



Brannfare ved bruk av PVC-isolerte elektriske kabler

| IFE/E-2024/001 | 22-Feb-2024

Forskning for en bedre fremtid

Rapport nummer: IFE/E-2024/001	ISSN 2535-6380	Tilgjengelighet: Åpen	Publikasjonsdato: 22.02.2024
Revision No.:			
Klient: Nelfo	ISBN: 978-82-7017-951-0	DOCUS ID: 58600	Antall sider: 51
Tittel: Brannfare ved bruk av PVC-isolerte elektriske kabler			
Sammendrag: <p>Norsk og internasjonal brannstatistikk viser at bygningsbranner med elektrisk årsak har en høyere kostnad enn branner med andre årsaker, både når det gjelder tap av menneskeliv og materielle verdier. Dette antyder at tiltak som vil redusere forekomsten av branner med elektrisk årsak har en særskilt høy samfunnsverdi. I den norske brannstatistikken er årsakskategorien "serielysbue" stor, med en andel på rundt 35 % av alle boligbranner med elektrisk årsak. Dette indikerer at seriefeil (kontaktsvikt) inntreffer hyppig i elektriske lavspenningsanlegg i Norge.</p> <p>PVC-plast benyttes i utstrakt grad i elektriske lavspenningsanlegg, først og fremst som kabelisolasjonsmateriale. Den termiske dekomponeringen av PVC er problematisk og gjør at isolasjonsegenskapene til PVC degraderes ved forhøyede temperaturer. Dette gjør at PVC har lite tilfredsstillende egenskaper med tanke på å motstå dannelse av forkullede spor og krepstrømmer. Dekomponeringen fører også til utgassing av mange ulike brennbare gasser. En rekke forskningsstudier peker mot at PVC har en svært uheldig påvirkning på forløpet til en seriefeil på grunn av de forhøyede temperaturene som oppstår ved en slik feilsituasjon. Denne sammenhengen er blitt styrket ved gjennomgang av en rekke konkrete brannerforskningsaker der PVC-isolasjon fremstår som en medvirkende årsak til at en seriefeil utvikler seg til antennelse av en brann. Mye tyder på at et termisk stabilt kabelisolasjonsmateriale som opprettholder sine isolasjonsegenskaper ved forhøyede temperaturer vil kunne redusere risikoen for at en seriefeil i et elektrisk lavspenningsanlegg får utvikle seg til en brann.</p> <p>Basert på funnene i dette litteraturstudiet fremstår det fra et elsikkerhetsperspektiv problematisk at PVC fortsatt er tillatt benyttet som isolasjonsmateriale i elektriske lavspenningsanlegg. Det meste av gjennomgått dokumentasjon peker mot utfasing av PVC som et logisk tiltak. Det finnes allerede alternative isolasjonsmaterialer i markedet som er termisk stabile og økonomisk konkurransedyktige sammenlignet med PVC. Et eksempel på et slikt isolasjonsmateriale er tverrbundet polyetylen.</p> <p>PVC-isolerte elektriske kabler har en E_{ca}-klassifisering i byggevareforordningen, og NEK 400 tillater bruk av kabler med en E_{ca}-klassifisering i en rekke anvendelsesområder, deriblant boliger. Det anbefales at det tas en gjennomgang av kravene som stilles til elektriske kabler og deres bruksområder ved neste revisjon av NEK 400. Kabelens reaksjon og påvirkning under en brann bør ikke være det eneste kriteriet for bestemmelse av dens bruksområde. Elsikkerhetsaspektet må vektlegges, særlig når det påviselig kan dokumenteres at bruk av PVC-isolasjonsmateriale fører med seg forhøyet risiko for brann i elektriske lavspenningsanlegg.</p>			

Institutt for energiteknikk

Postboks 40, 2027 Kjeller / Postboks 173, 1751 Halden

Tlf.: +47 63 80 60 00/ +47 69 21 22 00

www.ife.no / firmapost@ife.no



Utarbeidet av:	Ørnulf Nordseth	DocuSigned by: <i>Ørnulf Nordseth</i> C199CF4F0BDD4F4...
Kontrollert av:	Helge Malmbekk	DocuSigned by: <i>Helge Malmbekk</i> 0D99C2FA61794C1...
Godkjent av:	Helge Malmbekk	DocuSigned by: <i>Helge Malmbekk</i> 0D99C2FA61794C1...
Rapport distribusjon:		0D99C2FA61794C1...

Institutt for energiteknikk

Postboks 40, 2027 Kjeller / Postboks 173, 1751 Halden

Tlf.: +47 63 80 60 00/ +47 69 21 22 00

www.ife.no / firmapost@ife.no

Innholdsfortegnelse

1	Innledning	1
2	Brannstatistikk	2
2.1	Bygningsbranner med elektrisk årsak	2
2.2	Definisjonsavklaring for serielysbue og seriefeil.....	3
3	Seriefeil i et elektrisk lavspenningsanlegg	6
3.1	Hendelsesforløp for en seriefeil.....	6
3.1.1	Motstandsoppvarming.....	6
3.1.2	Glødende kontaktforbindelse	7
3.1.3	Serielysbue.....	7
3.2	Forskning i Norge og internasjonalt.....	9
4	Kabelisolasjonsmaterialer	11
4.1	Historikk	11
4.2	Kabelkonstruksjon.....	12
4.3	PVC.....	12
4.4	PEX	14
4.5	Dekomponering og forkulling	15
4.5.1	PVC.....	15
4.5.2	PEX	18
4.6	Årsaker til feil eller antennelse	18
4.7	Kabelklassifisering.....	20
4.8	Standarder for kabeltesting	21
5	Betraktninger	23
5.1	Krav til installasjonskabler i Norge.....	23
5.1.1	TEK17.....	23
5.1.2	NEK 400:2022.....	24
5.2	Bruk av PVC-isolert installasjonskabel	29
5.3	Seriefeilforløp for en PVC-isolert kabel.....	33
5.4	Kabelbranner forårsaket av isolasjonsmaterialet	36
5.4.1	Statistisk forekomst	36
5.4.2	Etterforskede branner.....	38
5.4.3	Kommentar til brannetterforskernes åstedsundersøkelser	43
5.5	Aktiv og passiv beskyttelse mot seriefeil	43
6	Oppsummering og anbefaling.....	47
7	Referanser.....	48

1 Innledning

Det kommer frem av norsk og internasjonal brannstatistikk at seriefeil forekommer hyppig i elektriske lavspenningsanlegg, og hvert år fører denne typen feil til utallige bygningsbranner med omfattende samfunnsmessige konsekvenser. Det er derfor av stor interesse å etablere tiltak som beskytter mot seriefeil i elektriske lavspenningsanlegg. En seriefeil er en form for kontaktsvikt som kan medføre motstandsoppvarming i en strømførende elektrisk krets. En slik lokal temperaturøkning kan ha negativ påvirkning på omkringliggende isolasjonsmaterialer, særlig polymér-materialet polyvinylklorid (PVC), som fremviser mangelfull termisk stabilitet. Dette materialet er kjent for å dekomponere og forkulle, noe som gjør at isolasjonsegenskapene kan svekkes allerede ved temperaturer som overstiger 60-70°C. Det finnes i dag alternative polymér-materialer som har gode isolasjonsegenskaper og er termisk stabile, deriblant tverrbundet polyetylen (PEX). Hoved-hypotesen for dette studiet er at bruk av PEX som kabelisolasjonsmateriale i elektriske lavspenningsanlegg vil være et effektivt brannforebyggende tiltak. Ved å benytte PEX-isolerte elektriske kabler kan man redusere risikoen for at en seriefeil får utvikle seg til antennelse av en brann.

Formålet med dette arbeidet er å gi en uavhengig vurdering av betydningen kabelisolasjonsmaterialer har for brannrisiko i bygninger, hovedsakelig basert på publisert forskning på området og informasjon innhentet fra myndigheter, fageksperter og kabelprodusenter. Arbeidet er begrenset til å være en litteraturstudie, noe som innebærer at det ikke er blitt gjennomført ny forskning eller blitt utført eksperimentelle forsøk i dette prosjektet. Videre er prosjektet begrenset til å undersøke de to mest utbredte kabelisolasjonsmaterialene, nemlig PVC og PEX.

Rapporten vil belyse sentrale problemstillinger relatert til bruk av PVC-isolerte elektriske kabler i elektriske lavspenningsanlegg. Dette kan for eksempel være om det finnes isolasjonsmaterialer i dagens marked som kan være en fullgod erstatning for PVC-plast og om de nåværende krav som settes til elektriske kabler er fornuftige, sett fra et sikkerhetsperspektiv. Rapporten vil innledningsvis presentere relevant brannstatistikk for branner med elektrisk årsak, deretter gi en overordnet teknisk beskrivelse av fenomenet seriefeil i elektriske lavspenningsanlegg, etterfulgt av en gjennomgang av viktige egenskaper og ytelseskrav for kabelisolasjonsmaterialer. Til slutt presenteres en del betraktninger knyttet til utfordringer og mulige farer knyttet til bruk av PVC-isolerte elektriske kabler.

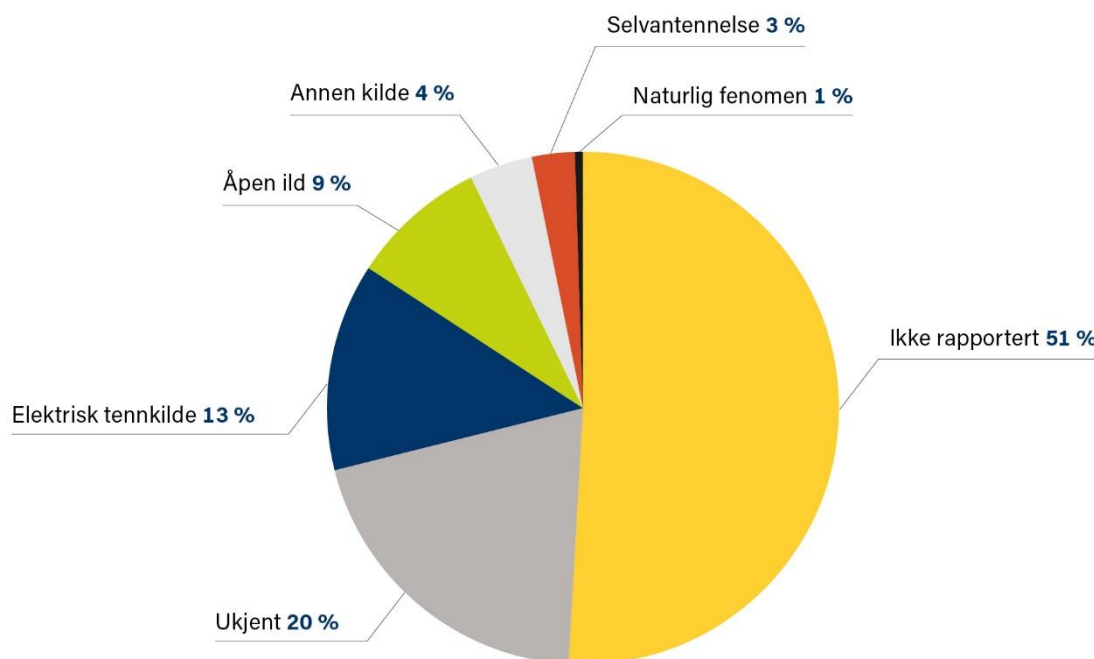
2 Brannstatistikk

I mange vestlige land finnes det detaljerte brannstatistikker, men kun noen av disse er gjort offentlig tilgjengelig. Dessuten varierer gjerne detaljnivå og kategorier fra land til land slik at det er en utfordring å gjøre treffsikre sammenligninger. I dette kapitlet avgrenses fokus til statistikk for bygningsbranner med elektrisk årsak, da disse er mest relevant for vurderinger knyttet til valg av isolasjonsmaterialer i lavspenningsinstallasjoner.

Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) har utarbeidet statistikk for branner i Norge siden 1986. Rapporteringssystemet BRIS ble satt i drift januar 2016. BRIS er en forkortelse for "brann, redning, innrapportering og statistikk". Dataene som samles inn i BRIS brukes både av brannvesenet og andre som jobber med brannforebyggende arbeid. *Brannstatistikk.no* er en åpen nettbasert tjeneste fra DSB som ble lansert i betaversjon november 2019. Tjenesten gir oversikt over alle utrykningene til brann- og redningstjenesten i hele Norge siden 2016.

2.1 Bygningsbranner med elektrisk årsak

En rapport som oppsummerer brannstatistikken for 2018 er tilgjengelig på DSB sine nettsider [1]. Av totalt 5089 registrerte oppdrag i 2018 knyttet til bygningsbranner var 3537 oppdrag (ca. 70 %) knyttet til boliger. Brannkilde for boligbrannoppdragene fordeler seg som vist i kakediagrammet i Figur 1 [1]:



Figur 1: Fordeling av brannkilder for boligbranner i perioden 2009-2014 [1].

En umiddelbar kommentar til denne statistikken er at underrapporteringen er svært høy og det er derfor grunn til å stille spørsmål om datagrunnlaget er særlig godt da man ikke kan forutsette at de ukjente og ikke rapporterte årsakene fordeler seg likt som de brannene som har fått fastsatt en spesifisert årsak. Kategoriene "ikke rapportert" og "ukjent" utgjør over 70 % og dette gjør at statistikken dessverre ikke særlig godt egnet til å finne komplekse årsakssammenhenger. Muligens kan statistikken være et nyttig verk for å fange opp trender. Uansett viser Figur 1 at antall boligbranner med elektrisk tennkilde vil være statistisk signifikant og utgjøre en vesentlig andel.

Det finnes også tilsvarende internasjonale brannstatistikker der andelen av registrerte bygningsbranner med elektrisk årsak kan hentes ut. Tabell 3 oppsummerer prosentvis andel av alle registrerte bygningsbranner med elektrisk årsak i utvalgte land og regioner.

Tabell 1: Andel av bygningsbranner med elektrisk årsak i ulike land i angitt tidsrom [2]-[4].

Land	Andel	Periode
Norge	21 %	2008-2013
EU	13-20 %	2004
USA	5-18 %	2009-2011
Storbritannia	18 %	2010-2020
Tyskland	33 %	2002-2013
Kina	27 %	2005-2010

En umiddelbar betraktning til tallene presentert i Tabell 1 er at det ikke ser ut til at andelen branner med elektrisk årsak er vesentlig forskjellig i Norge sammenlignet med andelen registrert i andre, relevante industrialiserte land, inkludert våre naboland Sverige og Danmark. Dette er også tidligere blitt påpekt i en SINTEF-rapport fra 2007 [5], hvor det ble sett nærmere på antall branner i installasjonsmateriell i elektriske lavspenningsanlegg. I tiårsperioden fra 1995 – 2004 ble det funnet at branner i installasjonsmateriell utgjorde ca. 7 % av boligbrannene i Norge, mens tilsvarende tall for England og USA var henholdsvis 6 og 9 %. Videre fremkom det av DSB sin brannstatistikk at ledninger og kabler forårsaker de fleste brannene i installasjonsmateriell, der forekomsten er ca. 30 – 40 %, deretter følger stikkontaktmateriell og koblingsbokser/klemmer. Kabler er det elektriske installasjonsmaterialet som forårsaker de klart fleste brannene i boliger i Norge og USA, nesten 50 % [5].

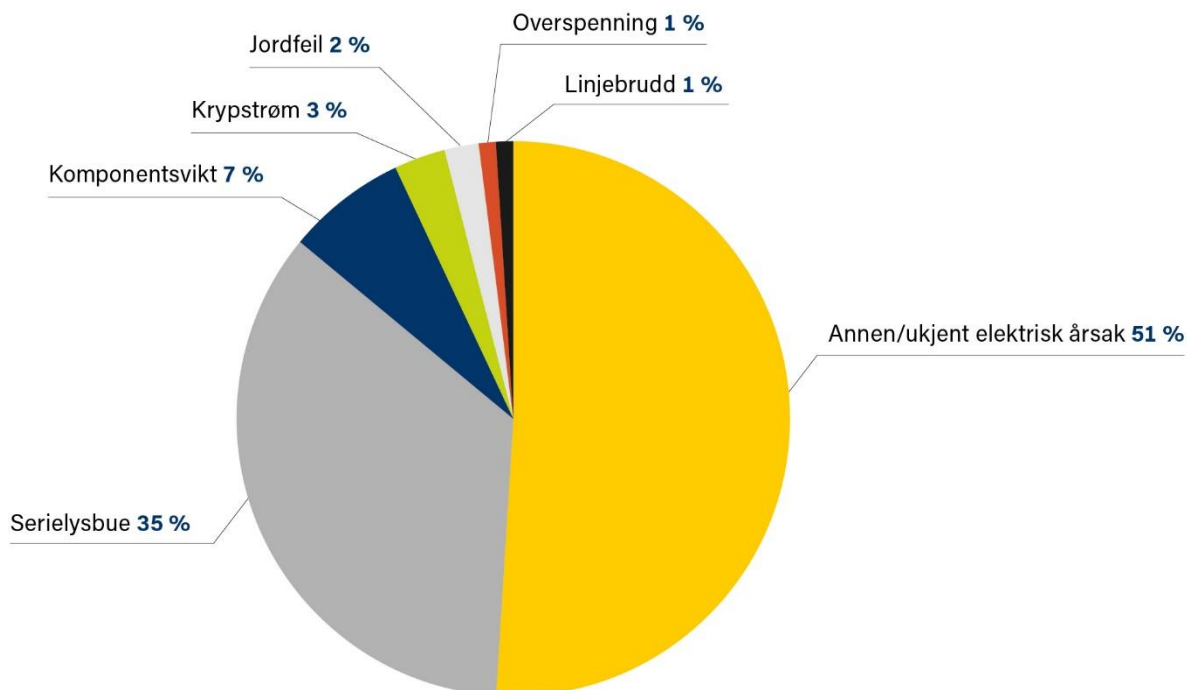
Den nest største enkeltårsaken til boligbranner i Norge er ledninger og kabler, som i gjennomsnitt forårsaker 21,4 branner i året i perioden 2009 - 2013 [6]. Brannstatistikken antyder med andre ord at mellom 1 - 2 % av boligbranner i Norge starter i elektriske kabler. Dette er omtrent den samme andelen som er rapportert i Dansk og Svensk brannstatistikk [4]. Det er også blitt påpekt at det finnes ingen tilgjengelig brannstatistikk som gir innsikt i hvordan elektriske kabler bidrar til brannutbredelse etter at en bygningsbrann har inntruffet [4].

2.2 Definisjonsavklaring for serielysbue og seriefeil

I DSB sin brannstatistikk er branner med elektriske årsak delt inn i 8 underkategorier og i tidsrommet 2009 – 2014 var fordelingen av disse som vist i Figur 2 [7].

Her kan det legges til at DSB sine definisjoner av serielysbue, kortslutningslysbue, jordfeil og kryptstrøm er følgende [8][9]:

- **Serielysbue** skyldes dårlig kontakt i en kobling. Kontaktsvikt gir lokalt høyere motstand med påfølgende varmgang og kan føre til en stående lysbue. Dette kan føre til avbrenning eller antenning av isolasjon, med påfølgende brann som resultat.
- **Kortslutningslysbue** eller parallelllysbue er en elektrisk utladning mellom to ledere som medfører lysbue. Vanligvis vil strømvernet løse ut, men det kan oppstå situasjoner der dette ikke skjer.
- **Jordfeil** betyr at en eller flere faseledere har tilfeldig eller uønsket forbindelse til jord, for eksempel til metallkapslinger på utstyr eller metallskjermer i kabler.
- **Kryptstrøm** er strøm på ville veier. Pga. dårlig rengjøring (støv, oljesøl etc.) og lynoverspenninger kan det bli dannet uønskede strømbaner mot jord eller mellom strømførende ledere med oppvarming som resultat.



Figur 2: Fordeling av årsakskategorier for boligbranner med elektrisk årsak i perioden 2009-2014 [7].

I kategorien **Annen/ukjent elektrisk årsak** føres både branner der man ikke kjenner årsaken (ukjent årsak) utover det at den skyldes elektrisk årsak og branner med årsak som ikke dekkes av de definerte underkategoriene (annen årsak). I Norge er altså serielysbue den største årsakskategorien for boligbranner med elektrisk årsak. Andelen er høy og ligger rundt 35 - 50 % [5], og den har ikke endret seg nevneverdig over de to siste tiårene. Det ser derfor ikke ut til at det er noen trend i den ene eller andre retningen basert på registreringene i brannstatistikken over en relativt lang periode. Det fremstår som uklart hvorfor årsakskategorien "serielysbue" utgjør en relativt stor andel av branner med elektrisk årsak i den norske brannstatistikken. Som nevnt tidligere kan det ha sammenheng med utformingen av registreringskjemaene og definisjonen DSB har valgt for serielysbue [10]. Det har også vært spekulert at det kan være særnorske forhold som gjør at denne årsakskategorien er så stor. Blant forholdene som har vært nevnt er følgende [5]:

- Strømnettet er unikt (IT-/TN-nett).
- Mye bebyggelse i tre
- Strøm brukes til oppvarming og kan medføre kontinuerlig høy belastning i forbrukerkurser
- Mangelfull brannetterforskning
- Ulik tolkning av de elektriske feilene
- Høy feilfrekvens i elektrisk anlegg

I femårsperioden 1999-2003 viser tilsvarende brannstatistikk fra USA at kun 6 % av brannene i elektriske lavspenningsanlegg i boliger hadde serielysbue som registrert brannårsak, mens derimot hele 47 % skyldtes kortslutningslysbue [5]. Det er med andre ord en forholdsvis stor forskjell på størrelsen på årsakskategorien *serielysbue* i den norske og amerikanske brannstatistikken. Det kan legges til at strømnettet i USA og Canada har 120 V vekselspanning (60 Hz), mens det i Europa har 230 V vekselspanning (50 Hz). Strømlasten i elektriske installasjoner vil derfor typisk være større i USA enn i Europa. Forbruksmønsteret kan ellers antas å være ganske likt i disse to regionene.

DSB sin definisjon av serielysbue konstaterer nærmest at kontaktsvikt (seriefeil) som det samme som serielysbue. Det kan stilles spørsmål med om dette er hensiktsmessig. Man har ikke noe godt vitenskapelig grunnlag for å si at samtlige seriefeil medfører serielysbuer. Allerede i 1992

kommenterte Sletbak at brannårsaker registrert som serielysbue er høyst sannsynlig samme fenomen som andre land registrerer som glødende kontaktforbindelse [11]. SINTEF NBL har i flere rapporter påpekt det samme [5][12][13]. Her skrives det blant annet [12]:

- *"Når det er oppstått brann i en bolig, og brannetterforskningen påviser varmgang i et koblingspunkt i arnestedsområdet, konkluderes det vanligvis med at brannårsaken er elektrisk feil som følge av serielysbue."*
- *"I en analyse av DSBs brannstatistikk for tiårsperioden 1995-2004 ble det påvist at 50 % av brannene i elektrisk installasjonsmaterieell generelt og 57 % av brannene i stikkontakter er registrert med serielysbue som brannårsak."*
- *"Til sammenligning er tilsvarende statistikk fra USA (NFPA), basert på vel 19000 branner pr. år som har startet i installasjonsmaterieell i boliger i femårsperioden 1999-2003, viser at kun 6 % av brannene hadde serielysbue som brannårsak, mens 47 % av brannene hadde forskjellige former for kortslutning som brannårsak."*
- *"Ovennevnte tallmateriale indikerer tydelig at man ikke har forstått hva varmgang i installasjonsmaterieell egentlig skyldes, og at slike feil tolkes forskjellig."*
- *"Serielysbue omtales i svært liten grad som brannårsak i andre land (USA, Japan, England, Canada). Varmgang i elmaterieell forklares med dannelse av kobberoksid i koblingspunktet. Dette medfører økt motstand og varmeutvikling, slik at det til slutt begynner å gløde med temperatur i området 1200-1300 °C."*

Videre påpekes det i en norsk studie fra 2012 følgende at [14]:

- *"Serielysbue i brannårsakssammenheng er derfor høyst sannsynlig samme fenomen som det andre land registrerer som glødende kontaktforbindelse. Ettersom både serielysbue og glødende kontaktforbindelse er typiske seriefeil, og begge skyldes kontaktsvikt, tyder mye på at de registreres som samme feil".*
- *"Hovedproblemet med seriefeil i elektriske installasjoner er sannsynligvis hovedsakelig glødende kontaktforbindelser, og ikke serielysbue."*

I denne rapporten vil derfor serielysbue anses å være en del av forløpet til en seriefeil. I neste kapittel vil begrepet seriefeil beskrives i mer detalj. Statistikk knyttet til seriefeil og kabelbranner vil kommenteres ytterligere i kapittel 5.4.

