

Multiple barrierer i inhomogene luftgap ved lynoverspenninger

Jan-Henrik Solbakken

Master of Science in Electric Power Engineering

Innlevert: juni 2013

Hovedveileder: Frank Mauseh, ELKRAFT

Medveileder: Atle Pedersen, SINTEF

Noregs teknisk-naturvitskaplege universitet
Institutt for elkraftteknikk

Problemstilling

Dagens klimautfordring har gjeve auka fokus på å minska forbruket av klimagassar som SF₆-gass. Gassisolerte høgspentanlegg har vore eit fokusområde for produsentar av høgspenutstyr i lengre tid fordi SF₆ har betre haldfastheit enn luft. Det er difor ei utfordring for elektroingeniørar å laga like kompakt utstyr utan SF₆-gass. Ein mogeleg måte å oppnå auka overslagsspenning på er introdusera isolasjonsbarrierar i gapet slik at lengda på ein eventuell streamer vert lengre, og dermed kan overslagsspenninga bli høgare. Det er også venta at ladingsakkumulasjon på barrierane fører til endring av det elektriske feltet i gapet.

I ein slik designprosess er det vanleg å nytta elementanalyse (FEM-analyse) for å rekna ut den elektrostatiske feltstyrken på dei ulike komponentane i utstyret. Men det er ikkje nok å berre vita den elektrostatiske feltfordelinga for å fastslå overslagsspenninga. Det er også naudsynt å modellera utladningsprosessen, noko som inkluderer initiering og utbreiing av streamerane. Derfor er det starta forskingsforsøk som tek sikte på å utarbeida numeriske prosedyrar for å kunna rekna ut streamerane si åtferd.

Hovudtema for dette prosjektet vil vera å studera initiering og utbreiing av streamere langs isolasjonsbarrierane. Arbeidet vil vera samansett av laboratoriearbeid samt elektromagnetiske simuleringar av overslag i eit inhomogent luftgap med multiple barrierar. Samanlikningar av resultata vil verta brukt som designkriterier for å kunne vurdere overslagsspenninga i inhomogene luftgap med multiple barrierar.

Dette prosjektet vil verta utført i samarbeid med ABB Skien i Norge, og ABB corporate reasearch i Daetwill i Sveits.

Forord

Formålet med denne masteroppgåva er å eventuelt kunna føresjå og forklara endringar i overslagsspenninga når multiple barrierar vert introdusert i eit stang-plate arrangement. Rapporten inneheld relevant teori om streamermekanismen og effekten av barrierar samt eit samandrag av resultat som er presentert i tabellar og figurar.

Eg vil først og fremst få takka førsteamanuensis ved NTNU Frank Mausest for framifrå rettleiing gjennom semesteret. I same andedrag vil eg også nemna forskingsleiar Atle Pedersen ved SINTEF Energi og seniorforskar Andreas Blaszczyk ved ABB Corporate Research for deira verdifulle innspel og gode diskusjonar i samband med denne oppgåva. Verkstadgjengen ved NTNU fortener også ei takk for rask og god handsaming av mine ynskje om design av arrangementet som vart nytta i oppgåva.

Eg ynskjer også å takka mine medstudentar for å ha skapt eit triveleg miljø både på kontoret og elles utanfor universitetet sine veggar gjennom studietida.

Sist men ikkje minst må eg takka mine foreldre for deira uvurderlege stønad gjennom mine år som student.

Trondheim 17.06.2013



Jan-Henrik Solbakken

Samandrag

Føremålet med dei utførte forsøka i denne masteroppgåva er å kunna føresjå og forklara endringar i haldfastheita når multiple barrierar er nytta som isolasjon i eit stang-plate-gap.

Forsøka vart utført med positiv lynimpulsspennning der opp og ned-metoden vart nytta for å finne haldfastheita U_{02} (2 % sannsyn for overslag).

Ei sylinderforma aluminiumsstang med sfærisk tupp med ein diameter på 7 mm vart nytta som høgspentelektrode og ei aluminiumsplate vart nytta som jordelektrode. Barrierane som blei nytta som hindringar i gapet var laga av polykarbonat. Dei var 5 mm tjukk og hadde ein storleik på 600 x 600 mm. Dei vart plassert i ulike høgder og med ulik overlapping i eit 80 mm stort stang-plate-gap for å finna den beste kombinasjonen.

Resultatdelen er todelt og skilt mellom barriereoppsett som skapar sikksakk-design og barriereoppsett som ikkje skapar sikksakk-design.

I oppsett som ikkje skapar eit sikksakk-design synte resultatata at ein kunne oppnå ei auke ved bruk av barrierar, sterkt avhengig av barrierane sin posisjon i gapet og korleis dei var oppstilte.

Plassering av barrierar heilt inntil høgspentelektroden har viste seg å gje lågare haldfastheit, og i enkelte tilfelle vart haldfastheita forverra samanlikna med eit barrierelaust gap.

Ei forklaring på dette kan vera det sterke tangentielle feltet som oppstår på barriereoverflata i desse tilfella. Det tangentielle feltet ladar barrierar raskt opp og gjer det lettare for streamere å propagere langs barriereoverflata, noko som fører til raskare overslag.

Når berre ei barriere er nytta i gapet er den optimale posisjonen til barrierar på rundt 20 mm, eller 25 % ut i gapet. Dette samsvarar godt med tidlegare studiar av ei sentrert barriere som syner at optimal plassering er rundt 15-30 % av distansen [1, 2].

Ved bruk av fleire barrierar (utan sikksakk-design) syner resultatata at avstanden kan aukast utan at haldfastheita minkar. Høgaste auke i haldfastheit i oppsett utan sikksakk-design viste seg å vera på 48 % samanlikna med eit barrierelaust gap.

Når eit sikksakk-design av isolasjonsbarrierar vart introdusert i gapet oppnådde ein den høgaste haldfastheita observert i denne oppgåva med ein auke på 63,9 %. Det oppsiktsvekkjande med dette var at denne auken vart oppnådd med ei moderat auke i teoretisk streamerlengde.

Dette talar for at eit sikksakk design kan vera godt egna til å skapa eit kompakt høgspentedesign.

Alle forsøka med sikksakk-design gav auke i haldfastheit samanlikna med eit barrierelaust gap, men resultatata var tvitydig med tanke på kva slags plassering av barrierar som gav den beste effekten.

Ved bruk av to barrierar i sikksakk-design var trenden at den beste plasseringa var lengst vekk frå høgspentelektroden.

Eit framlegg for auke i haldfastheit er at effekten til det tangentielle feltet på barriereoverflatene vert svekka av geometrien til eit sikksakk-design. Ein annan grunn kan vera at ladingsakkumulering på barrierar skapar eit meir homogent elektrisk felt under barrierar, noko som også kan auka haldfastheita.

Når tre barrierar vart nytta, viste derimot forsøka at den beste plasseringa av barrierane var heilt inntil høgspentelektroden. Dette er i strid med dei andre forsøka som syner lågare eller redusert haldfastheit ved plassering i desse posisjonane. Grunnen til dette kan vera at den auka teoretiske streamerlengda utkonkurrerer effektane som fører til tidleg gjennomslag.

Abstract

The purpose of the experiments conducted in this Master's thesis is to predict and explain the change in breakdown voltage when multiple insulating barriers are introduced in a rod-plane gap arrangement. The experiments have been conducted with positive lightning impulse voltage.

A cylindrical aluminium rod with a rounded tip with a 7 mm diameter was used as the high voltage electrode above a grounded plane aluminium electrode. The polycarbonate barriers used were 5 mm thick and the size was 600 x 600 mm. They were placed at various heights and different overhang in an 80 mm rod-plane gap to find the optimal combination.

The results are divided in two parts, one were the different set ups create a zigzag design and the other were they don't create a zigzag design.

In set ups which doesn't create a zigzag design is considered the results show that withstand voltage can be increased, strongly dependent of the barriers position and set up in the gap.

When placing a barrier against the rod tip the withstand voltage drops, and in some cases it drops below the withstand voltage level of a barrier-less gap.

A suggested explanation is the strong tangential field present on the barrier surface under these conditions, quickly building up charge on the barrier surface and leading to breakdown.

In a non-zigzag-design the optimal barrier position seems to be in the region between 20-30 mm under the rod tip, or 25 to 37,5 % of the gap. This corresponds well with other studies which have shown that the optimal position seems to be in the region around 15-30 % of the gap [1, 2].

The highest withstand voltage offered during these set ups had an increase of 48 % compared to a barrier-less gap.

When a zigzag design is considered the highest withstand voltage in this thesis was achieved with an increase of 63,9 %. This was done with a modest increase in the theoretical streamer path, implying that a zigzag design is suitable for creating a compact high voltage design.

All the set ups creating a zigzag design increased the withstand voltage compared to a barrier-less gap, but the results give equivocal trends regarding barrier placement.

When two barriers are used in a zigzag-design the best performance was observed when barriers were placed furthest away from the high voltage rod.

To explain the increased withstand voltage a suggestion is that zigzag-design weakens the effect of the tangential field on the barrier surfaces. Another suggestion is that charge accumulation of barrier surfaces creates a more uniform field underneath the barrier, giving an increase in withstand voltage.

On the other hand when three barriers were used the best placement of barriers was closest to the high voltage rod. A possible explanation can be that the increased streamer path in this configuration outperforms the effects causing early breakdown when placing barriers close to the high voltage rod.

Innholdsliste

1	Introduksjon	1
2	Teori.....	3
2.1	Townsendmekanismen	3
2.2	Streamermekanismen (kanalutladning).....	4
2.2.1	Streameren sin veg.....	6
2.3	Barrierane sin innverknad i eit luftgap.....	8
2.3.1	Barrieranes plassering	9
2.4	Statistisk handsaming av prøveresultat	9
2.4.1	Maximum-Likelihood-Method (MLM).....	10
3	Metode	12
3.1	Laboratorieoppsett.....	12
3.1.1	Stang-plategapet	12
3.1.2	Barrierar og haldestativ	12
3.1.3	Støtspenningsgeneratoren	13
3.1.3	Målekretsen.....	14
3.1.4	Fotografering	15
3.1.5	Korrigerering av lufttettleik	15
3.2	Forsøksmetode	16
3.2.1	Opp og ned-metoden	17
3.2.3	Handsaming av Laboratorieresultat	17
3.3	Feltberekningar ved hjelp av COMSOL.....	18
4	Resultat.....	20
4.1	Ingen barrierar i gapet.....	20
4.2	Design som ikkje skapar sikksakk-effekt	21
4.2.1	Ei barriere	21
4.2.2	To barrierar i gapet (ikkje sikksakk-design)	24
4.2.3	Tre barrierar i gapet (ikkje sikksakk-design).....	25
4.3	Design som skapar sikksakk-effekt.....	26
4.3.1	To barrierar i gapet (sikksakk-design)	26
4.3.2	Tre barrierar i gapet (sikksakk-design)	27
4.4	Fotografi av kanalutladingar.....	27
4.5	Elektriske feltsimuleringar	29
4.5.1	Spenningspotensial på barrierar	29

4.5.2 Feltendring ved ulik tjukkeleik på barrierar	30
4.5.3 Fleire barrierar i gapet.....	31
4.5.4 Tangentialfelt på barriereoverflater i sikksakk-design	33
5. Diskusjon	35
5.1 Stang-plate-gap med barrierar som ikkje skapar sikksakk-design	35
5.1.1 Ei barriere	35
5.1.2 To barrierar (ikkje sikksakk-design)	36
5.1.3 Tre barrierar (ikkje sikksakk-design).....	36
5.2 Stang-plate-gap med barrierar som skapar sikksakk-design.....	36
5.2.1 To barrierar i sikksakk-design	36
5.2.2 Tre barrierar i sikksakk-design.....	37
5.3 Mogelege feilkjelder.....	37
5.3.1 Fuktigheit og temperatur	37
5.3.2 Avlesing på oscilloskopet.....	37
5.3.3 Plassering av barrierar og restladning.....	37
6. Konklusjon	38
7. Vidare arbeid	40
8. Referansar	42

1 Introduksjon

Gassisolerte høgspenningar har vore leiande på marknaden dei siste tiåra grunna deira kompakte design og gode brytareigenskapar. Grunnen for dei gode eigenskapane er knytt til bruken av SF₆-gass som isolerande medium, ulempa er derimot at SF₆ er ein særskild miljøskadeleg gass om den skulle lekka ut av anlegga. Auka miljøfokus gjer no at ein ynskjer å fjerna gassen frå desse anlegga og erstatta dette med andre isolerande medium som til dømes luft, utan at det medfører auke i storleik på anlegga.

SF₆ er ein elektronegativ gass og er difor overlegen samanlikna med luft når det gjeld haldfastheit og overslagsspenningar. For å oppnå same kompakte design ved bruk av luft kan isolasjonsbarrierar nyttast for å auke haldfastheita til det naudsynte nivå. Auken i haldfastheit kjem som fylgje av at streameren sin veg for å kortslutta elektrodane vert lengre. Effekten av barrierar i eit luftgap er diskutert i ulike teori og det er hevda at overslagsspenninga kan verta så mykje som tripla under optimale tilhøve [3]. Målet med denne masteroppgåva er å kunna føresjå den forventa auken i haldfastheit ved bruk av barrierar og forklara kvifor det skjer samt skildra andre fenomen som kan oppstå.

Problemstillinga vert forska på ved å utsetja eit stang-plate-gap for positive lynimpulsar. Isolerte plater av polykarbonat vert sett inn i luftgapet i ulike posisjonar og kombinasjonar for å finna den optimale kombinasjonen. Testmetoden for å føresjå haldfastheita er opp og ned-metoden. Denne metoden treng få forsøk for å få resultat, men ein lyt visa varsemd når ein nyttar data knytt til denne metoden for å få pålitelege resultat. 2D-simuleringar av dei ulike oppsetta vert gjort for å kartleggja den elektriske feltfordelinga. Elementanalyseprogrammet COMSOL vert nytta til dette arbeidet og resultatata frå analysen kan vera til hjelp for å forklara kvar streamerane tek vegen og kvifor haldfastheita aukar eller minkar.

2 Teori

2.1 Townsendmekanismen

Townsend sin teori forklarar mekanismen som fører til gjennomslag i ulike gassar under gitte føresetnader.

Støtionisering skjer når ein liten partikkel med masse m og hastighet v avgjer sin kinetiske energi til eit molekyl eller eit atom ved eit uelastisk støt. I gassar er det oftast snakk om at det er elektronet som avgjer sin kinetiske energi. Den kinetiske energien kan elektronet ha fått ved å falla mot eit elektrisk felt [4]. Når eit elektron vert eksponert for eit elektrisk felt, vil elektronet akselerera i motsett retning i forhold til feltet, det vil sei mot anoden (den positive elektroda) [4].

$$W = e \cdot E \cdot x = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (1)$$

Arbeidet som feltet utfører på eit elektron er skildra i formel (1). Eit elektron med høg fart vil ha ein viss sannsynleg sjanse for å kollidera med eit molekyl i den isolerande gassen. I ein uelastisk kollisjon vert energien overført til molekylet. Dette kan føra til at molekylet blir ionisert og slepp i frå seg eit elektron. Dette elektronet vil då verta akselerert av det elektriske feltet, noko som igjen kan føra til ein ioniserande kollisjon. Townsend sin fyrste koeffisient α er eit mål på kor sannsynleg det er at eit elektron vil ha forårsaka ein ioniserande kollisjon per lengdeining. Ved høgare trykk aukar sannsynet for ein kollisjon. Den kinetiske energien til elektronet er proporsjonal med det påtrykte feltet, og koeffisienten α er difor ein funksjon av brøken $\frac{E}{\rho}$. Talet på kollisjonar er proporsjonalt med trykket [6].

Townsend sin andre koeffisient γ er eit mål på kor sannsynleg det er at eit sekundært elektron vert frigjort. Dette tilleggselektronet kan stamma frå katoden (den negative elektroden), og vert utløyst av at positive ion støyter borti katoden. I eit slikt tilfelle må ionet gje slepp på to elektron, eit for å nøytralisera ioneladinga og eit som vert støtt ut som eit sekundært elektron. Dette er ein andrehandsfunksjon i townsendmekanismen som også er avhengig av det elektriske feltet og gasstrykket. Fotoemisjon kan også bidra med sekundærelektron. Dei frisleppte elektrona vert akselerert mot anoden i eit skred og dette kan føre til overslag [6].

$$I = I_0 \frac{e^{(\alpha-\eta)d}}{1 - \frac{\gamma\alpha}{\alpha-\eta}(e^{(\alpha-\eta)d} - 1)} \quad (2)$$

I elektronegative gassar er molekyla eller atoma i stand til å ta til seg saktegåande elektron for å fylla deira ytre orbital, og dermed hindra desse elektrona i å bidra til fleire ioniserande kollisjonar. Sannsynet for at eit elektron festar seg til eit molekyl per lengdeining er gitt med koeffisienten η . Denne prosessen vil hindra elektronflyten i dei to prosessane nemnd ovanfor. Om ein reknar alle desse prosessane, ilag så kan straumen frå anoda uttrykkast som i formel (2). Formelen definerer Townsend si nedbrytingsmekanisme og viser at gjennomslag vil oppstå når nemnaren er null [5].

2.2 Streamermekanismen (kanalutladning)

Townsendmekanismen åleine er ikkje nok til å forklara når eit gjennomslag vil førekoma, då denne teorien har manglar ved atmosfærisk trykk. I følgje Townsend så skjer straumauken som ein fylgje av ioniseringsprosessen, og berre denne.

I praksis visar det seg derimot at gjennomslagsspenningar er avhengig av både trykket og gapet sin geometri. I tillegg har gjennomslag vorte observert ved vesentleg kortare tidforsenkingar (10^{-8}) enn føreslege i Townsendmekanismen (10^{-5}).

Rundt 1940 føreslo Rather, samt Meek og Loeb, uavhengig av kvarandre, noko som vart kalla streamermekanismen [4].

Denne teorien seier at når talet på elektron i eit skred når ein kritisk storleik N_{cr} vert elektronskredet sjølv-propagerande. Rather observerte at når konsentrasjonen av elektron er høgare enn 10^6 , men lågare enn 10^8 , vart veksten av ei lavine svekka. Når konsentrasjonen av elektron passerer 10^8 vert skredstraumen etterfylgt av ei bratt stigning i straumen, og deretter gjennomslag i gapet [4].

Grunnen til dette er det forsterka feltet i front av skredet, noko som fører til intens ionisering og magnetisering av gasspartiklar. Dei avgitte fotona, som har lysets hastighet, kan utløysa tilleggselektron som kan føra til at ein får leiande kanalar gjennom luftgapet. Dette kan oppstå når påtrykka spenning er ein impulsaktig spenning, som er vesentleg større enn statisk gjennomslagsspenning [6].

