

■ www.sintef.no ■



REFERANSESIDE

Rapportens tittel: LANGSGRADIENTER I IMPREGNERT ELEKTRISK ISOLASJON (FORSØKSRESULTATER)	Dato: 1983-05-25 Rapporten er: Åpen
Saksbehandlere: L.Lundgaard (forfatter) <i>LL</i> H.Danielsen (forfatter) <i>HA</i> W.Hansen H.J.Nielsen /LSt	Prosjektnr.: 310005.00 Arkivnr.: 7922075 Antall sider: 73 Opplag: 38

Faggruppe: Isolasjons- og ledermaterialer Gruppeleder: B.R.Nyberg <i>BN</i> Fagkoordinator: J.Sletbak <i>JS</i>	Ansvarlig: Industriseksjonen H. Riege <i>HR</i>
--	---

Oppdragsgiver: NTNF, ASEA-Per Kure, National Industri, NVE	Oppdragsgivers ref.: NTNF 0631.8560
---	--

4 emneord à maksimum 23 karakterer OLJEISOLASJON	GRENSEFLATE
PRESSPAN	GJENNOMSLAG

Referat:

Det er funnet at presspan parallellkoblet med en oljestrekning mellom papirbespun-
nede ledere senker den elektriske holdfasthet. Forurensing av cellulose og vann i
oljen forsterker denne reduksjonen, men har ingen virkning på det rene oljegapet.
Metallpartikler senker holdfastheten for oljegap med oljegap uten presspan.

INNHOLD

SIDE

SAMMENDRAG	I
1. INNLEDNING	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Målsetting	3
1.3 Omfang av arbeidet	3
2. INNLEDENDE FORSØK	4
2.1 Innledning	4
2.2 Prøvecelle	4
2.3 Prøveobjekt; transformatorrettede forsøk	5
2.3.1 Behandling av prøveobjekt, prøveprosedyrer og prøvekrets	6
2.3.2 Resultater	7
2.3.2.1 Planparallele blanke elektroder	7
2.3.2.2 Sylinder/plan med ulike støtter av permawood og presspan	8
2.3.2.3 Sylinder/plan med presspan støtter av ulike geometri	10
2.3.2.4 Sylinder/plan med ulike støttematerialer og varierende partikkelinnhold i oljen	11
2.3.3 Vurdering av de innledende transformatorrettede forsøkene	13
2.4 Kabelrettede forsøk	14
2.4.1 Prøveobjekt	14
2.4.2 Prøveprosedyre	16
2.4.3 Kabelrettede forsøk; resultater og diskusjon	17
3. HOVEDFORSØK	19
3.1 Innledning	19
3.2 Forsøksoppstilling	19
3.2.1 Prøveobjekter	19

3.2.2	Prøvecelle og spenningstilførsel	21
3.2.3	Oljebehandling og impregnering av prøveobjekter	23
3.2.4	Instrumentering	24
3.3	Prøveprosedyre og prøveforhold	25
3.3.1	Spenningspåkjenning	25
3.3.2	Prøveserier; kjøring og registrering	25
3.3.3	Oljeforhold	26
3.3.4	Prøveresultatenes statistiske behandling	28
3.4	Resultater med statistisk behandling - sammenstilling	29
3.4.1	Prøveserier, kommentarer og resultater	29
3.4.2	Parametrenes innvirkning på holdfastheten	32
3.4.2.1	Virkningen av presspan i oljegang med tørr og ren olje	32
3.4.2.2	Innvirkningen av partikler og fukt på de enkelte objekttypers holdfasthet	33
3.4.2.3	Virkningen av presspan i oljegang med fukt og partikler tilsatt	35
3.4.3	Overslagenes lokalisering på objektene	37
3.4.4	Overslagenes plassering på spenningskurven	38
3.4.5	Partielle utladninger	38
3.4.6	Enkeltobservasjoner av gjennomslag m/video	38
3.5	Diskusjon av resultater i hovedforsøk	40
4.	KONKLUSJON	44
	REFERANSER	46
	APPENDIKS A Fuktmåling	47
	APPENDIKS B Partikkelmålinger	49
	APPENDIKS C Dempemotstandens innvirkninger på prøvekretsen	50
	APPENDIKS D VDE-målinger - vurderinger av oljekvalitet	51
	APPENDIKS E Enkeltresultater fra prøveseriene	53

SAMMENDRAG

MÅLSETTING

I all flytende dielektrisk isolasjon er det behov for å støtte og adskille de elektriske lederne mekanisk. Grenseflaten mellom isolerende støtter og flytende isolasjon representerer en svakhet når den påkjennes med et tangentielt elektrisk felt. Den gir en redusert elektrisk holdfasthet i forhold til tilsvarende rene oljestrekninger.

Hovedmålsettingen med prosjektet er å bestemme størrelsen på denne holdfasthetsreduksjonen og finne hvilke parametre som påvirker den. En har søkt å finne om det er sammenheng mellom oljens kvalitet og holdfastheten for et slikt kombinert isolasjonssystem. En har også villet undersøke om det eksisterer en sammenheng mellom partielle utladninger i slik isolasjon og holdfastheten.

Det finnes flere teorier om årsaken til den reduserte holdfastheten. Endel av dem er gjort rede for i EFI-TR 2483, og en trekker her frem:

1. Feltforsterkning i oljen grunnet lavere permittivitet i oljen enn i den faste isolasjonen.
2. Overflateutladninger og endring i feltforhold langs støtten.
3. Elektrohydrodynamiske bevegelser i oljen som kan gi kavitasjon og bobler ved støtten.
4. Dielektroforetiske krefter som trekker partikler inn i oljevolumer med høy feltstyrke.

OBJEKTER OG FØRSØK

Hovedtyngden av forsøkene var holdfasthetsprøver med 50 Hz spenningspåkjenning. Arbeidet ble delt i to; endel innledende orienterende forsøk og en hovedforsøksserie utarbeidet ut ifra erfaringer man gjorde i de innledende forsøkene.

I de innledende forsøkene ble det brukt flere forskjellige objekttyper. De ble alle påkjent med lineært stigende vekselspanning. To objekttyper var rettet mot transformatorisolasjon, med fritt oljevolum rundt den påkjente faste isolasjonen. En type besto av fastisolasjon med varierende permittivitet innsatt mellom plane blanke elektroder. En annen besto av en papirbeviklet sylinderelektrode over plan adskilt med fastisolasjon av ulik geometri og permittivitet. En tredje objekttype var rettet inn mot konstruksjoner relevante for kondensatorstyrte kabelavslutninger. I en viklet papirisolasjon ble det her plassert et adskilt buttgap av sot-papir. Disse forsøkene ble gjennomført med varierende gapavstand.

I hovedforsøkene ble det brukt trinnvis økende vekselspanning. Prøveobjektene var bygget rundt to parallelle papirbeviklede elektroder. Elektrodene hadde en diameter på 5,64 mm og var bespunnet med 1,5 mm papirisolasjon. Elektrodene var 140 mm lange og hadde 20 mm avstand. Holdfastheten for et slikt rent oljegang (åpent objekt) ble undersøkt. Senere ble det introdusert fastisolasjon (presspan) i gapet for å se hvordan holdfastheten ble påvirket. Den faste isolasjonen ble satt inn på to ulike måter. En objekttype hadde en pressspanplate liggende parallelt med og inntil elektrodene (bakplate objekt). I en annen ble det satt inn tre pressspanplater vinkelrett på elektrodene (klypeobjekt). De ulike objektene ble kjørt i serier på 10.

Virkningen av endring i oljens fukt- og partikkelinnhold på de ulike objekters holdfasthet ble også undersøkt.

Til hovedforsøkene ble det bygget en prøveutrustning for maksimal

prøvespenning på 425 kV. Denne hadde, når alt virket, et utladningsnivå på under 5 pC. Det ble også bygget et anlegg for kontinuerlig tørking og filtrering av oljen, og en impregneringstank for objektene.

Under forsøkene ble oljens fukt- og partikkelinnhold, samt dens holdfasthet overvåket. Under selve spenningspåkjenningen ble utladningsnivået i objektene målt. Videorecorder og transientrecorder ble benyttet i registreringen av overslaget. I resultattbearbeidingen ble både Weibull-fordeling og Gaussfordeling med Student-t-test brukt for å finne signifikansen i holdfasthetsendringene.

RESULTATER OG KONKLUSJON

De innledende forsøkene viste for plan/planobjektene en synkende holdfasthet med økende permittivitet i støtten. Sylinder/plan objektene ga ikke konsistente resultater. De første seriene viste en reduksjon i holdfastheten ved innføring av permawood og presspan som støtte. Det ble ikke funnet signifikante forskjeller med ulik geometrisk utforming av støtten. De siste seriene ga en lavere holdfasthet med permittivitetstilpassede støtter enn med presspan støtter. Forskjellene mellom disse innbyrdes og i forhold til rent oljegap var imidlertid ikke signifikante. Forklaringen kan være at oljens tilstand var endret, eller at prøveobjektbehandlingen ga mulige feilkilder (f.eks. luftanslutninger).

Resultatene fra det viklede buttgapsobjektet indikerte en proporsjonal sammenheng mellom holdfastheten og gapavstanden.

Hovedforsøkene viste at med rensset og tørket olje (ca 50 partikler over 5 μ m pr ml og ca 0,6 ppm vann) sank midlere holdfasthet når presspan ble innført i et rent oljegap. Reduksjonen, som var geometriavhengig, var for bakplateobjekt 12% (muligens signifikant) og for klypeobjekt 17% (meget signifikant).

En økning i både vann- og partikkelinnhold med ca 10 ganger ga liten reduksjon i holdfastheten for åpent objekt. Reduksjonen ved innføring av presspan ble imidlertid forsterket. Reduksjonen var nå for bakplateobjektet 22% (meget signifikant) og for klypeobjektet 28% (meget signifikant).

Tilstedeværelsen av et ikke kvantifisert antall metallpartikler reduserte holdfastheten med 16% både for åpent og bakplateobjekt.

Utladningsmålingene viste ingen sammenheng mellom tennspenningen for partielle utladninger og holdfastheten for normale objekter. For objekter med tilvirkningsfeil kunne man observere store utladninger en kort stund før gjennomslag.

Forsøkene viser at holdfastheten blir redusert ved innføring av presspan parallelt med olje i elektrodegap. Holdfastheten i et slikt parallellkoplet gap er sterkere avhengig av oljens kondisjon enn tilsvarende rene oljegang. Et dimensjoneringskriterium for en slik kombinert isolasjon må derfor ta hensyn til faktorer som fukt- og partikkelinnhold i oljen.

1. INNLEDNING

1.1 BAKGRUNN

Når et elektrisk felt virker langs en grenseflate mellom olje- og faststoff-isolasjon er den elektriske holdfastheten ofte lavere enn for tilsvarende ren oljestrekning.

Slike fenomener (langsgradienter) vil være aktuelle i flere typer konstruksjoner; lederunderstøttelser med fast isolasjon i transformatorer og skjøting og endeavslutning av kabler med oljeimpregnert isolasjon. Problemer med kryptoverslag er kjent fra begge disse konstruksjonene, selv om det er forskjeller med hensyn til størrelsen av fritt oljevolum. Spesielt ved 50 Hz prøving av transformatorer har en hatt problemer ved slike konstruksjoner. Det finnes ikke noen fyldestgjørende forklaring på fenomenet. Dimensjoneringskriteriene for slike konstruksjoner er derfor heller ikke tilfredsstillende.

Prosjektet "Langsgradienter" startet i 1978 som et internt forprosjekt på EFI, og fortsatte med økt innsats i 1979 som et rent NTNf-prosjekt i EFI-regi. Det ble da gjort noen innledende forsøk. Neste år kom Standard Telefon og Kabelfabrikk og National Industri med i arbeidet, de innledende forsøkene ble avsluttet og en litteraturreport [1] utarbeidet. I 1981 kom så NVE og ASEA-Per Kure også med i arbeidet. Prosjektrammene ble vesentlig større. Det ble bygget en ny prøveutrustning for det vi her vil kalle hovedforsøkene.

Som bakgrunn for undersøkelsene hadde en endel hypoteser om hvilke faktorer som kan ha betydning for ovennevnte holdfasthetsreduksjoner:

1. *Feltforsterkning i oljen på grunn av lavere permittivitet i denne enn i faststoffisolasjon*

I den ru overflaten i faststoffisolasjonen oppstår det en seriekopling av oljen og den faste isolasjonen. Lokalt kan da oljens holdfasthet overskrides, med overslag som følge. Denne modellen [2] hevdes også å være gyldig både for impuls- og vekselspenning.

2. *Overflateladninger kan genereres fra partielle utladninger.*

Isolasjonsoverflaten antar da et potensial som endrer feltfordelingen. Slik tenker en seg at et overslag kan oppstå langs grenseflaten olje/fastisolasjon. Forholdet antas å være tydeligst ved impulspåkjenning [3],[4].

3. *Elektrohydrodynamisk (EHD)-bevegelser oppstår i oljen*

trolig på grunn av ladningsinjeksjon fra elektrodene. Mye tyder på at kavitasjon og bobledannelse kan oppstå ved hjørner mellom støtter og elektroder. En boble på et slikt sted vil kunne initiere et overslag. Dette er iaktatt både ved impuls- og likespenning [5] [6].

4. *Partikler vil kunne bevege seg i oljen både påbirket av dielektroforetiske- og EHD-krefter.*

De dielektroforetiske krefter trekker høypermittive partikler inn mot sterkere felt slik at "partikkel-broer" dannes i oljen. Ved høye spenninger vil EHD-bevegelsene gjerne bli så sterke at broene løser seg opp. Har en fast isolasjon i oljegapet, vil slike broer kunne feste seg permanent til overflaten av denne, slik at de ikke blir ødelagt av EHD-bevegelsene.

Et overslag vil kunne initieres langs slike broer. Partikkelbevegelsene er såvidt langsomme at de ikke vil ha innflytelse for rene impulspåkjenninger [7], [8], [9].

1.2 MÅLSETTING

Siktemålet for prosjektet har vært eksperimentelt å fremskaffe kunnskaper om overslagsmekanismene og holdfasthetsreduksjonen i en AC-påkjent oljeisolasjon med langsgradienter; fastisolasjon innført parallelt med det elektriske feltet. En har også ønsket å finne om oljens vann- og partikkelinnhold har betydning for holdfastheten i et slikt isolasjonssystem. En har videre villet undersøke om partielle utladningers tennspenning og størrelse har noen relasjon til de enkelte objekters holdfasthet. Dette med tanke på ikkedestruktive prøvemethoder for slike kombinerte isolasjonssystemer. Det er videre gjort noen orienterende forsøk vedrørende kabelavslutninger den en også vil ha langsgradienter i isolasjonen.

1.3 OMFANG AV ARBEIDET

Det ble i prosjektets første fase gjort noen orienterende modellforsøk relevante for transformatorer og kondensator-styrte kabelavslutninger. Hovedforsøkene er en videreføring av de transformatorrettede forsøkene. Det ble kjørt serier på 10 objekter. Seriene adskiller seg fra hverandre m.h.p. fastisolasjonsgeometri og oljens tilstand.

Hovedforsøkene ble alle gjort ved 50Hz prøvespenning og romtemperatur. Som fast isolasjon er det brukt presspan.

Det er utviklet metoder for tilsetting av partikler og fukt til oljen og for måling av konsentrasjonen av disse. Partiklene som ble tilsatt var av cellulose.

2. INNLEDENDE FORSØK

2.1 INNLEDNING

Resultatene fra de innledende forsøkene er delvis publisert [10], [11]. Det er senere blitt klart at mange av disse tildels er be-
heftet med usikkerheter. Vi nevner her ufullstendig kontroll med
parametre som vann og partikkel-innhold i oljen, behandlingsprose-
dyrer av prøveobjektene samt prøve- og målemetodikken.

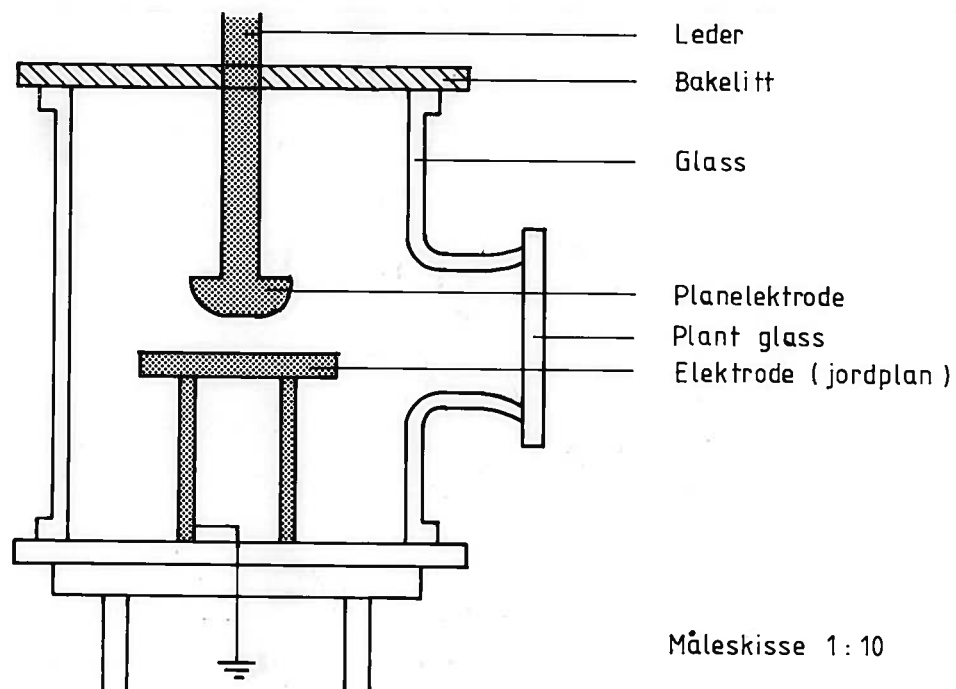
Det er derfor vanskelig å trekke klare og entydige slutninger av
disse forsøkene. De gir likevel en oversikt over hvilke parametre
som kan ha betydning for et overslag i en oljeisolasjon med langs-
gradienter, og hvilke parametre en bør legge vekt på å kontrollere.
Erfaringer fra disse forsøkene har vært til stor hjelp under plan-
leggingen av de senere hovedforsøk og prøveutrustning for disse.

2.2 PRØVECELLE

*I de innledende forsøkene ble det brukt en prøvecelle av glass som
rommer ca 200 liter olje*

For å oppnå visuell kontroll av prøveobjektene under spenning ble
det valgt en prøvecelle av glass. Prøvecellen (figur 1) ble dim-
ensjonert for maksimalt 200 kV vekselspenning. Den har bunn og
topplokk av bakelitt, og er utstyrt med O-rings tetting. Den ble
utført vakuomtett.

Tørking og impregnering av prøveobjektene foregikk i en egen tank.
Før impregnering ble oljen tørket og filtrert.



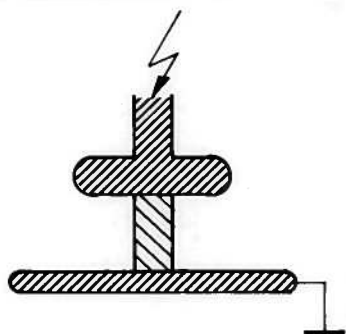
Figur 1 Prøvecelle av glass for de innledende forsøk

2.3 PRØVEOBJEKT; TRANSFORMATORRETTEDE FORSØK

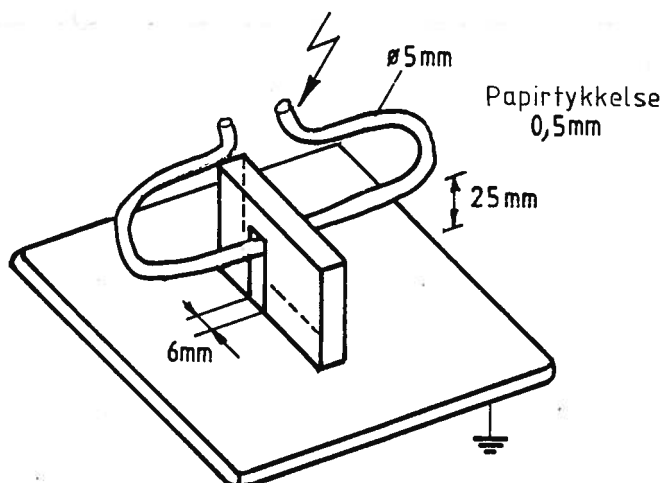
Ved de første forsøkene ble det benyttet planparallele blanke elektroder. Senere gikk man over til prøveobjekter av typen horisontal sylinder over plan, som er mer relevante for transformatorkonstruksjoner.

I de to elektrodegeometriene ble det innført fastisolasjon på ulike måter. Figur 2 og 3 viser dette.

Utformingen av støtten (figur 3) modifiseres noe under forsøkene. Likeså brukes forskjellige materialer. Disse spesifiseres sammen med resultatene. I alle sylinder/plan objektene var lederen beviklet med 0,5 mm papir.



Figur 2 Planparallelt gap



Figur 3 Cylinder-plan objekt

2.3.1 Behandling av prøveobjekt, prøveprosedyrer og prøvekreter

Objektene ble senket direkte i oljen i prøvecellen. De ble så påkjent med lineært stigende vekselspanning til gjennomslag

De av prøveobjektene hvor pressspan og papir inngikk, ble tilvirket hos National Industri og fraktet til Trondheim i impregnert stand i en oljetank.

