

Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2025 30 stp

Fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning

Prediktiv modellering av risikotrær langs distribusjonsnettene ved bruk av fjernmåling og maskinlæring

Predictive modeling of risk trees along the
distribution grid using remote sensing and machine
learning

Torjus Birkeland

Skogfag

Forord

Denne masteroppgaven markerer avslutningen på min mastergrad i skogfag ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). Det har vært en behagelig, lærerik, utfordrende og meningsfull studietid, og jeg er takknemlig for alle som har bidratt underveis.

Først vil jeg rette en stor takk til min veileder, professor Ole Martin Bollandsås og biveileder professor Terje Gobakken. Takk for at dere har vært både tydelig og alltid tilgjengelig når jeg hatt behov for det.

En stor takk går også til min søster, jordskifte kandidat Marte Birkeland for korrektur, ærlige tilbakemeldinger, jevnlig motivasjonsdrypp og evnen til å minne meg på at alt går, bare jeg tar én ting av gangen.

Til Glitre Nett vil jeg si tusen takk for at dere åpnet dørene og lot meg skrive en masteroppgave av stor samfunnsmessig betydning. Det har vært utrolig motiverende å få jobbe med et reelt problem, og vite at innsatsen kanskje kan bidra til mer treffsikker forvaltning i møte med framtidens (u)vær.

Til alle medstudenter på skogbrukerensalen vil jeg takke for et studiemiljø preget av både faglig dybde og uformell stemning. En særlig takk går til medstudenter Gerhard Berger Sørensen-Fuglem og Mathias Nordhagen, for faglig sterke innspill, konstruktiv sparring og gode diskusjoner gjennom hele skriveperioden.

Norges miljø- og biovitenskapelige universitet

Ås, 14. mai 2025

Torjus Birkeland

Sammendrag

Trefall er en av de vanligste årsakene til strømbrudd i Norge, og utgjør en økende utfordring i takt med elektrifisering av samfunnet, høyere forventninger til leveringssikkerhet og hyppigere ekstremvær. Nettselskapenes arbeid med linjerydding har tradisjonelt vært rettet mot undervegetasjon og trær innenfor det klausulerte ryddebeltet, mens omfanget av tiltak utenfor ryddebeltet har variert. I senere år har flere nettselskap styrket arbeidet utenfor ryddebeltet, blant annet gjennom økt fokus på skogfaglig kompetanse. Likevel er det fortsatt behov for verktøy som kan gi objektiv og operasjonell støtte i vurderingene av risiko og tiltak.

Formålet med denne studien har vært å utvikle en prediktiv modell for å identifisere risikotrær, altså enkelttrær med høy sannsynlighet for å falle over distribusjonsnettet under vindbelastning, ved hjelp av fjernmåling og maskinlæring. Studien tar utgangspunkt i stormen *Babet*, som førte til omfattende trefall i Agder i 2023, og analyserer 222 trær hvorav 78 falt over distribusjonsnettet. Maskinlæringsalgoritmen Extreme Gradient Boosting (XGBoost) ble benyttet for utvikling av to modeller, én med både felt- og fjernmålte variabler, og én basert utelukkende på fjernmåling.

Resultatene viser en balansert nøyaktighet på 74,3 % og Cohens kappa på 0,48 for modellen med både felt- og fjernmålte variabler, og 68,5 % og kappa $\sim 0,34$ for modellen kun basert på fjernmåling. Dette viser at god treffsikkerhet kan oppnås uten behov for ressurskrevende feltarbeid. Variabler som redusert jorddybde (særlig i vindretningen), høydedifferanse fra nabotrær, vindeksponering og ujevnheter i rotsonen ble identifisert som sentrale risikofaktorer.

Modellens praktiske nytte er svært sensitiv for valg av terskelverdi, altså grensen for når et tre klassifiseres som et risikotre. Små endringer av terskel påvirker balansen mellom presisjon og antall risikotrær som identifiseres, noe som gjør det mulig å tilpasse modellen etter nettselskapets prioriteringer. En lav terskel fanger opp flere potensielle risikotrær, mens en høy terskel gir færre, men mer treffsikre prediksjoner.

Studien viser at prediktive modeller basert på fjernmåling kan gi nettselskaper et verdifullt beslutningsverktøy for mer presis og målrettet planlegging av linjerydding. En slik tilnærming kan bidra til færre strømbrudd, feilrettingskostnader og økt leveringssikkerhet, noe som er avgjørende for et mer robust og klimatilpasset strømnnett.

Abstract

Treefall is one of the leading causes of power outages in Norway, and represents a growing challenge due to increasing electrification, higher expectations for supply reliability, and more frequent extreme weather events. Grid operators have traditionally focused vegetation management efforts on undergrowth and trees within the designated clearing corridor, while the extent of measures outside this corridor has varied. Some grid operators have expanded their efforts beyond the corridor, including an increased emphasis on forestry expertise. Nevertheless, there is still a lack of tools that offer objective and operational decision support.

The aim of this study was to develop a predictive model to identify risk trees, individual trees with a high probability of falling onto distribution lines during wind exposure, using remote sensing and machine learning. The study is based on storm Babet, which caused widespread treefall in Agder in 2023, and analyzes 222 trees, of which 78 had fallen on to the powerlines. The machine learning algorithm Extreme Gradient Boosting (XGBoost) was used to develop two models: one combining field and remotely sensed variables, and one based solely on remote sensing.

The model achieved a balanced accuracy of 74.3% and a Cohen's kappa of 0.48 when field data were included, and 68.5% and kappa ~0.34 for the remote sensing model. This indicates that good predictive accuracy can be achieved without the need for resource-intensive fieldwork. Key risk factors identified include shallow soil depth (particularly on the windward side), height differences from neighboring trees, wind exposure, and terrain roughness and slope in the root zone.

The practical use of the model is highly sensitive to the choice of threshold value, the limit at which a tree is classified as a risk tree. Small adjustments to the threshold significantly influence the balance between precision and the number of identified risk trees, making it possible to tailor the model to a grid operators priorities. A low threshold identifies more potential risk trees, while a high threshold yields fewer but more accurate predictions.

This study demonstrates that predictive models based on remote sensing can provide valuable decision-support tools for grid operators seeking more targeted and efficient vegetation management strategy. Such tools have the potential to reduce outage-related costs and improve supply reliability, both of which are critical for building a more resilient and climate-adapted power grid.

Innholdsfortegnelse

Innholdsfortegnelse	IV
Kapittel 1 Innledning.....	1
1.1 Oppgavens bakgrunn, tema og formål	1
1.1.1 Strømbrydd og samfunnskonsekvenser	1
1.1.2 Klimaendringer og ekstremvær	2
1.2 Tidligere forskning på trefall og risiko langs strømlinjer	3
1.3 Formål og problemstilling	3
1.3.1 Problemstillinger.....	4
1.3.2 Avgrensning	4
Kapittel 2 Teoretisk rammeverk	5
2.1 Kvalitetsjusterte inntektsrammer for ikke-levert energi.....	5
2.2 Relevant lovverk	7
2.3 Det norske strømnettet	8
2.4 Linjerydding og sikringshogst	9
2.4.1 Bunnrydding	9
2.4.2 Sikringshogst	10
2.5 Risikotrær og stabilitet	10
2.5.1 Hva er et stabilt tre?	11
2.5.2 Faktorer som påvirker stabiliteten til enkelttrær og bestand	11
2.6 Light Detection and Ranging (lidar)	13
2.7 Hypoteser	14
Kapittel 3 Materiale og metode.....	15
3.1 Studieområde	15
3.2 Forskningsdesign	15
3.3 Feltregistrering og datainnsamling	16
3.3.1 Feltregistreringer.....	16
3.3.2 Beskrivelse av datasettet.....	16
3.3.3 Fjernmålingsdata	17
3.4 Modellering.....	17
3.4.1 Identifisering av risikofaktorer	18
3.4.2 Beregning av forklaringsvariabler	18
3.4.3 Valg av klassifikasjonsmodell og modellstruktur.....	21
3.4.4 Modelltrening og evaluering.....	21

Kapittel 4 Resultater	24
4.1 Oversikt over datasettet og forskjeller mellom klasser.....	24
4.2 Korrelasjon mellom overflateanalyse av rotsonen og jorddybdemålinger	24
4.3 Overordnede terregegenskaper innenfor 1 daa	27
4.4 Treets størrelse sammenlignet med nabotrær.....	27
4.5 Prediktiv modell	28
4.5.1 Variabelviktighet i modellen.....	28
4.5.2 Modellnøyaktighet	29
Kapittel 5 Diskusjon.....	32
5.1 Tolkning av hovedfunn	32
5.1.1 Jorddybde, rotforankring og terregegenskaper	32
5.1.2 Trehøyde og vindeksponering.....	34
5.1.3 Diameter til høyde forhold	34
5.1.4 Svekkelser og skader.....	35
5.2 Modellens prediksjonsevne og praktisk nytte	36
5.2.1 Modellens prediksjonsevne	36
5.2.2 Brukertilpasning og økonomiske hensyn ved operasjonelt bruk	36
5.3 Vurdering av materiale og metode	38
5.3.1 Databalanse og bruk av syntetisk oversampling	38
5.3.2 Utvalg og vurdering av kontrolltrær og feltmålinger	39
5.3.3 Modellvalg og maskinlæringsmetode.....	39
5.3.4 Kvalitet og begrensninger i lidar-data	40
5.3.5 Fravær av meteorologiske data	41
5.4 Forslag til videre arbeid.....	42
5.4.1 Utvidelse og forbedring av datagrunnlaget	42
5.4.2 Videreutvikling av modell og maskinlæringsalgoritmer.....	42
5.4.3 Forbedring og utvidelse av dataanalyser	43
5.5 Anbefaling for identifisering av risikotrær	44
Kapittel 6 Konklusjon	46
Erklæring	47
Referanser	48

Kapittel 1 Innledning

1.1 Oppgavens bakgrunn, tema og formål

Elektrisitet er en av bærebjelkene i det moderne samfunnet, og siden strømmnettets etablering for om lag 150 år siden har avhengigheten av en stabil strømforsyning økt betydelig. På individnivå er strøm nødvendig for grunnleggende behov som lys, oppvarming, elektroniske hjelpemidler og transport. På samfunnsnivå er stabil strømforsyning avgjørende for industri, offentlige tjenester og kritisk infrastruktur. Norge var tidlig ut med elektrifisering, og allerede i 1920 hadde om lag 64 % av befolkningen tilgang til strøm (Faugli, 2020). I dag spiller elektrifiseringen en sentral rolle for å nå målene i det grønne skiftet om å bli et lavutslippsland innen 2050 (Regjeringen, 2023).

Økt fokus på elektrifisering fører til økt forbruk og avhengighet av stabil strømforsyning. Konsekvensene ved strømbrudd blir dermed større både for forbrukerne og storsamfunnet. Med et omfattende strømmnett som strekker seg over store avstander, ofte gjennom skogdekte områder, er linjerydding en viktig del av nettselskapenes arbeid for å forebygge strømbrudd.

Norges store skogareal som dekker om lag 44 % av landet (bioøkonomi, 2021), i kombinasjon med et langstrakt strømmnett og stadig voksende skog i og langs traséen, kan skape utfordringer for nettselskapene. Slike utfordringer kan være i form av vegetasjon som vokser opp i strømførende ledning (fas), grener fra kantskogen som vokser inn mot fas eller nærstående trær som bøyer eller velter på ledningen ved kraftig vind eller snøfall. For de ulike nettselskapene fører dette til betydelige vedlikeholdsbehov og driftsutfordringer. Statistikk viser at vind og trefall er en av de største årsakene til strømbrudd i Norge, og i perioden 2009-2015 stod dette for 71,9 % av strømbruddene på landsbasis (Statsforvalteren i Agder, 2017).

For å møte disse utfordringene er det behov for bedre beslutningsverktøy for risikovurderinger knyttet til trefall. Fjernmåling, og særlig laserskanning eller light detection and ranging (lidar), er godt egnet for analyser av trær, skog og terreng fordi det muliggjør effektiv innsamling av detaljerte data på stor skala. Den teknologiske utviklingen har ført til økt romlig oppløsning og høyere nøyaktighet, noe som gjør det mulig å fange opp presis informasjon om trærnes høyde, kroneutstrekning og plassering i terrenget. Dermed gir fjernmåling et datagrunnlag som tidligere kun var tilgjengelig gjennom omfattende feltarbeid.

Denne studien tar derfor sikte på å utvikle en modell som predikerer sannsynligheten for at enkelttrær vil falle over strømmettet basert på egenskaper ved enkelttreet, bestand og terreng gjennom bruk av lidar-data. På denne måten søker studien å bidra med kunnskap og verktøy for målrettet og kostnadseffektiv skogforvaltning langs infrastrukturen.

1.1.1 Strømbrudd og samfunnskonsekvenser

Økt etterspørsel etter energi i kombinasjon med større press på strømmettet gjør det viktig å utvikle effektive metoder for å holde linjene fri for hindringer. I dagens samfunn har strøm blitt en nødvendighet og langt på vei en selvfølgelighet, og som følge av dette forventer både privatpersoner og bedrifter nær 100% leveringssikkerhet. Nettselskapene hadde i 2023 en leveringssikkerhet på 99,97 % (NVE, 2024a). Ved første øyekast ser dette tallet svært bra ut. Det er likevel ikke helt representativt i forhold til virkeligheten, og realiteten er mer nyansert enn tallet viser. Statistikken oppgis på fylkesnivå, men det er stor variasjon i hvor strømbruddene skjer. Eksempelvis forekommer det nesten ikke strømbrudd i de store byene, men i mer rurale områder er det gjerne oftere strømbrudd (NVE, 2024a). På steder der det først forekommer strømbrudd,

skjer det gjerne flere og hyppige brudd. Bedrifter og bosetting i disse områdene, opplever da gjerne en vesentlig svakere leveringssikkerhet.

Selv korte strømbrudd kan få store konsekvenser for både helse, dagligliv og økonomi. Industrien kan tape store summer dersom produksjonsprosesser stopper opp, transport kan lammes og husholdninger kan oppleve ulemper som manglende oppvarming i kalde perioder, skader på elektriske komponenter som følge av kortslutninger eller ødelagt mat i kjøleskap og fryser. I tillegg utgjør trefall over linjene en betydelig sikkerhetsrisiko. En hendelse i 2024 ved Myra skole i Arendal illustrerer dette tydelig. Trefall over høyspentlinje nærme skolen resulterte i at strømsatte ledninger lå over gang- og sykkelstien i flere minutter, som igjen førte til varmeutvikling og brann i terrenget. Heldigvis var ingen barn ute når hendelsen inntraff, men situasjonen kunne fått alvorlige konsekvenser.

Konsekvensene av strømbrudd begrenser seg imidlertid ikke bare til akutte faresituasjoner. Ved langvarige strømbrudd kan viktige funksjoner i hverdagen stoppe opp. Mobiltelefon kan gå tom for strøm, og muligheten til å tilkalle hjelp eller holde kontakt med omverdenen forsvinner. For eksempel kan en eldre person som faller og blir liggende alene i hjemmet miste muligheten til å varsle noen. Tilsvarende kan en person som får andre akutte helseproblemer bli hindret i å kontakte nødetatene i tide. Dette viser at selv brudd uten akutt fare for liv og helse også kan få alvorlige følger for enkeltpersoner. Slike hendelser fremhever behovet for proaktive tiltak som reduserer risikoen for trefall og sikre strømforsyningen.

1.1.2 Klimaendringer og ekstremvær

Ekstremvær har blitt mer vanlig som følge av klimaendringene (IPCC, 2023), og dette er i større grad enn tidligere noe vi må forholde oss til i det daglige. Denne utviklingen fører ofte med seg trefall over linjene, som kan resultere i omfattende strømbrudd og store feilrettingskostnader for nettselskapene.

Et aktuelt eksempel er stormen *Babet*, som rammet Sør-Norge i oktober 2023. Stormen traff Agder 20.-21 oktober og var preget av kraftig vind, høy nedbørintensitet og mildere temperaturer enn normalt for årstiden. I løpet av stormens mest intense periode ble det målt vindkast på mellom 30-35 m/s, og særlig kystområder og høydedrag ble hardt rammet. Vindretning var hovedsakelig øst og nord-øst, og flere dager med nedbør i forkant, førte til vannmettet jordsmonn, som igjen svekker trærnes rotforankring (Svanevik, 2023).

Nærmere 82 000 kunder var uten strøm i kortere eller lengre perioder som følge av stormen. Totalt ble det registrert over 100 feil på høyspentnettet og over 1000 feil på lavspenettet (Glitre Nett, 2023). Dette illustrerer tydelig sårbarheten infrastrukturen har for ekstremvær, og hendelsen utgjør en sentral kontekst for denne studien.

Tidligere stormer som *Dagmar* i 2011 eller det ekstreme snøfallet *Nedsnødd* som rammet Agder i 2018 har vist lignende mønstre. Under *Dagmar* var det vindstyrker i kombinasjon med nedbør som førte til store mengder trefall over linjenettet, og de økonomiske konsekvensene var store. *Nedsnødd* i 2018 var også en stor hendelse i Agder som førte til langvarige strømbrudd som følge av at trær bøyde seg over linjene.

Slike hendelser tyder på at både hyppigheten og alvorlighetsgraden ved strømbrudd kan øke i takt med klimaendringer og samfunnets avhengighet av elektrisitet. Det stilles høyere krav til robusthet i strømmettet, noe som krever proaktive tiltak. For nettselskapene innebærer dette nye

utfordringer knyttet til å balansere kravene til leveringssikkerhet med ressursene som er tilgjengelig for linjerydding og vedlikehold.

1.2 Tidligere forskning på trefall og risiko langs strømlinjer

Det finnes relativt få studier som har utviklet sannsynlighetsmodeller for trefall på enkelttrenivå, men det finnes noen. I en masteroppgave ved NMBU (Østreng, 2014), ble det undersøkt hvordan laserdata kunne brukes til å identifisere risikotrær langs strømlinjer. En annen studie «*Predicting the risk of tree fall onto railway lines*» av Gardiner et al. (2024) undersøkte hvordan vindmodellen ForestGALES sammen med lidar kunne identifisere utsatte områder langs jernbanen i Tyskland. Videre har Gullick et al. (2019) utviklet en modell som vurderer risikoen for trefall langs kritisk infrastruktur ved bruk av skogstruktur og informasjon om tidligere stormer og ekstremværhendelser.

Norsk institutt for bioøkonomi (NIBIO) (Solberg et al., 2017) har utarbeidet en rapport om skogbehandling langs strømlinjer, og hvordan ulike skjøtselstiltak kan hjelpe med å redusere mengden trefall på linja. NIBIO har også sett på hvordan digitale kartdata kan brukes til å identifisere områder langs strømmettet som er særlig utsatt for trefall (2018).

Etter ekstremværet Dagmar i 2011 har Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) (2012) undersøkt om det er behov for en endring av praksis og krav for nettselskapene når det gjelder skogrydding. Rapporten beskriver også grundig faktorer som påvirker sannsynligheten for trefall, samt at den ser på fremtidig risikobilde.

Til tross for disse bidragene finnes det fortsatt kunnskapshull knyttet til presis modellering av sannsynlighet for trefall på enkelttrenivå. Flere av de eksisterende studiene fokuserer enten på bestandsnivå, bruker generelle skogstrukturelle indikatorer, eller forutsetter bruk av omfattende vind- og klimamodeller som kan være krevende å anvende operativt. Det er derfor behov for nye metoder som kombinerer god romlig oppløsning, praktisk gjennomførbarhet og presisjon på enkelttrenivå.

1.3 Formål og problemstilling

Formålet med studien er å utvikle en prediktiv modell som estimerer sannsynlighet for trefall over strømmettet under vindbelastning. Modellen er basert på registrerte trefall etter stormen *Babet* i 2023, og skal bygges på en kombinasjon av enkelttreegenskaper, skogstruktur og terrengforhold hentet fra fjernmåling.

Studien vil undersøke hvilke egenskaper som skiller trær som har falt fra dem som har blitt stående, og om disse forskjellene kan fanges opp gjennom fjernmåling. Dette kan danne grunnlaget for en praktisk anvendbar modell som nettselskapene kan ta i bruk for planlegging av sikringshogst og prioritering av tiltak utenfor ryddebeltet.

En slik modell kan gi nettselskapene følgende fordeler:

- Mer presis identifisering av risikotrær som utgjør en fare for linjenettet
- Redusert behov for unødvendig felling av trær som ikke representerer reell risiko
- Bedre balanse mellom forebyggende tiltak og ressursbruk
- Økt leveringssikkerhet og lavere kostnader knyttet til KILE (kvalitetsjusterte inntektsrammer ved ikke-levert energi) og feilretting

1.3.1 Problemstillinger

For å nå målene i studien, må det først avdekkes hvilke faktorer som faktisk bidrar til økt sannsynlighet for trefall. Deretter må det vurderes om disse egenskapene kan fanges opp gjennom fjernmåling, og benyttes i en prediktiv modell. Studien søker derfor å besvare følgende problemstillinger:

- P1. Hvilke strukturelle, miljømessige og topografiske egenskaper er assosiert med økt sannsynlighet for trefall over strømnettet?*
- P2. I hvilken grad kan slike risikofaktorer identifiseres ved hjelp av fjernmåling, og benyttes i en prediktiv modell basert på lidar-data?*
- P3. Hvor godt presterer modellen i å identifisere risikotrær med høy sannsynlighet for å falle over strømnettet under stormhendelser?*

1.3.2 Avgrensning

Skog- og vegetasjonsrydding i forbindelse med kraftlinjer er et stort og bredt tema. Denne studien er begrenset i tid og omfang, og det har derfor vært nødvendig å gjøre flere avgrensninger både i tema og metode. Studien har følgende avgrensninger:

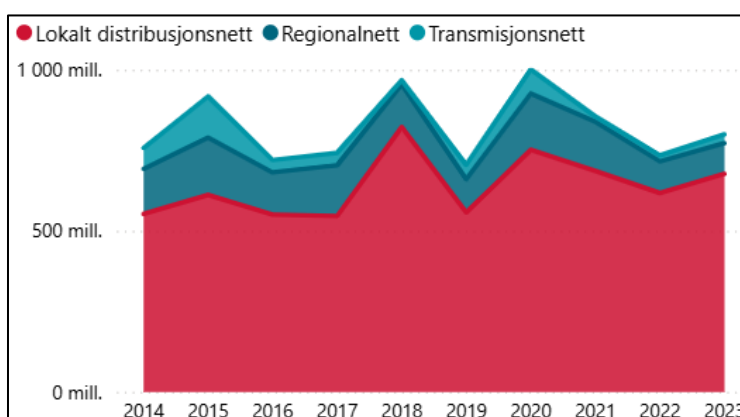
- **Geografisk avgrensning:** Oppgaven er begrenset til Glitre Nett AS sitt konsesjonsområde i Agder, og resultatene vil derfor være mest relevant for skog- og klimaforhold i denne regionen.
- **Nettspenning:** Kun høyspent distribusjonsnett med 22kV inngår i analysen. Regionalnett og transmisjonsnettet er ikke representert i datasettet.
- **Datasettets grunnlag:** Analysen er basert på registrerte trefall etter stormen *Babet* i 2023, hvor 78 trær som falt over linjenettet inngår i studien. Til sammenligning er 144 stående kontrolltrær inkludert for å undersøke forskjeller mellom trær som falt og trær som forble stående.
- **Fallretning og seleksjon:** Kun trær som falt på distribusjonsnettet ble inkludert. Trær som falt inn i skogen eller i andre retninger er ikke inkludert i analysen. Fallretning ble ikke registrert.
- **Værdata:** Analysen tar ikke hensyn til meteorologiske faktorer som vindstyrke eller nedbør. Modellen vil derfor predikere sannsynlighet for trefall basert på skog- og terrengvariabler, uavhengig av spesifikke værforhold.
- **Datagrunnlag og modellering:** Den prediktive modellen er utelukkende basert på datasettet, og er ikke testet på større datasett som inkluderer alle øvrige trær langs linjenettet.

