



NIBIO

NORSK INSTITUTT FOR
BIOØKONOMI

Årsaksfaktorer for vind- og snøskader i Sør-Norge

NIBIO RAPPORT | VOL. 5 | NR. 85 | 2019



Svein Solberg ¹⁾ Harold McInnes²⁾ Kristina Blennow³⁾

Divisjon for skog og utmark¹⁾/Met.no²⁾/Sveriges Lantbruksuniversitet³⁾

TITTEL/TITLE

Årsaksfaktorer for vind- og snøskader i Sør-Norge

FORFATTER(E)/AUTHOR(S)

Svein Solberg, Harold McInnes, Kristina Blennow

DATO/DATE:	RAPPORT NR./ REPORT NO.:	TILGJENGELIGHET/AVAILABILITY:	PROSJEKTNR./PROJECT NO.:	SAKSNR./ARCHIVE NO.:
24.06.2019	5/85/ 2019	Åpen	347020	19/00849
ISBN:	ISSN:	ANTALL SIDER/ NO. OF PAGES:	ANTALL VEDLEGG/ NO. OF APPENDICES:	
978-82-17-02369-2	2464-1162	37		

OPPDRA GSGIVER/EMPLOYER:

Norges forskningsråd

KONTAKTPERSON/CONTACT PERSON:

Svein Solberg

STIKKORD/KEYWORDS:

Stikkord norske: Skog, vindskader, snøskader

Stikkord engelske: forest, wind and snow damage

FAGOMRÅDE/FIELD OF WORK:

Sett inn fagområde: skogskader

Insert field of work: forest damage

SAMMENDRAG/SUMMARY:

Denne rapporten er basert på Landsskogtakseringens registreringer av vind- og snøskader i Sør-Norge i perioden 2005-2015, samt en case-studie hos Mathiesen Eidvol Værk for skader etter Dagmar-stormen. Med statistiske analyser har vi forsøkt å forklare variasjoner i skadeomfang ut fra (1) skoglige, (2) topografiske, (3) jordbunnsmessige, og (4) meteorologiske forhold.

Omfanget av snø- og vindskader i Landsskogtakseringens data var lavt, - dels ved at omkring 90% av flatene ikke hadde noen skader i løpet av den 15-års perioden vi har sett på, verken på selve prøveflata eller på bestandet som flata lå i. Dels var skadene svake ved at en overveiende andel av dem rammet under 5% av stående volum. Det var videre en stor andel av skadene som rammet småtrær og løvtrær, ofte i blandingsskog, og i mange tilfeller trolig trær som var revet ned av større rotvelter. Disse småtrærne og løvtrærne har mindre relevans for det praktiske skogbruk, og vi har forsøkt å redusere betydningen av dem ved å fokusere på sterkere skader og på skader som har rammet hele skogbestandet som den enkelte prøveflata i Landsskogtakseringen lå i. Skadene var mest utbredt på Vestlandet, men generelt ganske jevnt fordelt mellom landsdelene i Sør-Norge.

Sannsynligheten for vind- og snøskader kunne kun i liten grad kvantifiseres ut fra ulike forklaringsvariabler og modeller, og det var skoglige forhold som dominerte i analysene. Vi tolker dette som et resultat av at mange tilfeldigheter eller ukjente forhold har stor betydning. Slike skader rammer ofte spredte trær og grupper av trær, og det er vanskelig å fange opp hvordan lokale variasjoner i vindstyrke kan ha virket inn på slike skader, på grunn av stor topografisk variasjon og med 2,5 km romlig oppløsning på vinddataene. Case-studien viste at Dagmar-stormen rammet høye trær og hovedsakelig i et flatt og topografisk utsatt område på Hauer seteravsetningen, selv om trærnes forankring der burde være bra med djupe løsmasser.

**NIBIO**NØRSK INSTITUTT FOR
BIOØKONOMI

Resultatene indikerte at både enkelttre-stabilitet og sosial stabilitet spiller en rolle. Ut fra dette bør en videreføre anbefalinger om å utføre ungskogpleie for å øke D/H-forholdet samt være forsiktig med seine tynninger. Resultatene gir imidlertid ingen klare funn når det gjelder hvilke voksesteder som vil være særlig utsatte for slike skader, - verken i dag eller i framtida med klimaendring. Granskogområdene på Østlandet, og særlig høytliggende områder synes imidlertid å være ekstra utsatt, med spesiell vekt på snøbrekk.

Enkelte klimatiske variabler som høy vindstyrke, avvik fra dominerende vindretning, mye våt snø og våt jord uten tele vinterstid kunne forklare noe av variasjonen i sannsynlighet. Klimaendringene ventes å endre det geografiske mønsteret for snøskader, med mindre skadeomfang langs vestkysten og mer i høyereliggende strøk i innlandet. Bortsett fra det er det usikkert om endringene vil påvirke omfanget av vind- og snøskader, dels fordi de klimatiske variablene hadde svak effekt i de statistiske modellene, dels fordi det kun er ventet en svak økning i vindstyrke i de klimascenariene vi har brukt, dels fordi klimascenariene er usikre, og også fordi trærne herdes og gradvis tilpasser seg nye klimaforhold.

LAND/COUNTRY: Norge

FYLKE/COUNTY:

KOMMUNE/MUNICIPALITY:

STED/LOKALITET:

GODKJENT /APPROVED

Aksel Granhus

NAVN/NAME

PROSJEKTLEDER /PROJECT LEADER

Svein Solberg

NAVN/NAME



NIBIO

NORSK INSTITUTT FOR
BIOØKONOMI

Forord

Vind- og snøskader utgjør en betydelig del av skogskader i Norge og Europa for øvrig. Klimaendringer kan på ulike vis påvirke omfang av dette, ved mer ekstremvær og dårligere forankring av rotsystemene om vinteren hvis det blir mindre tve og mer våt jord. Det er behov for å øke kunnskapen om hvilke faktorer som påvirker sannsynligheten for slike skader, slik at man i skogbehandlingen kan forsøke å forebygge. Landskogtakseringens data er en kilde til å analysere årsaksforholdene.

Ås, 24.06.19

Svein Solberg

Innhold

1	Innledning	6
	Problemstillingene var å avklare:	7
2	Materiale	8
2.1	Skadevariabler	8
2.1.1	Vindskader på flate	8
2.1.2	Vindskader i bestand	8
2.1.3	Snøskader i bestand	8
2.2	Skoglige årsaksvariabler	9
2.3	Meteorologiske årsaksvariabler	9
2.4	Andre årsaksvariabler	11
3	Metoder	13
4	Resultater	14
4.1	Geografisk fordeling	15
4.2	Årsaksfaktorer	16
4.2.1	Årsaksfaktorer	16
4.3	Vindskade i bestand	19
4.4	Snøskader (bestand)	21
4.5	Hovedmodell	23
5	Case-studie: Skader av Dagmar-stormen 26/12-2011 på Romerike	26
6	Diskusjon	28
6.1	Det statistiske problemet med herding	28
6.2	Problemet med 5-års perioder mellom hver registrering	28
6.3	Skoglige forhold	28
6.3.1	Treslag	29
6.3.2	Høyde	29
6.3.3	D/H-forhold	29
6.3.4	Skogbehandling	30
6.3.5	Skogstruktur	30
6.4	Meteorologiske forhold	30
6.5	Jordbunnsmessige forhold	31
6.6	Hellende terreng	31
6.7	Høyde over havet	32
6.8	Topex	32
6.9	Effekt av klimaendring	32
6.10	Statistiske analyse	33
6.11	Konklusjon	33
	Etterord	34
	Litteraturreferanser	35

1 Innledning

Stormskader i skog er omfattende i Europa. Det tilsvarer i gjennomsnitt hvert år et område på størrelse med Polen, og klimaendringene kan øke omfanget ytterligere (Gardiner et al. 2013). Det er særlig Sentral-Europa som har vært rammet, men også i Skandinavia har vi hatt sterke skader som etter stormen Gudrun. Det har i de siste 50 årene vært en betydelig øning i omfanget av stormskader i Europa, og dette kan i hovedsak forklares ved en gradvis økning i skogvolum (Gardiner et al. 2013). Om man ser på omfang av akutte skogskader målt i volum skadd virke, så kommer stormskader desidert høyest med ca 50% av skadeomfanget i Europa (Schelhaas et al. 2003). Dersom man ser på forekomst av skader i den europeiske skogovervåkingen ICP-Forests så får man et annet inntrykk. Da virker vind- og snøskader mindre viktig, og kommer i bakgrunnen av andre skadetyper, hvor særlig insektskader (defolierende insekter), tørkeskader og råteskader dominerer (Potocic et al. 2018). Dette er imidlertid regnet som frekvens av observasjoner av ulike skadetyper på enkelttrær, og det er altså ikke vektet med trærnes størrelse eller verdi, og slik sett kan være mindre relevant dersom man fokuserer på de økonomiske konsekvensene av skadene.

I den rutinemessige overvåkingen av skogens helsetilstand i Norge er vind- og snøskader de årsakene som førte til mest skader både på gran og furu, mens insektangrep (målere) hadde størst betydning for bjørk (Timmermann et al. 2018).

Omfanget av vind- og snøskader kan øke framover i tid, særlig ved at skogvolumet øker (Granhus et al. 2012), samtidig som klimaendringene kan gi mer ekstremt vær og også dårligere forankring av rotsystemene vinterstid pga mindre tele og våtere jord (Kamimura et al. 2012). I tillegg kan klimaendringene påvirke det geografiske mønsteret av snø- og vind, og særlig når det gjelder snøskader forårsaket av våt snø i trekronene, så ventes det at tyngdepunktet for slike skader vil flyttes seg fra Vestlandet og innover i landet og oppover mot fjellet (Solberg and Tajet 2018).

Stormskader, og til en viss grad snøskader, har en rekke negative konsekvenser. For skogbruket fører det til et økonomisk tap i form av ødelagt virke, økte driftskostnader og lagringskostnader. I tilfeller med stort skadeomfang får man også tap ved at forholdet mellom tilbud og etterspørsel i tømmermarkedet påvirkes og dermed fallende tømmerpriser. Utover dette kommer indirekte skader, og det er særlig på infrastruktur som kraftledninger, jernbaner og veier at nedblåste, snøbøyde og brukne trær kan få store konsekvenser. Trefall på linjenettet er i dag den viktigste årsaken til lengre strømbrudd i Norge og påfører nettselskapene store kostnader. En undersøkelse blant 121 norske nettselskap viste at kostnadene til skogrydding langs linjenettet i Norge har vært økende de siste årene og nå er på 400 millioner kr per år, og i tillegg kommer over 100 millioner til reparasjoner og økonomisk straff for ikke levert strøm (Solberg et al. 2017). Slike problemer påvirker også beredskapssituasjonen i Norge (DSB 2014).

For å forebygge slike skader og redusere omfanget i framtida kan det være aktuelt å endre skogbehandlingen, både for skognæringen sjøl og for de som skjøtter skog langs infrastruktur. Dette betinger at man faktisk har mulighet til å påvirke sannsynligheten for skader gjennom skogbehandlingen. Vi trenger da å kjenne årsaksfaktorene. Dels trenger vi å vite hvordan skogbehandlingen påvirker sannsynligheten, og her vil skogbehandlingens effekt på enkeltrestabilitet og sosial stabilitet, samt plassering og utforming av nye skogkanter spille en viktig rolle (Blennow and Sallnas 2004; Nørgård-Nielsen 2001). I tillegg trenger vi å kjenne til betydningen av andre årsaksfaktorer knyttet til et gitt sted, som klimatiske, topografiske og jordbunnsmessige forhold, slik at vi kan gi tiltakene en riktig prioritering.

For skogbruket er det først og fremst skader med stort omfang som er et problem, mens for infrastruktur kan også skader på spredte enkelttrær få store, negative konsekvenser.

Formålet med denne rapporten var å klarlegge omfang og årsaksfaktorer for vind- og snøskader i Sør-Norge basert på Landsskogtakseringens data (Granhus et al. 2012), knyttet sammen med andre datasett for meteorologiske, topografiske og jordbunnsmessige forhold.

Problemstillingene var å avklare:

1. Hvilke variable påvirker sannsynligheten for vind- og snøskader?
2. Hvordan vil klimaendring påvirke sannsynligheten for vind- og snøskader?

2 Materiale

Denne studien er basert på registreringer av skader i Landsskogtakseringen, med supplerende data for en case-studie etter stormen Dagmer. Registreringsopplegget i Landsskogtakseringen er beskrevet i (Viken 2018), og beskrives derfor ikke i nærmere detalj her. Vi har gjort et utvalg av data, ved å avgrense dem til Sør-Norge og registreringene gjort i årene 2005-2015. Denne avgrensningen er gjort fordi de meteorologiske variablene i hovedsak bare var tilgjengelig for denne landsdelen og denne tidsperioden. Avgrensningen til en 10-års periode med registreringer representerer imidlertid en 15-års periode med skader, dvs. fra feltsesongen 2001 til feltsesongen 2015. Dette fordi ei flate blir taksert hvert 5. år, og en registrering skal derfor i prinsippet fange opp skader skjedd i løpet av den foregående 5-årsperioden. Nå er det slik at dette er riktig i prinsippet, mens vi regner med at en del skader skjedd i 5-årsperioden ikke fanges opp, fordi skadde skog i en del tilfeller har blitt avvirket etterpå. Ved registreringen vil man da finne stubber og hogstavfall, og det vil ikke alltid være mulig å fastslå at en vind- eller snøskade hadde skjedd.

I de tilfeller der flata består av to deler har vi kun brukt én tilfeldig valgt flatedel, dvs den delen som har lavest delnummer. Dette ble gjort for å unngå pseudoreplikater i datasettet.

I studien har vi gitt alle variabler et navn som starter med en stor bokstav for å gjøre presentasjonen av resultatene enklere for leseren:

E=effektvariabler (skadevariabler)

S=skoglige årsaksvariabler

M=meteorologiske årsaksvariabler

A=andre årsaksvariabler knyttet til stedet, som har med topografi og jordbunnsforhold å gjøre.

2.1 Skadevariabler

Vi genererte tre binære variabler med verdiene 1 (skade) og 0 (ikke skade). Vi brukte disse som avhengige variabler i de statistiske analysene.

2.1.1 Vindskader på flate

Vi brukte her Landsskogtakseringens variabel 'VOLVINDFALL' som angir volumet av vindfelt virke innenfor et prøveflateareal på 250 m², og vi kodet om alle verdier > 0 til verdien 1 (skade). Vi har kalt variabelen E_vindskade_flate_01.

