

Nora Ingvild Gulbransen
Oda Drægri Nilsen

En undersøkelse av det nåværende markedet og teknologien for lyndeteksjon og lynbeskyttelsessystemer i vindturbiner

Bacheloroppgave i Bachelor i ingeniørfar, Fornybar energi
Veileder: Tania Bracchi
Mai 2023



NTNU

Kunnskap for en bedre verden

Nora Ingvild Gulbransen
Oda Drægri Nilsen

En undersøkelse av det nåværende markedet og teknologien for lyndeteksjon og lynbeskyttelsessystemer i vindturbiner

Bacheloroppgave i Bachelor i ingeniørfar, Fornybar energi
Veileder: Tania Bracchi
Mai 2023

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for energi- og prosessteknikk



Kunnskap for en bedre verden



Institutt for energi-
og prosessteknikk

Bacheloroppgave

Oppgavens tittel: En undersøkelse av det nåværende markedet og teknologien for lyndeteksjon og lynbeskyttelsessystemer i vindturbiner	Gitt dato: 09.01.2023
	Innleveringsdato: 22.05.2023
	Antall sider rapport / sider vedlagt: 64/6
Project title (ENG): A study of the current market and technology for lightning detection and lightning protection systems in wind turbines.	
Gruppedeltakere: Nora Ingvild Gulbrandsen, Oda Drægri Nielsen	Veileder: Tania Bracchi
	Prosjektnummer: BIFOREN23-20
Oppdragsgiver: ANEO	Kontaktperson hos oppdragsgiver: Sindre Solberg

Fritt tilgjengelig:

Tilgjengelig etter avtale med oppdragsgiver:

Rapporten frigitt etter:

Gruppedeltakere signaturer:

Nora Gulbrandsen

Oda Drægri Nielsen

Forord

Denne bacheloroppgaven er skrevet som en del av studiet bachelor i Ingeniørfag, Fornybar energi ved institutt for energi og prosesssteknikk ved Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet (NTNU) i Trondheim. Oppgaven tilsvarer 20 studiepoeng som en del av emnet FENT2900 Bacheloroppgave Fornybar Energi.

Vi vil benytte denne muligheten til å takke Tania Bracchi, vår veileder på NTNU, for ukentlig møter, tilbakemeldinger og oppmuntring underveis i oppgaveskrivingen.

Vi vil takke ANEO for muligheten til å kunne bidra til datainnsamling om lyndeteksjon og lynbeskyttelse, og for at de hadde tillit til vår utførelse av oppgaven. I den sammenheng vil takke Sindre Solberg, vår veileder fra ANEO, for betydningsfull hjelp og veiledning. Vi vil også takke Lina Nordaune, David Thomas og Vebjørn Haukaas for deres bidrag til forståelse av viktige elementer i oppgaven.

Videre vil vi takke kontaktpersoner i selskapende intervjuet i sammenheng med oppgaven, for å sette av tid til å gi innsikt i dagens marked og industri.

Trondheim, 21.05.2023

Oda Drægni Nilsen

Oda Drægni Nilsen

Nora Gulbrandsen

Nora Ingvild Gulbrandsen

Sammendrag

Vindkraft er en rask voksende fornybar energikilde. Den raske økningen gjør at kraftselskapene, som ANEO, ønsker løsninger som er pålitelige, kostnadseffektive og tilpasset lokale forhold. Det er stor andel havari av vindturbiner, den største årsaken er lyn. Lynbeskyttelsessystem og lyndeteksjon skal sammen forebygge slike skader og dermed redusere de økonomiske risikoene knyttet til potensiell skade.

Oppgaven analyserer varslinger fra Roan, Frøya og Hundhammerfjellet vindpark. På Frøya og Hundhammerfjellet ble det analysert lyndata fra Frost, med hensikt i å kartlegge om det er behov for lyndeteksjon. Roan har lyndeteksjon i vindturbinene. Lynalarmene ble sammenlignet med lyndataen for å kartlegge gunstigheten til lyndeteksjonen. I tillegg ble det vurdert hvilket lynbeskyttelsesnivå for lynbeskyttelsessystemene som er nødvendig. Et litteraturstudie ble gjennomført for å kartlegge leverandører innen lyndeteksjon, og undersøke forskjellige teknologier for lynbeskyttelsessystemer. Det ble gjennomført intervjuer med leverandører for å gi større innsikt i industriens perspektiver, og høre deres erfaringer knyttet til lyndeteksjon og lynbeskyttelse.

Lyndata i parkene var relativt like, men gjennomsnittlig positiv maks strøm på Frøya og Hundhammerfjellet er høyere enn på Roan. Standardvarslinger på Hundhammerfjellet og Frøya ga ingen indikasjon på lynnedslag i turbinene. Basert på disse faktorene ble det konkludert med et behov for lyndeteksjon. Fra intervju med leverandører av lyndeteksjon og litteraturstudiet, er Phoenix Contact eller Polytech best egnet basert på behovene til vindparkene.

Ved å sammenligne lyndata fra Frost med lynvarsler fra Roan korresponderer lynvarslene og de registrerte lyn i flere tilfeller. Det er hendelser der det er registrert lyn men det ikke har kommet lynvarsel og hendelser der det er lynvarsel men ikke registrert lyn, dette kan skyldes usikkerheter i begge teknologiene. For å øke effektiviteten av lyndeteksjonen på Roan vil det være behov for mer nøyaktige parametere på varselene med klare terskeler på når det skal bli aktivert varsel og alarmer for lyn.

IEC61400-24 sier at alle turbiner bør ha lynbeskyttelsesnivå 1. Vinterlyn i tillegg til en stor andel positive lyn langs trøndelagskysten gjør at det kan være nødvendig å ha lynbeskyttelse bedre enn nivå 1.

Formålet med denne oppgaven er å styrke ANEO sin kunnskap om lyndeteksjon og lynbeskyttelse i vindturbiner, og å forenkle mulige valg i fremtiden knyttet til valg av lynbeskyttelse og installering av lyndeteksjon.

Abstract

Wind power is one of the fastest growing energy sources in the world. Because of the rapid growth are power companies, like ANEO, searching for solutions that are reliable, cost-efficient, and customized for the specific wind park's conditions. There is a lot of damage to wind turbines, and lightning strike is one of the biggest causes to downtime. Lightning protection system and lightning detection are designed to prevent such damages and thereby reduce the economic risks associated with the potential harm.

The thesis analyses warnings from Roan, Frøya and Hundhammerfjellet wind farm. Lightning data from Frost was analyzed to determine the need for lightning detection. The lightning warnings were compared to the given lightning data to determine the advantage of installing lightning detection. In addition, it was considered which level of lightning protection that is necessary. A literature study was implemented to learn about lightning detection suppliers and examine different lightning protection system technologies. It was implemented interviews with suppliers to give a greater insight into the perspectives of the industry, and to learn about their experiences with lightning detection and protection.

The lightning data for the wind parks were relatively similar, however, the positive peak current for Frøya and Hundhammerfjellet was higher than for Roan. The warnings for Hundhammerfjellet and Frøya did not indicate when lightning struck the turbines. Based on these factors, it was concluded that there is a need for lightning detection. Based on the literature study and interviews conducted with lightning detection suppliers, Phoenix Contact and Polytech emerge as the most suitable choices for meeting the needs of the wind parks.

Comparing lightning data from Frost with lightning warnings from Roan shows the correspondence between lightning warnings and lightning on many occasions. There are incidents where there is measured lightning, where no warnings have occurred, and the opposite. This may be due to uncertainties in both technologies. To raise the efficiency in the lightning detection installed in Roan, there will be a need for more precise parameters from the warnings, with explicit thresholds when the warnings and alarms should be activated during lightning. Winter lightning, along with a significant proportion of positive lightning along the Trøndelag coast, may make it necessary to have lightning protection better than level 1.

The purpose of this thesis is to improve ANEO's insight in lightning detection and protection in wind turbines. It aims to simplify potential choices in the future according to the choice and installation of lightning detection.

Innhold

Forord

Sammendrag

Abstract

Forkortelser

Symboler

1	Innledning	1
1.1	Bakgrunn	1
1.2	Om ANEO	1
1.3	Formålet med oppgaven	2
1.4	Avgrensning for oppgaven	2
1.5	Problemstilling	3
1.6	Disposisjon	3
2	Teori	5
2.1	Vindturbin	5
2.2	Lyn	6
2.3	IEC standard	9
2.4	Lynskader	10
2.5	Lynbeskyttelsesnivå	12
2.6	LPS i vindturbiner	15
2.7	Lyndeteksjon for vindturbiner	21
2.8	Vedlikehold / agering av turbiner ved lyn	29
2.9	Vindparkene	30
3	Metode	31
3.1	Lyndata fra meteorologisk institutt, Frost	31
3.2	GoogleMaps	32
3.3	Bazefield	34
3.4	Excel	35
3.5	Intervjuer	35
3.6	Usikkerhet	36
4	Resultat av dataanalyse	38
4.1	Lyndata	38
4.2	Andre alarmer	39
4.3	Resultater fra lynalarmer og lyndata	40
4.4	Effektkurve og trendkurve	41
5	Resultater fra intervju	42
5.1	Polytech	42
5.2	Phoenix Contact	43
5.3	Jomitek	44
5.4	Elteco	44
5.5	Vaisala	45
5.6	Teknikerere og ansatte på Roan vindpark	45
5.7	Meteorologisk institutt	45

6	Diskusjon	46
6.1	LPS	46
6.2	Lyndata fra meteorologisk institutt LS7002 fra Vaisala	48
6.3	Sammenlignng av LDS	49
6.4	Bruk av LDS på Roan	52
6.5	LDS på Frøya og Hundhammerfjellet	54
6.6	Fremtidig arbeid	57
7	Konklusjon	59
A	Lyndata fra vindparkene	I

Forkortelser

FMI	Finske meteorologisk institutt
GLD360	Global Lightning Dataset
GRP	Glassfiberarmert plast
IEC	The International Electrotechnical Commission
LCTU	Lightning Current Transfer Unit
LDS	Lightning Detection System
LKDS	Lightning Key Data System
LS7002	Advanced Total Lightning Sensor
LMS	Lightning Monitoring System
LPS	Lightning Protection System
LSA	Lightning Sensor and Analyzer System
LPL	Lightning Protection Level
LPZ	Lightning Protection Zones
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SMHI	Svenske meteorologisk institutt
SPM	Surge Protection Measures
UALF	Universal ASCII Lightning Format

Symboler

A	Ampere
C	Coulomb
J	Joule
k	Kilo, 10^3
MW	MegaWatt
M	Mega, 10^6
μ	Mikro, 10^{-6}
m	Milli, 10^{-3}
Ω	Ohm

Figurer

2.1	Oppbyggingen til en vindturbin [41]	5
2.2	Nacellen på en vindturbin [91]	6
2.3	Lyn per 100 kvadratkilometer i Norge [9]	8
2.4	Maksimum verdier av lynparametere i henhold til LPL [61]	13
2.5	Minsteverdier for lynparametere i forhold til LPL [61]	13
2.6	Sannsynlighet for skade basert på lynbeskyttelsesnivå [61]	14
2.7	Skadefrekvens fra lyn for vindturbiner [94]	14
2.8	Rullende kulemetoden for bygning [21]	15
2.9	Lynnedslag i forhold til avstanden fra tuppen av vindturbinbladene [61]	16
2.10	Nedledermodeller [73]	17
2.11	Lyndeteksjon fra Polytech i vindturbinbladene [63]	22
2.12	Lyndeteksjonen til Phoenix Contact [14]	24
2.13	Sensorboksen til LSA fra Jomitek [38]	25
2.14	Illustrering av installering av sensorboksen på tårnet [39]	26
2.15	Mulige installeringspunkter for rogowski-spolen [16]	27
2.16	Den frittstående lyndeteksjonen til Vaisala [84]	28
2.17	Polytech sitt beslutningstre ved lyn [49]	29
3.1	Parameterne gitt i UALF-formatet [33]	31
3.2	Området for Roan vindpark, hentet fra GoogleMaps	32
3.3	Området for Frøya vindpark, hentet fra GoogleMaps	33
3.4	Området for Hundhammerfjellet vindpark, hentet fra GoogleMaps	33
4.1	Effektkurve des 21	41
4.2	Effektkurve jan-feb 22	41
4.3	Effektkurve mar 22	41
4.4	Trendkurve des 21	41
4.5	Trendkurve jan-feb 22	41
4.6	Trendkurve mars 22	41
A.1	Lyndata for Roan 2020 - 2022	II
A.2	Lyndata for Roan 2020 - 2022	III
A.3	Lyndata for Roan 2020 - 2022	IV
A.4	Lyndata for Roan 2020 - 2022	V
A.5	Lyndata for Frøya 2020 - 2022	VI

A.6 Lyndata for Hundhammer 2020 - 2022 VI

Tabeller

2.1	Sammenhengen mellom lynparametere, fysisk effekt og utsatte komponenter i vindturbin [43], [58]	10
2.2	Sannsynlighet for at turbinen tar skade etter gitt antall lynnedslag gitt lynbeskyttelsessnivået 2.1	14
3.1	Lynvarsler og alarmer i bazefield	34
4.1	Lyntetthet per år [lyn/km^2]	38
4.2	Positiv og negativ lyn 2020-2022	38
4.3	Prosentandel positiv og negativ lyn 2020 2022	39
4.4	Prosentandel lyn på sommer og vinter 2020 2022	39
4.5	Lyndata for Roan vindpark 2020 - 2022	40

1 Innledning

Dette kapitlet består av bakgrunnen for oppgaven, informasjon om oppdragsgiver ANEO, formålet og avgrensingene for oppgaven, problemstillingen og disposisjon for oppgaven.

1.1 Bakgrunn

De siste tiårene har mangel på energi blitt et fremtredende globalt problem. Fokus på utvikling av fornybare energikilder som vindkraft bidrar til å adressere denne knappheten, samtidig som den ivaretar økologisk bærekraft og implementerer prinsipper for bærekraftig utvikling [93]. Økning i ekstremvær har ført til flere hendelser av havari på vindturbiner. Den fremste årsaken til økningen er lynnedslag [71]. Lynbeskyttelsessystemer (LPS) har som formål å beskytte turbinen mot skader foresaket av lynnedslag, dette gjøres ved å lede strømmen fra nedslagspunktet til jord. Lyndeteksjon (LDS) for vindturbiner har som formål å varsle om lyn, måle strømkomponenter og behandle parameterne for lynet, slik at vindparkoperatørene får mulighet til å foreta risikovurderinger knyttet til lyn. Lyndeteksjonsprodusenter har egne navn på sine deteksjonssystemer. I denne oppgaven brukes LDS generelt om lyndeteksjonsteknologien.

Effektiv LPS for vindkraftverk er stadig viktigere, siden områder med gunstige beliggenheter for vindkraftverk ofte sammenfaller med områder med betydelig tordenværaktivitet [65]. Lynskader er den største årsaken til uventet nedetid i vindturbiner, og denne nedetiden er ansvarlig for tap av utallige megawatt av strømgenerering, i tillegg til store kostnader for reparasjon [25]. Vindindustrien, på grunn av den raske økningen i antall vindparker, leter etter løsninger som er pålitelige, kostnadseffektive og tilpasset lokale forhold. LPS og LDS bør sammen ta hensyn til slike behov, samtidig som det reduserer de viktigste risikoene ved vindenergianlegg, som er de økonomiske risikoene knyttet til potensiell skade [61].

1.2 Om ANEO

ANEO er et fornybarselskap som jobber med løsninger for overgangen fra fossile til fornybare løsninger, der hovedkvarteret er lokalisert i Trondheim, Norge. De har kraftproduksjon i totalt elleve vindparker, der Roan, Frøya og Hundhammerfjellet vindpark er de aktuelle vindparkene for denne oppgaven [4]. Alle de tre nevnte parkene er lokalisert langs Trøndelagskysten i Norge. Roan vindpark er den nest største vindparken på Fosen, og den består av totalt 71 vindturbiner med samlet installert effekt på 255.6 MW [7]. Roan har LDS i vindturbinene. Frøya vindpark ligger i Frøya kommune, og består av totalt 14 turbiner med en samlet installert effekt på 58.8 MW [5].

Hundhammerfjellet vindpark ligger i Nærøysund kommune, og består av totalt 14 turbiner med en samlet installert effekt på 54.7 MW [6]. Alle parkene har LPS for vindturbiner. ANEO har ikke benyttet LDS for vindturbiner tidligere.

1.3 Formålet med oppgaven

Formålet med denne oppgaven er å styrke ANEO sin kunnskap om LPS og LDS for vindturbiner. ANEO har kraftproduksjon i mange vindparker som ikke har installert LDS, og ønsker derfor større innsikt i teknologien. Det innebærer å gi innsikt i hvilke selskaper som tilbyr LDS for vindturbiner, samt hvilken type teknologi de tilbyr. Videre vil det bli gitt en evaluering om det er behov for LDS på Frøya og Hundhammerfjellet vindpark.

På Roan vindpark er det installert LDS. ANEO ønsker å øke kunnskapen om hvordan LDS kan brukes bedre til å forebygge skader og oppgaven vil gi en vurdering av hvordan LDS kan utnyttes på en mer effektiv måte.

Det er flere måter å beskytte en vinturbin ved bruk av LPS og det er omdiskutert hvilken teknologi som gir best beskyttelse for lynnedslag. Oppgaven vil presentere ulike måter å designe LPS på, og fordeler og ulemper med de forskjellige designene for å gi større kunnskap ved valg av systemer.

1.4 Avgrensning for oppgaven

Oppgaven diskuterer ikke historiske skader av turbiner fra lyn da dette ikke er tilgjengelig data. Sammenhengen mellom lynnedslag og skader ved spesifikke hendelser er derfor ikke blitt diskutert.

Det er forskjellige måter å designe LPS på og designet blir bestemt av turbinprodusentene. De enkelte teknologiene produsentene bruker, inkludert ANEO, er ikke offentligjort og sammenligning av disse er derfor ikke blitt gjort. Oppbygningen av LPS er bestemt etter IEC61400-24, noe som alle produsentene må følge, og forskjellene på oppbygningen beskrevet i standarden kan derfor sammenlignes uten å knytte de opp mot produsentene [61].

En avgrensning er at det kun er tilgjengelig data fra vindparkene for de siste tre årene, fra 2020 til og med 2022, da oppgaveskrivingen startet i januar 2023. Det ble vurdert til å derfor analysere lydndata for de gjeldende årene, basert på at dataene fra vindparkene og lydndata skulle bli sammenlignet.

1.5 Problemstilling

Oppgaven har som mål å analysere og evaluere bruken av lyndeteksjonsteknologi i Roan vindpark for å kartlegge forbedringsmomenter. Samtidig vil behovet for å implementere slike systemer i andre vindparker undersøkes. Videre vil det bli identifisert relevante leverandører som tilbyr lyndeteksjonsløsninger og vurdere deres egnethet i forhold til Aneo's behov. Oppgaven vil analysere ytelsen til forskjellige lynbeskyttelsessystem og implementering av nye teknologier. Til slutt vil det være avgjørende å identifisere viktige faktorer som bør vurderes når en velger deteksjons- og beskyttelsesmetoder, for å sikre optimal sikkerhet og drift av vindparker.

1.6 Disposisjon

Denne oppgaven er oppdelt i et litteraturstudie, en dataanalyse og en intervjudel.

Dataanalysen er utført for å avdekke hvordan LDS for vindturbiner fungerer i dag, og for å muliggjøre en beslutning om LDS burde installeres i de to andre parkene i fremtiden basert på analysert lyndata. Dette er gjort ved å sammenligne lyndata, og data for alarmer og varslinger gitt av LDS på Roan, og ved analysering og sammenligning av lyndata for alle tre vindparkene fra 2020 til og med 2022. Analysen av lyndataen vil gi et grunnlag på hvor robuste LPS i parkene trenger å være, sett i sammenheng med parametere gitt i de ulike LPS-nivåene som er satt av den internasjonale standarden IEC61400-24.

Litteraturstudien er gjort for å kartlegge den nåværende industrien innen LDS for vindturbiner, og for å utforske hvilke løsninger som er optimale for de gjeldene parkene. Videre blir det utført en kartlegging av ulike teknologier for LPS.

Intervjuene ble utført med kontaktpersoner fra ulike leverandører av LDS og LPS, dette for å få tilgang til informasjon som ikke er publisert offentlig. Intervjuene er ment for å gi en større innsikt i industriens perspektiver. Videre ble det utført for å høre deres erfaringer og meninger knyttet til LDS og LPS for vindturbiner, de internasjonale standardene og turbinskader forårsaket av lyn.

Nedenfor blir det vist et kort innblikk i innholdet til hvert av de 7 kapitlene i oppgaven.

Kapittel 2: Teorien skal presentere den teoretiske rammen rundt vinturbiner og lyn, samt konseptene bak de essensielle teknologiene LPS og LDS. Relevante firmaer og teknologier for teknologiene vil bli presentert.

Kapittel 3: Metoden forklarer datainnsamlings- og behandlingsprosessen for data fra Bazefield og Frost. Utføringen av den kvalitative metoden intervju vil bli forklart videre.

Kapittel 4: Resultater fra dataanalyse presenterer funn fra lyddata og lynalarmer.

Kapittel 5: Resultater fra intervjuer viser funn fra intervjuer med kontaktpersoner fra ulike selskaper.

Kapittel 6: Diskusjon vil diskutere fund fra resultatene og de forskjellige teknologiene presentert i teori. Den vil samtidig trekke inn refleksjoner og erfaringer samlet fra intervjuene og diskutere rundt fremtidige ageringer og investeringer av teknologiene.

Kapittel 7: Konklusjonen vil gi en oppsummering av fundene og videre anbefalinger, etterfulgt av en liste med referanser og vedlegg.

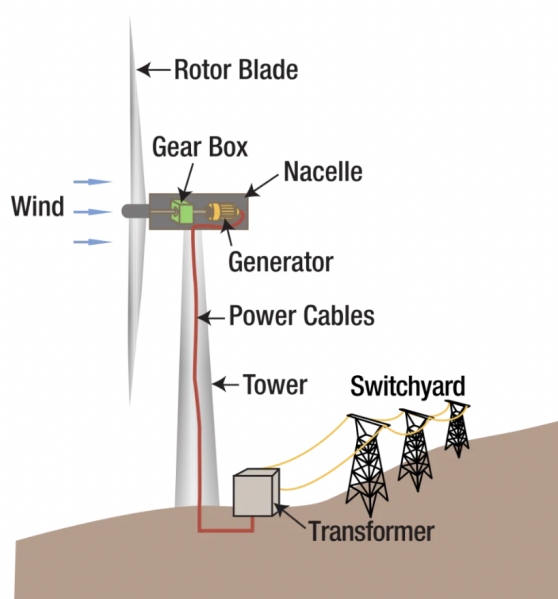
2 Teori

Dette kapitlet presenterer litteraturstudie, som er det teoretiske rammeverket for oppgaven. Første del er informasjon om oppbyggingen til en vindturbin, videre er det informasjon om lyn. Hoveddelen av teorien består av lynbeskyttelse, skader knyttet til lyn, og informasjon om ulike selskaper som leverer lyndeteksjon. Teoridelen avsluttes med informasjon om agering ved lyn, og informasjon om vindparkene som er aktuelle for oppgaven.

2.1 Vindturbin

Vindkraft har blitt utnyttet i mange tusen år, men dette har kun vært til å utføre mekanisk arbeid. Det er mekanisk arbeid folk flest”mest sannsynlig forbinder den tradisjonelle vindmøllen med. På 1970-tallet begynte utviklingen av det vi i dag ser på som moderne vindturbiner, og i 1978 ble verdens første multi-MW-turbin produsert i Danmark. Turbinen hadde installert effekt på 2 MW, og var 54 m høy. Samme år produserte vindturbinselskapet Vestas sin første vindturbin [27]. I dag utvikler Vestas vindturbiner med en total rotordiameter på 236m, og høyde på 280 m, der den installerte effekten er 15 MW [53].

I Norge var det, ved inngangen til 2022, 64 vindkraftverk med totalt installert effekt på 4650 MW. Det totale antallet turbiner for alle parkene i Norge er omtrentlig 1170 turbiner. I 2021 ble det produsert 11.8 TWh, noe som totalt utgjorde 7.5 % av den totale kraftproduksjonen i Norge. Dette var produksjonsrekord for vindkraft i Norge [54].



Figur 2.1: Oppbyggingen til en vindturbin [41]

2.1.1 Oppbygging

En vindturbin er en mekanisk innretning som omdanner energi fra vind til rotasjonsenergi [40]. Hovedkomponentene i en vindturbin er tårn, rotor, nacelle/motorhus, gir, generator, og nødvendige hjelpeaggregat og styresystemer, se figur 2.1 [2].

Tårnet i det fleste av dagens turbiner er en sylindrisk stålkonstruksjon. Diameteren på tårnet er i størrelseorden 3-4 m, men dette kan variere med størrelsen på turbinen og dets plassering.