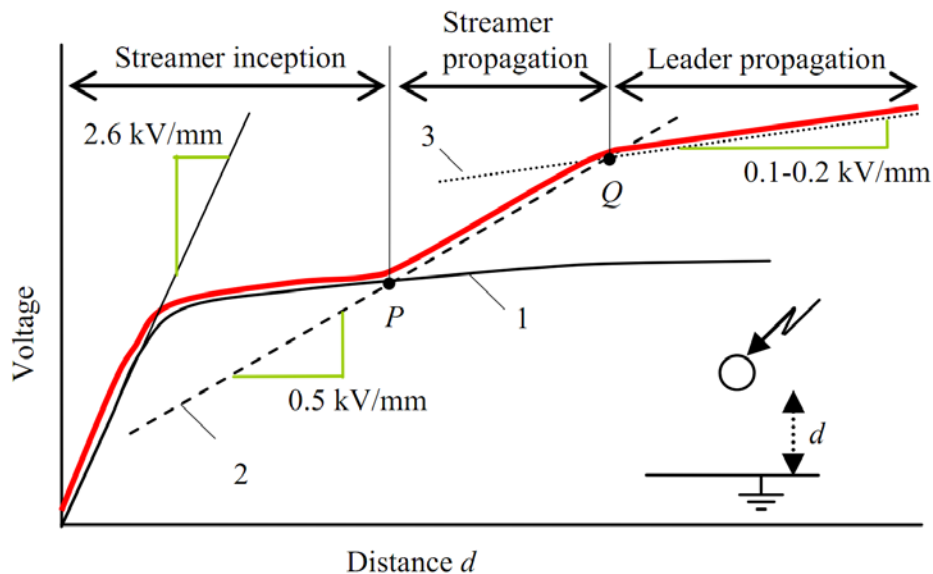
$$\int_{r} \alpha_{eff} dx = \ln(N_{cr}) \quad (3)$$

Tennspenningskriteriet er gitt i formel (3). Ein kombinert effekt av Townsendkoeffisientane og tilknytingskoeffisienten definerast ved α_{eff} , og er ein funksjon av den elektriske feltstyrken.

Integrasjonsområdet r fylgjer den anslåtte streamerstien langs feltlinjene der $\alpha_{eff} > 0$. Stien startar i punktet der det er maksimal feltstyrke, og stoppar der den når den kritiske feltverdien

$E_{cr} = 2,5 \text{ kV/mm}$. Denne vert kalla tennfeltstyrken. Bortanfor dette punktet er $\alpha_{eff} < 0$ [7].

I tilfelle den maksimale feltstyrken ikkje oppstår på elektroden, men for eksempel på ei barriere, så kan elektrodelaus tenning oppstå i dette punktet. Herfrå kan streameren utbre seg mot begge elektrodane samstundes. For sterkt inhomogene elektriske felt er det kritiske talet elektron $N_{cr} = 10^8$ [7]. Ved å kalkulera talet på elektron, kan tennspenninga U_{si} fastsetjast ved å iterativt auka spenninga til det kritiske talet elektron er nådd. Den elektriske feltfordelinga må være kjend frå til dømes datasimuleringar.



Figur 1 syner haldfastheita med omsyn til feltet sin homogenitet [8]

I homogene eller svakt inhomogene felt vil streamertening umiddelbart føra til overslag [7]. Figur 1 illustrerer at tenningsområdet har ei stigning på 2.6 kV/mm. Punktet P syner grensa mellom svakt og sterkt inhomogene felt. Den raude linja syner haldfastheita U_w for eit kule-plate-gap, og ein ser tydeleg at U_w ikkje lenger er bestemd av tenningsområdet når det gjeld inhomogene felt. Etter ei lita tidssenkning, så er det propagering av streamere som avgjer om det vert overslag eller ei [7].

Påtrykka spenning må nå eit visst nivå før propagering av ein streamer er mogeleg. Dersom spenninga er høg nok, vil streamerane propagera stegvis mot motsatt elektrode med ein typisk fart på mellom $10^5 - 10^7 m/s$. Den nøyaktige verdien er avhengig av ei rekkje parameter, blant anna spenninga og ioniseringa. Dersom spenninga er for låg, vil ikkje streamerane avansere, og overslag vil ikkje førekoma [8].

$$U_w = U_0 + d \cdot E_{st} \quad (4)$$

Den lågast tilførte spenninga som skal til for å oppnå eit gjennomslag er vist i formel (4). Denne likninga er vist som den stipla linja i Figur 1, og definerar haldfastheita i inhomogene felt, som til dømes eit stang-plate-gap som er vurdert i denne oppgåva. Denne likninga er derimot ikkje gyldig for mindre distansar der feltfordelinga er meir homogen.

U_0 i formel (4) er den lågaste spenninga som trengst for at eit streamerhode skal tenna og kunna føra til gjennomslag. Denne spenninga er lauseleg definert i området $U_0 \approx 20 \sim 30 kV$ [8]. For positive impuls-spenningar er streameren sitt utbreiingsfelt $E_{st} = 0,54 kV/mm$, noko som er identisk til den interne feltstyrken til streameren.

Eit mykje sterkare felt er naudsynt for negative streamere, $E_{st} = 1,2 kV/mm$, noko som fører til at negative streamere treng høgare spenning for å utbre seg. Difor vert fokuset i denne oppgåva retta mot positive impuls-spenningar.

Punktet Q i Figur 1 markerar overgangen til leiarregionen. Gapet må vera særst stort (rundt 2 m) for at overgangen til leiar skal kunna skje. Spenningsfallet i ein leiar er lågare enn i ein streamer og kan difor bre seg over større avstandar.

2.2.1 Streameren sin veg

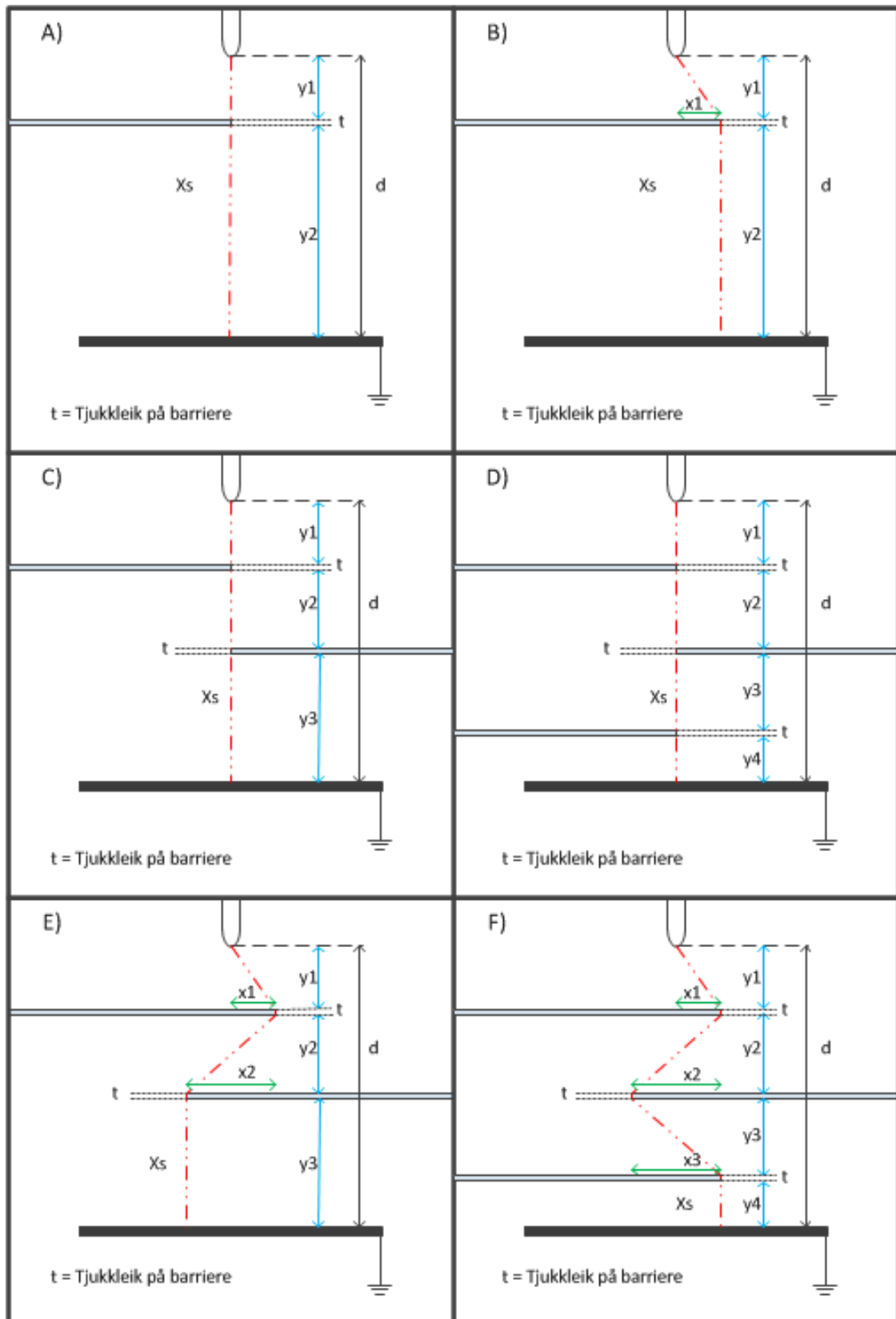
Å kunna føresjå kvar streameren vil ta vegen er viktig med tanke på å anslå gjennomslagsspenninga. Haldfastheita aukar i takt med lengda på gapet, noko som er synleggjort i formel (5) og Figur 1. I streamerutbreiingsfeltet i Figur 1 er forholdet lineært og gjeven av den interne feltstyrken til streameren, som er 0,54 kV/mm.

Det har vorte antatt at streamerane vil starta i det punktet der det er høgast feltstyrke, for så å utbre seg langs ei elektrisk feltlinje $-\vec{\nabla}V$. Det har temporært blitt observert at streamervegen systematisk avvik frå denne antakinga. Det nemnde streamerutbreiingsfeltet har den lågaste styrken feltet kan ha for å støtta ei streamerutbreiing. Dersom streamerane brer seg inn i eit felt som har lågare styrke enn dette, vil dei anten bøya av til ein annan retning, eller stoppa.

$$\vec{v}_s = A(E) \cdot \vec{E} + B \cdot \vec{\nabla} \cdot \vec{E}^2 \quad (5)$$

Formel (6) syner eit forsøk på å modellera ein streamerveg. Modellen føreslår at streamerane følgjer feltlinja fram til feltstyrken er for låg, deretter bøyer streamerane av og følgjer kanten av denne regionen mot høgare feltstyrke. Dette oppnåast ved å setje $A\left(< 0,54 \frac{kV}{mm}\right) = 0$. Streamerane vil då utbre seg heilt til dei når motsatt elektrode og gjennomslag vert fullført, eller stoppa dersom $\vec{\nabla} \times \vec{E}^2$ er parallell med \vec{E} .

Eit anna forslag er at streamervegen vil følgje maksimumsfeltet [8], sjølv om det medfører kryssing av feltlinjer. Vegen kan finnast ved å identifisera punkta med maksimal feltstyrke på kvar ekvipotensialkurve, og knyta saman desse punkta.



Figur 2 Syner dei ulike oppsetta i denne oppgåva. Distansen d er avstanden mellom stangelektroden og jordelektroden. Distansen X_s er den kortaste lengda som er mogeleg for streamerane å gå utan å penetrera ei eventuell barriere. Rute A) har ei barriere i flukt med senter av stanga. Rute B) har ei barriere framsprunge med distansen x_1 frå senter av stangelektroden. Rute C) har to barrierar i flukt med senter av stangelektroden. Rute D) har tre barrierar i flukt med stangelektroden. Rute E) har to barrierar som er symmetrisk framsprunge frå senter av stangelektroden og skapar eit sikkakk-design. Rute F) har tre barrierar som er symmetrisk framsprunge frå senter av stangelektroden som skapar eit sikkakk-design.

Figur 2 syner dei ulike stang-plate oppsetta nytta i denne oppgåva, der isolasjonsmediumet er luft. Den raudstipla linja merka x_s , er den teoretisk kortaste distansen som ein streamer kan bevege seg i luft før den treff jordelektroden. Ved å anta at ein kan skapa ein empirisk formel som uttrykkjer ei auke i haldfastheita når ein nyttar barrierar, så tek ein utgangspunkt i formel (4) og byter ut d med x_s .

Fylgjande formlar kan nyttast for å utrykke x_s i dei ulike geometriske oppsetta i Figur 2: For rute A), C) og D) i Figur 2:

$$x_s = d \quad (6)$$

For rute B) i Figur 2:

$$x_s = \sqrt{(x1)^2 + (y1)^2} + y2 + t \quad (7)$$

For rute E) i Figur 2:

$$x_s = \sqrt{(x1)^2 + (y1)^2} + \sqrt{(x2)^2 + (y2)^2} + y3 + (2 \cdot t) \quad (8)$$

For rute F) i Figur 2:

$$x_s = \sqrt{(x1)^2 + (y1)^2} + \sqrt{(x2)^2 + (y2)^2} + \sqrt{(x3)^2 + (y3)^2} + y4 + (3 \cdot t) \quad (9)$$

For n antall barrierer:

$$x_s = y_{n+1} + (n \cdot t) + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{(x_n)^2 + (y_n)^2} \quad (10)$$

Dette gjev ein ny formel for haldfastheita:

$$U_w = U_0 + x_s \cdot E_{st} \quad (11)$$

Formel (11) er den empiriske formelen for haldfastheita, gitt at tennspenninga er lik som for eksperiment utan barrierar og at samling av lading på barriere ikkje påverkar det elektriske feltet.

2.3 Barrierane sin innverknad i eit luftgap

Når ein introduserer ei hindring eller barriere i eit luftgap, så må streamerane anten penetrera eller finna vegen rundt barrieren. Uavhengig av kva for ein av dei to forslaga som oppstår, vil det medføra ei auke i haldfastheita. Dette er eit fordelaktig resultat som kan nyttast i arbeidet med å laga eit kompakt høgspente-design.

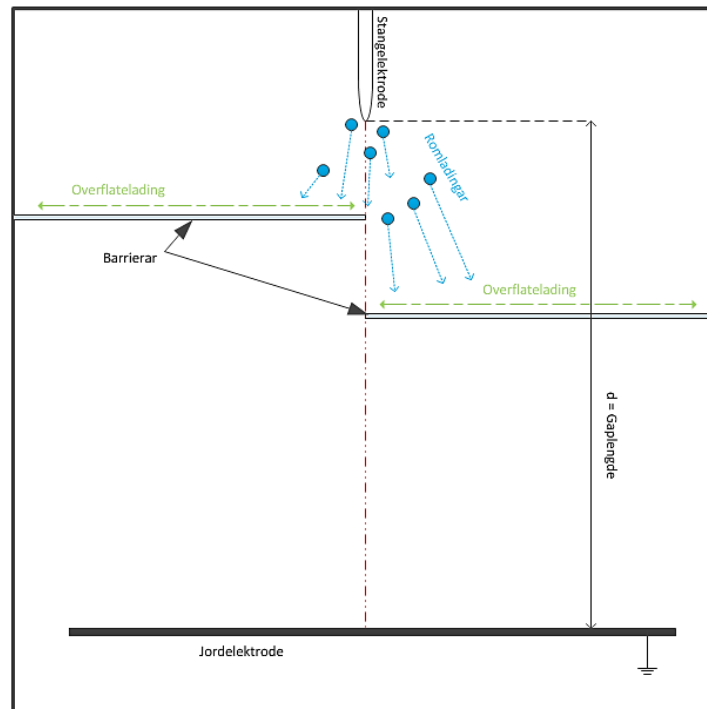
Ei hypotese som ein ynskjer å få svar på i denne oppgåva er om multiple barrierar i luftgapet gjev tilsvarende eller høgare haldfastheit samanlikna med eit luftgap utan barriere eller med ei sentrert barriere under høgspentelektroda.

Dei ulike barriereoppsetta i denne oppgåva vil vera med anten barrierar i flukt med senter av stangelektroden, eller barrierar som er trekt forbi stangelektroden på kvar side og skapar eit sikksakk design.

Introduksjon av isolasjonsbarrierar i eit stang-plate-gap vil ikkje ha stor innverknad på bakgrunnsfeltet, men det vil derimot ha stor innverknad på ladingsberarane ved at dei vert hindra frå å gå i fri bane mot elektrodane.

Ved å auka spenninga på stangelektroden, vil det oppstå partielle utladingar når ein passerer eit visst nivå. Når dette skjer (med positiv spenning), vil det elektriske feltet akselerera elektron i retning mot stanga, medan positive ion vil verta akselerert mot jordelektroden. Dei positive ladingane vil samla

seg på hindringsbarrierane på vegen mot elektrodane. Dette vil føra til at det elektriske feltet mellom stangelektroden og barrierane vert svekka, noko som fører til høgare gjennomslagsspenning. På grunn av overflateladinga på barrierane, kan det seiast at det elektriske potensialet til barrierane er likeins med stangelektroden sitt potensiale [3], eller omtrent like høgt potensiale [9]. Om det er nok tid, vil ladingane verta jamt fordelt på overflata og bidra til eit meir homogent elektrisk felt under barrierane, noko som også fører til auka gjennomslagsspenning [1, 9].



Figur 3 illustrerer ei stangelektrode med påtrykt høgspenning. Elektriske ladingar samlar og fordeler seg på barrierane.

2.3.1 Barrierane si plassering

Tidlegare studiar [1, 2, 9, 10] av stang-plate-gap med sentrerte barrierar syner auke i haldfastheita ved introduksjon av hindringar, men resultatane er sterkt avhengig av plasseringa. Den beste plasseringa av barrierar er i nærleiken av høgspentelektroden, men ikkje for nær, då dette kan redusere haldfastheita i luft til same nivåa som utan barriere, eller til og med forverra situasjonen [2, 9-11]. Dette er ikkje i tråd med teorien om lineær auke av haldfastheita som følgje av auka streamerlengde, noko som er illustrert i Figur 1 frå punktet P og utover til punktet Q, samt i formel (11). Optimal distanse for plassering av barrierar er funne på rundt 20 % av gap-distansen, eller innanfor 15 – 30 % av distansen avhengig av ulike storleikar [1]. Ved bruk av større barrierar kan haldfastheita verta så mykje som tripla [3], medan mindre barrierar gjev lågare auke i haldfastheit [12].

2.4 Statistisk handsaming av prøveresultat

Fenomenet ved streamergjennomslag er ein stokastisk prosess. Overslagsspenninga i luft er ikkje reproducerbar, det vil sei at ved identiske prøveføresetnader får ein overslag ved ulike spenningar [13]. Ulike årsaker kan vera grunn for variasjon i forsøka, blant anna tilfeldige kollisjonar mellom elektron og molekyl samt elektronlausrivning. Den observerte spenninga varierer altså for kvart forsøk.

For å kartleggja ei slik stokastisk overslagsspenning, må ein nytta statistiske metodar. Dei mest nytta metodane for sannsynsrekning når det gjeld å finna haldfastheita i luft, er normalfordeling (Gaussian) og Weibull-fordeling. Erfaringsmessig viser det seg at normalfordelingsfunksjonen er best egna når ein har data ved gjennomslag på 50 % av tilfella [13].

2.4.1 Maximum-Likelihood-Method (MLM)

Maximum likelihood metoden gjev høve til å finna ei optimal tilnærming mellom ein valgt fordelingsfunksjon (til dømes normalfordeling eller Weibull-fordeling) og dei målte eksperimentverdiane. MLM teknikkar kalkulerar parametarane slik at sannsynet av dei observerte data vert så stor som mogeleg [14, 15].

