



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2022 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

Simulering av snøerosjon fra flate tak ved bruk av meteorologiske data

Simulation of snow erosion from flat roofs using
meteorological data

Vetle Kraft Talsnes
Byggeteknikk og arkitektur

Forord

Denne oppgaven markerer avslutningen på min mastergrad i byggeteknikk og arkitektur ved fakultetet for realfag og teknologi ved Norges Miljø- og Biovitenskaplige Universitet. Oppgaven utgjør 30 studiepoeng, og ble skrevet våren 2022. Arbeidet med denne oppgaven har vært krevende, men samtidig spennende og lærerrikt.

Uten inspirerende veiledning fra Professor Thomas Kringlebotn Thiis kunne ikke dette arbeidet blitt utført. Jeg vil takke for en detaljert innføring i oppgavens tematikker, samt alle kunnskapsrike tilbakemeldinger og støtte. En takk rettes også til Signe Kroken for tilgang til meteorologiske data fra NMBU sin feltstasjon.

Til slutt vil jeg rette en stor takk til kjæresten min for alle støttende ord under hele prosessen. Jeg vil også takke mine foreldre som har vært store støttespillere, helt siden jeg begynte på NMBU for snart 7 år siden.

Ås, mai 2022
Vetle Kraft Talsnes

Sammendrag

En av utfordringene med å beregne snølaster på tak, er å hensynta hvordan vinden påvirker snølasten. De fysiske prosessene som foregår i møtet mellom vind og snø er komplekse, noe som gjør det utfordrende å lage en universell modell for snøerosjon fra tak. Snølasten på tak påvirkes i stor grad av de meteorologiske variasjonene i omgivelsene. Ved hjelp av simuleringer med timesbasert meteorologisk inndata kan taksnølasten beregnes gjennom mange år, noe som gir grunnlag for mer presise estimater av dimensjonerende snølast. For å estimere den dimensjonerende snølasten trengs riktignok sammenhengende tidsserier for flere værparametre over mange år, noe som kun er tilgjengelig ved et fåtall værstasjoner. Et potensielt alternativ i denne sammenhengen er reanalyserte data, som er lett tilgjengelig i lange tidsserier, og som kan lastes ned for hvilket som helst område i verden. Hvilke implikasjoner det får å benytte slike data for beregning av snølaster på tak er det riktignok ikke gjort mye forskning på.

I denne masteroppgaven utvikles en modell for snøerosjon fra flate tak som hensyntar fysiske endringer i snøoverflaten. Modellen implementeres til et simuleringsprogram som beregner energi- og massebalansen i et endimensjonalt homogent snødekke. Videre simuleres snølast over 30 år for tre forskjellige områder i Norge, hvilket danner grunnlag for beregning av eksponeringskoeffisienten. Resultatene sammenliknes deretter med tilsvarende verdier beregnet i henhold til gjeldende og kommende europeisk snølaststandard, samt en alternativ snømodell. For å validere modellen, sammenliknes resultatene med et datasett bestående av snølastmålinger på tak utført i perioden 1966-1986. I simuleringene tas både reanalyserte og tradisjonelle meteorologiske data i bruk. I denne forbindelse, søker oppgaven å finne ut om reanalyserte data er egnet for å estimere eksponeringskoeffisienten.

Analysen i oppgaven indikerer at modellen gir representative verdier for eksponeringskoeffisienten. Modellen overestimerer C_e sammenliknet med NS-EN 1991-1-3, men antyder å gi samsvarende resultater som i den oppdaterte snølaststandard. Den presenterte valideringen viste svak korrelasjon mellom beregnet og målt eksponeringskoeffisient. Dataene antyder riktignok at de observerte snølastmålingene kan ha vært påvirket av varmetap gjennom taket, da målingene ble utført for mange år siden på takkonstruksjoner med antatt lav U-verdi.

Resultater fra sammenlikning av reanalyserte data med meteorologiske målinger viste at steder med store variasjoner i topografi og terrengruhet ga feilestimeringer for enkelte værparametre. Dette hadde innvirkning på beregnet eksponeringskoeffisient. På bakgrunn av dette indikerer resultatene at reanalyserte data mangler tilstrekkelig nøyaktig for å estimere eksponeringskoeffisienten.

Summary

One of the challenges in calculating snow loads on roofs is to take into account how the wind affects the snow load. The physical processes regarding wind-snow relations are complex, which makes it challenging to create a universal model for snow erosion from roofs. The snow load on roofs is influenced by the meteorological variations in the surroundings. Using simulations with hourly meteorological input, the snow load can be calculated over many years, which provides a basis for more precise estimates of the design snow load. However, in order to estimate the design snow load, continuous time series are needed for several weather parameters over many years, which is only available at a few weather stations. A potential alternative in this context is reanalysis data, which is easily available in long time series and can be downloaded for any area of the world. However, not much research has been done on the implications of using such data for calculating snow loads on roofs.

In this master's thesis, a model for snow erosion from flat roofs is developed. This model takes into account physical changes in the snow surface. The model is implemented in a simulation program that calculates the energy and mass balance in a one-dimensional homogeneous snow cover. Furthermore, snow load over 30 years is simulated for three different locations in Norway, which forms the basis for calculating the exposure coefficient. The results are then compared with corresponding values calculated in accordance with current and future European snow load standards, as well as an alternative snow model. To validate the model, the results are compared with a data set consisting of snow load measurements on roofs carried out in the period 1966-1986. In the simulations, both reanalysis and traditional meteorological data are used. In this connection, the thesis also seeks to explore whether reanalysis data are suitable for estimating the exposure coefficient.

The analysis in the thesis indicates that the model gives representative values for the exposure coefficient. The model overestimates C_e compared to NS-EN 1991-1-3, but suggests giving similar results as in the updated snow load standard. The presented validation showed a weak correlation between the calculated and measured exposure coefficient. However, the data suggest that the observed snow load measurements may have been affected by heat loss through the roof, as the measurements were carried out many years ago on roof structures with an assumed low U-value.

Results from the comparison of reanalysis data showed that locations with large variations in topography and terrain roughness gave incorrect estimates for some weather parameters. This had an effect on the calculated exposure coefficient. Based on this, reanalysis data are not considered to be sufficiently accurate to estimate the exposure coefficient.

Innhold

Forord	i
Sammendrag	iii
Summary	v
Innhold	vii
Figurer	xiii
Tabeller	xvi
Forkortelser	xvii
1 Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Forskningsspørsmål og problemstilling	2
1.3 Oppgavestruktur	2
2 Teori	3
2.1 Dimensjonering av vind- og snølaster	3
2.1.1 Eurokode 1 Del 1-3 (snølaststandard)	3
2.1.2 prEN 1991-1-3 (oppdatert snølaststandard)	5
2.1.3 Eurokode 1 Del 1-4 (vindlaststandard)	6
2.2 Vindteori	7
2.2.1 Skalaer i meteorologien	7
2.2.2 Vind i Norge	8
2.2.3 Lufttrykk	9
2.2.4 Vindprofiler	9
2.2.5 Vindstrukturer nær bakken	11
2.3 Snøteori	13
2.3.1 Snøens vannekvivalent	13
2.3.2 Densitet til snø	13
2.3.3 Metamorfose	14
2.3.4 Mekanismer for snøtransport	14
2.3.5 Friksjonshastighet	15
2.3.6 Terskelfriksjonshastighet	16

2.3.7	Drivsnødannelse	18
2.4	Modeller for beregning av snølaster på tak	18
2.4.1	Snøerosjon	18
2.4.2	Modelleringsmetoder	19
2.4.3	Erosjon og akkumulasjon på en snøoverflate	20
2.4.4	Snølastmålinger på tak	21
2.4.5	Studier av friksjonshastighet	23
2.5	Modelleringsverktøy	24
2.5.1	Snømodellering i ESCIMO.spread	24
2.5.2	ERA5-data	27
2.6	Statistiske prinsipper	27
2.6.1	Ekstremverdianalyse	27
2.6.2	Root mean square error (RMSE)	28
3	Metode	29
3.1	Validering	29
3.1.1	Utvelgelse av måledata	30
3.1.2	Datainnhenting og formatering	30
3.1.3	Validering av ERA5-data	33
3.1.4	Simuleringer	34
3.2	Langtidssimulering av snølast	34
3.2.1	Caseområder	35
3.2.2	Datainnhenting og formatering	35
3.2.3	Ruhetslengde og høyde over havet	37
3.3	Modellbeskrivelse	38
3.3.1	Grensebetingelser og konstanter	38
3.3.2	Simulering av snølast på mark	38
3.3.3	Simulering av snølast på tak	39
3.3.4	Implementering av erosjonsparametere	40
3.3.5	Alternativene	43
3.4	Eksponeringskoeffisienten	44
3.4.1	Beregning av eksponeringskoeffisienten	44
3.4.2	Beregning av 5-års returlast for normalperiode	45
3.4.3	Den dimensjonerende eksponeringskoeffisienten	46
3.4.4	Bestemmelse av terrengruhetkategori	46
4	Resultater	47
4.1	Validering	47
4.1.1	ERA5 vs. meteorologisk data	47
4.1.2	Simulering av snølast på mark	49

4.1.3	Simulering av snølast på tak	52
4.1.4	Eksponeeringskoeffisienten	54
4.2	Langtidssimulering av snølast	57
4.2.1	Ekstremverdianalyse snølast	57
4.2.2	ERA5 vs. meteorologisk data	57
4.2.3	Eksponeeringskoeffisienten	58
4.3	Ytelse av implementert modell	61
4.3.1	Variasjon i terskelfriksjonshastighet	61
4.3.2	Implementert modell vs. alternativ modell	63
5	Diskusjon	65
5.1	Validering	65
5.2	Langtidssimulering av snølast	70
5.3	Ytelse av implementert modell	76
5.4	Oppsummering	80
6	Konklusjon	83
6.1	Videre arbeid	84
	Referanser	85
	Vedlegg A	89
	Vedlegg B	91

Figurer

2.1	Sammenheng mellom formfaktorer for snølast og takvinkel (figur hentet fra Standard Norge, 2008, s. 14).	4
2.2	Variasjon av eksponeringskoeffisient, C_e , med månedlig gjennomsnittlig vindhastighet. De røde horisontale linjene angir gjennomsnitt og +/- ett standardavvik for C_e (hentet fra Thiis mfl., 2022).	6
2.3	Illustrasjoner av ulike terrengkategorier (hentet fra Standard Norge, 2009, med modifikasjoner av forfatter).	7
2.4	Gjennomsnittlig vindhastighet i januar for Sør-Norge. (hentet fra Thiis mfl., 2022).	8
2.5	Vindprofiler for overflater av ulik ruhet. U er vindhastigheten og U_G er hastigheten til geostrofisk vind (reprodusert fra Kind, 1981, med modifikasjoner av forfatter).	10
2.6	Strømningsmønstre i møte med en bygning. Figur (a) viser bygningen sett fra siden, figur (b) viser strømningsmønstre for samme bygningen sett i plan og (c) viser strømming sett i plan hvor bygningen er orientert 45° i forhold til vinden (Figur hentet fra Oke mfl., 2017)	12
2.7	Illustrasjon av erosjon av snø fra tak som følge av vind (reprodusert fra Qiang mfl., 2021, med modifikasjoner av forfatter).	19
2.8	Den balanserte formfaktoren som funksjon av takvinkel for målinger til Høibø (1989) (figur hentet fra Thiis og O'Rourke, 2015).	22
2.9	Distribusjonen av forholdet mellom friksjonshastigheten og vindhastigheten i byggets høyde. x representerer lengden fra lo side av taket (figur hentet fra Qiang mfl., 2021).	23
2.10	Forholdet mellom friksjonshastighet og vindhastighet i takhøyde som for bygg av forskjellig høyde med ulik vindinnfallsvinkel. NP = ingen parapet, P = parapet, U_{roof} = vindhastigheten i takhøyde (hentet fra Abediy, 2022)	24
3.1	Prosess for validering.	29
3.2	Lokasjoner for snølastmålingene utført av Høibø (1989).	30
3.3	Oversikt over alle bygninger med flate tak hvor snølastmålinger er utført.	31

3.4	Prosess for langtidssimulering.	34
3.5	Skjema for bestemmelse av regnpåvirkning.	41
3.6	Skjema for bestemmelse av terskelfriksjonshastighet	42
3.7	Den log-normaliserte regresjonslinjen for marksnølaster og returperioder for Tromsø, med data hentet fra ERA5 (laget med inspirasjon fra masteroppgaven til Krogsrud, 2021).	45
4.1	Punktdiagram med inputdata fra meteorologiske målinger og ERA5 for Vordersteinwald. Den rød stiplede linjen angir den lineært tilpassede kurven til punktene, og den blå linjen angir 1:1-forholdet mellom x- og y-aksen.	48
4.2	Variasjon av observert SWE og simulert SWE med ulike typer data i Vordersteinwald vintersesongen 12/13. De rød punktene angir observert snølast på mark (beregningene er basert på data fra Marke mfl., 2016).	49
4.3	Snøens vannekvivalent simulert med Escimo.spread(v2) vs. observert snøvannsekvivalent vinteren 12/13 i Vordersteinwald. Plot a) viser simulering med meteorologisk data, mens plot b) viser simulering med ERA5. Rød strek angir trendlinjen for punktene, mens stiplet strek angir identitetslinjen (illustrasjon laget med data og inspirasjon fra Marke mfl., 2016).	50
4.4	Variasjon i termisk stråling og nedbør for ulike datatyper under første akkumulasjonsperiode med snø 2.12 til 24.12.	51
4.5	Variasjon i fast og flytende nedbør samt modellert SWE for ulike datatyper under første akkumulasjonsperiode med snø 2.12 til 24.12. Linjediagrammene viser nedbør, mens skravuren i bakgrunnen viser SWE.	51
4.6	Snøens vannekvivalent på tak simulert vs. observert snøvannsekvivalent av Høibø (1989) for alle simuleringene.	52
4.7	Fordeling av målte og simulerte verdier for eksponeringskoeffisienten i valideringen.	55
4.8	Oversikt over alle simulerte eksponeringskoeffisienter samt beregnede C_e -verdier fra Høibø (1989) for Ås og Byflaten.	55
4.9	Sammenlikning av gjennomsnittsverdier i januar for forskjellige parametre. Hvert punkt tilsvare ett år mellom 1990 og 2020. a. viser temperatur, b. viser luftfuktighet, c. viser vindhastighet og d. viser nedbør.	58
4.10	Eksponeringskoeffisienten beregnet gjennom simulering 3 vs. eksponeringskoeffisienten beregnet ved hjelp av den alternative modellen for alle caseområder.	59
4.11	Den gjennomsnittlige eksponeringskoeffisienten beregnet gjennom simulering 3, alternativ modell (alt. modell), oppdatert snølaststandard (prEN) og Eurokode 1991-1-3 (EN).	59

4.12	Variasjon i erosjonsmengde (oransje kurve) og snøens terskelfriksjonshastighet (blå kurve) i Ås. Grafen viser SIM3 for vintersesongen 05/06. . . .	61
4.13	Stolpediagram som viser andeler av total erosjonsmengde som inntreffer for ulike intervaller for terskelfriksjonshastighet. Figuren viser resultater for SIM3 vintersesongen 05/06. De blå stolpene er simulering hvor $T_d=30$ dager, og de grønne stolpene angir $T_d=20$ dager.	62
4.14	Erosjonsmengde simulert gjennom SIM3 vs. erosjonsmengde beregnet gjennom den alternative modellen for alle caseområdene.	63
5.1	Sammenlikning av $C_{e,dim}$ for SIM3 og den alternative modellen. Stolpediagrammet viser eksponeringskoeffisienten for de forskjellige modellene og datasettene. I a. er gjennomsnittlig vindhastighet (for årene med marklast større enn 5-års returlast) vist gjennom røde punkter. b. viser samme figur, men med plot av erosjonsmengde (blå og gule punkter) for de to modellene.	78

Tabeller

2.1	Eksponeeringskoeffisienter for forskjellige topografier i henhold til NS-EN 1991-1-3 (reprodusert fra Standard Norge, 2008, s. 13, med modifikasjoner av forfatter).	5
2.2	Ulike skalaer på klima i meteorologien (gjengivelse av Utaaker, 1991, s. 20, med modifikasjoner av forfatter).	7
2.3	Densitet til snø i henhold til NS-EN 1991-1-3 (reprodusert fra Standard Norge, 2008, med modifikasjoner av forfatter).	13
2.4	Oversikt over ulike studier for estimering av terskelfriksjonshastighet og terskelvindhastighet. Verdier i parentes angir gjennomsnittsverdier. . . .	17
2.5	Oversikt over parametere som beregnes i ESCIMO.	26
3.1	Input-parametere for snøsimulering i ESCIMO.	32
3.2	Gjennomsnittsverdier for meteorologiske parametere i januar for caseområder. Verdier er beregnet på bakgrunn av ERA5-data for de siste 30 årene.	35
3.3	Datasettyper for 30-årssimulering.	36
3.4	Prosentvis andel av hver parameter som består av ERA5-data for SN90400 og SN17850.	36
3.5	Gjennomsnittlig ruhetslengde og høyde over havet for forskjellig datatyper og caseområder.	37
3.6	Grensebetingelser og konstanter forhåndsdefinert av ESCIMO (ESCIMO.spread(v2), 2016).	38
3.7	Grensebetingelser for simuleringer i ESCIMO.	43
3.8	Terrengkategorier for ulike områder. Beskrivelsene er hentet fra Standard Norge (2009).	46
4.1	RMSE for simulert taklast mot observert taklast for alle simuleringer.	53
4.2	Beregnete eksponeeringskoeffisienter for Byflaten i valideringen.	53
4.3	Eksponeeringskoeffisienten beregnet med ulike datatyper for Vordersteinwald. Tabellen viser C_e for alle alternativene.	54

4.4	RMSE for simulert eksponeringskoeffisient mot observert eksponeringskoeffisient for alle simuleringene.	56
4.5	RMSE for snøvannsekvivalenten på tak og eksponeringskoeffisienten for Ås og Byflaten lagt sammen, mot observerte verdier.	56
4.6	5-års returlaster og karakteristiske snølaste for områder analysert i oppgaven.	57

Definisjoner

Akronymer

C3S	Copernicus Climate Change Service
CDS	Climate Data Store
CEN	Den europeiske standardiseringsorganisasjonen
CFD	Computational Fluid Dynamics
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EN	Europerisk standard
ERA5	Reanalyserte data levert av ECMWF
ESCIMO	Energy balance Snow Cover Integrated MOdel
NA	Nasjonalt tillegg
RMSE	Root Mean Square Error
SnoMoS	Snow Monitoring Station

Greske symboler

κ	Von Karman-konstanten
λ	Mixing length
μ_i	Snølastens formfaktor
ρ_s	Snøens densitet [kg/m^3]
τ	Skjærspenning [N/m^2]

Symboler

Δu_{*t}	Differansen mellom $u_{*t,max}$ og $u_{*t,min}$
$\overline{u_{10}}$	Gjennomsnittlig timesmessig vindhastighet [m/s]
ρ	Luftens densitet [kg/m^3]
B	Koeffisient for intergranulær binding
C	Snøkonsentrasjon [kg/m^3]

$C_{e,dim}$	Den dimensjonerende eksponeringskoeffisienten
C_e	Eksponeringskoeffisienten
C_t	Den termiske koeffisienten
d_s	Snødybde [kg/m^3]
H_g	Høydegrense
L	Lengde på tak parallelt med vindretningen [m]
Q_l	Nedbørsmengde regn [mm]
Q_o	Avrenning [mm]
Q_s	Nedbørsmengde snø [mm]
q_{dep}	Snøavsetningsmengde [kg/m^2]
Q_{ero}	Snøerosjonsmengde fra tak [mm]
q_{ero}	Snøerosjonsmengde [kg/m^2]
Q_{sub}	Sublimasjon/resublimasjon [mm]
R^2	Determinasjonskoeffisient [0-1]
RH	Relativ fuktighet [%]
s	Dimensjonerende snølast på tak [kN/m^2]
S_{50}	50-årsreturlast [kN/m^2]
S_5	5-årsreturlast [kN/m^2]
S_d	Snøalder i dager
$s_{e,mw}$	Erodert snømengde i snødriv-perioden [m/s]
s_k	Den karakteristiske verdien for snølasten på mark [kN/m^2]
T_d	Antall dager mellom $u_{*t,min}$ og $u_{*t,max}$
u	Vindhastighet [m/s]
u_*	Friksjonshastighet [m/s]
$u_{*t,max}$	Maksimum terskelfriksjonshastighet definert av modellen
$u_{*t,min}$	Minimum terskelfriksjonshastighet definert av modellen
u_{*t}	Terskelfriksjonshastighet [m/s]
u_{10}	Vindhastighet i 10 meters høyde [m/s]
z_0	Terrengets aerodynamiske ruhetslengde [m]
SWE	Snøens vannekvivalent [mm]

1. Introduksjon

1.1 Bakgrunn

Vind påvirker snølaster på tak i større grad enn det tas høyde for i dagens snølaststandard (NS-EN 1991-1-3). På steder med mye vind kan bygg være dimensjonert for langt større snølaster enn det som faktisk befinner seg på taket, noe som resulterer i unødig materialbruk; dette vil redusere den miljømessige bærekraften i byggeprosjektet. En konstruksjon kan i motsatt tilfelle være underdimensjonert som resultat av lite vind eller en ujevn fordeling av lasten på grunn av akkumulasjon av snø i leområder på taket. Konsekvensen av dette er at konstruksjonen blir overbelastet, noe som kan føre til fordyrende skader på bygget. I verst tenkelig scenario kan bygget kollapse og sette menneskeliv i fare. Som et ledd i arbeidet med å estimere snølast på en mer nøyaktig måte er det derfor satt i gang prosesser med å lage en oppdatert europeisk snølaststandard.

Beregningen av snølast på tak i dagens bygningskoder tar som regel utgangspunkt i snølasten på mark, som blir justert opp eller ned etter at varmetap gjennom taket, samt effekter av snødriver og vindeksponering er tatt i betraktning. Dette gjøres ved at marksnølasten multipliseres med forskjellige koeffisienter. Eksponeringskoeffisienten (forkortet C_e) tar høyde for vindens påvirkning på snølasten. I NS-EN 1991-1-3 er beregningen av C_e basert på forenklete tilnærminger, som i stor grad er basert på ingeniørfaglig dømmekraft, i stedet for oppdatert vitenskapelig empiri. De fysiske prosessene som foregår i snøoverflaten er komplekse, der selv små variasjoner i vind- og snøforhold kan utgjøre store forskjeller i snølast. Av den grunn er det nødvendig med en ny definisjon av eksponeringskoeffisienten, som i større grad tar høyde for vindpåvirkning.

I den nye standarden foreslåes det at den gjennomsnittlige vindhastigheten for den kaldeste måneden i året skal tas i betraktning når eksponeringskoeffisienten skal fastsettes. I tillegg skal terrengkategori hensyntas, slik det gjøres i nåværende standard. Normalt er vinddata lett tilgjengelig gjennom observasjoner fra meteorologiske målestasjoner, med dataserier helt ned på times-skala. For enkelte bygg kan i midlertid en målestasjon befinne seg langt unna, både i luftlinje og i antall høydemeter. Dessuten kan det være utfordrende å estimere vindhastigheten presist i mangel på sammenhengende dataserier

av tilstrekkelig lengde. Et alternativ i denne sammenhengen er modellerte meteorologiske data som er reanalysert gjennom kompliserte dataprosesser (f.eks. ERA5-data). Disse modellerte dataene er tilgjengelige for områder overalt i verden, og strekker seg langt tilbake i tid. Slike data utgjør derfor et potensielt alternativ til meteorologiske observasjoner, ikke bare for estimering av vindhastighet, men også for implementering i mer avanserte snømodeller. Det er i dag gjort få studier hvor eksponeringskoeffisienten estimeres ved hjelp av numeriske modeller implementert med assimilerte meteorologiske data. Dette er noe av det denne masteroppgaven vil undersøke.

1.2 Forskningsspørsmål og problemstilling

Med utgangspunkt i problematikken nevnt ovenfor er målet for denne oppgaven å estimere eksponeringskoeffisienten gjennom simulering av snølast på tak. Dette gjøres ved å lage en modell for erosjon av snø fra flate tak som ivaretar fysiske parametre som er viktige for relasjonen mellom vind og snø. Modellen implementeres til et avansert program som beregner snødekkets energi- og massebalanse ut i fra timesbasert meteorologisk inndata. I denne sammenhengen forsøker oppgaven i tillegg å sette søkelys på egnetheten av å benytte reanalyserte data som et nyttig verktøy for å estimere eksponeringskoeffisienten.

På bakgrunn av målet for oppgaven stilles det to forskningsspørsmål:

1. Gir simuleringer med den implementerte modellen representative verdier for eksponeringskoeffisienten?
2. Er reanalyserte meteorologiske data tilstrekkelig nøyaktig for å kunne benyttes til å estimere eksponeringskoeffisienten?

1.3 Oppgavestruktur

Denne oppgaven er strukturert etter IMRaD-modellen, og omfatter kapitlene innledning, metode, resultater og diskusjon. Etter introduksjonen inkluderes også et teorikapittel, hvor nødvendig bakgrunnsinformasjon for å forstå oppgavens analyser presenteres. I tillegg implementeres det avslutningsvis et kapittel med konklusjoner for oppgaven.

2. Teori

I dette kapitlet gis et teoretisk grunnlag for analysene som skal gjøres i oppgaven. Kapitlet er delt inn i seks deler, som omhandler temaer knyttet til oppgavens problemstilling. Innledningsvis presenteres ulike beregningsgrunnlag for bestemmelse av vind- og snølaster i Europa. Videre gis det en generell innføring i vind- og snøteori, samt koblingen mellom disse to temaene. Etter dette spisses teorien inn mot studier av relasjonen mellom vind og snølaster på tak, og det henvises til oppdaterte studier på dette feltet. Til slutt forklares modelleringsverktøy og statistiske prinsipper som er aktuelle for oppgaven.

2.1 Dimensjonering av vind- og snølaster

2.1.1 Eurokode 1 Del 1-3 (snølaststandarden)

«Eurokode 1: Laster på konstruksjoner - Del 1-3: Allmenne laster - Snølaster» er den europeiske snølaststandarden. Standarden gir et felles beregningsgrunnlag for snølaster på bygninger for medlemsland i den europeiske standardiseringsorganisasjonen (CEN). NS-EN 1991-1-3 er den norske versjonen av snølaststandarden. Denne versjonen omfatter et nasjonalt tillegg med egne tilpasninger, samt karakteristiske verdier for snølaster på mark for ulike kommuner i landet (Standard Norge, 2008).