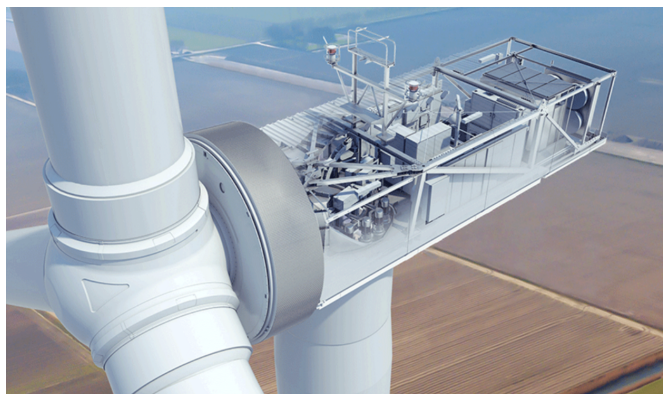
En gjennomsnittlig tårnhøyde er rundt 100 m [2], [27].

Rotoren er den roterende parten av vindturbinen, og den består som regel av tre blader som er montert på et nav. Navet er den sentrale delen av vindturbinen som bladene er festet til, og funksjonen er å gjøre det mulig for bladene å rotere. Bladene er hule, og de er laget av et komposittmateriale for å være både lette og sterke. Lengden på bladene kan variere ut i fra turbintype, men de kan ofte være rundt 80 meter lange. Bladene har form som en luftfoil for å være aerodynamiske [2]. Det er her vindenergien omdannes til rotasjonsenergi [27].

Nacellen er, som vist i figur 2.2, på toppen av tårnet. Den huser alle mekaniske og elektriske komponenter. To av de viktige komponentene er generatoren og girkassen. Generatoren omdanner rotasjonsenergien til elektrisk energi, mens girkassen øker hovedakselhastigheten til en hastighet som passer for generatoren. Nacellen dreier seg med vindretningen, slik at rotorplanet alltid står på tvers av vindretningen for å optimalisere virkningsgraden [2], [27].

2.2 Lyn

Lyn er en elektrisk utladning som oppstår når spenningen mellom et område med positiv ladning og et område med negativ ladning når en kritisk verdi, og det oppstår en elektrisk utladning mellom de to områdene. Lynet har ofte en varighet på rundt et halvt sekund [88]. Lyn kan utbedre seg mellom to skyer, innenfor én sky eller mellom skyen og bakken [24], [3], [52].



Figur 2.2: Nacellen på en vindturbin [91]

Skyer dannes ofte ved konveksjon. Konveksjon er når en luftmasse ved bakken varmes opp av sola. Den varme luften vil utvide seg og den får da lavere tetthet enn den omkringliggende luften, og av denne grunn vil den varme luften stige. Når den varme luften stiger opp i atmosfæren vil den etter hvert kjølnes og danne skyer [76], [52].

Lyn oppstår ofte i cumulonimbus-skyer [30]. Cumulonimbus-skyer er også kjent under navnet bygeskyer. De er store og tette, men der de har begrenset utstrekning i horisontal retning, har de stor vertikal utstrekning. Skytoppen kan være mellom 6000-9000 meter over havet, og utseendemessig kan toppen av skyen minne om en ambolt. Dette er et tydelig kjennetegn på et tordenvær i anmarsj. Den nedre delen av skyen består som regel av vanndråper, mens den øvre delen av skyen vanligvis består av iskrystaller. Disse forholdene er gunstig for dannelse av lyn. [75], [52]. Lyn oppstår ofte under storm, fordi kollisjoner mellom partikler av regn, is eller snø øker i skyen. Da blir den elektriske ladningen i den nedre delen av skyen ofte negativ, mens den øvre delen av skyen blir positiv [24], [52].

Lyn innad i én sky er den vanligste lyn-typen [95]. Utladningen skjer mellom den positivt ladde toppen av skyen, og den negativt ladde nedre delen av skyen. Dette foregår inne i skyen [52]. Lyn mellom to skyer oppstår mellom en positivt ladet topp i den ene skyen, og en negativt ladet bunn i en annen sky. Dette foregår i relativt stor høyde, og kan dermed ses over lange avstander [52]. Lyn fra sky til bakke er den farligste formen for lyn. Av alle oppståtte lyn vil ett av fire lyn slå ned i bakken [95], [52]. Den samlede strømstyrken varierer fra 5 til 200 kA i absoluttverdi [88].

Negativt ladde lyn er det vanligste lynet, og står for 95 % av alle lyn. Positive lyn skjer relativt sjeldent sammenliknet med negative lyn, og det står kun står for 5 % av alle lyn. Likevel blir positive lyn sett på med stor interesse, fordi de kan føre til større skade enn negativt ladde lyn. Dette er fordi lynet har opprinnelse i den øvre delen av skyen, og derfor er mengden luft utladningen må gjennom for å nå bakken mye større enn ved negative lyn. Sagt på en annen måte vil det elektriske feltet være mye sterkere, og den målte maksimale lynstyrken ofte være høyere for et positivt lyn sammenliknet med et negativt lyn. Prosentandelen negative lyn som bare har én utladning er derimot mellom 14 % og 21 %, der de resterende lynene ofte er to eller flere utladninger rundt relativt samme tidspunkt. Positive lyn har derimot vanligvis kun én utladning [52], [72].

I tillegg til at lyn både kan være negative og positive, er lyn også delt inn i nedadgående og oppadgående lyn. Nedadgående lyn er lyn fra sky til bakken. 90 % av nedadgående lyn er negativt ladde, mens positive nedadgående lyn representerer 10 %.

Oppadgående lyn er lyn som oppstår fra høye objekter på jordoverflaten, og beveger seg oppover mot en overliggende elektrifisert sky, og oppstår når det er et nærliggende sky-til-bakke lyn [70]. Dette er fordi det oppstår en plutselig elektrisk feltendring rundt det høye objektet, som fører til høy elektrisk feltstyrke, og som resulterer i en utladning [52], [19].

På verdensbasis er det anslått at det oppstår rundt 100 lyn per sekund. De ideelle forholdene for dannelse av lyn er varm, fuktig luft på bakkenivå, og kaldere luft på atmosfærenivå. Økende temperatur fører til sterkere konveksjon. Derfor oppstår det særlig mye lyn i tropiske strøk [30], [42].

2.2.1 Vinterlyn

Vinterlyn er et fenomen det fortsatt forskes mye på. Det er uenigheter og usikkerheter rundt hvordan slike lyn oppstår. Noen forskere mener at vinterlyn oppstår på samme måte som sommerlyn, som er beskrevet tidligere. Andre er uenige i dette, og mener at luften om vinteren er for kald til at luften kan bli konvektert [51].

2.2.2 Lyn i Norge

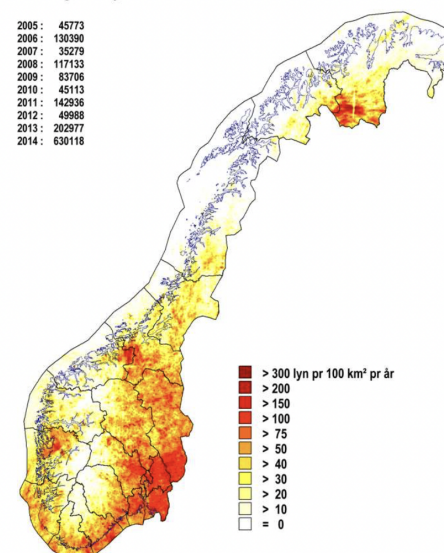
En teori er at vinterlyn oppstår ved at sterke vertikale luftbevegelser i en vinterstorm blander seg med varmere luft i et lavtrykksområde, for eksempel luft rundt nærliggende hav eller en stor innsjø [67]. Vinterlyn har høyere energi enn vanlige lyn om sommeren, og de kan ha en ladning som overstiger 300 Coulomb (C) [94].

Hvordan vinterlyn oppstår i Norge er derfor noe usikkert, men en teori er at kald luft fra Grønland møter varmere luft ved havet ved norskekysten, og danner tordenskyer. Det er Vestlands- og Trøndelagskysten som særlig blir rammet av vinterlyn i Norge [29].

LYNAKTIVITET 2005 -2014

Antall registrerte lyn: 1483413

2005 :	45773
2006 :	130590
2007 :	35279
2008 :	117133
2009 :	83706
2010 :	45113
2011 :	142936
2012 :	49988
2013 :	202977
2014 :	630118



Figur 2.3: Lyn per 100 kvadratkilometer i Norge [9]

I 2020 ble det totalt registrert 177331 lyn i Norge, og den gjennomsnittlige årlige lyntettheten i Norge er 0.2 lyn per kvadratkilometer. Totalt sett er det størst lyntetthet på Østlandet, og minst lyntetthet på kysten i Nordland [87], [55]. Dette er vist i figur 2.3.

Antall lyn fra sky til bakke er størst i juli, der det hovedsakelig er registrert flest lynnedslag på Østlandet, Sørlandet og Innlandet. I vintermånedene er det derimot Vestlandet og Trøndelagskysten som har størst antall registrerte lynnedslag. [45].

2.3 IEC standard

Standarder setter minimumskrav for trygghet, pålitelighet, effektivitet og tillit. *The International Electrotechnical Commission* (IEC) er en organisasjon som publiserer internasjonale standarder for all elektrisk, elektronikk og relaterte teknologier. IEC gir instruksjoner, retningslinjer, regler og definisjoner som brukes til design, produksjon, installasjon og vedlikehold av elektriske komponenter og systemer. [31]

2.3.1 IEC 62305:2010

IEC 62305:2010 gir generelle prinsipper som skal følges for å beskytte strukturer mot lyn. Dette inkluderer installasjon, innvendige komponenter, samt personer. Standarden består av fire deler som alle er av vesentlig betydning for lynbeskyttelse. Hver del har ulikt fokus og formål [60]. Del 1 gir en introduksjon til standarden, og beskriver i hovedsak hvordan en designer LPS i samsvar med de medfølgende delene av standarden. Del 2 fokuserer på risikostyring av lynnedslag. Del 3 viser til fire lynbeskyttelsesnivåer (LPL) av LPS og fokuserer på fysisk skade på konstruksjoner og livsfare. Del 4 omhandler beskyttelsen av elektriske og elektroniske systemer som er plassert i strukturer. Denne delen gir informasjon for design, installasjon, vedlikehold og testing av overspenningsvern (SPM) [48].

2.3.2 IEC 61400-24

IEC 61400-24 tar utgangspunkt i IEC 62305:2010, men tilpasser standarden til vindturbiner. IEC 61400-24 følger en lignende metode som IEC 62305 for å beregne risiko, med det er grunnleggende justeringer gjort i beregningen for å tilpasse seg høye strukturer/vindturbiner. IEC 61400-24 nevner at en vindpark kan øke lynaktiviteten i området. Turbinbladene er pålagt å produseres i henhold til IEC 61400-24, og må ha nedleder og reseptorer installert. [61]

2.4 Lynskader

I følge IEC61400-24 kan lyn bli betraktet som en strømkilde. Parameterne på lyn blir relatert til dimensjonering av et LPS og effektene de har på komponentene i turbinen [61]. I tabell 2.1 er det vist parametere målt ved lynnedslag og hvilke konsekvenser dette kan gi for vindturbinen. Maks strøm måles i kiloampere (kA), og er den maksimale verdien for strømmen til lynet. Ladeinnholdet måles i coulomb (C), som er tidsintegralet for strømmen, og gir den totale ladningen levert av lynet. Spesifikk energi måles i megajoule per ohm (MJ/Ω), og er tidsintegralet for kvadratet til lyn-strømmen. Den spesifikke energien identifiserer mulig oppvarming av komponenter i turbinen. Maks stigetid måles i kiloampere per mikrosekund ($\text{kA}/\mu\text{s}$), og er deriverte av strømmen med hensyn på tid. [43], [58].

Tabell 2.1: Sammenhengen mellom lynparametere, fysisk effekt og utsatte komponenter i vindturbin [43], [58]

Lynparameter	Relevant komponent for lynnedslaget	Fysisk effekt	Utsatte komponenter
Maks strøm [kA]	Maks strøm	Mekaniske krefter: spenningsøkning	Nacelle, kabler og koblinger, lynbeskyttelsessystem
Spesifikk energi [MJ/Ω]	Maks strøm	Termisk varmeeffekt	Blader, lager, lynbeskyttelsessystem
Ladning [C]	Langvarig strømning/ første impulsstrøm	Overflateerosjon, materialsmelte	Blader og lager (aerodynamikk, receptor, laminat)
Maks stigetid [$\text{kA}/\mu\text{s}$]	Impulsstrømninger	Spenningsøkning: Skjøter/koblinger av komponenter	Kontroll- og elektriske systemer
Antall lynnedslag på turbinen [n]	Impulsstrømninger	Slitasje	Vindturbin og komponentenes livstid

2.4.1 Skademekanismer

I vindturbiner er det spesifikke komponenter og konstruksjoner som er spesielt utsatt for lynskader. Komponenter som tårnet, girboksen og jordingsystemet betraktes ikke som utsatte komponenter, siden beskyttelse av disse relativt enkelt lar gjøre med velkjent teknologi. De utfordrende aspektene ved LPS omfatter bladene, nacellen, elektronikken i nacellen og legeringer. Potensielle skader på hver av de aktuelle komponentene i turbinen er vist i listen nedenfor hentet fra artikkelen ”*Lightning protection for wind turbines*”. Videre vil det bli gått dypere inn i skadene komponentene [22].

- Bladene: Lynnedslag kan forårsake strukturell skade som resulterer i havari og lang nedetid.
- Nacellehuset: Elektrisk gnister og lokale strømmer kan forårsake fysisk skade.
- Elektronikken innen i nacelle: Elektroniske komponenter som utgjør en del av lynavledningen til jorden, kan oppleve skadelige strømmer; i tillegg kan disse systemene skades av induerte elektromagnetiske felt forårsaket av lynstrømmer.
- Legeringer: Lynstrøm og gnister kan forårsake overflateskade på legeringskomponenter, noe som kan føre til degradering og reduksjon i levetid.

Bladene

Vindturbinblader er de mest sårbare delene av en vindturbin. Bladene utsettes for effekten av elektriske felt som er assosiert med lynnedslag. Bladene er utsatt for et lynmiljø med varierende alvorlighetsgrad og hyppighet langs bladlengden, hvor forekomsten av direkte lynnedslag er høyest på tuppen av bladet og avtar mot roten. [61]

Bladskader har stått i fokus på grunn av de høye kostnadene for erstatning og lange reparasjonstider. Vindturbinbladene er som regel laget av komposittmaterialer, og er ikke-ledende. Dette betyr at et blad som tar et direkte lynnedslag, ikke enkelt kan absorbere og overføre elektrisk energi, som ofte fører til store skader. Videre har bladene en hul struktur for å redusere total bladvekt. Det er som regel normalt for et lynnedslag å utbrede seg over bladet fremfor gjennom den interne strukturen. [22]

Nacelle og elektroniske systemer

Et annet kritiske element i lynbeskyttelse, er beskyttelse av nacellen og komponentene inni. Nacellen blir utsatt for direkte lynnedslag og induerte spenningspulser som følge lynnedslag i bladene. Komponentene inni nacellen er halvledende elektronikker som er generelt sensitive for økninger i spenning og strømpulser. Slike elektroniske systemer sårbare for direkte strøm og induert strøm fra lynnedslaget. [22]

Lager

Lager brukes for å tillate rotasjon av nacellen og navet. Lagrene gir den fysiske forbindelsen mellom bladene og navet, og mellom navet og nacellen. Som et resultat er lagrene ofte inkludert i den mest direkte elektriske banen fra et lynslag til jord. Generelt vil 90 % av lynstrømmen gå gjennom lageret resterende 10 % vil gå igjennom girkassen. [22]

2.4.2 Kostnader ved lynskader

Skadene fra lyn kan være svært omfattende og kan kreve mye tid og penger å reparere. *GCube*, den ledende leverandøren av forsikringstjenester for fornybar energi, publiserte en rapport i 2013 som oppsummerer de vanligste forsikringskravene knyttet til vindenergi i USA. Rapporten viser til at lynskader er en av de mest rapporterte skadene på 23 % og dette relateres som oftest til skader på bladene. I følge Gcube har en gjennomsnittlig skadeutbetaling på et blad ligget på ca. 240 000 USD. Dette omfatter da reparasjon, utskifting, driftsavbrudd og andre relaterte avgifter og utgifter før egenandelen til forsikringstakeren er trukket fra. De høye kostnadene skyldes at turbinen må stanses og skaden repareres, noe som kan involvere tungt maskineri som kraner. [11] I andre kvartal i 2020 registrerte Vestas garantikostnader på ca. 175 MEUR, og rapporterte at ”høyintensitetslyn” var årsaken. Skadene skjedde på et begrenset antall modeller men de har ikke valgt å gå nærmere på modelltype og skadeomfang. [66]

2.5 Lynbeskyttelsesnivå

I IEC 62305 er det fire LPL-nivåer angitt, disse er vist i figur 2.4 og 2.5. LPL-nivåene bestemmer robustheten av LPS. LPL 4 vil kun beskytte mot lyn med en maksstrøm mellom 16 kA og 100 kA, intervallet som nivået dekker vil bli større ved høyere LPL. For hvert nivå er det angitt maksimumsverdi for lynstrømparameterne. Dette kan anvendes inn mot å utforme LPS-komponenter. LPL som er nødvendig bestemmes utifra antall hendelser på en struktur og danner grunnlaget for risikoberegning. Antall hendelser beregnes på bakgrunn av lynaktiviteten i området og størrelsen på strukturen. Strukturene i området rundt har også en innvirkning, siden lignende strukturer i området kan redusere muligheten for at strukturen som vurderes blir truffet.

Figur 2.4: Maksimum verdier av lynparametere i henhold til LPL [61]

Current parameters		Symbol	Unit	LPL			
				I	II	III	IV
First positive short stroke	Peak current	I	kA	200	150	100	
	Charge	Q_{SHORT}	C	100	75	50	
	Specific energy	W/R	MJ / Ω	10	5,6	2,5	
	Time parameters	T_1 / T_2	$\mu\text{s} / \mu\text{s}$	10/350			
First negative short stroke ^a	Peak current	I	kA	100	75	50	
	Average steepness	di/dt	kA / μs	100	75	50	
	Time parameters	T_1 / T_2	$\mu\text{s} / \mu\text{s}$	1/200			
Subsequent short stroke	Peak current	I	kA	50	37,5	25	
	Average steepness	di/dt	kA / μs	200	150	100	
	Time parameters	T_1 / T_2	$\mu\text{s} / \mu\text{s}$	0,25 / 100			
Long stroke	Charge	Q_{LONG}	C	200	150	100	
	Time parameter	T_{LONG}	s	0,5			
Flash	Charge	Q_{FLASH}	C	300	225	150	

^a First negative stroke concerns only calculations and not testing.

Figur 2.5: Minsteverdier for lynparametere i forhold til LPL [61]

Interception criteria			LPL			
	Symbol	Unit	I	II	III	IV
Minimum peak current	I	kA	3	5	10	16
Rolling sphere radius	r	m	20	30	45	60

Andreutgaven av IEC 61400-24, ble gitt ut i 2019. Den anbefaler at alle komponenter på turbinen skal være designet for LPL 1. Dette er med mindre risikovurdering, i henhold til kausul 7, viser at lavere beskyttelsesnivå enn LPL 1 er økonomisk optimalt for enkelte turbiner og parker [61]. Ofte blir vindturbinbladene beskyttet med høy LPL, mens andre deler som er reparerbare eller utskiftsbare til en lavere kostnad kan ha lavere LPL, som LPL 2-eller 3. Det er viktig å bemerke at for å overholde et bestemt LPL er det viktig med vedlikehold og inspeksjoner gjennom hele turbinens levetid.

Figur 2.6: Sannsynlighet for skade basert på lynbeskyttelsesnivå [61]

Characteristics of wind turbine	Class of LPS	P_{LPS}
Wind turbine not protected by LPS	-	1
Wind turbine protected by LPS	IV	0,2
	III	0,1
	II	0,05
	I	0,02
Wind turbine with lightning protection of blades and nacelle conforming to LPS I with complete protection of any nacelle roof installations against direct lightning attachment and the tower acting as a continuous natural down conductor.		0,01

Sannsynligheten for at turbinen skal bli skadet ved lynnedslag er avhengig av lynbeskyttelsesnivået vist i tabell 2.6. Utifra tabellen kan en regne ut hva som blir sannsynligheten for at turbinen tar skade etter gitt antall lynnedslag, som er vist i formel 2.1. Det vil for eksempel si at etter 4 lynnedslag på samme turbin er sjansen for at turbinen tar skade lik 10 %.

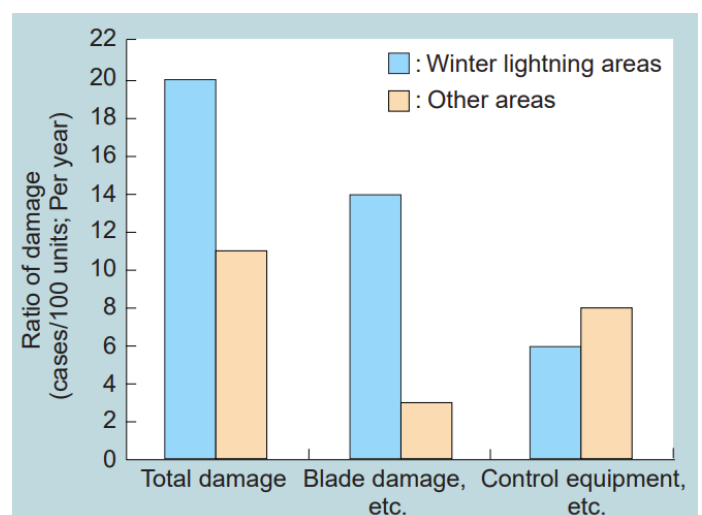
$$p = 1 - (1 - P_{LPS})^n \quad (2.1)$$

Tabell 2.2: Sannsynlighet for at turbinen tar skade etter gitt antall lynnedslag gitt lynbeskyttelsesnivået 2.1

$$P_{LPS} \left| \begin{array}{l} \text{sannsynlighet for gitt lynbeskyttelsesnivå} \\ \text{antall lynnedslag} \end{array} \right. n$$

2.5.1 LPL ved vinterlyn

Det japanske nasjonale forskningsbyrået *NEDO* publiserer rapporter om skader på vindturbiner, lynbeskyttelse samt fremtidig teknologi innen fornybar energi. I rapportene skriver *NEDO* at mesteparten av skader på vindturbiner fra lyn skyldes vinterlyn på kysten [82]. Figur 2.7 illustrer differansen mellom skader fra lyn på parker som er utsatt for vinterlyn og blader som er i områder uten vinterlyn [94]. Fra *NEDO* sin rapport *Guideline for wind turbines in Japan* konkluderer de med at IEC 61400-24 LPL 1 er ikke tilstrekkelig for vinterlyn da dette gir større skader [82].



Figur 2.7: Skadefrekvens fra lyn for vindturbiner [94]

2.6 LPS i vindturbiner

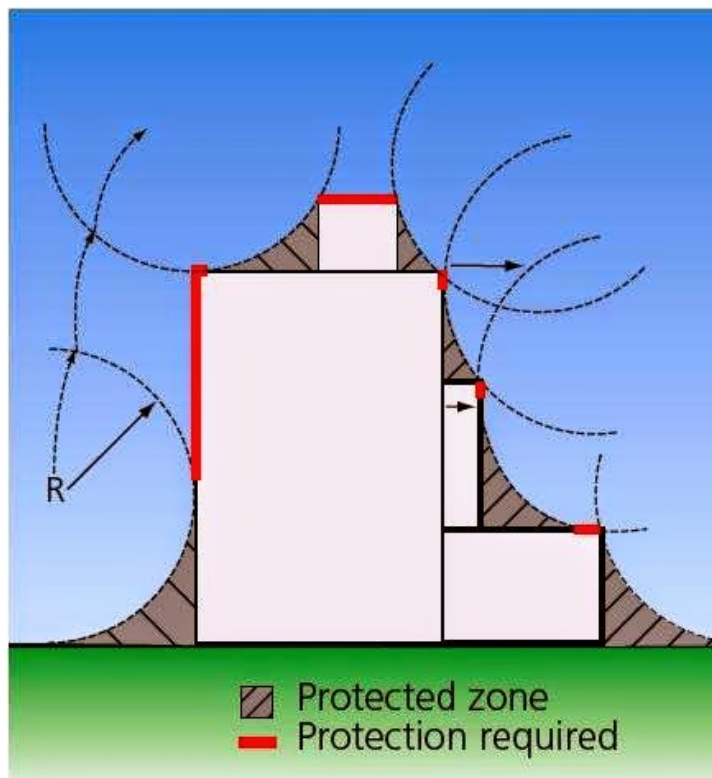
LPS består av innvendig og utvendig beskyttelsessystem. Systemet består av luftavleder og reseptorer som leder lynet inn til nedledere i turbinbladene og videre til jordingssystemet som tar strømmen gjennom tårnet ned til jord. Komponentene i LPS vises i listen under.

- Luftavleder- og nedlederanlegg i rotorbladene.
- Lufttermineringssystemer for å beskytte nacellestrukturer, nacellen, og nav.
- Tårnet brukes som lufttermineringssystem og nedleder.
- Jordingssystem bestående av en fundamentjordelektrode og en ringjordelektrode.

