



HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND

Eksplasjonssikring av transformatorer



Hovedprosjekt utført ved

Høgskolen Stord/Haugesund - Avd. Haugesund - ingeniørfag

Studieretning: Brannteknikk

Av: Kjartan Øvstedal
Øystein Aadland Olsnes

Kandidatnr. 67
44

Haugesund

Våren 2005



HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND

Høgskolen Stord/Haugesund
Avdeling Haugesund - ingeniørfag
Bjørnsonsgt. 45
5528 HAUGESUND
Tlf. nr. 52 70 26 00
Faks nr. 52 70 26 01

Oppgavens tittel		Rapportnummer
Eksplosjonssikring av transformatorer		(Fylles ikke ut)
Utført av Kjartan Øvstedal og Øystein Aadland Olsnes		
Linje Sikkerhet	Studieretning Brann	
Gradering Åpen	Innlevert dato 06.05.05	Veiledere Jan Torgil Josefsen og Jan Hantho

Ekstrakt

Eksplosjonssikring av transformatorer har siden slutten av nittitallet stått sterkt i fokus hos myndigheter, forsikringsselskap og energibransjen.

Det er utviklet flere tiltak for å hindre eksplosjoner i transformatorceller. I denne rapporten er deler av et tiltak utviklet av Haugaland Brannsikring A/S testet og vurdert opp mot definerte funksjonskrav.

Tiltaket går ut på å holde transformatorcellen inert ved hjelp av en nitrogengenerator og en trykkavlastningsduk. Dette gjøres for å forhindre en ødeleggende eksplosjon, som kan oppstå etter at gass fra spaltet transformatorolje har lekket ut i cellen. Hensikten med prosjektet er å finne og teste en duk med innfestning som kan benyttes til trykkavlastning.

Duk og innfestning ble testet i en strekkprøvemaskin, for å kunne avgjøre om funksjonskravene blir overholdt. Resultatene fra testen ble diskutert og målt opp mot funksjonskravene. De viste at den anbefalte duken og innfestningen har gode egenskaper i forhold til å kunne benyttes til trykkavlastning. Det er likevel nødvendig med videre beregninger for å finne ut hvordan duken skal utformes, og for å få nøyaktig svar på hvor stort trykk som kan tas opp.



Forord

Dette hovedprosjektet representerer vårt avsluttende arbeid i forbindelse med vår 3-årige branningeniørutdanning ved Høgskolen Stord/Haugesund.

Under valget av hovedoppgave tok vi kontakt med Haugaland Brannsikring A/S i håp om at de kunne tilby interessante problemstillinger, som vi kunne bygge opp et prosjekt rundt. Jan Hantho fremstilte flere spennende prosjekter for oss, men valget falt på den oppgaven vi syntes bød på størst utfordringer og faglig utvikling. I tillegg var det positivt at eksplosjonssikring av transformatorer er et område som også i fremtiden vil være i fokus. Det vil dermed være mulig å bygge videre på egne og andres erfaringer ved eventuell videre skolegang, da emnet stadig har potensial for forbedringer.

Det har vært en utfordrende og spennende oppgave å lære om hvordan transformatorer virker og hva vi kan gjøre for å forhindre at ulykker oppstår.

Ved siden av arbeidet med hovedprosjektet har vi hatt Eksplosjonssikring som valgfag, og det har vært et nyttig hjelpemiddel til å forstå det som ligger bak eksplosjoner i transformatorer.

Vi vil takke våre veiledere Jan Hantho og Jan Torgil Josefsen for godt samarbeid og gode innspill når vi har stått fast. En stor takk går også til Yaaseen Amith som var svært behjelpelig under testing av duk og innfestning.

Haugesund, 06.05.05

Kjartan Øvstedal

Øystein Aadland Olsnes



Sammendrag

Dette hovedprosjektet tar for seg eksplosjonssikring av transformatorer. Siden slutten av 90-tallet er det satt inn store ressurser på forskning og utvikling av tiltak som kan forbedre eksplosjonssikkerheten i transformatorceller. Hensikten med dette prosjektet er å videreutvikle et tiltak for Haugaland Brannsikring A/S. Tiltaket går ut på å hindre eksplosjon i transformatorceller ved å holde cellen kontinuerlig inert.

Dersom det oppstår en kortslutning med påfølgende lysbue i en transformator, vil transformatorolje spaltes til svært eksplosive gasser. Trykkoppbygningen som dannes når oljen spaltes, vil føre til en primæreksplasjon, med de følger at transformator-kassen revner og gassblandingen slippes ut i transformatorcellen. Dersom gassblandingen antennes, vil det oppstå en sekundæreksplasjon, som er svært ødeleggende og i verste fall kan føre til at menneskeliv går tapt.

Tiltaket går ut på å holde transformatorcellen inert både før og etter primæreksplasjonen. Cellen skal holdes inert ved å senke oksygenivået til 4-6 %. Dette gjøres ved å erstatte luften med nitrogen. Det vil dermed ikke være nok oksygen tilgjengelig i cellen til å antenne gassen.

Transformatorcellen skal holdes inert ved hjelp av en trykkavlastningsduk, som skal festes inn i cellens ventilasjonsåpning. Duken skal ta opp volumutvidelsen, som dannes av primæreksplasjonen. Den sentrale delen av hovedprosjektet gikk ut på å teste og finne frem til en duk og innfestning som kan ta opp den omtalte volumutvidelsen, samt tilfredsstillende funksjonskrav.

For å hindre at duken skades av prosjektiler fra primæreksplasjonen, skal det benyttes en prosjektilfanger foran duken.

Duken skal spennes innover i cellen ved normaltilstand. Dette fører til at duken må foldes ut gjennom ventilasjonsåpningen, før den må ta opp trykk, noe som fører til at det kan tas opp større volumutvidelser

Prøvestykker av to typer duk, i tre forskjellige innfestninger, er testet i en strekkprøvemaskin ved Høgskolen i Haugesund. Resultatene viste at en dobbel duk med isolasjonslag imellom og en innfestning med jevn avstand mellom innfestningspunktene er et svært godt alternativ. Det er nødvendig med videre arbeid rundt selve utformingen av duken for å bevise at duken kan ta opp volumutvidelsen som skapes av primæreksplasjonen, og for at dukens egenskaper skal utnyttes til det maksimale. Det anbefales en fullskalatest for å få nøyaktig svar på om duken og innfestningen holder cellen inert



Innholdsfortegnelse

FORORD	I
SAMMENDRAG	II
INNHALDSFORTEGNELSE	III
DATAREGISTER	V
1 INNLEDNING	1
1.1 BAKGRUNN	1
1.2 MÅLSETTING	3
1.3 AVGRENSING	3
1.4 VALG AV METODE	3
2 TRANSFORMATORER	4
2.1 GENERELT	4
2.2 OPPBYGNING	4
2.3 VIRKEMÅTE	4
2.4 OLJEKONSERVATOR	5
2.5 FEIL I TRANSFORMATORER	6
3 EKSPLOSJONSTEORI	10
3.1 BRENNBARHETSGRENSER	11
3.2 GASSER OG DAMPER	12
3.3 STØVEKSPLOSJONER	12
3.4 TÅKEEKSPLOSJONER	12
3.5 TENNKILDER	13
4 INERTISERING	14
4.1 NITROGEN	14
5 SAMMENFATNING RAPPORT FRA COMPUTIT[11]	15



6	PRODUKTBESKRIVELSE OG FUNKSJONSKRAV	16
6.1	LUFT/TETTHET	16
6.2	PROSJEKTILER	16
6.3	MATERIALKOSTNADER	16
6.4	SIKKERHETSSONE	16
6.5	TRYKK	18
6.6	TEMPERATUR	18
7	TESTMETODER	19
7.1	TESTUSIKKERHETER	20
7.2	INNFESTNINGER	20
7.3	DUK	22
8	RESULTATER	23
9	TILTAK FOR Å HINDRE SEKUNDÆR EKSPLOSJON	24
9.1	DUK	24
9.2	SPENNING AV DUK	25
9.3	PROSJEKTLIFANGER	26
9.4	INNFESTNING	27
9.5	VENTILASJON AV GASSBLANDING	28
10	DISKUSJON	29
11	KONKLUSJON	31
12	REFERANSER	32
13	VEDLEGG	33



Dataregister

Figurer

- 2.2.1 Transformatorkasse
- 2.4.1 Transformator med oljekonservator
- 2.5.1.1 Virkning av fukt og temperatur på transformatorpapir
- 3.1 Eksplosjonsfirkanten
- 3.1.1 Brennbarhetsgrenser for trekomponentssystemet metan/oksygen/nitrogen ved atmosfærisk trykk og 26 °C
- 3.5.1 Nødvendig energimengde
- 6.4.1 Skisse av transformatorcelle og duk i normaltilstand. Sett ovenfra
- 6.4.2 Skisse av transformatorcelle med duk i utslått tilstand og markert sikkerhetssone Sett ovenfra.
- 7.1 Shimadzu AG 250 KN
- 7.2 Tegning av prøvestykke
- 7.3 Tegning av prøvestykke
- 7.2.1 Innfestningstype 1
- 7.2.2 Innfestningstype 2
- 7.2.3 Innfestningstype 3
- 7.3.1 Protecta Fire Barrier EI30
- 9.1.1 BS 476, Flammetemperatur
- 9.2.1 Skisse av hvordan duken kan spennes innover i transformatorcellen
- 9.3.1 Skisse av prosjektilfanger
- 10.2.1 Skisse av kjederløsning
- 10.2.2 Forskjellige lister

Tabeller

- 2.5.1 Brennbarhetsgrenser
- 3.5.1 MIE
- 4.1 Inertiseringsgrenser
- 5.1 Volumprosent gass i blandingen
- 9.1 Testresultater



1 Innledning

Denne hovedoppgaven tar for seg eksplosjonssikring av transformatorer. Transformatorene spiller en viktig rolle innen kraftforsyning fra kraftanlegg til forbrukerne.

Krafttransformatorene kan sies å være hjertet i kraftanleggene. De drives stadig tøffere for å oppnå størst mulig gevinster i et konkurransepreget marked[1]. Dette fører til stadig større påkjenninger, noe som igjen fører til større risiko for uønskede hendelser. Mange av transformatorene som i dag er i drift begynner å bli gamle, noe som er med på å ytterlig øke risikoen. En kortslutning i en transformator er svært alvorlig og fører til spalting av transformatorolje til eksplosive gasser, som i verste fall kan antennes og føre til ødeleggende eksplosjoner.

For å unngå tap av liv og verdier er det i denne oppgaven sett på en mulig løsning, som er utviklet av Haugaland Brannsikring A/S for å hindre at det oppstår slike alvorlige eksplosjoner i transformatorceller. Det er svært viktig å sette fokus på dette området for å sikre at person- og materialsikkerheten blir ivarettatt.

1.1 Bakgrunn

I februar 1999 ble SEBK-prosjektet(Sikkerhetstiltak mot eksplosjon og brann i kraftanlegg) igangsatt. Hovedmålet for prosjektet var å utvikle og fremme tiltak for å øke personsikkerheten og verdisikringen når det gjelder brann og eksplosjoner i energiforsyningen, med fokus på oljefylte transformatorer.

I 1991 trådte Energiloven i kraft. Denne loven la forholdene til rette for konkurranse, da kraftselskapene fikk lov til å selge kraft utover sitt område. Tidligere kunne kraftselskapene bare selge kraft i sitt område, noe som førte til sterkt varierende priser. Effekten av Energiloven ble hyppige lastordninger og økte belastninger som gir økt påkjenning og fremskynder aldringsprosessene. Dette førte til at bekymringen for uønskede hendelser økte hos energibransjen, myndighetene og forsikringsselskapene. Dermed ble prosjektet igangsatt[1].

SEBK konkluderer blant annet med at elektriske feil nesten alltid er den utløsende årsaken til eksplosjoner og oljebranner i kraftanlegg. Risikoen for at dette skal inntreffe, har økt grunnet endrete driftsforhold og økt gjennomsnittsalder.

I dag finnes det en rekke ulike tiltak for å forhindre eller redusere følgene av en eksplosjon i en transformatorcelle.