3 Seriefeil i et elektrisk lavspenningsanlegg

Brannstatistikk antyder at seriefeil er en hyppig brannårsak i elektriske lavspenningsanlegg. Seriefeil kan betegnes som en svekket elektrisk forbindelse og kalles også ofte kontaktsvikt. En seriefeil har stort skadepotensial i de tilfeller der strømlasten er høy i en svak eller svekket elektrisk forbindelse. Hovedutfordringen med en seriefeil er at strømmen i kursen ikke påvirkes vesentlig av en slik svekket elektrisk forbindelse, noe som medfører at konvensjonelle sikkerhetsinnretninger som for eksempel en jordfeilautomat ikke er i stand til å oppdage feilen og koble ut strømtilførselen til kursen. Utfallet av en seriefeil vil kunne være dissipasjon av elektrisk energi med påfølgende varmeutvikling og lokal overoppheting, noe som medfører en høy risiko for antennelse av omkringliggende brennbart materiale og påfølgende brann. Med andre ord, en seriefeil medfører at elektrisk energi blir omdannet til termisk energi.

3.1 Hendelsesforløp for en seriefeil

For å forstå hvordan en seriefeil kan utvikle seg til en brann gjelder det å få klarhet i selve hendelsesforløpet. Figur 3 viser en enkel skisse som har til hensikt å illustrere sammenhengene mellom de ulike begrepene som inngår i fenomenbeskrivelsen. En seriefeil er altså en svak elektrisk forbindelse som kan oppstå av ulike årsaker. Feilen fører til en elektrisk barriere (resistans) som påvirker strømgjennomgangen i punktet der feilen har oppstått. Det påfølgende hendelsesforløpet er komplekst og dynamisk med ulike stadier som kan opptre i ulik rekkefølge og samtidig påvirke hverandre. De ulike stadiene i hendelsesforløpet vil beskrives i det følgende [10].



Figur 3: Illustrasjon av forløpet til en seriefeil fra dannelsen av en svak elektrisk forbindelse (årsak) til utvikling av en brann (konsekvens) [10].

3.1.1 Motstandsoppvarming

I et punkt med en svak eller svekket elektrisk forbindelse vil den elektriske motstanden være høyere, og denne forhøyede elektriske motstanden kan medføre en lokal oppvarming når det er en strømlast av betydning. Temperaturøkningen kan framskynde en prosess som innebærer oksidering og siging av metall. Et oksidbelegg, for eksempel i form av et Cu_2O -sjikt, kan dannes og utbrede seg på overflaten av metallederen noe som medfører at strømmen tar veien gjennom dette belegget. De fleste metaller, inkludert kobber, aluminium og ulike jernlegeringer, kan danne et oksidbelegg. Oksidbelegget har vesentlig høyere elektrisk motstand enn metallet og utfallet er en prosess som er selvforsterkende eller progressiv, der temperaturen fortsetter å øke fordi oksidasjonen av metallederen øker i omfang.

Et slikt kontaktpunkt kan potensielt generere en varmeutvikling på 30 – 40 W ved en strømstyrke på 15 – 20 A gjennom punktet [5]. Det finnes også andre årsaker til motstandsoppvarming i en elektrisk installasjon, inkludert [5]:

- For mye isolasjon
- Kraftig overbelastning
- Lekkasjestrøm og jordfeil
- Overspenning/spenningsstøt, f.eks. fra lynnedslag eller feil på utstyr

3.1.2 Glødende kontaktforbindelse

I en svak elektrisk forbindelse kan varmeutviklingen bli så stor at kontaktforbindelsen blir glødende. Årsaken til dette er at det kan oppstå høy effektdissipasjon på et relativt avgrenset område (punkt). Sammenhengen mellom temperatur, motstand, strøm og spenning i en svak elektrisk forbindelse ved påtrykk av vekselspenning er oppsummert i referanse [6]. Dannelsen av et oksidsjikt er nødvendig for at gløding skal kunne oppstå, og et slikt sjikt kan innledningsvis være dannet av en lysbue [2]. Sletbak m. fl. studerte Cu_2O -dannelse og fant ut at dette oksidsjiktet (filamentet) glødet ved 1200 – 1300°C, noe som er tilstrekkelig høy temperatur til å antenne de fleste vanlige brennbare materialer [11]. Grunnen til at strømmen innsnevres i et tynt filament i overflaten av oksidlaget henger sammen med at oksydet har en negativ temperaturkoeffisient. De fant videre at strømmen kunne bli konsentrert i et slikt filament allerede ved en strømstyrke på 0,15 A, og at effektdissipasjonen avhenger av strømstyrken og alderen på filamentet. I deres tilfelle målte de en effektdissipasjon på 17 W ved 1 A [11]. I andre studier har det også vært observert at glødende kontaktforbindelser kan oppstå ved relativt lave strømstyrker, rundt 0,15 – 0,8 A [15]. Glødende kontaktforbindelser kan vare i flere timer og dager uten avbrudd og kan gjenopptas etter et strømavbrudd. De trenger nødvendigvis ikke å utvikle seg til en serielysbue, da det også kan oppstå deformasjoner (delvis smelting) av isolasjonsmaterialer som kan føre til kortslutning eller strøml lekkasje til jord. Disse tilfellene vil normalt fanges opp av en jordfeilautomat som vil avbryte det videre forløpet.

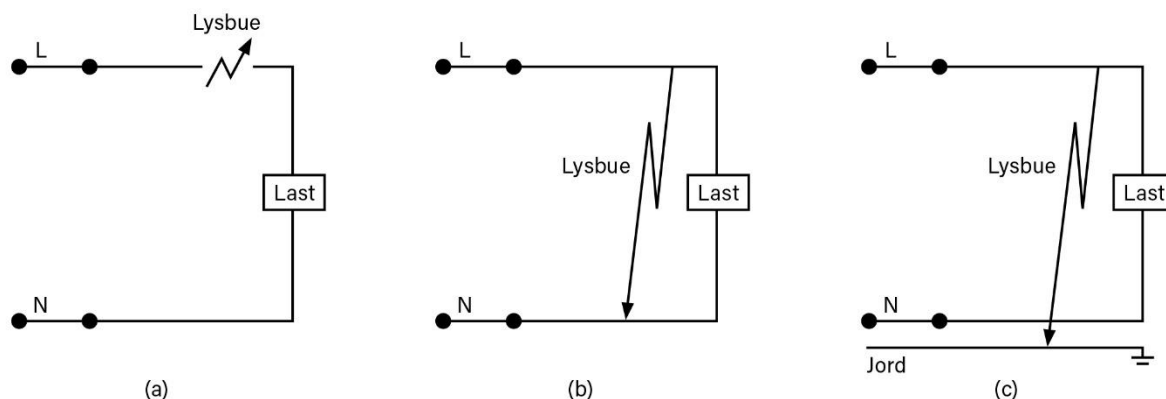
Det er blitt påpekt at hvis man ser på en seriefeil som en kjede av mange feilsituasjoner, så opptrer feilen med glødende kontaktforbindelse som oftest i begynnelsen av kjeden, og sjelden i slutten av kjeden [2]. Det er også blitt påpekt at en glødende kontaktforbindelse kan forkulle isolasjonsmaterialer i umiddelbar nærhet, noe som kan bidra til dannelse av en stabil lysbue, som igjen øker sannsynligheten for antennelse og utvikling av en brann [2].

3.1.3 Serielysbue

En serielysbue kan ses på som en del av forløpet til en seriefeil. En lysbue er definert som *“lysutladning av elektrisitet over et isolerende medium, vanligvis ledsaget av delvis fordampning av elektrodene”*, ifølge International Electrotechnical Vocabulary (IEC 60050). Lysbue i denne sammenheng oppstår når man får en svak elektrisk forbindelse mellom strømførende deler (elektriske ledere eller koblingspunkt), noe som medfører at det oppstår en gnist eller stående lyn-lignende lysbue med veldig høy temperatur i luftrommet rundt forbindelsen. Den primære forskjellen mellom en gnist og en lysbue er at en gnist er et transient fenomen, mens en lysbue vil ha en viss varighet [5]. I et elektrisk anlegg er lysbuedannelse uønsket og potensielt farlig, men det finnes også en rekke forbrukerutstyr som genererer (ønskede) lysbuer som en del av funksjonen, for eksempel elektriske børstemotorer som finnes blant annet i støvsugere og elektriske driller.

Lysbuedannelse i et elektrisk lavspenningsanlegg kan opptre i ulike former, og man skiller gjerne mellom serielysbue og parallelllysbue. Illustrasjonen i Figur 4 viser forskjellen mellom disse tre formene for lysbuedannelse. En serielysbue oppstår i serie med lasten (Figur 4a), mens en parallelllysbue kan oppstå mellom installasjonens faseleder (L) og nøytralleder (N) i parallell med lasten (Figur 4b) eller

mellom en leder og jord (Figur 4c). Generelt er parallelllysbuer mer risikable enn serielysbuer fordi energien i lysbuen er vesentlig større, og kan ofte opptre eksplosjonsartet med den konsekvens at utskilte deler av metallederen har større sannsynlighet for å komme i kontakt med brennbart materiale [5].



Figur 4: Ulike type lysbuedannelse som kan oppstå i en elektrisk installasjon. (a) Serielysbue, (b) parallelllysbue, (c) jordfeillysbue.

Lysbuer kan ha mange opphav, men de tre hovedårsakene til at lysbuedannelse oppstår i en elektrisk installasjon er [16]:

1. **Kortslutning.** Dette oppstår når det brått blir lav feilstedsimpedans, gjerne som et resultat av at to strømførende metalliske ledere kommer i kontakt med hverandre. Generelt er strømmen i en kortslutningslysbue omvendt proporsjonal med impedansen i lederne.
2. **Ytre ionisering av luften.** I luft ved vanlig atmosfærisk trykk er det vanskelig å etablere lysbuer ved påtrykk av 230 V vekselspanning fordi den dielektriske styrken til luft er 3 MV/m ved disse betingelsene. Dersom det dannes et plasma av ioniserte gasser i luften, kan den dielektriske styrken til luft bli betydelig redusert. Lysbuedannelse eller flammer kan være kilder til slik plasmadannelse. Dersom slik ioniserte gass blir ført bort til andre spenningspåsatte anleggsdeler kan ytterligere lysbuer skapes. Det er blitt hevdet at lysbuer vanskelig kan oppstå i 230 V elektriske installasjoner uten at atmosfæren allerede er blitt ionisert, enten fra eksisterende/nærliggende lysbue eller en brann (røykgasser). Brannindusert lysbuedannelse i det elektriske anlegget blir ansett for å være den mest vanlige situasjonen med hensyn til spor forårsaket av lysbuer på branntomter [5].
3. **Forkulling av isolasjonen.** Fukt og forurensninger på overflaten av isolasjonen kan forårsake lekkasjestrømmer og over tid kan dette skape et forkullet spor i isolasjonen som følge av en termisk dekomponeringsprosess. Forkulling kan også skje som følge av ytre termiske påvirkninger. Dannelsen av forkullede spor vil være sterkt avhengig av polymértypen. Polymérmaterialer med høyt karbon-til-hydrogenforhold (C/H), spesielt med aromatiske forbindelser, produserer lettere forkullede spor [17]. Det oppstår vedvarende lysbuer i et elektrisk lavspenningsanlegg som en følge av at det er blitt dannet et forkullet spor i isolasjonen mellom to ledere. Denne forkullingsprosessen vil beskrives i mer detalj i neste kapittel.

Et eksempel på et hendelsesforløp som er blitt observert for en seriefeil er som følger [18]: Ved en nydannet lysbue har det blitt observert at det i starten (i gnistringsfasen) oppstår en utladning som genererer hvit støy (dvs. lik styrke for alle frekvenser). Etter hvert forsvinner lav- og høyfrekvent støy mens varmeutviklingen fortsetter og denne utladningen går etter en tid over til en glødefase, med en

glødende strømbane i oksidsjiktet som utvikles fra den ene elektrodens metalloverflate til den andre elektrodens metalloverflate. Strømbaner med utstrekning på flere centimeter er blitt observert [11][18]. Under glødefasen øker både lengde og tykkelse av oksidsjiktet. I gapet mellom elektroden fylles rommet med kopperoksid. Samtidig forsvinner metallisk kopper fra elektrodene. Denne prosessen etses vekk elektrodene et stykke fra feilstedet, noe som betyr at det foregår en materialtransport mot kontaktområdet. Resultatet er ansamling av et tykt oksidlag omkring elektrodene ved kontaktpunktet. Etter hvert blir strømbanen langs oksidsjiktet så langt at evnen til å lede strøm i et glødende filament i oksidsjiktet ikke kan opprettholdes. Det observeres da to alternativer for det videre forløpet:

- Man klarer ikke lengre å få strømledning ved 230 V spenningspåtrykk, dvs. feilstedet forblir isolerende inntil en overspenningspuls klarer å starte ledning igjen.
- Det inntreer en tilstand der spenningen over feilstedet er ca. 0.5 V. Til sammenligning vil spenning over feilstedet ved ohmsk kontakt normalt være rundt 20 mV. Varmeutviklingen vil kunne være lav (i størrelsesorden 1 W) og gjøre at en slik tilstand muligens vil være av langvarig karakter, gitt at noe ikke skjer som forandrer forholdene ved kontaktstedet (strømlast, mekaniske spenninger, brudd, korrosjon).

Dannelsen av ulike former for lysbuer i forløpet til en seriefeil er derfor i stor grad avhengig av elektriske parametre, opprinnelige betingelser, og tidligere stadier i prosessen, for eksempel motstandsoppvarming og gløding. Det har blitt beskrevet fire ulike måter en serielysbue kan oppstå i et elektrisk lavspenningsanlegg [5]:

1. Når strømførende elektroder separeres fra hverandre dannes en lysbue. Lysbuen slukker dersom avstanden blir for stor. Lysbuer kan skapes på denne måten, selv med lavere spenning. For eksempel kan mekaniske vibrasjoner forårsake en bevegelse som gjør at elektrodene blir midlertidig separert fra hverandre, noe som kan skape små lysbuer mellom lederne. For en flertrådet kabel kan en eller flere trådstrenger brytes internt nær den støpte strekkavlastningen fra gjentatt trekk i ledningen eller fra mekanisk klemming eller kutting [19].
2. En lysbue kan oppstå når den elektriske spenningen over to elektroder blir høyere enn gjennomslagsspenningen til materialet som skiller elektrodene. Mellom elektrodene vil det da kunne oppstå en gnist som vil kunne utvikle seg til en lysbue dersom strøm og spenning er tilstrekkelig høy.
3. En glødende kontaktforbindelse mellom elektrodene kan føre til lysbuedannelse.
4. Ved dannelse av et forkullet spor mellom elektrodene kan det oppstå lysbuer som tar veien om dette forkullet sporet. Dette fenomenet vil utdypes i kapittel 4.

3.2 Forskning i Norge og internasjonalt

Det har blitt utarbeidet flere rapporter ved SINTEF NBL (Norges Branntekniske Laboratorium) med temaer som er relevante for seriefeil i elektriske lavspenningsanlegg. DSB har vært oppdragsgiver for mange av disse rapportene.

- Branner på grunn av elektrisk installasjonsmateriell, Rapport NBL A06121, 2007 [5].
- Brann på grunn av elektrisk feil i installasjonsmateriell og lavtemperatur varmpåvirkning fra belysning, Rapport NBL A08120, 2008 [12].
- Brannskadeutviklingen i Norge - tiltak for å redusere brannskadene, Rapport NBL A08111, 2008 [13].
- Analyse av DSBs brannstatistikk for bygningsbranner i tiårsperioden 1994-2003, Rapport NBL A04122, 2004 [20].
- Brannskadeutviklingen i Norge sammenlignet med andre nordiske land – Årsaker til forskjeller, Rapport NBL A06116, 2006 [21].
- Hendelser med brann i elektriske anlegg, Rapport NBL A12137 [22].

- Varmgang i elektrisk materiell og utstyr som tennekilde i bygninger, Rapport NBL A06122, 2007 [23].
- Elektriske kabler og brannrisiko, Rapport NBL A12123, 2012 [24].

Av internasjonal litteratur publisert de siste to tiårene kan det nevnes arbeidene til Vytenis Babrauskas, Jean-Mary Martel og John J. Shea:

- **V. Babrauskas** har publisert flere bøker og en rekke vitenskapelige journalartikler med tematikk knyttet til årsaker til at brann oppstår i elektriske lavspenningsanlegg [17][25][26]. Babrauskas grunnla Fire Science and Technology Inc. (FSTI) i 1993.
- **J. M. Martel** publiserte sin doktorgradsavhandling med tittel "Series arc faults in low-voltage AC electrical installations" i 2018. Avhandlingen tar for seg mange års forskning på fenomenet lysbuedannelse i elektriske lavspenningsanlegg og metoder for deteksjon av lysbuer i form av lysbuevern [2]. Arbeidet hadde tre definerte målsetninger: 1) Forstå hvordan serielysbue i lavspenningsanlegg kan resultere i branner, 2) utforske mulighetene for å redusere forekomsten av serielysbuer ved implementering av passive tiltak og 3) forklare opphavet til utløserkarakteristikken for lysbuevern og evaluere nivået av beskyttelse slike vern gir. Martel har vært affiliert med Siemens AG i over 15 år.
- **J. J. Shea** har publisert mange forskningsartikler med tematikk knyttet til årsaks-sammenhengene for branner som oppstår i elektriske lavspenningsanlegg [27]-[29]. Shea har vært affiliert med Schneider Electric Company og Eaton Corporation siden 1993.

4 Kabelisolasjonsmaterialer

Elektriske isolatorer er materialer med lav elektrisk ledningsevne, noe som forhindrer strømgjennomgang i materialet. Denne egenskapen gjør det mulig å isolere elektriske ledere fra omgivelsene slik at uønskede strømmer ikke oppstår i en elektrisk installasjon. En elektrisk kabel vil typisk bestå av flere metalliske ledere og kabelisolasjonsmaterialets rolle er primært å isolere hver leder fra de andre lederne og omgivelsene. Kabelisolasjonsmaterialer har generelt en rekke ulike tekniske krav, inkludert:

- Dielektriske egenskaper: Materialet må gi god elektrisk isolasjon
- Brannegenskaper: Materialet bør være brannsikkert og/eller selvslukkende
- Kjemisk motstand: Materialet bør kunne motstå kjemisk degradering fra ulike stoffer
- Temperaturområde: Materialet må tåle temperaturer i tiltenkt driftsområde
- Flexibilitet: Materialet må ikke være for stivt, noe som vanskeliggjør installasjon
- Holdbarhet: Materialet må motstå ytre påvirkninger, blant annet mekanisk slitasje, luftfuktighet, temperaturvariasjoner og lyseksposering.

4.1 Historikk

I dag er nesten alt kabelisolasjonsmateriale laget av plast. Historisk sett ble naturfiber og naturgummi brukt, men begge har med tiden blitt erstattet av ulike syntetiske materialer, inkludert silikoner, gummi, plast og fibre. Figur 5 viser en tidslinje for noen relevante milepæler i utviklingen av elektriske kabler og kabelisolasjonsmaterialer.

År	→	Milepæl
1830	→	Telegraflinjer tas i bruk
1858	→	Transatlantisk telegraflinje etablert
1880	→	Natur-lateks benyttes som kabelisolasjon
1882	→	Bastfibre benyttes som kabelisolasjon
1897	→	Gummi benyttes som isolasjon i 11 kV-linje
1933	→	PVC-kabelisolasjon utvikles i Tyskland
1942	→	Polyetylen-kabelisolasjon utvikles
1950	→	PVC-kabelisolasjon i kommersiell bruk
1970	→	PEX-kabelisolasjon i kommersiell bruk

Figur 5: Tidslinje for noen milepæler i utviklingen av elektriske kabler og kabelisolasjonsmaterialer.

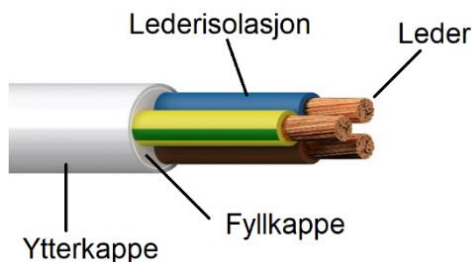
De mest utbredte plastmaterialene i dagens kabelmarked er PVC og polyetylen. Disse klassifiseres begge som termoplastiske, noe som innebærer at molekylkjedene som materialet består av separeres når det utsettes for varme. Denne egenskapen gjør blant annet at termoplastiske materialer kan smeltes og omformes gjentatte ganger. En annen type plastmaterialer klassifiseres som herdeplast

(thermoset), der materialet er utsatt for en herdeprosess som ofte gjøres ved bestråling, varme eller gjennom en kjemisk reaksjon. Denne herdingen gjør at molekyllkjedene er bundet til hverandre, noe som blant annet medfører at materialet ikke kan smeltes eller omformes. Tverrbundet polyetylen (PEX) er et eksempel på slik herdeplast.

4.2 Kabelkonstruksjon

Figur 6 illustrerer oppbygningen til en moderne elektrisk kabel i en lavspenningsinstallasjon, ofte referert til som en installasjonskabel. Kabelen er konstruert av minimum følgende elementer:

- Fleksibel leder (entrådet, flertrådet eller mangetrådet) av kobber eller aluminium
- Lederisolasjon av plast (polymérmateriale)
- Fyllkappe av plast
- Ytterkappe av plast

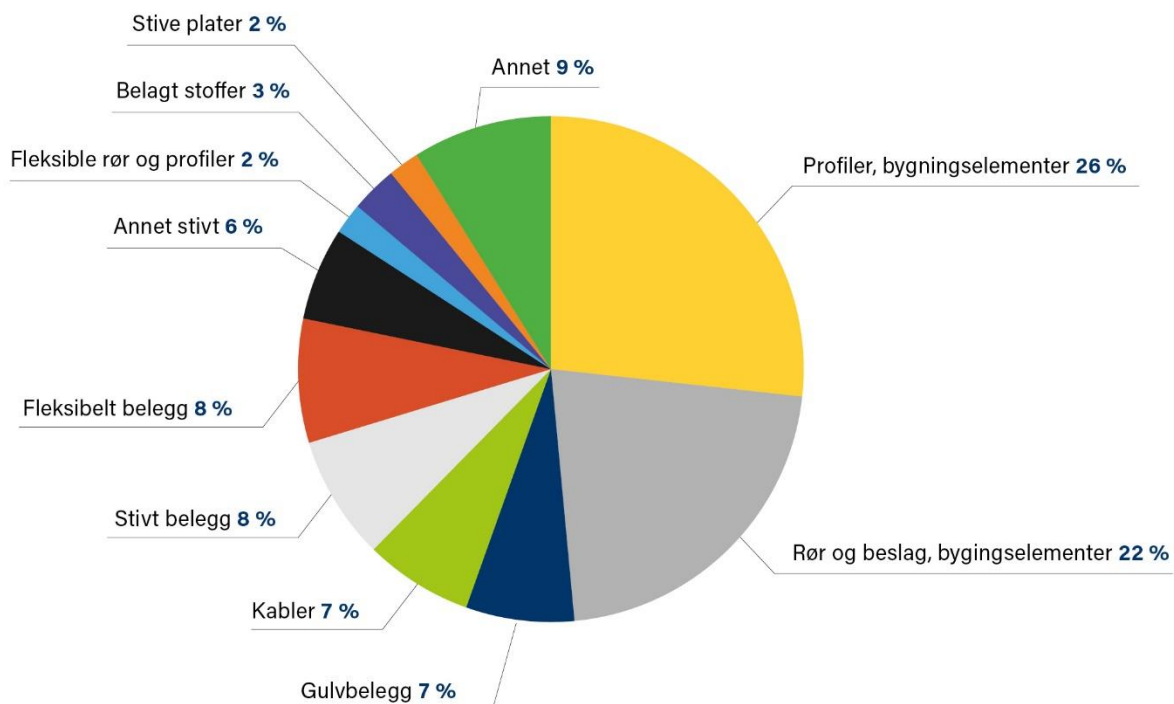


Figur 6: Typisk konstruksjon for en 230 V AC installasjonskabel med to faseledere og en jordleder.

Generelt vil tverrsnittet til den metalliske lederen bestemme hvor mye strøm som kan føres i lederen, mens tykkelsen på lederisolasjonen vil avhenge av materialtypen og spenningen mellom faselederne. I denne rapporten vil betegnelsen PVC-isolert elektrisk kabel referere til en kabel med lederisolasjon av PVC, mens det ikke spesifiseres hva kappematerialet er laget av.