Metoden er prega av to essensielle parameter:

- Den «optimale» 50 % -gjennomslagsspenninga (U_{50})
- Det «optimale» 50 % -standardavviket (σ)

På bakgrunn av desse parameter kan ein finna haldfastheita U_{02} , ved hjelp av fylgjande formel:

$$U_{02} = U_{50} - (2 \cdot \sigma) \quad (12)$$

MLM tek omsyn til om det vert gjennomslag eller ikkje i forsøka som vert utført. Sannsynet ved gjennomslag P_{bd} vert fastslått gjennom verdier frå normalfordelinga med fylgjande formel:

$$P_{bd}(U_{corr}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left(\int_{-\infty}^{U_{corr}} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{U_{corr}-\bar{U}}{\sigma}\right)^2\right]} dU_{corr} \right) \quad (13)$$

der U_{corr} er testspenninga som er korrigert for lufttettleik (skildra i 3.1.5), og \bar{U} er gjennomsnittsverdien, og σ er standardavviket frå laboratorieforsøka.

For forsøk der det ikkje vert gjennomslag, er sannsynet funne via fylgjande formel:

$$P_{nbd}(U_{corr}) = 1 - P_{bd}(U_{corr}) \quad (14)$$

Vidare vert den negative logaritmen til desse to sannsyna funne ved hjelp av:

$$-\ln P_{bd} \text{ eller } -\ln P_{nbd} \quad (15)$$

Den beste tilnærminga av alle testresultata vert deretter funne dersom produktet av alle sannsyna eller summen av logaritmane har eit maksimalpunkt (maximum likelihood). Dette er ikkje vidare skildra då dette er utanfor omfanget til denne oppgåva, men det naudsynte verktøyet for å finna denne verdien, er skaffa til veie [15].

Ei mogeleg fallgruve med denne metoden er at små endringar av innsamla data som til dømes skeivfordeling av impulsforsøk som gjev gjennomslag eller ei, kan føra til store endringar i resultatata som vert presenterte. Difor må ein vere aktsam når ein nyttar denne metoden slik at truverdigheita til resultatata ikkje vert forringa av for store standardavvik.

3. Metode

3.1 Laboratorieoppsett

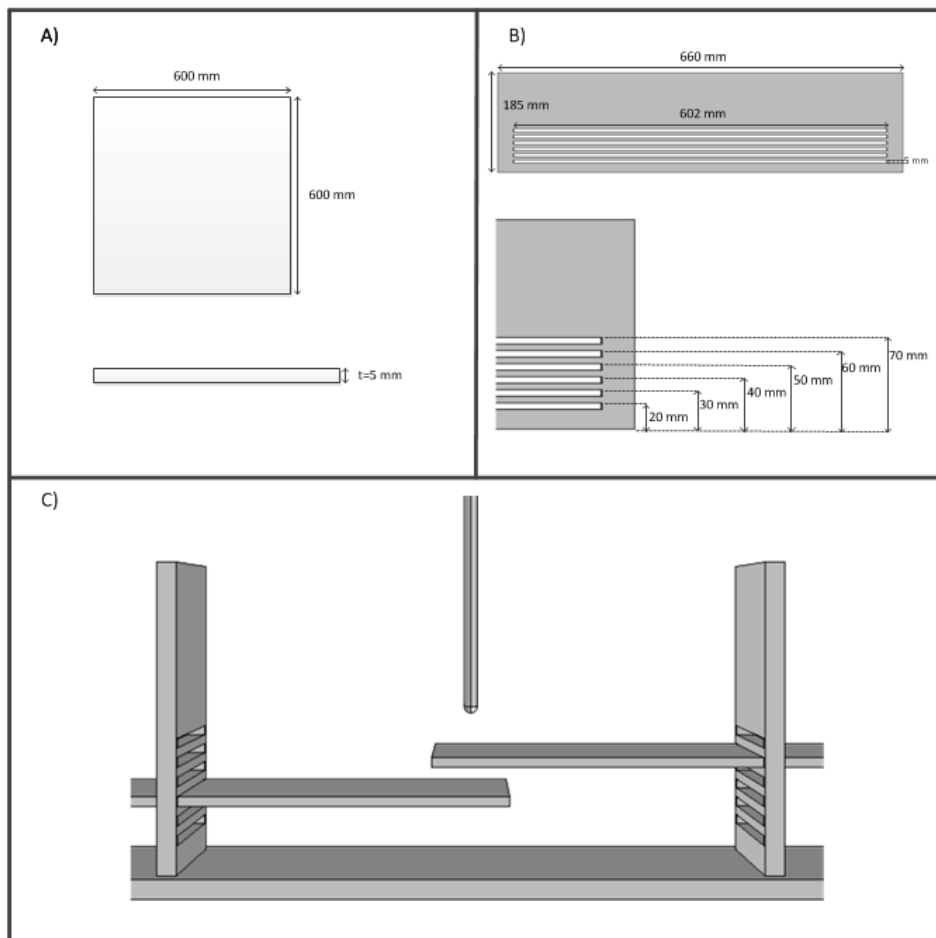
Eksperimenta som er skildra her vart utført ved studentane sitt høgspenlaboratorium (Rom E-152) ved NTNU.

3.1.1 Stang-plategapet

Til undersøkinga i denne oppgåva vart det bygd eit spesialtilpassa stativ av tre og plast for å halda på plass høgspentelektroden (stanga). Stativet gav moglegheiter for høgdejusteringar av stanga. Høgspentelektroden har ein diameter på 7mm og er laga av aluminium. Enden av elektroden har ein sfærisk tupp med den same diameteren. Stativet vart plassert på eit bord som sikra god arbeidshøgde. Bordplata vart dekkja av ei aluminiumsplate som fungerte som jordelektroden i forsøka.

3.1.2 Barrierar og haldestativ

Barrierane som vart introdusert i luftgapet i desse eksperimenta var laga av polykarbonatplast (Lexan-plater) og hadde eit mål på 600mm x 600mm, og tjukkeleik på 5 mm. For å få eit allsidig system med mange ulike oppsettsmoglegheiter, vart det også bygd to spesialtilpassa stativ med utsparringar for å skyva inn isolasjonsbarrierane. Stativa hadde seks utsparringar på kvar side med 10 mm forskjell i høgde, for raskt å kunne endra oppsettet av barrierar.

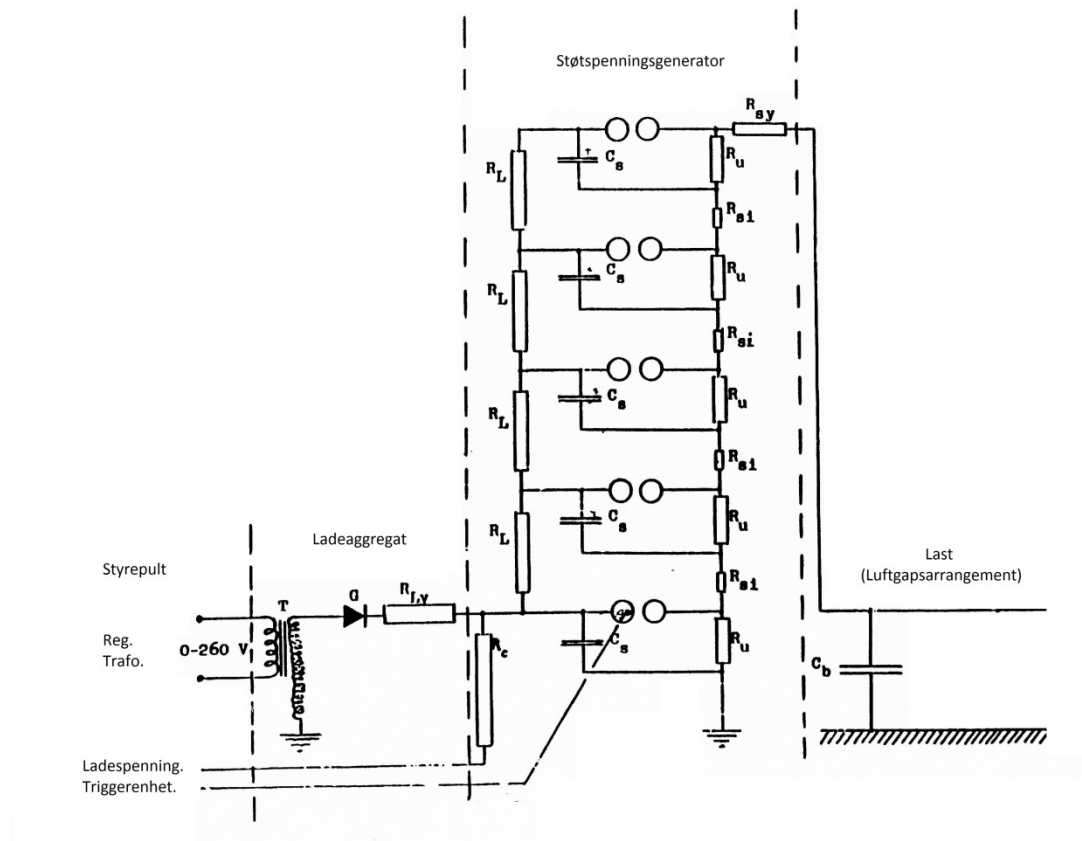


Figur 4 A) Syner ei barriere med sine respektive mål

B) Syner dei spesialtilpassa stativa som held på plass barrierane under forsøka med sine respektive mål

C) Syner oppsett av komplett system med to barrierar framsprunget 10 mm frå senter av stang, og høvesvis 20 og 40 mm i underkant av stang.

3.1.3 Støtspenningsgeneratoren



Figur 5 Støtspenningsgenerator [13]

Funksjonen til støtspenningsgeneratoren var å forsyne ei amplitudekontrollert støtspenning til stang-plate-arrangementet for å generera gjennomslag og å finna 50 % gjennomslagsspenning. Figur 5 syner ei skisse av støtspenningsgeneratoren.

Hovudkomponentane til støtspenningsgeneratoren var som følger:

- Styrepuilt med moglegheit for justering av ladespenning og kulegapat si overslagsspenning
- Transformator for lading av kondensatorar
- Likerettar for ladespenninga til kondensatorane
- Fem impuls-kondensatorar
- Fem kulegap for seriekopling av impuls-kondensatorane
- Utladingskondensator

Tabell 1 Skildrar dei ulike forkortingane i Figur 5

Tabell 1 Forkortingar og verdiar for støtspenningsgenerator

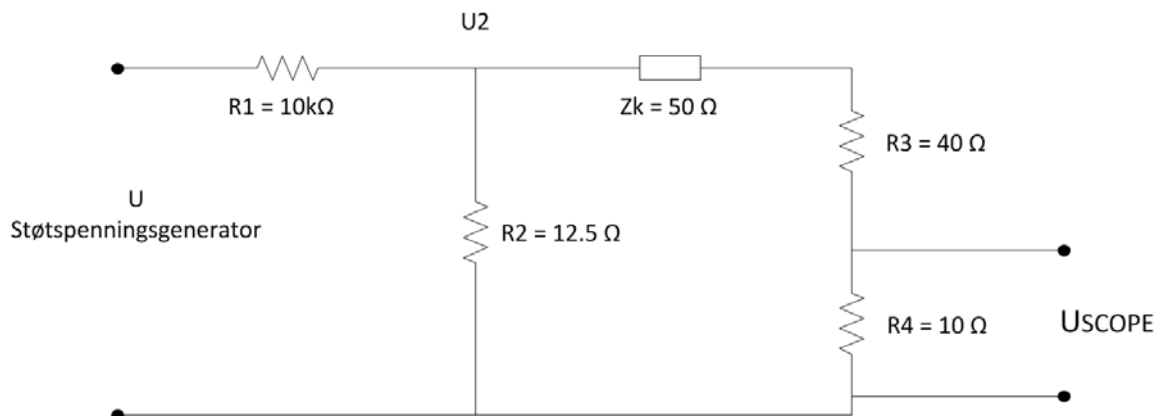
Forkorting:	Skildring:	Verdi:
T	Transformator	
G	Likerettar	
R_{Ly}	Laderesistans	1 m Ω
R_F	Måleresistans	160 m Ω
R_L	Laderesistans	30 k Ω
R_u	Utladingsresistans	326 Ω
R_{si}	Serieresistans	55 Ω
R_{sy}	Serieresistans	570 Ω
C_s	Impulskondensator	0.25 μ F
C_b	Utladingskondensator	560 pF

Frå styrepulten vart ladespenninga til impulskondensatorane (C_s) kontrollert og ladestraumen monitorert. Kvar impulskondensator kunne ladast opp til eit maksimum på 40 kV. Kulegapa sin funksjon var å endra koblingskonfigurasjonen til impulskondensatorane frå parallell til serie. På denne måten vart testobjektet utsett for fem gangar så høg ladespenning, noko som gav ein total impulsspenning på 200 kV ($5 \cdot 40$ kV). Opninga på kulegapa vart også kontrollert frå styrepulten. Den positive lynimpulsspenninga som vart levert frå støtspenningsgeneratoren har ei fronttid på 1,2 μ s og halveringstid på 50 μ s ($\frac{1,2}{50}$ μ s), noko som er i samsvar med IEC 60060-1.

Ei avgrensing i denne oppgåva var at støtspenningsgeneratoren i studentlaboratoriet ikkje makta høgare spenningar enn 130 kV grunna elding av utstyret. Impulsspenningar på 130 kV var difor det maksimale spenningsnivået som vart testa i dei ulike oppsetta, og ikkje 200 kV som nemnt over.

3.1.3 Målekretsen

For å måla spenninga over stang-plate-gapet, vart det nytta eit oscilloskop. Grunna den høge spenninga vart det nytta fleire spenningsdelarar.



Figur 6 Målekrets

Figur 6 synar målekretsen nytta for spenningsmåling over stang-plate-gapet. Z_k er den karakteristiske impedansen som lynspenninga ser i den fyrste augneblinken etter tenning. Oscilloskopet er kopla til over resistansen R_4 .

Tabell 2 Verdier for målekrets

Impedans:	Verdi:
R_1	10 k Ω
R_2	12,5 Ω
Z_k Karakteristisk impedans	50 Ω
R_3	40 Ω
R_4	10 Ω

Spenninga i gapet kan reknast ut via den målte spenninga på oscilloskopet på fylgjande måte:

$$U_2 = \frac{U_{testpeak} \cdot R_2 || Z_k}{R_1 + R_2 || Z_k} \quad (16)$$

$$U_{scope} = U_{testpeak} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \frac{R_2 || Z_k}{R_1 + R_2 || Z_k} \quad (17)$$

Når ein set inn verdiane, gjev det denne formelen for den målte spenninga gjennom oscilloskopet:

$$U_{testpeak} = 5005 \cdot U_{scope} \quad (18)$$

3.1.4 Fotografering

Foto av fullstendige lynoverslag vart teken. Det skinande lyset i ein gjennombrotskanal gjer det mogeleg å ta bilete med eit standard speilreflekskamera. Eit Nikon D80 med lukkertid på eit sekund vart nytta i denne oppgåva. For å ta bilete av streamere, treng ein eit høghastigheitskamera med lysforsterkande utstyr for å fanga dei lyssvake streamerane. Dette vart ikkje gjort i denne oppgåva.

3.1.5 Korrigering av lufttettleik

Dei målte spenningsverdiane har vorte korrigert i forhold til eit normalisert klima. Verdiane nytta for korreksjon var:

- Temperatur: $t_0 = 20^\circ\text{C}$
- Trykk: $p_0 = 1030 \text{ mbar}$
- Fuktighet: $h = 11 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$

Lufttettleiken vart utrekna på fylgjande måte:

$$\delta = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{273 \cdot t_0}{273 + t} \quad (19)$$

Absolutt fuktighetsgrad vart utrekna med ei tilnærming, der φ er relativ fuktighet:

$$h = \frac{\varphi}{100} \cdot 4,85 \cdot e^{(0,0685t - 0,00025t^2)} \quad (20)$$

Faktoren k er bestemt i samsvar med IEC 60060:

$$k = 1 + 0,010 \cdot \left(\frac{h}{\delta} - 11 \right) \quad (21)$$

Den korrigerte spenninga U_{corr} vart då rekna ut med fylgjande formel:

$$U_{corr} = \frac{U_{testpeak}}{k^w \cdot \delta^m} \quad (22)$$

der $U_{testpeak}$ er dei målte verdiane frå laboratorieforsøka og eksponentane w og m har ein antatt verdi på 1.

3.2 Forsøksmetode

I alle forsøka vart 50 % overslagsspenning (U_{50}) funne for dei ulike oppsetta ved hjelp av opp og ned-metoden som er vidare skildra i 3.2.1. Spenninga som vart tilført testoppsettet var positive lynimpulsar i tråd med IEC standard 60060-1.

I alle forsøka var avstanden d mellom tuppen av stanga og jordelektroden fastsatt til 80 mm. Talet på barrierar i dei ulike forsøka varierte frå ingen til tre barrierar.

Oversikt over dei ulike høgdene og sideforskyvingane til barrierane finst i Tabell 3, og design som skapar sikksakk-effekt er merka i tabellen.

Tabell 3 Oversikt over ulike oppsett av barrierar

Tal på Barrierar:	Vertikal avstand frå stang til overflata av barrierane(ne):	Horisontalt framspring frå senter av stang:	Samsvarar med oppsett i:
Ingen barriere	-	-	
Ei barriere	0 mm	0 mm (flukt)	Figur 2 A)
	10 mm		
	20 mm		
	40 mm		
	60 mm		
	0 mm	10 mm & 20 mm	Figur 2 B)
	10 mm		
	20 mm		
	40 mm		
	60 mm		
To barrierar	0 mm & 20 mm	0 mm (flukt)	Figur 2 C)
	10 mm & 30 mm		
	20 mm & 40 mm		
	30 mm & 50 mm		
	40 mm & 60 mm		
	0 mm & 20 mm	10 mm (sikksakk-design)	Figur 2 E)
	10 mm & 30 mm		
	20 mm & 40 mm		
	30 mm & 50 mm		
	40 mm & 60 mm		
Tre barrierar	0 mm, 20 mm & 40 mm	0 mm (flukt)	Figur 2 D)
	10 mm, 30 mm & 50 mm		
	20 mm, 40 mm & 60 mm		
	0 mm, 20 mm & 40 mm	10 mm (sikksakk-design)	Figur 2 F)
	10 mm, 30 mm & 50 mm		
	20 mm, 40 mm & 60 mm		

3.2.1 Opp og ned-metoden

Opp og ned metoden tek utgangspunkt i ei startspenning som er i nærleiken av den teoretiske overslagsspenninga som gjev gjennomslag ved 50 % av forsøka, U_{50} .

Dersom det oppstod gjennomslag, vart spenninga redusert med ΔU , og dersom det ikkje vart gjennomslag, auka ein spenninga med ΔU [6].