2.1.2 Vindskader i bestand

Vi kombinerte her Landsskogtakseringens variabler (a) BESTSKADESTORM og (b) BESTSKADEVINDSNO, som representerer henholdsvis (a) vindskade og (b) kombinert vind- og snøskade i det bestandet som flata tilhører. Vurdering av skadeomfanget gjøres da innenfor et utvidet areal tilsvarende ett dekar. Skaden er angitt i % av volumet, og kun skade over 5% er registrert. Vi har kalt variabelen E_vindskade_bestand_01, og har gitt den verdien 1 (skade) dersom det var registrert skade for BESTSKADESTORM eller BESTSKADEVINDSNO.

2.1.3 Snøskader i bestand

Tilsvarende som for skaden over, kombinerte vi her Landsskogtakseringens variabler (a) BESTSKADESSNO og (b) BESTSKADEVINDSNO, som representerer henholdsvis (a) snøskade og (b) kombinert vind- og snøskade i det bestandet som flata tilhører. Skaden er angitt i % av volumet, og kun skade over 5% er registrert. Vi har kalt variabelen E_snoskade_bestand_01, og har gitt den verdien 1 (skade) dersom det var registrert skade for BESTSKADESSNO eller BESTSKADEVINDSNO.

2.2 Skoglige årsaksvariabler

Vi benyttet en lang rekke av Landsskogtakseringens variabler som årsaksvariabler (Tabell 1). Vi har brukt variabel-verdiene ved starten av 5-årsperioden. For trærnes høyde, diameter og D/H-forhold har vi variabler både for et volumveid middeltre og for det høyeste treet per flate. Vi har i datasettet kun hatt trær fra hogstklasse 3-5, samt en del felt i hogstklasse 1 og 2 hvor trehøyde er målt på overstandere fra forrige tregenerasjon. Korrelasjonen mellom disse to alternativene var 0,93 for høyde (S_H og S_maxtre_h), 0,57 for diameter (S_D og S_maxtre_d) og 0,65 for D/H-forhold (S_DH og S_maxtre_dh). Ettersom disse korrelasjonene til dels bare var moderat sterke så har vi brukt begge alternativene som kandidater til årsaksvariabler.

Tabell 1. Årsaksvariabler for skoglige forhold

Variabel	Egenskap	Utvalg	Enhet	Kommentar
S_Bonitet	Bonitet	Prod. skog	6, 8-26	H40-bonitet, Angis i 3 m klasser fra 8-26
S_HKL	Hogstklasse	Prod. skog	1-5	
S_GRAN_PROS	Andel gran		%	
S_FURU_PROS	Andel furu		%	
S_LAUUV_PROS	Andel lauv		%	
S_treslag	Hovedtreslag		G,F,L,Mix	Gitt som G,F,L dersom andel>70%
S_renhet	Blanding		%	Andel av hovedtreslag
S_D	Diameter b.h.		mm	Beregnet for volummiddeltreet
S_H	Høyde		dm	--"--
S_DH	d/h-forholdet			--"--
S_maxtre_d	Diameter b.h.		mm	Beregnet for høyeste tre
S_maxtre_h	Høyde		dm	--"--
S_maxtre_dh	d/h-forholdet			--"--
S_maxtre_treslag	Treslag		G,F,L,X	X er andre treslag
S_N_D_5_10	Treantall			Antall trær>5cm (hkl 3) og >10cm (hkl 4-5)
S_m3	Volum		m ³ /ha	
S_sjikt	Antall sjikt	Prod. skog	1-3	
S_kant	skogkant	Prod. skog	0-1	Flatesentrum <20m fra skogkant
S_skogkant	kant mot lavere skog	Prod. skog	0-1	Flatesentrum <20m fra skogkant
S_kant_ny	ny skogkant	Prod. skog	0-1	Fra forrige 5-årsperiode
S_kantavst	avstand kant	Prod. skog	m	
S_tynning	tynning		0-1	Fra forrige 5-årsperiode
S_slutthogst	slutthogst		0-1	--"--
S_hogst	all hogst		0-1	--"--

2.3 Meteorologiske årsaksvariabler

De meteorologiske forklaringsvariablene nedenfor utgjør en mulig kobling mellom en sannsynlighetsmodell for skogskade og et klimascenarior, og er dermed viktige for dennes studien. De beskriver meteorologiske forhold som kan ha betydning for skog:

- Vindstyrke
- Vindretning

- Mengde våt nysnø
- Jordfuktighet. Dette påvirker trærnes forankring
- Tele eller ikke tele. Dette påvirker trærnes forankring

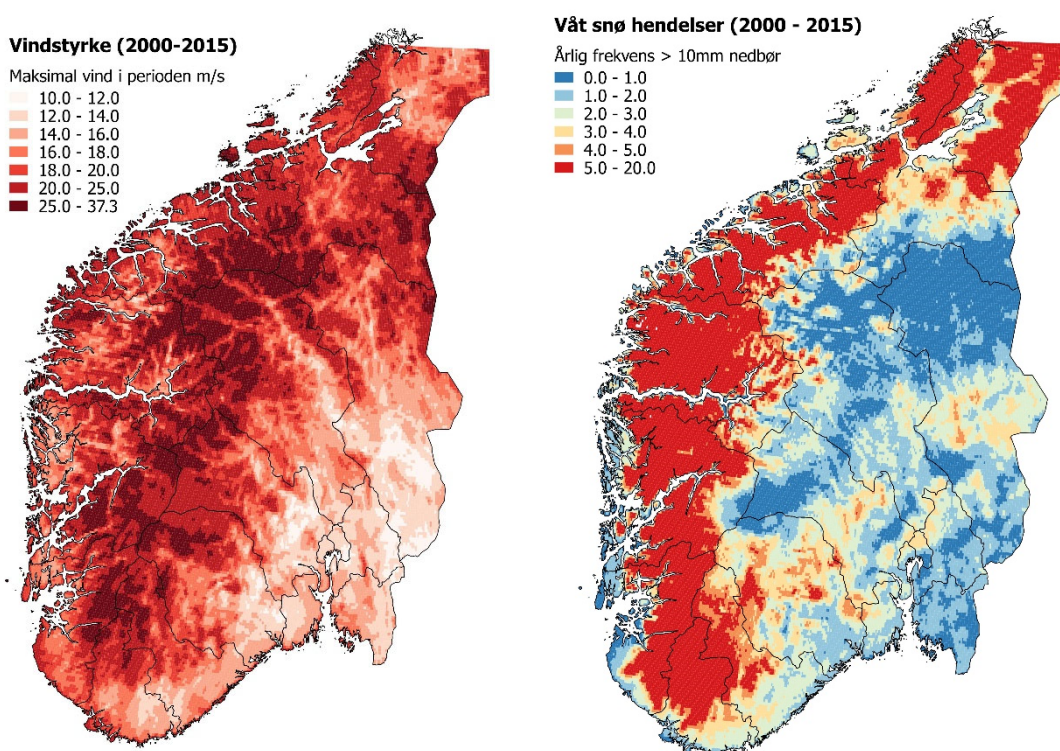
Selv om flere av disse variablene måles på mange stasjoner i Norge, er stasjonsnettet ikke tilstrekkelig til å gi en detaljert romlig beskrivelse. Det er dermed nødvendig å generere datasett basert på meteorologiske modeller med en relativt høy romlig oppløsning. I prosjektet WISLINE er det etablert flere slike modellbaserte datasett. I denne studien har vi brukt datasettet NORA-BC (Haakenstad and Haugen 2017) for det meste av meteorologiske data. Det dekker den sørlige delen av Norge (Figur 1) og har en avstand mellom datapunktene på 2.5 km. Data er generert for hver tredje time for perioden 2000 til 2015, og basert på et datasett som kalles NORA10 (Reistad et al. 2015) med ca 10 km mellom datapunktene. NORA10 er nedskalert statistisk mot et år med data fra værvarlingsmodellen AROME (Bengtsson et al. 2017). Ved å finne en statistisk sammenheng for enkelte variable mellom 10 km og 2.5 km oppløsning er det beregnet 15 år lange dataserier med 2.5 km oppløsning. En validering mot observasjoner viser at metoden gir en realistisk beskrivelse av de aktuelle variablene, men de sterkeste vindene underestimeres noe.

For jordfuktighet og tele er imidlertid data fra datasettet HCLIM (Dobler et al. 2019) brukt. Dette datasettet er generert ved at værvarlingsmodellen AROME er kjørt for årene 2004 til 2016, noe som gir data i flere nivåer og flere variabler enn NORA-BC. Slike kjøring krever imidlertid mye mer regnekapasitet og er dermed svært kostbare. Metoden kalles dynamisk nedskalering, og den innebærer at modellen beregner variablene ut fra fysiske lover.

Hvis snø fester seg på trær vil dette medføre en belastning som gjør trærne mer utsatte for vindskader. Er det relativt mildt slik at snøen som faller er våt fester den seg lettere til trær, ledninger, master og lignende. Ingen av de to ovennevnte datasettene inneholder våt snø, men ved å kombinere data for temperatur og nedbør kan man få en indikator. I denne studien er det antatt at våt snø fortrinnsvis vil forekomme mellom 0.5° og 2° C, og at det må falle mer enn 10 mm nedbør i døgnet for at skal feste seg en tilstrekkelig mengde snø til at det kan være skadelig. Temperaturintervallet er gitt av (Steen et al. 2012) mens antagelsen om minimum 10 mm kommer fra (Bonelli et al. 2011; Nygaard and Fikke 2012). de variablene vi har generert som input til de statistiske analysene er listet opp i Tabell 2.

Tabell 2. Meteorologiske variabler

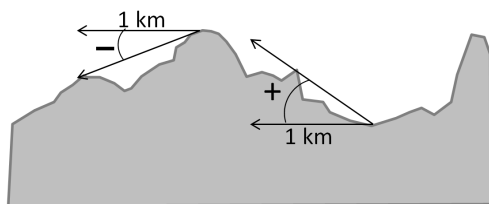
Variabel	Egenskap	Tidsvindu	Enhet	Kommentar
M15_vind_p90	Vindstyrke	15 år	m/s	90 % percentil
M5_vind_max	Vindstyrke	5 år	m/s	Max
M5_vind_pros	Vindstyrke	5 år	%	=100% · M5_vind_max/M15_vind_p90
M5_vind_retn	Vindretning	1 tidspunkt	°	Avvik vindretning for sterkeste vind 5 år fra dominerende vindretning 15 år
M15_sno_dag	Våtsnø	15 år	N	Gj-snitt antall dager pr år
M15_sno_p90	Våtsnø	15 år	mm	90 % percentil
M5_sno_max	Våtsnø	5 år	mm	Max
M15_jfukt	Jordfuktighet	15 år	%	Gj-snitt
M15_j10fukt_vint	Jordfuktighet	12 vintre	TSWI	Gj-snitt for jordtemp>0°C for 0-10 cm jorddybde. HCLIM
M15_j20fukt_vint	Jordfuktighet	12 vintre	TSWI	Gj-snitt for jordtemp>0°C for 10-20 cm jorddybde. HCLIM
M15_j10tele_vint	Tele	12 vintre	N	Gj-snitt antall dager pr år. 10 cm. HCLIM
M15_j20tele_vint	Tele	12 vintre	N	Gj-snitt antall dager pr år. 20 cm. HCLIM



Figur 1. Geografisk variasjon i risikoforhold i et 2,5 km rutenett over Sør-Norge: a) Maksimal vindstyrke 10 m over bakken for årene 2000-2015. Kartet er basert på statistisk nedskalering av vinddata hvor de sterkeste vindene kan bli noe underestimert, men angir på en realistisk måte hvordan vindstyrken varierte geografisk. b) Frekvens av våtsnø-episoder 2000-2015 er gitt som antall døgn med 0,5-2 grader gjennomsnittstemperatur og ≥ 10 mm nedbør i snitt per år. Dataene er fra forskningsprosjektet Wind Ice and Snow Load Impacts on Infrastructure and the Natural Environment (WISLINE).

2.4 Andre årsaksvariabler

Vi har generert tre variabler basert på topografi, og det er høyde over havet, helling og topografisk eksposisjon (Topex 'Topographic Exposure') (Quine and White 1994). Den siste representerer vinkelen fra et gitt punkt til horisonten, dog ikke lenger unna enn 1 km. Er vinkelen lav, eller negativ er stedet utsatt for vind. Er vinkelen høy, ligger stedet i le. Koller og høydedrag stikker opp og er mer utsatt for sterk vind enn søkk og dalbunner. I England har man vist hvordan vindstyrken varierer med topografi ved å utplassere bomullsvimpler ('tatter flags') på ulike lokaliteter, og etter en stund måle slitasjen på vimplene. Man har så testet ulike topografiske indekser for å beskrive vindklimaet på et sted. Vi har beregnet dette for 8 himmelretninger (N, NØ, ... , V, NV), og så gjennomsnittsberegnet dette. Dette er basert på en digital terrengmodell (DTM) for hele Norge med 10 m oppløsning (Fig. 2). Generelt i de fleste modellene har vi bare brukt gjennomsnittlig TOPEX som forklaringsvariabel, og ikke verdiene for de ulike himmelretningene. Dette fordi det ikke har vært mulig å vite hvilken vindretning som gjaldt for de vindskader som har oppstått i løpet en 5-års periode. Imidlertid har vi i denne rapporten tatt med en case-studie for Dagmar-stormen i 2011, og der har vi også brukt Topex i retning mot vinden.



Figur 2. Prinsippet for beregning av TOPEX i én retning på et terrengprofil. Vinkelen måles altså til det punktet innenfor 1 km som danner horisonten.

Videre har vi generert fire forklaringsvariabler for jord. De er alle sammen ment å representere trærnes mulighet for forankring av rotsystemet, med hovedvekt på djup forankring. Vi har her brukt både registreringer gjort på Landsskogtakseringens flater og dels på NGUs løsmassekart. Sistnevnte datasett foreligger for hele Norge og er basert på at vi har kodet om klassene til noen hovedkategorier (Tabell 3).