- Inertisering
 - Oksygen fortrenses etter at transformatorfeil er detektert
 - Forhindrer antennelse av gass eller svekker en eventuell eksplosjon
- Eksplosjonsundertrykking
 - Slukkingen starter etter at transformatorboksen er sprengt
 - Stopper eksplosjonen i begynnerfasen
- Forsterkning av transformatorboksen
 - Transformatorboksen forsterkes for å tåle trykkreftene som vil oppstå ved en spaltning av olje til gass
- Trykkavlastning inne i transformatoren
 - Trykkoppbygning i transformatoren avlastes
 - SEBK og flere forskningssteder stiller seg sterkt kritisk til denne løsningen
- Inertgass – dukking
 - Transformatorcellen holdes inert hele tiden
 - Denne løsningen er ikke tatt i bruk i Norge enda
- Designendring(bl.a):
 - Fjerner obstruksjoner som danner turbulens i transformatorcellen for å begrense skadeomfanget.
 - Sikre rømningsveier med seksjoneringstiltak.

Haugaland Brannsikring A/S ønsker å videreutvikle inertgastiltaket. Dette blir beskrevet senere i rapporten. Hensikten med tiltaket er å hindre at det oppstår en omfattende og ødeleggende sekundærexplosjon i transformatorcellen. Etter at det har oppstått en primærexplosjon i transformatoren, kan eksplosive gasser strømme ut i transformatorcellen. Cellen skal holdes inert ved å innføre nitrogen, dette forhindrer dannelsen av en eksplosiv atmosfære.



1.2 Målsetting

Målsettingen med oppgaven er å utvikle et produkt som kan være til nytte for Haugaland Brannsikring A/S i deres arbeid innen eksplosjonssikring av transformatorer.

1.3 Avgrensing

Opgaven forutsetter at det oppstår en kortslutning i transformatoren. Det kan være flere årsaker til at kortslutningen oppstår, men disse er bare kort beskrevet i rapporten. Videre er beregninger og følger av en sekundærexplosjon bare kort omtalt i rapporten. Hovedmengden av arbeidet dreier seg om å forhindre at sekundærexplosjonen inntreffer, ved å videreutvikle og teste Haugaland Brannsikring A/S sin løsning.

Det kan også oppstå kortslutning utenfor transformatorcellen. I denne rapporten er det bare sett på overslag i oljen i transformatoren.

1.4 Valg av metode

Opgaven vil bestå av å teste ut en løsning som Haugaland Brannsikring A/S har utarbeidet. Løsningen går ut på å innføre en avlastingsduk i ventilasjonsåpningen, som skal ta opp trykkoppbygningen som dannes av primærexplosjonen. Ved å ta opp trykkutviklingen samtidig som at transformatorcellen holdes inert, hindres gassblandingen i å antennes og dermed forhindres sekundærexplosjonen.

Det er utarbeidet en rapport av ComputIT, som tar for seg et reelt tilfelle av en eksplosjon i transformator. Rapporten er nøye gjennomgått for å kunne utføre test av duk og innfestning. Faglitteratur om eksplosjonsteori og transformatorers oppbygning og virkemåte er også gjennomgått.

Flere firmaer har vært involvert for å bistå med informasjon rundt mulige testmetoder og innfestningsmetoder.

Forskjellige typer duk, innfestning og testmetoder har vært vurdert før det ble valgt en løsning. De forkastede løsningene er nærmere beskrevet i vedlegg 1 – Forkastede Løsninger.

For å kunne dokumentere at duk og innfestning tilfredsstillende de krav som settes for å hindre sekundærexplosjonen, skal det utføres en test av den aktuelle duken og innfestningen. Denne testen skal gi svar på om duken og innfestningen tilfredsstillende funksjonskravene som blir gitt i denne rapporten.

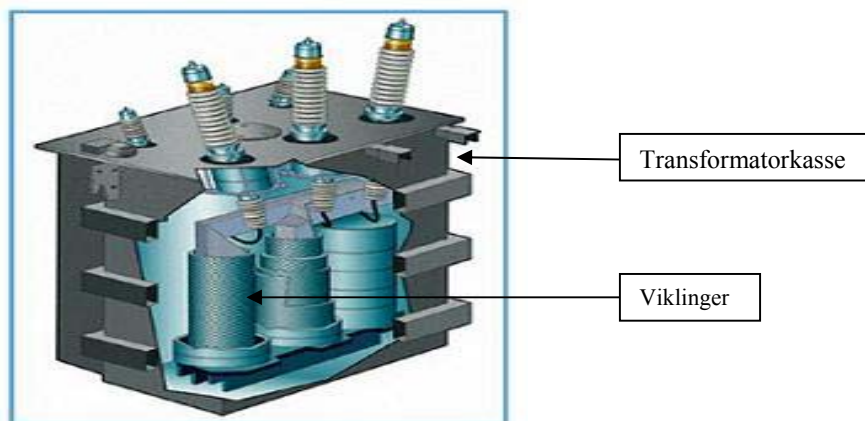
2 Transformatorer

2.1 Generelt

En transformator er et elektromagnetisk apparat som innen kraftforsyning blir benyttet til å øke eller senke vekselstrøm med ett spenningsnivå til vekselstrøm med et annet spenningsnivå. Hensikten med å endre spenningsnivået er å kunne øke nivået for effektivt å transportere strøm over lengre avstander, for deretter å senke nivået igjen for at strømmen kan bli distribuert til forbrukerne. Energitalpet blir nemlig betraktelig mindre dersom strømmen har høy spenning når den transporteres i høyspentkabler over lengre avstander. Denne typen transformatorer kalles krafttransformatorer.

2.2 Oppbygning

Transformatoren består hovedsaklig av en jernkjerne av laminerte elektroplater og isolerte kobberviklinger. Se figur. Viklingene overfører store effekter. Den siden av viklingene effekten blir tilført kalles primærsiden. Siden den går ut kalles sekundærsiden. For å minske energitalpet er viklingene tvunnet rundt jernkjernen som en sammenhengende sylindrisk spole. Sekundærviklingen ligger nærmest kjernen, og primærviklingene ytterst. Viklingene blir isolert for å hindre kontakt mellom dem, som vil føre til kortslutning. Cellulose er det mest vanlige isolasjonsmaterialet. Kjernen med viklingene er senket ned i en stålbeholder, kalt transformatorokasse, fylt med transformatorolje. Oljens formål er å kjøle og isolere viklingene og kjernen. Gunstig pris og tilgjengelighet har ført til at organisk mineralolje har blitt den mest brukte transformatoroljen.



Figur 2.2.1 – Skisse av en transformatorokasse med dens komponenter[2]

2.3 Virkemåte

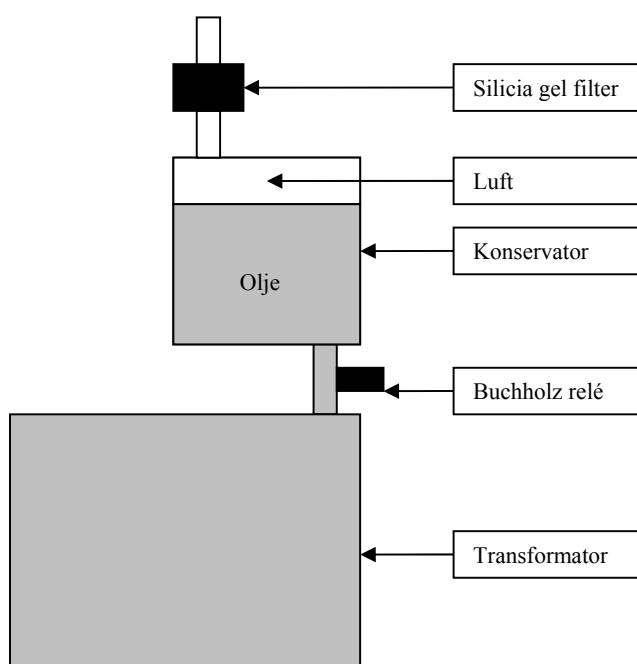
Ved å innføre strøm i primærspolen dannes et magnetfelt rundt viklingene, som også går inn i sekundærspolen. Endringer i magnetfeltet vil induisere strøm i sekundærspolen. For å holde strømmen i gang i sekundærspolen, må strømmen veksle kontinuerlig. Mengden strøm og spenning man får ut i sekundærspolen avhenger av antall viklinger og størrelsen på

sekundærspolen relativt til primærspolen. Dermed kan vekselstrømmens spenning økes eller senkes ved transporterering av strøm.

2.4 Oljekonservator

Når transformatoren drives vil temperaturen i oljen i transformatorkassen stige. Oljen ekspanderer ved økt temperatur, ca $0,7 \text{ dm}^3/\text{m}^3$. Dette medfører at transformatoren trenger et ekspansjonsvolum. Dette volumet kalles en oljekonservator. Når driftstemperaturen økes blir en del av oljen skjøvet inn i konservatoren og omvendt når temperaturen synker igjen. Uten en slik innretning kan oljeekspansjonen føre til at transformatorkassen revner som følge av økt indre overtrykk. Konservatoren er utstyrt med en pusteventil som forhindrer at luft suges inn i transformatorkassen når oljen er kald. I tillegg er den utstyrt med et silica gel filter som dehydrerer luften og dermed forhindrer at oljen blir tilført fuktighet/vann fra luften. (Se figur)

Transformatorer utstyrt med oljekonservator, kan med fordel utstyres med et Buchholzrelè. Dette er en sikkerhetsinnretning som kontrollerer gass- og oljestrømningen fra transformatoren til konservatortanken. Dersom strømmingen blir for stor, aktiveres en alarm samt at strømforsyningen til transformatoren blir stengt.



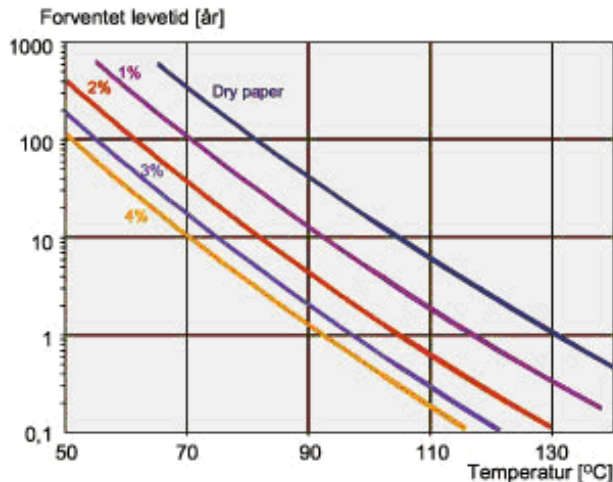
Figur 2.4.1 - Skisse av en transformator med oljekonservator

Dersom isoleroljen blir overopphetet kan transformatorkassen sprenges. Det er derfor nødvendig med kjølesystemer til transformatoren. Både vann- og luftkjøling er velbrukte kjølesystemer.

2.5 Feil i transformatorer

2.5.1 Beskrivelse av problemet

Den vanligste årsaken til feil i transformatorer er aldring av cellulosen som brukes til isolasjon. Vann, oksygen og høye temperaturer fører til flere oksidasjonsprosesser som bryter ned og korter levetiden til cellulosen.



Figur 2.5.1.1 – Virkning av fukt og temperatur på transformatorpapir[3]

Som skissert vil tørt papir ved 60° C vare i 1000 år, men bare i 50 år ved 3 % vanninnhold. Økes temperaturen på det våte papiret til 80° C, varer papiret bare i 5 år. Tørring til 1 % restfuktighet vil øke levetiden til 30 år.

2.5.2 Cellulose

Cellulose blir brukt som isolasjon rundt viklingene i transformatoren, og svikt i isolasjonen vil føre til at det kan dannes lysbue. En dannelse av lysbue kan i verste fall føre til at transformator-kassen sprekker og eksplosiv gass vil presses ut til omgivelsene. En annen konsekvens er at transformatoren kan bli stengt for lengre perioder hvis cellulosen blir ødelagt.