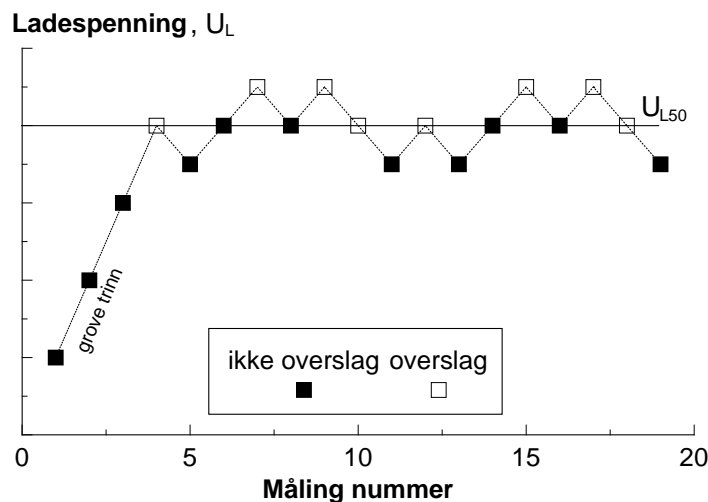
Den minste praktiske justeringa av ΔU som ein kunne foreta frå styrepulten til støtspenningsgeneratoren, var på 0,5 kV. Med vissheit om at det var fem kulegap med kvar sin ladecondensator, vart dette ein justering på 2,5 kV for kvart impulsforsøk.

$$U_{50} = 0.42 \frac{kV}{mm} \cdot x_s + 43.9 kV \quad (23)$$

Formel (23) er ein empirisk formel og syner sjansen for gjennomslag ved 50 % av tilfella med ei sentrert barriere [2]. Den vart nytta som teoretisk utgangspunkt for å sjekka om multiple barrierar hadde nokolunde same gjennomslagsspenning som ei sentrert barriere.

Dei avleste resultatane vil var i nærleiken av den spenninga som gjev 50 % sjanse for gjennomslag. Over tid, med mange nok forsøk, vil den gjennomsnittlege verdien av forsøka verta særst nær U_{50} . IEC standard 60060-1 som omhandlar høgspent testteknikk seier at ein treng eit minimum på $n = 20$ impulsforsøk. Difor hadde kvart enkelt testoppsett 20 eller fleire impulsforsøk for å imøtekoma kravet.

Fordelen ved bruk av opp og ned-metoden er at den krev relativt få skotforsøk for å oppnå brukbare resultat. Ulempa derimot er at metoden treng normale stabile forhold, og at standardavviket kan verta store. Eit tiltak for å oppnå stabile forhold var å vaska barrierane med isopropanol mellom kvart impulsforsøk for å fjerna eventuell restlading på platene.



Figur 7 Illustrerer bruk av opp og ned-metoden [13]

3.2.3 Handsaming av Laboratorieresultat

All data vart lagra i Excel-rekneark, både justeringar av ΔU samt om det oppstod gjennomslag eller ei. Alle avlesingar på oscilloskopet vart også notert og utrekna ved hjelp av formel (18).

Kvart oppsett hadde ein del innskytingsforsøk. Verdiane som veik frå eit jamt plottemønster som er illustrert i Figur 7, vart utelatt. Når dette var gjort, vart gjennomsnittsverdien \bar{U} funne ved hjelp av formel (24) basert på alle forsøka, både dei som holdt, og der det vart gjennomslag. Denne verdien vart då tilnærma lik U_{50} . Standardavviket σ vart utrekna med formel (25) ved bruk av det same plottemønsteret som for \bar{U} . Desse verdiane vart deretter fylt inn i eit anna rekneark som rekna ut den reelle U_{50} , σ , og U_{02} , basert på MLM som er skildra i 2.4.1.

For å kunna nytta MLM i denne oppgåva trøng ein fylgjande data frå laboratorieforsøka:

- Snittverdien \bar{U} av teljande impulsforsøk.
- Standardavviket σ av teljande impulsforsøk.
- Spenningsverdien $U_{testpeak}$ for kvart impulsforsøk, samt om det vart gjennomslag eller ei.

Formel for snittverdien:

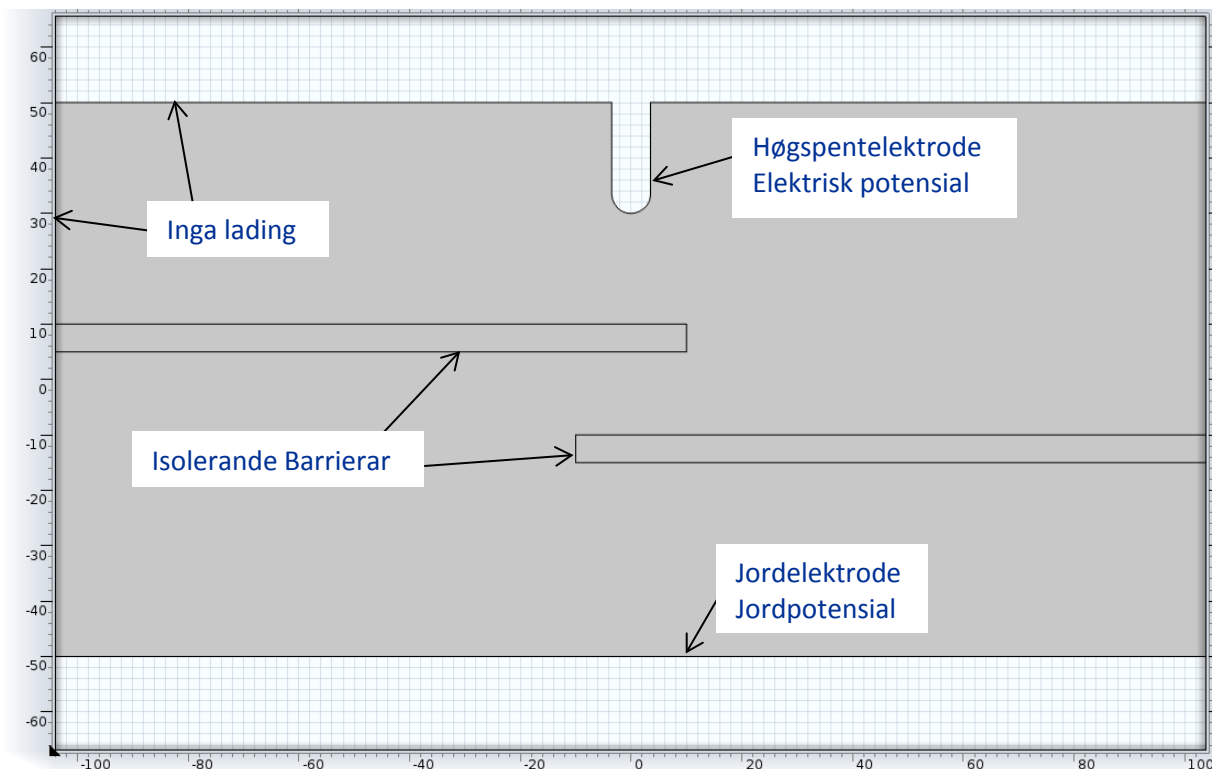
$$\bar{U} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i \quad (24)$$

Formel for standardavviket:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^2} \quad (25)$$

3.3 Feltberekningar ved hjelp av COMSOL

Kunnskap om elektrisk feltfordeling er naudsynt for å kunne føresjå kvar eventuelle streamarar vil tenna og utbre seg. Simuleringsverktøy er utvikla for å kunne bistå i eit slikt arbeid. COMSOL Multiphysics er eit elementanalyseprogram som kan nyttast i dei fleste modelleringsprosessar, og dette programmet er valgt i denne oppgåva. Programmet gjer det mogeleg å definera eigne geometriske figurar, grensevilkår, materialer med meir. Ved å løysa relevante differensiallikningar ut i frå gitte føresetnader i geometrien gjev COMSOL ei grafisk framstilling av det elektriske feltet, som i sin tur kan analyserast. I denne oppgåva har COMSOL vorte nytta til å rekne ut det elektriske feltet som oppstår i eit stong-plate-gap både med og utan barrierar.



Figur 8 viser eit oppsett med to barrierar i COMSOL der barrierane er framsprungne med 10 mm frå senter av stang. (Merk at heile modellen ikkje synes då den er forstørra for betre illustrering)

Figur 8 syner eit av mange oppsett nytta for simuleringar. Modellane vart laga i 2D og simulert med ekstremt fin maskevidde (oppløysing) for å oppnå mest mogeleg nøyaktige resultat. Sidan eit sikksakk-arrangement av barrierane vart undersøkt, var det ingen symmetrilinjer å utnytta for å minska simuleringane. Figuren syner den 7 mm diameter store aluminiumsstanga sentrert i bilete med to barrierar, plassert under på høvesvis 20 og 40 mm frå stanga. Barrierane vart gitt ein permittivitet på $\epsilon_r = 2,3$ [16]. Jordelektroden, som også var av aluminium, er vist i botn av biletet. Heile modellen var plassert i eit luftfylt areal med mål på 300x100 mm. Fylgjande grenseføresetnader vart gjevne i modellen:

- Elektrisk potensial på stangoverflata
- Jordpotensial på jordelektroden
- Elektrisk potensial på overflata av barrierane i enkelte tilfelle
- Inga lading på ytterkantar i luftarealet som omfamnar heile geometrien til figuren

4. Resultat

Alle eksperimentresultata har vorte utført med positiv lynimpulsspenning ved bruk av opp og-ned metoden. Alle forsøka har hatt ein gap-distans som har vore fastsatt på 80 mm.

Når fleire barrierar har vorte nytta i gapet, har avstanden mellom barrierane alltid vore 20 mm.

Startspenninga som vart stilt inn på styrepulten, tok utgangspunkt i formel (23). Det viste seg at den kun stemte for oppsettet der ingen barrierar var tilstades i gapet.

Ein kan difor fastslå at denne formelen ikkje kan nyttast i eit sikksakk-design.

Dei presenterte verdiane i tabellane er avstanden til overflata av barrierane, den teoretisk kortaste streamerlengda (X_s) funne ved hjelp av formlane (6-9), gjennomslagsspenninga (U_{50}), haldfastheita (U_{02}) og standardavviket (σ).

Dei tre sistnemnde verdiane er funne ved bruk av maximum likelihood metoden (MLM).

Resultata frå laboratorieeksperimenta er delt inn i tre ulike grupper, høvesvis:

- Ingen barrierar i gapet
- Oppsett som ikkje skapar sikksakk-design (sjå Figur 2A, B, C og D)
- Oppsett som skapar sikksakk-design (sjå Figur 2E og F)

Resultata er synleggjort i tabellform og illustrert med tilhøyrande grafar der dette let seg gjera. Standardavvika varierer ein del i dei ulike forsøka. Fleire ulike grunnar kan vere orsak til dette, blant anna variasjon i temperatur og atmosfæriske forhold. Små forskyvingar ved plassering av barrierar har med stor sannsynlegheit også skjedd.

4.1 Ingen barrierar i gapet

Tabell 4: Syner streamerlengda (X_s), målt gjennomslagsspenning (U_{50}), haldfastheit (U_{02}) og standardavviket (σ).
Gap-distans 80 mm, ingen barriere i gapet.

Ingen barriere i gapet			
X_s [mm]	U_{50} [kV]	U_{02} [kV]	σ [kV]
80	79,1	66,5	6,3

Resultatet utan barriere er teken med som eit samanlikningsgrunnlag for å kunna sei om haldfastheita aukar eller minkar ved introduksjon av hindringar i gapet.

4.2 Oppsett som ikkje skapar sikksakk-design

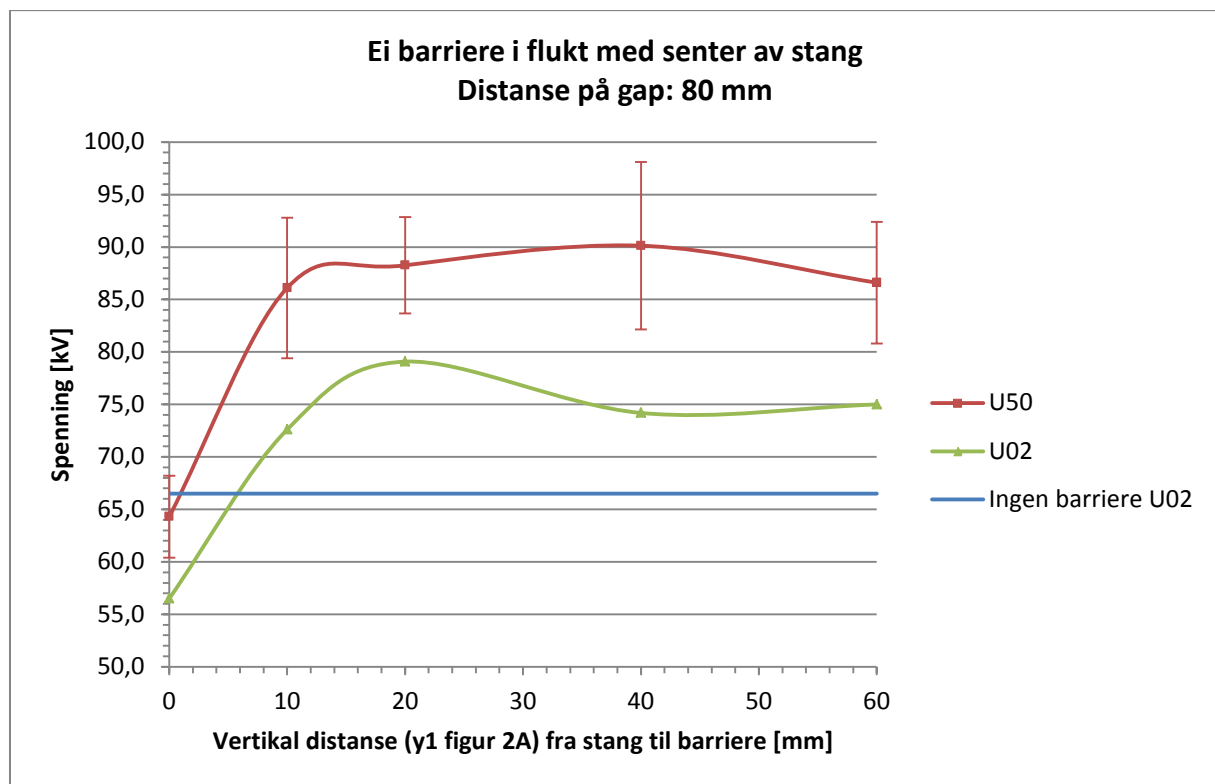
I alle oppsetta som ikkje skapar sikksakk-design, ser ein frå grafane presentert under her at haldfastheita minkar ved å plassera barrierane heilt inntil høgspentelektroden.

4.2.1 Ei barriere

Tabell 5: Syner distansen til toppen av barrieren, streamerlengda (X_s), målt gjennomslagsspenning (U_{50}), haldfastheit (U_{02}) og standardavviket (σ). Ei barriere i gapet som samsvarar med oppsett i Figur 2A)

Ei barriere i gapet plassert i flukt med senter av stang				
Distanse frå stanga [mm]	X_s [mm]	U_{50} [kV]	U_{02} [kV]	σ [kV]
0	80	64,3	56,5	3,9
10	80	86,1	72,6	6,7
20	80	88,3	79,1	4,6
40	80	90,1	74,2	8,0
60	80	86,6	75,0	5,8

Dette oppsettet gjev inga auke i teoretisk streamerlengde.

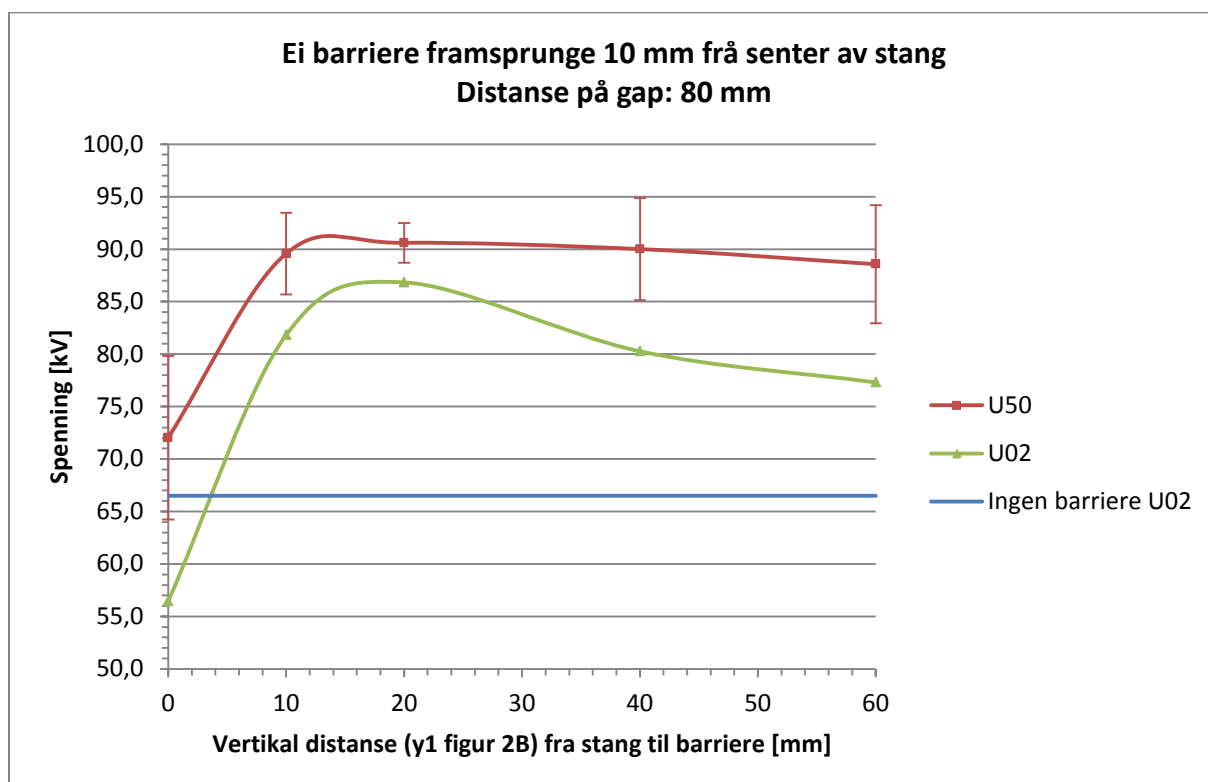


Figur 9: Illustrerer gjennomslagsspenninga U_{50} med standardavvik og haldfastheita U_{02} . Begge kurvane er ein funksjon av distansen til barrieren og samsvarar med verdiane gitt i Tabell 5. Den blå linja illustrerer haldfastheita til gapet utan barrierar.

Tabell 6: Syner distansen til toppen av barriera, streamerlengda (X_s), målt gjennomslagsspenning (U_{50}), haldfastheita (U_{02}) og standardavviket (σ). Ei barriere i gapet som samsvarar med oppsett i Figur 2B)

Ei barriere framsprunge 10 mm frå senter av stang				
Distanse frå stanga [mm]	X_s [mm]	U_{50} [kV]	U_{02} [kV]	σ [kV]
0	90	72,0	56,5	7,8
10	84,14	89,6	81,8	3,9
20	82,36	90,6	86,8	1,9
40	81,23	90,0	80,3	4,9
60	80,83	88,6	77,3	5,6

Teoretisk kortaste streamerlengda i Tabell 6 funne ved hjelp av formel (7).