Kapittel 2 Teoretisk rammeverk

Dette kapittelet gir en utdypende introduksjon av relevant lovverk og teori knyttet til strømmettet generelt og linjerydding mer spesifikt.

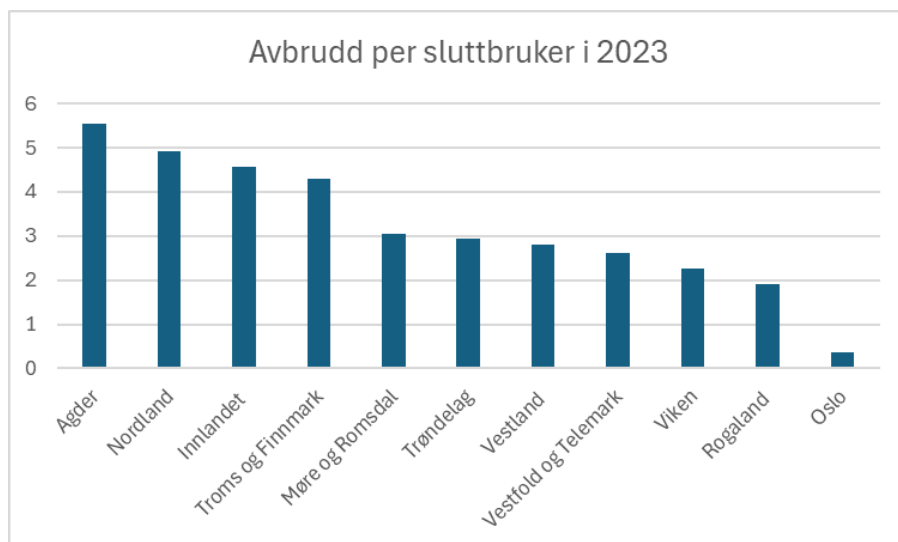
2.1 Kvalitetsjusterte inntektsrammer for ikke-levert energi

Strømbrydd som følge av trefall representerer ikke bare driftsmessige utfordringer for nettselskapene, men også økonomiske konsekvenser. I Norge reguleres disse kostnadene gjennom KILE-ordningen (kvalitetsjusterte inntektsrammer ved ikke-levert energi), som reduserer nettselskapenes tillatte inntektsramme ut fra avbrudd i strømløp (NVE, 2021). KILE er derfor sentralt for å vurdere konsekvensene av trefall og for å begrunne behovet for bedre risikovurdering og målrettede tiltak. Dette kapittelet gir en oversikt over hvordan KILE fungerer, og hvordan ulike nettnivå og regioner påvirkes økonomisk av strømbrydd.



Figur 1. KILE-kostnader per nettnivå i perioden 2014–2023. Kilde:(NVE, 2024b).

Figur 1 viser at distribusjonsnettet samlet sett har de høyeste KILE-kostnadene på landsnivå. Distribusjonsnettet utgjør den største andelen av det totale linjenettet i Norge i antall kilometer, og sannsynlighet for feil og avbrudd er dermed større, som igjen resulterer i høyere økonomiske konsekvenser for nettselskapene. På den andre siden har transmisjonsnettet de laveste totale KILE-kostnadene. Dette skyldes at transmisjonsnettet er kritisk for nasjonal strømforsyning og derfor bygges etter strengere krav til robusthet, inkludert større avstand mellom fas og terrenget i kombinasjon med bredere traseer. Den økte avstanden mellom linjene og terrenget i kombinasjon med bredere traseer reduserer sannsynligheten for trefall og andre feil, noe som bidrar til færre avbrudd på dette nettnivået.



Figur 2. Oversikt over antall avbrudd per sluttbruker på fylkesnivå. Egen fremstilling, tall hentet fra avbruddsstatistikk 2023 (NVE, 2024a).

Figur 2 viser antall strømbrudd per sluttbruker i 2023 på fastlands-Norge, det samme året som stormen *Babet* førte til omfattende trefall på distribusjonsnettet. Agder skiller seg ut som et fylke med vesentlig flere strømbrudd enn landsgjennomsnittet. Mens det nasjonale snittet lå på 2,86 avbrudd per sluttbruker i 2023, hadde Agder 5,54 avbrudd per sluttbruker i samme periode (NVE, 2024a). Denne forskjellen kan skyldes flere faktorer som forskjeller i topografi, klimatiske forhold og eksponering for ekstremvær langs kysten. Store skogområder i kombinasjon med kystklima, kan være en del av forklaringen til hyppigere trefall og avbrudd på linjenettet.



Figur 3. Oversikt over antall KILE - kostnader på fylkesnivå. Egen fremstilling, tall hentet fra avbruddsstatistikk 2023 (NVE, 2024a).

Figur 3 viser KILE-kostnader per fylke i 2023, og synliggjør hvordan geografiske forskjeller påvirker de økonomiske konsekvensene av strømbrudd. Selv om Agder har det høyeste antallet avbrudd per sluttbruker i 2023, ligger fylket omtrent på gjennomsnittsnivået når det gjelder KILE-kostnader, med totalt 63 millioner kroner. Denne tilsynelatende motsetningen kan forklares ved at KILE-kostnader avhenger av flere faktorer enn bare antall avbrudd. I tillegg til antall berørte sluttbrukere spiller også mengden ikke levert energi (ILE) og varigheten av strømbruddene en viktig rolle. I

områder med mye industri eller tett befolkning kan KILE-kostanden bli betydelig høyere selv med færre avbrudd, da økonomiske tap og kompensasjoner ofte øker med forbruket og den kommersielle aktiviteten i området som linjene forsyner med strøm.

2.2 Relevant lovverk

Nettselskapene må forholde seg til et omfattende regelverk som regulerer både drift og vedlikehold av elektriske anlegg, inkludert linjerydding. Det er i hovedsak to sentrale lover, Lov om tilsyn med elektriske anlegg og elektrisk utstyr (1929), heretter EL-tilsynsloven, og Lov om produksjon, omforming, overføring, omsetning, fordeling og bruk av energi m.m. (1990), heretter Energiloven.

EL-tilsynsloven er den overordnede loven, og denne omhandler alle elektriske anlegg. Særlig relevant er § 2, som sier at *“Elektriske anlegg skal prosjekteres, utføres, drives, vedlikeholdes og kontrolleres slik at de ikke frembyr fare for liv, helse og materielle verdier. Kongen utferdiger tekniske forskrifter for hvordan elektriske anlegg skal prosjekteres, utføres, vedlikeholdes, drives og kontrolleres. I forskriftene kan bl.a inntas bestemmelser siktede til å hindre at elektriske anlegg unødig virker skjemmende på omgivelsene”*. Elektriske anlegg skal altså vedlikeholdes slik at de ikke utgjør en fare for liv, helse og materielle verdier.

Under el-tilsynsloven er forskrift om elektriske forsyningsanlegg (2006) sentral, og loven spesifiserer tekniske krav til nettselskapenes drift og vedlikehold. Videre er Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) ansvarlig for tilsyn og forvaltning av flere forskrifter hjemlet i el-tilsynsloven. DSB har myndighet til å føre tilsyn med elektriske anlegg, gi pålegg om nødvendige tiltak, og kan også ilegge bøter eller andre sanksjoner dersom reglene ikke følges (DSB, 2016).

Den andre sentrale loven er som nevnt energiloven, med formål om å sikre samfunnsmessig rasjonell produksjon, overføring, omsetning og bruk av elektrisk energi. Energiloven regulerer nettselskapenes leveringsplikt (§ 3-3), som pålegger dem å sikre en stabil og pålitelig strømforsyning til alle kunder innenfor sitt konsesjonsområde. For å regulere leveringskvalitet viderefører forskrift om leveringskvalitet i kraftsystemet (2007) krav til pålitelighet i strømmettet, inkludert KILE-ordningen. KILE-ordningen gir nettselskapene økonomiske insentiver til å redusere strømbrudd ved at de må dekke deler av kostnadene knyttet til ILE. Dette gjør at nettselskapene har en økonomisk interesse i effektive vedlikeholdstiltak, inkludert linjerydding. Videre er det Reguleringsmyndigheten for energi (RME), en del av NVE, som overvåker nettselskapenes leveringskvalitet og håndhever forskriftene ut fra innrapporterte avbruddskostnader fra nettselskapene.

Ut over de nevnte lovene og direktoratene, er det etablert en interesseorganisasjon for norske nettselskaper. Denne har navnet Rettighetshaveres Elektroniske Nett (heretter REN), og eies av over 60 norske nettselskaper (REN, 2022). Målet til REN er å fremme samarbeidet mellom nettselskaper, og sikre at strømmettet i Norge utvikles på en effektiv, sikker og fremtidsrettet måte. REN jobber med å ivareta medlemsbedriftenes interesser, blant annet gjennom påvirkning av lovgivning, regler og standarder innen energisektoren. REN har utarbeidet flere veiledere som tar for seg prosesser fra A-Å, herunder retningslinjer for linjerydding. Dette utgjør en standard for nettselskapene og bidrar til å sikre likebehandling uavhengig av hvor i landet nettselskapene og kundene holder til.

Samlet utgjør lovene og forskriftene et rammeverk som stiller både tekniske og driftsmessige krav til nettselskapene, med mål om å sikre personsikkerhet, materielle verdier og

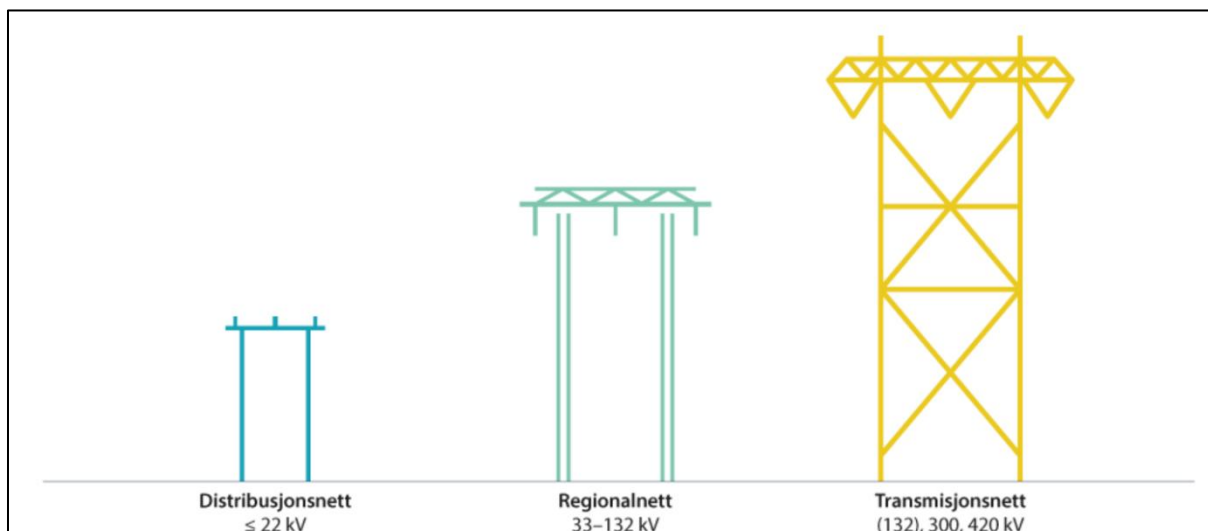
leveringspålitelighet. Regelverket angir derimot ikke metoder og prosedyrer for skogrydding, og hvordan dette gjøres i praksis er opp til de enkelte nettselskapene.

2.3 Det norske strømnettet

Strømnettet i Norge er inndelt i ulike nivåer basert på funksjon og spenningsnivå, og danner infrastrukturen for overføring av elektrisk energi fra produksjon til sluttbruker. Hovedinndelingen består av transmisjonsnett, regionalnett og distribusjonsnett, som til sammen utgjør det norske høyspentnettet.

Det totale ledningsnettet i Norge utgjør om lag 360 000 km, hvorav ca. 220 800 km er lavspenningsnett (spenning < 1 kilovolt, kV) og ca. 139 400 km er høyspentnett (spenning > 1 kV) (NVE, 2024b). Omtrent 38 % av nettet består av luftledninger, som er spesielt utsatt for ytre påkjenninger som vind og påfølgende trefall.

Figur 4 viser en forenklet illustrasjon av de tre nettnivåene, inkludert typiske spenningsintervaller og visuelle forskjeller i utforming. I denne studien er det distribusjonsnettet som er mest relevant, da det utgjør den største andelen av høyspentnettet i antall kilometer og erfaringsmessig har høyest risiko for trefall og tilhørende avbruddskostnader.



Figur 4. Ulike spenningsnivåer og fysisk utforming for distribusjons-, regional- og transmisjonsnett i Norge. Kilde: (NOU 2022: 6, 2022).

Det er betydelige forskjeller mellom transmisjons-, regional- og distribusjonsnettet når det gjelder både funksjon og fysisk størrelse. Som følge av høyere spenningsnivåer stilles det høyere krav til sikkerhet, noe som speiles i høyere master, større avstand mellom bakken og fas og grovere ledninger. Transmisjonsnettet består dermed av mer robuste og kraftigere linjer som er designet for å tåle større belastninger og transporterer strøm over lengre avstander, mens distribusjonsnettet består av mindre linjer som forsyner et stort antall sluttforbrukere.

Som følge av dette er det distribusjonsnettet som har flest strømbrydd per sluttbruker, som skyldes nettets store utstrekning og det faktum at det ofte befinner seg i mer utsatte områder med hensyn på vær og terreng.

Transmisjonsnettet fungerer som hovedveiene i det norske kraftnettet. Dette har de høyeste spenningsnivåene, vanligvis fra 132 kV til 420 kV, og står for overføringen av store mengder energi mellom ulike regioner og konsesjonsområder. Transmisjonsnettet utgjør 12 359 km av det totale

høyspenningsnettet (NVE, 2024b) og driftes av Statnett, som er utpekt som systemansvarlig for det norske kraftsystemet (RME, 2019).

Statnetts rolle er å sikre stabilitet og pålitelighet i kraftsystemet, noe som inkluderer balansering av produksjon og forbruk i sanntid. Dette er kritisk for å unngå spenningsfall eller strømbrudd i større deler av landet (RME, 2019).

Regionalnettet kan sammenlignes med fylkesveier, der strøm distribueres innenfor en bestemt region. Spenningsnivået i dette nettet ligger vanligvis mellom 50 kV og 132 kV (NOU 2022: 6). Regionalnettet eies og driftes hovedsakelig av større nettselskaper som har konsesjon for å bygge, eie og drifte nettanleggene innenfor et gitt område.

Regionalnettet spiller en viktig rolle for å koble transmisjonsnettet med distribusjonsnettet og å forsyne sluttforbrukere og mindre nettområder. Totalt utgjør regionalnettet 19 333 km av det norske høyspenningsnettet (NVE, 2024b).

Distribusjonsnettet er det siste leddet i kraftnettet, og bringer strømmen til sluttforbrukere enten det er husholdninger, bedrifter eller industri. Dette nettet har spenningsnivå fra 22 kV og ned til lavspenning på under 1 kV (NOU 2022: 6). Distribusjonsnettet utgjør den største andelen av høyspentnettet, med 107 401 km linjer (NVE, 2024b).

2.4 Linjerydding og sikringshogst

Linjerydding er en samlebetegnelse for vegetasjonsrydding i og ved strømlinjer, og deles videre inn i bunnrydding og sikringshogst.

Bunnrydding omfatter rydding av undervegetasjon som vokser innenfor det klausulerte ryddebeltet, mens sikringshogst innebærer felling av risikotrær utenfor ryddebeltet som kan forårsake strømbrudd ved trefall.

Dette kapittelet beskrives disse to tilnærmingene nærmere, inkludert hvordan de praktiseres i dag og hvilke utfordringer som finnes.

2.4.1 Bunnrydding

Det finnes flere ulike tilnærminger til linjerydding innenfor ryddebeltet, herunder rydding i faste intervaller differensiert på vekstforhold, vurderinger gjort etter befaringer eller ved bruk av lidar.

Når det gjelder linjerydding av undervegetasjon innenfor det klausulerte ryddebeltet, har nettselskapene hatt ulike strategier for både planlegging og utførelse. Generelt har nettselskapene hatt god kontroll på undervegetasjonen, men forskjellige tilnærminger har resultert i varierende grad av kostnadseffektivitet.

Noen nettselskap har valgt en strategi hvor linjenettet deles opp og ryddes med faste intervaller, eksempelvis hvert femte år. Dette er en metode som ikke krever noen skogfaglig kompetanse. Dette sikrer at vegetasjonen ikke vokser inn i ledningene, men tar ingen hensyn til forskjellige vekstforhold i ulike deler av geografien. Dette kan føre til unødvendige høye linjeryddingskostnader i områder med lavere vekst som følge av «overrydding».

Andre nettselskaper har brukt differensiert ryddeplaner, der ryddedefrekvensen har blitt justert etter vekstvilkårene og geografiske forskjeller. Områder med høy vekst får hyppigere tiltak enn områder med lav vekst, noe som vil bidra til bedre kostnadseffektivitet. Denne metoden reduserer risikoen for «overrydding» i enkelte områder, samtidig som den gir tilstrekkelig rydding der vekstforholdene krever det.

Enkelte nettselskaper har bruker feltbefaringer av linjenettet som en del av den løpende vedlikeholdsstrategien. Linjene blir inspisert manuelt og behovet for linjerydding blir registrert fortløpende. Dette gir en mer fleksibel tilnærming, men er tidkrevende og avhenger av menneskelige vurderinger.

Noen nettselskaper har tatt i bruk lidar i sin vegetasjonsforvaltning. Bruk av lidar-data gir en mer datadrevet tilnærming hvor nettselskapene kan kartlegge undervegetasjonen og trær nærme linjene nøyaktig, slik at eventuelle risikoer for kontakt mellom vegetasjon og fas kan identifiseres tidlig. Ved bruk av periodiske skanninger kan ryddeplanene tilpasses etter lokale vekstforhold ved å sammenligne høyde på vegetasjonen med tidligere skanninger.

Lidar har gitt nettselskapene enda et verktøy til å kunne optimalisere linjeryddingen ytterligere. Ved å bruke lidar-data kan nettselskapene automatisere vurderingen av vegetasjonsrisiko, identifisere spesifikke områder som trenger bunnrydding, og dermed redusere unødvendige tiltak. Dette kan gi en mer kostnadseffektiv og presis forvaltning av vegetasjonen innenfor rydebeltet, samtidig som det vil kunne bedre påliteligheten i strømforsyningen.

2.4.2 Sikringshogst

Ifølge REN (2024) defineres sikringshogst som fjerning av *“de trærne som har høy risiko. Det er alle enkelt-trær som står nær nok til å kunne fall på linjene, og som har høy risiko for å bli trefall”*.

Mens nettselskapene tradisjonelt har hatt god kontroll på undervegetasjonen og trær innenfor rydebeltet, har håndteringen av trær utenfor rydebeltet vært mer begrenset. Vurderinger av hvilke trær som burde fjernes krever skogfaglig kompetanse, noe flere nettselskap tidligere har manglet (Trømborg et al., 2012). I tillegg har nettselskapene begrenset juridisk handlingsrom utenfor klausulert rydebelt. Dette har ført til at hogst av risikotrær utenfor rydebeltet i stor grad har vært preget av reaktive tiltak, særlig etter større feil- og stormhendelser.

I noen tilfeller har kritiske linjer blitt gjort tresikre, det vil si at alle trær som kan treffe linja ved trefall innenfor et 10-15 års perspektiv hogges for å fjerne risikoen for trefall over linjene helt. Dette er tiltak som er kostbare og tidkrevende. På distribusjonsnettet har dette derfor vært sjelden praksis ettersom rydebeltene ofte er smale og utvidelse vil kreve avtaler med grunneiere. I tillegg rettfærdiggjør ofte ikke KILE-kostnadene så store tiltak på annet enn noen utvalgte linjestrekk. Resultatene av dette har vært at skogen langs linjene har fått vokse uavbrutt, noe som har gitt en stor andel med skog i hogstklasse 5 langs linjene (Solberg et al., 2017). Trær som ikke hogges vil før eller siden falle, og det er avgjørende å kunne identifisere hvilke trær som har høyest sannsynlighet for å falle for å kunne minimere skadene på infrastrukturen.

Ved å kombinere lidar med skogfaglig kompetanse, kan nettselskapene utvikle mer presise og effektive strategier for vegetasjonskontroll og identifisering av risikotrær. Dette kan gjøre det mulig å utvikle en mer målrettet hogststrategi, der kun trær mer høy risiko felles. På denne måten kan unødvendig felling av trær som ikke utgjør en trussel for linjenettet reduseres. Dette reduserer ikke bare KILE- og feilrettings kostnader, men vil også bidra til en mer bærekraftig profil for nettselskapene ved å redusere unødvendig hogst.

2.5 Risikotrær og stabilitet

Strømnettet er særlig utsatt for trefall som følge av stormer og andre værforhold. Trær som står nær strømlinjene og har høy sannsynlighet for å falle over linjenettet kan betegnes som et *risikotre*. Identifisering av risikotrær for å kunne ta preventive tiltak bør være en sentral del av

forvaltningen og vedlikeholdet hos nettselskapene, spesielt i lys av økende ekstremvær, klimatiske endringer og økende krav om leveringssikkerhet fra samfunnet.

Dette kapittelet gir en oversikt over hvordan stabilitet beskrives i skogfaglig teori, hvilke faktorer som påvirker stabiliteten til enkelttrær og bestand, samt hvordan risikotrær kan klassifiseres. Videre oppsummeres sentrale forskningsfunn om hvilke variabler som har betydning for stabilitet, med fokus på hvordan denne kunnskapen kan anvendes for risikovurderinger langs strømnettet.