Ifølge NS-EN 1991-1-3 er snølast for vedvarende/forbigående dimensjonerende situasjoner definert på følgende måte:

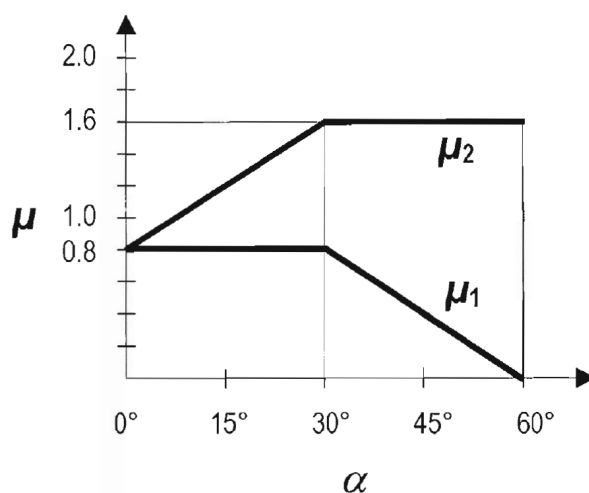
$$s = \mu_i C_e C_t s_k \quad (2.1)$$

der:

- s er den dimensjonerende snølasten til taket [kN/m^2]
- μ_i er snølastens formfaktor
- C_e er eksponeringskoeffisienten
- C_t er den termiske koeffisienten
- s_k er den karakteristiske verdien for snølasten på mark [kN/m^2]

Den karakteristiske verdien for snølasten på mark (s_k) er gitt for alle kommuner i Norge gjennom det nasjonale tillegget til snølaststandarden (NA.4.1). Verdiene er definert med en 50 års returperiode, noe som innebærer en 2 % sannsynlighet for at den karakteristiske lasten blir overskredet hvert år. For hvert spesifikke sted er det definert en grunnverdi ($s_{k,0}$), en tilleggsverdi (Δs_k) og en høydegrense (H_g). Dersom byggets høyde over havet overskrider høydegrensen for det spesifikke stedet skal en andel av Δs_k adderes til grunnverdien. For situasjoner der $H < H_g$, settes den karakteristiske verdien lik grunnverdien. Det nasjonale tillegget definerer også for enkelte steder en maksverdi som setter en øvre grense for størrelsen på marklasten (Standard Norge, 2008).

Størrelsesforholdet mellom taklasten og marklasten bestemmes ut i fra de tre parametrene μ_i , C_e og C_t . Disse faktorene varierer ut i fra takets geometri og ytre påvirkning. Formfaktoren (μ_i) er definert som forholdet mellom taklasten og marklasten i en situasjon uten termisk påvirkning og eksponering (Standard Norge, 2008, s. 8). Formfaktoren beskriver altså hvordan snølasten er fordelt utover takflaten. Siden tak har varierende geometri kan snølasten være forskjellig for ulike deler av taket. I tillegg skilles det i eurokoden mellom to lastsituasjoner avhengig av om lasttilfellet er forårsaket av snødriver eller ikke. Fig. 2.1 viser hvordan formfaktorene for en snølast varierer med takvinkelen. Hvilken av de to formfaktorene (μ_1 og μ_2) som skal benyttes for en gitt takflate i en gitt situasjon avhenger av takformen, og er vist for ulike taktyper i NS-EN 1991-1-3 (Standard Norge, 2008).



Figur 2.1: Sammenheng mellom formfaktorer for snølast og takvinkel (figur hentet fra Standard Norge, 2008, s. 14).

Den termiske koeffisienten (C_t) beskriver reduksjonen i den dimensjonerende snølasten som følge av varmegjennomgang i takkonstruksjonen. I lasttilfeller der $C_t > 1 \frac{W}{m^2K}$ skal denne faktoren hensyntas. I alle andre tilfeller settes C_t lik 1.0 (Standard Norge, 2008).

Eksponeringskoeffisienten (C_e) tar høyde for oppsamling og avblåsing av snø på taket som følge av vind. Denne verdien avhenger av topografien til det aktuelle området. Tab. 2.1 viser hvordan C_e bestemmes i henhold til snølaststandard. For skjermede situasjoner vil snølasten på taket øke i forhold til marklasten, mens i vindutsatte områder vil verdien minke (Standard Norge, 2008).

Tabell 2.1: Eksponeringskoeffisienter for forskjellige topografier i henhold til NS-EN 1991-1-3 (reprodusert fra Standard Norge, 2008, s. 13, med modifikasjoner av forfatter).

Topografi	C_e
Vindutsatt ^a	0.8
Normal ^b	1.0
Skjermet ^c	1.2

^a Flate områder uten hindringer, som gir eksponering på alle sider, helt uten eller med liten terrengbeskyttelse, høyere byggverk eller trær

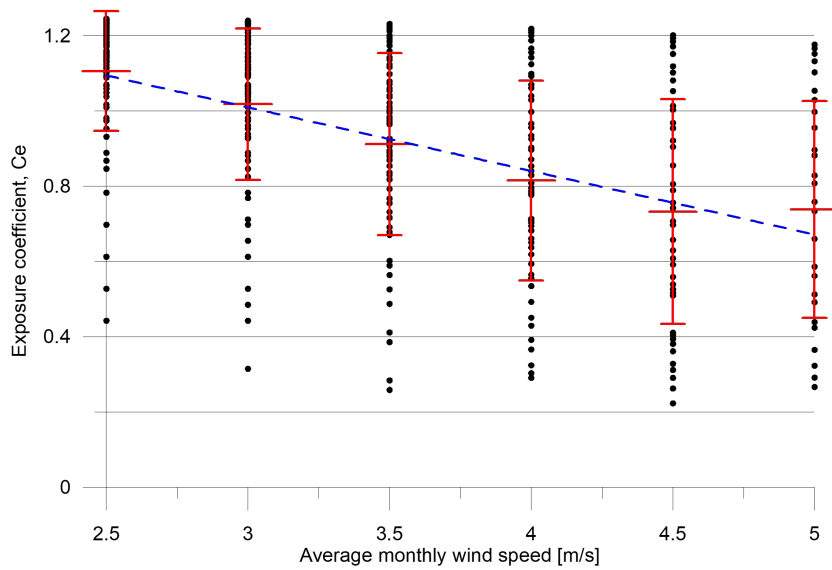
^b Områder der vinden ikke i vesentlig grad fjerner snø fra byggverk som følge av terreng, andre byggverk eller trær

^c Områder der det aktuelle byggverket er vesentlig lavere enn terrenget omkring, eller er omgitt av høye trær og/eller av høyere byggverk

2.1.2 prEN 1991-1-3 (oppdatert snølaststandard)

Med mål om å gi bedre estimater for snølaster på tak, samt å imøtekomme effekten av klimaendringene, er det satt i gang prosesser for å lage en oppdatert snølaststandard kalt prEN 1991-1-3:2020, med nye tilhørende marklastverdier for Europa. I denne sammenhengen skal flere av reduksjonskoeffisientene endres, deriblant eksponeringskoeffisienten. En av utfordringene med dagens C_e -verdi er at den ikke hensyntar vindhastigheten på det aktuelle stedet under snøsesongen. I en artikkel av Thiis mfl. (2022) foreslås en ny modell for eksponeringskoeffisienten. Denne modellen bruker den gjennomsnittlige vindhastigheten i den kaldeste måneden som en parameter i bestemmelsen av C_e . Modellen tar sikte på å gi en lett anvendelig metode for å bestemme eksponeringskoeffisienten, som gir estimater som reflekterer typiske europeiske vindklima. Den samme inndelingen som i Tab. 2.1 beholdes, men betingelsene for hver topografikategori ble foreslått endret.

I studien til Thiis mfl. (2022) ble det benyttet en parametrisk undersøkelse for å validere modellen, der parametre som påvirker bestemmelsen av eksponeringskoeffisienten i Europa analyseres. Videre ble prEN sammenliknet med en avansert teoretisk modell. Dette ble gjort ved å implementere meteorologiske måledata i modellen, som er representative for typiske europeiske klima.



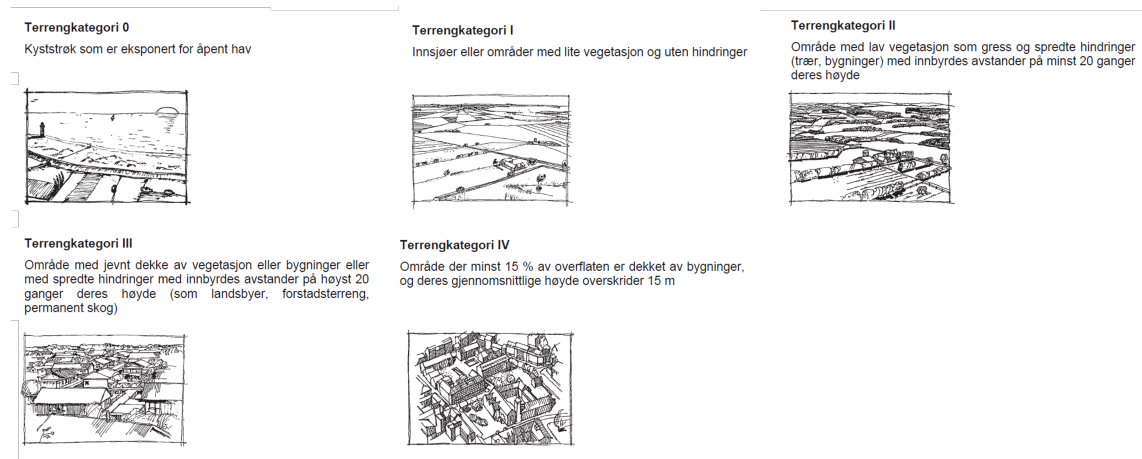
Figur 2.2: Variasjon av eksponeringskoeffisient, C_e , med månedlig gjennomsnittlig vindhastighet. De røde horisontale linjene angir gjennomsnitt og +/- ett standardavvik for C_e (hentet fra Thiis mfl., 2022).

Resultatene fra den parametriske undersøkelsen viste en klar lineær nedadstigende trend for C_e med gjennomsnittlig månedlig vindhastighet, som vist i Fig. 2.2. Disse analysene identifiserte en gjennomsnittlig vindhastighet i den kaldeste måneden på 4.5 m/s som en mulig grenseverdi for når et klima ansees som vindutsatt. Resultatene viste også god korrelasjon med den avanserte teoretiske modellen. En klar negativ korrelasjon mellom C_e og gjennomsnittlig antall erosjonstimer ble identifisert (hvor en erosjonstime defineres som en observasjon i dataserien med vindhastigheter større enn en valgt grenseverdi for snøtransport).

2.1.3 Eurokode 1 Del 1-4 (vindlaststandarden)

Del 1-4 av Eurokode 1 gir retningslinjer for dimensjonering av vindlaster for bygg og anlegg i Europa. I Norge er NS-EN 1991-1-4:2005+NA:2009 gjeldende standard med nasjonalt tillegg. I likhet med snølaststandarden inneholder det nasjonale tillegget referanseverdier (vindhastighet) for ulike kommuner i Norge (Standard Norge, 2009).

En parameter av betydning for vindens evne til å erodere snø er terrengruheten. Vind beveger seg raskest over flatt terreng med en glatt overflate. Hvis det er hindringer på overflaten, som for eksempel bygninger eller vegetasjon, vil hastigheten til vinden minke. For to områder med samme referansevindhastighet vil følgelig området med høyest terrengruhet få lavest vindhastighet. Vindlaststandarden skiller mellom fem ulike terrengkategorier avhengig av hvilket landskap bygningen står i. Fig. 2.3 viser beskrivelse og illustrasjon av de ulike kategoriene. Hver terrengkategori har en tilhørende ruhetslengde, z_0 . Ruhetslengden markerer høyden over terrenget der vindhastigheten er null,



Figur 2.3: Illustrasjoner av ulike terrengkategorier (hentet fra Standard Norge, 2009, med modifikasjoner av forfatter).

og øker med økt ruhet på terrenget. Ytterligere sammenhenger mellom terrengruhet og vindhastighet gis i Kap. 2.2.4.

2.2 Vindteori

2.2.1 Skalaer i meteorologien

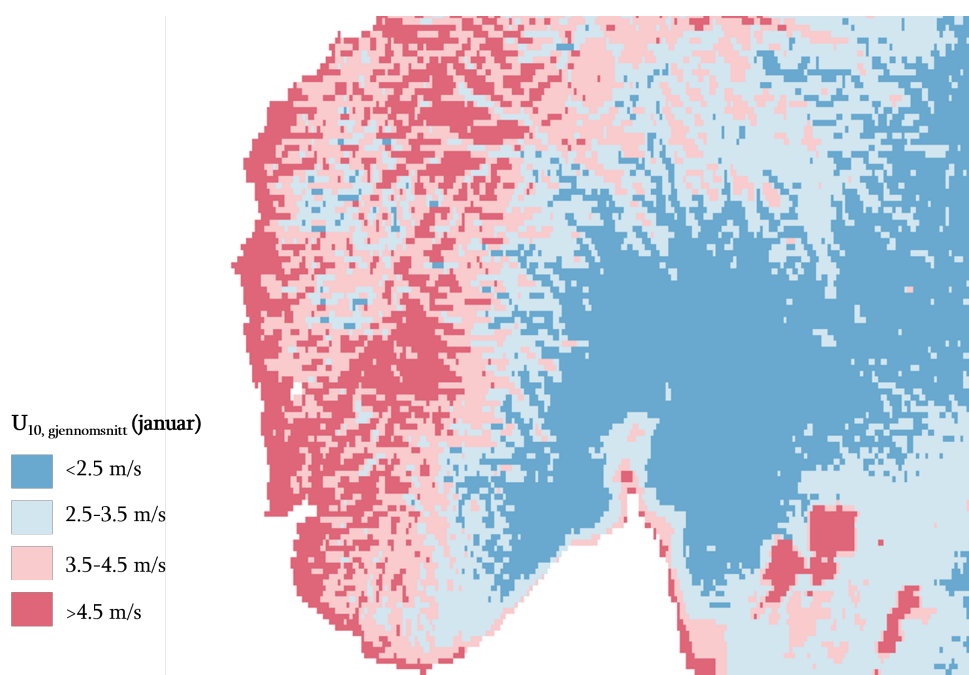
I meteorologien skilles det mellom ulike skalaer for bevegelsene som foregår i atmosfæren. Tab. 2.2 viser Utaaker (1991) sin inndeling av klima i fire forskjellige skalaer: mikroklima, lokalklima, mesoklima og makroklima. Denne inndelingen er naturligvis kunstig, da mange av prosessene i atmosfæren går utover rammene satt for denne inndelingen, og varierer utifra ulike forhold. Skalaene kan riktignok bidra til å gi et bedre sammenlikningsgrunnlag for ulike værphenomen. Denne oppgavens tema gjør at lokal- og mikroskalaen tildeles størst oppmerksomhet.

Tabell 2.2: Ulike skalaer på klima i meteorologien (gjengivelse av Utaaker, 1991, s. 20, med modifikasjoner av forfatter).

Klima	Horisontal utstrekning	Vertikal utstrekning	Eksempel
Mikroklima	1 cm - 1000 m	1 cm - 10 m	Klimaet i en potetåker
Lokalklima	100 m - 20 km	10 cm - 1 km	Klimaet i Nes, Hedmark
Mesoklima	10 - 200 km	1 m - 6 km	Klimaet i Hordaland
Makroklima	> 200 km	1 m - 50 km	Klimaet i Sør-Norge

2.2.2 Vind i Norge

Den varierende topografien kombinert med nærheten til havet gir grunnlag for store meteorologiske variasjoner i Norge. Dette inkluderer vinden. Det globale vindmønsteret noen tusen meter over bakken preges i stor grad av vestavindsbeltet, som går tvers over landet fra vest til øst. Vindkarakteristikken nærmere jordoverflaten vil på den annen side være mer kompleks. Dette kan utarte seg som vekselvise endringer av vindretningen med ulike årstider. Om sommeren vil vinden strømme fra fra havet og inn mot land, mens om vinteren vil vinden gå andre veien. Dette kalles for en monsuntendens (Dannevig, 2021). Dette fenomenet forklares nærmere i Kap. 2.2.3.



Figur 2.4: Gjennomsnittlig vindhastighet i januar for Sør-Norge. (hentet fra Thiis mfl., 2022).

Vind kan måles på ulike måter. Normalt brukes gjennomsnittsverdier for å beskrive den allmenne situasjonen for et gitt sted over en gitt tid. Disse kan regnes ut som eksempelvis 10-minutters- eller timesgjennomsnitt. Fig. 2.4 viser gjennomsnittlig vindhastighet for Januar måned i Sør-Norge. Siden vindkast kan være svært spontane og kun vare noen få sekunder, vil ikke gjennomsnittsverdier belyse dimensjonerende situasjoner. Derfor brukes også maksimalverdier. De høyeste vindhastighetene i Norge forekommer langs kysten og i fjellstrøkene, hvor vindhastigheten i visse tilfeller kan komme opp i orkan styrke. Dette skjer oftest om vinteren, og kan medføre store materielle ødeleggelser. Lavlandsområder innenlands har betydelig lavere vindhastigheter, noe som vises på Fig. 2.4 gjennom de blå områdene (Seter, 2020; Thue, 2016).

2.2.3 Lufttrykk

Lufttrykk er definert som kraften per horisontalt flateareal et vilkårlig sted i atmosfæren, påført av vekten til all overliggende luft. Dette medfører at lufttrykket vil avta med høyden over havet, siden den overliggende luftmengden minsker jo høyere opp i atmosfæren man kommer. Luft som stiger vil alltid bli avkjølt, mens synkende luft alltid varmes opp. Tettheten til luft vil også avta med høyden over havet. Dette kommer av at tyngdekraften i størst grad påvirker luften som befinner seg nærme jordoverflaten (Utaaker, 1991).

Vind oppstår som et resultat av forskjeller i lufttrykket (trykkgradienten). Luft vil alltid strømme fra høytrykk til lavtrykk. Høytrykk er beskrevet som områder hvor lufttrykket er høyere enn omkringliggende områder. Motsatt er trykket lavere enn omkringliggende områder ved et lavtrykk. Vindhastigheten vil øke med økende trykkgradient og minskede avstanden mellom trykksentrene (Utaaker, 1991).

Sjøbris og landbris er gode eksempler på hvordan trykkgradienten styrer hvilken retning vinden går. Som navnene tilsier opptrer de i områder langs kysten. Når solen varmer opp landarealer om morgenen resulterer dette i at luften stiger, noe som etterlater et lavtrykk nær overflaten, og et høytrykk i høyden. Ved den kalde vannoverflaten vil det være et høytrykk, og luft vil derfor strømme mot land som følge av trykkgradienten; en sjøbris skapes. I høyden vil det etter hvert også danne seg en motstrøm fra land og ut mot sjøen, noe som resulterer i et fullt luftkretsløp. Hele denne prosessen vil være motsatt om natten. Fravær av solinnstråling vil gjøre lufta ved land kald og tung, og et svakt høytrykk oppstår ved overflaten, og et svakt lavtrykk dannes i høyden. Siden det er lite temperaturfall over sjøen vil det settes i gang en landbris, hvor lufta langs overflaten beveger seg fra land og ut mot sjøen. Dette kalles for landbris (Utaaker, 1991). En monsun skiller seg fra land- og sjøbris i at begrepet forklarer sesongmessige forskjeller i vindretninger. Utover dette er prinsippet for en monsuntendens nokså lik land- og sjøbrisen (Dannevig, 2021)

2.2.4 Vindprofiler

I tillegg til å ha en horisontal geografisk avhengighet, vil vinden også variere med høyden over terrenget. I høyder over omtrent en kilometer opp i luften vil vinden avhenge av trykkgradienter forårsaket av værphenomen på stor skala. Disse kalles for geostrofiske vinder, og påvirkes ikke av ruheten til terrenget på bakkenivå. Siden overflaten er fast og står i ro, vil vindhastigheten her være null. Mellom overflaten og den geostrofiske vinden vil det altså skje en økning i vindhastighet. Den vertikale fordelingen av disse vindhastighetene kalles en vindprofil, og er vist for forskjellige terreng i Fig. 2.5 (Kind,

1981). Sammenhengen mellom vindhastigheten og høyden over overflaten er logaritmisk og uttrykkes ved følgende formel (Pomeroy og Gray, 1995):

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2.2)$$

der:

$u(z)$ er vindhastigheten [m/s] i høyden z over terrenget [m]

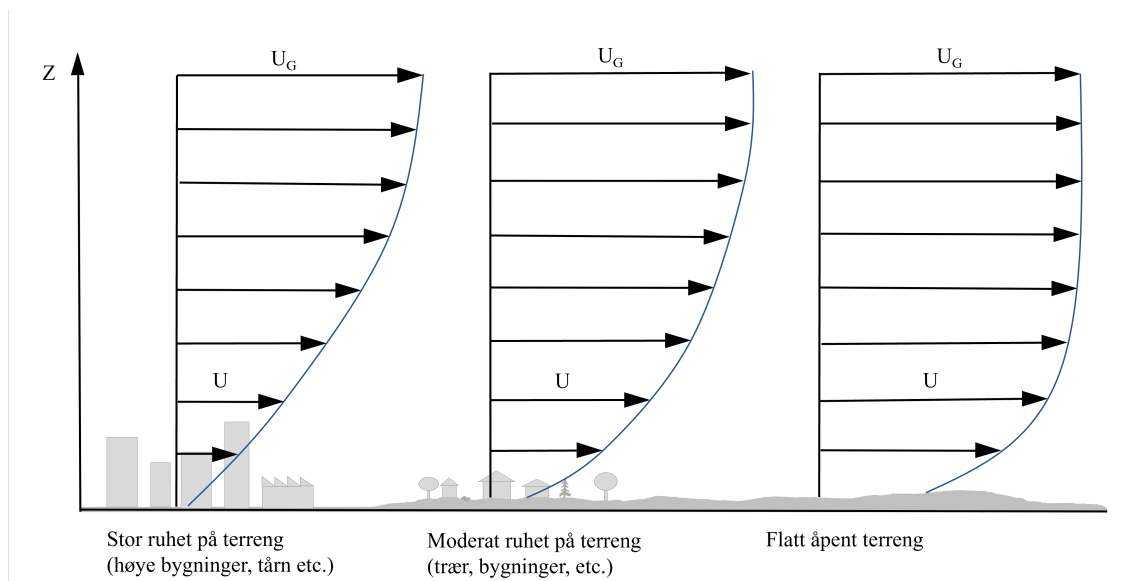
u_* er friksjonshastigheten [m/s]

κ er Von Karman-konstanten (settes som oftest til 0.41)

z_0 er terrengets aerodynamiske ruhetslengde [m]

En logaritmisk vindprofil slik som definert gjennom Likn. 2.2 vil være avhengig av ruheten til terrenget. Ettersom avstanden til overflaten øker, vil overflatefriksjonen mellom terrenget og vinden spille en mindre og mindre rolle for vindhastigheten. Dette er grunnen til at vindhastigheten øker med høyden over terrenget, z . Høyden på profilen, det vil si avstanden fra overflaten til laget for geostrofisk vind, avhenger altså av ruhetsgraden (Kind, 1981).

En parameter med relasjon til ruhet er terrengets aerodynamiske ruhetslengde, betegnet med z_0 i Likn. 2.2. z_0 er definert som høyden over terrenget der vindhastigheten er null, og er avhengig av både høyde, form og ujevnhetenes fordeling langs overflaten (Utaaker, 1991). Denne verdien vil øke med terrengets ruhet, og kan eksempelvis variere fra mellom 0.00001 m for en isdekt overflate til 0.3 m for en skog (Tabler, 1994).



Figur 2.5: Vindprofiler for overflater av ulik ruhet. U er vindhastigheten og U_G er hastigheten til geostrofisk vind (reprodusert fra Kind, 1981, med modifikasjoner av forfatter).

Når vindhastigheten endrer seg for forskjellige sjikt i grenselaget, vil det oppstå skjærkrefter i vindstrømmen. Det såkalte vindskjæret, den vertikale gradienten av vindhastigheten, vil i sjiktet nærmest bakken være størst for glatte overflater. Dette lar seg vise gjennom Fig. 2.5 hvor den glatte overflaten (flatt åpent terreng) har størst økning i vindhastighet i nederste del av grenselaget (Utaaker, 1991). Det vil altså oppstå skjærkrefter i lufta som følge av møtet med terrenget, og disse skjærkreftene avtar langsommere når overflatefriksjonen er stor. Friksjonshastigheten, eventuelt skjærhastigheten, u_* , er en parameter som tar høyde for overflatefriksjonen ved å omdefinere skjærkreftene til en hastighet. Denne parameteren er viktig i analysen av snøtransport, og forklares ytterligere i denne sammenhengen i Kap. 2.3.5.

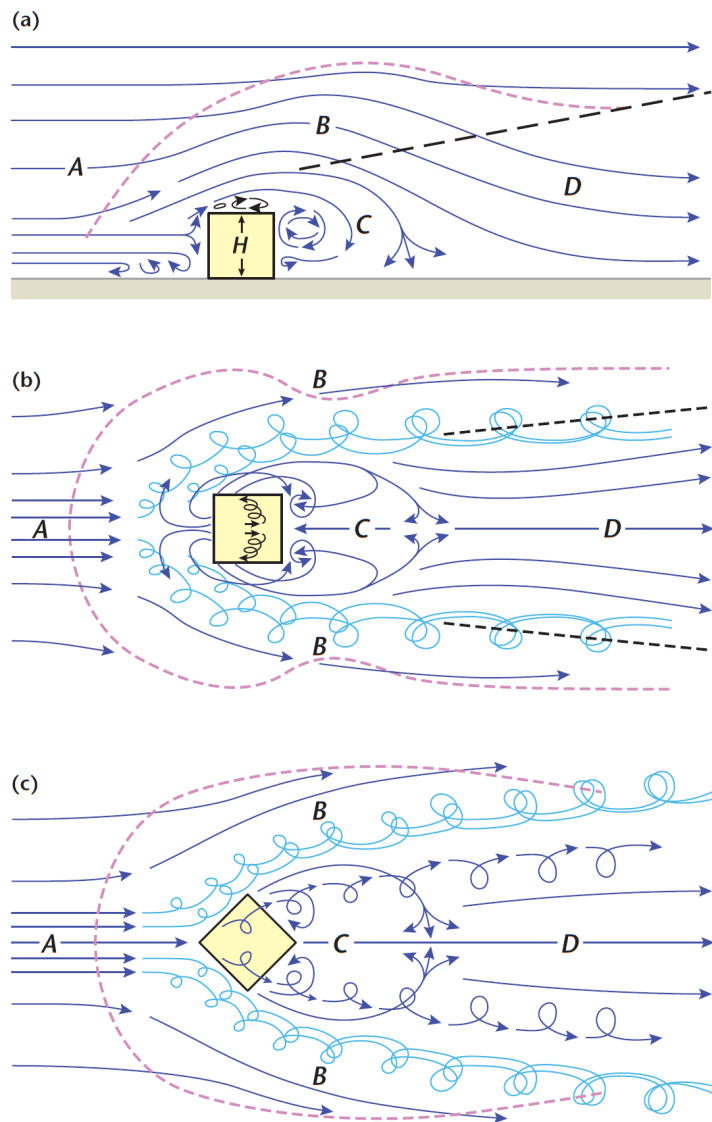
2.2.5 Vindstrukturer nær bakken

Når vind blåser langs bakken beveger den seg som en fluidstrøm. Fluidstrømmen kan illustreres gjennom strømlinjer, som angir posisjonen til en luftpartikkel over tid. Tangenten til strømlinjen i en gitt posisjon angir fartsretningen til vinden. Dersom strømningene beveger seg jevnt i forhold til hverandre uten store forskyvninger kalles det en laminær strøm. I en laminær strøm vil ingen av strømningene krysse hverandre, hvilket betyr at farten er konstant i ethvert punkt i strømmen (Young mfl., 1996).