Tabell 3. Andre årsaksvariabler

Variabel	Egenskap	Enhet / Klasser	Kommentar
A_HOH	Høyde over havet	m	Basert på Landsskogtakseringen
A_helling	Terrenghelling	%	Basert på Landsskogtakseringen
A_TOPEX	Topografisk ekspo.	°	Vinkel til horisont 1 km radius Basert på digital terrengmodell for Norge
A_JORDDYBDE	Jorddybde	1 <25cm	Basert på Landsskogtakseringen
		2 25-50cm	
		3 50-100cm	
		4 >100cm	
A_MINERAL_TORV	Mineral- eller torvjord	1 <40cm torv	Basert på Landsskogtakseringen
		2 >40cm torv	
A_NGU_rotdybde	Potensiell rottybde	1 Grunn	Basert på NGU's løsmassekart. Tynt eller usammenhengende dekke, torv, myr, marine avsetninger
		2 Dyp	Andre
A_NGU_jordtype	Opphavsmateriale	1 Torv	Basert på NGU's løsmassekart
		2 Marin	
		3 Elv- og breelv-avsetning, skred-materiale, vindavsetning	
		4 Bunnmorene	
		5 Bart fjell	
		6 annet	

3 Metoder

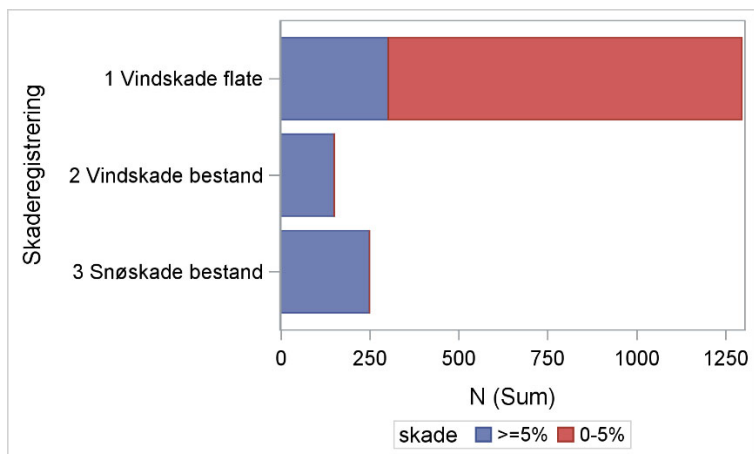
Vi har dels kjørt modeller for hver enkelt forklaringsvariabel, og dels multivariate modeller. Ved å kjøre en stegvis, logistisk regresjon (SAS PROC LOGISTIC) fikk vi valgt ut et sett av variabler for en forklaringsmodell. Vi utelot her observasjoner med skadegrad mellom 0 og 5%, fordi dette i stor grad var skader på småtrær. Vi gjorde beregningene først separat for to 5-års perioder. Dette resulterte i ulike modeller for de to periodene. For de ulike modellene har vi beregnet reskalerte R^2 -verdier som

$$\bar{R}^2 = \frac{R^2}{R_{max}^2}$$

fordi maksimal verdi for R^2 , det vil si R_{max}^2 , i mange slike modeller er lavere enn én, basert på Nagelkerke (1991). Vi satte alle forklaringsvariablene sammen og testet for ko-linearitet ved å beregne Variance Inflation Factor (VIF) mellom de ulike variablene. Vi utelot også variablene for treslagsandeler, ettersom disse fanges opp av variabelen treslag (*S_treslag*). Vi kjørte så en samlet beregning for alle år, og håndterte at de gjentatte registreringene på samme flate hadde en avhengighet ved å definere dette som en tilfeldig effekt i modellen, og brukte da SAS PROC GLIMMIX.

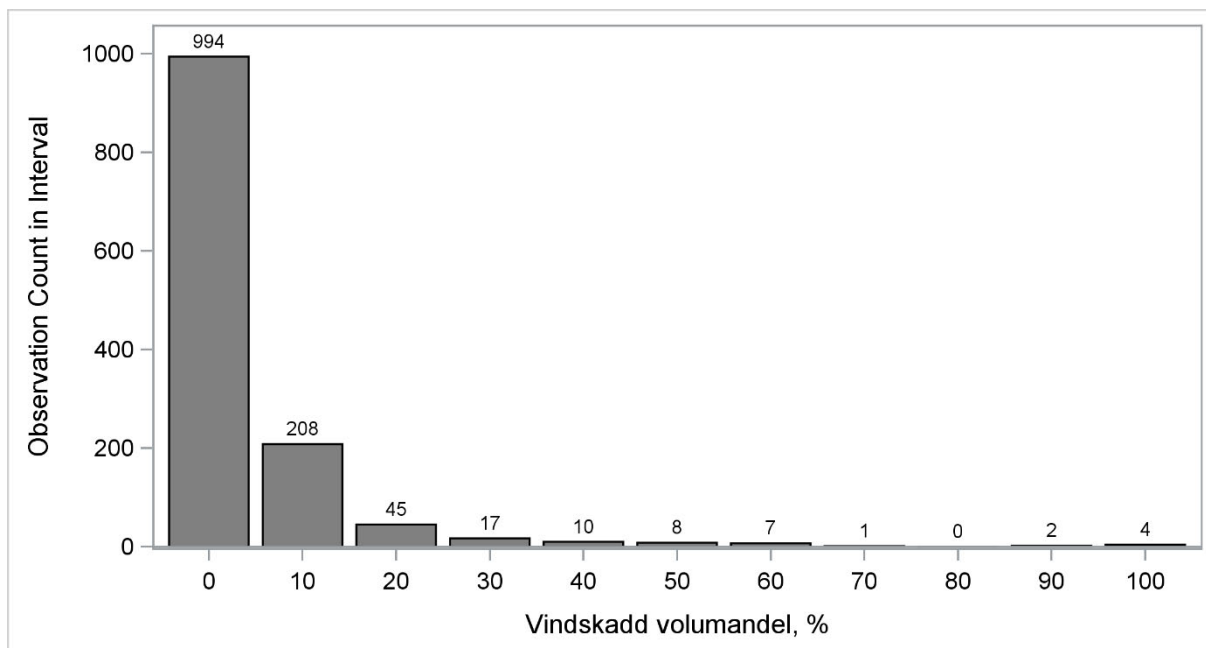
4 Resultater

Datasettet fra Landsskogtakserringen hadde totalt 20484 observasjoner fra 9956 flater, hvor en observasjon her betyr alle registreringer gjort ved ett besøk på flata. 11% av flatene hadde én observasjon (var besøkt én gang i løpet av de 15 årene), 72% hadde to observasjoner og 17% hadde 3 observasjoner. Omfanget av vind- og snøskader var lavt, ved at (i) en overveiende majoritet av observasjonene ikke hadde skader, (ii) i de tilfellene der det var skader så var det overveiende svake skader, og (iii) skadene rammet ofte småtrær og løvtrær med små konsekvenser. På 7,7% av observasjonene (1587 tilfeller) var en eller annen form for vind- eller snøskade registrert. Av dette var 4,9% (994 tilfeller) vindskader som rammet under 5% av kubikkmassen på flata (rød søyle i fig 3). Skader som rammet mer enn 5% av kubikkmassen utgjorde 302 tilfeller av vindskader på flata, 150 tilfeller av vindskader i bestandet og 249 tilfeller av snøskader i bestandet (blå søyler i fig 3). I tillegg var det 10 tilfeller av kombinerte vind- og snøskader i bestandet.



Figur 3. Antall skader i ulike kategorier av skadetype, fordelt på skader >5% (blått) og skader <5% (rødt). Den siste skadeomfanget er ikke registrert for bestand.

Av de 20484 observasjonene i datasettet var det vindskader på 1296, det vil si 6,3%. I produktiv skog var det omtrent samme skadefrekvens, med 16596 flate-observasjoner og 1176 (7%) med skader. Det var en sterk dominans av svake skader. Blant de observasjonene som hadde vindskade registrert på flata, så fordelte skadene seg med en majoritet av svake skader, og så en rekke med få tilfeller av ulik skadegrad (Fig. 4). I 80% av skadetilfellene var det under 6% av volumet på flata som var skadd. I 90% av tilfellene var skaden lavere enn 11%. Kun 5 flater hadde mer enn 90% skade.



Figur 4. Frekvensfordeling av vindskader på flate fordelt på skadegrad. Kun observasjoner med skade er tatt med her, N=1296.

Blant tilfellene av vindskader på flatene var det en sterk dominans av svake skader på løvtrær og småtrær. Mens 25% av de skadde flatene var dominert av løvtrær, så var det i 60% av tilfellene løvtrær som dominerte blant de skadde trærne (Tabell 4). Vi brukte da en grenseverdi på 70% av skadd volum for å angi et dominerende treslag, og hvis ingen treslagskategori utgjorde 70% eller mer ble det klassifisert som blanding. Det var særlig i blandingsskog at løvtrærne var rammet. Vi har klassifisert 26% av de skadde flatene som blandingsskog, mens 60% av dem hadde løvdominans blant de skadde trærne. Denne løvdominansen var imidlertid svakere ved sterke skader.

Tabell 4. Frekvensfordeling (%) av vindskader på flater fordelt på treslag (N=1296)

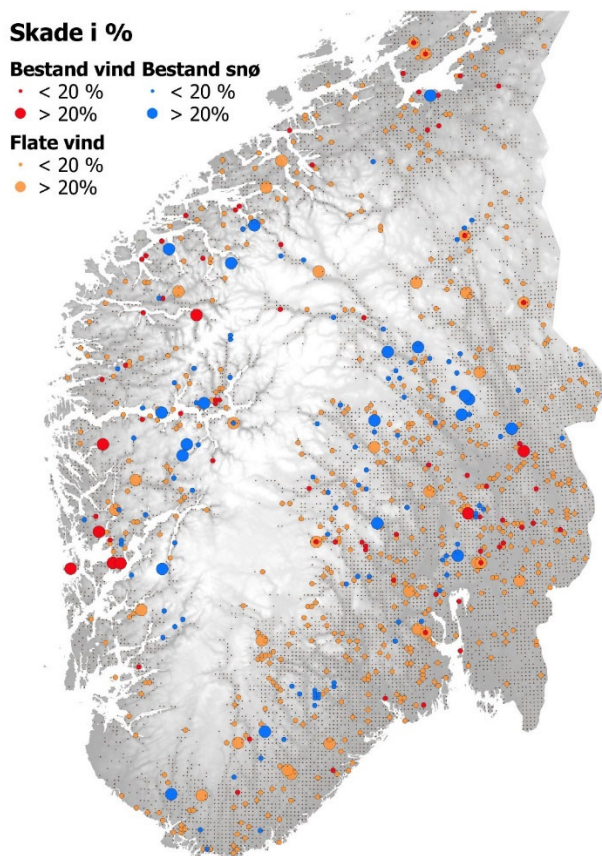
Dominerende treslag på flata	Dominerende treslag blant skadde trær				Sum
	Gran	Furu	Løv	Blanding	
Gran	19	1	15	1	35
Furu	2	7	5	0	14
Løv	1	0	24	0	25
Blanding	6	3	17	1	26
Sum	27	11	60	2	100

Svake skader på småtrær forekom hyppig. I gjennomsnitt var diameteren på vindskadde trær 63% av middeldiameteren for alle trærne på flata. Dette varierte imidlertid med skadeomfang på flata. For flater med 0-5% skadeomfang så var middeldiameteren på skadde trær 51% av middeldiameteren på alle trær. For flater med 5-10% skadeomfang så økte middeldiameteren til 94% og for skadeomfang >10% så økte den til 122%. Vi tolker den hyppige forekomsten av vindskader på løv- og småtrær som et delvis resultat av at store trær utenfor feltet har blåst ned og dratt småtrær med seg i fallet.

4.1 Geografisk fordeling

Skadene forekom noenlunde jevnt fordelt over hele landsdelen, men med noe høyere frekvens på Vestlandet, særlig for sterke snø- og vindskader registrert for bestandet (Fig. 5). Kartet viser hvordan

alle flatene er fordelt utover i et regulært nettverk på 3km x 3km, og alle flater med vind- og snøskader er framhevet med farge og økt størrelse. Hvis vi ser mer detaljert på dette, så var det for vindskader på flatene høyest frekvens på Vestlandet (10%), dernest Østlandet (8%), Agder (7%) og så lavest i Trøndelag (6%). For bestandsskade av vind var forskjellene større, med klart høyest forekomst på Vestlandet (1,3%) og i Trøndelag (1,1%), mens Østlandet hadde 0,6% og Agder bare 0,2%. For bestandsskader av snø var resultatene noe liknende, men med tyngdepunktet av skader flyttet til kyststrøkene lengre sør. Vestlandet og Agder hadde mest med henholdsvis 1,9 og 1,5%, fulgt av Østlandet (1,2%) og lavest i Trøndelag (0,5%).



Figur 5. Forekomst av vind og snøskader fra Landsskogtakseringen i registreringene fra 5-årsperioden 2011-2015. Svarte prikker angir flater uten skade, mens punkter med farge angir skadetype og skadeomfang.

4.2 Årsaksfaktorer

Vi presenterer her resultatene først for (a) vindskader på trær på de 250m² store flatene i Landsskogtakseringene, så for (b) vindskader i de bestandene som flatene ligger inne i, og til slutt (c) snøskader i disse bestandene. Forskjellen mellom punkt (a) og (b) er at det første er mer representativt for svake skader, mens det andre representerer sterkere skader, og årsaksfaktorene er noe forskjellig for de to.

4.2.1 Årsaksfaktorer

For de ulike forklaringsvariablene enkeltvis, så var det de skoglige variablene som forklarte mest av variasjonen i vindskade, og først og fremst bonitet, treslag og D/H-forhold (Fig. 6). Figuren er basert på alle vindskader registrert i siste 5-års periode. Men resultatene ble omtrent de samme når vi utelukket de svakeste skadene (0-5% av volumet) og for 5-årsperioden før.

Skadeforekomsten økte med volumandelen gran og løv på flata, og avtok med andelen furu. Skadeforekomsten var høyest på løvdominerte flater, etterfulgt av grandominerte, så blandede bestand, og var lavest på furudominerte flater. Det samme inntrykket får vi ved å se på treslaget for det høyeste treet på flata, - det vil si variabelen *S_maxtre_treslag*. Flater hvor det høyeste treet var et løvtre hadde høyest sannsynlighet for vindskade, etterfulgt av andre treslag ('X'), gran og så lavest for furu. Når det gjelder egenskaper ved trærne, så var det D/H-forholdet som gjorde sterkest utslag. Jo høyere D/H-forhold desto lavere sannsynlighet for vindfall. Det var et tilsvarende, men svakere utslag for hver av variablene diameter og høyde. Utslagene for maxtreets størrelse var de samme. Vindskadene økte med treantall og kubikkmasse. Flersjiktta skog hadde flere vindskader enn ensjiktta. Det var svake eller ingen utslag for hogst eller bestandskant.

Generelt var det svake eller ingen utslag for klimavariablene. Den sterkeste effekten var for relativ vindstyrke (*m5_vind_pros*). Det var her en positiv sammenheng. Det er grunn til å merke seg at det ikke var utslag for maksimal vindstyrke gjennom 5-års perioden (*m5_vind_max*). En tolkning av dette er at det er en herdingseffekt. Jo sterkere vind trærne er utsatt for desto mer tåler de, og det er derfor ikke nok å se på bare maksimal vindstyrke gjennom 5-års perioden.