Det er derfor viktig at transformator-kassen holdes fri for vann. Dette kan gjøres ved å bruke transformatoroljer som holder vann oppløst slik at det kan trekkes ut av cellen.

Rundt 70-80 prosent av alle feil skyldes interne kortslutninger mellom vindinger eller lag av vindinger. Dette kan oppstå som følge av aldring av celluloseisolasjon, eller termiske, mekaniske eller elektriske påkjenninger[3].

2.5.3 Konsekvenser ved feil i transformatoren

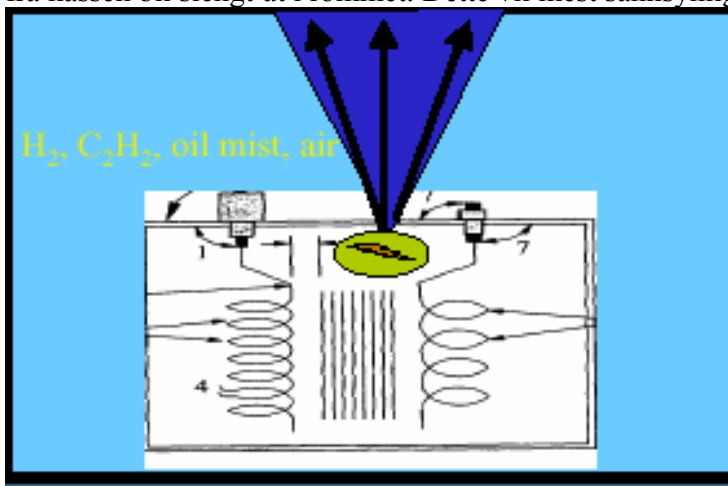
Ved kortslutning vil det oppstå en strømkning i kretsen som igjen kan føre til at temperaturen øker. Temperaturøkningen fører til at enda mer isolasjon blir ødelagt som igjen fører til en større kortslutning.

Dette gjør at det blir fare for overslag i transformatorcellen og påfølgende dannelse av lysbue. Lysbuene kan få høy temperatur og dette kan gjøre at lysbuene blir effektive tennkilder i forbindelse med antennelse av en eksplosiv atmosfære. Lysbuen kan inntreffe i transformatorolje, i transformatorens omliggende luft og i grensesjiktet mellom olje og luft.

Temperaturøkningen vil også føre til spalting av isolasjonsoljen. Isolasjonsoljen i transformatoren vil bli spaltet til mindre molekyler av mettede og umettede hydrokarboner, karbon og hydrogen. Størrelsen på kortslutningen, oljetypen, temperaturen og trykket i transformatorcellen vil avgjøre hvilke gasser som blir dannet. Vanligvis er dette metan, etan, etylen, propylen, hydrogen og acetylen[3].

Gassutviklingen er proporsjonal med størrelsen på lysbuen. En stor lysbue vil spalte molekylene enda mer og større mengder hydrogen og acetylen vil dannes.

Ved gassdannelse vil det bli overtrykk i transformator-kassen. Dette overtrykket kan føre til at kassen revner. Gass og olje vil strømme ut i cellen med høgt trykk. Når gass og olje strømmer ut av kassen, vil det kunne dannes en eksplosjonsfarlig atmosfære i transformatorcellen. De reaktive gassene utgjør ingen fare så lenge de er inne i transformator-kassen, da det ikke er tilgang på oksygen og blandingen vil være for fet til å få en eksplosjon. Når kassen revner, kan prosjektiler fra kassen bli slengt ut i rommet. Dette vil mest sannsynlig være kabelmuffer som løsner.



Figur 2.5.3.1 - Primærexplosjon

I cellen vil det derimot være tilstrekkelig med oksygen til å få en eksplosiv atmosfære. Dette er grunnen til at risikoen for å få en eksplosjon først oppstår når kassen revner. Det vil kunne dannes en oljesky, som kan føre til både gass-, tåke- og støveksplisjoner.

En forutsetning for alle eksplosjonstypene er at blandingsforholdet ligger mellom øvre og nedre eksplosjonsgrense. Eksplosjonsgrenser blir mer utførlig forklart under Eksplosjonsteori.

Tabell 2.5.1- Brennbarhetsgrenser [4] [5]

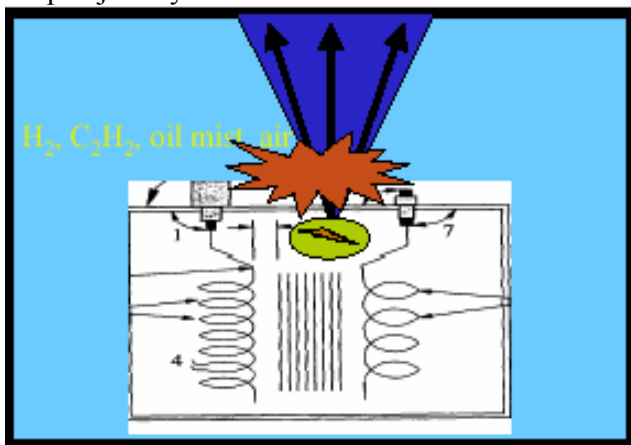
Kjemisk navn	Kjemisk formel	Selvantennelses-temperatur (°C)	Brennbarhetsgrenser (vol % i luft)
Hydrogen	H ₂	530	4,0 – 75,0
Metan	CH ₄	540	5,0 – 15,0
Acetylen	C ₂ H ₂	305	2,5 – 100
Etylen	C ₂ H ₄	490	2,7 – 36
Blandingen			3,3

For beregning av nedre brennbarhetsgrense for blandingen se vedlegg 2- Beregning av brennbarhetsgrenser og LOC.

Gassenes innblanding med luft vil avhenge av strømningshastigheten de har ut av transformatorcellen. Ved høye hastigheter vil det bli mer turbulens og innblanding vil være mer effektiv. Ved lave hastigheter kan man oppleve at det ikke blir dannet en eksplosjonsfarlig atmosfære og det kan oppstå en væskebrann inne i transformatoren.

2.5.4 Sekundærexplosjon

En sekundærexplosjon kan føre til store skader på utstyr i transformatorcellen. Cellens omliggende konstruksjoner er også utsatt for skader. Skadeomfanget vil avhenge av blant annet eksplosjonstrykket.



Figur 2.5.4.1 – Sekundærexplosjon

Hydrokarboneksplosjoner kan generere opp til 20 bar overtrykk. Til sammenligning vil et menneske mest sannsynlig dø eller få store skader ved et trykk mellom 0,25 – 1,2 bar.

Når transformatorcellen revner, er det fare for at prosjektiler vil spre seg i cellen. Disse vil utgjøre en fare for mennesker, i tillegg til brann- og eksplosjonsfaren som oppstår.

En transformatoreksplosjon vil mest sannsynlig oppstå som en deflagrasjon. Deflagrasjonen kan medføre høgt trykk i transformatorcellen. Dører, avlastingsflater og annet utstyr kan bli blåst bort. Det maksimale trykket som kan oppnås i cellen ved en deflagrasjon bør beregnes i designfasen og cellen bør dimensjoneres for dette trykket.

Dersom det er tilstrekkelig med obstruksjoner i transformatorcellen, kan disse føre til at turbulensen øker. Dette fører igjen til en økt forbrenningshastighet og det kan oppstå en Deflagration to Detonation Transition (DDT).

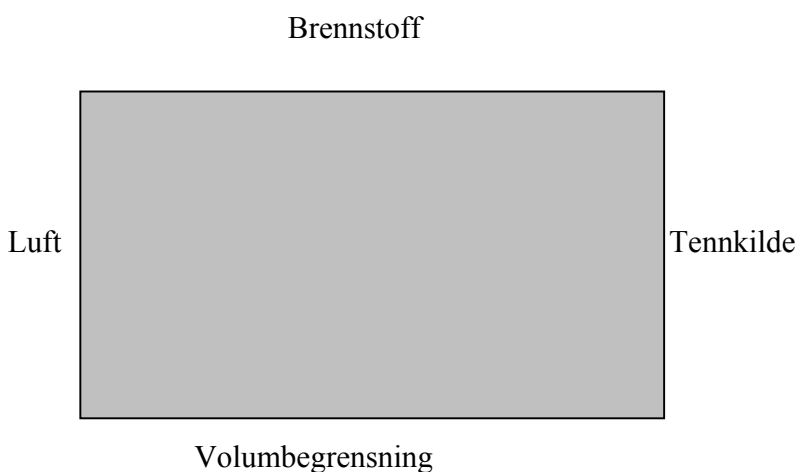
En detonasjon vil kun oppstå direkte hvis en høgeksplosiv ladning går av. Dette vil ikke kunne inntreffe ved normal drift. For at en detonasjon skal inntreffe må det forekomme en deflagrasjon med påfølgende DDT.

Nærmere beskrivelse av detonasjoner og deflagrasjoner følger i neste kapittel.

3 Eksplosjonsteori

I dette kapitlet vil det bli sett nærmere på de prosessene som ligger bak en sekundærekspløsjon i transformatorcellen. Det blir sett på hvilke forutsetninger som må ligge til grunn for at det skal oppstå en eksplosjon. Primærekspløsjonen er en fysikalsk eksplosjon som oppstår på grunn av trykket i transformatorcellen. Det er ikke sett nærmere på denne prosessen i rapporten.

En eksplosjon blir definert som en eksoterm kjemisk prosess som når den forløper ved konstant volum vil forårsake en meget hurtig og betydelig trykkøkning. For å få en eksplosjon er det fire faktorer som må være tilstede[6]. Se figur.



Figur 3.1 Eksplosjonsfirkanten

En typisk tennkilde er en gnist som kan antenne en brennbar blanding med luft tilstede. I et lukket volum vil en trykkøkning bli mye høyere enn ved en eksplosjon i det fri.

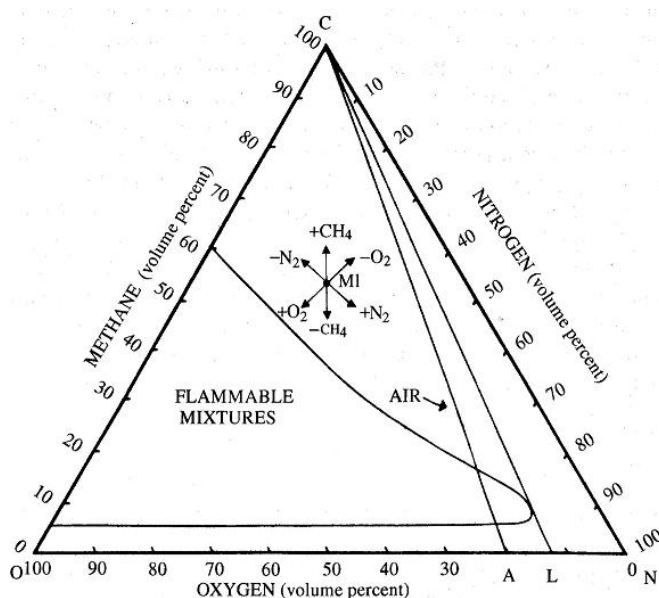
Det finnes to typer eksplosjoner, deflagrasjon og detonasjon.

En deflagrasjon er en forbrenningsfront med forbrenningshastighet inn i det ubrente medium lavere enn lydhastigheten. De fleste eksplosjonsforløp starter som en deflagrasjon som under gitte forhold kan gå over til en detonasjon.

En detonasjon er en eksplosjon der forbrenningsfronten beveger seg igjennom en uforbrent gass/luft-blanding med en hastighet større enn lydhastigheten. Sjokkfronten som beveger seg foran forbrenningsfronten forvarmer gassen, og vi får en umiddelbar antennelse. Trykket ved en detonasjon vil være 2-4 ganger høyere enn maksimalt trykk ved en deflagrasjon.

3.1 Brennbarhetsgrenser

For å få en eksplosjon må blandingen av gass, damp eller væske være blandet med luft i et forhold som ligger innenfor brennbarhetsgrensene. Disse er kalt øvre brennbarhetsgrense(UFL) og nedre brennbarhetsgrense(LFL). En blanding som ligger over øvre brennbarhetsgrense, betegnes som en ”fet” blanding, og blandinger som ligger under nedre brennbarhetsgrense betegnes som en ”mager” blanding. Grensene er som oftest gitt i volumprosent ved 25 °C, men de vil som oftest variere ved endring i temperatur og trykk.