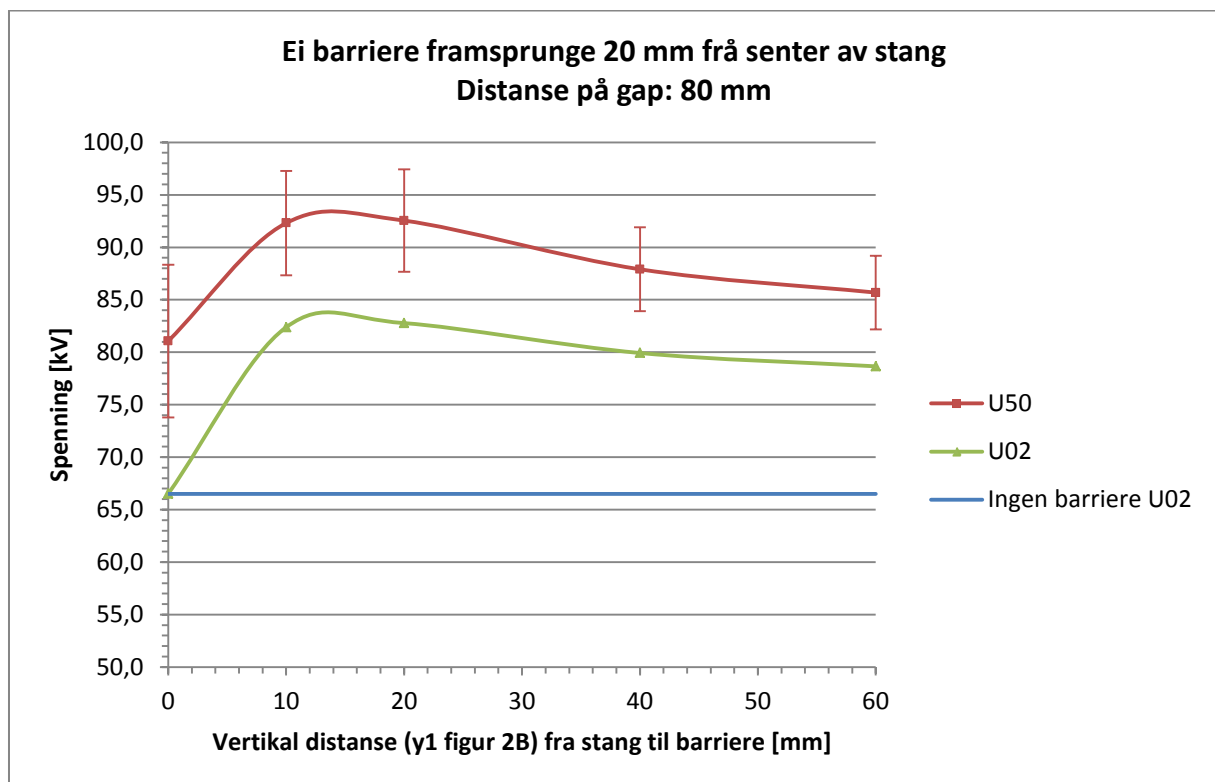


Figur 10: Illustrerer gjennomslagsspenninga U_{50} med standardavvik og haldfastheita U_{02} . Begge kurvane er ein funksjon av distansen til barriera og samsvarar med verdiane gitt i Tabell 6. Den blå linja illustrerer haldfastheita til gapet utan barrierar.

Tabell 7: Syner distansen til toppen av barriera, streamerlengda (X_s), målt gjennomslagsspenning (U_{50}), haldfastheita (U_{02}) og standardavviket (σ). Ei barriere i gapet som samsvarar med oppsett i Figur 2B)

Ei barriere framsprunge 20 mm frå senter av stang				
Distanse frå stanga [mm]	X_s [mm]	U_{50} [kV]	U_{02} [kV]	σ [kV]
0	100	81,1	66,5	7,3
10	92,36	92,3	82,4	5,0
20	88,28	92,5	82,8	4,9
40	84,72	87,9	79,9	4,0
60	83,25	85,7	78,7	3,5

Teoretisk kortaste streamerlengda i Tabell 7 funne ved hjelp av formel (7).



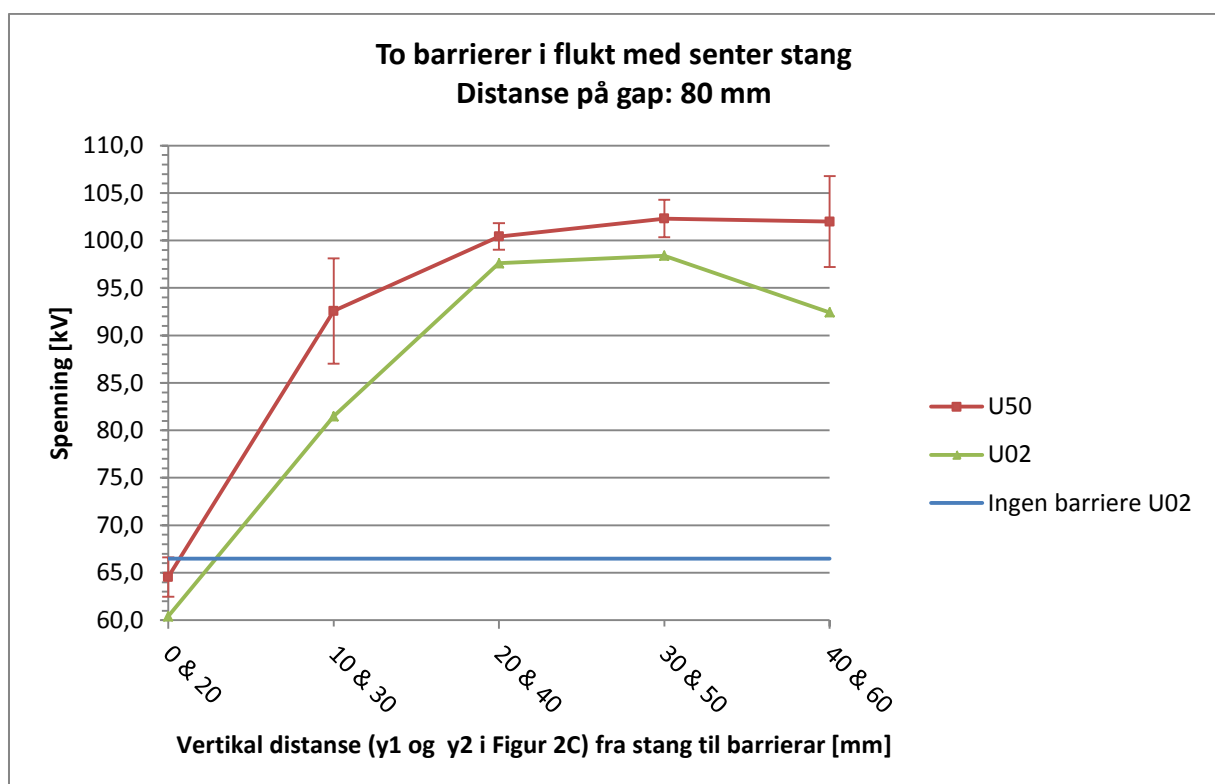
Figur 11: Illustrerer gjennomslagsspenninga U_{50} med standardavvik og haldfastheita U_{02} . Begge kurvane er ein funksjon av distansen til barriera og samsvarar med verdiane gitt i Tabell 7. Den blå linja illustrerer haldfastheita til gapet utan barrierar.

4.2.2 To barrierar i gapet (ikkje sikksakk-design)

Tabell 8: Syner distansen til toppen av barrierane, streamerlengda (X_s), målt gjennomslagsspenning (U_{50}), haldfastheita (U_{02}) og standardavviket (σ). To barrierar i gapet som samsvarar med oppsett i Figur 2C)

To barrierar i gapet plassert i flukt med senter av stang				
Distanse frå stanga [mm]	X_s [mm]	U_{50} [kV]	U_{02} [kV]	σ [kV]
0 & 20	80	64,5	60,4	2,1
10 & 30	80	92,6	81,5	5,5
20 & 40	80	100,4	97,6	1,4
30 & 50	80	102,3	98,4	2,0
40 & 60	80	102,0	92,4	4,8

Dette oppsettet gjev inga auke i teoretisk streamerlengde.



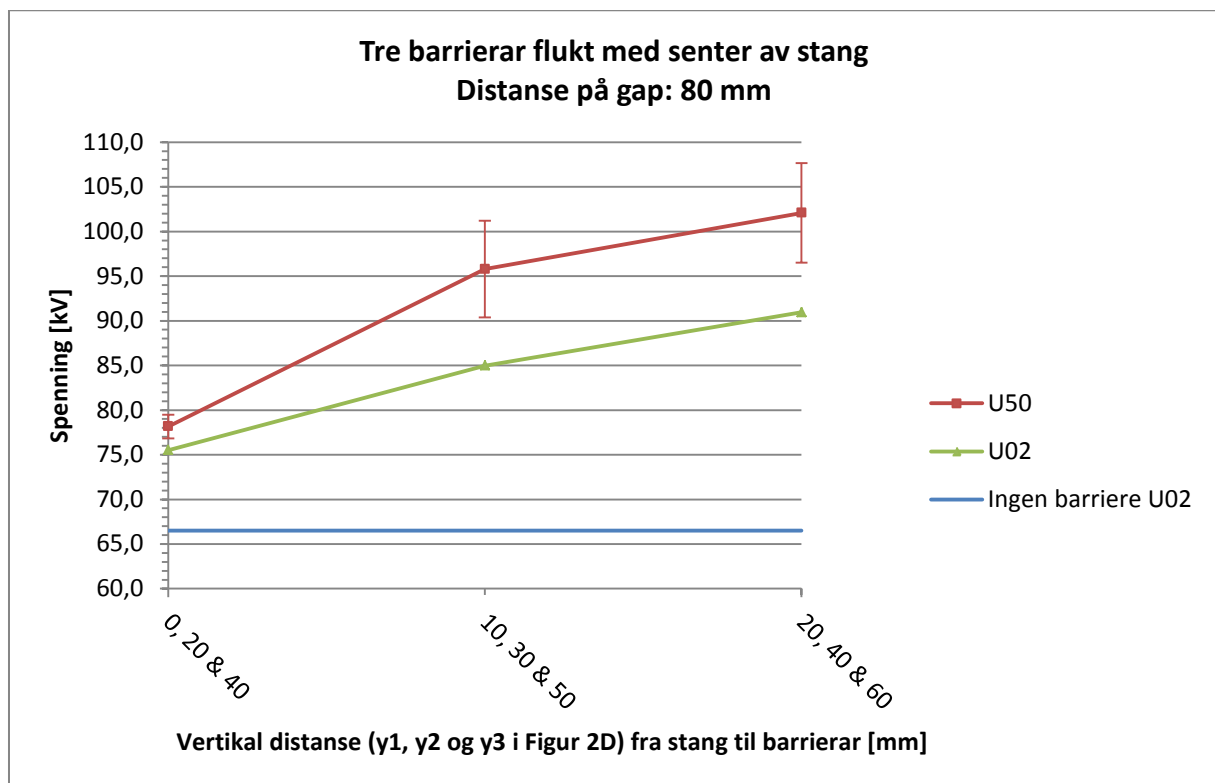
Figur 12: Illustrerer gjennomslagsspenninga U_{50} med standardavvik og haldfastheita U_{02} . Begge kurvane er ein funksjon av distansen til barrierane og samsvarar med verdiane gitt i Tabell 8. Den blå linja illustrerer haldfastheita til gapet utan barrierar.

4.2.3 Tre barrierar i gapet (ikkje sikksakk-design)

Tabell 9: Syner distansen til toppen av barrierane, streamerlengda (X_s), målt gjennomslagsspenning (U_{50}), haldfastheita (U_{02}) og standardavviket (σ). Tre barrierar i gapet som samsvarar med oppsett i Figur 2D)

Tre barrierar i gapet plassert i flukt med senter av stang				
Distanse frå stanga [mm]	X_s [mm]	U_{50} [kV]	U_{02} [kV]	σ [kV]
0, 20 & 40	80	78,2	75,5	1,3
10, 30 & 50	80	95,8	85,0	5,4
20, 40 & 60	80	102,1	90,9	5,6

Dette oppsettet gjev inga auke i teoretisk streamerlengde.



Figur 13: Illustrerer gjennomslagsspenninga U_{50} med standardavvik og haldfastheita U_{02} . Begge kurvane er ein funksjon av distansen til barrierane og samsvarar med verdiane gitt i Tabell 10. Den blå linja illustrerer haldfastheita til gapet utan barrierar.

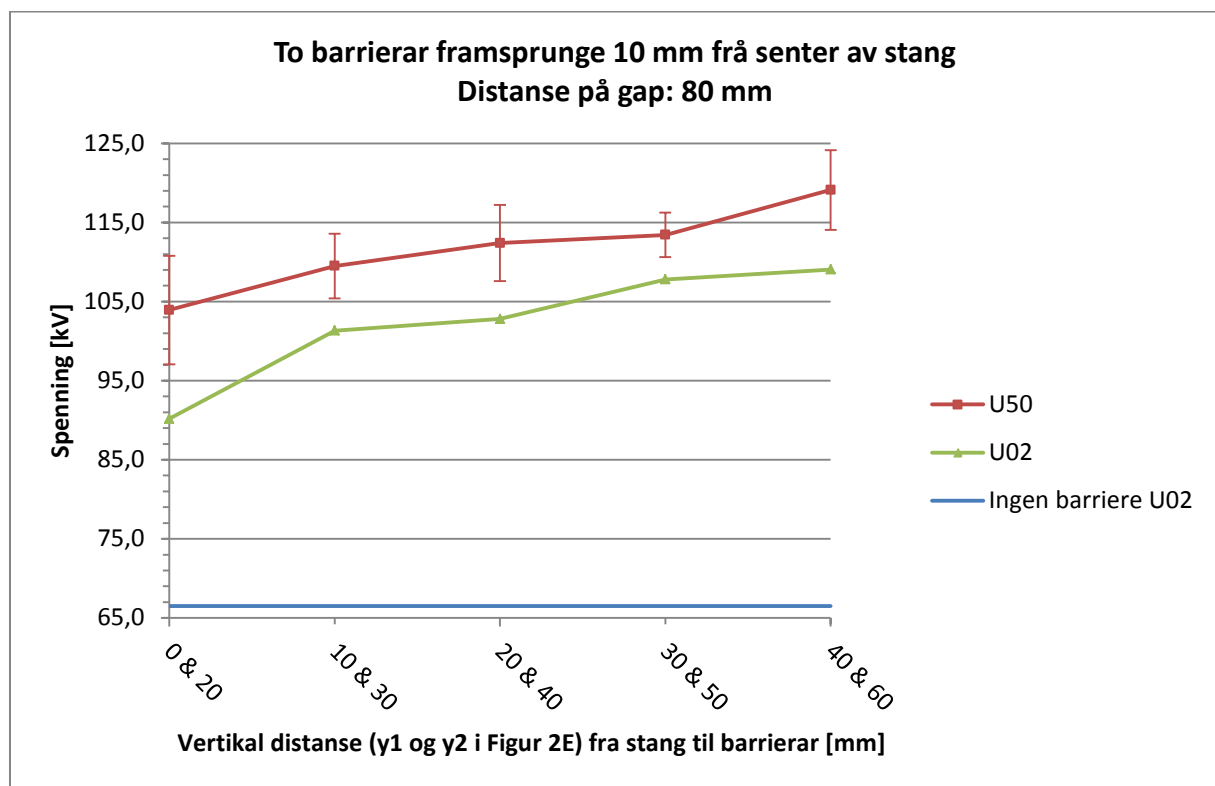
4.3 Design som skapar sikksakk-effekt

4.3.1 To barrierar i gapet (sikksakk-design)

Teoretisk kortaste streamerlengde i Tabell 10 og Tabell 11 funne ved hjelp av formel (8).

Tabell 10: Syner distansen til toppen av barrierane, streamerlengda (X_s), målt gjennomslagsspenning (U_{50}), haldfastheita (U_{02}) og standardavviket (σ). To barrierar i gapet som samsvarar med oppsett i Figur 2E)

To barrierar framsprunge 10 mm frå senter av stang				
Distanse frå stanga [mm]	X_s [mm]	U_{50} [kV]	U_{02} [kV]	σ [kV]
0 & 20	100	103,9	90,2	6,9
10 & 30	94,14	109,5	101,3	4,1
20 & 40	92,36	112,4	102,8	4,8
30 & 50	91,62	113,4	107,8	2,8
40 & 60	91,23	119,1	109,0	5,0



Figur 14: Illustrerer gjennomslagsspenninga U_{50} med standardavvik og haldfastheita U_{02} . Begge kurvane er ein funksjon av distansen til barrierane og samsvarar med verdiane gitt i Tabell 9. Den blå linja illustrerer haldfastheita til gapet utan barrierar.

Det vart gjort forsøk med to barrierar framsprunge 20 mm frå senter av stang (sjå Tabell 11). Dette forsøket vart stoppa då ingen gjennomslag førekom opp i mot føresetnadsverdien på 130 kV. Haldfastheita vart difor ikkje funne ved dette oppsettet.

Tabell 11: Syner distansen til toppen av barrierane, streamerlengda (X_s), målt gjennomslagsspenning (U_{50}), haldfastheita (U_{02}) og standardavviket (σ). To barrierar i gapet som samsvarar med oppsett i Figur 2E)

Merk at oppsettet ikkje har gitt gjennomslag før avgrensinga på 130 kV. Forsøket har difor vorte stoppa

To barrierar framsprunge 20 mm frå senter av stang				
Distanse frå stanga [mm]	X_s [mm]	U_{50} [kV]	U_{02} [kV]	σ [kV]
20 & 40	116	-	-	-

4.3.2 Tre barrierar i gapet (sikksakk-design)

Tabell 12: Syner distansen til toppen av barrierane, streamerlengda (X_s), målt gjennomslagsspenning (U_{50}), haldfastheita (U_{02}) og standardavviket (σ). Tre barrierar i gapet som samsvarar med oppsett i Figur 2F)

Merk at dei to første oppsetta ikkje har gitt gjennomslag før avgrensinga på 130 kV, forsøka har difor vorte stoppa.