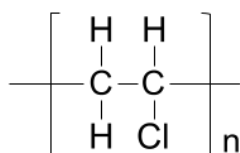
4.3 PVC

PVC (polyvinylklorid) er et av verdens mest anvendte polymérmaterialer og har en rekke ulike bruksområder. PVC-produksjonen i EU var i 2019 på rundt 6 millioner tonn, med en netto eksport på rundt 1 millioner tonn. 10 % av all plast som anvendes i EU er PVC og Figur 7 viser bruk av PVC i EU fordelt på ulike anvendelser i 2017. Kakediagrammet viser at rundt 67 % anvendes i bygningssektoren, mens 7 % (0,35 millioner tonn) anvendes i elektriske kabler. Global bruk av PVC i elektriske kabler var i 2018 ca. 3,6 millioner tonn [30]. PVC er et veldig vanlig isolasjonsmateriale i elektriske lavspenningsinstallasjoner, og i USA utgjør til eksempel PVC omtrent 2/3 av isolasjonsmaterialet benyttet i elektriske kabler i bygninger [17]. PVC har historisk også blitt benyttet i annet installasjonsutstyr i elektriske lavspenningsinstallasjoner, blant annet i koblingsklemmer, koblingsbokser, kapslinger, støpsler, kontakter og korrugerte plastrør. For mange av disse komponentene er PVC-plast faset ut og erstattet av halogenfri plast.



Figur 7: Bruk av PVC i EU i 2017 fordelt på ulike anvendelser [31].

En av hovedgrunnene til den store utbredelsen av PVC er at det er enkelt og billig å produsere, der råstoffene er koksalt (NaCl) og hydrokarboner i form av naturgass eller olje. PVC er et polymérmateriale, noe som innebærer at det består av en repeterende strukturell enhet, en såkalt monomér, som er forbundet med en kovalent kjemisk binding. Figur 8 viser denne strukturelle enheten for PVC. Monomérene bindes til hverandre og danner langkjedede molekyler (polymérer). Det kan nevnes at monoméret vinylklorid (C_2H_3Cl) inneholder 57 vektprosent klor og er klassifisert som kreftfremkallende for mennesker (Gruppe 1 karsinogen).



Figur 8: Strukturell enhet (monomér) for PVC polymérmateriale.

Generelt tilsettes en rekke hjelpestoffer for å forbedre og skreddersy plastens egenskaper. I de fleste tilfeller er ikke tilsetningsstoffene kjemisk bundet til plastpolymérene, men et unntak kan være noen type flammehemmere [32]. PVC for bruk som kabelisolasjonsmateriale blandes med opptil 50 % tilsetningsstoffer for å få egnede egenskaper, og formuleringen for PVC-kabelisolasjonsmateriale vil typisk være følgende [33]:

- 52 - 63 % PVC-resin.
- 25 - 29 % mykner (ftalat eller trimellitate).
- 5 - 16 % fyllstoff ($CaCO_3$ eller kaolin).
- 2 - 4 % stabilisator (zeolitt).
- 0,2 - 0,3 % voks.

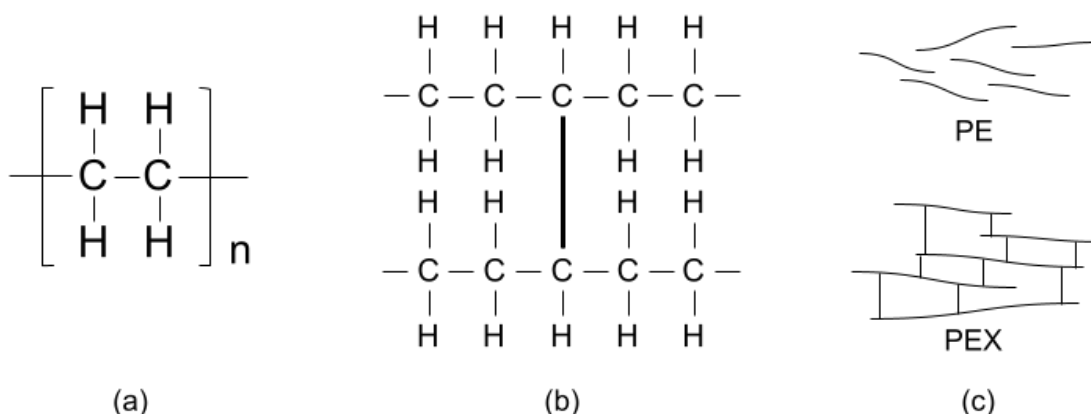
I tillegg tilsettes mindre mengder av fargestoffer, smøringsstoffer, anti-oksideranter og brannhemmende middel [17]. Myknerens hovedrolle er å hindre termisk nedbrytning av isolasjonsmaterialet, i tillegg til å gjøre det bøyelig, mens stabilisatorer tilsettes for å redusere

misfarging, aldring og avspaltning av hydrogenklorid [5]. For eksempel kan lysstabilisatorer tilsettes for å redusere avspaltning av hydrogenklorid som følge av eksponering for ultrafiolett lys. Fyllstoffet har flere funksjoner, blant annet å fange (skrubbe) avspaltet hydrogenklorid-gass og å optimere de dielektriske egenskapene til isolasjonsmaterialet.

4.4 PEX

Polyetylen er et termoplastisk materiale som fremstilles ved polymérisering av etylen-gass, avledet fra enten petroleumsgass eller naturgass. Polyetylen er det mest anvendte plastmaterialet i verden og benyttes blant annet i emballasje, flasker, poser og beholdere. Polyetylen kan på samme måte som PVC formuleres med ulike tilsetningsstoffer for å skreddersy egenskapene med hensyn til anvendelsen. Polyetylen med lav tetthet (LDPE) benyttes blant annet til fleksible produkter. Lineær lav tetthet polyetylen (LLDPE) er en variant av LDPE som er mykere og mer bøyelig, og benyttes ofte i kabelisolasjonsmateriale. Polyetylen med høy tetthet (HDPE) benyttes til produkter som krever stivhet/styrke, for eksempel rør. Når polyetylen omdannes til herdeplast refereres det til som tverrbundet polyetylen, ofte forkortet PEX, XLPE eller XPE. Herdeprosessen gjør at PEX har gode termiske og mekaniske egenskaper, noe som gjør det til et holdbart polymérmateriale med lang levetid. Generelt fører herdingen til økt kompresjonsstyrke, strekkfasthet, termisk stabilitet og vannabsorpsjonsmotstand [34].

Den repeterende strukturelle enheten for polyetylen er vist i Figur 9a. Denne monoméren danner langkjedede molekyler på samme måte som PVC, der den eneste forskjellen er inkorporeringen av halogenet (klor), noe som gjør at PVC har vesentlig mer masse og høyere massetetthet enn polyetylen. Elektriske kabler som ikke inneholder elementene fluor, klor, brom eller jod (gruppe 17) kalles ofte halogen-frie kabler. Figur 9b viser bindingsstrukturen for PEX. De langkjedede molekylerne for PEX har en tverrbinding som gjør det mer stabilt sammenlignet med polyetylen, som vist i Figur 9c. Denne tverrbindingen kan gjøres enten fysisk eller kjemisk: Fysisk tverrbinding innebærer å utsette polymérmaterialet for elektron- eller mikrobølgestråling (PE-Xc) med høy energi, mens kjemisk tverrbinding innebærer tilsetning av kjemikalier eller initiatorer som for eksempel azobensen (PE-Xd) silan (PE-Xb) eller peroksid (PE-Xa) for å skape frie radikaler som gjør at denne tverrbindingen kan dannes.



Figur 9: (a) Strukturell enhet (monomer) for polyetylen (PE), (b) bindingsstruktur for tverrbundet polyetylen (PEX), (c) lagvis struktur for PE og PEX langkjedede molekyler.

Polyetylen i seg selv har utmerket dielektrisk styrke, høy isolasjonsmotstand og lav dielektrisk spredningsfaktor ved alle frekvenser som gjør den til et meget godt isolatormateriale, men det har et begrenset temperaturområde på grunn av sine termoplastiske egenskaper. Tverrbindingen gjør at PEX

har et mye større temperaturområde samtidig som de gode dielektriske egenskapene opprettholdes. Tabell 2 sammenligner ulike relevante egenskaper for PVC, polyetylen og PEX kabelisolasjonsmateriale [35]. PEX har i de aller fleste kategorier bedre egenskaper sammenlignet med PVC. De gode termiske egenskapene gjør for eksempel at en PEX-isolert installasjonskabel i et lavspenningsanlegg kan spesifiseres for en ledertemperatur opptil 90°C. Ofte vil en PVC-isolert kabel være begrenset til 70°C ledertemperatur, noe som indirekte betyr at en PEX-isolert kabel kan føre en høyere strøm for et gitt ledertverrsnitt. De gode dielektriske egenskapene gjør at PEX blir veldig ofte benyttet som isolasjonsmateriale i høyspenningskabler.

Tilsetningsstoffene for PEX-kabelisolasjonsmateriale vil typisk være som følger [36][37]:

- 60 - 80 % polyetylen-resin (LLDPE).
- 20 - 40 % flammehemmere ($C_{12}Br_{10}O$, $C_{12}H_2Br_8O$, Sb_2O_3 , $Al(OH)_3$).
- 2 % antioksidanter (butylated hydroxytoluene, Poly(1,2-dihydro-2,2,4-trimethylquinoline)).
- I tillegg tilsettes mindre mengder av fargestoffer og stabilisatorer.

Det kan legges til at kommersiell resirkulering av PEX er utfordrende på grunn av tekniske og økonomiske årsaker. Typisk vil PEX degraderes før det smelter fordi det er tverrbundet (herdet). Det finnes metoder for å bryte opp tverrbindingene, men disse involverer teknikker som er kostbare. Det meste av dette plastmaterialet sendes derfor i dag enten til deponi eller forbrenning, noe som resulterer i landforurensning og utslipp av CO_2 [38].

Tabell 2: Sammenligning av ulike egenskaper for PVC, PE og PEX kabelisolasjonsmateriale [35].

Egenskap	PVC	PE	PEX
Massetetthet [g/cm^3]	1,4	0,92	0,92
Maksimal temperatur [$^{\circ}C$]	60 - 70	75	95
Mykningstemperatur [$^{\circ}C$]	120	110	127
Instantan kortslutningstemperatur [$^{\circ}C$]	135	150	250
Isolasjonsmotstand [$m\Omega \cdot K/m$]	20	1000	1000
Volumresistivitet [$\Omega \cdot cm$]	1e12 - 1e15	1e17	1e17
Dielektrisk styrke [kV/mm]	20 - 35	20 - 35	35 - 50
Dielektrisk konstant (60 Hz)*	6 - 8	2,3	2,3
Dielektrisk tap (60 Hz)	1e-1	1e-4	1e-4

* Lavere dielektrisk konstant innebærer lavere tap ved høy-frekvens signaloverføring

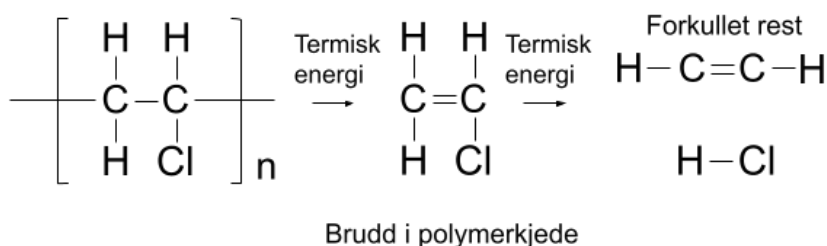
4.5 Dekomponering og forkulling

4.5.1 PVC

De termiske degraderingsmekanismene for PVC har vært studert utdypende siden introduksjonen for over 70 år siden. For PVC-basert kabelisolasjonsmateriale er opptil 50 % av massen i ulike tilsetningsstoffer og disse vil ha stor påvirkning på degraderingen. Babrauskas har tidligere presentert relevante funn knyttet til dekomponeringsprosessene til PVC-formuleringene som typisk benyttes i kabelisolasjonsmateriale, og de mest vesentlige sammenhengene er som følger [17]:

- Når PVC varmes opp er det relativt lett utsatt for dekomponering og forkulling (karbonisering) sammenlignet med andre polymérmaterialer, som for eksempel PEX. Når temperaturen økes over romtemperatur vil HCl-molekyler frigjøres (dehydroklorinering), og et flerumettet materiale blir igjen som noen ganger refereres til som polyacetylen.
- HCl (saltsyre) er en sterkt korrosiv gass som angriper og løser opp metalliske ledermaterialer i elektriske lavspenningsinstallasjoner og i elektroniske komponenter.

- Allerede i temperaturområdet 60 - 80°C vil utgassing av HCl initieres, og ved 360°C vil HCl være fullstendig fjernet fra polymérmatriksen. Fyllstoffet CaCO₃ er tilsatt for å fange opp HCl-gass og dermed redusere utgassingene. For ren PVC er fullstendig dehydroklorinering oppnådd ved ca. 250°C.
- Dehydroklorineringsprosessen er autokatalytisk, dvs. at HCl-gassen fremmer/forsterker reaksjonen. Ved videre oppvarming til 350 – 500 °C vil flere parallelle reaksjoner inntreffe, inkludert produksjon av polyenyl mikroradikaler, dehydrokykling, aromatisering, og kjedeklyving, slik at man til slutt ender opp med en tverrbundet forkullet rest. Figur 10 viser en illustrasjon av brudd i polyméerkjeden og dannelsen av forkullet materiale når PVC blir varmet opp [39].
- Tilsvarende vil mykningsmiddelet starte å dampe av allerede ved 85°C. Ved oppvarming til 130°C i 24 dager har det blitt påvist at 25 % av mykningsmiddelet hadde forsvunnet fra polymérmatriksen. Myknere har generelt en negativ effekt på stabiliteten til PVC. Tap av mykner kan føre til sprøhet og sprekkdannelser.
- Ved oppvarming av kabelisolasjonsmaterialet kan ftalater begynne å dekomponere ved temperaturer så lave som 105°C og frigjøre gassforbindelser som, når de kombineres med oksygenet i luft, danner en antennelig gassblanding. Høye temperaturer, som for eksempel fra glødende kontakter eller lysbuer, kan føre til ytterligere nedbrytning av disse gassforbindelsene for å danne mindre komplekse, men fortsatt svært antennelige gasser i oksygen. For de fleste rene hydrokarboner i luft varierer selvantennelsestemperaturen fra 240 - 540 °C, noe som er langt under rapporterte temperaturer (1 230°C) for glødende kontakter [19].



Figur 10: Illustrasjon av brudd i polyméerkjeden og dannelsen av forkullet materiale og HCl når PVC utsettes for termisk energi [39].

Enkelte tilsetningsstoffer, som blant annet fyllstoffet CaCO₃ og flammehemmeren Sb₂O₃, kan omdannes til aske under forbrenning, og denne asken inneholder ikke karbon. Dannelsen av slik aske i (den forkullede) polymérmatriksen er et fenomen som forsinker eller hemmer vedvarende forbrenning. En viss fraksjon av polymérmaterialet forblir i askeform og gjør at mindre flyktig og antennelig drivstoff blir frigjort (i form av gass). Asken kan også fungere som en barriere mellom den eksterne varmekilden og polymérmaterialet og således redusere varmeforplantning til intakte deler av polyméren. I tillegg kan den høyere viskositeten (økt fasthet) til mesofasen med forkullede, faste rester hemme overføringen av antennelig drivstoff fra den dekomponerte polyméren til den omkringliggende luften. Dannelsen av forkullet materiale er en strategi som brukes av produsenten for å forbedre brannegenskapene [2].

Denne termiske dekomponeringen av PVC påvirker de dielektriske egenskapene i stor grad, og de mest vesentlige sammenhengene er som følger [17][19]:

- Den dielektriske styrken for PVC-formuleringer benyttet i kabelisolasjonsmateriale er typisk 24 – 36 MV/m, sammenlignet med rundt 350 MV/m for ren PVC ved romtemperatur. Denne reduksjonen i dielektrisk styrke kan forårsakes av ujevn fordeling av fyllstoffet noe som bryter opp isolasjonsevnen til polymérmaterialet. I tillegg vil det kunne være små luftlommer

(defekter) i polymérmatriksen som skaper irregulariteter i det elektriske feltet og intensivering av feltstyrken i grensesjiktet mellom tomrommet og polyméren. Luft har til sammenligning en dielektrisk styrke på 3 MV/m.

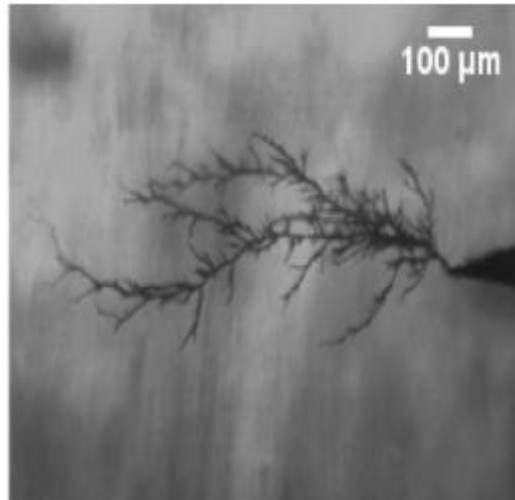
- Dekomponering av PVC gjør at materialets dielektriske egenskaper svekkes og det blir gradvis halvledende. Ved ca. 160°C blir materialet halvledende under kortvarig eksponering (ca. 10 timer), mens langvarig eksponering (ca. 1 måned) kan forårsake feil ved temperaturer så lave som 110°C. Det forkullede materialet er en temperaturavhengig halvleder som kan føre til sammenbrudd over grenseflaten ved spenningspåtrykk lavere enn $115 V_{rms}$.
- Forhøyede temperaturer vil svekke de dielektriske egenskapene til PVC, da tap av mykner forårsaker dannelse av små hulrom i materialet, noe som vil redusere den dielektriske styrken. Dette forholdet styres av mengden (og typen) av mykningsstoffer som brukes. For PVC uten mykner er den dielektriske styrken svakt stigende opp til 70°C, men deretter faller den bratt med økende temperatur.

Det er også andre faktorer enn forhøyet temperatur som påvirker de dielektriske egenskapene til PVC. Disse kan karakteriseres som degradering som følge av aldring og kan generelt deles inn i tre hovedkategorier [17]:

1. **Elektrisk aldring.** Dette fenomenet kalles også spenningsindusert degradering der det inntreffer et lokalt dielektrisk sammenbrudd (partial discharge). Det er spesielt dannelsen av tre-lignende kanaler i isolatoren (treeing) som er av vesentlig betydning for kabelisolasjonsmaterialer i høyspenningsapplikasjoner, og dette vil beskrives mer i detalj i neste avsnitt.
2. **Fysisk aldring.** Oksidering av polyméren kan føre til sprøhet og sprekkdannelse som vil kunne påvirke feltstyrken i isolatoren på samme måte som små luftlommer beskrevet tidligere. Mekanisk stress påtrykt over tid kan føre til dannelse av polymérradikaler og skape mikrotomrom (microvoids) i polymérmaterialet.
3. **Kjemisk aldring.** Dannelsen av frie radikaler fører til bindingsbrudd (unzipping) av polymérstrukturen. Prosessen kan initieres termisk eller mekanisk, ved oksidasjonsreaksjoner, ved hydrolyse, eller ved UV/ioniserende stråling. Det har blitt påvist at metaller kan akselerere oksidativ pyrolyse av polymérer benyttet i kabelisolasjonsmaterialer. Det har for eksempel blitt påvist at sink-støv har en skadelig påvirkning på PVC. Sterkt forurensede omgivelser kan på tilvarende måte føre til nedbryting av polymérmaterialet.

Fenomenet der tre-lignende kanaler dannes i isolatormaterialer har blitt omfattende studert i nyere tid. Figur 11 viser dette fenomenet der tre-lignende kanaler er dannet i PEX kabelisolasjonsmateriale [40]. Slike propagerende kanaler er et slags forstadium for dielektrisk sammenbrudd for isolatoren og fenomenet blir ofte delt inn i tre ulike typer [17]:

1. **Elektrisk.** Lokalt dielektrisk sammenbrudd (kanaler) blir dannet som følge av påtrykk av et høyt elektrisk felt over lang tid. Urenheter, hulrom, og mekaniske defekter i polymérmaterialet kan forårsake et elektrisk felt som er kritisk høyt i et lokalisert område. Dette kan danne ioniserte gasser i hulrom i materialet, noe som igjen kan føre til elektriske utladninger mellom veggene i tomrommet. Ultrafiolett lys og ozon fra disse utladningene reagerer deretter med det nærliggende polymérmaterialet, noe som fører til ytterligere polymérdekomponering og forringing av isolasjonsevnen.
2. **Vann-indusert.** I tilfeller der relativ fuktighet overstiger 70% kan tilsetningsstoffene i polymérmatriksen reagere med vann. Høyspentkabler som er nedsenket i vann eller nedgravd er spesielt utsatt for dette fenomenet.
3. **Kjemisk.** Kanaler blir dannet som følge av forurensninger.



Figur 11: Dannelse av tre-lignende kanaler i PEX kabelisolasjonsmateriale [40].

Tilsetningsstoffer og fyllstoffer kan påvirke dannelsen av tre-lignende kanaler. Generelt vil myknere redusere motstanden mot slik kanaldannelse, mens fyllstoff har små korn som kan fungere som inerte barrierer, noe som øker motstandsevnen. Noen stabilisatorer tilsettes spesielt for å forbedre motstanden mot kanaldannelse. Kalsiumkarbonat (CaCO_3) er hygroskopisk og kan føre til dannelse av fuktighet i isolasjonsmateriale, noe som kan bidra til vann-indusert kanaldannelse. Fuktighet kan også stamme fra nedbrytningen av flammehemmeren aluminatrihydrat [17].

4.5.2 PEX

Dekomponering og forkulling av PEX vil inntreffe først ved relativt høye temperaturer [19]. Det har blitt funnet at massetap som følge av utgassing inntreffer ved temperaturer rundt ca. 400°C [41], og generelt er degraderings-prosessene svært langsomme selv nær den øvre grense for angitt temperaturintervall (som regel 90°C ledertemperatur for en installasjonskabel). For en PEX-isolert kabel vil forventet levetid typisk være 40 – 60 år ved en brukstemperatur på 90°C , og i temperaturintervallet $95 - 105^\circ\text{C}$ er forventet levetid 7 – 30 år [42]. Studier på polyetylen har vist at tilsatte antioksidanter kan opptre som en urenhet og redusere den dielektriske styrken. En studie antyder at tilsetning av 1 % antioksidanter resulterte i 16 % reduksjon av den dielektriske styrken [17]. Det har også vært observert at PVC kan ha en negativ innvirkning på PEX sine egenskaper. En kabelkonstruksjon med PEX ledningsisolasjon og en PVC-ytterkappe viste mer alvorlig termisk nedbrytning av PEX enn i fravær av PVC [17].

Dannelse av tre-lignende spor, som vist i Figur 11, er et relativt utbredt fenomen for PEX-isolerte kabler benyttet i medium- og høyspenningsanlegg. Under normale forhold vil det kreves spenninger på flere tusen volt for å initiere dannelse av slike spor. For høy-kvalitet PEX-isolerte elektriske kabler i lavspenningsinstallasjoner med vekselspenning på 230 V er ikke denne problemstillingen vesentlig. Et tiltak som er nevnt for å redusere dannelse av tre-lignende spor for PEX-isolerte høyspenningskabler er å forsegle endene av kabelen under transport og lagring for å unngå at fuktighet trenger inn i kabelen.

4.6 Årsaker til feil eller antennelse

Det har blitt rapportert mange ulike årsaker til feil eller antennelse av elektriske kabler og installasjonsmaterieell. Tabell 3 identifiserer de mest kjente faktorene som kan føre til antennelse av PVC-isolerte elektriske kabler, forårsaket enten av fabrikkasjonsfeil eller bruks-/installasjonsfeil [5][17].

Tabell 3: Årsaker som kan føre til feil eller antennelse av PVC-isolerte elektriske kabler [5][17].