Figur 3.1.1 - Brennbarhetsgrenser for trekomponentssystemet metan/oksygen/nitrogen ved atmosfærisk trykk og 26 °C[4]

Diagrammet viser brennbarhetsgrensene til metan i blanding med nitrogen og oksygen. Metan er en av gassene som blir dannet ved spalting av isolasjonsoljen i transformatoren. Linjen CL som tangerer brennbarhetsområdet til metan viser minimumsmengden oksygen som trengs for å få en brennbar atmosfære.

Den begrensende oksygenmengden(LOC) som følger linjen CL blir nærmere beskrevet i kapitlet Inertisering



3.2 Gasser og damper

Eksplisjonsfaren avhenger av blandingsforholdet mellom gass og luft før antennelse. Etter antennelse propagerer flammen gjennom den brennbare blandingen og vi får oppbyggelse av en trykkbølge som kan være svært skadelig.

Hvis gassen antennes umiddelbart etter at den kommer i kontakt med luft, vil det oppstå en brann da det ikke har dannet seg en eksplosiv gass/luft blanding.

3.3 Støveksplisjoner

En støveksplisjon er en rask forbrenning av en støvsky. Støv er små partikler av fast stoff som, når de er suspendert i luft, vil ha forholdsvis lav sedimentasjonshastighet og derfor holde seg svevende relativt lenge[7].

For å få en støveksplisjon må støvet være brennbar eller ”eksplosivt”. Det må være blandet med luft i et forhold som tillater eksplosjon. En støvhaug som ligger på gulvet kan antennes, men med liten tilgang på oksygen vil den bare ulme eller gløde.

Forutsetningene for en støveksplisjon er:

- Brennbar eller eksplosivt støv
- Støvet må være virvlet opp i luft
- Støvkonsentrasjonen må ligge innenfor eksplosjonsgrensene
- Støvet må ha en fordeling av partikkelstørrelse som tillater flammepropagering
- Brennbar atmosfære
- Tilstedeværelse av en tennekilde

Eksplisjonsgrensene til støv måles i gram per liter luft. Som for gaseksplisjoner er blandingen for mager ved for liten konsentrasjon og for fet ved for høy konsentrasjon.

3.4 Tåkeeksplisjoner

Når brennbar væske under høgt trykk lekker ut i den omliggende atmosfæren, dannes det brennbare tåkeskyer. Dråpestørrelsen er en viktig parameter i eksplosjonssammenheng. Mindre dråper antennes lettere og er mer eksplosive enn store. Dråpene er i konstant bevegelse og når flere dråper krasjer med hverandre, vil dråpestørrelsen øke og dråpene vil se ut som regn hvis de blir tilstrekkelig store.

3.5 Tennkilder

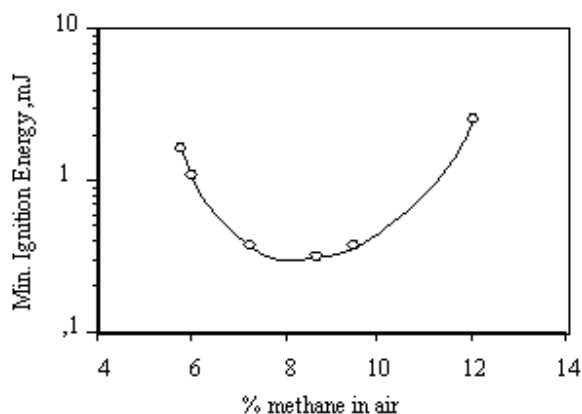
Det trengs svært små mengder energi for å antenne en gass/luft blanding. Energimengden synker etter hvor reaktiv blandingen er. Den laveste energimengden trengs ved støkiometrisk blanding.

De viktigste tennkildene i forbindelse med eksplosjoner er åpne flammer fra for eksempel fyrstikker, varme overflater, brennbare metallpartikler som løsner ved slag, elektriske gnister og stråler av varm forbrenningsgass.

Minimum Ignition Energy(MIE) er den laveste elektriske energiutladning nødvendig for å få antennelse av en eksplosiv atmosfære.

Tabell 3.5.1 - Minimum Ignition Energy for gasser som finnes i blandingen

Gass	MIE
Metan	0,26 mJ
Propan	0,25 mJ
Acetylen	0,02 mJ
Hydrogen	0,01 mJ



Figur3.5.1 - Nødvendig energimengde gitt ved forskjellig volumprosent metan i luft.[8]

Kurven viser hvordan energibehovet for antennelse endrer seg etter blandingsforholdet. Laveste energibehov finner vi på den brennbarhetsrike siden av støkiometrisk blanding.



4 Inertisering

Inertisering baserer seg på fortregning av oksygen til det blir en ikke-brennbar atmosfære. Oksygenkonsentrasjonen i rommet som skal inertiseres må senkes til 10-12 %. Ved denne konsentrasjonen vil de fleste branner dø ut på grunn av oksygenmangel og det vil ikke oppstå branner eller eksplosjoner. Selv om oksygenkonsentrasjonen ikke senkes så lavt vil et lavere oksygennivå gi en effektdemping på flammer og eksplosjoner. For mennesker vil det være en viss fare for kvelning knyttet til å oppholde seg i rom med så lav oksygenkonsentrasjon. OSHA (U.S. Occupational Safety and Health Administration) anbefaler at mennesker ikke oppholder seg i rom med lavere oksygenkonsentrasjon enn 19.5 Vol% uten beskyttelsesutstyr. Dette er bare vel 1 % lavere oksygeninnhold enn oksygeninnholdet i omgivelsesluften.[9]

De mest brukte inertiseringsgassene er:

- Karbondioksid (CO₂).
- Nitrogen (N₂).
- Blandinger av CO₂, Argon (Ar) og N₂.

4.1 Nitrogen

I atmosfæren finnes det rikelig med nitrogen (78 %). Den er ikke giftig. Nitrogen brukes som inertiseringsgass i prosessanlegg, drivstofftanker og lignende lukkede rom for å unngå eksplosjoner. Det følger mange fordeler med å bruke nitrogen som inertgass. Den dekomponeres ikke til skadelige gasser, temperaturen i omgivelsene holdes jevn og den har ingen aldrende effekt på cellulose, isolasjon eller transformatorolje[3]. Nitrogen eliminerer fuktighet og dette vil hjelpe til å øke levetiden til cellulosen som brukes som isolasjon i transformatorene.

De eneste ulempene med å bruke nitrogen som inertiseringsgass er at man forhindrer entring av rommet uten beskyttelsesutstyr, og at man kan få lekkasje av nitrogen i tilstøtende rom. Nitrogen kjøler ikke og dette kan medføre fare for reantennelse.

Tabell 4.1 Inertiseringsgrenser.[10]

Kjemisk navn	Begrensende oksygenkonsentrasjon(LOC) ved nitrogen inertisering
Hydrogen	5 %
Metan	12 %

Limiting oxygen concentration(LOC) er ved det laveste oksygennivået man kan få en eksplosjon. Ved inertisering er det viktig at man kjenner LOC for den aktuelle gassen eller gassblandingen slik at man vet hvor mye inertgass, i dette tilfellet nitrogen, som må tilføres.

For hydrokarboner generelt ligger den begrensende oksygenkonsentrasjonen rundt 10-12 %.



5 Sammenfatning rapport fra ComputIT[11]

Dersom det inntreffer en kortslutning med påfølgende lysbue i en transformator, vil oljen i kassen i hovedsak spaltes til hydrogen og acetylen, men også metan, etylen og karbon vil dannes. Disse gassene vil danne en eksplosiv gassblanding.

Tabell 5.1 – Volumprosent gass i blandingen

Gass	Volumprosent
Hydrogen	60 %
Acetylen	30 %
Metan	5 %
Etylen	5 %

Denne gassblandingen vil ha en tetthet på 687 kg/m^3 . Etter hvert som lysbuen genererer gass, vil trykket i transformatoren til slutt nå 20200 bar. Dette trykket vil føre til at kassen brister, og det vil bli et hull i kassen på ca. $0,02 \text{ m}^2$, hvor den varme gassblandingen og olje vil bli slengt ut med stor hastighet.

Når gassen blandes med den omliggende luften vil den få en temperatur på 950 K. Volumet av den dannede gassen etter ekspansjon til omgivelsestrykket finnes som $0,3 * 10^{-3} \text{ (m}^3/\text{kJ)}$. I beregningene i rapporten er det benyttet et overslag på 50 MJ over 130 millisekund, noe som vil føre til en volumekspansjon på 15 m^3 . Mengden gass som vil dannes er $4 * 10^{-3} \text{ kg/kJ}$. Det vil si 2,5 kg gass.

Olje og fragmenter som slenges ut gjennom hullet i transformatoren, vil oppnå en hastighet på mellom 50 og 100 m/s.

Initiell trykkbølge utenfor transformatorcellen når den brister, vil sannsynligvis ikke bli større enn 0,1 bar. Dette trykket vil kun gi små konsekvenser i transformatorcellen.

En volumekspansjon på 15 m^3 gass vil være håndterbar, men det er selvfølgelig viktig at den varme gassen ikke kommer i kontakt med oksygen, da det kan føre til en sekundær eksplosjon som ikke vil være mulig for oss å håndtere.



6 Produktbeskrivelse og funksjonskrav

For at tiltaket skal fungere er det mange forutsetninger og krav, som stilles til komponentene i løsningen. Kunnskap om transformatorer og rapporten fra ComputIT er kombinert med kunnskap om eksplosjonssikring, for å utarbeide spesifikke funksjonskrav.

6.1 Luft/tetthet

For å forhindre at gassblandingen skal kunne antennes er det viktig at det ikke befinner seg tilstrekkelig oksygen i cellen til at blandingen kan antennes. For å innfri dette skal rommet til en hver tid være fylt med 94-96 prosent nitrogen. Dette skal gjøres ved hjelp av en nitrogengenerator som skiller vanlig luft til hver enkelt komponent gass. Nitrogenet som utvinnes fra luften, blir ført inn i cellen, og oksygenholdig luft blir dermed tatt ut. Nitrogengeneratoren skaper et overtrykk i cellen og forhindrer at gassblandingen får tilført tilstrekkelig oksygen til at den kan antennes[3].

Funksjonskrav: Det skal være 94-96 % nitrogen i cellen.

Det er også viktig at duken ikke slipper ut mer gass enn at rommets atmosfære fortsatt er ubrennbar, for å unngå sekundæreksplosjonen. I tillegg til at innfestningen skal holde duken på plass, må også innfestningen være med på å opprettholde transformatorcellen inert både før og etter primæreksplosjonen

Funksjonskrav: Duken og innfestningen skal være tilstrekkelig tett til at inertisering opprettholdes

6.2 Prosjektiler

Dersom det blir slengt ut prosjektiler i cellen fra transformatoren ved primæreksplosjonen, kan disse føre til at duken blir skadet og rommet ikke lenger holdes inert. For å hindre at dette inntreffer skal det henges en gardin ned fra taket foran duken, som skal fange opp eventuelle prosjektiler.

Funksjonskrav: Gardinen skal stoppe prosjektiler og forhindre skade på duken.

6.3 Materialkostnader

Det er et ønske fra Haugaland Brannsikring A/S at de totale materialkostnadene per enhet ikke overstiger deres satte verdi.

Funksjonskrav: Materialkostnadene per enhet skal ikke overstige 60 000 kroner.