Dersom strømningene skulle krysse hverandre, oppstår det en turbulent strømning. Turbulens oppstår når farten i strømmen blir stor, eller når strømningen blir utsatt for store retningsendringer. I disse situasjonene vil strømningsfarten ikke være konstant i ethvert punkt lenger, derfor vil turbulens være preget av sporadiske endringer i vindhastighet (Grimesnes mfl., udatert).

Hindringer langs overflaten vil påvirke vindstrømmen nær bakken på ulike måter. Når vinden møter en hindring må alle luftpartiklene omdirigeres rundt hindringen. Siden massetettheten til luft er konstant når luft beveger seg langs jordflaten, vil hastigheten til luftstrømmen akselerere over taket. Tilsvarende vil vindhastigheten de-akselerere når strømningen møter et volum som utvider seg. På grunn av viskøse krefter i fluidet kan en slik brå de-akselerasjon føre til at luftpartikler separeres fra overflaten og turbulens skapes. Turbulensområder består av tilfeldige virvler av luft med lav hastighet og sporadiske retningsforandringer, og ligger ofte på lesiden av en hindring (Kind, 1981).

Den ovennevnte strømseparasjonen skjer ofte i møtet med skarpe kanter på en bygning. I etterkant av møtet med et skarpt hjørne vil den lave overflatespenningen føre til resirkulasjoner i strømningen i form av luftvirvler. Fig. 2.6 viser strømningsmønstre rundt en isolert kubisk bygning. I illustrasjonen kan man se at en innkommende strømning A blir forskjøvet i møtet med bygningen, som følge av økning i positive spenningsforstyrrelser på lo side. Omtrent 2/3 opp bygningshøyden finner vi stagnasjonspunktet. I



Figur 2.6: Strømningsmønstre i møte med en bygning. Figur (a) viser bygningen sett fra siden, figur (b) viser strømningsmønster for samme bygningen sett i plan og (c) viser strømming sett i plan hvor bygningen er orientert 45° i forhold til vinden (Figur hentet fra Oke mfl., 2017)

dette punktet vil spenningsforstyrrelsene være på et maksimum, og all kinetisk energi er transformert til spenning, noe som gjør at luften faller til ro (Oke mfl., 2017).

Strømningen over taket av bygningen vil være forskjellig avhengig av bygningens orientering i forhold til vinden. Dersom vinden treffer bygningen ortogonalt, vil strømningsseparasjon skje ved kanten av taket med påfølgende turbulente strømninger i området nære taket (se 2.6 b). Treffer vinden bygningen med en vinkel på f.eks. 45° vil to luftvirvler oppstå, som starter ved hjørnet, og strekker seg langs begge takets kanter (Oke mfl., 2017). Dette kan sees gjennom Fig. 2.6 c.

2.3 Snøteori

2.3.1 Snøens vannekvivalent

Tre svært viktige egenskaper for snødekker er densitet, snødybde og snøens vannekvivalent. Den sistnevnte egenskapen er ikke en målbar enhet, men kan beregnes ut i fra densiteten og snødybden. Snøens vannekvivalent beskriver snødekkets vanndybde dersom snøen hadde smeltet til vann. Gitt at snødybde måles i cm og vanndybde måles i mm får vi følgende uttrykk for snøens vannekvivalent (Pomeroy og Gray, 1995):

$$SWE = 0.01 d_s \rho_s \quad (2.3)$$

der:

SWE er snøens vannekvivalent (Snow Water Equivalent) [mm]
 d_s er snødybden [cm]
 ρ_s er snøens densitet [kg/m^3]

2.3.2 Densitet til snø

Som en tommelfingerregel settes den gjennomsnittlige densiteten til nylig avsatt snø ofte lik $100 kg/m^3$. Det kan riktignok være store forskjeller i densitet avhengig av de termiske og meteorologiske forholdene til omgivelsene. Densiteten avhenger i stor grad av hvor mye luft som finnes i gitterstrukturen til snøkrystallene. Normalt varierer densiteten til nysnø mellom $50 - 120 kg/m^3$. Generelt sett vil tørre, kalde omgivelser gi snøavsetninger med lav densitet. Motsatt vil varme temperaturer gi høy densitet (Pomeroy og Gray, 1995).

Tabell 2.3: Densitet til snø i henhold til NS-EN 1991-1-3 (reprodusert fra Standard Norge, 2008, med modifikasjoner av forfatter).

Snøtype	Densitet [kg/m^3]
Nysnø	100
Fast snø ^a	200
Gammel snø ^b	250 - 350
Våt snø	400

^aFlere timer eller dager siden snøfall

^bFlere uker eller måneder etter snøfall

Etter at snøen har lagt seg vil densiteten normalt øke med varigheten til snødekket (Standard Norge, 2008). Dette kommer av at faktorer som metamorfose, komprimering og vindlaster vil øke densiteten (Meløysund mfl., 2007). Tab. 2.3 viser densiteten for

typiske snølag slik de er definert i den europeiske snølaststandarden. I det neste underkapittelet presenteres metamorfose og hvordan dette påvirker de fysiske egenskapene til et snødekke.

2.3.3 Metamorfose

Metamorfose beskriver transformasjonsprosessen i snøkrystallenes størrelse, form og binding som følge av endringer i temperatur og trykk. I denne prosessen vil de opprinnelige krystallene ødelegges, og partiklene får en rundere form (Judson og Doesken, 2000). Ettersom lag på lag med snø legger seg på en overflate, vil snøen komprimeres. Jo lenger ned i snødekket partiklene ligger, jo større blir kompresjonen, og dermed også densiteten. Snødybden vil som resultat synke, fordi porevolumet i mikrostrukturen blir mindre. Vind vil også komprimere et snødekke, og følgelig øke densiteten. Denne komprimeringen vil være størst i vindutsatte områder, og kan i visse tilfeller føre til en mangedobling i densitet på kun få timer (Pomeroy og Gray, 1995).

Det at snø ofte opptrer i nærheten av sitt eget smeltepunkt, og dermed også har et høyt damptrykk, er en stor pådriver til metamorfose. Dette faktum gjør at selv små variasjoner i omgivelsene kan føre til store endringer i mikrostrukturen. I situasjoner hvor det er stor forskjell mellom temperaturen i lufta og temperaturen ved jordoverflaten under snøen (som normalt holder 0 grader), vil snø sublimere og bevege seg oppover i snødekket. Sublimasjon er en faseovergang hvor et stoff går rett fra fast form til gass. Snøen vil derfor «fordampe» til vanndamp uten å være innom væskeform. Etter at snøen har sublimert, vil vanndampen kondensere på snøkrystaller høyere opp i dekket. Metamorfose kan også skje i snølag uten temperaturforskjeller, men prosessen vil normalt gå raskest der temperaturgradienten er størst (SLF, udatert).

2.3.4 Mekanismer for snøtransport

Vindtransportert snø, også omtalt som drivsnø, er snø transportert med vinden over en spesifisert tid og bredde på tvers av vinden. Normalt kan drivsnø fraktes flere tusen meter opp fra bakken, men normalt regner man bare med konsentrasjonen til og med 5 meter over overflaten, da snømengden over denne høyden anses som neglisjerbar (Tabler, 2003). Mengden drivsnø er ofte mindre i områder med mye vegetasjon, på grunn av at vegetasjonen bremser ned vindhastigheten. I områder med sterk vind vil riktignok vinden kunne ta med seg store mengder snø, også i områder med mye vegetasjon (Thiis, 2005).

Snøpartikler kan transporteres på tre ulike måter: ved kryp, saltasjon eller turbulent suspensjon. Kryp kjennetegnes ved at partiklene ruller eller kryper langs overflaten.

Disse partiklene er for tunge til å bli løftet over bakken, og har derfor en stadig kontakt med overflaten. Dette etterlater et bølgemønster i snøen. Snøpartikler transportert gjennom kryp utgjør omtrent en firedel av all drivsnø som transporteres ved lave vindhastigheter. I møte med hindringer som for eksempel vegetasjon eller snøgjerder fanges lett krypsnø (Tabler, 2003).

Når vinden tar tak i lettere snøpartikler kan de begynne å saltre. Det vil da se ut som partiklene «hopper» langs overflaten i parabolske sprang rundt 1 cm høye og 25 cm lange. Disse sprangene vil riktignok variere med partikkelstørrelse, vindhastighet og overflateegenskaper. Normalt vil det meste av saltasjon foregå innenfor 5 cm over overflaten. I visse tilfeller kan partikler støte på og rive med seg andre partikler langs overflaten. Dette gjelder spesielt snøpartikler som er fryst fast til nærliggende partikler (Tabler, 2003).

Suspensjon betegner mekanismen hvor snøpartikler blir transportert gjennom luften i en hastighet omtrent lik den gjennomsnittlige horisontale vindhastigheten. Dette oppstår når luftmotstanden fra oppadstigende luft overgår gravitasjonskraften til en partikkel. Ofte blir salterende partikler utsatt for suspensjon. Da vil som regel de letteste partiklene bli tatt med opp i luften (Pomeroy og Gray, 1995).

2.3.5 Friksjonshastighet

Som nevnt i Kap. 2.2.4 er friksjonshastighet og skjærspenning nært tilknyttet hverandre. Friksjonshastigheten til en overflate vil være proporsjonal med skjærspenningene som oppstår i det jordnære laget som følge av vind (Utaaker, 1991):

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (2.4)$$

der:

- u_* er overflatens friksjonshastighet [m/s]
- τ er skjærspenningen påført overflaten av vinden [N/m^2]
- ρ er luftens densitet [kg/m^3]

Skjærspenningene i overflaten, τ , vil videre avhenge av den vertikale hastighetsgradienten (Tabler, 1994):

$$\tau = \rho \left| \frac{du}{dz} \right|^2 \lambda^2 \quad (2.5)$$

der:

$$\left| \frac{du}{dz} \right|^2 \quad \text{er den vertikale gradienten til vindhastigheten [m/s]}$$

$$\lambda \quad \text{er «mixing length»}$$

Ut i fra denne likningen kan vi se at formen til vindprofilen påvirker skjærspennin-
gene (Tabler, 1994). Vindprofilene i Fig. 2.5 viser at det flate vindeksponerte terrenget
har størst hastighetsgradient, noe som ut i fra Likn. 2.5 gir høyest skjærspenning i
overflaten. Høy skjærspenning gir videre høy friksjonshastighet, hvilket betyr at frik-
sjonshastigheten øker med den vertikale gradienten til vindhastigheten.

2.3.6 Terskelfriksjonshastighet

Vindens evne til å erodere en overflate for snø avhenger både av vindens hastighet og
snødekkets overflateegenskaper. Ifølge Tabler (2003) vil løssnø begynne å bevege seg
ved hastigheter rundt 5.5 m/s, mens dersom snøen er hardpakket som følge av vind-
og solpåvirkning vil snøen først begynne å erodere ved rundt 23 m/s. For å beskrive
et snødekkets motstandsdyktighet mot snødriv brukes vanligvis terskelfriksjonshastighet
(u_{*t}). Skare og is vil ha en større terskelfriksjonshastighet enn lett og luftig snø. Dette
er fordi bindingene mellom snøpartiklene i hardpakket snø er sterkere, noe som gjør det
vanskeligere for vinden og rive partiklene løs fra overflaten (Thiis, 2005). I tillegg til de
kohesive kreftene vil terskelfriksjonshastigheten avhenge av størrelsen, formen og vekten
til hver enkelt snøpartikkel. Dette gjør at terskelfriksjonshastigheten vil variere stort i
størrelse (Kind, 1981).

For å kontrollere om snødriv vil oppstå eller ikke må terskelfriksjonshastigheten sammen-
liknes med friksjonshastigheten. Forholdet mellom disse to parameterne vil bestemme
hvilken form for snøtransport som vil forekomme (Kind, 1981):

$$\begin{array}{ll} u_* < u_{*t} & \text{gir kryp} \\ u_{*t} < u_* < 5 u_{*t} & \text{gir saltasjon} \\ u_* > 5 u_{*t} & \text{gir suspensjon} \end{array}$$

Siden det er stor variasjon i egenskapene til snøpartikler i et snødekke, vil flere av
transportmekanismene kunne opptre samtidig. Dette medfører at stor vindhastighet
kombinert med stor variasjon i partikkelegenskaper kan gi kryp, saltasjon og suspen-

sjon på samme tid. Terskelfriksjonshastigheten til et snødekke representerer riktignok en gjennomsnittsverdi for snøpartiklene (Kind, 1981).

For å kunne beskrive vindtransport av snø på en så presis måte som mulig, er det nødvendig med en nøyaktig bestemmelse av snøens terskelfriksjonshastighet. Siden u_{*t} setter grensen for når snø begynner å erodere, påvirker denne parameteren total erosjonsmengde. I bestemmelsen av snølast på tak er total erosjonsmengde essensielt, derfor er god estimering av terskelfriksjonshastigheten avgjørende for påliteligheten til en snømodell. De fysiske prosessene rundt snødriv er dog svært kompliserte, noe som kan gi utfordringer med å skape tilfredstillende modeller (Kang mfl., 2018). Det er likevel gjort flere forsøk på å estimere terskelfriksjonshastigheten til snøoverflater med ulike fysiske egenskaper.

Tabell 2.4: Oversikt over ulike studier for estimering av terskelfriksjonshastighet og terskelvindhastighet. Verdier i parantes angir gjennomsnittsverdier.

Studie	Påvirkning	Terskelfriksjons- hastighet u_{*t} [m/s]	Terskelvind- hastighet U_{10} [m/s]
Kind (1981)	Nysnø	0.07-0.25	-
	Gammel snø	0.22-0.40	-
Pomeroy mfl. (1993)	Tørr nysnø	0.15-0.25	-
	Gammel eller våt snø	0.25-1.0	-
Tabler (1994)	Nysnø	-	5.5
	Påvirket snø	-	23
Li og Pomeroy (1997)	Tørr snø	-	4-11 (7.7)
	Våt snø	-	7-14 (9.9)
Doorschot mfl. (2004)	Alle obs.	0.21-0.69	-
Clifton mfl. (2006)	Alle obs.	0.27-0.69	-
Liston mfl. (2007)	Kald nysnø	0.20-0.30	4.0-5.0

I litteraturen skilles det ofte mellom nysnø og gammel snø hva angår terskelfriksjonshastighet. Kind (1981) samlet resultater fra flere studier med måledata, og approksimerte terskelfriksjonshastigheten til å variere mellom 0.07-0.25 m/s for nysnø, og 0.22-0.40 m/s for gammel snø. Et annet eksempel er Pomeroy mfl. (1993) som identifiserte typiske verdier for terskelfriksjonshastigheten til å variere mellom 0.15-0.25 m/s for ny, løs, tørr snø under snøfall og 0.25-1.0 m/s for gammel, vindpåvirket, hard eller våt snø. I en annen studie av Doorschot mfl. (2004) ble det gjort feltobservasjoner i et høyfjellsområde for å beregne terskelfriksjonshastigheten for salterende snøpartikler. Observasjonene viste at terskelfriksjonshastigheten varierte mellom 0.21 og 0.69 m/s, og at u_{*t} viste seg å ha en positiv korrelasjon med snøens kornstørrelse. Foruten kornstørrelse kan parametre som snøens temperatur, densitet og alder benyttes for å forklare endringer i terskelfriksjonshastighet. I en studie fra Sveits fant Clifton mfl. (2006) en sammenheng mellom

terskelfriksjonshastighet og densitet til snø, med en korrelasjonskoeffisient på 0.91. Tab. 2.4 gir approksimasjoner for terskelfriksjonshastigheten og terskelvindhastigheten for ulike overflater. Terskelvindhastighetene tar utgangspunkt i vindhastigheten 10 meter over bakken.

2.3.7 Drivsnødannelse

Vi har i forrige kapittel sett at terskelfriksjonshastigheten setter grensen for når snøtransport kan begynne. I det neste blir det aktuelt å undersøke hvilke betingelser som ligger til grunn for at snøerosjon skal opprettholdes. I grenselaget er luftbevegelsene preget av turbulens, det vil si store fluktuasjoner i vindhastighet. Disse fluktuasjonene gir tilsvarende stor variasjon i skjærspenningene i overflaten. Siden graden av snøtransport er bestemt av skjærspenningene, gjør dette at en ikke-uniform drivsnørate oppstår. Denne drivsnøraten er betinget av vindens fluktuasjoner slik at snøen akkumuleres på noen steder og eroderes fra andre. Dersom friksjonshastigheten øker, vil snø eroderes. Motsatt vil snø avsettes i situasjoner der friksjonshastigheten minker. Dersom s angir strømningsretningen definerer Kind (1981) denne sammenhengen på følgende måte:

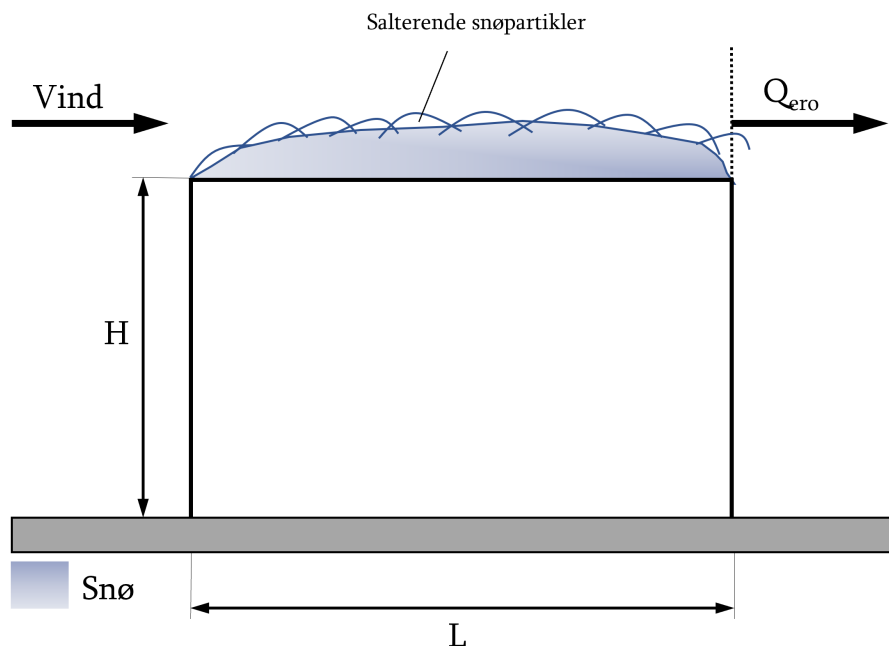
$$\begin{array}{ll} \text{Akkumulasjon ved} & \frac{du_*}{ds} < 0 \\ \text{Erosjon ved} & \frac{du_*}{ds} > 0 \end{array}$$

hvor $\frac{du_*}{ds}$ er endring i friksjonshastighet i vindretningen.

2.4 Modeller for beregning av snølaster på tak

2.4.1 Snøerosjon

Det vil som regel være mindre snø på tak enn på bakken. Dette kommer av at snøen på taket i større grad er eksponert for vinden. Unntaket er tilfeller med vindskygge, hvor drivsnø akkumuleres i leområder. I slike tilfeller kan taksnølasten overskride marksnølasten. Fig. 2.7 viser en illustrasjon av erosjon av snø fra et flatt tak som følge av vind. Ved gesimsen på lo side av taket vil transportraten være lik null. Herfra øker transportraten med lengden på taket (L), opptil en maksimumsverdi (Q_{ero}) på le side. Erosjonsmengden er representert som massen av eroderte snøpartikler per lengdeenhet av takets bredde per sekund (Qiang mfl., 2021).



Figur 2.7: Illustrasjon av erosjon av snø fra tak som følge av vind (reprodusert fra Qiang mfl., 2021, med modifikasjoner av forfatter).

I de neste avsnittene forklares noen av metodene som benyttes for å modellere drivsnø i relasjon til bygninger. I tillegg beskrives noen modeller for snøerosjon som benyttes senere i oppgaven.

2.4.2 Modelleringsmetoder

Modellering av drivsnø på og rundt bygninger kan gjøres på ulike måter. Eksperimenter i vindtunnel har i lang tid blitt benyttet som testmetode. Fordelen med vindtunnelforsøk er at omgivelsene er kontrollerbare, noe som gjør det enkelt å endre på vind- og snøforhold fra forsøk til forsøk. På denne måten har man kontroll på effekter av fysiske endringer som gjøres i modellen. Maskinene og utstyret som kreves til denne typen forsøk er riktignok kostbare og lite tilgjengelige. Dessuten har metoden begrensninger når det kommer til overførbarheten fra eksperiment til virkelighet (Tominaga mfl., 2011).

I de senere år har modellering ved hjelp av CFD blitt en vanlig anvendt metode for å simulere snøtransport på bygninger. CFD står for «Computational Fluid Dynamics» og er en numerisk metode der dataprogrammer benyttes til å simulere møtet mellom fluidstrømmer og objekter. Slike programmer gir i likhet med vindtunneltester god kontroll på modellparameterne. CFD-teknikker gir også muligheten for å kjøre simuleringer i full skala, noe som gjør det til et verdifullt verktøy til å forutse snølaste på tak (Zhou mfl., 2016).

En annen metode for å estimere snølast er gjennom bruk av feltobservasjoner. Feltobservasjoner av snødriv kan gi verdifull innsikt i ulike mekanismer for snøerosjon, og kan gi grunnlag for matematiske, fysisk baserte modeller. Måledata ligger dessuten til grunn for bestemmelsen av marklasten. En begrensning ved bruk av måledata til utviklingen av en modell er at parametre som vindhastighet, vindretning og temperatur ikke kan kontrolleres (Zhou mfl., 2016). Foruten å benyttes til utvikling av nye modeller kan måledata også brukes for å validere resultater fra numeriske simuleringer. Dette kan være simuleringer som er gjort ved hjelp eksempelvis CFD, vindtunnel eller en annen numerisk metode.

2.4.3 Erosjon og akkumulasjon på en snøoverflate

Som vi har sett i Kap. 2.3.7 veksler snøen mellom å akkumulere og erodere avhengig av endringer i friksjonshastigheten i vindretningen. Fluksen til henholdsvis de eroderte og akkumulative mengdene med snø er beskrevet av Naaim mfl. (1998) gjennom Likn. 2.6 og Likn. 2.7:

$$q_{ero} = B\rho(u_*^2 - u_{*t}^2) \quad \text{hvis} \quad u_* \geq u_{*t} \quad (2.6)$$

$$q_{dep} = Cw_f \left(\frac{u_{*t}^2 - u_*^2}{u_{*t}^2} \right) \quad \text{hvis} \quad u_* < u_{*t} \quad (2.7)$$

der:

- B er en koeffisient som representerer den intergranulære bindingen i overflatelaget
- C er snøkonsentrasjonen [kg/m^3]
- w_f er terminalfarten til en snøpartikkel [m/s]

Den totale fluksen på en snøoverflate vil være gitt ved summen av q_{ero} og q_{dep} . Den ovennevnte modellen ble i studien til Naaim mfl. (1998) implementert til simuleringer av drivsnø rundt snøgjerder. De numeriske resultatene viste god overensstemmelse med resultater fra vindtunneltester. Analysen viste dog at akkumulasjonssonen på lesiden var svært sensitiv til forholdet $\frac{u_*}{u_{*t}}$, noe som understreker viktigheten av presis modellering av overflatelaget i snøen for nøyaktig estimering av snøfluks.

En annen formulering av erosjonsmengde assosiert i større grad med snølast på tak gis i Thiis mfl. (2022). De foreslår en ny definisjon av eksponeringskoeffisienten i den europeiske snølaststandard. For å validere resultatene ble det benyttet en avansert teoretisk modell for beregning av snømengde erodert fra tak. Modellen er laget av Tabler (1994), og ble videreutviklet for snøerosjon fra tak av O'Rourke mfl. (2005). I den avanserte teoretiske modellen er erosjonsmengde gitt ved:

$$q(u_{10}) = 4.27 * 10^{-6} (u_{10})^{3.8} \left(\frac{L}{210} \right) \quad (2.8)$$

der:

L er lengden til taket parallelt til vindretningen [m]

u_{10} er vindhastigheten 10 meter over overflaten [m/s]

Den daglige erosjonstotalen er videre gitt ved:

$$s_e = \sum q(\overline{u_{10}}) \quad (2.9)$$

der:

$\overline{u_{10}}$ er gjennomsnittlig timesmessig vindhastighet [m/s]

Likn. 2.9 ble kun benyttet for timer i året med snø på taket der gjennomsnittlig vindhastighet var høyere enn terskelvindhastigheten. I studien til Thiis mfl. (2022) ble to terskelverdier valgt: 0.5 m/s for tørr snø, og 0.6 m/s for våt snø. Ut i fra utregning av erosjonsmengde ved hjelp av Likn. 2.8 og 2.9 ble eksponeringskoeffisienten estimert:

$$C_e = \frac{s_g L - s_{e,mw}}{0.8 s_g L} = 1.25 - \frac{s_{e,mw}}{0.8 s_g L} \quad (2.10)$$

der:

s_g er snølasten på mark [kg/m]

$s_{e,mw}$ er erodert snømengde i snødriv-perioden [kg/m]

Snødriv-perioden ble sett på som perioden fra første snøfall til maksimal snølast var akkumulert på taket. Ved hjelp av Likn. 2.8 og 2.9 kan altså erosjonsmengden med snø fra taket beregnes ved å kombinere daglig data for snølast i snødriv-perioden og timesmessige verdier for vindhastigheten. Den resulterende eksponeringskoeffisienten regnes deretter ved hjelp av Likn. 2.10.

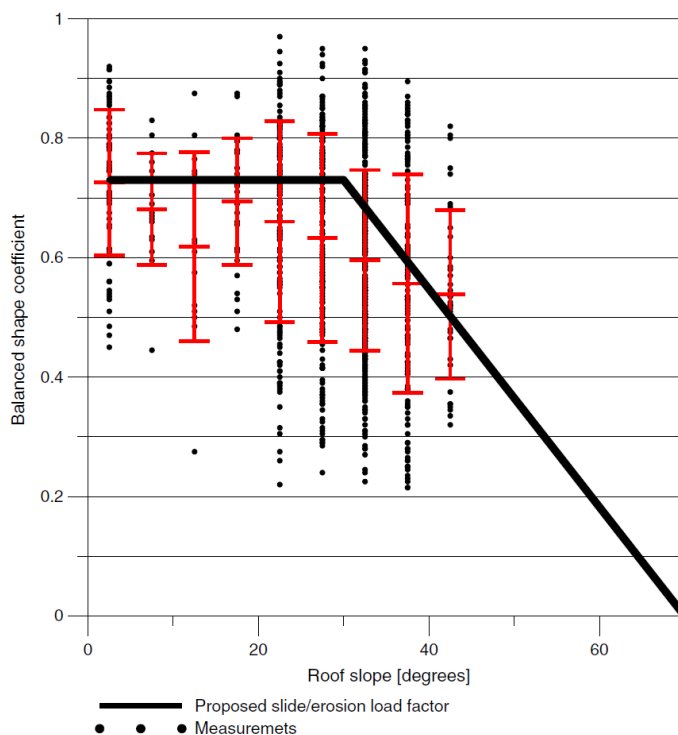
2.4.4 Snølastmålinger på tak

Som vi har vært inne på er målinger en god måte å kvantifisere snølasten på tak. Gjennom observasjoner kan man få innsikt i faktiske lastsituasjoner som kan gi grunnlag for forbedrede estimeringer av snølast. I dette delkapittelet presenteres studier av snølastmålinger på tak.

