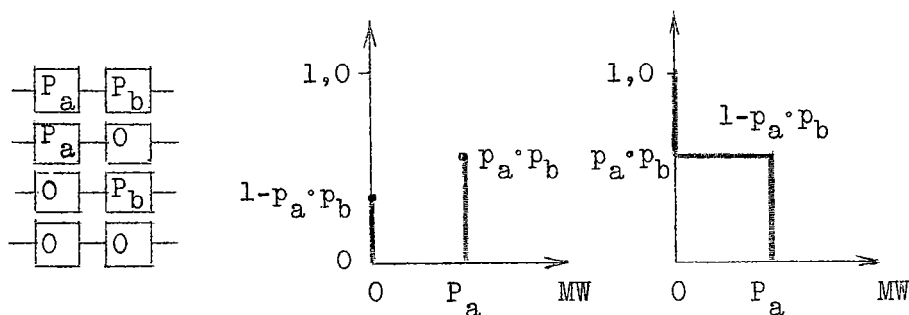


Fig. 3.4. Eksempel på seriekobling af to enheder.

Efter tilsvarende enkle regler er det muligt at foretage serie- og parallelkoblinger af mange enheder eller af mere komplicerede systemer. Hvert delsystem repræsenteres ved en trappekurve som på fig. 3.3. Som afsluttende eksempel vises på fig. 3.5 og 3.6 fordelingskurver for parallelkoblinger af henholdsvis 15 enheder á 1 MW og 5 enheder á 3 MW.

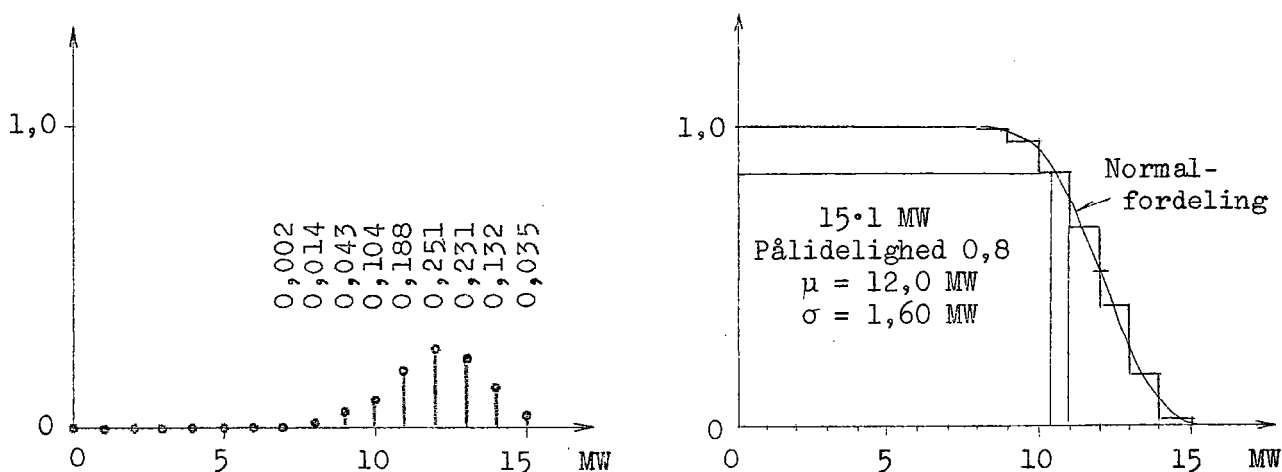


Fig. 3.5. System med 15 enheder á 1 MW.

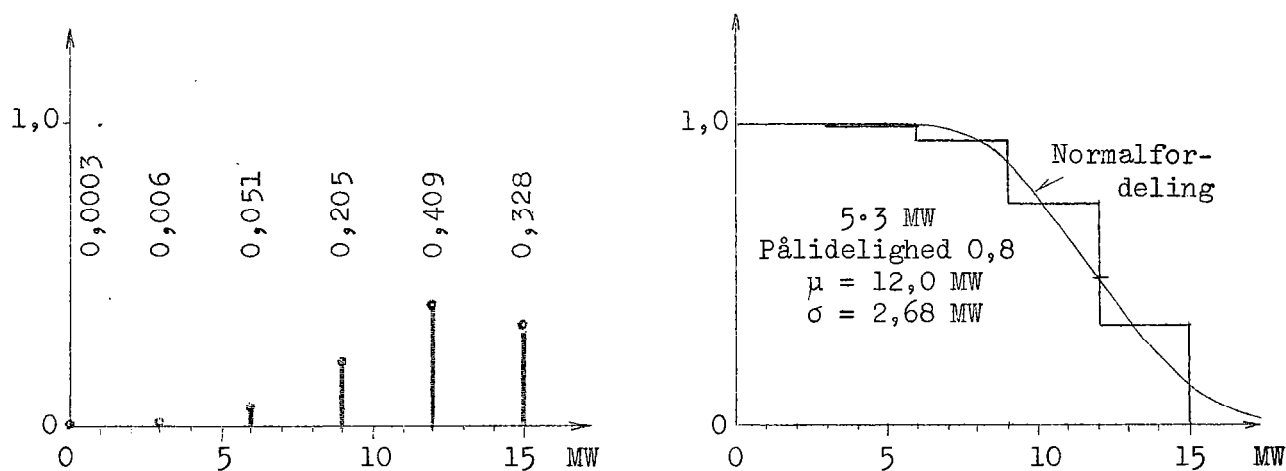


Fig. 3.6. System med 5 enheder á 3 MW.

Ved vurderingen af et systems egenskaber kan man ofte med fordel anvende en tilnærmelse til trappekurven. Hertil benyttes oftest normalfordelingen, der er en kontinuert fordeling. En normalfordeling af den variable P med middelværdien μ og spredningen σ har denne frekvensfunktion:

$$\varphi(P) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(P-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

og denne fordelingsfunktion:

$$\Phi(P) = \int_{-\infty}^P \phi(P) dP = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^P e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx$$

Når man søger den normalfordeling, som bedst beskriver en given trappefordeling, må man finde trappefordelingens middelværdi og spredning. Middelværdien beregnes således:

$$\mu = \sum_n P_n \cdot p_n$$

hvor summationen omfatter samtlige mulige ydeevner (P_n), og hvor p_n er frekvensfunktionens værdi svarende til ydeevnen P_n . Spredningen σ for en trappefordeling beregnes således:

$$\sigma^2 = \sum_n (\mu - P_n)^2 \cdot p_n = \left[\sum_n P_n^2 \cdot p_n \right] - \mu^2$$

Ved anvendelsen af den således fastlagte normalfordeling går man ud fra en tabel over fordelingsfunktionen for normalfordelingen af den variable t med middelværdien 0 og spredningen 1 (se fig. 3.7). Den aktuelle variable P og tabellens variable t hænger således sammen:

$$P = \mu - \sigma \cdot t \quad \text{og} \quad t = \frac{\mu - P}{\sigma}$$

Skal man finde den til en given sandsynlighed svarende effekt, kan man af tabellen finde den til sandsynligheden svarende værdi af t , hvorefter P bestemmes af ovenstående udtryk. Eksempelvis finder man, at der til en sandsynlighed på 0,98 svarer en t -værdi på 2,05. I ELSAM's sikret-effekt-beregning anvendes en t -værdi på 2. Dette giver en sandsynlighed for udfald under maksimum på ca. 0,02. Regner man med, at maksimalbelastningen nås fem gange på et år, skulle man i gennemsnit komme i effektunderskud hvert 10. år. Den sikrede effekt bliver middelværdien minus 2 gange spredningen:

$$P_S = \mu - 2 \cdot \sigma$$

Skal man på den anden side finde den til en given effekt svarende sandsynlighed, beregnes t af formlen, hvorefter der kan slås op i tabellen.

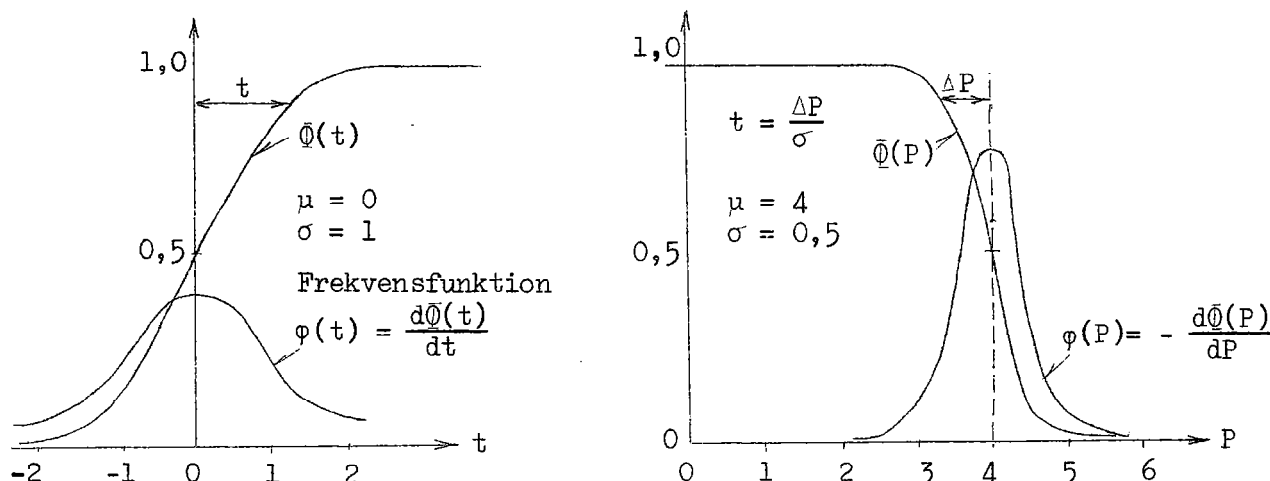


Fig. 3.7. Eksempler på normalfordelinger.

Ved addition af flere stokastiske variable (svarende til parallelkobling af elektriske systemer) har man bekvemme regler til bestemmelse af den resulterende middelværdi og spredning. For den variable

$$P_R = P_1 + P_2 + \dots + P_n$$

bliver middelværdien

$$\mu_R = \mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n$$

medens spredningen bestemmes af:

$$\sigma_R^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2$$

Denne regel forudsætter ikke, at de indgående variable er normalfordelte. Begreberne middelværdi og spredning kan anvendes i forbindelse med enhver fordeling. Ved at forudsætte, at den resulterende stokastiske variabel (P_R) er normalfordelt, har man hele fordelingen bestemt, når man kender μ_R og σ_R . Herpå beror i væsentlig grad normalfordelingens anvendelighed.

Reglen vil blive anvendt i kapitel 4.

Det har vist sig, at fordelingsfunktionen for et system med få enheder (jvf. fig. 3.6) afviger temmelig meget fra normalfordelingen. Her er de to parametre, middelværdi og spredning ikke tilstrækkelige til karakterisering af systemet. De kan suppleres med "momenter af højere orden", hvorved tilnærmelsen kan gøres vilkårligt god. Også for disse momenter gælder simple parallelkoblingsregler.

3.3 Sammenstilling af ydeevne og belastning - Risikoindeks

Betydningen af den just beskrevne fordelingsfunktion er, at man af kurven kan aflæse sandsynligheden for, at systemet kan dække én belastning. Den kan også anvendes den anden vej, idet man ud for en eller anden sandsynlighed, som ønskes overholdt, kan aflæse den belastning, som udgør systemets sikrede effekt.

Man kan i ét tal udtrykke sandsynligheden for, at systemets ydeevne er utilstrækkelig i en periode, bestående af intervaller med forskellige belastninger. Den for hvert interval aflæste sandsynlighed for aflastning vil indgå i dette tal med en vægt, der svarer til intervallets længde. Den således bestemte sandsynlighed kaldes systemets risikoindeks i den betragtede periode.

Ønskes et risikoindeks bestemt for en periode på et år, forudsætter den skitserede fremgangsmåde,

at det betragtede maskineri ikke er ude af drift af andre årsager end eventuelle havarier, og

at belastningen er konstant for hvert af de intervaller, hvori året inddeles.

Sidstnævnte betingelse kan i rimelig grad opfyldes ved, at intervallerne gøres tilstrækkeligt små (f.eks. 1 time). Den første betingelse kan derimod ikke opfyldes, idet maskineftersynene medfører, at forsynings-sikkerheden i sommerintervallerne ikke er så god, som den anførte beregningsmetode vil vise. Denne mangel udgør beregningens væsentligste svaghed.

Til brug i beregningen ordnes periodens intervalbelastninger efter størrelse, d.v.s. som en varighedskurve.

Forud for en vurdering af betydningen af den omtalte unøjagtighed og af mulighederne for at korrigere herfor vil det være hensigtsmæssigt at beskrive, hvorledes det er muligt at lade et risikoindeks for hvert interval indgå i resultatet med en vægt svarende til intervallængden. Metoden er først beskrevet af Calabrese i litt. 12.

I en periode med konstant belastning er risikoindekset lig med den sandsynlighed, som kan aflæses ud for denne belastning på fordelingsfunktionen. Eksempelvis læses af fig. 3.5, at sandsynligheden for, at det der beskrevne system kan producere 11 MW eller mere, er 0,837. Risikoindekset svarende til en belastning på 11 MW er således 0,163. Fra frekvensfunktionen kan man af sandsynlighederne for effekter større end eller lig med 11 MW danne en sum for tilfældene med "tilstrækkelig effekt":

$$\Sigma p^+ = 0,837$$

Sandsynlighederne for lavere effekter danner tilsvarende en sum for tilfældene med "utilstrækkelig effekt":

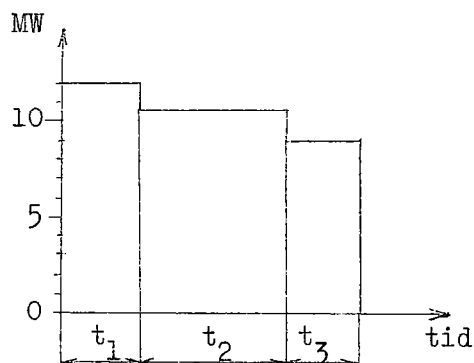
$$\Sigma p^- = 0,163$$

Det må altid gælde, at

$$\Sigma p^+ + \Sigma p^- = 1$$

Eksempel. Belastning som trappeformet varighedskurve.

For systemet fra fig. 3.5 beregnes risikoindeks for en periode bestående af 3 intervaller med belastningerne 9, $10\frac{1}{2}$ og 12 MW:



$$\begin{aligned} t_1 &= 2 \text{ timer} & - & 12 \text{ MW} \\ t_2 &= 4 \text{ " } & - & 10\frac{1}{2} \text{ MW} \\ t_3 &= 2 \text{ " } & - & 9 \text{ MW} \\ T &= t_1 + t_2 + t_3 & = & 8 \text{ timer} \end{aligned}$$

Fig. 3.8. Varighedskurve.