Tre barrierar framsprunge 10 mm frå senter av stang				
Distanse frå stanga [mm]	X_s [mm]	U_{50} [kV]	U_{02} [kV]	σ [kV]
0, 20 & 40	110	-	-	-
10, 30 & 50	104,1	-	-	-
20, 40 & 60	102,4	127,7	103,4	12,2

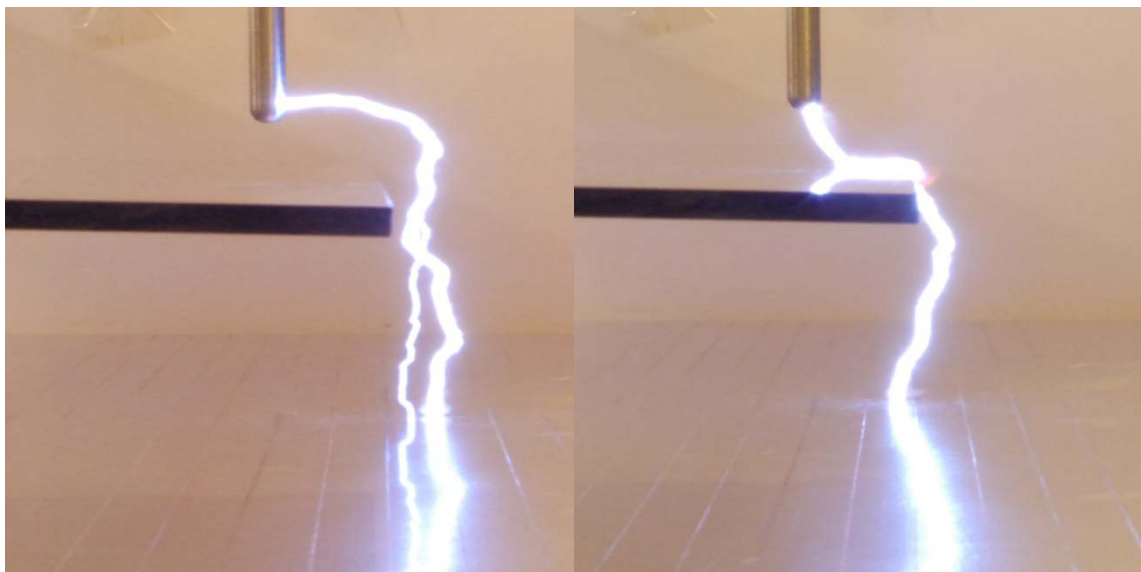
Teoretisk kortaste streamerlengde i Tabell 12 funne ved hjelp av formel (9).

Legg merke til at ein ikkje får gjennomslag når barrierane er lagt heilt inntil høgspentelektroden i Tabell 12, men først når barrierane er flytta lenger ut i gapet. Dette vik frå trendane i dei øvrige resultatata, der den lågaste gjennomslagsspenninga har oppstått når barrierane ligg heilt inntil høgspentelektroden.

4.4 Fotografi av kanalutladingar

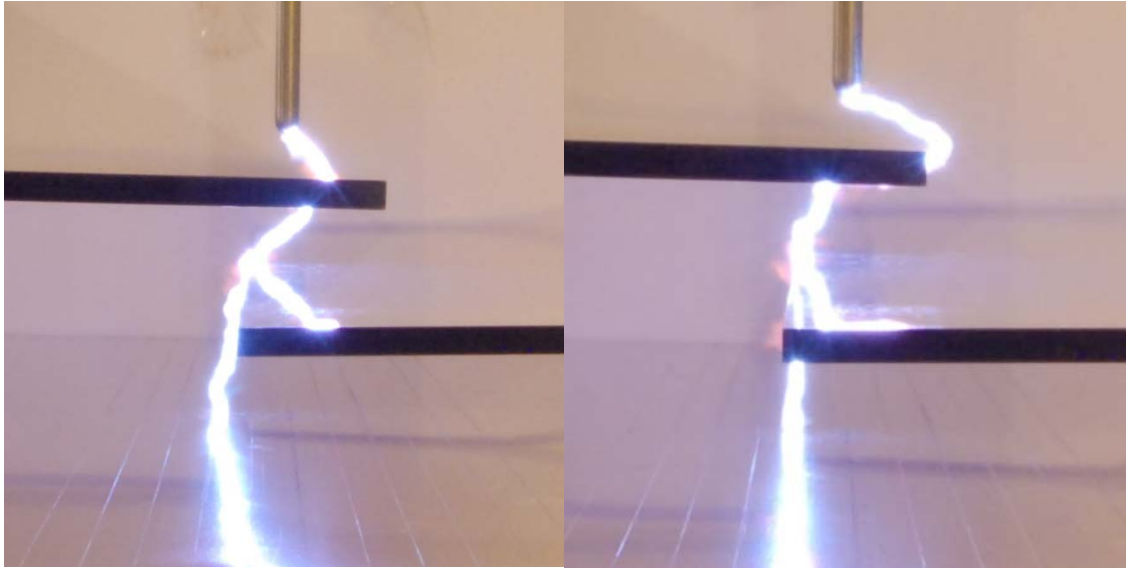
Figur 15, Figur 16 og Figur 17 viser kanalutladingar ved ulike oppsett. Grunna refleksjonar i dei transparente lexanplatene og i den blanke overflata til jordelektroden kan det vera vanskeleg å tolka bileta. Bileta fortel ikkje kvar streameren har tennt, eller korleis den har propagerert. Det dei derimot syner er at ei kanalutlading ikkje alltid tek den kortast mogelege vegen. Utladinga kan propagera i både luft eller langs ei barriereoverflate, noko som ikkje samsvarar med dei raudstipla linjene i Figur 2 som illustrerer den teoretisk kortaste vegen ein streamer kan gå. Det endrar ikkje mykje på lengda som utladingskanalen tek, men ein kan ikkje seia med sikkerheit at ei utlading tek den kortaste vegen.

Legg merke til at når utladingskanalen treff kanten på ei barriere, så er det eit svakt raudfarga skin. Dette kan vere ein indikasjon på at barrieria brenn av eit minimalt stykke kvar gong ein utladingskanal breiar seg rundt kantane. Dette er imidlertid ikkje synleg med det blotte auga.

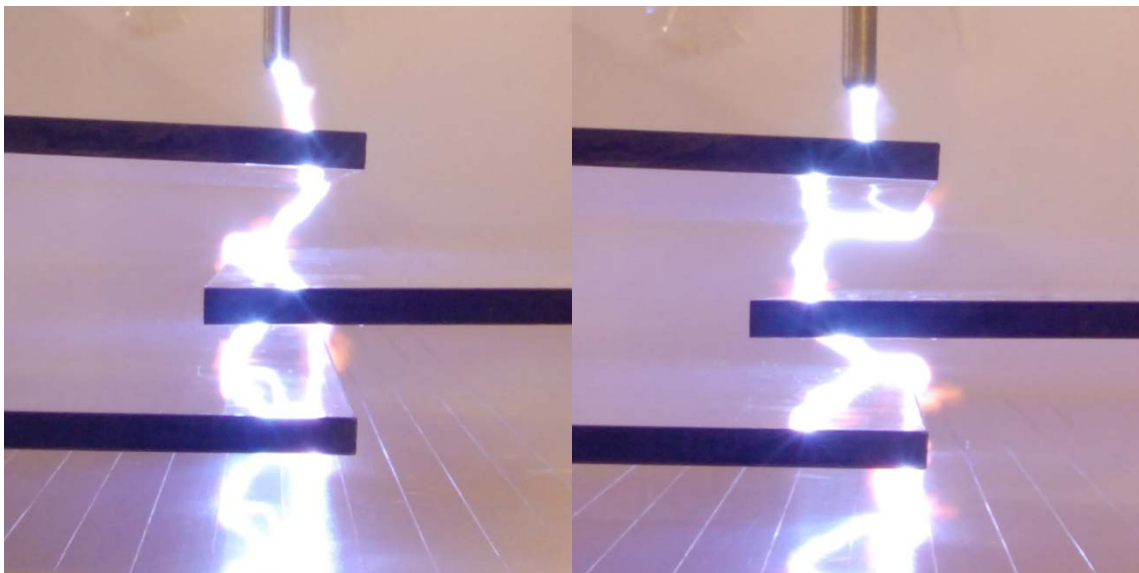


Figur 15: Oppsett: Ei barriere, vertikalt 10 mm, horisontalt 20 mm, påtrykka spenning 93 kV.

Venstre bilete syner at utladingskanalen propagerer i luft utan å røyre plata, medan høgre bilete viser at streameren følgjer overflata på barrieria før den går rett i jordelektroden.



Figur 16: Oppsett: To barrierar i sikksakk-design, vertikalt 10 og 30 mm, horisontalt 10 mm, påtrykka spenning 111 kV. Venstre bilete viser at utladingskanalen tek kortaste veg, medan høgre bilete viser at kanalen avvik ved å følgja underkant av øvre barriere.



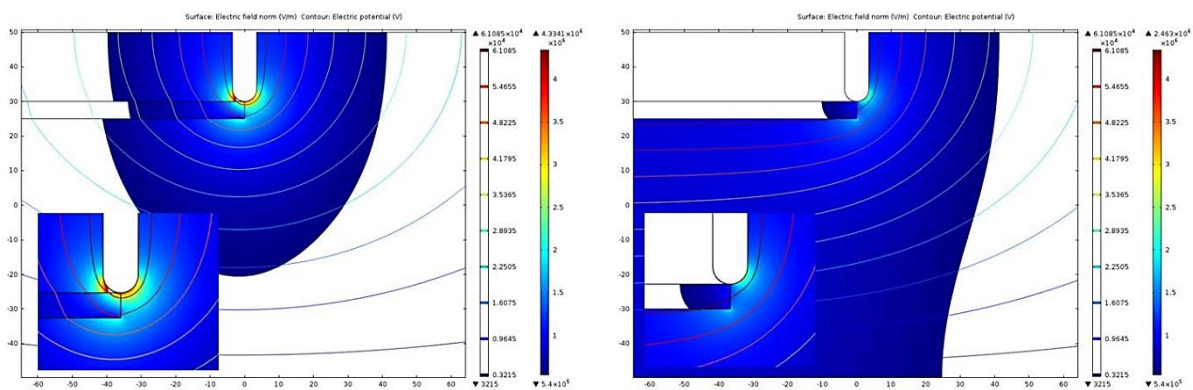
Figur 17: Oppsett: Tre barrierar i sikksakk-design, vertikalt 20, 40 og 60 mm, horisontalt 10 mm, påtrykka spenning 130 kV. Venstre bilete syner at utladingskanalen tek kortaste veg, medan høgre bilete viser at kanalen avvik frå dette ved å følgja underkant av øvre barriere. Merk at begge bileta er prega av mykje refleksjon.

4.5 Elektriske feltsimuleringar

Fleire ulike feltsimuleringar har vorte gjort i COMSOL, der ulike oppsett har blitt vurdert. Alle gapdistansar var fastsett til 80 mm. I dei ulike simuleringane har det vorte antatt at streamarane tenner og propagerer i frå høgspenstanga. Når streamarane treff overflata på ei barriere, vil det samlast ladingar på denne overflata og ein kan difor gje overflata eit spenningspotensial [3, 9]. Dette er også nemnt i 2.3 og illustrert i Figur 3.

Spenningspotensialet som er gitt til barriereoverflatene i dei ulike simuleringane er spenninga på høgspentelektroda minus 0,54 kV/mm. Den fargelagde bakgrunnen indikerer feltstyrken målt i V/m, og maksimalverdien er vist på toppen av fargeskalaen til høgre for bileta. Områder der feltstyrken er under 0,54 kV/mm er kvite på bileta. Desse områda er definert som områder der ein streamer ikkje kan propagera (streamerutbreiingsfeltet).

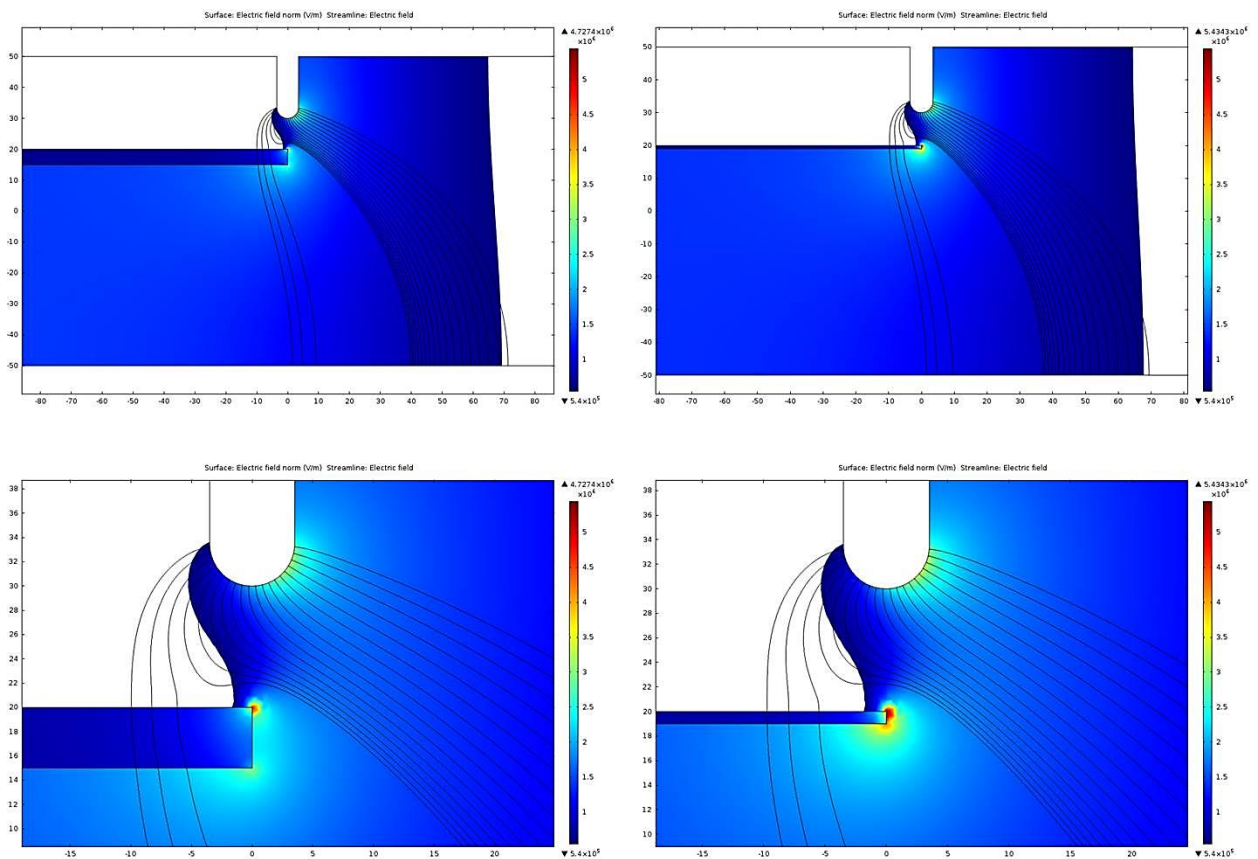
4.5.1 Spenningspotensial på barrierar



Figur 18 COMSOL: Viser oppsett med ei barriere som ligg heilt inntil stanga og i flukt med senter. Den fargelagde bakgrunnen syner feltfordelinga der det kvite feltet indikerer $E < 0,54$ kV/mm, ekvipotensiallinjene er spenninga målt i V. På biletet til venstre er stanga påtrykka 64,3 kV. På biletet til høgre er stanga og barriera påtrykka 64,3 kV. Merk at eit forstørra bilete av stanga er lagt til i venstre biletkant på begge bileta.

Venstre bilete på Figur 18 indikerar at bakgrunnsfeltet åleine ikkje er sterkt nok til at ein streamer kan propagera heilt ned til jordelektroden. Det same bilete syner også at det høgaste feltet er i kilepunktet mellom barriera og stanga. Feltet er også forsterka i underkant av barriera. Permittiviteten til plasten er med på å gje ei forstyring av feltet som fører til ei lita forsterking. Biletet til høgre viser korleis det elektriske feltet endrar seg ved å gje overflata til barriera eit spenningspotensial. I dette tilfellet har overflata til barriera fått påtrykka 64,3 kV som var gjennomslagsspenninga i oppsettet, og det er den same spenninga som er påtrykka høgspentelektroda. Dette fører til at streamerutbreiingsfeltet på 0,54 kV/mm når frå høgspentelektroda og ned til jordelektroden, og dermed kan større delar av gapet støtta ei streamerutbreiing.

4.5.2 Feltendingring ved ulike tjukkleik på barrierar



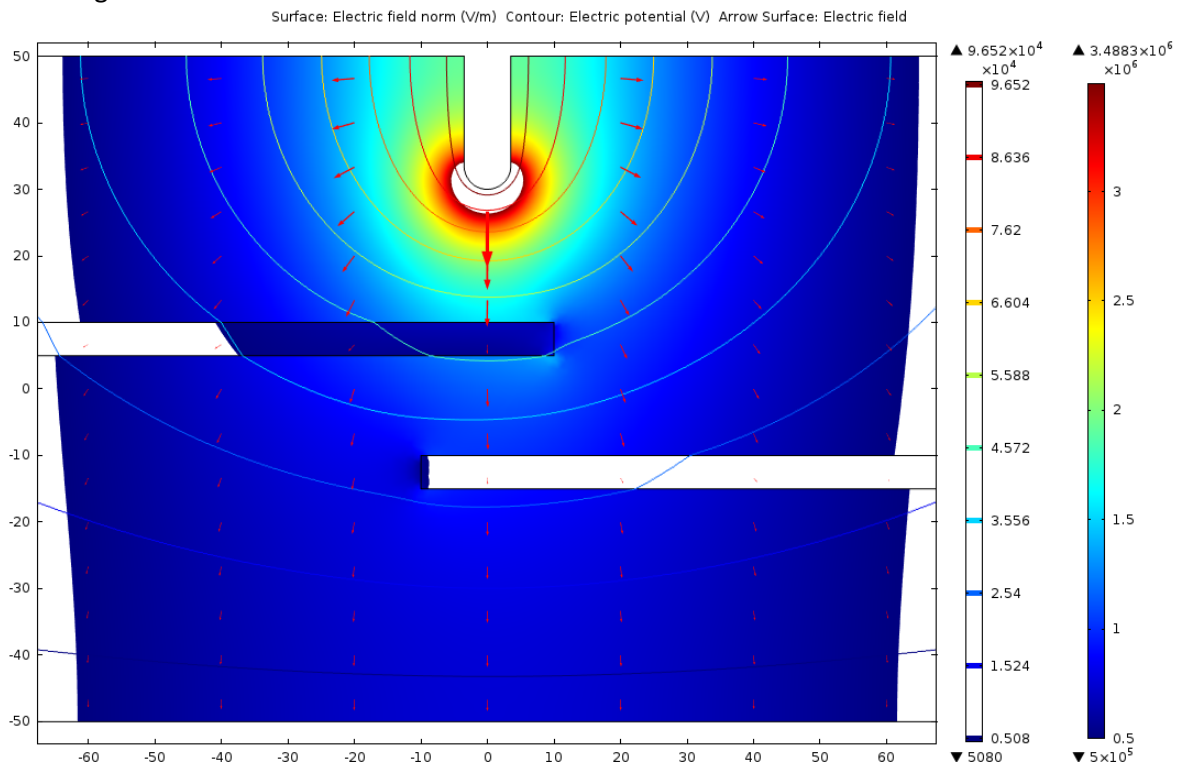
Figur 19 COMSOL: Illustrerar feltfordelinga på ei tjukk barriere (5 mm) og ei tynn barriere (1 mm). Den farga bakgrunnen syner det elektriske feltet E , og dei svarte linjene syner streamerlinjene som propagerer frå stanga. Høgspenstanga er påtrykka 100 kV. Toppen av barrieria er plassert 10 mm under stanga, og overflata på barrieria er påtrykka stangspenninga minus 0,54 kV/mm. Det kvite feltet syner der feltet $E < 0,54$ kV/mm.