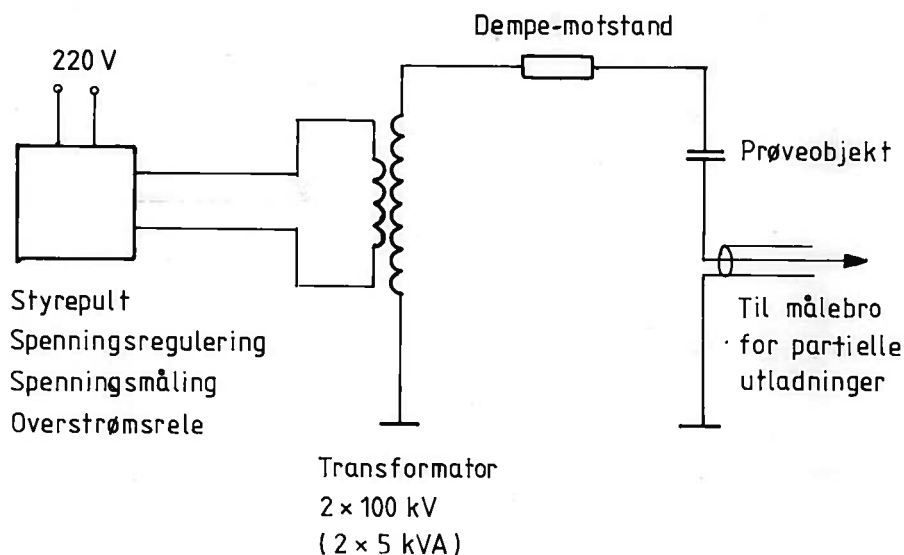
Ved fylling av prøvecellen ble denne rensset og vakuumert før transformatoroljen (Esso Vallø, AppF) ble påfylt.

Ved montering av objektet i cellen ble topplokket fjernet og objektet senket på plass i oljen. For å oppnå en stabil partikkelfordeling, ventet man i ca 30 min før spenning ble påsatt. Etter holdfasthetsprøven ble det defekte objektet fjernet, og et nytt montert som beskrevet ovenfor.

Vanninnholdet i oljen ble målt med Karl Fisher utstyr. I løpet av 1980 anskaffet man utstyr for telling av partikler (se avsnitt 3.3.3). Innhold av partikler i oljen ble senere jevnlig registrert.

I holdfasthetsprøvene ble det benyttet jevnt stigende (10-30 kV/min) vekselspenning. Det ble samtidig gjort utladningsmålinger, men med disse var det store problemer.

Prøvekretsen vises i figur 4. Dempemotstanden var på 700 Ω . Energiutviklingen i gjennomslaget var relativt stor, og resulterte i endel sotpartikler i oljen. Under forsøkene med større serier ble derfor oljen skiftet og renset minst hver annen dag.



Figur 4 Prøvekrets ved innledende forsøk

2.3.2 Resultater

2.3.2.1 Planparallelle blanke elektroder

Resultatene viser en synkende holdfasthet med økende permittivitet i støttematerialet.

Hensikten med disse forsøkene var å undersøke hvilken betydning

støttematerialets permittivitet har på 50 Hz-holdfastheten. De støttematerialene som ble benyttet var polyetylen med $\epsilon = 2,3$, som tilsvarer oljens permittivitet, og videre nylon og glass med henholdsvis $\epsilon = 4,3$ og $\epsilon = 7,0$.

Ved prøvene var det 12 ppm vann i oljen.

Med relativt få prøver (4) i 15 mm gap, fikk man resultater som vist i tab. 1. Det ble benyttet AC-spenning stigende med 10 kV pr minutt.

Støttemateriale	Midlere holdfasthet U [kV]		Holdfasthetsreduksjon
	Uten støtte	Med støtte	
Polyetylen $\epsilon=2,3$	90	87	3,3%
Nylon $\epsilon=4,3$	90	66	26,7%
Glass $\epsilon=7,0$	90	19	78,9%

Tabell 1 50 Hz-holdfasthet; plan/plan med og uten støtter

Resultatene gir en klar indikasjon på permittivitetsens betydning for holdfastheten. Det er uklart hvorvidt det var feltpåkjenningen langs støtteoverflaten som ga den reduserte holdfastheten. Overgangen mellom blank elektrode og støtte er trolig også kritisk, med feltforsterkning i et ikke homogent sjikt. Reduksjonen i holdfasthet var i hvertfall økende med økende permittivitet i støttematerialet i vår objektkonfigurasjon.

Senere forsøk med bjørk og presspan ($\epsilon=4,2$) ga ikke tolkbare resultater, trolig på grunn av forringet oljekvalitet.

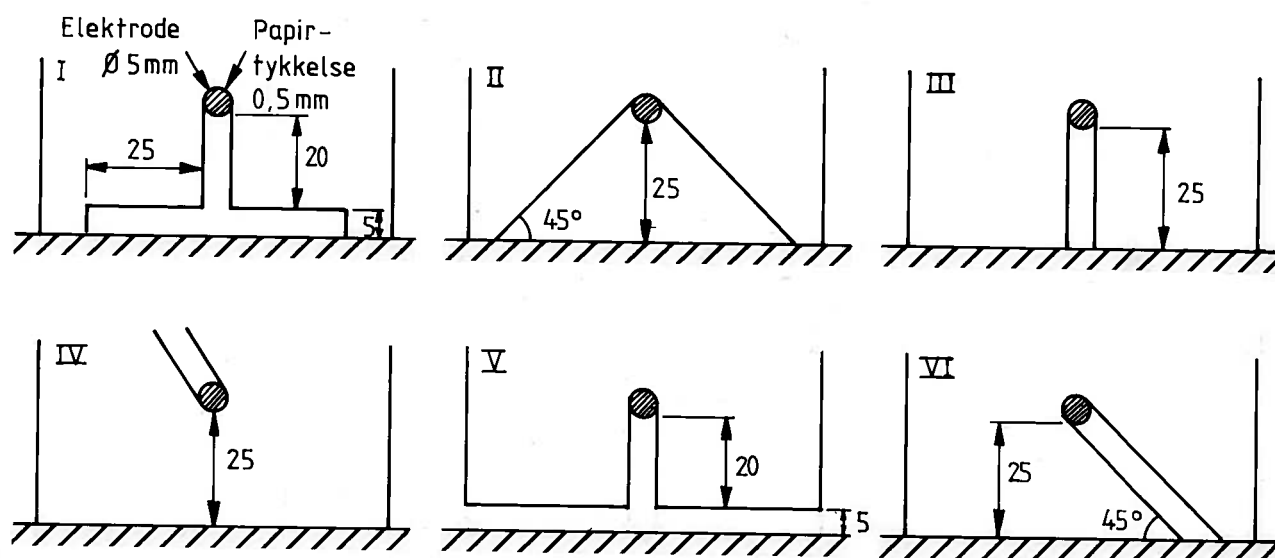
2.3.2.2 Sylinder/plan med ulike støtter av permawood og presspan

Resultatene viser en reduksjon av holdfastheten ved innføring av

støtter. Grunnlaget er for lite til å påvise forskjeller mellom permawood og pressspan.

Med utgangspunkt i sylinder/plan elektrodegeometri ble det kjørt holdfasthetsprøver på 6 forskjellige støttekonfigurasjoner. Vanninnhold var i middel 10 ppm. Typisk resultat fra partikkel-tellingene var 250 part.>5 μ m og 70 part.>10 μ m pr ml.

Siktemålet med disse forsøkene var å undersøke om holdfasthetsreduksjonen kunne knyttes til både material- og geometriparametere. Figur 5 viser de 6 benyttede geometriene. I støttene ble det brukt 5 mm pressspan, samt 16 og 64 mm permawood. Begge disse materialer benyttes i transformatorer.



Figur 5 Støtteutforminger med sylinder/planelektrode geometri

Tabell 2 viser forsøksresultatene. Holdfasthetsreduksjonen ved innføring av støtter var i middel ca 20% sammenlignet med rent oljegang. Lederen var i begge tilfeller papirbespunnet. Maksimal prøvespenning var 190 kV, og ved denne spenning holdt alle objekter uten støtte. Vi gir disse objektene en holdfasthet lik denne spenningen i den statistiske behandling. Spenningen ble økt med 30 kV/min.

Prøveobjekt Konfig.Støttematr.	Ant. prøver	Holdfasthet \bar{U} [kV]	Spredning %	$\frac{\bar{U}}{U_0}$
0 Uten støtte	15 (*)	$\bar{U}_0 > 189$		1
I 5 mm ppn (xx)	5 (1)	170,5	7,9	0,90
II 5 mm ppn	5 (0)	162,0	8,7	0,86
III 5 mm ppn	4 (0)	150,5	16,4	0,80
" 16 mm pW	5 (0)	139,0	9,9	0,74
" 64 mm pW	5 (0)	112,0	6,3	0,59
IV 16 mm pW	5 (1)	149,0	15,6	0,79
" 5 mm ppn	5 (2)	153,0	9,4	0,81
V 16 mm pW	2 (0)	177,0		0,94
" 5 mm ppn	5 (1)	164,0	5,5	0,87
VI 5 mm ppn	4 (0)	122,0	22,3	0,65

(* Antall objekter uten gjennomslag ved maksimal prøvespenning 190 kV)

(xxppn = presspan, pW = permeawood)

Tabell 2 50 Hz holdfasthet for ulike støttetyper

Som vist i tabell 2 er spredningen i holdfasthet stor både innen den enkelte serie og mellom midlere holdfasthet for konfigurasjoner som ligner på hverandre. Trolig var det forholdene rundt den sylindriske elektroden som var avgjørende for holdfasthetsreduksjonen. Det ser ut som økende støttetykkelse ga større reduksjon i holdfasthet.

2.3.2.3 Sylinder/plan med presspan støtter av ulike geometri

Prøver med flere objekter av forskjellig støttegeometri ga ikke signifikante forskjeller.

Det ble kjørt 8-11 forsøk med hver av geometriene; I, III, IV og VI, alle med 5 mm presspan og 20 mm elektrodeavstand (fig. 5).

Det ble også målt utladninger under kjøringene. Disse målingene ga ingen korrelasjon mellom start-nivå for utladningene og holdfastheten.

Objekttype	Antall	Midlere holdfasthet [kV]	Standardavvik [kV]
I	11	129	29,6
III	10	128	14,6
IV	9	147	32,1
VI	8	121	20,9

Tabell 3 Holdfastheter for sylinder/plan objekter med ulike støttegeometri

Resultatene vises i tab. 3. At støttetype VI ga lavest holdfasthet kan forklares ut i fra feltforsterkning ved lederen og volumet der høyeste feltstyrke opptrer. En Student t-test viser forøvrig at forskjellene mellom de ulike seriene ikke er signifikante (se kap. 3.3.4).

2.3.2.4 Sylinder/plan med ulike støttematerialer og varierende partikkelinnhold i oljen

Forsøkene med presspan ga som resultat høyere holdfasthet med støtte enn uten, mens polypropylen, som derimot ikke har permittivitet forskjellig fra oljen hadde en mindre holdfasthet med støtte. Bedre filtering av oljen ga en økning av holdfastheten for objekter uten støtte.

I de innledende forsøkene siste fase valgte man å konsentrere seg om støttetype III (fig. 5), med 20 mm elektrodeavstand. Det ble kjørt både med presspan ($\epsilon=4,2$) og polypropylen ($\epsilon=2,2$).

Objektene ble påkjent med AC 50 Hz, stigende med 20 kV/min. Utladningsmålingene ga ingen korrelasjon med holdfastheten innen de

enkelte serier. Likevel steg startnivået for utladningene når oljen ble bedre filtert.

I den første seriene som ble kjørt (presspan) var oljen av samme kvalitet som i tidligere forsøk. Den ble da filtrert gjennom et dybdefilter med 10 μm maskestørrelse. Før kjøring av serien med polypropylenstøtter ble filteret skiftet ut med et dybdefilter med maskestørrelse under 1 μm .

Resultatene ble ved hjelp av et dataprogram tilpasset en Weibullfordeling (se 3.3.4) og satt opp i tabell 4.

Støttemateriale	PRØVER	Antall prøver	U_0 [kV]	b	Anm.
Presspan	Start utl.m/st	37	23,1	2,8	Filter 10 μm
	Gj.sl. m/st	38	125,7	7,1	12.12.80-
	Gj.sl. u/st	7	115,1	4,8	19.12.80
Polypropylen	Start utl.m/st	19	60,8	3,2	Filter sub- μm
	Gj.sl. m/st	20	113,8	8,1	Jan/Feb. 81
	Gj.sl. u/st	16	129.1	5.0	

Tabell 4 Weibull-parametere for holdfasthetsforsøk med sylinder/plan og støtter av presspan og polypropylen.

U_0 angir 63% gjennomslagssannsynlighet

Med den dårlig filtrerte oljen og presspanstøtter var holdfastheten med støtte høyere enn uten. Dette er motsatt av det forventede. Denne økningen er imidlertid ikke signifikant (Student-t-test). Dessuten hadde over 30% av overslagene ingen tilknytning til støtten. Det er trolig andre forhold enn støtten som påvirker gjennomslaget. Spenningsnivået for utladningsstart er lavt.

Ved visuell kontroll av prøvecellen så man tydelig hvordan partikler sank ned på den plane jordelektroden, og satt i bevegelse i det

elektriske feltet. Det vil derfor alltid være relativt stor konsentrasjon av partikler i det kritiske område nær elektrodene. Målingene av partikkelinnholdet ble derfor ikke representative for det påkjente oljevolumet. Oljens kvalitet var også blitt dårligere etter hvert p.g.a. den høye utladningsenergien i lysbuen under gjennomslaget. Det ble muligens generert partikler som ikke ble filtrert bort.

Prøvene med polypropylenstøtte og bedre filtrert olje viser at startnivået for utladningene ble vesentlig høyere enn tidligere. Holdfastheten ble nå lavere med støtte enn uten, men forskjellen er ikke signifikant. En skulle med disse objektene ikke ha forventet noen reduksjon på grunn av ulik permittivitet i støtten og oljen. Halvparten av gjennomslagene skjedde i forbindelse med støtten. Holdfastheten med støtte ble lavere enn i foregående serie, på tross av permittivitetstilpasningen.

Bedre filtrering ga en økning i 63% gjennomslagsverdi for objekter uten støtter.

At resultatene er så vanskelig tolkbare kan skyldes manglende kontroll med de ulike parametrene som kan innvirke på holdfastheten.

2.3.3 Vurdering av de innledende transformatorrettede forsøkene

Totalt sett er prøveresultatene lite egnet for vurdering av støttekonfigurasjoners innvirkning på holdfastheten i oljegang. Resultatene fra den planparallelle oppstillingen stemmer godt med teorien om permittivitets betydning for holdfastheten. For sylinder/plan geometrien er derimot forskjellene mere uklare. I en av seriene (2.2.2.2) ga innføringen av støtte, med permittivitet ulik oljens, klart redusert holdfasthet. Det var derimot umulig å påvise signifikante geometriavhengige forskjeller (2.2.2.3). I den siste serien (2.3.2.4) med og uten permittivitetstilpasning i støttene, fant man ingen signifikant forskjell i holdfastheten i

forhold til renoljegang. Objekter med støtte hadde ofte gjennomslag langt vekk fra støtten.

Det kan se ut som om forskjellene i holdfasthet mellom objekter med og uten støtte kan maskeres av andre parametre. Vi har allerede pekt på oljens tilstand. Under våre forsøk har antall partikler større enn 5 μm ligget under 500, og vanninnholdet har vært på ca 10 ppm (20°C). Dette er høyt sett i forhold til tilstanden for en transformator under prøving.

Et annet og trolig viktigere forhold kan ha vært fremgangsmåten under montering av objektene. Objektene ble senket direkte i oljen, og det er mulig at luftbobler har festet seg til dem. Luft har enda lavere permittivitet enn olje, og derfor kan slike bobler virke initierende på overslag. Dette kan ha vært bestemmende for de holdfastheter vi har funnet. Slike forhold kan også ha bidratt til reduksjonen i holdfasthet som vi påviste med planparallele blanke elektroder.

2.4 KABELRETTEDE FORSØK

Arbeidet med de kabelrettede forsøkene ble ikke påbegynt før i oktober 1980. Bakgrunnen var STK's interesse for å skaffe bedre kunnskaper om holdfastheter og tennspenningsnivå for partielle utladninger langs sjiktene i kondensatorstyringer i oljeimpregnerte endeavslutninger og kabelskjøter.

2.4.1 Prøveobjekt

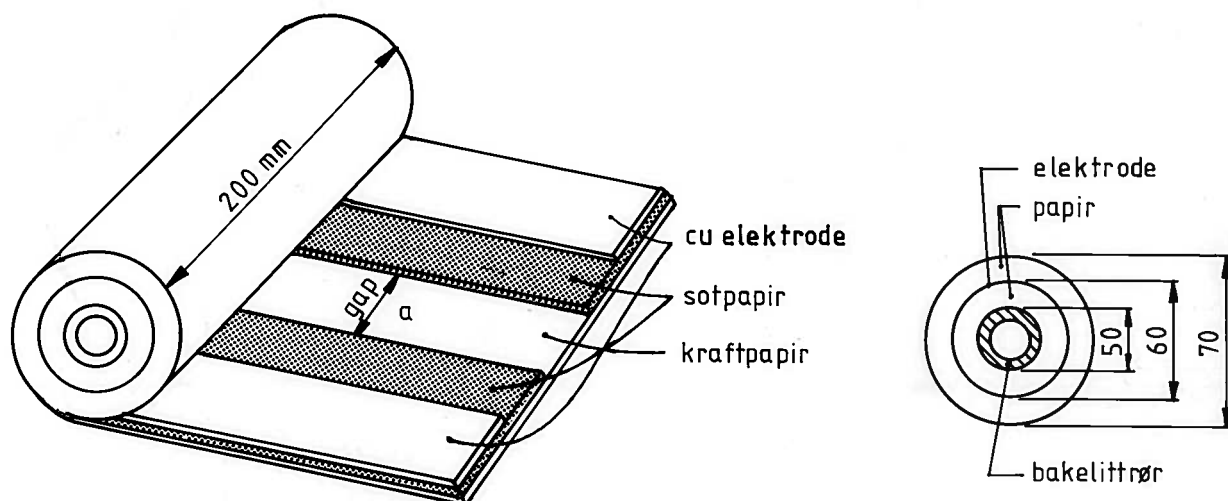
Prøveobjektene er rotasjonssymmetriske med aksielt buttgap av sotpapir.

Etter forslag fra STK ble det laget sylindriske prøveobjekter med aksielt buttgap av sotpapir langs oljesjiktet mellom viklete papirlag. Dette er en forenklet konfigurasjon sammenlignet med

forholdene i en kondensatorstyring der det radielt er papirisolasjon mellom sotpapirene. Meningen var siden å gå over til prøveobjekt med radiell papirisolasjon mellom sotpapirlagene.

Figur 6 viser en skisse av objektkonstruksjonen. Det ble laget tilsammen 12 objekter med tre ulike buttgapavstander (a):

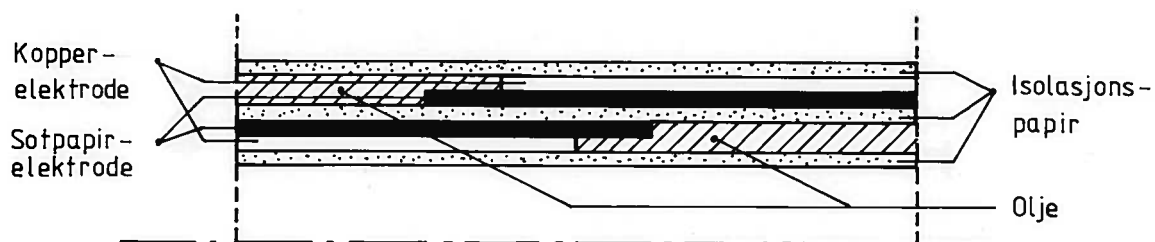
4 objekter	a = 20 mm
5 objekter	a = 40 mm
3 objekter	a = 60 mm



Figur 6 Prøveobjekt for kabelrettede forsøk

Prøveobjektene ble tørket under vakuum og impregnert med transformatorolje. Inntil prøving ble de oppbevart nedsenket i olje i impregneringstanken. Overføring av objektene til prøvecellen foregikk uten eksponering mot luft. Prøvecellen var den samme glasscellen som beskrevet tidligere.

Det ble gjort orienterende forsøk med prøveobjekter med radiell isolasjon mellom sotpapirlagene. Figur 7 viser et aksielt snitt av denne konfigurasjonen.



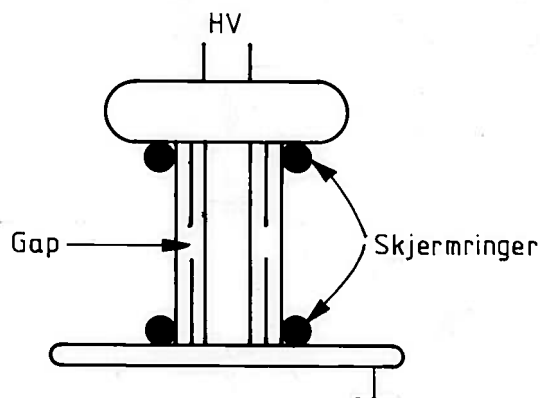
Figur 7 Utkast til viklete prøveobjekter med papirisolasjon radielt mellom sotpapirlag

Av denne typen ble det viklet 3 objekter, men det var store problemer med å få dem faste; mekanisk stabile. Etter noen innledende forsøk ble arbeidet med disse nedprioritert og lagt ned.

2.4.2 Prøveprosedyre

Objektene påkjennes med 50 Hz spenning, stigende med 20 kV/min

Før prøving ble prøveobjektet plassert vertikalt i prøvecellen, stående på jordelektroden. Ned på den andre enden ble det senket en planelektrode. Ved endene av prøveobjektene var det montert kopperringe for å gi god elektrisk kontakt og jevn feltfordeling. Figur 8 viser et snitt av oppstillingen.



Figur 8 Prøveobjekt for kabelrettede forsøk montert mellom elektrodene

Prøvekretsen er den samme som vist i fig. 4. Det ble forsøkt å måle partielle utladninger, men dette ga ingen resultater på grunn av støyproblemer. Prøveobjektene ble påtrykket 50 Hz spenning, stigende med 20 kV pr min.