2.6.1 Lynbeskyttelsessoner

For å sikre tilstrekkelig beskyttelse av alle komponentene i en vindturbin blir turbinene delt inn i områder som definerer hvor mye området eksponeres for lyn. Disse områdene kalles lynbeskyttelsessoner (LPZ) og definerer nivået av påvirkning lynnedslag kan ha på komponentene i sonen. LPZ-ene har som formål å sikre at alle komponentene i en vindturbin

beskyttes tilstrekkelig mot lynnedslag ved å påføre lynbeskyttelsesmetoder på hver enkelt komponent. Dette inkluderer komponenter som bladdeler, maskiner, elektriske systemer og kontrollsystemer, og tar hensyn til virkningen lynstrømmen kan ha disse komponentene innenfor sonen de er plassert. [61]



Figur 2.8: Rullende kulemetoden for bygning [21]

Distance from tip m	Range of distribution of direct strikes %
0 to 2	71 to 99
2 to 4	0 to 10
4 to 6	0 to 10
6 to 8	0 to 4
8 to 10	0 to 4
Rest	0 to 4

Figur 2.9: Lynnedslag i forhold til avstanden fra tuppen av vindturbinbladene [61]

Den rullende kulemetoden kan brukes til å bestemme potensielle nedslagspunkter på en vindturbin. I figur 2.8 blir det vist hvordan kulemetoden brukes til å bestemme potensielle nedslagspunkter. Langs turbinbladene og på nacellen er det montert lynreseptorer som videre leder strømmen til jordingssystemet inne i turbinen. Nacellekonstruksjonen bør integreres i LPS for å sikre at lynnedslag i nacellen treffer enten naturlige metalldele som er i stand til å motstå denne påkjenningen, eller et lufttermineringssystem som er utformet for dette formålet. Innvendig i turbinen er det LPS for å beskytte de elektriske komponentene og kontrollsystemet mot induisert magnetisk og elektrisk felt fra lynnedslaget.

2.6.2 Lufterminasjonssystem

Lufterminasjonssystemene for lynnedslag er plassert på overflateområdene på bladet. Systemet kan være en del av bladstrukturen, komponenter implementer i bladet, eller en kombinasjon av begge. Analyse av tidligere lynnedslag har vist at flertallet av lynnedslagene skjer på de ytre delene av bladet. Dette fremgår i figur 2.9 hvor det prosentvis viser hvor langt fra bladtuppen lyn treffer. Kulemetoden fra IEC 62305:2010 tar ikke hensyn til lynnedslag innover på turbinbladene og etter IEC 61400 skal denne metoden derfor ikke brukes på bladene [61].

Lynbeskyttelse av turbinblader

Produsentene har utviklet metoder for å motvirke problemene som oppstår på grunn av ikke-ledende materialer og hule bladdesign. En tilnærming er å inkludere interne nedledere, ledende overflater og/eller nett, og reseptorer. [73]

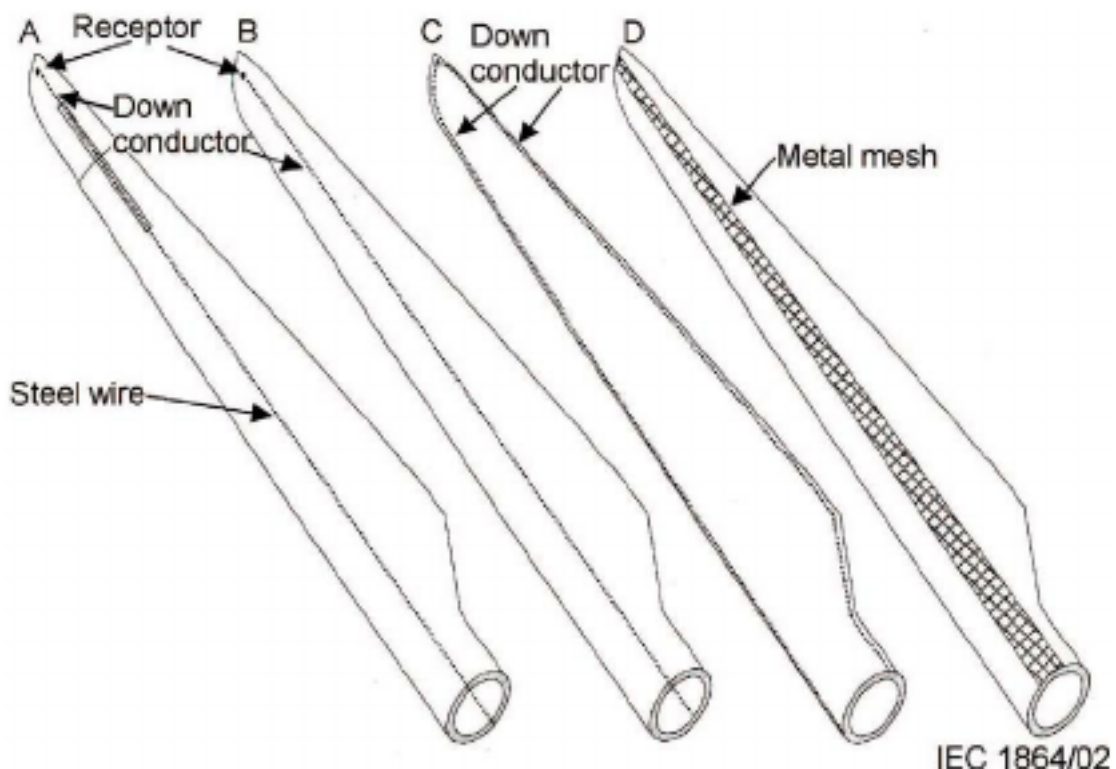
Bruken av en ledende overflate kan virke som en enkel måte å redusere skade på bladene ved lynnedslag. Alternativet med å bruke et metallisk belegg på bladets ytterflate er ofte upraktisk fordi belegget må være tykt nok til å lede lynstrømmen uten å selv bli skadet. Et slikt belegg bidrar også til stor vektøkning på bladene. Videre har det oppstått problemer med erosjon og

korrosjon på slike belegg når de har blitt truffet av lyn. [73]

Et multi-komponentsystem av overflateledere, lynreseptorer og internt ledende strukturer kan bli brukt som lynbeskytter for bladene. En LPS-design med en ekstern nedleder og utvidet metallfolie kalles *mesh*. Det elektriske ledende mesh-nedlederen er koblet via lynreseptorer til en intern nedleder, noe som gjør at lynstrømmen kan bevege videre ned til jordingssystemet. Dette oppsettet reduserer antallet nødvendige potensialutjevningssystemer og gir beskyttelse mot direkte lynnedslag. Potensialutjevning bidrar til å jording av elektriske komponenter for å unngå spenningsoppbygging mellom systemene. I tillegg til dette har moderne mesh økt strekkstyrke, noe som betyr at de kan bøye seg uten at strekknivået overstiger den designmessige ytelsen til det utvidede metallfolien [50]. Eksperimentell testing har vist at karbonfiber-mesh medfører at lynstrømmen sprer seg utover det utsiden av bladet istedenfor å gå inn i turbinen [92]. Denne løsningen krever at ledende materiale dekker kun tuppen av bladet, noe som drastisk reduserer den totale vekten av mesh-materialet [22].

Nedleder

Nedleder består av en linje med små metallsegmenter. Når metallsegmentene eksponeres for lyn vil det formes en ionisert kanal på overflaten som leder lynstrømmen til jordingssystemet. Metallsegmentene er typisk 0.3 - 10 mm vide og kan bøyes etter bladet. [73]



Figur 2.10: Nedledermodeller [73]

I følge IEC 61400-24 kan nedlederen plasseres enten på utsiden eller innsiden av turbinbladet [61]. I figur 2.10 er det vist forskjellige løsninger for nedlederen, der typene A og B har nedledere montert på innsiden av bladet med en reseptor montert på utsiden i tuppen av bladet. Typene C og D har nedledere montert på utsiden av bladet. Type A og B med kun én nedleder har historisk blitt mest brukt på turbinblader opptil 20 meter. For lengre blader på opptil 60 meter har produsenter ofte brukt typer som C, som har to utvendige nedledere [73].

Ved lange blader er det blitt flere skader knyttet til innvendige nedledere, som kan skyldes at lynet ved direkte nedslag kan trenge gjennom laminatet i den innvendige nedlederen. Det er blitt diskutert om dette skyldes ukontrollerte elektriske overslag som dannes i de innvendige elektriske ledende delene, som nedledere og lagere. Når elektriske overslag treffer de indre metallkomponentene i bladet, vil de spre seg like raskt som de inntreffer i reseptorene. Når den interne utladningene treffer den indre flaten av bladet vil de øke den elektriske belastningen som laminatet opplever. [73]

Den økte belastningen er ikke et problem for et begrenset antall lyn som treffer reseptorene, men når bladet er utsatt for flere påvirkninger i løpet av hele levetiden, kan belastningen til slutt utvikle seg til elektrisk nedbrytning. Den fysiske påvirkningen på bladet vil være begrenset, men skadene som følger med påfølgende lynstrøm vil være ødeleggende. Slike utladninger kan forsinkes ved å innkapsle den interne nedlederen og andre ledende deler i bladet med elektrisk isolerende materiale, og dermed redusere problemet. [73]

Ved innvendig nedleder trengs det flere potensialutjevninger inni bladet for å håndtere lynstrømmen i konstruksjonen inne i bladet. Et slikt system har tradisjonelt også vært foretrukket da det er lettere å installere og vedlikeholde, i tillegg til å ikke forstyrre aerodynamikken over turbinbladene. [73]

Tidligere har vindturbin produsentene har ofte valgt å installere nedledere på den indre siden av bladet for å bevare den aerodynamiske ytelsen til bladet. En publikasjon fra *University of strathclyde, department of aerospace engineering* konkluderer basert på simulering at utvendig nedleder har minimal påvirkning på kraftgenerering [1]. Selskapet Polytech har utført simuleringer i henhold med IEC 61400-24 der de så på maksstrøm ved utvendig og innvendig nedleder. Resultatene fra simuleringen viste at ved bruk av en ekstern nedleder var det i gjennomsnitt 83 % lavere maksimal strøm gjennom de kritiske strukturelle delene av bladet. [50]

2.6.3 Innledning LPS

Det interne LPS er anvendt til å lede lynstrømmen til jordingssystemet, samtidig som systemet beskytter mot induert magnetiske og elektriske felt fra lynnedslaget. Lynbeskyttelse av nacellen og andre strukturelle komponenter i vindturbinen skal være laget ved å bruke store metallstrukturer for lufttermineringssystemet. Det interne LPS inkluderer et Jordingssystem og ekvipotensielle bindinger. Videre er de elektriske komponentene inne i turbinen vernet av SPM og induert elektromagnetisk vern. [47]

Lynbeskyttelse av nacelle og elektroniske systemer

Nacellehuset kan brukes som en Faradaybur for å beskytte elektroniske systemer mot både direkte støt og induerte spenninger. Et Faradaybur innebærer i denne sammenheng å plassere mange ledende materialer symmetrisk rundt hele konstruksjonen og på den måten verne komponenter plassert inne i buret fra direkte lynnedslag [81]. For naceller konstruert i ikke-ledende nacellematerialer, som glassfiberarmert plast (GRP), kan metallkomponenter som nett benyttes for å skape en Faradaybur. [22]

For systemer som ikke krever fysiske tilkoblinger utenfor Faradayburet, kan optiske interkoblinger brukes som en bro mellom den beskyttede elektronikken inne i Faradayburet og miljøet utenfor. Optiske tilkoblinger kan være egnet for kommunikasjonssystemer, men det er ikke mulig å bruke optiske tilkoblinger gjennom Faradayburet i alle sammenhenger. For eksempel krever kabler som overfører strøm fra turbingeneratoren en fysisk ledende tilkobling. SPM kan installeres for ledninger og kabler som krysser Faradayburs fysiske grense. Disse kan bidra til å minske størrelsen på overspenninger eller maks strøm som elektroniske systemer kan utsettes for. [22]

SPM er ikke i stand til å fullstendig isolere elektroniske systemer innenfor et Faradaysbur fra lynnedslagseffekter, og skade på elektroniske systemer innen Nacelle er en ledende årsak til turbinhavari. Derfor bør en ved design av disse elektroniske systemene ta hensyn til praktiske reparasjonsmuligheter. For eksempel bør elektroniske systemer som er sårbare for skade være tilgjengelige og designet på en modulær måte for å gjøre det enkelt å erstatte skadede komponenter. [22]

Overgangsenhet for lynstrøm

En Lynstrømsovergangsenhet (LCTU) for vindturbin leder lynnedslagsstrømmen fra vindturbinens første komponent på turbinen som er blitt truffet av lyn til den neste. LCTU-systemet beskytter bladlagerne, hovedlageret og dreielagerne mot høy lynstrøm [47]. Hvis lynet slår ned i turbinbladet vil lynet bli ledet til turbinens nacelle og videre fra nacellen til tårnet som vil videre bli ført til jordingssystemet. Jordingssystemet er designet for å slippe ut lynnedslagsstrømmen til omgivelsene rundt bakken [23].

Lynbeskyttelse av lagerne

Lagrene har en relativt robust elektrisk bane og opplever sjelden katastrofal svikt på grunn av lynstrøm, men det kan selvom oppstå under lynnedslag. Lynstrøm gjennom lagre kan avveie gjennom smørefluid eller luftgap og forårsake korrosjon på lageroverflaten. Dette kan redusere driftslevetiden til et lager. [22]

2.6.4 Nye teknologier

LPS-teknologier er fortsatt i økende utvikling, og forskes på måter å beskytte turbinen bedre mot lyn. LPS er installert i turbinen når den blir satt sammen av produsentene, og er derfor komplisert å bytte ut. Måter å forbedre LPS som er allerede i turbinene, uten å bytte ut systemet er derfor av stor interesse.

Striketape

Striketape er en teknologi utviklet av det amerikanske teknologiselskapet *Weather Guard Lightning Tech*. Teknologien skal forbedre mottakereffektiviteten ved å lede lynet trygt til reseptoren [28]. Striketape er teipet med retning mot mottakeren. Dette skaper en enkel vei for lynet å følge, og leder det dit en ønsker det. Målet er å begrense overflateområdet på bladspissen som ikke har lynbeskyttelse. Striketape er en segmentert lynavleder som er laget av små metallskiver eller segmenter som er plassert langs turbinbladet. Striketape skaper en serie gnistgap der elektrisiteten hopper fra gap til gap. Dette skaper en ionisert luftkanal. Mesteparten av lynenergien følger den ioniserte luften til reseptoren, og bare en liten prosentandel reiser gjennom metallsegmentene selv. På grunn av lynavlederen flyter den varmen gjennom luften, noe som dramatisk reduserer varmen som går inn i bladet [28]. Det danske firmaet *Jomitek* har patent på en lignende striketape-teknologi [37].

Drone

Økt effektivitet for arbeidere er en av hovedgrunnene til at droner er blitt mer og mer brukt i vindindustribransjen. Teknikere kan undersøke potensielle skader øyeblikkelig uten å måtte bruke tidskrevende måter som å klatre inn i turbinen.

Ved reparasjon inni turbinbladene kan spesialiserte innendørsdroner som *Flyabilitys Elios 3* navigere i kamrene og der raskt innhente høyoppløselige bilder og data i stedet for å fysisk krabbe inn i hvert blad [89]. Ved hjelp av drone kan teknikere identifisere lynskader og andre feil som påvirker funksjonaliteten og levetiden til turbinen [74].

Voliro T har en ny teknologi der droner er utstyrt med LPS-tester. Dette er en måleprobe som brukes til å opprette kontakt med LPS-reseptoren. Når sensoren på *Voliro T* er i kontakt med LPS-reseptoren kan målingen av motstand registreres. Målingen kan utføres i løpet av en time, noe som sparer mye tid i forhold til tradisjonelle tilstandssjekker [90]. Etter at drone-dataen er innhentet, kan teknikere analysere det framkomne. Et resultat av dette igjen kan være både kortsiktige og langsiktige tiltak inn mot å opprettholde vindturbinenes integritet. [74]

2.7 Lyndeteksjon for vindturbiner

I IEC 61400-24 er det oppgitt at det anbefales at vindturbiner er utstyrt med systemer som er i stand til å både oppdage lyn, måle strømkomponenter samt behandle parameterne for lynet. Et slikt system har flere hensikter. Formålet er å gi informasjon til operatøren om lyn på vindturbinen, gi innspill til drifts- og vedlikeholdsregimer, og til å gi data om lynet. Dette igjen bidrar til å kunne foreta risikovurderinger, som for eksempel å unngå farlige aktiviteter når det er fare for lyn. [61]

Standarden deler definisjonen inn i to typer, *Lightning detection systems* (LDS) og *Lightning measurement systems* (LMS). *Lightning detection systems* har to ulike definisjoner. Tordenværvarslingssystemer som oppdager lyn ved å overvåke de elektrostatiske og elektromagnetiske feltene. Den andre definisjonen er lynlokaliseringssystemer som oppdager individuelle slag i lysglimt. LMS er definert som måling av lynhendelser og dens egenskaper, der komponentene er installert på turbinen. Disse systemene kan variere fra enkle elektromekaniske hendelsestallere til mer komplekse systemer som måler og analyserer lynparametere. [61] Parameterne som måles er vanligvis maks strøm (kA), polariteten til lynet, ladeinnhold (C), spesifikk energi (MJ/Ω) og maks stighetid (kA/μs).

SCADA står for *Supervisory Control and Data Acquisition*. Det er et system som består av programvare- og maskinvareelementer for å kontrollere prosesser lokalt eller på avsidesliggende steder. SCADA-systemet overvåker prosesser, samler inn informasjon og måledata i sanntid samt lagrer dataen for mulig fremtidig analyse. SCADA-systemet gjør det også mulig å samhandle direkte med smarteenheter og sensorer gjennom HMI-programvare (Human-Machine Interface). [83]

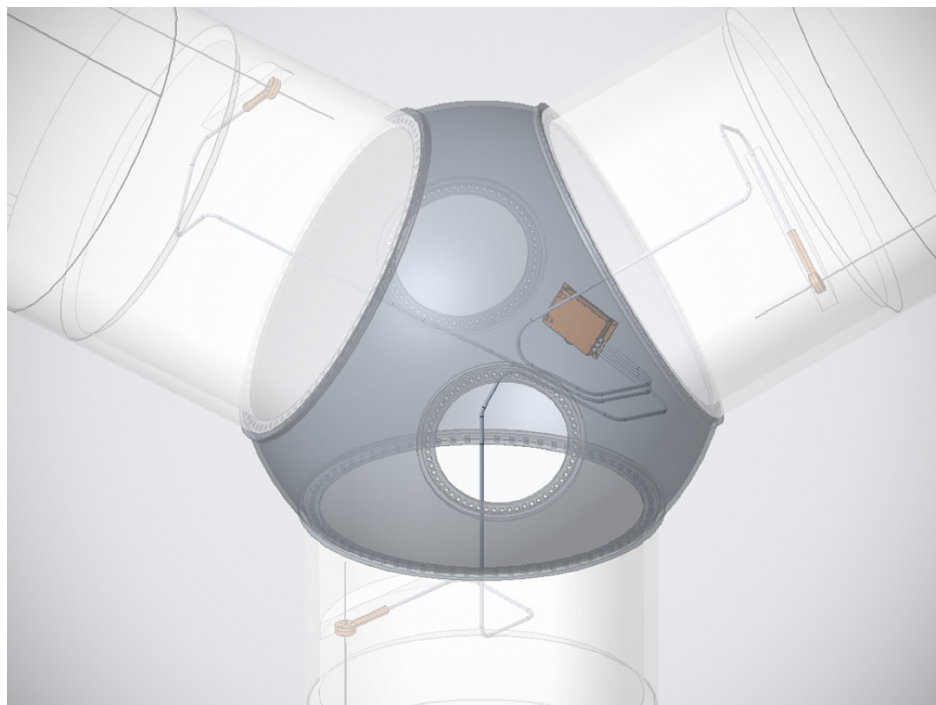
2.7.1 Kartlegging av selskaper

Det har oppstått økt interesse for LDS-teknologier de siste årene. Dette har ført til at flere selskaper har satset på utvikling av teknologien.

Polytech

Polytech ble grunnlagt i 1994, og har i dag kontorer i Danmark, Tyskland, Kina og Mexico. De jobber med å finne løsninger som forbedrer holdbarheten og ytelsen til vindturbiner [64].

Lightning Key Data System (LKDS) er lyndeteksjonen som tilbys av Polytech, og er spesielt designet for vindturbiner. Målet med LKDS er at vindparkeierne trygt kan planlegge inspeksjonene, redusere produksjonstap ved unødvendige turbinstopp og å unngå store følgeskader fra lynnedslag [63].



Figur 2.11: Lyndeteksjon fra Polytech i vindturbinbladene [63]

Parametere systemet måler er maks strøm, ladeinnhold, polariteten til lynet, spesifikk energi og maks stigetid. LKDS måler lyn som har en maks strøm mellom 100 A og 300 kA. LKDS er designet for å forbedre detaljenivået på lynmålingen, og er beregnet for å oppdage mindre opp- og nedoverslag som over tid kan skade LPS og bladstrukturen, i tillegg til de større lynnedslagene [49].

LKDS kan tilpasses forskjellige turbintyper ved at deteksjonskomponentene er koblet sammen med fleksible pluggen. Tilpassingen til turbinene kan gi en mer korrekt måling og lengre levetid. På bladene er det festet rogowskispole-sensorer, som måler lynstrømmen [62]. Målingene kan stoppe turbinen momentant og videresende registrerte lyndata [63]. I navet og nacellen er det signal-og datakomponenter som videresender data til det gjeldende nettverket, for eksempel SCADA [63]. Figur 2.11 viser rogowski-spole i bladene, samt datainnsamler i navet.

LKDS vil med Polytech-View programvaren gi umiddelbar varsling. Det fungerer ved at systemet varsler operatøren direkte når det overskrider en viss terskelverdi, inkludert lyndata dersom det er ønskelig. [63]

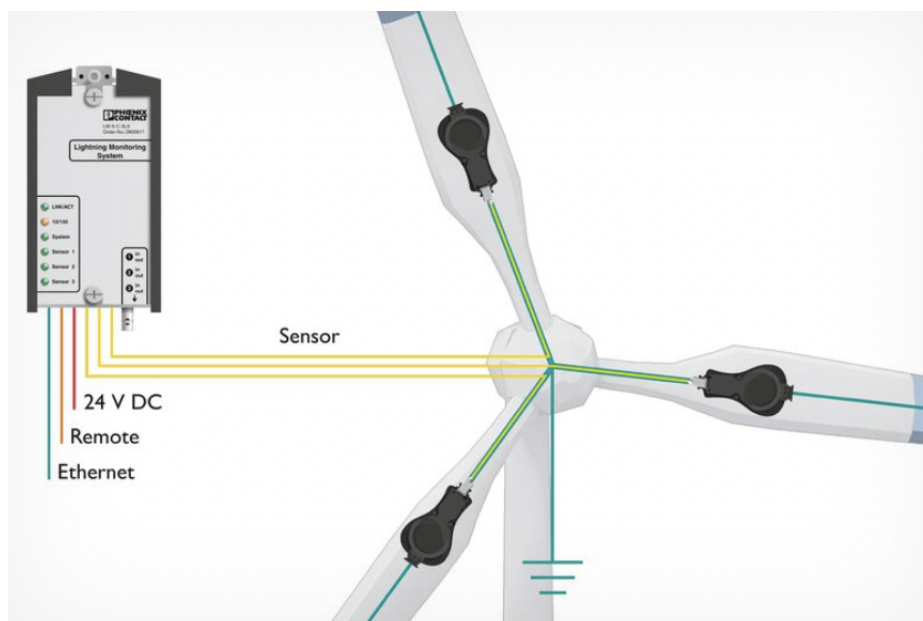
Phoenix Contact

Phoenix Contact er et selskap som verdensomspennede med et hovedkontor i Tyskland. Selskapet tilbyr lynmålingssystemet *Lightning monitoring system* (LMS). LMS måler lynstrømmen fra lynnedslag. [13]

LMS består av en evalueringsenhet, opptil tre sensorer samt optiske tilkoblingskabler, se figur 2.12. Ved montering er det en egen adapter for sensorene som skal monteres på vindturbinbladene [14]. Sensorene er montert på nedlederne som fører lynstrømmen, og registrerer magnetfeltet. Kablene overfører måleresultatene til evalueringsenheten, der det optiske signalet konverteres til et elektrisk signal med O/E-modul [32]. Basert på disse oppnådde verdiene, bestemmer evalueringsenheten lynparameterne [77].

Deteksjonssystemet måler maks strøm mellom 1 kA og 400 kA [12], [14].

LMS fra Phoenix Contact måler maks strøm, maks stigetid, polariteten til lynet, spesifikk energi og ladeinnhold. Parameterne på de målte lynene lagres i en datafil som kan lagre opptil 500 lynhendelser.



Figur 2.12: Lyndeteksjonen til Phoenix Contact [14]

Indikatorer gis i form av fargesignaler, som skal kommunisere hva situasjonen er for både systemet og de ulike sensorene. For systemet betyr grønt lys at systemet er klart, og at målingen er aktiv. Blinkende grønt lys betyr at systemet starter opp, men at målingen ikke er aktiv. Oransje lys betyr at vedlikehold er nødvendig, men at målesystemet fortsatt er aktivt. Blinkende oransje lys betyr at det er målt verdi som må innhentes, altså at systemet er utløst. Rødt lys betyr at det er en systemfeil, og målingssystemet er helt eller delvis inaktivt [12].