Når ein samanliknar dei øvste bileta i Figur 19, så viser biletet til venstre med tjukk barriere at streamerlinjene vert forskyvd litt lengre ut i frå barrieria enn i høgre bilete der ei tynn barriere er nytta. Samanliknar ein dei nedste bileta som er forstørra versjonar av dei øvste, så kan ein tydeleg sjå at feltet er sterkare på dei skarpe kantane på barrierane.

Ein interessant observasjon er derimot at feltet er noko sterkare på den tynne barrieria til høgre under dei same føresetnadane. Dette kan tyde på at den fysiske tjukkleiken har ein noko dempe effekt på det elektriske bakgrunnsfeltet. Det høgaste oppnådde nivået på feltstyrken står over fargeskalaen på høgre side av bileta.

4.5.3 Fleire barrierar i gapet

Når fleire barrierar er introduserte i gapet, har simuleringane vorte teke stegvis. Under ei impuls-spenning er det antatt at streamerane utbreir seg stegvis. Difor har også simuleringane blitt utført stegvis.



Figur 20 COMSOL, Steg 1: To barrierar i sikksakk-design plassert høvesvis 20 mm og 40 mm frå stanga, begge er horisontalt framsprunge med 10 mm frå senter av stanga. Påtrykka spenning på stang $U_{50}=112,4$ kV. Den fargelagde bakgrunnen er det elektriske feltet, medan konturlinjene syner potensialet i V. Pilene syner utbreiingsretninga til det elektriske feltet og pil-lengdene er proporsjonal med feltstyrken.

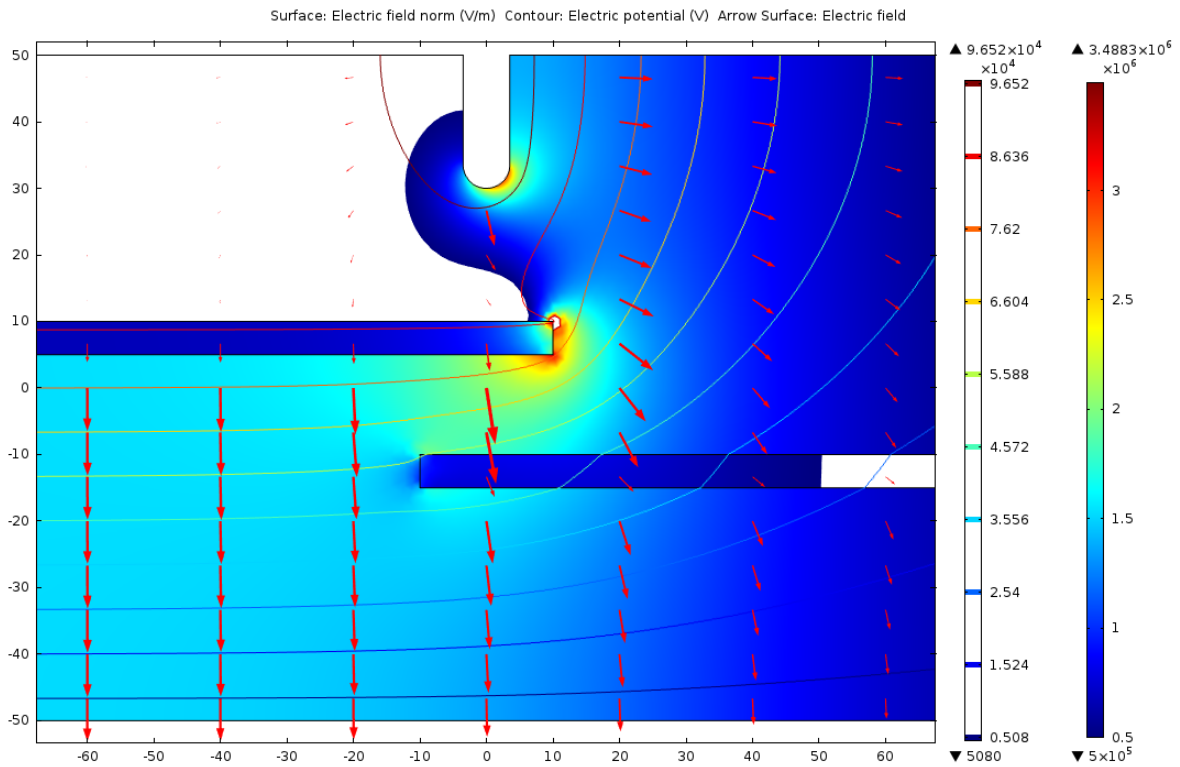
Steg 1 i Figur 20 illustrerer at streamerutbreiingsfeltet er sterkt nok til at streamerane kan utbre seg frå stangelektroden til jordelektroden når påtrykka spenning er $U_{50} = 112,4$ kV, som var spenninga som gav gjennomslag ved dette oppsettet i laborieforsøka. Dei raude pilene er proporsjonal med feltstyrken og syner at streamerane kan utbre seg som ein nedstraums paraply og jamt fordelt utover gapet.

I steg 2 når streamerane frå høgspentelektroden når barrierana som er nærast, vil overflata verta lada, og eit potensiale byggjer seg opp på overflata (illustrert i Figur 21).

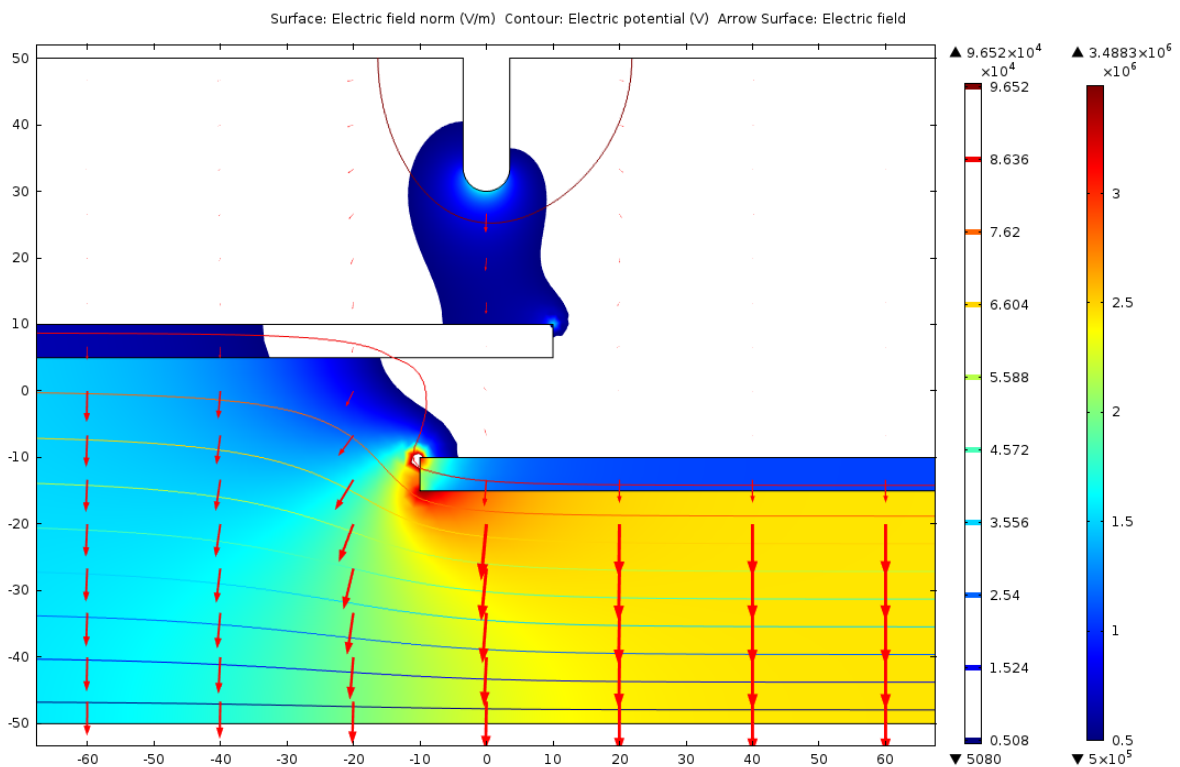
Vidare observerer ein at feltet under den øvste barrierana vert meir homogent når eit potensiale er påtrykka barrieroverflata. Maksimalpunktet til feltet er også flytta til kanten av den øvste barrierana. Noko som medfører at streamerane vil fortsetja å propagera nedover mot den neste barrierana i tråd med retninga til dei raude pilene.

I steg 3 i Figur 22 er det antatt at streamerane har nådd den nedste barrierana og lada opp denne. Dermed har også den nedste barrierana fått påtrykka eit potensiale. Ein ser den same trenden som frå steg 2 ved at homogeniteten til feltet under barrierana aukar, noko som gjer det vanskelegare for ein streamer å propagera. Igjen er maksimalpunktet til det elektriske feltet flytta seg til kanten av den nedste barrierana, og dei raude pilene har endra retning. Dette vil skyva eventuelle streamere i den same retninga som pilene. Ein kan også sjå at streamerutbreiingsfeltet ikkje er samanhengande frå høgspentelektroden og ned til jordelektroden.

I steg 3 er det allereie antatt at streamerane har nådd nedste barrierana, difor er det grunnlag for å tru at streamerane kan propagera vidare frå kanten av den nedste barrierana til jordelektroden.

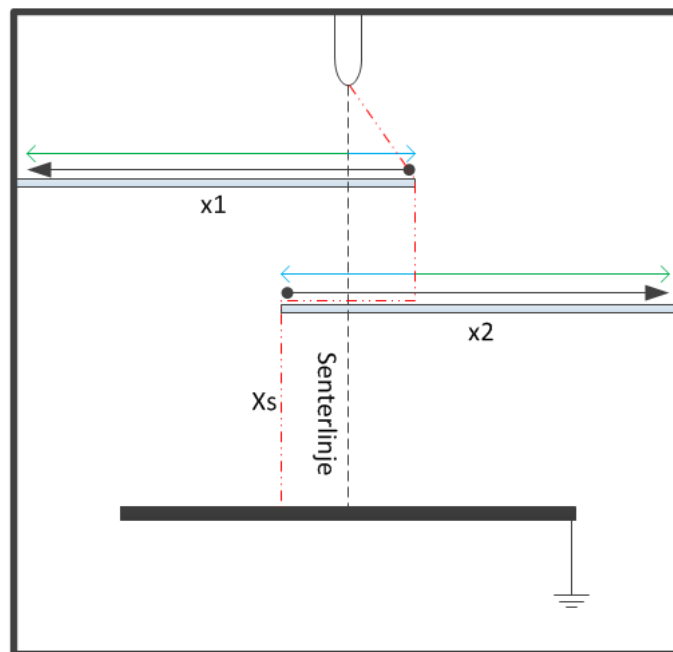


Figur 21 COMSOL, steg 2: Same oppsett som i Figur 20. Påtrykka spenning på høgspenstanga er $U_{50} = 112,4$ kV. Toppen av den fyrste barrieria er plassert 20 mm under stanga, og overflata på barrieria er påtrykka stangspenninga minus $0,54$ kV/mm.



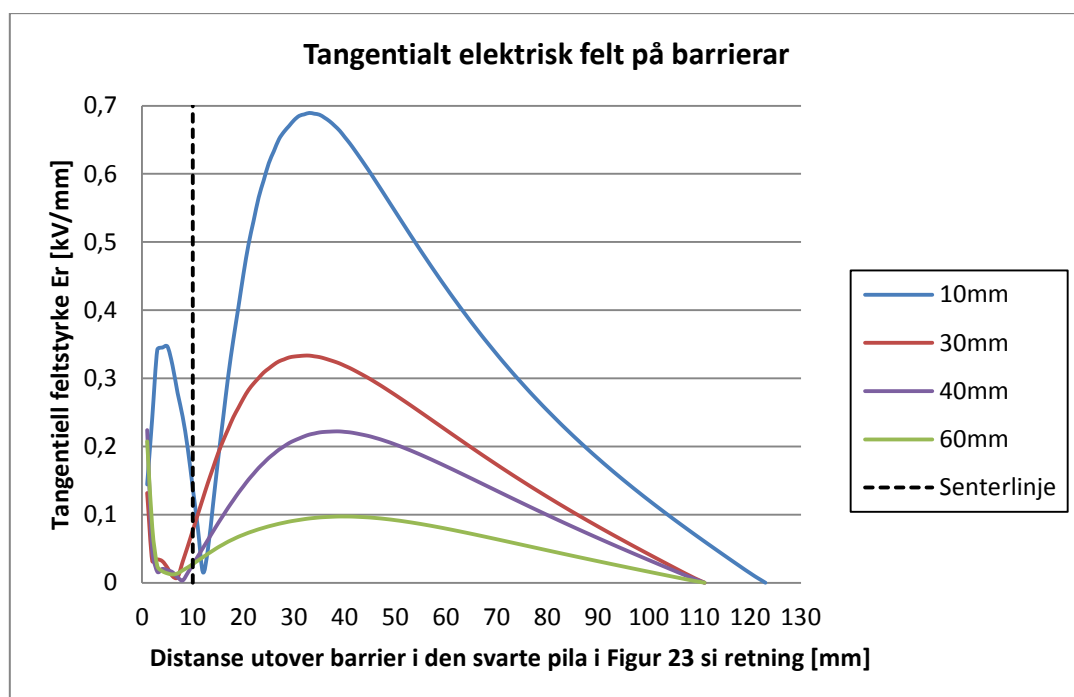
Figur 22 COMSOL, steg 3: Same oppsett som i Figur 20. Påtrykka spenning på høgspenstanga er $U_{50} = 112,4$ kV. Toppen av den fyrste barrieria og den andre barrieria er høvesvis plassert 20 & 40 mm under stanga, og overflata på barrierane er påtrykka stangspenninga minus $0,54$ kV/mm.

4.5.4 Tangentialfelt på barriereoverflater i sikksakk-design



Figur 23 Illustrer korleis det tangensiale feltet har vorte simulert

Det tangensiale feltet som oppstår på ei barriere når den vert utsett for eit bakgrunnsfelt har vorte simulert i COMSOL. Figur 23 syner korleis det tangensiale feltet på eit oppsett med to barrierar har vorte simulert. Ei måling av det elektriske feltet i horisontal retning er målt. Målinga starta frå kanten av barrierana, markert med den svarte kula og vidare til enden av den svarte linja i pilas retning. Det vart gjort på begge barrierane, først i retning x1 deretter i retning x2. Senterlinja viser den vertikale linja frå tuppen av høgspentelektroden og direkte til jordelektroden, medan den raustipla linja (X_s) syner korleis ein streamer kan propagera. Den blå og grøne linja syner den tenkte kraftretninga på det tangensiale feltet i forhold til streamerlinja (X_s).



Figur 24 Tangensialt elektrisk felt på overflata av barrierar i ulike høgdar. To barrierar er plassert i gapet samstundes og, høvesvis på 10 & 30 mm og på 40 & 60 mm. Påtrykka spenning 100 kV.

Figur 24 visar absoluttverdien til det tangentielle feltet på overflata til barrierane. To ulike oppsett der to barrierar er framsprunge 10 mm og plassert på høvesvis 10 & 30 mm, deretter 40 & 60 mm, er illustrert i same grafen for å syne korleis det tangentielle feltet endrar seg med aukande avstand frå høgspentelektroda.

Ein kan tydeleg sjå at styrken og utbreiinga på feltet minkar ved aukande avstand frå høgspentelektroden. Rundt senterlinja i Figur 24 kan ein sjå at den tangentielle feltstyrken er noko lågare då kraftretninga på feltet endrast i nærleiken av denne linja, noko som er markert med grøne og blå piler i Figur 23.

I eit sikksakk-design kan det seiast at ein streamer som kan føra til gjennomslag (markert med raudstipla linje i Figur 23) ikkje vil bevega seg langt unna senterlinja. Dette kan vera ein fordel i sikksakk-designet sidan den tangentielle feltstyrken rundt senterlinja markert i Figur 24 er låg. Effekten av det tangentielle feltet er svakare og høgare spenning må dermed truleg påtrykkast for å oppnå gjennomslag.

5. Diskusjon

Innleiingsvis kan det nemnast at det ikkje har vorte funne relevant teori der multiple barrierar er nytta i inhomogene gap. Difor er av diskusjonane i oppgåva knytt opp mot teori som gjeld inhomogene gap med sentrerte barrierar, til tross for dei geometriske ulikskapane frå oppsetta nytta i denne oppgåva.

5.1 Stang-plate-gap med barrierar som ikkje skapar sikksakk-design

Resultata stadfestar at det er mogeleg å oppnå auke i haldfastheit når ein introduserer barrierar i gapet som ikkje skapar sikksakk-design. Resultata er avhengig av talet på barrierar og plasseringa av desse.

5.1.1 Ei barriere

Oppsetta der ei barriere er nytta er det, som er mest samanliknbart med ei sentrert barriere. Tre ulike oppsett med varierende høgde er nytta når ei barriere er tilstades i gapet.

Viser til illustrasjonane i Figur 2 A) og B).

Trenden for dei ulike oppsetta er omtrent identiske (sjå Figur 10, Figur 11 og Figur 12), men ein oppnår litt høgare gjennomslagsspenningar der barrierar er framsprunge i forhold til senter av stanga (Figur 11 og Figur 12). Dette verkar naturleg sidan den teoretiske streamerlengda aukar dess meir framsprunge barrierar er.

Når ei barriere er nytta i gapet, kan ein tydeleg sjå at det er ei ulempe å plassera den heilt inntil høgspentelektroden. Figur 9, Figur 10 og Figur 11 illustrerer dette ved at den grønne linja (U_{02}) er lågare enn den blå linja som representerer gapet utan barrierar.

I det verste tilfellet (Figur 9) er haldfastheita redusert med 10 kV samanlikna med eit barrierelaust gap. Dette var ikkje eit uventa resultat då tidlegare studiar syner same trenden [2, 11].

Ein grunn til at det oppstår gjennomslag ved lågare spenningar kan vera at den 5 mm tjukke barrierar fungerer som ei forlenging av høgspenstanga. Dette kan sjåast i Figur 18 på det høgre biletet der barrierar ligg heilt inntil stanga. Overflata på barrierar har fått same potensial som høgspentelektroden. Det kan tenkjast at ei elektrodelaus tenning av streamerane kan oppstå i underkant av barrierar i nærleiken av det skarpe hjørnet der feltstyrken er høgast.

Eit anna framlegg er at det sterke tangentielle feltet som oppstår på overflata til barrierar når den er plassert i nærleiken av høgspentelektroden, gjer at streamerane lettare propagerer på overflata til barrierar.

Når ein trekkjer barrierar lengre vekk frå høgspentelektroden, kan ein sjå ei tydeleg auke i haldfastheit (U_{02}), med ein topp på rundt 20 mm i avstand frå stanga (sjå Figur 9, Figur 10 og Figur 11), noko som tilsvarar 25 % av gaplengda i desse tilfella. Tidlegare studiar syner at ein oppnår høgast haldfastheit ved ein distanse innafor intervallet mellom 15 – 30 % av gapet [1].