Årsak	Fabrikasjonsfeil	Feil bruk/installasjon
Feil i formuleringen av isolasjonsmaterialet	X	
Feil i ekstruderingen av kabelen	X	
Forurensninger	X	
Høy fuktighet, forårsaket av tilsetningsstoffer	X	
Overbelastning (> 3-7 ganger lederdimensjoneringen)		X
For mye isolasjon svekker varmedissipasjon		X
Varmgang på grunn av skade på isolasjonen		X
Varmgang på grunn av skade på leder		X
Feilutført kobling skaper en kontaktsvikt		X
Dielektrisk nedbrytning av isolasjonsmaterialet	X	X
Lysbuedannelse gjennom et forkullet spor i isolasjonen	X	X
Siging av isolasjonen	X	X
Kjemisk påvirkning	X	X
Spenningsstøt	X	X

Dielektrisk nedbrytning av isolasjonsmaterialet og lysbuedannelse gjennom et forkullet spor i isolasjonen har fått relativt stor oppmerksomhet da dette er ganske unike feilmekanismer for PVC-isolerte elektriske kabler. Under normale omstendigheter har PVC akseptable dielektriske egenskaper (jmf. Tabell 2), men manglende temperturstabilitet gjør at isolasjonsegenskapene brytes ned allerede nær den øvre grense for angitt temperaturintervall (som regel opp til 70°C ledertemperatur for installasjonskabel). Flere av feilene som er listet i Tabell 3 kan medføre forhøyet temperatur. Ytre mekaniske påkjenninger kan for eksempel påvirke lederen; det kan være brudd i flertrådet leder eller deformert/reduert ledertverrsnitt som følge av klemskader eller for liten bøye-radius. Konsekvensene av slike skader på lederen vil kunne være lokal oppvarming på grunn av økt strømtetthet, hvilket er uavhengig av kabelisolasjonsmaterialet som benyttes, men for en PVC-isolert elektrisk kabel vil varmgang i lederen potensielt få stor konsekvens på grunn av den manglende temperturstabiliteten.

Dielektrisk nedbrytning av PVC er et sammensatt fenomen og ble beskrevet i forrige kapittel. Når et sammenbrudd av isolasjonsevnen inntreffer, vil en lysbue kunne propagere gjennom det dielektriske mediet. Slike lysbuer kan ha meget høy temperatur (opptil 6 000°C) og vil kunne medføre antennelse av nærliggende brennbart materiale, inkludert isolasjonsmediet og omkringliggende objekter. Spontanantennelsestemperaturen til PVC er blitt rapportert til å ligge i temperaturintervallet 263 – 454°C [19]. Lysbuedannelse kan også medføre ablasjon (dvs. materiale fra overflaten av et objekt fjernes ved fordampning) uten at materialet nødvendigvis antennes [17]. I slike tilfeller vil sammenbruddet danne en permanent og lokal skade i isolasjonen, noe som refereres til som forkullede spor.

Forkullede (karboniserte) spor er svært problematisk for PVC-isolerte elektriske kabler fordi disse sporene kan skape en elektrisk forbindelse mellom lederne. Det er tidligere blitt gjennomført laborietester med kortslutningslysruer (parallellysruer) i elektriske kabler og man fant at denne type lysbuedannelse er gjentakende, men på en uregelmessig måte. Følgende hendelsesforløp ble observert [5]:

- Det går strøm i det forkullede sporet i isolasjonen
- Strømstyrken øker og resulterer i lokale lysruer
- Lysruen forårsaker smelting av metall og utstøting av smeltede metallbiter
- Strømstyrken reduseres som følge av de ovennevnte
- Fortsatt strøm gjennom de forkullede spor, noe som igjen medfører betydelig økt strømstyrke

Det er vanlig å skille prosessen for dannelse av forkullede spor i isolasjonsmaterialet inn i to kategorier: Tørr og våt spordannelse. Når fuktighet ikke er involvert i prosessen er det normalt en betingelse at PVC-isolasjonen er blitt utsatt for forhøyet temperatur. I en studie ble det påvist at forkullede spor kan dannes allerede ved kort tids (1 måned) oppvarming til 71 - 77°C [43]. Flere andre studier der PVC har blitt sammenlignet med andre polymérmaterialer konkluderte med at PVC hadde de verste egenskapene med tanke på å motstå dannelse av forkullede spor under tørre forhold [44][45].

Våt spordannelse kan inntreffe når (en film av) vann danner en forbindelse mellom to ledere. En intakt kabel som blir utsatt for våte omgivelser (enten vann i væskeform eller luft med høy relativ fuktighet) vil normalt ikke påvirkes, men hvis isolasjonsmaterialet er skadet eller svekket (fysisk og kjemisk aldring) kan forholdene ligge til rette for slik spordannelse. Babrauskas påpeker at når PVC blir testet for spordannelse under våte omgivelser er fremgangsmåten beskrevet i den internasjonale standarden (IEC 60112) ikke egnet, da en flat plate/skive og ikke en kabel benyttes i testingen [17]. Realistiske tester av PVC-isolerte kabler antyder at PVC har dårlige egenskaper med tanke på å motstå dannelse av karboniserte spor under våte forhold. Betydelig spordannelse ble observert i helt ned i spenningsområdet 50 – 100 V [17][46][47].

HCl sin evne til å fremme korrosjon kan være en tilleggsfaktor til svikt som følge av lysbuedannelse i karboniserte spor for PVC-isolerte kabler. Korrosjonen av kobberlederen danner ulike reaksjonsprodukter ($\text{Cu}(\text{OH})\text{Cl}$, $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$) som aktivt kan fremme spordannelse [17].

4.7 Kabelklassifisering

Klassifisering av elektriske kabler i Norge omfattes av den europeiske byggevareforordningen, ofte kalt CPR (Construction Products Regulation). CPR ble introdusert og tatt i bruk i 2011 og ble obligatorisk 1. juli 2013. Målsetningen for CPR var å harmonisere kravene som skal settes til byggevareprodukter i Europa, noe som ikke var mulig med det foregående direktivet kalt CPD (Construction Products Directive), etablert i 1989. CPR innebærer at landbaserte bygninger og konstruksjoner omfattes av et felles regelverk hvor det stilles krav til sikkerhet og brann. Det kan også presiseres at CPR kun klassifiserer et produkts reaksjon med brann (reaction to fire). Det vil si at de elektriske, mekaniske og materialtekniske egenskapene for et produkt ikke vil omfattes av CPR.

Elektriske kabler er det eneste elektrotekniske produktet som er eksplisitt listet i CPR, og fra 1. juli 2017 ble CPR innført for kraft-/installasjonskabler og kontroll-/kommunikasjonskabler for varig og fast installasjon (innendørs) i norske bygg og byggverk. CPR setter krav til kabelens reaksjon og påvirkning under en brann, det er med andre ord ikke kabelens motstandsdyktighet mot brann (funksjonssikker kabel) som omfattes, kun dens egenskaper i form av brannspredning, varmeutvikling og avgivelse av stoffer etter at en brann har oppstått.

Basert på disse egenskapene klassifiseres kabler fra klasse A_{ca} (høyest ytelse, best beskyttelse) til F_{ca} (laveste ytelse) i henhold til Tabell 4, der "ca" henviser til "cable". Disse refereres også til som euroklasser. Ytterpunktene her er klasse A som er ikke-brennbart materiale og klasse F som er brennbart materiale uten spesielle krav til brannegenskaper. Et eksempel på kabeltype som tilfredsstiller klasse A_{ca} er en såkalt "mineral insulated metal sheathed (MIMS)" kabel der lederne er isolert med et inorganisk pulvermateriale (f.eks. magnesiumoksid) som er kapslet inn i et metallrør. I motsatt ende av klassifiseringsskalaen så vil typisk en umerket kabel med ukjent opphav klassifiseres i klasse F_{ca} . For klasse B, C og D er det også tilleggsklassifisering som angir kriterier for røykutvikling (s), dråpeutvikling (d) og syreutvikling (a) i henhold til Tabell 4. Her er ytelsen høyere jo lavere tallet er. Klasse E_{ca} er altså en kabeltype som kun tilfredsstiller kriteriene for flammespredning uten tilleggskriterier for varmeavgivelse, brannspredning, samt røyk-, dråpe- og syreutvikling. E_{ca} i denne

klassifiseringsskalaen tilsvarer det tidligere, norske minimumskravet gitt av IEC 60332-1-2. Utover dette er det ingen direkte sammenheng mellom CPR-forskriften av 1. juli 2017 og tidligere standarder.

Klassifiseringssystemet åpner altså for 183 ulike klassekombinasjoner [4]. Enhver slik kombinasjon av hoved- og tilleggsklassifisering kan i teorien oppnås, men i praksis vil det kun være et fåtall kombinasjoner som blir fabrikkert da en gitt ytelsesparameter kan påvirke og styre andre ytelsesparametere. PVC-isolerte elektriske kabler vil tilfredsstillende E_{ca} , mens elektriske kabler med halogenfri isolasjonsmateriale vil typisk tilfredsstillende klasse D_{ca} [4].

Byggevareforordningen innebærer at de ulike aktørene i markedet må forholde seg til CPR-kravene, og i praksis innebærer dette følgende ansvar:

- Kabelprodusent må utstede ytelsesdeklarasjon (DoP), utføre CE-merking og 3. parts sertifisering i henhold til CPR
- Importør må sikre at kabler er CPR-kompatible
- Grossist må sikre at produkter de fører er testet og merket i henhold til CPR
- Prosjekterende må sikre at kabler er CPR-kompatible
- Installatør må anskaffe og anvende korrekt produkt/dokumentasjon

Tabell 4: Klassifisering av elektriske kabler i henhold til byggevareforordningen (CPR) og tilhørende testmetoder.

Klasse	Kriterier	Testmetode	Tilleggsklassifisering	Testmetoder
A_{ca}	Brennverdi	EN ISO 1716	-	
$B1_{ca}$	Varmeavgivelse Brannspredning Flammespredning	30 kW flammekilde EN 60332-1-2	s1a, s1b, s1, s2, s3 d0, d1, d2 a1, a2, a3	EN 61034-2 / 50399 EN 50399 EN 60754-2
$B2_{ca}$	Varmeavgivelse Brannspredning Brannutviklingsindeks Flammespredning	20,5 kW flammekilde EN 60332-1-2	s1a, s1b, s1, s2, s3 d0, d1, d2 a1, a2, a3	EN 61034-2 / 50399 EN 50399 EN 60754-2
C_{ca}	Varmeavgivelse Brannspredning Brannutviklingsindeks Flammespredning	20,5 kW flammekilde EN 60332-1-2	s1a, s1b, s1, s2, s3 d0, d1, d2 a1, a2, a3	EN 61034-2 / 50399 EN 50399 EN 60754-2
D_{ca}	Varmeavgivelse Brannutviklingsindeks Flammespredning	20,5 kW flammekilde EN 60332-1-2	s1a, s1b, s1, s2, s3 d0, d1, d2 a1, a2, a3	EN 61034-2 / 50399 EN 50399 EN 60754-2
E_{ca}	Flammespredning	EN 60332-1-2	-	
F_{ca}	Tilfredsstillende ikke klasse E_{ca}		-	

4.8 Standarder for kabeltesting

I Norge er det Normkomite 20 (Elektriske kabler) i Norsk elektroteknisk komite (NEK) som utvikler og overvåker standarder som beskriver krav til konstruksjon, materialer og testmetoder knyttet til kraft- og signalkabler. Komiteen jobber også med europastandarder (EN) i forbindelse med CPR/byggevareforordningen for brannkrav til kabler i Europa. De mest relevante europeiske standardene for testing av elektriske kabler er:

- **NEK EN 50575:2014:** Power, control and communication cables - Cables for general applications in construction works subject to reaction to fire requirements.

- **NS-EN 13501-6:2022:** Fire classification of construction products and building elements - Part 6: Classification using data from reaction to fire tests on power, control and communication cables.
- **NEK EN 50576:2022:** Electric cables - Extended application of test results for reaction to fire
- **NEK EN 50399:2022:** Common test methods for cables under fire conditions - Heat release and smoke production measurement on cables during flame spread test - Test apparatus, procedures, results.
- **NEK EN 60332-1-2:2004:** Tests on electric and optical fiber cables under fire conditions Part 1-2: Test for vertical flame propagation for a single insulated wire or cable - Procedure for 1 kW pre-mixed flame.
- **NEK EN 61034-2:2005:** Measurement of smoke density of cables under defined conditions - Part 2: Test procedure and requirements.
- **NEK EN ISO 1716:2018:** Reaction to fire tests for products — Determination of the gross heat of combustion (calorific value).
- **NEK EN 60754-2:2014:** Test on gases evolved during combustion of materials from cables - Part 2: Determination of acidity (by pH measurement) and conductivity.

5 Betraktninger

I dette kapittelet vil tematikken presentert i de foregående kapitlene diskuteres og settes i sammenheng. De mest sentrale problemstillingene som er forsøkt belyst er:

- Hvem stiller krav til valg av isolasjonsmaterialer? Hvor er disse kravene definert og hvordan er de fremkommet?
- Hvilken grad brukes PVC og PEX i Norge og i Europa?
- Hvor mange branner og brannutløp er det reelt årlig i Norge som er forårsaket av seriefeil i elektriske anleggsinstallasjoner? Hva er samfunnskostnaden?
- Kan bruk av PEX-isolasjon avbryte forløpet til en seriefeil?
- Kan bruk av PEX i stedet for PVC som kabelisolasjonsmateriale være et effektivt brannforebyggende tiltak?

5.1 Krav til installasjonskabler i Norge

Det er opp til hvert enkelt europeisk land å definere sitt brannsikkerhetsnivå under CPR. Dette vil variere ut ifra byggeskikk og byggeregler for landet, og generelt, den lokale brannfasesituasjonen. Den endelige avgjørelsen om minimumsnivået for brannytelse ligger hos de nasjonale myndighetene, som i Norge er DSB og Direktoratet for byggkvalitet (DiBK). I Norge er branntekniske krav til elektriske kabler spesifisert i følgende regelverk, med tilhørende årstall:

- Regelverk for bygg
 - Byggevareforordningen (CPR) - 2013
 - Byggteknisk forskrift (TEK17) - 2017
- Regelverk for elektriske installasjoner
 - Forskrift om elektriske anlegg (FEL) - 1999
 - Elektriske lavspenningsinstallasjoner (NEK 400:2022) – 2022
- Regelverk for elektrisk utstyr
 - Lavspenningsdirektivet (2014/35/EU) - 2014

I det følgende vil det gis en oversikt over relevante avsnitt knyttet til branntekniske krav for elektriske kabler i TEK17 og NEK 400:2022.

5.1.1 TEK17

Forskrift om tekniske krav til byggverk (Byggteknisk forskrift) definerer det minimum av egenskaper et byggverk må ha for å kunne oppføres lovlig i Norge. Siste utgave av Byggteknisk forskrift (TEK17) trådte i kraft 1. juli 2017 og erstattet fra samme dato TEK10. TEK17 er en såkalt funksjonsbasert forskrift som ikke stiller detaljerte krav til enkeltprodukter, men krav om hvilke funksjoner de ulike produktene må tilfredsstillere, for eksempel sikkerhet ved brann [24]. Hvilke ytelser som produktene minst må oppfylle for å tilfredsstillere forskriftens krav angis i veiledningen til forskriften. Ytelsene er angitt i forhold til hvilke konsekvenser en brann kan medføre for ulike byggverk, basert på byggverkets **brannklasse** og **risikoklasse** [24]. Det er i TEK17 definert 6 ulike **risikoklasser** for et byggverk, eller for ulike bruksområder i et byggverk, basert på vurderinger av faren en brann kan utgjøre for liv og helse, der risikoklasse 6 har høyest krav til brannsikringstiltak. Risikoklasse 6 inkluderer blant annet sykehus og overnattingssteder, mens boliger og kontor plasseres i henholdsvis risikoklasse 4 og 2. Det er også definert 4 ulike **brannklasser** for et byggverk basert på konsekvensen en brann kan ha for skade på liv, helse, samfunnsmessige interesser og miljø, der brannklasse 4 gjelder for bygg der konsekvensen vurderes til å være særlig stor. Brannklassene skal legges til grunn for prosjektering og utførelse for å sikre bæreevnen til byggverket ved brann, mens risikoklassene skal legges til grunn ved prosjektering og utførelse for å sikre rømning og redning ved brann.

Kravene som gjelder for kabler, ledningssystemer og kapslinger i elektriske installasjoner i byggverk er gitt i § 11.9 (*Materialer og produkters egenskaper ved brann*) og § 11.10 (*Tekniske installasjoner*) i TEK17. I §11.9 fremkommer følgende:

- 1) *Byggverk skal prosjekteres og utføres slik at det er liten sannsynlighet for at brann skal oppstå, utvikle og spre seg. Det skal tas hensyn til byggverkets bruk og den nødvendige tiden for rømning og redning.*
- 2) *Materialer og produkter skal ha egenskaper som ikke gir uakseptable bidrag til brannutviklingen. Det skal legges vekt på muligheten for antennelse, hastigheten av varmeavgivelse, røykproduksjon, utvikling av brennende dråper og tid til overtenning.*

I §11.10 fremkommer følgende:

- 1) *Tekniske installasjoner skal prosjekteres og utføres slik at installasjonen ikke øker faren vesentlig for at brann oppstår eller at brann og røyk sprer seg.*
- 2) *Installasjoner som er forutsatt å ha en funksjon under brann, skal være slik prosjektert og utført at deres funksjon opprettholdes i den tiden som er nødvendig. Dette omfatter også tilførsel av vann, strøm eller signaler som er nødvendig for å opprettholde installasjonens funksjon.*

I veilederen til §11.10 første ledd står det følgende om det som er relatert til elektriske installasjoner:

- *Klasser for ulike bruksområder for kabler er angitt i NEK 400 Elektriske lavspenningsinstallasjoner. For installasjoner for elektronisk kommunikasjon gjelder NEK 702 informasjonsteknologi - Installasjon. Denne henviser til NEK 400.*
- *Preaksepterte ytelser*
 - 1) *Kabler må ikke legges over nedforet himling eller i hulrom i rømningsvei med mindre ett av følgende punkter er oppfylt:*
 - a) *kablene representerer liten brannenergi, det vil si mindre enn ca. 50 MJ/løpemeter hulrom*
 - b) *kablene er ført i egen sjakt med sjaktvegger som har brannmotstand tilsvarende branncellebegrensende bygningsdel*
 - c) *himlingen har brannmotstand tilsvarende branncellebegrensende bygningsdel*
 - d) *hulrommet er sprinklet.*
 - 2) *Kabler som utgjør liten brannenergi, det vil si mindre enn ca. 50 MJ/løpemeter korridor eller hulrom, kan føres ubeskyttet gjennom rømningsvei. Dette er et spesifikt unntak som gjelder kabler, og kan ikke brukes som begrunnelse for andre fravik fra preaksepterte ytelser.*

5.1.2 NEK 400:2022

NEK 400:2022 [48] er en samling av 43 normer innenfor elektriske lavspenningsinstallasjoner og er utarbeidet av Normkomité 64 (*Lavspenningsanlegg*) i Norsk Elektroteknisk Komite (NEK). Den gjeldende versjonen trådte i kraft 1. juli 2022 og erstattet fra samme dato tilsvarende deler av NEK 400:2018. NEK 400:2022 er norsk bearbeidet utgave av IEC 60364-serien og CENELEC HD 60364-serien. I NEK 400:2022 fremkommer følgende:

- *NEK 400:2022 spesifiserer krav til prosjektering, utførelse og verifikasjon av elektriske lavspenningsinstallasjoner. Kravene har til hensikt:*
 - *å sikre mennesker (personer), husdyr og eiendom mot farer og skader som kan oppstå ved forutsatt bruk av elektriske lavspenningsinstallasjoner, og*
 - *å sikre at disse installasjonene fungerer som forutsatt, og*
 - *å bidra til at installasjoner ikke medfører uakseptable ulemper.*

Bestemmelser med relevans for brannegenskaper til elektriske kabler er hovedsak samlet i NEK 400-4:2022 og NEK 400-5:2022:

- Delnormen NEK 400-4 inneholder de grunnleggende kravene til beskyttelse, deriblant funksjonelle krav til beskyttelse mot termiske virkninger, spesifisert i NEK 400-4-42.
- Delnormen NEK 400-5 omfatter krav for valg og montasje av elektrisk utstyr som skal tilfredsstilles for å oppfylle de funksjonelle kravene gitt i NEK 400-4.

I NEK 400-4:2022 er følgende formuleringer relevante for elektriske kabler (hvor klassifisering av ytre påvirkninger er beskrevet i Tabell 5):

- **428.1: Områder klassifisert med ytre påvirkninger BD2, BD3 eller BD4 for **evakueringsbetingelser i nødsituasjon****

 - 428.1.1.7: Kabler skal minst tilfredsstille kravene til klasse **D_{ca}-s2d2a2** definert i NS-EN 13501-6. Dersom kablene er beskyttet av et automatisk brannsløkkeanlegg, for eksempel et sprinkleranlegg, kan kabler som tilfredsstiller klassen **E_{ca}** definert i NS-EN 13501-6 benyttes.
 - 428.1.1.8: Ledningssystemer skal ikke bidra til spredning av brann.
 - 428.1.2.5: Kabler og ledninger skal, dersom de ikke er beskyttet av et automatisk brannsløkkeanlegg (for eksempel et sprinkleranlegg), totalt ikke representere en brannenergi mer enn 50 MJ pr løpemeter rømningsvei.
 - Veiledning: Dette kravet er ikke en del av den sertifiserte ordningen for brannkrav til kabler under Byggevareforordningen (CPR).

- **428.2: Områder klassifisert med ytre påvirkning BE2 eller BE3 for egenskaper ved materialer som bearbeides eller lagres**
 - 428.2.7: Utstyr skal, som et minimum, velges i samsvar med følgende krav:
 - Kabler skal minst tilfredsstille kravene til klasse **E_{ca}** definert i NS-EN 13501-6
 - Der hvor faren for flammespredning er høy, for eksempel i lange vertikale føringer eller i buntede kabler, er det anbefalt å benytte kabler som minst tilfredsstiller kravene til klasse **D_{ca}-s2d2a2** definert i NS-EN 13501-6.

I NEK 400-5:2022 er følgende formuleringer relevante for elektriske kabler:

- **527.1: Forholdsregler innenfor branncelle i bygning**
 - 527.1.3: Kabler skal minst tilfredsstille kravene til klasse **E_{ca}** definert i NS EN 13501-6 og utstyr som, ifølge avsnitt 527.1.6, er klassifisert som flammehemmende kan monteres uten spesielle forholdsregler.
 - Kabler som ikke tilfredsstiller kravet til klasse **E_{ca}** definert i NS EN 13501-6 skal, dersom de benyttes, være begrenset til korte lengder for tilkobling av utstyr til den faste installasjonen, og skal aldri føres fra en branncelle til en annen. I installasjoner hvor det er spesiell risiko, kan det være nødvendig med kabler som minst tilfredsstiller klasse **D_{ca}-s2d2a2** definert i NS EN 13501-6.
- **560.8: Ledningssystemer**
 - 560.8.1: Ett eller flere av følgende ledningssystemer skal anordnes for nødstrømsystemer som skal fungere under en brann:
 - mineralisolerte kabler i samsvar med NEK EN 60702-1 og NEK EN 60702-2, eller
 - funksjonssikre kabler i samsvar med relevante deler av NEK IEC 60331-serien og som minst tilfredsstiller kravene til klasse **D_{ca}-s2d2a2** definert i NS-EN 13501-6, eller
 - et ledningssystem som opprettholder den nødvendige beskyttelse mot brann og mekanisk skade.

Tabell 5: Klassifisering av ytre påvirkninger definert i Tabell 51A i NEK 400:2022.

Kode	Ytre påvirkning	Nødvendige egenskaper ved valg og montasje av utstyr
BD	Evakueringsbetingelser i nødsituasjoner	
BD1	Lav persontetthet / enkel rømming	Lav persontetthet og enkel rømming. Normale.
BD2	Lav persontetthet / vanskelig rømming	Lav persontetthet og vanskelig rømming. Høye bygninger.
BD3	Høy persontetthet / enkel rømming	Høy persontetthet og lett rømming. Områder åpne for allmennheten (teatre, kinoer, kjøpesentre etc.).
BD4	Høy persontetthet / vanskelig rømming	Høy persontetthet og vanskelig rømming. Høye bygninger tilgjengelig for allmennheten (hoteller, sykehus etc.).
Kode	Ytre påvirkning	Nødvendige egenskaper ved valg og montasje av utstyr
BE	Egenskaper ved materialer som bearbeides eller lagres	
BE1	Ingen betydelig risiko	Normale.
BE2	Brannfare	Fremstilling, bearbeiding eller lagring av brennbare materialer herunder støv. Låve, trebearbeidingsbedrift, papirfabrikk o.l. Utstyr laget av materialer med brannmotstand. Arrangement for å unngå at temperaturstigning eller gnister i elektrisk utstyr kan medføre antennelse av brann i omgivelsene.
BE3	Eksplisjonsfare	Bearbeiding eller lagring av eksplosive stoffer, eller stoffer med lavt flammepunkt herunder gass og støv samt eksplosiver. Se NEK 420. Oljeraffinerier, hydrokarbonlagre, næringsmiddelindustri mv. Krav til utstyr for bruk i Ex-områder.
BE4	Forurensningsfare	Tilstedeværelse av ubeskyttede næringsmidler, farmasøytiske produkter og tilsvarende produkter uten beskyttelse. Næringsmiddelindustri, kjøkken. Tiltak kan være nødvendig for å hindre at matvarer o.l. i en feilsituasjon blir forurenset av elektrisk utstyr, for eksempel av en ødelagt lampe. Passende tiltak som: <ul style="list-style-type: none"> • beskyttelse mot nedfall av deler fra lamper og annet lett knusbart utstyr, eller • skjerming mot skadelig stråling i IR og UV-området.