Ved Instituttet for bygningsteknikk ved Norges Landbrukshøgskole ble det i perioden 1966-1986 gjennomført en studie av snølasten på tak, dokumentert av Høibø (1989). I

studien ble rundt 200 uoppvarmede landbruksbygninger i Sør-Norge undersøkt. Bygningene befant seg i ulike klimatiske soner, og hadde saltak med takvinkel som varierte mellom 0° og 45° . Takene bestod av forskjellige takmaterialer, og hadde ulik vind- og soleksponering.

Det ble i studien gjort målinger av både tak- og marklast. Målingene ble gjort på både le- og loside av taket på tidspunktet da det ble antatt at taklasten var på sitt største. Gjennomsnittslast ble beregnet ut i fra verdiene som ble målt på le- og loside. Formfaktoren, herunder forholdet mellom tak- og marklasten, ble også beregnet.



Figur 2.8: Den balanserte formfaktoren som funksjon av takvinkel for målinger til Høibø (1989) (figur hentet fra Thiis og O'Rourke, 2015).

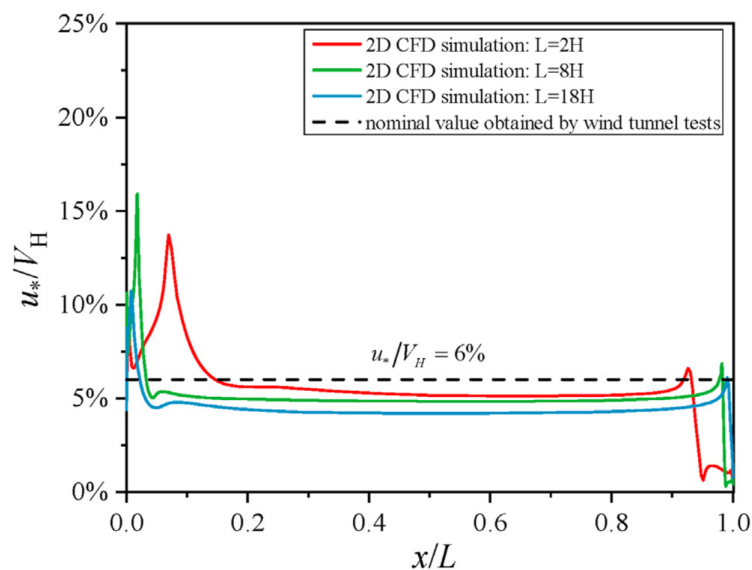
Med utgangspunkt i snølastmålingene til Høibø (1989) ble det utført en studie av snølast på tak med ulike takvinkler av Thiis og O'Rourke (2015). Snølastmålingene ble analysert for utvikling av en modell for snølast på tak. Siden målingene ble utført på uoppvarmede bygninger med røe takoverflater, ble resultatene anslått å gi en konservativ tilnærming for beregning av snølast på oppvarmede bygninger med glatte takoverflater. Alle takene det ble gjort målinger av ble delt inn etter takvinkel i 5 graders grupperinger fra 0 til 45° . Fig. 2.8 viser de balanserte formfaktorene (her definert som gjennomsnittet for le- og loside av taket) som en funksjon av takvinkelen. For hver enkelt gruppering er det vist gjennomsnitt og ± 1 SD. Bygningene med takvinkel fra 0 til 5° hadde en gjennomsnittlig formfaktor lik 0.73 med SD lik 0.12. Resultatene viser en nedadgående trend for formfaktoren med takvinkelen. Den foreslåtte modellen for formfaktoren (vist

som den svarte kurven i Fig. 2.8) spesifiserte samme verdi for takvinkler mellom 0 og 30° og en lineær reduksjon fra 30 til 70°. Takvinkler større enn 70° har i følge modellen ingen snølast, og følgelig en formfaktor lik 0.

2.4.5 Studier av friksjonshastighet

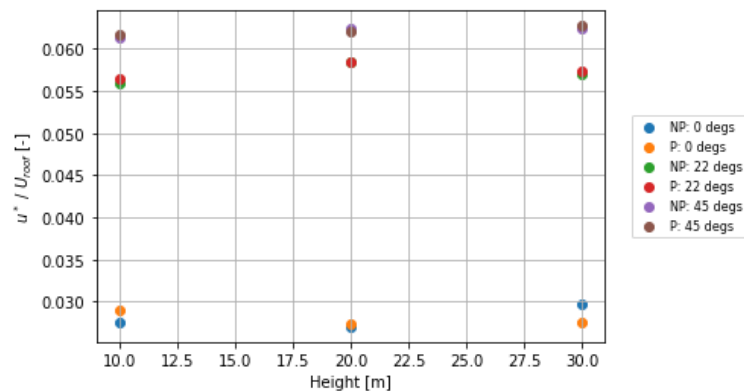
Friksjonshastigheten vil, som vi har sett tidligere, variere med ruheten til det omliggende terrenget. Når friksjonshastigheten ved snøoverflaten på et tak undersøkes, vil geometrien til bygget spille inn. Friksjonshastigheten er derfor nokså situasjonsbestemt. For typiske vindhastigheter over flatt terreng estimerer Tabler (1994) u_* til å være 4 % av vindhastigheten ved ti meters høyde. Dette vil altså representere friksjonshastigheten ved bakkeplan. Mens friksjonshastigheten ved bakken kan sees på som uniformt fordelt, vil vinden i grenselaget på takoverflaten være utsatt for strømningsseparasjon (Qiang mfl., 2021). Dette vil påvirke friksjonshastigheten i snøoverflaten. I tillegg vil vindhastigheten på taket være større enn på bakken, noe som må tas i betraktning.

Ved hjelp av CFD-simuleringer beregnet Qiang mfl. (2021) distribusjonen av friksjonshastigheten på flate tak til bygninger av ulik høyde (H). Denne distribusjonen er vist i Fig. 2.9. Forholdet mellom vindhastigheten i takhøyde (V_H) og friksjonshastigheten (u_*) viste seg å være størst på lo side av taket. Over størsteparten av lengden (L) på taket var friksjonshastigheten tilnærmet uniform. For de andre undersøkelsene i studien ble friksjonshastigheten på bakgrunn av dette antatt å være 6 % av vindhastigheten i takhøyde.



Figur 2.9: Distribusjonen av forholdet mellom friksjonshastigheten og vindhastigheten i byggets høyde. x representerer lengden fra lo side av taket (figur hentet fra Qiang mfl., 2021).

En annen faktor som også påvirker friksjonshastighet er bygningens orientering i forhold til vinden. Dersom vinden treffer bygningen ortogonalt vil u_* normalt være mindre enn dersom vinden treffer med en vinkel. Dette kommer av at sistnevnte tilfelle vil skape luftvirvler i overflaten som øker friksjonen mellom luften og overflaten (forklart nærmere i Kap. 2.2.5). I masteroppgaven til Abediy (2022) ble vindretningens påvirkning på friksjonshastigheten undersøkt ved hjelp av CFD-simuleringer. Simuleringene ble utført på bygninger av ulik høyde, og bygningene ble delt inn i to kategorier basert på om de hadde parapet eller ikke. Fig. 2.10 viser forholdet mellom friksjonshastigheten og vindhastigheten i takhøyde for de forskjellige simuleringene. Innfallsvinkelen vinden traff bygningen med viste seg å ha stor betydning for friksjonshastigheten. For innfallsvinkel lik 0° var u_* mindre enn 3 % av vindhastigheten i takhøyde. Friksjonshastigheten ble derimot anslått å være i overkant av 5.5 % og 6 % av vindhastigheten for simuleringer med henholdsvis 22° og 45° vinkel. Høyden til bygningen viste seg å ha mindre påvirkning på forholdet friksjonshastighet/vindhastighet i takhøyde.



Figur 2.10: Forholdet mellom friksjonshastighet og vindhastighet i takhøyde som for bygg av forskjellig høyde med ulik vindinnfallsvinkel. NP = ingen parapet, P = parapet, U_{roof} = vindhastigheten i takhøyde (hentet fra Abediy, 2022)

2.5 Modelleringsverktøy

2.5.1 Snømodellering i ESCIMO.spread

ESCIMO står for «Energy balance Snow Cover Integrated MOdel», og er et åpent regneark-basert simuleringsprogram for å beregne energi- og massebalansen i snødekker. Programmet tar inn timesmessige registreringer av temperatur, nedbør, vindhastighet, relativ fuktighet, global og langbølget stråling. Ut i fra disse seks variablene løses energi- og massebalanselikninger for et endimensjonalt homogent snødekke. På denne måten kan relevante prosesser i et snødekke parametriseres, slik at snøens egenskaper kan beskrives. Siden programmet tar utgangspunkt i en endimensjonal og homogen modell, vil simuleringene representere en forenkling av de virkelige forholdene inne i et snødekke,

som kjennetegnes av komplekse prosesser. Resultater fra simuleringer med ESCIMO viser riktignok at simulerte verdier stemmer godt overens med ukentlig måleverdier for snøens vannekvivalent (Strasser og Marke, 2010).

I ESCIMO regnes energibalansen i et snødekke ut time for time ved å ta hensyn til følgende energibidrag:

- Kortbølget og langbølget stråling
- Følelig og latente varmekullukser
- Energibidrag fra fast og våt nedbør
- Sublimasjon/resublimasjon
- Konstant varmekullukse fra jorden

Absorbent og reflektert kortbølget stråling regnes ut fra innkommende kortbølget stråling basert på albedo til snøen. Albedo til snøen vil reduseres med tiden, og tas hånd om av reduksjonskurver i timesmessige intervaller. I simuleringene i ESCIMO vil fast nedbør føre til en økning i SWE, mens våt nedbør vil bli addert til snødekkets vannlagringsreserver opptil en maksimumsgrense basert på den aktuelle snøvannsekivalenten. I tillegg til å ta inn temperatur, regner programmet også ut våttemperaturen i luften, som et kombinert mål på temperatur og relativ fuktighet. Dette er med på å skille fast og våt nedbør på en mer nøyaktig måte (Marke mfl., 2016).

Massebalansen til et snødekke beregnes for hvert enkelt tidssteg ved hjelp av fire variabler: nedbørsmengden i form av regn (Q_l), nedbørmengden i form av snø (Q_s), sublimasjonen/resublimasjonen (Q_{sub}) og avrenningen (Q_o). Masseregnskapet tar utgangspunkt i SWE fra forrige tidssteg, deretter adderes/subtraheres variablene i henhold til Likn. 2.11.

$$SWE_n = SWE_{n-1} + Q_l + Q_s + Q_{sub} - Q_o \quad (2.11)$$

Beregning av SWE ved hjelp av Likn. 2.11 gir dermed en kontinuerlig rekke av timesmessige snølaste over den gitte tidsperioden.

Tab. 2.5 viser en oversikt over alle parametrene som simuleres ut i fra de seks inputvariablene i ESCIMO.spread(v2). For en mer detaljert beskrivelse av hvordan de ulike parametrene regnes ut vises det til Strasser og Marke (2010) og Marke mfl. (2016).

Tabell 2.5: Oversikt over parametere som beregnes i ESCIMO.

Parameter	Benevning	Forklaring
Våttemperatur	[K]	Temperaturen til et adiabatisk system der luften er fullstendig mettet
Andel nedbør (væske)	-	Andel nedbør som kommer som regn (0 - 1)
Andel nedbør (fast)	-	Andel nedbør som kommer som snø (0 - 1)
Våt nedbør	[mm/h]	Mengde regn per time
Fast nedbør	[mm/h]	Mengde snø per time
Snøalder	[d]	Alderen til snø i dager
Albedo	-	Andel av lyset som blir reflektert av overflaten
Snøtemperatur	[K]	Temperaturen til snøen
Damptrykk (luft)	[hPa]	Damptrykket i luften
Damptrykk (overflate)	[hPa]	Damptrykket ved overflaten
Kortbølget strålingsbalanse	[W/m ²]	Strålingsbalanse for kortbølget stråling
Langbølget strålingsbalanse	[W/m ²]	Strålingsbalanse for langbølget stråling
Følbar varmeffluks	[W/m ²]	Energioverføring fra luft som følge av temperaturendring
Latent varmeffluks	[W/m ²]	Energioverføring mellom overflaten og luften som følge av kondensasjon/fordamping under faseovergang
Adveksjonsfluks regn	[W/m ²]	Den horisontale forflytningen av regn
Adveksjonsfluks snø	[W/m ²]	Den horisontale forflytningen av snø
Energibalanse	[W/m ²]	Sum av alle energiparametere
Potensiell smeltemengde	[mm/h]	Mengden snø tilgjengelig for smelting
Kuldeinnhold	[mm]	Varmen nødvendig for å heve temperaturen til snødekke til 0 °C uttrykt i mm fryst vann
Kuldeinnhold	[°C]	Snødekkets temperatur i grader celsius
Sublimasjon/ resublimasjon	[mm/h]	Mengde snø omgjort til vanndamp
Smeltemengde	[mm/h]	Snømengde som smelter på overflaten
Frysemenge	[mm]	Vannmengde som fryser på overflaten
Vannmengde	[mm]	Mengde vann på overflaten
Utstrømning	[mm]	Vann som strømmer bort fra overflaten
Modellert SWE	[mm]	Overflatens snømengde omgjort til mm vann

2.5.2 ERA5-data

ERA5 er en offentlig tilgjengelig database som består av timesbaserte estimater på ulike klimatiske data. Databasen er framstilt gjennom observasjoner av store mengder historiske data, ved hjelp av systemer for avansert modellering og dataassimilasjon. ERA5-data tar utgangspunkt i at jorda deles inn i et rutenett med dimensjon 30x30 km. Variablene innenfor hver rute er modellert som timesmessige estimater gjeldende for land- eller havområdet omsluttet av ruten. I modelleringen benyttes observasjoner fra 137 høydenivåer, 80 km opp i atmosfæren. Foruten estimater gir databasen også informasjon om usikkerhet knyttet til parametere med redusert tidsmessig eller romlig detalj i observasjonene (ECMWF, [udatert](#)).

2.6 Statistiske prinsipper

I dette kapittelet forklares noen av de statistiske prinsippene som benyttes for å håndtere data som produseres i oppgaven.

2.6.1 Ekstremverdianalyse

I visse situasjoner er det nødvendig å skaffe informasjon om ekstreme verdier for en gitt fordeling. Dette er viktig i statistiske analyser, der man må ta høyde for store avvik fra normalen når man skal dimensjonere. I slike tilfeller er det vanlig å gjøre en ekstremverdianalyse. En Gumbelfordeling er en type ekstremverdifordeling som benyttes til å modellere maksimums- eller minimumsverdier av observasjoner av forskjellige fordelinger. En slik fordeling kan benyttes når man vil predikere maksima når man kjenner maksimumsverdien for foregående år. Metoden benyttes ofte i naturvitenskapelige analyser, hvor man er interessert i å vite hva som anses som eksempelvis ekstreme nedbørmengder, ekstreme snølaste eller ekstreme jordskjelv (UiO, [2019](#)).

Sannsynlighetsfordelingen $f(x)$ for Gumbelfordelingen kan uttrykkes:

$$f(x) = \frac{1}{\beta} e^{-\left(\frac{x-\mu}{\beta} + e^{\frac{x-\mu}{\beta}}\right)} \quad (2.12)$$

der:

- μ er gjennomsnittsverdien
- β er konstantleddet (skaleringsfaktoren)
- x er en tilfeldig variabel

Den kumulative fordelingsfunksjonen er gitt ved:

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{x-\mu}{\beta}}} \quad (2.13)$$

Likn. 2.12 kan brukes for å regne ut sannsynligheten $f(x)$ for at en målt verdi er mindre enn eller lik X . Fordelingen gitt av Likn. 2.13 kan brukes til å finne forventet returperiode av observasjonene (UiO, 2019).

2.6.2 Root mean square error (RMSE)

I regresjonsanalyse kan «Root mean square error», ofte forkortet RMSE, brukes til å forklare hvor godt en modell passer et gitt datasett. RMSE er et mål på den gjennomsnittlige forskjellen mellom modellens predikerte verdier, og verdiene som er observert. Dette gjør det til en god metode for å teste ytelsen til en gitt modell (Bobbitt, 2021). Formelen for RMSE er gitt ved Likn. 2.14:

$$\sqrt{\frac{\sum(P_i - O_i)^2}{n}} \quad (2.14)$$

der:

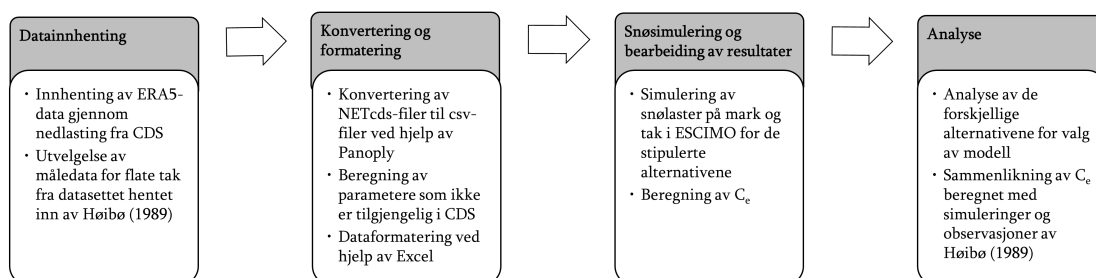
- P_i er den predikerte verdien
- O_i er den observerte verdien
- n er størrelsen på utvalget

3. Metode

I det følgende kapitlet vil framgangsmåten benyttet for å besvare oppgavens problemstilling bli presentert. Denne oppgaven benytter seg av en kvantitativ metode. Dette innebærer at numeriske data relatert til oppgavens tema innhentes og analyseres for å besvare forskningsspørsmålene presentert i Kap. 1. Alle simuleringer er utført ved hjelp av et regnearkbasert simuleringsprogram kalt ESCIMO.spread(v2). Resultatene fra simuleringene er videre behandlet og analysert ved hjelp av Excel.

3.1 Validering

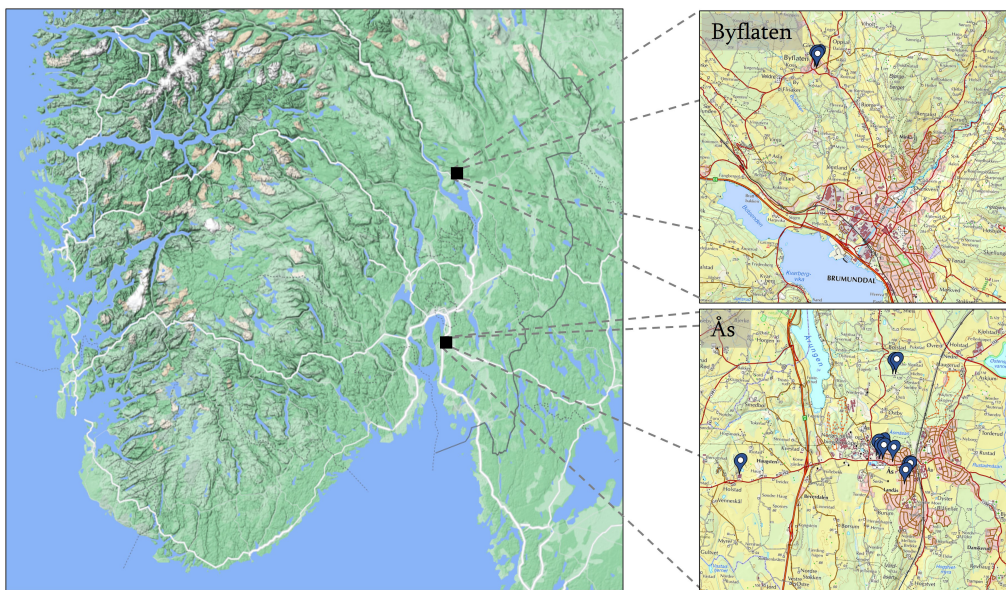
Hensikten med valideringen er å kontrollere resultatene fra simuleringene opp mot målinger utført i den virkelige verden. Snølastmålinger på flate tak er blitt tatt i bruk som valideringsgrunnlag i denne oppgaven. Denne type måledata utgjør et direkte sammenlikningsgrunnlag for simuleringene som skal gjøres i oppgaven. Gjennom valideringen prøves forskjellige modeller ut, for å komme fram til metoden som passer best sammenliknet med observasjoner som er gjort. Den valgte modellen danner grunnlag for andre analyser. Fig. 3.1 viser hele prosessen for valideringen. De forskjellige stegene vil bli forklart nærmere videre i kapitlet.



Figur 3.1: Prosess for validering.

3.1.1 Utvelgelse av måledata









Datagrunnlaget som ble innhentet av Høibø (1989) tas i bruk i denne gradsoppgaven (beskrevet nærmere i Kap. 2.4.4). Siden oppgaven er begrenset til flate tak, er kun målingene for tak med vinkel mellom 0° og 5° nyttiggjort. Dette omfatter 68 målinger fordelt på 17 bygninger, målt i årene mellom 1968 og 1985. Snølast ble målt for forskjellige bygningstyper, hvor grunnarealet varierer mellom 40 m^2 og 2000 m^2 . Bygningene befinner seg på to ulike områder: Ås i Ås kommune (Viken fylke) og Byflaten i Ringsaker kommune (Innlandet fylke). Lokasjoner for alle bygningene er vist i Fig. 3.2. I studien ved Landbrukshøgskolen ble bygningene plassert i ulike høydeklasser basert på bygningenes høyde over havet. Klassifiseringen bestod av fire klasser, der klasse 1 markerer lavlandsområde, mens klasse 4 markerer høyfjellsområde. Ås befinner seg rundt 100 meter over havet, og ble plassert i høydeklasse 1, mens Byflaten ligger rundt 300 meter over havet og ble plassert i høydeklasse 2. En oversikt over alle bygningene med flate tak inkludert observert eksponeringskoeffisient på hvert enkelt målested er vist i Fig. 3.3.



Figur 3.2: Lokasjoner for snølastmålingene utført av Høibø (1989).

3.1.2 Datainnhenting og formatering

Meteorologiske data benyttet i simuleringene for valideringen er hentet fra klimatjennesten Copernicus Climate Change Service (C3S). Datamaterialet er produsert av det europeiske meteorologisenteret ECMWF, som er et forskningsinstitutt som utarbeider værprognoser på mellomlang tidsskala, samt lagrer og utbedrer eksisterende meteorologiske data (Nilsen, 2021). De aktuelle observasjonene implementert i denne oppgaven har gjennomgått en reanalyse, som innebærer at observasjonene kombineres med avanserte modeller og systemer for dataassimilasjon for å komme frem til globale estimater.

Bygningsnr.	Beskrivelse	Lokasjon	Observert eksponeringsfaktor	Bilde
38 39	2 x lagerbygninger	Ås	0.68 0.98 1.14 0.91 1.15 0.98 0.90 0.59	
65 66	1 x enebolig 1x garasje	Ås	1.08 1.14 0.89 0.95 0.89 0.93 0.89 1.08 1.03	
67	1 x enebolig	Ås	0.76 1.13 1.04 1.10	
160	1 x lagerbygning	Ås	0.88 0.99 1.04 0.75 0.64 1.11 0.94 0.70 0.95	
245	1 x enebolig	Ås	0.99 1.08	
252 254 255 256 258 259	6 x universitetsbygg	Ås	0.94 1.05 0.89 0.94 0.98 0.76 1.09 1.00 1.04 0.99 0.99 1.09 1.00 1.13 0.94 1.01 0.99 0.93 0.91	
438 439 440 441	3 x skolebygg	Byflaten	0.88 0.66 0.69 0.70 0.89 0.68 0.70 0.60 0.86 0.84 0.56 0.74 0.81 0.74	
440 441	1 x gymsal	Byflaten	0.98 0.84 0.76	

Figur 3.3: Oversikt over alle bygninger med flate tak hvor snølastmålinger er utført.

ERA5 er siste versjon av denne typen reanalyserte data, og består av både daglige og tidsmessige tidsserier, som strekker seg tilbake til 1979. C3S leverer også foreløpige data for årene fra 1950 til 1979. All data lagres i en egen database kalt «Climate Data Store», forkortet CDS, der alle tidsserier er fritt tilgjengelig for nedlasting (ECMWF,

udatert; C3S, udatert).

For å kunne validere opp i mot målingene til Høibø (1989), ble data hentet inn for alle årene med observasjoner. Klimatiske parametre ble lastet ned fra to ulike datasett ut i fra den aktuelle tidsperioden for observasjonen:

- ERA5 timesmessige data for enkle atmosfæriske lag fra 1950 til 1978
- ERA5 timesmessige data for enkle atmosfæriske lag fra 1978 til i dag

Parameterne ble valgt ut basert på hvilke parametre som var nødvendige for å kunne kjøre snøsimuleringer i ESCIMO. Tab. 3.1 viser en oversikt over alle parameterne som ble brukt som input i programmet.

Tabell 3.1: Input-parametere for snøsimulering i ESCIMO.

Forkortelse	Enhet	Parameter
t2m	K	Temperatur, 2 m over overflaten
r2m	%	Relativ fuktighet i luften, 2 m over overflaten
ws10	m/s	Vindhastighet, 10 m over overflaten
tp	mm	Total nedbør
ssrd	W/m^2	Solstråling ved overflate (nedadgående)
strd	W/m^2	Termisk stråling overflate (nedadgående)

Filer lastet ned fra «Climate Data Store» kommer i et NETcdf-format. For å kunne analysere dataene i Excel, ble alle nedlastede filer konvertert til csv-filer ved hjelp av programmet Panoply. Panoply er et program utviklet av NASA som, foruten å konvertere filer, kan brukes til å lage plott ut av geo-referert data (NASA, udatert). Etter at parameterene var hentet frem som csv-filer, ble alle parametre sortert, samt konvertert til riktig benevnning i Excel, før de ble implementert i ESCIMO.