For sensorene betyr grønt lys at det er klart for måling, og at målingssystemet er aktivt. Blinkende grønt lys vil si at LED-ene justerer seg selv, og målingen er inaktiv. Oransje lys tilsier at LED-strømmen er høy, og vedlikehold kreves. Rødt lys betyr at det er feil på kanalen, og målingen er inaktiv. Hvis lyset er av, betyr det at kanalen er tatt av, og målingen er inaktiv [14]. De oppgir er det viktig å rengjøre kontaktene, fordi skitne kontakter kan påvirke ytelsen til en overføringsbane betydelig. Dette øker LED-drivstrømmen permanent, og i lengden kan det forkorte levetiden til LED-lysene [12], [14].

Jomitek

Jomitek er et dansk selskap som ble etablert i 1997. Hovedfokuset har vært å muliggjøre effektiv drift og vedlikehold, særlig mot områder med kraftdistribusjonssystemer, herrunder vindturbiner. Deres første LDS for vindturbiner ble testet i 1999, og siden har de jobbet med å utvikle nye og bedre teknologier. Deres største kunde er Siemens, og de har lyndeteksjonen installert på vindturbiner blant annet i USA og Nederland. Målet til selskapet er å forstå lynskader, øke arbeidseffektiviteten, forlenge levetiden til turbinen og sikre riktig mengde vedlikehold og utskiftning av utstyret. [36]

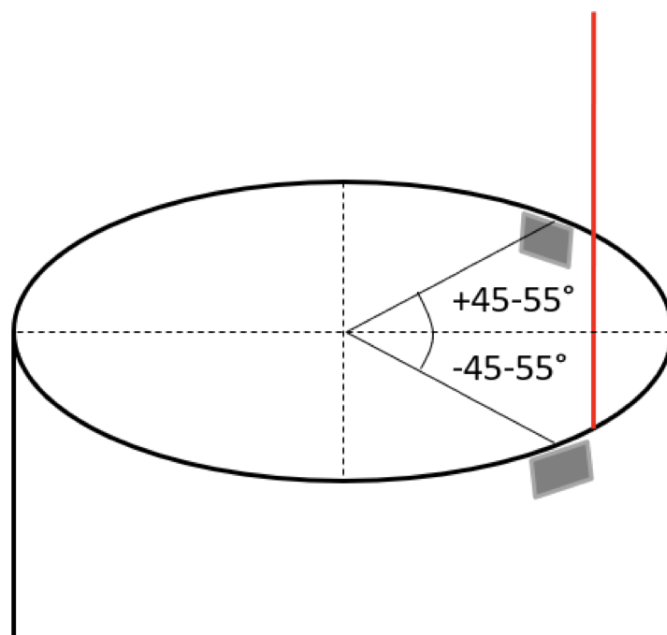
Jomitek sitt nyeste LDS heter *Lightning Sensor and Analyzer system* (LSA) og er designet for å oppdage lynnedslag og rapportere informasjon om lynnedslaget og dens egenskaper. Parametere den måler er maks strøm, maks stighetid, polariteten til lynet, spesifikk energi og ladeinnhold levert av lynet. LSA måler maks strøm mellom 1 kA og 500 kA. Nøkkelparameterne fra registrerte lyn vil lagres i en loggfil. [39]



Figur 2.13: Sensorboksen til LSA fra Jomitek [38]

LSA er designet ut ifra teorien om at et magnetisk felt oppstår i et sirkulært mønster rundt lederen til objektet det slår ned i. For en vindturbin konstruert av stål vil lynstrømmen fra et lynnedslag fordeles jevnt i tårnkonstruksjonen, dette til tross for at det er en isolert lynavleder i turbinen. Det magnetiske feltet som oppstår vil bli oppdaget av LSA, og utløse en varsel. LSA-systemet vil registrere en tidsserie av magnetfeltet, som vil bli konvertert til en tilsvarende lynstrømsparametere under etterbehandling i sensoren. Sensoren oppgir tidspunkt for når lynet er registrert, og dette tidspunktet brukes til beregning av hvor i rotasjonen bladene befinner seg på det aktuelle tidspunktet. Dette igjen brukes som bakgrunn for å bestemme hvilket blad som var øverste punkt på turbinen, og dermed hvilket blad som med størst sannsynlighet ble truffet av lyn. [39]

Sensorboksen, som vises i figur 2.13, festes direkte på utsiden av vindturbintårnet med magneter rundt 0.5 m over døren. Sensorboksen må være 45-55 °unna linjen som kan trekkes fra jordingsystemet i midten av tårnet til sensorboksen, slik som det er vist i figur 2.14. Sensorboksen er designet for å passe turbiner med tårn som har 4-6 meter i diameter. [39]. LSA har innebygd minne som er designet for å logge hele levetiden til sensoren. Dette er estimert til rundt 4000 lynhendelser. [39]



Figur 2.14: Illustrering av installering av sensorboksen på tårnet [39]

LSA-sensoren bekrefter driftstilstanden ved at den behandler den kontinuerlige målestrømmen. Dersom denne bekreftelsen skulle mislykkes, vil det komme en feilvarsel. Denne selv-testingen kan senke behovet for planlagte vedlikeholdsbesøk, og dermed den totale eierkostnaden til vindparkeierne. [39]

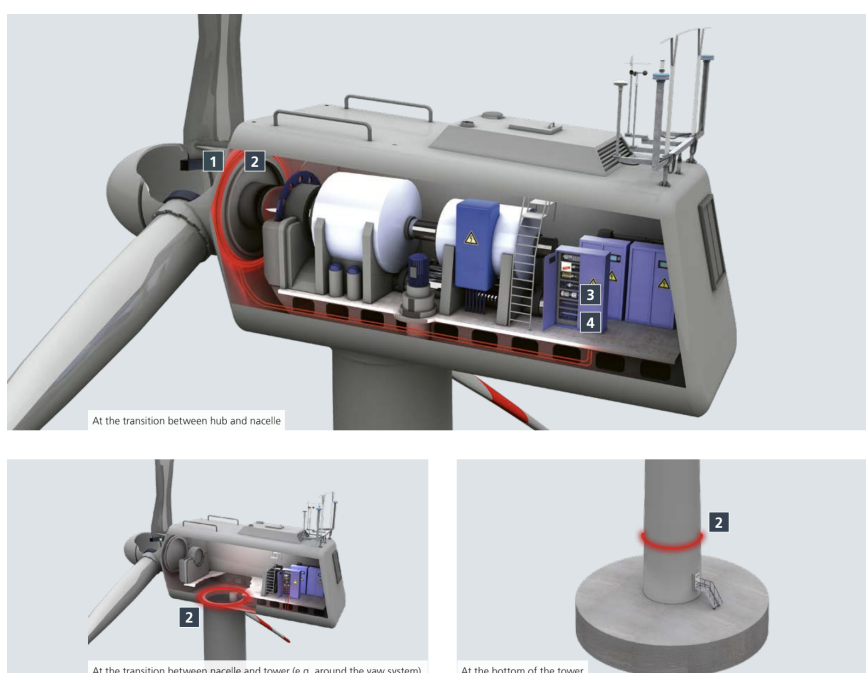
Jomitek oppgir en parameter som kan bli registrert ved et lynnedslag. Dette er registrering av reseptorskade i LPS. Sensoren kan gi et estimat på mengden reseptormateriale som har forsvunnet på grunn av kombinasjonen av resistiv oppvarming og atmosfærisk trykk under et lyn. Dette er basert på grunnleggende fysiske egenskaper for reseptorer i rustfritt stål. Lyn med lav energi vil ikke ha en målbar effekt med tanke på reseptorskade. [39]

DEHNdetect

DEHN er et elektroingeniør-firma, som ble startet opp i 1910 i Tyskland. Hovedbasen er fortsatt i Tyskland, men det har blitt et internasjonalt firma med over 2200 ansatte verden over. De satser på alt fra fornybar energi til beskyttelse av infrastruktur. Firmaet tilbyr løsninger og tjenester for lyn, SPM, bygninger, vindturbiner og solcelleanlegg [15],[18].

DEHNdetect er LDS fra DEHN. De har som formål å unngå kostbart vedlikeholdsarbeid og lange nedetider. De henviser til at lynskader ofte forblir uoppdaget i vindturbiner, fordi det ofte ikke fører til en umiddelbar feil i systemet, men som på lang sikt kan føre til turbinskade. Dette vil de kunne forhindre med hindre ved deres lyndeteksjon. Deteksjonen sender lyndataen i sanntid, slik at vindturbinerne kan planlegge vedlikeholds- og serviceaktiviteter [17].

DEHN tilbyr ulike versjoner av LDS. Den fulle versjonen inneholder én datalogger, tre rotorblad-detektorer og én rogowski-spole og integrator. Rogowski-spolen kan installeres flere steder. Som vist i figur 2.15, kan den installeres mellom navet og nacellen, på overgangen mellom tårnet og nacellen og nede på tårnet. Full-versjonen gir informasjon om tidspunkt for lynnedslaget, og også informasjon om lynparametere. Parameterne den måler er maks strøm, spesifikk energi, polariteten til lynet, ladeinnhold og den maksimale stigetiden. Den gir også informasjon om hvilket blad som ble truffet av lynet. Den måler lyn med maks strøm mellom 60 A og 250 kA [16], [17]. Systemet kan integreres i et SCADA-system. Dersom integrasjon ikke er mulig, kan dataen bli overført til en sky. Dette gir mulighet til å overvåke flere turbiner, eller hele vindparker [16].



Figur 2.15: Mulige installeringspunkter for rogowski-spolen [16]

Vaisala

Vaisala ble etablert i 1936 i Finland. I dag har de over 1850 ansatte verden over, og eksporterer 98 % av produksjonen til andre land [85]. Vaisala har lyndeteksjon som heter *Advanced Total Lightning sensor*, LS7002. Dette var den første LDS som klarte å skille mellom lyn fra sky til sky, og lyn fra sky til bakke [20]. Vaisala tilbyr tilgang til et nettverk, *Global Lightning Dataset*, GLD360, som leverer lyndata detektert av disse frittstående systemene [86].

Advanced Total Lightning sensor, LS7002, er en frittstående lyndeteksjon, vist i figur 2.16. De bruker en kombinasjon av magnetisk retningslokasjon og tidspunktteknikker for å oppdage lyn. Sensorene skal kunne plasseres opp til 350 km fra hverandre, og fortsatt kunne foreta nøyaktig måling. Av den grunn kan et få antall sensorer gjøre nøyaktige målinger. LS7002 oppdager lavfrekvente elektromagnetiske signaler generert av lyn, og identifiserer derfor tordenvær tidlig. Systemet gir også nøyaktig geolokalisering av lyn. [84]



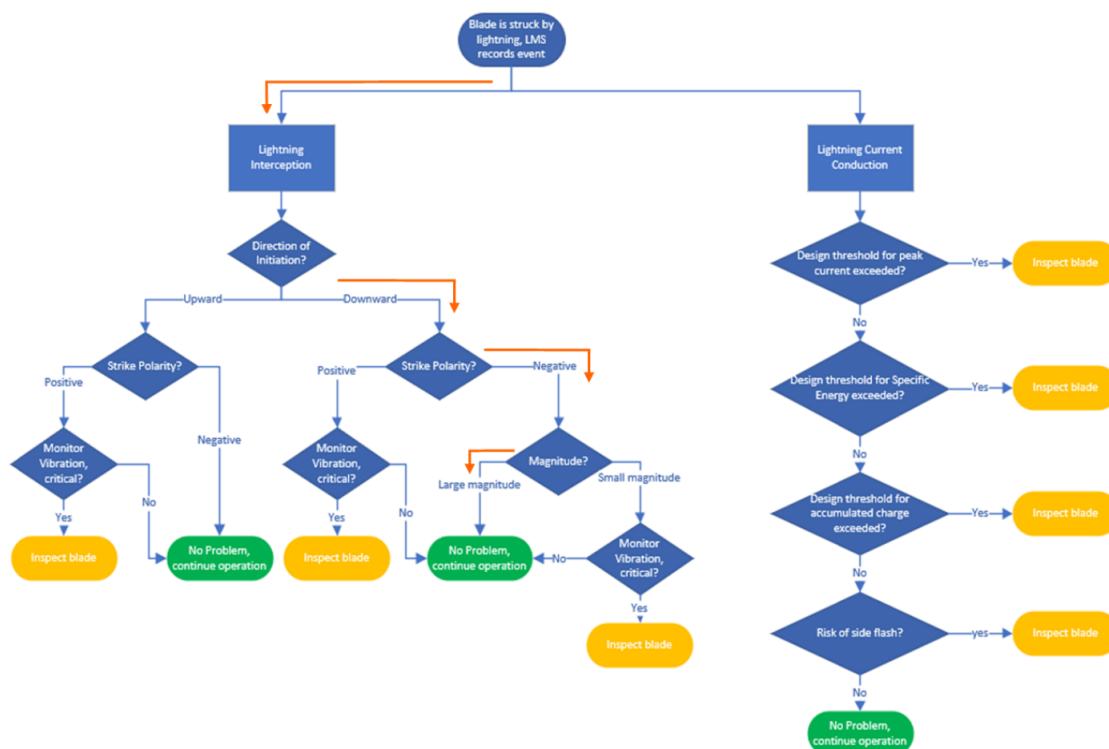
Figur 2.16: Den frittstående lyndeteksjonen til Vaisala [84]

Parameterne den gir informasjon om er om lynet er fra sky til sky eller fra sky til bakke, maks strøm, polariteten og den maksimale stigetiden. [84]

LS7002 gir ifølge Vaisala nøyaktige målinger og enkel installasjon. De tilbyr ulike installasjonsalternativer som bidrar til å forenkle oppsett og vedlikehold. Ifølge Vaisala kan deres deteksjon varsle vindpark-eierne om når det kommer lyn, og om de eventuelt må stoppe turbinene for å forebygge skade. [84]

2.8 Vedlikehold / agering av turbiner ved lyn

Selskapet Polytech har en oversikt over handlinger som anbefales utført i vindparken basert på lynparameterne målt. Dette er vist i figur 2.17 Handlingstreet kan være uavhengig av selskapet som deteksjonen er levert av. Informasjonen de legger til grunn er polariteten til lynnedslaget, om det er oppadgående eller nedadgående lyn, maksstrømmen til lynet, den spesifikke energien til lynet og ladningen til lynet. [49]



Figur 2.17: Polytech sitt beslutningstre ved lyn [49]

Negative lyn er enklere å oppdage, og ifølge Polytech trengs det ikke inspeksjon etter et negativt lyn. Polytech anbefaler derfor å stoppe turbinen for en inspeksjon dersom lynet er positivt da positive lyn har større sansynlighet for å skade turbinen. [Polytech·PPD·agering]

Større nedadgående lyn samt oppadgående lyn har ifølge Polytech tendens til treffe reseptoren på bladspissen somvidere vil føre lynet til jord.

Mindre nedadgående lyn kan har en tendens til å treffe andre steder på turbinen og bør derfor inspiseres. [49]

Stigetiden, spesifikke energien og den akkumulerte ladningsoverføringen kan føre til skader om verdiene overgår terskelen for det gjeldende LPS-designet. Om dette skjer bør turbinen inspiseres.

2.9 Vindparkene

ANEO har kraftproduksjon i totalt elleve vindparker, der ni av vindparkene er lokalisert i Trøndelag fylke i Norge, og to av vindparkene er lokalisert i Sverige. Vindparkene har totalt 225 turbiner, og den totale installerte effekten er 797.6 MW. De største vindparkene er Roan vindpark, Sørmarkfjellet vindpark og Stokkfjellet vindpark. De har henholdsvis en installert effekt på 255.6 MW, 130 MW og 88.2 MW. I denne oppgaven rettes fokuset mot Roan vindpark, Frøya vindpark og Hundhammerfjellet vindpark. [8]

2.9.1 Roan vindpark

Roan vindpark er den nest største vindparken på Fosen i Åfjord kommune, i Trøndelag fylke, etter Storheia vindpark. Den startet opp i 2018. I 2021 solgte Statkraft sin eierandel på 52.1 % til ANEO og partneren Stadtwerke Munchen [7], [79]. Vindparken består av 71 turbiner av typen Vestas V117, der hver turbin har en installert effekt på 3.6 MW. Det gir en totalt installert effekt på 255.6 MW for hele vindparken, noe som gir en årsproduksjon på 884 GWh. Det tilsvarer forbruket til 44000 husstander. Arealet til vindparken er på 24.5 km^2 [69], [7].

2.9.2 Frøya vindpark

Frøya vindpark ligger i Frøya kommune, i Trøndelag fylke. Parken har i alt 14 turbiner av typen Vestas V136. Opprinnelig ble det i 2004 søkt om utbygging av 63 turbiner med samlet installert effekt på inntil 200 MW, men i 2013 ble det gitt tillatelse av olje- og energidepartementet til endelig utbygging av 14 turbiner. Parken består nå av totalt 14 turbiner med samlet installert effekt på 58.8 MW [5], [44]. Oppstartsåret var i 2020, og den forventede årlige produksjonen er 201.8 GWh, som tilsvarer årsforbruket til 13400 husstander. Det totale arealet er på 6.6 km^2 [5].

2.9.3 Hundhammerfjellet vindpark

Hundhammerfjellet vindpark ligger i Nærøysund kommune, i Trøndelag fylke, og hadde oppstart av første turbin i 2003. I løpet av de neste fire årene ble det etablert totalt 13 turbiner. Turbinene hadde en samlet installert effekt på 54 MW, og en gjennomsnittlig årsproduksjon på 160 GWh. Kostnadene ble etter hvert så store at hele vindparken, med unntak av to turbiner, ble stoppet og demontert [68]. I 2016 ble en konsesjonssøknad gitt for reetablering av Hundhammerfjellet vindpark, og i 2017 ble den vedtatt av Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) [56]. Nå består vindparken av 14 turbiner med en samlet installert effekt på 54.7 MW. Den forventede årlige produksjonen er 211 GWh. Turbintypen er i hovedsak Vestas V136, men to av turbinene er av typen Enercon. Det totale planområdet er på 1.6 km^2 [6].

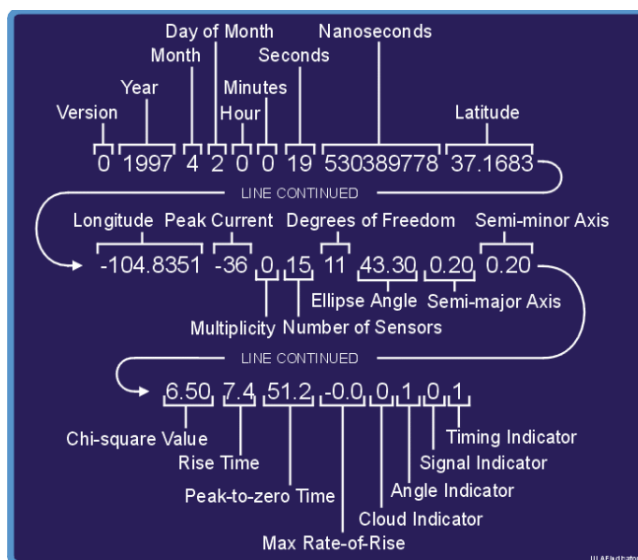
3 Metode

Kapitlet tar for seg metodikken som benyttes for å innhente resultatene til denne oppgaven. Den beskriver programmene som har gitt rådataen, og hvordan den er filtrert og benyttet videre. Avslutningsvis beskrives usikkerhetene.

3.1 Lyndata fra meteorologisk institutt, Frost

Frost API er et program som gir fri tilgang til Meteorologisk institutt sitt arkiv. Dette arkivet inneholder historiske vær- og klimadata, og inkluderer daglige, månedlige og årlige målinger. Metadata om værstasjoner er også tilgjengelig [35]. Metadata er annen tilleggsinformasjon som tekstdokumenter, bildefiler eller videofiler [57]. API Reference på Frost sin nettside kan bli brukt til å hente værdata, men det er også mulig å hente værdata ved hjelp av programmene Python, Java, R og PHP.

Lyndata kommer i et UALF-format. UALF står for *Universal ASCII Lightning Format*, som blant annet inneholder dato og tid, lengde- og breddekoordinater, antall sensorer inkludert i målingen og den maksimale strømmen. Det blir også gitt informasjon om hvilket type lyn det er, enten lyn mellom to skyer eller lyn fra sky til bakke [78]. Dette er vist i figur 3.1. Tiden er i UTC, som er den tidsstandarden som blir mest brukt i verden i dag [10]. Til sammenligning er sommertiden i Norge UTC+2, altså to timer senere enn UTC.



Figur 3.1: Parameterne gitt i UALF-formatet [33]

Lyndataen blir registrert ved hjelp av 14 sensorer som er plassert rundt om hele Norge [34]. Dette er frittstående LDS fra selskapet Vaisala [80]. Ved hjelp av Frost blir det hentet ut lyndata for Midt-Norge fra perioden 2020 til og med 2022, som er tidsrommet denne oppgaven omhandler.

For å bli registrert som en lynobservasjon, må lynet være registrert av to eller flere sensorer. For å øke kvaliteten har meteorologisk institutt inngått et samarbeid med det svenske meteorologisk institutt (SMHI) og den finske meteorologisk institutt (FMI) om distribusjon av lyndata. Dette gjør at datakvaliteten øker for lynene som blir registrert. Nøyaktigheten på lynobservasjonene kan være på 200 m radius fra koordinatene, men dette varierer ut ifra hvor god sensordekningen er i det aktuelle området [34].

Det er usikkerhet forbundet med lokalisering av lynene. Usikkerheten er som oftest oppgitt til å være en radius på 0.4 km. Da er det 50 % sannsynlighet for at lynet er innenfor sirkelen til den aktuelle radiusen. Dersom en multipliserer usikkerheten med to, er det 90 % sannsynlighet for at lynet er innenfor radiusen. I dette tilfellet blir det da innenfor 800 m. Bladene på vindturbinene er rundt 80 m lange. Med denne informasjonen blir det antatt at vindturbiner innenfor en radius på 1 km fra koordinatene til det aktuelle lynet, har en mulighet for å bli truffet.

3.2 GoogleMaps

GoogleMaps er et nettsted som er eid av *Google*, hvor en har mulighet til å se kart- og satellittbilder av jordene [26]. Koordinatene for området til vindparkene Roan, Hundhammerfjellet og Frøya ble funnet ved hjelp av *GoogleMaps*. Dette ble gjort ved å markere et rektangel over det gjeldende området, og deretter finne koordinatene til alle hjørnene.

Området som ble sjekket for lyn i Roan vindpark er vist i figur 3.2. Figuren viser at arealet til området er 80.82 km², med hjørnekoordinater; 64.184602° N, 10.238660° Ø, 64.167773° N, 10.472626° Ø, 64.109787° N, 10.445648° Ø, 64.119209° N, 10.206759° Ø.



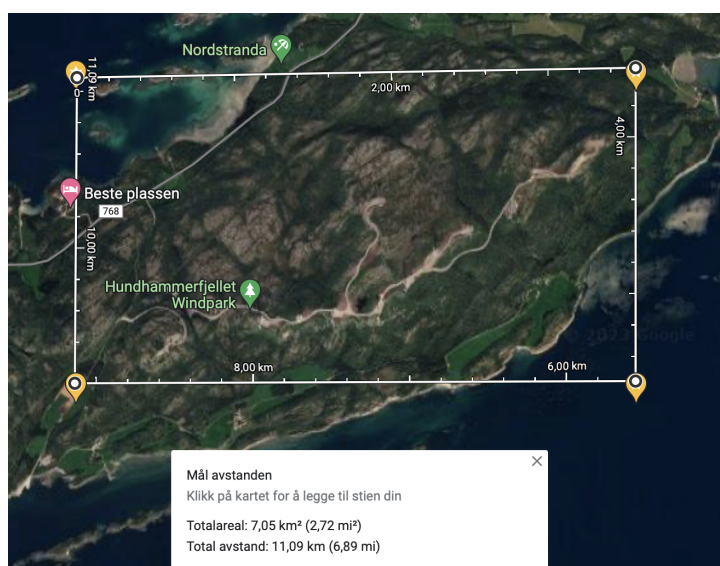
Figur 3.2: Området for Roan vindpark, hentet fra *GoogleMaps*

Området som ble sjekket for lyn på Frøya vindpark er vist i figur 3.3. Figuren viser at arealet til det gjeldende området er 10.86 km^2 med hjørnekoordinater; $63.686123^\circ \text{ N}$, 8.614891° Ø , $63.686123^\circ \text{ N}$, 8.699410° Ø , $63.709474^\circ \text{ N}$, 8.699410° Ø og $63.709474^\circ \text{ N}$, 8.614891° Ø .



Figur 3.3: Området for Frøya vindpark, hentet fra GoogleMaps

Området som ble sjekket for lyn i Hundhammerfjellet vindpark er vist i figur 3.4. I figuren vises også at arealet til området er 7.05 km^2 , med hjørnekoordinater; $64.748580^\circ \text{ N}$, $11.329147^\circ \text{ Ø}$, $64.748580^\circ \text{ N}$, $11.404557^\circ \text{ Ø}$, $64.766484^\circ \text{ N}$, $11.404557^\circ \text{ Ø}$, $64.766484^\circ \text{ N}$, $11.329147^\circ \text{ Ø}$.



Figur 3.4: Området for Hundhammerfjellet vindpark, hentet fra GoogleMaps

Disse arealene ble brukt videre til å beregne lyntettheten i hver park.

3.3 Bazefield

Det ble gitt tilgang av ANEO til operasjonstyringsprogramvaren *Bazefield*. Bazefield samler data for blant annet turbinenes status, produksjon og feilmeldinger. Dataen hentet ut fra programmet danner grunnlaget for oppgaven.