SINTEF-rapport NBL A12123 "Elektriske kabler og brannrisiko – Branntekniske egenskaper til kabler, ledningssystemer og kapslinger" har relevans for gjeldende kabelklassifisering i Norge. Arbeidet ble utført i 2012 under forskningsavtalen mellom SINTEF NBL og DSB og var delfinansiert av DiBK. Det overordnede målet for rapporten var "å avklare, definere og spesifisere branntekniske egenskaper og ytelse til kabler, ledningssystemer og fordelingskapslinger basert på regelverk for elektriske installasjoner (forskrift om elektriske lavspenningsanlegg og elektroteknisk norm NEK 400) og regelverk for bygninger (byggteknisk forskrift – TEK10)" [24]. I kapittel 4 i rapporten gis følgende oppsummering av daværende brannkrav til elektriske kabler [24]:

- "Det er ikke stilt krav til at brannegenskaper for kabler skal være dokumentert ved prøving i dagens byggtekniske forskrift, og preaksepterte løsninger basert på euroklassene er enda ikke angitt i veiledningen. Ytelse til brannmotstand er heller ikke angitt i form av klasser".
- "NEK 400 er akseptert som en metodebeskrivelse for å tilfredsstillte sikkerhetskravene gitt i forskrift om elektriske lavspenningsanlegg (FEL). De ytelsene som er oppgitt i merknader må anses som anbefalinger mer enn krav. Dette gjelder for flere av henvisningene til branntekniske metoder i NEK 400 kapittel 400-4 og 400-5".

- "Enkelte referanser til branntekniske prøvingsmetoder er imidlertid gitt i selve teksten, og må derfor anses som krav som må følges dersom man skal utføre en elektrisk installasjon i henhold til NEK 400. Disse referansene er gitt under avsnitt 422.1 om brannmotstand til ledningssystemer som forsyner nødstrømskurser, og under 422.3.4 om kabler og ledningssystemer".
- "NEK 400 omfatter altså et sett med branntekniske krav for ulike deler av elektriske lavspenningsinstallasjoner i norske byggverk. Disse kravene er imidlertid ikke helt entydige når det refereres til krav og kriterier i byggregelverket. Bruken av områdekategoriene BD2, BD3 og BD4 i elregelverket og bruken av risikoklasser og brannklasser i det byggetekniske regelverket er et eksempel på ulike begreper som kan skape unødige problemer under prosjektering".

I kapittel 5 i rapporten gjøres det vurderinger for nye brannkrav til elektriske kabler i byggverk. Noen relevante formuleringer er [24]:

- "For å komme frem til et robust forslag til hvordan de nye klassene for egenskaper ved brannpåvirkning kan implementeres i veiledning til byggeteknisk forskrift, er det nødvendig med et bedre beslutningsgrunnlag enn det vi har tilgang til i dag. Et slikt grunnlag kan for eksempel utarbeides gjennom et nordisk samarbeidsprosjekt, der risikoanalyse av produktene inngår, og der det blir utvekslet erfaringer og gjort felles vurderinger".
- "Et hovedprinsipp bør være at kablers egenskaper ved brannpåvirkning reguleres på samme måte som andre byggevarer. I områder der det er strenge krav til overflatematerialer på vegger og tak, bør det også stilles strenge krav til brannegenskapene til elektriske kabler. Kravene kan i tillegg vurderes på grunnlag av mengde og plassering av kablene. I områder med spesielt strenge krav til brannsikkerhet, som for eksempel rømningsveier, kan en alternativ løsning være å bygge inn eller dekke til kablene, slik at de ikke vil delta vesentlig i en tidlig fase av brannutviklingen. I tillegg må kablene reguleres med hensyn til muligheter for antennelse på grunn av elektrisk feil. Dette er i stor grad ivaretatt i dagens el-regelverk".
- "Som et eksempel er det gitt forslag til hvordan brannkrav til produktene i rømningsvei bør reguleres. Et endelig forslag til hvordan de nye brannklassene kan innarbeides i veiledning til byggeforskrift, bør imidlertid koordineres med de andre nordiske landene. Denne rapporten vil danne et godt grunnlag for et videre nordisk samarbeid".

Som en fortsettelse av dette arbeidet ble SINTEF-rapport NBL A13111 "Conditions for Nordic harmonisation of fire classification of cables - Proposal of implementation of the new European classification system in the building regulations" publisert i 2013. Rapporten ble utarbeidet for bygningsmyndighetene i Danmark, Sverige og Norge i samarbeid med brannlaboratoriene i alle tre landene. Hovedmålet med arbeidet var å foreslå hvordan det nye europeiske systemet for klassifisering av reaksjon på brann for elektriske kabler kan implementeres i de nordiske byggeforskriftene. Basert på en gjennomgang av daværende brannkrav, brannstatistikk og erfaringer fra branner der elektriske kabler hadde vært involvert ble følgende anbefalinger gitt, sammen med oppsummeringen i Tabell 6 (oversatt) [4]:

- "Elektriske kabler i bygninger skal minimum tilfredsstillende klasse E_{ca} ".
- "For områder utstyrt med brannalarm eller et automatisk brannslukkeanlegg kan en euroklasse lavere enn kravet benyttes, f.eks. E_{ca} i stedet for $D_{ca} - s2d2$ ".
- "For underklassifisering av røyksurhet kom det ingen anbefalinger om krav da det ikke fantes slike krav til andre byggevarer. Det ble imidlertid bemerket at for kjøpere som ønsker å kreve kabler som produserer syrefri røyk, er det mulighet for å legge til et krav om a1 eller a2. Dette kan være tilfelle i områder hvor beskyttelse av elektronisk utstyr (data-servere og lignende) mot korrosjon fra røyk er et vesentlig krav".

Tabell 6: Anbefalinger for krav til elektriske kabler gitt til Nordiske myndigheter i 2013 [4].

Ekspontert område av kabeloverflaten	Generelt krav	1 og 2 etasjes frittstående boliger	Rømningsveier
> X % *	D _{ca} – s2d2	E _{ca}	C _{ca} – s1d1 **
< X % *			D _{ca} – s2d2

* Prosenttallet X bør settes i området 2 – 10 % og beregnes som eksponert areal for kabler i forhold til takarealet.

** Dette kravet gjelder kun for den delen av eksponert område som overstiger X %.

Det presiseres i rapporten at kabler med PVC-isolasjon vil tilfredsstillere kravene til klasse E_{ca}, mens kabler uten halogen i isolasjonen vil tilfredsstillere klasse D_{ca}, dette ifølge opplysninger fra norske kabelprodusenter.

I diskusjonsdelen av rapporten fremlegges følgende sammenhenger (oversatt) [4]:

- *"Prinsippet for fastsettelse av krav for reaksjon på brann for elektriske kabler bør i størst mulig grad følge samme logikk som kravene til andre typer bygningsmaterialer. Det betyr at kravene i enkelte områder hvor risikoen for liv og helse er høy ved brann (f.eks. rømningsveier, institusjoner, hoteller osv.) vil være høyere enn i områder med lavere risikonivå".*
- *"Tilgjengelig brannstatistikk viser at et lite antall bygningsbranner starter i kabler, andelen kan være i størrelsesorden 1-2 % av alle bygningsbranner. De statistiske dataene er imidlertid svært sparsomme, og inneholder en stor grad av usikkerhet. Den grundigste analysen av bygningsbranner med elektrisk årsak i Norden var en studie av norsk brannstatistikk, men de statistiske dataene er ikke detaljerte nok til å gi en god status på hvordan kabler bidrar til brannstart og brannutvikling".*
- *"Rapportene fra branner der kabler var involvert viser at flere av disse brannene førte til store økonomiske og praktiske konsekvenser utover brannskadene, fordi viktige funksjoner som strømfordeling og datakommunikasjon ble påvirket. Betydelig røykproduksjon er også en felles faktor for disse brannene".*
- *"Dette prosjektet har vist at det finnes svært lite informasjon om hvordan elektriske kabler i bygg bidrar til brannsikkerheten. Det hadde derfor vært nyttig om informasjon om kabler i branner ble samlet i den nasjonale brannstatistikken. Vi mener imidlertid at dette kan være vanskelig å gjennomføre, og at usikkerheten knyttet til den innsamlede informasjonen vil være stor".*

Formuleringene i NEK 400:2022 sammenfaller i stor grad med anbefalingene som ble gitt til de Nordiske bygningsmyndighetene (jmf. Tabell 6) i SINTEF-rapport NBL A13111 i 2013. Disse anbefalingene var utelukkende basert på produktets brannegenskaper, det vil si kabelens reaksjon med brann etter at en brann hadde oppstått. Den termiske degraderingen av isolasjonsevnen til PVC ble ikke tatt i betraktning når anbefalingene ble utarbeidet. Både hovedforfatteren for SINTEF-rapporten og representanten for oppdragsgiveren (DiBK) har blitt kontaktet og begge har kunnet bekrefte dette. Gitt problematikken knyttet til den termiske dekomponeringen og dannelsen av forkullede spor i PVC er det mye som tyder på at elsikkerhets-aspektet også bør tas i betraktning når brannkravene for elektriske kabler skal defineres.

Gjeldende CPR-krav for elektriske kabler i Norden, Tyskland, England og Frankrike er gjengitt i Tabell 7. Denne tabellen peker mot at kravene i Norge ikke skiller seg vesentlig fra kravene i andre europeiske land. Det er verdt å merke seg at anbefalingen i Norge er D_{ca} – s2d2a2 for alle bruksområder, som i praksis betyr kabelisolasjonsmateriale uten halogener. Videre kan man merke seg at klassifiseringen E_{ca} tilfredsstiller minimumskravene i alle disse landene, noe som i praksis vil si at det finnes bruksområder der det er tillatt å benytte PVC-isolerte elektriske kabler.

Tabell 7: Oversikt over CPR-krav for elektriske kabler i Norden og utvalgte europeiske land. Informasjonen er hentet fra EuropaCable sine nettsider.

Land	Minimumskrav	Anbefaling	Bruksområde
Norge*	E _{ca} D _{ca} - s2d2a2	D _{ca} - s2d2a2	E _{ca} for alle bruksområder D _{ca} - s2d2a2 hvor det er påkrevd produkt med lav røyk- og syreutvikling
Sverige*	E _{ca} D _{ca} - s2d2 C _{ca} - s1d1		E _{ca} for bygg < 200 m ² og lager/industribygg < 500 m ² D _{ca} - s2d2 for øvrige bygninger C _{ca} - s1d1 for rømningsveier
Danmark	E _{ca} E _{ca} - d2		E _{ca} for el- og signalkabler iht. DS/EN 13501-6 E _{ca} - d2 for rør iht. DS/EN 13501-1
Finland	E _{ca} D _{ca} - s2d2a2 C _{ca} - s1d1a2		E _{ca} innendørs minimumskrav D _{ca} - s2d2a2 for offentlige bygg C _{ca} - s1d1a2 for rømningsveier og helsebygg
Tyskland	E _{ca} C _{ca} B2 _{ca}		E _{ca} for bygninger, høyde < 13 meter, areal < 400 m ² C _{ca} for andre type bygninger utenom fluktvei B2 _{ca} for fluktveier
England	E _{ca} D _{ca} - s2d2a1 C _{ca} - s1d2a1		E _{ca} for lavrisiko installasjoner D _{ca} - s2d2a1 for kabel i installasjoner med økt krav C _{ca} - s1d2a1 for kraftkabel i installasjoner med økt krav
Frankrike	E _{ca} C _{ca} - s1d1a1 B2 _{ca} - s1aa1		E _{ca} for installasjoner uten bestemte krav C _{ca} - s1d1a1 for boligbygg B2 _{ca} - s1aa1 for tunneler for offentlig transport

* Dersom kablene er beskyttet av et automatisk brannslukkeanlegg kan kabler som tilfredsstiller en klasse lavere benyttes.

5.2 Bruk av PVC-isolert installasjonskabel

I NEK 400 er det i kapittel 523 (Strømføringssevne) spesifisert at elektriske kabler i et lavspenningsanlegg har en begrensning som innebærer at strømmen som skal føres i en leder i langvarige perioder ved normal drift ikke skal overskride temperaturrensene spesifisert i Tabell 52A, som angir maksimal driftstemperatur for forskjellige isolasjonstyper [48]. For PVC-isolerte elektriske kabler er denne temperaturrense satt til 70°C. Tilsvarende grense for PEX- og etylen-propylen gummi-isolerte elektriske kabler er satt til 90°C. Det presiseres i Tabell 52A at når en leder opererer med en temperatur som overstiger 70°C skal en forsikre seg om at det utstyret som lederen er tilkoblet, er tilpasset den resulterende temperaturen som oppstår i klemmene. Det kan her legges til at mange norske hus bygges i tre med mye (termisk) isolasjon. Når kabler legges inne i en isolert vegg kan det ved feil installasjon kombinert med høy belastning være en risiko for at ledertemperaturen overstiger 70°C på grunn av redusert varmedissipasjon til omgivelsene, jmf. Tabell 3.

Det opplyses i NEK 400 at den maksimale tillatte ledertemperatur gitt i Tabell 52A er hentet fra NEK IEC 60502. Siste utgave av denne standarden er fra 2021 og har tittelen "*Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV)*". Det er tidligere blitt påpekt at standardene som gjelder for bruk av PVC-isolerte elektriske kabler baserer seg på forskning utført på PVC på 1950-tallet. I SINTEF-rapporten NBL A06121 skrives følgende relatert til dette [5]:

- "*Både UL og IEC-standarder grupperer elektriske isolasjonsmaterialer i temperaturklasser på grunnlag av 50 år gamle forskningsresultater [49]. Disse testene har vist seg at PVC kan bli klassifisert eller godkjent for bruk opp til 105°C*".

- *"Stricker 1974 [43] fant at betydelige mengder av mykningsmiddelet forsvant ved 71 - 77°C i løpet av en måneds eksponering på 20 - 50 år gamle varmekabler. Det ble konkludert med at ingen av kablene, som var klassifisert for 90 eller 105°C, burde anvendes ved temperaturer over 70°C".*
- *"Det faktum at glødende kontaktforbindelser er en meget aktuell årsak til brann i EU og USA, gjenspeiler seg også i standarder for godkjenning av plastmaterialer anvendt i elektrisk materiell og utstyr, nemlig standardene IEC60695 og UL94*
 - *Disse standardene simulerer en glødende metalltråd, med temperaturer i området 500 - 900°C, som skal berøre plastmaterialet i en viss periode. Dersom materialet ikke antenner eller selvslukker innen en viss periode er det godkjent.*
 - *Det påpekes at lysbuer kan være mer intense enn glødende kontakt, og at standarden dermed ikke fanger opp lysbuer som tennkilde".*

Dette tyder på at problematikken knyttet til termisk degradering av de dielektriske egenskapene for PVC-isolasjon er velkjent og tatt i betraktning når disse temperaturgrensene i Tabell 52A er blitt bestemt, selv om det ble gjort forskning på PVC på 1950-tallet som tilsynelatende overestimerte den termiske tåleevnen til isolasjonsmaterialet.

CPR-kravet for elektriske kabler i Norge spesifiserer altså at D_{ca}-s2d2a2 anbefales for alle bruksområder. Det oppfattes likevel som om PVC-isolerte elektriske kabler benyttes i stor utstrekning i Norge, noe som har blitt bekreftet av ulike aktører i elbransjen, representanter fra DiBK og flere normkomite-ledere i NEK. Forklaringen på hvorfor det er slik er ikke entydig, men det er blitt pekt på at de mekaniske egenskapene til PVC gjør den enkel og forutsigbar å håndtere/montere og at både installasjonspraksis og arbeidsprosedyrer er veletablerte og nærmest å anse som en innarbeidet vane. Om man går over til et annet produkt, f.eks. en kabel med PEX-isolasjon, kan det bli behov for å endre prosedyrer, noe som kan medføre en økt kostnad og muligens økt risiko i form av at løsninger som ikke er velutprøvde kan bli tatt i bruk. I denne sammenheng er det blitt antydnet at det er et forholdsvis stort prispress i bygningsbransjen og at det til en viss grad råder en form for aversjon mot tiltak som er kan være fordyrende.

Gjennom samtaler med aktører i elbransjen har det kommet frem at bruk av kabler som tilfredsstillende klasse D_{ca} er forholdsvis utbredt i Sverige, selv om regelverket åpner for bruk av kabler som tilfredsstillende klasse E_{ca} i bygninger under et gitt areal, mens det i Danmark i stor utstrekning benyttes halogenfrie kabler i E_{ca}-klassen, uten at isolasjonsmaterialet nødvendigvis er PEX. Det kan fremstå som at miljømessige hensyn her spiller en ikke ubetydelig rolle, da halogenfrie produkter ofte fremstilles (i markedsføringen) som "miljøriktige", noe som kan være avgjørende for miljøbevisste kunder. Det er uklart om elsikkerhetshensyn også spiller inn. Basert på dette kan det stilles spørsmål om miljøbevisstheten er mindre i Norge sammenlignet med Sverige og Danmark. I en kronikk skrevet av styrelederen for Forum for gulvbransjen i forbindelse med at PVC-gulv ble valgt for nye Stavanger universitetssykehus presiseres det at *"Region Stockholm har besluttet å fase ut produkter som inneholder PVC og bestemt at bruk av gulvmaterialer der PVC inngår, skal avviksmeldes i prosjekter. Eiendomsselskapet Locum, som bygger, eier og forvalter regionens sykehusbygg og helsebygg, anbefaler at det brukes andre alternativer der det er mulig"* [50].

Miljøaspektene ved PVC-bruk er det derfor verdt å kommentere på. Klor er en sterk oksidant, noe som betyr at den lett reagerer med organiske molekyler for å produsere en rekke klorerte forbindelser. Mange av disse kjemikaliene akkumuleres i økosystemet, inkludert fisk, dyreliv og mennesker, og er giftige ved relativt lave doser [51]. Selv om PVC er termoplastisk og derfor potensielt velegnet til resirkulering, spiller totaliteten av tilsatte stabilisatorer, myknere og andre farlige stoffer (deriblant ftalater) under produksjonen en rolle for materialets egnethet for resirkulering ved slutten av levetiden. For vellykket resirkulering må PVC-produkter "super-separeres" etter produkttype for å hindre at de heller går til forbrenning eller deponi [51]. En fersk studie knyttet til komparativ

Tabell 8: Analyse av alternativer til PVC kabelisolasjonsmateriale [53].

Alternativer vurdert	Teknisk gjennomførbar	Økonomisk gjennomførbar	Sammenlignbar fare og risiko	Tilgjengelighet	Usikkerhet og kvalitet på informasjon
PE, CPE, PP, PUR, TPE, mPPE, FEP, ETFE, PTFE, PFA, PEX, CP, EPDM, EVA, silikon-gummi	Plast eller syntetisk gummi-alternativer er tilgjengelige og i bruk, men hvert alternativ presterer ulikt.	Materialkostnadene varierer: Noen alternativer er sammenlignbare mens andre er betydelig mer kostbare. Kostnader reflekterer dette, selv om reelle prisforskjeller sannsynligvis vil være lavere.	Noen alternativer er fluor-polyméerer og kan bli påvirket av pågående reguleringstiltak, andre alternativ inneholder skadelige stoffer som gjør resirkulering utfordrende. Tilsetningsstoffer vil mest sannsynlig fortsatt kreves i mange tilfeller.	Alternativer er tilgjengelig. Økning i produksjon og/eller importvolumer kan være nødvendig	Mangel på pålitelig informasjon om økonomi og kostnad for hvert alternativ, og det er erkjent at spesifikke ytelseskrav varierer signifikant innenfor sektoren.

En av innvendingene mot total utfasing av PVC har vært at det finnes produkter med PVC-innhold på markedet som ikke har fullverdige substitutter. Blant annet innen helsesektoren viser det seg at medisinsk-grad PVC har en rekke fordelaktige egenskaper, inkludert biokompatibilitet, steriliseringsevne, fleksibilitet, gjennomsiktighet, materialstyrke, og lav kostnad, samt at det er velutprøvd gjennom mange tiår. Innen medisinsk teknologi har kritikken derfor i stor grad vært rettet mot frigjøring av myknerstoffene i PVC-materialet, særlig ftalatene di-2-etylheksyl og dioctyl, som utviser reproduktive toksiske egenskaper. Ftalat-frie myknere har derfor blitt utviklet for å redusere risikoen vesentlig. Det jobbes aktivt i denne bransjen med å finne gode substituttmaterialer for medisinsk-grad PVC. For elektriske kabler for lavspenningsanlegg vil det typisk ikke være lignende innvendinger for substitutt av PVC-basert isolasjonsmateriale. Fra en kabelprodusent som er blitt kontaktet i dette prosjektet har det blitt opplyst at substituttmaterialer finnes i stor grad og at det for denne type kabler (for installasjon i lavspenningsanlegg) er fullt mulig å erstatte PVC både som isolasjonsmateriale og ytter-kappe. Det kan dog være som det antydes i Tabell 8 at det er spesialanvendelser, for eksempel innen elektronikk, der substituttmaterialene vil bringe med seg en fare og risiko som er sammenlignbar med PVC.

Når det kommer til kostnad for en PVC-isolert elektrisk kabel sammenlignet med en ekvivalent PEX-isolert elektrisk kabel så kommer det frem at verken produksjonskostnad eller salgspris er vesentlig forskjellig [53]. I dialog med en kabelprodusent har det blitt opplyst at prisen for en elektrisk kabel generelt vil avhenge av produksjonsvolum og etterspørsel, i tillegg til selve materialkostnadene, der metallet i ledere er den største kostdriveren. Prisen vil også påvirkes av energiforbruk, materialforbruk, linjehastigheter, og batch-størrelse. En sammenligning av to relativt like kabler (likt ledertverrsnitt, begge med ytre kappe i PVC) fra denne produsenten viser at kabelen med PEX-isolerte ledere kommer prismessig gunstig ut sammenlignet med varianten med PVC-isolerte ledere. Den forenklete forklaringen på dette er at kabelen med PEX-isolasjon har et slankere design, dvs. mindre bruk av plast driver kostnaden ned. En tilsvarende sammenligning mellom en PFSP-kabel (E_{ca} -klassifisert) og en IFSI-kabel (halogenfri, D_{ca} -klassifisert) viser at kostpris vil være relativ lik. I enkelte tilfeller kan en IFSI-kabel være rimeligere enn en PFSP-kabel, men som oftest vil den være litt dyrere. Tradisjonelt har PFSP-kabler vært mer tilgjengelig i Norge.

Tabell 9 presenterer avslutningsvis en sammenligning av relevante egenskaper for elektriske kabler med utvalgte isolasjonsmaterialer [53]. Det fremkommer av tabellen at PVC og PEX har

sammenlignbare egenskaper i alle de vurderte kategoriene. Tar man i tillegg i betraktning termisk stabilitet og det miljømessige aspektet fremstår det som om PEX utkonkurrerer PVC som kabelisolasjonsmateriale.

Tabell 9: Sammenligning av egenskaper for elektriske kabler med ulike isolasjonsmaterialer [53].

Isolasjons-material	Temperatur-bruksområde (°C)	Dielektrisk styrke (kV/mm)	Brann-motstand	Kjemisk motstand	Fleksibilitet	Holdbarhet	Kostnad (€/m)*
PVC	-20 – 105	25	God	God	God	God	0,4 – 1,7
PEX	-40 – 105	50	God	God	God	God	0,4 – 1,3
Polyetylen	-60 – 80	25	Dårlig	Dårlig	God	God	0,84
Polypropylen	-40 – 105	20	Dårlig	God	God	Brukbar	-
Polyuretan	-55 – 80	20	Dårlig	God	God	God	-
PTFE	-60 – 200	20	God	God	God	God	1,3 – 3,4
EPDM	-55 – 125	25	Dårlig	Dårlig	God	God	1,25
Silikongummi	-80 – 180	20	God	Brukbar	God	Brukbar	1,1 – 3,0

* Utsalgspris for 1 meter 0,75 mm² (18 AWG) kabel.