Betragter man i denne periode intervallet med belastningen 12 MW, må på fig. 3.5 summen af de aflæste sandsynligheder korrigeres med faktoren $\frac{t_1}{T} = 0,25$ (se den indrammede forklaring side 25)

$$\Sigma p_1^+ = 0,649 \cdot 0,25 = 0,162$$

$$\Sigma p_1^- = 0,351 \cdot 0,25 = 0,088$$

Tilsvarende findes for intervallerne 2 og 3:

$$\Sigma p_2^+ = 0,837 \cdot 0,50 = 0,419$$

$$\Sigma p_2^- = 0,163 \cdot 0,50 = 0,081$$

$$\Sigma p_3^+ = 0,984 \cdot 0,25 = 0,246$$

$$\Sigma p_3^- = 0,016 \cdot 0,25 = 0,004$$

Ved summation af værdierne for "tilstrækkelig effekt",

$$\Sigma p^+ = \Sigma p_1^+ + \Sigma p_2^+ + \Sigma p_3^+ = 0,827$$

Ved summation af værdierne for "utilstrækkelig effekt":

$$\Sigma p^- = \Sigma p_1^- + \Sigma p_2^- + \Sigma p_3^- = 0,173$$

$$\Sigma p^+ + \Sigma p^- = 1$$

Dette resultat kan sammenfattes således, at det på fig. 3.5 beskrevne system over for belastningen på fig. 3.8 har et risikoindeks på 0,173.

Idet belastningen opfattes som en generator med negativ effekt, kan dens varighedskurve betragtes som belastningens fordelingsfunktion. Ved parallelkobling af denne generator med systemets øvrige generatorer findes en fordelingsfunktion, der kan betragtes som en "varighedskurve for overskydende effekt" (fig. 3.9). Kurvens negative værdier repræsenterer de tilfælde, hvor man har utilstrækkelig effekt. Kurvens yderste venstre punkt svarer til en effektmangel på 12 MW. Sandsynligheden for, at dette indtræffer, er $8,2 \cdot 10^{-12}$. Afskæringen på den lodrette akse viser risikoindekset 0,173.

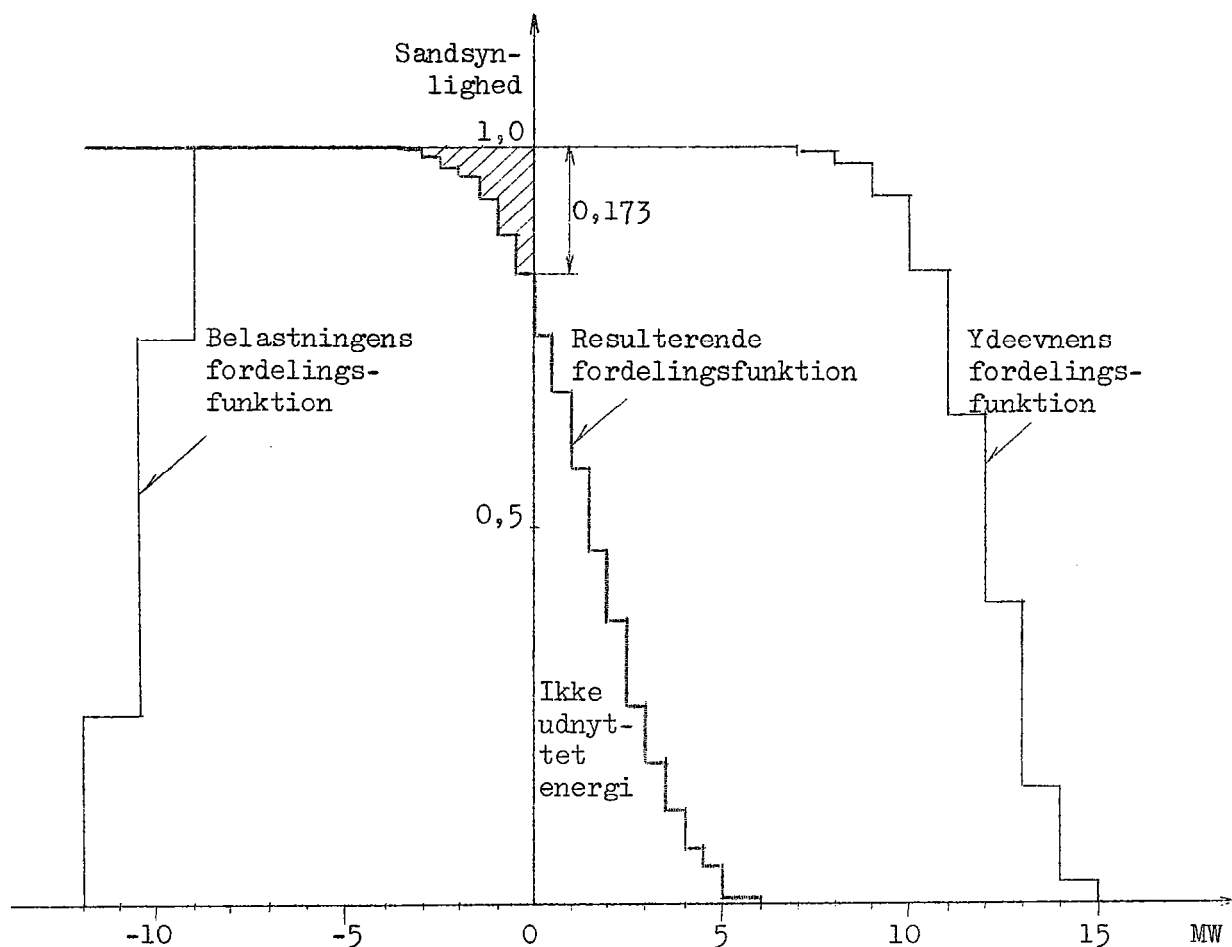


Fig. 3.9. Bestemmelse af risikoindeks.

Det skraverede areal udgør "ikke leveret energi" og kan, taget i forhold til belastningen udtrykke sandsynligheden for manglende energi. Denne størrelse varierer ikke på nogen entydig måde med den tidligere definerede "sandsynlighed for manglende effekt" (risikoindeks). Arealet over den positive del af abscisseaksen er "ikke udnyttet energi".

Regner man med, at vort system har en god forbindelse til andre områder, kan den negative del af kurven betragtes som en varighedskurve for den energi, der må importeres til dækning af havarier. Denne varighedskurve registrerer kvantitativt, hvor sikkert maskineriet er over for den optrædende belastning. Som mål herfor kan man anvende kurvens areal (energikriterium) eller afskæringen på akse (effektkriterium). Intet af disse kriterier er tilstrækkeligt til en strengt korrekt jævnføring af to forskellige systemer. Man kommer ved en sammenligning nemt ud for, at det ene system (med f.eks. små enheder) har størst sandsynlighed for manglende effekt, mens det andet system (med f.eks. store enheder) har størst sandsynlighed for manglende energi. Da er de to systemer inkommensurable. Imidlertid skal man opstille et sammenligningskriterium, og hertil vælges i denne undersøgelse afskæringen på den lodrette akse (effektkriteriet). Det bety-

der, at to "lige gode" systemer kommer til at mangle effekt i lige lang tid, men ikke nødvendigvis lige meget.

- - - - -

En repræsentation af en belastningsvarighedskurve med en rimelig nøjagtighed ved hjælp af en trappekurve fordrer en trappe med et stort antal trin. Man kan derfor enklere opnå en passende tilnærmelse til varighedskurven ved sammensætning af rette linier, som vist på fig. 3.10.

Eksempel. Belastning som varighedskurve sammensat af rette linier

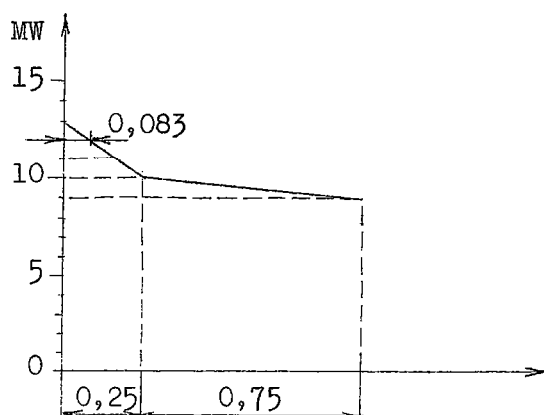


Fig. 3.10. Varighedskurve.

Ved bestemmelse af et risikoindeks for systemet fra fig. 3.5 i forbindelse med varighedskurven på fig. 3.10 foretages en undersøgelse for hver mulig ydeevne. Med ydeevner på 13, 14 og 15 MW kan belastningen dækkes i alle tilfælde. På fig. 3.5 aflæses af frekvensfunktionen sandsynligheden for hver af disse maksimale ydeevner:

$$p_{15}^+ = 0,035$$

$$p_{14}^+ = 0,132$$

$$p_{13}^+ = 0,231$$

En ydeevne på 12 MW vil være utilstrækkelig i $\frac{1}{12}$ ($= 0,083$) af belastningens varighed:

$$p_{12}^- = 0,251 \cdot 0,083 = 0,021$$

$$p_{12}^+ = 0,251 \cdot (0,75 + 0,167) = 0,230$$

$$p_{11}^- = 0,188 \cdot 0,167 = 0,031$$

$$p_{11}^+ = 0,188 \cdot (0,75 + 0,083) = 0,157$$

$$p_{10}^- = 0,104 \cdot 0,25 = 0,026$$

$$p_{10}^+ = 0,104 \cdot 0,75 = 0,078$$

$$p_9^- = 0,043$$

Alle lavere effekter er til enhver tid utilstrækkelige:

$$p_0^- = 0,016$$

Af disse tal findes ved summation:

$$\Sigma p^- = 0,137 \quad (\text{risikoindeks})$$

$$\Sigma p^+ = 0,863$$

og som kontrol:

$$\Sigma p^+ + \Sigma p^- = 1,000$$

3.4 Program til beregning af risikoindeks

Til beregning af risikoindekser er der foretaget en videreudvikling af NESA's program til parallelkobling af flere systemer. I ELSAM-KRAFTIMPORT-undersøgelsen har programmet været anvendt i forbindelse med Datacentralens regneanlæg: IBM 7074. Programmet er beskrevet i litt. 16, hvis resumé gengives her:

Ud fra oplysninger om de enkelte blokanlægs havarital og pålidelighedstal beregnes samhørende værdier af til rådighed stående effekt og tilsvarende sandsynlighed, idet der tilføjes én blokkenhed ad gangen, indtil alle enheder i systemet er taget med. For værker med dampsamleskinner kan opgives en tabel med samhørende værdier af sandsynlighed og til rådighed stående effekt. På samme måde, som en enhed - eller gruppe af enheder - kan føjes til systemet, kan en enhed - eller gruppe af enheder - der allerede er indregnet, trækkes ud af systemet. Resultatet af denne beregning bliver eksakt det samme, som hvis den (de) pågældende enhed(er) ikke havde været medregnet på noget tidspunkt. Den således beregnede fordelingsfunktion for til rådighed stående effekt kan derpå sammenregnes med en belastningsvarighedskurve - repræsenteret ved en brudt linie - og sandsynligheden for tilstrækkelig eller utilstrækkelig effekt derved beregnes. Med bibeholdelse af varighedskurvens form kan belastningsværdierne multipliceres op svarende til en vilkårlig stigningsprocent, inden fornyet beregning af sandsynlighed for effektmangel finder sted. Belastningens varighedskurve kan dog også repræsenteres ved en trappekurve og behandles af programmet som en negativ generator. I dette tilfælde kan programmet ikke foretage omproportionering af varighedskurvens ordinatværdier.

3.5 Sammenhæng mellem middelværdi, spredning, havarital og risikoindeks

For systemer uden dampsamleskinner kan følgende relationer vises:

1. Fordelingsfunktionens middelværdi u er givet ved havaritallet h og den totalt installerede effekt P_T ved:

$$\mu = (1 - h) \cdot P_T$$

2. Fordelingsfunktionens spredning σ er givet ved havaritallet h , den ækvivalente maskinstørrelse $P_{\text{ækv}}$ og den totalt installerede effekt P_T som:

$$\sigma^2 = h(1 - h) \cdot P_{\text{ækv}} \cdot P_T$$

Ad 1 Middelværdien for en fordeling er givet som summen af de enkelte middelværdier:

$$\mu = \sum P_i \cdot (1 - h_i)$$

da h er regnet konstant, er dette udtryk lig med:

$$\mu = (1 - h) \cdot \sum P_i = (1 - h) \cdot P_T$$

Udtrykket gælder lige så vel for maskiner af forskellig størrelse, idet middelværdien er uafhængig af maskinstørrelse og antal.

Ad 2 Spredningen for en binomialfordeling er givet ved:

$$\sigma = \sqrt{n \cdot p \cdot q} \quad \text{eller} \quad \sigma^2 = n \cdot p \cdot q$$

hvor p er sandsynligheden for en vis hændelse, og q er sandsynligheden for den komplementære hændelse under forudsætning af n identiske enheder. Hvis n , som her betegner antallet af lige store maskiner hver med effekten P MW, kan udtrykket til vort formål omskrives til:

$$\sigma^2 = n \cdot h \cdot P \cdot (1 - h) \cdot P = h(1 - h) \cdot P \cdot P_T$$

For maskiner af forskellig størrelse må man i stedet beregne spredningen for de enkelte maskiner af:

$$\sigma_1^2 = h \cdot P_1 \cdot (1 - h) \cdot P_1$$

$$\sigma_2^2 = h \cdot P_2 \cdot (1 - h) \cdot P_2$$

⋮

$$\sigma_n^2 = h \cdot P_n \cdot (1 - h) \cdot P_n$$

Spredningen for maskinerne som helhed findes af:

$$\sigma_T^2 = h(1 - h) \cdot \left\{ P_1^2 + P_2^2 + \text{----} + P_n^2 \right\} = h(1 - h) \cdot \sum_n P_i^2$$

Man kan med god tilnærmelse benytte enhver anden maskinpark, der blot har samme middelværdi og spredning. Af udtrykket for middelværdien ses, at man må have samme installerede effekt (samme havarital forudsat). Af udtrykket for spredningen ses, at man i stedet for maskinerne P_i lige

så godt kan anvende maskiner af samme størrelse $P_{\text{ækv}}$, når blot

$$\sum_n P_i^2 = \frac{P_T}{P_{\text{ækv}}} \cdot P_{\text{ækv}}^2 = P_T \cdot P_{\text{ækv}}$$

hvor $\frac{P_T}{P_{\text{ækv}}}$ er det ækvivalente antal maskiner af størrelsen $P_{\text{ækv}}$. Man får da:

$$\sigma_T^2 = h \cdot (1 - h) \cdot P_{\text{ækv}} \cdot P_T$$

og samtidig:

$$P_{\text{ækv}} = \frac{\sum P_i^2}{P_T} = \frac{\sum P_i^2}{\sum P_i}$$

Man vil også komme ud for at arbejde med en sammensætning af maskiner med forskellige havarital. Dampkraftanlæg regnes normalt at have havarital omkring 5-10 %, medens vandkraftanlægs havarital kan sættes til omkring 1 %. Ved et bedre kendskab til havaritalene for forskellige områder kan man ønske at regne med mere nøjagtige værdier for områderne, således at et område, der på grund af ekstra god vedligeholdelse af maskinerne, vil være i stand til at tage dette til indtægt ved mindre nødvendig reserve.