”Monitoring-funksjonen” i Bazefield viser operasjonsstatus, vindhastighet, hvilke turbiner som er nede, hvor lenge de har vært nede og hvilke varsler som har blitt aktivert. Videre er varsellogen i Bazefield blitt analysert. I varselloggen kan en se frekvensen og varigheten på de forskjellige varslene. Ved å analysere hvilke turbiner som har mange alarmer, og hvilke varsler som er oftest aktivert, kan dette være med på å øke produksjonstiden til turbinene. Programmet ble brukt til å filtrere ut varslingene knyttet til lyn for å analysere de oppimot lyndata. Bazefield bruker norsk tidsregning UTC+1 ved vinterstid, og UTC+2 ved sommertid. Frost bruker UTC 00, derfor ble tidspunktene til Bazefield gjort om til UTC 00 for at tiden skal samsvare.

I Bazefield er det fire forskjellige lynvarsler. Varslene er kategorisert i maks strøm og spesifikk energi, vist i tabell 3.1. Styrken på strømmen og energinivået skiller om alarmene bli kategorisert som ”høyeller for høy” og videre ageringer blir gjort ut i fra dette.

Tabell 3.1: Lynvarsler og alarmer i bazefield

Varsel/alarm beskrivelse	Type
Høy maks strøm registrert	Varsel
Høy spesifikk energi registrert	Varsel
For høy maks strøm registrert	Alarm
For høy spesifikk energi registrert	Alarm

En vindturbin-effektcurve er en graf som viser hvor mye kraft en turbin kan produsere ved ulike vindhastigheter. Ved bruk av Power Curve Analyzercan det oppdages avvik eller plutselige, uventede endringer i kraftkurvene. Bazefield kan også visualisere en trendkurve for hver enkelt turbin. Dette viser produksjonen til turbinen i forhold til tiden. Resultatene gir innsikt i effektiviteten og ytelsen til vindturbinene. Effektkurve og trendkurve er i oppgaven brukt til å sammenligne vindturbinens effektivitet og produksjon før og etter lynnedslag på turbinen.

3.4 Excel

Dataen fra Frost og Bazefield ble i dette prosjektet eksportert til dataprogrammet *Microsoft Office Excel*, som ved bruk regneark kan utføre beregninger, analysere informasjon og behandle lister. Lyndataen for Midt-Norge fra Frost ble filtrert ut for riktig område, ved å bruke koordinatene for det markerte området til parken til å filtrere ut lyn som er i det ønskede området. Tidspunktene for lynalarmen ble videre satt sammen med tilsvarende registrerte lyn. Ved å sammenligne plasseringen av turbinene i kartet på Bazefield med koordinatene til hvert lynnedslag i GoogleMaps ble de utsatte turbinene identifisert. Turbinene innenfor 1 km radius fra lynet ble notert ved det samsvarende lynet i Excel.

3.5 Intervjuer

Ettersom LDS og LPS er et konkurransepreget marked med mange bedriftshemmeligheter, som fører til at det er begrenset med informasjon en finner på nettet. Det ble derfor brukt intervju som en av forskningsmetodene for å samle inn data og få innsikt i industriens perspektiver. Videre ble det også samlet inn erfaringer og meninger knyttet til LPS, LDS samt skader forårsaket av lyn. Intervjuene i oppgaven er ment til å gi kvalitative data som bidrag til en forståelse av dagens status i industrien, samt tolkning og refleksjoner rundt fremtidig utvikling og problemer.

Relevante firma ble kontaktet og informert om formålet med studie og om deres frivillige deltagelse. Intervjuene ble gjennomført over *Teams* og notater ble gjort av det som kom fram. Det ble stilt spørsmål som var planlagt på forhånd, men disse spørsmålene var på forhånd ikke oversendt intervjuobjektene. Utover disse spørsmålene ble det under intervjuene stilt oppfølgingsspørsmål for å oppmuntre til deltakernes refleksjoner, og for å kunne utforske og forstå deres perspektiver. Intervjuene bidro til å betydelig informasjon som da komplementerte andre datainnsamlingsmetoder benyttet i denne oppgaven. Informasjon og kartlegging av de ulike LDS-teknologiene vil også kunne bidra til at ANEO lettere kan ta de riktige valg inn mot investeringer i denne type utstyr i vindparker.

Selskapene som ble intervjuet var *Meteorologisk institutt*, *Vaisala*, *Polytech*, *Elteco* og *Jomitek*. Elteco henviste videre til *DEHN* som ga informasjon om deres teknologier. I tillegg ble det korrespondert på mail med *Phoenix Contact*. Ved besøk av vindparken Roan ble det også utført uformelle samtaler med teknikere som delte erfaringer med skader og vedlikehold relatert til turbinene.

3.6 Usikkerhet

Under gjennomføringen av oppgaven oppsto det usikkerheter knyttet til innhenting av data, og ved analysing av data fra dataanalysen og intervju.

3.6.1 Avstand fra sensorer til Trøndelag

Det er større usikkerhet forbundet med lynmålinger langs kysten av Trøndelag og nordover, da dette er et området i landet som har lengst avstand fra de fleste sensorene som måler lyn. Dette gjør at lynmålingene kan ha større feilmargin enn for eksempel områder på Østlandet, som har en høyre tetthet av sensorer.

3.6.2 Lynkoordinatene

Det ble beregnet at det er sannsynlig at lynet er innenfor en radius på 800 m fra koordinatet som ble gitt av meteorologisk institutt. For å unngå feilmargin i analysen av lyddataen ble lyn innenfor 1 km radius fra en turbin sjekket. Selv om lynet, etter informasjonen som ble gitt, mest sannsynlig har vært i det området, er det mulighet at noen lyn har større feilmargin enn 1 km i radius fra de oppgitte koordinatene.

3.6.3 Feilmeldinger i LDS

Det har ikke blitt undersøkt feilmeldinger som er oppstått på lyndeteksjonen på Roan. Det kan ikke ses bort fra at disse meldingene kan være et resultat av lyn. Det har vært utfordrene å finne informasjon om hva som kan utløse slike feilmeldinger, både fra vindparkeiere og fra selskaper som produserer LDS. Det er derfor en mulighet for at det har vært lyn i området som ikke er blitt registrert av deteksjonen.

3.6.4 Tider som varierer i Bazefield

Dataen til varslinger og alarmer ble hentet fra Bazefield ved starten av denne oppgaven, og denne inneholder blant annet tidspunktet for da varslingen eller alarmen oppsto. Det ble gjort noen nye undersøkelser av disse varslingene og alarmene på et litt senere tidspunkt av oppgaveskrivingen, og da var tidspunktene for noen av de samme varslingene og alarmene endret. Det ble sjekket om dette var forårsaket av endringen fra vintertid til sommertid, eller fra UTC+1 til UTC+2, men tidene samsvarte likevel ikke. Dette gjør at noen av tidene til alarmene som er oppgitt i resultatene, ikke samsvarer med tiden en får opp i Bazefield dersom en søker opp den samme alarmen på tidspunktet oppgaven leveres. Dette gir seg at det er stor usikkerhet rundt hvilke tidspunkt som faktisk stemmer.

3.6.5 Feiltolkning av informasjon i intervjuer

Informasjon som ble gitt under intervju av kontaktpersoner i de respektive selskapene, ble nøye notert ned og gjennomgått etter møtet var gjennomført. Dette for å unngå potensielle misforståelser. Det er likevel mulighet for at noe av informasjonen som ble gitt ble misforstått av møtedeltakerne.

4 Resultat av dataanalyse

Resultater fra dataanalysen i denne bacheloroppgaven består av data fra Bazefield og Frost som er prosessert ved hjelp av excel. Dataen i helhet er presenter i vedlegg A. Resultatene er fremstilt for å kunne sammenligne lyndata for de forskjellige parkene, samt gi en sammenligning av registrerte lyn fra Frost og varslinger i Bazefield.

4.1 Lyndata

Lyndataen presentert er for å sammenligne de analyserte lynparameterne som er målt i vindparkene.

4.1.1 Lyntetthet

Som det fremgår i tabell 4.1, er den gjennomsnittlige lyntettheten på Roan $1.53 \text{ lyn}/\text{km}^2$ i 2020, $0.62 \text{ lyn}/\text{km}^2$ i 2021 og $1.22 \text{ lyn}/\text{km}^2$ i 2022. Videre er det vist at den gjennomsnittlige lyntettheten på Frøya er $0.92 \text{ lyn}/\text{km}^2$ i 2020, $1.20 \text{ lyn}/\text{km}^2$ i 2021 og $1.01 \text{ lyn}/\text{km}^2$ i 2022. Den gjennomsnittlige lyntettheten på Hundhammerfjellet er $1.14 \text{ lyn}/\text{km}^2$ i 2020, $1.28 \text{ lyn}/\text{km}^2$ i 2021 og $0.99 \text{ lyn}/\text{km}^2$ i 2022.

Tabell 4.1: Lyntetthet per år [lyn/km^2]

	Roan [lyn/km^2]	Frøya [lyn/km^2]	Hundhammerfjellet [lyn/km^2]
2020	1,53	0,92	1,14
2021	0,62	1,20	1,28
2022	1,22	1,01	0,99

4.1.2 Gjennomsnittlig maks strøm

Som det fremgår i tabell 4.2, er den gjennomsnittlig positive maksstrømmen på Roan 10.47 kA, på Frøya er den 24 kA og på Hundhammerfjellet er den 24.13 kA. Videre så fremgår det i tabellen den gjennomsnittlige negative maksstrømmen i hver park. Denne er -6.67 kA på Roan, -8.43 kA på Frøya og -7.68 kA på Hundhammerfjellet.

Tabell 4.2: Positiv og negativ lyn 2020-2022

Gjennomsnittlig maks strøm 2020-2022	Roan	Frøya	Hundhammerfjellet
Positive lyn	10,47	24	24,13
Negative lyn	-6,67	- 8,43	-7,68

4.1.3 Prosentandel positivt og negativt lyn

Det er beregnet prosentandel positive og negative lyn i de tre parkene. Dette fremgår av tabell 4.3. På Roan er den prosentvis positivt lyn på 40 %, på Frøya er det 18 % og på Hundhammerfjellet er det 30 %. henholdsvis er det prosentvis 60 % negativt lyn på Roan, 82 % på Frøya og 70 % på Hundhammerfjellet.

Tabell 4.3: Prosentandel positiv og negativ lyn 2020 2022

Prosentandel negative/positive lyn 2020-2022	Roan	Frøya	Hundhammerfjellet
Positive lyn [%]	40	18	30
Negative lyn [%]	60	82	70

4.1.4 Prosentandel lyn på sommeren og vinteren

Tabell 4.4 viser prosentandelen av det registrerte lynet i de tre parkene som er på sommeren og vinteren. På Roan er 83 % av lynene på vinteren, på Frøya er 82 % av lynene på vinteren og på Hunhammer er 70 % av lynene på vinteren. Henholdsvis er 17 % av lynene på Roan på sommeren, på Frøya er 18 % av lynene på sommeren og på Hundhammerfjellet er 30 % av lynene på sommeren.

Tabell 4.4: Prosentandel lyn på sommer og vinter 2020 2022

Prosentandel på sommer/vinter 2020-2022	Roan	Frøya	Hundhammerfjellet
Sommer [%]	17	18	30
Vinter [%]	83	82	70

4.2 Andre alarmer

I den videre dataanalysen ble de rutinemessige varslingene og alarmene sortert vekk. Resultatet for Hundhammerfjellet er at 8 alarmer som viser at det er lyd i nacellen, ble utløst samme minutt som lynet er registrert. 2 alarmer som viser at røyksensorene er aktivert, er utløst samtidig som lyn er registrert. Alle disse totalt 10 alarmene er utløst på en turbin som er innenfor den satte radiusen på 1 km fra det registrerte lynet.

Resultatet for Frøya er at ingen varslinger eller alarmer kan tilsi at det har vært lyn, eller kan tas i betraktning at det har vært utløst av lyn.

Resultatet for Roan er at ingen alarmer eller varslinger kan tilsi at det har vært lyn, eller kan tas i betraktning at det har vært utløst av lyn.

4.3 Resultater fra lynalarmer og lydndata

Tabell 4.5: Lyndata for Roan vindpark 2020 - 2022

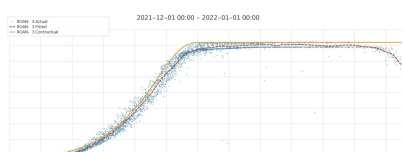
Turbin med varsel	Tid varsel [UTC]	Tid lyn [UTC]	Avstand turbin [m]	Maks strøm [kA]	Type lyn
67	07.06.21 10:32	Ikke registrert lyn			
57	08.06.21 12:54	Ikke registrert lyn			
16	31.08.21 19:03	Ikke registrert lyn			
47	06.10.21 12:06	Ikke registrert lyn			
47	06.10.21 12:06	Ikke registrert lyn			
66	10.11.21 16:18	10.11.21 13:56	1660	-6	sky-sky
		10.11.21 13:56	1590	-6	sky-sky
66	12.11.21 13:56	10.11.21 12:56	1290	-6	sky-sky
		10.11.21 13:56	1320	-6	sky-sky
3	16.01.22 16:26	16.01.22 16:25	550	31	sky-bakke
		16.01.22 16:25	560	14	sky-sky
		16.01.22 16:26	580	3	sky-sky
		16.01.22 16:26	900	4	sky-sky
		16.01.22 16:26	900	5	sky-sky
		16.01.22 16:32	430	7	sky-sky
		16.01.22 16:32	290	4	sky-sky
26	19.01.22 16:26	Ikke registrert lyn			
41	05.02.22 02:00	01:59	4500	14	sky-sky
58	05.02.22 02:22	05.02.22 02:22	460	-6	sky-bakke
		05.02.22 02:24	930	3	sky-sky
		05.02.22 02:24	1400	8	sky-sky
		05.02.22 02:24	890	7	sky-sky
3	01.03.22 18:12	01.03.22 10:25	294	-5	sky-sky
3	01.03.22 20:36				
4	04.05.22 11:51	Ikke registrert lyn			
4	19.05.22 21:02	Ikke registrert lyn			
4	19.05.22 21:02	Ikke registrert lyn			
68	23.06.22 10:19	Ikke registrert lyn			
61	06.07.22 03:06	Ikke registrert lyn			
4	01.11.22 01:33	Ikke registrert lyn			
68	18.11.22 13:06	Ikke registrert lyn			
75	27.12.22 11:14	27.12.22 11:13	900	7	sky-sky
		27.12.22 11:13	1200	-9	sky-sky

Vist i tabell 4.5 vises det flere tilfeller der det alarmer som viser til detektert lyn i bladene når det ikke er lyn. Hva som gjør at disse alarmene forekommer er ukjent og det trengs å forhøres om dette er falske alarmer eller om det er lyn som ikke er blitt registrert i lydndataen.

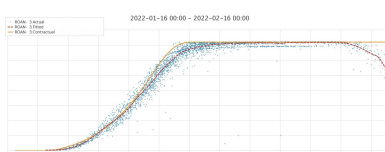
Tabell 4.5 viser at det er flere lynalarmer og tidspunkt for lyn som korresponderer på minuttet. Videre ser en at det hendelser med flere timer fra lynnedslag til det er alarm.

Fra vedlegg A.4 ser en avvik på flere dager mellom lyn og alarm, dette må undersøkes om er en sammenheng mellom eller om det er en falsk alarm. Videre viser det 14 hendelser der det er blitt registrert mer enn 4 lyn under 500 meter fra en vindturbin uten at det er registrert lynvarsel. Når vindparkeierne på Roan får varsler fra LDS, får de ikke oppgitt parameterne den har målt. For å få tilgang til parameterne må de opp i den aktuelle turbinen for å hente ut informasjonen.

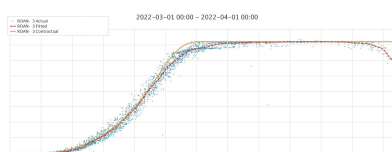
4.4 Effektkurve og trendkurve



Figur 4.1: Effektkurve des 21



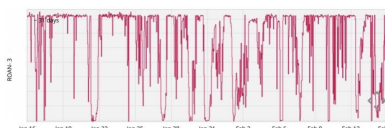
Figur 4.2: Effektkurve jan-feb 22



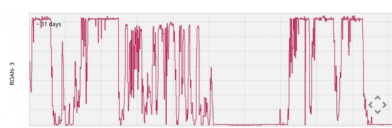
Figur 4.3: Effektkurve mar 22



Figur 4.4: Trendkurve des 21



Figur 4.5: Trendkurve jan-feb 22



Figur 4.6: Trendkurve mars 22

Fra tabell 4.5 ser en at turbin 3 har lynalarmer 16.01.22 og 01.03.22, trendkurven og effektkurven før og etter lynnedslagene ble analysert for å se om det er avvik i produksjon og effekt hos turbinen.

I figur 4.1, 4.2 og 4.3 vises effektkurvene for turbin 3. Figur 4.4, 4.5 og 4.6 viser trendkurvene for turbin 3 på Roan over en måned.

5 Resultater fra intervju

Denne delen består av resultat fra intervju med leverandørene av LDS og LPS. Resultatene fra intervju i denne bacheloroppgaven er basert på intervjuer av kontaktpersoner fra selskaper i vindturbinbransjen. Innholdet i intervjuene er informasjon angående LPS, LDS, lynskader og internasjonale standarder.

5.1 Polytech

Det ble gjennomført to møter med to forskjellige kontaktpersoner fra Polytech.

Møte 1

Med hensyn på LPS oppgir kontaktpersonen dersom lynet ikke treffer LPS-en er det umiddelbar skade på turbinen, men dersom lynet treffer LPS vil turbinen kunne bli slitt over tid. Kontaktpersonen oppgir også at dersom lageret i LPS er dårlig, kan dette føre til umiddelbar skade.

Om LKDS oppgir kontaktpersonen at den estimerte kostnaden for installasjon av LKDS er omtrent 10000 EUR. Kontaktpersonen oppgir ikke hvor mange turbiner som er inkludert i estimeringen. Han estimerer at det tar 1.5-2 dager å installere systemet på én vindturbin. Kontaktpersonen oppgir at det er vanskelig å estimere hvor ofte en må utføre vedlikehold på LKDS-systemet, da det varierer utifra mange faktorer. Han sier det kan variere fra flere ganger i året til én gang hvert fjerde år.

Om lyn oppgir kontaktpersonen at lokalisering med hensyn på lyn i det spesifikke området, så er det viktigere å ta hensyn til vinterlyn enn sommerlyn, da sommerlyn slår ned mer tilfeldig enn vinterlyn. Han oppgir også at det er mye mer energi i positive lyn.

Møte 2

Om LPS oppgir kontaktpersonen at etterspørselen etter LPS har økt kraftig de siste 15-20 årene. For 20 år siden var det generelt stor uvitenhet om hvordan en kunne beskytte turbinene. Et historisk problem har blant annet vært liten grad av standarder og standardisering, av den grunn er det nå etablert nye standarder. Han oppgir at det er stor utvikling og internasjonal diskusjon rundt prinsipper for både LPS og LDS av vindturbiner. Han oppgir at Polytech selger LPS til vindturbinprodusenter. Kontaktpersonen oppgir at det er litt vanskelig å si om en burde ha down conductor på innsiden eller utsiden av vindturbinbladene. Han oppgir at det er best å ha det på utsiden, fordi det gir bedre stømledningsevne, men at dette er veldig dyrt.

Turbinblader av glassfiber har det på innsiden, mens turbinblader av aluminium eller kobber kan ha dette innstalert både på innsiden og utsiden. Angående vedlikehold av LPS oppgir han at det ikke er veldig godt spesifisert i standardene, så det blir mer opp til produsenten å spesifisere dette. Angående LDS oppgir kontaktpersonen at markedet har økt kraftig de siste 5 årene.

Om de internasjonale standardene oppgir kontaktpersonen at standarden er god nok slik den er i dag, men han mener det er rart at turbiner med dagens standarder fortsatt blir skadet av lyn. Han oppgir at standardene ikke er gode nok for blant annet Japan, som er mye utsatt for vinterlyn, og derfor har de egne krav for Japan. Japan multipliserer dermed kravene i de internasjonale standardene med 2.

Et scenario selskapet Polytech oppgir de skal undersøke videre i fremtiden, er området i tordenskyen som har -10° C. Dette området er isotermisk, som vil si at det er et område med konstant temperatur [46], [59]. Dette er fordi området bestemmer ladningskillet i tordenskyen. Dersom området er i nærheten av vindturbinen, vil det være med på å definere risikoen for lynnedslag på bladene. Dette er relevant med tanke på forekomsten av lyn på vinterstid. De forventer at det vil ha en betydelig innvirkning når skyene ligger lavt, og det generelt er kaldt i lufta. Det kan også være relevant når det er varmt, dersom skyene ligger så lavt at turbinen likevel kan være i nærheten av -10° C-laget i tordenskyen [46]. Dette kan være et økende problem ved økning av turbinhøyde.

5.2 Phoenix Contact

Det ble utvekslet informasjon på mail med Phoenix Contact. Det ble gitt filer med informasjon om LDS de tilbyr. Kontaktpersonen oppga at den estimerte kostnaden mellom 150000 og 200000 NOK for LMS-komponentene, men ikke for hvor mange vindturbiner dette gjelder. Dersom det var interesse for en mer nøyaktig estimering, burde selskapet Vestas kontaktes. Det ble sendt en mail om dette til Vestas, men per dato ved publisering av oppgaven, er ikke mailen respondert. Det ble stilt spesifikke spørsmål om installasjonen og hvordan denne vil foregå, men kontaktpersonen oppgir at det er avhengig av for mange faktorer til at det var mulig å si noe generelt.

5.3 Jomitek

Kontaktpersonen oppgir at sensorboksen i LSA koster rundt 3000 USD, eller ca 30000 NOK, for installasjon på én vindturbin. Det var for mange faktorer som bestemte pris på den totale installasjonen til at det var noe han kunne estimere. Installasjonen tar rundt 2 timer for én vindturbin og systemet skal holde i 30 år. LSA har en egen selvtest som sjekker at systemet fungerer, som de anbefaler å gjennomføre én gang i året. Han oppgir at selskapet har merker en økt etterspørsel for LDS. Selskapet Siemens er deres største kunde, og de har installert LSA i USA og Nederland.

Angående LPS oppgir han at de har utviklet en teip-lynavleder, slik som Striketape, men dette satser ikke selskapet på lengre, da blant annet de er vanskelige å vedlikeholde.

5.4 Elteco

Møte 1

Angående LDS oppga kontaktpersonen en estimert pris på 40000 til 50000 NOK for installasjon av selve LDS. Kostnaden for komponentene og den totale installasjonen, ble ikke oppgitt. Han oppga at selve installasjonen av LDS tar rundt 6 timer på én vindturbin.

Angående LPS oppga kontaktpersonen at nedlederne skal tåle å bli utsatt for 40 kA én gang, og at den skal tåle å bli utsatt for 20 kA gjentatte ganger, estimert mellom 12 og 20 ganger.

Angående standarden, IEC 62305:2010, og med de nivåene denne er delt inn i, mener kontaktpersonen at nivå 2 egentlig burde holde. Han oppgir at han mener det burde bli sett mer på standarden for å produsere turbinbladene, dette inn mot eventuelt er for lave krav i standarden sett opp mot hvor mye et turbinblad burde tåle. Angående skader mener kontaktpersonen at det er de elektriske komponentene som er mest utsatt, og som burde få et større fokus.

Møte 2

En annen kontaktperson fra DEHN oppgir at en kan installere rogowski-spolene på 3 ulike steder på vindturbinen. Ifølge kontaktpersonen er det vanligste stedet å installere rogowski-spolen mellom navet og nacellen.

5.5 Vaisala

Kontaktpersonen i Vaisala oppgir at det er mulig for LS7002 å beregne hvilke turbiner som er utsatt for lyn, dersom det er en viss avstand mellom turbinene. Den nøyaktige avstanden ble ikke oppgitt. Han oppgir at LS7002 kan oppleves som en sikkerhet for operatørene. Det oppgis at dataene om lynet er tilgjengelige for operatørene innen 35 sekunder etter lynet er registrert. Kontaktpersonen oppgir også at de har levert LS7002 til vindparker i USA.

5.6 Teknikerere og ansatte på Roan vindpark

I samtale med teknikere på Roan ble det fortalt at for å få parametere til lyn fra LDS må en hente dette manuelt i turbinen og at det ikke er i Bazefield. Videre nevnte de at LDS som er installert er svært nøyaktig på å detekttere lyn, og det er lite sannsynlig at komponenter i nacellen eller vibrasjoner kan ha utløst lynvarsel.

5.7 Meteorologisk institutt

Kontaktpersonen fra Meteorologisk institutt oppgir at det er en mulighet for at det kan ha vært lyn uten at det har blitt registrert av sensorene, spesielt er dette en mulighet på vinterstid. Hun oppgir at systemet kan ha større vanskeligheter med å oppdage positive lyn enn negative.

6 Diskusjon

Dette kapitlet består av diskusjon av teorien, resultatene fra dataanalysen og resultatene fra intervjuene. Det vil videre bli gitt kommentarer på bruk av LDS, LDS-selskaper, forskjellige LPS-teknologier samt fremtidige løsninger.