Gjennomgangen er basert på NVE-rapporten *Trær til besvær* (Trømborg et al., 2012). Rapporten gjør en grundig gjennomgang av litteratur og forskning som er gjort for faktorer som påvirker træs stabilitet. Videre kommer en oppsummering av de viktigste momentene fra rapporten. For en grundigere gjennomgang av teorien kan NVE-rapport *Trær til besvær* (Trømborg et al., 2012) leses i sin helhet.

2.5.1 Hva er et stabilt tre?

For at skogen skal kunne vokse og overleve må trærne tåle ulike ytre påvirkninger som vind, snøfall og varierende jordforhold. Et stabilt tre kan defineres som et tre som har tilstrekkelig rotforankring og mekanisk styrke til å motstå ytre krefter, slik som kraftige vindkast og vekten av snø som legger seg på treet om vinteren. Stabilitet kan deles inn i to klasser:

1. **Rotstabilitet:** Rotsystemets evne til å forhindre rotvelt. Rotsystemets motstandsdyktighet mot rotvelt vil avhenge av mange faktorer som treslag, jordtype, jorddybde og fuktighet.
2. **Stammestyrke (bøyefasthet/e-modul):** Stammens evne til å motstå bøyning og stammebrekk. Dette vil variere ut fra faktorer som treslag, høyde, diameter og kronesetning.

Stormstabilitet er begrepet som brukes om trærnes evne til å tåle sterke vindkast uten å få rotvelt eller stammebrudd. Stormstabilitet er et produkt av både individuelle egenskaper til trærne (enkelttrestabilitet) og strukturen på skogen rundt (sosial stabilitet). Et tre kan dermed ha lav enkelttrestabilitet hvis treet vurderes isolert, men likevel ha god stabilitet hvis det står skjermet av nabotrær som gir en god sosial stabilitet.

2.5.2 Faktorer som påvirker stabiliteten til enkelttrær og bestand

Det er viktig å se på stormstabilitet som en sammenstilling av enkelttrestabilitet og sosial stabilitet. På enkelttrenivå er faktorer som treslag, rotutvikling, stammeutforming og kroneform avgjørende, mens for sosial stabilitet spiller tetthet, høydevariasjoner og skogens behandlingshistorikk en større rolle.

Trær som står i et tett bestand har oftere smalere og kortere kroner og mindre diametertilvekst som gir et lavere diameter i brysthøyde (DBH) til høyde forhold (D/H – forhold), noe som kan gjøre dem utsatt for vindfall dersom bestandet blir tynnet eller det blir åpnet opp en ny kant inntil bestandet.

2.5.2.1 Enkelttrestabilitet

For enkelttrestabilitet er treets form og størrelse sentrale faktorer. Høye trær er generelt mer utsatt for vindfall enn lave trær, da høyden gir økt vindfang. Det samme gjelder for trær med store kroner, som får et større totalt areal eksponert for vind. Samtidig har større trær større masse og styrke, noe som gjør dem mer motstandsdyktige mot stammebrekk, men heller mer utsatt for rotvelt.

Treets tyngdepunkt har også betydning for stabiliteten. Et tre som står loddrett vil være mer stabilt enn et tre som heller, da en vinkel på stammen endrer hvordan vindkreftene påvirker treet. Trær

som er betydelig høyere enn nabotrærne er særlig utsatt, da de stikker opp over skjermende vegetasjon som gir økt vindeksponering.

Kronas utforming påvirker treets stormstabilitet på flere måter. En bred krone øker vindfanget og dermed belastningen på treet, noe som kan gjøre det mer utsatt for vindfall. Samtidig henger kronestørrelse ofte sammen med rotsystemets utvikling, ettersom trær med større kroner gjerne har et mer omfattende rotsystem som potensielt kan forbedre forankringen i jorda. Videre kan en lang og smal krone kan også bidra til økt stabilitet ved å redusere svaing og dempe belastningen på stammen under vindpåvirkning.

En mye brukt indikator på treets stabilitet er forholdet mellom diameter i brysthøyde (DBH) og høyde, kjent som D/H-forholdet. Ifølge RENs veileder for linjerydding (2024) regnes trær med D/H-forhold $\geq 1,5$ som trær med høy enkeltrestabilitet (figur 5). Dette samsvarer med forskning som viser at trær med høyere D/H-forhold har lavere risiko for stammebrekk, ettersom de er kraftigere i forhold til høyden.

D/H (cm/m)	Enkelttre-stabilitet
$\leq 1,0$	Lav
1,25	Middels
$\geq 1,5$	Høy

Figur 5. Sammenheng mellom D/H-forhold og vurdert enkeltrestabilitet. Kilde: (REN, 2024).

Rotforankringen er avgjørende for treets evne til å motstå vindpåvirkning. Viktige faktorer er rotutstrekning, rottykkelse, rottybde og tilgjengelig jord. Generelt gir dypere rotsystemer bedre forankring og høyere stabilitet mot vindfall. Treslag har også en betydning for rotsystemet, siden ulike treslag utvikler ulike typer rotsystem. Gran (*Picea abies* (L.) Karst.) utvikler ofte grunne, utbredte rotsystemer, mens treslag som furu (*Pinus sylvestris* L.) og eik (*Quercus* spp.) normalt utvikler dypere røtter. Klimatiske forhold spiller også inn, frost i bakken kan midlertidig øke rotforankringen, mens vannmettet jord reduserer stabiliteten betraktelig.

Skader som tørke og råte svekker i tillegg treets strukturelle styrke. Råteskader reduserer vedens bøyefasthet, noe som øker risikoen for stammebrekk.

Det er viktig å understreke at disse faktorene virker sammen. For eksempel kan furu ha et naturlig dypere rotsystem enn gran, men hvis furua vokser på steinete eller grunn jord, kan den reelle rottybden være begrenset. Dette illustrerer hvordan både biologiske og miljømessige forhold må vurderes samlet for å forstå treets stabilitet.

2.5.2.2 Sosial stabilitet

På bestandsnivå påvirkes stabiliteten av trærnes plassering i forhold til hverandre. En tettere skog har ofte lavere vindeksponering per tre, siden vindbelastningen fordeles over flere trær. Dette fører til at trærne skjermer hverandre og reduserer den totale vindbelastningen innover i bestandet, som fører til at vindstyrken raskere avtar. En tett skog kan være stabil på bestandsnivå, men den fremmer ikke egenskaper som gjør enkelttreet stabilt. Dette fører til at trærne er særlig utsatt dersom det gjøres inngrep som åpner opp bestandet eller skogen rundt. Dette kan eksempelvis være en tynning, hogst av nabobestand som lager en ny kant inn mot bestandet.

Vind fordeles ikke jevnt gjennom et bestand, og trær som står i senter er dermed mer skjermet enn trærne langs kanten. En kant inntil et åpent område eller til et betydelig lavere nabobestand vil være mer eksponert enn bestand med mindre tydelige skiller. Nyetablerte kanter inntil hogstflater vil føre til redusert stabilitet for kanttrærne i noen år, frem til kanttrærne får tilpasset seg ny belastning. Selve utformingen på kanten er også av betydning, og en jevn overgang mellom bunnsjiktet til de høye trærne kan dempe vinden noe før det treffer det høye bestandet. I motsetning kan tydelige høydeforskjeller mellom grensende bestand skape turbulens, som kan føre til ekstra belastning hos enkelte trær langs kanten.

Treslagssammensetning og sjikting har også en innvirkning på stabiliteten. Blandingsskoger med flere treslag og varierende høyder kan bidra til bedre stabilitet, ettersom større trær blåser ned før de mindre trærne. Grandominert skog er ansett som mer stormutsatt, mens innslag av lauv og furu kan forbedre stabiliteten i skogen. Samtidig er det ikke en absolutt regel at heterogene skoger er mer stabile, og i kraftige stormer kan også slike skoger rammes hardt. Dette illustrerer at det er mange faktorer som spiller inn og at det er utfordrende å generalisere hva som gjør ett tre eller en skog stormstabil.

2.5.2.3 Geografiske og topografiske faktorer

Trærs eksponering for vind påvirkes i stor grad av trærnes geografiske plassering og topografiske forhold. Trær som står i åpne eller eksponerte områder, for eksempel på topper eller langs kysten, er ofte mer utsatt for vind enn trær som står i dalsøkk eller lesiden av terrenget.

Terrengets utforming kan kanalisere eller forsterke vindene, noe som gjør at enkelte områder kan oppnå høyere vindhastigheter enn hva den generelle vindhastigheten skulle tilsi. Studier har vist at topografiske forhold som helningsgrad og høydeforskjeller i nærområdet påvirker både vindstyrke og turbulens lokalt (Ruel et al., 1998). Trær som vokser i skråninger eller nær kantsoner mot åpne områder eller hogstflater, kan dermed utsettes for større vindbelastning.

I tillegg kan klima og vindeksposering variere betydelig, selv over korte avstander. Kystnære områder, som ofte har høyere vindfrekvens og mindre stabile vintre, kan gi andre vekstbetingelser og risikoforhold enn innlandsområder. Slike variasjoner bør også tas i betraktning ved vurdering av risikotrær, særlig ved arbeid på regionalt eller nasjonalt nivå.

2.6 Light Detection and Ranging (lidar)

Lidar er en fjernmålingsmetode som kan benyttes til å samle inn tredimensjonale data om terreng, vegetasjon og infrastruktur. I flybåren laserskanning (ALS) monteres en sensor på en flyvende plattform, typisk fly, helikopter eller drone, som sender ut laserpulser mot bakken. Tiden det tar før pulsen reflekteres tilbake til sensoren brukes til å beregne avstanden, noe som gir svært presise høyde- og posisjonsdata for objektene på bakken.

Lidar-teknologien ble utviklet på 1960-tallet og har siden gjennomgått betydelig utvikling. På 1970-tallet ble profilerende lasersystemer testet i Sovjetunionen for å sammenligne høydeestimeringer fra laser med fotogrammetri (Næsset et al., 2004). Dette markerer starten på overgangen fra enkle høydemålinger til mer avanserte analyser og operative takster. På 1990-tallet ble ALS tatt i bruk i skogbruket i Norden, blant annet til å estimere skogegenskaper som volum, høyde og biomasse på bestandsnivå (Næsset, 1997). I dag er systemene videreutviklet til bruk også på enkelttrenivå, og brukes både til forskning og operativ skoglig planlegging.

I dag er ALS et sentralt verktøy innen skogbruk og naturressursforvaltning, og benyttes også i økende grad av nettselskaper for kartlegging og risikovurdering langs strømlinjer (jf. kapittel 2.4.1).

Nøkkelegenskaper ved ALS som er særlig relevante for kartlegging langs strømlinjer, er valg av plattform og punkttetthet.

Plattformen, altså hvilket objekt sensoren er montert på, har stor betydning for både datakvalitet og operativ fleksibilitet. I konteksten av linjerydding brukes normalt helikopter eller drone. Droner er egnet for mindre områder og gir ofte høyere punkttetthet, mens helikoptre kan dekke større områder på kortere tid.

Punkttetthet, altså antall laserpulser per kvadratmeter, er avgjørende for hva slags informasjon som kan hentes ut fra punktskyen. Lav punkttetthet (1 punkt/m²) kan gi tilstrekkelig oppløsning til å lage terrengmodeller (DTM) med god presisjon (Magnussen et al., 2010), mens høyere punkttetthet er nødvendig for vegetasjonsanalyser og risikovurdering på enkelttreenivå. For å kunne skille ut selve høyspentlinja (fas) fra punktskyen kreves minst 5 punkt/m² (Yermo et al., 2024), og ved deteksjon av enkelttrær er enda høyere tetthet ønskelig. Sparks et al. (2022) fant at punkttetthet over 22 punkt/m² ga vesentlig bedre resultater for individuell tredeteksjon (ITD) sammenlignet med lavere tetthet. Det er derfor viktig å tilpasse punkttettheten etter formålet, hvor lavere tetthet kan være tilstrekkelig for topografi og generell skogstruktur, mens høy presisjon og prediksjon på enkelttreenivå krever tettere punktsky.

2.7 Hypoteser

Basert på teori og tidligere forskning om stormstabilitet og risiko for trefall (jf. kapittel 2.5), stilles følgende hypoteser:

H1. Trær som falt hadde redusert rotforankring og dermed økt sannsynlighet for rotvelt.

- Dette antas å gjenspeiles i grunnere jorddybde i rotsonen, spesielt på baksiden av treet (i vindretningen) eller ved treslag med grunne rotsystemer.

H2. Trær som falt var høyere enn nabotrær var dermed mer utsatt for rotvelt.

- Høydeforskjellen mot nabotrær gir økt eksponering for vind, og dermed økt risiko for rotvelt eller stammebrekk.

H3. Trær som falt hadde lavt diameter-høyde-forhold ($D/H < 1,5$).

- Slanke trær vil ha lavere mekanisk stabilitet og høyere belastning under storm.

H4. Trær som falt stod på vindutsatte områder.

- Dette inkluderer trær i åpent terreng, på koller, i skråninger, eller mot hogstflater der vindbelastning er større.

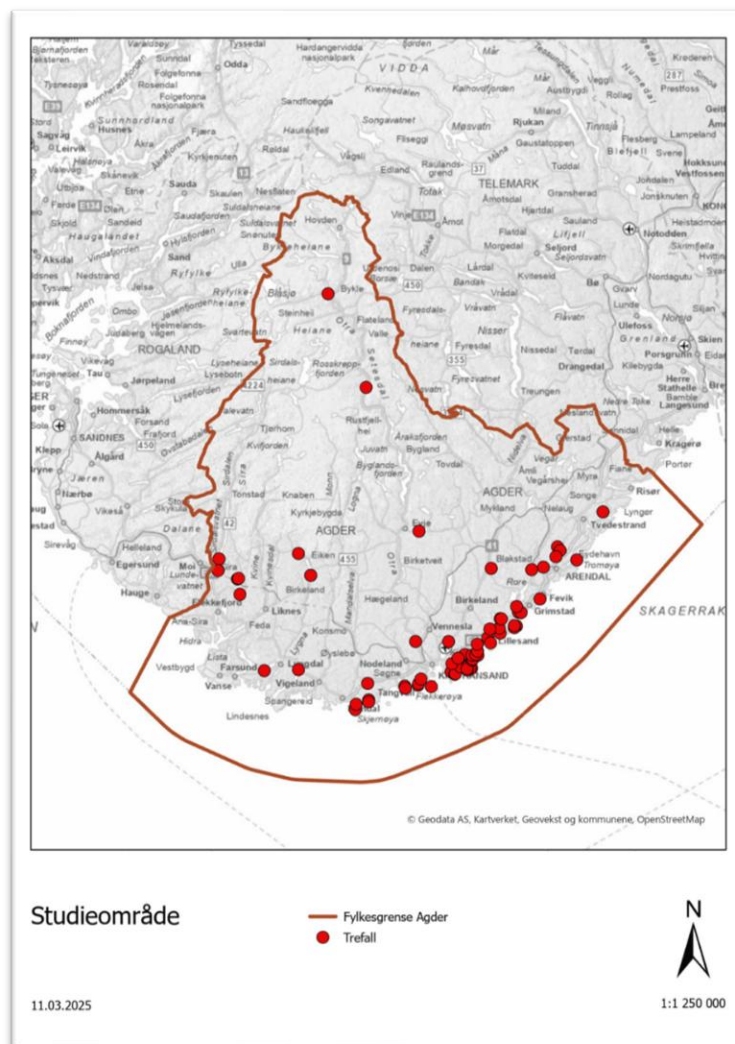
H5. Trær som falt var svekket, som følge av tørkestress, råte eller skader.

Kapittel 3 Materiale og metode

3.1 Studieområde

Studien ble gjennomført i Agder fylke, innenfor Glitre Netts konsesjonsområde. Området dekker både kyst- og innlandsområder, og strekker seg fra Tvedestrand i øst, Sirdal i vest og til Bykle i nord. Det var særlig i områdene mellom Kristiansand og Tvedestrand strømmettet ble hardest rammet av trefall under stormen *Babet* i 2023, noe som gjorde denne regionen til et sentralt fokus under feltarbeidet (se figur 6).

Topografien i Agder varierer betydelig, fra flate og åpne partier, til bratte skogkledde åser, daler og fjell. I kystområdene er vegetasjonen dominert av furu, eik og blandingsskog, mens innlandet har større innslag av gran. Høyspentlinjene krysser ulike typer terreng og vegetasjon, noe som påvirker eksponeringen for vind.



Figur 6. Kart over studieområdet i Agder fylke, med markering av registrerte trefall etter stormen *Babet* i 2023. Kartet viser fylkesgrensen og fordelingen av trefallspunkter innen Glitre Netts konsesjonsområde.

3.2 Forskningsdesign

Studien bruker et case-control-design som presentert av Schlesselman (1982). Trær som falt over distribusjonsnettet under stormen *Babet* i 2023 (case) er undersøkt i felt og sammenlignet med nærliggende kontrolltrær (control).

Datasettet består av to hovedkilder:

1. **Feltregistreringer**, hvor det ble samlet inn data om blant annet jorddybde, treslag og DBH. Jorddybdemålinger ble brukt til å undersøke korrelasjoner med fjernmålte terrengvariabler, mens andre feltmålinger som DBH ble inkludert som forklaringsvariabler i referansemodellen som inkluderer både fjernmålte- og feltmålte variabler.
2. **Fjernmålingsdata og offentlige kartlag**, inkludert LiDAR-baserte terrengvariabler samt løsmassekart, markfuktighetskart og SR16-data fra Geonorge. Disse inngår som

forklaringsvariabler i både referansemodellen og fjernmålingsmodellen (kun basert på fjernmålte variabler).

For å belyse problemstillingen ble registrerte trær delt inn i to klasser:

1. **Falt:** trær som falt over høyspentlinja under stormen.
2. **Stående:** nærstående trær som fortsatt står, brukt som kontrollgruppe.

Ved å analysere forskjeller og likheter mellom disse to klassene, var målet både å identifisere hvilke faktorer som kan bidra til redusert stormstabilitet, og å utvikle en modell som predikerer sannsynligheten for trefall basert på strukturelle og miljømessige trekk.

3.3 Feltregistrering og datainnsamling

3.3.1 Feltregistreringer

Feltarbeidet ble gjennomført sommeren 2024 og omfattet registrering av 222 trær (prøvetrær), hvorav 78 var trefall og 144 var stående kontrolltrær. Lokasjoner til trær som falt under *Babet* i 2023 ble identifisert ved hjelp av Glitre Netts ArcGIS-portal, hvor feilrettinger etter stormen ble registrert.

Opprinnelig var antallet trefall høyere, men totalt 10 tilfeller ble ekskludert fra datasettet. To av disse ble utelatt på grunn av manglende laserdata, noe som gjorde dem uegnet for videre fjernmålingsanalyser. I tillegg ble 8 trær ekskludert av hensyn til sikkerhet og fremkommelighet. Disse vurderingene ble gjort for å sikre en forsvarlig og effektiv gjennomføring av feltarbeidet.

I felt ble følgende registrert:

1. **Type:** Falt eller stående
2. **Enkelttreegenskaper:** Treslag, høyde og DBH
3. **Jordegenskaper:** jorddybde ble målt både foran og bak treet. Med foran menes området mellom treet og strømlinja, mens bak betegner området på motsatt side av treet, bort fra linja.
4. **Geografisk plassering:** GNSS-koordinater ble registrert og senere korrigert i GIS
5. **Foto:** For dokumentasjon og hjelp til korrigerende av posisjon

På hver side av treet ble det gjennomført tre punktmålinger av jorddybde. Målepunktene ble lagt langs en rett linje parallelt med strømlinjen. Den midterste målingen ble tatt 2 meter ut fra stammen, og de to andre 2 meter til hver side av denne. Avstanden mellom målepunktene var dermed 2 meter. Målingene ble utført med jordspyd til fast grunn, og representerer dybden til uforstyrret jordlag. Et gjennomsnitt ble beregnet for målingene foran og bak treet, og brukt som indikator på rotforankringens potensielle forskjell i eksponert og skjermet retning.

Kontrolltrær ble valgt systematisk langs linjetraséen med ca. 20 meters mellomrom for å sikre sammenlignbarhet mellom trærne.

3.3.2 Beskrivelse av datasettet

Gjennomsnittlig trehøyde var høyere for falte trær (19,1 meter) sammenlignet med stående trær (17,2 meter). Tilsvarende var gjennomsnittlig DBH større for falte trær (34 cm) enn for stående trær (30 cm). D/H-forholdet, var henholdsvis 1,9 og 1,8 for falt og stående trær, noe som indikerer trær med relativt høy avsmalning.

Trær som falt var i snitt 2,25 meter høyere enn nabotrærne innenfor 1 daa (dekar), kontrolltrærne var i snitt 0,89 meter høyere enn sine nabotrær. Når det gjelder jorddybde, hadde trær som falt gjennomgående grunnere forhold både foran og bak stammen sammenlignet med de stående kontrolltrærne (tabell 1).

Tabell 1. Oversikt over treslagsfordeling og deskriptive egenskaper for prøvetrærne. Tabellen inkluderer gjennomsnittlige verdier for trehøyde, DBH, D/H-forhold, høydeforskjell mot nabotrær og jorddybde.

Variabel	Falt (n=78)	Stående (n=144)
Furu	34	55
Eik	19	46
Gran	17	20
Øvrige treslag	8	23
Total treantall	78 (35%)	144 (65%)
Gj.snittlig trehøyde (m)	19,1	17,2
Differanse i høyde mot nabotrær (m)	2,25	0,89
Gj.snittlig DBH (cm)	34	30
D/H - Forhold	1,9	1,8
Jorddybde foran treet (cm)	16	24
Jorddybde bak treet (cm)	11	21

3.3.3 Fjernmålingsdata

Lidar-data levert av Stellaire AS ble brukt til analyser av terrengsstruktur og analyser av enkelttre- og bestandsegenskaper. Tilleggsdata fra Geonorge ble benyttet for å supplere med informasjon om terrengforhold, markfuktighet, løsmasser og skogressurser.

Informasjon fra laserskanningen er oppgitt i tabell 2. Punkttetthet var varierende gjennom datasettet, og hadde variasjoner mellom 10 pkt/m² til 90 pkt/m².

Tabell 2. Spesifikasjoner for dronebasert lidar-data brukt i analysene. Dataene ble levert av Stellaire AS.