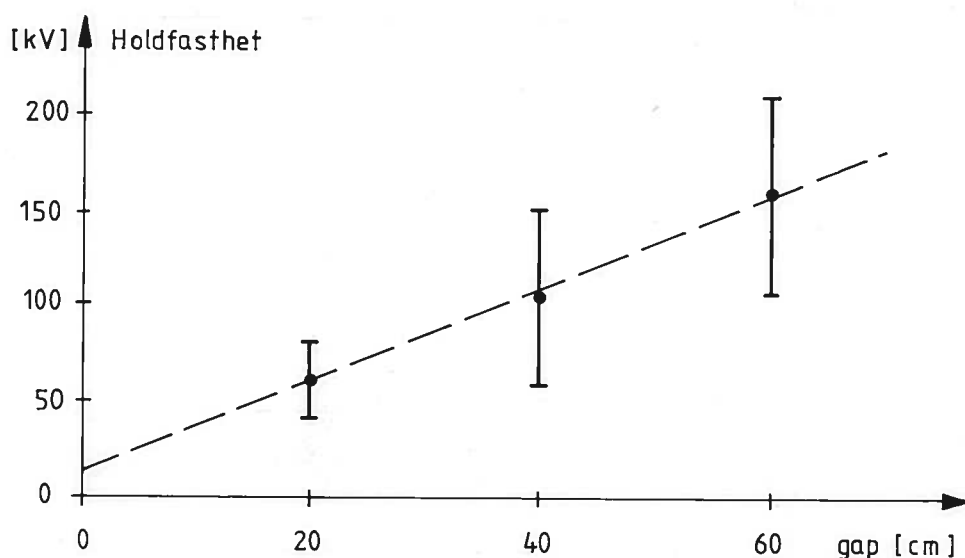
2.4.3 Kabelrettede forsøk; resultater og diskusjon

Holdfastheten i de viklede objektene med sotpapir buttgap er tilnærmet proporsjonal med gapavstanden

Resultatene av forsøkene med aksiell påkjenning vises i tab. 5 og figur 9.

Obj.nr.	a [mm]	Holdfasthet [kV]	Anm.
1	20	31	n=4
2	"	68	
3	"	70	$\bar{U}=61$
4	"	75	
5	40	33	
6	"	100	n=5
7	"	103	$\bar{U}=105$
8	"	117	
9	"	173	
10	60	100	n=3
11	"	180	
12	"	200 (holdt)	$\bar{U}=160$

Tabell 5 Holdfastheten for viklede buttgapsobjekter kumulativt oppsatt



Figur 9 Holdfasthet for viklet buttgap som funksjon av gapavstand

I utregningen av midlere holdfasthet og standard avvik er maksimal holdespenning brukt som gjennomsnittsspenning for de objekter som ikke hadde overslag i gapet. Det er derfor endel usikkerhet i den kvantitative analyse. I tillegg er prøveseriene små.

Man vil av fig. 10 se en tilnærmet proporsjonal økning i holdfastheten med gapavstanden. Siden vi har benyttet holdespenning som gjennomsnittsspenning for 60 mm gap, må den opptrukne sammenheng betraktes som et konservativt estimat.

Den store spredningen kan skyldes ulikheter gitt i produksjonen av objektene. Både for objektene med aksielt og radielt gap bør det derfor legges større vekt på den mekaniske utforming dersom arbeidet skal videreføres.

3. HOVEDFORSØK

3.1 INNLEDNING

Med bakgrunn i de innledende forsøkene ble det klart at en økt innsats for å få kontroll med prøvebetingelsene var nødvendig. En besluttet å arbeide videre innenfor de transformatorrettede forsøkene. Det ble bygget en helt ny prøvekrets med oljebehandlings- og impregneringsutstyr, samt prøvecelle. Det ble lagt inn måleutrustning i prøvecellen, både for måling av oljekvalitet og for kontroll med objektene under prøving.

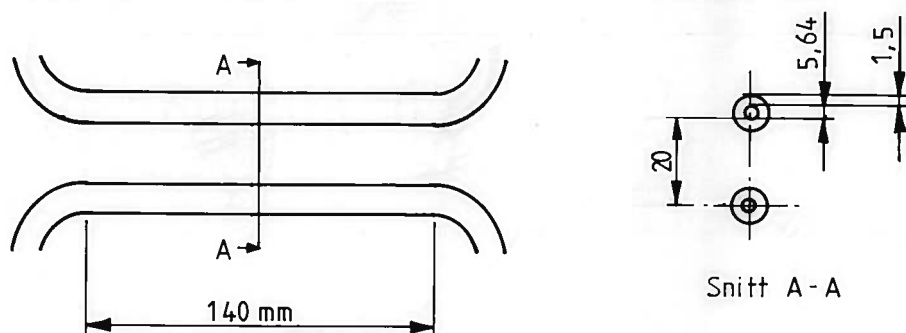
Det ble også lagt vekt på at en skulle operere med relativt høye prøvespenninger, slik at avstander og påkjente oljevolumer skulle kunne sammenlignes med dem en finner i aktuelle konstruksjoner.

3.2 FORSØKSOPPSTILLING

3.2.1 Prøveobjekter

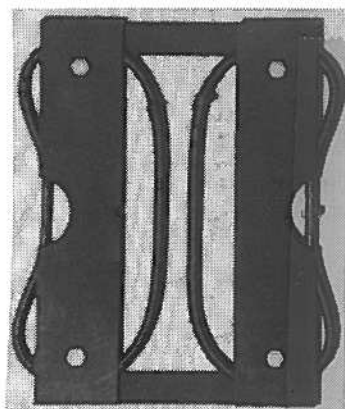
Prøveobjektene bestod av parallelle, papirbespunnede sylindre. Oljegapet mellom disse ble parallellkoplet med presspan på to måter: en type med fast isolasjon normalt på elektrodene akser, og en type med fast isolasjon inn mot og parallelt med elektrodene.

Prøveobjektene ble bygget rundt et elektrodesystem som ble laget av parallelle papirbespunnede Cu-ledere. Figur 10 viser dimensjonene. Papirbespinningen bestod av 24 lag papir med vikle-retningen alternerende for hvert 4. lag. Elektrodene var bøyd i enden for å unngå kantfenomener (feltforsterkning).

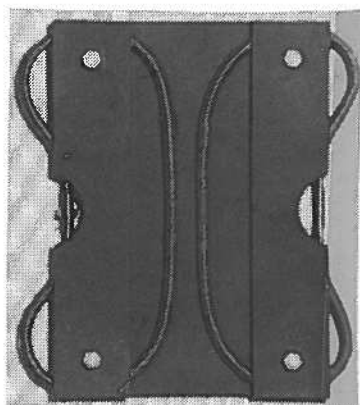


Figur 10 Elektrodekonfigurasjon; målskisse

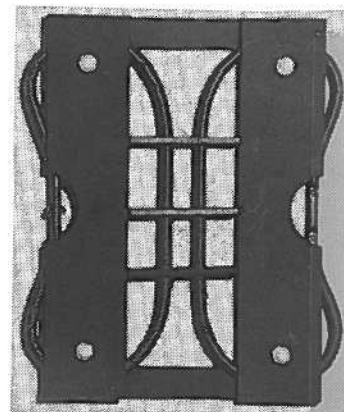
Elektrodenes ble montert mot en ramme av pressspan, og pressspan ($\epsilon=4,2$) ble montert inn i oljegapet på to ulike måter (fig. 11). Oljens permittivitet er 2,2.



Åpent objekt



Bakplate objekt



Klybeobjekt

Figur 11 Prøveobjektenes konstruksjon

I det åpne objektet, som var vårt referanseobjekt, fant vi maksimal feltstyrke i elektrodens fremkant. Den er på 7,3% av påtrykt spenning pr mm. Oljen kan bevege seg fritt rundt elektrodene.

I bakplateobjektet lå den innførte pressspanflaten inn til og

parallelt med elektrodene. Den maksimale feltstyrken i dette objektet fant vi i oljekilen mellom elektrodene og pressspanplaten. Den er 7,9% av påtrykt spenning pr mm. Oljestrømninger ble til en viss grad hindret av platen, men partikler kunne trekkes inn fra øvrig oljevolum.

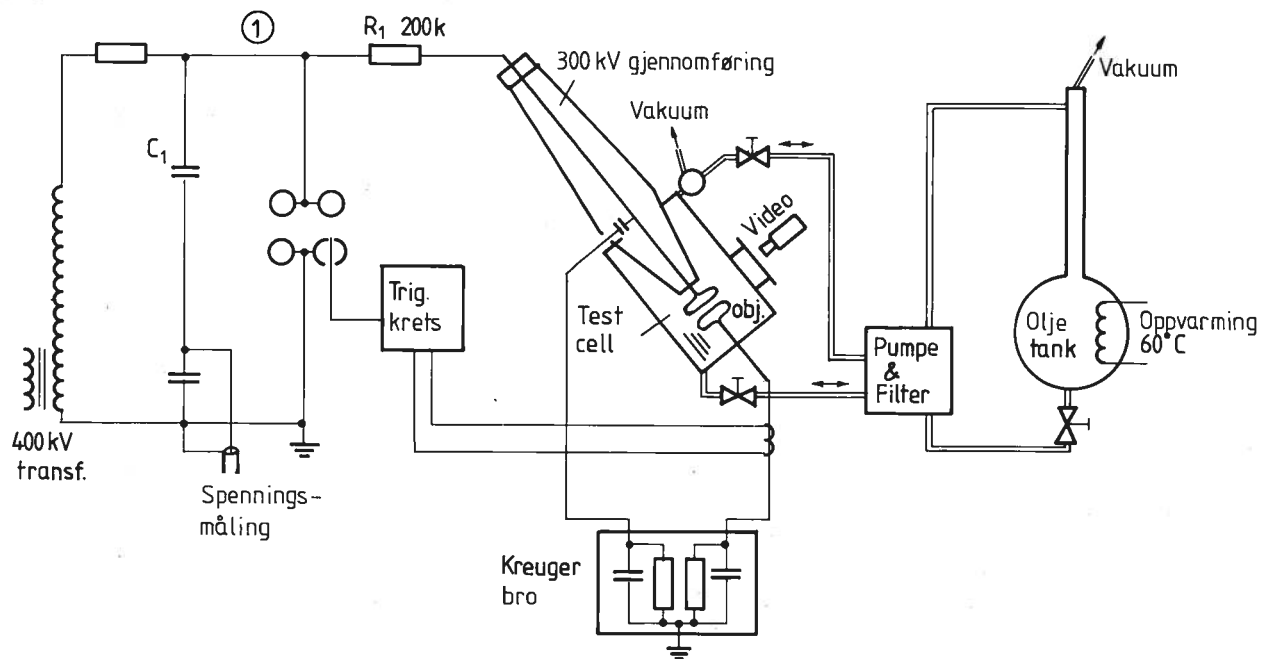
Klypeobjektet hadde 3 pressspanplater normalt på elektrodesyndrene. Her var maksimal feltstyrke i oljen 14% av påtrykt spenning pr mm inne i oljekilen mellom "støtten" og elektroden. Det er små volum som var påkjent med så høy feltstyrke. Også her ble oljestrømninger hindret av pressspanplatene, mens partikler fritt kunne trekkes inn i elektrodegapet.

3.2.2 Prøvecelle og spenningstilførsel

Prøvecellen, som rommet 10 objekter, var bygget for å være utladningsfri opp til 400 AC. Det ble installert utstyr for prøvetaking av oljen.

Prøvekretsen (fig. 12) ble bygget opp rundt en kondensatorstyrt transformatorgjennomføring. Denne ble montert på en skråstilt stålprøvecelle, som rommet ca 600 liter olje. I prøvecellen kunne det lagres 10 prøveobjekter. Ved montering av nytt prøveobjekt måtte oljen tappes ned til under et "mannhull". Dette var plassert slik at objektene kunne manøvreres under olje. Spenningen fikk vi fra en høyspenningstransformator som kan gi opp til 425 kV (eff). Mellom transformator og prøvecelle var det koplet inn en dempemotstand for å redusere kortslutningsstrømmen. (app. C).

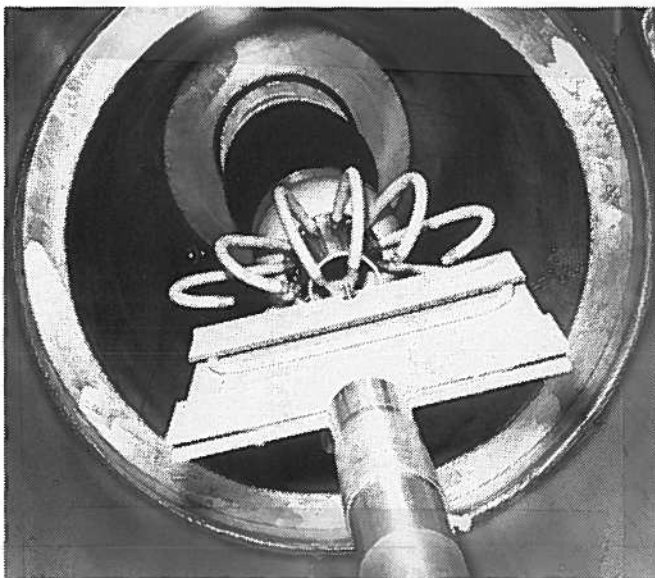
Et kortslutningsgap ble montert inn i prøvekretsen. Ved sammenbrudd i prøveobjektet tentes en lysbue i kortslutningsgapet, slik at utladningen av prøvekretsen skjedde her og ikke i oljen. En har med dette søkt å minimalisere forurensingen av oljen.



Figur 12 Prøveutrustning

Kortslutningsgapet ble tent fra en thyatron tennkrets som var induktivt koplet mot kortslutningsstrømmen i prøveobjektet.

Prøvekretsen var utformet for å gi et så lavt utladningsnivå som mulig (<5 pC ved 400 kV ble oppnådd). I den forbindelse ble det laget et papirbeviklet feltutjevne "bur" på HV-siden (fig. 13). Prøveobjektene var lett manøvrerbare ut og inn av elektrodeholderne.



Figur 13
Bunn av HV-gjennomføring
med bur, prøveobjekt og
jordtilkopling

3.2.3 Oljebehandling og impregnering av prøveobjekter

Oljen ble filtrert og tørket med vakuum og varme. Partikkel- og vanninnhold, samt holdfasthet ble overvåket. Impregneringsanlegget for objektene var tilkoplek oljetanken. Objektene ble holdt under olje etter impregneringen.

Det ble bygget et oljeprosesseringsanlegg som rommer 800 liter olje. Anlegget består av en oljetank med tørkekolonne og en sirkulasjonsenhet. Oljen ble oppvarmet (ca 60°C) og sirkulert under vakuum (ca 0,03 Torr) gjennom kolonnen. Et dybdefilter med maskestørrelse under 1µm kunne koples inn i sirkulasjonskretsen. Anlegget var koplet til prøvecellen, slik at også oljen i denne kunne sirkuleres gjennom prosesseringsanlegget. Den tørkede presspanmengden i prøveobjektene tok opp vann fra oljen, og bidro slik til en ekstra uttørking av denne.

Inne i prøvecellen var det montert VDE-normerte prøveelektroder med gapavstand redusert til 1,2 mm. Med dette sjekket vi oljens holdfasthet. Gapet ble forsynt med spenning fra en egen 60 kV kilde plassert utenfor tanken.

Partikkelinnholdet ble målt med en partikkelteller av typen Hiac Type PC 320. En prøve på 150 ml olje ble tappet fra oljevolumet nær objektet v.hj.a. en fast montert slange. Målemetoden ga antall partikler innen bestemte størrelsesområder. Partikler med diametere på 5 µm (app. B) var de minste detekterbare. Metoden baserer seg på et fotoelektrisk skyggeprinsipp, og den sier intet om hva slags partikler som registreres. Prøvetakingen kan gi store unøyaktigheter (app. B).

Fuktmålingen ble foretatt med en Photovolt Aquatest IV, der titreringen skjedde coulometrisk (modifisert Carl Fisher-metode). Vanninnholdet i oljen var for lavt til å måles direkte, og en gikk derfor vegen om fuktlivekt olje/papir. Papirprøver på 1,2g lå sammen med prøveobjektene. Når fuktinnholdet skulle kontrolleres

førtes en papirprøve og ca 25 ml olje over i en lukket flaske, som ble holdt ved 80°C i 4 døgn. Ny fuktlikevekt innstilte seg da med vesentlig høyere vanninnhold i oljen (>10 ppm). Prøven av denne oljen kunne analyseres med tilfredsstillende nøyaktighet (app. A). Ved hjelp av kurver for fuktlikevekt mellom olje og papir som funksjon av temperatur, fant vi så vanninnholdet i papiret, og deretter oljens vanninnhold ved 20°C .

Prøveobjektene ble impregnert i en egen tank, som kunne koples til oljeprosesserings-anlegget.

Først ble de oppvarmet til 120°C og holdt under vakuum ($0,03$ torr) i 4 dager. De nedkjøltes så til 50°C hvorefter de, fremdeles under vakuum, ble oversvømmet med varm (50°C), rensset og tørket olje. Deretter slapp vi på atmosfæretrykk, og de fikk stå i 1 døgn [ref. 12].

De impregnerte objektene ble så overført til den tomme prøvecellen, etter at elektrodeavstandene er justert. Her ble de liggende under vakuum i 1 døgn, for å fjerne luftbobler, før de igjen ble oversvømmet med olje. Videre manøvrering, inn og ut av elektrodefester, ble foretatt med stenger under oljeoverflaten slik at de ikke ble eksponert mot luft.

3.2.4 Instrumentering

Spenningen ble målt kapasitivt før dempemotstanden (R_1 fig.12) og registrert med skriver. Spenningen over prøveobjektet ble også overvåket med en transientrecorder, som var koplet til en kapasitiv spenningsdeler der gjennomføringen utgjorde høyspentdelen. Vi ble slik istand til å studere hvor på spenningen gjennomslaget kom.

Utladningene i prøveobjektet ble detektert ved hjelp av en Kreuger målebro. Deres størrelse ble registrert med skriver. Utladningene

ble også, sammen med spenningen, vist på et oscilloskop slik at deres faseleie kunne kontrolleres.

Det ble brukt videoutstyr til å overvåke prøveobjektet visuelt under spenningspåtrykk. Dette utstyret hadde for liten tidsoppløsning til å gi opplysninger om selve gjennomslagsforløpet, men en har kunnet observere partikkelbevegelser før gjennomslaget i en del tilfeller.

3.3 PRØVEPROSEDYRE OG PRØVEFORHOLD

Som prøvespenning ble det brukt en trinnvis økende vekselspenning. Det ble kjørt med 10 objekter i hver serie. Seriene ble kjørt med ulike fukt- og partikkelinnhold i oljen. I analysen av prøveresultatene blir både Gauss og Weibullfordeling brukt.

3.3.1 Spenningspåkjenning

Objektene ble påkjent med trinnvis økende vekselspenning (50 Hz). Det ble brukt 25 kV's trinn av 1 min. varighet.

Dersom kortslutningsgapet tente før gjennomslag i prøveobjektet, ble det ved ny spenningspåkjenning kjørt direkte opp til 50 kV under siste nivå, og den trinnvise påkjenningen ble fortsatt inn-til gjennomslag. I de tilfeller der objektenes holdfasthet oversteg holdfastheten til kortslutningsgapet, ble dette fjernet fra prøvekreften.

3.3.2 Prøveserier; kjøring og registrering

Hver serie besto av 10 objekter, som ble lagret under olje i prøvecellen inntil de var kjørt. Straks etter hvert gjennomslag ble det ødelagte objektet fjernet, og et nytt montert. Oljen ble så

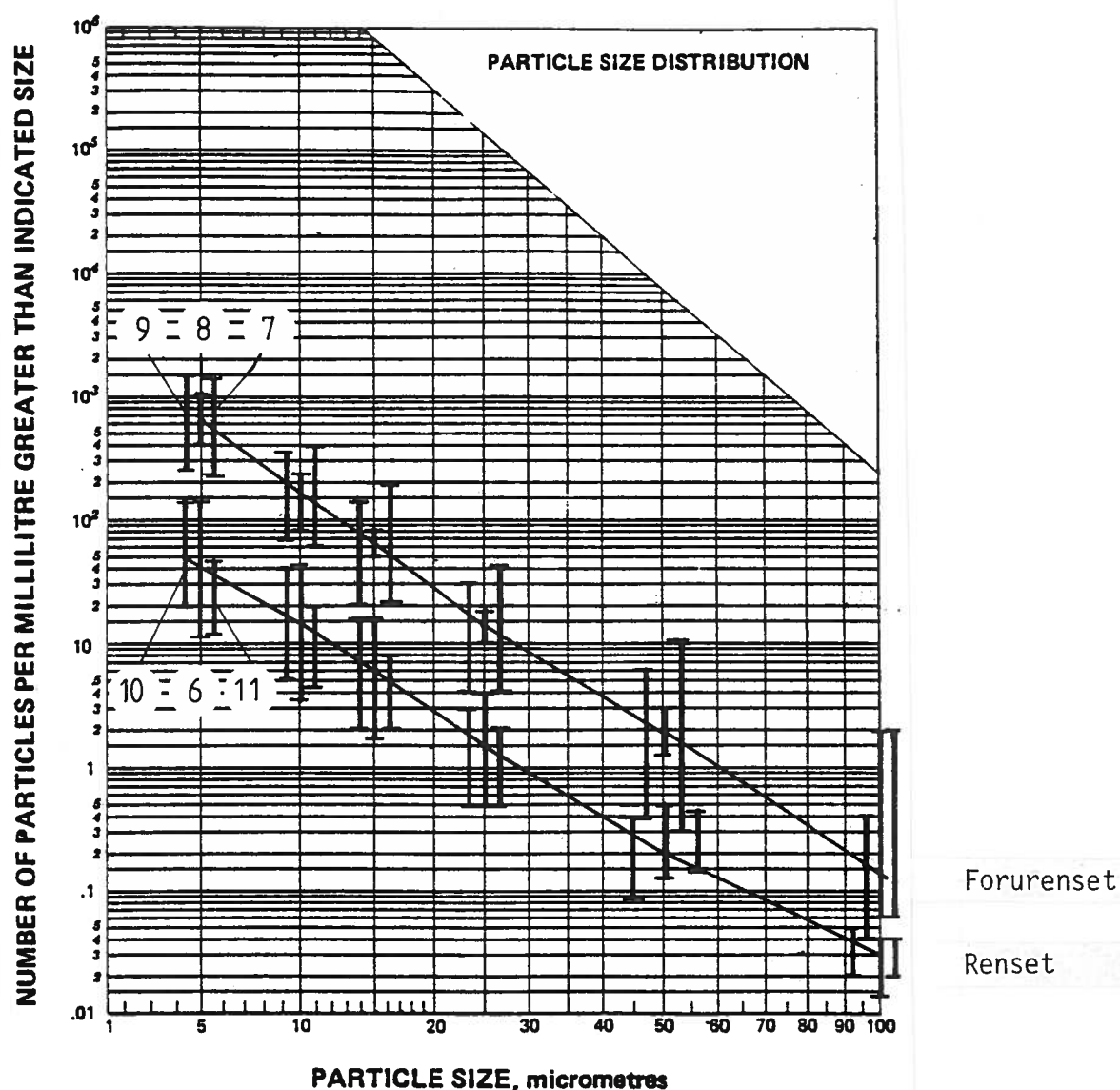
sirkulert fra 3 til 16 timer, for å filtrere bort partikler generert under gjennomslaget. Før hver ny kjøring ble det tatt partikkel- og holdfasthetsprøver av oljen. Tre ganger i løpet av hver prøveserie ble det tatt to fuktprøver. Registrering fra serier og enkeltobjekt finnes i appendix E.