6.1 LPS

Vindturbinblader er de mest sårbare delene av en vindturbin og mottar mest skader. Nacellen, elektronikk og legeringer har historisk ikke fått store skader og reparasjon og vedlikehold av disse komponentene er mindre komplekst. Vist i tabell 2.9 er forekomsten av direkte lynnedslag høyest på tuppen av bladet og avtar mot roten. LPS på vindbladene består av reseptorer og nedledere. Nedledere har etter IEC 61400-24 flere måter å bli konstruert på.

6.1.1 Nedleder

Det finnes forskjellige typer nedledere, inkludert innvendige og utvendige nedledere. Innvendige nedledere krever flere likestrømsforbindelser inne i bladet for å håndtere lynstrømmen. Dette systemet har tradisjonelt blitt foretrukket på grunn av enklere installasjon og vedlikehold, samt minimal forstyrrelse av bladets aerodynamikk. Færre ekstra komponenter og eksterne tilkoblinger gjør systemet mer oversiktlig og det er lettere å utføre tilstandsjekker samt vedlikehold. Den interne nedlederen kan også håndtere strømflyten bedre og derfor kan redusere risikoen for skade på komponentene i turbinen. Systemet krever ofte flere likestrømsforbindelser innenfor bladet, noe som legger til vekt og kompliserer designet. Flere forbindelser kan også øke risikoen for slitasje mellom lagene eller komponentene i bladet. Den interne nedlederen har ikke like god beskyttelse av det eksterne delene av vindturbinen.

Ved å bruke en ekstern nedleder kan strømflyten gjennom kritiske strukturelle deler av bladet betydelig reduseres, og dermed minimeres risikoen for skade. Samtidig bidrar bruk av ekstern nedleder til å redusere behovet for flere interne likestrømsforbindelser. Tidligere har produsenter ofte valgt å installere nedledere på den indre siden av bladet for å bevare bladets aerodynamiske ytelse. Simuleringer viser imidlertid at enkelte utvendige nedledere har minimal innvirkning på strømytelsen. Ved bruk av eksterne nedledere kan det være en betydelig reduksjon i maksimal strøm gjennom de strukturelle delene av bladet.

Installasjonen av en ekstern nedleder kan involvere ekstra trinn og hensyn sammenlignet med et internt system. Dette kan potensielt øke kompleksiteten og installasjonstiden i tillegg til at det er mer tidskrevende og komplisert å utføre vedlikehold av det eksterne systemet.

Mesh-nedlederen bruker en ekstern nedleder og utvidet metallfolie. Dette reduserer antall nødvendige likestrømsforbindelser og gir beskyttelse mot direkte lynnedslag. Moderne mesh har også økt strekkstyrke, slik at de kan bøye seg uten å påvirke den designmessige ytelsen til metallfolien. Testing har vist at karbonfiber-mesh får lynstrømmen til å spre seg utover bladets ytre laminat i stedet for å trenge inn i turbinen.

6.1.2 LPS-nivå for turbinblader

Vist fra lyndataen for de tre parkene er gjennomsnittlig positivt lyn på 15,5 kA og negativt lyn på -7,6 kA. Dette er svært svake lyn og LPL 4 ville dekket de fleste av disse lynene. Det er derfor viktig å se på minimumsverdiene for de forskjellige klassene da LPL 4 har en minimums maksstrøm på 16 kA. Dette vil si at nesten alle lynnedslagende på vindparkene hadde falt under minimumsverdien og lynbsekyttelsessystemet hadde ikke beskyttet turbinen. Det er også viktig å se på de største lynene på parken.

Det er viktig å ta i betraktning at LPS får mindre beskyttelseeffekt ved lynneslag og slitasje gjennom tid. Fra formel 2.1 ser en at beskyttelsen minker etter flere lynnedslag. Det er derfor viktig å ta hensyn til dette når en bestemmer LPL for turbinen. De siste 3 årene har det vært mål lyn opptil 100 kA. For at en skal være sikker på at LPS skal være tilstrekkelig for å kunne motta lynnedslagende vil det trenge en høyere klasse enn LPL 4. Videre viser formel 1 at LPS avtar for hvert lynnedslag turbinen mottar. For at turbinen skal kunne forbli beskyttet gjennom hele dens levetid er det derfor viktig at en tar i betraktning at beskyttelsesgraden vil gå ned med slitasje fra vær og lynnedslag. I kontakt med Polytech ble det nevnt at Japan multipliserer parameterne i LPS-nivåene med 2 for å garantere at de vil dekke lynnedslagende.

6.1.3 Drone

Det er flere og flere turbinparker som benytter droner for tilstandsjekk og vedlikehold av turbiner. Ved LDS av lyn på turbiner kan en turbin brukes til å sjekke turbinbladene for utvendig og innvendige skader. Ved hjelp av en drone kan inspektører identifisere lynskader og andre feil som påvirker funksjonaliteten og levetiden til turbinen. Dette vil bidra til å minke turbininstansen ved inspeksjon for å samtidig øke sikkerheten til teknikerne. Dronene gjør det også lettere å vurdere dokumentasjon fra inspeksjonene og i senere til bidra til å samle dokumentasjon til rapporter for skader og inspeksjoner.

6.2 Lyndata fra meteorologisk institutt LS7002 fra Vaisala

Lyndata ble levert fra Meteorologisk institutt, der de måler lynforekomster ved hjelp av LS7002 fra Vaisala.

6.2.1 Lyndata

Lyndataen ble gitt av meteorologisk institutt, og den blir detektert av LDS fra Vaisala, LS7002. LS7002 er ifølge Vaisala svært nøyaktig, og de oppgir at et få antall sensorer kan gjøre nøyaktige målinger selv om de plasseres opptil 350 km fra hverandre.

En kontaktperson i Vaisala oppgir at det er mulig for LS7002 å presisere hvilke turbiner som er utsatt for lyn, dersom det er en viss avstand mellom turbinene. Den nøyaktige avstanden ble ikke oppgitt. Meteorologisk institutt oppgir derimot at målingene som blir gjort har en usikkerhet på minst 0.4 km, noe som tilsvarer 400 m radius fra koordinatene som blir oppgitt i målingene. De oppgir at de tar utgangspunkt i at dersom en multipliserer usikkerheten med to, er sannsynligheten 90 % for at lynet har vært innenfor den radiusen. I alle tilfellene for lyndataene til parkene, blir dette en radius på 800 m. De oppgir videre at målingene langs kysten av Trøndelag, der de gjeldene parkene har lokasjon, har enda større usikkerhet. Dette fordi det er færre sensorer som måler i det området, sammenlignet med målinger som gjøres for store deler av Sør-Norge. Dermed kan det virke som at avstanden mellom hver turbin må være relativt stor, sannsynligvis minst 800 meter, dersom vindpark-eierne skal ha mulighet til å stadfeste hvilke turbiner som kan ha blitt truffet av lyn, og eventuelt stanse de gjeldene turbinene.

I resultatene vises det at 70 % av alle lyn i vindparken på Frøya er i vinterhalvåret, 83 % av alle lyn i Roan vindpark er i vinterhalvåret, mens på Hundhammerfjellet vindpark er hele 88% av alle lyn på vinterhalvåret. Kontaktpersonen fra meteorologisk institutt oppgir at en annen mulig usikkerhet for LS7002 er måling av lyn om vinteren. Hun oppgir at det kan oppstå lyn som ikke blir detektert av LS7002, så det er en mulighet for at det er flere lyn på vinterhalvåret enn det som blir oppgitt i resultatene. Ved mulig installasjon av LS7002 fra Vaisala ved en av de gjeldende vindparkene, bør det tas til etterretning at LS7002 muligens har en større feilmargin ved vinterstid, da det også er klart mest lyn ved alle tre parkene.

6.2.2 Vaisala

LS7002 gir informasjon om mange parametere i lynet, blant annet maks strømverdi for lynet og om det er positivt eller negativt. Det er det eneste LDS som oppgir at den måler om lynet er fra sky-til-sky eller fra sky-til-bakke. Den oppgir ikke spesifikk energi eller ladningsinnhold. Dersom vindparkeierne anser at det er mindre sjanse for at det kan oppstå skader fra lyn på vindturbinene i en spesifikk park, kan LS7002 være en mindre tidkrevende installasjon som kan føres opp som en trygghet. Den gir viktig informasjon om lynet, inkludert en radius på et område lynet mest sannsynlig er lokalisert. Avhengig av størrelsen på parken, blir en mulig løsning å enten stanse alle turbinene i det usikre området, eller hele parken. Antallet ganger slikt måtte utføres bestemmer om det er økonomisk gunstig for vindparkeierne, ut ifra tapt produksjon på grunn av eventuell nedetid sammenlignet med eventuell kostnad for skadede vindturbiner fra lyn. Muligheten er at det kan oppleves som en sikkerhet for vindparkeierne sammenlignet med en installasjon uten LDS.

6.3 Sammenligning av LDS

LDS for vindturbiner har som hensikt å gi informasjon til operatøren om at det er lyn på vindturbinen, gi innspill til vedlikeholdsregimer og dermed bidra til operatørens mulighet til å foreta risikovurderinger. Det er 4 selskaper som leverer LDS som blir diskutert.

6.3.1 Funksjon, pris og installasjon

Polytech og DEHN plasserer sensorer i alle tre bladene til vindturbinen. Disse sensorene måler derfor hvilke blad som eventuelt blir truffet av lyn, og informasjonen blir overført direkte til vindparkeierne. Det kan oppleves som et høyt sikkerhetsnivå å ha en så nøyaktig måling. Polytech sin kontaktperson oppgir at det den estimerte tiden for installering av LDS på én turbin er 1.5 til 2 dager. Samtidig oppgir kontaktpersonen fra DEHN oppgir at det tar rundt 6 timer å installere DEHNdetect for én turbin. Dersom vindparken LDS skal installeres i har en betydelig mengde turbiner, kan denne forskjellen i installeringstid være betydelig for vindparkeierne.

Prisene disse selskapene oppgir varierer noe mellom dem, der kontaktpersonen for Polytech oppgir en estimering på rundt 110000 NOK. Kontaktpersonen fra DEHN oppgir at kostnaden er mellom 40 000-50 000 NOK for installasjon av DEHNdetect, men det ble ikke gitt noe informasjon om prisen for selve komponentene. Ingen av selskapene oppga hvor mange vindturbiner som er inkludert i estimeringen av prisen, men poengterer at dette er en estimering, og at prisene kan variere.

Phoenix Contact har også sensorer i alle tre bladene. De har beskrevet hvordan installasjon av LMS vil foregå. Til forskjell fra Polytech og DEHN, oppgir ikke Phoenix Contact kostnadene forbundet med installasjon. Ifølge kontaktpersonen er dette avhengig av mange faktorer som er vanskelig å forutsi. Kontaktpersonen fra Phoenix Contact oppgir at prisen er mellom 150 000 og 200 000 NOK for komponentene. Det oppgis heller ikke hvor mange vindturbiner dette estimeres ut ifra. Det blir derimot poengtert at dette er en estimering, men at det gir en viss anelse av hvor selskapet ligger prismessig.

LSA fra Jomitek kan også gi informasjon om hvilket blad som ble truffet, men deres analyse har en litt større usikkerhet grunnet at det gjøres beregninger ut ifra hvilket blad som var nærmest lynet da lynet ble registrert av sensoren. Jomitek har sensoren på nede på tårnet istedenfor én sensor i hvert blad. Slik sett har LSA færre komponenter å installere, blant annet fordi den ikke inkluderer sensorer på hvert turbinblad. De oppgir at det tar omtrent to timer å installere selve sensorboksen på én turbin. Kontaktpersonen fra Jomitek oppgir også en estimert kostnad for én sensorboks på omtrent 30 000 NOK. Det ble oppgitt at det var litt for mange faktorer som bestemte pris på den totale installasjonen til at det var noe som kunne estimeres.

LS7002 fra Vaisala kan ikke gi informasjon om hvilket blad som ble truffet, men det kan gi informasjon om hvilken turbin eller hvilke turbiner som var i området det ble registrert lyn. Det kan føre til større usikkerhet for vindparkeierne, men det kan også oppleves som en sikkerhet sammenlignet med å ikke ha noen form for LDS i vindparken. LS7002 består ikke av mange komponenter, og installasjonen er derfor enkel og tidsmessig rask ifølge kontaktpersonen. Kontaktpersonen var ikke interessert i å oppgi en estimering av pris ved eventuell oppsetting av LS7002 i en vindpark, men ifølge Vaisala er det billigere enn å installere LDS som er integrert i selve vindturbinen.

Det at noen selskaper har oppgitt pris for kun komponentene til LDS, mens andre selskaper kun har gitt estimert kostnad for installasjonen, uten å ville nevne antall vindturbiner som er med i estimeringen, gjør det svært vanskelig å sammenligne de samlede kostnadene for LDS fra de ulike selskapene.

6.3.2 Vedlikehold

Informasjonen om vedlikehold som må utføres av vindparkeierne er oppgitt i litt variable mengder hos de ulike selskapene. Polytech sin kontaktperson oppgir at vedlikehold varierer ut ifra mange faktorer, og at det derfor er vanskelig å estimere mengden vedlikehold som må utføres. Han påpeker at det kan variere mellom alt fra flere ganger i året til én gang hvert fjerde år.

Phoenix Contact har fargesignaler som skal kommunisere situasjonen for systemet, og dette inkluderer da også behovet for vedlikehold. Oransje lys for både systemet og sensorene betyr at vedlikehold er nødvendig, men at systemet og målingen fortsatt er aktivt. Phoenix Contact oppgir også at det er viktig at kontaktene blir vasket, da støv eller skitne kontakter kan svikte ytelsen til overføringsbasen betydelig.

Jomitek oppgir at de har et feiltilstandsvarsel, som de har installert for å senke behovet for vedlikeholdsbesøk. De oppgir at dette også ble innført for å senke den totale eierkostnaden. Slikt kan virke betryggende for vindparkeierne. DEHN har ikke oppgitt mengde vedlikehold som må utføres, eller tiltak som er satt for å informere vindparkeierne om når vedlikehold eventuelt behøves. Vaisala har heller ikke oppgitt mengden vedlikehold som behøves. Kontaktpersonen til Vaisala oppgir at systemet er lett å vedlikeholde, og at det derfor medfører lave vedlikeholdskostnader for vindparkeierne. Det er ikke funnet noe dokumentasjon på dette.

6.3.3 Parametere

Den maksimale strømmen, både minimumsverdien og maksimumsverdien, som måles av ulike LDS varierer noe. Polytech oppgir at de måler maksimal lynstrøm mellom 100 A og 300 kA. Phoenix Contact og Jomitek måler begge minimumsverdi av maksstrøm på 1 kA. Phoenix Contact sin maksimumsverdi er på 400 kA, mens Jomitek har sin maksimumsverdi på 500 kA. DEHN har minimumsverdien den måler nede på 60 A, mens det maksimale maksstrømmen den måler er 250 kA. Vaisala sin kontaktperson oppgir at LS7002 ikke har noen øvre grense på maksimal strøm den måler. Den nedre grensen til den maksimale strømmen blir oppgitt til å være 3 kA. Alle selskapene er dermed også godt innenfor nivå 1 fra standarden IEC 62305.

Lyn fra sky til bakke er som regel mellom 5 kA og 200 kA. Alle LDS innenfor disse strømverdiene. Lynene som er målt i de aktuelle vindparkene for denne oppgaven har alle en maksimal strømverdi på under 200 kA. Den laveste maksimale strømverdien som er registrert er på 3 og 4 kA i absoluttverdi. Alle de fem LDS ville derfor målt disse lynene, siden det er over deres minimalverdi i maksstrøm.

Det er her et poeng å påpeke at lyddataen som er utgangspunkt for denne oppgaven er levert til meteorologisk institutt bassert på LS7002 fra Vaisala. Det er derfor en del feilmarginer i disse målingene, som det er skrevet om tidligere. Når Vaisala oppgir at minimalverdien til den maksimale strømmen den kan måle er 3 kA, fører det til at det er en mulighet for at det har vært lyn i parkene som ikke er detektert og rapportert til meteorologisk institutt. Da kan det være en mulighet for at det kan være lyn som hadde maksimal strømverdi på et nivå som faller under minimumsnivået for detektering til en eller flere av LDS-sensorene.

Alle fem LDS måler parameterne maks strømstyrke (kA), polariteten til lynet, spesifikk energi (kA/), maks stigetid (kA/ μ s) og ladeinnhold (C). I tillegg er det noen av selskapene som oppgir andre parametere de også måler. Jomitek oppgir at LSA kan oppgi om det har oppstått en lynreseptorskade. Det kan virke betryggende for vindparkeierne, da reseptorene er en viktig komponent i LPS. Dette er ikke en parameter de andre selskapene har oppgitt at de måler i de tilgjengelige filene som er funnet.

6.4 Bruk av LDS på Roan

I dette avsnittet blir varslere og alarmer fra LDS på Roan og avvik funnet i resultater ved sammenligning av lyddata fra Meteorologisk institutt og Bazefield diskutert.

6.4.1 Varsler og alarmer

Roan bruker LDS. De får varslinger og/eller alarmer når lynet har en maksimal strøm som har oversteget den gitte terskelverdien. De spesifikke parameterne til lynet som blir målt, blir ikke oppgitt i alarmen eller varslingen. Dersom operatørene er interessert i å vite parameterne som måles hos et spesifikt lyn, må de inn i turbinen og hente dette direkte fra LDS. Dersom mer spesifikk informasjon om lynnedslaget hadde blitt oppført ved alarmer og/eller varslinger, ville dette gitt vindparkeierne mulighet til å vurdere bedre om vindturbinen trenger en inspeksjon eller ikke.

Ved en eventuell skade på en vindturbin etter et lyn, kunne lagret informasjon om de ulike parameterne gjøre det lettere for vindparkeierne å evaluere årsaken til skaden. Risikoen ved dette er at det kan bli gitt for mye informasjon i én alarm eller varsel. En mulighet er å opprette flere alarmer som gir info om spesifikke parametere har oversteget bestemte terskelverdier ved et lyn. Polytech viser til dette ved beslutningstreet vist i figur 2.17 i teorikapitlet, der det blir poengtert om vindturbinen burde bli inspisert eller ikke basert på om de forskjellige parameterne har fått oversteget sine gitte terskelverdier. Dette er en mulighet uavhengig av hvilket LDS vindparken skulle benytte seg av.

I samtale med Vestas informerte de om at LDS intstallert på turbinene på Roan aktiverte lynvarsel om den detekterte maksstrøm over 400 kA. Turbinene på Roan har LPS-nivå 1 og er designet for å tåle en maksstrøm på 200 kA. At det ikke kommer varsel før lynet har en maksstrøm på 400 kA vil ikke anses som gunstig da mye lavere lynstyrker vil gjøre skade på turbinen. Vestas har ikke vært tilgjengelig for å diskutere dette og det store avviket kan tyde på at de har gitt feil informasjon om teknologien. LDS skiller mellom lynvarsel og lynalarm. Ved lynvarsel blir ikke turbinen stoppet men det blir gitt en varsel i Bazefield at det er detektert lyn. Varselet blir aktivert ved ”*Høy maks strøm*”. Når lynalarmen aktiveres vil turbinen bli stoppet og personell må godkjenne en ny oppstart. Lynalarmen aktiveres av LDS ved ”*For høy maks strøm*”. Vestas informerte om at både varsselen og alarmen blir aktivert ved lyn med maksstrøm over 400 kA. Fra tabell 4.5 er det kun lynvarsel som er blitt aktivert og det er ikke kommet lynalarm på Roan i løpet av parkens levetid. LDS har detektert lyn fra 3 kA noe som kan styrke teorien om at Vestas har gitt feil informasjon om terskelen for når varselene aktiveres.

6.4.2 Avvik

Fra tabell 4.5 vises det flere hendelser der det er detektert lyn men lyndataen har ikke registrert lyn i område. Det ble undersøkt om det kan komme feilvarseler fra LDS i turbinen. I samtale med teknikere på Roan ble det bekreftet at LDS er svært nøyaktig på å detektere lyn og det er lite sannsynlig at komponenter i nacellen eller vibrasjoner har utløst lynvarsel. Vaisala måler ikke lyn under 3 kA. På vinteren er det vinterlyn på kysten i Trønderlag. Vinterlyn varer lengre og har lavere maksstrøm enn lyn ellers på året. Den lave maksstrømmen kan gjøre det vanskeligere å oppdage lynene. Gjennom de tre siste årene er 40 % av lynene som Vaisala har registrert vært positive. Dette er langt mer enn 5 % som er den valige andelen av positive lyn. LDS til Vaisala registrerer dårligere positive lyn enn negative noe som kan være grunnen til at det er flere alarmer uten lyn registrert. Videre vises det i vedlegget A.4 at det er flere hendelser der det har vært gjentagende lynnedslag i nærheten av turbiner men hvor det ikke har oppstått lynvarsel. Dette kan skyldes at lynet ikke har slått ned i turbinvingen og dermed vil ikke lynet gå gjennom måleren plassert ved nedlederen. Andre årsaker kan være tekniske feil på lynmåleren, eller at lyndataen er unøyaktig.

6.4.3 LDS løse tvistesaker

Det er ofte uenigheter mellom vindturbin-eiere og produsenter angående lynskader på vindturbiner. Vanligvis er dette snakk om skader på bladene. Skadene involverer både tekniske aspekter knyttet til funksjonen til vindturbiner og kommersielle aspekter knyttet til eierskap og produksjon. Videre er samspillet mellom lyn og vindturbiner omfattet av betydelig usikkerhet, da intensiteten av lyn er vanskelig å vite med sikkerhet, og skaden det forårsaker er uforutsigbar. Ved bruk av LDS kan en få dokumentasjon om lyn som har truffet turbinen. Nyttig informasjon som hyppighet av lyn og lynstyrke kan brukes til å vurdere om skadene skal dekkes av garantibestemmelser. I samtale med kontaktperson i Polytech fortalte de om at de er blitt kontaktet ved flere tviste saker for å gi dokumentasjon på lyndata etter at en lynskade hadde oppstått. Denne type dokumentasjon kan være med på å avgjøre om turbinen skulle ha kunne motstått lynnedslaget etter spesifikasjoner, eller ikke.

6.4.4 Påvirkning fra lynnedslag

Fra figurene 4.1, 4.2 og 4.3 viser effektkurvene og figur 4.4, 4.5 og 4.6. Dataene for turbinen ble presentert for å se om det er noe visuell forskjell etter turbinen har blitt truffet av lyn på to forskjellige hendelser. Fra effektkurvene og trendkurvene vises det ikke vesentlige endringer i effektiviteten til turbinen ukene etter lynnedslaget og en kan derfor ikke se antydning til noen umiddelbare skader på turbinen. Det er viktig å ta i betraktning at mange faktorer som vindhastighet, ising på blad og andre problemer i turbinen kan også føre til endringer i produksjon og effektivitet og det vil være utfordrende å bruke disse verktøyene til å oppdage skader i turbinen.

6.5 LDS på Frøya og Hundhammerfjellet

Frøya og Hundhammerfjellet vindpark har ikke installert LDS. Faktorer som lynforekomster og indikasjoner fra standardvarsler kan være med på å avgjøre om det er behov for LDS.

6.5.1 Sammenligning av lyndata i parkene

Lyntettheten på Frøya er 1.043 lyn/km² i løpet av årene 2020 til 2022. I løpet av de samme årene er lyntettheten på Hundhammerfjellet 1.135 lyn/km². Sammenlignet med den årlige lyntettheten for Norge, som er 0.2 lyn/km², er dette relativt høyt. Dette kan komme av at det er mye lyn i vinterhalvåret, men det er også mulighet for at det var mye lyn de tre spesifikke årene. Likevel er det noe som bør tas til etterretning.

Vindparken på Roan har en gjennomsnittlig lyntetthet på 1.123 lyn/km^2 , som er litt høyere enn lyntettheten på Frøya, men litt lavere enn lyntettheten på Hundhammerfjellet. Av disse tre vindparkene er det derfor Hundhammerfjellet som har høyest lyntetthet.

Den gjennomsnittlige maksimale positive strømmen på Frøya er i løpet av de samme årene 24.000 kA . På Hundhammerfjellet er den gjennomsnittlige maksimale positive strømmen 24.125 kA . Dette er veldig likt, og begge er veldig godt innenfor maksimalverdien til alle nevnte LDS og innenfor den maksimale strømmen LPS beskytter seg mot. Roan har en gjennomsnittlig maksimal positiv strøm på 10.46 kA . Roan har dermed over halvparten så lav gjennomsnittlig maksimal positiv strøm som Frøya og Hundhammerfjellet. Den gjennomsnittlige maksimale negative strømmen på Frøya er -8.430 kA , og på Hundhammerfjellet er det -7.684 kA . Roan har til sammenligning en gjennomsnittlig maksimal negativ strøm på -6.67 kA . Roan har dermed lavest gjennomsnittlig negativ strøm av de tre parkene. Positive lyn blir regnet som mer skadelige enn negative. Som vist i resultater, er det betydelig større prosentandel positive lyn på Roan enn på Hundhammerfjellet, der prosentandelen er henholdsvis 41% på Roan, mens den er 18% på Frøya og 30% på Hundhammerfjellet. Sammenlignet med gjennomsnittet verden over, som er 5% positive lyn, er det høy prosentandel for alle de tre parkene. Roan har høyest prosentandel positive lyn, mens Hundhammerfjellet er relativt nærme med sine 30% . Frøya har relativt lavere prosentandel med sine 18% .