Består maskinparken af et antal maskiner n af forskellig størrelse P_i og med forskellig havarital h_i , er middelværdien bestemt af:

$$\mu = \sum_n [(1 - h_i) \cdot P_i]$$

medens spredningen er:

$$\sigma^2 = \sum_n [h_i (1 - h_i) \cdot P_i^2]$$

En maskinpark bestående af lige store maskiner $P_{\text{ækv}}$ med et ækvivalent havarital $h_{\text{ækv}}$, således at man får samme værdi af middelværdi og spredning, kan bestemmes af:

$$\mu = \sum [(1 - h_i) \cdot P_i] = (1 - h_{\text{ækv}}) \cdot P_T$$

eller

$$\sum [h_i \cdot P_i] = h_{\text{ækv}} \cdot P_T$$

hvoraf

$$h_{\text{ækv}} = \frac{\sum (h_i \cdot P_i)}{P_T} = \frac{\sum (h_i \cdot P_i)}{\sum P_i}$$

$$\sigma^2 = \sum h_i (1 - h_i) \cdot P_i^2 = h_{\text{ækv}} \cdot (1 - h_{\text{ækv}}) \cdot P_{\text{ækv}} \cdot P_T$$

hvoraf:

$$P_{\text{ækv}} = \frac{\sum (h_i (1 - h_i) \cdot P_i^2)}{h_{\text{ækv}} (1 - h_{\text{ækv}}) \cdot P_T}$$

En maskinpark med lige store maskiner af størrelsen $P_{\text{ækv}}$ med havarital $h_{\text{ækv}}$ vil med god tilnærmelse give samme forsyningskvalitet som det oprindelige system. Ved hjælp af bilag 21 kan risikoindeks som funktion af reserveeffekten findes.

3.6 Risikoindeksets afhængighed af systemets parametre

Man har søgt at bestemme risikoindeksets afhængighed af de faktorer, der har væsentlig indflydelse på dette. Denne undersøgelse har ført til opstilling af kurver og kriterier, som kan anvendes ved en tilnærmet manuel beregning af risikoindekser. Nøjagtigheden ved denne beregningsform er ganske tilfredsstillende.

Den undersøgelse, der har ført til disse resultater, er udført ved gennemregning af 8 produktionssystemer, hvert sammensat af et antal lige store enheder. Systemerne sammensættes således:

100 MW enheder	=	40	•	100 MW	alt.	50	•	100 MW
200 " "	=	20	•	200 " "		25	•	200 "
400 " "	=	10	•	400 " "		13	•	400 "
800 " "	=	5	•	800 " "		7	•	800 "

For disse systemer er risikoindeksets afhængighed af følgende variable undersøgt ved hjælp af ciffermaskinprogrammet:

- 1) Reserveeffekten
- 2) Den relative enhedsstørrelse
- 3) Havarital (1, 3, 5, 7 og 10 %)
- 4) Forskellige former på varighedskurven
(som angivet i bilag 8).

1) Reserveeffektens betydning:

I bilag 9-12 er risikoindeks optegnet som funktion af reserveeffekten. Der er i alle tilfælde anvendt værdier på grundlag af varighedskurve 1 i bilag 8 (timebelastninger). Hvert kurveblad gælder for én bestemt maskinstørrelse. Antallet af maskiner og havaritallet er angivet som parametre.

Man ser heraf, at risikoindeks aftager meget stærkt ved voksende reserveeffekt.

I bilag 13 er risikoindeks for havaritallet 5 % optegnet som funktion af den relative reserveeffekt givet som:

$$\text{Reserveprocent} = \frac{\text{Reserveeffekt} \cdot 100}{\text{Totalt install. effekt} - \text{reserveeffekt}} \quad \%$$

$$= \frac{\text{Reserveeffekt} \cdot 100}{\text{Maksimal belastning}} \quad \%$$

Antallet af lige store maskiner er angivet som parametre.

Det fremgår ligeledes af dette bilag, at risikoindeks aftager med voksende reserveeffekt, samt at dette forhold er mest udpræget ved mange maskiner.

Ved meget få maskiner vil det være vanskeligt eller endog umuligt at opnå en given værdi for risikoindeks selv med meget store værdier for reserveeffekten. Ved en normal varighedskurve (belastningen altid større end 0) vil risikoindeks være større end eller lig med sandsynligheden for 0 MW til rådighed (jvf. v på fig. 3.3). Denne betingelse kan udtrykkes således:

$$\text{Risikoindeks} = (\text{havarital})^n$$

hvor n er antallet af maskiner. Havaritallet angives i rent tal. For forskellige værdier af havarital og risikoindeks er i nedenstående tabel angivet de mindste værdier af maskintallet n, der opfylder ovennævnte betingelser:

Havarital \ Risikoindeks	0,01	0,03	0,05	0,07	0,10
10^{-3}	2	2	3	3	3
10^{-4}	2	3	4	4	4
10^{-5}	3	4	4	5	5

For værdier af n mindre end de anførte tabelværdier vil det ikke være muligt, uanset reserveprocentens størrelse, at opnå det givne risikoindeks.

Disse værdier er så små, at de ikke har betydning for denne undersøgelse. De viser dog, at isolerede værker med få maskiner ikke alene kan opretholde tilstrækkelig forsyningspålidelighed.

2) Den relative enhedsstørrelses betydning:

I bilag 14-16 er risikoindeks angivet som funktion af den relative maskinstørrelse, der er givet ved:

$$\frac{\text{Enhedsstørrelse} \cdot 100}{\text{Totalt installeret effekt}} \quad \%$$

Hvert kurveblad gælder for én bestemt værdi af havaritallet. Reserveprocenten er angivet som parameter.

Det fremgår heraf, at risikoindeks vokser stærkt med voksende enhedsstørrelse.

3) Havaritallets betydning:

I bilag 17 og 18 er risikoindeks optegnet som funktion af havaritallet. Hvert kurveblad gælder for én bestemt værdi af den relative maskinstørrelse. Reserveprocenten er angivet som parameter.

Det ses, at risikoindeks er stærkt voksende for voksende værdier af havaritallet.

4) Varighedskurvens indflydelse:

Hidtil har alle beregninger været baseret på varighedskurve 1 i bilag 8. Da sandsynligheden for en given effekt til rådighed normalt stiger meget stærkere ved faldende effekt, end sandsynligheden for en given belastning eller mere stiger ved faldende belastning, vil de væsentligste bidrag til risikoindeks komme fra de øverste belastningsværdier, altså fra varighedskurvens spids. En afvigelse på de bidrag til risikoindeks, der stammer fra belastninger under 80 %, vil kun give en ubetydelig ændring af risikoindeks.

Det samme forhold kommer frem ved sammenligning af risikoindeks beregnet på grundlag af forskellige varighedskurver. Ser man på de dele af varighedskurverne 1, 3 og 4, der ligger over 85 % belastning, er tidsværdierne for 3 12,3 gange tidsværdierne for 1, medens tidsværdierne for 4 er 30 gange tidsværdierne for 1. Tidsværdierne for 4 er 2,44 gange tidsværdierne for 3 for belastninger over 80 %.

I bilag 19 er for en række beregnede værdier af risikoindeks på grundlag af de tre varighedskurver beregnet forholdet mellem sammenhørende risikoindekser. Det ses af skemaet, at for maskinantal på ca. 20 og derved er disse forhold næsten identiske med de tilsvarende forhold mellem tidsværdierne i varighedskurvernes øverste dele, svarende til at sandsynligheden for kun at have effekter mindre end 80-85 % af belastningen til rådighed bliver meget lille ved store maskinantal.

Ved få maskiner vil selv store værdier af reserveeffekten ikke være tilstrækkelig til at bevirke, at kun varighedskurvens øverste del er bestemmende.

I praksis vil maskinantalet normalt være mere end 15-20 med havarital på omkring 5-7 %. For at få en god bestemmelse af risikoindeks er det derfor især nødvendigt at repræsentere varighedskurvens øverste del (spidsen) med god nøjagtighed. Forløbet mellem 0 og 80 % belastning er mindre vigtigt, idet selv grove afvigelser næppe kan spores i det beregnede risikoindeks.

Det samme kommer til udtryk ved beregning af risikoindeks på grundlag af varighedskurve 2, der har en udpræget spids. Risikoindeks som funktion af reserveeffekten for 200 MW enheder er optegnet i bilag 20. Selv om belastningsfaktoren for varighedskurve 2 er noget større end for varighedskurve 1, bliver risikoindeks væsentlig mindre ved varighedskurve 2. Dette forhold kommer naturligvis især til udtryk ved små havarital og mange maskiner.

I bilag 21 er for tre forskellige værdier af risikoindeks (10^{-3} , 10^{-4} og 10^{-5}) optegnet reserveprocenten som funktion af den relative maskinstørrelse ved anvendelse af varighedskurve 1. Havaritallet er angivet som parameter. Det viser sig, at denne afhængighed med meget god tilnærmelse kan afbildes ved rette linier inden for det område, der normalt har interesse, d.v.s. maskinstørrelser mellem 1 og 10 %. For varighedskurver, hvis

tidsværdier (især i den øverste del) er en konstant, a , gange tidsværdierne i varighedskurve 1 i bilag 8, gælder kurverne med god tilnærmelse for risikoindekserne $a \cdot 10^{-3}$, $a \cdot 10^{-4}$ og $a \cdot 10^{-5}$.

Maskiner af forskellig størrelse:

I de hidtil nævnte beregninger har der været tale om tilfælde med lige store maskiner. Dette vil sjældent være tilfældet i praksis.

Eksempler på forholdene ved forskellig maskinstørrelse inden for samme område er vist i bilag 22, hvor risikoindeks for 25 enheder på i alt 5000 MW er optegnet som funktion af reserveeffekten. Beregningerne er foretaget på grundlag af varighedskurve 1 og med havaritallene 1, 5 og 10 %.

Der er regnet med følgende maskinsammensætninger:

- 1) 25 lige store enheder à 200 MW (4 % af 5000 MW)
- 2) 8 enheder à 150 MW (3 % af 5000 MW)
 9 " " 200 " (4 % " 5000 ")
 8 " " 250 " (5 % " 5000 ")
- 3) 6 enheder à 50 MW (1 % af 5000 MW)
 5 " " 100 " (2 % " 5000 ")
 7 " " 200 " (4 % " 5000 ")
 7 " " 400 " (8 % " 5000 ")

I alle tre tilfælde er middelmaskinstørrelsen lig med 200 MW eller 4 % af den totale installerede effekt. Tilfælde 1 og 2 afviger kun lidt fra hinanden svarende til, at maskinerne grupperer sig tæt omkring middelværdien. Tilfælde 3 har betydeligt større risikoindeks for en given reserveeffekt end tilfælde 1 og 2 svarende til stor spredning omkring middelværdien.

Man kan således ikke lægge middelværdien af maskinstørrelserne til grund for en bestemmelse af risikoindeks for et område med maskiner af forskellig størrelse. Det ses, at de store maskiner er temmelig afgørende for afhængigheden mellem risikoindeks og reserveeffekt.

Man kan imidlertid ud fra sandsynlighedsregningens love udlede en ækvivalent maskinstørrelse, $P_{\text{ækv}}$, der sammen med bilag 21 netop giver de rigtige værdier af reserveeffekten for givne værdier af risikoindeks. Den ækvivalente maskinstørrelse findes af:

$$P_{\text{ækv}} = \frac{\sum P_i^2}{\sum P_i}$$

hvor P_i angiver størrelsen af de enkelte maskiner i % eller MW.

Heraf findes for de tre tilfælde:

- 1) 25 maskiner à 4 %, i alt 100 %

$$P_{\text{ækv}} = \frac{25 \cdot 4^2}{25 \cdot 4} = 4 \%$$

- 2) $8 \cdot 3\% + 9 \cdot 4\% + 8 \cdot 5\%$, i alt 100 %

$$P_{\text{ækv}} = \frac{8 \cdot 3^2 + 9 \cdot 4^2 + 8 \cdot 5^2}{100} = \frac{72 + 144 + 200}{100} = 4,2 \%$$

3) $6 \cdot 1\% + 5 \cdot 2\% + 7 \cdot 4\% + 7 \cdot 8\%$, i alt 100 %

$$\begin{aligned} P_{\text{ækv}} &= \frac{6 \cdot 1^2 + 5 \cdot 2^2 + 7 \cdot 4^2 + 7 \cdot 8^2}{100} \\ &= \frac{6 + 20 + 112 + 448}{100} \\ &= 5,9 \% \end{aligned}$$

Af bilag 21 findes derefter nødvendig reserveeffekt for risikoindeks 10^{-3} , 10^{-4} og 10^{-5} for havaritalle 1, 5 og 10 %. Værdierne er opført i bilag 23 sammen med de tilsvarende værdier fra bilag 22. Man ser, at de af bilag 21 på grundlag af ækvivalent maskinstørrelse beregnede værdier stemmer udmærket overens med de i bilag 22 optegnede værdier, der stammer fra de direkte beregninger.

Da varighedskurve 1 meget nær svarer til den varighedskurve, der er benyttet ved ELSAM-KRAFTIMPORT-undersøgelsen, er metoden anvendt på en af kurverne i udbygningsplan S3K for KRAFTIMPORT.

Eksempel

I stadium 1983/84 er den installerede effekt 5850 MW fordelt på følgende maskiner:

<u>Maskiner</u>	<u>Maskinstørrelse i % af totalt install. effekt</u>	<u>Kvadratet på maskinstørrelsen gange antal maskiner</u>
2 x 750 MW	12,81	328
2 x 600 MW	10,25	210
1 x 470 MW	8,03	64,5
2 x 370 MW	6,32	80,0
3 x 235 MW	4,01	48,3
5 x 130 MW	2,22	24,5
KYV 3 x 60 MW	1,02	3,1
MØV 45 MW	0,77	0,6
MØV 75 MW	1,28	1,7
HCØ 66 MW	1,13	1,2
KB 6 x 30 MW	0,51	1,5
+ små enheder		763,4

Den ækvivalente maskinstørrelse bliver:

$$P_{\text{ækv}} = \frac{763,4}{100} = 7,6 \%$$

Af bilag 21 findes for havarital 7 % den nødvendige reserveeffekt ved risikoindeks 10^{-3} , 10^{-4} og 10^{-5} til henholdsvis 22,1 %, 40,0 % og 54,0 %,

svarende til maksimalbelastninger på 4800 MW, 4180 MW og 3800 MW.

De tilsvarende belastninger for S3N stadium 1983/84 er efter fradrag af 380 MW, svarende til den sikrede effekt fra Sverige, lig med henholdsvis 4900 MW, 4260 MW og ca. 3800 MW. Der er altså også i dette tilfælde god overensstemmelse mellem de direkte og indirekte beregnede værdier.

Eksempel

Der er tillige foretaget en beregning med delvis udbygning med 50 MW spidskraftblokke. Regner man med i stadium 1983/84 at have erstattet den ene 750 MW blok med i alt 12 stk. 50 MW blokke, har man en installeret effekt på 5700 MW. Man kommer da til følgende resultat:

<u>Maskiner</u>	<u>Maskinstørrelse i % af totalt install. effekt</u>	<u>Kvadratet på maskinstørrelsen gange antal maskiner</u>
1 x 750 MW	13,15	173,0
2 x 600 MW	10,51	221,0
1 x 470 MW	8,24	68,0
2 x 370 MW	6,49	84,1
3 x 235 MW	4,13	51,0
5 x 130 MW	2,28	26,0
3 x 60 MW	1,05	3,3
1 x 45 MW	0,79	0,6
1 x 75 MW	1,31	1,7
1 x 66 MW	1,16	1,3
6 x 30 MW	0,53	1,7
12 x 50 MW	0,88	9,3
		641,0

Den ækvivalente maskinstørrelse bliver:

$$P_{\text{ækv}} = \frac{641,0}{100} = 6,4 \%$$

der fører til en nødvendig reserveeffekt ved risikoindeks 10^{-3} , 10^{-4} og 10^{-5} på henholdsvis 19,5 %, 34,9 % og 45 % svarende til maksimalbelastningerne 4775 MW, 4225 MW og 3930 MW. Man kan altså med denne maskinpark, der er 150 MW mindre, holde en lige så god forsyningskvalitet som ved udbygning med store grundlastmaskiner. Ved direkte beregning er ligeledes fundet en besparelse på ca. 150 MW ved installation af små spidskraftmaskiner.