3.3.3 Oljeforhold

Til forsøkene ble det benyttet en naftensk olje, Nynäs 10X (app. F). Det ble kjørt med ulike fukt- og partikkelinnhold i oljen. Vår referanse var maksimalt rensset og tørket olje (ca 50 part>5µm pr ml og 0,6 ppm).

Partikkelinnholdet pr ml i den rensede oljen er vist i fig. 14 (kumulativ fordeling). Vi antar at partiklene i hovedsak besto av cellulose fra presspanet i prøveobjektene. I noen serier har det vært iakttatt et bidrag av "større" metallpartikler. Mengden av partikler var avhengig av filtreringstidene. Figuren viser gjennomsnittet av tre serier (30 objekter) med den enkelte series minimale og maksimale verdi påført. Med maksimalverdi menes den målingen som totalt ga flest partikler. Dette er ikke nødvendigvis tilfelle for alle partikkelstørrelser, men vi har brukt hele fordelingen fra denne målingen. Minimalverdi forstås på samme måte.

I noen serier ble det kjørt med partikler tilsatt oljen. Det ble da brukt en cellulosesuspensjon; en blanding av malt presspan og cellulosepulver (Linterspulver) suspendert i olje. Denne ble tilsatt oljen i en mengde som ga ønsket partikkelinnhold. Gjennomsnittlig ble innholdet økt med 10 ganger i forhold til i rensset tilstand. Figur 14 viser også målinger fra 3 slike serier, som forklart ovenfor. Når partikler var tilsatt, måtte filtre fjernes, og vi sirkulerte oljen for å fordele rester fra gjennomslaget over hele oljevolumet.



Figur 14 Partikkelinnhold; gjennomsnitt for 3 rensede og 3 forurensede serier

Vanninnholdet ble i noen av prøveseriene holdt så lavt som mulig. Med tørking i tørkeanlegget, og en siste uttrekking av vann med tørr presspan i objektene, kom vi ned i ca 0,6 ppm i oljen.

Under kjøring av andre serier ble vanninnholdet økt ca 10 ggr (6 ppm) i oljen. Ser en på den vannmengde som krevdes for å øke vanninnholdet i oljen under tilstedeværelse av objektene, vil

nesten alt vannet bli opptatt av objektene, som er hydrokopiske, dersom vi skulle ha likevekt. Vi tilsatte en målt vannmengde til impregneringstanken som inneholdt de tørkede objektene under vakuum. Etter at dette vannet var trukket inn i objektene, ble de impregnert. Deretter ble objektene overført til prøvecellen, som etter en kort evakuering ble fylt med tørr olje. Oljen ble så sirkulert inntil fuktlikevekt var etablert mellom olje og presspan.

3.3.4 *Prøveresultatenes statistiske behandling*

Til den statistiske behandling av prøveresultatene (gjennomslagsverdier) ble både Gauss- og Weibullfordeling brukt. De overslag som er tatt med i den statistiske behandlingen er gitt uten parentes i app. E. I noen av prøvene som ble avbrudt (feiltenning i kortsluttgapet) kom gjennomslaget under andre gangs oppkjøring ved en lavere spenning enn det de første gang hadde holdt. De ble da i statistikken gitt den høyeste verdi de hadde holdt. Virkelig gjennomslagsverdi er anført i parentes. Dersom objektet holdt maksimal prøvespenning ble denne brukt som gjennomslagsverdi i statistikken. Dette er markert med > i resultatlistene.

For å undersøke om forskjeller i resultatene fra serie til serie var signifikante, benyttet en Student's t-test på gruppenes middelerverdier. Når en gjør dette forutsetter en egentlig at resultatene er Gaussfordelte. Selv om dette ikke er tilfelle, er metoden en akseptabel signifikans-test for de fleste praktiske prøvetakinger. En definerer her et signifikans-nivå på under 0,1% som signifikant, videre mellom 1% og 5% som muligens signifikant og til slutt over 5% som ikke signifikant.

Studier av gjennomslagsverdier for forsøksserier med fast og flytende isolasjon har vist at disse ofte kan tilpasses en eller annen ekstremalverdifordeling. For praktiske forhold er det jo også de lave feilsannsynlighetene som kan være dimensjonerende.

Weibull-fordelingen er en type ekstremalverdifordeling som er mye anvendt i isolasjonsteknikken. Den kjennetegnes bl.a. ved at den har en nedre grense for gjennomslagsspenningen, under hvilken feilsannsynligheten er null. Den kumulative fordeling er gitt som:

$$P(U) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{U - U_a}{U_o} \right)^b \right\}$$

der: U_o = 63,2% verdi

U_a = nedre grense for gjennomslag

b = formparameter

I de fleste praktiske tilfeller, og i denne rapporten, settes $U_a = 0$, da denne parameteren er meget vanskelig å bestemme.

EFI disponerer et regnemaskinprogram som fastlegger parametrene i fordelingen, deres konfidensintervall og fordelings toleranse-grenser.

3.4 RESULTATER MED STATISK BEHANDLING - SAMMENSTILLING

3.4.1 Prøveserier, kommentarer og resultater

Det ble kjørt 9 prøveserier (3-11; i kronologisk orden) med ulike kombinasjoner av objekttyper, fukt og partikkelinnhold. Seriene 1 og 2 var rene innledende serier, kjørt for å kontrollere om elektrodene tilbøyning ga kantfenomener (feltforsterkning), hvilket holdfasthetsområde objektene hadde og prøvekretsens funksjon. Den enkelte serie ble tilpasset Weibull-fordeling, middelvei og standard avvik ble også regnet ut. Tabell 6 viser resultatene for de enkelte serier, ordnet etter objekttype. Oljens holdfasthet (U_{VDE}) fra seriene er også tatt med. Oljeforholdene er beskrevet i 2.3.3.

OBJEKT			OLJETILSTAND		GJENNOMSLAG				
Type	Serie nr.	Ant.	Type	U _{VDE} [kV]	Middelverdi [kV] U kV	WEIBULL PARAMETERE			
						U ₀ [kV]	U ₀ 95% konf. [kV]	U ₀ 99% konf. [kV]	B
APEN	4	9	Tørr&ren *	48±6	329±11%	344	317-374	306-389	10,50
"	11	10	"	48±5	395± 9%	409	389-430	381-440	16,79
"	9	10	+fukt+part	47±6	388± 8%	400	383-417	376-425	19,9
BAKPLATE	3	8	Tørr&ren *	-	292± 8%	303	285-322	277-332	16,6
"	10	10	"	49±5	340±16%	361	327-399	313-418	8,12
"	5	8	Ren+fukt	48±5	334±10%	349	320-383	307-400	10,39
"	7	10	+fukt+part	45±4	292±14%	310	283-339	272-353	9,15
KLYPE	6	10	Tørr&ren	47±6	326±12%	340	319-364	309-376	12,21
"	8	10	+fukt+part	46±4	279± 5%	286	275-298	270-303	20,0

Tabell 6 Resultater fra de enkelte prøveserier

Enkeltresultatene fra seriene 3-11 finnes i app. E. Nedenfor er de enkelte serier opplistet og spesielle forhold er kommentert.

Serie 3: Bakplateobjekt; pressspan tørket og renset olje

Holdfasthetsprøver i oljen med 2 mm gap ga ikke gjennomslag ved 65 kV prøvespenning. 3 av 8 objekter slo ved bøydel del av elektrodene. To objekter slo langt ute på denne og taes ikke med i den statistiske behandling av seriene. Det ble observert mange metallpartikler i oljen. Disse stammer trolig fra maskineringen av prøvecellen.

Serie 4: Åpent objekt; tørket og renset olje

Objektene 11-16 holdt ved første oppkjøring til 325 kV, som var kortslutningsgapets øvre grense. De ble tatt ut av prøvecellen og oppbevart under vakuum, før de ble reimpregnert og kjørt på nytt. Et objekt slo utenfor elektrodegapet og ble ekskludert av statistikken. 5 av 8 objekter slo ved bøydel del av elektrodene. Det ble observert mange metallpartikler i oljen.

Serie 5: Bakplateobjekt; pressspan, renset olje tilsatt vann

Vann ble tilsatt etter at objektene var impregnert. På noen objekter ble det observert svelling i pressspan-platene, trolig forårsaket av vanddrypp i impregneringstanken. To objekter ble ekskludert da videoopptak viste "spesielle" overslag og holdfastheten var lav. Kortslutningsgapets holdfasthet var 325 kV. 3 av 8 objekter slo ved elektrodene bøyde del.

Serie 6: Klypeobjekt; pressspan, tørket og renset olje

Kortslutningsgapets øvre grense var 325 kV. 8 av 10 objekter slo utvendig på ytre klype.

Serie 7: Bakplateobjekt; pressspan, olje tilsatt vann og partikler

Oljefilteret ble fjernet fra sirkuleringssystemet. Kortslutningsgapet virket opp til 325 kV. 4 av 10 objekter slo ved bøyd del av elektrodene.

Serie 8: Klypeobjekt; pressspan, olje tilsatt vann og partikler

Oljen ble renset og tørket, før ny tilsetning. Sirkuleringskrets ble brukt uten oljefilter. Kortslutningsgapet virket opp til 325 kV. 9 av 10 objekter slo utvendig langs ytre støtte.

Serie 9: Åpent objekt, olje tilsatt fukt og partikler

Kortslutningsgapets øvre grense er utvidet til 375 kV. Oljen ble tørket og renset før ny tilsetning, deretter ble filteret fjernet under videre sirkulering. 4 av 7 objekter slo ved bøyd del av elektrode, 3 objekter holdt 425 kV. Utladningsmålinger "druknet" i støy.

Serie 10 bakplateobjekt; pressspan, tørket og renset olje

Kortslutningsgap virket til 375 kV. 4 av 9 objekter slo ved bøyd

del av elektrode og ett holdt 425 kV. Støy på utladningsmålingene.

Serie 11 åpent objekt, tørket og rensset olje

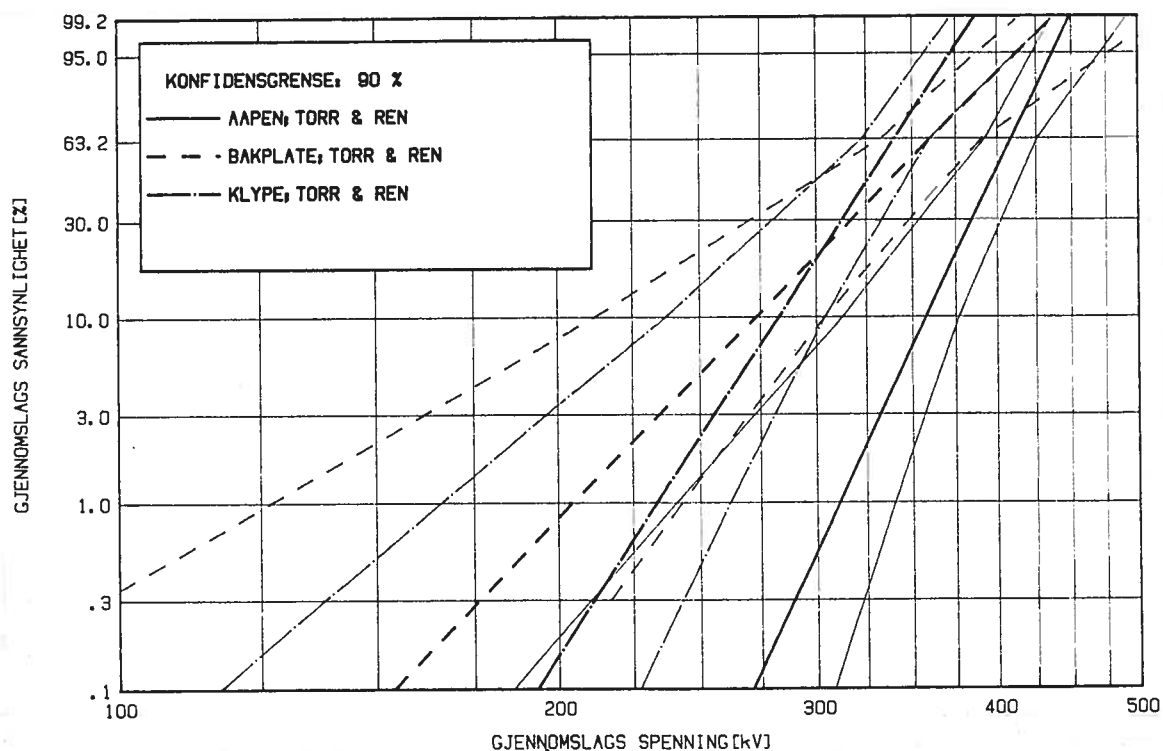
Kortslutningsgapet ble fjernet for å kunne nå opp til maksimal prøve-spennning. Oljen ble filtrert 16 timer mellom hver overslag. 3 av 8 objekt slo ved bøydel del av elektrodene. 2 stykker holdt 425 kV. Støy på utladningsmålingene.

3.4.2 Parametrene innvirkning på holdfastheten

3.4.2.1 Virkningen av pressspan i oljegang med tørr og ren olje

Som kommentert ble det observert metallpartikler i oljen i serie 3 og 4, og holdfastheten for disse var mye lavere enn for seriene 10 og 11 som var bedre rensset, men som ellers skulle være likeverdige. Vi tar derfor ikke hensyn til serie 3 og 4 i den videre analyse.

Weibullplot (fig. 15) viser seriene 11; åpent objekt, 10; bakplateobjekt og 6; klypeobjekt kjørt i tørket og rensset olje. U_0 har ved innføringen av fast isolasjon i gapet falt med henholdsvis 11,7% for bakplateobjektet og 16,8% for klypeobjektet i forhold til det åpne objektet.



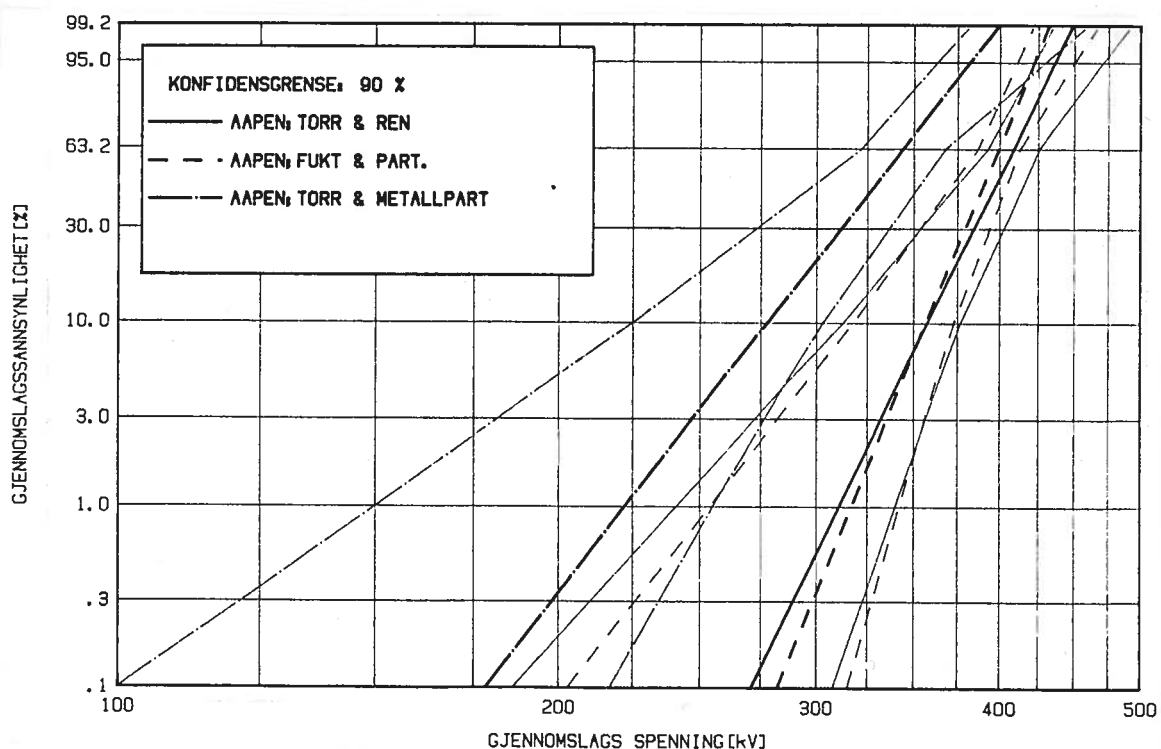
Figur 15 Weibullfordeling av holdfasthet for ulike prøveobjekt - konfigurasjoner i tørket og rensset olje

En ser av 90% konfidensgrensene at reduksjonen er klarest for klypeobjektet. Tabell 6 viser at en ved 99% konfidens ikke har overlapp i konfidensintervallene for U_0 for åpent - og klypeobjekt. En Student's t-test utført på middelerverdiene viser at holdfasthetsreduksjonen ved innføring av bakplate er "muligens signifikant", mens ved innføring av klype er den "meget signifikant".

Da seriene med klypeobjekt har mindre spredning enn seriene med bakplateobjekt, får denne større holdfasthet ved de lavere feilsannsynligheter. Overlapp i konfidensintervall med åpent objekt er derfor også større ved de lave feilsannsynlighetene.

3.4.2.2 Innvirkningen av partikler og fukt på de enkelte objekttypers holdfasthet

Tilsetningen av partikler og vann ga liten innflytelse på holdfastheten for det åpne objektet. U_0 ble redusert med bare 2% fra serie 11 til serie 9, mens spredningen derimot ble mindre (fig. 16). Serie nr. 4, med observerte metallpartikler, hadde markert lavere holdfasthet enn under rene og tørre forhold (16%).

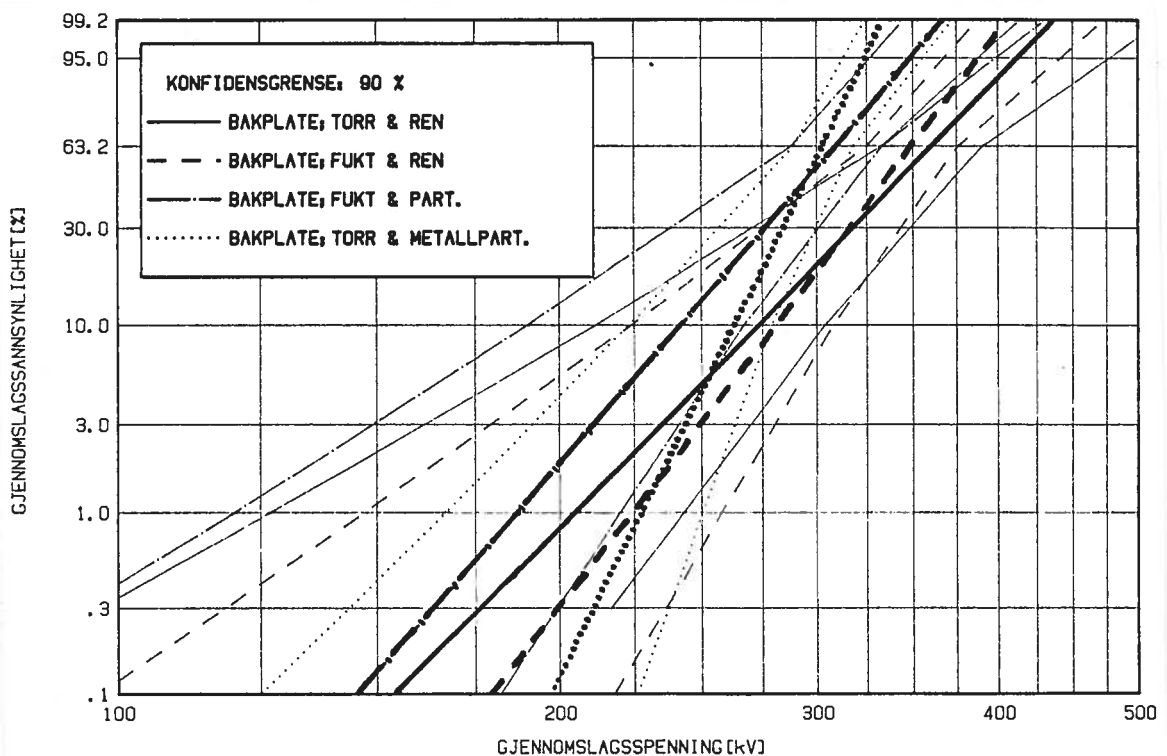


Figur 16 Weibullfordeling av holdfastheten for åpent objekt i ulike oljetilstander

Det er kjørt 4 serier med bakplateobjektet under ulike oljeforhold; nr. 3, 5, 7 og 10.

Weibullplot av disse sees i figur 17. Vi regner serien kjørt i tørr og ren olje som referanse og ser at tilsetning av vann alene ga en reduksjon i holdfastheten (U_0) på bare 3%. Når både vann og partikler ble tilsatt oljen, ga dette en reduksjon av U_0 på 14%. Student's t-test på middelverdiene viser at denne reduksjonen ligger på grensen til å være "muligens signifikant". Spredningen i holdfasthet ble også mindre.