Enkelte meteorologiske parametre er ikke tilgjengelig for nedlasting i visse datasett i CDS, og i disse tilfellene ble andre variabler brukt for å kalulere de nødvendige parametrene. Relativ fuktighet (RH) og vindhastighet ble regnet ut gjennom en slik konvertering. Duggpunktstemperatur ble benyttet til å regne ut den relative fuktigheten. Til utregning av relativ fuktighet benyttes antakelsen om at RH avtar med 5% for hver grad i forskjell det er mellom temperaturen og duggpunktstemperaturen (Lawrence, 2005):

$$RH \approx 100 - 5(t - t_d) \quad (3.1)$$

der:

- RH er den relative fuktigheten i luften (%)
- t er temperaturen i lufta (K)
- t_d er duggpunktstemperaturen (K)

2 meter vindhastighet ble regnet ut ved hjelp av u- og v-komponenten av vinden i 2 meters høyde. Disse to parametrene representerer henholdsvis østgående og nordgående vindhastighet. Vindhastigheten er gitt ved følgende likning (ECMWF, 2021):

$$|\vec{V}| = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3.2)$$

der:

- u er u-komponenten til vinden (m/s)
- v er v-komponenten til vinden (m/s)
- $|\vec{V}|$ er vindhastigheten (m/s)

3.1.3 Validering av ERA5-data

Siden forskningsspørsmål 2 handler om reliabiliteten til ERA5-data, må disse dataene også valideres. Dette gjøres ved å ta i bruk snølastmålinger fra Tyskland utført av Marke mfl. (2016). Sammen med programmet ESCIMO.spread(v2) inkluderes ett år med meteorologiske målinger og observasjoner av SWE fra Vordersteinwald i Tyskland. Teststedet befinner seg rundt 800 moh., og har et varierende vinterklima med alternerende smelte- og akkumulasjonsperioder gjennom vintersesongen. Dette gjør det spesielt utfordrende å simulere snølast, og er følgelig en god test for ERA5-dataen. Snøobservasjonene i studien ble foretatt ved hjelp av innovative snømonitoreringssystemer (SnoMoS) på en testlokasjon rundt tre km fra den meteorologiske stasjonen. Resultatene fra simuleringene fra Vordersteinwald er vist i Marke mfl. (2016).

Det ble foretatt både tak- og marklastsimulering. Marklastsimuleringen ble brukt for direkte sammenlikning av ERA5-datasettet og de meteorologiske observasjonene, og for å undersøke sammenhengen mellom variasjoner i parameterverdier og simulert last. Ved hjelp av taklastsimuleringen kunne eksponeringskoeffisienten regnes ut, slik at datasettypene kunne sammenliknes også i lys av denne koeffisienten. Datagrunnlaget (ERA5) benyttet for simuleringene i ESCIMO ble hentet fra dataapplikasjonen «Shiny Weather Data». Dette er en nettside hvor brukeren gjennom en karttjeneste kan hente ut ERA5-data for flere meteorologiske parametere (Rokka, 2021). Disse dataene ble videre formateret til riktig benevning, før de ble implementert til ESCIMO.

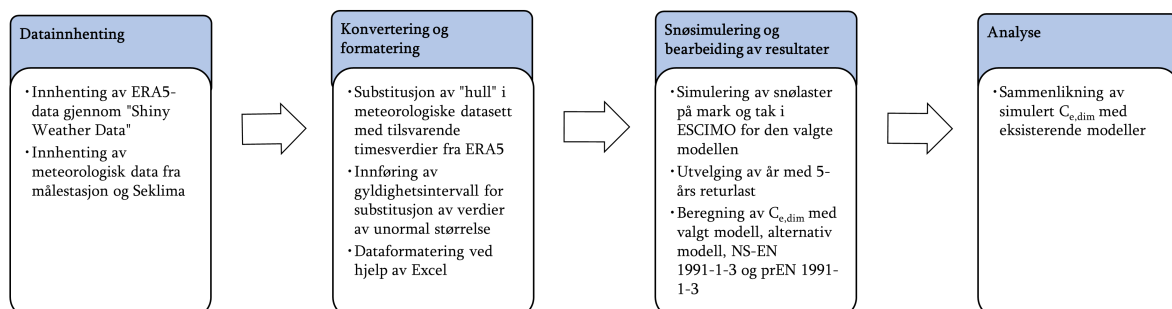
3.1.4 Simuleringer

Etter at alle parametere var formatert ble det utført simuleringer for de aktuelle periodene det ble gjort snølastmålinger i Ås og Byflaten av Høibø (1989). Det ble simulert ulike alternativer, som er beskrevet nærmere i Kap. 3.3.5. Ut i fra resultatene fra simuleringene ble deretter ett alternativ valgt ut for videre analyse. Denne analysen innebar langtidssimuleringer over en 30-årsperiode, som forklares i større detalj i Kap. 3.2. Alle beregnede verdier av taklast, marklast og eksponeringskoeffisienten i valideringen er tabulert i Vedlegg A.

Siden det for enkelte simuleringer ble beregnet marklaster av nokså ubetydelig størrelse (< 5 mm SWE), som hadde stor innvirkning på beregnet C_e , ble disse observasjonene ikke tatt med i videre analyse. Dette var gjeldende for fem av observasjonene i Høibø (1989) sitt datasett. Denne selekteringen vil påvirke reliabiliteten til valideringen, men på grunn av at avstanden mellom simulert og observert snølast var markant, og at dette gjaldt for få observasjoner, mistenkes det at en eller annen feil var tilknyttet disse målingene. Hvilken type feil er dog ukjent.

3.2 Langtidssimulering av snølast

Ut i fra resultatene fra valideringen ble en modell valgt for videre analyse. For å simulere snølast så nøyaktig som mulig ble det hentet inn data for en lengre periode. Simuleringene ble kjørt over 30 år, fra 1991 til 2020. Dette er den nåværende normalperioden for klimaanalyser. Normalen endres hvert tiende år, og brukes i klimaforskning for å ha en felles referanse for klima (Meteorologisk Institutt, 2021). Dette delkapittelet tar for seg fremgangsmåten for den videre analysen. Fig. 3.4 illustrerer prosessen for langtidssimuleringene. Hvert steg vil i det følgende bli presentert.



Figur 3.4: Prosess for langtidssimulering.

3.2.1 Caseområder

For analysen av perioden 1991 til 2020 ble det valgt ut 3 caseområder:

- Ås, Ås kommune (Viken)
- Byflaten, Ringsaker kommune (Innlandet)
- Tromsø, Tromsø kommune (Troms)

Stedene har ulike klimatiske forhold, noe som var en forutsetning for utvelgelsen. I tillegg er stedene valgt på bakgrunn av tilgang til meteorologiske data. Tab. 3.2 viser gjennomsnittsverdier for ulike meteorologiske parametere for de ulike caseområdene.

Tabell 3.2: Gjennomsnittsverdier for meteorologiske parametere i januar for caseområder. Verdier er beregnet på bakgrunn av ERA5-data for de siste 30 årene.

Område	Temperatur [°C]	Relativ fuktighet [%]	Vindhastighet [m/s]	Nedbør [mm]
Ås	-3.0	87.13	2.81	73.1
Byflaten	-6.5	86.38	2.28	67.2
Tromsø	-7.0	77.56	2.97	110.2

3.2.2 Datainnhenting og formatering

Datagrunnlaget er hentet fra forskjellige kilder. Det er anskaffet data både i form av modellerte data (ERA5) og meteorologiske målinger fra værstasjoner. ERA5-data er innhentet gjennom dataapplikasjonen «Shiny Weather Data» (Rokka, 2021). Applikasjonen henter dataene sine fra klimatjenesten C3S (forklart nærmere i Kap. 3.1.2), og det er hentet timesmessig data for enkle atmosfæriske lag, slik det også ble gjort i valideringen.

De meteorologiske målingene for Ås er hentet fra en meteorologisk feltstasjon ved NM-BU (SN17850), og er anskaffet gjennom universitetet. Feltstasjonen befinner seg i åpent landskap, rundt 90 meter over havet. I Tromsø er feltmålinger hentet fra den meteorologiske stasjonen på Holt (SN90400). Stasjonen er lokalisert ca. 10 meter over havet, i nærheten av sjøen. Dataene fra Tromsø er anskaffet gjennom tjenesten «Seklima», som er en nettside for nedlasting av værdata i Norge. Tjenesten er levert av Norsk Klimaservicesenter, som er et samarbeid mellom Meteorologisk Institutt, Norges Vassdrags- og Energidirektorat, NORCE og Bjerknessenteret. «Seklima» lar deg hente ut historiske observasjoner for ulike parametere i ulike tidsoppløsninger (Norsk Klimaservicesenter, [udatert](#)). For Byflaten var meteorologiske data ikke å oppdrive, derfor kjøres simuleringer kun med ERA5 data på denne lokasjonen.

Tabell 3.3: Datasettyper for 30-årssimulering.

Datasett nr.	Sted	Temperatur	Relativ fuktighet	Vindhastighet	Nedbør	Global stråling	Langbølget stråling
1	Ås	SN17850/ ERA5	SN17850/ ERA5	SN17850/ ERA5	ERA5	ERA5	ERA5
2	Ås	ERA5	ERA5	ERA5	ERA5	ERA5	ERA5
3	Byflaten	ERA5	ERA5	ERA5	ERA5	ERA5	ERA5
4	Tromsø	SN90400/ ERA5	SN90400/ ERA5	SN90400/ ERA5	SN90400/ ERA5	ERA5	ERA5
5	Tromsø	ERA5	ERA5	ERA5	ERA5	ERA5	ERA5

Parameterene som ble anskaffet for simuleringer i ESCIMO er vist i Tab. 3.1. Kortbølget og langbølget strålingsdata har ERA5 som eneste datakilde for alle simuleringene, grunnet manglende tilgjengelighet på meteorologiske målinger. Med unntak av Byflaten, hvor kun ERA5 var tilgjengelig, ble det laget to datasett for hvert sted: ett med ERA5 og ett med hovedsakelig meteorologisk data. En oversikt over de forskjellige datasettkombinasjonene er vist i Tab. 3.3. Datasett nr. 2, 3 og 5 består utelukkende av ERA5, mens datasett nr. 1 og 4 består av en kombinasjon av ERA5 og meteorologiske målinger. Denne kombinasjonen av ulike data var nødvendig fordi det manglet målinger for flere tidsintervaller i datasettet. Tab. 3.4 viser den prosentvise andelen som ble erstattet med ERA5-data for hver enkelt parameter i hvert av de to datasettene. Som man kan se av denne tabellen er i snitt 1.7 % av alle timesverdiene for de tre aktuelle parameterene i datasett 1 utelatt. Alle disse verdiene ble erstattet med tilsvarende timesverdi fra ERA5. For datasett 4 ble i snitt 15.9 % av de fire aktuelle parameterene erstattet med ERA5-data.

Tabell 3.4: Prosentvis andel av hver parameter som består av ERA5-data for SN90400 og SN17850.

Parameter	SN90400 (Tromsø)	SN17850 (Ås)
Temperatur	8.2 %	1.2 %
Relativ fuktighet	8.2 %	2.3 %
Vindhastighet	38.8 %	1.6 %
Nedbør	8.6 %	-
Gjennomsnitt	15.9 %	1.7 %

I tillegg til «hullene» i datasettet for de meteorologiske målingene i Ås, var det også enkelte verdier som var av unormal størrelse. Disse ble ansett som feilmålinger, og berørte parameterene relativ fuktighet og vindhastighet. For å luke ut disse feilmålingene ble det satt et gyldighetsintervall for hver parameter. Dersom en gitt timesverdi ikke til-

fredstilte kriteriet, ble verdien erstattet med tilsvarende timesverdi fra ERA5-datasettet. Grensebetingelsene ble satt som følger:

Dersom	$0 \% < \text{relativfuktighet} < 100 \%$	beholdes meteorologisk måling
Dersom	$0 \text{ m/s} < \text{vindhastighet} < 22 \text{ m/s}$	beholdes meteorologisk måling

Dersom de to ovennevnte kriteriene ikke ble tilfredsstilt ble timesverdien erstattet med ERA5-data. Dette var tilfellet i 0.24 % og 0.34 % av tilfellene for henholdsvis RH og vindhastighet. Grenseverdiene for relativ fuktighet ble valgt på bakgrunn av det veletablerte faktum at RH har positiv verdi mellom 0 og 100 %. Vindhastighetsgrensen ble valgt basert på hva som anses som maksimal vind som kan oppstå i Ås, altså 22 m/s.

3.2.3 Ruhetslengde og høyde over havet

Gjennom «Shiny Weather Data» er det mulig å hente ut gjennomsnittsverdier for ruhetslengde og høyde over havet for aktuelt område. Data hentet fra ERA5 er gjeldende for områder på 30x30 km. Siden topografi og terreng kan variere stort innenfor et slikt område, vil det være hensiktsmessig å vurdere gjennomsnittsverdiene i relasjon til stedet man gjør analysen for. Eksempelvis kan et sted ha høye fjell i omkringliggende områder som kommer innenfor den ruten det er hentet ERA5 data fra. Dette kan ha stor innvirkning på om nedbør kommer som snø eller regn. Terrengruheten har på den annen side betydning for vindhastigheten i et området. Stor ruhetslengde gir lave vindhastigheter som følge et ujevnt overflatelag som sakker ned vinden. Gjennomsnittsverdier innhentet gjennom ERA5 må derfor vurderes opp i mot tilsvarende verdier ved målestasjonene. Tab. 3.5 viser gjennomsnittlig ruhetslengde og høyde over havet for ulike datatyper og områder som er undersøkt. Det understrekes at Vordersteinwald er inkludert i tabellen, selv om dette stedet ble analysert gjennom valideringen.

Tabell 3.5: Gjennomsnittlig ruhetslengde og høyde over havet for forskjellig datatyper og caseområder.

Sted	Ruhetslengde [m]		Høyde over havet [m]	
	ERA5		Met. stasjon	ERA5
Ås	1.04		95	118
Byflaten	1.53		290	469
Tromsø	0.24		10	211
Vordersteinwald	0.84		801	613

3.3 Modellbeskrivelse

I dette kapitlet forklares snømodellen i ESCIMO. Dette programmet benyttes i utgangspunktet til å regne ut snøens vannekvivalent (SWE) på bakken, hvilket gjøres også i denne oppgaven. I tillegg til dette tilføyes det justeringer til programmet, for å beregne snøens vannekvivalent på tak. I de neste avsnittene forklares hvilke forutsetninger som ligger til grunn for simuleringene, hvordan ESCIMO regner snølast, samt hvilke justeringer som gjøres til programmet, for å beregne snølasten på tak.

3.3.1 Grensebetingelser og konstanter

I ESCIMO er det brukeren selv som definerer hvilke grensebetingelser og konstanter som ligger til grunn for beregningene. Tab. 3.6 viser et utvalg av konstantene som er forhåndsdefinert av programmet, samt de respektive størrelsene. Med unntak av grunnvarme ble alle de forhåndsdefinerte konstantene beholdt for simuleringene i denne oppgaven. For simuleringer av marksnølast ble det antatt en konstant varmekraft fra bakken på 2 W/m^2 . For simulering av snølast på tak ble det antatt ingen varmekraft fra bakken, fordi byggene anses å være kalde ventilerte tak. Mesteparten av byggene i Høibø (1989) har også en slik karakteristikk.

Tabell 3.6: Grensebetingelser og konstanter forhåndsdefinert av ESCIMO (ESCIMO.spread(v2), 2016).

Grensebetingelse/konstant	Størrelse	Forklaring
Terskel for signifikant snøfall	0.5 mm/h	Den nedre grensen for snøfall pr. time som medregnes
Snøemissivitet	0.99	Snøens strålingsevne
Grunnvarme	2.00 W/m^2	Bakkens konstante varmekraft
Vannholdende kapasitet	10 %	Absorpsjonskapasiteten til snø

3.3.2 Simulering av snølast på mark

ESCIMO benytter en kompleks avansert metode der hele energiregnskapet for et endimensjonalt homogent snødekke er tatt i betraktning. Å forklare alle beregninger som gjøres i programmet går utenfor denne oppgavens ramme. For ytterligere informasjon om beregninger knyttet til snødekkets energibalanse henvises det derfor til Marke mfl. (2016).

Siden SWE er et direkte mål på snølasten, er denne parameteren relevant for snødekkets masseberegning. Som nevnt i Kap. 2.5.1 beregnes snødekkets massebalanse ved hjelp av Likn. 2.11:

$$SWE_n = SWE_{n-1} + Q_l + Q_s + Q_{sub} - Q_o \quad (3.3)$$

Likningen beregner en kontinuerlig rekke av timesmessige snølaste. På denne måten holdes utviklingen i snødekket seg oppdatert gjennom snøsesongen.

3.3.3 Simulering av snølast på tak

Målet for utregningen av SWE på tak er å lage en modell som hensyntar vindens evne til å erodere snø på best mulig måte. I denne sammenhengen er mange av snøkarakteristikkene introdusert i Kap. 2.3 relevante. Snødekkets overflateegenskaper, herunder friksjonshastighet og terskelfriksjonshastighet, påvirker i stor grad hvor lett snøpartikler lar seg frigjøre fra snøoverflaten. Formler for disse parameterene vil derfor bli brukt under beregningen av taks snølasten.

For å implementere snøerosjon til snølastregnskapet, legges det til en erosjonsparameter til massebalanselikningen, kalt Q_{ero} . Siden all snø som blåser av et tak er forbundet med en lavere taklast, har parameteren negativt fortegn. Beregningen av SWE for hvert enkelt tidsintervall blir dermed:

$$SWE_n = SWE_{n-1} + Q_l + Q_s + Q_{sub} - Q_o - Q_{ero} \quad (3.4)$$

Q_{ero} regnes ut for hvert tidssteg ved hjelp av Naaim mfl. (1998) sin definisjon av snøerosjon presentert gjennom Likn. 2.6. I simuleringene settes verdien av $B\rho$ til 0.0007, samsvarende med det som gjøres i Thiis og Ramberg (2008). Likningen for utregning av snøerosjon kan dermed uttrykkes:

$$Q_{ero} = 0.0007 (u_*^2 - u_{*t}^2) \quad \text{hvis} \quad u_* \geq u_{*t} \quad (3.5)$$

En antagelse som gjøres for beregningen for snølaste på tak er at det ikke avsettes snø på taket. Normalt vil vinden kunne suspendere snøpartikler gjennom luften slik at de potensielt kan havne på taket. Denne snømengden anses riktignok som neglisjerbar sammenliknet med snøen som eroderer av takoverflaten.

Som man kan se av Likn. 3.5 er forutsetningen for at snøerosjon skal oppstå at friksjonshastigheten er større enn eller lik terskelfriksjonshastigheten. I en slik situasjon vil vinden være sterk nok til å løsrive snøpartikler fra snøoverflaten. En annen måte å formulere det på er at snøen er løs nok for vinden til å løsrive partikler. Både vindhastigheten og overflateegenskapene til snøen spiller altså inn på erosjonsmengden. I det

neste avsnittet forklares hvordan disse to forholdene er modellert i ESCIMO.

3.3.4 Implementering av erosjonsparametere

Som man kan se av Likn. 3.5 vil snøerosjonen en gitt time avhenge av u_* og u_{*t} . Disse parameterne må derfor defineres, noe som kan være vanskelig uten detaljert informasjon om bygget og dets lokasjon. Friksjonshastigheten vil gjerne variere avhengig av geometrien til bygget og ruheten til terrenget, jf. Likn. 2.2. Terskelfriksjonshastigheten vil på sin side være avhengig av egenskaper til snøoverflaten, som eksempelvis partikkelbinding, kohesjon og kinetisk friksjon (Li og Pomeroy, 1997). Det vil følgelig være forbundet usikkerhet til bestemmelsen av snølast siden takene har ulike omgivelser, geometri og lokalt klima. Valgt modell er riktignok basert på oppdaterte studier på de aktuelle feltene. I det følgende vil modellene for friksjonshastighet og terskelfriksjonshastighet beskrives nærmere.

Friksjonshastighet

Beregningen av friksjonshastigheten tar utgangspunkt i Tabler (1994) sin estimering av friksjonshastigheten til å være 4 % av vindhastigheten i 10 meters høyde:

$$u_* = 0.04 U_{10} \quad (3.6)$$

På samme måte som for andre parametere beregnes friksjonshastigheten ut for hver time i tidsserien. Siden vindhastigheten endrer seg med tiden, vil også friksjonshastigheten variere time for time.

Denne definisjonen av friksjonshastighet vil være en forenkling av faktiske forhold i snøoverflaten. Som nevnt i Kap. 2.4.5 vil u_* avhenge av ruheten til terrenget og geometrien til bygget. Tabler (1994) sin definisjon benyttes til å beregne friksjonshastigheten ved bakken, som vil være forskjellig fra friksjonshastigheten til snø på tak. Riktignok viste CFD-simuleringene til Abediy (2022) at friksjonshastigheten i større grad er avhengig av innfallsvinkelen til vinden. Det beregnede forholdstallet mellom friksjonshastigheten og vindhastigheten i takhøyde varierte mellom i underkant av 0.03 til i overkant av 0.06 for alle simuleringene (se Fig. 2.10). Forholdstallet anslått av Tabler (1994) befinner seg et sted i mellom disse ytterpunktene, og ansees derfor som et godt estimat på friksjonshastigheten.

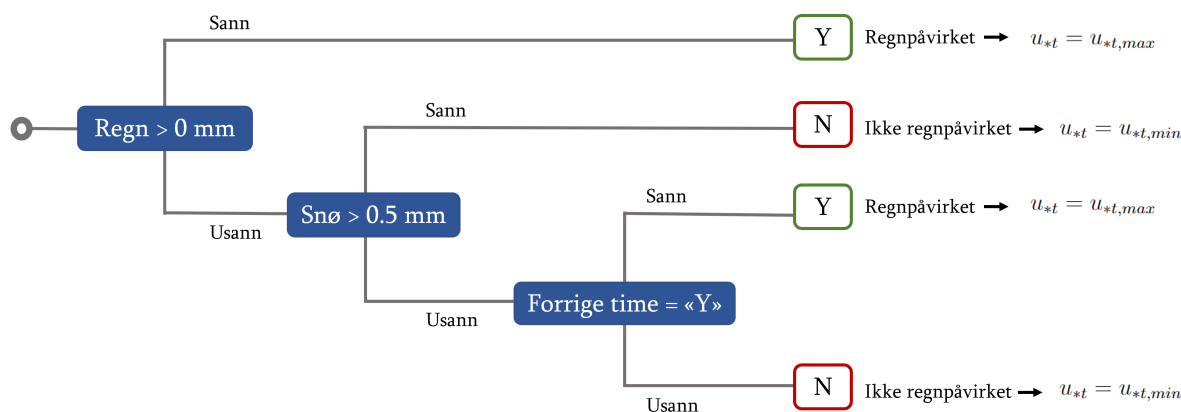
Terskelfriksjonshastighet

Terskelfriksjonshastigheten til snø er som vi har sett tidligere avhengig av de klimatiske omgivelsene. Eksempelvis øker u_{*t} som følge av temperaturøkning, regn og hard vindpå-

kjenning. Dessuten vil bindingene mellom snøpartikler kontinuerlig øke med tiden som følge av masse- og energiflukser gjennom snødekket og endringer i snøkrystallene (Li og Pomeroy, 1997). Generelt sett vil u_{*t} være på sitt laveste under og rett etter et snøfall. I tiden etter snøfallet vil u_{*t} gradvis øke som følge av metamorfose.

Som observert gjennom Tab. 2.4 kan verdier for snøens terskelfriksjonshastighet variere stort. I studiene som er gjengitt i tabellen varierer u_{*t} for nysnø mellom 0.07-0.30 m/s, mens for gammel eller påvirket snø varierer verdien mellom 0.22-1.0 m/s. Grenseverdier for u_{*t} implementeres også i den valgte modellen. Verdien vil ligge et sted mellom en minimumsverdi, $u_{*t,min}$, og en maksimumsverdi $u_{*t,max}$. For å evaluere ulike grenseverdier gjøres det tre ulike simuleringer, med forskjellige kombinasjoner av minimums- og maksimumsverdien. I tillegg gjøres det to simuleringer med en fast terskelfriksjonshastighet, som ikke endrer seg med tiden.

Siden terskelfriksjonshastigheten til snø vil øke med tiden er dette noe som også må tas i betraktning. Hvor mange dager det tar etter et gitt snøfall for u_{*t} å øke til $u_{*t,max}$ vil variere. På bakgrunn av dette innføres det en tidsvariabel, T_d . Tidsvariabelen er definert som antall dager mellom $u_{*t,min}$ og $u_{*t,max}$. To forskjellige verdier for T_d innføres i modellen: 20 og 30 dager.



Figur 3.5: Skjema for bestemmelse av regnpåvirkning.

En faktor som kan gi drastiske endringer i snøens terskelfriksjonshastighet er regn. Regnfall vil ødelegge snøkrystallene, og føre til at overflaten blir kompakt og hard. Dette er noe som må tas hensyn til i modellen. Det innføres derfor en parameter, «regnpåvirkning», som beskriver om snøoverflaten er påvirket av regn eller ikke. I tilfeller hvor snøoverflaten defineres som regnpåvirket vil $u_{*t} = u_{*t,max}$. Fig. 3.5 viser skjematisk hvordan regnpåvirkning bestemmes. Etter et regnfall vil u_{*t} forbli lik maksimumsverdien for terskelfriksjonshastighet, helt inntil et nytt snøfall inntreffer (hvor snøfallet er større

enn terskelverdien for signifikant snøfall, 0.5 mm). I tilfeller med snøfall vil modellen nullstilles, og $u_{*t} = u_{*,min}$.

Basert på forutsetningene gitt av de foregående avsnittene ble modellen for terskelfriksjonshastighet utviklet. Modellen er betinget av regnpåvirkning og snøalder (S_d). Snøalderen beskriver tiden siden siste snøfall, uttrykt i dager. For timer i tidsserien med snøfall større enn den nedre grenseverdien for signifikant snøfall, vil snøalderen være lik null. I perioder etter et snøfall med opphold for nedbør vil terskelfriksjonshastigheten øke lineært med tiden fra $u_{*,min}$ til $u_{*,max}$. Stigningstallet vil avhenge av tidsvariabelen.

Oppsummert kan altså terskelfriksjonshastigheten bestemmes gjennom følgende tre punkter:

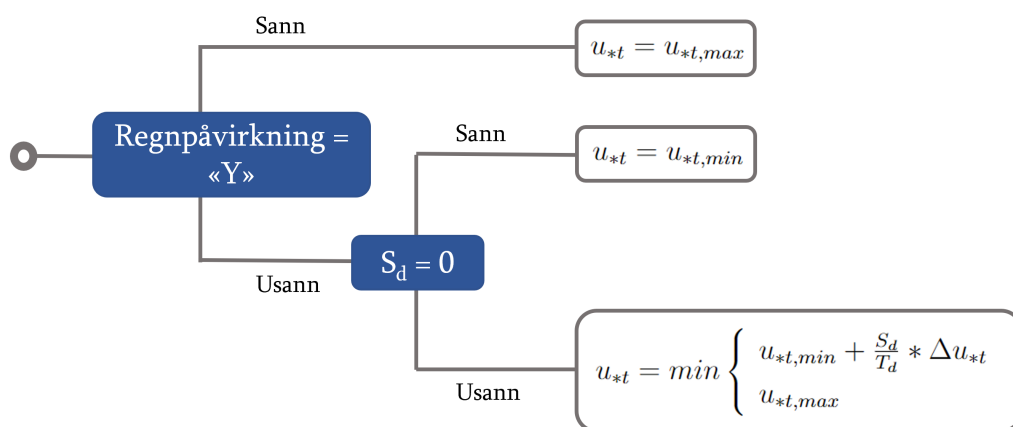
- I tilfeller med regnpåvirkning $\Rightarrow u_{*t} = u_{*,max}$
- I tilfeller der $S_d = 0 \Rightarrow u_{*t} = u_{*,min}$
- I tilfeller der $S_d > 0 \Rightarrow u_{*t}$ bestemmes vha. Likn. 3.7

$$u_{*t} = \min \begin{cases} u_{*,min} + \frac{S_d}{T_d} * \Delta u_{*t} \\ u_{*,max} \end{cases} \quad (3.7)$$

der:

Δu_{*t} er differansen mellom $u_{*,max}$ og $u_{*,min}$

På grunn av minimumskriteriet i Likn. 3.7 vil u_{*t} ikke overstige $u_{*,max}$. Bestemmelsen av terskelfriksjonshastigheten er visualisert skjematisk gjennom Fig. 3.6.