KAPITEL 4 RESERVEKRAV

=====

Resumé: Det kan være vanskeligt fra risikoindeksets talværdi at nå til en anskuelig forestilling om reservens størrelse. I undersøgelsen skal der imidlertid til sammenligninger bruges en værdi for risikoindekset. Til fastlæggelse af denne værdi har man beregnet risikoindekser for Samkøringen for årene 1952-62 og for ELSAM for året 1963/64. Man har herved fundet, at et risikoindeks på $2 \cdot 10^{-4}$ må anses for at være en passende grænseværdi. Ved en sådan vurdering negligeres imidlertid muligheden for uforudsete belastningssvingninger. Sådanne er der ikke i undersøgelsen taget hensyn til, men i afsnittene 4.2 og 4.3 diskuteres sandsynligheden for disse afvigelsers forekomst samt deres konsekvenser. Der skelnes mellem den daglige driftstilrettelæggelse og prognoseringen over flere år. - Muligheden for forsinkelser i nyanlægs aflevering tages der ikke hensyn til. - Forekomsten af udlandsforbindelser medfører en betydelig reduktion af kravene til den installerede reserve. I bestemmelsen af den nødvendige reserve indgår udlandsforbindelser som en generator med pålideligheden 1. Denne generators effekt fastlægges hos KRAFTIMPORT ved en vurdering af den fremtidige udvikling i det svenske net og hos ELSAM ved en vurdering af, hvor stor reserveeffekt strukturen i det jysk-fynske system tillader, at man henter udefra.

4.1 Tilladelig risikoindeks

I risikoindekset har man et begreb, som følsomt registrerer ændringer i de parametre, som har betydning for et systems produktionssikkerhed.

Af hensyn til den økonomiske sammenligning bør undersøgelsens udbygningsplaner, så vidt det er muligt, indebære samme produktionssikkerhed. Nogle planer har imidlertid en sådan struktur, at produktionssikkerheden nødvendigvis må variere fra år til år. Kravet må derfor formuleres således: undersøgelsens udbygningsplaner bør for hvert år i undersøgelsesperioden kunne overholde en nærmere angivet produktionssikkerhed, d.v.s. risikoindekset bør ikke overstige en given værdi, men må på den anden side ligge så tæt under denne værdi, som planens struktur tillader.

Det er ikke på det foreliggende grundlag muligt ved en økonomisk optimalisering eller anden form for beregning at foretage en entydig fastlæggelse af dette risikoindeks. Effektarbejdsgruppen har af et historisk materiale sammenholdt de praktiske driftserfaringer med tilsvarende beregnede risikoindekser. Disse beregninger omfatter for Samkøringen årene 1952/53 til 1962/63 (se bilag 24) og for ELSAM året 1963/64, som reservemæssigt var det dårligste år, ELSAM indtil dette tidspunkt havde haft (se bilag 25). Efter gruppens skøn vil et risikoindeks på $2 \cdot 10^{-4}$ i forbindelse med de anvendte varighedskurver føre til et fornuftigt kriterium. I undersøgelsens udbygningsplaner er denne værdi søgt overholdt. I enkelte planer forekommer mindre overskridelser.

Hvis man ønsker begrebet risikoindeks sat i relation til mere kendte størrelser, finder man ud fra de her anførte definitioner, at risikoindekset udtrykker forholdet mellem den sandsynlige tid, hvor aflastning må finde sted, og totaltiden. Således betyder et risikoindeks på $2 \cdot 10^{-4}$, at den sandsynligste tid, hvori belastningen er større end ydeevnen, er ca. 2 timer ud af årets ca. 10^4 timer. Et sådant tal kan ikke direkte jvnføres med forsyningsselskabernes driftserfaringer, som også påvirkes af haverier i distributionssystemet.

Risikoindekset $2 \cdot 10^{-4}$ anvendes i undersøgelsen som sammenligningskriterium. Som nævnt foran er valget af denne værdi baseret på en gennemregning af historiske forhold for enkelte år. Der vil herhjemme og fra udlandet blive indsamlet yderligere statistisk materiale til nærmere belysning af problemet. Man håber herved at kunne reducere usikkerheden omkring begrebet risikoindeks. Når et mere omfattende erfaringsmateriale foreligger, vil man kunne udarbejde mere detaljerede regler for fastlæggelsen af risikoindekset.

4.2 Tilfældige belastningssvingninger

I den daglige driftstilrettelæggelse vil forudsigelsen af belastningen undertiden skabe større vanskeligheder end bedømmelsen af maskinerens ydeevne.

Som tidligere nævnt kan maskineriets ydeevne beskrives af en fordelingsfunktion, som kan tilnærmes ved en normalfordeling. Det betyder, at man forventer at have en vis ydeevne disponibel (middelværdien), og at der kan forudses afvigelser fra dette tal (karakteriseret ved spredningen).

På samme måde kan man tænke sig belastningen karakteriseret ved en eller anden forventet værdi (middelværdi) samt en spredning. Såfremt disse tal kendes, vil det være muligt på grundlag af sandsynlighedsregningens regler at fastlægge reserveprocenten som en normalfordeling med en middelværdi og en spredning (litt. 14). Reglerne herfor illustreres ved nedenstående figur 4.1, som viser de til de to normalfordelinger svarende frekvensfunktioner.

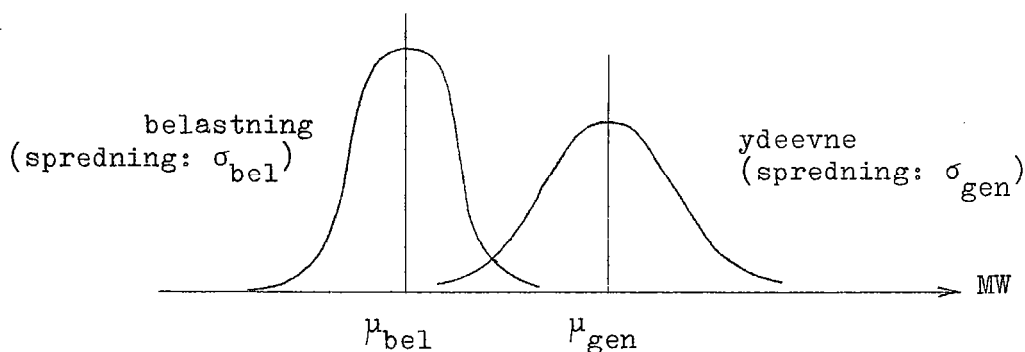


Fig. 4.1

Som et karakteristisk udtryk for reservens størrelse bestemmes differensen mellem ydeevne og belastning. Denne størrelse bliver normal-

fordelt med denne middelværdi:

$$\mu_{\text{res}} = \mu_{\text{gen}} - \mu_{\text{bel}}$$

For bestemmelse af spredningen gælder formlen

$$\sigma_{\text{res}} = \sqrt{\sigma_{\text{bel}}^2 + \sigma_{\text{gen}}^2}$$

Denne spredning skal betragtes som et mål for vor reservevurderings usikkerhed. Man ser, at hvis de to spredninger (σ_{bel} og σ_{gen}) ikke er af samme størrelsesorden, må den største afgøre, på hvilken måde man vil tilrettelægge sin løbende reserve.

Der er tidligere gjort rede for, hvorledes ydeevnens normalfordeling bestemmes.

Der er ikke fastlagt nogen standardmetode til bestemmelse af spredningen på belastningen. Til orientering om tallenes størrelsesorden refereres i det følgende de hos Samkøringen og ELSAM foretagne beregninger og de anvendte forudsætninger.

For Samkøringens vedkommende har man betragtet hverdages maksimum i 1963. Der er beregnet middelbelastninger uge for uge. Spredningen bestemmes af følgende formel:

$$\sigma_{\text{bel}} = \sqrt{\frac{\sum (P - \bar{P})^2}{n - 1}}$$

hvor P er en dags belastning, $\bar{P}$ den pågældende uges middelværdi og n antallet af observationer.

Beregningerne gav disse resultater:

Sommerhalvåret (1.4. - 30.9.)	9,5 MW
Vinterhalvåret (øvrige dage)	11,1 MW
Hele året	10,4 MW

Ansættelse af middelværdierne er sket på en anden måde i ELSAM's betragtninger. For året 1963 er der lagt en glat middelkurve gennem de observerede værdier for aftenmaksimum. I ovenstående formel indsættes for $\bar{P}$ middelkurvens værdi på den betragtede dag. I forhold til denne kurve er beregnet spredninger for hver måned:

	μ_{bel}	σ_{bel}	
Januar 1963	740 MW	37,6 MW	5,1 %
Februar	640 "	11,5 "	1,8 "
Marts	580 "	19,2 "	3,3 "
April	530 "	8,5 "	1,6 "
Maj	480 "	31,0 "	6,5 "
Juni	417 "	51,3 "	12,3 "
Juli	400 "	13,2 "	3,3 "
August	500 "	11,4 "	2,3 "
September	625 "	13,1 "	2,1 "
Oktober	675 "	12,2 "	1,8 "
November	750 "	7,5 "	1,0 "
December	775 "	11,6 "	1,5 "
Hele året 1963:		18,8 "	

%-værdierne er beregnet på basis af middelværdien af hver måneds døgnmaksimum. For samme år findes med de i undersøgelsen anvendte pålidelighedstal følgende værdier for produktionssiden:

	KRAFTIMPORT	ELSAM
	MW netto	MW netto
Installation	1036	880
Middelværdi (μ_{gen})	1005	816
Spredning (σ_{gen})	65	47

På nedenstående figur er med disse tal som baggrund søgt opstillet frekvensfunktioner for ELSAM for henholdsvis januar og juni 1963. Ifølge eftersynsplanerne har den disponible effekt i juni måned 1963 været ca. 680 MW. Den hertil svarende middelværdi er skønnet til 630 MW og spredningen til 40 MW.

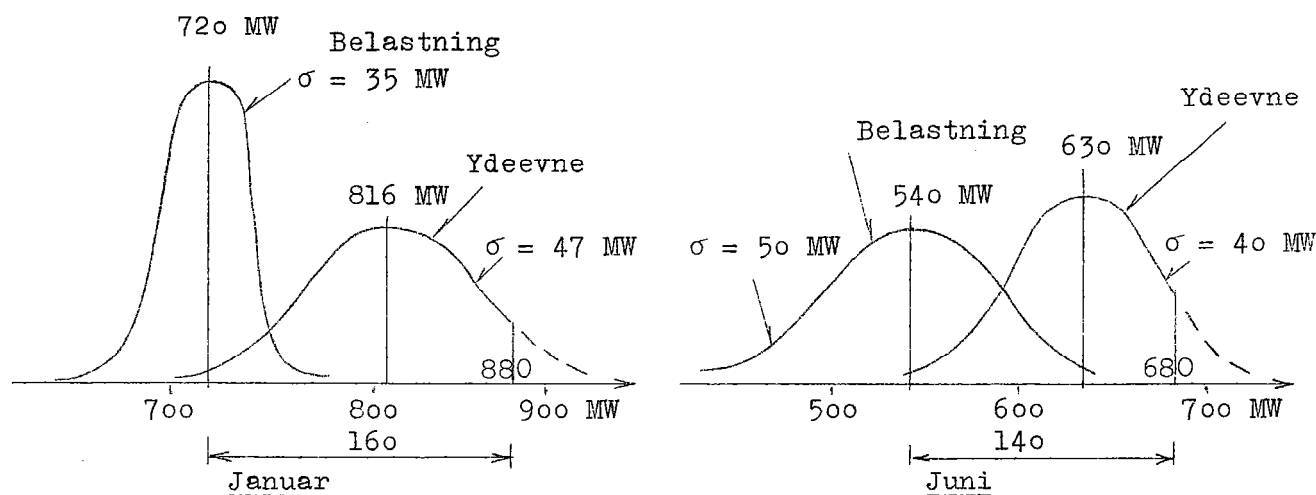


Fig. 4.2 Frekvensfunktion for ELSAM aftenmax. 1963.

På grundlag af figurens tal beregnes reservens normalfordeling.

Januar

Ydeevne - middelværdi:	μ_{gen}	=	816 MW
Belastning - " :	μ_{bel}	=	720 MW
Reserve - " :	$\mu_R = 816 - 720$	=	96 MW
" - spredning:	$\sigma_R = \sqrt{35^2 + 47^2}$	=	59 MW

Til bestemmelse af sandsynligheden for, at reserven bliver negativ, beregnes forholdet mellem reservens middelværdi og dens spredning. Undertiden benyttes denne størrelse direkte som udtryk for produktionssikkerheden og kaldes da t-værdien. Ved hjælp af en tabel over normalfordelingen kan den omsættes til en procentisk sandsynlighed.

$$t = \frac{96}{59} = 1,63$$

svarende til en sandsynlighed for udfald på 5,2 %.

Juni

Ydeevne	- middelværdi:	μ_{gen}	=	630 MW
Belastning	- "	: μ_{bel}	=	540 MW
Reserve	- "	: $\mu_R = 630 - 540$	=	90 MW
"	- spredning:	$\sigma_R = \sqrt{50^2 + 40^2}$	=	64 MW

$$t = \frac{90}{64} = 1,41$$

svarende til en sandsynlighed for udfald på 8,0 %.

Det bemærkes, at udfaldssandsynligheden bliver større om sommeren end om vinteren.

De her beregnede sandsynligheder gælder for et enkelt døgns maksimum og er derfor ikke sammenlignelige med de tidligere anførte talværdier for risikoindekser. Ønsker man til en sådan sammenligning at bestemme de tilsvarende tal for en længere periode, må der foretages en intervalopdeling, som tidligere beskrevet.

Disse beregningers resultater vil ikke influere på ELSAM-KRAFTIMPORT-undersøgelsens udbygningsplaner, da de nærmere vedrører de daglige dispositioner ved fastlæggelsen af den løbende reserve end den langsigtede planlægning af den installerede reserve.

Et risikoindeks gælder for et år. Det er vist, at der inden for hvert år kan forekomme mærkbare variationer i forsyningskvaliteten, og at forsynings sikkerheden under visse forhold først og fremmest er afhængig af belastningen.

Det vides ikke, om den påviste tendens er generel. Tallene fra KRAFTIMPORT tyder ikke på, at belastningsvariationer her vil kunne medføre så store årlige variationer i forsyningskvaliteten som hos ELSAM.

4.3 Prognosens pålidelighed

Ved opstilling af udbygningsplaner, som gennem årene holder samme risikoindeks, vil man - alt efter systemernes struktur - finde planer med stærkt afvigende reserveprocenter. Disse planer anses for at være lige gode. Belastningens størrelse og form er den samme i alle planer, og det antages, at en afvigelse fra den prognoserede belastning vil få de samme følger for hver plan.