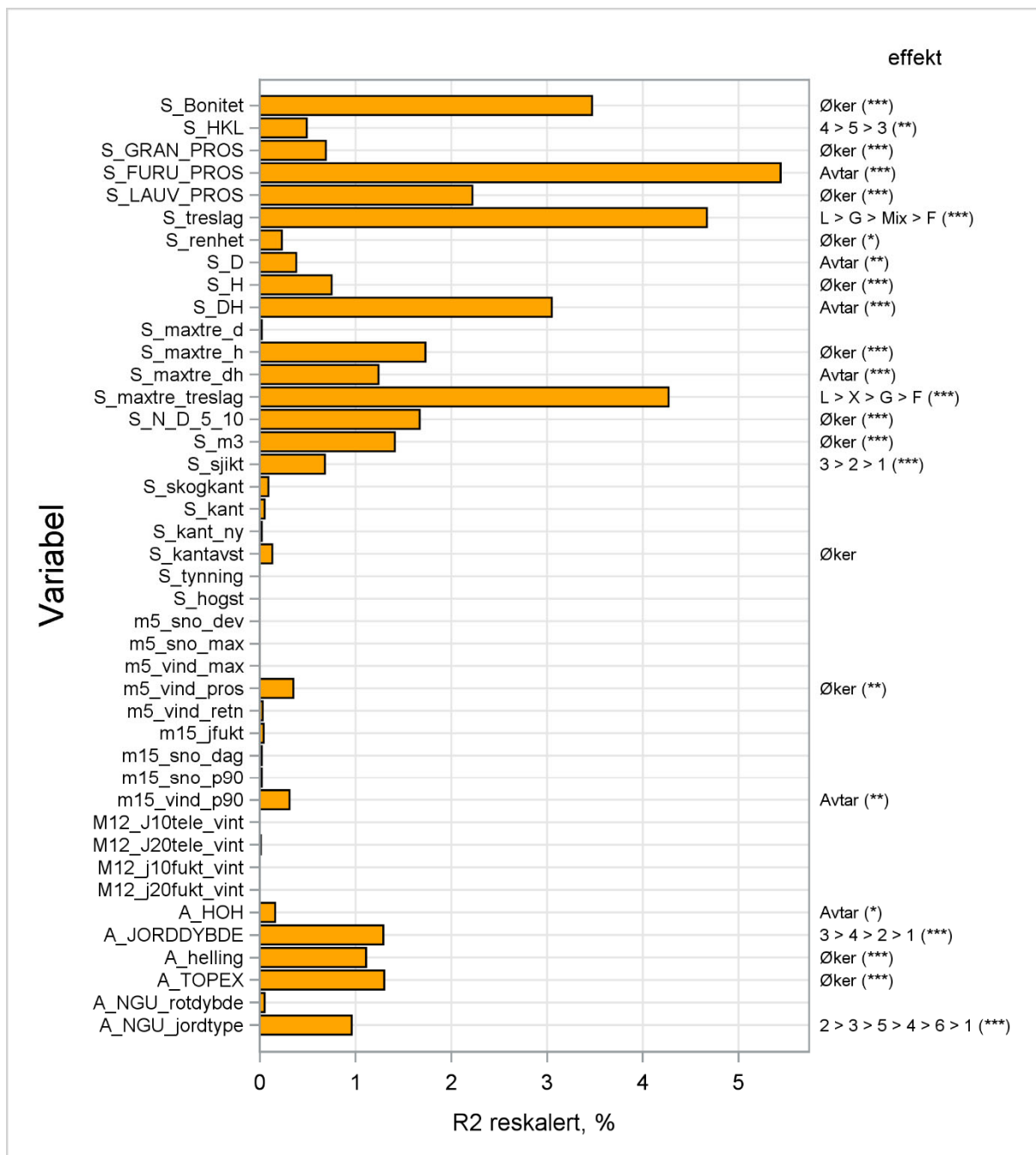
Skadefrekvensen avtok svakt med økende høyde over havet. Dette kan være en effekt av lavere trehøyder og mer herdige trær i fjellskogen.

Skadefrekvensen økte med jorddybde, med mest skader i klasse 3 og 4, som har jorddybder > 50 cm i mineraljord og ikke fjell i dagen. Dette var ikke som forventet, og kan være et utslag av at trærne på grunn jord blir herdet til å tåle moderat vindstyrke, og at de fleste skadene i dette datasettet skyldes vindepisoder med moderat vindstyrke. Dette kan også være en effekt av gjennomgående lavere trehøyder på grunt jordsmonn med lav bonitet. Basert på NGUs løsmassekart, så var det mest skader på marine avsetninger (2), etterfulgt av sand- og grusjord (3), bart fjell (5), bunnmorene (4), andre typer (6) og minst på torvmark (1). det var ingen utslag for potensiell rottybde.

Skadefrekvensen økte med terrengbratthet og avtok med topografisk eksponering (økte med økende TOPEX).

Resultatene var omtrent de samme for noe sterkere skader. Når vi kun tok med tilfeller med skadevolum over 5% ble resultatene omtrent like. For hogstklasse ble nå vindskadene hyppigst i hogstklasse 5, deretter 4 og så 3. For treslag ble det tilnærmet uendrede resultater. Blant klimavariablene ble den negative effekten av vindstyrke, det vil si 90-persentilen for vindstyrke gjennom 15 år (*m15_vind_p90*) ikke lenger var statistisk sikker. For jorddybde ble nå rekkefølgen $4 > 3 > 2 > 1$, det vil si at sannsynligheten for vindfall økte med økende jorddybde.

Resultatene over er basert kun på siste 5-års periode (registreringsår 2011-2015). Resultatene var omtrent like for 5-års perioden før, men med noen forskjeller. Hogstklasse og antall sjikt slo nå ikke ut. For jordtyper ble rekkefølgen $2 > 3 > 6 > 1 > 4 > 5$.



Figur 6. Effekten av hver forklaringsvariabel separat for vindskade på flata. Søylenes lengde angir styrken på sammenhengen ved den reskalerte R²-verdien. I kolonnen til høyre er retningen på sammenhengen angitt for kontinuerlige variable, og rangeringen av klasseverdier for klassevariabler. Dette er kun angitt for variabler som var statistisk sikre, det vil p<0,10 (ingen stjerne), p<0,05 (*), p<0,01 (**), og p<0,001 (***)

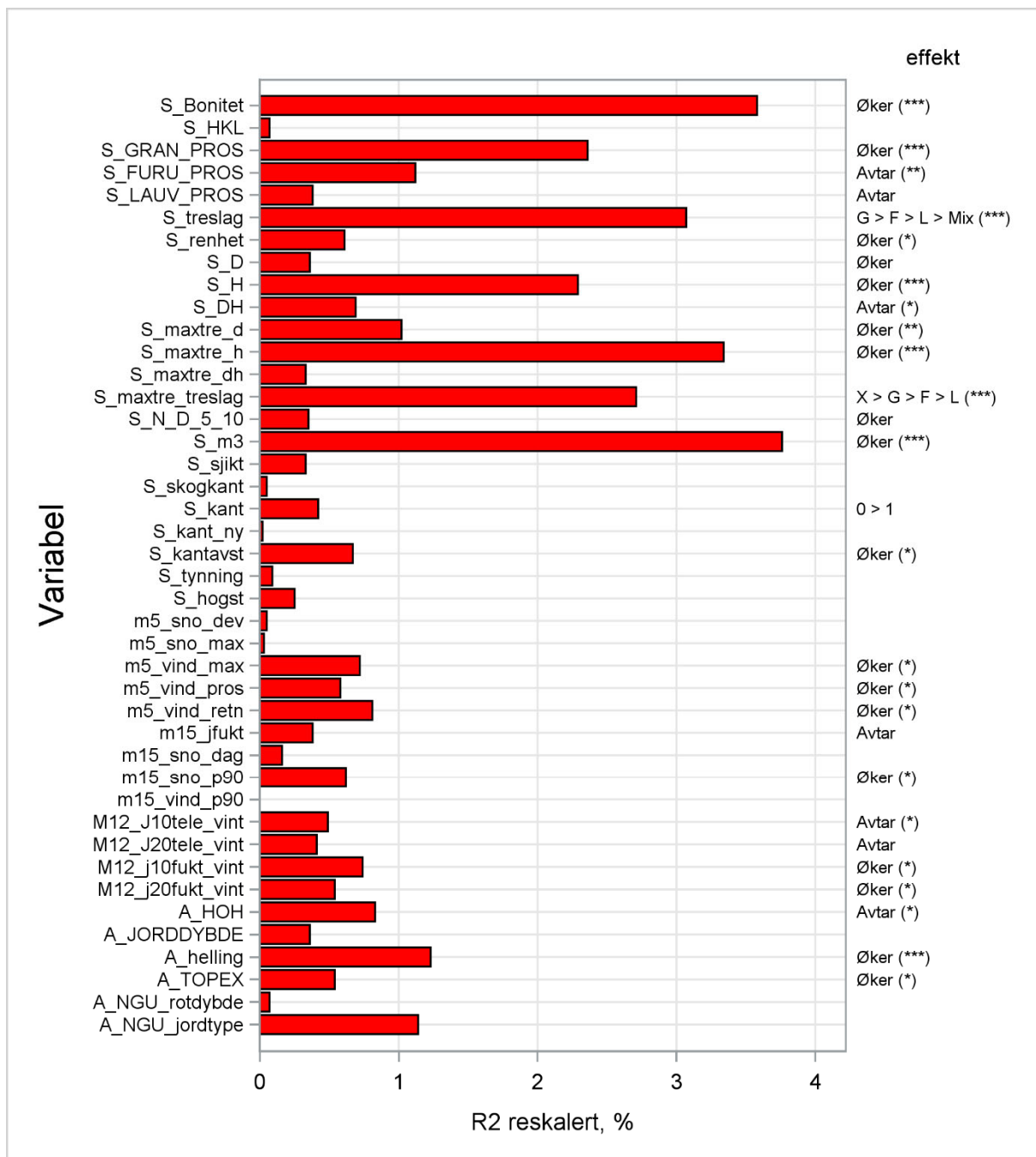
En stegvis regresjon for hver av de to siste 5-årsperiodene, og så en sammensatt modell for hele 15-årsperioden endte vi opp med hovedsakelig skoglige forklaringsvariabler (Tabell 5). Dette var hovedtreslag, hogstklasse, bonitet, trehøyde, kubikkmasse, samt tynning i forrige 5-års periode. I tillegg slo terrenghelling ut. Variabelutvalget var forskjellig for de to periodene, og generelt synes det vanskelig å få en entydig utvelgelse av årsaks-variabler.

Tabell 5. Modell for vindskader på flatene basert på stegvis regresjon. Kun nskader > 5% av volumet er tatt med

Effekt	F-Verdi	Pr > F	Parameter-estimat	Skadefrekvens ...
Konstantledd			-0.01952	
S_treslag	6.91	0.0001	Furu -0.00196 Gran -0.00108 Blanding 0 Løv 0.01385	Lavest i furuskog, høyest i løvskog
S_HKL	5.68	0.0001	2 -0.01386 3 -0.01327 4 -0.00455 5 0 1 0.01349	Øker med økende utviklingstrinn (hogstklasse 1 og 2 er overstandere)
S_Bonitet	29.87	<.0001	0.002122	Øker med bonitet
S_maxtre_h	6.80	0.0091	0.000103	Øker med høyde på høyeste tre
S_tynning	4.20	0.0404	0.01784	Øker hvis det har vært tynna i forrige 5-års periode
A_helling	15.32	<.0001	0.000246	Øker med terrengbratthet
S_m3	5.22	0.0223	-0.00004	Avtar med kubikkmasse

4.3 Vindskade i bestand

Resultatene for vindskader registrert i de bestand (1 daa nivå) som Landsskogtakseringens flater ligger i var i hovedtrekk sammenfallende med resultatene over (Fig. 7). Men det var noen forskjeller. For treslag var det nå ikke lauvtrær, men gran som hadde høyest skadefrekvens. Det var også sterkere utslag for de meteorologiske variablene, det vil si 5-årsperiodens maksimum vindstyrke, maksimum vindstyrke i prosent av 90-persentilen for vindstyrke gjennom 15 år, og avviket fra dominerende vindretning for hendelsen med maksimum vindstyrke. For tele og jordfuktighet om vinteren, var resultatet en tendens til at skadene økte med økende antall dager med tele, og avtok med jordfuktighet om vinteren. Vi regner med at disse skadene som er registrert som vindskader av observatørene hovedsakelig har vært rotvelt. Disse sistnevnte resultatene er ikke i tråd med det man kunne forvente, og dette kan indikere problemer med korrelasjon mellom ulike variabler, og dermed spuriose korrelasjoner.