Spesifikasjon	
Sensor	Hesai XT32 LiDAR
IMU	The Seiko Epson OEM-IMU-EG370N
GNSS-mottakere	Novatel OEM7720
Kamera	Sony IMX565
Plattform	Drone
Flyhøyde	45 m
Flyhastighet	10 m/s
Punkttetthet	45 pkt/m ²

3.4 Modelling

Dette delkapittelet beskriver hvordan den prediktive modellen ble utviklet, samt hvordan forklaringsvariabler ble valgt og beregnet fra fjernmålingsdata. Analysene har to hovedformål:

1. Identifisere og kvantifisere betydningen av ulike egenskaper ved trær og omgivelser som påvirker sannsynligheten for trefall
2. Utvikle en prediktiv modell basert på forklaringsvariabler hentet fra fjernmålingsdata og offentlige kartlag, som kan predikere sannsynligheten for at et tre faller.

Variabelutvelgelsen i modellen bygger delvis på innsikt fra del 1, der sammenhengen mellom hver variabel og trefall er undersøkt. På denne måten fungerer analysen både som en forklarende studie av risikofaktorer og som et grunnlag for utvikling av en praktisk prediksjonsmodell.

3.4.1 Identifisering av risikofaktorer

Med utgangspunkt i teori og tidligere forskning (jf. kapittel 2.5) ble fem overordnede kategorier av faktorer identifisert som potensielt påvirker trærnes stormstabilitet. Disse dekker både biologiske, topografiske og strukturelle forhold, og er relevante for både rotforankring og eksponering for vindbelastning.

Hver kategori ble knyttet til én eller flere forklaringsvariabler, som ble beregnet fra feltdata, fjernmåling og offentlige kartlag fra Geonorge som løsmassekart (NGU, 2024), markfuktighetskart (bioøkonomi, 2019) og skogressurs 16x16 (sr16) (bioøkonomi, 2023). Tabell 3 viser de overordnede risikofaktorene og eksempler på hvilke forhold som er vurdert innenfor hver kategori. Mer detaljerte beskrivelser av variablene følger i delkapittel 3.4.2.

Tabell 3. Oversikt over risikofaktorer og tilhørende overordnede variabler benyttet i modellen for å predikere stormrelatert trefall. Variablene er basert på data fra fjernmåling, feltregistreringer og offentlige kartlag.

Risikofaktor / Egenskap	Overordnede variabler
Rotforankring og jordforhold	Jorddybde, terrengforhold i rotsonen, grunnforhold og fuktighet
Terrengstruktur og topografi	Overordnet helningsgrad, terrengform, helningsretning, lokal ujevnhet
Relativ plassering i skogbildet	Treets høyde og størrelse i forhold til nabotrær, lokal tetthet og skogstruktur
Vindeksponering	Plassering i terrenget, nærhet til åpninger, eksponeringsgrad
Treets størrelse og form	Trehøyde, diameter, kroneareal og -volum, D/H-forhold

3.4.2 Beregning av forklaringsvariabler

3.4.2.1 Terrengstruktur i rotsonen

For å analysere terrengmessige forhold som kan påvirke rotforankringen ble bufferområder med ulike radier (2,5 - 5 m) opprettet rundt hvert prøvetre og sammenlignet. Bufferstørrelser ble valgt med bakgrunn i studier av rotutstrekning for ulike treslag (Kalliokoski et al., 2008). Buffer på 4,5 m ble valgt etter testing, der kriteriet var størst forklaringskraft for korrelasjon mellom terrengvariabel og feltmålt jorddybde.

Bufferzonene ble delt i «foran» og «bak» treet, basert på høyspentlinjas posisjon for å skille eksponert og skjermet side. Hensikten var å undersøke forskjeller i terrengstruktur mellom skjermet og eksponert side som kan påvirke utviklingen av treets rotsystem. Det ble også utført t-tester for å undersøke om hver variabel var signifikant forskjellige foran og bak treet, og om det var systematiske forskjeller mellom trær som hadde falt og trær som ble stående.

For hvert bufferområde ble terrengvariabler som vist i tabell 4 beregnet fra lidar-data.

Tabell 4. Oversikt og forklaring av variabler som ble beregnet under overflateanalysen

Variabel	Forklaring
IQR	Interkvartilavstand – Forskjellen mellom første og tredje kvartil, et mål på spredning i høydeverdier.
height_range	Høydeområde – Forskjellen mellom høyeste og laveste høydeverdi.
mean_height	Gjennomsnittshøyde – Gjennomsnittlig høyde for terrenget innenfor området.
mean_roughness	Gjennomsnittlig ujevnhet – Mål på terrengets ujevnhet, hvor store høydeforskjeller som finnes innenfor et område.
mean_slope	Gjennomsnittlig helning – Gjennomsnittlig stigningsvinkel (bratthet) på terrenget.
mean_tpi	Gjennomsnittlig topografisk posisjonsindeks (TPI) – Mål på hvor høyt et punkt ligger i forhold til omgivelsene (f.eks. topper vs. søkk).
median_height	Medianhøyde – Midtverdien av høydene i området, som er mer robust mot ekstremverdier enn gjennomsnitt.
sd_height	Standardavvik for høyde – Hvor mye høydene varierer fra gjennomsnittet i området.
variance	Varians i høydeverdier – Hvor spredt høydeverdiene er, et mål på variasjon i høyden på terrenget.

For å undersøke om terrengvariablene fra overflateanalysen faktisk reflekterer forhold som påvirker rotforankringen, ble det gjennomført en korrelasjonsanalyse mellom hver variabel og feltmålt jorddybde. Det ble brukt Pearsons korrelasjonskoeffisient for å kvantifisere styrken og retningen på sammenhengen. Dette gir en indikasjon på hvilke variabler som i størst grad kan fungere som indirekte mål for jorddybde, og dermed ha potensial til å forklare variasjon i rotforankring gjennom fjernmåling.

3.4.2.2 Overordnet terrengstruktur (1 daa)

For å fange opp overordnede terrengegenskaper ble terrenget innenfor 1 daa rundt hvert tre undersøkt gjennom lidR-pakken i R. Her ble det beregnet variabler som gjennomsnittlig terrenghøyde, helningsgrad og helningsretning i forhold til høyspentlinja, samt differanser i spesifikk terrenghøyde mellom prøvetre og nabotrær. Hensikten var å avdekke hvordan treets plassering i terrenget relativt til nabotrær kunne påvirke vindeksponering, skjerming og mulig rotforhold.

3.4.2.3 Tresegmentering og størrelse

Ved hjelp av lidR-pakken i R ble individuelle trær segmentert ut fra normaliserte laserdata. Toppunkt ble identifisert med local maxima filter (vindustørrelse ws=4), og Dalponte & Coomes (2016) sin algoritme ble brukt for segmentering. Videre ble treets totale volum (stamme og krone) estimert via voxel-basert metode.

3.4.2.4 Treets størrelse sammenlignet med nabotrær

For å undersøke hvordan hvert tre skiller seg ut i forhold til nabotrærne, ble det gjennomført en lokal statistisk sammenligning innenfor 1 daa. Denne analysen gir informasjon om hvorvidt treet er dominerende i høyde, volum eller kroneareal.

Følgende variabler ble beregnet:

- **Tetthet:** Antall andre trær innenfor 1 daa.
- **Gjennomsnittsverdi og variasjon:** Gjennomsnittlig høyde, volum og kroneareal, samt standardavvik for disse verdiene.
- **Avvik:** Absolutt differanse og z-score for høyde, volum og kroneareal.

Z-score gir et standardisert mål på hvor mye et tre skiller seg ut, basert på hvor mange standardavvik treets verdi ligger over eller under gjennomsnittet. For eksempel vil et tre som er fem meter høyere enn nabotrærne få høy z-score dersom de andre trærne er like høye, men lav z-score dersom høyden i området varierer mye. Dette gjør det lettere å identifisere trær som er dominerende uavhengig av lokalt nivå og variasjon.

Dette beregnes med følgende formel:

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

Hvor:

- X = verdien til det aktuelle treet
- μ = gjennomsnittet for trærne innenfor 1 daa
- σ = standardavviket innenfor 1 daa

3.4.2.5 Vindeksponeringsfaktor

For å estimere enkelttrærnes eksponering for vind, ble åpne og skogdekte områder kartlagt basert på kronehøyde ved bruk av lidR-pakken i R, hvor kronehøyde < 5 m ble definert som åpne områder.

For å unngå at høyspenttraséen ble klassifisert som åpne områder, ble traséen med bredde tilsvarende klausulert ryddebeltet fjernet før videre analyser. Dette ble gjort fordi trær nær linjetraséen har hatt tid til å tilpasse seg denne eksponeringen, og derfor ikke bør regnes som åpning i skogen.

To typer vindeksponeringsfaktorer ble benyttet/testet:

1. Vindeksponering (enkel)

En enkel faktor som definerer forholdet mellom størrelsen på nærmeste åpning og avstanden til denne.

$$\text{Vindeksponering} = \frac{\text{Åpningens areal}}{\text{Avstand til åpning}}$$

2. Vindeksponering (kompleks)

En mer avansert faktor som kombinerer trehøyde, avstand til åpning og åpningens størrelse. Denne faktoren fanger bedre opp hvordan vindbelastningen øker for høye trær nær store åpninger.

$$\text{Vind eksponering} = H * e^{-kD} * \frac{\ln(\min(S, S_{\max}) + 1)}{\ln(S_{\max} + 1)}$$

Hvor:

- H = trehøyde
- D = avstand til nærmeste åpning
- S = størrelsen på åpningen
- $S_{\max}$ = maksimal verdi for åpningens effekt (satt til 50 daa)
- k = Avstandsdempingsfaktor (satt til 0,1)

Justering og testing av parametere

- **Trehøyde (H):** Tre ulike vektingsmetoder for høyde ble testet; lineær, eksponentiell (med eksponent 1,5 og 2) og logaritmisk. Den lineære tilnærmingen ga best resultater og ble brukt i den endelige modellen
- **Avstandsdemping (k):** verdien $k=0,1$ ble valgt etter testing av ulike verdier. Dette gir en eksponering som reduseres med ca. 60 % etter 10 meter, og over 90 % etter 25 meter, noe som gjenspeiler redusert vindbelastning med økende avstand fra åpne områder.
- **Maksimal effekt av åpning ($S_{\max}$):** Dette leddet begrenser effekten av svært store åpninger og hindrer at disse dominerer i modellen. Dette er spesielt relevant for naturlige åpninger som vann, veier, myr eller lignende hvor trærne kan ha etablert stabilitet over tid. Selv om ingen åpninger i det aktuelle datasettet oversteg denne grensen, ble leddet beholdt for å sikre robusthet ved eventuell fremtidig skalering av modellen.

3.4.3 Valg av klassifikasjonsmodell og modellstruktur

Etter at forklaringsvariablene var definert og beregnet, ble ulike klassifikasjonsalgoritmer testet for å finne den modellen som ga best prediktiv ytelse. Ettersom utfallet som predikeres er binært, altså om trær har falt (1) eller står (0), ble det benyttet klassifikasjonsmodeller. Flere maskinlæringsalgoritmer ble testet, inkludert logistisk regresjon, Random Forest, Support Vector Machine (SVM) og Extreme Gradient Boosting (XGBoost). Valg av algoritme ble basert på en vurdering av modelleringsresultatene mot evalueringskriteriene som er beskrevet i kapittel 3.4.4.1.

XGBoost modellen presterte best på tvers av kriteriene, ble dermed valgt for videre analyse. Dette er en avansert implementering av gradient boosting-teknikker, utviklet for å være svært effektiv, presis og rask (Chen & Guestrin, 2016). Algoritmen bygger modeller sekvensielt, hvor hver påfølgende modell forsøker å rette opp feilene til den forrige, og optimaliserer feilmarginene ved hjelp av gradient descent-metoder. XGBoost er kjent for sin evne til å modellere komplekse, ikke-lineære relasjoner og for sin robusthet mot multikollinearitet, noe som gjør den særlig egnet for miljø- og fjernmålingsbaserte analyser hvor datastrukturen ofte er sammensatt (Ramdani & Furqon, 2022; Sahin, 2020; Shao et al., 2024; Wu et al., 2024). Videre har XGBoost innebygde mekanismer for å håndtere skjeve datasett og begrense risikoen for overtilpasning, noe som var en viktig egenskap gitt det relativt begrensede og ubalanserte datasettet i denne studien.

I denne studien ble det utviklet to modeller:

1. **Referansemodellen** som inkluderer både feltdata og fjernmålbaserte variabler.
2. **Fjernmålingsmodellen** som kun benytter variabler avledet fra fjernmåling og offentlige kartlag.

Hensikten var å sammenligne modellens ytelse med og uten bruk av feltregistreringer. I tillegg ble det vurdert hvorvidt en operativ modell kan utvikles basert på fjernmåling alene.

3.4.4 Modelltrening og evaluering

Datasettet bestod av 222 prøvetrær, hvorav 78 var klassifisert som «falt» og 144 som «stående». Denne ubalansen mellom klassene kunne potensielt ført til at modellen ble skjev og favoriserte majoritetsklassen (stående trær). For å motvirke dette ble datasettet balansert ved hjelp av SMOTE (Synthetic Minority Over-sampling Technique). SMOTE er en oversamlingsmetode som syntetisk genererer nye datapunkter for minoritetsklassen ved å interpolere mellom eksisterende observasjoner (Chawla et al., 2002). Dette gir et mer balansert treningsgrunnlag, og kan bidra til å

forbedre modellens evne til å gjenkjenne tilfeller av den sjeldnere klassen, i dette tilfellet trær som har falt.

Etter oversampling ble datasettet delt i et treningssett (80 %) og et testsett (20 %), slik at testsettet utelukkende besto av reelle observasjoner (uten SMOTE-punkter). Modelltreningen ble utført ved hjelp av 10-fold kryssvalidering, en metode som deler treningssettet i ti like store deler. I hver iterasjon trenes modellen på ni deler og valideres på den tiende. Prosessen gjentas ti ganger, og resultatene aggregeres for å redusere overtilpasning og gi en mer robust estimering av modellens ytelse.

Hyperparameter-tuning ble utført ved hjelp av manuell grid search. Dette innebærer at flere kombinasjoner av parametere for den valgte algoritmen (XGBoost) ble systematisk testet for å finne den kombinasjonen som gir best ytelse.

3.4.4.1 Modellevaluering

For å vurdere modellens prediksjonsevne ble flere evalueringskriterier benyttet:

- **Feilmatrise:** Viser fordelingen av riktige og feil klassifiseringer i form av sanne positive, sanne negative, falske positive og falske negative. Feilmatrisen danner grunnlaget for beregning av de øvrige evalueringskriteriene.
- **Nøyaktighet:** Andelen riktig klassifiserte observasjoner totalt. Nøyaktighet alene kan være misvisende dersom klassene er skjevt fordelt.
- **Cohen's Kappa:** Et mål på hvor godt modellen presterer sammenlignet med tilfeldig klassifisering. En verdi på 0,0 tilsier tilfeldig, mens 1,0 er perfekt samsvar (Cohen, 1960).
- **Sensitivitet (recall for «stående»):** Andelen av trær som faktisk står og som modellen korrekt klassifiserer som «stående», altså sanne positive (Monaghan et al., 2021).
- **Spesifisitet (recall for «falt»):** Andelen av trær som faktisk har falt som modellen korrekt identifiserer som «falt», altså sanne negative (Monaghan et al., 2021).
- **Positiv predikert verdi (PPV):** Andelen trær som modellen klassifiserer som «stående», som faktisk står. Altså andelen predikerte positive som er sanne positive (Monaghan et al., 2021).
- **Negativ predikert verdi (NPV):** Andelen trær som modellen klassifiserer som «falt», som faktisk har falt. Altså andelen predikerte negative som er sanne negative (Monaghan et al., 2021).
- **Balansert nøyaktighet:** Gjennomsnittet av sensitivitet og spesifisitet. Et nyttig mål når klassene er ubalanserte.

Ettersom modellen estimerer en sannsynlighet for trefall (0-1), er det nødvendig å fastsette en terskelverdi for å klassifisere trær som «falt» eller «stående». Det ble testet ulike terskelverdier mellom 0,48 og 0,52 for å finne en hensiktsmessig balanse mellom sensitivitet og spesifisitet. Det ble også testet to ekstremverdier på 0,40 og 0,60. Valg av terskelverdi påvirker hvordan modellen brukes i praksis. En lav terskel fanger opp flere risikotrær (høyere spesifisitet), men gir også flere falske positive. En høy terskel gir motsatt effekt, og passer bedre dersom det er viktig å unngå unødvendig felling. Dette gjør terskelverdien til et sentralt verktøy for å tilpasse modellen til nettselskapets risikoprofil og økonomiske vurderinger. En mer inngående diskusjon av terskelverdiens betydning presenteres i kapittel 5.2.2.

3.4.4.2 Evaluering av variabelviktighet

Etter at den endelige XGBoost-modellen var trent og evaluert, ble variabelviktigheten undersøkt for å identifisere hvilke faktorer som hadde størst betydning for modellens evne til å forutsi trefall. Dette ble gjort ved hjelp av funksjoner fra caret- og xgboost-pakkene i R, som rangerer forklaringsvariabler basert på deres bidrag til modellens beslutninger.

Resultatene fra analysen ble brukt til å vurdere hvilke variabler som er mest sentrale i modellen, og gir innsikt i hvilke egenskaper ved treet og omgivelsene som i størst grad påvirker sannsynligheten for trefall. De viktigste variablene ble visualisert og presentert i resultatdelen, både for referansemodellen og fjernmålingsmodellen.

Kapittel 4 Resultater

Dette kapittelet presenterer funnene fra analysene, med fokus på å identifisere hvilke faktorer som best forklarer trefall under stormhendelser. Først gis en oversikt over sentrale forskjeller mellom trær som falt og kontrolltrærne. Deretter gjennomgås resultater fra korrelasjonsanalyser og den prediktive modellen. Kapittelet avsluttes med en presentasjon av variabelviktighet og presisjonsmålinger for både referansemodellen og fjernmålingsmodellen.

4.1 Oversikt over datasettet og forskjeller mellom klasser

Tabell 5 gir en oversikt over deskriptiv statistikk for prøvetrærne. Analysene viser at trær som falt, er gjennomgående høyere, har større DBH, og står nærmere større åpninger enn de stående trærne. Gjennomsnittlig D/H-forhold var 1,9 for trær som falt og 1,8 for kontrolltrærne, som indikerer trær med relativt høy avsmalning. Videre viser analysen at trær som falt i snitt er 2,25 meter høyere enn nabotrær innenfor 1 daa, mens de stående kontrolltrærne er i gjennomsnitt 0,89 meter høyere enn nabotrærne. De dominerende treslagene er furu og eik, etterfulgt av gran, for begge klasser.

Tabell 5. Deskriptiv statistikk for prøvetrær fordelt på trær som falt og trær som ble stående.

Variabel	Falt (n = 78)	Stående (n = 144)
Furu (antall)	34	55
Eik (antall)	19	46
Gran (antall)	17	20
Øvrige treslag (antall)	8	23
Gj.snittlig trehøyde (m)	19,1	17,2
Differanse i høyde mot nabotrær (m)	2,25	0,89
Gj.snittlig DBH (cm)	34	30
D/H - Forhold	1,9	1,8
Bonitet	10,9	10,5
Tetthet (treantall/daa)	17,6	19
Volum (m ³)	40,9	38,3
Differanse i volum mot nabotrær (m ³)	7,2	6,5
Avstand til åpning (m)	18,6	21,5
Størrelse på åpning (m ²)	2316	1835
Vindeksponeringsfaktor	117	74
Jorddybde foran treet (cm)	16	24
Jorddybde bak treet (cm)	11	21

4.2 Korrelasjon mellom overflateanalyse av rotsonen og jorddybdemålinger

Korrelasjonsanalysen mellom fjernmålte terrengvariabler og feltmålt jorddybde viste at terrengets gjennomsnittlige helning ($r = -0,427$) og ujevnhet ($r = -0,387$) hadde de sterkeste sammenhengene (tabell 6). De negative korrelasjonene tyder på at trær med bratt og ujevnt terreng i rotsonen generelt har grunnere jord, noe som er illustrert i figur 7 og 8. Øvrige terrengvariabler viste svakere korrelasjoner ($r < 0,2$), og har dermed begrenset forklaringskraft for jorddybde.

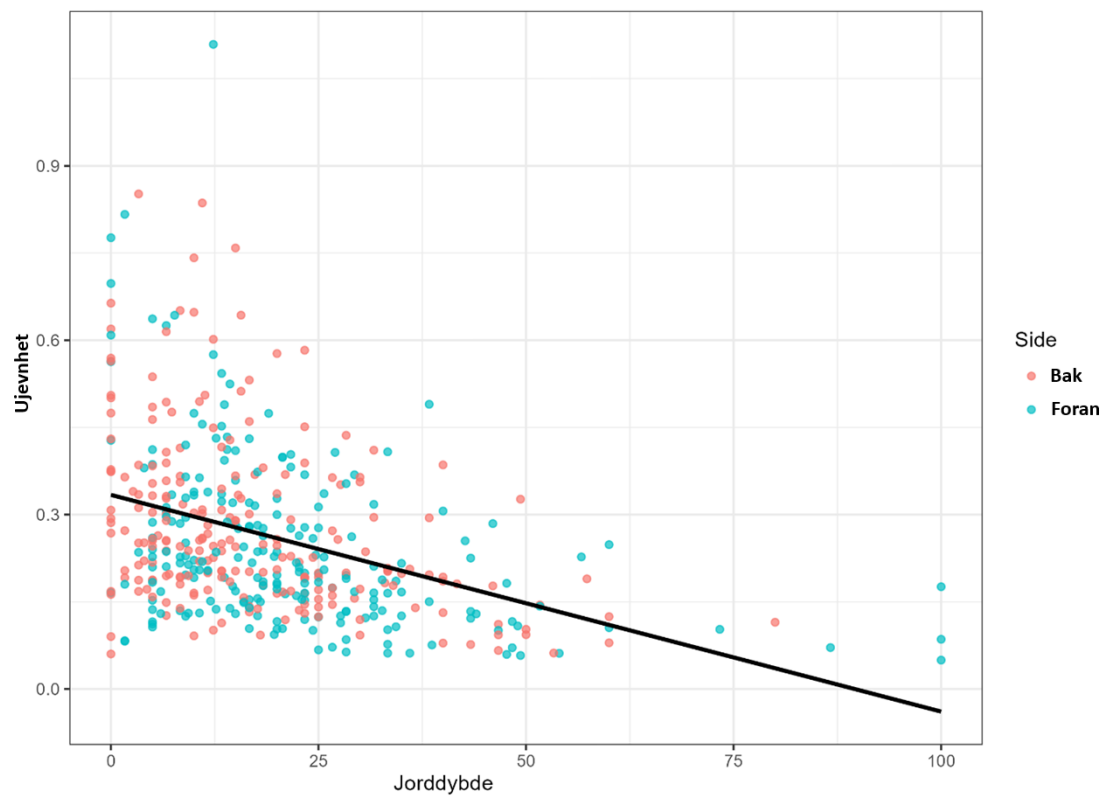
Selv om det observeres enkelte forskjeller mellom klassene, viser analysene at kun standardavvik høyde, interkvartilavstand, varians i høydeverdier og høydeområde hadde statistisk signifikante forskjeller mellom stående og falte trær (tabell 7).