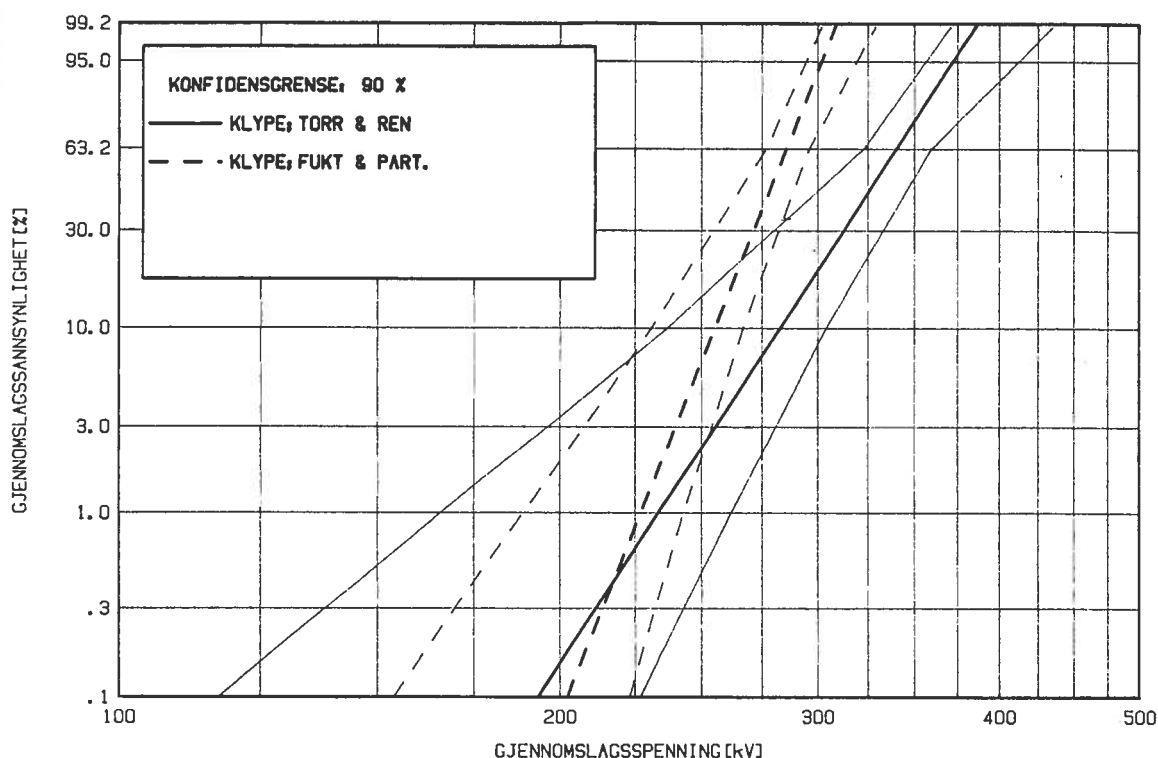
Serien med rensset og tørket olje der en tydelig så metallpartikler hadde 16% laver U_0 enn referansen.



Figur 17 Weibull-plot av holdfastheten for bakplateobjekt kjørt i ulike oljekvaliteter.

Med klypeobjekt er det kjørt to serier; nr. 6 og 8.

Weibull-plot av disse vises i figur 18. Holdfastheten (U_0) sank ved tilsetning av vann og partikler med 16% i forhold til hva den var med tørket og rensset olje. Fallet i middelvei er ifølge Student's t-test "signifikant". Også for denne objekttypen ble spredningen redusert ved tilsats av fukt og partikler. Ved de lave feilsannsynlighetene overlapper 90% konfidensintervallene for de to seriene hverandre.

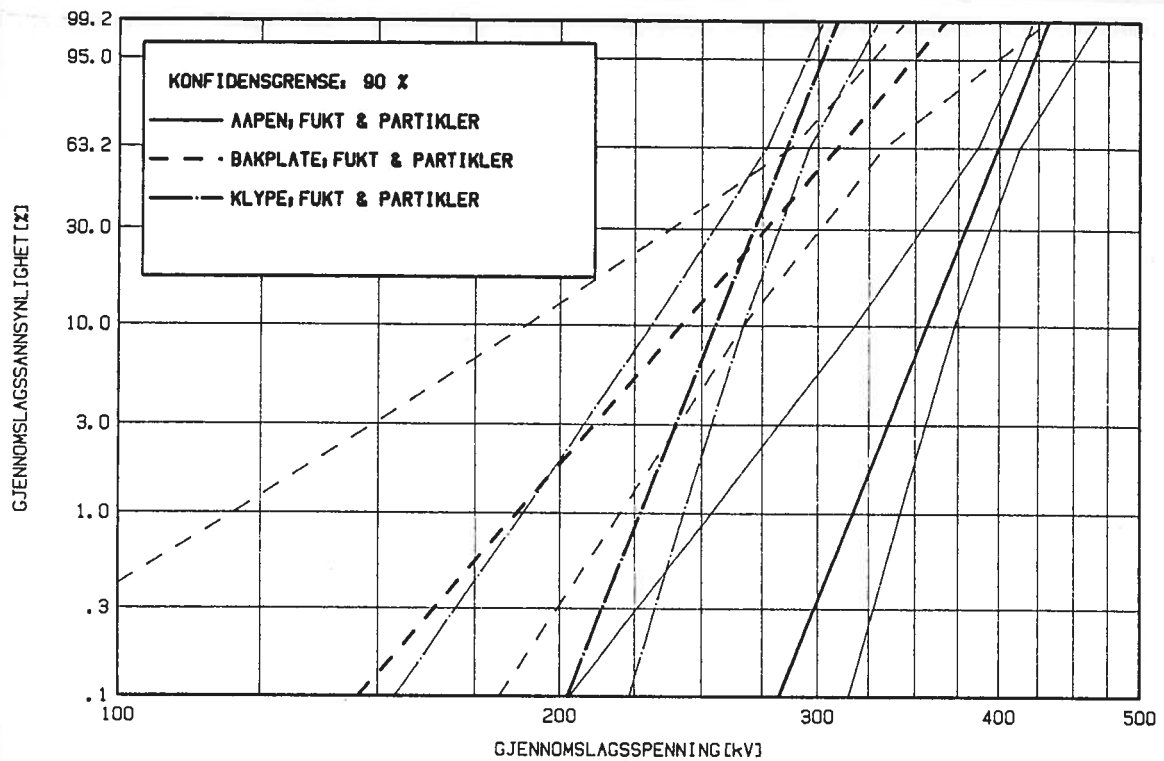


Figur 18 Weibull-plot av holdfastheten for klypeobjektet kjørt i ulike oljetilstander

3.4.2.3 Virkningen av pressspan i oljegang med fukt og partikler tilsatt

Det er kjørt 3 serier med ulike objekter i olje tilsatt vann og cellulosepartikler: Serie 9; åpent objekt, serie 7; bakplateobjekt og serie 8; klypeobjekt. Figur 19 viser Weibull-plottene av disse holdfastheter. Som en ser på reduksjonen i holdfasthet (U_0)

for objekter med langsfeltstyrker langs presspan overflater i forhold til holdfastheten for rent oljegang, er denne økt med fukt og partikler tilsatt oljen. Den er henholdsvis 22% og 28% for bakplate- og klypeobjekt.



Figur 19 Weibull-fordeling av holdfasthet for ulike prøveobjekt i olje tilsatt fukt og partikler

Ved 63% feilsannsynlighet ($p(U_0)$) vil det nå ikke være noen overlapp i 99% konfidensintervall for holdfastheten (U_0) mellom åpent objekt og de to andre typene. En Student's t-test på middelerverdiene av holdfastheten sier at reduksjonen nå er "meget signifikant" i begge tilfellene.

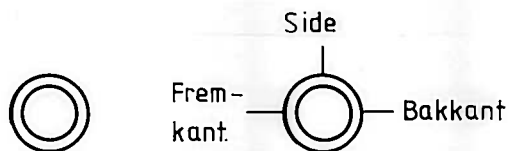
Reduksjonen trer nå også klart frem ved de lave feilsannsynlighetene. Bakplateobjektene har fremdeles mindre holdfasthet enn klypeobjektene ved disse lave feilsannsynlighetene.

3.4.3 Overslagenes lokalisering på objektene

Elektrodene var bøyd til for å unngå store feltforsterkninger ved enden av parallelldelen. Ser en på samtlige objekter av bakplate og åpen type, har 56% av gjennomslagene sin lokalisering på den rette del av elektrodene. De øvrige er i hovedsak plassert nær bøyens begynnelse, og noen få har et av fotpunktene langt ute på den bøyde delen.

Papirbespinningen var som oftest etter et gjennomslag revet opp over så store områder at det var umulig å se hvor på elektrodens omkrets gjennomslaget hadde startet. På noen objekter lot dette seg imidlertid bestemme.

For de åpne objektene i serie 9 og serie 11 var 7 av 15 gjennomslag nær eller på bøyd del av elektrodene. 5 av totalt 15x2 fotpunkter for gjennomslag ble funnet i elektrodens framkant, 2 i bakkant og 3 på siden (figur 20). Resten lot seg ikke bestemme.



Figur 20 Plassering av fotpunkt for gjennomslag

For bakplateobjektene i serie 7 og serie 10 var 8 av 19 gjennomslag nær eller på bøyd del av elektrodene. For 3 av disse 19 gjennomslagene lot det seg ikke observere noe krypespor. De andre hadde krypespor. For noen var dette tilfelle bare for deler av overslagsstrekningen. Av de 19 overslagenes 38 fotpunkter lot 6 stykker seg lokalisere til bakside og side av elektrodene. Ett av disse i en papirbrett etter tilbøyingen. De øvrige var plassert i framkant av elektroden eller ned mot presspanplaten.

For klypeobjektene har gjennomslagene i 19 av 20 objekter funnet

sted ved en av klypene, herav 17 utvendig langs ytre støtte.

3.4.4 *Overslagenes plassering på spenningskurven*

Spenningsforløpet ble registrert ved noen gjennomslag. Det ble brukt en transientrecorder til disse målingene. De ble gjort for å undersøke hvor på spenningskurven gjennomslagene kom. Det ble foretatt ialt 11 registreringer fra serie 7, 8 og 9. 6 gjennomslag skjedde ved spennings positive topp og 5 ved negativ topp. Gjennomslagene skjedde innenfor et intervall fra 1,8 ms før til 1,3 ms etter toppen.

3.4.5 *Partielle utladninger*

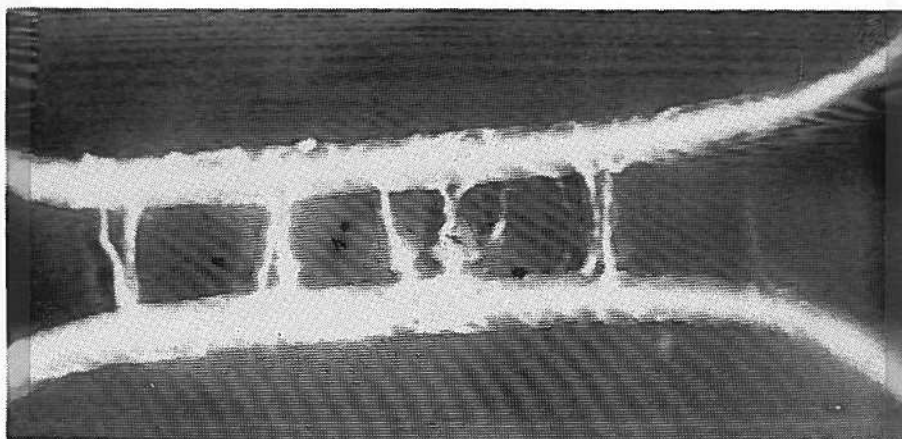
Vi har ikke funnet noen generell sammenheng mellom holdfasthet og utladningenes startnivå og størrelse. I noen objekter der vi hadde lokal fuktansamling (serie 5) eller store partikler, har vi registrert store utladninger rett før gjennomslag fant sted (3.4.6). Holdfastheten har da gjerne vært lav (se obj. 3.7, 5.1, 5.3, 5.5 og 5.9 i appendiks 5).

3.4.6 *Enkeltobservasjoner av gjennomslag m/video*

En videorecorder ble benyttet til registrering av gjennomslagene. På grunn av problemer med utstyret ble registreringene uregelmessige. De observasjonene som ble gjort må derfor betraktes som enkelttilfeller.

Ved noen gjennomslag bredte det seg lysende utladninger ut langs en av elektrodene. Disse bredte seg ut fra fotpunktet på lysbuen som sto over elektrodegapet. Vi antar at gjennomslaget startet på den andre elektroden, og at papirbespinnningen ennå ikke er punktert på den elektroden utladningene brer seg ut over.

Ved objekt 5.1, bakplateobjekt; fuktet olje, skjedde det først et overslag i oljegapet, dette slukket så, deretter tente flere kanaler i oljegapet (fig. 21).



Figur 21 Begynnende overslag i objekt 5.1

Begge elektrodeoverflatene ble omspent av "løpegnisten". Ca 100 ms senere lyste en av disse kanalene kraftig opp, og endelig gjennomslag var et faktum. Objektet slo ved svært lav spenning; 150 kV og ble tatt helt ut av den statistiske behandling. Vi tror dette fenomenet har sammenheng med fukttilsetningen. For denne serien skjedde den etter at objektene var impregnert med olje. Dette kan ha forårsaket lokale fuktansamlinger.

Objekt 5.5 fra samme prøveserie hadde også et spesielt utseende gjennomslag ved 150 kV. Gjennomslaget startet helt ute på elektrodens bøyde del. Videoopptaket viste en kraftig strøm av olje og gassbobler ut fra dette stedet mot den andre elektroden, samtidig økte utladningsnivået sterkt (> 10000 pC). Etter kort tid (~ 1 sek) kom overslaget i denne kanalen. Inspeksjon av prøveobjektet viste rustflekker på elektroden ute på bøyen, og pressspan-

platen var svellet grunnet vanddrypp under fukteprosessen. Objektet ble ekskludert fra statistikken.

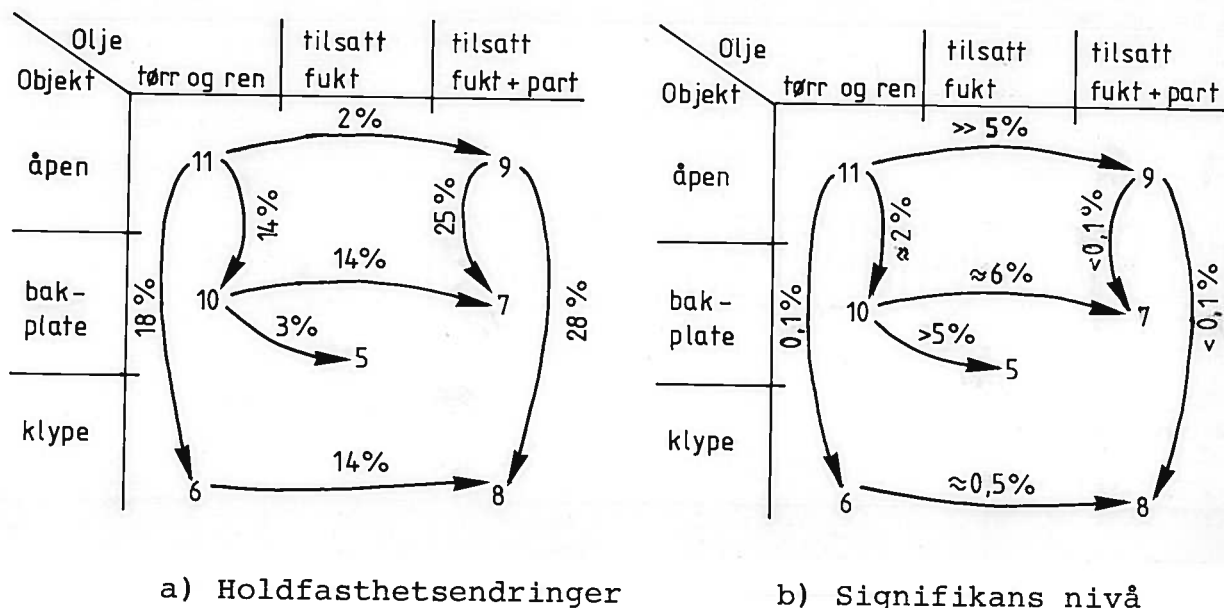
Objekt 7.4; bakplateobjekt tilsatt fukt og partikler, slo ved 280 kV; altså ikke spesielt lavt. Før gjennomslag såes en stor partikkel på baksiden av HV-elektroden, der feltstyrken også på grunn av skjermburet er lav. Den reflekterte lyset diffust (cellulose fiber?) og beveget seg sakte inn mot elektroden og ut igjen flere ganger. Mens den befant seg ca 1,5 cm ut fra bespinningsen tente overslaget, med det ene fotpunkt i treffstedet for partikkelen.

3.5 DISKUSJON AV RESULTATER I HOVEDFORSØK

Den holdfasthet våre objekter hadde var høy i forhold til den forventede. Et regnemaskinprogram hos NI angir holdfastheten (U_0 i Weibull-fordelt overslagssannsynlighet) for 10 cm lange parallelle sylindre, ellers lik våre åpne objekter, til å være 279 kV. Våre åpne objekter oppnådde holdfastheter på 400 kV og 409 kV i henholdsvis rensset og forurenset olje. Dette kan skyldes at i den beregnede holdfastheten tar en utgangspunkt i volumkriteriet som er etablert ut ifra holdfastheten mellom blanke elektroder. Papirbespinningsen vil muligens hindre ladningsinjeksjon i oljen og opplading av partikler ved elektrodene, og derfor heve holdfastheten.

Underkaster vi middelerverdiene av holdfastheten for de forskjellige seriene en Student t-test, får vi et begrep om størrelsen og signifikansen i de reduksjoner vi får ved innføring av fukt, cellulosepartikler og presspan i oljegapet (fig. 22).

Holdfasthetsreduksjonene i forhold til åpent objekt forsterkes ved tilførsel av fukt og partikler. Reduksjonen blir også mer signifikant. Figur 22a viser med piler hvilke endringer i midlere holdfasthet de ulike parameterendringene forårsaket, og fig. 22b viser signifikansen i disse endringene (se 3.3.4).



Figur 22 Endringer i holdfasthet fra serie til serie

Numrene på prøveseriene er kronologiske, og man ser ingen tendens til at oljekvaliteten skal ha blitt forringet over tid. Den sist kjørte serien har høyest holdfasthet. Ved tilsetning av fukt og partikler falt oljens midlere holdfasthet i VDE-gapet fra 48 kV til 46 kV, som er "meget signifikant". Samtlige prøver fra hver av de gjeldende seriene er da slått sammen og gir oss 400 prøver i hver av oljekvalitetene. Tilsettes bare fukt, gir dette ingen reduksjon i oljens midlere holdfasthet. Innenfor de enkelte serier hadde oljens holdfasthet en svakt fallende tendens. (Appendiks D). Denne var likevel usikker. Det ble ikke funnet noen korrelasjon mellom objektenes holdfasthet og oljens holdfasthet innenfor de enkelte prøveserier.

Betrakter vi Weibullfordelingene for våre ulike serier, trer forskjellene mellom disse frem med relativt smale konfidensgrenser ved de høye gjennomslagssannsynlighetene. At konfidensgrensene er så vide når vi ekstrapolerer til lave feilsannsynligheter har delvis sin årsak i det lille antall prøver i hver enkelt serie, og delvis i usikkerheten i beregningen av stigningen (b). (Ref. 13). Vi vil siden, i omtale av de Weibull-fordelte resultatene, benytte betegnelsen tydelig som tegn på at det ikke er overlapp i (90%) konfidensintervallene. Dette er nok en unøyaktig statistisk betegnelse, men

den gir likevel et begrep om kvaliteten i ulikheten (ref. 13).

Betrakter vi den reduserte holdfasthet for de to objekttypene med langsgradient i rensed olje (fig. 15), er denne tydelig helt ned til 10% feilsannsynlighet. Når vi så tilsetter fukt og partikler (fig. 19), blir reduksjonen tydelig helt ned til 1% gjennomslags-sannsynlighet. Ved 63,2% gjennomslagssannsynlighet er reduksjonene nå tydelige også når vi ser på 99,0% konfidens.

Denne økte reduksjonen fant vi ikke for bakplateobjektene når det bare var fuktinnholdet som ble økt (serie 5). Det er derfor trolig at den forsterkede reduksjonen i holdfasthet vi får ved tilsetting av vann og partikler til bakplateobjektet, har sin årsak i tilstedeværelsen av fuktige cellulosepartikler. Dette understøttes av observasjoner av gjennomslagsstedene. De hadde ikke alltid sine fotpunkter i oljekilen mot pressspanplaten, slik de ville hatt om det var feltforsterkning på grunn av permittivitets-mistilpassning som var den avgjørende parameter. Av og til fant man fotpunktene på siden og baksiden av elektrodene. En gang (objekt 7.4) så man at gjennomslaget var nær forbundet med en partikkelbevegelse. *Likevel må også bakplaten ha en betydning, da ingen nevneverdig reduksjon i holdfastheten for de åpne objektene ble iaktatt ved tilsetting av fukt og partikler.* Det er tenkelig at partikkel- og elektrohydrodynamiske bevegelser blir sperret av bakplaten. Partikler kan da samles mot denne og muligens fikseres til overflaten i permanente broer.

Klypeobjektene hadde i begge typer olje mindre spredning enn bakplateobjektene, overslagsstedene var også klarere definert; mot utsiden av ytre støtte. Denne typen objekter ble ikke kjørt med økt fuktinnhold alene, så det er uklart om det er vann, partikler eller kombinasjonen som ga holdfasthetsreduksjonen.

En kan her tenke seg at feltforsterkningen grunnet ulike permittiviteter i olje og pressspan kan være initierende for overslaget. Selv om vi betrakter elektrodene som parallelle, er det en svak krumning i dem etter tilbøyingen. Ved innsetting av klyper vil derfor de

ytterste klypene få dårligere kontakt mot elektrodene enn den midt-erste, og det påkjente oljevolum vil muligens bli tilstrekkelig stort til at overslag kan initieres (volum kriteriet, ref. 14). Tilsettingen av fukt vil øke presspanets permittivitet, og slik øke feltforsterkningen i kilen. Dette kan imidlertid ikke forklare hvorfor overslagene skjedde langs utsiden av støttene.