Figur 3.6: Skjema for bestemmelse av terskelfriksjonshastighet

3.3.5 Alternativene

Som nevnt tidligere er erosjonsmengden betinget av forutsetningene lagt til grunn gjennom erosjonsparameterne. Av den grunn er det nødvendig å utforske forskjellige alternativer når det simuleres i ESCIMO. Ulike kombinasjoner av $u_{*t,min}$, $u_{*t,max}$ og T_d utgjør derfor tre av de totalt fem alternativene som undersøkes. De to resterende alternativene kjøres med statiske verdier for terskelfriksjonshastighet. Tab. 3.7 viser en oversikt over de ulike alternativene som benyttes i valideringen og casestudiet.

Tabell 3.7: Grensebetingelser for simuleringer i ESCIMO.

Alternativ	Forkortelse	Min $u_{*t,min}$ [m/s]	Max $u_{*t,max}$ [m/s]	Max - min Δu_{*t} [m/s]	Dager max til min T_d [dager]
1	SIM1	0.1	0.5	0.4	20
2	SIM2	0.1	0.3	0.2	30
3	SIM3	0.07	0.2	0.13	30
4	SIM4			$u_{*t} = 0.15 \text{ m/s}$	
5	SIM5			$u_{*t} = 0.10 \text{ m/s}$	

Den nedre grenseverdien, $u_{*t,min}$, settes lik 0.1 m/s for simulering 1 og 2. Denne verdien er i nedre sjiktet av alle de estimerte verdiene for nysnø i Tab. 2.4. Siden det benyttes middelveidier for vindhastighet, vil mange av de høyeste vindhastighetene (som potensielt gir snøerosjon) være utelatt. Det anses derfor som akseptabelt å velge en nokså lav terskelverdi. Av den grunn har også simulering 3 en lav verdi for $u_{*t,min}$, lik 0.07 m/s. $u_{*t,max}$ settes lik 0.5 og 0.3 m/s for henholdsvis alternativ 2 og alternativ 3. Begge disse verdiene kan ansees som typiske for maksimum terskelverdi i studiene som er gjennomgått. Simulering 3 har på den annen side en ganske lav maksimal terskelverdi ($u_{*t,max} = 0.20 \text{ m/s}$). Dette alternativet ble laget underveis i oppgaven på bakgrunn av at de eksisterende simuleringene ga lave erosjonsmengder. Det ble derfor laget en simulering med svært luftig og lett snø, slik at dette kunne bøte på andre eventuelle effekter som førte til at erosjonsmengden ble liten.

Når det gjelder antall dager mellom minimum og maksimum terskelverdi (T_d) velges 20 og 30 dager. En utfordring med å velge verdier for T_d er at terskelen for snøtransport vil være avhengig av vind- og temperaturhistorien. Effekter som metamorfose og sintering øker hardheten til snø, og disse prosessene vil skje oftere ved høye temperaturer og vindhastigheter (Li og Pomeroy, 1997). Eksempelvis observerte Gray mfl. (1970) en økning i snødensitet fra 45 til 230 kg/m^3 på 24 timer som følge av vindlaster. Yong og Metaxas (1985) rapporterte på sin side at ved en relativt stabil temperatur på -13°C , økte snødensiteten fra 100 til 300 og 400 kg/m^3 på henholdsvis 30 og 50 dager.

Densiteten til en snøoverflate kan med andre ord øke i varierende grad. Det finnes riktignok ikke mye litteratur på hvor mye terskelfriksjonshastigheten til snø øker med snøalderen. Verdiene på 20 og 30 dager baseres derfor på antakelser av hva som ansees å være en rimelig tidshorison for u_{*t} å gå fra minimum til maksimum.

3.4 Eksponeringskoeffisienten

Det følgende delkapittelet forklarer framgangsmåten for bearbeiding av snølastdata for utregning av eksponeringskoeffisienten.

3.4.1 Beregning av eksponeringskoeffisienten

Som beskrevet i Kap. 2.1.1 er eksponeringskoeffisienten C_e en faktor som skal ivareta erosjon, avsetning og redistribusjon av snø på tak som følge av vind. Eksponeringskoeffisienten skal ikke ta hensyn til effekter av snøsmelting som følge av varmegjennomgang gjennom taket eller eventuelle snølastøkninger forårsaket av snødriver. Disse effektene blir ivaretatt av henholdsvis den termiske koeffisienten C_t og formfaktoren μ_i . Den termiske koeffisienten settes normalt lik 1.0 i henhold til NS-EN 1991-1-3, med unntak av tilfeller med betydelig varmetap gjennom taket. I denne oppgaven forenkles utregningen av eksponeringskoeffisienten ved å sette $C_t = 1.0$ for alle tak. Med tanke på valideringen anses dette som rimelig, i og med at de fleste av de observerte takene i Høibø (1989) er ventilerte tak. Det antas videre at formfaktoren har en verdi på 0.8. Dette er den gjeldende verdien for flate tak i henhold til NS-EN 1991-1-3.

Likningen for eksponeringskoeffisienten kan deduseres ut i fra Likn. 2.1. I oppgaven til nå har SWE (oppgitt i kg/m^2 eller mm) blitt brukt som mål på snømengde, siden dette er hva ESCIMO regner ut. Snølast benevnes med kN/m^2 i NS-EN 1991-1-3, men siden utregningen av C_e bruker forholdet mellom snølasten på tak og mark, vil det ikke være nødvendig med konvertering. Eksponeringskoeffisienten kan dermed beregnes ved hjelp av Likn. 3.8.

$$C_e = \frac{SWE_{tak,max}}{\mu_i C_t SWE_{mark}} = \frac{SWE_{tak,max}}{0.8 SWE_{mark}} \quad (3.8)$$

der:

$SWE_{tak,max}$ er maksimal SWE på tak [kg/m^2]

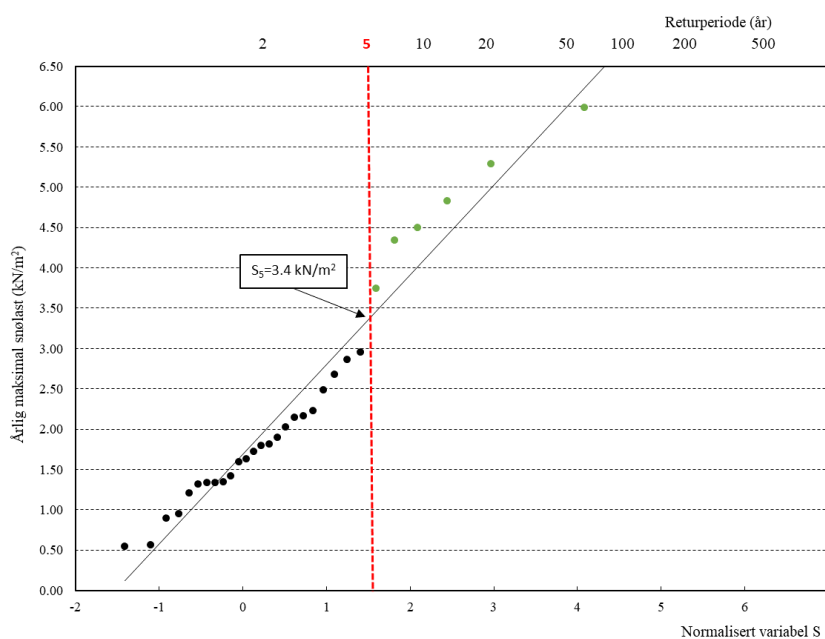
SWE_{mark} er SWE på mark ved samme tidspunkt som $SWE_{tak,max}$ [kg/m^2]

Som observert gjennom Likn. 3.8 benyttes maksimal SWE på taket som utgangspunkt for beregningene. Marklasten gjenspeiler den akkumulerte snøen simulert den samme timen som $SWE_{tak,max}$ inntreffer. I visse tilfeller vil det være mer snø på taket enn på

bakken. I slike situasjoner vil varmekraften på bakken smelte bort en større mengde med snø enn det som blåses av taket. Dette er nærliggende for år med lite snø, siden forskjellen mellom tak- og marklasten er ganske liten. Visse deler av snøsesongen kan i ytterste konsekvens ha en uendelig stor eksponeringskoeffisient. Dette oppstår når snø på bakken er fraværende, mens det fortsatt er snø på taket. Slike tilfeller vil ikke gi representative verdier for eksponeringskoeffisienten.

3.4.2 Beregning av 5-års returlast for normalperiode

Siden store snømengder er fordelsmessig når man skal beregne eksponeringskoeffisienten gjøres det en ekstremverdianalyse for å hente ut snølaster for år med 5-års returlast. Dette innebærer at kun snølastene som er forventet å inntreffe hvert femte år medberregnes. Utrekning av gyldige snølaster regnes ut ved hjelp av en Gumbelfordeling, som er beskrevet nærmere i Kap. 2.6.1.



Figur 3.7: Den log-normaliserte regresjonslinjen for marksnølast og returperiode for Tromsø, med data hentet fra ERA5 (laget med inspirasjon fra masteroppgaven til Krogsrud, 2021).

Fig. 3.7 viser en log-normalisert regresjonslinje for snølast på mark samt returperioder for Tromsø. Den vertikale linjen angir grensen for 5-års returlast. Alle punkter (markert i grønn) til høyre for denne linjen har en marklast større enn 5-års returlast. Disse tas med videre i analysen, mens de gjenværende punktene ekskluderes. Beregningen av returlast er gjort for alle caseområdene, både med ERA5 og meteorologiske målinger som datagrunnlag (med unntak av Ringsaker der det kun er data i form av ERA5).

3.4.3 Den dimensjonerende eksponeringskoeffisienten

For å regne ut eksponeringskoeffisienten for et gitt område må man, som vi har sett, ta utgangspunkt i snøsesonger med betydelig snøfall. Etter denne seleksjonen kan eksponeringskoeffisienten regnes ut ved hjelp av Likn. 3.8 for de respektive årene. Videre beregnes en verdi for eksponeringskoeffisienten som anses som typisk for et område; den dimensjonerende eksponeringskoeffisienten $C_{e,dim}$. I denne oppgaven beregnes $C_{e,dim}$ ved å ta gjennomsnittet av alle de gyldige C_e -verdiene for et gitt område og år.

I analysen skal den dimensjonerende eksponeringskoeffisienten sammenliknes med en alternativ snømodell. Dette er en modell laget av Tabler (1994), som ble videreutviklet for å gjelde tak av O'Rourke mfl. (2005). Hvordan denne modellen regner ut eksponeringskoeffisienten er forklart i Kap. 2.4.3. På samme måte som med oppgavens modell regnes $C_{e,dim}$ ut ved å regne ut gjennomsnittet for alle år med marklast høyere enn 5-års returlast.

3.4.4 Bestemmelse av terrengruhetkategori

Siden eksponeringskoeffisienten beregnet av modellen skal sammenlignes med eksponeringskoeffisienten gitt av NS-EN 1991-1-3, samt oppdatert snølaststandard (prEN-1991-1-3), må terrengkategorier bestemmes. De forskjellige områdene ble inndelt etter beskrivelsene gitt av Fig. 2.3. Vurderingen ble gjort på bakgrunn av overflateruheten til terrenget rundt den meteorologiske stasjonen på det gitte stedet. For steder uten målinger fra meteorologisk stasjon, ble det gjort en generell betraktning av terrenget for området. Tab. 3.8 viser valgt terrengkategori for de ulike områdene analysert i oppgaven. Foruten caseområdene ble det også valgt terrengkategori for hvert observasjonssted i valideringen.

Tabell 3.8: Terrengkategorier for ulike områder. Beskrivelsene er hentet fra Standard Norge (2009).

Sted	Terrengkategori	Beskrivelse
Ås	III	Område med jevnt dekke av vegetasjon eller bygninger eller med spredte hindringer med innbyrdes avstander på høyst 20 ganger deres høyde
Ringsaker	II	Område med lav vegetasjon som gress og spredte hindringer med innbyrdes avstander på minst 20 ganger deres høyde
Tromsø	I	Innsjøer eller områder med lite vegetasjon og uten hindringer

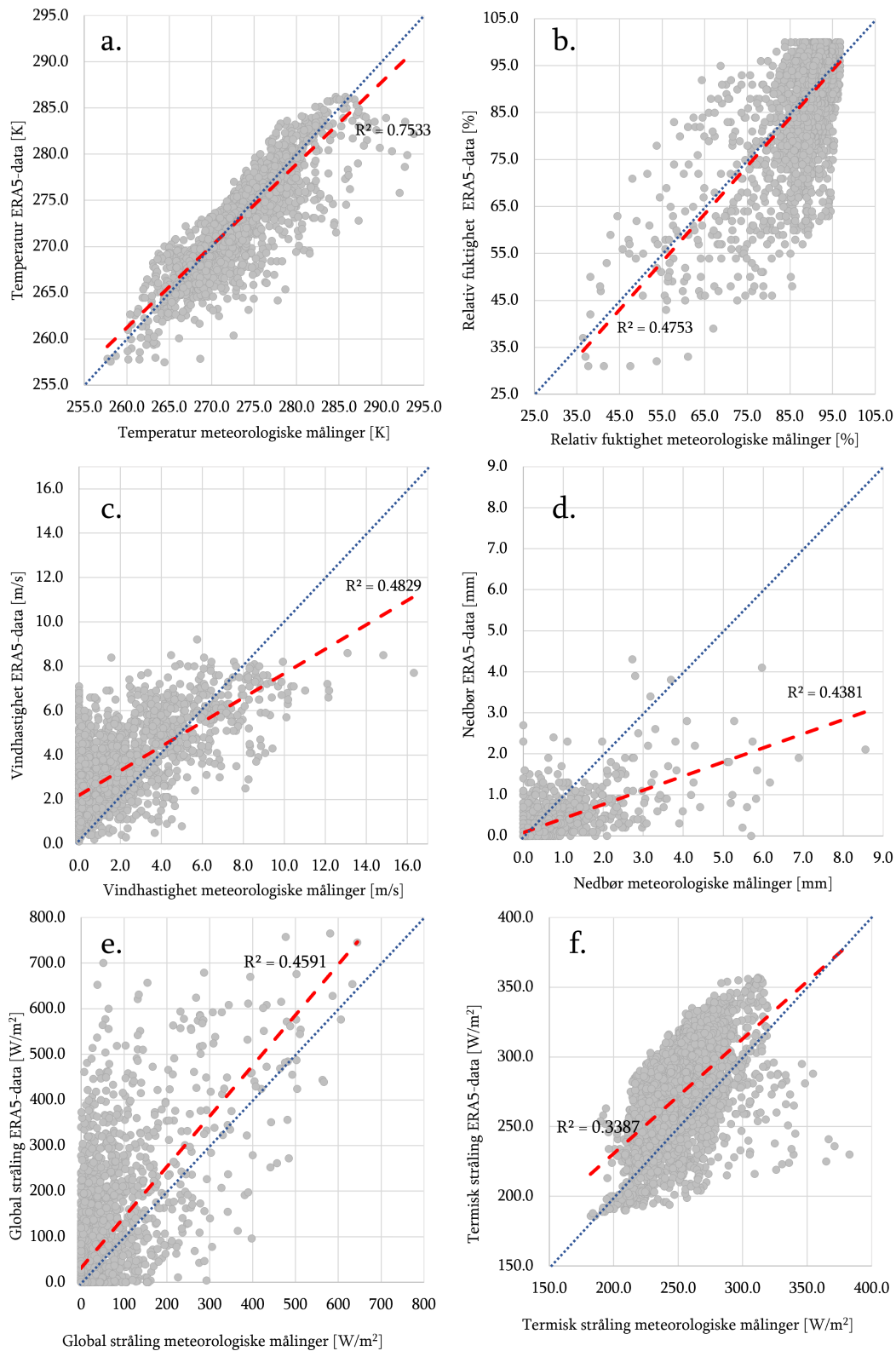
4. Resultater

I dette kapitlet presenteres resultatene tilegnet basert på metoden presentert i forrige kapittel. Vurdering, analysing og drøfting av resultatene presenteres i Kap. 5. Resultatene vises fram i tre ulike delkapitler. I Kap. 4.1 presenteres resultatene fra valideringen. Videre presenteres resultatene fra langtidssimuleringene i Kap. 4.2. Avslutningsvis presenterer Kap. 4.3 resultater for hvordan de implementerte parameterene i ESCIMO opererer, som er beskrivende for ytelsen til modellen.

4.1 Validering

4.1.1 ERA5 vs. meteorologisk data

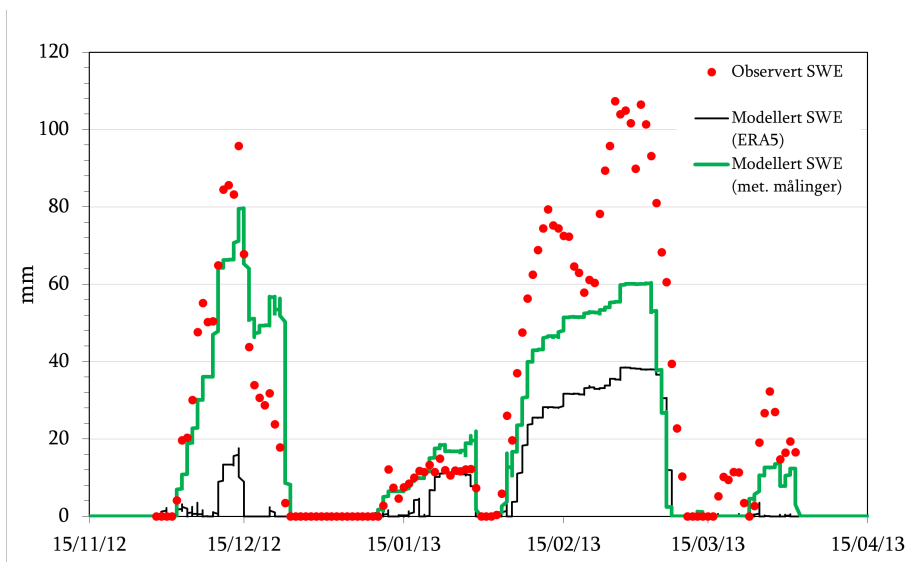
Sammenlikning mellom ERA5-data og meteorologiske observasjoner ble gjort for data innhentet fra studien i Tyskland utført av Marke mfl. (2016). ERA5-data for de aktuelle parameterne som ESCIMO benytter som input er plottet mot tilsvarende observerte verdier i Fig. 4.1. Temperatur (Fig. a.) har størst korrelasjon mellom målt og simulert verdi, med høyest determinasjonskoeffisient ($R^2 = 0.75$). De andre meteorologiske parameterene har noe lavere korrelasjon, med en forklaringsgrad mellom 0.34 og 0.48. Resultatene antyder at ERA5 underestimerer nedbørsmengdene (Fig. d.) sammenliknet med de meteorologiske målingene. Dette er også tilfellet når det gjelder vindhastighet (Fig. c.), men riktignok kun for høye verdier. På den annen side overestimerer ERA5 vindhastigheten for lave verdier sammenliknet med meteorologiske målinger.



Figur 4.1: Punktdiagram med inputdata fra meteorologiske målinger og ERA5 for Vordersteinwald. Den rød stiplede linjen angir den lineært tilpassede kurven til punktene, og den blå linjen angir 1:1-forholdet mellom x- og y-aksen.

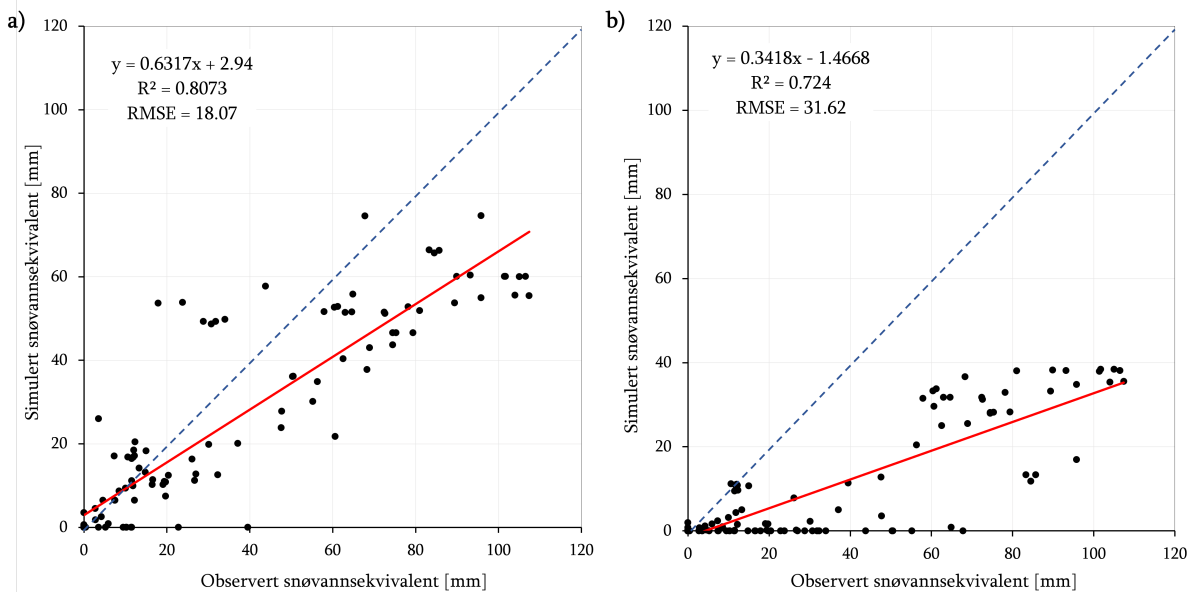
4.1.2 Simulering av snølast på mark

For å teste gyldigheten av ERA5 i ESCIMO ble det kjørt en simulering av snølast på mark for Vordersteinwald i Tyskland. Disse resultatene ble plottet sammen med snølaster simulert med meteorologiske målinger, samt observerte snølast på mark for samme område (begge hentet fra Marke mfl., 2016). Dette plottet er vist i Fig. 4.2. Observert SWE har høyest verdi i månedskiftet februar/mars, og er betydelig større enn modellert SWE simulert med både ERA5 og meteorologiske målinger. Simuleringen med meteorologiske målinger ser ut til å treffe de observerte verdiene bedre enn simuleringene med ERA5. Dette gjelder spesielt for det første snøfallet i sesongen da ERA5 simulerer i underkant av 20 mm SWE, mens meteorologisk data gir rundt 80 mm SWE. I tillegg antyder grafen at snøakkumulasjonen for modellert SWE med input fra ERA5-data initieres senere enn observerte verdier og simulerte verdier gitt av meteorologiske målinger. I tillegg feiler ERA5-simuleringen å plukke opp ulike «topper», dvs. raske endringer i SWE, sammenliknet med simuleringen med meteorologiske målinger.



Figur 4.2: Variasjon av observert SWE og simulert SWE med ulike typer data i Vordersteinwald vintersesongen 12/13. De røde punktene angir observert snølast på mark (beregningene er basert på data fra Marke mfl., 2016).

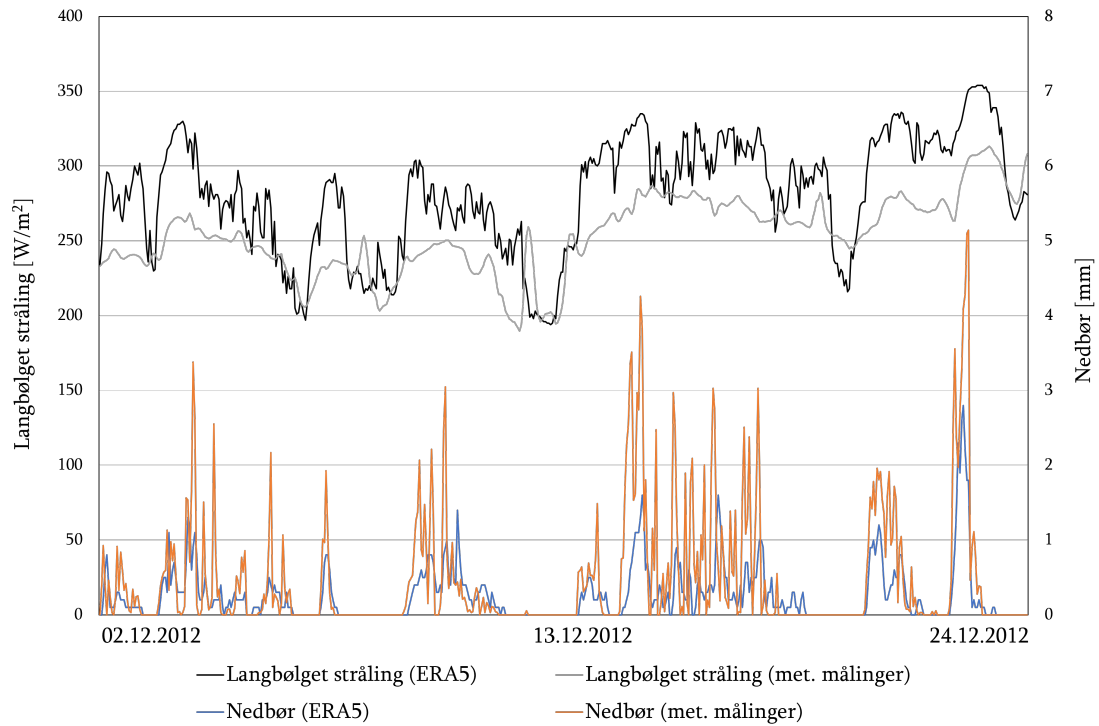
Fig. 4.3 gir et nærmere innblikk i de to simulerte marklastene. Figuren viser plot av simulert SWE mot observert SWE med henholdsvis meteorologisk data og ERA5-data. Det er større korrelasjon mellom observert og simulert verdi for simuleringen med meteorologisk data. Verdien av R-kvadrat er 0.81 og 0.72 for henholdsvis simuleringer med meteorologisk data og ERA5. RMSE er lavere for de meteorologiske datane (RMSE = 18.07 vs. 31.62 for ERA5), noe som indikerer at den gjennomsnittlige avstanden til de observerte verdier er større for ERA5 data. I begge tilfeller er de observerte snølastene større enn de simulerte, dog i større grad for simuleringen med ERA5.