Denne antagelse er imidlertid ikke helt korrekt. Fig. 4.3 illustrerer det tilfælde, hvor systemet står over for en uventet høj belastning. Da vil strukturen med store maskiner få den største produktionssikkerhed.

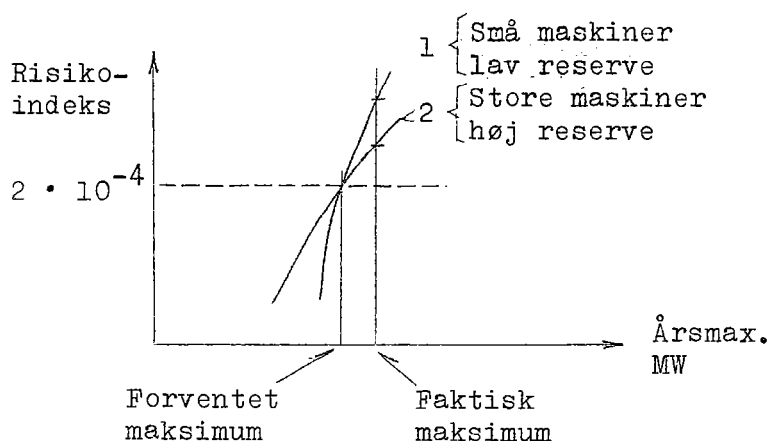


Fig. 4.3

Medens forrige afsnit behandlede usikkerheden ved korttidsprognoser, er der her tale om nøjagtigheden af langtidsprognoser.

Det er vigtigt, at man til enhver tid har en prognose, der rækker ca. 5 år ind i fremtiden, da beslutningen om en udbygning må træffes 4-5 år før idriftsættelsen. Man må derfor søge opstillet et mål for den nøjagtighed, hvormed det er muligt at forudsige belastningen efter 5 år. Til dette anvendes ligesom i foregående afsnit en spredning, her udtrykt i % af den forventede belastning.

Det bør bemærkes, at installation af en ny enhed i systemer, der udbygges med gasturbiner eller andre typer af spidskraftenheder, kan gennemføres på meget mindre end 5 år. I tilfælde af sådanne dispositioner bliver prognosens nøjagtighed af noget mindre betydning for forsyningsikkerheden.

Til vurdering af muligheden for at forudsige belastningen er anvendt energisalg i Danmark i årene 1921-38 og 1948-61 (Elværksstatistikken 1961/62). Man må forestille sig, at man i hvert af årene 1925-33 og 1952-56 har skullet forudsige forbruget efter 5 års forløb på grundlag af de foregående 5 års forbrug. På bilag 26 er optegnet logaritmen til hvert års salg af elektricitet. Desuden er for hvert af årene 1930-38 og 1957-61 anført det forbrug, man 5 år før kunne have forudsat. Disse værdier er bestemt ved, at der efter bedste skøn er lagt en ret linie gennem værdierne i de 5 år, der udgør observationsområdet. Til en mere systematisk bestemmelse fordres en regressionsanalyse for hvert af de 14 tilfælde. Det var ønskeligt, om iagttagelsesområdet kunne gøres længere end 5 år. Dette vil imidlertid give for få prognoser til vor vurdering af prognosesikkerheden, da værdierne i årene 1939-51 ikke kan anvendes.

Logaritmen til prognose-fejlen (forholdet mellem virkeligt og prognoseret forbrug) måles på bilag 26.

1930	0,025	1957	0,050
31	0,025	58	0,030
32	0	59	0,030
33	-0,025	60	0,015
34	-0,020	61	-0,010
35	0,015		
36	0,010		
37	-0,050		
38	-0,045		

Disse tal giver følgende spredninger:

1930-38	$\log (1 + \sigma)$	$= 0,028$	$\sigma = 6,8 \%$
1957-61	$\log (1 + \sigma)$	$= 0,030$	$\sigma = 7,1 \%$
I alt	$\log (1 + \sigma)$	$= 0,029$	$\sigma = 7,0 \%$

Tallene tyder på, at man ved en prognosering over 5 år må regne med en spredning på ca. 7 % på resultatet.

Det skal bemærkes, at tallene er udledt af en energiprognose. Da risikoindekset beregnes på grundlag af en årsvarighedskurve, ville en effektprognose være mindre egnet.

Til sammenligning skal anføres nogle omtrentlige værdier for spredningen på ydeevnen i undersøgelsens udbygningsplaner:

KRAFTIMPORT	- små maskiner (S1)	$\sigma = 6,6 \%$
"	- store " (S3)	$\sigma = 8,6 \%$
ELSAM	- små " (E1)	$\sigma = 6,2 \%$
"	- store " (E2)	$\sigma = 8,5 \%$
Danmark	- (D1)	$\sigma = 6,5 \%$

Disse resultater synes at vise, at usikkerheden på en belastning, prognoseret over 5 år, er af samme størrelsesorden som den usikkerhed, harvarimuligheden betyder for vurderingen af ydeevnen.

Vil man vurdere, hvorledes prognoseusikkerheden kan påvirke størrelsen af den planlagte installerede reserve, sker dette nemmest ved en sikret-effekt-beregning. Herved sammenholder man den forventede maksimal-belastning for det betragtede år med den ydeevne, som på dette tidspunkt antages at være disponibel.

Som eksempel anvendes den på bilag 5 viste fordelingsfunktion, som gælder for ELSAM i 1963. Ydeevnen repræsenteres ved en middelværdi og en spredning. Belastningen er bestemt ved en prognose i 1958. Herved adskiller problemet sig fra det i forrige afsnit behandlede. Der regnes med en spredning på belastningen på 50 MW svarende til ca. 7 % af den forventede belastning.

Der tages i første omgang ikke hensyn til samarbejdsforbindelser til udlandet.

Der er installeret 880 MW.

Når der kun tages hensyn til ydeevnens variation, bliver den sikrede effekt middelværdien minus 2 gange spredningen (t-værdien er 2) svaren-

de til ca. 2 % sandsynlighed for utilstrækkelig ydeevne:

$$E_s = \mu_{\text{gen}} - 2 \cdot \sigma_{\text{gen}} = 816 - 2 \cdot 47 = 722 \text{ MW}$$

Belastningen regnes normalfordelt med middelværdien μ_{bel} (som foreløbig er ukendt), og spredningen $\sigma_{\text{bel}} = 50 \text{ MW}$.

Reserven bliver normalfordelt med middelværdien

$$\mu_{\text{res}} = \mu_{\text{gen}} - \mu_{\text{bel}} = 816 - \mu_{\text{bel}}$$

og spredningen

$$\sigma_{\text{res}} = \sqrt{\sigma_{\text{gen}}^2 + \sigma_{\text{bel}}^2} = \sqrt{47^2 + 50^2} = 69 \text{ MW}$$

Med en udfaldssandsynlighed på 2 % må reservens middelværdi være 2 gange spredningen:

$$\mu_{\text{res}} = 2 \cdot \sigma_{\text{res}} = 138 \text{ MW} = 816 - \mu_{\text{bel}}$$

hvoraf

$$\mu_{\text{bel}} = 816 - 138 = 678 \text{ MW}$$

Hvis den prognoserede belastning overstiger denne værdi, vil udfaldssandsynligheden blive større end 2 %, når der regnes med en usikkerhed på både ydeevne og belastning.

Reserveprocent i forhold til den sikrede effekt:

$$\frac{880 - 722}{722} \cdot 100 \% = \underline{22 \%}$$

Reserveprocent i forhold til μ_{bel} :

$$\frac{880 - 678}{678} \cdot 100 \% = \underline{30 \%}$$

Ved indregning af udlandsforbindelser reduceres ydeevnens spredningsfradrag til en tiendedel. Dette er motiveret i afsnit 4.5.

Man finder da følgende sikrede effekt:

$$E_s = 816 - 0,1 \cdot 2 \cdot 47 = 807 \text{ MW}$$

Reserveeffekten har middelværdien:

$$\mu_{\text{res}} = \mu_{\text{gen}} - \mu_{\text{bel}} = 816 - \mu_{\text{bel}}$$

og spredningen

$$\sigma_{\text{res}} = \sqrt{\sigma_{\text{gen}}^2 + \sigma_{\text{bel}}^2} = \sqrt{4,7^2 + 50^2} = 50 \text{ MW}$$

Reservens nødvendige middelværdi svarende til 2 % sandsynlighed for utilstrækkelig ydeevne:

$$\mu_{\text{res}} = 2 \cdot \sigma_{\text{res}} = 100 \text{ MW} = 816 - \mu_{\text{bel}}$$

hvoraf

$$\mu_{\text{bel}} = 816 - 100 = 716 \text{ MW}$$

Reserveprocent i forhold til den sikrede effekt:

$$\frac{880 - 807}{807} \cdot 100 \% = \underline{9 \%}$$

Reserveprocent i forhold til μ_{bel} :

$$\frac{880 - 716}{716} \cdot 100 \% = \underline{23 \%}$$

Det kan således være rimeligt at foretage installationer af reserveeffekt alene af hensyn til prognoseusikkerheden. Det vil imidlertid ofte være mere overkommeligt at skaffe en evt. manglende effekt dækket enten ved aftaler med tilsluttede fremmede selskaber eller ved installation af enheder med kort byggetid. En gasturbine kan installeres på 1-2 år.

Eksemplet viser, at produktionssikkerhedens følsomhed over for prognosefejl er størst i store systemer, hvor samarbejdet har muliggjort en lav reserve. Det ser ikke ud til, at forbrugsstigningen i et stort system er jævner og mere regelbundet end i et lille (jvf. litt. 17).

ELSAM-KRAFTIMPORT-undersøgelsens prognosearbejdsgruppe har angivet et sandsynligt variationsområde for den fremtidige belastning. Alle beregninger følger imidlertid en fast prognose, og der er ikke forudsat dispositioner, som skulle tage højde for fejl i denne prognose.

4.4 Forsinket aflevering af nyanlæg

Det er af stor betydning for produktionssikkerheden, at nyanlæg kan idriftsættes på det tidspunkt, som er forudsat ved planlægningen. Der kalkuleres i Danmark med ret lange byggetider, hvorfor forsinkelser med idriftsættelsen er yderst sjældne.

I Vesttyskland regnes der med væsentligt kortere byggetider. Her er til gengæld forsinkelserne betydelige. Fra litt. 9 gengives i nedenstående tabel nogle tal til belysning af størrelsesordenen. Tabellen viser fordelingen af forsinkelserne for i alt 115 anlæg. Som forsinkelse regnes tiden mellem den planlagte påbegyndelse af normal drift og den faktiske begyndelse. I middel har forsinkelsen været 3450 timer eller næsten 5 måneder.

Forsinkelse måneder	≤ 0	0-1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	>12
Antal anlæg	6	11	12	12	16	10	8	8	6	6	5	2	3	10

I ELSAM-KRAFTIMPORT-undersøgelsen er der ikke taget hensyn til muligheden for afleveringsforsinkelser. Hvis man ved planlægningen af nye enheder fortsætter den hidtidige danske praksis, begår man næppe nogen fejl ved at forudsætte, at enhederne er disponible fra 1. oktober i idriftsættelsesåret.

4.5 Samarbejdslinier

Alment

Ved etablering af elektriske forbindelser mellem ellers adskilte områder opnår samtlige deltagere reservemæssige fordele. Værdien af disse fordele vil afhænge af forbindelsernes overføringsevner, men kan ikke stige i det uendelige ved udbygning af linierne. En langtidsplanlægning bør derfor indeholde en vurdering af de størst opnåelige fordele og i fortsættelse heraf overvejelser om samarbejdsforbindelsernes størrelser i de fremtidige net.

Beregningen af en samarbejdsforbindelses reservemæssige værdi må baseres på forudsætninger om samarbejdets form og om eventuelle andre samarbejdsforbindelser.

For et antal adskilte områder kan man beregne de reserveprocenter, som er nødvendige for, at hvert område kan overholde et givet risikoindeks. Hvis områderne sluttet sammen, kan den samme beregning foretages for det sammenkoblede system. Ved sammenligning af de to beskrevne tilstande vil man finde, at reserven i det sammenkoblede system er mindre end summen af de enkelte, adskilte områders reserver. Sammenslutningen har således medført en effektbesparelse, som er relativt veldefineret.

Som eksempel illustreres på fig. 4.4 reserveberegningen for ELSAM og KRAFTIMPORT i 1971/72. Systemerne karakteriseres ved følgende værdier:

	Belastning	Installeret	Reserve	
	MW	MW	MW	%
ELSAM	1925	2130	205	10,6
KRAFTIMPORT	1850	2130	280	15,1

De to risikoindekskurver for ELSAM og KRAFTIMPORT (s. 49) vedrører alene områders installerede effekt. Udlandsforbindelser er således ikke indregnet. At de to kurver ikke er sammenfaldende trods samme installerede maskineffekt i det pågældende år, skyldes den større gennemsnits-enhedsstørrelse i KRAFTIMPORT.

Kurverne viser, at man for at opnå det tilstræbte risikoindeks på $2 \cdot 10^{-4}$ må øge reserven med ca. 240 MW hos ELSAM og ca. 170 MW hos KRAFTIMPORT. I undersøgelsen er disse effekter forudsat disponible fra udlandet.

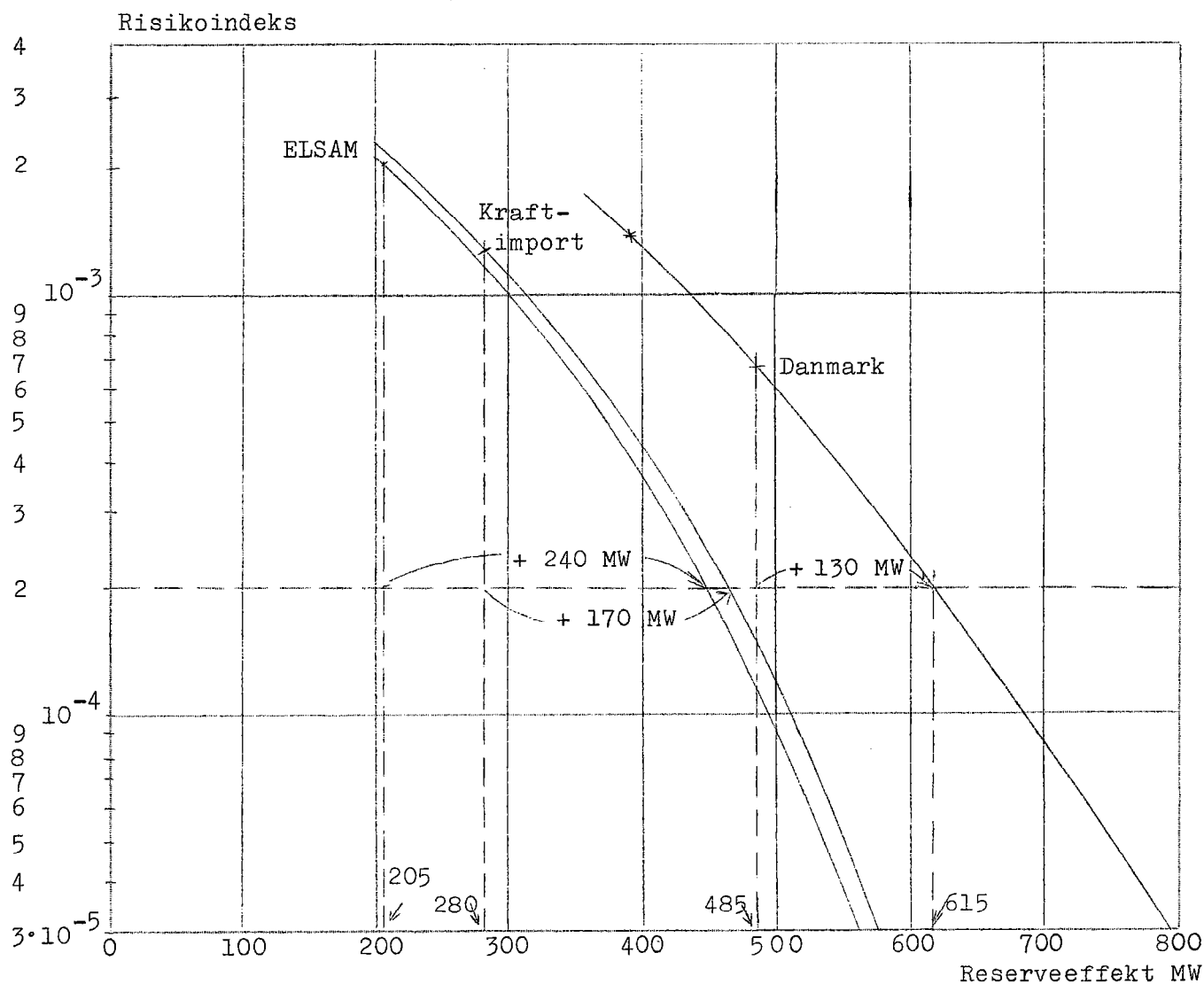


Fig. 4.4.