Det ser altså ut til at holdfasthetene for de åpne objektene er lite avhengig av oljekvaliteten innenfor de grensene vi har arbeidet. Oljens kvalitet er derimot viktig for hvor stor holdfasthetsreduksjonen blir når det er innført presspan parallelt med oljegapet. Hva dette skyldes er umulig å si med sikkerhet på dette tidspunkt, selv om jo spekulasjon er mulig. De overslagsmekanismene vi har tenkt på; feltforsterkning grunnet permittivitetsmistilpasning og partikler sammen med elektrohydrodynamisk bevegelse, kan fungere sammen og ulikt i bakplate- og klypeobjektene. For å kunne si mer om dette, må en søke å endre parametrene i objektene. En kan bruke fastisolasjon av samme permittivitet som oljen. En kan også utforme bakplateobjektet slik at dielektroforetiske krefter ikke kan trekke partikler inn i elektrodegapet. Dette kan gjøres ved å legge en plate på hver side av elektrodene. Feltforholdene skulle da forbli som før i bakplateobjektet.

Utladningenes tennspenning og størrelse viste ingen klar sammenheng med holdfastheten, annet enn for objekter med store defekter og lav holdfasthet. (5.1 og 5.5). Store utladninger tente da like før gjennomslag. Man kan tenke seg muligheten av å finne slike graverende feil på transformatorer v.hj.a. utladningstester. I våre undersøkelser finnes det intet som tyder på at en transformators holdfasthet kan forutsies ut i fra utladningsmålinger.

4. KONKLUSJON

De innledende forsøkene har vist at i et oljegang med bare elektrod-er og homogent felt vil en innsatt fastisolasjonsoverflate med permittivitet høyere enn oljens, senke holdfastheten. Med glass ($\epsilon=7,0$) falt holdfastheten med 79%, mens med polyetylen ($\epsilon=2,2$ som i oljen) var reduksjonen neglisjerbar. Med papirbespunnet leder over plan har en observert holdfastreduksjonen når fastisolasjonen blir innsatt i oljegang, men også det motsatte. Denne effekten tilskrives ukontrollerte parametre (oljetilstand) og prøveprosedyre og viser viktigheten av en nøye kontroll med disse.

De forsøkene som var rettet mot kabelavslutninger indikerer at et aksialt sylindrisk buttgap med sotpapir som elektroder har en holdfasthet som økte proporsjonalt med avstanden.

Hovedforsøkene viser at vi nå har et prøveutstyr og en prøveprose-dyre som virker tilfredsstillende med hensyn til parameterkontroll og reproduserbarhet i forsøkene.

Vi har funnet at i et renoljegang med parallelle papirbespunne led-ere vil endringer i oljetilstanden ikke ha noen signifikant innflyt-else på holdfastheten innenfor de grenser vi har operert. Vi har brukt olje av to kvaliteter m.h.t. renhet; 1:0,8 ppm vann og ca 50 partikler større enn $5\mu\text{m}$ pr ml og 2:6 ppm vann og ca 600 partikler større enn $5\mu\text{m}$ pr ml.

Innføringen av bakplate i oljegang senket under rene oljeforhold 63% gjennomslagsspenningen med ca 12%. Med forurenset olje (fukt og partikler) falt den 22%. Med bare vann tilført oljen var ikke holdfastheten forskjellig fra det vi fikk under helt rene forhold.

Innføringen av klype (støtte) i oljegang senket under rene oljeforhold 63% gjennomslagsspenningen med ca 17%, mens med fukt og partikler tilført oljen ble reduksjonen på 28%.

Innføringen av en tangentielt påkjent pressspanflate i et oljegang mellom papirbespunnede ledere senker holdfastheten. Denne effekten forsterkes av tilstedeværelsen av fuktige cellulosefibre. Disse fuktige cellulosefibre hadde ingen merkbar innflytelse på holdfastheten for det rene oljegapet.

Metallpartikler senket 63% gjennomslagsspenningen både for rent oljegang og oljegang med bakplate med 16%.

Resultatene bekrefter iakttakelsen som viser en holdfasthetsreduksjon ved innføring av pressspan i et oljegang. De viser at denne reduksjonen vil være avhengig av oljens kondisjon (fukt og partikkelinnhold) i sterkere grad enn i et rent oljegang.

Forsøkene har vist at et generelt dimensjoneringskriterium for et oljegang med fastisolasjon må inneholde parametre som angår oljetilstanden.

REFERANSER

- [1] Danielsen, H., Stanghelle, H.:
"Langsgradienter olje-/faststoffisolasjon: Litteraturstudium",
EFI-TR 2483, sept. 1979, Trondheim
- [2] Wechsler, K., Riccitello, M.:
"Electric breakdown of a parallel solid and liquid dielectric system",
AIEE Trans. Pow. App. vol PAS-80, part III, Aug 1961 pp 365-369
- [3] Standring, W.G., Hughes, R.C.:
"Breakdown under impulse voltages of solid and liquid dielectrics in combination",
Proc. Inst.Elec.Eng., vol 103A, 1956 pp 583-597
- [4] Inuishi, Y.:
"Effect of space charge and structure on breakdown of liquid and solid",
IEEE-Trans.El.Ins., vol EI-17, No 6, Dec. 1982 pp 488-492
- [5] Cherney, E.A., Cross, J.D.:
"Electrical breakdown at solid-liquid interfaces",
IEEE-Trans.El.Ins., Vol EI-12, no 3, juni 1977 pp 214-218
- [6] Cross, J.D.:
"Breakdown across a dielectric spacer in insulating oil and the role of electrohydrodynamics in liquid breakdown"
IEEE-Trans.El.Ins., vol EI-17, Nov., Dec., 1982 pp 493-498
- [7] Denegri, C.B., Liberty, G., Mölinari, G., Vivani, A.:
"Field-enhanced motion of impurity particles in fluid dielectrics under linear conditions",
IEEE Trans.El.Ins., vol EI-12, no 2, April 1982 pp 114-124

- [8] Roath, J.F., Rosado, M., Ivey, H.F.:
"Liquid and particle motions in transformer oil under 60 Hz stress"
IEEE Int. symp. on El.Ins. June 9-11, 1980, Boston pp 234-238

- [9] Kok, J.A.:
"Der elektrische Durchschlag in flüssigen Isolerstoffen",
Phillips Technische Bibliotek, Eindhoven, 1963

- [10] Danielsen, H., Stanghelle, H.:
"Langsgradienter i høyspenningisolasjon",
Nord-Is, rapport nr. 14, juni 1980, Røros

- [11] Danielsen, H., Lundgaard, L.:
"Overslag langs grenseflaten mellom fast og flytende isolasjon",
Nord-Is, rapport nr. 5, juni 1982, Odense

- [12] "Principles and guide to practice for vacuum impregnation of
cellulose materials prior to testing samples"
ERA 70-25, April 1970, Surrey

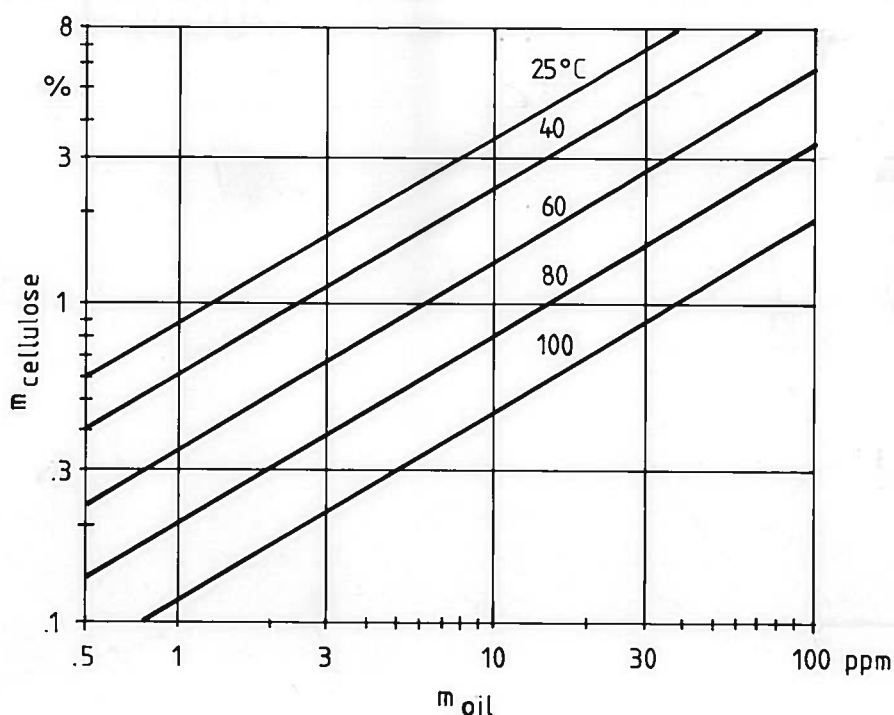
- [13] Stone, G.C., Lawless, J.F.:
"The application of Weibull statistics to insulation Aging
tests",
IEEE-Trans.El.Ins., Vol EI-14, no 5, Oct. 1979 pp 233-239

- [14] Rodal, S.:
"A statistical Approach to the Dielectric Breakdown Strength
of Papr-Oil Systems"
Licentiatavhandling, 1973, Inst. for Vekselstrømsteknikk, NTH.

APPENDIKS A

FUKTMÅLING

Til fuktmålingene av oljen ble det brukt en Aquatest (modifisert Carl Fisher) med nedre deteksjonsgrense på ca 1 ppm. De ble derfor gjort med ekstraksjon av fukt fra papir til olje ved oppvarming til 80°C under omrøring i lukket flaske, slik at oljens fuktinnhold i varm tilstand kan måles og gi papirfukten ut i fra likevektskurver. Likevektsskurvene gir en da fuktinnhold i henholdsvis papir og olje ved 20°C (figur 1).



Figur A1 Likevekt mellom vann i olje og cellulose med temperaturen som parameter (ASEA)

Til vår bakplateobjektserie ble det tilsatt 150 g vann. Fordelt på 6.62 kg papir/presspan og 720 kg olje ville dette gi 2,2% vann i cellulosen og 4,7 ppm i oljen, forutsatt at alt vann var fjernet på forhånd. Det ble med ekstraksjonsmåling, 2 målinger à 2 prøver,

målt henholdsvis 2,3% og 2,5% vann i cellulosen, som stemmer godt.

Den enkelte prøve inneholder 1,2 gram papir og 22,5 gram olje. Papiret er tynt for at det raskt skal innstille seg til likevekt. Siden det er en liten papirmengde i forhold til oljen, vil man få en senking av papirets fukt når oljen opptar fukt. I våre målinger vil denne feilen være på maksimalt 4%.

Det ble også i denne serien målt vanninnhold direkte i oljen (20°C). Dette ga et vanninnhold som tilsvarte henholdsvis 3,3% og 3,5%, altså noe høyere.

Ved en annen serie (5) der ekstraksjonsmåling ga 3% papirfukt ble denne kontrollert med utfrysingsmetoden som ga en oljefukt som tilsvarende 3,5% vann i papiret. Utfrysingsmetoden baserer seg på avdamping fra en oljeprøve mot vakuum. Vannet fanges i en frysefelle. Etter avsluttet avdamping fjernes frysefellen, og dette vannets damptrykk i et fast volum måles. Karl Fisher-metoden registrerer både fritt og bundet vann, mens frysemetoden bare registrerer fritt vann. Resultatet fra denne burde derfor være lavest. Dette er ikke tilfelle ved våre målinger, men vi ligger i hvert fall i samme område.

I en serie (6) der oljen ble tørket helt, ga ekstraksjonsmåling 0,7% i papir, og oljeprøver på 20°C ga 1,3 - 2%. Ved ekstraksjonsmåling måler en på olje med 60-70 ppm vanninnhold. En velger derfor å ikke stole på de målinger som er gjort nær prøveutstyrets nederste deteksjonsgrense.

En så ingen tendens til endring av fuktinnholdet i løpet av den enkelte serie.

APPENDIKS B

PARTIKKELMÅLINGER

Oljeprøvene til partikkeltellingene ble tatt fra prøvecellen i 150 ml glass. Disse ble så kjørt gjennom en Hiac Type PC 320 partikkelteller etter maksimalt en ukes henstand. Telleren registrerer antall partikler innen visse størrelser (tverrmål). Den er kalibrert etter 1504406.

For å kontrollere tellingen ble det tatt ti prøver på en gang fra prøvecellen. Fra disse prøveglassene ble det tatt en partikkeltelling på 20 ml umiddelbart og etter henholdsvis 4 og 8 dager (tabell B1).

	1 dag		4 dag		8 dag	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
> 5 μ m	631	25%	785	39%	866	40%
>10 μ m	199	29%	230	53%	263	43%
>15 μ m	90	18%	113	40%	119	41%
>25 μ m	20	15%	28	50%	27	52%
>50 μ m	4	47%	4	50%	4	50%
>100 μ m	1	50%	0	-	0	-

Tabell B1 Antall partikler pr 10 ml fra prøver etter varierende henstand

Tabellen viser at det er relativt stor unøyaktighet i tellingene, og at det over tid kan iaktas en vesentlig grad av flokkulering; små partikler klumper seg til større.

APPENDIKS C

DEMPMOTSTANDENS INNVIRKNING PÅ PRØVEKRETSEN

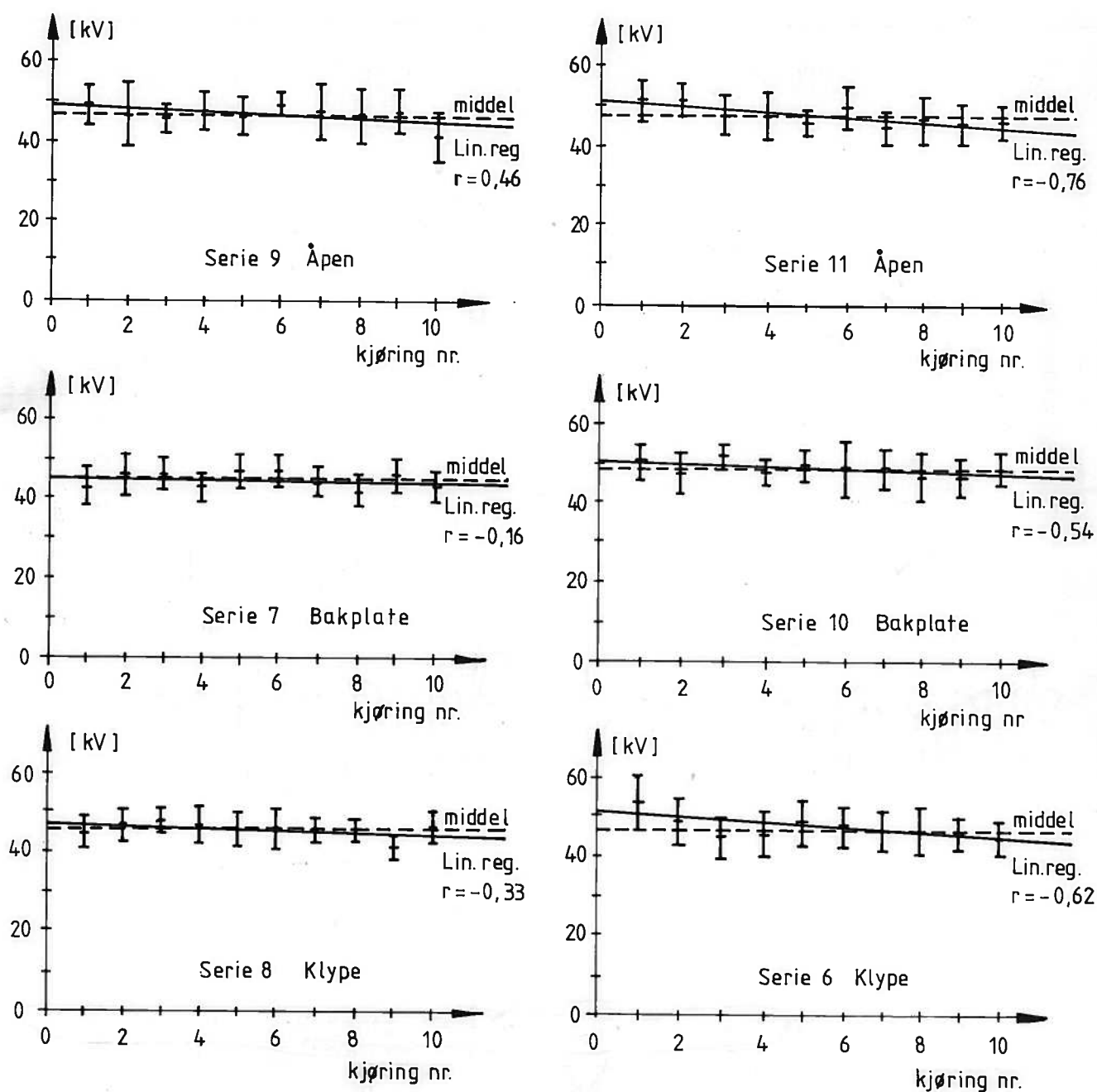
Det ble i serie 3 og 4 kjørt med 1500 k Ω dempemotstand. Vi registrerte spenning på kondensatoren og fant ved store utladninger (påhengt korona-initiator) ingen deformasjon av spenning. Det var heller ikke noe tegn til at holdfasthetene sank ved overgang til 200 k Ω 's motstand. Dempemotstanden har ingen innflytelse på holdfastheten i objektene.

En kunne tenkt seg at dempemotstanden ville hindret energitilgangen i et begynnende overslag slik at det slukket. Selve gjennomføringen (1000 pF) har trolig nok lagret energi til å fullende et påbegynt gjennomslag.

APPENDIX D

VDE-MÅLINGER - VURDERINGER AV OLJEKVALITET

Det ble kjørt 10-20 VDE gjennomslag i oljen før kjøring av de enkelte objekter. Innenfor de enkelte serier kunne en se en fallende tendens etter hvert som prøveserien skred frem (fig.D1).



Figur D1 VDE holdfastheter i de ulike serier

7922075

Det ble kjørt en lineær regresjon på VDE-holdfastheten imot prøveobjektene i kronologisk orden. Denne ga fallende holdfastheter med tiden. Som også anmerket i figuren viser korrelasjonskoeffesienten r liten korrelasjon ($-0,76$ - $-0,16$), men er i alle tilfellene fallende, r kan variere fra -1 til 1 , der -1 og 1 viser fullstendig korrelasjon og 0 ingen korrelasjon.

Holdfasthetene mellom de ulike seriene viser også variasjoner (tab. D1).

Serie	Fukt	Part.	Holdfasth.	Antall
4			48 ± 6	120
5	Ja		48 ± 5	200
6			47 ± 6	200
7	Ja	Ja	45 ± 4	200
8	Ja	Ja	46 ± 4	100
9	Ja	Ja	47 ± 6	100
10			49 ± 5	100
11			48 ± 5	100

Tabell D1 Oljens midlere holdfasthet i de enkelte prøveserier

For de seriene som var godt rensset og tørket er det ingen signifikans i forskjellen mellom de mest ekstreme seriene (6 og 10).

Slår en sammen målingene fra alle seriene med fukt og partikler og sammenligner med de tørre og rene, er holdfasthetsreduksjonen på 2 kV meget signifikant.

APPENDIKS E

ENKELTRESULTATER FRA PRØVESERIENE

Tabellene og kurvene viser resultatene fra de enkelte seriene.

Den virkelige kummulative holdfasthet er utregnet som

$$p[U_n] = \frac{\sum n}{N+1}$$

der n viser hvor mange objekter som har slått ved U_n og N er totalt antall i serien.

Holdfasthet brukt i statistikk angis uten parentes. Overslag ved lavere verdi enn tidligere oppnådd angis i parentes.