Dette er målinger i løpet av årene 2020-2022, så det er en mulighet for at det ikke representerer gjennomsnittet for lyntetthet og maksimal strømstyrke for alle tre parkene i et større historisk perspektiv. Likevel bør det tas i betraktning at Roan, der det er vedtatt å installere LDS, har lavere positiv og negativ gjennomsnittlig strømstyrke enn Frøya og Hundhammerfjellet. Frøya og Hundhammerfjellet vindpark har også veldig lik lyntetthet per år som Roan. Samtidig er vindparken på Roan mye større enn vindparkene på Frøya og Hundhammerfjellet, der Roan har 71 turbiner, mens det er 14 turbiner på henholdsvis Frøya og Hundhammerfjellet. Mesteparten av negative lyn har flere enn ett slag rundt samme tidspunkt, så dersom det oppstår, øker risikoen for at én eller flere turbiner kan bli truffet av et lyn parallelt med økningen av antallet turbiner som er i samme område. Positive lyn regnes som mest skadelig, men positivt lyn har som regel kun ett slag. Antall vindturbiner har dermed minimalt å si med tanke på hvor utsatt de er for å bli truffet av et positivt lyn.

6.5.2 Indikasjoner ved generelle varsler

På vindparkene på Frøya og Hundhammerfjellet ble det sjekket hvilke varslinger og/eller alarmer som har oppstått 10 minutter etter at et lyn er registrert hos meteorologisk institutt. Hensikten er å finne ut om alarmene kan gi informasjon om at det har slått ned lyn i turbinen, slik at det kan vurderes om det eventuelt trengs LDS i vindturbinene eller ikke. Årsaken til at det ble valgt 10 minutter etter at lynet ble registrert, er at det var tidsrammen som oppdragsgiver ANEO var interessert i at skulle bli sjekket. Frøya ble vurdert til å ikke ha noen relevante varslinger eller alarmer i den gjeldende tidsperioden etter lynet ble registrert. Varslingene og alarmene som oppsto blir regnet som tilfeldige i forhold til at de ikke kan ha oppstått som et resultat av lyn. På Hundhammerfjellet derimot er det flere alarmer som har oppstått som kan være forårsaket av lyn. I åtte av lyntilfellene mellom 2020 og 2022 oppsto alarmen som forteller at det er oppstått støy i nacellen. I alle tilfellene oppsto alarmen på det samme minuttet som lynet er registrert. I to av alarmtilfellene på Hundhammerfjellet oppsto det en alarm om at røykdetektorene på en vindturbin er aktivert, i begge alarmtilfellene i samme minutt som lynene er registrert. Det oppsto på en turbin som er innenfor 1 km i radius fra koordinatet til det gjeldende lynet for begge tilfellene. Det kan derfor ha oppstått på grunn av lynet. Det er mulighet for at det er tilfeldig, men det blir sett på med interesse at alle de nevnte alarmene oppsto i det samme minuttet som lynet ble registrert.

Det at det er ulike resultater fra begge parkene gjør det vanskelig å danne et eventuelt mønster ut i fra disse to parkene. Derfor ble eventuelle varslinger og alarmer på Roan også sjekket. På Roan ble det sjekket varslinger og alarmer som oppsto i 10 minutter etter at LDS på turbinen registrerte lyn, istedenfor opp mot lyndataen som ble gitt av meteorologisk institutt. Det er fordi ved en lynalarm er det nærmest sikkert at det har vært et lyn rett ved den gjeldene turbinen. Her viser resultatet at det ikke er noen varsler eller alarmer som tilsier at det har vært lyn, utenom lynalarmen fra LDS. Varslinger og alarmer som oppsto ble vurdert til å være rutinemessige. Det er derfor vanskelig for operatørene å vite at det eventuelt har vært lyn i området på Roan, dersom det ikke hadde vært for LDS. Basert på resultatene i de tre nevnte parkene, er det vanskelig å danne et mønster på alarmer og varslinger som oppstår etter at det har vært lyn i område. Det er kun mulighet for å sjekke alarmene fra og med 2020, så det er mulighet for at det kunne oppstått et litt annet resultat, og et potensielt mønster, dersom det hadde blitt undersøkt varslinger og alarmer mot lyn fra litt lenger tilbake i tid.

6.6 Fremtidig arbeid

Fremtidig arbeid består av temaer inne for oppgaven som vil være interessant å studere videre. Temaene ble ikke inkludert i oppgaven på grunn av mangler på tilgjengelig data eller at temaene var utenfor oppgavens avgrensinger. Imidlertid er det flere viktige aspekter for videre utvikling i LPS av vindturbiner som det kan vurderes å studere nærmere.

6.6.1 Høyde på turbiner

Som skrevet om i teorien, er turbiner mer utsatt for lyn jo nærmere de er -10°C -laget i skyene. En interessant problemstilling er hvordan dagens utvikling av turbiner tar hensyn til slikt, dette sett i lys av at vindturbiner har blitt høyere og høyere de siste årene. I dag er vindturbinene rundt 100m høye, mens den første multi-MW-turbinen kun var 54m høy. Det hadde vært interessant å undersøke om vindturbinprodusenter tar hensyn til denne problemstillingen når de utvikler vindturbiner, og eventuelt om de har en løsning på det.

6.6.2 Tiden på bazefield

I Bazefield ble det oppdaget at tidspunkt for varslingene og alarmene som ble hentet ut da skrivingen av denne oppgaven startet, hadde endret seg. Noen alarmer og varslinger som ble hentet ut i februar hadde et annet oppgitt tidspunkt enn det de samme varslingene og alarmene hadde når de senere ble sjekket i bazefield. Dette er en feilkilde i denne oppgaven, og det oppleves som en interessant problemstilling å undersøke videre.

6.6.3 Sammenligne LPS-teknologier med skader

Parkene som undersøkes i denne oppgaven er relativt nye, og det derfor kun tilgjengelige varslinger og alarmer fra turbinene i disse parkene for de siste årene. Optimalt sett, særlig ved analyse av varslinger og alarmer på Hundhammerfjellet og Frøya når det er registrert lyn, hadde det vært bedre med mer historisk data for å kunne danne et eventuelt mønster. Dette gjelder også ved analysen av lynalarmer på Roan. Derfor virker det interessant å gjøre den samme analysen om noen år, når det vil være tilgang på mer data.

6.6.4 Dokumentasjon fra Japan

Japan har vært et land som er nevnt av mange kontaktpersoner i sammenheng med LPS og LDS, da de er utsatt for mye lyn. Det ble ikke funnet mye informasjon om dette på nettet, og det mistenkes at noe av grunnen er at mye av informasjonen sannynligvis er skrevet på japansk. Det ble forsøkt å komme i kontakt med vindparkeiere og selskaper i Japan, med den hensikt å forhåpentligvis få mer informasjon om hvordan LPS og LDS fungerer der. Mer informasjon om hvordan standarden benyttes der sammenlignet med her i Norge og Europa ville vært av stor interesse. Henvendelsene ble dessverre ikke besvart. Vurdering fra Japan er likevel noe som virker veldig interessant, særlig da med tanke på at de kunne gitt informasjon om deres erfaringer. Kanskje denne kunnskapen også kunne inspirert vindparkeiere og selskaper her i Europa.

6.6.5 Info fra parkeiere

Det ble også forsøkt å komme i kontakt med parkeiere i USA. Dette var et land som også ble nevnt av noen av kontaktpersonene, men da i litt mindre grad enn Japan. Hensikten var å høre deres erfaringer med LDS, spesielt da det ble gitt inntrykk av at dette blir brukt i mange parker der. Disse henvendelsene ble dessverre heller ikke besvart, men dette blir også sett på som et interessant område å undersøke nærmere.

7 Konklusjon

For store turbinblader slik som i de gjeldende vindparkene bør eksterne nedledere brukes med mesh-nedledere. Eksterne nedledere gir bedre beskyttelse og betydelig reduksjon i maksimal strøm gjennom de strukturelle delene av turbinbladene. Bruk av droner som kan inspisere reseptorene og nedlederne vil forbedre effektivitet og sikkerheten for teknikere i tillegg til å være økonomisk gunstig ved å unngå store kraner og minke nedetiden. Det bør vurderes om det trengs ytterligere LPS på vindparkene for parametere høyere enn LPL1, dette for å kunne ruste turbinene mot vinterlyn og mange positive lyn som oppstår på vindparkene.

Hendelser der det er lynvarsel, men det ikke er registrert lyn skyldes trolig unøyaktigheter i LDS benytta av Meteorologisk institutt. Dette kan komme av at det er mange positive lyn på Roan. Det er hendelser der det har vært gjentakende lynnedslag i nærheten av en turbin, men hvor det ikke har vært lynvarsel. Dette kan komme av at lynet ikke har slått ned i turbinbladet og dermed vil ikke lynet gå gjennom måleren plassert ved nedlederen, eller at det har vært tekniske feil på LDS-teknologien. Det er derfor viktig å være oppmerksom på skader ved lyn selvom det ikke er kommet lynvarsel.

Alarmer og varslinger i Bazefield vil være mer brukervennlig om de viser ladningen, maks strøm og polariteten til det målte lynet. Dette gjør skadevurdering lettere ved lynvarsel. Det bør videre bli avklart med Vestas ved hvilke verdier varselene og alarmene blir aktivert. Om det stemmer at disse ikke blir aktivert før 400 kA bør dette endres på. Lynalarmene bør aktiveres ved minst 200 kA da dette er det LPS er maksimalt konstruert for å tåle.

Lyntettheten i parkene er omtrentlig lik, men styrken på positive lyn er betydelig høyere på Frøya og Hundhammerfjellet. Varslinger fra Bazefield viste ikke indikasjon på lyn for vindparkene uten LDS. Installasjon av LDS i disse vindparkene vil være med på å forebygge potensielle lynskader. LDS vil være gunstig for å ha dokumentasjon på lynhyppighet og lynstyrke. Dette kan brukes til å vurdere om turbinen oppfylder garantibestemmelser fra turbinprodusentene i tvistesaker mellom produsenter og kraftprodusenter.

LMS fra Phoenix Contact eller LKDS fra Polytech anses som best egnet for vindparkene. Disse LDS stiller svært likt sett opp mot hverandre, der begge har faktorer som taler til deres fordel. Det er uansett viktig å vurdere behovet til hver vindpark ved vurdering av LDS.

Referanser

- [1] M. Stickland A. S. Ayub W. H. Siew. “External lightning protection system for wind turbine blades - Power performance”. I: (2018). URL: https://pure.strath.ac.uk/ws/portalfiles/portal/79603578/Ayub_etal_CIGRE_2018_External_lightning_protection_system_for_wind_turbine_blades.pdf.
- [2] Electrical Academia. “Wind Turbine Parts and Functions”. I: (2023). URL: https://electricalacademia.com/renewable-energy/wind-turbine-parts-functions/?utm_content=cmp-true (sjekket 03.05.2023).
- [3] Steinar Qvenild Andersen. “Hva er lyn og torden?” I: (2002). URL: <https://forskning.no/bakgrunn-klimateorologi/hva-er-lyn-og-torden/1081128> (sjekket 23.04.2023).
- [4] ANEO. “Fra TrønderEnergi og Ohmia til Aneo”. I: (2023). URL: <https://www.aneo.com/om-oss/om-aneo/> (sjekket 19.05.2023).
- [5] ANEO. “Frøya vindpark”. I: (2023). URL: <https://www.aneo.com/fornybar-kraft/var-kraftproduksjon/froya-vindpark/> (sjekket 23.04.2023).
- [6] ANEO. “Hundhammerfjellet vindpark”. I: (2023). URL: <https://www.aneo.com/fornybar-kraft/var-kraftproduksjon/hundhammerfjellet-vindpark/> (sjekket 26.04.2023).
- [7] ANEO. “Roan vindpark”. I: (2023). URL: <https://www.aneo.com/fornybar-kraft/var-kraftproduksjon/roan-vindpark/> (sjekket 23.04.2023).
- [8] ANEO. “Vår kraftproduksjon”. I: (2023). URL: <https://www.aneo.com/fornybar-kraft/var-kraftproduksjon/> (sjekket 03.05.2023).
- [9] Marius Solberg Anfinsen. “Her lyner det mest - og minst”. I: (2017). URL: <https://www.frende.no/aktuelt/her-lyner-det-mest-og-minst/> (sjekket 27.04.2023).
- [10] Anne Buckle. “UTC – The World’s Time Standard”. I: (2023). URL: <https://www.timeanddate.com/time/aboututc.html> (sjekket 23.04.2023).
- [11] Dino Clark. “GCUBE TOP 5 US WIND ENERGY INSURANCE CLAIMS REPORT”. I: (2023). URL: <http://www.gcube-insurance.com/news/gcube-top-5-us-wind-energy-insurance-claims-report/>.
- [12] Phoenix contact. “Lightning current measurement for wind turbine generators”. I: (2019). URL: <https://www.phoenixcontact.com/en-pc/industries/applications/lightning-current-measurement-wind-turbine-generators> (sjekket 12.02.2023).
- [13] Phoenix contact. “Om oss”. I: (2022). URL: <https://www.phoenixcontact.com/no-no/om-oss> (sjekket 12.02.2023).

- [14] Phoenix contact. “Startup and operation of the LM-S lightning monitoring system”. I: (2018). (Sjekkset 09.05.2023).
- [15] DEHN. “About us”. I: (2023). URL: <https://www.dehn-international.com/en/dehn> (sjekkset 29.04.2023).
- [16] DEHN. “DEHNdetect”. I: (2023). (Sjekkset 29.04.2023).
- [17] DEHN. “DEHNdetect lightning current measuring system”. I: (2023). URL: <https://www.dehn-international.com/en/dehndetect-reliable-detection-long-stroke-currents-wind-power-plants> (sjekkset 29.04.2023).
- [18] DEHN. “Since 1910: DEHN”. I: (2023). URL: <https://www.dehn-international.com/en/company-history> (sjekkset 29.04.2023).
- [19] DEHN. “Upward flashes – a risk for wind turbines”. I: (2023). URL: <https://www.dehn-international.com/en/upward-flashes> (sjekkset 25.04.2023).
- [20] Paul Dvorak. “Vaisala releases the Advanced Total Lightning sensor”. I: (2013). URL: <https://www.windpowerengineering.com/vaisala-releases-advanced-total-lightning-sensor/> (sjekkset 29.04.2023).
- [21] Knowhow Electrical. “Design Calculations of Lightning Protection Systems Electrical Knowhow”. I: (2021). URL: <http://www.electrical-knowhow.com/2014/05/Rolling-Sphere-Method-for-Lightning-Protection-Design.html> (sjekkset 23.04.2023).
- [22] Exponent. “lightning protection for wind turbines”. I: (). URL: <https://www.exponent.com/knowledge/alerts/2017/06/lightning-protection-for-wind-turbines/?pageSize=NaN&pageNum=0&loadAllByPageSize=true> (sjekkset 25.01.2023).
- [23] Kim Folkmann. “European patent application”. I: (2011). URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/65/ba/fe/e5fe0df4cda6c2/EP233659A1.pdf>.
- [24] National Geographic. “Lightning”. I: (2023). URL: <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/lightning> (sjekkset 23.04.2023).
- [25] B. Glushakow. “Effective lightning protection for wind turbine generators”. I: (2007).
- [26] Google. “Utforsk og naviger i verdenen din”. I: (2023). URL: <https://www.google.com/maps/about/#!/> (sjekkset 19.05.2023).
- [27] T.Hennum H.Karoliussen. “Fornybar energi grunnkurs - vindkraft”. I: (2019). (Sjekkset 01.05.2023).
- [28] Allen Hall. “Lightning diverter spesifications”. I: (2023). URL: <https://weatherguardwind.com/striketape/> (sjekkset 11.05.2023).
- [29] Tore Halvorsen. “Hissige vinterlyn”. I: (2017). URL: <https://energiteknikk.net/2017/01/hissige-vinterlyn/> (sjekkset 11.05.2023).

- [30] Trygve Holtebekk. “Lyn”. I: (2022). URL: <https://snl.no/lyn> (sjekket 23.04.2023).
- [31] IEC. “The International Electrotechnical Commission (IEC)”. I: (2023). URL: <https://www.iec.ch/understanding-standards>.
- [32] Inritsu. “O/E Calibration Module”. I: (2023). URL: <https://www.anritsu.com/en-us/components-accessories/products/mn4765b> (sjekket 12.02.2023).
- [33] Meteorologisk institutt. “Data Clarifications”. I: (2023). URL: <https://frost.met.no/dataclarifications.html> (sjekket 30.03.2023).
- [34] Meteorologisk institutt. “Informasjon om lynobservasjoner i Norge”. I: (2017). URL: <https://lyn.met.no/info.html> (sjekket 30.03.2023).
- [35] Meteorologisk institutt. “What is Frost?” I: (2023). URL: <https://frost.met.no/index.html> (sjekket 30.03.2023).
- [36] Jomitek. “Enabling efficient operations and maintenance in the power sector”. I: (2023). URL: <http://jomitek.dk/en/about/> (sjekket 28.04.2023).
- [37] Jomitek. “Jomitek”. I: (2023). URL: <http://jomitek.dk/downloads/Jomitek%20lightning%20tape.pdf> (sjekket 21.03.2023).
- [38] Jomitek. “Lightning Sensor and Analyzer”. I: (2022). URL: <http://jomitek.dk/en/products/lightning-sensor-analyzer/> (sjekket 29.04.2023).
- [39] Jomitek. “User manual”. I: (2022). (Sjekket 28.04.2023).
- [40] K.A.Rosvold K.Hofstad. “Vindturbin”. I: (2022). URL: <https://snl.no/vindturbin> (sjekket 03.05.2023).
- [41] Hazem Kaylani. “Component-level failure analysis using multi-criteria hybrid approach to ensure reliable operation of wind turbines”. I: (2021). URL: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0309524X211003960?journalCode=wiea> (sjekket 03.05.2023).
- [42] Hobart M. King. “World lightning map”. I: (2022). URL: <https://geology.com/articles/lightning-map.shtml> (sjekket 27.04.2023).
- [43] Richard Kithil. “Case Study of Lightning Damage to Wind Turbine Blade”. I: (2008). URL: https://docs.wind-watch.org/wind_blade_damage.pdf (sjekket 16.05.2023).
- [44] Frøya kommune. “Fakta - Dette har skjedd - Frøya vindkraftverk 2002 - d.d.” I: (2023). URL: <https://www.aneo.com/fornybar-kraft/var-kraftproduksjon/froya-vindpark/> (sjekket 23.04.2023).
- [45] Morten Andreas Ødegaard Køltzow. “Lynstudien”. I: (2011). (Sjekket 27.04.2023).
- [46] S. F. Madsen L. javier S.Vogel. “Investigation of weather conditions leading to different types of lightning strikes measured in wind turbine blades”. I: *Polytech A/S* (2023).

- [47] LPC. “lps for wind turbines”. I: (2011). URL: https://lpconcepts.com/_downloads/lps-for-wind-turbines.pdf?.
- [48] LSP. “BS EN IEC 62305 Lynbeskyttelsesstandard”. I: (2015). URL: <https://www.lsp-international.com/no/bs-en-iec-62305-lightning-protection-standard/>.
- [49] Søren F. Madsen. “Lightning monitoring for reducing blade OPEX”. I: (2022). (Sjekk 03.05.2023).
- [50] Søren F. Madsen. “Why choose an external down conductor in an LPS for carbon blades?” I: (2022). URL: <https://www.polytech.com/blog/why-choose-an-external-down-conductor-in-an-lps-for-carbon-blades/> (sjekk 11.05.2023).
- [51] Amy Mckeever. “The mystery behind thundersnow, a rare winter phenomenon”. I: (2023). URL: <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/thundersnow-lightning-winter-weather-phenomenon> (sjekk 11.05.2023).
- [52] Brit Nes. “Lyn og torden”. I: (2022). (Sjekk 25.04.2023).
- [53] Jannicke Nilsen. “Vingespenn på 236 meter: Verdens kraftigste vindturbin leverer strøm”. I: (2023). URL: <https://www.europower.no/vindkraft/vingespenn-pa-236-meter-verdens-kraftigste-vindturbin-leverer-strom/2-1-1383322> (sjekk 03.05.2023).
- [54] Energifakta Norge. “Kraftproduksjon”. I: (2022). URL: <https://energifaktanorge.no/norsk-energiforsyning/kraftforsyningen/#vindkraft> (sjekk 03.05.2023).
- [55] NTB. “Nå smeller det: Så mange beskytter tingene sine mot lynvær”. I: (2021). URL: <https://kommunikasjon.ntb.no/pressemelding/na-smeller-det-sa-mange-beskytter-tingene-sine-mot-lynvaer?publisherId=5653809&releaseId=17912534> (sjekk 27.04.2023).
- [56] NVE. “Reetablering av Hundhammerfjellet vindkraftverk”. I: (2020). URL: <https://www.nve.no/konsesjon/konsesjonssaker/konsesjonssak?id=4535&type=A-6> (sjekk 26.04.2023).
- [57] Tom Heine Nätt. “Metadata”. I: (2023). URL: <https://snl.no/metadata> (sjekk 30.03.2023).
- [58] Sokratis Pastromas og Eleftheria Pyrgioti. “Modular Lightning Protection for Wind Turbines”. I: (2023). URL: <file:///C:/Users/nora0/Downloads/wind-03-00008.pdf> (sjekk 16.05.2023).
- [59] Bjørn Pedersen. “Isoterm (kjemi)”. I: (2021). URL: https://snl.no/isoterm_-_kjemi (sjekk 08.05.2023).
- [60] Technical Committee PEL/88. “NEK IEC 62305-4:2010”. I: *The British Standards Institution: London, UK*, (2010).

- [61] Technical Committee PEL/88. “Wind Turbines Part. 24: Lightning Protection”. I: *The British Standards Institution: London, UK*, (2019).
- [62] Pemuk. “What is a Rogowski Coil?” I: (2013). URL: <http://www.pemuk.com/how-it-works.aspx> (sjekket 02.02.2019).
- [63] Polytech. “Lightning Key Data System (LKDS®)”. I: (2023). URL: <https://www.polytech.com/media/4241/polytech-lightning-key-data-system.pdf>.
- [64] Polytech. “We make sustainability profitable”. I: (2023). URL: <https://www.polytech.com/about/about/> (sjekket 30.04.2023).
- [65] J.P.S. Catalão R.B. Rodrigues V.M.F. Mendes. “An investigation over the lightning location system in Portugal for wind turbine protection development”. I: (2008).
- [66] Bernd Radowitz. “Lightning strike blade damages push Vestas into fresh quarterly loss”. I: (2020). URL: <https://www.rechargenews.com/wind/lightning-strike-blade-damages-push-vestas-into-fresh-quarterly-loss/2-1-855590> (sjekket 10.05.2023).
- [67] Dan Robinson. “Thundersnow”. I: (2018). URL: <https://stormhighway.com/thundersnow.php> (sjekket 11.05.2023).
- [68] Knut A. Rosvold. “Hundhammerfjellet vindpark”. I: (2023). URL: https://snl.no/Hundhammerfjellet_vindpark (sjekket 26.04.2023).
- [69] Knut A. Rosvold. “Roan vindpark”. I: (2023). URL: https://snl.no/Roan_vindpark (sjekket 23.04.2023).
- [70] Anil Sasi. “When lightning travels from ground to sky: How upward streamers work”. I: (2023). URL: <https://indianexpress.com/article/explained/explained-sci-tech/what-is-upward-lightning-explained-8525379/> (sjekket 10.05.2023).
- [71] Matthew Senn. “Lightning Damage to Wind Turbine”. I: (2022). URL: <https://www.envistaforensics.com/knowledge-center/insights/articles/lightning-damage-to-wind-turbine/> (sjekket 10.05.2023).
- [72] National Weather Service. “The Positive and Negative Side of Lightning”. I: (2023). URL: <https://www.weather.gov/jetstream/positive> (sjekket 25.04.2023).
- [73] Naumanulhaq Barkatullah Shaikh. “Lightning protection system for wind turbine blade”. I: *Global journal of engineering science and researches* (2017).
- [74] RONNI BING SIMONSEN. “Drone inspection of wind turbines – on- and offshore”. I: (2023). URL: <https://forcetechnology.com/en/services/inspection/drone-inspection-of-wind-turbines-onshore-and-offshore> (sjekket 11.05.2023).
- [75] Anders Doksæter Sivle. “Cumulonimbus”. I: (2022). URL: <https://snl.no/cumulonimbus> (sjekket 25.04.2023).