Den tredje kurve viser sammenhængen mellem risikoindeks og reserveeffekt i det samarbejdende danske system med en forbindelse over Storebælt. Her kræves kun en ekstrareserve på ca. 130 MW.

Hvis de disponible udlandsforbindelser er mere værd, kan den installerede effekt reduceres tilsvarende. Der findes ikke nogen almindelig regel til beregning af, hvor stor en del af reserven man kan basere på forbindelser til udlandet. Det må afhænge af samarbejdets form og af hensynet til de udenlandske samarbejdspartnere. Udlandsforbindelserne vurderes lidt forskelligt hos KRAFTIMPORT og hos ELSAM. De to områders overvejelser herom gennemgås derfor særskilt i de følgende afsnit.

Fejlhyppigheden på luftlinier og søkabler er så lille, at gruppen har skønnet, at pålidelighedstallet for samarbejdslinier til brug for denne undersøgelse kan sættes til 1, jvf. ref. 10 og 11.

I eksemplet ovenfor er der konstateret en effektbesparelse på 280 MW ved etablering af en Storebæltsforbindelse. Denne størrelse er knyttet til risikoindekset $2 \cdot 10^{-4}$. Den stiger med stigende krav til produktionssikkerheden og falder ved en lavere produktionssikkerhed. Ved et risikoindeks på $10 \cdot 10^{-4}$ er besparelsen kun 175 MW.

To eller flere selskaber kan gennemføre et snævrere samarbejde end det her beskrevne og derved muliggøre en koordineret udbygning. Dette indebærer, at der ikke stilles noget reservekrav til den enkelte deltager, men kun til fællesskabet. Aftalerne må blot udformes således, at en formindsket reserve i et område opvejes af en højere reserve et andet sted. Herved forbliver fællesskabet usvækket.

En koordineret udbygning finder sted i samarbejdet mellem de enkelte værker både inden for KRAFTIMPORT og ELSAM.

ELSAM

Udlandsforbindelserne repræsenteres her som en generator med pålideligheden 1.

Ydeevnen fastlægges ud fra en regel til bestemmelse af fordelingen af samarbejdsfordelene mellem samarbejdets deltagere. De her anførte beregninger forudsætter, at samarbejdet med de udenlandske naboer ikke omfatter en koordineret udbygning.

Der betragtes et samarbejde mellem n delsystemer med spredningerne $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$. Samarbejdsforbindelserne forudsættes at være tilstrækkelige til dækning af alle i praksis forekommende transmissionsbehov. Det samlede system får spredningen:

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2}$$

Denne formel er almen og forudsætter ikke, at delsystemerne eller det samlede system er normalfordelte. Denne forudsætning træder først i kraft ved beregningen af den sikre effekt (jvf. definition side 25), fordi man da bestemmer sandsynligheden for udfald ved opslag i en tabel over normalfordelingen.

Den sikre effekt for et produktionssystem ansættes til middelværdien minus 2 gange spredningen:

$$P_j = \mu_j - 2 \cdot \sigma_j$$

hvor μ_j er middelværdien for deltager j . Når de n delsystemer sluttet sammen bliver den totale sikre effekt, idet der for hele området ønskes en sandsynlighed for tilstrækkelig effekt, svarende til $t = 2$:

$$\begin{aligned} P_T &= \mu_T - 2 \cdot \sigma_T \\ &= \mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n - 2 \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2} \\ &= \mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n - 2 \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2}{\sigma_T} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n - 2 \frac{\sigma_1^2}{\sigma_T^2} - 2 \frac{\sigma_2^2}{\sigma_T^2} - \dots - 2 \frac{\sigma_n^2}{\sigma_T^2} \\
&= \mu_1 - 2 \frac{\sigma_1^2}{\sigma_T^2} + \mu_2 - 2 \frac{\sigma_2^2}{\sigma_T^2} + \dots + \mu_n - 2 \frac{\sigma_n^2}{\sigma_T^2} \\
&= P'_1 + P'_2 + \dots + P'_n
\end{aligned}$$

Ved denne opdeling bliver den enkelte deltagers andel i den sikrede effekt:

$$P'_j = \mu_j - 2 \frac{\sigma_j^2}{\sigma_T^2} \quad (4.1)$$

Sammenslutningen indebærer således for deltager j følgende forøgelse i sikret effekt:

$$\begin{aligned}
P'_j - P_j &= \mu_j - 2 \frac{\sigma_j^2}{\sigma_T^2} - \mu_j + 2 \sigma_j^2 \\
&= 2 \cdot \sigma_j^2 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_j^2}{\sigma_T^2}\right) \quad (4.2)
\end{aligned}$$

Denne metode til opdeling af den sikrede effekt i deltagerens andele i sikret effekt tilgodeser følgende fundamentale regler:

- 1 - Summen af deltagerens sikrede effekter er hele systemets sikrede effekt. Det betyder, at en deltager har opfyldt sin pligt over for fællesskabet, så længe hans belastning ikke overskrider hans andel i den sikrede effekt.
- 2 - Er spredningen på en deltagers ydeevne stor (d.v.s. er der tale om en usikker partner), bliver spredningsfradraget ved beregning af hans andel i den sikrede effekt relativt større end for andre deltagere.

Hvis disse betragtninger i en langtidsplanlægning skal være bestemmende for reservens størrelse, må man for undersøgelsesperioden fastlægge forholdet mellem deltagerens spredning og systemets spredning, $\frac{\sigma_j}{\sigma_T}$. Hvis et lille system tilsluttes et uendeligt stort, bliver dette forhold 0. Områdets sikrede effekt bliver derved:

$$P'_j = \mu_j - k \cdot \sigma_j^2 \cdot \frac{\sigma_j}{\sigma_T} = \mu_j$$

Middelværdien bliver således den største sikrede effekt, området på nogen måde kan opnå.

- - - - -

I fig. 4.5 er det vist, hvorledes ELSAM's sikrede effekt forøges ved forbindelserne til udlandet

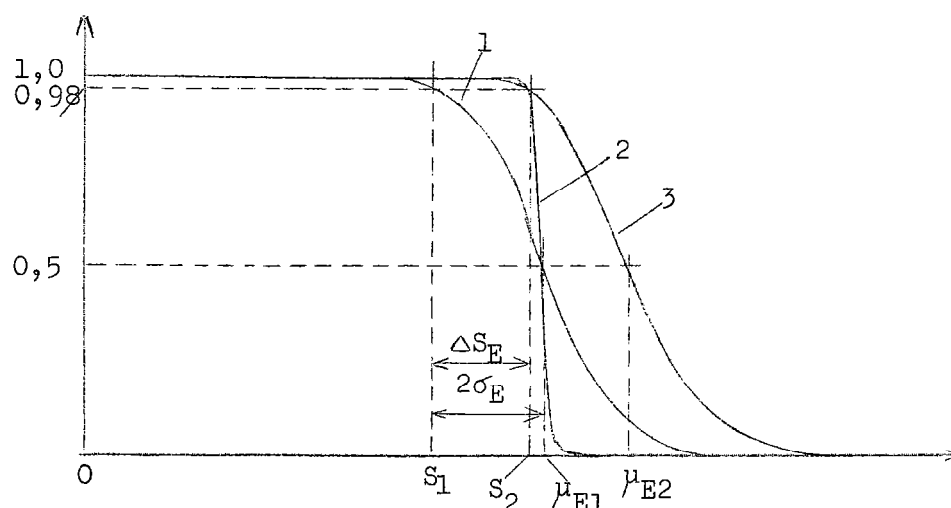


Fig. 4.5.

I tilstanden uden udlandsforbindelser har området middelværdien μ_{E1} og spredningen σ_E . Af kurve 1 findes den sikrede effekt S_1 . Ved forbindelserne til udlandet formindskes spredningsfradraget, og den sikrede effekt forøges med ΔS_E til S_2 (kurve 2). Den samme sikrede effekt (S_2) opnås imidlertid, hvis man til det oprindelige system (kurve 1) føjer en enhed med ydeevnen ΔS_E og pålideligheden 1. Dette svarer til en parallelforskydning af kurve 1 med ΔS_E til kurve 3.

Da kun dette sidste er muligt i programmet til beregning af risikoindekser, er ELSAM's udlandsforbindelser repræsenteret på denne måde.

Til bestemmelsen af ΔS_E anvendes spredningsforholdet $\frac{\sigma_E}{\sigma_T} = 0,1$. Herved forudsættes, at udlandets elproduktionsmæssige struktur svarer til ELSAM's, samt at der i det tilknyttede udland er installeret 100 gange så meget effekt som hos ELSAM. Man finder da ifølge formel (4.2) følgende forøgelse i sikret effekt:

$$\Delta S_E = 2 \cdot \sigma_E \cdot \left(1 - \frac{\sigma_E}{\sigma_T}\right) = 2 \cdot \sigma_E \cdot 0,9 = \underline{1,8 \cdot \sigma_E}$$

ΔS_E repræsenterer nogenlunde den største værdi, man mener at kunne tillægge en udlandsforbindelse. På den anden side bør i det mindste denne effekt være disponibel fra andre områder, da man ellers ikke har udnyttet sine samarbejds muligheder fuldt ud. Man vil derfor ved udbygningen af udlandsforbindelserne søge at følge med udviklingen af ΔS_E . I bilagene med udbygningsplaner er ΔS_E kaldt krav til udlandsforbindelser.

KRAFTIMPORT

Øresundsforbindelsen har i nærværende undersøgelse været repræsenteret som en generator med pålideligheden 1.

Generatorens ydeevne er fastlagt på grundlag af et skøn over, hvilket effekt KRAFTIMPORT i fremtiden vil kunne regne med som hjælp fra Sverige i fejltilfælde. Denne effekt vil være begrænset af dels kablernes overføringsevne, dels overføringsevnen i ledningsnettet mellem Sydsverige og det øvrige Sverige. Man har regnet med, at den disponible effekt vil variere i takt med udbygningerne af dette ledningsnet mellem O og Øresundsforbindelsernes overføringsevne. Øresundsforbindelserne regnes udbygget således, at deres overføringsevne til enhver tid er mindst lige så stor som KRAFTIMPORT's største enhed. Som en passende middelværdi antages Øresundsforbindelsens halve overføringsevne til enhver tid at udgøre den disponible udlandske effekt.

Anlægges imidlertid en lignende betragtning som anført for ELSAM's udlandsforbindelser, og udregner man også her den sikrede effekt som middelværdien minus 2 gange spredningen, bliver gevinsten i den sikrede effekt som følge af forbindelsen til Sverige lig med:

$$\Delta S_K = 2 \cdot \sigma_K \cdot \left(1 - \frac{\sigma_K}{\sigma_T}\right)$$

hvor

σ_K er spredningen for KRAFTIMPORT

σ_T er den totale spredning for Sverige og KRAFTIMPORT

$$\text{lig med } \sqrt{\sigma_K^2 + \sigma_S^2}$$

Af beregninger Sveriges maskiner i stadium 1968/69 fremgår, at spredningen σ_S er 113 MW ved en installeret effekt på 6300 MW. Spredningen for KRAFTIMPORT på det tilsvarende tidspunkt er 97 MW ved en installeret effekt på omkring 1500 MW. Den ringe forskel i spredningerne trods den store forskel i installeret effekt i de to områder skyldes vandkraftens meget små havarital (0-1 %).

Den totale værdi af spredningen σ_T for de to områder bliver:

$$\sigma_T = \sqrt{97^2 + 113^2} = 149 \text{ MW}$$

$$\Delta S = 2 \cdot \sigma_K \left(1 - \frac{97}{149}\right) = 2 \cdot 0,35 \cdot \sigma_K = 0,7 \cdot \sigma_K$$

Da Sverige i fremtiden i stadig større udstrækning må udbygge med termiske kraftværker, vil spredningen antagelig stige mere end spredningen for KRAFTIMPORT.

Forholdet $\frac{\sigma_K}{\sigma_T}$ vil da aftage, således at stigningen i den sikrede effekt for KRAFTIMPORT vil blive omkring $1,0 \cdot \sigma_K$. I bilag E-27 er spredningen σ_K tillige med Øresundsforbindelsernes halve overføringsevne opført for de sjællandske udbygningsplaner S1K, S3K, S3N, S9N og S10N. Man ser, at størrelsen af spredningen stemmer ganske godt overens med den fastsatte

værdi af Sverigesforbindelsen. I årene indtil begyndelsen af 70'erne er σ_K dog noget mindre end værdien af Sverigeslinierne. Det vil dog nok alligevel være mest korrekt at anvende værdien af forbindelsens halve overførings-
evne ved beregning af risikoindeks. Dette er blot et udtryk for, at de to sider af Øresund ikke har samme fordel i effektmæssig henseende (hverken absolut eller relativt) af forbindelsen, hvilket igen hænger sammen med Sveriges betydeligt bedre forsyningssikkerhed i disse år.

Storebæltsforbindelsen

Undersøgelsen har vist, at der med udnyttelse af mulighederne for samarbejde med andre områder for det danske system ved et risikoindeks på $2 \cdot 10^{-4}$ kræves en installeret reserve på 12 - 15 % af belastningen, jfr. bilag 56.

Med de nuværende gode udlandsforbindelser er der i Danmark allerede planlagt med ret små reserver, hvorfor man ikke, så længe de til enhver tid eksisterende udlandsforbindelser slår til, og en udbygningsrytme med én ny enhed pr. år opretholdes, kan opnå væsentlige reduktioner af den installerede reserve ved etablering af en Storebæltsforbindelse. I denne sammenhæng kan det også nævnes, at Konti-Skan giver visse muligheder for etablering af et samarbejde mellem de to landsdele, især i havarisituationer.