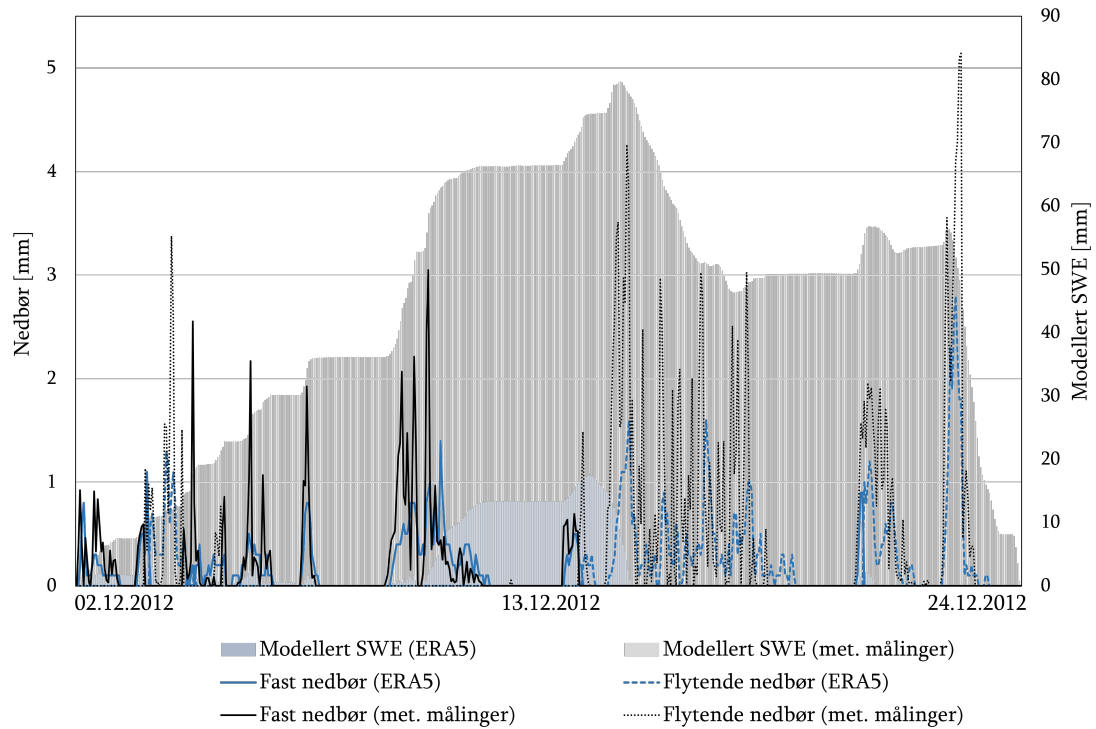
Figur 4.3: Snøens vannekvivalent simulert med Escimo.spread(v2) vs. observert snøvannekvivalent vinteren 12/13 i Vordersteinwald. Plot a) viser simulering med meteorologisk data, mens plot b) viser simulering med ERA5. Rød strek angir trendlinjen for punktene, mens stiplet strek angir identitetslinjen (illustrasjon laget med data og inspirasjon fra Marke mfl., 2016).

Siden nokså store forskjeller i akkumulert SWE er observert under den første akkumulasjonsperioden fra 2.12 til 24.12 (se Fig. 4.2), er variasjonen til utvalgte meteorologiske parametre undersøkt i nærmere detalj. Fig. 4.4 viser variasjonen av nedbør og langbølget stråling. Som man kan se av den blå og oransje kurven i figuren kommer nedbør på omtrent samme tid, men i ulik mengde for de to datatypene. De meteorologiske målingene er jevnt over større enn den modellerte dataen. Gjennomsnittsverdien av nedbørstotalen gitt av ERA5 utgjør rundt 55 % av gjennomsnittet av de meteorologiske målingene. Termisk stråling er vist gjennom den svarte og grå kurven, som henholdsvis ERA5 og meteorologiske data. ERA5 oppgir like eller høyere verdier for termisk stråling enn målingene fra feltstasjonen for store deler av akkumulasjonsperioden. En annen observasjon er at den svarte kurven har større variasjoner i strålingsfluks enn den grå kurven.

For den samme akkumulasjonsperioden er fast og flytende nedbør i tillegg til modellert SWE vist i Fig. 4.5 for ulike datatyper. Grafen indikerer samsvar mellom økning i fast nedbør og SWE. ERA5-data viser lavere verdier for både fast og flytende nedbør enn de meteorologiske målingene. I andre halvdel av perioden går nedbørstrenden over fra snø til regn. Som resultat minker snømengden simulert med ERA5 til null, mens modellert SWE simulert med meteorologiske målinger opprettholdes fram til 24.12.



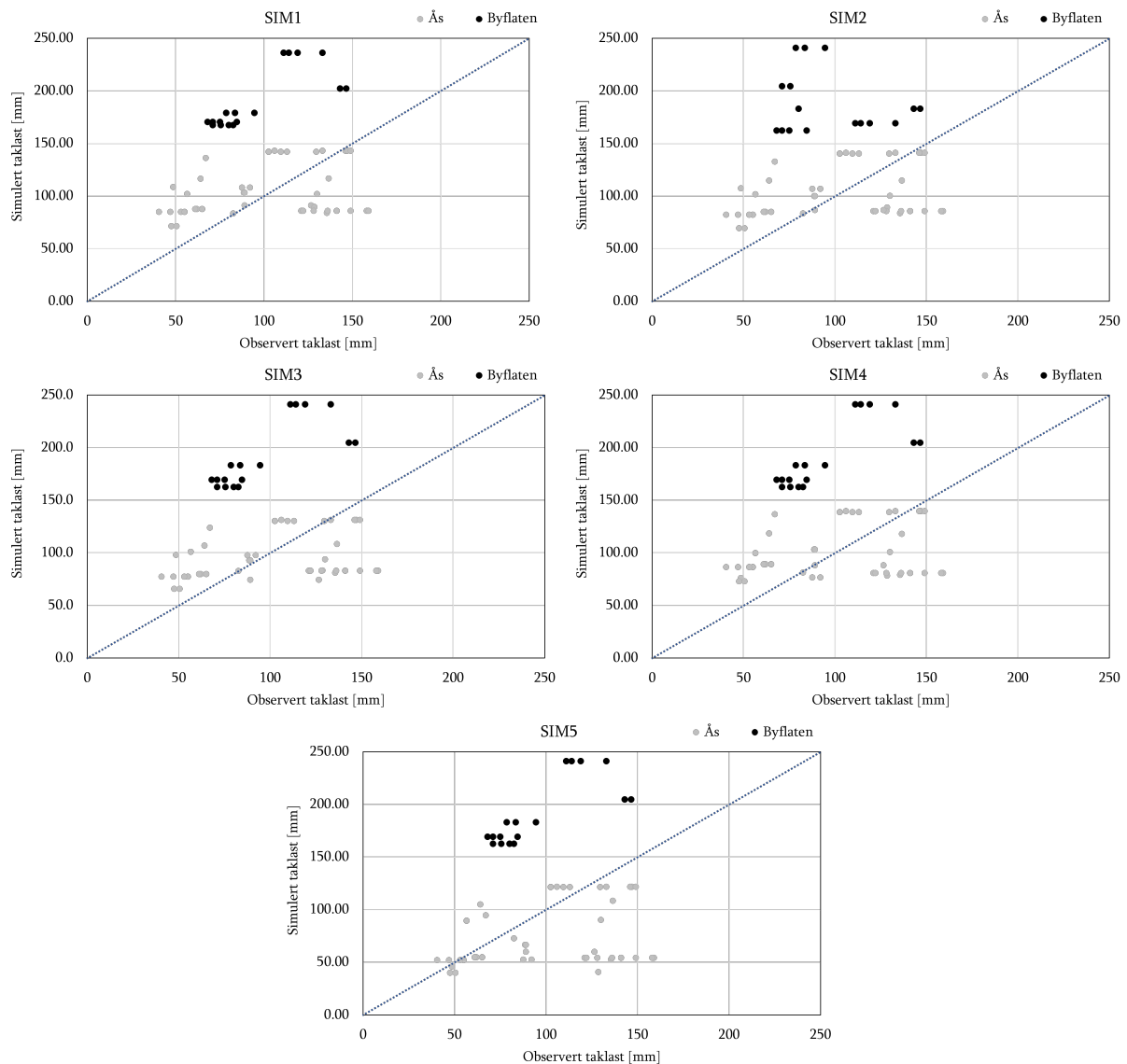
Figur 4.4: Variasjon i termisk stråling og nedbør for ulike datatyper under første akkumulasjonsperiode med snø 2.12 til 24.12.



Figur 4.5: Variasjon i fast og flytende nedbør samt modellert SWE for ulike datatyper under første akkumulasjonsperiode med snø 2.12 til 24.12. Linjediagrammene viser nedbør, mens skravuren i bakgrunnen viser SWE.

4.1.3 Simulering av snølast på tak

For simuleringene av snølast på tak ble det som nevnt tidligere gjort fem simuleringer med forskjellige betingelser for snøoverflaten. Fig. 4.6 viser plot av simulert mot observert taklast. De svarte punktene er observasjoner fra Byflaten, mens de grå punktene er observasjoner fra Ås. Som man kan se av figurene er det svak korrelasjon for Byflaten, representert ved at alle punktene legger seg på oversiden av identitetslinjen. For Ås er korrelasjonen noe bedre, med omtrent like mange punkter på hver side av identitetslinjen. Verdier for RMSE (se Tab. 4.1) avslører at simulering 3 har best korrelasjon for Ås (RMSE = 36.5 mm). For Byflaten hadde simulering 5 lavest verdi for RMSE (RMSE = 81.7 mm).



Figur 4.6: Snøens vannekvivalent på tak simulert vs. observert snøvannekvivalent av Høibø (1989) for alle simuleringene.

Tabell 4.1: RMSE for for simulert taklast mot observert taklast for alle simuleringer.

Simulering	RMSE ($SW E_{tak}$)[mm]	
	Ås	Byflaten
SIM1	38.1	96.4
SIM2	37.4	94.2
SIM3	36.5	88.1
SIM4	39.1	96.7
SIM5	46.9	81.7

For simuleringene av snølast i Byflaten viste resultatene at snølasten på tak i visse tilfeller var større enn snølasten på mark. Den beregnede eksponeringskoeffisienten vil da være høyere enn 1.25. Tab. 4.2 viser alle de simulerte C_e -verdiene for Byflaten, delt inn etter bygningsnummer (Bnr.) og året målingen ble utført. Tilfeller med større taksnølast enn marksnølast er markert i rødt i tabellen.

Tabell 4.2: Beregnede eksponeringskoeffisienter for Byflaten i valideringen.

Bnr.	År	Måledata	SIM1	SIM2	SIM3	SIM4	SIM5
		Ce	Ce	Ce	Ce	Ce	Ce
438	1969	0.88	1.23	1.22	1.18	1.24	1.18
438	1970	0.70	1.26	1.23	1.20	1.25	1.16
438	1971	0.70	1.29	1.26	1.21	1.28	1.10
438	1980	0.86	1.24	1.23	1.19	1.21	1.14
438	1981	0.56	1.22	1.21	1.17	1.23	1.12
439	1969	0.81	1.23	1.22	1.18	1.24	1.18
439	1970	0.68	1.26	1.23	1.20	1.25	1.16
439	1971	0.66	1.29	1.26	1.21	1.28	1.10
439	1980	0.89	1.24	1.23	1.19	1.21	1.14
439	1981	0.60	1.22	1.21	1.17	1.23	1.12
440	1969	0.84	1.23	1.22	1.18	1.24	1.18
440	1970	0.74	1.26	1.23	1.20	1.25	1.16
440	1971	0.74	1.29	1.26	1.21	1.28	1.10
440	1981	0.69	1.22	1.21	1.17	1.23	1.12
441	1969	0.98	1.23	1.22	1.18	1.24	1.18
441	1970	0.84	1.26	1.23	1.20	1.25	1.16
441	1971	0.76	1.29	1.26	1.21	1.28	1.10

4.1.4 Eksponeringskoeffisienten

Som forklart i metoden ble eksponeringskoeffisienten beregnet for valideringen opp i mot datasettet til Høibø (1989), og for simuleringene gjort i Vordersteinwald. I dette delkapittelet vises resultatene fra disse beregningene.

Eksponeringskoeffisienten simulert med de to ulike datatypene i Vordersteinwald er vist i Tab. 4.3. Det er nokså små forskjeller mellom de ulike simuleringene for beregnet C_e med meteorologiske observasjoner. Alle alternativene gir $C_e = 1.24$, med unntak av SIM5 der $C_e = 1.23$. Simuleringene med ERA5-data gir noe lavere verdier, og eksponeringskoeffisienten varierer mellom 1.07 og 1.19. Lavest C_e -verdi er simulert gjennom SIM3 og SIM5.

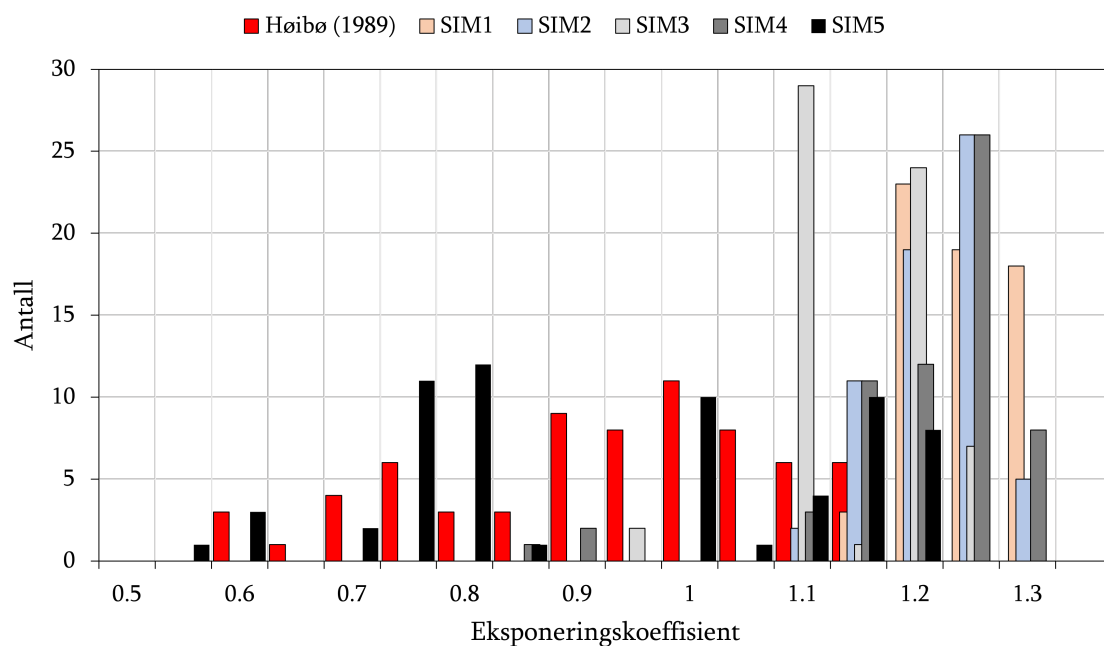
Tabell 4.3: Eksponeringskoeffisienten beregnet med ulike datatyper for Vordersteinwald. Tabellen viser C_e for alle alternativene.

Datatype	Eksponeringskoeffisient				
	SIM1	SIM2	SIM3	SIM4	SIM5
ERA5	1.19	1.17	1.07	1.19	1.07
Meteorologiske obs.	1.24	1.24	1.24	1.24	1.23

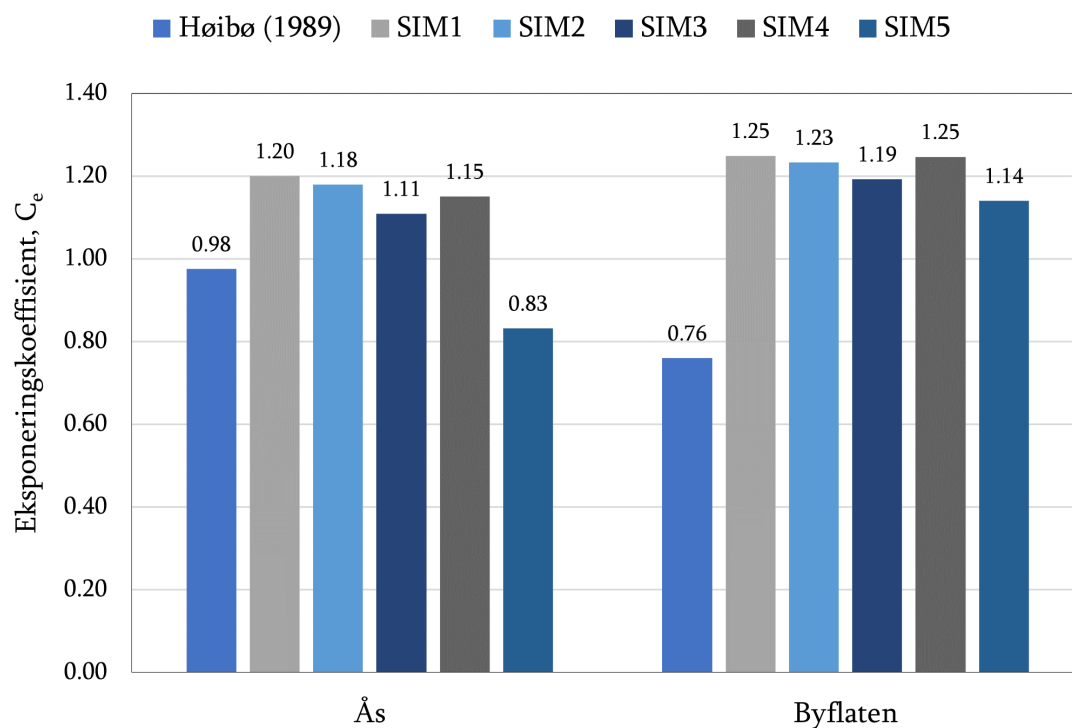
Fordelingen av alle observerte verdier av eksponeringskoeffisienten inkludert simulerte eksponeringskoeffisienter for valideringen opp i mot datasettet til Høibø (1989) er vist i Fig. 4.7. De observerte C_e -verdiene varierer fra rundt 0.55 til 1.15, og er nokså normalfordelt. Generelt sett gir simuleringene høyere verdier for C_e enn det som er observert. Dette gjelder spesielt for SIM1 til SIM4. I tillegg er eksponeringskoeffisienten i disse simuleringene fordelt over et kortere spenn enn målte verdier. SIM5 er den eneste simuleringen som i nevneverdig grad gir verdier for C_e lavere enn 1.0.

Korrelasjonen mellom målt og simulert eksponeringskoeffisient er presentert i form av RMSE i Tab. 4.4. Simulering 3 estimerer eksponeringskoeffisienten best i forhold til målingene (RMSE = 0.17), mens for Byflaten kommer simulering 5 nærmest (RMSE = 0.39).

Den gjennomsnittlige eksponeringskoeffisienten for alle simuleringer ($C_{e,dim}$), samt observasjoner er vist i Fig. 4.8. I motsetning til de målte verdiene ble det simulert større eksponeringskoeffisient i Byflaten enn i Ås for alle simuleringene. I tillegg er de simulerte verdiene jevnt over høyere enn observerte verdier. Av figuren kan man se at SIM3 ($C_e = 0.98$) og SIM5 ($C_e = 1.14$) kommer nærmest den målte eksponeringskoeffisienten for henholdsvis Ås og Byflaten. Rikignok er begge tilfellene et stykke unna de observerte verdiene ($C_e = 0.83$ for Ås og $C_e = 0.76$ for Byflaten).



Figur 4.7: Fordeling av målte og simulerte verdier for eksponeringskoeffisienten i valideringen.



Figur 4.8: Oversikt over alle simulerte eksponeringskoeffisienter samt beregnede C_e -verdier fra Høibø (1989) for Ås og Byflaten.

Tabell 4.4: RMSE for simulert eksponeringskoeffisient mot observert eksponeringskoeffisient for alle simuleringene.

Simulering	RMSE (C_e)	
	Ås	Byflaten
SIM1	0.25	0.50
SIM2	0.23	0.49
SIM3	0.17	0.45
SIM4	0.21	0.50
SIM5	0.24	0.39

Tab. 4.5 viser RMSE for alle simuleringer i valideringen (observasjoner for Ås og Byflaten lagt sammen). RMSE er vist for både snøvannsekvivalenten på tak og eksponeringskoeffisienten. Det viser seg at SIM3 har lavest verdi for begge undersøkte lastegenskaper (markert i grønn i tabellen). Avstanden mellom de simulerte og observerte verdiene for hver parameter er altså minst for SIM3, og denne modellen er følgelig i stand til å tilpasse seg de observerte verdiene best.

Tabell 4.5: RMSE for snøvannsekvivalenten på tak og eksponeringskoeffisienten for Ås og Byflaten lagt sammen, mot observerte verdier.

Simulering	RMSE ($SW E_{tak}$) [mm]	RMSE (C_e)
	Totalt	Totalt
SIM1	59.7	0.34
SIM2	58.4	0.32
SIM3	55.4	0.28
SIM4	60.3	0.32
SIM5	58.4	0.29

4.2 Langtidssimulering av snølast

4.2.1 Ekstremverdianalyse snølast

Resultatene fra ekstremverdianalysen ved hjelp av Gumbelfordeling er vist i Tab. 4.6. Det er noe forskjell i 5-års returlaster beregnet med ERA5-data og meteorologiske data. For Tromsø er 5-års returlast beregnet med ERA5-data (3.4 kNm^{-2}) betydelig større enn tilsvarende last beregnet med meteorologiske data (2.1 kNm^{-2}). I Ås er derimot returlasten større for simuleringen med meteorologiske data, dog i mindre grad enn Tromsø (0.8 vs. 0.9 kNm^{-2} for henholdsvis ERA5 og meteorologiske målinger).

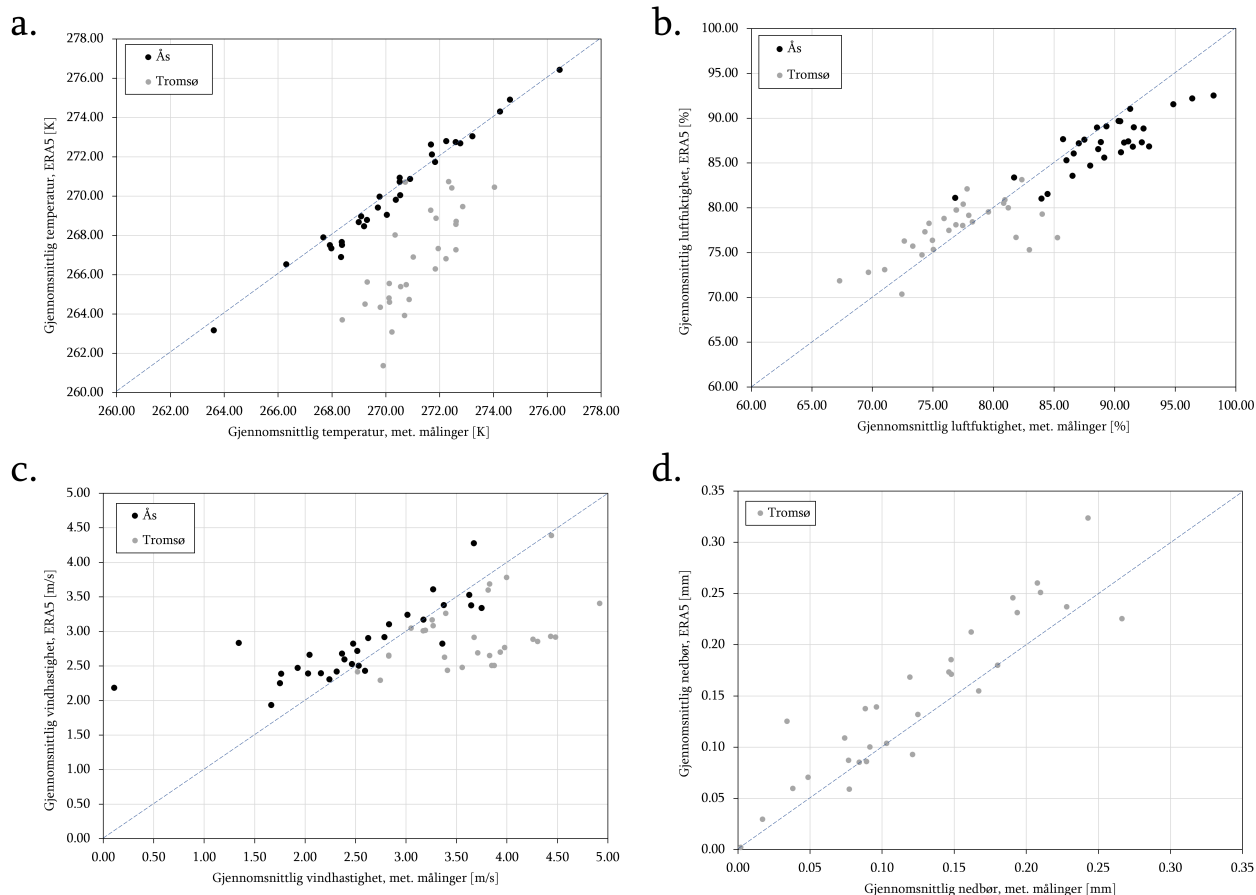
Tabell 4.6: 5-års returlaster og karakteristiske snølaster for områder analysert i oppgaven.

Sted	Benevning	5-års returlast (S_5)		Karakteristisk snølast (S_{50})
		ERA5	Met. Data	
Ås	kNm^{-2}	0.8	0.9	3.5
Byflaten	kNm^{-2}	1.9	-	3.5
Tromsø	kNm^{-2}	3.4	2.1	6.0

4.2.2 ERA5 vs. meteorologisk data

For å forstå forskjellene i simuleringer med ulike datatyper ble ERA5 og meteorologisk data sammenliknet for hver enkelt parameter. Fig 4.9 viser månedlige gjennomsnittsverdier i januar måned gitt av ERA5-data vs. meteorologiske målinger for parameterne temperatur (a.), luftfuktighet (b.), vindhastighet (c.) og nedbør (d.). Januar er kaldeste måned for alle områdene som er undersøkt, og gir derfor verdier som er representative for vinteren. Hvert punkt i grafen tilsvarener ett år i perioden 1991-2020. Fig. 4.9 d. viser kun verdier for Tromsø, siden ERA5 ble brukt som datakilde for nedbør for både datasett 1 og 2 (se Tab. 3.3).