- [76] Anders Doksæter Sivle. “Konveksjon”. I: (2023). URL: https://snl.no/konveksjon_-_meteorologi (sjekket 25.04.2023).
- [77] Johannes Skaar. “Polarisert lys”. I: (2018). URL: https://snl.no/polarisert_lys (sjekket 12.02.2023).
- [78] SMHI. “SMHI Open Data API Docs - Lightning Archive”. I: (2023). URL: <https://open.data.smhi.se/apidocs/lightning/parameters.html> (sjekket 30.03.2023).
- [79] Statkraft. “Roan vindpark”. I: (2023). URL: <https://www.statkraft.no/om-statkraft/hvor-vi-har-virksomhet/norge/roan-vindpark/> (sjekket 23.04.2023).
- [80] Erlend Tangeraas Lygre. “Slik finner de ut hvor lynet slår ned”. I: (2014). URL: <https://www.tu.no/artikler/slik-finner-de-ut-hvor-lynet-slar-ned/223116> (sjekket 30.03.2023).
- [81] Daphne Thompson. “It’s Not Your Rubber Tires That Protect You From Lightning”. I: (2016). URL: <https://www.dtn.com/have-you-heard-of-a-faraday-cage/> (sjekket 10.05.2023).
- [82] NEDO Touyou-Sekkei. “Lightning Protection for WTGS in Japan (Japanese)”. I: (2007).
- [83] Utic. “Hva er SCADA?” I: (2022). URL: <https://www.autic.no/hva-er-scada/> (sjekket 07.02.2019).
- [84] Vaisala. “Advanced Lightning™ Sensor LS7002”. I: (2020). URL: <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/WEA-MET-ProductSpotlight-LS7002-B212227EN-A.pdf> (sjekket 29.04.2023).
- [85] Vaisala. “Decades of innovation”. I: (2023). URL: <https://www.vaisala.com/en/vaisala-company/history> (sjekket 29.04.2023).
- [86] Vaisala. “Global Lightning Dataset GLD360 for Wind Energy”. I: (2018). URL: <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/WEA-DIG-ERG-ProductSpotlight-GLD360-Wind-B212495EN-A.pdf> (sjekket 29.03.2023).
- [87] Vaisala. “Vaisala Weather”. I: (2022). URL: <https://interactive-lightning-map.vaisala.com> (sjekket 27.04.2023).
- [88] Odd Richard Valmot. “Slik oppstår lyn og torden”. I: (2008). URL: <https://www.tu.no/artikler/slik-oppstar-lyn-og-torden/258447> (sjekket 25.04.2023).
- [89] Voliro. “Elios3”. I: (2023). URL: <https://www.flyability.com/elios-3> (sjekket 11.05.2023).
- [90] Voliro. “The mystery behind thundersnow, a rare winter phenomenon”. I: (2023). URL: <https://voliro.com/case-studies/wind-turbine-lps-drone-inspection> (sjekket 11.05.2023).

- [91] Eize de Vries. “Enercon’s E-nacelle marks next ‘technology transition leap’”. I: (2021). URL: <https://www.windpowermonthly.com/article/1701636/exclusive-enercons-e-nacelle-marks-next-technology-transition-leap> (sjekket 23.04.2023).
- [92] Ben Wang mfl. “Fabrication of continuous carbon fiber mesh for lightning protection of large-scale wind-turbine blade by electron beam cured printing”. I: (2020). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860419312072>.
- [93] J.; Zhou Wang Y.; Wang. “Characteristic of Wind Turbine Blade with Two-receptors”. I: (2018).
- [94] Ueda Yoshinori. “Measurement Experience of Lightning Currents to Wind Turbines”. I: (2007). URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=e677f92fd434d1efafe42fdb5c85159bf5fc3432> (sjekket 16.05.2023).
- [95] YR. “Lyn – motsetninger tiltrekker hverandre”. I: (2011). URL: <https://www.yr.no/artikkel/motsetningene-skaper-lyn-1.7784970> (sjekket 25.04.2023).

A Lyndata fra vindparkene

Figur A.1: Lyndata for Roan 2020 - 2022

År	Måned	Dag	Time	Minutt	Maks strøm [kA]	Antall sensorer	Maks stigetid [kA/μs]	Sky-sky = 1, sky-bakke = 0	Avstand fra turbin
2020	1	3	14	26	-6	5			1 På Roan 46 , 500 m unna 45, 340 m unna 47
2020	1	3	23	42	-13	5 -3.5			0 600 m unna 25
2020	1	3	23	42	-6	4 -2.0			1 435 m unna 25
2020	1	3	23	42	-7	5 -2.5			0 160 m unna 25, 500 m unna 24
2020	1	3	23	42	-7	5 -2.8			0 136 m unna 25, 490 m unna 24
2020	1	3	23	42	-10	5 -3.6			0 136 m unna 25, 490 m unna 24
2020	1	3	23	42	-10	6 -3.6			0 340 m unna 25
2020	1	8	12	26	12	5 0.0			1 ca 700 m unna 12 og 800 m unna 3
2020	1	8	12	26	12	5 0.0			1 ca 700 m unna 12 og 800 m unna 3
2020	1	8	12	26	14	5 0.0			1 ca 700 m unna 12 og 800 m unna 3
2020	1	8	12	26	20	3 0.0			1 315 m unna 12 og 600 m unna 11
2020	1	8	13	23	-7	5 -3.0			0 100 m unna 46, 250 m unna 47, 500 m unna 45
2020	1	8	14	16	-7	4 -3.1			1 x
2020	1	8	16	10	-6	4 -2.3			1 300 m unna 12
2020	1	8	16	11	-7	2 -2.4			0
2020	1	8	16	11	-10	5 -3.5			1 300m unna 16, 500m unna 12
2020	1	8	16	11	11	4 -2.3			1 x
2020	1	8	16	11	11	5 0.0			1 x
2020	1	8	16	13	-12	8 -3.9			0 260 m fra 71
2020	1	8	16	13	-8	6 -2.6			0 230 m fra 32 og 33, 550 m fra 31, 407 fra 30, 380 m fra 29
2020	1	8	16	13	-7	5 -2.4			0 200 m fra 59, 440 m fra 61 og 62
2020	1	8	16	13	-5	3 -1.9			0 200 m fra 59, 440 m fra 61 og 62
2020	1	8	16	13	-6	5 -1.7			1 170 m fra 27
2020	1	8	16	13	-6	5 -2.0			1 120 m fra 27
2020	1	8	16	14	7	5 0.0			1 250 m fra 66 og 65
2020	1	8	16	14	10	6 2.0			1 x
2020	1	8	16	14	-9	5 -3.9			1 100 m fra 7
2020	1	8	16	14	-8	5 -3.6			1 110 m fra 7
2020	1	8	16	14	-7	3 -3.4			1 190 m fra 9
2020	1	8	16	14	-8	5 -3.6			0 140 m fra 7
2020	1	8	16	14	-5	3 -0.0			0 300 m fra 71
2020	1	8	16	14	-6	5 -2.4			0 270 m fra 71
2020	1	8	16	15	-5	6 -0.0			1 x
2020	1	8	16	16	-5	4 -2.0			1 70 m fra 41
2020	1	8	16	17	-8	4 -2.8			0 150 m fra 50
2020	1	8	16	18	33	8 6.6			0 x
2020	1	8	18	44	13	8 3.8			0 200 m fra 40 og 41
2020	1	8	19	11	7	5 0.0			1 x
2020	1	8	19	18	9	4 0.0			1 x
2020	1	8	19	18	7	6 1.8			1 140 m fra 22 og 280 m fra 21
2020	1	8	19	18	8	4 0.0			1 x
2020	1	8	19	20	5	5 1.1			1 x
2020	1	11	22	17	-5	4 -2.0			1 240 m på 19
2020	1	11	22	17	-8	5 -2.9			0 230 m da 19
2021	2	13	0	37	-6	4 -2.3			1 0 m fra 19
2021	2	13	0	37	-6	3 -2.3			1 250 m fra 46
2021	2	13	0	37	-7	3 -2.4			1 270 fra 46
2021	2	13	0	37	-8	4 -3.0			1 550 m fra 46
2021	2	13	0	37	-6	4 -2.3			1 520 m fra 46

Figur A.2: Lyndata for Roan 2020 - 2022

2021	3	24	15	20	5	4 0.0	1 255 fra 46
2021	3	24	15	20	5	3 0.0	1 x
2021	3	24	15	20	8	3 0.0	1 340 m fra 4
2021	3	24	15	20	11	3 0.0	1 460 m fra 2, 370 m fra 3
2021	3	24	15	20	6	3 0.0	1 x
2021	3	29	19	31	-11	7 -1.7	1 260 m fra 6
2021	3	29	19	31	-7	5 -2.1	0 250 m fra 25, 290 m fra 24
2021	3	30	0	19	9	4 0.0	1 260 m fra 25
2021	3	30	0	19	11	4 0.0	1 x
2021	3	30	0	19	35	4 0.0	1 x
2021	3	30	0	19	6	5 0.0	1 x
2021	3	30	0	19	16	4 0.0	1 x
2021	3	30	0	19	24	3 0.0	1 x
2021	4	5	5	22	-5	4 -1.5	1 270 m 26
2021	4	5	14	44	-5	4 -1.9	0 260 m fra 8, 350 m fra 8, 330 m 9, 290 m fra 17
2021	4	5	14	44	-4	3 -1.6	1 480 m fra 21
2021	4	5	14	44	-5	4 -1.7	1 x
2021	4	5	14	44	-11	7 -3.2	0 470 m fra 21
2021	4	5	14	44	-11	5 -3.7	0 490 m fra 21
2021	4	5	14	44	-8	5 -2.6	0 450 m fra 21
2021	4	5	20	0	-8	5 -2.5	1 300 m fra 21
2021	4	5	20	0	-5	4 -1.3	1 500 m fra 25, 350 m fra 24
2021	4	5	20	0	-5	4 -1.8	1 500 m fra 24
2021	4	5	20	0	-9	5 -3.5	1 500 m fra 24
2021	4	5	20	0	-11	4 -2.5	0 296 m fra 24, 440 m fra 25
2021	4	5	20	0	-5	4 -2.0	1 380 m fra 24,
2021	4	5	20	0	-4	4 -1.4	1 444 m fra 24
2021	4	5	20	0	-8	5 -2.6	1 235 m fra 24, 427 m fra 25
2021	4	5	20	0	-6	5 -2.4	1 235 m fra 24, 427 m fra 25
2021	4	5	20	5	-5	3 -1.4	0 110 m fra 24
2021	4	6	2	51	-4	4 -1.8	0 418 m fra 47
2021	4	7	18	18	-5	4 -1.5	1 270 m fra 23
2021	4	7	18	18	-5	5 -1.9	1 355 m fra 64, 390 m fra 68
2021	4	7	18	18	-3	3 -1.1	1 70 m fra 64
2021	4	7	18	18	-6	5 -2.0	1 200 m fra 64
2021	4	13	20	12	-6	4 -2.1	1 140 m fra 64, 203 m fra 65
2021	4	22	2	18	-7	4 -2.8	1 480 m til 2 og 4
2021	11	10	9	26	-6	5 -1.9	1 450 m fra 3
2021	11	10	9	26	-5	4 -1.5	1 60 m fra 15
2021	11	10	9	26	-6	4 -1.7	1 270 m fra 15
2021	11	10	9	28	-5	4 -1.2	0 400 m fra 15
2021	11	10	13	56	-6	4 -2.5	1 280 m fra 18, 500 m fra 19, 575 m fra 20, 630 m fra 21 og 22
2021	11	10	13	56	-6	4 -2.5	1 samme som nednfor (X170) 1.3 km fra 71, 1.6 km fra 69
2021	11	10	18	19	-7	4 -2.3	1 270 m fra 59, 543 m fra 60, 511 m fra 62, 1.32 km fra 71, 1.59 km fra 69
2022	1	14	2	18	-7	5 -1.4	0 211 m fra 46, 450 m fra 47, 640 m fra 45
2022	1	14	2	18	-6	4 -2.0	1 733 m fra 12
2022	1	16	16	25	31	4 7.9	0 725 m fra 3, 360 m fra 12
2022	1	16	16	25	14	4 0.0	1 550 m fra 3, 1.27 km fra 12
2022	1	16	16	25	25	4 0.0	1 560 m fra 3, 440 m fra 2, 1.24 km fra 12
2022	1	16	16	25	13	3 0.0	1 x
2022	1	16	16	26	3	3 0.0	1 x

Figur A.3: Lyndata for Roan 2020 - 2022

2022	1	16	16	26	4	4 0.0	1 580 m fra 3
2022	1	16	16	26	5	4 0.0	1 900 m fra 3
2022	1	16	16	32	7	3 0.0	1 900 m fra 3
2022	1	16	16	32	4	3 0.0	1 430 m fra 3, 322 m fra 2, 1.23 km fra 12
2022	1	16	16	32	4	3 0.0	1 50 m fra 2, 290 m fra 3
2022	1	16	16	32	3	3 0.0	1 500 m fra 4
2022	1	16	20	35	-4	4 -1.3	1 x
2022	1	16	20	35	-5	4 -2.0	1 140 m fra 3
2022	1	16	21	23	12	4 2.3	1 400 m fra 3
2022	1	16	22	1	-4	3 -1.5	1 230 m fra 26 og 170 m fra 27
2022	2	5	1	59	14	4 0.0	1 580 m fra 62, 530 m fra 61 og 59
2022	2	5	2	17	35	3 0.0	1 1.3 km unna 70 OG 71
2022	2	5	2	17	22	3 0.0	1 x
2022	2	5	2	17	5	5 1.0	1 600 m fra 25, 2.3 km fra 26
2022	2	5	2	22	-6	5 -1.8	0 60 m fra 25, 400m unna 24
2022	2	5	2	24	3	3 0.0	1 460 m fra 62
2022	2	5	2	24	8	6 0.0	1 930 m fra 62, 200 m unna 56 - 61, 52 - 54
2022	2	5	2	24	11	4 0.0	1 1.43 km unna 62
2022	2	5	2	24	7	6 0.0	1 420 m fra 46, 380 m fra 47, 2.3 km unna 26
2022	2	5	2	24	6	3 0.0	1 890 m fra 62, 900 m fra 60 og 59, 2.7 km unna 26
2022	2	5	2	24	7	3 0.0	1 340 m unna 55, 380 m fra 47, 500 m unna 54, 3 km unna 26
2022	2	6	22	15	-10	5 -3.2	0 180 m fra 37, i nærheten av 36, 38, og 34
2022	2	9	10	36	-6	4 -2.3	1 400 m fra 3
2022	2	9	11	42	5	3 2.1	1 113 fra 59
2022	2	9	11	42	5	3 1.4	1 x
2022	2	9	11	46	-7	4 -2.5	1 390 m fra 4
2022	2	9	11	48	-3	3 -1.0	1 190 m fra 3, 230 m fra 2
2022	2	9	11	49	-5	4 -2.0	0 x
2022	2	9	11	49	-6	4 -2.5	0 330 m fra 26
2022	2	9	11	49	-10	8 -3.1	0 250 m fra 26
2022	2	9	11	49	-5	4 -1.7	0 340 m fra 26
2022	2	9	11	49	-6	4 -2.4	0 x
2022	2	9	11	49	-6	4 -2.3	0 x
2022	2	9	11	49	-5	4 -1.7	0 x
2022	2	9	11	49	-6	4 -2.2	0 290 m fra 26
2022	2	9	11	49	-9	4 -3.2	0 340 m fra 26
2022	2	9	11	49	-10	5 -3.3	0 410 m fra 26
2022	2	9	11	49	-6	4 -2.2	0 360 m fra 26
2022	2	9	11	55	-6	3 -2.7	1 360 m fra 26
2022	2	9	11	56	20	3 0.0	1 x
2022	2	9	11	56	15	4 0.0	1 x
2022	2	9	11	56	8	5 0.0	1 x
2022	2	9	11	56	10	5 0.0	1 x
2022	2	9	11	58	4	4 0.0	1 x
2022	2	9	11	58	3	3 0.0	1 x
2022	2	9	11	58	10	3 0.0	1 x
2022	2	9	11	58	10	3 0.0	1 441 m fra 18
2022	2	9	11	58	6	3 0.0	1 460 m fra 18
2022	2	9	11	58	5	3 0.0	1 400 m fra 18
2022	2	9	11	58	5	3 0.0	1 x
2022	2	9	11	58	5	3 0.0	1 460 m fra 18, 300 m fra 15

Figur A.4: Lyndata for Roan 2020 - 2022

2022	2	9	11	58	6	3 0.0	1 434 m fra 18
2022	2	9	13	33	-3	4 -0.7	1 100 m fra 26 og 475 m fra 27
2022	2	9	23	52	-10	7 -3.0	0 x
2022	2	9	23	52	-15	8 -4.4	0 x
2022	2	9	23	52	-6	4 -2.0	0 x
2022	2	9	23	54	-3	3 -1.0	0 420 m fra 12
2022	2	9	23	54	-4	3 -1.0	1 x
2022	2	9	23	54	-6	4 -1.7	1 x
2022	2	9	23	54	-5	4 -2.0	1 400 m fra 16
2022	2	9	23	54	-10	9 -3.3	0 300 m fra 16
2022	2	9	23	54	-9	6 -3.0	0 x
2022	2	9	23	58	-4	3 -1.2	1 300 m fra 16
2022	2	9	23	58	-7	8 -2.5	0 445 m fra 27
2022	2	9	23	58	-9	8 -2.8	0 480 m fra 27
2022	2	10	0	1	-3	3 -1.1	0 330 m fra 27
2022	2	10	1	53	-8	5 -2.5	1 450 m fra 56
2022	2	10	1	56	-6	4 -2.0	0 315 m fra 29
2022	2	10	4	51	-6	4 -2.0	1 495 m fra 26
2022	2	10	19	39	-4	3 -0.9	1 500 m fra 27
2022	2	24	13	41	4	4 0.0	1 440 m fra 70
2022	2	24	13	41	5	5 0.0	1 x
2022	2	24	13	41	4	3 0.0	1 x
2022	2	24	13	41	4	3 0.0	1 x
2022	3	1	10	25	-5	4 -1.8	1
2022	3	1	15	49	6	4 0.0	1 294 m fra 3
2022	3	1	15	49	6	3 0.0	1 x
2022	3	1	15	49	11	4 0.0	1 x
2022	7	4	17	13	3	3 0.7	1 650 m fra 25
2022	7	4	17	13	-3	3 -1.0	1 288 m fra 71, 1.17 km fra 64
2022	7	4	17	20	-8	5	1 2 km fra 64
2022	7	25	18	23	-13	5 -0.8	0 x
2022	7	25	18	27	20	3 0.0	1 120 m fra 13, 370 m fra 17, 460 m fra 16, 464 m fra 14
2022	7	25	18	27	13	3 0.0	1 x
2022	7	25	18	27	26	4 4.2	0 x
2022	7	25	18	33	10	3 1.8	1 x
2022	10	6	0	2	-4	4 -0.8	1 x
2022	12	27	11	13	7	4 0.0	1 50 m fra 8, 390 m fra 9, 310 m fra 7, 420 m fra 17
2022	12	27	11	13	-9	3 -0.0	1 900 m fra 38, 4190 m fra 30, 400 m fra 30, 600 fra 32, 1 km fra 33 og 33
2023	1	30	4	35	-4	4 -2.1	0 1.21 km fra 38, 340 m fra 30, 550 fra 32, 900m fra 33 og 33
2023	2	9	13	32	-6	4 -1.9	0 320 m fra 27

Figur A.5: Lyndata for Frøya 2020 - 2022

År	Måned	Dag	Time	Minutt	Maks strøm [kA]	Antall sensorer	Maks stigetid [kA/μs]	Sky-til-sky = 1, sky-til-bakke = 0	Avstand fra turbin
2021	4	5	17	14	-7	4	-2.6	0	4 (301m), 2, 3, 1, 5
2021	4	10	15	44	-13	10	-1.2	0	2 (514m), 4, 1
2021	4	10	15	45	-8	5	-2.5	1	2 (114m), 4, 1, 3
2021	4	10	15	51	-7	4	-2.9	0	7 (633m), 1, 6, 5, 2, 8
2021	4	10	15	51	-8	4	-3.1	1	7 (87m), 1, 6, 5, 2, 8
2021	4	10	15	53	-6	3	-1.6	1	9 (400m), 8, 10, 12
2021	4	10	15	53	-9	6	-3.1	0	8 (250m) (9-433m), 10, 12, 7
2021	4	10	15	53	-8	4	-2.8	0	8 (160m) (9-390m), 10, 12, 7
2021	11	10	10	39	12	3	0.0	1	(1.125 km unna)
2021	11	10	10	39	13	3	0.0	1	8 (108m) (9 - 340m), 10, 12
2021	11	10	10	39	-13	3	-2.7	1	8 - 623m, (9 - 644m), 10
2021	11	10	10	39	-7	3	-3.0	1	9 (175m) (10 - 530m), 8, 12, 13
2021	11	10	10	40	-8	4	-3.3	1	10 (192m), 9, 8, 14, 13, 12
2020	11	21	10	21	7	3	1.3	1	14 (263m), (13 - 363m), 11, 10, 9
2020	11	21	10	24	-10	6	-3.7	0	1 (203m), (7 - 457m), 5, 6, 2, 3
2020	11	21	10	24	-7	3	-2.2	1	1 (59m), 7, 5, 6, 2, 3
2020	11	21	10	24	-6	3	-2.6	0	1 (141m), 2, 7, 5, 6, 3
2020	11	21	10	28	-7	4	-2.7	0	11 (28m), (12 - 388m), 6, 8, 7, 13
2020	11	21	10	28	-8	4	-3.0	1	11 (65m), (12 - 331m), 6, 8, 7, 13
2020	11	21	16	16	-10	5	-2.1	1	7 (102m), (1 - 616m), 5, 6, 8
2020	11	21	16	17	-13	8	-4.7	0	10 - 246m, 14, 9, 13
2020	11	21	16	17	-9	4	-3.7	1	10 (115m), 9, 8, 14, 13
2020	11	21	16	17	-8	3	-3.6	1	10 (111m), 9, 8, 14, 13
2022	2	9	1	31	-9	4	-4.1	1	1 (201m), 2, 4, 3, 5, 6, 7
2022	2	9	1	35	-7	3	-1.7	1	6 (164m), (7 - 236m), 5, 1, 11, 12, 8
2022	2	9	1	40	12	8	2.8	1	14 (362m), 13, 12, 10, 9
2022	2	9	4	57	95	4	5.7	0	11 (326m), (6 - 413m), 5, 7, 12, 8
2022	2	23	2	26	-10	6	-4.0	1	7 (138m), 6, 5, 1, 8, 11, 12
2022	4	5	18	9	-9	4	-3.8	0	12 (264m), (8 - 399m), (11 - 474m), 6, 7, 9, 13
2022	4	5	18	9	-6	4	-2.9	0	12 (254m), (8 - 381m), (11 - 592m), 6, 7, 9, 13
2022	12	15	0	15	-7	4	-3.4	1	10 (147m), 9, 8, 14, 13
2022	12	15	0	16	-7	4	-2.4	1	14 (162m), (13 - 427m), 12, 10, 9, 8
2022	12	15	0	16	5	3	1.2	1	14 (613m), 13
2022	12	18	5	29	-9	4	-2.6	1	11 (92m), (6 - 527m), 6, 7, 12, 8

Figur A.6: Lyndata for Hundhammer 2020 - 2022

År	Måned	Dag	Minutt	Maks strøm [kA]	Antall sensorer	Maks stigetid [kA/μs]	Sky-til-sky = 1, sky-til-bakke = 0	Avstand fra turbin
2021	3	24	9	8	4	0.0	1	12 (678m), 11, 1
2021	3	24	10	5	4	0.0	1	11 (544m), 12
2021	4	5	4	-11	5	-3.9	0	11 (314m), (12 - 328m), 1, 2
2021	4	5	4	-14	6	-4.0	1	12 (268m), (11 - 326m), 1, 2
2021	11	10	9	-9	7	-3.5	1	14 (402m), 4, 13, 5
2021	11	10	9	-6	3	-2.4	1	14 (261m), 4, 13, 5
2021	11	10	13	-6	3	-1.9	1	9 (436m), (10 - 520m), 8, 7, 6
2021	11	10	13	-4	3	-1.6	1	9 (220m) (8 - 311m), 8, 7, 6
2021	12	25	3	-6	4	-2.0	1	12 (294m), (11 - 330m), 1, 2
2020	1	3	20	8	4	0.0	1	x
2020	1	3	20	17	4	0.0	1	x
2020	1	3	20	11	4	0.0	1	14 (277m), 4, 13, 3, 5
2020	1	3	20	7	3	0.0	1	14 (182m), (6 - 364m), (5 - 378m), 13, 4, 7, 8, 3
2020	1	3	20	133	6	16.6	0	3 (437m), 2, 1, 12, 11, 4, 13, 5
2020	2	21	21	-7	4	-0.0	1	11 (109m), (12 - 256m), 1, 2
2020	2	21	21	-6	4	-0.0	1	11 (112m), (12 - 212m), 1, 2, 3
2020	2	21	21	-8	4	-0.0	1	11 (99m), (12 - 209m), 1, 2, 3
2020	2	21	21	-7	4	-0.0	1	11 (30m), (12 - 144m), 1, 2, 3
2020	11	22	0	-6	3	-2.0	1	10 (111m), (9 - 177m), 8, 7, 6, 5
2022	2	9	1	-9	4	-3.1	1	12 (269m), (11 - 304m), 1, 2, 3
2022	2	9	1	-4	3	-1.4	1	11 (264m), (12 - 292m), 1, 2, 3
2022	2	9	1	-9	4	-3.2	1	11 (398m), (12 - 407m), 1, 2, 3
2022	2	9	12	-20	14	-2.4	0	11 (117m), (12 - 210m), 1, 2, 3, 4
2022	2	19	12	-5	3	-1.8	1	11 (252m), (12 - 362m), 1, 2, 3, 4
2022	2	19	12	-4	3	-1.6	1	9 (202m), (8 - 260m), 10, 7, 6, 5
2022	2	19	12	-5	3	-2.1	0	7 (170m), (8 - 239m), 6, 5, 13, 9, 10, 14
2022	6	28	12	4	4	1.0	1	x