Tabell 6. Resultater av korrelasjonsanalyse mellom variabler fra overflateanalysen av rotsonen og feltmålt jorddybde

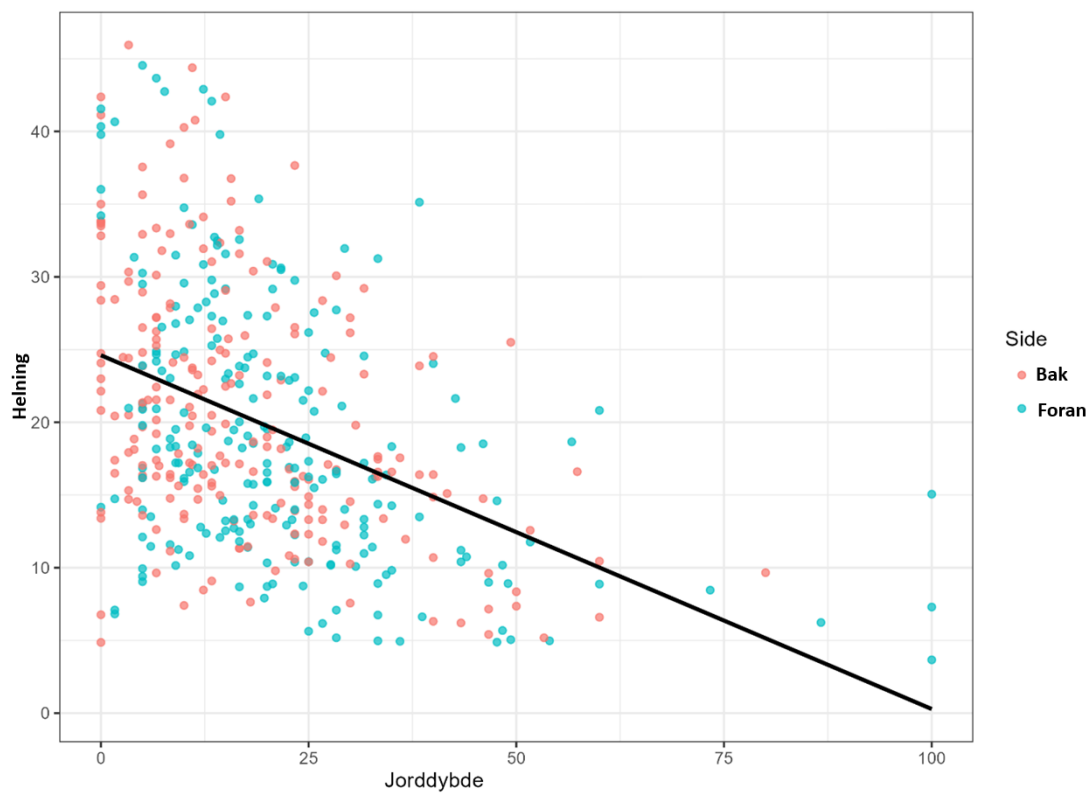
Variabel	Korrelasjon
Gjennomsnittlig helning	-0,427
Gjennomsnittlig ujevnhet	-0,387
Standardavvik for høyde	0,183
Varians i høydeverdier	0,179
Interkvartilavstand	0,135
Medianhøyde	0,087
Gjennomsnittlig høyde	0,085
Høydeområde	0,073
Gjennomsnittlig TPI	0,067

Tabell 7. Gjennomsnittlige verdier for terrengvariabler for trær som falt og trær som ble stående. p-verdier angir resultatet fra t-tester. Signifikante forskjeller er markert med stjerne ($p < 0.05^*$; $p < 0.01^{**}$; $p < 0.001^{***}$).

Variabel	Falt (n=78)	Stående (n=144)	p-verdi
Interkvartilavstand	10,4	9,2	0,0019**
Standardavvik for høyde	5,9	5,4	0,0024**
Varians i høydeverdier	37,2	30,7	0,0031**
Høydeområde	21	19,6	0,0480*
Gjennomsnittlig helning	21,4	19,1	0,0520
TPI	-6,49E-05	-0,000667946	0,0755
Gjennomsnittlig ujevnhet	0,281	0,252	0,1428
Gjennomsnittlig høyde	75,5	77,9	0,8537
Medianhøyde	76,5	78,5	0,8720



Figur 7. Korrelasjon mellom terrengets ujevnhet i rotsonen (4,5 m) og feltmålt jorddybde foran og bak treet.



Figur 8. Korrelasjon mellom terrengets helning i rotsonen (4,5 m) og feltmålt jorddybde foran og bak treet.

4.3 Overordnede terrengegenskaper innenfor 1 daa

Analysen viste at det ikke var signifikante forskjeller i de terrengbeskrivende variablene rundt trær som hadde falt og kontrolltrærne (tabell 8). Videre testing viste at inkluderingen av disse variablene reduserte modellens nøyaktighet, og derfor ble de utelatt i videre analyser.

Tabell 8. Gjennomsnittlige verdier for terrengvariabler beregnet innenfor 1 daa rundt prøvetrærne. Ingen av variablene viste signifikante forskjeller mellom trær som falt og stående kontrolltrær ($p > 0,05$).

Variabel	Gj.snitt falt	Gj.snitt stående	p verdi
nabotrær standardavvik hoh	2,59	2,28	0,11
gj.snitt helning	19,48	18,2	0,14
relativ helning terreng/linje	81,67	72,95	0,24
gj.snitt retning	160,51	167,46	0,34
retning høyspentlinje	238,47	228,417	0,34
standardavvik hoh	2,68	2,51	0,39
differanse hoh	-0,357	-0,214	0,57
nabotrær min hoh	62,74	66,39	0,78
dtm hoh	66,58	69,9	0,79
min hoh	61,79	65,17	0,79
gj.snitt hoh	66,7	69,87	0,8
nabotrær gj.snitt hoh	66,93	70,11	0,81
maks hoh	72,51	75,43	0,82
nabotrær maks hoh	71,14	74,07	0,82

4.4 Treets størrelse sammenlignet med nabotrær

Resultatene fra t-testene viste at det var statistisk signifikante forskjeller mellom trær som hadde falt og stående kontrolltrær for tre av variablene, høyde z-score ($p = 0,0003$), høydeforskjell mot nabotrær ($p = 0,0004$) og standardavvik i høyde ($p = 0,0036$) (tabell 9). Dette tyder på at trær som skiller seg ut i høyde, både absolutt og relativt til nabotrærne, har større sannsynlighet for å falle. Det ble ikke funnet signifikante forskjeller for øvrige variabler som gjennomsnittlig volum, kroneareal eller treantall.

Tabell 9. Resultater fra t-tester for variabler som beskriver treets størrelse i forhold til nabotrær. Verdiene angir p-verdier for forskjeller mellom trær som falt og stående kontrolltrær. Signifikante forskjeller er markert ($p < 0,05^*$, $p < 0,01^{**}$, $p < 0,001^{***}$).

Forklaringsvariabel	Signifikansnivå (p verdi)
Høyde z-score	0,0003***
Trehøyde differanse	0,0004***
Standardavvik høyde	0,0036**
Treantall	0,0871
Gjennomsnittlig volum	0,1779
Gjennomsnittlig kroneareal	0,1793
Standardavvik volum	0,4136
Standardavvik høyde	0,4199
Standardavvikkroneareal	0,4250
Gjennomsnittlig høyde	0,6139

4.5 Prediktiv modell

4.5.1 Variabelviktighet i modellen

Variabelviktigheten ble undersøkt for å identifisere hvilke variabler som hadde størst betydning for modellenes evne til å predikere trefall. Variabelviktigheten er representert relativt, hvor den viktigste variabelen har en verdi på 100.

Referansemodellen identifiserte jorddybde bak treet som den klart viktigste variabelen (100), etterfulgt av trehøyde differanse (58,458), jorddybde foran treet (52,299) og DBH (49,804). Terrengvariablene fra overflateanalysen av rotsonen, inkludert interkvartilavstand og helning, hadde moderat viktighet mellom 14 og 25 (tabell 10).

Fjernmålingsmodellen rangerte trehøyde-differanse som den viktigste variabelen (100), etterfulgt av høyde z-score (43,227) og terrengvariabler som interkvartilavstand, ujevnheter, TPI og helning med viktighet mellom 21,5 og 35 (tabell 11). I fjernmålingsmodellen er viktigheten jevnere fordelt, med flere variabler i området 10-20, noe som indikerer at modellen baserer seg på et bredere spekter av variabler.

Tabell 10. De 20 viktigste variablene i referansemodellen (XGBoost) basert på både felt- og fjernmålingsdata. Variabelviktigheten er oppgitt relativt, hvor 100 representerer den mest betydningsfulle variabelen.

Variabel	Viktighet
Jorddybde bak treet	100.000
Trehøyde differanse	58.458
Jorddybde foran treet	52.299
DBH	49.804
IQR	25.257
Høyde z-score	24.616
Gjennomsnittlig TPI	15.997
Gjennomsnittlig helning	14.239
Diameter/høyde-forhold	12.716
Treantall 1 daa	11.460
Vindeksponeringsfaktor kompleks	9.828
Gjennomsnittlig ujevnheter	8.145
Standardavvik trehøyde	7.415
Standardavvik høyde	6.510
Høydeområde	6.266
Gjennomsnittlig trehøyde	6.200
Treantall/ha DBH >5cm	5.897
Kroneareal	4.859
Treantall/ha DBH >10cm	4.789
Avstand til åpning	4.569

Tabell 11. De 20 viktigste variablene i fjernmålingsmodellen (XGBoost) basert kun på fjernmålte data. Variabelviktigheten er oppgitt relativt, hvor 100 representerer den mest betydningsfulle variabelen.

Variabel	Viktighet
Trehøyde differanse	100.000
Høyde z-score	43.227
IQR	35.016
Gjennomsnittlig ujevnhet	27.562
Gjennomsnittlig TPI	26.183
Gjennomsnittlig helning	21.573
Biomasse under bakken	21.427
Vindeksponeringsfaktor kompleks	21.010
Høydeområde	17.741
Treantall 1 daa	17.720
Gjennomsnittlig trevolum	15.450
Standardavvik høyde	14.452
Vindeksponeringsfaktor enkel	10.772
Biomasse over bakken	10.625
Treantall/ha DBH >10cm	10.060
Kroneareal	9.763
Gjennomsnittlig trehøyde	9.648
Standardavvik kroneareal	8.506
Standardavvik trehøyde	7.763
Varians i høydeverdier	6.645

4.5.2 Modellnøyaktighet

4.5.2.1 Test av terskelverdier

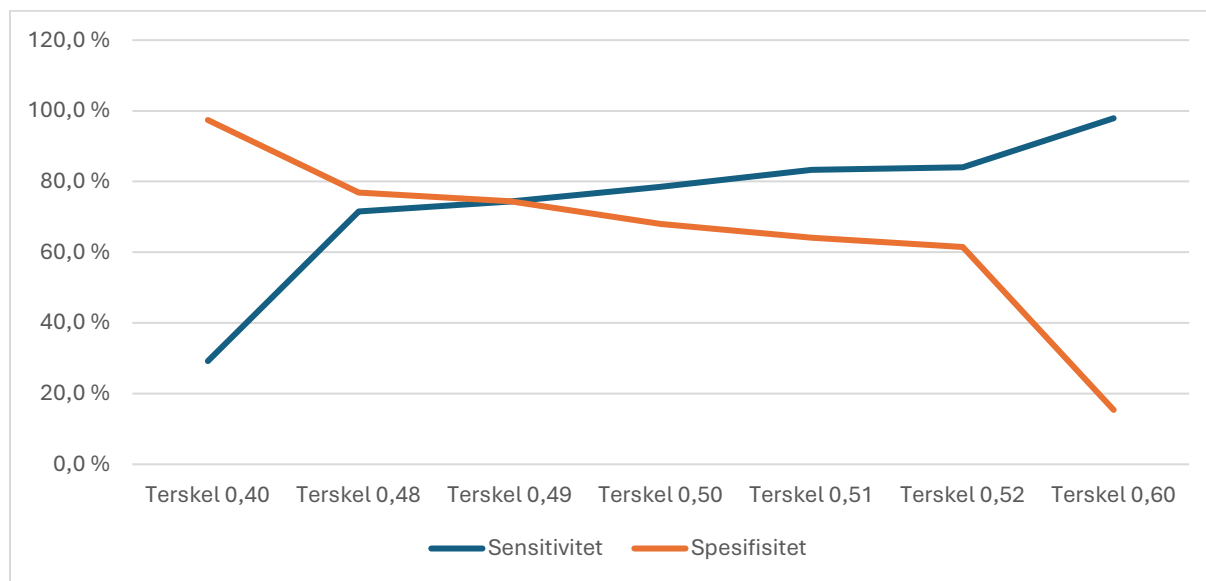
Referansemodellens balanserte nøyaktighet varierer fra 56,7 % til 74,3 % og er høyest ved terskel 0,49 (74,3 %) (tabell 12). Videre er kappa-verdi høyest ved terskel 0,51 (0,4800), noe som tilsier best overordnet samsvar ved disse verdiene. Terskel 0,40 ga lavest sensitivitet (29,2 %) og høyest spesifisitet (97,4 %), mens motsatt mønster ble observert ved terskel 0,60 med sensitivitet på 97,9 % og spesifisitet på kun 15,4 %. Figur 9 viser dette tydelig som en kryssende trend. Ved lav terskel (0,40) er PPV svært høy (95,5 %), noe som betyr at de trærne som klassifiseres som «stående» nesten alltid faktisk står. NPV var derimot høyest ved terskel 0,60 (80,0 %), altså at de trærne som modellen klassifiserer som trefall, stemmer i 80 % av tilfellene.

Fjernmålingsmodellen presterte best ved terskel 0,50, med hensyn til balansert nøyaktighet på 68,5 % og kappa-verdi 0,3388 (tabell 13). Balansert nøyaktighet varierer mellom 52,9 % og 68,5 %. Den samme utviklingen i sensitivitet og spesifisitet som referansemodellen ble observert (figur 10). Terskel 0,40 og 0,60 gir tydelige kontraster, hvor terskel 0,40 gir lav sensitivitet (22,9 %) og høy spesifisitet (94,9 %), mens terskel 0,60 gir høy sensitivitet (99,3 %) og svært lav spesifisitet (6,4 %). Ved terskel 0,60 identifiseres få risikotrær, men med høy sikkerhet (NPV 83,3 %).

Resultatene viser en tydelig avveining mellom sensitivitet og spesifisitet samt PPV og NPV for begge modellene. Lav terskelverdi gir høy spesifisitet og PPV, men lav sensitivitet og NPV. Ved høy terskelverdi er mønsteret motsatt, med høy sensitivitet og NPV, men lav spesifisitet og PPV.

Tabell 12. Resultater av referansemodellens presisjon ved terskelverdier 0,48 til 0,52 og ekstremverdier på 0,40 og 0,60. Høyeste verdier markert med fet skrift.

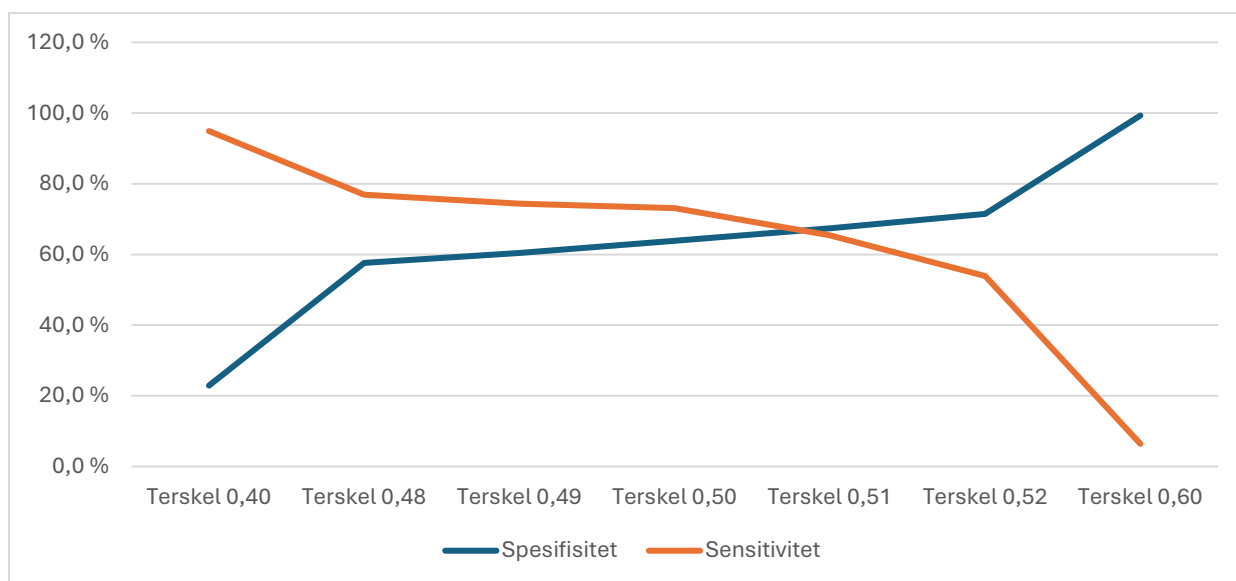
Evalueringskriterie	Terskel 0,40	Terskel 0,48	Terskel 0,49	Terskel 0,50	Terskel 0,51	Terskel 0,52	Terskel 0,60
Nøyaktighet	53,2 %	73,4 %	74,3 %	74,7 %	76,6 %	76,1 %	68,9 %
Kappa	0,2056	0,4538	0,4635	0,4562	0,4800	0,4652	0,1632
Sensitivitet	29,2 %	71,5 %	74,3 %	78,5 %	83,3 %	84,0 %	97,9 %
Spesifisitet	97,4 %	76,9 %	74,4 %	68,0 %	64,1 %	61,5 %	15,4 %
PPV	95,5 %	85,1 %	84,3 %	81,9 %	81,1 %	80,0 %	68,1 %
NPV	42,7 %	59,4 %	61,1 %	63,1 %	67,6 %	67,6 %	80,0 %
Balansert nøyaktighet	63,3 %	74,2 %	74,3 %	73,2 %	73,7 %	72,8 %	56,7 %



Figur 9. Sensitivitet og spesifisitet for referansemodellen ved ulike terskelverdier. Figuren viser hvordan modellens evne til å identifisere henholdsvis stående trær (sensitivitet) og trær som falt (spesifisitet) påvirkes av valg av terskelverdi. Høyere terskel gir høyere sensitivitet, men lavere spesifisitet, og motsatt.

Tabell 13. Oversikt over fjernmålingsmodellens presisjon ved terskelverdi 0,48 til 0,52 og ekstremverdier på 0,40 og 0,60. Høyeste verdier markert med fet skrift.

Evalueringskriterie	Terskel 0,40	Terskel 0,48	Terskel 0,49	Terskel 0,5	Terskel 0,51	Terskel 0,52	Terskel 0,60
Nøyaktighet	48,2 %	64,4 %	65,3 %	67,1 %	66,7 %	65,3 %	66,7 %
Kappa	0,1353	0,3069	0,3137	0,3388	0,3093	0,2501	0,0725
Sensitivitet	22,9 %	57,6 %	60,4 %	63,9 %	67,4 %	71,5 %	99,3 %
Spesifisitet	94,9 %	76,9 %	74,4 %	73,1 %	65,4 %	53,9 %	6,4 %
PPV	89,0 %	82,2 %	81,3 %	81,4 %	78,2 %	74,1 %	66,2 %
NPV	40,0 %	49,6 %	50,4 %	52,3 %	52,0 %	50,6 %	83,3 %
Balansert nøyaktighet	58,9 %	67,3 %	67,4 %	68,5 %	66,4 %	62,7 %	52,9 %



Figur 10. Sensitivitet og spesifisitet for fjernmålingsmodellen ved ulike terskelverdier. Figuren viser hvordan modellens evne til å identifisere henholdsvis stående trær (sensitivitet) og trær som falt (spesifisitet) påvirkes av valg av terskelverdi. Høyere terskel gir høyere sensitivitet, men lavere spesifisitet, og motsatt.

4.5.2.2 Feilmatriser

Ved terskelverdi 0,49 identifiserte referansemodellen 107 stående trær korrekt og 58 falt trær korrekt. Modellen gjorde 37 feilklassifiseringer der trær som stod ble predikert til å falle, og 20 feil der falt trær ble predikert som stående (tabell 13). Dette tyder på en god balanse mellom sensitivitet og spesifisitet.

Fjernmålingsmodellen ved terskelverdi 0,50 ble 92 trær korrekt klassifisert som stående og 57 korrekt som falt. Modellen gjorde 52 feilklassifiseringer av stående trær som «falt», og 21 feilklassifiseringer av falt trær som «stående» (tabell 14).

Begge modellene identifiserte omtrent like mange trær som faktisk hadde falt, men fjernmålingsmodellen hadde et høyere antall falske negative, altså trær som ble feilaktig klassifisert som risikotrær.

Tabell 13. Feilmatrise for referansemodellen ved terskel 0,49

		Observert		
		Stående	Falt	
Predikert	Stående	107	20	127
	Falt	37	58	95
		144	78	

Tabell 14. Feilmatrise for fjernmålingsmodellen ved terskel 0,5

		Observert		
		Stående	Falt	
Predikert	Stående	92	21	113
	Falt	52	57	109
		144	78	

Kapittel 5 Diskusjon

Dette kapittelet diskuterer og tolker funnene fra analysene i lys av studiens tre problemstillinger og tidligere forskning på stormstabilitet og trefall. Målet er å vurdere hvilke faktorer som har betydning for trefall over strømnettet, om disse faktorene kan identifiseres gjennom fjernmåling, og i hvilken grad en prediktiv modell kan identifisere risikotrær.

Diskusjonen er strukturert i tre hoveddeler. Først vurderes hvilke strukturelle, miljømessige og topografiske egenskaper som skiller trær som har falt fra trær som har blitt stående. Deretter drøftes i hvilken grad disse egenskapene lar seg fange opp gjennom fjernmåling, og hvordan dette påvirker modellens prediksjonsevne. Til slutt vurderes modellens presisjon og praktiske nytteverdi, samt metodiske styrker og svakheter i studien.

Kapittelet avsluttes med forslag til videre forskning og refleksjoner rundt hvordan modellen kan benyttes som beslutningsstøtteverktøy for mer målrettet og risikobasert linjerydding hos nettselskaper.