Figur 7. Effekten av hver forklaringsvariabel separat for vindskade i bestandet. Søylenes lengde angir styrken på sammenhengen ved den reskalerte R²-verdien. I kolonnen til høyre er retningen på sammenhengen angitt for kontinuerlige variable, og rangeringen av klasseverdier for klassevariabler. Dette er kun angitt for variabler som var statistisk sikre, det vil p<0,10 (ingen stjerne), p<0,05 (*), p<0,01 (**), og p<0,001 (***)

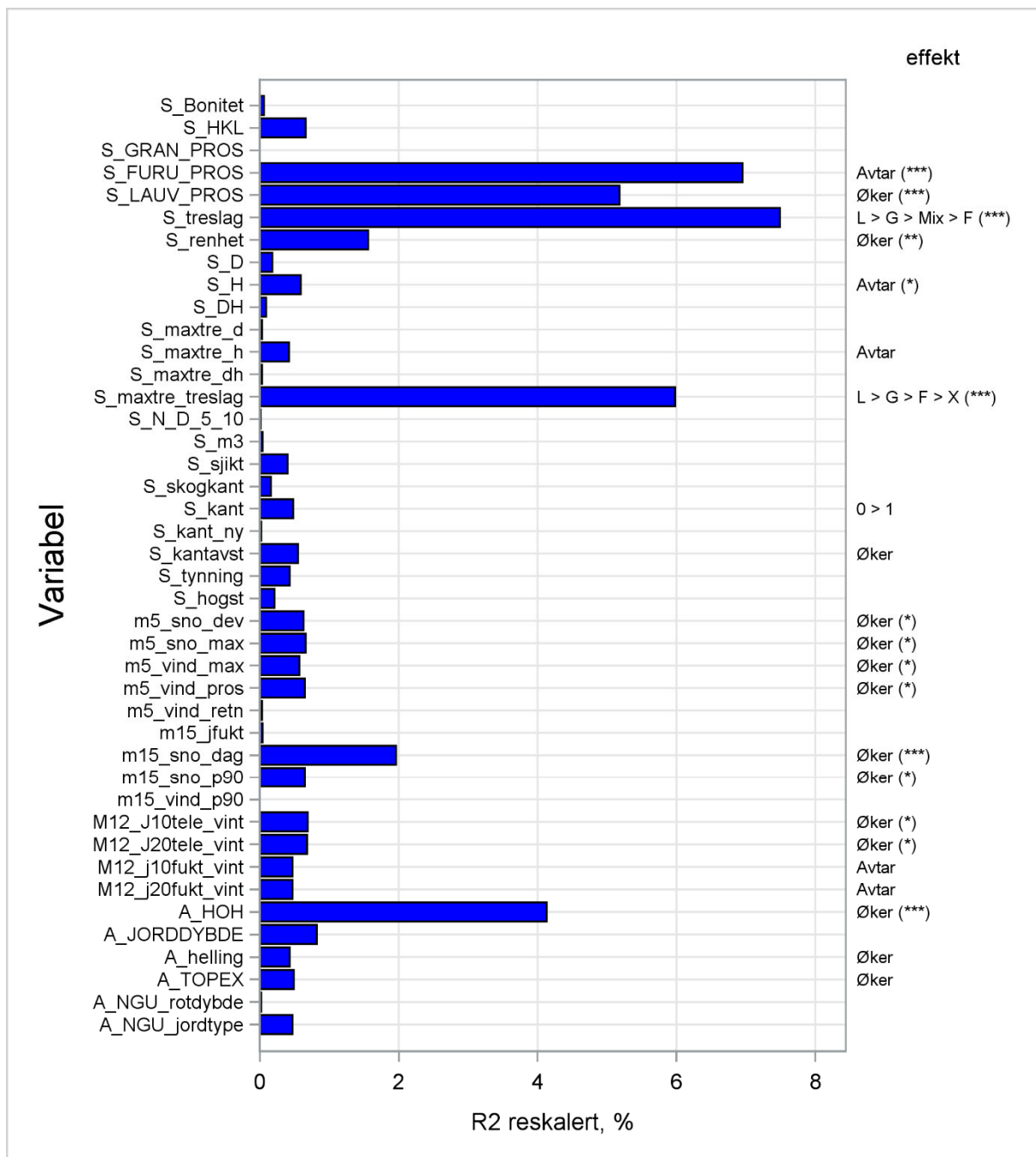
Den multivariate modellen her inneholdt også delvis de samme variablene som for vindskader i prøveflata (Tabell 6). De skoglige variablene var hovedtreslag, bonitet og høyde. Nå slo også to meteorologiske variabler ut, det vil si avvik fra dominerende vindretning ved den sterkeste vindstyrken gjennom 5-årsperioden, samt maksimum vindstyrke i perioden.

Tabell 6. Modell for vindskader i bestand basert på stegvis regresjon

Effekt	F-Verdi	Pr > F	Parameter- estimat	Skadefrekvens ...
Konstantledd			-0.04580	
S_treslag	4.81	0.0024	Løv -0.00071 Blanding 0 Furu 0.001170 Gran 0.007071	Lavest i løvskog, høyest i granskog
S_Bonitet	8.68	0.0032	0.000644	Øker med bonitet
S_maxtre_h	38.63	<.0001	0.000112	Øker med høyde på høyeste tre
m5_vind_retn	14.78	0.0001	0.000049	Øker med avvik i vindretning mellom i 5-årsperiodens max-vind og dominerende vindretning
m5_vind_max	19.85	<.0001	0.001257	Øker med maksimal vindstyrke i 5-årsperioden
A_helling	20.09	<.0001	0.000200	Øker med terrengbratthet

4.4 Snøskader (bestand)

Snøskadene var i hovedsak styrt av treslag, med sterke skader i løvskog og svake skader i furuskog (Fig. 8). Videre var det tydelig at snøskadene økte med høyde over havet. For øvrig var sammenhengene svake. Det var utslag for noen meteorologiske variabler, som antall våtsnø-dager per år i gjennomsnitt for 15 år, og maksimal mengde våtsnø på én dag gjennom 5-årsperioden.



Figur 8. Effekten av hver forklaringsvariabel separat for snøskade i bestandet. Søylenes lengde angir styrken på sammenhengen ved den reskalerte R²-verdien. I kolonnen til høyre er retningen på sammenhengen angitt for kontinuerlige variable, og rangeringen av klasseverdier for klassevariabler. Dette er kun angitt for variabler som var statistisk sikre, det vil p<0,10 (ingen stjerne), p<0,05 (*), p<0,01 (**), og p<0,001 (***)

I den multivariate analysemodellen fikk vi resultater som samsvarte med resultatene for enkeltvariabler (Tabell 7).

Tabell 7. Modell for snøskader i bestand basert på stegvis regresjon

Effekt	F-Verdi	Pr > F	Parameter-estimat	Skadefrekvens ...
Konstantledd			-0.00161	
S_treslag	12.25	<.0001	Furu -0.00694 Blanding 0 Gran 0.000081 Løv 0.01108	Lavest i furuskog, høyest i løvskog
S_Bonitet	14.99	0.0001	0.001040	Øker med bonitet
S_kant	9.25	0.0024	-0.00550	Øker med avstand til kant
m12_j10tele_vint	13.82	0.0002	-0.00038	Avtar med tele i øverste jordlag
A_HOH	73.06	<.0001	0.000050	Øker med høyde over havet
A_TOPEX	7.26	0.0071	0.000613	Øker med TOPEX
m15_sno_dag	6.53	0.0106	0.001073	Øker med antall våtsnødager per år

4.5 Hovedmodell

Vi har laget en hovedmodell, ut fra en del kriterier. Den er basert bare på bestandsskader, det vil si ikke på skader registrert på flatene. Grunnen til dette er at skadene på flatene i stor grad ser ut til å fange opp enkeltrær og til dels småtrær, og dette har mindre konsekvenser og mindre interesse. Vi har også slått sammen vind- og snøskader til en felles variabel. En grunn til dette er at slike skader ofte er et resultat av både snø og vind. Videre er det slik at det i landsskogtakseringens data er tre variabler, det vil si vindskader, snøskader og kombinerte vind- og snøskader. Ved å slå dette sammen til en variabel får en også vektlagt de skadene som opptrer mest hyppig, og det er vindskadene, fordi det er flere registreringer av dette. Det kan også føyes til at tiltakene i skogbehandlingen for å forebygge vind- og snøskader er like, og går i begge tilfeller ut på langsiktig oppbygging av enkeltrestabilitet, unngå reduksjon i sosial stabilitet gjennom seine tynninger, og for øvrig unngå å etablere svake bestandskanter ved sluttavirkning.

Vi har i denne modellen redusert antall kandidat-variabler. For en anvendelse av modellen, så vil det være en fordel at den kun inneholder variabler som er tilgjengelig heldekkende over Norge, eller ventes å bli det i løpet av få år.

Når det gjelder skogdata, så tenker vi særlig på SR16 datasettet over Norge. Vi har da begrenset skogvariablene som er tilgjengelig for en risikomodell til treslag og trehøyde, og dette er svært aktuelle variabler for en risikomodell. Vi har også her tatt med D/H-forholdet, som i mange studier er vist å spille en viktig rolle for trærnes stabilitet mot vind- og snøskader. Det er mulig at en variabel som D/H-forholdet vil bli lagt inn i SR16 etterhvert. Dersom man vil bruke modellen for prediksjon av skader, og man ikke har tilgang til D/H-forholdet, så kan man bruke middelveidien på 1,51.

Når det gjelder topografiske variable så har vi tatt med høyde over havet, helling og TOPEX, som alle er basert på data som er generert i den nasjonale terrengmodellen.

For jordvariablene, så er det NGUs løsmassekart som er tilgjengelig heldekkende for Norge både for dybde og jordtype.

Når det gjelder klimadataene, så har vi her kun tatt med de langsiktige variablene som i større grad beskriver klimaet på et gitt sted, enn variablene som beskriver de enkelte 5-årsperioder. De siste er i stor grad et resultat av ekstreme storm- og snøhendelser, og disse er mindre representative for et gitt

sted. Vi har altså tatt med klimavariablene som gjelder for hele 15-årsperioden fra NORA_BC, og for 12-årsperioden fra HCLIM.

Den endelige modellen var langt på veg styrt av treslag og høyde over havet (Tabell 8). Vi ser at disse hadde høye F-verdier og var statistisk sikre på 0,0001-nivå. Når det gjelder treslag så var det lavest sannsynlighet for skader i furudominert skog og høyest i løvtredominert. Når det gjelder høyde over havet, så økte sannsynligheten for skader med denne variabelen. Dette betyr at det særlig er høytliggende løv- og granskog rundt Langfjella som har høyest sannsynlighet for skader som vist i kartet (Fig. 9). I Det grandominerte området fra Vestfold og innover i landet over Oppland har en noe forhøyet sannsynlighet for skader.

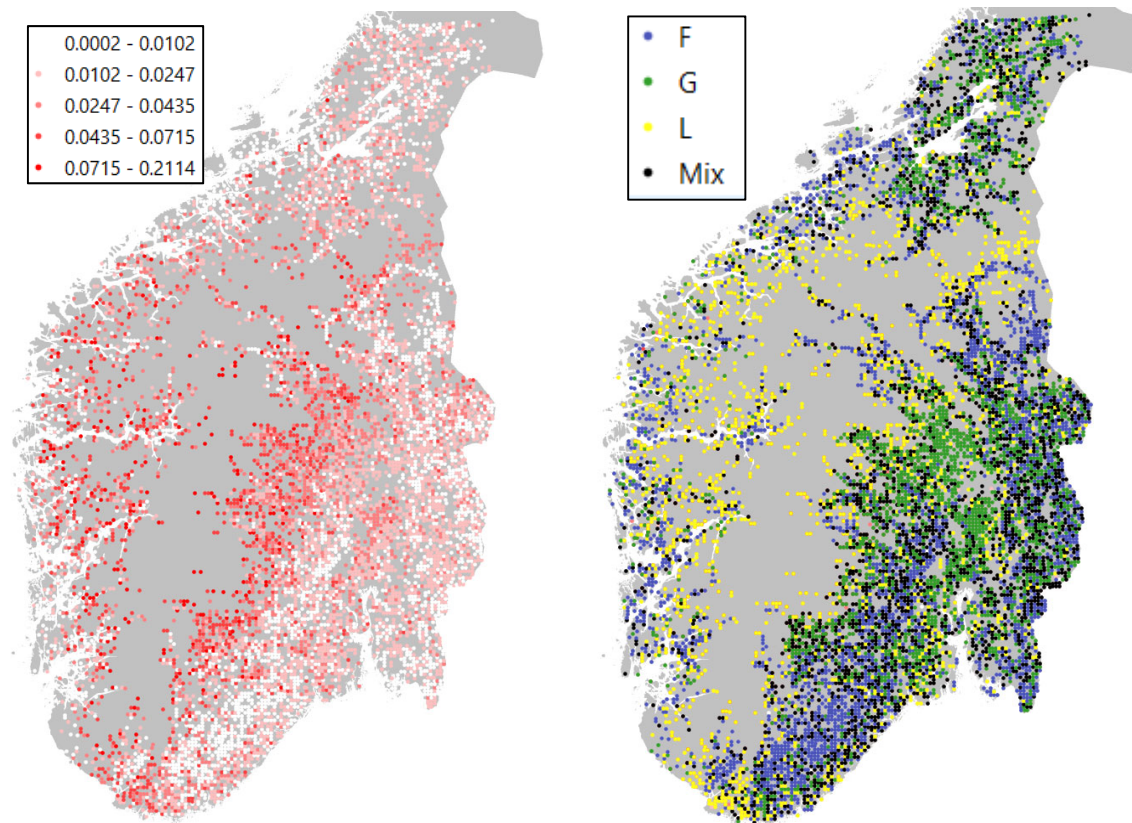
Modellens andre variabler gir økt sannsynlighet for skader når trærne er høye og har lavt D/H-forhold. Dette stemmer bra med litteraturen, som ofte viser stor effekt av trehøyde og D/H-forhold.

Vestlandet hadde også generelt en høy sannsynlighet for vind- og snøskader, og det kan skyldes flere forhold. Modellen predikerte høyere skadegrad i bratt terreng og på skjermede lokaliteter (høy TOPEX). Det siste kan virke overraskende, men dette kan tilskrives at det generelt er mye skader på Vestlandet og her er TOPEX høy fordi det ofte er fjell i nærheten. Generelt var Topex lavere på Østlandet, som har mindre topografi. Dette indikerer at Topex har begrenset verdi som forklaringsvariabel for undersøkelser over en så stor del av landet, og at den egner seg bedre for lokale studier.

Det var en klimavariabel som ble med i modellen og det var gjennomsnittlig jordfuktighet 10cm nede i jorda om vinteren (desember-februar). Denne variabelen kunne erstattes med antall dager tele i samme jordsjikt (m12_j10tele_vint), og de samme variablene 20cm nede i jorda. Alle disse fire variablene var sterkt korrelert. Dette kan gjenspeile dårlig rot-forankring gjennom vinteren, når jorda er våt og uten tele. Dette er ofte situasjonen på Vestlandet.

Tabell 8. Hovedmodell felles for vind og snøskader

Effekt	F-Verdi	Pr > F	Parameter-estimat	Skadefrekvens ...
Konstantledd			-0.02014	
S_treslag	22.19	<.0001	Furu -0.00876 Blanding 0 Gran 0.009486 Løv 0.01884	Lavest i furuskog, høyest i løvskog
S_H	9.05	0.0026	0.000091	Øker med trehøyde
S_DH	4.75	0.0294	-0.00625	Avtar med d/h-forhold
m12_j10fukt_vint	13.20	0.0003	0.02961	Øker med fuktighet i øverste jordlag om vinteren
A_HOH	51.31	<.0001	0.000049	Øker med høyde over havet
A_helling	10.35	0.0013	0.000232	Øker med bratthet på terrenget
A_TOPEX	5.56	0.0184	0.000733	Øker med Topex



Figur 9. Predikert sannsynlighet for vind- og snøskader (venstre). Modellen er i hovedsak styrt av høyde over havet og treslag, og treslagsfordeling på Landsskogtakseringens flater i siste 5-års periode er vist (høyre).