Ein interessant observasjon er derimot at ein oppnår ei auka haldfastheit på 12,6 kV med oppsettet som er vist i Figur 2A). Den kortaste teoretiske streamervegen i dette oppsettet er den same som i eit barrierelaust gap (80 mm).

Ein grunn for auke i haldfastheit kan vera at barrierar skapar ei provosert tidsseinking grunna direkte obstruksjon av ladingsbærarar i gapet.

Ei anna mogeleg forklaring kan vera at barriereoverflata vert opplada og skapar eit homogent felt under barrierar. Dette vil då føre til at streamerane vert skuva horisontalt vekk frå barrierar grunna det tangentielle feltet som oppstår på overflata (synleggjort i simuleringane i Figur 19). Streamerlinjene trekkjer då systematisk bort i frå barrierar, og inn i ei sone der feltstyrken er lågare.

Utladingskanalen som er avbilda til venstre i Figur 15, syner også den same forskuinga som i simuleringane i Figur 19, noko som kan indikera at dette stemmer. Ein lyt vera særst varsam med å samanlikne ein utladingskanal med streamarar, då streamarane ikkje er synlege utan hjelp frå høgastigheitskamera.

Figur 19 syner også forskjellen mellom ei tjukk (5 mm) og ei tynn barriere (1 mm). Det kan sjå ut som det kan vera fordelaktig med ei tjukk barriere i følgje simuleringane. Feltet har ein lågare men jamnare fordeling langs den vertikale kanten på barrierana, noko som skyv streamerlinjene enda lengre ut enn ved bruk av tynne barrierar.

Merk at endringa er særst liten og at det ikkje har vore testa i praksis, berre via simuleringar.

5.1.2 To barrierar (ikkje sikksakk-design)

Når to barrierar er nytta i gapet utan å skapa eit sikksakk-design, (sjå Figur 2C, Tabell 8 og Figur 12) så gjev det den same trenden som oppsetta med ei barriere. Den teoretiske streamerlengda er den same som for eit barrierelaust gap (80mm), og haldfastheita vert redusert når barrierane er plassert heilt inntil høgspentelektroden.

Ein interessant observasjon er at den høgaste haldfastheita som vart oppnådd, var når første barriere under høgspentelektroden vart plassert på 30 mm, noko som tilsvarar 37,5 % i gaplengda. Ein årsak til auke i haldfastheita kan vera at barrierane også her skapar ei provosert tidsseinking grunna direkte obstruksjon av ladingsbærarar i gapet.

Ein annan grunn for auken i haldfastheita kan vera at styrken på det tangentielle feltet vert redusert ved aukande avstand til barrierana (sjå Figur 24).

Ein tredje effekt er at det elektriske feltet vert meir homogent under barrierane når desse vert lada opp som i simuleringane i Figur 21 og Figur 22 noko som er fordelaktig.

Kombinasjonen av desse tre effektane saman, eller kvar for seg kan vera grunn til at ein må tilføra høgare spenning for å oppnå gjennomslag.

Det var også ved dette oppsettet (Figur 12) ein nådde den høgaste auka i haldfastheit utan sikksakk-design med ei registrert auke på 48 % samanlikna med eit barrierelaust gap.

5.1.3 Tre barrierar (ikkje sikksakk-design)

Tre barrierar vart nytta i gapet utan å skapa eit sikksakk-design (sjå Figur 2D, Tabell 9 og Figur 13). Den teoretiske streamerlengda var ikkje lenger enn for eit barrierelaust gap (80 mm), men her auka haldfastheita i forhold til eit barrierelaust gap sjølv om første barriere var plassert heilt inntil høgspentelektroden.

Dette er tydeleg synleggjort i Tabell 9 der den grønne linja (U_{02}) er godt over den blå linja (U_{02} ingen barriere). Også her visar det seg at ein oppnår å betra verknaden av barrierane ved å flytta dei lengre vekk frå høgspentelektroden. Årsaka til auken i haldfastheita når barrierane er flytta lengre vekk frå elektroden, er dei same som nemnt for ei og to barrierar.

5.2 Stang-plate-gap med barrierar som skapar sikksakk-design

Resultata frå dei ulike oppsetta med sikksakk-design stadfestar at haldfastheita aukar samanlikna med eit barrierelaust gap uansett konfigurasjon, men også her endrar resultata seg ved endra høgdeplassering av barrierar.

5.2.1 To barrierar i sikksakk-design

Når to barrierar i gapet var framsprunge med 10 mm (sjå Figur 2E, Tabell 9 og Figur 13), oppnådde ein den høgaste haldfastheita observert i denne oppgåva (auke på 63,9 %). Sjølv om den teoretiske streamerlengda berre auka med 11,2 mm. Dette vart oppnådd når barrierane vart plassert i oppsettet som var lengst vekk i frå høgspentelektroden (40 & 60 mm).

Ein observasjon som kan vera viktig i høve til auken av haldfastheita er at, streamerane (raudstipla linje i Figur 23) i sikksakk-designet som er vurdert her, ikkje treng bevega seg langt frå den svartstipla senterlinja i Figur 23. Det betyr at streamerane må kryssa senterlinja ein gong for at det kan oppstå gjennomslag. Streamerane beveger seg då i området rundt kraftretningsendringa (markert med grønne og blå piler i Figur 23). I dette området er den tangentielle feltstyrken låg (sjå Figur 24), noko som kan bety at ein må auke spenninga for å oppnå gjennomslag. Dette er ein fordelaktig effekt som kan bety at sikksakk-designet svekkar verknaden av det tangentielle feltet.

I tillegg blir feltet under barrierane særers homogent når ein antek ladingar samlar seg på overflata til barrierane, noko som er synt i simuleringane i Figur 21 og Figur 22. Desse effektane samla sett kan vere grunn for at ein kan ha høgare påtrykka spenning for å oppnå gjennomslag.

5.2.2 Tre barrierar i sikksakk-design

Når tre barrierar var plassert i gapet og framsprunget 10 mm i forhold til senter av stang (sjå Figur 2F og Tabell 12), vart det ein signifikant auke i 50 % gjennomslagsspenning.

Det vart ikkje gjennomslag ved to av oppsetta før ein nådde avgrensinga til støtspenningsgeneratoren på 130 kV (sjå Tabell 12). Utan denne avgrensinga ville det vorte observert enda høgare gjennomslagsspenningar.

Det er verdt å merka seg at ein ikkje fekk gjennomslag når barrierane var plassert nærast høgspentelektroden. Dette avvik med trendane frå alle dei tidlegare oppsetta. Det kan difor tenkjast at den auka streamerlengda (oppgitt i Tabell 12) utkonkurrerer mekanismene som fører til gjennomslag ved lågare spenningar sjølv om barrierane er plassert i øvre sjikt av gapet.

Når barrierane i dette oppsettet vart plassert lengre vekk frå høgspentelektroden, fekk ein gjennomslag. U_{50} -verdien var då den høgaste som vart målt i denne oppgåva, men med eit særers høgt standardavvik slik at haldfastheita U_{02} ikkje vart like høg.

Høgaste auke i 50 % -gjennomslagsspenning (U_{50}) i denne oppgåva samanlikna med eit barrierelaust gap (80 mm), var på 61,4 % (48,6 kV) med ei teoretisk streamerlengdeauke på 22,4 mm (auke frå 80 mm til 102,4 mm i Tabell 12). Det vil sei ei auke på 2,17 kV/mm.

Samanliknar ein dette med ei anna studie [2] som også har 80 mm gapdistanse men med ei sentrert barriere, syner oppsettet i den studien ei auke på 98 % (79 kV) med ei teoretisk stremerlengdeauke på 200 mm. Det vil sei ei auke på 0,40 kV/mm

Dette gjev ein sterk indikasjon på at eit sikksakk-design har særers gode eigenskapar for å kunna auka haldfastheita i eit luftgap, noko som kan nyttast som designkriterie for kompakt høgspenutstyr. Ein lyt imidlertid vera merksam på at dette er ei samanlikning mellom to ulike design.

5.3 Mogelege feilkjelder

5.3.1 Fuktigheit og temperatur

Det har i denne oppgåva blitt antatt at laboratoriet har relativt stabile forhold sjølv om forsøka har halde på over ein lengre tidsperiode. Verknaden av temperatur og fuktigheit har dermed vorte neglisjert. Sjølv om det med stort sannsyn har vore endringar i forholda grunna endringar i vêrforholda. Ein måte å redusere denne feilkjelda i framtida på, kan vera bruk av temperaturmålingar og fuktigheitsmålingar for å oppnå så like tilhøve som mogeleg, eller slik at naudsynte korreksjonsfaktorar kan nyttast.

5.3.2 Avlesing på oscilloskopet

Alle spenningsmålingar vart utført ved hjelp av markørverktøyet på oscilloskopet. Markørane kan berre flyttast i trinn på 0,2 V ved dei innstillingane som var høvelege for oppgåva. Dette førte til relativt store avvik når ein nyttar målingsomforminga i formel (18), og for kvart trinn markøren vart flytta, endra målingane seg med 1 kV.

Om ein i tillegg legg til at den minste endringa i den tilførte spenninga ΔU var i trinn på 2,5 kV, så vil målinga nokre gongar verta avlesne som eit avvik på 2 kV og nokre gongar på 3 kV. Dette gjer at standardavviket kan verta litt større enn ynskjeleg.

5.3.3 Plassering av barrierar og restlading

Målingar av elektrostatiske felt på barriereoverflata vart gjort mellom kvart impulsforsøk med eit håndholdt elektrostatisk voltmeter for å sjekka at det ikkje var for mykje restlading igjen på barrierane. Måleinstrumentet gjekk i metting ved 2000 V. Det vart påvist så høg restlading etter kvart

impulsforsøk, uavhengig av om det vart gjennomslag eller ei. Polykarbonatplatene (Lexanplatene) vart deretter vaska med isopropanol mellom kvart forsøk for å fjerna restladinga som kan forstyrre det elektriske feltet og dermed overslagsspenninga. Etter vaskinga låg målingane på mellom ± 70 V, noko som er akseptabelt. Slik vart restladingsproblematikken eliminert. Sidan barrierane vart flytta for kvar gong dei vart vaska, kunne små forskyvingar førekoma. Barrierane vart plassert tilbake i stativa for hand ved hjelp av enkelt måleutstyr og rettholtar. Dette kunne føra til små forskjellar i plassering av barrierane som gav utslag i målingane.

6. Konklusjon

Resultata har vorte oppdelt i to ulike kategoriar der det er skilt mellom oppsett som skapar sikksakk-design eller ei.

Alle oppsetta med barrierar oppnådde auke i haldfastheit, med atterhald om at barrierane ikkje var plassert for nær høgspentelektroden i enkelte av tilfella. Den mest opplagte grunnen som truleg førte til auke i haldfastheit, er at barrierane skapar ei provosert tidsforseinking fordi dei fysisk hindrar ladningsbærarane i å nå sine respektive elektrodar under eit impulsforsøk.

Ikkje sikksakk-design:

I oppsett som ikkje skapar eit sikksakk-design, syner resultata at ein kan oppnå ei auke i haldfastheit ved bruk av barrierar, avhengig av barrierane sin posisjon i gapet og korleis dei er oppstilt. Plassering av barrierar heilt inntil høgspentelektroden har vist seg å gje lågare haldfastheit, og i enkelte tilfelle har haldfastheita vorte forverra samanlikna med eit barrierelaust gap.

Ei forklaring på dette kan vera det sterke tangentialfeltet på barrierelooverflata. Det tangentialfeltet ladar overflata på barrierara raskt opp, og dette gjer det lettare for ein streamer å propagera langs overflata, noko som fører til overslag ved lågare spenningar. Dette er ikkje i strid med etablert teori rundt haldspenninga i eit stang-plate-gap som gjeld for ei sentrert barriere [3, 11, 12].

Ladningsbærarar når også raskare fram til barrierara når dei er plasserte i nærleiken av høgspentelektroden [11].

Då berre ei barriere var nytta i gapet, var den optimale posisjonen til barrierara på rundt 20 mm, eller 25 % ut i gapet. Dette samsvarar også godt med tidlegare studiar som syner at optimal plassering er rundt 15-30 % av distansen [1, 2]. Ved bruk av fleire barrierar (utan sikksakk-design), syner resultata at avstanden kan aukast til 37,5 % utan at haldfastheita minkar. Høgaste auke i haldfastheit i oppsett utan sikksakk-design var på 48 % samanlikna med eit barrierelaust gap.

Sikksakk-design:

Den høgast oppnådde auken i haldfastheit var på 63,9 % med to barrierar i sikksakk-design tilstades i gapet. Eit høgare resultat ville truleg vorte oppnådd med tre barrierar dersom ikkje avgrensinga til støtspenningsgeneratoren hadde stogga forsøka. Dette er likevel eit stykke unna ei tripling av haldspenninga som er oppnådd i eit anna studie med ei sentrert barriere [3].

Det oppsiktvekkjande i denne oppgåva er at resultatet vart oppnådd med ei særmoderat auke i moglege streamerlengde. Resultatet tyder altså på at eit sikksakk-design kan vera godt egna til å skapa eit kompakt høgspentedesign. Ei forklaring av auken i haldfastheita, kan vera at sikksakk-designet svekkar den negative verknaden av det tangentialfeltet. I tillegg er det antatt at streamerane ladar overflata til barrierane, og skapar med det eit meir homogent felt under barrierane, noko som gjer det vanskelegare for streamerane å utbre seg heilt ned til jordelektroden. Kombinasjonen av auke streamerlengde, svekka tangentialfelt og meir homogent felt under barrierane, kan gje eit godt grunnlag for å hevda at ein lyt auka spenninga for å oppnå gjennomslag.

Resultata viser at ein ikkje kan bruka formel (11) til å uttrykka auken i haldfastheit når eit sikksakk-design er introdusert i gapet. I tilfella som er testa i denne oppgåva, aukar haldspenninga sjølv om streamerlengda minkar. Noko som er stikk i strid med forslaget om lineær auke i haldfastheit i eit inhomogent gap vist med den stipla linja i Figur 1 og i formel (4).

Ein empirisk formel som syner auke i haldfastheit kan difor ikkje uttrykkast på bakgrunn av forsøka utført i denne oppgåva då trenden ikkje syner linearitet ved ulike kombinasjonar av oppsetta.

7. Vidare arbeid

Mange faktorar i denne oppgåva har vore med på å redusera tryggleiken til påstandane gjeve i diskusjonen og konklusjonen. Eit framlegg til forbetring av oppsetta nytta i denne oppgåva, er å endra designet på haldestativa slik at ein med større sikkerheit unngår forskyvingar og avbøyingar av barrierar. Dette kan gjerast ved å forbetra sidestøtta i haldestativa til barrierane når dei vert skuva ut i gapet mot høgspentelektroden.

Det vil vera av stor interesse å få testa sikksakk-designet med tre eller fleire barrierar utan ei avgrensing på 130 kV for å sjå om nye trendar i haldfastheita i gapet kan oppstå, samt om dette kan vera overførbart til vidareutvikling av høgspenutstyr.

Vidare bør fotografering med høghastigheitskamera bli gjort for å kunna avdekka kvar streamerane tek vegen og korleis dei oppfører seg i eit sikksakk-design. Gode bilete som avdekkar dette, kan bli til stor hjelp i å kunne prova eller forkasta forslag som er føreslegne i diskusjonen.

Vidareutvikling av datamodellane nytta i COMSOL kan gje større innsikt i korleis dei elektriske fenomen kan te seg i eit luftgap. 3D-modellar er eit forslag til forbetring.

Sidan alle forsøka i denne oppgåva har vorte gjort med relativt tjukke barrierar på 5 mm, kunne det vore interessant å nytta tynnare barrierar for å sjå om det vil gje andre utslag på resultatata, spesielt med tanke på at simuleringar i COMSOL syner ei lita endring ved bruk av tjukke kontra tynne barrierar. Andre isolasjonsmaterialer kan også gjerne testast for å sjå om trendane endrar seg.

8. Referansar

1. A. Kara, Ö.K., K. Mardikyan, *DC Breakdown Voltage Characteristics of Small Air Gaps with Insulating Barriers in Non-Uniform Field*, in *International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)2010*, IEEE, page 425-428.
2. Jørstad, J.S., *Effect of Barriers in Air Insulated Rod-Plan Gaps*, Master thesis, in *Department of Electric Power Engineering*, 2012, Norwegian University of Science and Technology: Trondheim. p. 63.
3. S. Lebedev, O.S.G., and Y. P. Pokholkov, "*The Barrier Effect in Dielectrics: The Role of Interfaces in the Breakdown in Inhomogeneous Dielectrics*". IEEE, "Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation", 2005. vol. 12(June 2006): p. 537-555.
4. L.Sivertsen, *Kompendium i Høyspenningsteknikk*. 2008, Bergen: HiB, avdeling for ingeniørutdanning, Elkraftteknikk.
5. E.Ildstad, *TET 4160 High Voltage Insulation Materials*. 2011, Trondheim: Department of Electric Power Engineering, NTNU.
6. Kuffel, E., W.S. Zaengl, and J. Kuffel, *High voltage engineering : fundamentals*. 2000, Oxford: Butterworth-Heinemann. xiii, 239 s. : ill.
7. T. Christen, H.B., A. Pedersen and A. Blaszczyk, *Streamer Line Modeling*. Scientific Computing in Electrical Engineering, Mathematics in Industry, 2012. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
8. A. Pedersen, T.C., A. Blaszczyk, H. Boehme, *Streamer inception and propagation models for designing air insulated power devices*, in *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena 2009*, IEEE. p. 604-607.
9. A. Maglaras, L.M., *Modeling and analysis of electric field distributions in air gaps, stressed by breakdown voltages.*, in *International Conference WSEAS MMACTEE*, December 2004, Electrical Engineering Department, Technological Institute of Larissa: Athens.
10. F.Mauseth, J.S.J., A.Pedersen *Streamer Inception and Propagation for Air Insulated Rod-Plane-Gaps with Barriers*. Conference paper. 2012. 4 pages.
11. F. V. Topalis, a.I.A.S., "*Barrier Effect on Electrical Breakdown in Air Gaps: A Theoretical Approach*" in *9th International Symposium on High Voltage Engineering*1995: Graz Convention center, Austria. p. 2147-1 - 2147-4
12. L.Ming, M.L.a.T.B., "*Factors Influencing Barrier Effects in Air-Gaps*", in *9th International Symposium on High Voltage Engineering 1995*: Graz Convention center, Austria. p. 2168-1 - 2168-4
13. E.Ildstad, *Laboratorieoppgave OV2: generering og fordeling av impuls spenninger*, in *Institutt for Elkraftteknikk*, 2005, NTNU.
14. Magnusson, W.E. and G. Mourão, *Statistics without math*. 2004, Sunderland, Mass.: Sinauer. VI, 136 s. : ill.
15. Böhme, P.D.-I.H., *Evaluation of the Breakdown Voltage U_{50} ant the Withstand Voltage U_w (=U₀₂) ant their Confidence Intervals going out from Measured Values in Impulse Tests*, 2005. Template for Excel-spreadsheet.
16. Dyrstad, T., *Elektroteknisk ledningsberegning*. 2004, Oslo: Pensumtjeneste. 230 s. : ill.