5.1 Tolkning av hovedfunn

Dette delkapittelet adresserer den første problemstillingen og hypoteser. Formålet er å diskutere hvilke egenskaper hos trær og deres omgivelser som er forbundet med økt sannsynlighet for trefall. Diskusjonen bygger på analysene av variabler knyttet til jorddybde, rotforhold, trehøyde, eksponering, D/H-forhold og svekkelser og skader. Hensikten er å vurdere hvilke mekanismer som bidrar til redusert stormstabilitet, og hvordan disse kan avdekkes gjennom fjernmålingsanalyser av trær som har falt.

5.1.1 Jorddybde, rotforankring og terrengegenskaper

Jorddybde fremstår som en av de mest sentrale forklaringsvariablene i denne studien, med en tydelig negativ sammenheng mellom jorddybde og sannsynlighet for trefall. Trær som falt hadde gjennomgående grunnere jord, både foran og bak stammen, enn kontrolltrærne. Dette er i tråd med tidligere forskning, som viser at grunn jord gir svakere rotforankring og dermed lavere stormstabilitet (Nicoll et al., 2006).

Spesielt ser jorddybden bak treet ut til å være av stor betydning. Dette antyder rotforankring i vindretningens side er avgjørende for trets evne til å motstå vindbelastning, noe som også støttes av studier av rotsystemets struktur (Coutts, 1986; Moore, 2014; Stokes & Mattheck, 1996).

I denne studien ble det gjennomført en overflateanalyse av rotsonen i en radius på 4,5 meter rundt hvert tre, for å undersøke om fjernmålte terrengvariabler kan fungere som indirekte indikatorer på jordforhold. Analysene viste signifikante forskjeller i variabler som høydevariasjon, helning, ujevnhet og interkvartilavstand mellom trær som falt og kontrolltrærne. Helning og ujevnhet viste i tillegg en moderat negativ korrelasjon ($\sim -0,4$) med feltmålt jorddybde. Dette tyder på at slike terrengvariabler kan fungere som indirekte mål på jorddybde, og at fjernmåling kan bidra til å avdekke forhold som svekker rotforankringen.

Tidligere forskning har vist at rotsystemets utvikling og fordeling blir påvirket av både jordforhold og vindeksponering. Flere studier som har undersøkt kritisk belastning før rotvelt oppstår, viser at rotsystemets utstrekning i vindretningens side er avgjørende for stormstabilitet (Coutts, 1983; Coutts, 1986; Yang et al., 2018). Coutts et al. (1999) peker også på at asymmetri i rotsystemet kan redusere stormstabilitet, noe som underbygges av funnene i denne studien, hvor trærne som falt ofte hadde grunnere jord bak treet.

Rotsystemet formes over tid og tilpasser seg vanligvis dominerende vindretning, noe som normalt gir økt stabilitet mot vanlige belastninger (Nicoll & Ray, 1996). Topografiske hindringer som fjell, store steiner eller skrenter kan likevel hindre rotutviklingen i enkelte retninger. Under feltarbeidet ble det observert flere trær i steinete eller fjellnært terreng, hvor rotutviklingen på baksiden av treet var tydelig begrenset (figur 11 og 12).



Figur 11. Eksempel på tre som har falt i terreng med tydelige begrensninger for rotutvikling bak treet. Rotsystemet er delvis hemmet av stein og fjell, noe som svekker stabiliteten i vindretningens side. Foto: Torjus Birkeland.



Figur 12. Tre som har veltet ned mot terrenget, med synlig grunn rotforankring på baksiden. Eksemplet illustrerer hvordan lokale topografiske forhold kan hemme rotutviklingen i en bestemt retning. Foto: Torjus Birkeland.

Resultatene antyder at slike terrengmessige begrensninger kan identifiseres indirekte gjennom fjernmåling. Videre utvikling av metoder som kombinerer terrengstruktur og indikatorer for rotforhold kan styrke fremtidige modeller, særlig i områder der feltarbeid er lite gjennomførbart.

Treslag kan også påvirke rotforankring. Tidligere studier har vist at gran har et grunnere rotsystem sammenlignet med for eksempel furu og eik, noe som normalt gir gran lavere stormstabilitet (Peltola et al., 1999; Päätaalo, 2000). I denne studien var det imidlertid flest felle trær av furu og eik. Dette kan skyldes at stormen *Babet* traff kystområdene i Agder hardest, områder hvor disse treslagene dominerer, mens gran i større grad forekommer lengre inn i landet. Dermed ble furu og eik i større grad eksponert for ekstreme vindforhold under stormen. Selv treslag som ansees som stormstabile kan få redusert rotforankring under svært grunne jordforhold, noe som kan tyde på at betydningen av treslag i denne studien overskygges av lokale forhold som jorddybde og eksponering. Resultatene svekker derfor ikke nødvendigvis teorien om treslagsforskjeller, men antyder at slike effekter kan overskygges av lokale forhold i enkelthendelser.

Analysen av overordnede terrengtrekk innenfor 1 daa viste ingen signifikante forskjeller mellom trefall og kontrolltrær, og ble derfor utelatt fra sluttmodellen. Dette indikerer at mikroforhold i rotsonen har større betydning for stormstabilitet enn generelle topografiske trekk. Dette samsvarer med funn fra Nicoll et al. (2005), som viste at trær som står i helninger opptil 30° har tilnærmet lik stabilitet som trær på flat mark, men krever mer kraft for å velte oppover enn nedover i helningen. Dette kan tyde på at terrenghelning $< 30^\circ$ ikke reduserer stabiliteten, men snarere kan styrke den i enkelte retninger. I praksis kan dette bety at trær som står lavere enn høyspentlinja (og dermed må falle «oppover» for å treffe den) utgjør lavere risiko.

Samtidig vil trær som står på nedsiden av linja, gitt samme avstand til linja, treffe linja høyere på stammen. Dette kan føre til mindre skade enn trær på oversiden, som treffer linja lavere. Dette illustrerer behovet for modeller som både vurderer sannsynlighet og potensiell konsekvens av trefall.

Funnene støtter hypotese 1 om at svekket rotforankring, spesielt på baksiden av treet (i vindretningen), øker sannsynligheten for rotvelt. Dette underbygges av både feltdata og variabler fra fjernmåling. Hypotesen om at treslag med grunne rotsystemer (som gran) er mer utsatt fikk ikke støtte i denne studien, men dette forklares trolig av at stormen traff kystområdene hardest.

5.1.2 Trehøyde og vindeksponering

Høydedifferanse mot nabotrær og høyde z-score var blant de mest forklarende variablene i fjernmålingsmodellen. Resultatene viser at trær som er betydelig høyere enn nabotrærne har høyere sannsynlighet for å falle. Dette samsvarer med tidligere studier som viser at trær som stikker opp over skogbildet i mindre grad beskyttes av nabotrær og derfor har større vindfang (Blennow & Olofsson, 2008; Peltola et al., 1999). Risikoen forsterkes særlig i åpne områder og kantsoner, hvor treet kan ha redusert skjerming av nabotrær.

En annen viktig variabel i modellen var vindeksponeringsfaktoren som kombinerer trehøyde, avstand til åpning og størrelse på åpning. Resultatene viste at høye trær nær store åpninger hadde høy eksponeringsverdi og også høyere sannsynlighet for å falle. Dette samsvarer med tidligere forskning som viser at trær i kantsoner eller nær hogstflater er mer utsatt for vindfall (Gardiner et al., 2008; Moore, 2014).

Det finnes mer avanserte simuleringsmodeller for vindpåvirkning, som GALEs (Gardiner et al., 2000) og HWIND (Peltola et al., 1999), som estimerer kritisk vindstyrke basert på meteorologiske forhold, bestandsegenskaper og jordtype. Disse ble ikke brukt i denne studien for å redusere kompleksiteten og sikre mer operasjonell anvendbarhet, men de representerer et potensielt utviklingsområde for fremtidige studier og modellutvikling.

Funnene gir tydelig støtte til hypotese 2, om at trær som er høyere enn omgivelsene er mer utsatt for vindbelastning og trefall. Resultatene støtter også hypotese 4, som tilsier at trær som står eksponert mot åpne områder eller i kantsoner har høyere sannsynlighet for å falle. Begge forholdene fremstår som tydelige risikofaktorer, og bør inngå i fremtidige modeller for vurdering av stormstabilitet.

5.1.3 Diameter til høyde forhold

Et interessant funn i denne studien er at trærne som falt i snitt hadde et D/H-forhold på 1,9. Dette tilsier trær med relativt stor diameter i forhold til høyde, altså trær med stor avsmalning. Ifølge RENs (2024) veileder for linjerydding anses trær med D/H-forhold over 1,5 til å ha høy stabilitet og anses dermed som å utgjøre en lav risiko. Dette kan i praksis føre til at slike trær ikke prioriteres

ved sikringshogst. NIBIO (2017) peker på 1,25 som en terskelverdi mellom stabile og ustabile trær, og anbefaler et forhold på 1,5 i kraftgater, med forbehold om at lokale forhold som vindeksponering, topografi og jordbunnsforhold kan påvirke stabiliteten.

Det at mange av trærne som falt hadde et D/H-forhold godt over 1,5 utfordrer bruken av denne enkeltvariabelen som hovedindikator for stormstabilitet. Funnene i denne studien tyder på at et høyt D/H-forhold ikke garanterer høy stabilitet, og at vurdering basert på denne faktoren alene kan gi en falsk trygghet. Dette samsvarer med tidligere forskning av blant andre Cremer et al. (1982), Peltola et al. (1999) og Peltola et al. (2013), som viser at D/H-forholdet har sammenheng med økt motstand mot stammebrekk, men ikke nødvendigvis mot rotvelt, særlig i tilfeller med grunn jord eller høy eksponering for vind.

Samtidig viser analysene at kontrolltrærne hadde nesten like høyt D/H-forhold som trærne som falt (1,8 i snitt). Dette tyder på at D/H-forholdet i denne konteksten ikke i seg selv er en god indikator for trefall. En mulig forklaring er at begge grupper stod langs kantene av rydebeltene, hvor konkurransen for lys er lavere. Slike vekstforhold gir ofte større kroner, som fører til økt diametertilvekst og dermed høyere D/H-forhold (Murcia, 1995; Stempski, 2025).

I denne studien ble kun D/H-forhold og diameter (DBH) inkludert i referansemodellen, og begge viste høy forklaringskraft og forbedret modellens nøyaktighet. Siden DBH ikke inngår i fjernmålingsmodellen, reiser dette spørsmål om predikert DBH ville ha forbedret modellen. Flere studier har vist lovende resultater ved prediksjon av DBH med lidar-data, både på bestands- og enkelttre-nivå (Sun et al., 2022; Wei et al., 2012; Xiaowei et al., 2011). Inkludering av predikert DBH i fremtidige modeller kan derfor være et forbedringsmoment til praktisk risikovurdering der feltdata ikke er tilgjengelig i stor skala.

Funnene gir ikke støtte til hypotese 3, som forutsatte at lavt D/H-forhold (slanke trær) gir høyere risiko for trefall. I stedet viste mange av trærne som falt relativt høyt D/H-forhold, og det var liten forskjell mellom trær som falt og kontrolltrærne. Dette tyder på at D/H alene ikke er en tilstrekkelig indikator for stormstabilitet, spesielt i kantsoner hvor vekstforholdene påvirker trærnes form. D/H-forholdet bør tolkes med forsiktighet og alltid ses i sammenheng med lokale forhold andre risikofaktorer.

5.1.4 Svekkelser og skader

Tidligere forskning har vist at svekkelser i treets struktur, som råte, tørkestress og andre skader, kan redusere stormstabiliteten og øke risikoen for både rotvelt og stammebrekk (Trømborg et al., 2012). Slike faktorer kan både rotsystem og stamme, og anses som relevante risikofaktorer i mange sammenhenger.

I denne studien ble det imidlertid ikke observert synlige tegn til råte, tørkeskader eller mekaniske svekkelser på de trærne som hadde falt. Trærne fremstod som friske under feltarbeidet, og det ble ikke gjennomført egne undersøkelser av vedkvalitet eller strukturelle forhold. Dette begrenser muligheten for å vurdere om skjulte svekkelser kan ha bidratt til trefall i utvalget.

Samtidig er det rimelig å anta at slike svekkelser kan spille en viktig rolle i andre tilfeller, og at metodiske begrensninger har gjort det vanskelig å fange dette opp i denne studien. Som diskutert i kapittel 5.4, kan bruk av hyperspektrale eller multispektrale data gi muligheter for å identifisere helsesvekkelser gjennom fjernmåling. Flere studier har dokumentert at slike sensorer kan brukes til å påvise både treslag og tegn på råte og tørkestress med moderat til høy presisjon.

Hypotese 5, som antok at svekkelser i treets struktur øker sannsynligheten for trefall, kunne ikke testes direkte i denne studien. Det ble ikke observert synlige tegn til råte, tørkeskader eller mekaniske svakheter blant trærne som hadde falt, og de fleste fremstod som friske basert på visuell vurdering i felt. Imidlertid ble det ikke tatt prøver, og i enkelte tilfeller var trær allerede fjernet av grunneier, slik at kun stubben var tilgjengelig. Dette begrenser muligheten for å fastslå med sikkerhet om skjulte svekkelser kan ha bidratt til trefall i det aktuelle utvalget.

5.2 Modellens prediksjonsevne og praktisk nytte

Dette delkapittelet vurderer i hvilken grad den prediktive modellen kan brukes til å identifisere trær med høy risiko for å falle over strømmettet, med utgangspunkt i problemstilling P2 og P3. Det gis en vurdering av modellens presisjon, anvendelighet og potensial for operativ bruk hos nettselskapene. Avslutningsvis diskuteres hvordan modellen kan støtte en mer datadrevet og kostnadseffektiv tilnærming til skogforvaltning og linjerydding.

5.2.1 Modellens prediksjonsevne

Resultatene fra denne studien viser at det er mulig å predikere hvilke trær som har økt sannsynlighet for å falle, enten ved bruk av en kombinasjon av fjernmålte og feltbaserte variabler, eller kun basert på fjernmåling. Referansemodellen oppnådde høyest balansert nøyaktighet på 74,3 % ved terskel 0,49, noe som tilsier at den hadde god evne til å skille mellom trefall og stående trær. Kappa-verdien på 0,46 (terskel 0,49) indikerer et moderat samsvar med observerte data, og viser at modellen presterer klart bedre enn tilfeldig klassifikasjon.

Når modellen kun ble basert på fjernmålte variabler, sank ytelsen noe. Balansert nøyaktighet ble 68,5 % og kappa-verdien 0,34. Likevel viser modellen fortsatt akseptabel presisjon, noe som er viktig i en praktisk kontekst der feltarbeid er lite gjennomførbart i stor skala. En modell som baserer seg utelukkende på fjernmåling kan derfor være nyttig i kartlegging og risikovurdering over større geografiske områder.

Analysene viste at små justeringer i terskelverdi har stor innvirkning på modellens ytelse. Eksempelvis ga terskel 0,4 i fjernmålingsmodellen høy spesifisitet (94,9 %), men lav sensitivitet (22,9 %) og NPV på kun 40 %. Det betyr at modellen identifiserer nesten alle faktiske risikotrær, men på bekostning av NPV. Ved terskel 0,6 ble det predikert kun seks risikotrær, men fem av disse hadde faktisk falt, noe som ga en NPV på hele 83 %. Spesifisiteten var lav siden kun 5 av 78 trefall ble identifisert (6,4 %), men modellen ga høyere sikkerhet for at identifiserte trær faktisk utgjør en risiko som illustreres av høy NPV.

Disse forskjellene viser at det ikke nødvendigvis finnes én optimal terskelverdi. Modellens nytte ligger i muligheten for brukertilpasning, der terskelen justeres etter ønsket balanse mellom å fange opp flest mulig risikotrær og å unngå unødvendig hogst. Balansert nøyaktighet og NPV fremstår som særlig relevante måltall i denne vurderingen, fremfor nøyaktighet alene.

Referansemodellen oppnådde høyest balansert nøyaktighet (74,3 %), noe som illustrerte hvordan feltvariabler som jorddybde og DBH tilfører forklaringsverdi til modellen. Selv om denne modellen ikke er direkte skalerbar, fungerer den som en viktig referanse for hvilke variabler det kan være nyttig å forsøke å estimere gjennom fjernmåling i fremtidige modeller.

5.2.2 Brukertilpasning og økonomiske hensyn ved operasjonelt bruk

Modellen utviklet i denne studien gir ikke én universell løsning, men er et fleksibelt beslutningsverktøy hvor terskelverdien kan tilpasses den enkelte brukers operasjonelle og

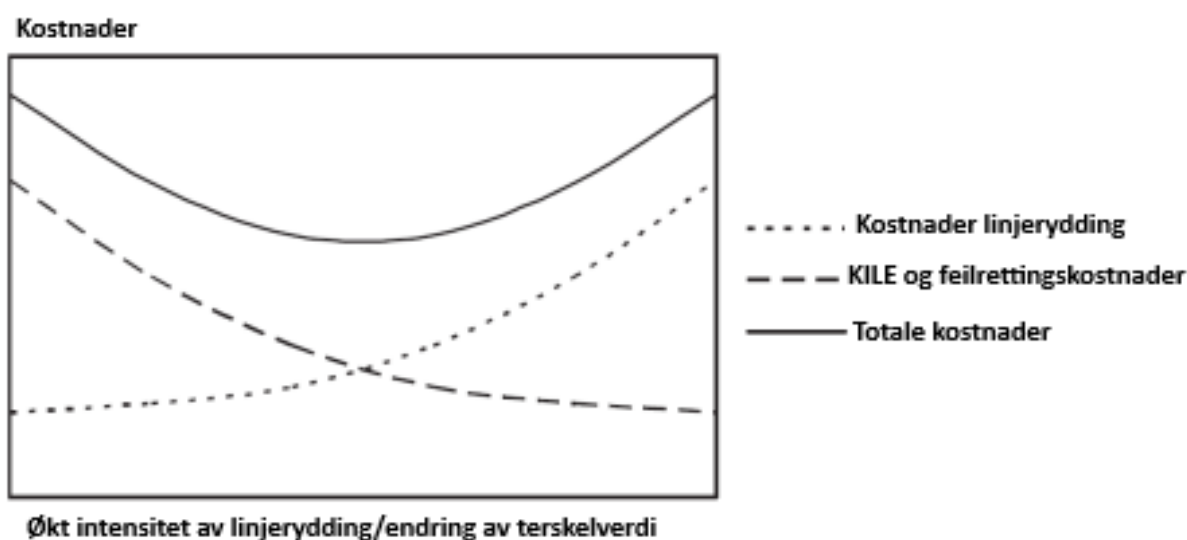
økonomiske situasjon. Hvorvidt modellen predikerer mange eller få risikotrær, og hvor presise disse prediksjonene er, vil avhenge av hvor terskelen settes. Dette gjør terskelverdien til et sentralt styringsverktøy, ikke bare et statistisk optimaliseringspunkt.

Ved terskel 0,6 i fjernmålingsmodellen ble kun seks trær klassifisert som risikotrær, hvorav fem hadde faktisk falt. Dette ga en NPV på 83 %, men lav spesifisitet og en balansert nøyaktighet på 53 %. Ved terskel 0,5 ble det identifisert betydelig flere trær, men NPV sank til 52,3 %. Dette viser at høyere terskler gir færre, men mer treffsikre prediksjoner, noe som er fordelaktig dersom ressurser for linjerydding er begrenset.

Dersom modellen ved terskel 0,5 eksempelvis predikerer 200 trær som risikotrær, og nettselskapet kun har kapasitet til å felle 10, vil om lag 47 % av disse kunne være unødvendige inngrep, fordi trærne i realiteten ville blitt stående (NPV 52,3 %). Dersom terskelen i stedet settes til 0,6, og modellen da kun predikerer 11 trær, kan nettselskapet gjennomføre tiltak med høyere treffsikkerhet (NPV 83 %), og med større trygghet for at ressursene rettes mot reelle risikotrær.

Denne fleksibiliteten gjør modellen nyttig i operasjonell sammenheng. Den gir nettselskapene mulighet til å vurdere treffsikkerhet opp mot kapasitet og konsekvens, og dermed justere terskelen basert på linjens kritikalitet, tilgjengelige budsjettmidler og ønsket risikoprofil. Modellen kan også brukes til å gruppere trær etter risikonivå, for eksempel lav, middels og høy, og prioritere tiltak der risikoen er størst. Trær nær samfunnskritiske funksjoner som nødetaer, sykehus, eller transformatorstasjoner kan vurderes med lavere terskelverdi for å sikre høy leveringssikkerhet, mens mer perifere områder kan håndteres mer konservativt.

Samtidig må terskelvalg ses i lys av kostnader. Som Figur 13 illustrerer, kan lav terskel føre til økte kostnader for linjerydding (flere trær klassifiseres som risikotrær), mens høy terskel kan medføre høyere kostnader knyttet til feilretting og KILE som følge av uidentifiserte risikotrær. Totale kostnader for nettselskapet kan derfor ha en U-format sammenheng med terskelverdien, hvor for lav eller for høy terskel gir høyere kostnader, mens et moderat nivå kan gi en balanse mellom forebygging og effektiv ressursbruk.



Figur 13. Illustrasjon av sammenheng mellom terskelverdi i modellen og kostnader knyttet til linjerydding og strømbrudd. X-aksen viser øktende intensitet av linjerydding som følge av reduserende terskelverdi i modellen. Y-aksen viser relative kostnader. Figuren illustrerer hvordan lav terskel gir høyere kostnader for linjerydding, men reduserer KILE- og feilrettingskostnader, mens høy terskel gir motsatt effekt. Den totale kostnaden følger en U-format kurve, med et minimum der balansen mellom forebygging og avbruddskostnader er optimal.

Disse økonomiske avveiningene underbygger at modellen ikke bør sees som en fasit, men som støtte for strategisk planlegging. Der dagens praksis ofte baserer seg på visuell vurdering og skjønn, metoder som kan være både ressurskrevende og lite objektive, representerer modellen et alternativ med bedre skalerbarhet, struktur og dokumenterbarhet. Ved å bruke terskelverdien aktivt som en beslutningsparameter, kan nettselskapene ta mer informerte valg og oppnå både bedre forsyningssikkerhet og mer målrettet bruk av egne ressurser.

Det er også viktig å understreke at modellen ikke er en fullstendig gjengivelse av virkeligheten. Ved bruk i nye områder eller ved skalering til større geografiske utstrekninger, kan nøyaktigheten avta. Derfor vil skogfaglig kompetanse være avgjørende for å tolke modellens resultater korrekt og ta informerte beslutninger om tiltak. Historisk har det blitt gjort lite linjerydding utenfor ryddebeltet (Trømborg et al., 2012), ofte som følge av manglende verktøy og kompetanse til å identifisere risikotrær. Modellen kan bidra til å strukturere og målrette denne innsatsen, men bør alltid brukes som et supplement til faglig skjønn og lokalkunnskap.