5 Case-studie: Skader av Dagmar-stormen 26/12-2011 på Romerike

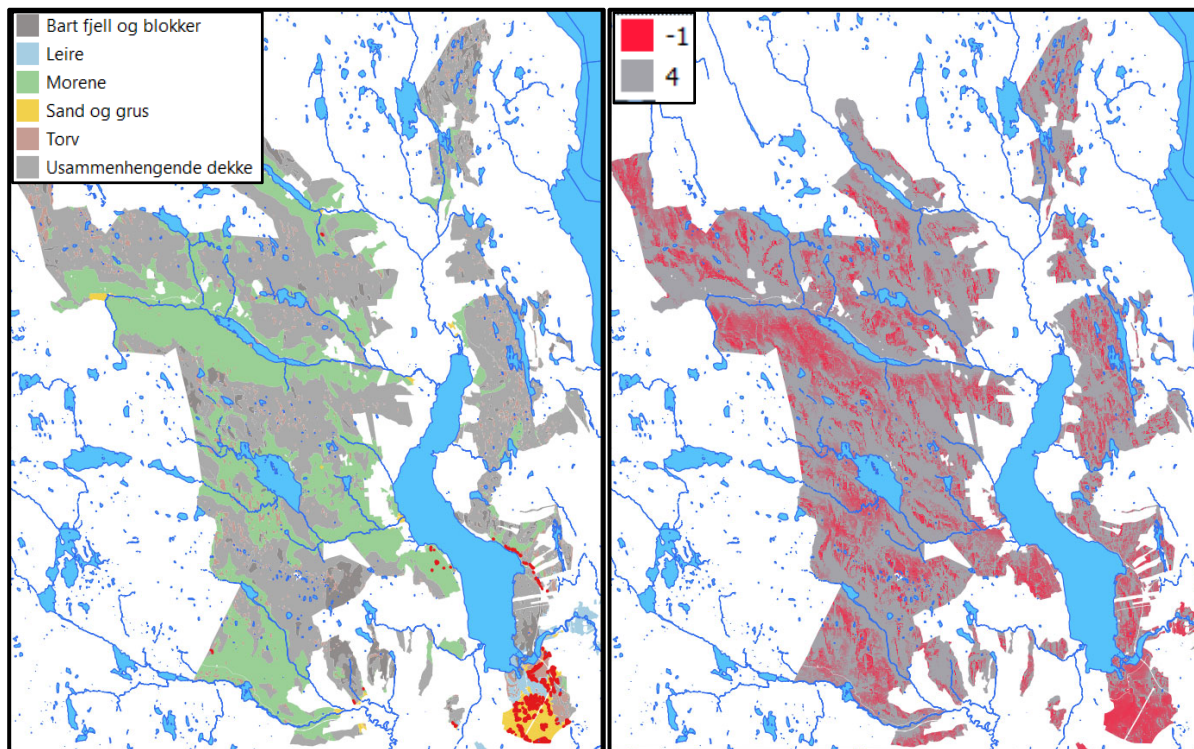
Vi har supplert analysen basert på Landsskogtakseringens data med en case-studie basert på stormskader under stormen Dagmar i 2011, i en stor skogeiendom (Mathiesen Eidsvold Værk, MEV) hovedsakelig i Hurdal og Eidsvold. Skogeier gjorde her en grov kartlegging av stormskadene. Vi har etablert et datasett ved å rastre hele området til 16m x 16m ruter, og for hver rute legge inn både om det var stormskade der (ja / nei) og en rekke risikofaktorer knyttet til skoglige, topografiske og jordbunnsmessige forhold. Disse risikofaktorene samsvarte med de vi brukte for Landsskogtakseringens data. De skoglige faktorene ble tatt fra skogbruksplanen til MEV, og de ble framskrevet fra tidspunktet da flydataene for planen ble tatt opp og til tidspunktet for Dagmar basert på modellert tilvekst og data om tynnings- og sluttavvirkingshogst i perioden. Totalt ble dette 1,4 millioner ruter, og vi valgte tilfeldig ut kun 5% av rutene for å unngå naboskapseffekter mellom naboruter. Dersom vi hadde brukt alle rutene ville mange av dem ikke være ekte gjentak, eller uavhengige observasjoner i statistisk forstand, fordi naboruter ofte er svært like. Vi ville da fått for mange frihetsgrader på feilslaget, og feilaktig hypotesetesting av ulike faktorenes betydning. Vi fikk statistisk sikre utslag for trehøyde (grunnflateveiet middelhøyde), for Topex og for løsmassestype. Jo høyere trær, desto høyere sannsynlighet for stormskade. Jo mer topografisk eksponert (lav Topex) ei rute var, desto høyere sannsynlighet for stormskade. Og sannsynligheten for stormskade var lavest på bunnmorene som er den vanligste løsmasse-kategorien i området, og høyest for kategorien sand og grus (Tabell 9). Ved å øke antall ruter høyere enn 5% så var den neste variabelen som kom med TOPEX_VEST, dvs topografisk eksponisjon mot vest. Dagmar kom fra vestlig retning.

Tabell 9. Resultater for Dagmar-stormens risikofaktorer i MEVs skog

Effekt	F-Verdi	Pr > F	Parameter-estimat	Skadefrekvens ...
Konstantledd			-0.0056	
S_H	88.05	<.0001	0.0017	Øker med trehøyde
A_TOPEX	11.39	0.0007	-0.0011	Avtar med Topex
A_NGU_jordtype	170.76	<.0001	bunnmorene -0.010 bart fjell -0.0093 torv -0.00063 annet 0 marin 0.035 sand/grus 0.19	Var lavest på bunnmorene og høyest på sand/grus

Tolkningen av resultatene er usikker, fordi det aller meste av stormskadene skjedde i den sørligste delen av området, hvor vi både hadde en spesielt lav Topex-verdi og hvor løsmasser av sand/grus var dominerende. I figur 10 ser vi at omtrent alt av skader (rød farge) var konsentrert her, hvor vi har Hauerseier-avsetningen med sitt glasifluviale materiale dominert av sand og stedvis rullesteinsgrus med uvanlig mektighet (dyp jord). Forankringsmulighetene for trærne burde være uvanlig bra her med den djupe jorda, og undersøkelser har vist at gran og fururøtter her ofte går djupe enn 1,5 m ned, og ble påvist ned til 3 m dyp (Bjørn and Huse 1988). Årsaken til alle stormskadene her synes derfor å være at skogen er eksponert for vind. De lave Topex-verdiene skyldtes at vi har dette store, flate området uten noen skjermende terrenghøyder. Særlig er det tilfelle mot vest der vinden kom fra.

Skogstrukturen her er også et typisk bestandsskogbruk, med bestand av ulike aldre og hogstklasser, noe som gir eksponerte skogkanter. Det er også en del skogkanter mot infrastruktur her, - både veier og kraftlinjer. Visuelle analyser av skadenees fordeling på satellittbilder (TanDEM-X) viste også kanteffekter.



Figur 10. Skader etter Dagmar-stormen i MEVs skog omkring Hurdal (med Hurdalssjøen) og Eidsvold. *Venstre:* Registrerte stormskader etter Dagmar (rød farge) lagt på NGUs løsmassedata, som viser at skadene i det alt vesentlige var lokalisert til Haurseteravsetningen sør for Hurdalssjøen og i figuren er angitt som kategorien sand og grus (gul farge). *Høyre:* Topex-verdier, hvor rød farge angir områder som er topografisk eksponert for vind. Skadeområdet på Haurseteravsetningen er det mest topografisk utsatte området (lav Topex-verdi). Rektangelet er 30km x 37km.

6 Diskusjon

Generelt var det svake statistiske sammenhenger mellom potensielle årsaksfaktorer og omfanget av skade, og flere årsaksfaktorer som er kjent fra litteraturen slo ikke ut. Likevel er resultatene langt på veg i samsvar med det som er funnet i andre studier. De skoglige variablene dominerte, mens effekten av klimatiske forhold var så svake at denne studien ikke gir noen indikasjon på hvordan skadeomfanget vil påvirkes av klimaendringer.

6.1 Det statistiske problemet med herding

En generell svakhet ved å benytte et datasett basert på skadeobservasjoner i naturen, er at årsaksfaktorer kan skjules av skogens herding mot vind- og snøskader, og til dels også hogst og fjerning av skadd skog. Alternativet til slike datasett er eksperimenter, men det er vanskelig å gjennomføre for store trær og ulike voksestedforhold. Vi må regne med at skog som vokser på utsatte lokaliteter blir herdet mot skader, og at den derfor tåler belastning av vind- og snøkrefter bedre enn skog på lite utsatte lokaliteter. Som vist i resultatene så er dette datasettet dominert av svake skader, og derfor kan herdingseffekten langt på veg skjule hvilke egenskaper ved et voksested som øker sannsynligheten for skader. Dette problemet med datasettet kan også forsterkes gjennom skogbehandlingen, dels ved at man fjerner skadde trær slik at disse skadene ikke blir registrert, og dels ved at man på utsatte lokaliteter prøver å forebygge skader for eksempel ved sterk avstandsregulering, ved å unngå tynning, og ved å være forsiktig med etablering av nye kanter. Herding består i at trærne registrerer graden av belastninger, og at de tilpasser seg voksesteder med mye vind- og snøkrefter gjennom økt diametervekst, økt rotvekst, tennardannelse og i ekstreme tilfeller også redusert høydevekst. Dette kalles også thigmomorfogenese (Telewski and Jaffe 1986). Dette er også studert i Sverige, og et særlig viktig funn har vært at trærne ser ut til å kunne herde seg ved å registrere belastningene også om vinteren (Valinger et al. 1995). Vi har i denne studien forsøkt å redusere denne svakheten i datasettet ved å utelukke svake skader fra analysene. Likevel regner vi med at effekten av topografisk eksposisjon (Topex) og dårlig forankring på grunt jordsmonn i liten grad har blitt fanget opp i analysene på grunn av herding. Man får dermed ikke identifisert risikofaktorer som bør legges til grunn ved langsiktige skjøtselstiltak som ungsogpleie.

Man kunne tenke seg at man kunne unngå problemet, ved kjøre statistiske analyser uten å ta med egenskaper i den eksisterende skogen, og på den måten identifisere risikofaktorer for voksestedet i seg sjøl. Det er imidlertid ikke mulig, fordi de skadedataene som ligger i Landsskogtakseringens database er et resultat av den skogen som er der, og denne skogen er tilpasset og herdet til voksestedet. Det er altså ikke mulig å skille risikofaktorene knyttet til voksestedet fra risikofaktorer knyttet til skogen på stedet. Dette er en uunngåelig konsekvens av å basere forskningen på naturobservasjoner i stedet for eksperimenter.

6.2 Problemet med 5-års perioder mellom hver registrering

Skaderegistreringen tilstreber å fange opp alle skader som har skjedd siden forrige registrering 5 år tidligere, men sannsynligvis så er dette ikke mulig. Særlig i tilfeller der skogen har fått sterke skader og hele bestanden er avvirket, så vil observatøren registrere stubber og hogstavfall uten at vind- eller snøskader kan fastslåes. Dette problemet er mindre i de tilfeller der skadene er svake, og dette bidrar derfor til at datasettet har en overrepresentasjon av svake skader. En konsekvens av dette er at resultatene får noe redusert verdi som basis for tilpasninger i skogbehandlingen.

6.3 Skoglige forhold

Blant årsaksfaktorene dominerte de skoglige faktorene, og da særlig treslag, høyde og D/H-forhold. Dette kan indikere at vind-, topografi- og jordvariablene våre ikke har vært i stand til å fange opp slike andre forhold tilstrekkelig nøyaktig.

6.3.1 Treslag

Furu var minst skadd av vind og snø, mens gran og løvtrær var mest skadd. Gran og løvtrær kom samlet sett ganske likt ut, men nærmere ettersyn viser at gran var mest utsatt for sterke vindskader, mens løvtrær var mest utsatt for svake vindskader og snøskader. Disse resultatene var gjennomgående for alle analysene. Dels kom dette fram ved å se på effekten av ulike hovedtreslag, og dels ved å se på effekten av økende andel av de ulike treslagene. Resultatene stemmer overens med andre studier, hvor bartrær og særlig gran er utsatt for stormskader (Valinger and Fridman 2011). Ser vi på tabellene for kritisk vindstyrke hos Peltola et al. (2000), så har gran 15% lavere kritisk vindstyrke enn furu og bjørk med blader. At furu er mindre utsatt for vindskader enn gran, tolker vi som et resultat av at furu har et relativt større rotsystem enn gran, og at dette er en grunnleggende forskjell mellom disse treslagene. Men denne tolkningen er noe usikker. Tolkningsproblemet består i å skille mellom treslagenes genetisk styrte egenskaper og ulikheter i deres typiske voksested. Furu finnes både på grunn og djup jord, som sand- og grusavsetninger, mens gran finnes oftere på tynt jordsmonn samt på marine avsetninger med høy grunnvannstand og dårlig forankring (Persson 1975). Gran har et rotsystem som er tilsynelatende grunt og flatt fordi man tydelig ser de horisontale røttene i jordoverflata, mens den egentlig har djuptgående røtter der det er mulig. Stabiliteten til gran er ofte funnet å være dårlig i undersøkelser, men det skyldes i mange tilfeller at gran ofte vokser på fuktig eller tett jord hvor rotsystemet blir gruntliggende. Gran har imidlertid en del egenskaper som gjør den utsatt for vindskader. Den har et stort vindfang ved at krona er lang og tett, og den har ofte råteangrep i rotsystem og stamme. Furu derimot har mindre vindfang og angripes sjelden av råte.

Det er overraskende at løvtrær kommer ut med mye skader her, og dette er ikke i tråd med hva man har funnet i Sverige. I tabellene til Peltola et al. (2000) er det for øvrig stor forskjell på bjørk med og uten blader, og man regner gjerne at vindfanget på løvtrær reduseres med 90% når de feller bladene. På denne bakgrunn er det overraskende at løvtrær er så ofte rammet av vind- og snøskader, som jo inntreffer oftest vinterstid. Det har i denne studien ikke vært mulig å vite om de aktuelle skadene har skjedd med eller uten blader på løvtrærne, ettersom vi bare vet hvilken 5-års periode det har skjedd. Våre resultater her står også i kontrast til andre studier, der løvtrær er funnet å være mindre utsatt enn bartrær for stormskader (Mayer et al. 2005). Vi regner med at forklaringen på at vi har mye skader på løvtrær i denne studien er dels at løvtrær er heliotropiske og ofte har usymmetriske kroner og ikke en loddrett gjennomgående stamme. Til dels tror vi det skyldes også at datasettet domineres av svake skader, og mange små løvtrær kan blir registrert som vind- og snøskadd ved at de blir revet med når større trær rotvelter. I en del tilfeller kan løvtrær ha blitt revet med av større trær som rotvelter eller brekker, og dette fenomenet er observert på landsskogtakseringens flater. I tillegg kommer at vi i Norge har relativt mye løvtrær i områder som er utsatte for sterk vind og mye snø, som på Vestlandet og i høyereliggende strøk.