Der er i undersøgelsen regnet med en ret kraftig udbygning af udlandsforbindelserne. Såfremt en sådan udbygning ikke kan realiseres på økonomisk måde, forøges interessen for en Storebæltsforbindelse. Hertil kommer spørgsmålet om, i hvilket omfang man fremover reservemæssigt vil og kan gøre sig afhængig af udenlandske værker. Dette er imidlertid af politisk-økonomisk art og lader sig ikke besvare inden for Effektarbejdsgruppens rammer.

Ved en koordineret udbygning kan der formentlig opnås betydelige besparelser ved etablering af en Storebæltsforbindelse, såfremt man forlader den hidtidige udbygningsrytme og installerer større enheder, d.v.s. enheder, der er større end svarende til hvert områdes årlige stigning. Disse enheder har en lavere specifik anlægspris end de mindre enheder. Denne skala-effekt er især af betydning for kernekraftværker.

Herværende undersøgelse har imidlertid langt fra kunnet afdække problemkomplekset omkring en Storebæltsforbindelse, men de foreløbige resultater kan måske tjene som et incitament til mere dybtgående overvejelser.

KAPITEL 5 ARBEJDETS FORLØB OG RESULTATER

=====

Resumé: Hvert områdes fordelingsfunktion er bestemt ved parallelkobling af fordelingsfunktionerne for områdets værker. Bestemmelsen af værkernes fordelingsfunktioner har for de københavnske værkers vedkommende voldt problemer, som er løst ved visse simplificerende antagelser. På dette grundlag har det været muligt at beregne risikoindekser for de udbygningsstrukturer, som Koordinationsudvalget har skitseret. Af disse resultater er de endelige udbygningsplaner udarbejdet, idet et risikoindeks på $2 \cdot 10^{-4}$ er søgt overholdt.

Udbygningsplanerne overholder ikke eksakt kravet om en konstant produktionssikkerhed. Der er foretaget en undersøgelse af afvigelseernes økonomiske rækkevidde. Endelig er det undersøgt, hvilken investering man må foretage for at opnå en vis forbedring af produktionssikkerheden i hele undersøgelsesperioden.

5.1 Beregning af fordelingsfunktioner

Fordelingsfunktionen for et helt samarbejdsområde beregnes ved en parallelkobling af fordelingsfunktionerne for områdets kraftværker. Dette sker efter de parallelkoblingsregler, som er skitseret i afsnit 3.2.

Bestemmelsen af hvert værks fordelingsfunktion er i de fleste tilfælde også ganske enkel. Når et værk ikke omfatter modtryksturbiner, beregnes dets fordelingsfunktion ved simple parallel- og seriekoblinger. Dette gælder følgende værker:

Masnedøværket	(MØV)
Asnæsværket	(ASV)
Kyndbyværket	(KYV)
Skærbækværket	(SV)
Sønderjyllands Højspændingsværk	(SH)
Fynsværket	(FV)
Vestkraft	(VK)
Randers kommunale Elværk	(RE)

Fordelingsfunktionerne er vist på bilagene 37 - 39.

Fjernvarmeleverancer kan komplicere ydeevneberegningerne. På værkerne i Jylland og på Fyn produceres fjernvarmen næsten udelukkende ved hjælp af udtagsturbiner. Når en given varmebelastning skal dækkes med udtagsdamp, er en vis elproduktion nødvendig (modtryksproduktionen). Samtidig er den maksimale generatoreffekt reduceret, idet den damp, der anvendes til varmeleverance, ved fortsat ekspansion i turbinen ville have øget generatorens effekt. Elproduktionens øvre og nedre grænser varierer med den udtagne dampmængde som angivet på fig. 5.1. De mulige driftstilstande falder inden for det skraverede område. Det fremgår af figuren, at den største elproduktion kan opnås, når der ikke leveres damp til fjernvarme. Hos de jysk-fynske værker går i en nødsituation elproduktionen forud for fjernvarmeproduktionen efter herom fastlagte regler. I reserveeffektberegninger må det derfor

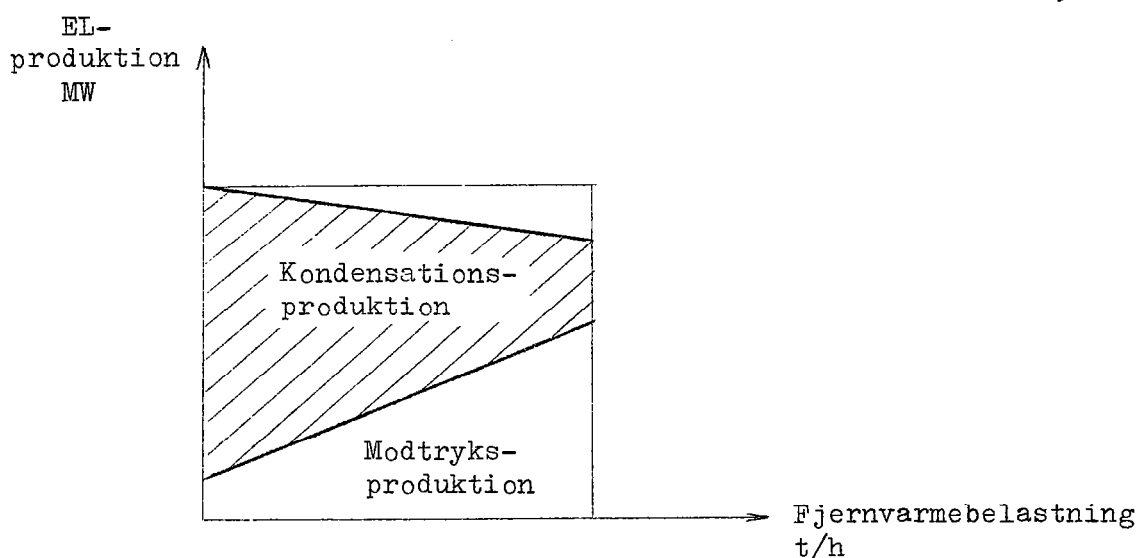


Fig. 5.1. Udtagsturbine. Sammenhæng mellem damp- og elbelastning.

være tilladeligt at se bort fra fjernvarmeleverancer og regne med maksimale ydeevner svarende til ren kondensationsdrift.

For værker med modtryksturbiner bliver beregningen vanskeligere. Den normale kondensationsdrift repræsenterer en tottrinsproces (kedel-turbine), hvor første trins produkt (damp) anvendes som råstof i andet trin. Dette er en simpel seriekobling. Modtryksdriften repræsenterer en tretrinsproces (kedel-turbine-turbine). Seriekoblingen medfører her en meget omfattende beregning.

For værkerne under Københavns Belysningsvæsen har man tilnærmet de virkelige dampskemaer, som beskriver tretrinsprocesser, med tottrinsækvivalenter. Opstillingen af disse ækvivalenter er indgående beskrevet i appendix.

For de jyske modtryksværker, Midtkraft (MK) og Nordkraft (NK), er der udviklet et cifferregnemaskineprogram, som ud fra en opdeling af systemet udvælger samtlige kombinationsmuligheder og beregner ydeevne og sandsynlighed for hver enkelt. Beregningen er eksakt, men langsom.

Oversigtsdiagrammer for danske kraftværkers maskinbestand er givet i bilag 28 - 36.

5.2 Beregning af risikoindekser for opstillede udbygningsplaner

Koordinationsudvalget har for tidsrummet 1969-84 opstillet seks udbygningsplaner for ELSAM, seks for KRAFTIMPORT og to fælles udbygningsplaner, d.v.s. planer, som forudsætter en Storebælts-forbindelse. Disse planer er vist på bilag 47.

Der er gennemført en serie beregninger, som er symboliseret således:

E 1 K + S 1 K
 E 1 N + S 3 K
 E 2 N + S 3 N
 D 1 K
 D 1 N
 E 8 N + S 8 N
 E 9 K + S 9 K
 E 10 N + S 10 N

Symbolernes betydning skal kort gennemgås. Første bogstav betegner området:

S: Sjælland m.v. (KRAFTIMPORT)
 E: Området vest for Storebælt (ELSAM)
 D: Danmark (forudsætter Storebælts-forbindelse).

Tallet derefter indeholder oplysninger om planens struktur i overensstemmelse med følgende tabel:

- KRAFTIMPORT: 1. Udbygning med 235 MW-enheder, indtil 2 stykker er nødvendige pro anno; derefter 470 MW enheder.
 2. Udbygning med 470 MW enheder.
 3. Udbygning med enheder af størrelsen 15-20% af belastningen.
 8. Store enheder samt et antal "spidslastenheder" á 50 MW.
 9 og 10. Struktur med grundlastenheder, forenklede konventionelle enheder og spidslastenheder.
- ELSAM: 1. Der føjes en ny enhed til hvert år.
 2. Der føjes en ny enhed til hvert andet år.
 8. Struktur med grundlastenheder og forenklede konventionelle enheder.
 9 og 10. Struktur med grundlastenheder, forenklede konventionelle enheder og spidslastenheder.
- Danmark: 1. Der føjes en ny enhed til hvert år.

Sidste bogstav oplyser, om der i planen forekommer nukleare kraftværker (N), eller om der er tale om en rent konventionel udbygning (K). Med de valgte pålidelighedstal er dette spørgsmål uden betydning for Effektarbejdsgruppen.

- - - - -

Beregningen af risikoindekser foretages, som før nævnt, på en cifferregnemaskine (IBM 7074). De indlæste data kan inddeles i tre hovedkategorier:

1. Belastningsvarighedskurvens form indlæses og lagres straks ved beregningens begyndelse. Hvis det ønskes, kan man senere under beregningen indlæse en ny varighedskurve.
2. Generatordata. En generator eller et system af generatorer beskrives ved en frekvensfunktion.
3. Belastningens størrelse. Belastningen angives som en faktor, hvormed alle varighedskurvens værdier multipliceres.

Indledningsvis indlæses frekvensfunktioner for alle 1964 produktionssystemets generatorer. Heraf beregnes det samlede systems frekvensfunktion. Med denne frekvensfunktion beregnes risikoen for effektmangel ved forskellige belastninger, og man får på denne måde bestemt risikoindekset som funktion af belastningen. Denne sammenhæng er vist grafisk på bilag 40-46.

Herefter modificeres den allerede beregnede frekvensfunktion for systemet, svarende til ét års udvikling. Nytilkomne enheder medregnes ved almindelige parallelkoblinger. Afskrevne enheder trækkes ud af systemet ved en metode, som er udviklet i forbindelse med programmet til beregning af risikoindeks. Således fortsættes år for år gennem hele beregningsperioden, og risikoindekset beregnes for en udbygningsplan i alle dens faser.

De i undersøgelsen anvendte belastningsvarighedskurver er vist i bilag 6 og 7.

- - - - -

Såfremt Effektarbejdsgruppen havde modtaget definitive udbygningsplaner fra Koordinationsudvalget, ville beregningsproceduren have været relativt enkel. Man skulle i så fald have beregnet ét risikoindeks pr. år for hver plan.

Imidlertid har man for den økonomiske sammenlignings skyld ønsket, at alle planer så vidt muligt skulle kunne anses for lige med hensyn til produktionssikkerhed. Man har derfor efter den første beregning af en udbygningsplans risikoindekser foretaget ændringer i planen, så den bedst mu-

ligt overholder risikoindekset $2 \cdot 10^{-4}$. Vurderingen af de fornødne ændringer er foretaget på grundlag af ovennævnte kurver, som for hvert af udbygningsplanens trin angiver risikoindekset som funktion af et års maksimalbelastning. Selv efter disse ændringer har det ikke været muligt at nå det tilsigtede risikoindeks hvert år. Dette skyldes dels, at nogle planer ikke forudsætter ny effekt hvert år, og dels, at der for nye enheder er regnet med følgende standardstørrelser (MW, netto):

190, 235, 300, 370, 470, 600, 750, 940.

For de endelige planer kan risikoindekser aflæses af bilagene 48 - 56.

I udbygningsplanerne E 9 og E 10 er risikoindekserne beregnet manuelt ved den i afsnit 3.6 beskrevne metode.

Bilagene omfatter alle de planer, som er gennemregnet af effektarbejdsgruppen. Kun en del af disse har fundet anvendelse i det videre arbejde med beregning af produktionsomkostninger.

5.3 Diskussion af resultaterne

Som nævnt i foregående afsnit har udbygningsplanerne ikke eksakt kunnet fastlægges med konstante risikoindekser. Man har derfor ønsket en vurdering af de økonomiske følger af en afvigelse af risikoindekset fra den tilsigtede værdi. Dette skulle føre til et svar på spørgsmålet, om det er nødvendigt at foretage en korrektion for disse afvigelser.

For udbygningsplanerne "S 1", "E 1", "S 3", "E 2" og "D 1" er der foretaget en sådan korrektion, at risikoindekset hvert år ligger så tæt under $2 \cdot 10^{-4}$, som planens struktur tillader. Korrektionen foretages ved, at hver ny enhed tænkes indsat med den mindste ydeevne, som overholder reservekravet. Forskellen mellem denne enhedsstørrelse og den i planen anvendte vurderes ud fra en marginal effektpris for en konventionel udbygning på 500 kr/kW. Man kan med rimelig nøjagtighed forudsætte, at den nødvendige ændring i installeret effekt kan aflæses af kurverne med risikoindeks som funktion af maksimalbelastningen. Det tjente eller tabte beløb føres tilbage til 1964 med en rente på 7 %.

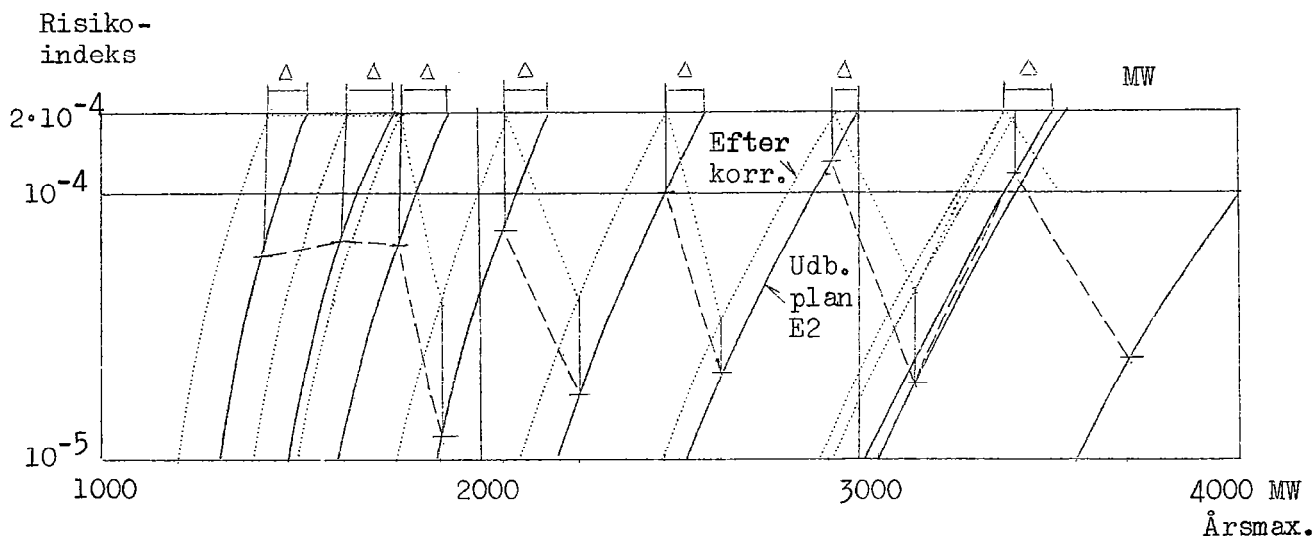


Fig. 5.2. Korrektion af udbygningsplan E2.