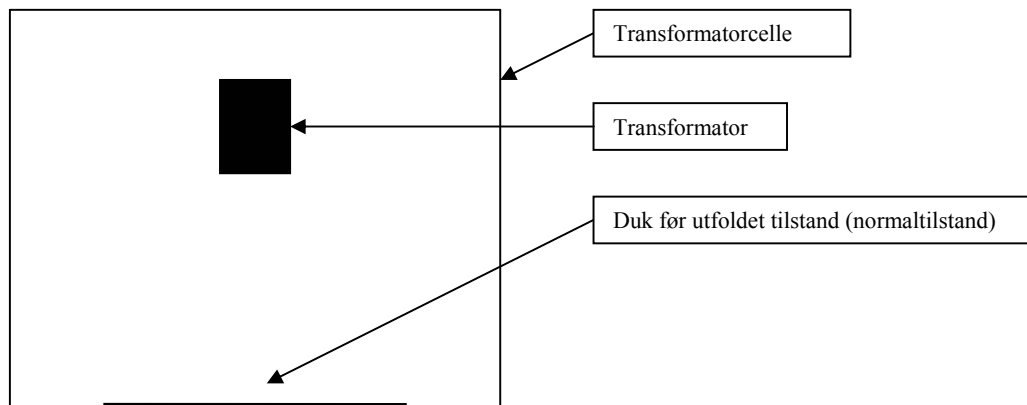
6.4 Sikkerhetssone

Når duken foldes ut gjennom ventilasjonsåpningen, er det viktig at det ikke befinner seg utstyr eller andre obstruksjoner i området utenfor åpningen. Dette for å hindre at duken skades når den foldes ut. En flenge eller et hull i duken vil føre til at cellen ikke lenger er inert, og dermed kan sekundæreksplosjonen inntreffe.

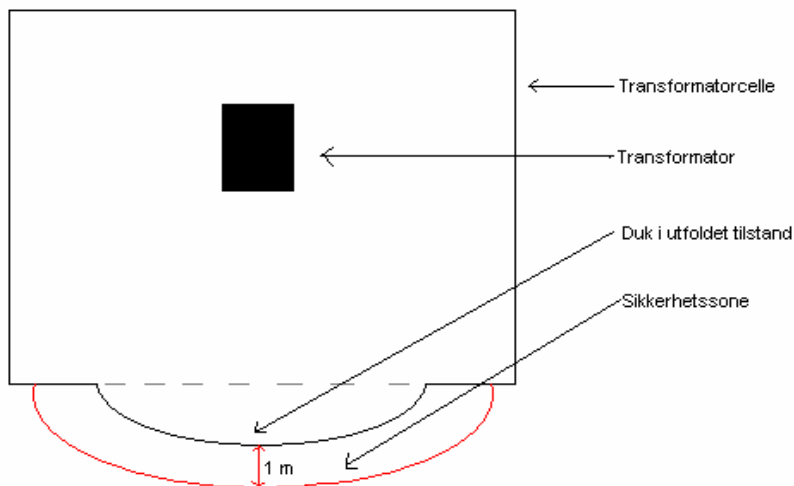
Når duken foldes ut, vil det kunne være personer innenfor dukens utfoldelsesområde. Duken kan dermed være en fare for dem som eventuelt skulle befinne seg i dens bane.

På grunnlag av faremomentene nevnt over er det nødvendig med en sikkerhetssone rundt åpningen. Se figur.

Funksjonskrav: Sikkerhetssonen skal være en meter lenger enn dukens posisjon i utslått tilstand.



Figur 6.4.1 Skisse av transformatorcelle og duk i normaltilstand. Sett ovenfra.



Figur 6.4.2 - Skisse av transformatorcelle med duk i utslått tilstand og markert sikkerhetssone. Sett ovenfra.



6.5 Trykk

Når transformatorkassen revner og gass og olje strømmer ut i cellen, vil det oppstå en volumutvidelse beregnet til 15 m³. Det skal derfor plasseres en duk i ventilasjonsåpningen som kan ta opp denne volumutvidelsen. Videre er det også ønskelig å finne en duk som kan tilfredsstille funksjonskravene ved en større utvidelse. Dette er ønskelig fordi det kan oppstå en lysbue som generer gass over et lengre tidsrom enn det som er beregnet i rapporten fra ComputIT, som er grunnlag for størrelsen på 15 m³. Duken må minst kunne ta opp dette volumet ved utfolding og/eller strekk, og være av en slik kvalitet at den tåler trykket som vil oppstå i rommet.

Funksjonskrav: Duken skal kunne ta opp en volumutvidelse på minst 15 m³.

For at dukens egenskaper skal opprettholdes gjennom hele hendelsesforløpet, er det viktig at innfestingen er av en slik art at den tåler det samme trykket som duken vil bli utsatt for.

Funksjonskrav: Innfestningen skal tåle at duken tar opp en volumutvidelse på minst 15 m³.

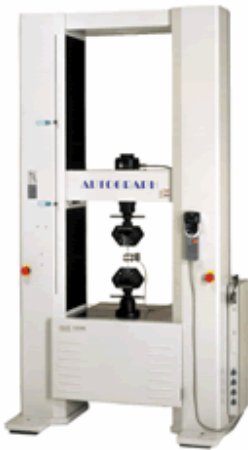
6.6 Temperatur

Gassen og oljen som strømmer ut i transformatorcellen er beregnet til å holde en temperatur på rundt 700 °C når den er blandet med den omliggende luften. Denne temperaturen vil synke raskt på grunn av varmetap til omgivelsene, da det ikke er noen vedvarende forbrenning i cellen. Duken må derfor være av en slik art at dens strekkegenskaper ikke blir forandret ved denne temperaturen, i tillegg til at den ikke må bli ødelagt.

Funksjonskrav: Duken må tåle minst 700 °C i den eksponerte tiden.

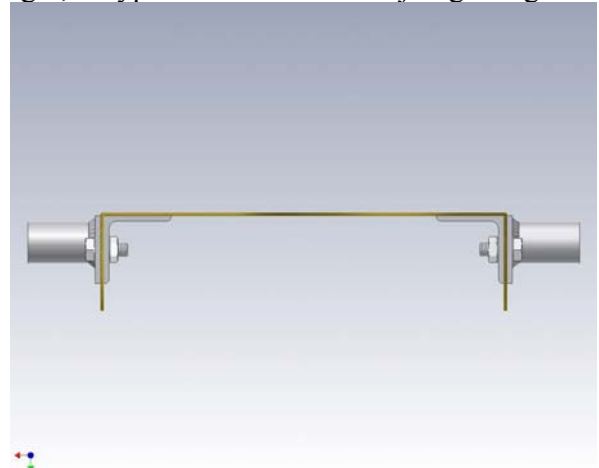
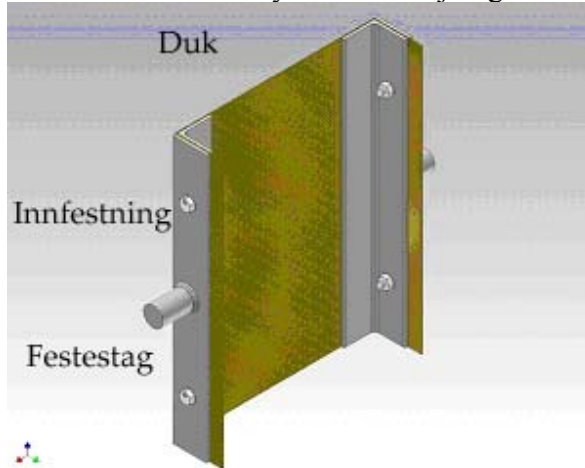
7 Testmetoder

Duken har blitt testet ved Høgskolen Stord/Haugesund i en strekkprøvemaskin. Testen vil gi svar på hvor store strekkrefter duken kan ta opp. Strekkprøvemaskinen, en Shimadzu AG 250 KN, er vanligvis benyttet til å teste kvaliteten av runde eller flate standardprøver av stål og aluminium og lignende. Prøvestykkene av duk og innfestning, som benyttes i dette forsøket, skiller seg vesentlig fra de prøvestykkene strekkmaskinen er dimensjonert for.



Figur 7.1 - Shimadzu AG 250 KN

I forsøket ble det benyttet tre forskjellige innfestninger, to typer duk med tre forskjellige lengder.



Figur 7.2 & 7.3 – Tegning av prøvestykke

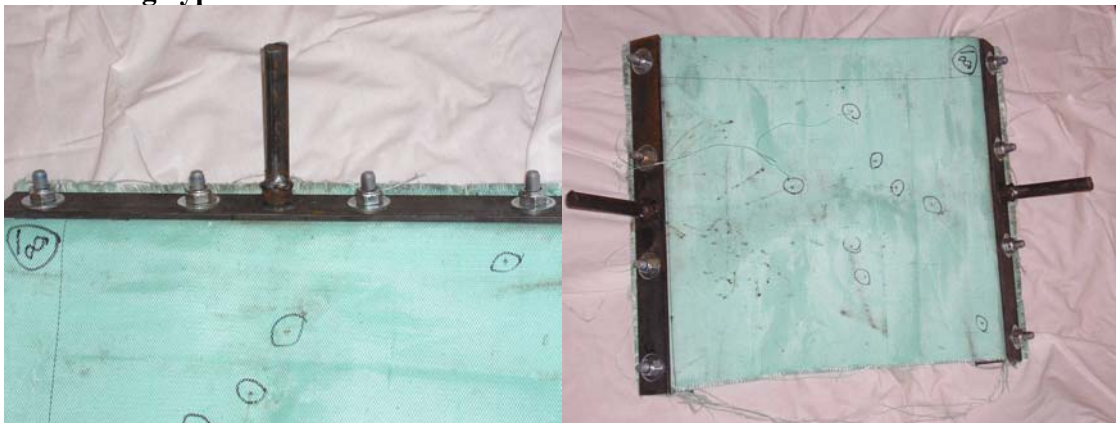
7.1 Testusikkerheter

- Duken er ikke festet homogent på alle prøvestykkene. Det gjør at det ikke blir strekt helt likt over hele duken.
- Festestaget står ikke 90° på innfestningen på alle prøvestykkene.
- Innfestningen er buet på noen av prøvestykkene.
- Noen av prøvestykkene har små sår i duken etter lagring og transport.
- Noen av de doble dukene strakk mer på den ene duken enn den andre grunnet dårlig innfestning.
- Strekkmaskinen strekker ikke jevnt på grunn av at staget er det punktet på innfestningen som blir utsatt for mest krefter.
- Strekkmaskinen er egentlig ment for å teste små prøvestykker i metall.

7.2 Innfestninger

Det ble brukt tre forskjellige innfestninger under forsøkene

Innfestningstype 1



Figur 7.2.1 – Innfestningstype 1

På denne innfestningen er det 11 cm mellom alle festepunktene. Dette gir en jevn belastning over hele innfestningen.

Innfestingstype 2



Figur 7.2.2 – Innfestingstype 2

På denne innfestningen er det 14 cm mellom de innerste og de ytterste festepunktene og 7 cm mellom de innerste. Dette for å forsterke innfestningen rundt festestagget.

Innfestingstype 3



Figur 7.2.3 – Innfestingstype 3

På denne innfestningen er det kun 2 festepunkter. Avstanden mellom disse er 22 cm.

7.3 Duk

De to dukene som ble testet var Protecta Fire Barrier E 120 og EI 30. Forskjellen på disse to er at Protecta EI 30 består av to lag duk med isolasjonslag imellom



Figur 7.3.1 – Protecta Fire Barrier EI30

8 Resultater

Tabell 9.1 – Testresultater

Type duk	Størrelse	Innfestning	Strekk
Dobbel	40 * 40	1	12 kN
Dobbel	40 * 30	1	7,9 kN
Dobbel	40 * 20	1	7 kN
Enkel	40 * 40	1	2,1 kN
Enkel	40 * 30	1	Ikke testet
Enkel	40 * 20	1	7,9 kN

Dobbel	40 * 40	2	7,3 kN
Dobbel	40 * 30	2	Ikke testet
Dobbel	40 * 20	2	5,5 kN
Enkel	40 * 40	2	3,7 kN
Enkel	40 * 30	2	Ikke testet
Enkel	40 * 20	2	Ikke testet

Dobbel	40 * 40	3	Ikke testet
Dobbel	40 * 30	3	Ikke testet
Dobbel	40 * 20	3	4 kN
Enkel	40 * 40	3	3 kN
Enkel	40 * 30	3	Ikke testet
Enkel	40 * 20	3	0,7 kN

Noen av testene kunne ikke gjennomføres da duken var skadet og det ikke blei gitt verdier.