6.3.2 Høyde

Trehøyde slo ut som forklaringsvariabel for vindskader, men ikke snøskader. Jo høyere trær desto mer vindskader. Dette resultatet gjaldt både for høyden på volummiddeltreet og høyden på det høyeste treet. Indirekte kan trehøyde også være forklaringen på at skadegrad generelt økte med hogstklasse og bonitet. Det er intuitivt og åpenbart at høye trær er mer utsatt for vindskader enn små trær, og slik sett trenger vi ikke en statistisk analyse for å forstå dette. Det bør imidlertid bemerkes at ungskog ikke var med i denne studien, slik at resultatene er funnet for et noe begrenset spenn i trehøyde. Vi har i datasettet kun hatt trær fra hogstklasse 3-5, samt en del felt i hogstklasse 1 og 2 hvor trehøyde er målt på overstandere fra forrige tregenerasjon. At trehøyde er en viktig risikofaktor er vist i en rekke studier (Blennow and Sallnas 2004; Foster and Boose 1992; Gardiner et al. 2008; Hale et al. 2015; Lanquaye-Opoku and Mitchell 2005; Valinger and Fridman 2011).

6.3.3 D/H-forhold

For vindskader så økte skadeomfanget med avtakende D/H-forhold, mens det ikke var noe utslag for dette når det gjaldt snøskader. D/H-forholdet er en velkjent indikator for enkelttre-stabilitet, og det

representerer dels trestammens styrke, og dels representerer det indirekte rotsystemets størrelse (Nørgård-Nielsen 2001). Som kjent er trærnes høydevekst tilnærmet uavhengig av bestandstetthet, mens trærnes diameter- og rotvekst avhenger sterkt av tetthet. Trær som har hatt mye plass gjennom hele livet utvikler grove stammer og store rotsystemer, og de kjennetegnes ved høyt D/H-forhold. D/H-forholdet betydning for trærnes stabilitet mot vind- og snøskader er dokumentert i mange studier (Peltola et al. 1999; Seidl et al. 2014; Wonn and O'Hara 2001). I studien til Wonn and O'Hara (2001) ble et D/H-forhold på 1,25 (cm/m) funnet å veldig klart skille skadde fra uskadde trær av ulike treslag etter en storm.

6.3.4 Skogbehandling

Skog som nylig har vært tynnet eller satt igjen i ny kant etter snauhogst er særlig utsatt for vindskader (Blennow and Sallnas 2004; Suvanto et al. 2016; Talkkari et al. 2000; Valinger and Fridman 2011; Zeng et al. 2007), fordi dette bryter ned bestandets sosiale stabilitet (Nørgård-Nielsen 2001). Vi fant imidlertid bare delvis støtte for dette i denne undersøkelsen. Et resultat som var i tråd med andre undersøkelser var at sannsynligheten for vindskader på flatene økte dersom tynning hadde vært foretatt i forrige 5-års periode. Men når det gjaldt vind- og snøskader i bestand var det ingen effekt. Det var generelt en svak tendens i denne studien til at skadeomfang var lavere i en kant enn ikke i kant, og at det økte med økende avstand til kant. Vi tolker dette som et utslag av herding, ved at trær som står i kant ofte har stått slik i lang tid og har blitt herdet, og en slags utvalgsbasert herding ved at svake trær i slike kanter har blåst ned tidligere. Selv om vi forsøkte å fange opp nye skogkanter i datasettet, så ble resultatet det samme.

6.3.5 Skogstruktur

Skogstruktur gav kun svake utslag i analysene, og det er ingen entydig og enkel sammenheng mellom skogstruktur og slike skader. For vindskader på flatene var det en tendens til at skadene økte med antall sjikt, det vil si mest skader i fler-sjikta skog, deretter to-sjikta og så minst skader i ensjikta skog. For vindskader og snøskader i bestand var det ingen slik tendens. Litteraturen på området kan virke forvirrende, fordi noen studier viser mer skader i flersjikta skog og noen studier viser det motsatte. Dette kan skyldes at en flersjikta skog har oftere og svakere skader, mens en ensjikta skog har sjeldnere, men sterkere skader (Persson 1975). Forklaringen på dette kan være at man i flateskogbruket med ensjikta skog stadig har nye skogkanter som er særlig utsatte for skader, mens man i et skogbruk av typen Continuous Cover Forestry (CCF) stadig eksponerer nye og uherdede enkelttrær for vind.

En annen skogstruktur-variabel var treslags-renhet, og der var det en tendens til at både vind- og snøskader økte med økende renhet. Det kan altså se ut til at blandingsskog ha noe lavere sannsynlighet for vind- og snøskader. Det har vært hevdet at innblanding av løvtrær i en barskog hemmer herdingen av bartrærne (Nørgård-Nielsen 2001). En slik 'herdingsblokkering' kan forklares ved at om sommeren mens lauvtrærne har løvet på så vil de skjerme bartrærne for vind, slik at bartrærne ikke får et tydelig 'vind-signal' som input til herdingen, og de blir dermed ekstra utsatte om vinteren da lauvtrærne står uten blader. Dette er imidlertid noe usikkert, ved at Valinger et al. (1995) har påvist at trærne også oppfatter herdings-signaler under vinterhvilten, og dessuten har Valinger and Fridman (2011) også funnet at innblanding av løvtrær i granskog har gitt færre vindskader.

6.4 Meteorologiske forhold

Generelt var det svake sammenhenger mellom skadeforekomst og meteorologiske variabler, men resultatene var i hovedsak i tråd med det man kan forvente. Frekvensen av vindskader økte når det i 5-års perioden hadde vært sterk vind, eller sterk vind i forhold til vanlig på stedet, eller sterk vind fra uvanlig retning på stedet. Disse variablene er beregnet som maksimal vindstyrke, maksimal vindstyrke i forhold til 90-percentilen for 15 årsperioden, og som vinkelforskjellen mellom 5-års periodens sterkeste vind og dominerende vindretning for 15-års perioden. Dette indikerer dels at sterk vind øker frekvensen av skader, og dels at trærne herdes ut fra vindklimaet på stedet. Disse resultatene

ble funnet i flere beregninger, både for enkeltvariabler og for en multivariat modell for vindskade på bestand. Resultatene ble imidlertid ikke funnet i den multivariate modellen for vindskader på flate, og heller ikke i samlemodellen for vind- og snøskader, og dette svekker resultatet noe.

Resultatene indikerte at både vind- og snøskader øker dersom jorda er telefri og våt om vinteren. Dette samsvarer med et eksperiment med vanning og effekten på stabilitet (Kamimura et al. 2012), med at høytstående grunnvannsspeil øker sannsynligheten for rotvelt (Persson 1975), at antall dager med tele i januar-mars påvirker stormskader (Lagergren et al. 2012), og at skadeomfang ved orkanen Fran i USA økte med nedbørmengde (Xi et al. 2008). Resultatene våre kan derfor indikere at klimaendring vil øke forekomst av vind- og snøskader ved at trærnes forankring i bakken blir lavere om vinteren. Det kan nevnes at stormen Gudrun som rammet Sverige med omfattende stormfelling i januar 2005 kom etter 2 uker med regn, slik at trærnes forankring var svært lav i forhold til det som er vanlig i januar. Om våre resultater representerer en årsakssammenheng er imidlertid usikkert, dels fordi det ikke var konsistente resultater mellom analysene for enkeltvariabler og for en multivariat modell når det gjaldt snøskader. Usikkerheten skyldes også at jordtemperatur og jordfuktighet var variabler basert i stor grad på modellering og i liten grad på målinger, og vi må regne med at de er korrelert med andre egenskaper på et voksested slik som høyde over havet og graden av kystklima på stedet.

Sammenhengen mellom våt jord og forankring er imidlertid mer komplekst ved at det avhenger av kornstørrelse (Persson 1975). I følge ham så er det riktig at våt jord reduserer forankringen dersom jorda er finkornet, mens det er omvendt for grovkornet jord. Skille skal gå mellom de svenske jordtypebegrepene «finmo» (silt) og «grovm» (finsand).

Generelt er det sannsynlig at en romlig oppløsning på 2,5 km for vinddata er for grovt til å fange opp stormskader, fordi maksimal vindstyrke kan variere mye innenfor 2,5 km. Dette er særlig tilfelle i Norge med vår topografi. Vår idé har imidlertid vært at stor-skala variasjoner i vindstyrke fanges opp av vindvariablene, mens Topex skulle fange opp de lokale effektene av topografi. Topex har imidlertid den begrensningen at den ikke fanger opp le-effekter i bratt terreng og turbulens. Samlet sett har derfor slike studier som dette en begrensning når det gjelder å fange opp helt lokale effekter av vind.

6.5 Jordbunnsmessige forhold

Det var ingen klare utslag av jordbunnsforhold. For vindskader på flatene så var det en tendens til at de økte med jorddybde og mulighet for djup rotforankring, samt at det var mest skader på marine avsetninger, etterfulgt av sand- og grusjord, bart fjell, bunnmorene og minst på torvmark. Dette var også i store trekk resultatet fra case-studien etter stormen Dagmar. Samlet sett så er dette til dels motsatt av det man kan forvente, men igjen så kan disse resultatene forklares ut fra at datasettet er dominert av svake skader og da kan herding av trær på utsatte lokaliteter skjule risikofaktorene. Mayer et al. (2005) argumenterer med at trær som vokser på steinete og grunt jordsmonn har en bedre forankring, fordi røttene da ofte vokser inn i sprekker i berggrunnen. Dette samsvarer imidlertid ikke helt med gjennomgangen av årsaksfaktorer av Persson (1975), som hevder at det er mer vindskader på torvmark, podsolfjord og grunt jordsmonn hvor rotsystemet er overfladisk. Mayer et al. (2005) sier også at finkornet jord, særlig leire, har sterkere kohesive og adhesive krefter og dermed bedre forankring, men igjen stemmer dette ikke med våre resultater.

6.6 Hellingende terreng

Både vind- og snøskader økte med økende terrenghelling. Det er imidlertid usikkert om dette representerer en årsakssammenheng. For en gitt storm så vil eksponeringen avhenge av et samspill mellom helling og eksposisjon, slik at bratt terreng som vender mot vindretningen blir eksponert mens bratt terreng som vender vekk fra vindretningen blir lite utsatt (Foster and Boose 1992). I kontrast til våre resultater

Motsatt ble det etter Lothar-stormen funnet mest skader ved svak helling, og det ble tolket som et resultat av dårligere drenering og dermed grunnere rotsystemer på slike steder (Mayer et al. 2005).

Også i en metastudie er det funnet mer vindskader ved lav hellingsgrad (Lanquaye–Opoku and Mitchell 2005).

6.7 Høyde over havet

For vindskader var det ingen klar effekt av høyde over havet, - kun en veldig svak tendens til mest skader i lavlandet. Vindstyrken øker klart med høyde over havet, men på den annen side så avtar trehøyde og trærne får en kraftigere herding mot vind i fjellstrøkene. For snøskader, derimot, var det i dette datasettet en klar økning med høyde over havet.

6.8 Topex

Selv om Topex gir et uttrykk for vindutsatthet, så er det ikke alltid slik at risikoen for vindskader er høyest på vindutsatte steder. I stor grad vil en urørt skog bli herdet på vindutsatte steder, ved at den blir kortvokst og får store diametere og store rotsystemer. Ofte har vi gammel furu med høy enkelttre-stabilitet på slike steder, og den vil tåle mye vind og vil også tåle hogst og utlegging av nye kraftgater. Imidlertid kan vi ha andre treslag eller andre aldersklasser på slike steder, og det er da viktig å ha en skogbehandling med sterk vekt på stabilitet. I case-studien etter stormen Dagmar fant vi imidlertid en sterk sammenheng mellom sannsynlighet for skader og Topex, - til dels også med Topex mot vestlig retning, og der vindretningen var fra vest. Flere studier av stormskader har funnet en sammenheng mellom Topex og skaderisiko. På baksida av bratte åser kan vi få turbulens, som kan slå ned og gi høy vindstyrke på små områder. Vi får da gjerne grupper av nedblåste trær. Slik turbulens treffer svært tilfeldig og er vanskelig å gardere seg mot. Det er også svært vanskelig å skille en effekt av topografisk eksponering fra en effekt av jordbunnsforhold, fordi det er en sterk sammenheng mellom disse to egenskapene (Persson 1975). Dette var også tilfelle i vår case-studie etter stormen Dagmar.

Idéen i denne studien har vært at stor-skala variasjoner i vindstyrke fanges opp av vindvariablene som er griddet med en oppløsning på 2,5 km, mens Topex skulle fange opp de lokale effektene av topografi. Topex er beregnet med en romlig oppløsning på 10 m, og tar altså hensyn til topografien i opptil 1 km avstand. Det er mulig at vi kunne ha forbedret resultatene ved å utvide Topex-beregningen fra maksimalt 1 km til for eksempel maksimalt 2,5 km. Dette kan være noe å undersøke nærmere i seinere prosjekter.

6.9 Effekt av klimaendring

I klimaendringsscenariene for Norge er det kun ventet en liten endring i vindstyrke og frekvensen av sterk vind. Dette er imidlertid usikkert, særlig fordi vi har to klimaendringmekanismer som går i diametralt forskjellige retninger. På den ene siden vil klimaendringene føre til høyere lufttemperatur og med dette mer energi i atmosfæren, og dette vil tilsi mer vind. På den annen side vil oppvarmingen som følger med klimaendringene være sterkest ved polene og svakest ved ekvator. Dette gjør at temperaturgradienten mellom polene og ekvator blir svakere, og denne svakere gradienten tilsier mindre vind.

Sterk vind og den dominerende vindretningen vil i våre områder i stor grad være knyttet til lavtrykk. Det er usikkerhet rundt hvor lavtrykksbanene kommer til å gå i et fremtidig klima, noe som gjør det vanskelig å vurdere hvordan vindstyrke og dominerende vindretning vil endre seg.