5.2.2.1 Simulering av hogst og konsekvenser for nabotrær

Et mulig bruksområde for modellen er å simulere hvordan felling av et tre påvirker stabiliteten til trærne i nærheten. I dag mangler mange nettselskap et verktøy for å vurdere slike sekundære effekter, altså risikoen for at gjenstående trær blir mer utsatt etter felling av nabotrær.

En mulig tilnærming kan være å bruke modellen iterativt: Først identifiseres trær med høy sannsynlighet for å falle, deretter fjernes disse virtuelt fra datagrunnlaget, og deretter kjøre modellen på nytt. Ved å sammenligne endringen i sannsynlighet for nabotrær før og etter simulert hogst, kan det gi innsikt i om enkelte trær får økt sannsynlighet for trefall på grunn av redusert skjerming.

Dette er særlig relevant i tette bestand med høy sosial stabilitet, eller hvor et enkelt tre kan ha fungert som fysisk barriere mot vind for et nabotre. Ved å simulere konsekvensene av hogst kan det dermed tas mer informerte beslutninger, og eventuelt identifisere behov for tiltak som kantstabilisering eller ytterligere hogst i omkringliggende områder for å unngå redusert stabilitet for gjenstående trær.

For at slike simuleringer skal gi meningsfulle resultater, forutsettes det at modellen er sensitiv for endringer i skogstrukturen. Det innebærer at variabler som høydedifferanse, z-score og vindeksponeringsfaktor må oppdateres i tråd med endringer i skogbildet. Dette representerer et mulig utviklingsområde, og kan gjøre modellen til et mer dynamisk og beslutningsorientert verktøy.

Ved å utvide modellen med slik funksjonalitet, kan man i større grad vurdere konsekvensene av tiltak, og dermed unngå unødvendig destabilisering av gjenstående trær. Dette vil styrke modellens praktiske nytte og støtte en mer helhetlig og risikobasert tilnærming til skogforvaltning langs strømnettet.

5.3 Vurdering av materiale og metode

5.3.1 Databalanse og bruk av syntetisk oversampling

Siden studien er basert på et relativt begrenset og ubalansert datasett, med 78 falne trær og 144 stående kontrolltrær (totalt 222 observasjoner), oppstår det en risiko for overtilpasning og redusert generaliserbarhet. Et såpass begrenset utvalg gjør modellen sårbar for tilfeldige mønstre i dataene, og kan svekke overførbarheten til andre geografiske områder eller stormhendelser.

For å redusere skjevheten mellom klassene ble SMOTE benyttet. SMOTE balanserer treningsgrunnlaget ved å generere syntetiske observasjoner i minoritetsklassen, noe som bidro til å forbedre modellens ytelse betraktelig. Uten SMOTE oppnådde fjernmålingsmodellen kun 53 % balansert nøyaktighet og en kappa-verdi på 0,0675, mens den med SMOTE oppnådde 68,5 % balansert nøyaktighet og kappa 0,3388. Dette viser tydelig at SMOTE var et korrekt og effektivt metodisk valg i denne studien.

Samtidig innebærer syntetisk utvidelse av datasettet en risiko for overtilpasning, da de syntetiske punktene er basert på mønstre i et begrenset datagrunnlag. Forskning har vist at SMOTE gir bedre resultater jo flere reelle observasjoner som finnes i minoritetsklassen (Elreedy & Atiya, 2019). Dette understreker behovet for systematisk dokumentering av trefall, slik at modellen kan trenes på et bredere og mer representativt datagrunnlag.

5.3.2 Utvalg og vurdering av kontrolltrær og feltmålinger

Kontrolltrær ble valgt etter en systematisk metode for å sikre konsistens i datagrunnlaget. Plasseringen tok utgangspunkt i en fast avstand fra trefallspunktet langs linjetraséen, noe som bidro til å redusere seleksjonsbias. I praksis oppsto det enkelte avvik grunnet terrengmessige forhold, og kontrolltrærne ble ikke selektert etter spesifikke egenskaper som treslag eller høyde. Dette kan ha introdusert variasjon som ikke nødvendigvis er relatert til risiko, og i fremtidige studier kan det vurderes å bruke kontrolltrær med lignende egenskaper som trær som falt for å isolere betydningen av enkelte faktorer som eksempelvis rotforhold og vindeksponering.

Feltregistreringene inkluderte treslag, DBH og jorddybde foran og bak treet. DBH ble vanligvis målt med klave vinkelrett på linja, men i tilfeller der falte trær var fjernet, ble diameteren estimert basert på stubbehøyde og sammenligning med nærliggende trær. Dette introduserer en viss usikkerhet, spesielt ved beregning av D/H-forholdet, som brukes i referansemodellen. Jorddybde ble registrert som et viktig mål på rotforankring, og selv om punktmålinger ikke fullt ut beskriver rotsystemets kompleksitet, gir de et representativt bilde av jordforholdene i rotsonen.

Jorddybde ble registrert som et viktig mål på rotforankring. Selv om punktmålinger ikke fullt ut fanger kompleksiteten i et rotsystem, gir de et representativt bilde av jordforholdene i rotsonen. Fjernmålte terrengvariabler som ujevnheter og helning (jf. kapittel 5.1.1) viste moderat negativ korrelasjon ($\sim -0,4$) med feltmålt jorddybde. Dette indikerer at slike variabler kan fungere som indirekte indikatorer på grunn jord og svak rotforankring.

Funnene tyder på at metodikken har potensial. Videre utvikling, for eksempel med bruk av georadar eller elektrisk resistivitet i komplekst terreng, kan forbedre samsvaret mellom feltmålinger og fjernmålte overflatevariabler. Siden jorddybde fremstod som en av de mest forklarende variablene i modellen, bør forbedringer i målemetodikk og prediksjon av denne variabelen prioriteres i fremtidig forskning.

5.3.3 Modellvalg og maskinlæringsmetode

I denne studien presterte XGBoost best sammenlignet med logistisk regresjon, SVM og Random Forest, og ga den høyeste klassifiseringsnøyaktigheten. Resultatene viser at XGBoost håndterer datasettet godt, og særlig evnen til å identifisere ikke-lineære relasjoner og samspill mellom variabler virker sentral for modellens ytelse. Dette støttes også av flere tidligere studier innen miljø- og fjernmålingsbasert klassifisering, hvor XGBoost ofte fremheves for sin presisjon (Ramdani & Furqon, 2022; Sahin, 2020; Shao et al., 2024; Wu et al., 2024; Zamani Joharestani et al., 2019).

Samtidig er det mulig at modellen ikke fullt ut utnyttet potensialet i XGBoost-algoritmen. I denne studien ble det brukt et sett med standard hyperparametere og begrenset justering. Mer omfattende tuning, bruk av automatisert hyperparameteroptimalisering, eller ensembletilnærminger kunne potensielt gi ytterligere forbedring i prediksjonsevne. Dette er særlig relevant i komplekse datasett, hvor interaksjoner mellom variabler kan ha stor betydning.

Selv om det i denne studien ikke var indikasjoner på at XGBoost var et dårlig valg, bør fremtidige studier vurdere en grundigere utforskning av alternative modeller og optimalisering av parametere. Det vil kunne bidra til å avdekke om det finnes metoder eller kombinasjoner som gir enda bedre ytelse eller bedre overførbarhet til andre områder og stormhendelser.

5.3.4 Kvalitet og begrensninger i lidar-data

En gjennomgang av punktskyen viste at det i enkelte områder, til tross for høy rapportert punktetthet, var relativt få bakketreff og til dels feilaktig klassifisering av terrenget. Spesielt ble store steiner og blokker feilaktig tolket som lav vegetasjon, og dermed ekskludert fra terrengmodellen. Dette kan ha påvirket beregningene av variabler som ujevnhet, IQR, helning og høydevariasjon, og dermed introdusert systematisk skjevheter i analysene. Slike feil kan svekke modellens presisjon, særlig i tilfeller der små terrengvariasjoner kan ha stor betydning for resultatene.

Selv om leverandør av lidar-dataene oppga en punktetthet på 250 pkt/m², viste analysene at faktisk punktetthet varierte betydelig, og i gjennomsnitt lå nærmere 40 pkt/m². I tett skog er dette ofte tilstrekkelig for mange typer analyser, men det kan være utilstrekkelig for nøyaktig terrengkartlegging i bratte og ujevne områder der mange bakketreff er avgjørende for å avdekke detaljer i terrengstrukturen.

En mulig løsning kan være bruk av full-waveform lidar, som har vist seg å gi høyere andel bakketreff i tett vegetasjon og bedre skille mellom vegetasjon og terreng (Clément & Frédéric, 2009). Bedre terrengmodeller kan gi mer presise estimater av terrengegenskaper og dermed forbedre modellens prediksjonsevne.

Siden jorddybde og terrengstruktur var viktige forklaringsvariabler i denne studien, bør datakvalitet og klassifiseringsnøyaktighet prioriteres i videre arbeid.

5.3.4.1 Sensoreffekter og modellens robusthet ved skalering

En potensiell utfordring ved operasjonalisering og skalering av modellen er variasjon i kvalitet og egenskaper mellom ulike lidar-sensorer og skanningsmetoder. I denne studien ble det benyttet data fra flere relativt korte droneflyvninger, noe som kan forklare variasjonen i punktetthet og klassifiseringsnøyaktighet. Slike variasjoner kan påvirke både høydennøyaktighet, intensitetsdata og synligheten av trær i undervegetasjonen, noe som videre kan påvirke modellens prediksjoner.

I en operativ sammenheng, der data samles inn over tid og fra ulike leverandører, vil det være en risiko for systematiske avvik som følge av ulik sensortype, flyhøyde, skannevinkel, kalibrering og etterbehandling. Flere studier har vist at lidar-data kan bli påvirket av slike faktorer. Eksempelvis påpeker Prieur et al. (2021) at ulikheter i returfordeling og intensitetsmåling mellom multispektrale og single-photon lidar-systemer kan gi systematiske forskjeller i klassifiseringsnøyaktighet, selv ved bruk av samme metode. Tilsvarende viser Korpela et al. (2010) at intensitetsdata påvirkes av en rekke sensor- og miljøfaktorer, inkludert flyhøyde og sensorinnstillinger, og at intensitetsbasert treslagsklassifisering derfor kan gi varierende resultater mellom sensorer.

En ytterligere komplikasjon er at mange sensoregenskaper holdes tilbake av produsenter av forretningshensyn, og at sensorers karakteristikk kan endre seg etter service eller oppdateringer. Dette gjør det krevende å oppdage og kompensere for sensoreffekter, og understreker behovet for modeller som er robuste mot slike variasjoner.

En mulig løsning er å utvikle modeller som er sensor- og plattformagnostiske, for eksempel ved bruk av dyplæringsmetoder som trenes på data fra ulike sensorer og med ulik punkttetthet. Dette har blitt demonstrert i studien *SegmentAnyTree* av Wielgosz et al. (2024), der en 3D dyplæringsmodell ble trent på drone- og bakke-data, inkludert syntetisk nedskalerte punktskyer som simulerte ALS-forhold. Modellen viste høy overførbarhet til nye datasett uten behov for spesifikke tilpasninger.

Andre strategier kan inkludere oppbygging av større og mer varierte treningsdatasett med lidar-data fra ulike sensorer, plattformer og skogstyper. Dette er imidlertid ikke uten utfordringer. Modellen utviklet i denne studien baserer seg på treningsdata fra faktiske trefall, der lidar-data ble samlet inn før stormhendelsen inntraff. For at dette skal være mulig i stor skala, forutsetter det at nettselskapene både gjennomfører regelmessige skanninger av linjenettet og har gode rutiner for presis kartfesting og dokumentasjon av trefallhendelser. Uten slike rutiner vil det være vanskelig å bygge opp robuste treningssett over tid, noe som i sin tur kan svekke modellens generaliseringsevne.

Kalibreringsprosedyrer basert på faste referanseobjekter i felt, som stolper eller master, kan også være et nyttig tillegg for å identifisere og justere for systematiske avvik mellom skanninger. Selv om dette er lite beskrevet i litteraturen, kan det være et praktisk verktøy i operativ drift for å kvalitetssikre datagrunnlaget over tid.

5.3.5 Fravær av meteorologiske data

En viktig begrensning ved denne studien er fraværet av meteorologiske data som vindstyrke, vindretning, nedbørsmengde og jordfuktighet under stormen *Babet*. Modellens prediksjoner er dermed utelukkende basert på strukturelle og miljømessige forhold ved enkeltreet, bestandet og terrenget, ikke på selve stormhendelsen som forårsaket trefallene. I praksis innebærer dette at modellen predikerer et træs predisposisjon for å falle, snarere enn å predikere faktiske utfall under én konkret storm.

Inkludering av meteorologiske data ble vurdert, men ble ansett som metodisk utfordrende. Værdata fra tilgjengelige stasjoner i Agder har lav geografisk oppløsning og gir ikke tilstrekkelig detalj for å modellere vindforhold ved hvert enkelt tre. I et topografisk komplekst landskap, som i store deler av Agder, kan vindretning og vindstyrke variere betydelig på kort avstand. Uten svært høyoppløselige og stedsspesifikke data, eller avanserte vindmodeller, ville inkludering av slike variabler kunne introdusert betydelig usikkerhet. Derfor ble det valgt å ekskludere meteorologiske data fra modellen.

Samtidig kan dette tolkes som et metodisk valg. Ved å utelate informasjon om selve stormhendelsen, fokuserer modellen på å identifisere trær med lav stormstabilitet basert på strukturelle og miljømessige forhold, uavhengig av en spesifikk stormhendelse. Dette gir modellen potensial for mer generalisert bruk, og gjør den egnet som beslutningsverktøy i forkant av framtidige ekstremvær, ikke bare som en beskrivelse av hva som skjedde under stormen *Babet*.

Hadde meteorologiske data blitt inkludert, kunne modellen kanskje blitt mer presis for akkurat denne hendelsen, men samtidig mindre overførbart til nye situasjoner. I tillegg ville usikkerheten

knyttet til lokal variasjon i vindretning og -styrke, samt manglende dekning fra værstasjoner, kunne svekket nøyaktigheten og tolkbarheten. På denne bakgrunn kan fraværet av slike data vurderes som et bidrag til økt generaliserbarhet og robusthet i en operativ sammenheng.

5.4 Forslag til videre arbeid

Resultatene fra denne studien viser at det er mulig å predikere sannsynligheten for trefall basert på fjernmålingsdata, men peker også på flere forbedringsmuligheter. Videre forskning kan bidra til å styrke modellens nøyaktighet, gjøre den mer robust for bruk i ulike geografiske områder og tilrettelegge for praktisk bruk i nettselskapenes drift.

De følgende delkapitlene skisserer relevante utviklingsområder knyttet til datagrunnlag, modellstruktur og bruk av nye datatyper.

5.4.1 Utvidelse og forbedring av datagrunnlaget

Et viktig forbedringspunkt er å utvide og styrke datagrunnlaget. Studien bygger på et relativt lite og geografisk avgrenset utvalg ($N = 222$), og det er spesielt få observasjoner av trær som faktisk har falt. Dette begrenser modellens generaliserbarhet til andre områder og stormhendelser.

Et sentralt tiltak er derfor å etablere rutiner for systematisk kartfesting av trefall etter fremtidige stormer og trefall langs strømmettet. Slike data bør dokumentere treslag, posisjon, fallretning, lokale jord- og terrengforhold og helsetilstand der det er mulig. Jo flere og mer varierte data, jo bedre kan modellen trenes til å gjenkjenne ulike risikofaktorer.

Et langsiktig mål bør være å integrere modellen som en del av nettselskapenes beredskap og planleggingsverktøy. Dette forutsetter at modellen kan leveres i praktisk format (f.eks. i GIS-format), at terskelverdien enkelt kan tilpasses ulike risikoprofiler, og at systemet er brukervennlig. En naturlig første fase er pilottesting, hvor man evaluerer samsvaret mellom modellens prediksjoner og faktiske trefall etter nye stormer og trefall.

På sikt kan modellen brukes som en del av en iterativ forbedringsprosess: prediksjon → tiltak → observasjon → justering. Et slikt rammeverk vil bidra til kontinuerlig forbedring av modellen og styrke beslutningsgrunnlaget for forebyggende tiltak. Samtidig må modellen alltid brukes i kombinasjon med skogfaglig kompetanse og lokalkunnskap, modellen er et støttesystem, ikke en erstatning for faglig skjønn.

5.4.2 Videreutvikling av modell og maskinlæringsalgoritmer

Et utviklingsområde fremover er å teste alternative klassifikasjonsmetoder og ensemblemodeller for å vurdere om modellens ytelse kan forbedres ytterligere. Selv om XGBoost fungerte godt i denne studien, kan andre metoder, som Random Forest, LightGBM eller nevralt nettverk, vise seg å gi bedre presisjon eller bedre håndtere ulike typer data.

I tillegg bør det vurderes om justering av hyperparametere eller bruk av automatisert modelloptimalisering (f.eks. grid search eller Bayesian optimization) kan bidra til bedre ytelse.

Praktisk testing av modellen i større områder og over tid er allerede omtalt i kapittel 5.4.1, men det vil også være sentralt for å validere hvilke algoritmer som faktisk fungerer best i operative settinger.

5.4.3 Forbedring og utvidelse av dataanalyser

5.4.3.1 Vindmodellering

Et konkret utviklingspotensial ligger i å forbedre hvordan vindeksponering beregnes. I denne studien ble det brukt en enkel eksponeringsfaktor basert på trehøyde, avstand til- og størrelse på åpne områder. Fremtidige studier kan vurdere mer avanserte modeller som GALES og HWIND, som estimerer kritisk vindstyrke basert på mekaniske egenskaper, bestandsstruktur og jordforhold (Gardiner et al., 2000; Peltola et al., 1999). Slike modeller kan potensielt gi en mer presis vurdering av vindrisiko og potensielt forbedre modellens nøyaktighet.

5.4.3.2 Predikering av DBH med fjernmåling

Videre kan et mulig forbedringspunkt være å teste hvorvidt predikert DBH og D/H-forhold kan forbedre modellens ytelse. Dette er spesielt relevant for skalering og operativ bruk av modellen, hvor innsamling av feltdata ikke er praktisk gjennomførbart. Selv om predikert DBH ikke er like presist som feltmålinger, kan det kanskje gi modellen mer informasjon som kan bidra til bedre nøyaktighet.

5.4.3.3 Stammedeteksjon og helningsanalyse

En mulig videreutvikling av modellen er å segmentere ut treets stamme og vurdere stammens form og orientering i forhold til strømlinja. Dette ble ikke gjort i denne studien, men det representerer et interessant moment som mulig kan forbedre modellens nøyaktighet.

Forskning har vist at det er mulig å identifisere og modellere trestammer ved bruk av lidar-data med høy punkttetthet. Flere metoder er utarbeidet for dette formålet, både basert på tradisjonell segmentering og tilnærminger med bruk av maskinlæring og dyplæring. Blant annet har Reitberger et al (2007), Kuželka et al. (2020) og Windrim & Bryson (2020) presentert metoder for stammedeteksjon og modellering ved bruk av flybåren og drone laserskanner med høy punkttetthet, som kan brukes til å måle stammens form og helning med god nøyaktighet.

Inkludering av slik informasjon i fremtidige modeller vil kunne bidra til en mer presis og operativ risikovurdering. Dersom stammens helningsretning kan estimeres, gir det et direkte mål på hvilken vei treet krever minst vindbelastning før rotvelt. Trær som heller mot strømlinja utgjør naturlig nok en høyere risiko enn trær som heller bort fra den gitt lik rotforankring. Ved å kombinere helningsanalyse i modellen, kan det utvikles en mer helhetlig vurdering av risiko for hvert enkelt tre. Dette vil øke modellens nytteverdi for nettselskaper som ønsker å prioritere sikringshogst mer målrettet og effektivt.

5.4.3.4 Datakvalitet og full-waveform lidar

Som nevnt tidligere (kapittel 5.4.4), er klassifiseringsfeil i lidar-data en mulig feilkilde. Full-waveform lidar har vist seg å gi høyere andel bakketreff og bedre terrengmodellering, spesielt i tett vegetasjon (Clément & Frédéric, 2009). Fremtidig arbeid bør vurdere å teste slike datasett, særlig for forbedret beregning av terrengvariabler som ujevnheter og helning.

5.4.3.5 Bruk av multi- eller hyperspektrale data

Som tidligere nevnt har ulike treslag generelt sett ulike stormstabilitet, gitt like jord og terrengforhold som følge av forskjeller i rotsystemets struktur og dybde. Dersom treslag kan identifiseres med fjernmåling åpner det for å inkludere treslag som en mulig variabel i modellen. Dette kan være aktuelt i områder hvor treslagssammensetningen er varierende, der enkelte treslag kan ansees som å ha høyere risiko for vindfall.

Tidligere forskning har vist at treslag kan klassifiseres med relativt høy nøyaktighet ved bruk av multi- eller hyperspektrale data. Miyoshi et al. (2020) oppnådde gode resultater ved bruk av hyperspektrale bilder til å identifisere treslag i komplekse skogbilder i Sør-Amerika. I en annenstudie undersøkte Yu et al. (2017) bruken av multispektrale lidardata til treslagsklassifisering i skoger i Finland dominert av gran, furu og bjørk. De oppnådde en nøyaktighet på 76 % ved bruk av lidar alene og 85,9 % når multispektrale data ble kombinert med lidar. Likevel påpeker de utfordringer med å identifisere mindre trær som skjules under trekronene til dominerende trær.

En annen mulig utnyttelse av slike data er å fange opp tegn på råte, tørkestress eller døde trær. Slike egenskaper svekker rotforankringen eller kan redusere treets bøyefasthet som kan øke risikoen for stammebrekk eller rotvelt. Allen et al. (2022a) undersøkte bruken av hyperspektrale data for å identifisere råte i gran i Norge, og oppnådde moderat klassifiseringsnøyaktighet på 64 %. I en oppfølgende studie (Allen et al., 2022b) ble nøyaktigheten forbedret til 76 %, men forskerne peker fremdeles på behovet for videre utvikling før metodene kan tas i bruk i praksis.

Samlet peker disse studiene på at bruken av multi- eller hyperspektrale data i kombinasjon med lidar kan være en lovende tilnærming for å forbedre fremtidige modeller for predikering av risikotrær. Disse datatypene kan gi ytterligere informasjon om treslag og treets helsetilstand, noe som ikke inngår i modellen presentert i denne studien.

5.5 Anbefaling for identifisering av risikotrær

Funnene fra denne studien viser at risikoen for trefall ikke kan vurderes ut fra én enkeltfaktor alene. Dagens retningslinjer, slik de for eksempel er formulert i REN-veilederen (2024), legger mest vekt på enkeltmål som D/H-forhold og avstand til linja. Denne studien viser at slike mål har begrenset forklaringskraft isolert sett, og at risiko for trefall i stor grad er et resultat av samvirkende forhold.