5.3 Seriefeilforløp for en PVC-isolert kabel

Under normale omstendigheter vil en PVC-isolert elektrisk kabel fungere godt og ha en lang levetid i et elektrisk lavspenningsanlegg. Men blir en slik kabel utsatt for varme kan risikoen øke betraktelig for at isolasjonsmaterialet svikter og at en farlig situasjon oppstår. Som påpekt i innledningen av kapittel 3 kan en seriefeil (kontaktsvikt) føre til dissipasjon av elektrisk energi med påfølgende varmeutvikling og lokal oppvarming (også kalt motstandsoppvarming). For en PVC-isolert elektrisk kabel vil termisk dekomponering og dannelse av forkullede spor kunne inntreffe ved relativt lave temperaturer; langt lavere temperaturer enn antennespunktet til både isolasjonsmaterialet og et omkringliggende brennbart materiale. For eksempel, i en kabelkonstruksjon med flere strømførende ledere vil krypstrømmer i forkullede spor kunne legge til rette for at stabile (stående) lysbuer kan oppstå i isolasjonsmaterialet mellom lederne. I en NTNU-masteroppgave som omhandler seriefeilvern ble følgende sammenhenger fremlagt for denne type lysbuedannelse [6]:

- *"En lysbue gjennom en karbonisert vei mellom to kabler gir en mer realistisk feilsituasjon enn lysbuegeneratoren. Den representerer den type serielysbue som av Martel blir ansett for å være den mest skadelige [2]"*.
- *"Shea viste at en serielysbue over en karbonisert vei kan starte en brann ved strømmer så lave som 1,7 A_{rms} [29]. Shea poengterer også at det trolig er mulig å starte en brann ved enda lavere strømmer, men dette ble ikke bevist"*.

Martel legger i sin doktorgradsavhandling frem følgende sammenhenger for stabile lysbuer i karboniserte spor (oversatt) [2]:

- *"De termiske egenskapene til et isolasjonsmateriale har en betydelig innflytelse på initiering av stabile serielysbuer. En grunn som ofte ble nevnt er forkullingen av polyméren som resulterer i et ledende spor der lysbuen kan re-antennes etter hver nullgjennomgang for strømmen"*.
- *"PVC-baserte polyméer har stor sannsynlighet for antenning som er direkte relatert til initiering av en stabil lysbue. Mengden energi som trengs for å oppnå en stabil lysbue ligger i området 10 J til 1000 J"*.
- *"De polyetylen-baserte polymérene antennes ikke fordi det ikke er mulig under disse forholdene å initiere en stabil lysbue. For noen få ekstra tester ble varigheten utvidet til 5 minutter i stedet for 200 sekunder. Ingen stabil lysbue og ingen tenning kunne observeres"*.
- *"Bevisene fra undersøkelsene viser en klar sammenheng mellom dekomponering og forkulling av polymérene og initiering av stabile serielysbuer som kan føre til antenning av"*

isolasjonsmaterialet. Det ble observert at alifatisk polyméer som polyetylen og andre halogenfrie polyméer ikke lett forkulles. PVC er derimot kjent for å danne lysbuer i forkullede spor. Alle testede polyméer vil kunne brenne, men bare PVC og polypropylen-baserte polyméer var i stand til å produsere et forkullet spor under termisk stress fremkalt av elektriske feil og uregelmessigheter som glødende kontaktforbindelser og lysbuer. Dette forkullede sporet kan initiere en veldig stabil lysbue som har en høyere effekttetthet enn andre feil og raskt kan antenne brennbare materialer. Polyetylen-baserte og halogenfrie polyméer forkulles i motsetning ikke lett og ser ut til å være veldig lysbuebestandige".

- "Den kontaktfrie serielysbuen som skyldes forkullede spor kan identifiseres som den farligste formen for serielysbue: Den kan være et resultat av mange andre fenomener, som glødende kontaktforbindelse og kontaktskybue, bli selvdrevet og spre en betydelig mengde varme. De andre typer lysbuer har ikke samme evne til å være selvopprettholdende og spre mye varme".
- "En serielysbue i en kontakt dissiperer mye mindre effekt enn en serielysbue i et forkullet spor fordi den er mindre stabil og lysbuespenningen er lavere".

Det er blitt publisert veldig få studier der PVC- og PEX-isolerte elektriske kabler sin motstandsdyktighet mot en seriefeil har blitt systematisk testet. I sitt doktorgradsarbeid har Martel analysert motstandsevne mot serielysbue og gløding for PVC- og PEX-isolerte elektriske kabler, og de viktigste funnene er oppsummert i Tabell 10 [2]. Her kommer det frem at den PEX-isolerte kabelen yter vesentlig bedre enn den PVC-isolerte kabelen i alle kategorier. Lavt massetap er synonymt med lav grad av termisk dekomponering, mens stor askeproduksjon under forbrenning betyr god beskyttelse mot brenning, da asken som er igjen er materialer som ikke fordampes, noe som begrenser konsentrasjonen av brannfarlige gasser [2]. Det nevnes ofte at hovedårsakene til den høye flammemotstanden til PVC-baserte materialer er den høye konsentrasjonen av halogener og tendensen til å forkulle. Derimot viser undersøkelsene til Martel at PVC av samme grunn kan muliggjøre stabile serielysbuer og antennelse [2].

Tabell 10: Motstandsevne for PVC- og PEX-isolerte elektriske kabler mot serielysbue og gløding [2].

Test	Egenskap / karakteristikk	PVC (70°C)	PVC (105°C)	PEX (125°C)
Serielysbue ved 230 V AC, 5 A last	Antennessannsynlighet	90 %	100 %	0 %
	Tid for å danne stabil lysbue	7,5 s	13,6 s	-*
Serielysbue ved 230 V DC, 4 A last	Antennessannsynlighet	100 %	100 %	60 %
	Massetap per energienhet	176 µg/J	149 µg/J	71 µg/J
	Proporsjon askedannelse	13 %	8 %	27 %
Gløding ved 230 V AC	Synlig endring	Smelting og røykdannelse	Smelting og røykdannelse	Ingen skade
	Antennelse	Små flammer ved lysbue	Små flammer ved lysbue	Ingen

*Stabil lysbue ble ikke dannet

Konklusjonen er at en PEX-isolert kabel er vesentlig mer motstandsdyktig mot en seriefeil sammenlignet med en PVC-isolert kabel. Dette påpekes også i en SINTEF-rapport fra 2007 der det skrives at isolasjonsmaterialer varierer mye med hensyn til tilbøyelighet til å danne forkullede spor. Kabler er ofte isolert med PVC. Uheldigvis er PVC et av de minst tilfredsstillende plastmaterialer med hensyn til å motstå dannelsen av forkullede spor og kryptstrømmer [5]. Disse funnene sammenfaller med påstander som tidligere er blitt lagt frem for å forklare utviklingen av en seriefeil for tilfeller der det er benyttet PVC isolasjonsmateriale (oversatt) [19]:

- "Dette arbeidet viser hvordan glødende kontakter og overflatelystbuer kan dekomponere PVC-isolasjon og danne antennelige gasser, og at det er mulig for den påfølgende serielysbuen å antenne og brenne isolasjon. To forhold er identifisert som kan skape en overopphetet forbindelse - en glødende kontakt og/eller sammenbrudd over en forkullet isolasjonsoverflate.

- Det er vist at glødende kontakter og lysbuedannelse i forkullede spor er to former for overoppheting, forårsaket av seriefeil, som potensielt kan starte en brann".*
- *"Kontinuerlige utbrudd av antente gasser kan dannes fra overopphet PVC-isolasjon forårsaket av glødende kontakter med påfølgende serielysbue, eller overflatesammenbrudd med påfølgende serielysbue".*
 - *"En serielysbue, selv ved lav strømlast (< 20 A_{rms}), kan resultere i et plasma som er varmt nok til å forkulle isolasjon som i nærheten av lysbuen. Denne forkullingen kan deponeres på kobbertråden, noe som gjør den til en god termionisk emitter. Forkulling på innsiden av isolatoroverflaten, mellom de to lederne kan også forekomme. En forkullet spor mellom de forurensede lederne kan resultere i periodevis lysbuedannelse i sprekker dannet i forkullingen på isolasjonsoverflaten eller direkte over de forurensede lederne. Karbon på ledningen, oppvarmet av en lysbue opprinnelig dannet fra mekanisk kontakt mellom de to lederne, fortsetter å danne lysbue på grunn av karbonets termioniske emisjonsegenskaper".*
 - *"Den overopphetede PVC-isolasjonen kan dekomponere og produsere antennelige gasser. Disse gassene kan antennes med hver halvsyklus av påfølgende lysbue helt til drivstoffkilden fjernes eller er brukt opp. Overraskende nok ble branner, på grunn av antenning av utviklede gasser, startet med strømmer så lave som 0,9 A_{rms}".*

Det har også vært påpekt i flere studier at PVC-isolasjon med CaCO₃-fyllmasse har en helt unik feilmodus i den forstand at PVC er det eneste materialet som har en tilbøyelighet til å feile som følge av våt spordannelse i ellers tørre omgivelser, siden materialet kan skape sitt eget lag med fuktighet. Det har blitt påvist at våt spordannelse kan inntreffe ved beskjedent forhøyede temperaturer (rundt 110°C) under tørre forhold [17][54][55], noe som er mildt sagt oppsiktsvekkende. Standardiserte tester av PVC har antydnet at materialet har god evne til å motstå våt spordannelse. Men dessverre har forskningsstudier vist at de gode resultatene for motstand mot våt spordannelse er en konsekvens av måten IEC 60112-testen utføres på, og ikke en indikator på faktisk ytelse [17].

En NTNU-masteroppgave fra 2000 undersøkte om PVC-isolert installasjonskabel kan være skyld i en del av tilfellene der man får varmgang i installasjonsmateriell [56]. Langtidsmålinger ble utført for å undersøke om migrering av mykner og klor fra PVC-isolasjonen kunne føre til økt overgangsmotstand i tilkoblinger med påfølgende temperaturøkning. I et tilfelle ble det funnet tegn på økt temperatur grunnet migrering fra isolasjonen samtidig som det ble funnet korrosjon på lederen og rester av mykner på komponenten. Videre ble det funnet at dersom PVC-isolasjonen tidligere hadde blitt utsatt for temperaturer opp mot 70°C eller mer, var terskelen for den samme nedbrytningen og migreringen av klor lavere enn før temperaturøkningen. Det ble observert at slik migrering kunne skje allerede ved 64°C dersom kabelen tidligere har vært utsatt for en temperatur høyere enn 70°C [56].

Basert på sammenhengene presentert over fremstår det som at PVC isolasjonsmateriale nærmest fungerer som en katalysator for utviklingen av en seriefeil for en elektrisk kabel. Dette er forsøkt illustrert i Figur 12, der seriefeilforløpet for en PVC- og PEX-isolert elektrisk kabel er sammenlignet. Når en seriefeil oppstår for en PVC-isolert elektrisk kabel vil den termiske dekomponeringen av polymérmaterialet promotere en gjentagende og progressiv prosess, der dissipasjonen av elektrisk energi og temperaturen fortsetter å øke helt til en situasjon med farlig lysbuedannelse oppstår, med et potensielt branttilløp som utfall. Til sammenligning vil en PEX-isolert elektrisk kabel ikke kunne dekomponere i tilsvarende grad ved forhøyede temperaturer [41], noe som innebærer at seriefeilens forløp avbrytes eller bremses vesentlig opp slik at en isolasjonssvikt ikke inntreffer. Forløpet vil muligens ende opp i en tilstand med termisk likevekt, der den termiske energien som avgis til omgivelsene tilsvarer den elektriske energien dissipert i feilstedet. Videre forskning innenfor denne tematikken burde rettes mot å underbygge og utvide studien presentert i Tabell 10, med målsetning om å undersøke teorien presentert i Figur 12.



Figur 12: Seriefeilforløp for en PVC- og PEX-isolert elektrisk kabel. Forløpet avbrytes, og branntilløpet vil kunne forhindres i tilfellet for PEX.

5.4 Kabelbranner forårsaket av isolasjonsmaterialet

5.4.1 Statistisk forekomst

Det har vært en markant nedgang i antall omkomne i brann siden DSB startet registreringene av omkomne i brann i 1979. I denne perioden har over 80 % av alle de omkomne i brann omkommet i boligbrann. Eldre pleietrengende, personer med nedsatt funksjonsevne og rusavhengige er utsatte grupper. Personer over 70 år har for eksempel fire til fem ganger høyere risiko for å omkomme i brann sammenlignet med resten av befolkningen. I 5-årsperioden fra 2016 til 2020 omkom i snitt 38 personer årlig i brann. Av 510 dødsbranner i perioden 2005 - 2014 ble elektrisk årsak registrert som brannårsak i 11 % av tilfellene [38]. Tilsvarende ble det i perioden 2001 - 2003 rapportert en andel på 9 % (elektrisk årsak) av 185 dødsbranner [16]. Dette innebærer at rundt 3 - 4 personer antas å omkomme årlig i branner med elektrisk årsak. Hvis man antar at rundt 1/3 av branner med elektrisk årsak er forårsaket av lysbuedannelse, så antyder dette at det i Norge årlig kan omkomme 1 - 2 personer i brann forårsaket av lysbuedannelse. I 2018 ble det registrert ca. 5 000 bygningsbranner der rundt 20 % av disse brannene er registrert med elektrisk årsak. Antar man at rundt 1/3 av disse rundt 1 000 brannene med elektrisk årsak er forårsaket av lysbuedannelse, så antyder dette at lysbuedannelse årlig forårsaker noen hundre bygningsbranner i Norge [10].

DSB sin brannstatistikk antyder at både seriefeil (serielysbue) og elektriske kabler utgjør en vesentlig brannrisiko i norske bygninger, i den forstand at lysbuedannelse forårsaker noen hundre bygningsbranner årlig, mens ledninger og kabler forårsaker i gjennomsnitt rundt 21 branner i året [6]. Det har tidligere blitt påpekt svakheter ved brannstatistikken i Norge, blant annet er den preget av en høy grad av underrapportering (ikke rapportert brannårsak) og feilrapportering (rapportert, men ukjent brannårsak). Videre blir en brannårsaksrapport fra politiet mottatt for kun omkring 67 % av bygningsbrannene der brannvesenet har rykket ut (tall fra 2022). Dersom de resterende 33 % er skjævfordelt, så vil dette kunne være en vesentlig feilkilde. Mindre enn halvparten av boligbranner har historisk sett blitt registrert med en årsakskategori, noe som tyder på at det veldig ofte ikke er trivielt å finne brannårsaken, kanskje særlig i tilfellene der elektrisk energi er identifisert som tennkilden. I tillegg kan faktorer som manglende ressurser og kompetanse hos instansene som har ansvar for etterforskning og rapportering av sakene spille inn [10]. DSB skriver selv i en rapport fra 2010 [57], som omhandler statistikk for omkomne i brann i perioden 1986-2009, at "det har i hele perioden vært et problem at brannårsakskoden «Ukjent» har utgjort en svært høy andel, rundt 20 %. For å forsøke å bedre på dette forholdet har man i de senere år i deler av landet prøvd ut sammensatte etterforskningsteam, bestående av representanter fra politi, brannvesen og Det Lokale Etilsyn (DLE).

På sikt håper man at dette vil øke kompetansen innen brannetterforskning, og således bringe brannårsaksstatistikken til et høyere nivå".

Norske husholdninger har tradisjonelt i stor grad benyttet elektrisk varmeavgivende utstyr, noe som ofte kan medføre vedvarende høy belastning i forbrukerkurser. En seriefeil vil derfor ha potensiale til å resultere i en stor effektutvikling, noe som kan medføre en økt brannfare i Norge sammenlignet med andre land [14]. Ved sammenligning av norsk brannstatistikk med tilsvarende brannstatistikker for andre nordiske land har det blitt gjort noen funn som kan oppsummeres med det følgende [21]:

- Det omkommer ikke flere i brann i Norge sammenlignet med de andre nordiske landene. Gjennomsnittlig antall omkomne pr. år pr. 100000 innbygger i årene 1999 - 2003 var 1,3 for Norge, 1,4 for Sverige, 1,5 for Danmark og 1,7 for Finland.
- Det er ikke større brannhyppighet i Norge sammenlignet med de andre nordiske landene. Gjennomsnittlig antall brannutrykninger pr. år pr. 1000 innbygger i årene 2000 - 2004 var 2,7 for Norge, 2,9 for Sverige, 3,2 for Danmark og 2,5 for Finland.
- Elektrisk årsak er en mindre hyppig registrert årsak til dødsbranner i Sverige (3 %) sammenlignet med Norge (9 %), Finland (9%) og Danmark (12 %).
- Norge har en forholdsvis høy andel av registrerte boligbranner med elektrisk årsak (20 %) sammenlignet med Sverige (8 %) og Danmark (13 %).

Basert på disse funnene ser det ikke ut til at det er særskilt høy brannrisiko i Norge, men det kan se ut til at registrerte boligbranner i Norge oftere har elektrisk årsak sammenlignet med de andre nordiske landene. Som en mulig forklaring på dette nevnes det i studien at elektrisitet er mindre vanlig som oppvarmingskilde i Sverige, samt at en større andel av befolkningen i Sverige bor i blokker og leiegårder der kontroll med elektrisk anlegg kan være bedre enn den er for andre type bygninger [21]. Det er likevel verdt å merke seg at andelen registrerte branner med elektrisk årsak i Norge ikke skiller seg vesentlig fra andelen registrert i EU eller Storbritannia, jmfør Tabell 1.

I en SINTEF-rapport fra 2012 som omhandler brannrisiko for elektriske kabler fremkommer følgende sammenhenger knyttet til kabelbrann og serielysbuer [24]:

- *"Analyse av norsk brannstatistikk viser at antall branner med årsak i elektrisk installasjonsmateriell har hatt en økende tendens. I 2009 startet 150 boligbranner i elektrisk installasjonsmateriell, og dette utgjorde 4,5 % av alle boligbranner dette året. Branner som startet i kabler utgjør en stor andel av disse brannene. Serielysbue er den vanligste registrerte brannårsaken ved brannstart i kabler og installasjonsmateriell".*
- *"Ifølge en studie av om lag 19 000 branner knyttet til elektriske installasjoner i USA, oppsto over 40 % i ledningsnett (ikke nærmere spesifisert). Om lag 20 % oppsto i stikkontakter, og 18 % i forgreiningsledninger".*
- *"Fra en analyse av 105 branner med elektrisk årsak i USA, går det frem at kabler og ledninger var involvert i brannstart i over en tredel av brannene".*
- *"De viktigste elektriske brannårsakene er lysbue, motstandsoppvarming og eksponering for ytre varmekilder. Noen eksempler på branner der kabler har spilt en viktig rolle er presentert i rapporten. Noen av disse brannene har hatt store konsekvenser med hensyn til personskader, materielle skader eller skader på infrastruktur".*

Dette siste punktet er også blitt belyst av Martel, som påpeker følgende sammenhenger for alvorligheten til bygningsbranner med elektrisk årsak (oversatt) [2]:

- *"International Cable makers Federation (ICF) rapporterte at 13-20 % av alle branner i Europa var forårsaket av elektrisitet. Disse brannene ser ut til å være spesielt dødelige fordi de utgjorde 20 % til 30 % av dødsfall (3 250 per år) og skader fra alle boligbranner".*

- *“Statistikken fra Consumer Product Safety Commission (CPSC) i USA er enda mer slående. Det relativt lille antallet (5 %) av alle boligbranner forårsaket av feil på elektrisk fordelingsanlegg medfører 28 % av dødsfallene”.*
- *“I gjennomsnitt går ett liv tapt i hver 69 brann som startes i elektriske distribusjonsanlegg. Hvis brannene skyldes andre årsaker, går ett liv tapt i hver 566 brann. Branner forårsaket av feil i elektriske fordelingsanlegg er åtte ganger mer dødelige enn andre branner”.*
- *“Økonomiske hensyn gir et lignende resultat: En brann med elektrisk årsak har en kostnader på gjennomsnittlig \$ 35 500 sammenlignet med enhver annen brann som har en gjennomsnittlig kostnad på \$ 5 300”.*
- *“US Fire Administration rapporterte at branner med elektrisk årsak er to ganger mer dødelige og koster 2,5 ganger mer penger enn branner med ikke-elektrisk årsak”.*
- *“En av grunnene som er nevnt for å forklare dette resultatet er vanskeligheten med å oppdage denne typen brann og større sjanse for å bli overrasket av brann om natten”.*

Det siste momentet underbygges av brannstatistikk fra USA i perioden 1980 - 1981 som viste at 42 % av boligbranner med elektrisk årsak starter i skjulte, innelukkede områder eller vanligvis tomme, ikke-okkuperte rom, mens 17 % av brannene hadde arnested på soverommet. Verdt å merke seg er at statistikken også viste at hoveddelen (73 %) av brannene i innelukkede områder oppstod i kabler og stikkontakter [5]. Elektriske feil i skjulte/innelukkede områder kan i mange tilfeller utvikle seg relativt lenge før brannen blir oppdaget, enten av beboere eller røykvarsler. Røyk kan innledningsvis spres inne i vegg- og takkonstruksjoner, og forårsake skjult brannspredning i disse områdene. Dette kan resultere i en forsinket oppdagelse av brannen og den kan derfor være mer intens sammenlignet med en åpen brann [5].

5.4.2 Etterforskede branner

Flere konkrete branneretterforskningssaker relatert til isolasjonssvikt i elektriske kabler blitt studert nærmere i dette prosjektet. Dokumenter har enten vært offentlig tilgjengelige (via internett) eller vært gjort tilgjengelig etter at søknad om innsyn har blitt innvilget. Det er blitt funnet flere eksempler på kabelbranner forårsaket av isolasjonssvikt, der kabelen oppgis å ha PVC-isolerte ledere. En fellesnevner for disse sakene er at det har pågått en termisk degradering og forkulling av lederisolatoren som etter en tid har medført isolasjonssvikt (krypstrømmer). Videre forløp har vært gløding og/eller lysbuedannelse i de forkullede sporene i isolasjonsmaterialet og antennelse av en brann, uten at kursens automatsikring har reagert.

I det følgende gjengis konklusjoner og sammenhenger fra offentlig tilgjengelige dokumenter for tre branner med store konsekvenser, der lederisolasjonen i en elektrisk kabel kan ha vært av betydning for brannen i en innledende fase.

Sak 1: Brann som følge av jordfeil i en ledning nær en kompressor:

Den 21. november 1980 brant det i MGM Grand Hotel i Las Vegas, USA. 85 personer omkom i brannen, mens over 700 personer ble skadd. Gjenoppbyggingsarbeidet etter brannen tok 8 måneder og kostet \$50 millioner. I tillegg ble det et søksmålsoppgjør på totalt \$140 millioner. Dette er den nest største hotellbrannen i fastlands-USA i moderne tid. Branneretterforskningen ble utført av Clark County Fire Department, National Fire Protection Association (NFPA), U. S. Fire Administration og National Bureau of Standards, og rapporter fra etterforskningen er gjort offentlig tilgjengelig. Følgende sammenhenger om brannen ble lagt frem i rapportene (oversatt) [58][59]:

- *“Omtrent kl. 07:10 oppdaget en ansatt en brann i en servicestasjon i restauranten kalt "The Deli" på den østre enden av kasinoet”.*

- *Clark County Fire Department fastslo at den mest sannsynlige brannkilden var av elektrisk natur. Antennelsen skjedde inne i et brennbart skjult rom ved siden av en kjøledisk langs sørveggen i The Deli".*
- *"Brannetterforskernes oppfatning er at det ikke er noen tvil om at en jordfeil oppstod".*
- *"Eksponering for en **varm atmosfære forårsaket at isolasjonen rundt kobberlederne løsnet og forringet slik at bart kopper ble eksponert**. Kortslutning inntraff i de eksponerte kobberlederne".*

En uheldig plassering av tilførselskabelen (4 mm², som var ettermontert og ikke en del av den opprinnelige faste installasjon i bygget) til kompressoren i kjøledisken gjorde at lederisolasjonen ble utsatt for en varig forhøyet temperatur, og etter 6 år i bruk oppstod mest sannsynlig en isolasjonssvikt på grunn av en gradvis termisk dekomponering av isolasjonsmaterialet. De to tilførselslederne til kjøledisken var tredd gjennom et korrugert rør i aluminium, som på et punkt 1 m over gulvnivå var i fysisk kontakt med et kobberrør som fraktet kjølemedium fra kompressoren til kjøledisken. I dette punktet kan det ha oppstått galvanisk aktivitet som har skapt et hull i det korrugerte røret og eksponert lederisolasjonen for varm luft fra kompressoren. Varmedissipasjonen fra kompressorens kondensatorspole ble i rapporten oppgitt til å være i temperaturområdet 49 – 82°C. Kompressoren var konstant aktiv bortsett fra i en avisingsyklus som varte 15 minutter en gang i døgnet. Mangelfull konveksjon av oppvarmet luft rundt kompressoren medvirket til å skape forhøyede temperaturer i det skjulte rommet som tilførselsledningen var lagt inne i [58]. Det er oppgitt i rapporten at kabelisolasjonsmaterialet var ukjent, men det presiseres samtidig i rapporten at en 2,5 mm² leder med TW-type isolasjon (PVC) ikke skal overstige 60°C ved normal operasjon [58]. Det er stor sannsynlighet for at tilførselskabelen var PVC-isolert. Det korrugerte røret i aluminium var designet for å være en leder til jord, dvs. det var ikke noe separat jordleder tredd gjennom røret. Dessverre var dette aluminiumsrøret utilstrekkelig koblet til jord ved koblingsboksen, dvs. det var en relativt høy impedans til jord. Når kobberlederen kom i kontakt med det korrugerte aluminiumsrøret ble dette røret en del av den spenningspåsatte kretsen med det resultat at røret raskt ble glødende varmt og antente omkringliggende materialer [58].