For kort beskrivelse av hvert prøvestykke se vedlegg 3 - Testobservasjoner

Det ble testet en enkel duk og en dobbel duk. Begge dukene ble testet med tre forskjellige innfestninger og i tre forskjellige størrelser(40 * 20/30/40).

Testene viser at det er dobbel duk med innfestningstype 1 som gir de beste resultatene.

Innfestningstype 3 har for stor avstand mellom festepunktene. Under noen av testene slapp duken innfestningen.

9 Tiltak for å hindre sekundær eksplosjon

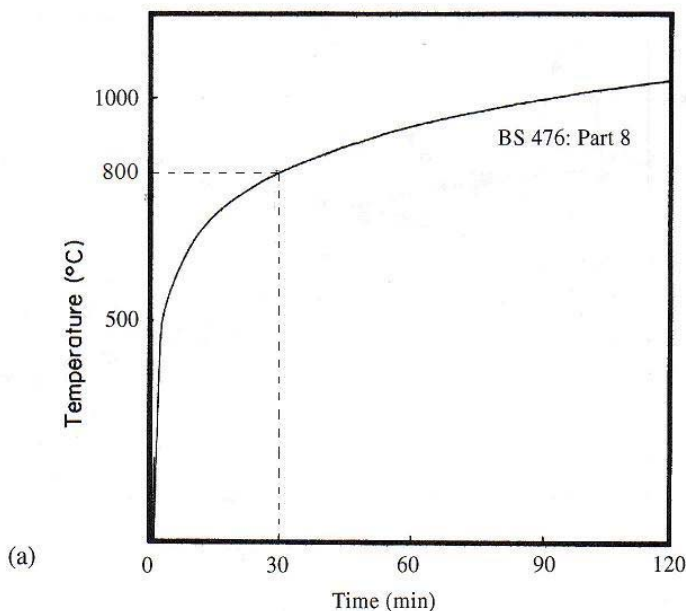
For å hindre en sekundærexplosjon må transformatorcellen holdes inert både før og etter at transformatorcellen revner. Det skal benyttes en duk som skal ta opp trykk og volum for å holde cellen inert etter volumekspansjonen. Etter en lysbue i en transformator er det i hovedsak hydrogen og acetylen som strømmer ut av transformatoren, og disse har et veldig vidt brennbarhetsområde. Derfor er det veldig viktig at cellen forblir inert. Dersom transformatorcellen ikke holdes inert etter primærexplosjonen, vil det kunne oppstå en sekundærexplosjon som ikke er håndterbar.

Det kan oppstå problemer med denne løsningen dersom cellen ikke holdes inert. Det er ikke lagt inn noen tiltak ved en eventuell sekundærexplosjon da denne ikke skal kunne oppstå.

9.1 Duk

Den valgte duken, Protecta Fire Barrier EI 30, består av spesialbehandlet vevet glassfiber og isoleringslag. Duken har brannmotstand E 120 og I 30. Den har svært liten vekt og er lett å montere og behandle. Protecta EI 30 er designet for å hindre gjennomgang av røyk og flammer. Tykkelsen på duken er i underkant av 8 millimeter. Duken er testet i henhold til BS 476, del 20/22 av 1987, ved Warrington Fire Research.

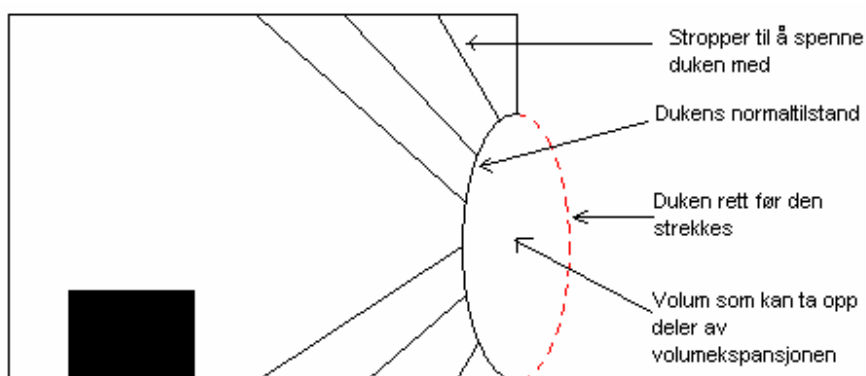
Temperaturen på gass og luft i cellen vil nå 700° C. Denne duken har brannmotstand EI30 og er godkjent for temperaturer høyere enn dette.



Figur 9.1.1 – BS 476, Flammetemperatur[4]

9.2 Spenning av duk

For at duken skal kunne ta opp størst mulig trykk, skal duken i normaltstand være spent innover i transformatorcellen. Dette fører til at duken ikke strekkes før den er foldet ut i motsatt retning, ut gjennom ventilasjonsåpningen, av normaltstand. Ved en primæreksplosjon vil dette volumet, som befinner seg mellom dukens normaltstand og dukens posisjon idet den starter å strekkes, ta opp deler av trykkoppbygningen. En direkte følge av dette er at duken ikke trenger å ta opp hele volumutvidelsen ved hjelp av at duken strekkes.



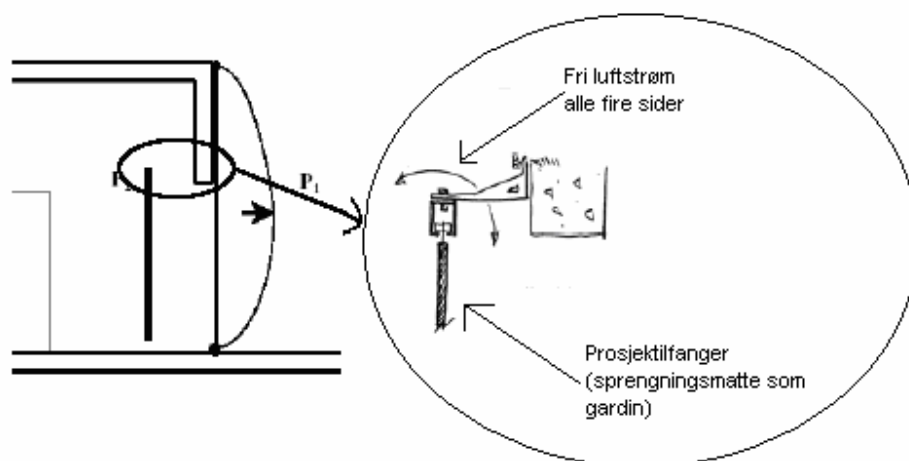
Figur 9.2.1 - Skisse av hvordan duken kan spennes innover i transformatorcellen.

Volumet, som kan ta opp deler av trykkoppbygningen, er også illustrert i figuren over.

9.3 Prosjektilfanger

For å sikre duk og personell for eventuelle prosjektiler, skal det benyttes en prosjektilfanger i transformatorcellen. Prosjektilfangeren skal være en 200-300 kilo tung armert gardin på skinner, som plasseres på innsiden av åpningen foran trykkavlastningsduken. Gardinen skal enkelt kunne skyves til side for adkomst, og skal henge fritt med god luftsirkulasjon rundt alle fire sider. Prosjektilfangeren skal derfor anordnes slik at den ikke tetter åpningen foran avlastningsduken.

I tillegg til å sikre duken mot kutt og gjennomhulling fra prosjektiler, bidrar prosjektilfangeren til å forsinke kontakt mellom gassblandingen og luft dersom duken skulle ryke. Den bidrar også til å forsinke den varme gassblandingen, som frigjøres når transformator-kassen revner, i å nå avlastningsduken. Se figur.



Figur 9.3.1 Skisse av prosjektilfanger



9.4 Innfestning

Det er viktig at kreftene duken blir utsatt for ved en primæreksplasjon i transformator-kassen, blir jevnt fordelt over innfestningen av duken. Dette vil være med på å oppnå størst mulig styrke på innfestningen. Dersom det er større krefter i et punkt på innfestningen, vil dette føre til at innfestningen og duken kan bli deformert tidligere enn det som er optimalt.

Ved å feste duken på en list, vil kreftene i innfestningen bli jevnt fordelt over alle sidene, noe som gjør at duk og innfestning må utsettes for maksimalt med krefter før de ryker.

Det er også en fordel at belastningen som duken blir utsatt for ved primæreksplasjonen blir jevnt fordelt ut over duken i innfestningen. Ved å feste duken til åpningen punktvis vil dette føre til at kreftene som virker på duken, er større i innfestningspunktet enn punktet rett ved siden. Dersom det forekommer større krefter på deler av innfestningspunktene til duken vil dette føre til at duken revner tidligere enn ved jevn belastning. Derfor er denne typen innfestning en god løsning for å benytte dukens egenskaper maksimalt.

Innfestningen som er valgt er anbefalt av leverandøren av duken, men med en større dimensjon for å gjøre den sterkere. Testingen viser at jevn avstand mellom festepunktene gir best resultat.



9.5 Ventilasjon av gassblanding

Etter at primæreksplosjonen har inntruffet, og påfølgende sekundæreksplosjon er forhindret, vil atmosfæren i transformatorcellen kunne bli eksplosiv dersom den kommer i kontakt med luft. Gassblandingen må derfor ventileres ut av cellen før man kan være sikker på at sekundæreksplosjonen ikke kan inntreffe. Dette kan gjøres ved hjelp av et ventilasjonsanlegg som ventilerer gassblandingen ut i friluft.

Det er ikke kjent hvordan gassblandingen vil oppføre seg i cellen, når den kommer i kontakt med nitrogen. Om gassblandingen vil blandes med nitrogenet eller om den vil skilles ut fra nitrogenet er ikke sett på i denne rapporten. Dersom gassblandingen skilles fra nitrogenet, kan det inntreffe at den kommer ut i friluft uten innblanding av nitrogen. Derfor må ventileringen av cellens atmosfære behandles med stor forsiktighet.

Når blandingen ventileres ut, vil den etter hvert komme under nedre brennbarhetsgrense i luft, som er 3,2 volum % (Jf. Tabell 2.5.1), på grunn av den rikelige tilgangen på luft. Selv om blandingen vil bli for mager til at den kan antennes, vil den kunne antennes over et lite tidsrom. En antennelse av blandingen i friluft vil ikke kunne føre til like omfattende skader som en sekundæreksplosjon inne i cellen. Dette kommer av at det ikke vil kunne dannes noen stor trykkoppbygning i et stort åpent volum. Det er forutsatt at blandingen ventileres ut direkte til friluft, hvor det ikke forekommer obstruksjoner som kan skape turbulens med påfølgende trykkdannelse.

I tillegg til at blandingen raskt blir for mager må den ha en antennelseskilde for at den skal kunne utgjøre en fare for omgivelsene. Det svært viktig at stedet blandingen ventileres ut ikke er i nærheten av utstyr som kan være potensielle antennelseskilder.



10 Diskusjon

Test av duken viser at en dobbel duk festet med innfestningstype 1 er det beste alternativet. Prøvestykkene som ble brukt i testen, er mye mindre enn duken som skal festes i ventilasjonsåpningen. For nesten alle testene tålte duken mer strekk for de største prøvestykkene. Dette tyder på at duken tåler mer strekk etter hvert som størrelsen på duken økes.

Under alle testene raknet duken ved innfestningen. Dette sett i sammenheng med at de største stykkene tålte mest strekk, er med på å bygge opp under påstanden om at en større duk vil tåle en større strekkraft.

Det er en del usikkerheter forbundet med testene som ble gjennomført. Noen av de viktigste er at duken ikke er innfestet homogent, skader på duken og ujevn kraftfordeling. Usikkerhetene fører til at duken blir utsatt for større strekk enn ved et reelt tilfelle. Dersom duken hadde vært uskadd, homogent innfestet og utsatt for jevn kraftfordeling ville resultatene fra testen vært mer nøyaktige.

Ved å gjennomføre en fullskalatest, ville man fått svar på om løsningen til Haugaland Brannsikring A/S klarer å holde transformatorcellen inert eller ikke. En slik test ligger utenfor dette prosjektets rekkevidde, og er dermed ikke gjennomført, men ville med større nøyaktighet enn den gjennomførte testen gitt svar på om løsningen holder mål.