I de udbygningsplaner, hvor der ikke installeres nye enheder hvert år, må korrektionen ifølge foranstående bemærkninger kun foretages i forbindelse med installation af en ny enhed. I disse planer varierer risikoindekset, således at det er lavt i år med tilføjelse af ny effekt og højt de øvrige år. Hvis risikoindekset i de år, hvor det ligger højt, netop rammer $2 \cdot 10^{-4}$, behøver planen ingen korrektion. Korrektionen må da tage sigte på, at netop disse risikoindeskser får den rigtige værdi, hvorved de øvrige bliver ret lave. Denne afvigelse er betinget af planens struktur og er et udtryk for en ulempe ved denne struktur. Den bør derfor ikke udlignes ved en korrektion.

Beregningerne kan følges i nedenstående tabeller. I første kolonne står den overskydende reserve. I den næste er opført den effekt, som det pågældende år må skaffes. I planen "S 1" mangler det første år 30 MW, som må skaffes for 15 mill. kr. (tilbageført til 1964: 10,7 mill. kr.). I 1970 mangler kun 20 MW. Man kan da installere 10 MW mindre. Denne effekt må i 1971 købes igen.

S 1				E 1		
År	Overskud i reserve MW	Nødv. effektkøb		Overskud i reserve MW	Nødv. effektkøb	
		MW	Mill. kr. (tilbageført til 1964)		MW	Mill. kr. (tilbageført til 1964)
69	-30	+30	10,7	50	-50	-17,8
70	-20	-10	-3,3	20	+30	10,0
71	-30	+10	3,1	30	-10	-3,1
72	0	-30	-8,7	60	-30	-8,7
73	50	-50	-13,1	80	-20	-5,4
74	70	-20	-5,1	90	-10	-2,5
75	30	+40	9,5	80	+10	2,4
76	30	0	0	80	0	0
77	40	-10	-2,1	90	-10	-2,1
78	20	+20	3,9	120	-30	-5,8
79	-10	+30	5,4	140	-20	-3,6
80	100	-110	-18,6	140	0	0
81	220	-110	-17,4	90	+50	7,9
82	0	+220	32,6	120	-30	-4,4
83	0	0	0	130	-10	-1,4
84	30	-30	-3,9	80	+50	6,5
			-7,0			-28,0

År	S 3			E 2		
	Overskud i reserve MW	Nødv. effektkøb		Overskud i reserve MW	Nødv. effektkøb	
		MW	Mill. kr. (tilbageført til 1964)		MW	Mill. kr. (tilbageført til 1964)
69	-20	+20	7,1	60	-60	-21,4
70	-20	0	0	80	-20	-6,7
71	-20	0	0	90	-10	-3,1
72	60	-80	-23,3			
73	20	+40	10,9	90	0	0
74						
75	-50	+70	16,6	70	+20	+4,7
76						
77	10	-60	-12,5	100	-30	-6,2
78						
79	50	-40	-7,2	110	-10	-1,8
80						
81	-30	+80	12,7	410	-300	-47,5
82				280	+130	+19,2
83	-40	+10	1,4			
84				430	-150	-19,4
			+5,7			
						-82,2

År	D 1		
	Overskud i reserve MW	Nødv. effektkøb	
		MW	Mill. kr. (tilbageført til 1964)
69	-70	+70	24,9
70	-30	-40	-13,3
71	10	-40	-12,5
72	-70	+80	23,3
73	0	-70	-19,0
74	40	-40	-10,2
75	-30	+70	16,7
76	-10	-20	-4,4
77	50	-60	-12,4
78	100	-50	-9,7
79	180	-80	-14,5
80	170	+10	1,7
81	210	-40	-6,3
82	220	-10	-1,5
83	160	+60	8,3
84	110	+50	6,5
			-22,4

Den største korrektion forekommer i planen "E 2", hvor den overskydende reserve er vurderet til 82,2 mill. kr. I alle de øvrige planer kan afvigelserne anses for negligeble i forhold til de betragtede beløb.

- - - - -

Til en mere generel vurdering af den pris, man over en årrække må betale for at opnå en højere produktionssikkerhed, er der foretaget en beregning af konsekvensen af ensidige afvigelser i to karakteristiske planer ("S 1" (små maskiner) og "E 2" (store maskiner)). Som økonomisk nulpunkt er valgt et risikoindeks på $2 \cdot 10^{-4}$. Ved beregningerne er bestemt de økonomiske følger af en ændring af samtlige planens risikoindeskser til henholdsvis $4 \cdot 10^{-4}$, $1 \cdot 10^{-4}$ og $0,5 \cdot 10^{-4}$. Beløbene er som før ført tilbage til 1964 med en rente på 7%. Den marginale effektpris er sat til 500 kr/kW.

Effektvariationerne svarende til ovennævnte ændringer i risikoindeskserne aflæses for hvert år af kurverne på bilag 41 og 43. Man tænker sig, at hvert års belastning netop er så stor, at risikoindekset er $2 \cdot 10^{-4}$. Hvis man hæver risikoindekset til $4 \cdot 10^{-4}$, frigives en effekt, som kan spares. Eksempelvis frigives i "S 1" i 1969 60 MW, en besparelse på 30 mill. kr. eller tilbageført til 1964: 21,4 mill. kr. Året efter kan yderligere 10 MW frigives. De indbringer 5 mill. kr. (= 3,3 mill. kr. tilbageført).

Beregningerne udføres som de tidligere. Resultaterne bliver:

Risikoindeks ændres		Merudgift, mill. kr. tilbageført til 1964	
fra	til	S 1	E 2
$2 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	-39,8	-52,6
$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	38,1	49,2
$1 \cdot 10^{-4}$	$0,5 \cdot 10^{-4}$	32,3	45,8

På bilag 62 er optegnet kurver, som angiver sammenhængen mellem merudgiften og ændringen i risikoindeks.

LITTERATUROVERSIGT

=====

Anlæggenes pålidelighed:

1. AIEE Trans. Vol. 68 part I 1949, p. 450-457. Outage Rates of Steam Turbines and Boilers and of Hydro Units.
2. AIEE Trans. 1954, p. 1438-42. Forced Outage Rates of High-Pressure Steam Turbines and Boilers.
3. AIEE Trans. 1957, p. 338-342. Forced Outage Rates of High-Pressure Steam Turbines and Boilers.
4. Edison Electric Institute, Publication No. 62-44. Summary 1960: Equipment Availability Report Including Averages and Trends for Six-Year Period 1955-60.
5. Federal Power Commission. Advisory Committee Report No. 24. Outage Rates for Electric Generating Units.
6. UNIPED - Rapport II 1. Experience Resulting from the Operation of High Power Thermal Units.
7. UNIPED, Comité d'Etudes des Statistique Indisponibilités des Equipments de Production et de Transport d'Électricité.
8. Fédération Professionnelle des Producteurs et Distributeurs d'Électricité de Belgique: Annuaire Statistique (1962 og 1963).
9. Vereinigung der Grosskesselbesitzer E. V. Essen, 1963: Untersuchung der Betriebs-, Stillstands- und Ausfallzeiten sowie der Ausnutzung von 120 Blockanlagen.
10. ELSAM. Notat af 22.4.1964. Fejlhyppighed i ELSAM's 150 kV net.
11. NESA tekn. rapp. nr. R 1964-30. Fejlfrekvens for søkabler.

Beregningsmetoder:

12. AIEE Trans. Vol. 66 (1947), p. 1439-50. G. Calabrese: Generating Reserve Capacity Determined by the Probability Method.
13. IEEE Trans. Vol. 84 (1965), p. 64-79. G.S. Vassell og N. Tibberts: An Approach to the Analysis of Generating-Capacity Reserve Requirements.
14. AIEE Paper 60-251. Baldwin, Gaver, Hoffman og Rose: The Use of Simulated Reserve Margins to Determine Generator Installation Dates.
15. NESA tekn. rapp. nr. R 1964-26. Udredning angående bestemmelse af sandsynlighed for manglende effekt i to forsyningsområder, der er forbundet med hinanden gennem samkøringslinier med begrænset overførings-eвне.
16. NESA tekn. rapp. nr. R. 1964-38. Program til beregning af forsynings-pålidelighed i elektriske kraftnet.

Belastningsforhold:

17. Elektrizitätswirtschaft 1964, p. 633. Klaus-Dieter Fischer: Die Belastungsentwicklung in der öffentlichen Elektrizitätsversorgung in der Bundesrepublik.

Alment om reserveeffekt:

18. IEEE Trans. Vol. 83 (1964), p. 737-743 og 868-873. C.W. Watchorn: A Review of Some Basic Characteristics of Probability Methods as Related to Power System Problems.
19. Elteknik, 1965, p. 29. Per-Gustaf Edblad og Bengt Wallenberg: Reserveffekt i ett kraftsystem

Appendix Repræsentation af modtryksdrift på KB's værker

Indledning

Ved beregning af tabeller over til rådighed stående effekt og tilsvarende sandsynlighed støder man ved behandlingen af kombinerede modtryks- og kondensationsværker på den vanskelighed, at den udnyttelige elektriske effekt varierer med den til andet formål leverede dampmængde og derfor ofte antager værdier forskellige fra den installerede effekt, man finder ved hjælp af turbinernes mærkeydelse. Årsagen hertil må søges i, at sådanne værker normalt dimensioneres for en vis kombineret belastning af damp og elektrisk energi, således at lav dampbelastning hindrer fuld udnyttelse af modtryksturbinerne, medens til gengæld kondensationsturbinerne, der arbejder ved modtryksdampens trykniveau, ikke kan udnyttes fuldt ud ved høj dampbelastning.

Da det vanskeligt kan lade sig gøre at afkaste dampbelastningen, får denne som regel prioritet frem for elproduktionen og må derfor primært tilgodeses, selv i tilfælde hvor kedelkapaciteten nedsættes på grund af havarier. Dette faktum afspejler sig ved beregning af risikoindeks i form af en forringelse af forsyningssikkerheden i det elektriske kraftsystem.

Beregningsmodel

I den beregningsmæssige model af et sådant kraftværk kan man ikke - hvis man skal regne eksakt - klare sig med de almindeligt anvendte parallel- eller seriekoblingsmodeller, der er fyldestgørende for normale kondensationsværker. Årsagen til dette er, at modtryksdriften repræsenterer en tretrinsproces (kedel-turbine-turbine), hvor havarier i et af trinene påvirker leveringsmulighederne fra de øvrige. I modsætning hertil repræsenterer kondensationsdrift kun tottrinsproces (kedel-turbine). Som en yderligere komplikation ved beregningen af modtryksværker kan nævnes, at sammenhængen mellem dampmængde og produceret elektrisk energi ofte varierer med driftsforholdene, således at der ikke eksisterer nogen entydig omsætningsfaktor kg damp/kWh.

Det er imidlertid muligt at opbygge specielle programmer, der udfører disse beregninger eksakt, men af tidshensyn har det ikke været muligt at gennemføre det programmeringsarbejde, der er nødvendigt. I stedet har man søgt at tilnærme beregningsgrundlaget sådan, at de almindeligt anvendte serie- og parallelkoblingsprogrammer kan anvendes.

Det er da først og fremmest nødvendigt at tilnærme tretrinsarrangementet med et tottrinsækvivalent. Dette er muligt under forudsætning af, at reduktionsstationernes kapacitet er tilstrækkelig til at forsyne lavtryksturbinerne med damp uanset højtryksturbinernes driftstilstand. Er dette tilfældet, kan man i sandsynlighedsmodellen betragte lavtryksturbinerne som parallelkoblet med højtryksturbinerne (se bilag 35 og 36). Denne tilnærmelse medfører da kun én ulempe, nemlig at havari på lavtryksenhederne ikke i sandsynlighedsmodellen influerer på højtryksenhedernes produktion. For at afhjælpe denne mangel kan man imidlertid erstatte det virkelige turbinearrangement med en fiktiv turbinebestykning af modtryks- og kondensationsenheder. Til kondensationsenhederne henregnes her ikke blot de virkeligt forekommende lavtryksturbiners ydelse, men tillige den del af højtrykstur-

binernes ydelse, der betinges af lavtryksturbinernes produktion. Man opnår herved, at udfald af lavtryksturbiner får indflydelse på den samlede ydeevne med både den havarerede maskines egen ydeevne og en del af højtryksturbinernes ydelse. Til gengæld kan havarier på højtryksmaskinerne ikke medtages nøjagtigt, da disse jo er delt op og repræsenteret i både modtryks- og kondensationsmaskiner.

For H.C.Ørsted Værket har det imidlertid været nødvendigt ved udarbejdelsen af det simplificerede dampskema at indføre endnu en tilnærmelse, idet reduktionsstationen mellem sektion 3 og lavtryksdelen af sektion 1 og 2 er udeladt. Betragter man imidlertid dampleverancer fra sektion 3 til sektion 1 og 2 som et bidrag til fjernvarmedampen, således at en til den pågældende leverance svarende del af fjernvarmedampen leveres direkte fra sektion 3, får denne tilnærmelse kun betydning i tilfælde, hvor sektion 1 og 2 rammes af flere samtidige kedelhavarier. Sandsynligheden for denne hændelse er imidlertid kun lille, og tilnærmelsen må derfor betragtes som forsvarlig.

Den ovenfor omtalte beregning af de på bilagene viste ydeevner for ækvivalente modtryks- og kondensationsenheder er udført af KB for både H.C.Ørsted Værket og Svanemølleværket. I bilag 63 og 64 er resultatet af denne beregning anført som funktion af fjernvarmebelastningen.

Beregningerne

Ved gennemførelsen af beregningerne er der benyttet to ækvivalente modtryks- og to ækvivalente kondensationsturbiner på hvert værk foruden en højtrykskondensationsturbin på hvert sted. Da det ikke er muligt på skemaerne at aflæse, hvorledes de aktuelle turbiner kan belastes, er det her valgt for hvert værk at opdele den i bilag 63 og 64 aflæste ydelse for både kondensations- og modtryksenheder på to lige store enheder inden for hver slags. For eksempel er der svarende til perioden 1968-71, hvor fjernvarmebelastningen på H.C.Ørsted Værket ligger på omkring 335 t/h, regnet med 2 modtryksturbiner á 19 MW og 2 kondensationsturbiner á 34 MW. Tilsvarende er der for Svanemølleværket regnet med 2 modtryksturbiner på hver 12 MW og 2 kondensationsturbiner på hver 35 MW, idet fjernvarmebelastningen her udgør mellem 140 og 200 t/h i samme periode. Højtrykskondensationsmaskinerne er i begge tilfælde repræsenteret ved deres nominelle ydeevne (60 henholdsvis 35 MW netto).

For Gothersgade Elværk er der ikke taget hensyn til havarier på kedlerne, idet kedeleffekten her er meget rigelig og fordelt på et større antal enheder. Derimod er de 4 turbiner (3x5 + 2 MW) repræsenteret på sædvanlig måde.

Beregningerne for KB's værker er gennemført med 3,5 og 5 % havarital for de enkelte enheder. I bilag 37 er angivet sumfunktionen for til rådighed stående effekt på H.C.Ørsted Værket, Svanemølleværket og Gothersgade Elværk. Dette bilag giver kurver svarende til 5 % havarital.