Sak 2: Brann som følge av en lysbue i en ledning nær et lampepunkt:

Den 5. september 1986 brant det i Hotel Caledonien i Kristiansand. 14 personer omkom i brannen, mens 54 personer ble skadd. De totale forsikringsutbetalingene etter brannen var på 366 millioner 2010-kroner [60]. Det ble i januar 1987 publisert en 125-siders rapport om brannen, utarbeidet i felleskap av Direktoratet for brann- og eksplosjonsvern (nå DSB) og Statens bygningstekniske etat (nå DiBK). Følgende sammenhenger om brannen ble lagt frem i rapporten [61] (sitat):

- *"Brannen ble varslet kl. 04:40. Den ene nattportieren mente at han hadde kjent røyklukt da han ryddet bordene ved Balustraden ca. kl. 04:30".*
- *"Den etterforskning Kriminalpolitisen (nå Kripos) har foretatt med hensyn til brannårsaken konkluderer med at alt tyder på at brannen oppstod som følge av en elektrisk feil i en lampe i himlingen over atkomst døren til restaurant Veteranen i underetasjen".*
- *"Det var montert 2 like lamper i himlingen. Montasjen fant sted i 1973".*
- *"Man mener at den direkte brannårsak var en elektrisk lysbue. **Lysbuen oppstod i forbindelse med den interne ledningsføringen i armaturen, enten ved brudd i en av lederne eller på grunn av dårlig kontakt ved lederens kopling til lampeholderen**. Lysbuen hadde utvilsomt tilstrekkelig høy temperatur til å avbrenne brennbart materiale i nærheten. Trolig startet brannen som en ulmebrann. Bruddet eller den dårlige kontakten kan ha oppstått som følge av stadige vibrasjoner i himlingen når døren mot restaurant Veteranen ble åpnet og lukket".*
- *"Mellom himlingen som lampen var festet i og betongdekket var det et hulrom. Ulmebrannen, som pågikk over noe tid, utviklet branngasser som fylte hulrommet. Etter en tid oppstod det en lokal overtenning i hulrommet og åpen flammibrann var et faktum".*

- *"Oppunder himlingen var det store mengder elektriske kabler med plastisolasjon. Plastisolasjonen på kablene bestod i stor grad av PVC og bidro utvilsomt sterkt til røykutviklingen, og også til dannelsen av saltsyredamp".*
- *"Det ble konstatert at sikringene for den kurs hvor lampene i nedgangen til restaurant Veteranen var tilkopleet hadde utløst under brannen".*
- *"Alt tyder på at brannen oppsto som følge av en lysbue i en ledning nær et lampepunkt i underetasjen".*

Den aktuelle lampen (glødelampearmaturen) og den identiske nabolampen ble undersøkt av NEMKO (Norges Elektriske Materiellkontroll) hos Kripos kort tid etter brannen. Følgende sammenhenger ble lagt frem i rapporten, datert 25. september 1986 (sitat) [62]:

- *"Restene av glødelampearmaturene for innfelling, samt funn som antas å ha forbindelse med disse er undersøkt ved besøk på Kripos".*
- *"Armaturene var festet i himlingen med tre skruer og tilkoblingen hadde skjedd over bevegelig ledning og plugg til jordet stikkontakt montert i boks for skjult anlegg festet i taket over armaturene".*
- *"Armaturene er av fabrikat Arnold Wiigs Fabrikker (senere Høvik Lys) type 7190 G, for maks. 100 W glødelampe. Armaturen ble godkjent i 1967 og gikk ifølge brev fra fabrikanten ut av produksjon av 1983".*
- *"Intern ledningsføring på armaturen, fra nettilkoplingsboks på toppen av armaturen til lampeholderens koplings-skruer, er utført med 2 ledninger av type TG 170 (silikonisolert med glassfiberomspinning). Av disse ledningene ble én funnet tilkoblet en delvis nedsmeltet bøssingsklemme (fra lampeholderen). Skadene på klemmen er tydelig en følge av ytre varmepåvirkning. Bøssingsklemmen fra den andre tilkoblingen i lampeholderen ble ikke funnet, men denne ledningen, som ble funnet fastbrent på armaturen (av størknet silumin/aluminium), hadde spor som tilsier at det har vært en serielysbue som følge av brudd i lederen, eller på grunn av dårlig kontaktforbindelse i koblingen i holderen".*
- *"Av lampeholder og lyspære er bare små rester tilbake. Det samme gjelder ifølge åstedsgranskerne boksen for det skjulte anlegget (silumin) og stikkkontakten som hadde vært montert i denne".*
- *"Videre var det i brannrestene funnet rester etter bevegelig ledning, påmontert deler fra plugg, som antas å være tilførsel til armaturen. Det ble ikke funnet spor på noen av disse komponentene som kan gi holdepunkter med hensyn til brannårsak".*
- *"Den andre armaturen var noe mindre skadet. Av de interne ledningsforbindelsene satt den ene fortsatt på plass i bøssingsklemmen i holderen, mens den andre bøssingsklemmen hadde løsnet. Det kan imidlertid bemerkes at det i koplingsrommet for denne lampen ble funnet relativt store mengder lo, evt. isolasjonsmaterialer, uten at det kan gis noen forklaring på hvor dette skriver seg fra".*
- *"Ut fra undersøkelsen må vi anta at brannens arnested er å finne i forbindelse med den omtalte serielysbue i den mest skadede lampen. En serielysbue gir en meget høy temperatur i selve brennpunktet, en temperatur som i visse uheldige tilfeller kan antenne omkringliggende lett brennbare materialer".*

Når det gjelder omkringliggende lett brennbare materialer som er nevnt over, så fremkommer det ikke av Kripos sin åstedsundersøkelse eller NEMKO sin rapport hvilke materialer som kunne antennes eller kunne medvirket til antennelse. Oppbygningen av armaturen og materialer benyttet i dens konstruksjon ble ikke beskrevet, men bilder som ble tatt av de forbrante armaturene viser at koblingsboksen (av metall) var plassert oppå lampen, rett over selve lampeholderen. De interne ledningene i lampen ble ført fra denne koblingsboksen ned til lampeholderen og hadde isolasjon av silikongummi, som muligens var ratet for temperaturer opp til 170°C, basert på navngivningen for kabeltypen [62]. Silikongummi har generelt en antenningstemperatur på rundt 450°C.

Tilførselsledningen til lampen var mest sannsynlig PVC-isolert, da det ble påpekt at det var store mengder elektriske kabler med PVC-plastisolasjon oppunder himlingen [61]. Denne tilførselsledningen var ført inn i lampens koblingsboks, og dermed er det grunn til å anta at det var PVC-plast i umiddelbar nærhet til punktet der seriefeilen (kontaktsvikten) oppstod. Det kan ha oppstått forhøyede temperaturer inne i koblingsboksen som følge av seriefeilen. Det ble tatt fotografier av spor etter lysbuedannelse på tilførselsledningen til lampen, samt den nevnte interne ledningen som hadde blitt fastbrent på armaturen, men dessverre var brannetterforskernes vurderinger av disse lysbue-sporene ikke tilstrekkelig dokumentert i rapportene. Basert på en gjennomgang av dokumentene etter brannetterforskningen som ble utført i 1986 har det ikke vært mulig å avdekke om PVC-plast kan ha hatt en avgjørende betydning for utviklingen av seriefeilen som forårsaket brannen i Hotel Caledonien.

Det kan legges til at brannen i Hotel Caledonien har bemerkelsesverdig mange likhetstrekk med brannen i MGM Grand Hotel seks år tidligere:

- Brannene hadde en elektrisk tennkilde.
- Brannene oppstod på bakkenivå inne i et høyt bygg der mange mennesker sov.
- I løpet av få minutter var hele 1. etasje overtent, mye på grunn av uheldig materialvalg i både innvendig kledning, veggdekorasjoner og inventar.
- Viktig bygningsinfrastruktur ble tidlig i brannforløpet satt ut av spill.
- Røyk spredte seg via trapperom og sjakter oppover i etasjene og hindret evakuering av overnattingsgjester via de innvendige rømningsveiene.
- Overlevende ble reddet gjennom vinduer ved hjelp av helikoptre, og redningsaksjonen pågikk over mange timer.
- Nær alle de omkomne døde som følge av røyk- eller kullosforgiftning.

Brannen i MGM Grand Hotel i 1980, samt en annen hotellbrann (Las Vegas Hilton) tre måneder senere, fikk stor påvirkning på brannsikkerhet i USA. Blant annet ble det i hoteller krav om brannrislingsanlegg, automatisk brannvarslingsanlegg, og overtrykk i heissjakter og trapperom for å hindre røykspredning. På samme måte fikk den alvorlige brannen i Hotel Caledonien stor betydning for utformingen av lignende bygninger i Norge. Blant annet ble det innført en rekke tiltak for å hindre brannspredning, forbedre varslingssystemer, forbedre rømningsforhold, og forbedre beredskapsvevnen til bygningspersonell.

Sak 3: Brann som følge av kontaktsvikt og påfølgende avbrenning av ledningsisolasjon:

Den 14. juni 2017 brant det i Grenfell Tower i London, England. 72 personer omkom og 74 personer ble skadd i brannen. Totalkostnaden for brannen ble estimert til £1,2 milliarder. Dette var den verste boligbrannen i Storbritannia siden 2. verdenskrig og den vakte stor internasjonal oppmerksomhet. Dokumenter fra brannetterforskningen ble offentliggjort i november 2018 og er tilgjengelig på internett. Av dokumentene fremkommer det at brannen startet i 4. etasje i et kjølfrys-kombiskap av typen Hotpoint FF175BP (produsert av Whirlpool) som følge av en dårlig krympekobling (seriefeil), jmf. Tabell 3 - feilutført kobling skaper en kontaktsvikt. Kombiskapet var produsert i oktober 2008 og hadde en nominell effekt på 120 W (maks 190 W) ved 220 - 240 VAC. Kombiskapets strømkabel hadde en intern 13 A sikring i støpselet og var av typen H05VV-F [63] med både lederisolasjon og ytterkappe av PVC og 21-trådet kobberledere med et total ledertverrsnitt på 0,75 mm².

Brannetterforskningen, ledet av Dr. John Duncan Glover ved Failure Electrical LLC, antydte følgende årsakssammenheng for brannen (oversatt) [64]:

- *“Isolasjonsmaterialet på en strømførende intern ledning i kompressorrelérommet antennes på grunn av en overopphetet, dårlig krympekobling: Bevisgjenstand JDG/6B”.*
- *“Brann og varme fra brannen smelter og brenner av isolasjonen på den interne ledninger så vel som tilstøtende ledninger, noe som resulterer i en kortslutning (lysbugfeil) i*

kompessorrelérommet i de to strømførende ledningene som går til kondensatoren: Bevisgjenstand MJS/1".

- *"Kortslutningen/lysbuefeilen er tilstrekkelig til å utløse 32 A automatsikring (MCB) for krets nr. 7 (Kjøkken) uten å aktivere sikringen i støpselet til kombiskapets strømløsning. Lokale temperaturer i nærheten av lysbuen kan overstige smeltepunktet til kobbertrådene (ca. 1 080 °C/1 980 °F)".*

Kortslutnings-/parallelllysuen fra faseleder til nøytralleder, som var påvist med bevisgjenstand MJS/1, er mest sannsynlig sekundær, dvs. den inntraff etter at lederisolasjonen var brent bort. Om det på et tidligere tidspunkt i seriefeilforløpet inntraff dannelse av serielysbuer inni den dårlige krympekoblingen eller parallelllysuer mellom strømførende ledere i kompressorrelérommet som følge av kryptstrømmer i forkullede spor i lederisolasjonen fremkommer ikke av etterforskningsdokumentasjonen. Det står i rapporten at de eneste ledningene som ble funnet med lysbueskader som kunne ha trippet automatsikringen (MCB) for krets nr. 7 var bevisgjenstand MJS/1 og JDG/1. Bevisgjenstand JDG/1 hadde sannsynligvis blitt lysbueskadet på et tidligere tidspunkt, og var ikke relatert til brannen. Det kan legges til at det i utredningsrapporten [65] blir presisert at brannårsaken (dårlig krympekobling) som ble publisert i brannetterforskningsrapporten ble kraftig utfordret av Whirlpool (produsenten av kombiskapet) uten at nye ekspertbevis ble fremlagt, mens lederen for utredningen har uttalt at det ikke er mulig innenfor rammen av utredningen å identifisere med sikkerhet den nøyaktige naturen til feilen i kombiskapet som forårsaket brannen.

De PVC-isolerte lederne i tilførselskabelen til kombiskapet sammen med andre interne strømledere ble ført inn i kompressorrelérommet. Det er overveiende sannsynlighet for alle interne strømløsninger i kombiskapet var PVC-isolerte. Dette innebærer at PVC-plast befant seg i umiddelbar nærhet til den dårlige krympekoblingen (bevisgjenstand JDG/6B) der varmgangen hadde funnet sted, mest sannsynlig helt siden kombiskapet første gang ble tatt i bruk. Kompressorrelérommet var av typen BRPT2101-3 og laget av polyfenylen-oksidi (PPO) plast. PPO er en halogenfri halvkrystallinsk termoplastisk polymér med høy glasstransisjonstemperatur ($T_g > 200^\circ\text{C}$) som gjør at den har god motstand mot termisk deformasjon [66]. Plast benyttet i selve reléene er typisk halogenfri. Det er derfor nærliggende å anta at termisk dekomponering (utgassing) og forkulling av PVC-isolasjonen i kompressorrelérommet kan ha hatt en vesentlig betydning for forløpet til denne seriefeilen.

Det står i etterforskningsrapporten at koblinger utsatt for langvarige høye temperaturer kan oppleve en opphopning av et oksidlag, noe som gradvis øker kontaktmotstanden med påfølgende temperaturøkning. Langvarig overoppheting kan antenne ledningsisolasjon i nærheten [64]. Den termiske dekomponeringen av PVC-isolasjonen som inntraff i det leder- eller omgivelsestemperaturen oversteg 70°C kan ha ført til utgassing av både korrosive gasser (HCl) og antennerlige (brannfarlige) gasser, deriblant hydrogengass [19]. De korrosive gassene kan ha bidratt til akselerert oksidasjon av metallet i krympekoblingen med en påfølgende økning i kontaktmotstanden, mens tilstedeværelse av brennbare gasser fra PVC-dekomponeringen kan ha vært utløsende årsak til at det oppstod en antenne. Den minste antennesesenergien fra en gnist eller lysbueutladning som trengs for å antenne en luft/brensel-blanding varierer mellom 0,1 - 0,3 mJ. For hydrogen er den derimot vesentlig lavere, rundt 17 μJ . Til sammenligning produserer en 0,2 A halv-syklus for en lysbue, selv ved minimum lysbuespenning i luft på 10 V, en energi på ca. 16 mJ, noe som er mer enn nok energi til å antenne de brennbare gassene som blir frigjort når PVC varmes opp [19]. Nominelt strømforbruk for det aktuelle kombiskapet var 0,5 A, og både et startrelé for kompressoren og et overbelastningsrelé befinner seg inne i kompressorrelérommet. Lysbuedannelse kan inntreffe i et relé når kontaktene åpnes og lukkes.

En alternativ årsakssammenheng for brannen i Grenfell Tower kan derfor være:

- Årsaken til seriefeilen var en dårlig koblingsklemme (bevisgjenstand JDG/6B) i kompressorrelérommet.

- Årsaken til at seriefeilten utviklet seg til en antennelse av en brann var termisk dekomponering av PVC-isolasjonen på de strømførende ledningene i kompressorrelérommet med påfølgende utgassing av brannfarlige og korrosive gasser.

5.4.3 Kommentar til brannetterforskernes åstedsundersøkelser

Basert på åstedsundersøkelsene som har vært gjennomgått i dette prosjektet virker det som at både norske og internasjonale brannetterforskere har god forståelse av sammenhengen mellom termisk dekomponering (forkulling) av isolasjonsmaterialet og påfølgende isolasjonssvikt (unormale strømoverganger). Dette er spor som en erfaren brannetterforsker tilsynelatende lett kjenner igjen ved en åstedsundersøkelse. I dokumentet NFPA 921, *Guide for Fire and Explosion Investigations*, første gang utgitt i 1992 med den hensikt å etablere retningslinjer og anbefalinger for sikker og systematisk undersøkelse eller analyse av brann- og eksplosjonshendelser, er svekket isolasjonsegenskaper for PVC dekket [67]. Her beskrives blant annet de halvledende egenskapene til forkullet lederisolasjon, overoppheting av isolasjonsmateriale nær en svekket elektrisk forbindelse (kontaktsvikt) og termisk degradering av lederisolasjonen ved overbelastning (for høy strøm i lederen). Det nevnes eksplisitt (i seksjon 9.9.4.5.1) at PVC-isolasjon er utsatt for lysbuedannelse i forkullede spor, samt at PVC har en unik feilmekanisme i form av at våt spordannelse kan oppstå i ellers tørre omgivelser (self-induced wetting). Det virker derfor som om at de problematiske egenskapene til PVC har vært velkjent for brannetterforskere i mange tiår.

Sett i et større perspektiv er det imidlertid betenkelig at denne termiske dekomponeringen nærmest betraktes som en iboende egenskap til ethvert isolasjonsmateriale, mens det i realiteten er en kjent svakhet til ett spesifikt isolasjonsmateriale, nemlig PVC. Hvorfor aksepteres det at PVC i en feilsituasjon fremviser så dårlige isolasjonsegenskaper? I etterforsknings sakene gjennomgått i dette prosjektet er det ikke funnet uttalelser fra brannetterforskere der det pekes direkte på den sentrale rollen PVC kan ha hatt for anstiftelsen av den etterforskede brannen.

Det er heller ikke dokumentert funn i de undersøkte brannetterforsknings sakene som antyder at samme årsakssammenheng (dvs. termisk dekomponering og forkulling av isolasjonsmaterialet med påfølgende isolasjonssvikt og unormale strømoverganger) gjelder for PEX-isolerte elektriske kabler i lavspenningsinstallasjoner. Det er derfor ikke urimelig å anta at forløpet for feilsituasjonene som har forårsaket de etterforskede brannene i forrige kapittel kunne vært avbrutt hvis de strømførende ledningene hadde vært PEX-isolert. Argumentene som støtter denne antakelsen, er:

- Martel sin studie av kabelisolasjonsmaterialer, jmf. Tabell 10, antyder at PEX ikke kan antennes verken av en serielysbue ved 5 A eller en glødende kontakt [2].
- PEX vil ved temperaturer under 400°C ikke utsettes for termisk dekomponering og utgassing av brannfarlige og korrosive gasser [41].

5.5 Aktiv og passiv beskyttelse mot seriefeil

Forskrift om elektriske lavspenningsanlegg (gjeldende fra 01.01.1999) er gitt av DSB og regulerer hvem som får utføre, reparere og vedlikeholde elektriske anlegg, og hvordan anleggene og installasjonene skal utføres. Formålet med forskriften er å oppnå forsvarlig elsikkerhet ved prosjektering, utførelse, endringer og vedlikehold av elektriske lavspenningsanlegg og ved bruk av elektrisk utstyr som tilkobles slike anlegg. Forskriften stiller kvalifikasjonskrav til utførende, sikkerhetskrav, krav til planlegging og utførelse, krav om dokumentasjon, og krav til elektriske påvirkninger av omgivelsen [68]. Kapittel V i forskriften omhandler sikkerhetskrav i form av vern og andre sikkerhetstiltak, og det stilles (i §20 - §28) krav til beskyttelse mot:

- §20 - elektriske støt ved normal bruk
- §21 - elektrisk støt ved feil

- §22 - skadelige termiske virkninger
- §23 - overstrøm
- §24 - feilstrømmer
- §25 - overspenning
- §26 - underspenning
- §27 - spenningsfall i forbrukerens anlegg
- §28 - ytre påvirkninger

Det spesifiseres at normen som beskriver hvordan sikkerhetskravene i kapittel V kan oppfylles er NEK 400, Del 2 - 8, med de endringer som er angitt i vedlegg 1 til forskriften. I veilederen til §22 står det følgende:

- *"Det må tas spesielt hensyn til faren for høy overgangsmotstand i termineringspunkter for kabler/ledninger. Dette kan medføre farlig varmeutvikling og i noen tilfeller brann. Slike faresituasjoner kan oppstå som følge av utilfredsstillende festing av leder eller varig belastning av kabel/ledning opp mot ledningens maksimale strømføringssevne".*
- *"Prosjekterende/utførende må være spesielt oppmerksom på at slik unormal varmeutvikling i kontaktpunkter kan medfører at isolasjonsmateriale avgir gasser som er korrosive og kan påvirke overgangsmotstanden over tid. For å hindre at slik fare oppstår må samordning mellom overbelastningsvern og kabelens strømføringssevne vurderes nøye".*
- *"Ved avmantling av isolasjon er det spesielt viktig å benytte egnet verktøy som ikke skader kabelens/ledningens ledermateriale".*

Det står også spesifisert i forskriften at ved bruk av PVC-isolert kabel med tverrsnitt opp til og med 4 mm² skal vern mot overbelastning velges slik at vernets høyeste prøvestrøm I₂ ikke overstiger kabelens maksimale strømføringssevne I₂ eller vernets høyeste prøvestrøm I₂ ikke overstiger høyeste prøvestrøm som er benyttet for materiell i kretsen. Dette er ytterligere spesifisert i kapittel 431.3, 705.4 og 823.4 i NEK 400:2022.

I et elektrisk lavspenningsanlegg stilles det med andre ord krav til implementering av ulike tiltak for å redusere risikoen for brann. I praksis betyr dette både passiv og aktiv beskyttelse blir tatt i bruk. Konvensjonelle aktive vern kan inkludere jordfeilvern, automatsikring, overspenningsvern og kombiautomat, og alle disse plasseres normalt i et fordelingsskap. Brannstatistikken antyder at seriefeil er en fremtredende brannårsak i norske bygninger, noe som både betyr at seriefeil forekommer hyppig i elektriske lavspenningsanlegg og at slike konvensjonelle vern tilsynelatende ikke fanger opp seriefeil med påfølgende gløding og lysbuedannelse på en tilfredsstillende måte. I de senere år er det derfor blitt utviklet ulike innretninger som aktivt kan fange opp og forhindre utviklingen av en seriefeil i et elektrisk lavspenningsanlegg. Blant disse kan det nevnes lysbuevern, kabelgassdetektor, infrarød termografi og ulike former for lokal varmedeteksjon [14].

I NEK 400:2022 er det i kapittel 428 spesifisert at for elektriske installasjoner i områder hvor det oppbevares uerstattelige verdier (museer, historiske bygninger, biblioteker og dokumentsentre), skal det anordnes tiltak for beskyttelse mot brann forårsaket av isolasjonssvikt og seriefeil. I områder beregnet til sovende mennesker anbefales det å iverksette tiltak for beskyttelse mot seriefeil i samsvar med kapittel 424 i forbrukerkurser. I kapittel 424 spesifiseres det at det skal anordnes tiltak som kobler ut kursen når en seriefeil detekteres. I AC-kurser kan et lysbuevern (AFDD, arc fault detection device) i samsvar med NEK EN 62606, plassert ved starten av kursen tilfredsstillende kravene til slik utkobling. Primærfunksjonen til et lysbuevern er å beskytte mot farlig lysbuedannelse i en elektrisk installasjon. Et lysbuevern må installeres i starten av kursen den skal beskytte. Dersom det detekteres en lysbue som vernet identifiserer som farlig, vil strømtilførselen til kursen brytes, noe som gjelder for både serie- og parallelllysuer. Samtidig skal lysbuevernet ideelt sett være i stand til å identifisere ufarlig

lysbuedannelse som normalt vil kunne genereres av forbrukerutstyr, og i slike tilfeller skal kursen ikke kobles ut.