Dersom cellen ikke holdes inert hele tiden, vil det oppstå fare for en sekundær eksplosjon. Da inertisering og trykkavlastingsduken er de eneste kompenserende tiltakene i transformatorcellen, vil denne kunne være svært ødeleggende og dødelig for mennesker i nærliggende områder. For å kunne benytte seg av tiltaket til Haugaland Brannsikring A/S er man nødt til å utelukke andre tiltak som benyttes til eksplosjonssikring, som avlastingsflater eller muligheten til eksplosjonsundertrykking.

En mangel på kompenserende tiltak kan anses som risikabelt, men dersom det bevises at duken i løsningen kan ta opp en volumutvidelse på minst 15 m³, vil denne løsningen være god nok.

Ved hjelp av en gassdetektor kan nitrogennivået i cellen kontrolleres kontinuerlig. Det vil si at dersom nitrogennivået synker, kan tiltak for å øke nivået raskt igangsettes. Selv om nitrogengeneratoren overvåkes kan det oppstå en brennbar atmosfære i cellen. Nitrogengeneratoren kan slutte å fungere, eller det kan komme oksygen inn gjennom utettheter i cellen eller hull i duken. Det er meget viktig at det ikke kan oppstå en brennbar atmosfære i cellen hvis dette tiltaket skal benyttes.

Vedlikehold og kontroll av løsningen er svært viktig for å kunne avdekke feil og mangler på et tidlig stadium, som gjør det mulig å igangsette forbedrende tiltak så raskt som mulig.



Prisen på avlastningsduken og innfestning er ganske rimelig, men en nitrogengenerator fører til at prisen på tiltaket går kraftig opp. I en transformatorhall er personsikkerhet førsteprioritet, og de forskjellige tiltakene må ikke vurderes opp mot kost/nytte hvis det går på bekostning av personsikkerheten.

I rapporten fra ComputIT er beregningene basert på en lysbue som varer i 130 ms. Hvis lysbuen genererer lengre vil det kunne bli en annen sammensetning av gass og trykket i transformatoren kan bli høyere. Et høyere trykk i transformatoren vil gi en gasstrøm med høyere hastighet, noe som igjen fører til bedre innblanding med luften i transformatorcellen. Størrelsen på riften i transformatorcellen kan og spille inn på strømningshastigheten.

Den valgte løsningen innebærer at duken er spent innover i transformatorcellen ved normaltilstand. Dette er ikke tatt hensyn til i rapporten fra ComputIT. Ved å spenne duken innover i cellen endres rommets volum og geometri. Selv om endringen er relativ liten i henhold til cellens dimensjoner, kan dette medføre at resultatene blir noe annerledes enn fra den utarbeidede rapporten til ComputIT.

Lysbuen som oppstår i transformatoroljen, kan også oppstå i transformatorens omgivelser. Dette vil skape en mye større trykkbølge, men det vil ikke oppstå brann og det er ikke sett på noen løsninger for å ta opp dette trykket.

I rapporten fra ComputIT er det sett på elektrisk overslag i luft og olje som to isolerte hendelser. Det er ikke sikkert at lysbuen vil oppstå enten i luft eller olje. Det kan inntreffe at lysbuen oppstår ved inngangen til transformatoren, det vil si i grensesjiktet mellom olje og luft. Et slikt tilfelle kan føre til langt større trykkdannelser, enn hva tilfellet er dersom den oppstår i oljen, som krever konstruksjoner med stor trykkmotstand.

Det er stor forskjell på om lysbuen oppstår i luft eller i olje, dermed er det grunn til å ta høyde for at en lysbue i grensesjiktet kan være mer alvorlig enn lysbuen, midt i oljen, som er sett på i denne rapporten. En annen hendelse som kan inntreffe er at det oppstår en lysbue i mindre oljefylte komponenter av transformatoren. Det er ikke sett på om det er forskjellig trykkoppbygning i disse to tilfellene.



11 Konklusjon

Testing av duken og vurderinger i forhold til de satte funksjonskrav har vist at den doble duken og innfestningstype 1 kan brukes videre under utviklingen av Haugaland Brannsikring A/S sitt konsept for transformatorsikkerhet.

Duken må behandles med stor forsiktighet for å unngå skader. Skadene kan føre til at duken strekkes ujevnt, noe som fører til at duken kan ta opp mindre trykk. I verste fall kan skadene føre til at duken ikke klarer å holde cellen inert.

Et av hovedkriteriene for at dette tiltaket skal fungere er at cellen blir holdt inert kontinuerlig. Dette er en faktor som er veldig viktig at blir tatt med i de videre vurderingene av tiltaket. En sekundær eksplosjon vil, uten noen form for begrensende tiltak, gjøre store skader på, så vel materiell som personell.

I det videre arbeidet må det utarbeides en beskrivelse av hvordan duken skal spennes opp for å kunne ta opp størst mulig trykk. Det anbefales en fullskalatest for å få nøyaktig svar på om duken, innfestningen og en eventuell beskrivelse av oppspenning av duken holder cellen inert.



12 Referanser

- [1] Sikkerhetstiltak mot eksplosjon og brann i kraftanlegg(SEBK)(2002), Norconsult
- [2] <http://www.fysikknett.no/superledning/bilder>
- [3] Jan Arvid Sandvik(2004), *Eksplosjonssikring av transformatorer – Masteroppgave ved HiS*
- [4] Dougal Drysdale(2003), *An introduction to fire dynamics, 2nd ed.* , John Wiley & Sons, London
- [5] Arthur E. Cote(Editor)(2003), *NFPA Fire Protection Handbook 19th ed.* , NFPA, Quincy
- [6] Rolf K. Eckhoff(1996), *Elektrisk utstyr for eksplosjonsfarlige områder : en innføring i eksplosjonsfenomener, tenningsmekanismer og derav følgende prinsipper for utforming av eksplosjonsbeskyttet elektrisk utstyr*, Tapir, Trondheim
- [7] International Organization for Standardisation (ISO) 4225 *Air quality -- General aspects -- Vocabulary*
- [8] <http://www.gexcon.com/handbook>
- [9] <http://nbl.sintef.no/handbok/kap5.htm>
- [10] Robert Zalosh(2002), *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd ed. cpt. 3-16 Explosion protection*, SFPE, Quincy
- [11] Konfidensiell rapport fra ComputIT



13 Vedlegg

1. Forkastede løsninger
2. Beregning av brennbarhetsgrenser og LOC
3. Testobservasjoner
4. Definisjonsliste



Vedlegg 1 - Forkastede løsninger

Testmetoder

Vindtunnel

For å få testet slitestyrken til duken var det ønskelig å få testet duken ved hjelp av en vindtunnel. Prinsippet går ut på å sende luft i høy hastighet mot duken, for å se hvilke krefter duken tåler før den revner. Dersom duken hadde vært innfestet med samme innfestning som skal benyttes i prosjektet, kunne man da i tillegg testet innfestningen. Denne testmetoden ble ikke aktuell på grunn av manglende informasjon om testmetoden.

Skalering

En annen testmetode for å få testet styrken på duken var å skalere ned en transformatorcelle, for deretter å utsette et prøvestykke av duken i dette rommet for samme trykk som er beregnet i rapporten fra ComputIT. Transformatorcellen er opprinnelig 280 m³ stor. Åpningen som duken skal dekke er 4 * 6 meter. Det ville derfor vært ønskelig å skalere dette rommet ned til 10 % av det originale rommets størrelse, for å spare tid og materialutgifter i forbindelse med selve byggingen av testrommet. Selv om man får en tilsvarende trykkoppbygning i det nedskalerte rommet, er det ikke sikkert at kreftene som duken blir utsatt for er tilsvarende kreftene duken ville blitt utsatt for i den reelle cellens dimensjon. I tillegg vil et mindre prøvestykke av duken få en ulik krumningsradius enn duken i reell størrelse ville fått. En mindre krumningsradius ville ført til forskjellige aksialkrefter i duken, og dermed ville disse verdiene mest sannsynlig ikke være sammenlignbare. Denne ideen ble dermed forkastet på grunn av at nedskalering fører til en rekke usikkerhetsmomenter, som vanskelig kan kompenseres for ved hjelp av konservative faktorer i omregninger av størrelser.

Fullskalatest

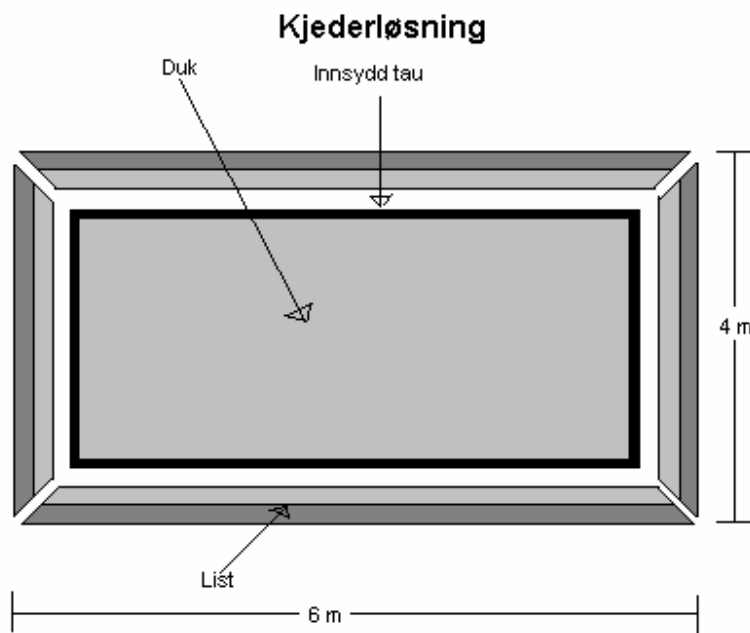
Den beste metoden å teste løsningen til Haugaland Brannsikring A/S på er å gjøre et forsøk i fullskala. Da kunne man installert avlastningsduken, prosjektilfangeren og nitrogengeneratoren i et rom med tilsvarende dimensjoner som en reell transformatorcelle. Ved å overholde de satte funksjonskravene, og ved å skape en trykkoppbygning som tilsvarer primærekspløsjonen, kunne man testet om avlastningsduken klarer å holde cellen inert.

Det vil ikke være noe stort problem å skape en trykkoppbygning tilsvarende primærekspløsjonen. Selv om en fullskalatest ville gitt et mer konkret svar på om løsningen er god nok, er det på grunnlag av manglende tid og ressurser ikke gjennomført en slik test. De begrensede faktorene er dermed at en fullskalatest vil være svært ressurs- og tidkrevende. Ved videre arbeid med eksplosjonssikring av transformatorer ville det vært interessant og lærerikt å gjennomføre en slik fullskalatest.

Innfestning

Kjederløsning

I denne innfestningen syr man inn et tau i sidekantene på duken. Den innsydde taukanten tres deretter inn i lister som festes på alle de fire sidene av den 4 * 6 meter brede åpningen. I listen er det frest ut spor som taukanten skal ligge inni.



Figur 10.2.1 - Skisse over innfestningsmetoden kjederløsning.

Det finnes en rekke lister/skinner på markedet. Det er blant annet flere aluminiumslister, som allerede er i produksjon, som blant annet benyttes innen seiling. Det er ønskelig at listen skal ha en slags lippe som det er mulig å skru listen til kantene i åpningen.



Figur 10.2.2 – Forskjellige innfestningslister



En av fordelene med kjederløsningen er at når duken er spendt inn mot transformatoren i cellen, vil kanten presses mot utgangen av listen. Dermed vil minimalt med luft sive inn i cellen via innfestningen. I tillegg vil det være et overtrykk i cellen, noe som hindrer at luft som ellers ville sive inn via innfestningen, kommer helt inn i cellen. Dermed er denne løsningen egnet til prosjektet med hensyn til at cellen skal holdes inert både før og etter primærekspløsjonen.

Selv om dette er en innfestningsmetode som egner seg til dette prosjektet, ble den forkastet da det ikke finnes noe data på hvor lufttett denne innfestningen egentlig er.