En side av klimaendringene som har fått økt oppmerksomhet i seinere år er at værtypene blir mer stabile. Det kan bety at også værtyper som fører til snø- og vindskader kan bli mer langvarige, og slik sett føre til mer skader. Været vil ha lettere for å 'henge seg opp' (Coumou et al. 2014). Årsaken er at skillet mellom kald luft ved polene og varmere luft nærmere ekvator vil bli svakere, og at jetstrømmen får større amplituder og beveger seg saktere. Både den langvarige perioden med tung, våt snø i Vestfold og Telemark vinteren 2018 og den langvarige tørkesommeren i Sør-Norge 2018 er satt i mulig sammenheng med denne effekten.

Når det gjelder snøskader så vil vi trolig se at omfanget av dette vil avta mye på Vestlandet, men at skadeområdet vil flytte seg innover i landet og høyere opp mot fjellet. Vi kan derfor vente at høytliggende skogområder på østsida av Langfjella i Buskerud og Oppland vil få mer skader. Oppland har også en høy andel granskog, og dette kan ytterligere bidra til dette.

6.10 Statistiske analyse

I de endelige modellene forekom hver flate med gjentatte registreringer i tid, og disse gjentatte registreringene er ikke fullverdige gjentak i en statistisk modell. Vi har likevel behandlet dem som fullverdige gjentak, fordi det reduserte beregningstida vesentlig. Vi har imidlertid kjørt noen av de endelige beregningene med modellering av den avhengigheten som er mellom gjentatte observasjoner, ved å inkludere estimering av en varians-kovarians modell for slike gjentak som en tilfeldig effekt. Som ventet gav hypotesetestingen for hver enkelt forklaringsvariabel noe høyere signifikans når vi utelot denne tilfeldige effekten. Men det var liten forskjell, og vi har vurdert det til å ha ingen nevneverdig effekt på de endelige resultatene. Som eksempel kan nevnes at effekten av hellingsgrad endret P-verdi fra 0.0238 til 0.0333 når vi tok med den tilfeldige effekten av gjentatte registreringer.

6.11 Konklusjon

Landsskogtakseringens data for vind- og snøskader var dominert av svake skader, og til dels skader på småtrær og løvtrær. Dette, sammen med at flere av forklaringsvariablene trolig har for lav romlig oppløsning, samt at det må være mange tilfeldigheter og ukjente forhold som har betydning for vind- og snøskader, har gjort at sannsynligheten for vind- og snøskader kun i liten grad kunne forklares ut fra skoglige, topografiske, jordbunnsmessige og klimatiske forhold. Likevel, skoglige forklaringsvariabler dominerte i de statistiske analysene. Resultatene indikerte at både enkelttre-stabilitet og sosial stabilitet spiller en rolle. Ut fra dette bør en videreføre anbefalinger om å utføre ungsogpleie for å øke D/H-forholdet samt være forsiktig med seine tynninger. Resultatene gir imidlertid ingen klare funn når det gjelder hvilke voksesteder som vil være særlig utsatte for slike skader, men granskogområdene på Østlandet, og særlig høytliggende områder synes å være ekstra utsatte særlig for snøskader med de ventede klimaendringene.

Resultatene for de topografiske variablene tilsa økt risiko med økende høyde over havet. Topografisk eksponerte områder (lav Topex) var mest utsatte for skader etter stormen Dagmar, men generelt i Landsskogtakseringens vind- og snøskade-data så slo Topex svakere ut og til dels i omvendt retning, og det kan skyldes mange svake skader og herdingeffekten på trær på utsatte lokaliteter.

Enkelte klimatiske variabler som høy vindstyrke, avvik fra dominerende vindretning, mye våt snø og våt jord uten tele vinterstid kunne forklare noe av variasjonen i sannsynlighet. De statistiske sammenhengene var svake, og de var dessuten ustabile ved at alternative, multivariate statistiske modeller med stegvist utvalgte variabler ble forskjellige. Når ulike perioder ble kjørt, så endte modellene med ulike variabler. Resultatene stemte i en del tilfeller verken med det man skulle forvente eller med det som er funnet i andre studier. Vi tolker dette som et resultat av (i) kollinearitet mellom variabler og dermed spuriøse korrelasjoner, (ii) at årsaksforholdene er forskjellige for svake og sterke vind- og snøhendelser, og (iii) at trærne tilpasser seg forholdene gjennom herding slik at årsakssammenhengene kan virke omvendt av hva man skulle forvente. Dataene for vindstyrke er usikre, og kan ha litt for liten romlig oppløsning (2,5 km) til å fange opp lokale skader. Men vi mener at en slik oppløsning får med seg hovedtrekkene i vindklimatologien, og særlig på Østlandet.

Etterord

Arbeidet som presenteres i denne rapporten er en del av forskningsprosjektet Wind, Ice and Snow Load Impacts on Infrastructure and the Natural Environment (WISLINE), som er finansiert Forskningsrådet (Project 244106/E10). Vi takker Mathiesen Eidsvold Værk (MEV) for tilgang til skogbruksplandata. Takk til to kolleger ved NIBIO, - Clara Anton Fernandez som har framskrevet enkelttredataene i case-studien til tidspunktet for stormen Dagmar og til Eva Solbjørg Flo Heggem som har laget figurene 1 og 5. Kollega Rune Eriksen takkes for uttak og preparering av data fra Landsskogtakseringens database.

Litteraturreferanser

- Bengtsson, L., Andrae, U., Aspelien, T., Batrak, Y., Calvo, J., de Rooy, W., Gleeson, E., Hansen-Sass, B., Homleid, M., & Hortal, M. (2017). The HARMONIE–AROME model configuration in the ALADIN–HIRLAM NWP system. *Monthly Weather Review*, *145*, 1919-1935
- Bjor, K., & Huse, M. (1988). Variations in ground water level at the field station Nordmoen, Romerike (Variasjoner i grunnvannsnivå ved Nordmoen feltstasjon, Romerike). *Meddelelser fra norsk institutt for skogforskning*, *41.38*, 543-554
- Blennow, K., & Sallnas, O. (2004). WINDA - a system of models for assessing the probability of wind damage to forest stands within a landscape. *Ecological Modelling*, *175*, 87-99
- Bonelli, P., Lacavalla, M., Marcacci, P., Mariani, G., & Stella, G. (2011). Wet snow hazard for power lines: a forecast and alert system applied in Italy. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, *11*, 2419-2431
- Coumou, D., Petoukhov, V., Rahmstorf, S., Petri, S., & Schellnhuber, H.J. (2014). Quasi-resonant circulation regimes and hemispheric synchronization of extreme weather in boreal summer. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *111*, 12331-12336
- Dobler, A., Haugen, J.E., & Mc Innes, H. (2019). HCLIM-NORWAY – A 13 year long convection permitting climate simulation covering the Norwegian main land. Evaluation report, The Norwegian Meteorological Institute report ISSN 2387-4201
- DSB (2014). Nasjonalt risikobilde 2014. Tønsberg. Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap
- Foster, D.R., & Boose, E.R. (1992). Patterns of Forest Damage Resulting from Catastrophic Wind in Central New England, USA. *Journal of Ecology*, *80*, 79-98
- 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: An International Journal of Forest Research*, *81*, 447-463
- Gardiner, B., Schuck, A.R.T., Schelhaas, M.-J., Orazio, C., Blennow, K., & Nicoll, B. (2013). *Living with storm damage to forests*. European Forest Institute Joensuu
- Granhus, A., Hysten, G., & Ørnelund Nilsen, J.-E. (2012). Skogen i Norge. Statistikk over skogforhold og skogressurser i Norge registrert i perioden 2005-2009. In (p. 85): Norsk institutt for skog og landskap
- Haakenstad, H., & Haugen, J.E. (2017). A 15-year high resolution meteorological dataset for risk assessment in southern Norway. *METreport. Norwegian Meteorological Institute*, *5/2017*
- Hale, S.E., Gardiner, B., Peace, A., Nicoll, B., Taylor, P., & Pizzirani, S. (2015). Comparison and validation of three versions of a forest wind risk model. *Environmental Modelling & Software*, *68*, 27-41
- Kamimura, K., Kitagawa, K., Saito, S., & Mizunaga, H. (2012). Root anchorage of hinoki (*Chamaecyparis obtuse* (Sieb. Et Zucc.) Endl.) under the combined loading of wind and rapidly supplied water on soil: analyses based on tree-pulling experiments. *European Journal of Forest Research*, *131*, 219-227
- Lagergren, F., Jönsson, A.M., Blennow, K., & Smith, B. (2012). Implementing storm damage in a dynamic vegetation model for regional applications in Sweden. *Ecological Modelling*, *247*, 71-82
- Lanquaye-Opoku, N., & Mitchell, S.J. (2005). Portability of stand-level empirical windthrow risk models. *Forest Ecology and Management*, *216*, 134-148
- Mayer, P., Brang, P., Dobbertin, M., Hallenbarter, D., Renaud, J.-P., Walthert, L., & Zimmermann, S. (2005). Forest storm damage is more frequent on acidic soils. *Ann. For. Sci.*, *62*, 303-311
- Nagelkerke, N.J. (1991). A note on a general definition of the coefficient of determination. *Biometrika*, *78*, 691-692
- Nygaard, B.E., & Fikke, S. (2012). Isstorm. Ising på kraftforsyningsnettet. In R. Steen (Ed.), *NVE rapport*. Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat
- Nørgård-Nielsen, C. (2001). Vejledning I styrelsen af stormfasthed og sundhed i nåletræbevoksninger. *Dansk Skovbrugs Tidsskrift*, *4/01*, 216 – 263
- Peltola, H., Kellomäki, S., Vaisanen, 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-Revue Canadienne De Recherche Forestiere*, *29*, 647-661
- Peltola, H., Kellomäki, S., Hassinen, A., & Granander, M. (2000). Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland. *Forest Ecology and Management*, *135*, 143-153
- Persson, P. (1975). *Stormskador på skog : uppkomstbetingelser och inverkan av skogliga åtgärder*. Stockholm

- Potocic, N., Timmermann, V., & Ognjenovic, M. (2018). Tree crown condition in 2017. *Forest Condition in Europe: 2018 Technical Report of ICP Forests* (pp. 38-52): BFW Austrian Research Centre for Forests Vienna
- Reistad, M., Haakenstad, H., Furevik, B., & Haugen, J.E. (2015). NORA10 - Final report 2015. The atmospheric part. Norwegian DeepWater Programme – report.
- Schelhaas, M.J., Nabuurs, G.J., & Schuck, A. (2003). Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. *Global Change Biology*, 9, 1620-1633
- Seidl, R., Rammer, W., & Blennow, K. (2014). Simulating wind disturbance impacts on forest landscapes: tree-level heterogeneity matters. *Environmental Modelling & Software*, 51, 1-11
- Solberg, S., Heggem, E.S.F., Søvde, N.E., & McInnes, H. (2017). Skogbehandling langs kraftlinjer. Teorigrunnlag. *NIBIO Rapport*
- Solberg, S., & Tajet, H.T.T. (2018). Snøskader på trær langs kraftledninger. In, *NIBIO POP* (p. 6)
- Steen, R., Nygaard, B.E.K., & Fikke, S. (2012). *Isstorm : ising på kraftforsyningsnettet*. Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat
- Suvanto, S., Henttonen, H.M., Nöjd, P., & Mäkinen, H. (2016). Forest susceptibility to storm damage is affected by similar factors regardless of storm type: Comparison of thunder storms and autumn extra-tropical cyclones in Finland. *Forest Ecology and Management*, 381, 17-28
- Talkkari, A., Peltola, H., Kellomäki, S., & Strandman, H. (2000). Integration of component models from the tree, stand and regional levels to assess the risk of wind damage at forest margins. *Forest Ecology and Management*, 135, 303-313
- Telewski, F.W., & Jaffe, M.J. (1986). THIGMOMORPHOGENESIS - THE ROLE OF ETHYLENE IN THE RESPONSE OF PINUS-TAEDA AND ABIES-FRASERI TO MECHANICAL PERTURBATION. *Physiologia Plantarum*, 66, 227-233
- Timmermann, V., Andreassen, K., Brurberg, M.B., Clarke, N., Herrero, M.-L., Jepsen, J.U., Solheim, H., Strømeng, G., Talgø, V., Vindstad, O.P.L., Wollebæk, G., Økland, B., & Aas, W. (2018). Skogens helsetilstand i Norge. Resultater fra skogskadeovervåkingen i 2017. In (p. 86): NIBIO
- Valinger, E., & Fridman, J. (2011). Factors affecting the probability of windthrow at stand level as a result of Gudrun winter storm in southern Sweden. *Forest Ecology and Management*, 262, 398-403
- Valinger, E., Lundqvist, L., & Sundberg, B. (1995). MECHANICAL BENDING STRESS APPLIED DURING DORMANCY AND (OR) GROWTH STIMULATES STEM DIAMETER GROWTH OF SCOTS PINE-SEEDLINGS. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere*, 25, 886-890
- Viken, K.O. (2018). *Landsskogtakseringens feltinstruks 2018. NIBIO bok 4(6): 1-214.*
- Wonn, H.T., & O'Hara, K.L. (2001). Height:diameter ratios and stability relationships for four northern Rocky Mountain tree species. *Western Journal of Applied Forestry*, 16, 87-94
- Xi, W., Peet, R.K., Decoster, J.K., & Urban, D.L. (2008). Tree damage risk factors associated with large, infrequent wind disturbances of Carolina forests. *Forestry*, 81, 317-334
- Zeng, H., Talkkari, A., Peltola, H., & Kellomäki, S. (2007). A GIS-based decision support system for risk assessment of wind damage in forest management. *Environmental Modelling & Software*, 22, 1240-1249

Nøkkelord:	Skog, vindskader, snøskader
Key words:	Forest, wind and snow damage

Norsk institutt for bioøkonomi (NIBIO) ble opprettet 1. juli 2015 som en fusjon av Bioforsk, Norsk institutt for landbruksøkonomisk forskning (NILF) og Norsk institutt for skog og landskap.

Bioøkonomi baserer seg på utnyttelse og forvaltning av biologiske ressurser fra jord og hav, fremfor en fossil økonomi som er basert på kull, olje og gass. NIBIO skal være nasjonalt ledende for utvikling av kunnskap om bioøkonomi.

Gjennom forskning og kunnskapsproduksjon skal instituttet bidra til matsikkerhet, bærekraftig ressursforvaltning, innovasjon og verdiskaping innenfor verdikjedene for mat, skog og andre biobaserte næringer. Instituttet skal levere forskning, forvaltningsstøtte og kunnskap til anvendelse i nasjonal beredskap, forvaltning, næringsliv og samfunnet for øvrig.

NIBIO er eid av Landbruks- og matdepartementet som et forvaltningsorgan med særskilte fullmakter og eget styre. Hovedkontoret er på Ås. Instituttet har flere regionale enheter og et avdelingskontor i Oslo.