I en omfattende studie som omhandler betingelser for serielysbuer i PVC-isolerte elektriske kabler fra 2007 konkluderes det med følgende (oversatt) [19]:

- *"Nye metoder er nødvendig for å redusere effekten av lysbuer ved lav strømstyrke og glødende kontakter på elektriske branner. Dette kan inkludere forbedrede beskyttelsesanordninger for å oppdage lysbuer med resulterende brannforhindring, sammen med bedre varmebestandige isolasjonsmaterialer som ikke lett produserer brennbare gasser".*

Det pekes altså i studien mot et behov for både aktiv og passiv beskyttelse mot seriefeil. Det observeres at de aller fleste publikasjonene som siterer denne studien dreier seg om utvikling av lysbuevern-teknologi, og det virker som om forskning innen denne tematikken siden 2007 stort sett har hatt fokus på å utvikle teknologi for aktiv beskyttelse. Ofte har denne forskningen foregått i regi av store produsenter av aktive vern for bruk i elektriske lavspenningsinstallasjoner. Det kan spekuleres om det er økonomiske hensyn som har gjort det mer attraktivt å fokusere på aktiv beskyttelse mot seriefeil fremfor passiv beskyttelse.

Det ble i 2013 publisert en europeisk standard for lysbuevern (IEC 62606 - General requirements for arc fault detection devices), som er et omfattende dokument på 150 sider der det defineres en rekke krav som et lysbuevern må tilfredsstillende [69]. I denne standarden blir evnen vernet har til å detektere lysbuer testet på ulike måter, blant annet ved fremstilling av forkullede spor i en kabelprøve, som er beskrevet i kapittel 9.9.2.6 i standarden. Generelt er fremstilling av stabile lysbuer svært utfordrende å få til. Tillagingen og bruken av en slik kabelprøve muliggjør uttesting av et lysbuevernet under noenlunde kontrollerte og reproducerbare betingelser. Prosessen med å tillage en kabelprøve er detaljert beskrevet i standarden, og det presiseres at det må benyttes PVC-isolerte ledere sammen med en PVC-basert isolasjonsteip. Det nevnes videre at kabeltypene SPT2 og H05VV-F er spesielt godt egnet til dette formålet. Forklaringen på at testen krever PVC-basert isolasjonsmateriale er mest sannsynlig at det er vanskelig å lage forkullede spor i de fleste andre kabelisolasjonsmaterialer. En kan stille spørsmål om det ville vært mulig å lage en slik kabelprøve med bruk av PEX-basert isolasjonsmateriale, og om reell funksjon og deteksjonsevnen til et lysbuevern ville bli påvirket hvis det ikke var PVC-isolasjon til stede i den elektriske kretsen.

Martel utforsket i sine doktorgradsstudier mulighetene for å redusere forekomsten av serielysbuer ved implementering av både aktiv og passiv beskyttelse, og noen av sammenhengene som fremkom av dette arbeidet er som følger (oversatt) [2]:

- *"Undersøkelsene av isolasjonsmaterialene gir bevis på et klart forhold mellom tendensen til mange polyméer, spesielt PVC, til å produsere ledende aske ved termisk nedbrytning og å fremme initiering av stabile serielysbuer ved påtrykk av vekselstrøm. I motsetning til dette er polyetylen og andre halogenfrie polyméer meget motstandsdyktige mot serielysbuer".*
- ***"Bruk av lysbuebestandige polyméer materialer som isolasjon for kabler og andre elektriske komponenter vil føre til en stor forbedring i el-sikkerheten. Sikkerhetsgevinsten må likevel veies opp mot mulige ulemper som tiltaket kan medføre. PVC er mye brukt i elektrisk utstyr, ikke bare på grunn av lavere kostnader, men også på grunn av sine gode kjemiske og mekaniske egenskaper".***
- *"Den praktiske bruken av disse lysbuebestandige polymérene i ulike elektriske applikasjoner bør studeres når det gjelder kostnader og andre tekniske krav. Disse funnene bør tas i betraktning i installasjons- og produktstandarder".*
- *"Så lenge seriefeil ikke kan fullstendig forhindres av passive sikkerhetstiltak, anbefales bruk av aktive vern mot lysbuefeil. Videre forskningsinnsats bør rettes mot å øke passiv beskyttelse mot serielysbuefeil".*

- *"En detaljert undersøkelse utført av Consumer Product Safety Commission på et lite antall branner i elektriske lavspenningsanlegg (149 branner i 16 amerikanske byer) viser en høy forekomst av elektriske branner i eldre boliger. Et flertall av brannene skjedde i hus eldre enn 40 år. Bruk av beskyttelsesanordninger som jordfeilvern, automatsikringer, eller lysbuevern i nye installasjoner er fornuftig, men ettermontering av slike anordninger i eldre installasjoner vil også være sterkt anbefalt".*

Her blir det altså pekt mot bruk av lysbuebestandige isolasjonsmaterialer som en effektiv passiv beskyttelse mot seriefeil. Det blir samtidig argumentert for at PVC har lav kostnad, gode mekaniske/kjemiske egenskaper og inngår i etablert praksis. Både Martel og Babrauskas har i prosjektet blitt kontaktet og forespurt om argumentasjon som kan forklare hvorfor PVC fortsatt blir utbredt benyttet som kabelisolasjonsmateriale i elektriske lavspenningsanlegg. Begge har i sin respons oppgitt lav kostnad kombinert med etablert praksis som de viktigste (og eneste) faktorene.

Selv om det i nær fremtid skulle bli skjerpene krav til bruk av lysbuebestandige isolasjonsmaterialer for kabler og andre komponenter i elektriske lavspenningsanlegg vil det forbli mye PVC i eksisterende elektriske installasjoner i lang tid fremover, med risikoen dette bringer med seg for elektriske branner. Videre utvikling av aktiv beskyttelse mot seriefeil virker derfor logisk, særlig hvis denne teknologien kan gjøres tilstrekkelig god til at den kan utgjøre et effektivt brannforebyggende tiltak. Det kan nevnes at det har vært utprøvd ulike former for passiv beskyttelse mot seriefeil i elektriske lavspenningsanlegg. Det blir i en SINTEF-rapport pekt på et passivt brannforebyggende tiltak i form av et krav om metalliske ledningsrør for ledningsnettet i boliger i Chicago (USA). I rapporten ble det lagt frem følgende sammenhenger [5]:

- *"På grunn av mange og kostbare branner opp gjennom historien har myndighetene i Chicago etablert strenge regler for elektriske installasjoner og utstyr. Dette har, som vist i figur 2.15, medført at andelen av kostnadene for elektriske branner i boliger, av de totale kostnadene til boligbranner, er vesentlig lavere i Chicago, sammenlignet med resten av USA. Kostnadsestimatene for elektriske branner generelt i Chicago av de totale kostnadene for boligbranner i USA er nesten en firedel av gjennomsnittet for hele USA".*
- *"Som vist i figur 2.16, er de tilsvarende kostnadsestimatene for branner på grunn av elektriske installasjoner i Chicago godt under halvparten av tilsvarende tall for resten av USA".*
- *"En viktig årsak er at man i lang tid i denne byen har hatt et krav om metalliske ledningsrør for ledningsnettet i boliger. På denne måten blir elektriske ledninger, som er det installasjonsmaterieell som klart medfører flest branner i det elektriske anlegget i boliger, effektivt isolert fra brennbart materiale ved hjelp av en metallisk barriere".*
- *"Det faktum at ledninger og kabler er lagt i metalliske rør, er den eneste forskjellen som kan forklare de færre brannene i de elektriske installasjonene i Chicago i forhold til resten av USA".*
- *"Erfaringene i Chicago er at denne praksisen ikke har medført nevneverdige økninger i husbyggingskostnadene sammenlignet med resten av landet".*

Ved å legge elektriske kabler i slike metallrør oppnår man økt beskyttelse mot ytre termiske og mekaniske påvirkninger, for eksempel gnager-skader eller spikerslag. I tillegg fører tiltaket til at gamle, forringede kabler kan skiftes ut på en enkel og rimelig måte [5]. Erfaringene fra dette konkrete tiltaket i Chicago illustrerer hvor effektivt en slik passiv beskyttelse av elektriske installasjonskabler kan være med tanke på forebygging av brann med elektrisk årsak i bygninger. Dette antyder at bruk av lysbuebestandige isolasjonsmaterialer i elektriske installasjonskabler som passiv beskyttelse mot seriefeil mest sannsynlig vil kunne være et godt brannforebyggende tiltak.

6 Oppsummering og anbefaling

Bygningsbranner med elektrisk årsak er en gjenganger i norsk og internasjonal brannstatistikk. Denne type brann viser seg å ha en høyere kostnad, både i form av antall omkomne og tap av materielle verdier, sammenlignet med andre type branner, noe som impliserer at tiltak som kan redusere forekomsten av branner med elektrisk årsak har særskilt høy samfunnsverdi. I Norge antas rundt 3 - 4 personer å omkomme årlig i branner med elektrisk årsak. I DSB sin brannstatistikk er årsakskategorien "serielysbue" stor, med en andel på rundt 35 % av alle boligbranner med elektrisk årsak. Dette indikerer at serielysbuedannelse inntreffer hyppig i norske lavspenningsanlegg. I dette arbeidet er serielysbue ansett å være en del av forløpet til en seriefeil, da lysbuedannelse på samme måte som motstandsoppvarming og glødende kontaktpunkt sees på som en del av forløpet til en seriefeil. Mekanismene som er involvert i forløpet er sammensatte og undersøkelser av ulike feilscenarier har demonstrert at en seriefeil i en elektrisk installasjon har høy kompleksitet.

I Norge er PVC-plast benyttet i utstrakt grad i elektriske lavspenningsanlegg, først og fremst som kabelisolasjonsmateriale. PVC-isolerte elektriske kabler har en E_{ca}-klassifisering i byggevevareforordningen (CPR), og NEK 400:2022 tillater bruk av kabler med en E_{ca}-klassifisering i de fleste anvendelsesområder, deriblant boliger. Den termiske dekomponeringen av PVC er problematisk og gjør at isolasjonsegenskapene til PVC degraderes ved forhøyede temperaturer. Dekomponeringen fører også til utgassing av mange ulike brannfarlige gasser. En rekke forskningsstudier peker mot at PVC har en svært uheldig påvirkning på forløpet til en seriefeil på grunn av de forhøyede temperaturene som oppstår ved en slik feilsituasjon. PVC er et av de minst tilfredsstillende plastmaterialer med hensyn til å motstå dannelsen av forkullede spor og krepstrømmer. Denne sammenhengen er blitt styrket ved gjennomgang av en rekke konkrete branneretterforsknings saker der PVC-isolasjonen fremstår som en medvirkende årsak til, og ofte helt avgjørende for, at en seriefeil utvikler seg til antennelse av en brann. Mye tyder på at et termisk stabilt og lysbuebestandig kabelisolasjonsmateriale vil kunne betydelig redusere risikoen for at en seriefeil i et elektrisk lavspenningsanlegg får utvikle seg til en brann.

Basert på funnene i dette litteraturstudiet fremstår det fra et elsikkerhetsperspektiv problematisk at PVC fortsatt er tillatt benyttet som isolasjonsmateriale i elektriske lavspenningsanlegg. Det meste av gjennomgått dokumentasjon peker mot utfasing av PVC som et logisk tiltak, først og fremst fra et elsikkerhetsperspektiv, men også av miljø- og helsemessige årsaker. Det finnes allerede alternative isolasjonsmaterialer i markedet som er termisk stabile og økonomisk konkurransedyktige sammenlignet med PVC. Et eksempel på et slikt isolasjonsmateriale er tverrbundet polyetylen (PEX), som er en halogenfri herdeplast utviklet allerede for over 50 år siden. Det anbefales at det tas en gjennomgang av kravene som stilles til elektriske kabler og deres bruksområde ved neste revisjon av NEK 400. Kabelens reaksjon og påvirkning under en brann bør ikke være det eneste kriteriet for bestemmelse av dens bruksområde. Elsikkerhetsaspektet må vektlegges, særlig når det påviselig kan dokumenteres at bruk av PVC-isolasjonsmateriale fører med seg forhøyet risiko for at en elektrisk brann kan oppstå.

7 Referanser

- [1] Brannstatistikk 2018, "Tall fra rapporteringsløsningen (BRIS) fra brann- og redningsvesenet til DSB", Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB), 2019.
- [2] J. M. Martel, "Series arc faults in low-voltage AC electrical installations", PhD thesis, Technische Universität Ilmenau, 2018.
- [3] K. Hoare, "Arc Fault Detection Devices (AFDDs) - Are they worth it?", Hoare Lea Consulting Engineers, November 2020.
- [4] A. S. Hansen, K. Storesund, M. Försth, M. Strömgren, B. V. Jensen, D. Bluhme, "Conditions for Nordic harmonisation of fire classification of cables", SINTEF NBL as, Rapport NBL A13111, 2013.
- [5] J. P. Stensaas, "Branner på grunn av elektrisk installasjonsmateriell", SINTEF NBL as, Rapport NBL A06121, 2007.
- [6] M. B. Nilsen, "Seriefeilvern som beskyttelse mot brann", Masteroppgave, NTNU, 2015.
- [7] M. Fagerås, "Testing av lysbuevern". Masteroppgave, NTNU, 2016.
- [8] B. A. Mostue, "Brannskadeutviklingen i Norge - tiltak for å redusere brannskadene", SINTEF NBL as, Rapport NBL A08111, 2008.
- [9] A. Steen-Hansen, J. P. Stensaas, S. Fjær, K. Storesund, "Elektriske kabler og brannrisiko", SINTEF NBL as, Rapport NBL A12123, 2012.
- [10] Ø. Nordseth, "Status for bruk av lysbuevern i Norge", Institutt for energiteknikk, Rapport IFE/E-2021/004, 2021.
- [11] J. Sletbak, R. Kristensen, H. Sundklakk, G. Nåvik and M. Runde, "Glowing contact areas in loose copper wire connections", IEEE Trans. Comp. Hybrids Manufact. Technol., vol. 15, no. 3, pp. 322-327, 1992.
- [12] J. P. Stensaas og K. Nygård, "Brann på grunn av elektrisk feil i installasjonsmateriell og lavtemperatur varmpåvirkning fra belysning", SINTEF NBL as, Rapport NBL A08120, 2008.
- [13] B. A. Mostue, "Brannskadeutviklingen i Norge – Tiltak for å redusere brannskadene", SINTEF NBL as, Rapport A08111, 2008.
- [14] C. O. Larsson, "Seriefeilvern i elektriske installasjoner", Masteroppgave, NTNU, 2012.
- [15] J. Urbas, "Glowing connections experiments with alternating currents below 1 Arms", IEEE Holm Conference on Electric Contacts, 2008.
- [16] V. Babrauskas, "How do electrical wiring faults lead to structure ignitions", Proc. Fire Mater. Conf., pp. 39-51, 2002.
- [17] V. Babrauskas, "Mechanisms and modes for ignition of low-voltage PVC wires, cables and cords", Fire and Materials, pp. 291-309, 2005.
- [18] G. Nåvik, B. Aspmo, D. I. Ekrem, R. Kristensen, "Detektor for kontaktfeil/isolasjonsfeil", Energiforsyningens forskningsinstitutt A/S, Teknisk rapport nr. TR 3811, 1991.
- [19] J. J. Shea, "Conditions for Series Arcing Phenomena in PVC Wiring", IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies Volume 30, pp. 532-539 (2007)
- [20] B. A. Mostue, J. P. Stensaas, "Analyse av DSBs brannstatistikk for bygningsbranner i tiårsperioden 1994-2003", SINTEF NBL as, Rapport NBL A04122, 2004.
- [21] B. A. Mostue, "Brannskadeutviklingen i Norge sammenlignet med andre nordiske land – Årsaker til forskjeller", SINTEF NBL as, Rapport NBL A06116, 2006.
- [22] K. Storesund, A. S. Hansen, B. A. Mostue, C. Sesseng, "Hendelser med brann i elektriske anlegg", SINTEF NBL as, Rapport NBL A12137, 2012.
- [23] J. P. Stensaas, "Varmgang i elektrisk materiell og utstyr som tennkilde i bygninger", SINTEF NBL as, Rapport NBL A06122, 2007.
- [24] A. S. Hansen, J. P. Stensaas, S. Fjær, K. Storesund, "Elektriske kabler og brannrisiko – Branntekniske egenskaper til kabler, ledningssystemer og kapslinger", SINTEF NBL as, Rapport NBL A12123, 2012.
- [25] V. Babrauskas, Ignition Handbook, Fire Science Publishers, Issaquah, WA, 2003.

- [26]V. Babrauskas, "Mechanisms and modes for ignition of low-voltage, PVC-insulated electrotechnical products", *Fire and Materials*, pp. 151-174, 2006.
- [27]J. J. Shea, "Glowing contact physics", in *Electrical contacts-2006, proceedings of the fifty-second IEEE Holm conference on*, 2006, pp. 48-57.
- [28]J. J. Shea and X. Zhou, "Material Effect on Glowing Contact Properties," *Electrical Contacts - 2007 Proceedings of the 53rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, Pittsburgh, PA, USA, 2007, pp. 90-97.
- [29]J. J. Shea, "Identifying causes for certain types of electrically initiated fires in residential circuits", *Fire and Materials*, vol. 35, pp. 19-42, 2011.
- [30]Kunststoffe International, *Special K 2019 - Plastics World Market - PVC (Kunststoffe International 2019)*
- [31]S. Pickard og S. Sharp, "Phasing out plastics – The construction sector", ODI Report, London, September 2020.
- [32]Espen L. Mikkelsen, Eirik Wærner, Jarle Marthinsen, Rolf Hagen, Kirsti Gimnes Are, "Plastgjenvinning i bygg og anlegg i et sirkulært perspektiv – Hovedrapport", Mepex Consult AS og Multiconsult AS, 2023.
- [33]E. J. Wickson, "Handbook of Polyvinyl Chloride Formulating", Wiley, New York, 1993.
- [34]K. Formela, M. Wołosiak, M. Klein, S. Wang, "Characterization of Volatile Compounds, Structural, Thermal and Physico-Mechanical Properties of Cross-Linked Polyethylene Foams Degraded Thermo-Mechanically at Variable Times", *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 134, pp. 383–393, 2016.
- [35]S.-J. Mo, J. Zhang, D. Liang, H.-Y. Chen, "Study on Pyrolysis Characteristics of Cross-linked Polyethylene Material Cable", *Proc. Engineering*, vol. 52, pp. 588-592 (2013)
- [36]S. Liu, S. W. Veysey, L. S. Fifield, N. Bowler, "Quantitative analysis of changes in antioxidant in crosslinked polyethylene (XLPE) cable insulation material exposed to heat and gamma radiation", *Polymer Degradation and Stability*, vol. 156, pp. 252-258, 2018.
- [37]M. Ferry, F. Carpentier, M. Cornaton, "Radio-Oxidation Ageing of XLPE Containing Different Additives and Filler: Effect on the Gases Emission and Consumption", *Polymers*, vol. 13, 2845, 2021.
- [38]M. Bawareth, m. fl., "Crosslinked Polyethylene (XLPE) Recycling via Foams", *Polymers*, vol. 14, 2589, 2022.
- [39]C. L. Beyler og M. M. Hirschler, "Thermal Decomposition of Polymers", *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3. utgave, 2002.
- [40]M. A. Fard, M. E. Farrag, S. McMeekin, A. Reid, "Electrical Treeing in Cable Insulation under Different HVDC Operational Conditions", *Energies*, vol. 11, 2406, 2018.
- [41]C. Blivet, E. -F. Larché, Y. Israël, P. -O. Bussière, J. -L. Gardette, "Thermal oxidation of cross-linked PE and EPR used as insulation materials: Multi-scale correlation over a wide range of temperatures", *Polymer Testing*, vol. 93, 106913, 2021.
- [42]A. S. Alghamdi og R. K. Desuqi, "A study of expected lifetime of XLPE insulation cables working at elevated temperatures by applying accelerated thermal ageing", *Heliyon*, vol. 6, e03120, 2020.
- [43]S. Stricker, "Thermal Design of PVC-Insulated Heating Cable", Report 74-26-K, Ontario Hydro, Toronto, 1974.
- [44]R. Wilkins og M. J. Billings, "Effect of Discharges between Electrodes on the Surface of Organic Insulation", *Proc. IEE*, vol. 116, pp. 1777-1784, 1969.
- [45]G. M. L. Sommerman, "Electrical Tracking Resistance of Polymers", *Trans. AIEE* 79-III, pp. 69-74, 1960.
- [46]K. Kawamura, F. Noto, S. Sakamoto, "Electric Ignition Phenomena Caused by Tracking Failure in Distribution Cable and Development of Electric Fire Protection Equipment" (in Japanese), *Bull. Japan Assn. Fire Science and Engrg.*, vol. 31, pp. 23-30, 1981.

- [47] K. Oba, "Identification of Melting Marks of Electric Wires" (in Japanese; unpublished report), Yamagata Prefecture Police Headquarters, Criminal Scientific Laboratory, Japan (1980).
- [48] Norsk Elektroteknisk Komite (NEK), "Elektriske lavspenningsinstallasjoner", NEK 400:2022, 2022.
- [49] T. W. Dakin, "Electrical Insulation Breakdown Treated as a Chemical Rate Phenomenon", Trans. AIEE, vol. 67, pp. 113-122, 1948.
- [50] R. Bjørnstad, "Uvøren bruk av fakta om gulv til Nye SUS", kronikk i Stavanger Aftenblad, 13. desember 2022.
- [51] "The polyvinyl chloride debate: Why PVC remains a problematic material", Health Care Without Harm (HCWH), 2021.
- [52] A. Alsabri og S. G. Al-Ghamdi, "Carbon footprint and embodied energy of PVC, PE, and PP piping: Perspective on environmental performance", Energy Reports, vol. 6, pp. 364-370, 2020.
- [53] European Commission (2022): European Commission, Directorate-General for Environment, The use of PVC (poly vinyl chloride) in the context of a non-toxic environment : final report, ENV/2020/MVP/0029, doi:10.2779/375357, Publications Office of the European Union, 2022, <https://data.europa.eu/doi/10.2779/375357>
- [54] K. Ashizawa og K. Omata, "Property of Ignition Mechanism Caused by Thermal Degradation on Plug" (in Japanese), Abstracts of Annual Meeting of JAFSE, Paper C-22, pp. 386-389, 1997.
- [55] H. Ohtani og K. Kawamura, "An Experimental Study on thermal Deterioration of Electric Insulation of a PVC Attachment Plug", J. Japan Society for Safety Engineering, vol. 42, pp. 216-221, 2003.
- [56] B. Sveberg, "Varmgang i PVC-isolert installasjonskabel", Masteroppgave, NTNU, 2000.
- [57] "Kjenneteikn og utviklingstrekk ved dødsbrannar og omkomne i brann - Ein gjennomgang av DSBs statistikk over omkomne i brann 1986–2009, Rapport, Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB), 2010.
- [58] Clark County Fire Department, "MGM Report", Mai 1981.
- [59] National Fire Protection Association (NFPA), "Investigation report on the MGM Grand Hotel Fire", Prepared by Richard Best and David. P. Demers, Januar 1982.
- [60] "Kjenneteikn og utviklingstrekk ved næringsbrannar 1986–2009", Rapport, Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB), 2011.
- [61] Direktoratet for brann- og eksplosjonsvern og Statens bygningstekniske etat: "Rapport om brannen ved Hotel Caledonien, Kristiansand 5.9.1986", Rapport 750/1.87, januar 1987.
- [62] Norges Elektriske Materiekkontroll (NEMKO), "BRANN – Caledonien Hotel, 1986.09.05", Rapport S-9560/86, 25. september 1986.
- [63] M. Dyer, "Test Report – Hotpoint Fridge Freezer Model FF175B", Report No. 103250895MKS-001, Intertek, 12. februar 2018.
- [64] J. D. Glover, "Grenfell Tower Public Inquiry Addendum", 16. november 2018. <https://www.grenfelltowerinquiry.org.uk/evidence/dr-j-duncan-glovers-expert-report>
- [65] Grenfell Tower Inquiry: Phase 1 report, "REPORT of the PUBLIC INQUIRY into the FIRE at GRENFELL TOWER on 14 JUNE 2017", HC 49–IV, Volume 4, Oktober 2019.
- [66] S.-H. Hwang, Y.-S. Kim, H.-C. Cha, J.-C. Jung, "Thermal and physical properties of poly(phenylene oxide) blends with glass fiber reinforced syndiotactic polystyrene", Polymer, vol. 40, pp. 5957-5960 (1999).
- [67] National Fire Protection Association, NFPA 921, Guide for Fire and Explosion Investigations, 2024-utgave.
- [68] K. A. Rosvold og L. O. Askheim, "Forskrift om elektriske lavspenningsanlegg", i Store norske leksikon på snl.no. Hentet november 2023 fra https://snl.no/forskrift_om_elektriske_lavspenningsanlegg
- [69] International Electrotechnical Commission (IEC), "General requirements for arc fault detection devices", IEC 62606, 2013.