IK = ikke krypspor

e.p.t.= etter positiv topp

f.n.t.= for negativ topp

Oljen:

Tørket: ca 0,8 ppm vann

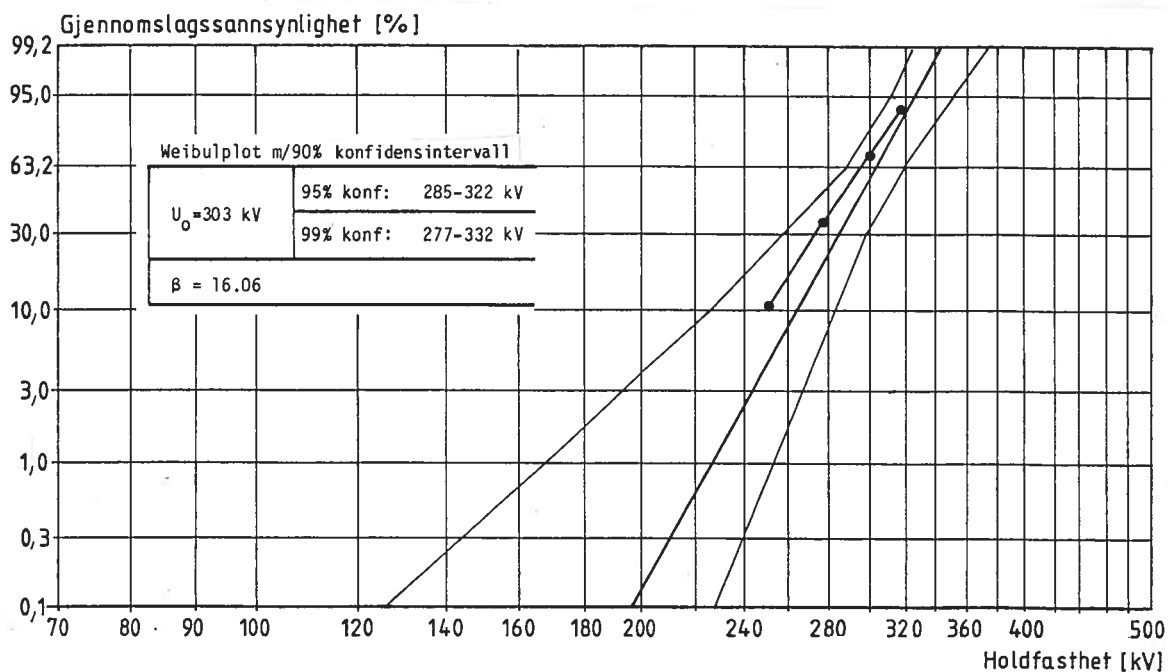
Fuktet: ca 6.0 ppm vann

Renset: ca 50 part > 5µm pr ml

Forurensset: ca 600 part > 5µm pr ml

Obj.nr.	Oljeprøver				Utladninger	Gjennomslagskarakteristika				Anm.
	Part.pr 100 ml		Holdfasth. 1,2mmVDE[kV]	Vanninnhold i papir [%]		Holdfasth.[kV]	Tid til gj.sl.[s]	Fase	Gj.sl.sted.	
	>5µm	> 50µm								
3.1	9.500	30	-	oljemåling	75kV-100 pC 275kV-250 pC	275	60		rett del	
3.2	8.700	40	-		50kV- 5 pC 250kV- 15 pC	250	60		rett del	
3.3	3.100	30	-	oljemåling 0,8	- " -	(225)	(30)		på bøy	
3.4	10.000	90	-			>320				
3.5	-	-	-		50kV-150 pC 225kV-250 pC	(225)	30		på bøy	
3.6	5.900	27	-		75kV-2500pC 300kV-500 pC	300	60		rett del	
3.7	1.600	10	-		250kV- 20 pC 70pC like før gj.slag	300	60		ved bøy	
3.8	-	-	-		0kV- 5 pC 300kV- 15 pC	>320	0			
3.9	-	-	-		0kV- 5 pC 250kV- 15 pC	275	30		rett del	
3.10			-		0kV- 5 pC 225kV- 15pC	300	30		rett del	
Gj.sn.	6.400 ±3.500	38 ±27	-			292±24				metallpart observert i oljen

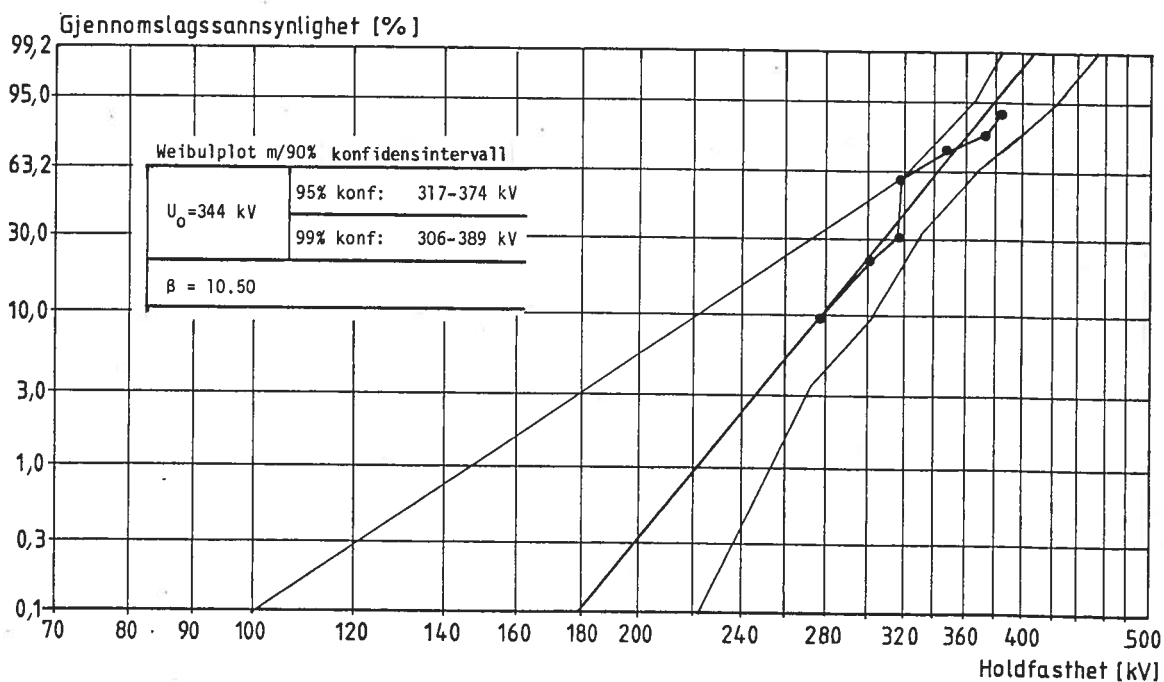
Tabell E1 Serie 3; Bakplateobjekt i tørket og renset olje
(metallpartikler). 1/12 - 9/12 1981



Figur E1 Virkelig og Weibulltilpasset kumulativ fordeling av
holdfastheten for serie 3

Obj.nr.	Part.pr 100 ml		Oljeprøver		Utladninger	Gjennomslagskarakteristika				Anm.
	>5µm	> 50µm	Holdfasth. 1,2mmVDE[kV]	Vanninnhold i papir [%]		Holdfasth.[kV]	Tid til gj.sl.[s]	Fase	Gj.sl.sted.	
4.7	5.100	20	-		75 kV-900 pC defekt i HV bur	(200)			Feste HV mot jord elektrode	
4.8	3.600	20	-		- " -	275	30		ved bøy	
4.9	1.000	0	-		- " -	315	42		rett del	
4.10	1.100	10			- " -	300	30		ved bøy	
4.11	-	-	42±4		124kV- 40 pC 321kV-140 pC	350	20		rett del	Har holdt 320kV lagt tilside og kjørt på ny
4.12	-	-	45±5		< 5 pC	375	56		ved bøy	- " -
4.13	-	-	45±10		< 5 pC	> 320 (200)			fra "BUR" til jord	- " -
4.14	-	-	50±5		< 5 pC	> 320 (175)	(33)		ved bøy	- " -
4.15	-	-	54±4		< 5 pC	> 320 (300)	(37)		ved bøy	- " -
4.16	-	-	52±6		375kV- 70 pC sporadisk	385			rett del	- " -
Gj.sn.	2.700 +2.000	13±9	48±6 120 målinger	trolig < 1		329±35				observert flere metall- partikler

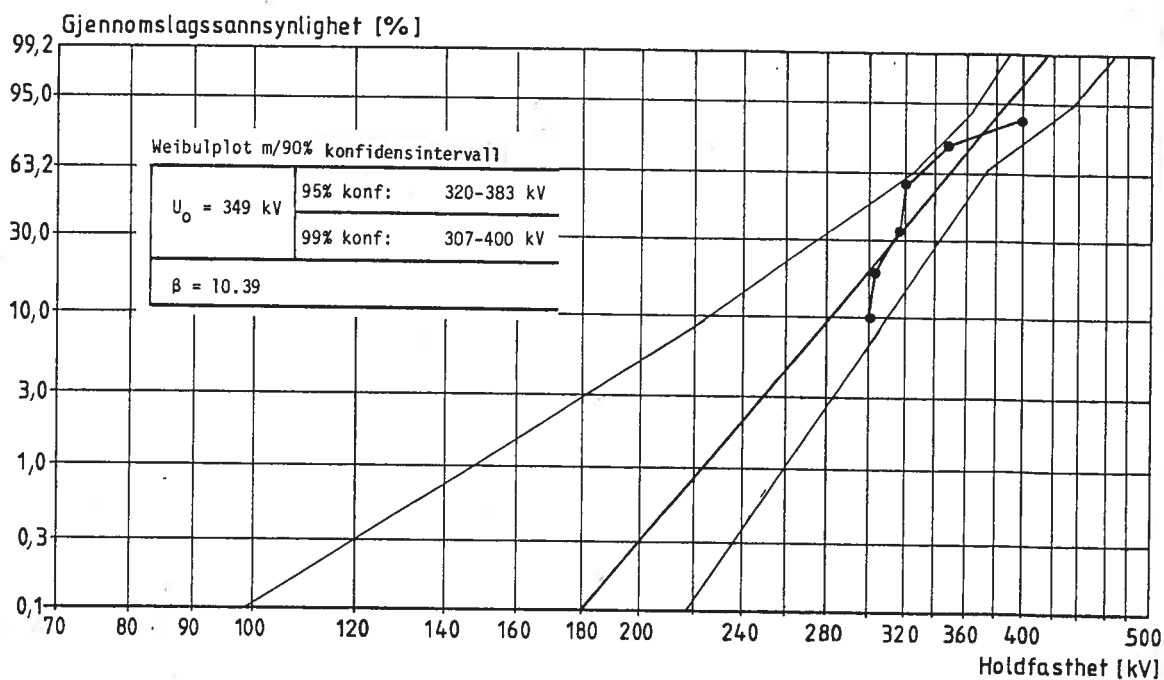
Tabell E2: Serie 4; Åpent objekt i tørr og ren olje (metallpartikler)
1/12-9/12 1982



Figur E2 Virkelig og Weibulltilpasset kumulativ for deling av holdfastheten for serie 4

Obj.nr.	Oljeprøver		Holdfasth. 1,2mmVDE[kV]	Vanninnhold i papir [%]	Utladninger	Gjennomslagskarakteristika				Anm.
	Part.pr 100 ml >5µm	> 50µm				Holdfasth.[kV]	Tid til gj.sl.[s]	Fase	Gj.sl.sted.	
5.1	3.700	40	45±4	Oljeprøve 3,5	150kV meget store utlad- ninger 7 sek	(150)	(30)		rett del	streamer tennes og slukkes
5.2	8.400	12	46±5		10kV-10 pC 320kV-70pC	320	20		rett del	
5.3	8.200	16	51±4	Oljeprøve 3	150kV-50pC 150pC før gj.sl.	400	0		rett del	Kulegap tente 320kV 325kV
5.4	(28.000)	(530)	47±6	Oljefrysning 3.5	50kV-20 pC 225kV-50 pC	325	10		ved bøy	tvilsom part.telling
5.5	800	8	48±5		150kV-200- 2000 pC	(150)			på bøy IK	sterk strømning fra bøy
5.6	3.000	20	52±4		50kV-10 pC 30 pC	350	25		på bøy IK	Kulegap tente 325kV
5.7	4.600	30	47±6		150kV-40 pC	300	59		ved bøy	
5.8	19.000	40	48±4		50kV-10 pC 30 pC	325	10		rett del	Kulegap tente 320kV
5.9	1.100	4	51±5	Oljeprøve 3,6	100kV-10 pC 200kV-50 pC 500pC 10sek før gj.slag	350	36		rett del	Kulegap tente 325 kV
5.10	7.000	34	50±4	Papirprøve 3	300kV-15 pC spora disk	306	52		rett del	
Gj.sn.	6.200 ±5.500	23±14	48±5 200 gj.sl.	trolig rundt 3		334±32			problem med fukting	uten kulegap > 325kV

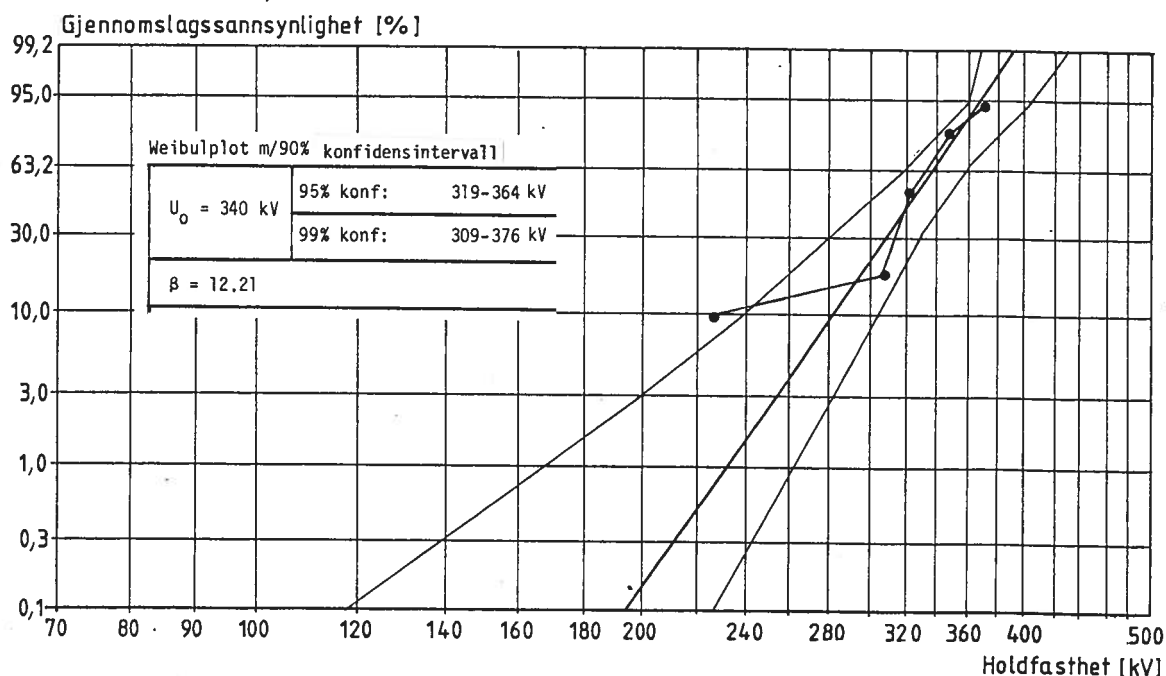
Tabell E3 Serie 5; bakplateobjekt i fuktet og renset olje. 29/3-16/4 1982



Figur E3 Virkelig og Weibulltilpasset kumulativ fordeling av holdfastheten for serie 5

Obj.nr.	Oljeprøver				Utladninger	Gjennomslagskarakteristika				Anm.
	Part.pr 100 ml >5µm	> 50µm	Holdfasth. 1,2mmVDE[kV]	Vanninnhold i papir [%]		Holdfasth.[kV]	Tid til gj.sl.[s]	Fase	Gj.sl.sted.	
6.1	2.700	24	54±7	Oljeprøve 1,3	≤ 3 pC	> 320 (275)	(40)		ytre støtte utvendig	Triggegap tente 320 kV
6.2	3.300	36	49±6		175kV- 5 pC 300kV-20 pC	315	59		midtre støtte	
6.4	3.100	58	45±5		225kV- 5 pC ustabilt	350	49		mellom to støtter	
6.8	10.000	48	46±6		≤ 3 pC	> 320 (275)	(40)		ytre støtte utvendig	Kulegap tente 320 kV
6.3	3.800	4	49±6	Oljeprøve 2	≤ 3 pC	325	18		ytre støtte utvendig	Ikke ved el. fremkant
6.6	4.400	40	48±5		≤ 4 pC	350	10		ytre støtte utvendig	
6.5	1.400	26	47±5	Oljeprøve 1,7	≤ 4 pC	350	30		ytre støtte utvendig	
6.9	1.300	20	47±6		200kV-20 pC slukker	225	60		ytre støtte utvendig	Ikke helt krypespor
9.10	1.300	10	46±4	Papirprøve 0,7	300kV-20 pC sporadisk senere jevnere	375	30		ytre støtte utvendig	
6.7	14.000	60	45±4	Oljeprøve 1,3	275kV korona 200 pC	325	57		ytre støtte utvendig	Ikke elektrodes fremkant
Gj.sn.	4.500 ±4.200	33 ±20	47±6 200 gj.sl.	Papirprøve 0,7		326±40				

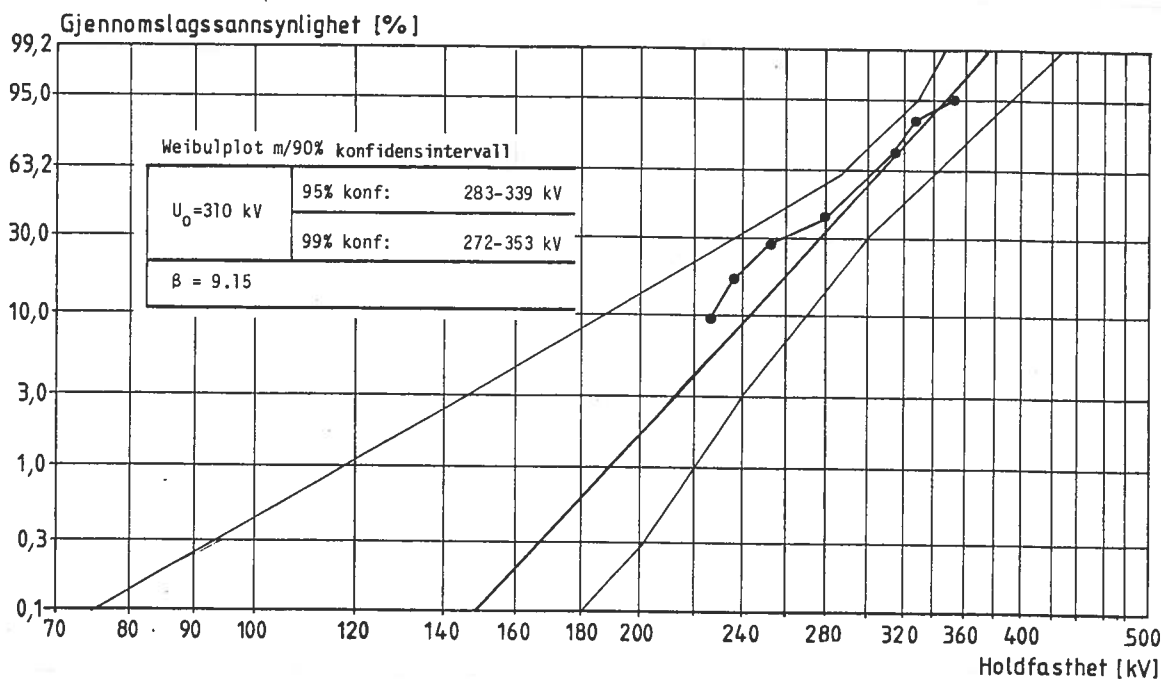
Tabell E4. Serie 6; Klypeobjekt i tørket og renset olje 23/4 - 3/5 83



Figur E4 Virkelig og Weibull tilpasset kumulativ fordeling av holdfastheten for serie 6

Obj.nr.	Oljeprøver				Utladninger	Gjennomslagskarakteristika				Anm.
	Part.pr 100 ml		Holdfasth. 1,2mmVDE[kV]	Vanninnhold i papir [%]		Holdfasth.[kV]	Tid til gj.sl.[s]	Fase	Gj.sl.sted.	
	>5µm	> 50µm								
7.5	25.000	30	43±5	Oljemåling 3,5	2-gang 50kV- 15 pC	315	46		ved bøy	Kulegap tente 100kV
7.9	42.000	100	46±5	Papirprøve 2,3	160kV-100 pC	325	39		rett del	Kulegap tente 300kV
7.7	39.000	80	46±4		sporadisk over 3 pC	350	60		rett del	Kulegap tente 275kV
7.6	35.000	90	43±3		≤ 3 pC	225	28		ved bøy	
7.10	19.000	110	47±4	Papirprøve 2,5	150kV-20 pC sporadisk	315	50	1,4ms e.p.t.	rett del	
7.8	43.000	100	47±4	Oljeprøve 3,3	150kV-15 pC	235	0		rett del	partikkel ob- serveres nær gj.slag
7.3	60.000	160	44±4		150kV-200kV: 10-50 pC intermitterende	315	5	1,8 ms f.n.t.	rett del	
7.1	64.000	190	42±4		50kV-15 pC 225kV-25 pC	250	60	pos topp	ved bøy	
7.2	60.000	100	46±4		≤ 3 pC	315	15	0,6ms e.n.t.	rett del	
7.4	160.000	1300	43±4		125kV-15 pC tenner og slukker 225kV-70 pC	280	-		ved bøy IK	partikkel ved gjennomslag
Gj.sn.	54.000 ±40.000	230 ±400	20 mål-pr.serie 45±4 200 gj.sl.	ca 2,5		292±42				

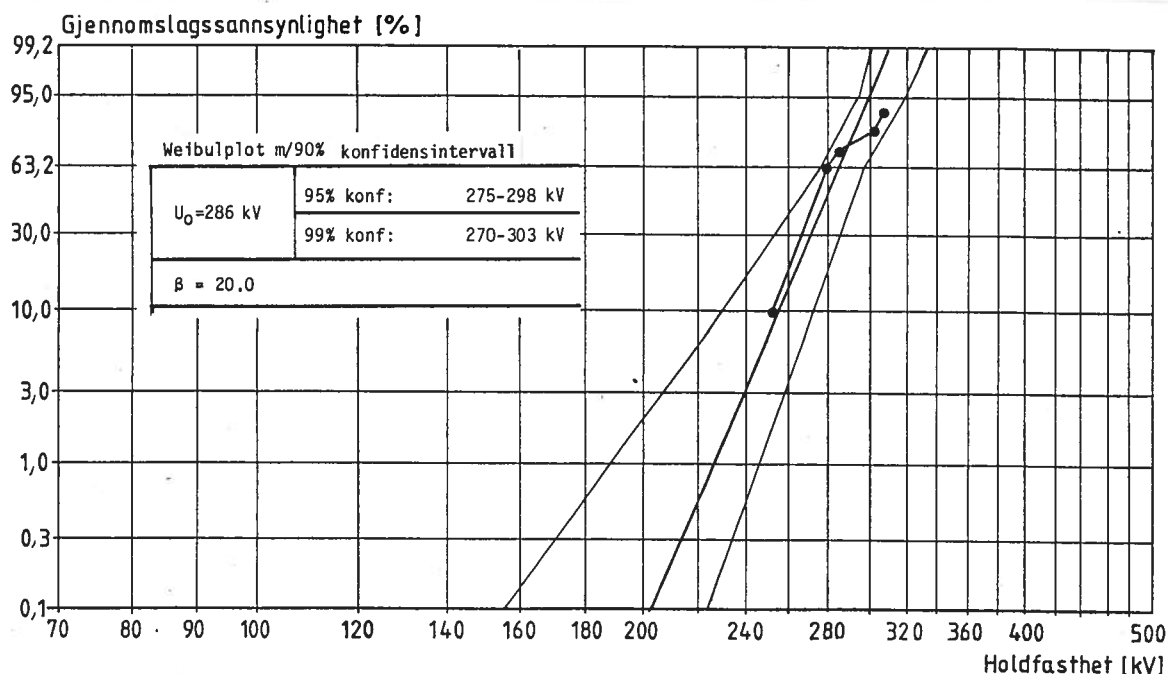
Tabell E5 Serie 7; Bakplateobjekt i fuktet og forurenset olje.
11/5-14/5 1982



Figur E5 Virkelig og Weibulltilpasset kumulativ fordeling av holdfastheten for serie 7

Obj.nr.	Oljepreøver				Utladninger	Gjennomslagskarakteristika				Anm.
	Part.pr 100 ml >5µm	> 50µm	Holdfasth. 1,2mmVDE[kV]	Vanninnhold i papir [%]		Holdfasth.[kV]	Tid til gj.sl.[s]	Fase	Gj.sl.sted.	
8.5	67.000	490	45±4	Papirprøve 2,5%	0-275kV- 2 pC	275	30	1,3ms e.p.t.	ytre støtte utvendig	Kulegap tente 225kV
8.6	50.000	160	47±4		50kV-20 pC 275kV-40 pC intermitterende	275	30		ytre støtte utvendig	
8.7	47.000	130	48±3		150kV-70 pC 250kV-10 pC	275	56		ytre støtte utvendig	Kulegap tente 250kV,275kV
8.4	46.000	160	47±5		100kV-50 pC ikke i' alle halvper.	275	56		ytre støtte utvendig	
8.10	69.000	220	46±4	Papirprøve 2,5	0-275kV- 2 pC	275	16	0,3ms f.n.t.	ytre støtte utvendig	
8.9	75.000	300	46±5		0-250kV- 2 pC	250	12	0,2ms f.n.t.	midtre støtte	
8.8	64.000	120	46±3		85kV-20 pC 200kV-80 pC	285	60	0,3ms f.p.t.	midtre støtte	
8.2	78.000	270	46±3		250kV-500pC	305	15	pos. topp	ytre støtte utvendig	
8.3	70.000	70	42±3		220kV,20-80pC sporadisk	300	16	1,3ms e.n.t.	ytre støtte utvendig	
8.1	92.000	240	47±4	Papirprøve 2,5	275kV 100 pC	275	14		ytre støtte utvendig	
Gj.sn.	66.000 ±14.00	220 ±120	46±4 100 gj.sl.	2,5		279±15				

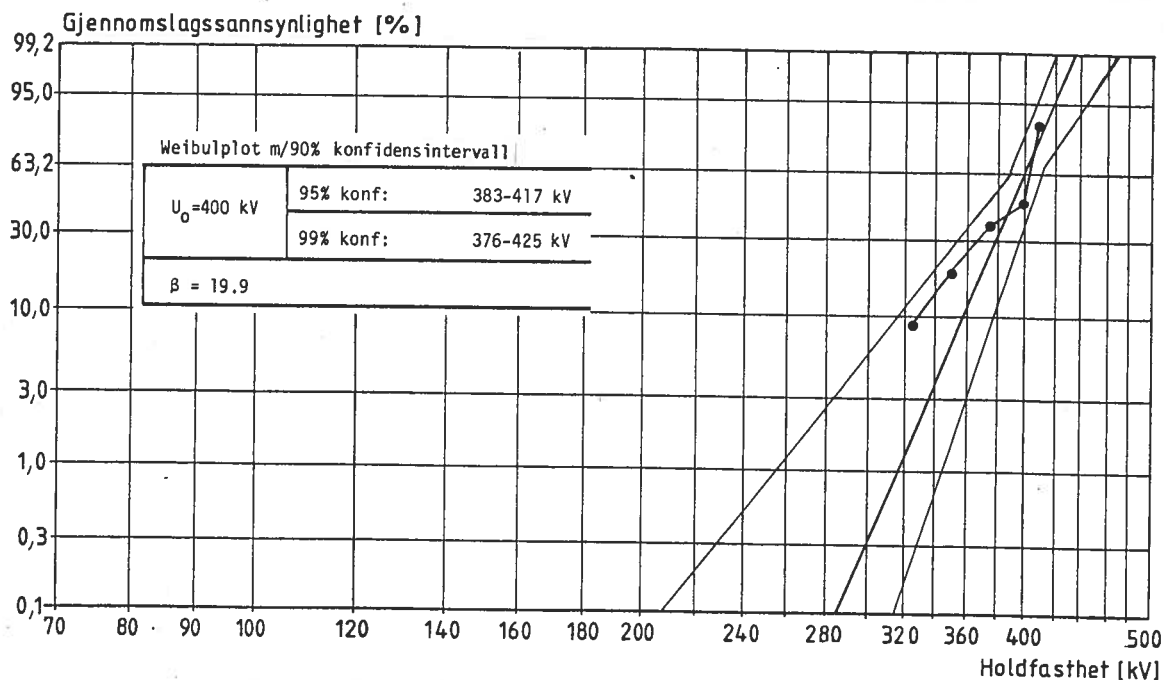
Tabell E6 Serie 8; Klypeobjekt i fuktet og forurenset olje
28/6 - 2/7 1982



Figur E8 Virkelig og Weibulltilpasset kumulativ fordeling av holdfastheten for serie 8

Obj.nr.	Oljeprøver				Utladninger	Gjennomslagskarakteristika				Anm.
	part.pr 100 ml >5µm	> 50µm	Holdfasth. 1,2mmVDE[kV]	Vanninnhold i papir [%]		Holdfasth.[kV]	Tid til gj.sl.[s]	Fase	Gj.sl.sted.	
9.1	28.000	30	50±4	papirprøve 2,5	200kV-1000 pC 2. kjøring 250kV- 25 pC	410	0		rett del	Kulegap tente 365kV
9.2	50.000	80	47±8		50kV-3000 pC	>375 (350)	(39)		ved bøy	Kulegap tente 375kV
9.4	77.000	200	46±3		- " -	325	13		rett del	
9.5	58.000	110	48±5		- " -	350	52	1,2ms e.p.t.	Ved/på bøy	Kulegap tente 225kV
9.8	84.000	130	47±5	papirprøve 2,8	- " -	>410			-	
9.9	79.000	50	50±3		- " -	375	46		rett del	Kulegap tente 200,225,350 kV
9.10	89.000	50	48±7		- " -	>410			-	Kulegap tente 200, 375 kV
9.7	86.000	100	47±7		- " -	410	30		ved bøy	
9.6	97.000	110	48±6		- " -	400	30		ved/på bøy	Kulegap tente
9.3	50.000	630	42±6	papirprøve 2,6	- " -	>410			-	Etter 3 dager 420 kV (VDE 48±4)
Gj.sn.	80.000 ±32.000	150 ±170	47±6 100 gj.sl.	2,6	Defekt i HV- skjermbrur	388±30				

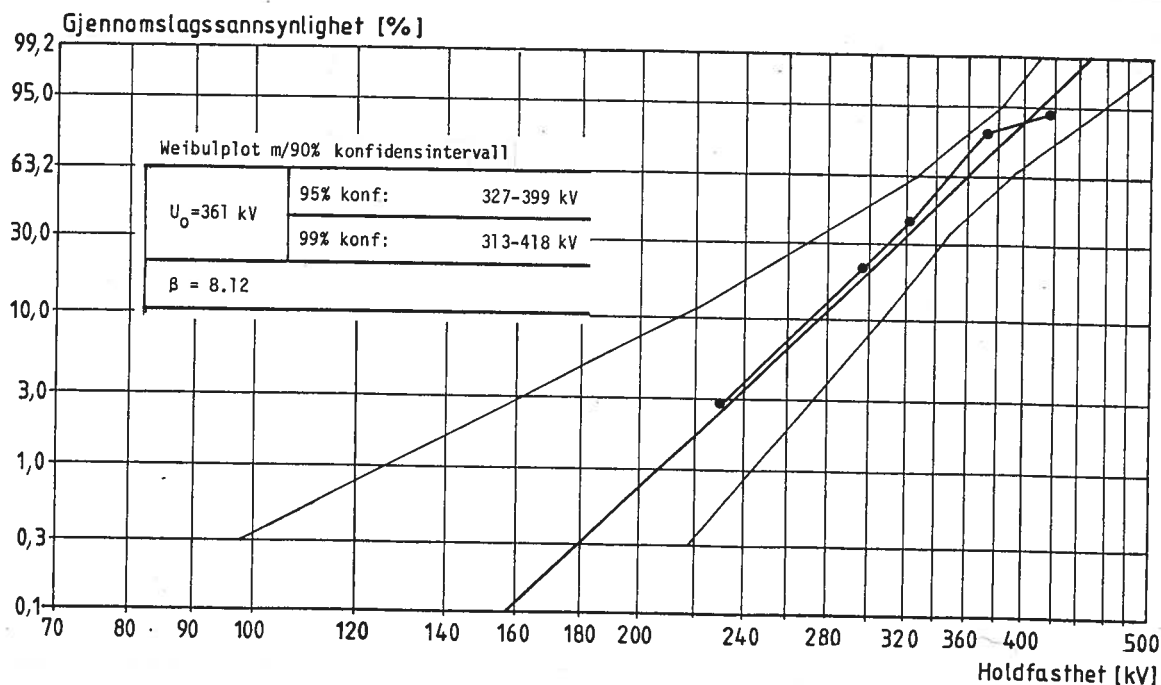
Tabell E7 Serie 9; Åpent objekt i fuktet og forurenset olje
27/8 - 3/9 1982



Figur E7 Virkelig og Weibulltilpasset kumulativ fordeling av holdfastheten for serie 9

Obj.nr.	Oljeprøver		Holdfasth. 1,2mmVDE[kV]	Vanninnhold i papir [%]	Utladninger	Gjennomslagskarakteristika				Anm.
	Part.pr 100 ml >5µm	> 50µm				Holdfasth.[kV]	Tid til gj.sl.[s]	Fase	Gj.sl.sted.	
10.10	12.000	36	51±4	Papirprøve 0,7	50kV: 2000pC	350	40		rett del	Kulegap tente 325,250,325kV
10.1	13.000	38	48±5		- " -	350	20		rett del, IK	
10..4	6.600	8	52±3		- " -	350	60		rett del	
10.3	10.000	12	48±3		- " -	325	30		ved/på bøy	Kulegap tente 200,200,200kV
10.2	2.800	6	50±4	Papirprøve 0,8	- " -	325	40		ved bøy	
10.7	3.400	16	49±7		- " -	>425 (300)			rett del	Kulegap tente 375, ved ny kjøring 300
10.5	7.400	66	49±5		- " -	225	42		ved bøy	Partikkel i gap "aluminium" ?
10.6	4.100	26	47±6		- " -	>375 (350)	30		rett del	Kulegap tent 375kV
10.8	1.900	8	47±5		- " -	375	2		ved bøy	Kulegap tente 225, 225, 225
10.9	2.900	14	49±4		- " -	300	0		rett del	
Gj.sn.	6.400 ±4.100	23±19	49±5		feil i "bur" HV-elektrode	340±53			IK=ikke krupespor	

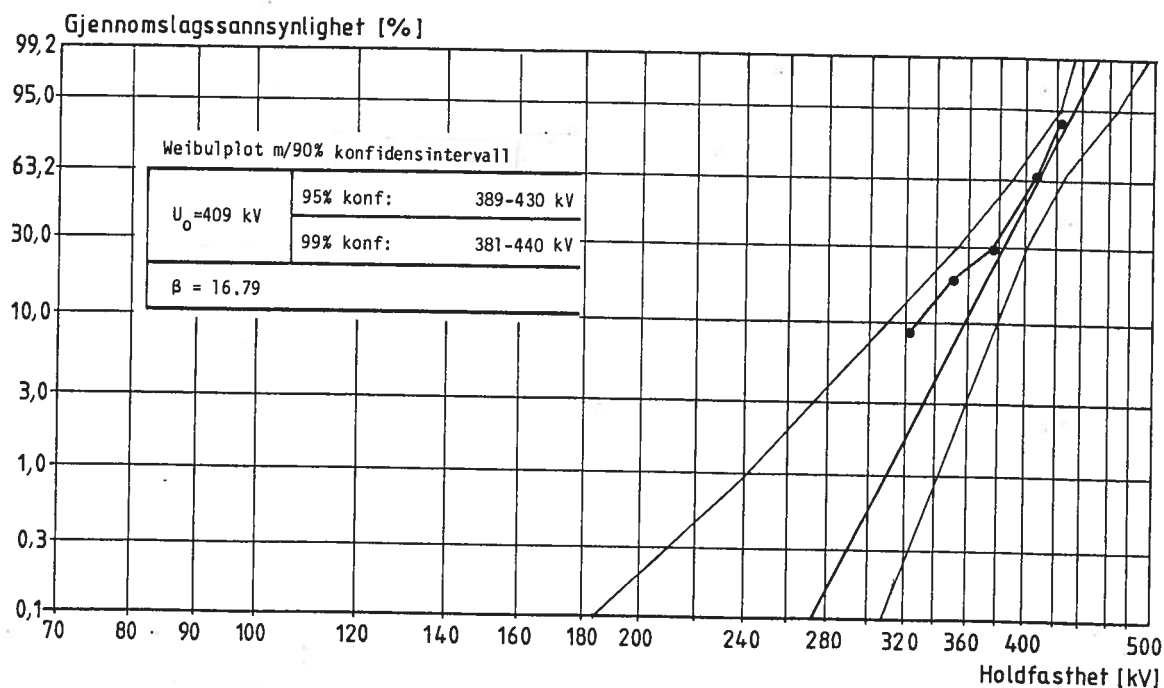
Tabell E8 Serie 10, Bakplateobjekt i tørket og renset olje
21/9 - 28/9 1982



Figur E8 Virkelig og Weibulltilpasset kumulativ fordeling av holdfastheten for serie 10


Obj.nr.	Oljeprøver				Utladninger	Gjennomslagskarakteristika				Anm.
	Part.pr 100 ml		Holdfasth. 1,2mmVDE[kV]	Vanninnhold i papir [%]		Holdfasth.[kV]	Tid til gj.sl.[s]	Fase	Gj.sl.sted.	
	>5µm	> 50µm								
11.1	4.300	40	52±5	Papirprøve 0,63	50 kV:2000 pC	400	55		ved/på bøy	Kulegap tente 200,325,325kV
11.8	4.700	36	52±4		- " -	325	45		ved bøy	
11.7	1.200	14	48±5		- " -	425	35		rett del	
11.10	4.000	10	48±6		- " -	375	24		rett del	Kopperpartikkel olje nær gj.sl
11.9	1.700	6	46±3	Papirprøve 0,6	- " -	>425	-			
11.6	2.500	26	50±5		- " -	400	20		ved bøy	
11.5	1.700	8	45±4		- " -	350	47		rett del	
11.4	1.800	10	47±6		- " -	>425	-			
11.2	1.600	4	46±5		- " -	400	0		rett del	
11.3	1.800	3	46±4	Papirprøve 0,6	- " -	425	0		rett del	
Gj.sn.	2.500 ±1.300	16 ±13	48±5	0,6	Støy i prøve- krets	395±35				sirkulasjon 16 timer etter gjennomslag

Tabell E9 Serie 11; Åpent objekt i tørket og renset olje
5/10 - 13/10 1982



Tabell E9 Virkelig og Weibulltilpasset kumulativ fordeling av
holdfastheten for serie 11

APPENDIX F DATA FOR TRANSFORMATOROLJER



INFORMASJON

LE-112
Vallø Transformatorolje
C.L.R.D.
KSH/rp.

TRANSFORMATOROLJENS OPPGAVE:

Transformering av elektrisk energi foregår ikke uten tap. På grunn av elektrisk motstand i transformatorens viklinger og hvirvelstrømmer i kjerne vil det oppstå elektriske tap som omsettes i varme. Ved store kraftoverføringer blir det betydelige varmemengder som må bortledes. For å få en effektiv kjøling må oljen være så tynn som mulig. Ved de høye spenninger som nyttes for å redusere overføringstap i ledninger mest mulig vil det også kunne oppstå gjennomslag mellom viklelingene i transformatoren. For å få størst mulig isolasjonsevne - størst gjennomslagsfasthet - må den være så tørr som mulig.

Transformatoroljen skal virke som en isolator samtidig som den skal lede bort varme. Den må virke like godt ved de lavest forekommende utetemperaturer som ved de høyeste temperaturer som kan oppstå i transformatorren innendørs. Derfor må oljen ha meget lavt stivnepunkt samtidig som flampunktet ikke må være for lavt. Ved siden av disse egenskaper kreves det at en transformatorolje at dens levetid er lengst mulig, at den ikke korroderer eller angriper metaller eller isolasjonsstoffer i transformatorren. Det vil si at oljen må være oksydasjonsbestandig og ha et så lavt nøytraliseringsstall (syretall) som mulig. Er nøytraliseringsstallet for høyt er oljen bitt sur og vil virke korroderende og medvirke til dannelse av slam. Nedbrytningsproduktene virker som en katalysator som påskynder videre nedbrytning av oljen og materiell som oljen kommer i kontakt med.

VALLØ TRANSFORMATOROLJE:

Alle disse fordringer er sammenfattet i en rekke spesifikasjoner utarbeidet av Norges Elektrisitetsverkers Forening (N.E.V.F.). Som det vil fremgå av de typiske analyser for Vallø Transformatorolje, ligger samtlige analyse-data innenfor de vedtatte spesifikasjoner. Vallø Transformatorolje utmerker seg ved meget lavt nøytraliseringsstall og slamtall. Vallø Transformatorolje er behandlet med antioksydasjonsinhibitor, men oljen tilfredsstiller vel å merke N.E.V.F.s krav med hensyn til oksydasjonsbestandighet også uten denne inhibitor som det vil fremgå av analysedataene.

Ved hjelp av spesielle metoder for tørringen av oljen kan denne leveres med en særlig høy grad av tørrhet. På grunn av forhold som kan oppstå ved transporten og som vi ikke er helt og holdent herre over, kan vi imidlertid allikevel ikke garantere oljens tørrhet på leveringsstedet, men anbefaler at oljen cm mulig undersøkes med hensyn til gjennomslagsfasthet, og i tvils- tilfelle tørre oljen før den fylles på transformatoren.

De norske transformatorfabrikker benytter idag praktisk talt bare Vallø Transformatorolje ved oppfylling av nye transformatorer, og betydelige mengder blir også eksportert.

Vårt laboratorium på Vallø utfører til selvkostende alle nødvendige analyser for kontroll av transformatoroljens tilstand.

DK-111 - UN. CD. ER. utgår.

-4-

TRANSFORMATOROLJE Vallø Typisk Analyse

Utseende:	Lys gul		
Spesifikk vekt v/20°C:	0.855	max. 0.92	
Viskositet v/20°C, cSt:	15	" 20	
Viskositet v/20°C, cP:	2.39	(" 2.9)	
Flampunkt PM °C:	140	min. 130	
Flampunkt Marcusson °C:	150	" 140	
Stivnepunkt °C:	-45	max. -40	
Nøytraliseringsstall mg. KOH/g.:	0.01	" 0.1	
Svovelinhold % S:	0.2	" 0.2	
Oksydasjonsbestandighet etter Anderson ASEA:	0.02	" 0.1	
Slamtall mg/100 g m/inhibitor:	0.1	" 0.1	
Nøytraliseringsstall etter oksydasjon m/inhibitor:	0.2	" 0.8	
u/inhibitor:	0.8	" 100	
Gjennomslagsfasthet KV/cm.:	157		



NYNÄS

INFORMASJON

MSI 2/1
blad 2
1980-05-04

TRANSFORMATOROLJE 10 X
Inhibisert
Solventtraffinert og hydrofinisert

BRUKSOMRÅDE

Nynäs Transformatorolje 10 X anbefales som varmebortledende og isolerende medium for el-transformatorer og som isolerolje for strømbrytere når spesielle lavtemperaturkrav ikke stilles (se evt. inf.MSI 2/8 : Strømbryterolje).

EGENSKAPER

Nynäs Transformatorolje 10 X er en inhibisert solventtraffinert mineralolje med meget god oksidasjonsbestandighet. Hvilket reduserer risikoen for avsetninger og slamdannelser, slik at oljen kan anvendes i lang tid.

Nynäs Transformatorolje 10 X har følgende egenskaper som er vesentlige for elektriske isoleroljer:

- Høy gjennomsnittsholdfasthet - god elektrisk isolerevne
- Lav viskositet - høy kjølnende effekt gjennom rask selvsirkulasjon
- Lavt demulgeringstall - god vannavskillingsevne
- Lav flyktighet - liten avdunsting
- Betryggende flammepunkt
- Lavt stivningspunkt
- Små dielektriske tap

Nynäs Transformatorolje 10X oppfyller bl.a. følgende normer:

SEN 04 03 00 klasse II
 IEC 296 klasse II
 NBN C27 - 101 klasse II
 NF C27101 klasse II
 VDE 0370 Klasse A
 BS 148
 NEN 36.74

Nynäs Transformatorolje 10 X er godkjent av ASEA, Møre Transformatorfabrikk og National Industri.

For analysedata se MSI 2/1 blad 1.

Nynäs-Johnson A/S
 En Johnsonbedrift

Postadresse
Postboks 100, 0401 Oslo 2
Telefon
02 15 22 00
Telefax
02 15 22 01
Telex
AJOEN 1000



NYNÄS

INFORMASJON

MSI 2/1
blad 1
1980-05-15

TRANSFORMATOROLJE 10X
Inhibisert
Solventtraffinert og hydrofinisert

EGENSKAP	ENHET	METODE ASTM	GARANTERT MIN	MAX	TYPISK
Densitet +20°	g/cm ³	D 1298	0,895		0,872
Viskositet +40°	mm ² /s (cSt) D	445	8,0		7,5
Viskositet +20°	mm ² /s (cSt) D	445	17,0		16,0
Viskositet -30°	mm ² /s (cSt) D	445	800		600
Flammepunkt, PM	°C	D 93	140		144
Flytepunkt	°C	D 97	- 45		- 51
Nøytralisasjonstall	mg KOH/g	IEC 296	0,03		0,01
Korrosivt svovel		D 1275	intet		intet
Elektrisk gjennomsnittsgrense		IEC 156 (med kalottelektroder)			
- ved levering	KV		30		30-50
- etter IEC behandling	KV		70		70
Dielektriske tap:					
tg δ ved 90°C	%	IEC 250		0,5	0,2
Oksidasjonstabilitet					
(inhibisert olje),					
Induksjonstid	h	IEC 474	120		210
Overflatespenning mot vann ved + 25°C	mN/m	D 971	40		≥40

Produktet oppfyller helt følgende spesifikasjoner:

ASEA 11 71 30 11 - 101
 SEN 04 30 00 klasse II
 IEC 296 klasse II
 NBN C27 - 101 klasse II
 NF C27101 klasse II
 VDE 0370 klasse A
 BS 148
 NEN 36.74

Bruksområde/egenskaper: SE MSI 2/1 t

Nynäs-Johnson A/S
 En Johnsonbedrift

Postadresse
Postboks 100, 0401 Oslo 2
Telefon
02 15 22 00
Telefax
02 15 22 01
Telex
AJOEN 1000

SINTEF Energiforskning AS
Adresse: 7465 Trondheim
Telefon: 73 59 72 00

SINTEF Energy Research
Address: NO 7465 Trondheim
Phone: + 47 73 59 72 00