Basert på analysene i denne studien foreslås derfor en oppdatert tilnærming til risikovurdering. Nedenfor presenteres en oversikt over faktorer som, enten alene eller i kombinasjon, øker sannsynligheten for trefall. Oversikten kan brukes som støtteverktøy i planlegging av tiltak, og kan danne et utgangspunkt for mer treffsikker identifisering av risikotrær.

Egenskaper som kjennetegner trær med økt risiko for trefall:

- 1. Svekket rotforankring**
 - Grunn jord, særlig på baksiden av treet (i vindretning)
 - Terrenghindringer som fjell, stein eller skrenter som hemmer rotutvikling
 - Ujevn overflatestruktur i rotsonen (f.eks. stor høydevariasjon, helning, ujevnhet eller interkvartilavstand)
- 2. Dominerende trær i ujevn bestand**
 - Treet er betydelig høyere enn nabotrær (høy z-score eller høydeforskjell)
 - Treet står i bestand med stor intern høydevariasjon
- 3. Høy vindeksponering**
 - Plassering nær større åpninger eller hogstflater
 - Manglende skjerming fra nabotrær
 - Høy trehøyde kombinert med kort avstand til eksponerte områder
- 4. Treslag og vekstforhold**

- Selv normalt stormstabile treslag som furu og eik kan være utsatt under ekstreme værforhold eller ved ugunstige jord- og terrengforhold
- Kombinasjonen av høy eksponering og dårlig rotforankring ser ut til å være kritisk uavhengig av treslag

5. Strukturelle skader og svekkelser

- Råte, tørkestress og mekaniske skader reduserer stormstabiliteten betydelig
- Slike forhold ble ikke dokumentert i denne studien, men er godt etablert i tidligere forskning og bør inngå i fremtidige vurderinger der informasjonen er tilgjengelig

Denne oversikten viser at ingen enkeltfaktor alene gir tilstrekkelig grunnlag for å vurdere risiko for trefall. Trær med tilsynelatende lav risikoprofil basert på én variabel kan likevel være utsatt dersom andre forhold, som dårlig rotforankring eller høy eksponering, er til stede. En helhetlig og sammensatt vurdering som kombinerer flere indikatorer, vil gi bedre beslutningsgrunnlag. Ved å benytte slike vurderinger operativt, kan nettselskapene gjennomføre mer målrettede og kostnadseffektive tiltak for å sikre strømnettet mot stormrelatert trefall.

Kapittel 6 Konklusjon

Denne studien har vist at det er mulig å utvikle en prediktiv modell som estimerer sannsynligheten for trefall på enkelttreenivå ved hjelp av lidar-data og maskinlæring. Basert på data fra stormen *Babet* i 2023, identifiserte analysene klare strukturelle og terrengmessige forskjeller mellom trær som falt og trær som ble stående. Viktige forklaringsvariabler inkluderte høydeforskjell mot nabotrær, vindeksponering, svekket rotforankring og redusert jorddybde bak treet (i vindretningen).

Modellen oppnådde en balansert nøyaktighet på 74,3 % med kombinerte felt- og fjernmålingsdata, og 68,5 % med kun fjernmålte variabler. Kappa-verdien (0,48 for referansemodellen og ~0,34 for fjernmålingsmodellen) viser at modellen har et moderat samsvar med observerte data, klart bedre enn tilfeldig klassifikasjon. Dette viser at modellen har potensial som et effektivt og skalerbart verktøy, også uten ressurskrevende feltarbeid.

Et viktig funn er at modellens praktiske nytteverdi er svært sensitiv for valg av terskelverdi. Små justeringer i terskel kan gi store utslag i balansen mellom hvor mange risikotrær som identifiseres, og hvor stor andel av de predikerte risikotrærne som faktisk utgjør en risiko. Ved høy terskelverdi (f.eks. 0,6) oppnådde fjernmålingsmodellen høy negativ prediktiv verdi (NPV 83 %), noe som gir stor sikkerhet i identifiseringen av faktiske risikotrær, men til gjengjeld identifiseres færre risikotrær totalt. Ved lavere terskel (f.eks. 0,5) fanges flere potensielle risikotrær opp, men med lavere sikkerhet (NPV 52 %), noe som kan føre til flere unødvendige tiltak. Dette understreker viktigheten av å tilpasse terskelverdien til nettselskapets risikoprofil, kapasitet og prioriteringer.

Videre peker studien på svakheter ved dagens praksis for vurdering av risikotrær, som ofte baseres på enkle faktorer som D/H-forhold og avstand til linja. Ved å analysere både trærnes egenskaper og omgivelser i større detalj, gir modellen et mer nyansert bilde av hvilke trær som faktisk utgjør en risiko. Modellen kan dermed fungere som beslutningsstøtte for nettselskapene i arbeidet med sikringshogst og risikobasert vegetasjonsforvaltning.

Selv om studien er basert på et begrenset datagrunnlag og én enkelt stormhendelse, gir den et bidrag til utviklingen av prediktive modeller for å identifisere risikotrær langs strømnettet. Metodikken kan videreutvikles med større datasett, lengre tidsserier og flere stormhendelser. På sikt kan dette bidra til færre strømbrydd, lavere kostnader og en mer robust infrastruktur i møte med klimaendringer og mer ekstremvær i årene som kommer.

Erklæring

Kunstig intelligens (KI) gjennom OpenAIs ChatGPT ble brukt som støtteverktøy gjennom skrive- og analyseprosessen. Bruken omfattet feilsøking av kode i R Studio, forklaring av statistiske konsepter og rettskriving. KI har ikke produsert innhold automatisk, og alle faglige beslutninger og analyser er basert på egen vurdering.

Referanser

- Allen, B., Dalponte, M., Hietala, A., Ørka, H., Næsset, E. & Gobakken, T. (2022a). Detection of Root, Butt, and Stem Rot presence in Norway spruce with hyperspectral imagery. *Silva Fennica*, 56 (2). doi: 10.14214/sf.10606.
- Allen, B., Dalponte, M., Ørka, H. O., Næsset, E., Puliti, S., Astrup, R. & Gobakken, T. (2022b). UAV-Based Hyperspectral Imagery for Detection of Root, Butt, and Stem Rot in Norway Spruce. *Remote Sensing*, 14 (15): 3830.
- Barry, G., Rike, L., Marc, H., Benjamin, S., Frederick, B., Sonja, S., Annett, F. & Uwe, U. (2024). Predicting the risk of tree fall onto railway lines. *Forest Ecology and Management*, 553: 121614. doi: 10.1016/j.foreco.2023.121614.
- bioøkonomi, N. i. f. (2019). Markfuktighet - DTW. I: *Norsk institutt for bioøkonomi*. Tilgjengelig fra: <https://kartkatalog.geonorge.no/metadata/markfuktighet-dtw/e8d01d77-af2a-431c-9fa5-5894b7a40074> (lest 01.01.2025).
- bioøkonomi, N. i. f. (2021). *Skogen i Norge*. skogbruk.nibio.no. Tilgjengelig fra: <https://www.skogbruk.nibio.no/skogen-i-norge#:~:text=Skog%20og%20annet%20trebevokst%20areal%20utgj%C3%B8r%20om%20lag%2014%20millioner,trevirke%20per%20hektar%20per%20%C3%A5r>. (lest 05.03).
- bioøkonomi, N. i. f. (2023). Skogressurskart (SR16). I: *Norsk institutt for bioøkonomi*. Tilgjengelig fra: <https://kartkatalog.geonorge.no/metadata/sr16-skogressurskart-16x16-meter-vektor/27206b9e-4830-4f71-810d-d04c0dc32b59> (lest 01.01.2025).
- Blennow, K. & Olofsson, E. (2008). The probability of wind damage in forestry under a changed wind climate. *Climatic Change*, 87 (3): 347-360.
- Chawla, N. V., Bowyer, K. W., Hall, L. O. & Kegelmeyer, W. P. (2002). SMOTE: synthetic minority over-sampling technique. *Journal of artificial intelligence research*, 16: 321-357.
- Chen, T. & Guestrin, C. (2016). Xgboost: A scalable tree boosting system. I: *Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining*, s. 785-794: Association for Computing Machinery.
- Clément, M. & Frédéric, B. (2009). Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64 (1): 1-16. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2008.09.007.
- Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and psychological measurement*, 20 (1): 37-46. doi: 10.1177/001316446002000104.
- Coutts, M. (1983). Root architecture and tree stability. I: *Tree Root Systems and Their Mycorrhizas*, s. 171-188. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Coutts, M. (1986). Components of tree stability in Sitka spruce on peaty gley soil. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 59 (2): 173-197. doi: 10.1093/forestry/59.2.173.
- Coutts, M. P., Nielsen, C. C. N. & Nicoll, B. C. (1999). The development of symmetry, rigidity and anchorage in the structural root system of conifers. *Plant and Soil*, 217 (1): 1-15. doi: 10.1023/A:1004578032481.
- Cremer, K., Borough, C., McKinnell, F. & Carter, P. (1982). Effects of stocking and thinning on wind damage in plantations. *New Zealand journal of forestry science*, 12 (2): 244-268.
- Dalponte, M. & Coomes, D. A. (2016). Tree-centric mapping of forest carbon density from airborne laser scanning and hyperspectral data. *Methods in ecology and evolution*, 7 (10): 1236-1245. doi: 10.1111/2041-210X.12575.
- Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap. (2016). *Samfunnets kritiske funksjoner*, DSB Rapport kiks-2: Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB).
- el-tilsynsloven. (1929). *Lov om tilsyn med elektriske anlegg og elektrisk utstyr*, LOV-2024-06-21-48.

- Elreedy, D. & Atiya, A. F. (2019). A comprehensive analysis of synthetic minority oversampling technique (SMOTE) for handling class imbalance. *Information Sciences*, 505: 32-64.
- energiloven. (1990). *Lov om produksjon, omforming, overføring, omsetning, fordeling og bruk av energi m.m.*, LOV-2024-06-14-32.
- Faugli, P. E. (2020). *Elektrisitetens forvaltningshistorie 1877-1921*. NVE Rapport nr. 12/2020, NVE Rapport 12/2020.
- Forskrift om elektriske forsyningsanlegg. (2006). *Forskrift om elektriske forsyningsanlegg*: Lovdata.
- Forskrift om leveringskvalitet i kraftsystemet. (2007). *Forskrift om leveringskvalitet i kraftsystemet*: Lovdata.
- Gardiner, B., Peltola, H. & Kellomäki, S. (2000). Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees. *Ecological Modelling*, 129: 1-23. doi: 10.1016/S0304-3800(00)00220-9.
- Gardiner, B., Byrne, K., Hale, S., Kamimura, K., Mitchell, S. J., Peltola, H. & Ruel, J.-C. (2008). A review of mechanistic modelling of wind damage risk to forests. *Forestry*, 81 (3): 447-463. doi: 10.1093/forestry/cpn022.
- Glitre Nett. (2023). *Krevende feilretting etter uværet på Agder*: Glitre Nett. Tilgjengelig fra: <https://www.glitrenett.no/aktuelt/krevende-feilretting-etter-uvaeret-pa-agder> (lest 28.03).
- Gullick, D., Blackburn, G. A., Whyatt, J. D., Vopenka, P., Murray, J. & Abbatt, J. (2019). Tree risk evaluation environment for failure and limb loss (TREEFALL): An integrated model for quantifying the risk of tree failure from local to regional scales. *Computers, Environment and Urban Systems*, 75: 217-228. doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2019.02.001.
- IPCC, I. P. o. C. C. (2023). Summary for policymakers. I: *Climate change 2021 – The physical science basis: Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, s. 3-32: Cambridge University Press.
- Kalliokoski, T., Nygren, P. & Sievänen, R. (2008). Coarse root architecture of three boreal tree species growing in mixed stands. *Silva Fennica*, 42 (2).
- Korpela, I., Ørka, H. O., Maltamo, M., Tokola, T. & Hyypä, J. (2010). Tree species classification using airborne LiDAR-effects of stand and tree parameters, downsizing of training set, intensity normalization, and sensor type. *Silva Fennica*, 44 (2): 319-339.
- Kuželka, K., Slavík, M. & Surový, P. (2020). Very High Density Point Clouds from UAV Laser Scanning for Automatic Tree Stem Detection and Direct Diameter Measurement. *Remote Sensing*, 12 (8): 1236.
- Magnussen, S., Næsset, E. & Gobakken, T. (2010). Reliability of LiDAR derived predictors of forest inventory attributes: A case study with Norway spruce. *Remote Sensing of Environment*, 114 (4): 700-712.
- Miyoshi, G. T., Arruda, M. d. S., Osco, L. P., Marcato Junior, J., Gonçalves, D. N., Imai, N. N., Tommaselli, A. M. G., Honkavaara, E. & Gonçalves, W. N. (2020). A Novel Deep Learning Method to Identify Single Tree Species in UAV-Based Hyperspectral Images. *Remote Sensing*, 12 (8): 1294.
- Monaghan, T. F., Rahman, S. N., Agudelo, C. W., Wein, A. J., Lazar, J. M., Everaert, K. & Dmochowski, R. R. (2021). Foundational statistical principles in medical research: sensitivity, specificity, positive predictive value, and negative predictive value. *Medicina*, 57 (5): 503.
- Moore, G. (2014). Wind-thrown trees: storms or management? *Arboriculture & Urban Forestry (AUF)*, 40 (2): 53-69.
- Murcia, C. (1995). Edge effects in fragmented forests: implications for conservation. *Trends in ecology & evolution*, 10 (2): 58-62.
- Norges geologiske undersøkelse. (2024). Løsmasser. I: *Norges geologiske undersøkelse (NGU)*. Tilgjengelig fra: <https://kartkatalog.geonorge.no/metadata/loesmasser/3de4ddf6-d6b8-4398-8222-f5c47791a757> (lest 01.01.2025).

- Nicoll, B. C. & Ray, D. (1996). Adaptive growth of tree root systems in response to wind action and site conditions. *Tree Physiology*, 16 (11-12): 891-898. doi: 10.1093/treephys/16.11-12.891.
- Nicoll, B. C., Achim, A., Mochan, S. & Gardiner, B. A. (2005). Does steep terrain influence tree stability? A field investigation. *Canadian Journal of Forest Research*, 35 (10): 2360-2367.
- Nicoll, B. C., Gardiner, B. A., Rayner, B. & Peace, A. J. (2006). Anchorage of coniferous trees in relation to species, soil type, and rooting depth. *Canadian Journal of Forest Research*, 36 (7): 1871-1883. doi: 10.1139/x06-072.
- NOU 2022: 6. (2022). *Nett i tide*. redaksjon, D. s.-o. s. T.
- Norges vassdrags- og energidirektorat. (2021). *KILE-ordningen*. nve.no: Reguleringsmyndigheten for energi.
- Norges vassdrags- og energidirektorat. (2024a). *Avbruddsstatistikk 2023*. nve.no: Reguleringsmyndigheten. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/reguleringsmyndigheten/publikasjoner-og-data/statistikk/avbruddsstatistikk/avbruddsstatistikk-2023/> (lest 05.03).
- Norges vassdrags- og energidirektorat. (2024b). *Nøkkeltall for nettselskapene*. nve.no: Reguleringsmyndigheten.
- Næsset, E. (1997). Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote sensing*, 52 (2): 49-56.
- Næsset, E., Gobakken, T., Holmgren, J., Hyypä, H., Hyypä, J., Maltamo, M., Nilsson, M., Olsson, H., Persson, Å. & Söderman, U. (2004). Laser scanning of forest resources: the Nordic experience. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19 (6): 482-499.
- Peltola, H., Kellomäki, S., Väisänen, H. & Ikonen, V.-P. (1999). A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce, and birch. *Canadian Journal of Forest Research*, 29 (6): 647-661.
- Peltola, H., Gardiner, B. & Nicoll, B. (2013). Mechanics of wind damage. I: Christophe Orazio, K. B., Bruce Nicoll (red.) b. 151 *Living with storm damage to forests*, s. 33-40: European Forest Institute.
- Prieur, J.-F., St-Onge, B., Fournier, R. A., Woods, M. E., Rana, P. & Kneeshaw, D. (2021). A comparison of three airborne laser scanner types for species identification of individual trees. *Sensors*, 22 (1): 35.
- Päätaalo, M.-L. (2000). Risk of snow damage in unmanaged and managed stands of Scots pine, Norway spruce and birch. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 15 (5): 530-541.
- Ramdani, F. & Furqon, M. T. (2022). The simplicity of XGBoost algorithm versus the complexity of Random Forest, Support Vector Machine, and Neural Networks algorithms in urban forest classification. *F1000Research*, 11: 1069. doi: 10.12688/f1000research.124604.1.
- Regjeringen. (2023). *Klima og miljø*. Regjeringen.no: Departementenes digitaliseringsorganisasjon (DIO). Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/no/tema/naringsliv/omstillingstempen/klima-og-miljo/id2967602/> (lest 05.03).
- Reitberger, J., Heurich, M., Krzystek, P. & Stilla, U. (2007). Single tree detection in forest areas with high-density LiDAR data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36 (3): 139-144.
- Rettighetshaveres Elektroniske Nett. (2022). *Om REN*: Rettighetshaveres Elektroniske Nett. Tilgjengelig fra: <https://www.ren.no/om-oss/om-ren> (lest 13.03).
- Rettighetshaveres Elektroniske Nett. (2024). *Retningslinjer for utførelse av linjerydding*, RENblad 2024 | Versjon: 3.1.
- Reguleringsmyndigheten for energi. (2019). *Systemansvar*: Reguleringsmyndigheten for energi. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/reguleringsmyndigheten/regulering/nettvirksomhet/systemansvar/> (lest 13.03).

- Ruel, J.-C., Pin, D. & Cooper, K. (1998). Effect of topography on wind behaviour in a complex terrain. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 71 (3): 261-265.
- Sahin, E. K. (2020). Assessing the predictive capability of ensemble tree methods for landslide susceptibility mapping using XGBoost, gradient boosting machine, and random forest. *SN Applied Sciences*, 2 (7): 1308.
- Schlesselman, J. J. (1982). *Case-control studies: design, conduct, analysis*, b. 2: Oxford university press.
- Shao, Z., Ahmad, M. N. & Javed, A. (2024). Comparison of random forest and xgboost classifiers using integrated optical and sar features for mapping urban impervious surface. *Remote Sensing*, 16 (4): 665.
- Solberg, S., Heggem, E. S. F., Søvde, N. E. & McInnes, H. (2017). *Skogbehandling langs kraftlinjer*. NIBIO rapport, NIBIO Rapport 65: Norsk institutt for bioøkonomi.
- Solberg, S. & Flo Heggem, E. S. (2018). Trefall over kraftlinjer: Hvor er risikoen størst? *NIBIO POP*, 4.
- Sparks, A. M., Corrao, M. V. & Smith, A. M. S. (2022). Cross-Comparison of Individual Tree Detection Methods Using Low and High Pulse Density Airborne Laser Scanning Data. *Remote Sensing*, 14 (14): 3480.
- Statsforvalteren i Agder. (2017). *ROS Agder*.
- Stempski, W. (2025). Long-term edge effect of strip roads in pine stands (*Pinus sylvestris* L.). *Drewno Wood*, 68 (215). doi: 10.53502/wood-199708.
- Stokes, A. & Mattheck, C. (1996). Variation of wood strength in tree roots. *Journal of Experimental Botany*, 47 (5): 693-699.
- Sun, Y., Jin, X., Pukkala, T. & Li, F. (2022). Predicting Individual Tree Diameter of Larch (*Larix olgensis*) from UAV-LiDAR Data Using Six Different Algorithms. *Remote Sensing*, 14 (5): 1125.
- Svanevik, M. a. H., Håkon Magnus and Fagerlid Mjelstad, Geir Ottar. (2023). *Svært kraftige vindkast i delar av Agder, Rogaland og Vestland, 20.–21. oktober 2023*. MET-info, 32/2023.
- Trømborg, E., Solberg, B., Rønning, E. & Fladset, P. O. (2012). *Trær til besvær. Lærdommer om skogrydding i etterkant av ekstremværet Dagmar*. I: løehen, I. A. (red.), NVE Rapport 45-12. Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat.
- Wei, Y., Peter, K. & Marco, H. (2012). Tree species classification and estimation of stem volume and DBH based on single tree extraction by exploiting airborne full-waveform LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 123: 368-380. doi: 10.1016/j.rse.2012.03.027.
- Wielgosz, M., Puliti, S., Xiang, B., Schindler, K. & Astrup, R. (2024). SegmentAnyTree: A sensor and platform agnostic deep learning model for tree segmentation using laser scanning data. *Remote Sensing of Environment*, 313: 114367.
- Windrim, L. & Bryson, M. (2020). Detection, Segmentation, and Model Fitting of Individual Tree Stems from Airborne Laser Scanning of Forests Using Deep Learning. *Remote Sensing*, 12 (9): 1469.
- Wu, Y., Zhang, Z., Qi, X., Hu, W. & Si, S. (2024). Prediction of flood sensitivity based on Logistic Regression, eXtreme Gradient Boosting, and Random Forest modeling methods. *Water Science & Technology*, 89 (10): 2605-2624. doi: 10.2166/wst.2024.146.
- Xiaowei, Y., Juha, H., Mikko, V., Markus, H. & Risto, V. (2011). Predicting individual tree attributes from airborne laser point clouds based on the random forests technique. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66 (1): 28-37. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2010.08.003.
- Yang, M., Défossez, P., Danjon, F. & Fourcaud, T. (2018). Analyzing key factors of roots and soil contributing to tree anchorage of *Pinus* species. *Trees*, 32 (3): 703-712. doi: 10.1007/s00468-018-1665-4.
- Yermo, M., Laso, R., Lorenzo, O. G., Pena, T. F., Cabaleiro, J. C., Rivera, F. F. & Vilariño, D. L. (2024). Powerline detection and characterization in general-purpose airborne LiDAR

- surveys. *IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 17. doi: 10.1109/JSTARS.2024.3396522.
- Yu, X., Hyypä, J., Litkey, P., Kaartinen, H., Vastaranta, M. & Holopainen, M. (2017). Single-Sensor Solution to Tree Species Classification Using Multispectral Airborne Laser Scanning. *Remote Sensing*, 9 (2): 108.
- Zamani Joharestani, M., Cao, C., Ni, X., Bashir, B. & Talebiesfandarani, S. (2019). PM2.5 prediction based on random forest, XGBoost, and deep learning using multisource remote sensing data. *Atmosphere*, 10 (7): 373. doi: 10.3390/atmos10070373.
- Østreng, R. (2014). *Identifikasjon av risikotrær langs kraftlinjer ved hjelp av flybåren laserscanning*. Masteroppgave: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet.



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelege universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway