

■ www.sintef.no ■

EFI Teknisk rapport nr.: 1984

Oppdragsgiver: NVE Statskraftverkene.	Dato: - 5. JAN 1976 Blad: 59 Opplag: 160 +1	Sak nr.: 1G-19 Prosj. nr.: 122111
Rapportens tittel: PERSONSIKKERHET VED KORTSLUTNINGER.		
Avdeling: Høyspenningsavdelingen. v/ avd.sjef H.M. Paulsen Prosjektleder: A. Schei Saksbehandlere: A. Schei AS/gh		Rapporten er: ÅPEN <input checked="" type="checkbox"/> Utredning, teoretisk undersøk. <input type="checkbox"/> Prøver, eksp. undersøkelser <input checked="" type="checkbox"/> Original arbeid <input type="checkbox"/> Referat

Rapporten sendes oppdragsgiveren i 3 originaleksemplarer. Rapporten er oppdragsgiverens eiendom og kan ikke uten hans skriftlige tillatelse overdras til tredjemann. (Jfr. pkt. 6 i EFI's oppdragsvilkår).

Sammendrag:

Målsettingen for prosjektet har vært å klarlegge virkningene av kortslutning på elektriske anlegg og dets omgivelser, og da spesielt med tanke på personsikkerheten.

Rapporten behandler, dog med noe varierende dyptgående:

- Kartlegging av normer for prøving av komponenter som utsettes for kortslutningspåkjenninger.
- Energiutvikling ved lysbuekortslutning i luft og i olje.
- Virkning av kortslutning på anlegg og på omgivelser.
- Nåværende og forventede kortslutningsytelser i det norske nett.

Spesielle avsnitt med kommentarer omtaler blant annet hvor fortsatt forskningsvirksomhet synes å være ønskelig.

Rapporten gir en oversikt over personsikkerheten ved kortslutninger og et grunnlag for fortsatt arbeide innen dette felt.

Trondheim, den - 5. JAN 1976

INNHOOLD

FORORD -----	1
1. INNLEDNING -----	4
2. KARTLEGGING AV NORMER FOR PRØVING AV KOMPONENTER SOM UTSETTES FOR KORTSLUTNINGSPÅKJENNINGER -----	5
2.1 Ventilavledere -----	5
2.2 Metallkapslede høyspennings koblingsanlegg ---	5
2.3 Kommentarer -----	7
3. ENERGIUTVIKLING VED LYSBUEKORTSLUTNING I LUFT OG I OLJE -----	8
3.1 Kortslutning med lysbue i luft -----	8
3.1.1 Lysbuefysikk -----	8
3.1.2 Lysbuespenning -----	9
3.1.3 Lysbuevandring -----	13
3.2 Kortslutning med lysbue i olje -----	14
3.2.1 Lysbuespenning og effektutvikling -----	14
3.2.2 Gassutvikling -----	15
3.2.3 Kommentarer -----	16
4. VIRKNING AV KORTSLUTNING PÅ ANLEGG OG PÅ OMGIV- ELSER -----	17
4.1 Mekaniske påkjenninger på grunn av strøm- kreftene -----	17
4.2 Lysbue i luft -----	18
4.2.1 Trykkstigning -----	19
4.2.2 Trykkavlastning -----	23
4.2.3 Stråling -----	27
4.2.4 Kommentarer -----	29

4.3	Lysbue i apparat med olje -----	30
4.3.1	Trykkstigning og trykkavlastning -----	30
4.3.2	Kommentarer -----	
4.4	Lysbue i olje-luft blanding -----	31
4.4.1	Ekspløsjonsbegrepet -----	32
4.4.2	Ekspløsjon i olje-luft blanding -----	32
4.4.2.1	Virkning på bygninger -----	34
4.4.2.2	Trykkavlastning -----	36
4.4.2.3	Kommentarer -----	42
4.5	Virkning på den menneskelige organisme -----	43
4.5.1	Virkning av kortvarige trykkstøt -----	43
4.5.2	Virkning av gassen fra lysbuen -----	43
5.	NÅVÆRENDE OG FORVENTEDE KORTSLUTNINGSYTELSE I DET NORSKE NETT -----	46
5.1	Kortslutningsytelser i nettene fra 110 kV til 380 kV -----	46
5.2	Kortslutningsytelsen i fordelingsnettet -----	48
6.	SLUTTORD -----	55

REFERANSER

1. INNLEDNING

Ved kortslutning oppstår vanligvis lysbue på kortslutningsstedet. Om denne lysbuen oppstår i nærheten av mennesker, kan direkte skade inntreffe i form av strømgjennomgang, forbrenning ved stråling eller varm luft og gass, trykkstøt ved ekspansjon av luft og smeltet metall, rundtflygende gjenstander og giftige gasser. Lysbuen på kortslutningsstedet kan utvikle seg videre til brann med risiko for personskader i form av røkforgiftning og innebrenning. Om kortslutningen skjer i apparat som inneholder olje, kan oljebrann, oljestøv og/eller gasseksplisjon, og i verste tilfelle detonasjon inntreffe. Om kortslutningen brytes hurtig bort av bryter som fungerer tilfredsstillende, inntreffer ingen skader i brytercellen samtidig som skadene på kortslutningsstedet begrenses i omfang. Tilfredsstillende bryterfunksjon er likevel helt avhengig av bryterens merkeeffekt og kondisjon (vedlikehold) samt kortslutningseffekten i nettet. Klårer ikke bryteren å bryte kortslutningsstrømmen oppstår brytereksplisjon med lysbue, og om bryteren inneholder olje, foreligger også her risiko for oljebrann og eksplisjon.

Kortslutningsstrømmen forårsaker også store mekaniske påkjenninger på alle anleggsdelene som følge av strømkreftene. Like- så oppstår store termiske påkjenninger som følge av strømvarmetapene. Riktig dimensjonering med hensyn til disse påkjenn- ingene har stor betydning for såvel drifts- som personsikker- heten.

Ved jordfeil i direkte jordede nett blir telenettet og høy- spentnettet utsatt for induserte spenninger og potensial- differanser. Det kan også oppstå farlige skritt- og berørings- spenninger i nærheten av koblingsanlegg og ledningsmaster.

2. KARTLEGGING AV NORMER FOR PRØVING AV KOMPONENTER SOM UTSETTES FOR KORTSLUTNINGSPÅKJENNINGER [1],[2],[3],[4]

Generelt kan sies at alle viktigere apparatnormer inneholder krav om kortslutningssikkerhet. Prøvekrets samt kortslutningsstrømmens amplitude og varighet spesifiseres. Det er likevel bare i unntakstilfeller som følgeskadene ved en ikke vellykket kortslutningsprøve spesifiseres. Det vil si de fleste normene bryr seg ikke om de ofte meget omfattende skadene som kan oppstå i anleggene som følge av at de aktuelle apparater av en eller annen årsak ikke klarer de foreskrevne kortslutningspåkjenningene.

2.1 VENTILAVLEDERE [1]

Ventilavledernormene IEC-Publication 99-1, 1970, spesifiserer følgeskadene ved ventilavlederhavari (indre kortslutning) ved å angi en maksimal avstand for spredningen av avlederens fragmenter. Alle deler fra avlederen skal falle innom en sirkel med radius lik avlederens høyde + halve dens diameter. Prøvens varighet er 0.2 sek. og kortslutningsstrømmen varierer fra 5 kA til 40 kA (sym. eff. verdi), avhengig av avlederens kortslutningsklasse. Det oppstår alltid fri lysbue ved disse prøver, men følgeskadene som følge av den frie kortslutningslysbuen som kan komme opp i flere meters lengde, spesifiseres derimot ikke.

2.2 METALLKAPSLEDE HØYSPENNINGS KOBLINGSANLEGG [2],[3],[4]

Lysbueprøving av metallkapslede høyspennings koblingsanlegg er heller ikke spesifisert i noen norm enda, men forslag foreligger fra flere instanser. Det kan nevnes følgende:

- [2]: Phela-Richtlinie Nr. 2, Januar 1974.
Vorläufige Richtlinie für die Prüfung des Verhaltens von gekapselten Schaltanlagen für Nennspannungen von 1-72.5 kV bei Störlichtbögen.
- [3]: SEK NK 17 C, D: AG 3
Forslagsutgåva 6, 1974-06-27
Ljusbågsprovning av metallkapslade högspänningsstallverk.
- [4]: IEC TC No 17: Switchgear and Controlgear.
Sub-committee 17C: High-voltage enclosed switchgear and controlgear.
Proposal by the German National Committee, 17C (Germany) 20. April 1975, for a recommended method for testing the performance of enclosed switchgear and controlgear for rated voltages from 1 kV to 72.5 kV under conditions of internal arcing.

SEK-og IEC-forslaget bygger på Phela, og avviker ikke vesentlig fra denne.

Retningslinjen omfatter metallkapslede koblingsanlegg med isolasjon av fast isolasjonsmaterial i kombinasjon med luft av atmosfærisk trykk. Olje eller gass, som normalt kan inngå i anlegget i form av f.eks. slukkemiddel i brytere, inngår ikke ved prøven. Det vil si at prøven viser ikke hva som kan inntraffe om f.eks. en bryter havarerer. Her studeres bare virkningen av en fri lysbue i luft som kan tenkes å være initiert av en feilmanøverert skillebryter.

Prøvetiden er normalt 1 sek. For prøving av trykksikkerheten holder det med 0.1 sek. om skapet har fungerende trykkavlastning. Trykkmaksimum opptrer da under de første halvperiodene.

Prøveobjektet ansees å ha bestått prøven om følgende krav oppfylles:

- Dører må være lukket og låst i overensstemmelse med fabrikantens anvisning og forbli lukket under prøven.
- Ingen deler av prøveobjektet (trykkavlastningsklaffer, inspeksjonsvindu etc.) som kan treffe og skade personer, må løsne.
- Ingen hull må oppstå i prøveobjektets ytre kapsling på grunn av gjennombrenning, og heller ikke må det forekomme sprekker eller bristninger forårsaket av lysbuen. Mindre hull, sprekker eller bristninger kan likevel aksepteres under forutsetning av at indikatorer (svart flaggvev av bomull, svart bomullsbatist), oppsatt fremfor hullene, ikke er blitt antent.
- De anbrakte indikatorene må ikke antennes av utstrømmende varm gass fra skapet.

2.3 KOMMENTARER

Detaljert kartlegging av apparatnormene og deres foreskrevne kortslutningsprøver er ikke utført. Denne kartlegging kan kanskje være av interesse for at man skal få en grunn for fremtidige modifikasjoner (forbedringer) av normenes kortslutningsprøver.

Det er rimelig at normene i fremtiden legger større vekt enn hittil på følgeskadene i forbindelse med at apparatene ikke klarer angitte kortslutningsdata.

3. ENERGIUTVIKLING VED LYSBUEKORTSLUTNING I LUFT OG I OLJE

Ved lysbuekortslutning i luft tilføres energi fra lysbuen til den omgivende luften som ekspanderer. Smeltet metall fordamper ved lysbuens fotpunkter og kan, sammen med den ekspanderende luften, forårsake omfattende skade som følge av høyt trykk, høy gasstemperatur og intens stråling. Ved lysbue i olje genereres brennbar gass som kan medføre sprengning av den beholder som oljen er innesluttet i. Under gunstige forhold kan brann og eksplosjon forekomme.

3.1 KORTSLUTNING MED LYSBUE I LUFT

3.1.1 Lysbuefysikk [5]

En lysbue kan defineres som "en gassutladning med en positiv søyle i termisk likevekt og med et anode-katodefall med lav spenning og høy strømtetthet". En lysbue har vanligvis en fallende spenningsstrømkurve. Katode- og anodespenningsfallet tilsvarer tilsammen et par titall volt og feltstyrken i den positive søylen til noen kV pr. meter.

Det er ofte praktisk å dele inn lysbuene i korte og lange lysbuer. Grensen, som naturligvis ikke er spesielt skarp, kan ansees å ligge ved en buelengde på noen desimeter. En kort lysbue brenner hovedsakelig i metalledamp fra elektrodene. For disse lysbuene spiller materialet i elektrodene og deres utforming en meget stor betydning, og man kan ikke se bort i fra anode-katodespenningsfallet. Korte buer forekommer i lavspenningsanlegg og i ulike typer av strømbrytere.

Lange lysbuer brenner hovedsakelig i luft, og buespenningen bestemmes praktisk talt helt av forholdene i den positive søylen.

Elektrodematerialet har ingen større betydning, men elektrodernes utforming kan spille en viss rolle for buens vandring. Lange buer forekommer oftest på kraftlinjer og i friluftskoblingsanlegg.

Lysbuer i innebyggede koblingsanlegg, f.eks. metallkapslede koblingsanlegg, utgjør et grensetilfelle. Man kan vanligvis se bort i fra anode- og katodespenningsfallene, men må regne med at buene i alle fall delvis brenner i metalledamp fra elektrodene. Elektrodernes material og utforming spiller derfor en viss rolle her.

3.1.2 Lysbuespenning [5],[6]

Lysbuespenningen har vanligvis en tilnærmet rektangulær kurveform, hvilket innebærer at dens toppverdi, middelvei og effektivverdi er omtrentlig like store. Ved strømmen på 100 A og derover har buens treghet ingen praktisk betydning, og buen kan betraktes som rent resistiv. For fritt brennende lange lysbuer kan lysbuespenningen tilnærmelsesvis skrives:

$$U = \frac{K_1 \cdot L}{J^n} \quad (1)$$

hvor

U = buespenningen i V

J = buestrømmen i A

L = buelengden i m

K_1 = konstant

n = konstant

I litteraturen angis ganske ulike verdier på K_1 og n . En ofte sitert kilde [7] angir $K_1 = 26.700$ og $n = 0.4$. Målte verdier på lysbuespenningen viser ofte relativt stor spredning, hvorfor strømvhengigheten ofte forsummes for strømmer over 100 A. Buespenningen skrives da:

$$U = K \cdot L \quad (2)$$

der K i de fleste tilfeller ligger mellom 1000 og 2500 v/m. Ofte settes $K = 1500$, dvs. $U = 1.5$ kV/m. For en sikrere bedømming vises til figurene 1 - 3. De angitte verdiene i fig. 1 angitt av Strøm, er blitt oppnådd ved laboratorieforsøk der stor vekt er blitt lagt på ledningsføringen for å få så stabilt brennende bue som mulig. Øvrige verdier stammer fra nettforsøk med lysbuer over isolatorer og mellom faser.

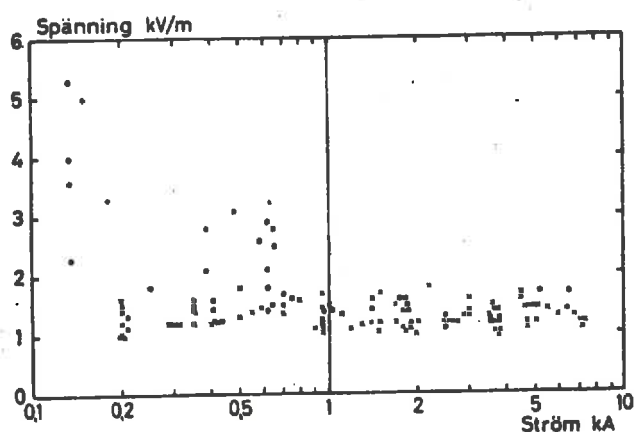


Fig. 1. Ljusbågsspänning som funktion av ström enligt litteraturuppgifter
 ○ Warrington³, $L = 1,2-12$ m
 × Strom⁴, $L = 1,2$ m
 □ Burgsdorf⁵, $L = 1-4$ m
 ● Ulbricht & Koethnitz⁶, $L = 2,2$ m
 + Gross⁷, $L \approx 2$ m
 Arc voltage as function of current according to literature.

Fig 1 [5]

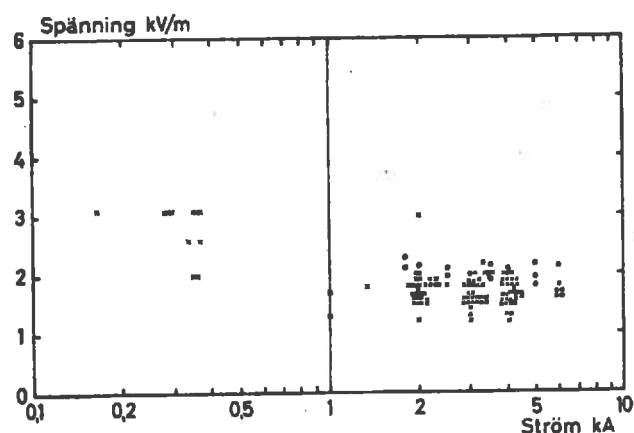


Fig. 2. Ljusbågsspänning som funktion av ström enligt prov vid Asea. $L = 1,5-2,6$ m. De olika beteckningarna avser prov vid olika tillfällen.
 Arc voltage as function of current according to tests at Asea.

Fig 2 [5]

Fig. 2 refererer til hengeisolatorer i en virkelig linje, i de fleste tilfellene med lysbuehorn. Middelverdien under intervallet 0 - 0.2 sek. etter kortslutningen er blitt angitt. Buen sto da noenlunde rett mellom fotpunktene. Verdiene fra ASEA i fig. 3 er middelverdier av buespenningen under kortslutningstider fra 0.1 til 1.0 sek. Kortvarig kunne buespenningen være 1.5 ganger så stor ved strømmen over 1 kA og 2 ganger så stor ved lavere strømmen.

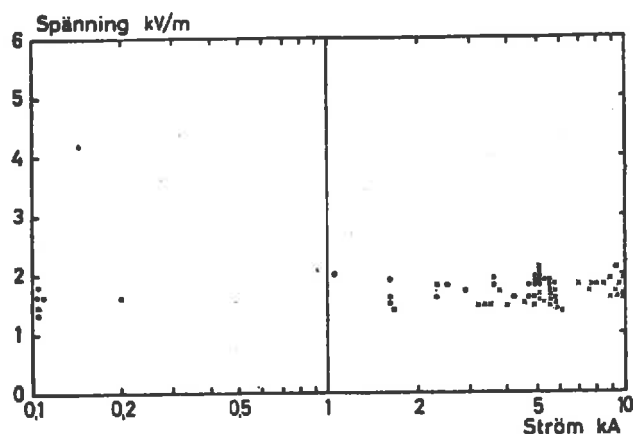


Fig. 3. Ljusbågsspenning som funksjon av strøm. Stabilisert bølge.

○ Asea. Stång-plattagap, $L = 0,14$ m

× Strom. Stånggap, $L = 0,3$ m

Arc voltage as function of current. Stabilized arc.

Fig. 3 [5]

Spredningen mellom de ulike målingene er ganske stor, og det er helt klart at man vinner ingenting på å bruke en komplisert formel for å beskrive sammenhengen mellom spenning og strøm. Den enkle formel (2) er fullt ut tilfredsstillende. Lysbuens feltstyrke kan settes til 1.0 kV/m for lange buer i strømområdet 0.1 - 10 kA, og med stor sannsynlighet også for betydelig større strømmen. Det fremgår fremfor alt av Stroms forsøk i fig. 1 som ble utført under vel stabiliserte forhold. For kortere buer av den type som forekommer i innbygde koblingsanlegg, bør man i følge fig. 3 regne med noe høyere verdi, 1.2 kV/m. Årsaken er sannsynligvis den kjølede virkning som metalledampen utøver. I praksis står imidlertid sjelden buen rak mellom elektrodene, og derfor er de ovenfor angitte verdiene

for buens feltstyrke lite egnet for praktisk bruk. Basert på forsøk kan nedenfor angitte fiktive feltstyrker brukes sammen med den opprinnelige elektrodeavstanden:

2 å 3 kV/m for 0.1 - 1.0 kA

1.5 å 2 kV/m for 1 - 100 kA

De lavere verdiene ved høyere strøm forklares av at buen her har en større tendens til å "kortslutte seg selv" etter en viss forlengning.

For innbygde koblingsanlegg bør man regne med fiktive feltstyrker på 2 å 3 kV/m. For skap av normal konstruksjon gjelder da tabell 1 nedenfor (fasespenning ved trefase buer).

Tabell 1. Ljusbågsspänningar i ställverksfack.

Fackets nominella spänning kV	Normala isolationsavstånd m	Bågspänning kV
6	0,10—0,15	0,2—0,45
10	0,15—0,20	0,3—0,6
20	0,25—0,30	0,5—0,9
30	0,35—0,40	0,7—1,2

Tabell 1 [5]

Følgende overslagsformler kan da brukes for strømmen i området 1 - 100 kA ("Begynnelsesstadiet" er av 0,1 - 0,2 sek. varighet ved strømmen på noen kA):

L = elektrodeavstand i m

L_1 = skapets korteste isolasjonsavstand i m

For 0.1 - 1.0 kA kan tilnærmedelsesvis doble verdier av dem i tabellen benyttes. Effektutviklingen pr. meter lysbue fås ved å multiplisere buestrømmens effektivverdi med de angitte feltstyrkene i tabellen.

Relativt raka, fritt brinnande ljusbågar (begynnelseskedet)	$U = (1,5 \text{ à } 2)L$ kV
Fritt brinnande, icke vandr- de ljusbågar (efter begynn- seskedet)	$U = (2 \text{ à } 5)L$ kV
Fritt brinnande, vandr- ende ljusbågar	$U = (2 \text{ à } 15)L$ kV
Ljusbågar i inomhus ställ- verksfack	$U = (2 \text{ à } 3)L_i$ kV

Tabell 2. [5]

3.1.3 Lysbuevandring [5],[8]

En lysbue kan forflytte seg under innvirkning av termiske og elektrodynamiske krefter samt vindkraften. Buens bevegelse er meget ujevn. Fotpunktene har en tendens til å bite seg fast på visse steder. Det forekommer også at buen tilbaketenner på et sted den nettopp har passert, og på det viset liksom starter på nytt sin vandring. Bevegelsen blir derfor ofte meget rykkete og forskjellen mellom maks- og middelhastighet kan bli stor.

Omfattende undersøkelser er blitt utført for å klarlegge bevegelsen hos korte buer. Som eksempel kan nevnes at 1200 m/sek er blitt målt ved 20 kA og 4000 m/sek. ved 200 kA for buer på et par millimeters lengde. Tabell 3 gir en oppfatning om hva man får regne med for buer som kan forekomme i høyspenningsanlegg.

Tabell 2. Medelhastighet hos lysbågar i öppna skensystem.

Sken- avstånd (fritt) m	Ström kA	Medel- hastighet m/s	Referens
0,1	< 0,2 0,2—0,3 1	0 1—2 15	Litt. 15
0,15	0,3 0,9	5 12	Asea
0,25	< 1 1—2 10 15	0 10—12 12—20 30—70	Litt. 16
ca 0,3	35	300	Litt. 11
0,5	6	18	Asea

Tabell 3. [5]

Middelkastighet for lysbuer i åpne horisontale skensystem.

Det fremgår at strømvhengigheten er meget stor. Strømmer under en viss kritisk verdi kan overhode ikke starte. En viss avstandseffekt foreligger også. Jo større avstand, desto mindre hastighet. Normalt kan man regne med at de elektrodynamiske kreftene helt dominerer over de termiske når strømmen overskrider et par kA. Bare for strømmer under ca. 100 A påvirker vindkraften buens bevegelse i noen større grad. Ved strømmer over noen kA dominerer de elektrodynamiske kreftene helt.

3.2 KORTSLUTNING MED LYSBUE I OLJE

3.2.1 Lysbuespenning og effektutvikling

Lysbuespenningsfallet øker med trykket, men kan, ved store strømmer, regnes som uavhengig av strømmen. De tallmessige opplysninger i litteraturen om lysbuespenningsfallet er divergerende [9], men følgende formel bør gi et bra holdepunkt:

$$U \cong 5.5 L \cdot \sqrt{p} \quad [\text{kV}] \quad (3)$$

hvor

p = trykk, ata

L = lysbuelengde, m.

Lysbueeffekten blir:

$$P_b = 5.5 L \cdot \sqrt{p} \cdot J \quad [\text{MW}] \quad (4)$$

hvor

J = strømmen i lysbuen, kA_{eff} .

3.2.2 Gassutvikling

Bruce [10] har funnet at gassutviklingen i oljen er i det nærmeste konstant $50 \text{ cm}^3/\text{kWs}$, referert til 1 atm. og 20°C , i effektivområdet 0.4 - 35 kWs. Waddington & Allan [11] angir $30 \text{ cm}^3/\text{kWs}$, og Pucher [12] 70 - $100 \text{ cm}^3/\text{kWs}$. ERA [9] har funnet ca. $70 \text{ cm}^3/\text{kWs}$. Det finnes også talloppgaver som viser betydelige avvik fra verdiene ovenfor. For en oljefattig bryter er det f.eks. funnet $200 \text{ cm}^3/\text{kWs}$.

Forskjellen i måleresultatene kan bero på forskjell i lysbueenergi. Det finnes nemlig måleresultater som viser $200 \text{ cm}^3/\text{kWs}$ ved en total lysbueenergi på 0.010 kWs, $40 \text{ cm}^3/\text{kWs}$ ved 0.1 kWs, og bare $10 \text{ cm}^3/\text{kWs}$ ved 1 kWs lysbueenergi. At et slikt samband finnes, er naturlig da gassproduksjonen skjer langs lysbueperiferien, og en forholdsvis større del av strømmen går i lysbuens kjerne ved økende strøm.

ERA har undersøkt gassens sammensetning for lysbuer nær atmosfæretrykk for strømmer i området 270 - 2000 A og funnet:

ca. 70% hydrogen

ca. 25% acetylen

ca. 5% metan, etylen og andre hydrokarboner.

3.2.3 Kommentarer

De gitte data om lysbuespenning, effektutvikling og gassutvikling i olje er ikke basert på særlig grundige studier, men de bør i alle fall gi gode holdepunkter.

Om studier omkring trykkstigning og trykkavlastning ved lysbue i olje skal utføres, kreves mer omfattende undersøkelser og da spesielt av eksperimentell art.

4. VIRKNING AV KORTSLUTNING PÅ ANLEGG OG PÅ OMGIVELSER

Kortslutningsstrømmen fører til påkjenninger på kortslutningsstedet og de nærmeste omgivelsene på grunn av utviklet lysbueenergi, strømkrefter og opphetning ved strømvarmetap. I kombinasjon med olje kan også eksplosjon inntreffe under gunstige forhold i form av gass-oljestøv-eksplosjon. Alle disse virkningene kan føre til skade på personer og/eller utstyr.

Telenettet og lavspenningsnettet blir utsatt for induserte spenninger og potensialdifferanser ved jordfeil i nærliggende direktejordede stasjoner eller linjer. Rørledningsnettet utsettes også for disse påkjenninger. Det kan også oppstå farlige skritt- og berøringsspenninger i nærheten av koblingsanlegg og ledningsmaster. Ved vanskelige jordingsforhold, som en har i store deler av landet, vil disse faremomentene være til stede i relativt stor avstand fra anleggsdelene.

4.1 MEKANISKE PÅKJENNINGER PÅ GRUNN AV STRØMKREFTENE

Ved kortslutning opptrer, som følge av de store kortslutningsstrømmene, store mekaniske påkjenninger på hele det elektriske anlegget. Disse kortslutningskreftene kan f.eks. lede til sprengning av porselenet i transformatorgjennomføringer. Dermed renner olje ut, og porselensbiter kastes ut fra gjennomføringen med stor hastighet og kan volde direkte personskaade.

Riktig dimensjonering av hele det elektriske anlegget med dets inngående apparater og komponenter, med hensyn til kortslutningskreftene er derfor av den aller største betydning.

Da dette området behandles i annet EFI/NTH-prosjekt (Høystrømsproblemer), går en ikke her inn på detaljer. Det bør imidlertid nevnes at beregnede og målte mekaniske påkjenninger i mange tilfeller avviker mye fra hverandre. Interessante målinger og sammenlignende beregninger, såvel med hjelp av formler (VDE) som med datorprogram (ASEA), har nylig blitt utført for 145 kV luftlinje ved høyeffektlaboratoriet ved ASEA i Ludvika [13]. En fant blant annet forhold ved ledernes bevegelse (fall fra største høyde etter utsving) som ga høy strekkpåkjenning i lederen, og som eksisterende formler (VDE) ikke tar hensyn til.

For kortslutningsstrømmer i området 20 - 50 kA_{eff} ble det målt strekk-krefter i lederen opp til 36 kN hvilket er mer enn 10 ganger den statiske belastningen. Målingene viste også at en reduksjon i kortslutningstiden fra 0.5 sek. til 0.1 sek. ga 40% lavere påkjenninger (kan ikke beregnes med VDE-anvisninger).

Datorberegningene ga bedre overensstemmelse med målingene enn de manuelle formlene. Ved visse arrangement avvek likevel datorberegningene fra målingene med en faktor 2.

4.2 LYSBUE I LUFT

Det er viktig for å begrense skadene av kortslutningslysbuen at buen forhindres fra å vandre bort fra startstedet. Det er også av meget stor betydning at lysbuetiden gjøres så kort som mulig med hjelp av effektivt relévern. De personskadene som kan oppstå, er først og fremst av følgende typer:

- Berøring med varm lysbuegass og metalledamp som eksplosjonsartet strømmer ut fra lysbuen (innånding), f.eks. i koblingsskap. Antenning av klær.
- Metallsprut fra lysbuens fotpunkter.
- Stråling fra lysbuen.
- Trykkbølge med mekanisk personfare.
- Plutselig og kraftig lysskinn i kombinasjon med eksplosjonsartet knall gir en sjokkvirkning som i en viss tid blokkerer personers logiske sans og reaksjonsevne. (Sansynligheten for en logisk riktig handling $\rightarrow 0$).

4.2.1 Trykkstigning [5],[14],[15]

Forsøk med lysbue i lukket stålbeholder [14] viser at trykket stiger i middel lineært med tiden. Om andelen bueenergi som går til oppvarming av luften, buespenningen, varighet og spesifikk varme C_v samtlige er konstante, må trykket øke proporsjonalt med strømmen. Eksperimentet viser noe sterkere økning enn proporsjonalt, se fig. 4, noe som antas å bero på at buen forlenger seg med øket strøm. Når maksimum forlengning er oppnådd, er sambandet i det nærmeste lineært. Trykkstigningens steilhet øker omtrent på samme vis med økende strøm som trykket selv, fig. 5.

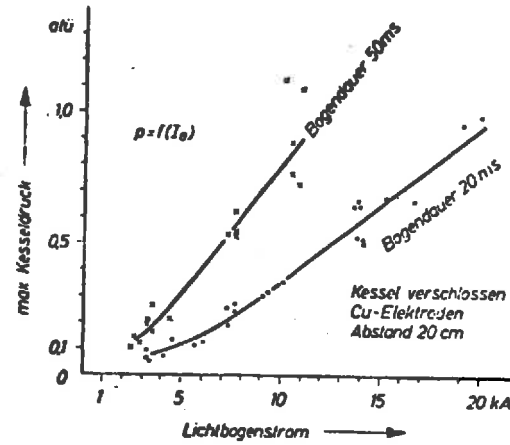


Bild 5 Maximaler Kesseldruck (p) in Abhängigkeit vom Lichtbogenstrom (I_a); (Lichtbogendauer als Parameter)

Fig. 4. [14]

Volum : 0.636 m^3

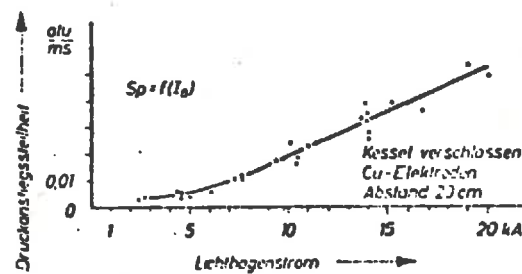


Bild 6 Mittlere Anstiegsteilheit (S_p) des Kesseldruckes in Abhängigkeit vom Lichtbogenstrom (I_a)

Fig. 5. [14]

Volum : 0.636 m^3

Trykkmaksimumet er faseforskjøvet 30 - 60 el.grad. etter strømmen. Intet steilt trykkstøt kunne observeres ved buens tenning, og trykket sank etter strømbrydd til halve maksimalverdien i løpet av ca. 150 ms. Al-elektroder ga i middel ca. 20% høyere trykk enn Cu-elektroder, fig. 6.

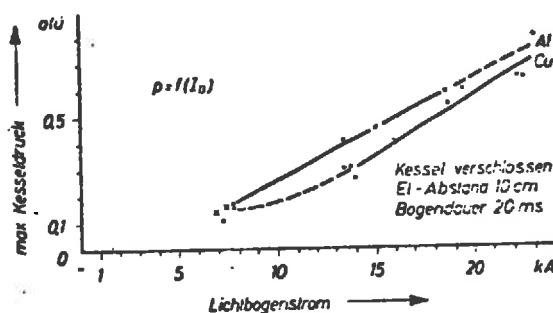


Bild 8 Maximaler Kesseldruck (p) in Abhängigkeit vom Lichtbogenstrom (I_B) bei verschiedenen Elektrodenwerkstoffen

Fig. 6.

Volum : 0.636 m^3

En lysbue i en lukket beholder genererer et trykk som med relativt god nøyaktighet kan beregnes ut fra formelen:

$$p = 10^{-5} \frac{Q(\kappa-1)}{V} \quad (5)$$

Her er:

p = trykkstigningen, at

Q = trykkgenererende energien, Ws

V = volumet, m^3

$\kappa = C_p/C_v = 1,4$ (for luft)

Ved beregning av Q må det observeres at ikke hele lysbue-energien går med til å varme opp luften. En hel del går også med til oppvarming og forbrenning av elektrodene samt til oppvarming av veggene.

Omfattende undersøknings [14] viser at den delen av lysbue-energien som går med til oppvarming av luften er noe avhengig av strøm, lysbuetid og elektrodematerial.

I gjennomsnitt kan man regne med at omtrent halvparten av lysbueenergien går med til oppvarming av luften (50% ved Cu-, 65 % ved Al-elektroder. Man får da følgende approksimative formel for trykkstigningen:

$$p = \frac{2NUJt}{V} \quad (6)$$

- p = trykkstigningen, at.
- N = antall lysbuer
- U = spenning pr. lysbue, kV
- J = strøm, kA_{eff}
- t = lysbuetid, sek.
- V = volum, m³

(Kommentar: Den metalledamp som produseres ved at lysbuen smelter elektrodematerialet, bidrar vesentlig til trykkstigningen ved siden av selve ekspansjonen av den opprinnelige luftmassen. Dette har ikke noen av referansene tatt hensyn til direkte. Indirekte kommer det med i den eksperimentelt bestemte faktor 50%.)

Eksempel

For et normalt 10 kV koblingsskap med $V = 1.7 \text{ m}^3$, $U = 0.3 \text{ kV}$ (se tabell 1), får en for $N = 3$, $I = 25 \text{ kA}_{\text{eff}}$ og $t = 0.2 \text{ sek.}$ $p \cong 5 \text{ at.}$

Eksemplet viser at det er meget vanskelig med praktiske konstruksjoner å stenge inne en høyeffektlysbue i et lukket rom. Noen form av avlastningsåpninger må anordnes.

Ref. [15] løser differensialligningene for systemet, og har kunnet beregne trykkstigningen som funksjon av tiden med relativt god overensstemmelse med eksperiment. Temperaturfordelingen i den utstrømmende luften er også beregnet.

4.2.2 Trykkavlastning

En undersøkelse av nødvendig størrelse på avlastningsåpningen for ulike koblingsskap med indre fri lysbue [6], ga følgende enkle tommeregul:

$$F = \frac{1}{80} P_L \quad (7)$$

hvor

F = nødvendig avlastningsareal, m^2

P_L = lysbueeffekt, MW.

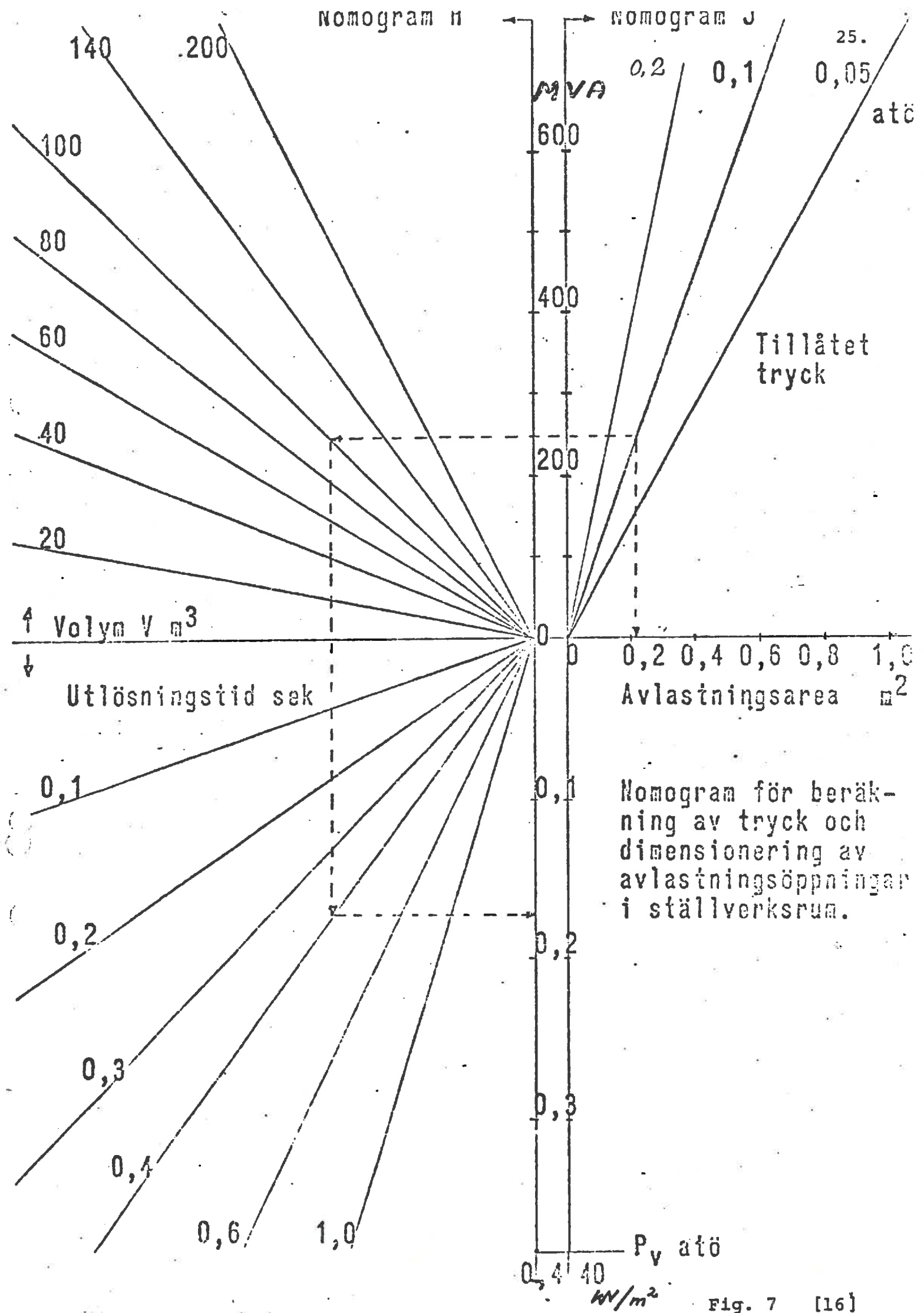
Formelen gjelder for skap med overtrykksholdfasthet 0.5 ato. For eksemplet under 4.2.1 beregnes en nødvendig avlastningsåpning på 0.28 m^2 .

Om koblingsskapene utstyres med avlastningsåpninger, strømmes den varme gassen ut i det omgivende rommet og forårsaker trykkstigning der. Avhengig av dette rommets volum, må avlastningsåpninger av varierende størrelse også plasseres i dette rommet.

Det er ikke i dag mulig å angi enkle og eksakte regler for beregning av trykk og avlastningsareal som tar hensyn til alle medvirkende faktorer. Ut fra de forsøk som er utført til nå, er det imidlertid mulig å gi en viss veiledning [16]. I de tilfeller da avlastningsåpninger ansees nødvendige, gis regler for dimensjonering som i rimelig grad bør begrense skadene på bygninger. Denne bedømmelse og dimensjonering kan utføres med hjelp av nomogrammet i fig. 7. Dette gjelder for trykkpåkjenninger forårsaket av kortslutningslysbuer, og gjelder ikke trykkstigning av annen årsak, f.eks. oljestøveksplasjon.

Om rommets volum er tilstrekkelig stort, kan, avhengig av rommets holdfasthet, trykkstigningen stoppe opp ved slike trykkverdier som rommet tåler. Avlastningsåpninger kreves da ikke. Fra del H av nomogrammet kan det omtrentlige trykk, som oppstår om ingen avlastningsåpning finnes, bestemmes. Nomogrammet er basert på verdien av kortslutningseffekten i det aktuelle rommet P_K i MVA, rommets volum, V i m^3 og utløsningstiden for kortslutningsstrømmen, t i sek.

Om det beregnede trykket er større enn hva bygningen tåler, kreves avlastningsåpninger. Omtrentlige størrelsen av disse bestemmes med hjelp av nomogrammets del J med utgangspunkt i rommets kortslutningseffekt samt tillatte belastning på rommets vegger, tak og gulv.



Avlastningsåpningens nettoareal bestemt ut fra nomogrammet, er basert på fri eller nesten fri utstrømming. Om dette ikke er tilfelle (tette gitter eller luker), må åpningen økes så tilstrekkelig nettoareal oppnås. Om utstrømmingen ikke skjer ut i det fri, men i stedet til annet lokale, kan det bli nødvendig å øke arealet og samtidig ordne sekundær avlastning.

Svake vinduer, som blir slått ut ved trykkstigningen, kan virke som avlastning ved fortsatt trykkstigning. Dører, som kan bli slått ut på grunn av svake låser og hengsler, bør ikke betraktes på samme vis på grunn av tregheten i dørens masse.

Nomogrammet gjelder nærmest for 10 kV, men kan benyttes for området 6 - 30 kV uten større feil. For større koblingsanlegg for 380 V og 500 V bør avleste verdier på trykk og avlastningsareal multipliseres med en faktor på minst 3.

I prinsipp bør avlastningsåpningen plasseres så nært som mulig til det stedet der lysbuen kan tenkes å oppstå. Det kan være lempelig å dele opp avlastningsarealet på flere åpninger plassert på ulike steder i rommet. Avstanden fra lysbuen til åpningen bør ikke overskride ca. 6 m.

På nomogrammet er det vist et eksempel for et 10 kV koblings-skap plassert i et rom med volum 100 m^3 . Kortslutningseffekter i skapet er 250 MVA og utløsetiden 0.4 sek. Av del H fremgår at rommet blir utsatt for et trykk P_v som er 17 kN/m^2 (0.17 ato). Om rommets vegger har en tillatt trykkbelastning på $P_t = 10 \text{ kN/m}^2$ (0.1 ato), kreves altså avlastningsåpninger. Av del J fremgår det at denne åpningen bør være ca. 0.23 m^2 .

Tillatte verdier på overtrykket P_t for rommets flater bør hentes fra bygningsekspert. Som veiledning for overslagsberegninger, angis følgende omtrentlige verdier:

- Murt teglvegg, uarmert, ca. 20 cm tykk (en sten)
tåler ca. 5 kN/m^2 (0,05 ato).
- Betongvegg, normalt armert, ca. 20 cm tykk,
tåler ca. 20 kN/m^2 (0,2 ato).
- Branndør (ca. 2 m^2) utslående tåler ca. $1-10 \text{ kN/m}^2$
(0.01 - 0.1 ato).
- Branndør, innslående tåler $30-60 \text{ kN/m}^2$ (0.3-0.6 ato)

Veggene forutsettes å ha god innfestning i tak og gulv, og ha største spennvidde 2.5 m. Det er dessuten forutsatt at trykket bygges opp i løpet av 10 - 20 ms, og deretter forblir tilnærmet konstant under resten av lysbuetiden (totalt ca. 1 sek.).

Nomogrammet var tenkt å inngå i svensk norm for koblingsanlegg, SEN 362101, men kom aldri så langt da man ble usikker på dets pålitelighet. Spesielt da angående avlastningsåpningenes størrelse. Det er kanskje i alle fall det beste dimensjoneringsunderlaget for dagen.

4.2.3 Stråling [5],[14]

Ved sin høye temperatur ($10.000 - 20.000^\circ\text{K}$ i kjernen) utsender lysbuer en kraftig stråling som i visse tilfeller kan medføre stor skade. I praksis absorberes en stor del av strålingen i den gassky som omgir buen. Dette gjelder spesielt for lysbuer i koblingsskap der elektrodeavstandene er relativt små, og hvor gasskyen følgelig inneholder betydelige mengder metalledamp fra elektrodene. I stedet avgir også gasskyen stråling med en styrke som blant annet beror på skyens utstrekning.

Systematiske strålingsforsøk er blitt utført med lysbuen i en relativt liten beholder, ca. 0.6 m^3 , åpen til den ene siden [14]. Strålingen økte noe mindre enn proporsjonalt med lys-

bueeffekten. Ved 20 MW lysbueeffekt ble strålingsintensiteten målt til 3.7 W/cm^2 for Cu-elektroder og 12 W/cm^2 for Al-elektroder i 1.5 m avstand fra lysbuen, se fig. 8.

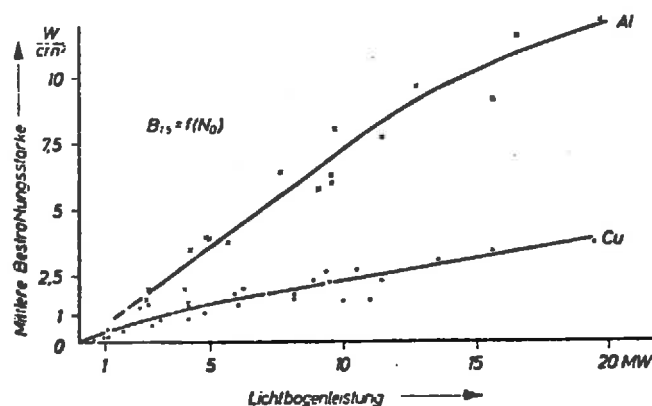


Bild 9 Mittlere Bestrahlungsstärke ($B_{1,5}$) in 1,5 m Abstand vom Lichtbogen in Abhängigkeit von der Lichtbogenleistung (N_a) bei verschiedenen Elektrodenwerkstoffen

Fig. 8. [14]

Verdiene angir midlere strålingsintensitet for den totale stråling (bue + gassky).

Omregning av strålingen til andre avstander kan skje med hjelp av Stefan-Boltzmanns lov (omvendt proporsjonal med avstanden i kvadrat). Forskjellen mellom kobber- og aluminium-elektroder forklares av ulike absorpsjonsevne for de ulike metalledampene. Også den spektrale fordelingen viste stor forskjell mellom forsøk med ulike elektrodematerialer. Med kobber-elektroder forsvant den ultraviolette strålingen allerede etter noen perioder hvoretter den infrarøde dominerte. Med aluminiums-elektroder forble ultraviolett, synlig og infrarød strålingen omtrent konstant. Som sammenligning ble strålingen fra gasskyen alene målt (lys-buen avskjermet). Med kobber-elektroder ble da målt ca. $1/3$ av totalstrålingen bue + gassky. Denne stråling lå nesten helt i det infrarøde området.

De angitte verdiene på strålingen kan sammenlignes med styrken av solstrålingen som ved jordoverflaten er ca. 0.1 W/cm^2 . 12 W/cm^2 gir blemmer i huden etter 5 sek., og en stråling av 25 W/cm^2 ansees tilstrekkelig for at i løpet av et par sekunder forårsake alvorlige skader på menneskehud. Herav følger at koblingsskap bør utføres på et vis som forhindrer direkte bestråling fra lysbuen. Kortvarig stråling fra den omgivende gasskyen bør derimot ikke være farlig. Bestående strålingsskader bør heller ikke kunne forårsakes av lysbuer på høyspenningslinjer, etter som avstanden der alltid bør være tilstrekkelig stor for at strålingsintensiteten skal reduseres til ufarlig verdi.

Briller av spesielt strålingsglass reduserte strålingsintensiteten med ca. 75% hovedsakelig ved refleksjon [14].

4.2.4 Kommentarer

Det refererte underlag for beregning av trykk og dimensjonering av trykkavlastning ved lysbue i luft, ansees å gi noe for usikre resultat. Det er antakelig i alle fall blant det beste som er tilgjengelig i dag. Riktig dimensjonert trykkavlastning er meget viktig både med hensyn til drift- og personsikkerheten (begrensning av skadeomfang). Ytterligere forskning på dette området, både av teoretisk og eksperimentell natur, ansees nødvendig om en skal komme videre.

4.3 LYSBUE I APPARAT MED OLJE

4.3.1 Trykkstigning og trykkavlastning

Om lysbuekortslutning inntreffer i en lukket beholder med olje, opptrer en trykkstigning som skyldes dels de gasser som dannes ved spaltning av oljen (3.2.2), dels også den oljedamp som dannes. En har målt volumet på den gass/damp-boble som dannes rundt en lysbue og funnet at det er fra 4 (ASEA) til 9.5 (Kesselring) ganger volumet av gassen som ble utviklet, og som ble oppsamlet og målt. Dette antas å gjelde ved lave trykk. Ved høye trykk må en anta at oljedamptrykket utgjør en mindre del av totaltrykket idet det må antas å være omtrent likt med oljedampens kondensasjonsstrykk som er begrenset av temperaturen [9].

Nøyaktig beregning av trykket i oljebeholderen er vanskelig å gjennomføre fordi en må kjenne til hvordan beholderens volum endrer seg med trykket, om det finnes innestengt luft i kaviteter eller luftvolum over oljen, om det finnes noen trykkavlastningsåpning og hvordan utblåsningen gjennom denne varierer med trykket, hva temperaturen i gassboblen er, volum av eventuell gass i oljen (oljens kompressibilitet) etc. Ref. [25] gir visse holdepunkter.

Større transformatorer har som regel overtrykksventil montert på lokket [17]. Ventilen åpner for et bestemt overtrykk (f.eks. $\sim 7 \text{ N/cm}^2$) med stor åpningshastighet (f.eks. 30 ms til full åpning). Etter avlastningen stenges ventilen igjen av seg selv. Regler for dimensjonering av disse avlastningsventilene fins ikke i normer, men visse kraftselskaper har utarbeidet sine egne forskrifter. Hensikten med overtrykksventilene er å forhindre sprengning av transformator-kassen ved indre lysbue. Ventilenes effektivitet er imidlertid diskutabel [18]. For hvis avstanden fra lysbuen til ventilen er relativt stor, blir det stor oljemasse som må akseleres og trykkes ut gjennom ventilen hvilket ofte leder til høyt trykk og sprengning av kassen.

Det er rimelig at trykkavlastningen bare kan få noen større nytte i de tilfeller lysbuen inntreffer nært inntil selve ventilene. Det er derfor fordelaktig å plassere ut flere ventiler med et visst mellomrom.

4.3.2 Kommentarer

Det virker som om kunnskapene omkring trykkstigning og trykkavlastning i forbindelse med lysbuekontaktslutning i olje er mangelfulle. De trykkavlastningsarrangement som fins, f.eks. for transformatorer, ser heller ikke ut til å ha større tiltro hos brukerne. Ytterligere forskning av såvel teoretisk som eksperimentell art er nok nødvendig. Løsning av trykkavlastningsproblemet vanskeliggjøres dessuten av at hensyn må tas til risikoen for oljestøv-gass-eksplosjon.

4.4. LYSBUE I OLJE-LUFT-BLANDING

Om finfordelt olje (oljestøv) forekommer sammen med luft i passende blanding, inntreffer en kraftig eksplosjon om blandingen antennes f.eks. av en lysbue. Denne type eksplosjon kalles oljestøveksplasjon. Gasseksplasjon kan også forekomme om gass produsert av lysbue i oljen blandes med luft og antennes. Om blandingen antennes i avlangt rom eller kanal, kan til og med detonasjon inntreffe. Etter som kombinasjonen olje-luft-lys-bue vil kunne forekomme i forbindelse med kortslutning i elektriske anlegg, er kunnskap om forholdene omkring denne type eksplosjoner meget viktig.

4.4.1 Eksplosjonsbegrepet [19]

Eksplosjon benevnes hurtig fremkomne trykkfenomener av eksploderende gass eller damp som følge av en hurtig kjemisk omsetting i forbindelse med forbrenningsforeteelser. Teknisk oppfattes med eksplosjon en hurtig energiomvandling med plutselig trykkforandring.

Ved forbrenningseksplasjon forplanter varme seg i en flammefront hovedsakelig ved varmeledning. I oljetåke må tåkedråpene fordampe før de kan antennes. Forbrenningssonens (flammefrontens) relative hastighet (= forbrenningshastigheten) ovenfor den uforbrente gassen, er i regel i området 0.1 - 1.5 m/s. Den nedre grensen for en stabil flamme er 0.2 m/s. Flammefrontens absolutte hastighet i rommet (= flammehastigheten), er derimot avhengig av rommets utforming og av aerodynamiske fenomener. Den er fra noen m/s til noen titall m/s, under forutsetning av at ilden får utbrede seg noenlunde uhindret.

Detonasjonshastigheten ligger vanligvis ved noen 1000 m/s. Detonasjon oppstår vanligvis ikke ved tenning av en brennbar gass eller tåke (damp) i vanlige rom, men kan forekomme ved tenning i langstrakte rom eller rørledninger. Risiko for overgang til detonasjon foreligger om rommets lengde er > 8 - 10 ganger dets største tverrmål (diameter) [19]. Ved trykkavlastning av olje-luft-blanding fra f.eks. koblingsskap via lang kanal, er det derfor mulig at risiko for detonasjon foreligger. Dette er et viktig punkt som bør studeres nærmere.

4.4.2 Eksplosjon i olje-luft-blanding

Ved eksplosjon i en blanding av gass eller oljestøv og luft er flammens temperatur maksimalt 1600°C - 2200°C [19]. Den maksimale temperaturen oppnås ved et blandingsforhold mellom brensel

og luft som gir forbrenning uten oksygenoverskudd. For at en eksplosjon i det hele tatt skal kunne inntreffe, må andelen gass eller oljestøv ligge innenfor visse eksplosjonsgrenser som f.eks.:

9 - 66% hydrogen

2 - 80% acetylen

2 - 7% oljestøv

(5% er optimal oljestøv-luft-blanding, 50 g olje pr. m³ luft. For oljestøvskyer med varierende blandingsforhold med luft antas at ca. 20% er i området for eksplosjonsartet forbrenning).

Oljegassanalysen (pkt. 3.2.2) viste 70% hydrogen, 25% acetylen, 5% metan, etylen, andre hydrokarboner.

Disse gassene har i seg selv en raskere trykkstigning enn oljestøv-luft-blandingen. Blanding mellom disse cracking-produkter og oljestøv gir en meget rask trykkstigning. (Iflg. Veivkasse-eksplosjoner i dieselmotorer "SFI-rapport nr. R43 Juni 1962 øker trykkstigningshastigheten med en faktor 8). Forholdet ser ut til å være lite kjent, men det er på det rene at bare sporstoffer av hydrogen/acetylen i oljestøv gir en vesentlig økning av trykkstigningshastigheten.

Foruten eksplosiv blanding av gass eller oljestøv og luft kreves tenningsårsak for at forbrenningseksplasjon skal kunne utvikles. Tenningen kan være gnist, glo eller lignende, eller oppvarming til den temperatur da blandingen tenner av seg selv (tennpunkt). Slik oppvarming kan skje på mange vis, f.eks. kontakt med varme flater, kompressjonsstøt og friksjon. Ved lysbue i olje i kombinasjon med luft bør derfor forholdene ligge vel til rette for tenning av gass-eksplosjon eller kombinert gass- og olje- støveksplasjon.

Når det gjelder støveksplasjoner, er ikke transformatorolje undersøkt i samme grad som metalliske støvarter. Å sammenligne med aluminiumstøv anses å være noe pessimistisk. I stedet anses den ligge nærmere organiske støvarter som f.eks. melis, mais-stivelse og organiske pigmenter.

4.4.2.1 Virkning på bygninger

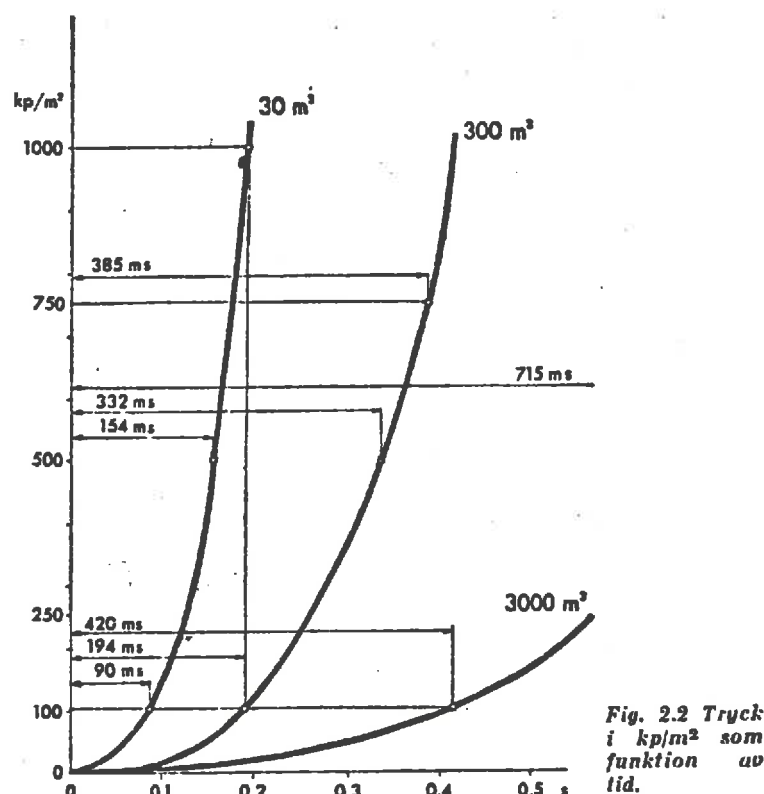
Ved eksplosjoner skiller en mellom slike forårsaket av høyeksplosiver og slike forårsaket av laveksplosiver [20].

Sjokkbølger av typen høyeksplosiv får en ved detonasjon av TNT og vanlig dynamitt, men også fra eksploderende luft eller gassbeholdere. Karakteristisk for sjokkbølgen fra høyeksplosive energikilder er den ekstremt korte tiden fra 0 til maksimalt trykk (størrelsesorden mikrosekund eller mindre). Dette forhold gir spesielle refleksjonsfenomener ved refleksjon fra faste overflater. Maksimaltrykket i refleksjonsflaten er for små trykk det dobbelte av maksimaltrykket i den innfallende sjokkbølge, dvs. vi har en refleksjonsfaktor lik 2. En må her være oppmerksom på at det er refleksjonstrykket, dvs. trykket i refleksjonsflaten som belaster konstruksjonen. For store trykk er refleksjonsfaktoren > 2 . For sjokkbølger i luft med maksimaltrykk ca. 100 ata er refleksjonsfaktoren ca. 10 [20].

Sjokkbølger av laveksplosiver vil gi refleksjonsfenomener bare i spesielle tilfeller. Som laveksplosiv energikilde kan regnes forbrenning av svartkrutt, støvekspløsjoner og kortslutninger. Tidsrommet fra 0 til maksimalt trykk vil her være i størrelsesorden millisekund eller mer. Stigetid for en støvekspløsjon av middels intensitet er 50 - 100 ms. En støvekspløsjon av stor intensitet har en stigetid på 20 ms [20].

Til forskjell fra høyeksplosiver kan man ved laveksplosiver (oljestøvekspløsjon) i de fleste tilfeller utgå fra statisk tilstand og regne med de holdfasthetsverdier som gjelder for statisk tilstand. De normale gasslovene kan da også brukes og vil gi tilstrekkelig nøyaktighet for praktisk bruk. Et viktig unntak er forbrenning i langstrakt rom der forbrenningen kan overgå til detonasjon. Statistiske beregningsmetoder bør derfor brukes med en viss forsiktighet og i prinsipp bare for bygninger og lokaler med enkel geometrisk form [19]. Helst bør en støtte seg til bygningsdelens dynamiske svingeforløp og ta i betraktning betongens egenskaper ved dynamisk belastning.

Trykkstigningen ved forbrenningseksplasjon er for de fleste gasser og damper i en lukket beholder mellom 5 og 10 at under forutsetning av at blandingen er jevnt fordelt. For fint fordelt aluminiumsstøv (ca. 0.3μ kornstørrelse) ligger trykket enda høyere. Som regel motstår apparater og bygninger ikke på langt nær slike trykk, om ikke spesielle konstruksjonstiltak er blitt gjort. Fig. 9 viser trykkets utvikling med tiden ved eksplasjon av bensindamp i et lukket volum av varierende størrelse [19].



I følgende eksempel betraktes tryckstegringsforløpet ved eksplasjon av bensinånga med hjelp av en forenklet beräkning gällande för låga tryck. I ett rum fyllt med explosiv 2,2 %-blandning av bensingas och luft, där lufttrycket är 735 mm Hg, utbreder sig en låga från en punkt kulformigt i rummet. Flamhastigheten antas vara konstant och oberoende av storleken. För rummets storlek göres tre antaganden: 30 m^3 , 300 m^3 och 3000 m^3 . Trycket stiger då efter en kubisk parabel (se fig. 2.2). I 30 m^3 -rummet nås 500 kp/m^2 efter 0,154 sekunder. I de två andra rummen tar samma tryckstegring längre tid, motsvarande 3:de roten ur rumsförhållandet, alltså $\sqrt[3]{10} = 2,15$ resp. $\sqrt[3]{100} = 4,64$ gånger 0,154 s.

Fig. 9 [19]

Om man går ut fra at 5 kN/m^2 medfører risiko for styrtning av normale bygningskonstruksjoner, viser beregningene at følgende regel kan stilles opp: "Den for et rom av normal bygningskonstruksjon (monolittisk konstruksjon d.v.s. ikke prefabrikerte elementer) farlige mengder eksplosiv væske eller eksplosivt støv, uttrykt i kg, er omtrent $1/400$ av rommets volum i m^3 " [19]. (vinduer og dører vil bli sprengt ut, men liten sansynlighet for trommehinneskader på personer).

4.4.2.2 Trykkavlastning

Ved en eksplosjon begrenses trykket i rommet som regel ved at avlastninger inntreffer på ett eller annet vis, f.eks. ved knuste vinduer eller avløftet tak. Teoretisk avtar dermed trykkstigningen, og det høyeste trykket oppnås når de gassmengder som strømmer ut gjennom åpningene, er like store som de gassmengder som produseres ved forbrenning og ekspansjon. Den gassen som blir produsert ved forbrenning og ekspansjon, beror på eksplosjonsflammens effektive overflate og på flammehastigheten. Velges 5 kN/m^2 som akseptabelt eksplosjonstrykk, får en for ulike flammehastigheter et samband mellom rommets størrelse og nødvendig avlastningsareal ($\text{m}^2/100\text{m}^3$ volum) som fremgår av fig. 10 [19].

I figuren angir en spesiell linje anbefalingene fra NFPA (National Fire Protection Association, Fire Codes Vol. 2: The Prevention of Dust Explosions). (Statens Sprengstoffsinspeksjon benytter foreløpig NFPA).

Fra ulike forsøk har en funnet at det nødvendige avlastningsarealet er omvendt proporsjonal med 3. roten av rommets volum.

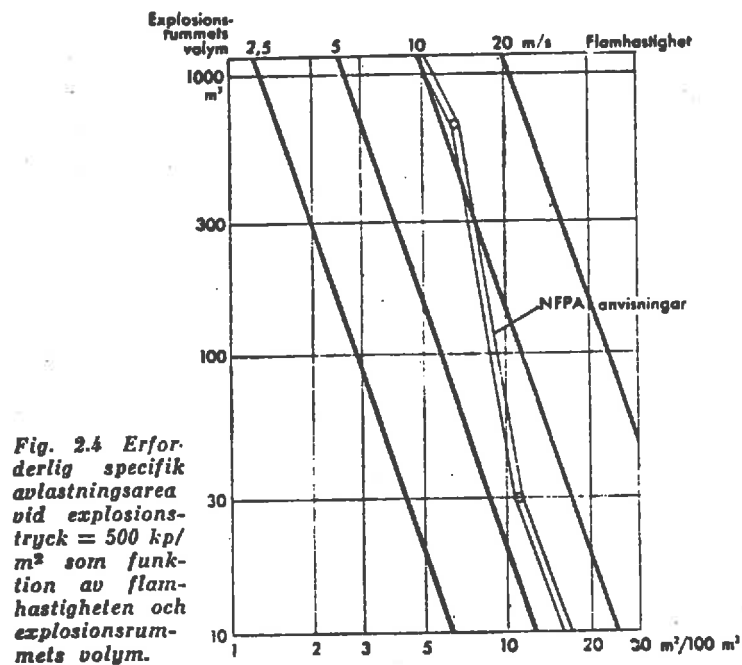


Fig. 10 [19]

Fig. 11 viser et nomogram for beregning av spesifikt avlastningsareal for mindre beholdere av ulik størrelse og for ulike slag av støv. Nomogrammet bygger på eksperiment med 28 liters eksplosjonsrom [19]. Oljestøv ligger trolig mellom kurvene B og C.

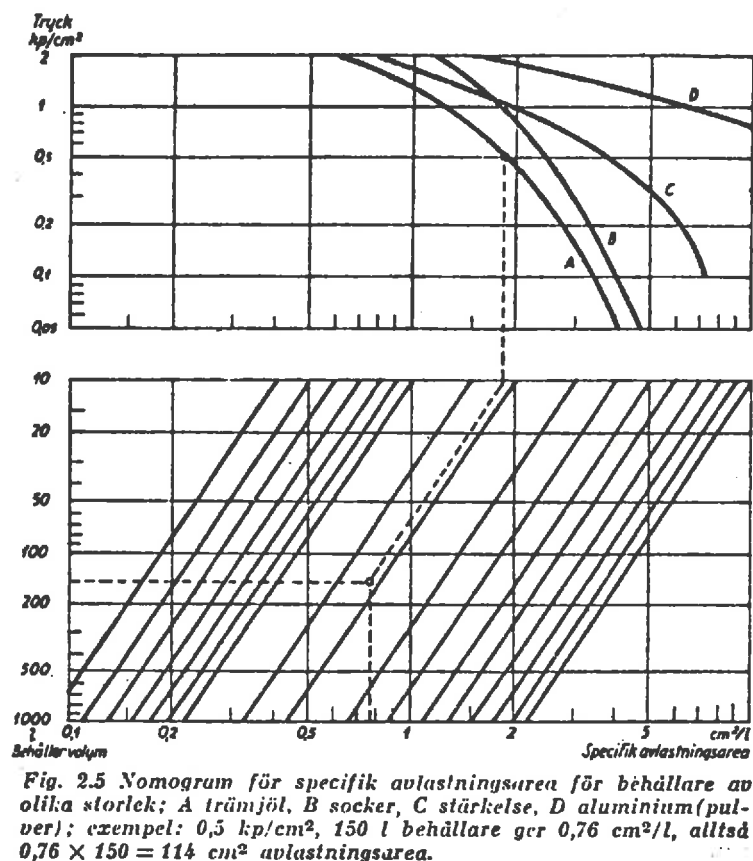


Fig. 11 [19]

Fig. 12 viser på samme vis sambandet mellom trykk og spesifikt avlastningsareal ved ulike volumer for en del andre stoffer ut fra forsøk med 1.83 m³ eksplosjonsvolum [19].

Når en sammenligner ulike stoffers oppførsel med hverandre, kan man bygge på en viktig hovedregel: "Jo større flammehastigheten er, desto høyere blir trykket ved et gitt avlastningsareal".

Verdiene for avlastningsarealets størrelse gjelder under forutsetning av at åpningen av avlastningsluken skjer lett. Ved de forsøkene som nomogrammene er basert på, var rommet tilsluttet med 0.2 mm innpakningspapir som var lett festet ved åpningen. I anlegg behøves det sterkere konstruksjoner. Hvilken trykk-

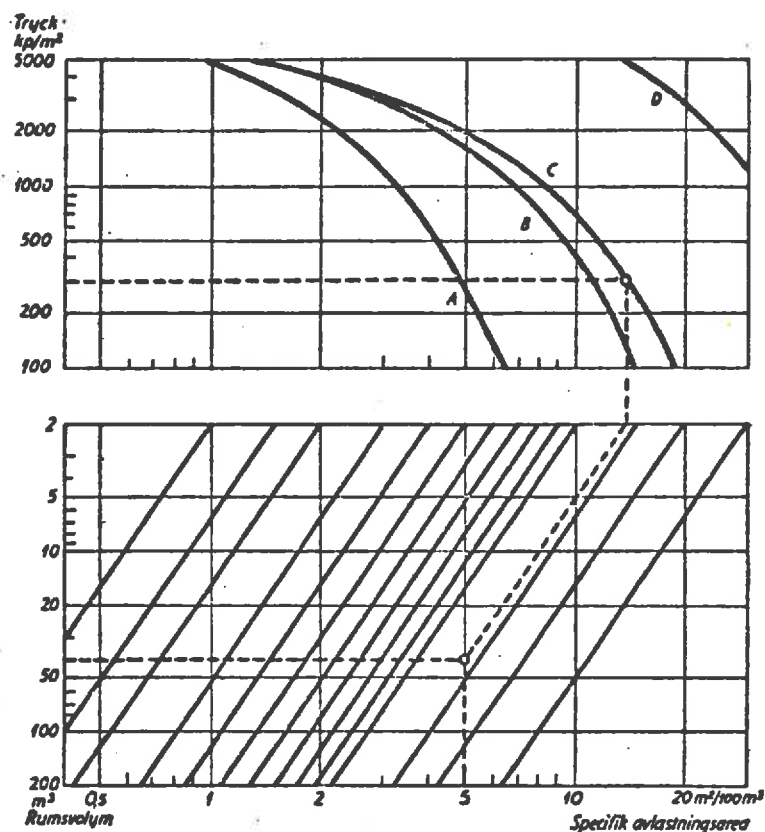


Fig. 2.6 Nomogram för specifik avlastningsarea för explosionsfarliga rum av olika storlek; A luft, B trämjöl, stenkolsdamm, C stärkelse, fenolharts, D aluminium (flagor); exempel: 300 kp/m², 50 m³ rumsvolym ger 5 m²/100 m³, alltså $5 \times 0,4 = 2$ m² avlastningsyta.

Fig. 12 [19]

stigning en da må regne med i forhold til hva nomogrammene ovenfor viser, fremgår av tabell 4 [19].

Tryckfaktor för explosionsavlastning för trädamm.

	Tryckfaktor
Svänglucka, 1,6 mm stål, vikt 2,9 kg	1,2
Svänglucka, 6,4 mm stål, vikt 10,9 kg	2,8
Lackerat papper (0,2 mm), inspant som membran	3,4
Kraftpapper (2 mm), inspant som membran	6,5
Glasfönster, 3,2 mm utan ritsning	8,8
lätt kryssformat ritsat	3,7
Plastimpregnerat papper (3,8 mm), inspant som membran	12,12

Tabell 4 [19]

Tabellen er basert på forsøk med 1.83 m^3 volum og avlastningsåpning $32 \times 48.5 \text{ cm}$. Jo større volumet er, og jo større de enkelte åpningene er, desto mindre er trykkfaktoren.

I et lukket rom, der en på grunn av eksplosjonsrisiko har installert avlastningsluker, har disse sin største betydning ved at hoveddelen av gassen kommer til å forbrenne utenfor rommet. Det er da viktig å bedømme de sekundærskader dette kan medføre. (Ved Brømmaforsøkene [19] forbrant opptil 98% av gassen utenfor rommet).

Ved eksplosjon av gassblanding i en bygning når trykket et første maksimum når avlastningslukene åpnes, og dette er uavhengig av flammehastigheten så lenge denne understiger 10 m/s . Når lukene åpnes, oppstår en flammeorkan, og flammehastigheten stiger kolossalt. Dette medfører et andre trykkmaksimum, og dette bestemmer som regel det høyeste trykket i bygningen. Likevel overskrider trykket sjelden 5 kN/m^2 ved et avlastningsareal $10 \text{ m}^2/100 \text{ m}^3$ [19]. Flammehastigheten er turbulensavhengig og en endring i turbulensforholdene kan også oppstå ved refleksjon fra ujevne overflater, f.eks. et hjørne eller et framspring.

Eksempel:

Oljestøvekspløsjon i koblingsskap. Volum 2 m^3 . Avlastningsåpningen er dekket med en luke av 1.6 mm stålplate, vekt 2.9 kg . Skapet holder 50 kN/m^2 .

Oljestøvekspløsjonen følger nærmest kurven for stivelse C i fig. 12. Luken gir i følge tabell 4 en trykkfaktor på 1.2, hvilket medfører at en må gå inn i fig. 12 ved et trykk på $5000/1.2 \cong 4150 \text{ kp/m}^2$. Kurve C gir da et spesifikt avlastningsareal på ca. $2 \text{ m}^2/100 \text{ m}^3$. Skapets avlastningsåpning bør da være omtrent $0.02 \cdot 2 \text{ m}^2 = \underline{0.04 \text{ m}^2}$.

Om koblingsskapet ovenfor var for 10 kV og kortslutningsstrøm 20 kA , skulle en fri lysbue i skapet i følge formel (7) avsn. 4.2.2 kreve følgende avlastningsåpning:

$$P_L = 0.5 \cdot 20 \cdot 3 = 30 \text{ MW}$$

$$F = 30/80 = \underline{\underline{0.38 \text{ m}^2}}$$

Betraktet hver for seg skulle altså den frie lysbuen kreve ca. 10 ganger større avlastningsåpning i koblingsskapet enn oljestøv-eksplosjonen. Hvordan sammenlagringen av lysbue- og oljestøv-effekten blir i praksis, er noe vanskelig å si. Det er imidlertid sannsynlig at ved eksplosjon av f.eks. en oljefattig bryter i skapet, blir oljestøvkonsentrasjonen for høy til å begynne med (7% øvre grense gir $0.07 \cdot 2 \cdot 1293 = 181 \text{ g olje}$). Det vil si at den eventuelle oljestøv-eksplosjonen kan først inntreffe i skapet etter den avlastning som har skjedd på grunn av ekspanderende luft. Trykkets stigetid ved støv-eksplosjonen er dessuten 2 - 10 ganger større enn ved fri lysbue. Det bør derfor være riktigst å ikke regne med sammenlagring.

Vi antar nå at koblingsskapet avlaster til et omgivende rom på 80 m^3 der oljestøv-eksplosjonen skjer. Rommet tåler et overtrykk på 5 kN/m^2 . Fig. 12 kurve C gir da, idet vi tilnærmelsesvis må forlenge kurven, et spesifikt avlastningsareal på $\text{ca. } 3.5 \text{ m}^2/100 \text{ m}^3$. Nødvendig avlastningsåpning blir da $0.035 \cdot 80 = \underline{\underline{2.8 \text{ m}^2}}$. Går vi ut fra NFPA-anvisningene i fig. 10, finner vi $\text{ca. } 9 \text{ m}^2/100 \text{ m}^3$, dvs. avlastningsåpning $\underline{\underline{7.2 \text{ m}^2}}$.

Om ingen oljestøv-eksplosjon inntreffer, men i stedet den frie lysbuen brenner i 0.4 sek., finner vi fra fig. 7 for $P = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 20 \cong 350 \text{ MVA}$:

$$\begin{aligned} \text{Overtrykk uten avlastning:} & \sim 0.31 \text{ ato} \\ & \cong 31 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Nødvendig avlastningsåpning
for å begrense trykket til
 $0.05 \text{ ato} \approx 5 \text{ kN/m}^2$: 0.5 \text{ m}^2

For den omgivende bygningen krever altså en eventuell oljestøv-
eksplosjon 6 - 15 ganger større avlastningsåpning enn den
ekspanderende luften og gassen fra lysbuen.

4.4.2.3 Kommentarer

Når det gjelder støvekspløsjoner og trykkavlastning for disse,
fins ganske omfattende informasjon tilgjengelig. Det er imidler-
tid noe vanskelig å vite hvor på skalaen blant støvekspløsjonene
man skal plassere oljestøv, eventuelt kombinasjonen oljestøv-
gass-eksplosjonen.

Et viktig punkt av interesse for elektriske anlegg er spørsmålet
om detonasjon i forbindelse med trykkavlastning av olje-luft-
blanding til lang kanal. Foreligger det detonasjonsrisiko?
(Torvald Sande mener at denne er liten. I alle fall vil sjokk-
responsen i kanalvegger og tak være relativt liten, fordi trykk-
sonen har en relativt liten utbredelse, men maksimaltrykket kan
bli opp til 20 bar $\approx 2000 \text{ kN/m}^2$).

4.5 VIRKNING PÅ DEN MENNESKELIGE ORGANISME

4.5.1 Virkning av kortvarige trykkstøt

En kortfattet presentasjon av hva den menneskelige organisme tåler i form av kortvarige trykkstøt, er gitt i [21]

Det er særlig 3 fysiske størrelser hos lufttrykkbølgen som har interesse for skader på det menneskelige legeme:

- Overtrykk
- Stigetid
- Varighet

Terskelverdien for sprengning av trommehinnen ligger ved 0.34 ato (skadefrekvens < 5%) såvel ved 3 ms som 400 ms varighet. Dødelighetsgrensen ligger ved ca. 13 ato ved 2 ms varighet, 3.5 ato ved 10 ms varighet og 2.5 ato ved 400 ms varighet.

Disse tallene indikerer trykk som er ca. 10 - 100 ganger høyere enn hva normale bygninger tåler, og som følgelig trykkavlastningen må dimensjoneres for. Den direkte trykkskaden på mennesker ved en eventuell lysbuekortslutning eller eksplosjon synes derfor å være relativt liten. Den indirekte skaden, ved at personer flyttes flere meter på grunn av trykket, eller ved at maskindeler og splinter kastes ut med stor hastighet, vil være betydelig større.

4.5.2 Virkning av gassen fra lysbuen

ASEA har analysert gassen fra lysbuekortslutning i koblingsanlegg, og utført en arbeidshygienisk bedømming [22]. Gassprøvene har dels blitt tatt i en overstrømskanal oppe ved taket, og dels alment i rommet med start 2 min. etter kortslutningsprøven.

I tabellen nedenfor angis de målte verdier av luftforurensingen sammen med de hygieniske grenseverdiene som anbefales for 8 timers arbeide.

E M N E	KONSENTRASJON I LUFTEN mg/m^3		
	Overstrøms- kanal (Alt. 1)	Alment i rommet (Alt. 2)	Hygienisk grenseverdi
Kobberrøyk (Cu)	28	3.2	0.1
Klorider (HCl)	0.7	Ikke på- visbar	7.0*
Kvelstoffoksyd (NO ₂)	4.5	-	9.0
Kulloksyd (CO)	11	-	55.0

Tabell 5. [22]

* grenseverdi som ikke får overskrides.

Av tabellen fremgår at det er kobberinnholdet i luftforurensningene som overskrider de hygieniske grenseverdiene. Lengre tids innånding av de målte konsentrasjoner kobberrøyk medfører med noen timers forsinkelse besvær i form av kobberfeber.

Samvirkende effekter kan tenkes oppstå gjennom saltsyre og kvelstoffoksyd, men også med hensyn til dette burde de målte konsentrasjonene ikke kunne medføre problemer.

Det bør imidlertid påpekes at de hygieniske grenseverdiene må benyttes med stor varsomhet. Spesielt gjelder dette kombinasjonen av stoffer.

I følge alternativ 1 burde en oppholdstid i røyken av 1 - 1.5 min. ikke medføre problem. I følge alternativ 2 er tilsvarende tid 15 min.

Opplysningene er noe mangelfulle i så måte at kortslutningsstrøm og lysbuetid ikke er angitt.

En annen skade forårsaket av den varme gassen, er indre forbrenning i lungene.

Store brannskader kan også oppstå gjennom direkte varmestraling fra buen og/eller gassen, eller indirekte ved at klær antennes.

Vesentlige skader kan også oppstå på grunn av blinding og sjokk som lett leder til irrasjonelle handlinger.

5. NÅVÆRENDE OG FORVENTEDE KORTSLUTNINGSYTELSE I DET NORSKE NETT

Dette avsnittet gir en oversikt over nåværende og forventede kortslutnings- og jordfeilstrømmer i Norge. For mer detaljert informasjon henvises til de angitte referansene.

5.1 KORTSLUTNINGSYTELSE I NETTENE FRA 110 KV TIL 380 KV [23]

J.A. Øvestad [23] gir en relativt detaljert oversikt over kortslutningsstrømmene i det norske nettet på spenningsnivåene 110, 132, 275 og 380 kV, ved maksimalsituasjonen vinteren 1973/74. Likeledes gis prognose for 1982/83.

For å få frem maksimale kortslutningsstrømmer har en lagt vekt på sterk sammenkobling av nettdelene, all transformator kapasitet innkoblet og maksimal roterende ytelse innfaset i direkte tilknyttede kraftstasjoner og underliggende nett.

I 275/380 kV-nettet forutsettes driftsjordingen ideel, dvs. uten jordingsmotstand. Ved alle feiltilfeller forutsettes metalliske kortslutninger.

Analysen av situasjonen 1982/83 bygger på opplysninger fra Elektrisitetsdirektoratet. Det er også på dette stadium forutsett at nettet er sterkt sammenkoblet og at alle transformatorer tilknyttet 275 og 380 kV-nettet har direkte jordet nullpunkt.

Informasjonen fra [23] er sammenfattet i tabellform og gitt i tabellene 6, 7, 8 og 9. Typisk for store deler av 275 kV-nettet er at feilstrømmene ved jordslutning er større enn ved trefase kortslutning, tabell 6 og 7. En er i 1973/74 oppe i ca. 17 kA trefase kortslutningsstrøm og ca. 20 kA ved enfase jord-

slutning. For 110/132 kV-nettet er en i 1973/74 oppe i ca. 20 kA trefase kortslutningsstrøm, tabell 8.

De største kortslutningsstrømmene har en i dag i stasjoner som ligger sentralt med mange sterke forbindelser til de enkelte nettdeler. I perifære deler av nettet vil kortslutningsstrømmene bli mindre.

For enkelte av stasjonene i 132 kV-nettet er kortslutningsstrømmene i det vesentligste bestemt av transformatorene som knytter sammen 132 kV-nettet og 275 kV-nettet. I de fleste tilfeller er imidlertid kortslutningsstrømmene i hovedsak bestemt av roterende maskiner i kraftstasjoner tilknyttet nettet på samme spenningsnivå.

Det synes som om en må regne med en gjennomsnittlig økning i kortslutningsstrømmene i de nåværende hardest påkjente stasjoner på omlag 50% frem til 1982/83. Ser en på de enkelte nettdeler, vil situasjonen være sterkest avhengig av den utbygging av systemet som foregår relativt nær, slik at økningen i feilstrømmene kan variere mye fra sted til sted.

Opprettholdes nåværende praksis med hensyn til driftsjording i 275/380 kV-nettet, må en i de fleste stasjoner fortsatt regne med større feilstrømmer ved jordfeil enn ved trefasekortslutning.

I løpet av de kommende år vil det bygges opp et betydelig 380 kV-nett i det sørlige Norge som vil binde sammen de større produksjons- og belastningsområdene. Dette nettet vil knyttes til det eksisterende 275 kV-nettet via store autotransformatorer med liten kortslutningsspenning. Foruten de relativt store kortslutningsstrømmer i 380 kV-nettet, vil denne oppbygging av systemet medføre betydelig økning i kortslutningsstrømmene i og nær de stasjoner hvor systemtransformatorene er plassert.

Fortsetter utviklingen av kortslutningsstrømmene uforstyrret, er det sannsynlig at de maksimale kortslutningsstrømmene har nådd opp i 50 kA innen år 2000 [23]. Dette bør lede til en drøfting hvorvidt en bør forsøke å bremse utviklingen av feilstrømmene i fremtiden. Et spesielt problem i det direkte-jordede systemet er de store jordfeilstrømmene som kan medføre ikke uvesentlige sikkerhetsproblemer.

5.2 KORTSLUTNINGSVYTELSER I FORDELINGSNETTET [24]

Opplysninger fra en del elverk om maksimale kortslutningsnivåer er sammenstilt i tabell 10.

De høyeste kortslutningsnivåer finner en i større byer med driftspenninger mellom 6.5 kV og 11 kV.

Ved omlegging av driften vil parallell-kobling av transformatorer i en del tilfeller gi beregnede kortslutningsstrømmer over 30 kA.

Kortslutningsnivået i fordelingsnett (10 eller 20 kV) bestemmes hovedsakelig av ytelse og reaktans ved transformering fra overliggende nett (60 eller 132 kV). En fordobling av kortslutningsnivået i det overliggende nettet vil f.eks. bare gi en økning i fordelingsnettets kortslutningsstrøm på 5 - 10%.

Analyse av et stilisert 22 kV-nett med maksimal kortslutningsstrøm 5 kA viser at vel 50% av feiltilfellene vil gi strømmer lavere enn 1 kA, og mindre enn 5% vil gi strømmer over 3 kA.

Ref. [24] gir på basis av informasjon fra inn- og utland følgende begrensningsnivåer for kortslutningsstrømmene:

- For nettstasjoner (fra høyspenningsfordeling til lavspenningsfordeling) anbefales:

Anleggstype	10 kV	20 kV
Ufullstendig kapslet	12.5 kA (200 MVA)	10 kA (350 MVA)
Fullstendig kapslet	20 kA (350 MVA)	15 kA (500 MVA)

- For hovedfordelingsstasjoner (fra overliggende spenning til høyspenningsfordeling) synes akseptabelt:

Anleggstype	10 kV	20 kV
Ufullstendig kapslet	15 kA (250 MVA)	12.5 kA (450 MVA)
Fullstendig kapslet	25 kA (450 MVA)	20 kA (750 MVA)

Ovenstående verdier overskrider anbefalingene for nettstasjonene. Dette innebærer at det er nødvendig å begrense kortslutningsstrømmen på utgående matninger til nettstasjoner.

Det er sannsynlig at en, i fremtiden i forbindelse med utbyggingen av nettene, vil forsøke å begrense kortslutningsstrømmene til verdier i nærheten av de som er angitt ovenfor.

TABELL 6: MAKSIMALE KORTSLUTNINGSSTRØMMER VINTEREN 1973/74
275/380 KV-NETTET.

OMRÅDE	STED	TREFASE KORT- SLUTNINGSSTRØM KA	JORDSTRØM VED ENFASE KORTSLUTNING KA
Østlandet	Smestad, Sogn, Ulven, Tokke-verkene, Flesaker, Røykås, Rjukanområdet, Sylling, Hamang, Furuset, Tegneby, Hasle	16.4 - 16.9 13.4 - 14.9 > 15 10 - 15	19.6 - 20.6 13.5 - 16.1 15 10 - 15
Vestlandet	Suldal, Kvandal, Sande Førre Sira-Kvina, Blåfalli Aura - Nedre Røsåga	12 10.5 8 - 9 4 - 5.4	11.7 - 13.5 8 - 10 8 - 10 Blåfalli 3.7 - 5.0

TABELL 7: KORTSLUTNINGSSTRØMMER I 275/380 KV-NETTET 1982/83

OMRÅDE	STED	TREFASE KORT- SLUTNINGSSTRØM KA	JORDSTRØM VED ENFASE KORTSLUTNING KA
Østlandet	Smestad, Sogn, Ulven	27	30 - 31
	Rød, Sylling, Hamang, } Røykås, Furuset, Nittedal, Uste	> 20	> 20
	Tokkeverkene	16 - 18	16 - 19
	Rjukanområdet	12	11
	Flesaker	19	
Vestlandet	Hasle	14 - 20	
	Tonstad, Førre, Hylen, } Sande, Suldal	15 - 20	17 - 20
	Blåfalli	11	11
	Aura - Nedre Røsåga	9 - 6	
	Øvrige		< 14

TABELL 8: MAKSIMALE KORTSLUTNINGSSTRØMMER VINTEREN 1973/74
110/132 KV-NETTET

OMRÅDE	STED	TREFASE KORTSLUTNINGS- STRØM
		KA
Østlandet	Nedre Telemark (Rød, Hauen, Knardalstrand, Herøya)	18.2 - 19.3
	Grønvollfoss, Såheim, Mår	11.9 - 13.7
Sørlandet	Finndøla, Hovatn, Brokke	7.7 - 9.2
	Øvrige	4 - 6
Vestlandet sør for Sognefjorden	Stokkeland/Tronsholen	9.5
	Lyse	8.9
	Dale	9.4
	Øvrige	6.6 - 7.5
Vestlandet nord for Sognefjorden	Fortun - Øvre Ardal	8 - 9
	Brannhol	7.5
	Øvrige	< 5
Aura og Trøndelag	Aura	13.2
	Strinda transformatorstasjon	7.7
	Større sentrale stasjoner	> 5
Helgeland - Salten	Nedre Røsåga, Svebo, Rana, Langvatn	10.1 - 11.3
	Enga, Reppa, Siso	3.2 - 4.2
	Øvrige	≤ 6
Skjomen - Alta	Straumsmo	6.4
	Kvandal, Innset, Sørnes	> 5
	Nord for Bardufoss	≤ 3
Øst-Finmark	Adamselv - Kirkenes/Skogfoss	1.5 - 2.4

TABELL 9: KORTSLUTNINGSSTRØMMER I 132 KV-NETTET 1982/83

OMRÅDE	STED	TREFASE KORT- SLUTNINGSSTRØM KA
Østlandet	Rød - Hauen -	28 - 29
	Knardalsstrand	
	Tveiten	12 - 14
	Flesaker	10
	Mår	14.5
Skjomen - Kirkenes	Skjomen - Straumsmo	8
	Kvandal	7
	Bardufoss	6
Øst-Finmark		< 3

TABELL 10: EKSEMPLER PÅ MAKSIMALE KORTSLUTNINGS
NIVÅER I DET NORSKE HØYSPENNINGS-FORDELINGSNETT [24]

Elverk	U_N (kV)	I_k (kA)	P_k (MVA)	Brukes reaktor	Kommentarer
Bergen	7.5	15.4	200	Ja	
	10	11.5	200	Ja	
	22	5.3	200	Nei	
Kristiansand S	10	14.4	250	Ja	
Kristiansund N	11	4.3	81	Nei	
Nord-Trøndelag	22	6.0	250	Nei	
Oslo	10	23.0	400	Nei	
	10	10.5	182	Ja	
	10	20.0	346	Nei	
Salten	11	14.3	260	Nei	
	15	18.1	404	Nei	
Skiersfjorden	10	16.0	278	Nei	I_k opp til 32 kA midlertidig under omkobling
Stavanger	9.5	21.4	350	Nei	
	9.5	11.3	185	Ja	
Trondheim	6.6	25.2	290	Nei	I_k opp til 34 kA midlertidig under omkobling
	11.8	8.7	180	Nei	

6. SLUTTORD

Det er viktig å studere personsikkerheten ved kortslutninger, men den bør sees i sammenheng med hele personsikkerhetskomplekset innen elforsyningen. Det er feil om en alene ser på personsikkerhetsproblemene ved kortslutning. Disse er bare delproblem som må løses, men som må, for å få de riktige proporsjonene på investering og sikkerhetstiltak, sees i den store sammenheng som er generell personsikkerhet i elforsyningen (produksjon, overføring, fordeling). Hjemmeulykkene bør sees separat.

Elforsyningen må også settes inn i samfunnsmessig sammenheng. I første rekke vil dette gjelde målsettingen for personsikkerheten, men det vil også gjelde analysemetoder, arbeidsredskaper og bakgrunnsdata for systematiseringen av personsikkerhetsproblematikken.

REFERANSER

- [1] IEC-Publication No. 99-1, 1970: Lightning Arresters.
- [2] Phela-Richtlinie Nr. 2, Januar 1974: Vorläufige Richtlinie für die Prüfung des Verhaltens von gekapselten Schaltanlagen für Nennspannungen von 1-72.5 kV bei Störlichtbögen.
- [3] SEK NK 17C,D; AG 3 : Förslagsutgåva 6, 1974-06-27
Ljusbågsprovning av metallkapslade högspänningsställverk.
- [4] IEC TC No. 17 : Switchgear and Controlgear. Subcommittee 17C: High-voltage enclosed switchgear and controlgear.
- [5] Thorén, B : Ljusbågar på kraftlinjer och i högspänningsställverk. Elteknik 1962 s. 139-143.
- [6] Hochrainer, A : Kurzschlusslichtbögen in Hochspannungsschaltanlagen. ETZ-A Bd. 83, H7, 1962, s. 202-206.
- [7] Warrington, AR von C : Reactance Relays Negligibly Affected by Arc Impedance. El.World XCVII (1931), s.502-504.
- [8] Hochrainer, A : Die Bewegung des Kurzschluss-Lichtbogens in Hochspannungsschaltanlagen. ETZ-A 77 (1956) 10, s. 302-308.

- [9] Sletbak, J : Eksplosjonsfare ved lysbuer i olje. EFI/NTH-Notat 1975-02-11.

- [10] Bruce, C.E.R. : The distribution of energy liberated in an oil circuit-breaker; with a contribution to the study of the arc temperature. IEE Journal 69 (1931) s.557-590.

- [11] Waddington, F.B., Allan, D.J. : Transformer fault detection by dissolved gas analysis. Electrical Review 23, May 1969.

- [12] Pucher, W : Brytförloppet i högspänningsbrytere. Elteknik 1961.

- [13] Landin, J.I. et al. : Mechanical effects of high short-circuit currents in substations. T75.059-1, IEEE PES Winter Meeting, New York Jan. 1975.

- [14] Hennecke, G Horn, W : Über Druckentwicklung und Strahlung bei Lichtbogenkurzschlüssen in Schaltanlagen. Conti Elektro Berichte 6(1960) H 3, S. 119-128.

- [15] Kindler, H Schels, W: Systematische Untersuchungen zur Störlichtbogensicherheit von Schaltfeldern und Schaltanlagen. Techn. Mitt. AEG-Telefunken 65(1975) 1/2, s. 24-34.
- [16] Bergström, L.R. : Kortslutning/Explosion i elektriska apparater. Kursdagene ved NTH 7.-9. Jan. 1974, Personsikkerhet i elektriske anlegg ved kortslutning.
- [17] ASEA : Fjäderbelastad explosionsventil för oljeisolerade transformatorer. LT 4676-1a, Febr. 1969.
- [18] Schei, A. : Reiserapport, EFI-Notat 1975-06-03, Ref. 1G-19/122111
- [19] Svenska Tarifföreningen: Explosion Fara och Skydd.
- [20] Sande, T : Eksplosjon i bygningstekniske konstruksjoner. Dimensjoneringsprinsipper og løsninger. Kursdagene ved NTH, januar 1974.
- [21] Jenssen, A : Hva tåler den menneskelige organisme av kortvarige trykkstøt? Diskusjonsinnlegg. Kursdagene ved NTH, januar 1974.
- [22] ASEA Hälsovårdsbyrån : Arbetshygienisk bedømming av undersøkingar rörande gasutveckling i ställverk vid kortslutning. (Intern rapport).

- [23] Øvestad, J.A. : Kortslutningsstrømmer i kraftsystemene i dag og i fremtiden. Kursdagene ved NTH, jan. 1974.
- [24] Paulsen, H.M. : Anbefaling for begrensnng av kortslutningsnivå i det norske høyspente fordelingsnett. EFI-TR nr. 1932, 17. juni 1975.
- [25] Trencham : Circuit Breaking. Appendix II p.40-. "Estimate of maximum pressure in an explosion pot when test can be made at required current but only at fractional voltage".

Appendix p. 135: "Calculation of pressure in E.R.A side blast explosion pot".

Tilleggsreferanser til avsnitt 4.2.1 og 4.2.2.

- [26] Pigler, F : Druckentwicklung in Schaltzellen durch Störlichtbögen. Energie und Technik 24 (1972) H2 s. 47-50.
- [27] Beer, F & Keitel, J. : Eine Methode zur Druckberechnung in geschlossenen und mit Austrittsöffnungen versehenen Lichtbogenlöschkammeren.

Elektrie 28 (1974) H. 5
s. 264-267.

SINTEF Energi AS
SINTEF Energy Research

No-7465 Trondheim
Telephone: + 47 73 59 72 00
energy.research@sintef.no
www.sintef.no/energy