Glidelås

For at transformatorcellen skal holdes inert er det viktig at duken blir festet til veggen på en slik måte at det ikke kan komme luft inn i cellen. Det er utviklet solide glidelåser til blant annet presenninger som brukes offshore. Disse kan ikke benyttes som innfestning i dette prosjektet, da de ikke er tilstrekkelig tette til å holde cellen inert.

Knyting

En annen alternativ innfestningsmetode som ble vurdert var knyting ved hjelp av tau. Dette er mye brukt til å spleise seil, presenninger og lignende, men er ikke et særlig godt alternativ for dette prosjektet da heller ikke denne løsningen er tilfredsstillende tett.



Duk

Ballongform

Det ville vært positivt dersom duken kunne blåse seg ut tilsvarende en ballong. Den største fordelen vil være at man da får et nesten helt kuleformet volum som skal ta opp trykkoppbygningen. Fordelen med en kule er at aksialkreftene i duken blir så små som mulig. En annen fordel er at ventilasjonsåpningen reduseres betraktelig. Det er da mulig å feste denne ballongen over et relativt lite åpningsareal, som er betraktelig mindre enn $4 * 6$ meter. Med denne åpningen vil materialkostnadene på duk gå ned. Problemet er å få tak i en duk med egenskap til å oppføre seg som en ballong samtidig som at den skal tåle høge temperaturer. Det viste seg vanskelig å få tak i et slikt materiale og ideen ble forkastet.

Trommeskinn

Dersom man bare strekker duken over ventilasjonsåpningen uten å gi den noen form for slakk, ville duken oppføre seg som et trommeskinn. En fordel med dette er at man sparer en del materialkostnader på grunn av færre kvadratmeter duk i åpningen. Det er derimot negativt i forhold til at aksialkreftene i duken blir mange ganger større enn tilfellet med kuleformet duk. Dermed vil duken ryke ved mye lavere trykk. Derfor er ikke dette alternativet særlig egnet.

Foldet

Etter hvert som valget falt på å spenne duken innover i cellen, ble det diskutert om det var mulig å folde duken på en eller annen måte istedenfor å strekke duken. Denne metoden ble forkastet på grunn av at dersom duken er spent innover i rommet, har man "kjøpt" et volum som kan ta opp deler av volumutvidelsen før duken begynner å strekkes. Dette ville ikke forekommet dersom duken var foldet. I tillegg blir det å folde duken en stor utfordring, noe man ikke trenger tenke på ved å benytte løsningen som ble valgt.



LOC for gassblandingen

Det er gjennomført en beregning av hvor mange prosent nitrogen som må tilføres i transformatorcellen for at gassblandingen ikke skal kunne antennes. Denne verdien ble beregnet til 84,2 % N₂. Denne beregningen er gjort på grunnlag av adiabatisk begrensende flammtemperatur. Begrensende flammtemperaturen er oppgitt til 1500-1600 K [4]. For fullstendig beregning se vedlegg 1 - ?

Formel for adiabatisk begrensende flammtemperatur: $T_f = T_o + n\Delta H_c / \sum n_i C_{p_i}$

Det er en del usikkerhetsmomenter rundt denne verdien. Beregningen gir at blandingen har en LOC lik 15,8, noe som ikke stemmer med de LOC verdier for hydrokarboner som er nevnt tidligere i rapporten under kapittelet om inertisering. Der er LOC for hydrogen oppgitt til å være 5 %. Gassblandingen består i hovedsak av 60 % hydrogen og 30 % acetylen. For acetylen er det ikke oppgitt noen LOC verdi. Dette kommer av at acetylen er en gass som ikke trenger å tilføres oksygen for at den skal kunne eksplodere. Det er store spenninger mellom molekylene, og dersom molekylene spaltes utvikles det tilstrekkelig energi til at gassen kan eksplodere uten tilførsel av oksygen. På grunnlag av dette er det urimelig å anta at LOC verdien for blandingen, som i hovedsak består av hydrogen og acetylen, er så stor som 15,8 %.

Et annet usikkerhetsmoment er at LOC for hydrokarboner generelt ligger fra 10-12 %. Dette stemmer ikke i henhold til den beregnede verdien på 15,8 %.

I tillegg til usikkerhetsmomentene nevnt over, er det en del usikkerhet rundt verdiene for brennbarhetsgrensene til de forskjellige gassene i blandingen. Det er i dag flere metoder som benyttes til å bestemme brennbarhetsgrensen til en gass. Den ene av de to mest anerkjente er US Bureau of mines apparatus, som måler brennbarhetsgrensen ut fra å måle flammelengden som dannes når gassen tilføres en gnist eller liten flamme. Den andre beregner brennbarhetsgrensen på grunnlag av trykkdannelse. Brennbarhetsgrensene fra disse to måleapparatene er ikke entydige. For hydrogen er det en faktor 2 på forskjellen mellom brennbarhetsgrensen målt i de to apparatene. Brennbarhetsgrensen var henholdsvis 4 % og 8 % i de to apparatene, noe som tyder på at det er store usikkerhetsmoment i forbindelse med å fastslå brennbarhetsgrensen til en gass[4].

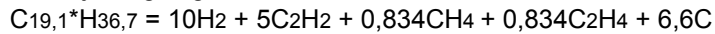
Videre er det oppgitt at transformatorcellen skal være fylt med 94-96 % nitrogen til enhver tid for at gassblandingen ikke skal kunne antennes[3].

På grunnlag av disse usikkerhetsmomentene er det valgt å benytte en nitrogenkonsentrasjon i cellen på 94-96 %. Dette er den mest konservative av de alternativene som er sett på, og gir dermed størst sikkerhet. Nitrogengeneratoren som skal plasseres i cellen har kapasitet til å produsere en renhet på 99,9 prosent nitrogen. Dermed er det ingenting som tilsier at den valgte verdien, skal være problematisk å overholde[3].



Vedlegg 2 Beregning av brennbarhetsgrenser og LOC

Reaksjonsligning



Gasblandingens komponenter

H ₂	Hydrogen
C ₂ H ₂	Acetylen
CH ₄	Metan
C ₂ H ₄	Etylen
C	Karbon

Vol % av blandingen

60 H ₂	4 %vol
30 C ₂ H ₂	2,5 %vol
5 CH ₄	5 %vol
5 C ₂ H ₄	2,7 %vol

Komponentenes brennbarhetsgrenser i luft

Denne komponenten blir sett bort fra i beregningen

Nedre brennbarhetsgrense av blandingen L.F.L.M. (lower flammability limit mixture)

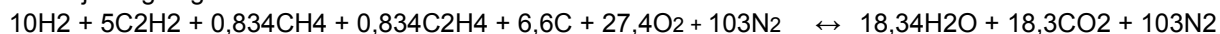
$$L.F.L.M. = 100 / \sum(\pi/Li)$$

$$L.F.L.M. = 3,34987593 \text{ %vol}$$

Nedre brennbarhetsgrense av gassblandingen i luft er 3,35 volumprosent

**Beregning av hvor mye nitrogen som må tilføres blandingen for at den skal bli ubrennbar**

Reaksjonsligning

Finner $\Delta H_c(\text{blanding})$

$$\Delta H_c(\text{blanding}) = n\Delta H_f(\text{H}_2\text{O}) + n\Delta H_f(\text{CO}_2) + n\Delta H_f(\text{N}_2) - \sum n\Delta H_f(\text{reaktant})$$

$$\Delta H_c(\text{blanding}) = -12752,4036 \text{ kJ}/23,268\text{mol}$$

$$\Delta H_c(\text{blanding}) = 548,066 \text{ kJ/mol}$$

Stoff	Antall mol	C_p	nC_p
CO ₂	18,3	54,3	993,69
H ₂ O	18,34	41,2	755,608
N ₂	103	32,7	3368,1
N ₂	x	32,7	X*32,7
ΣnC_p	5117,398	[J/K]	pluss X*32,7 [J/mol.K]

$$T_f = (n\Delta c)/(\Sigma nC_p)$$

$$X = 167,95 \text{ mol}$$

$$\text{Fortynning} = 0,84245907$$

84,2 % N ₂ må innføres i cellen for at blandingen ikke skal være brennbar
--



Vedlegg 3 – Testobservasjoner

Prøvestykke	Innfesting, duk, lengde	Testobservasjoner
1	1, Dobbel, 40 cm	Festestag røyk og innfestning bøyd før det skjedde noe med duken
2	3, Enkel, 40 cm	Duken revnet nede til venstre. Sklidd ut av innfestning på midten oppe og nede
3	1, Dobbel, 20 cm	Duken revnet hele oppe bak og venstre og høyre nede på fremsiden. Innfestningen svakt bøyd
4	1, Dobbel, 30 cm	Duken revnet hele oppe på begge sider. Innfestning svakt bøyd oppe og nede
5	2, Enkel, 40 cm	Duken revnet i innfestingskant nede til høyre.
6	1, Enkel, 30 cm	Duken løsnet nede til venstre
7	1, Enkel, 20 cm	Duken revnet oppe til høyre og i midten, og nede på begge sider
8	3, Dobbel 20 cm	Duken revnet høyre og venstre oppe, midt på nede. Det er og slitasje i skruerpunktene på fremside. Innfestningen har bøyd seg oppe og nede.
9	2, Dobbel, 20 cm	Duken revnet langs hele innfestningen nede og oppe til venstre
10	3, Enkel, 20 cm	Duken løsnet i innfestningen nede til venstre
11	3, Dobbel, 30 cm	Innfestningen holder ikke igjen duken så duken kan ikke testes
12	2, Dobbel, 40 cm	Duken har revnet hele oppe
13	2, Enkel, 20 cm	Sklidd ut av innfestning oppe til høyre
14	2, Enkel, 30 cm	Ikke testet grunnet hull i duk
15	2, Dobbel, 30 cm	Ikke testet grunnet hull i duk
16	3, Enkel, 30 cm	Ikke testet grunnet hull i duk
17	3, Dobbel, 40 cm	Ikke testet grunnet hull i duk
18	1, Enkel, 40 cm	Ikke testet grunnet flere små hull i duken etter sveising



Vedlegg 4 - Definisjonsliste

Adiabatisk begrensende flammtemperatur	Flammtemperatur hvor all energi i reaksjonen går med til å varme opp flammen. Ingen energi blir tapt til omgivelsene.
Spenning	Kraft per flateenhet mellom et elastisk materiales enkelte deler når materialet belastes med ytre krefter.
Driftstemperatur	Den temperaturen som transformatoren drives med til daglig.
EI- klassifisering	Brannklassifisering som forteller hvor stor evne bygningsdelen har til å hindre at brannen smitter gjennom delen fra den branneksponte siden som følge av gjennomtrengning av og/eller varme gasser (E), og varmeledning (I).
Forbrenningsfront	Fronten av flammen i forbrenningssonen.
Kabelmuffe	Skjøtestykke for kabler.
Lysbue	En lysende, buet strømbane som går mellom to strømførende metall- eller kull- stifter i luft.
Oksidasjonsprosesser	Biokjemiske prosesser som foregår ved opptak og kjemisk binding av oksygen, eller ved avgivelse av hydrogen.
Propagering	Forbrenning med klart definerte soner; reaksjonssone, område med uforbrent brennstoff og sone med reaksjonsprodukter.
Sedimentasjonshastighet	Hastigheten partikler skilles ut fra en løsning med.
Elektrisk spenning	Det arbeid som må utføres per ladningsenhet for å forskyve en ladning fra et punkt til et annet i et elektrostatisk felt.
Støkiometrisk blanding	Blandingsforholdet mellom brensel og oksygen (luft) er balansert slik at det ikke vil eksistere brensel eller oksygen etter forbrenning.
Suspendert	Ett stoff som er blandet med et annet stoff, men ikke oppløst i det.
Turbulens	Strømning deles inn i laminær og turbulent strømning. Ved laminær strømning strømmer fluidet i lag, mens turbulent strømning karakteriseres ved uregelmessig bevegelse (virvler).
Vekselstrøm	Elektrisk strøm som skifter retning periodisk, slik at det i gjennomsnitt går like mye strøm i begge retninger langs en leder.