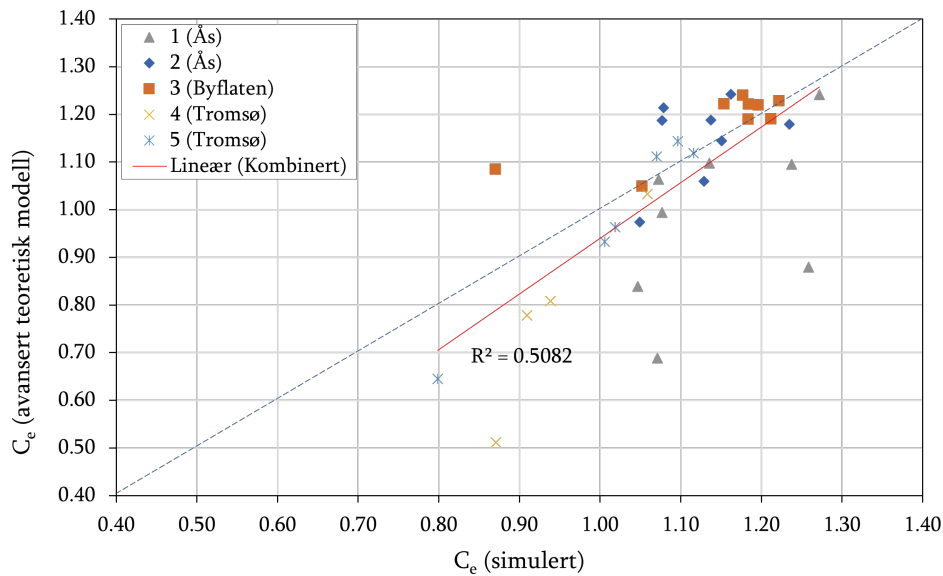
De svarte punktene i Fig. 4.9 viser resultater for Ås. Som man kan se av figuren korrelerer datatypene godt for temperatur, mens RH har høye verdier for meteorologiske målinger sammenliknet med ERA5. Vindhastighet har motsatt tendens og ERA5 ser ut til å overestimere, sammenliknet med meteorologiske målinger. Av de grå punktene som viser resultatene for Tromsø ser vi at de reanalyserte dataene har en tendens til å underestimere temperatur og vindhastighet, sammenliknet med de meteorologiske målingene. På den annen side overestimerer ERA5 verdier for RH og nedbør, noe som er indikert gjennom flere punkter på oversiden enn undersiden av identitetslinjen.



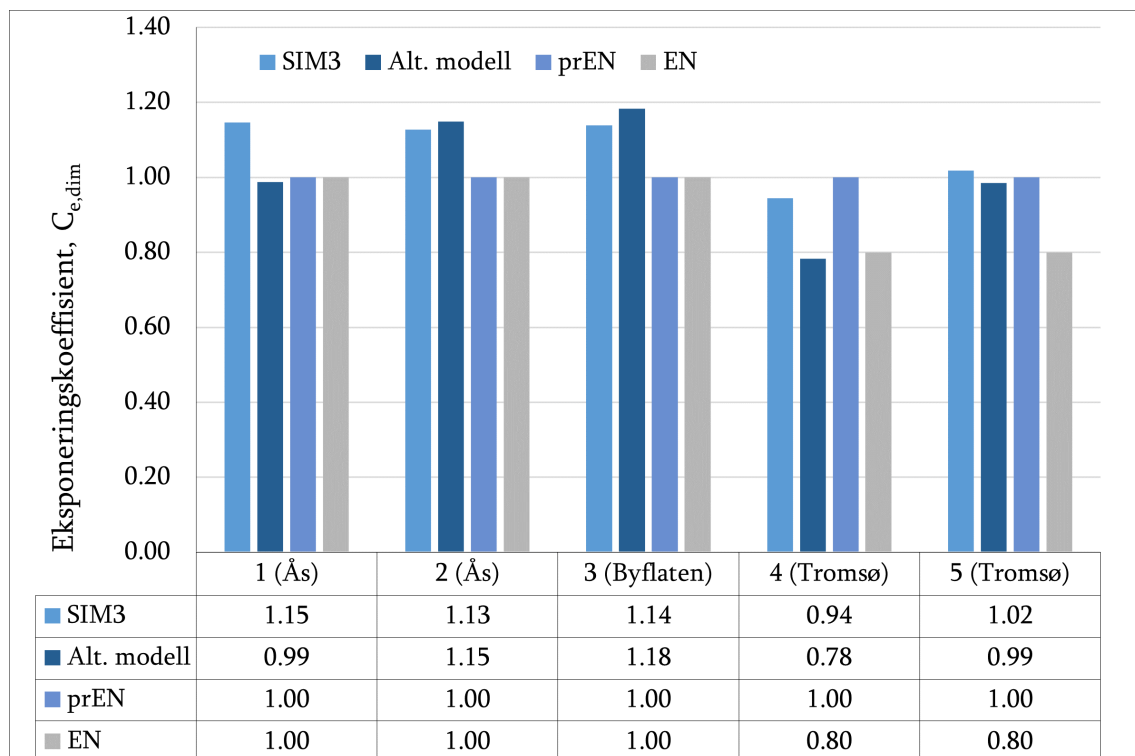
Figur 4.9: Sammenlikning av gjennomsnittsverdier i januar for forskjellige parametre. Hvert punkt tilsvarer ett år mellom 1990 og 2020. a. viser temperatur, b. viser luftfuktighet, c. viser vindhastighet og d. viser nedbør.

4.2.3 Eksponeringskoeffisienten

Eksponeringskoeffisienten ble beregnet for år med snølast høyere enn 5-års returlast for de forskjellige datasettene og simuleringene (alle C_e -verdier er tabulert i Vedlegg B). De beregnede eksponeringsfaktorene ble videre sammenliknet med C_e beregnet gjennom den alternative snømodellen. I beregningen av C_e med den alternative modellen ble snølasten på mark beregnet med ESCIMO brukt som input. På denne måten blir det mer nærliggende å sammenlikne de to modellene. Terskelvindhastigheten (vindhastigheten som må overskrides for at snøerosjon skal skje) ble satt til 5.0 m/s, på samme måte som i Thiis mfl. (2022). Fig. 4.10 viser eksponeringskoeffisienten beregnet ved hjelp av den alternative modellen plottet mot simulert C_e for de ulike alternativene. Figuren indikerer nokså god korrelasjon mellom de to modellene, med en beregnet determinasjonskoeffisient på 0.51. Figuren indikerer at de to modellene korrelerer godt for høye verdier av C_e . For lavere verdier av C_e er det noe svakere korrelasjon, og datasett 1 (Ås) og 4 (Tromsø) skiller seg ut med å ha flere punkter som faller et stykke utenfor identitetslinjen.



Figur 4.10: Eksponeringskoeffisienten beregnet gjennom simulering 3 vs. eksponeringskoeffisienten beregnet ved hjelp av den alternative modellen for alle caseområder.



Figur 4.11: Den gjennomsnittlige eksponeringskoeffisienten beregnet gjennom simulering 3, alternativ modell (alt. modell), oppdatert snølaststandard (prEN) og Eurokode 1991-1-3 (EN).

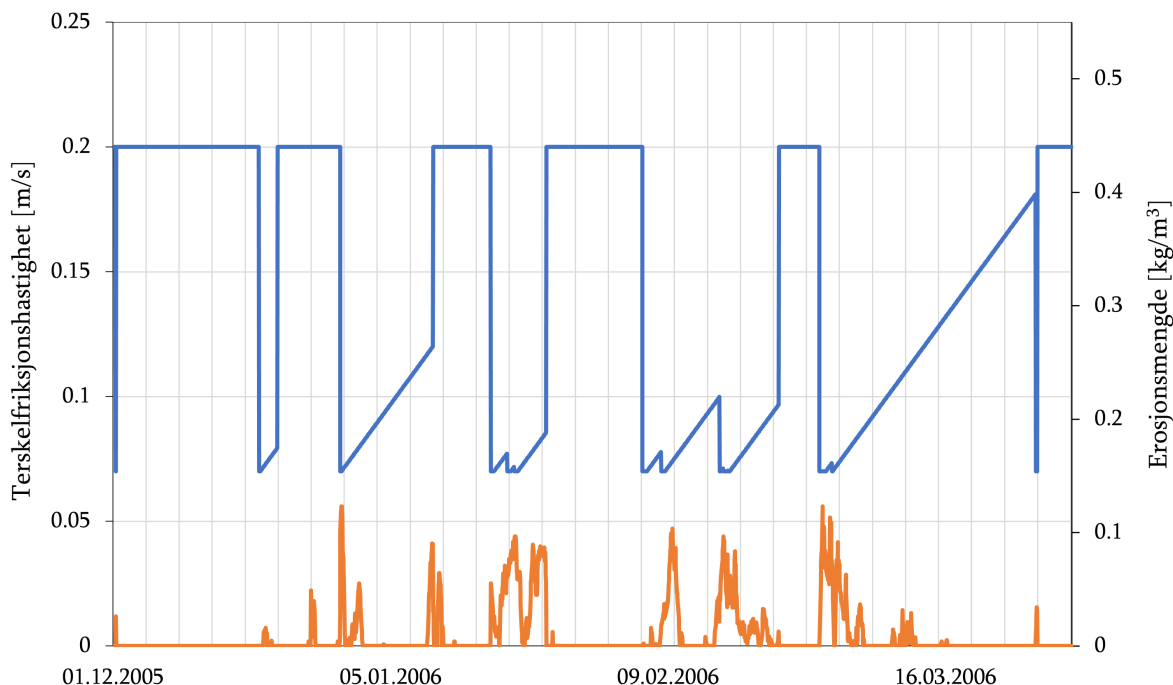
Den dimensjonerende eksponeringskoeffisienten er vist i Fig. 4.11 for SIM3, i tillegg til den alternative modellen, oppdatert snølaststandard og NS-EN 1991-1-3. Stolpene i diagrammet er gruppert etter de fem ulike datasettypene. Numeriske verdier for alle estimeringene av C_e er tabulert under diagrammet. Resultatet viser at SIM3 simulerer høyere verdier for C_e enn NS-EN 1991-1-3 for alle datasettene. Siden ingen av case-områdene har en gjennomsnittlig vindhastighet for den kaldeste måneden i året over terskelverdien for det som anses som eksponert terreng (4.5 m/s), vil C_e beregnet av prEN 1991-1-3 være 1.0 i alle tilfeller. De simulerte C_e -verdiene kommer nærmest eksponeringskoeffisientene estimert av prEN gjennom datasett 4 (Tromsø) og 5 (Tromsø). Den alternative modellen gir sammenliknbare resultater som SIM3 for datasett 2 (Ås), 3 (Byflaten) og 5 (Tromsø). For datasett 1 (Ås) gir riktignok oppgavens modell høyere verdi for C_e . For datasett 4 (Tromsø) gir derimot SIM3 en lavere verdi for C_e enn den alternative modellen.

4.3 Ytelse av implementert modell

4.3.1 Variasjon i terskelfriksjonshastighet

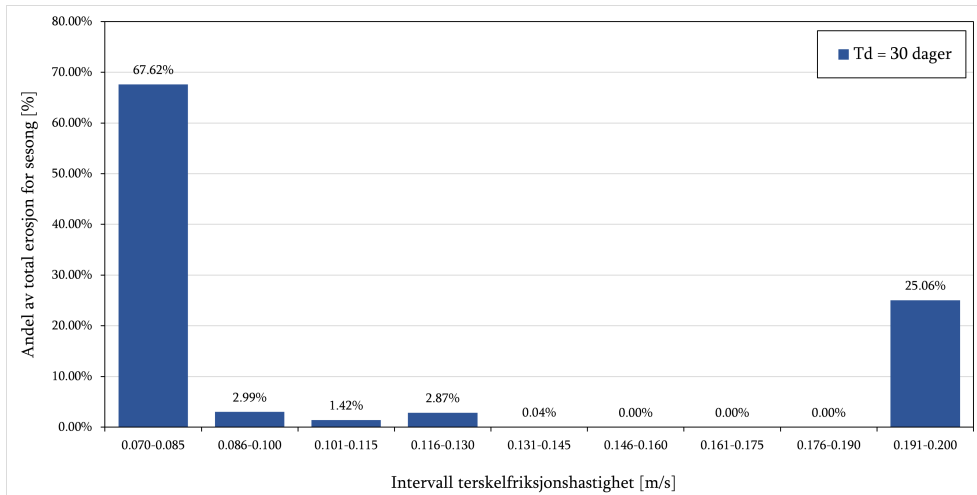
I ESCIMO ble det implementert parametere for å ta hånd om erosjon av snø fra tak. Dette innbefatter parametere for snøerosjon, snøens regnpåvirkning og snøoverflatens friksjonshastighet, samt terskelfriksjonshastighet. I det følgende presenteres resultater for hvordan den implementerte modellen fungerer, og sammenliknes også med den alternative snømodellen utviklet av Tabler (1994) og O'Rourke mfl. (2005).

Fig. 4.12 viser variasjonene i erosjonsmengde, samt snøens terskelfriksjonshastighet med tiden for snøsesongen 2005/2006 i Ås (simulert med ERA5-data). Erosjonen er vist som den oransje kurven, mens den blå kurven viser terskelfriksjonshastigheten. I denne simuleringen varierer terskelfriksjonshastigheten mellom 0.07 og 0.2 m/s (SIM3). Mesteparten av tiden holdes verdien lik maksimum (0.2 m/s). Grafen stiger lineært fra minimum på 0.07 m/s i perioder etter snøfall, eksempelvis i periodene rundt 16. mars og 5. januar. I enden av sistnevnte eksempel gjør grafen et «hopp» til maksimum som følge av et regnfall.



Figur 4.12: Variasjon i erosjonsmengde (oransje kurve) og snøens terskelfriksjonshastighet (blå kurve) i Ås. Grafen viser SIM3 for vintersesongen 05/06.

Som observert av den oransje kurven i Fig. 4.12 foregår det erosjon av snø nesten utelukkende i perioder med lav terskelfriksjonshastighet. De største erosjonsmengdene er observert når terskelfriksjonshastigheten til snøen er på minimum. Videre synker erosjonsmengden ettersom terskelfriksjonshastigheten øker. Positiv erosjonsfluks er i dette tilfellet typisk observert for terskelfriksjonshastigheter mellom 0.07 og 0.11 m/s .



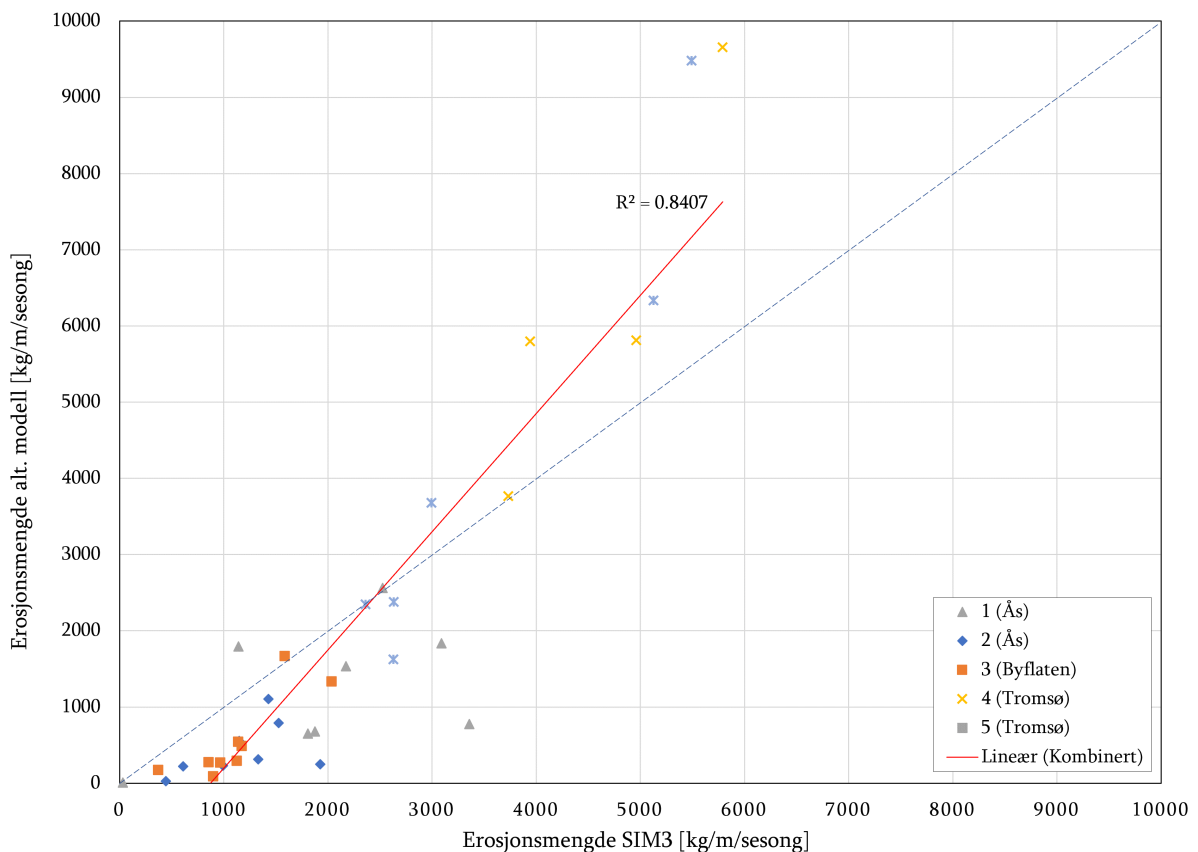
Figur 4.13: Stolpediagram som viser andeler av total erosjonsmengde som inntreffer for ulike intervaller for terskelfriksjonshastighet. Figuren viser resultater for SIM3 vintersesongen 05/06. De blå stolpene er simulering hvor $T_d=30$ dager, og de grønne stolpene angir $T_d=20$ dager.

For å forstå sammenhengen mellom terskelfriksjonshastighet og erosjonsmengde bedre, er prosentvise andeler av total erosjonsmengde som inntreffer for ulike intervaller for terskelfriksjonshastighet illustrert i Fig. 4.13. Figuren gjelder for den samme snøsesongen, 2005/06 i Ås, og det er simulert med SIM3. Som man kan se av det blå stolpediagrammet inntreffer mer enn to tredeler av den totale snøerosjonen fra tak ved det laveste intervallet for u_{*t} ($u_{*t} = 0.070-0.085$ m/s). Det nest største bidraget til erosjonstotalen oppstår for terskelfriksjonshastigheter mellom 0.191 og 0.200 m/s . Når u_{*t} er mellom 0.131 og 0.190 m/s er erosjonsmengden tilnærmet lik null.

For å undersøke hvilken effekt T_d har på erosjonsmengde ble en simulering av SIM3 kjørt for samme betingelser, men hvor T_d var satt til 20 dager. I den opprinnelig simuleringen er $T_d=30$ dager. Som nevnt i Kap. 3 er T_d antall dager mellom minimum og maksimum terskelfriksjonshastighet. Beregningene viste at erosjonsmengden over vintersesongen var 1741 og 1663 kg/m for simuleringer med T_d lik henholdsvis 30 og 20 dager.

4.3.2 Implementert modell vs. alternativ modell

Fig. 4.14 viser punktplot av erosjonsmengden beregnet gjennom SIM3 mot erosjonsmengden gitt av den alternative modellen for de ulike datasettene. Erosjonsperioden er den samme for begge metodene; tiden fra første snøfall til høyeste simulerte marklast. Av grafen kan man se at SIM3 gir høye verdier for erosjonsmengde for Ås og Byflaten sammenliknet med den avanserte teoretiske metoden. På den annen side er den sesongmessige erosjonen større for den avanserte teoretiske metoden for Tromsø. Kombinert gir alle datasettene en verdi for R^2 på 0.84, noe som indikerer en sterk korrelasjon.



Figur 4.14: Erosjonsmengde simulert gjennom SIM3 vs. erosjonsmengde beregnet gjennom den alternative modellen for alle caseområdene.

5. Diskusjon

I denne delen av oppgaven analyseres resultatene presentert i Kap. 4, for å gi svar på forskningsspørsmålene. Diskusjonen har samme inndeling som resultatene. Alle analyser er bygget på den teoretiske forankringen gitt i Kap. 2, metoden presentert i Kap. 3 og resultatene lagt frem i Kap. 4. Det vil derfor nok så hyppig refereres til innhold fra disse kapittele. Mot slutten av kapitlet oppsummeres alle analyser, med vekt på forskningsspørsmålene, for å gi svar på disse.

5.1 Validering

Som beskrevet i Kap. 3 ble det gjort en validering, hvor resultater fra ulike simuleringsalternativer ble sammenliknet med snølastmålinger på flate tak utført av Høibø (1989). Dette ga utgangspunkt for valg av modell, og danner grunnlaget for langtidssimuleringene. Snølastmålinger ble også simulert for Vordersteinwald i Tyskland, hvor hensikten var å sammenligne ulike typer input-data (ERA5 vs. meteorologiske målinger), og deres evne til å estimere eksponeringskoeffisienten. I dette kapitlet diskuteres resultatene fra valideringen av både reanalyserte data, samt simulert eksponeringskoeffisient.

I Kap. 4.1.1 og 4.1.2 presenteres resultatene fra snølastmålingene på mark i Vordersteinwald. Utviklingen av marksnølasten over snøsesongen illustrert i Fig. 4.2 viser at både meteorologiske og reanalyserte data gir lavere verdier for maksimal SWE, sammenliknet med observert snølast. Dette gjelder spesielt for reanalyserte data, hvor kun 36 % av den maksimale observerte snølasten ble beregnet gjennom simuleringen. Regresjonsanalysen i Fig. 4.3 viser høyere determinasjonskoeffisient og lavere RMSE for simulert SWE med meteorologiske målinger enn med ERA5-data. Verdien for RMSE for simuleringen med ERA5, avslører at den gjennomsnittlige avstanden mellom de predikerte verdiene fra regresjonsmodellen, og de observerte verdiene i datasettet er 31.6 mm SWE. Dette utgjør en betydelig mengde snø, tatt i betraktning at maksimal akkumulert SWE for simuleringen med ERA5-data er 38.5 mm. Med andre ord ser det ut til at ESCIMO har problemer med å beregne observerte snølaster på mark med reanalyserte data som input.

For å forklare forskjellene i simulert marksnølast i Vordersteinwald, må parameterne som benyttes som input i ESCIMO analyseres. I det neste vil det derfor forklares hvordan forskjeller mellom meteorologiske parametere fra forskjellige datakilder illustrert i Fig. 4.1 har innvirkning på snølastsimuleringene i Fig. 4.2.

Fig. 4.1 a. viser sterk korrelasjon mellom datakildene for temperatur. På grunn av den høye determinasjonskoeffisienten ($R^2 = 0.75$) minker dette sannsynligheten for at denne parameteren kan forklare store endringer i snøvannsekvivalenten på mark. Et snøsimuleringsprogram vil riktignok naturligvis være sensitiv for temperaturer rundt frysepunktet til vann. I perioder i løpet av vintersesongen vil temperaturer ligge rundt null grader celsius i både polare, varm- og kaldtempererte klima. Negative temperaturer assosieres typisk med snø, mens positive temperaturer assosieres typisk med regn. Selv om det er observert relativt god korrelasjon mellom datatypene for temperatur, betyr ikke det nødvendigvis at store forskjeller i SWE ikke kan skyldes temperaturforskjeller. Dersom temperaturen anslåes med feil fortegn i en periode med mye nedbør, kan dette utgjøre store forskjeller for maksimal SWE. For Vordersteinwald kan man riktignok se av Fig. 4.5 at faseutviklingen til nedbøren (fast/flytende) har sterk samvariasjon for de to datatypene. Dette indikerer at temperatur ikke har påvirket akkumulert SWE i nevneverdig grad.

Fig. 4.1 d. viser at meteorologiske målinger fra målestasjonen i Vordersteinwald har høyere verdier for nedbør enn reanalysert data. Dette kan forklare hvorfor den grønne grafen (meteorologiske målinger) i Fig. 4.2, når høyere verdier for akkumulert SWE enn den svarte grafen (ERA5). Fig. 4.4 viser dette enda tydeligere: nedbørsmengdene gitt av de meteorologiske målingene er i flere tilfeller over dobbelt så store som nedbøren gitt av ERA5-datasettet. Hvilke timer det er nedbør ser riktignok ut til å samsvare godt for de to datasettene, noe som indikerer at de reanalyserte dataene estimerer nedbør godt tidsmessig, men underestimerer nedbørsmengden.

Dersom vi studerer variasjonen i fast og flytende nedbør vist i Fig. 4.5, ser vi at både snødekket simulert av ERA5 og meteorologiske målinger reduseres som følge av regn i andre halvdel av akkumulasjonsperioden. I det førstnevnte tilfellet smelter all snøen bort som følge av disse regnskyllene. Dette er fordi absorpsjonspotensialet til snødekket ikke er stort nok for å absorbere vannet, derfor smelter heller snøen som følge av energitilførsel fra regnet. For snødekket simulert av meteorologiske målinger reduseres først snødekket, etterfulgt av små akkumulasjoner selv om nedbøren er flytende. I visse tilfeller vil altså regnet øke SWE siden vannlagringskapasiteten i snødekket er stort.

Fig. 4.1 f. viser at reanalyserte data for langbølget stråling har større verdier enn de meteorologiske målingene. På grunn av snøens høye emissivitet, vil store deler av den langbølgede strålingen bli absorbert. Variasjonen i den langbølgede strålingen med tiden

er vist gjennom den svarte og grå grafen i Fig. 4.4. Som observert ligger ERA5-datasettet på et høyere nivå enn datasettet med målinger fra meteorologisk stasjon. Disse høye verdiene for langbølget stråling kan forklare hvorfor snødekket simulert av reanalysert data aldri får skikkelig «fotfeste», siden snøen smeltes så fort et lite snøfall har skjedd. Dette kan observeres gjennom Fig. 4.2 hvor den svarte grafen viser flere små akkumulasjoner og nedsmeltinger. Dette gir en indikasjon om at dataen klarer å detektere små intervaller med snøakkumulasjon, men at feilestimeringer av enkelte av de meteorologiske parametrene, eksempelvis høy stråling og lite nedbør, fører til at snøen alternerer mellom akkumulasjon og smelting, istedenfor å ha jevn stigning.

Alle de ovennevnte analysene for hver enkelt parameter må sees i lys av gridområdet de reanalyserte dataene er hentet fra. Som nevnt tidligere befinner Vordersteinwald seg rundt 800 moh. Den gjennomsnittlige høyden for området ERA5-dataen er definert av er 613 moh., noe som betyr at det er en differanse på nesten to hundre høydemeter mellom de to datasettene. Dette kan utgjøre store forskjeller, spesielt for parametre som temperatur og nedbør. Temperaturen synker normalt jo høyere opp et sted er plassert. Dette kan ha innvirkning på om nedbøren kommer som snø eller regn. På den annen side vil nedbør øke med høyde over havet. Større nedbør ved temperaturer under null akkumulerer snø, som gir høyere SWE. Det er med andre ord nærliggende at høydeforskjellen mellom datasettene er en av grunnene til at det simuleres høyere snølast gjennom meteorologiske målinger enn ERA5.

I Kap. 4.1.3 presenteres resultater fra taklastsimuleringer. De simulerte snølastmålingene på tak for Ås og Byflaten er plottet mot observert taklast i Fig. 4.6. Resultatene indikerer nokså svak korrelasjon mellom predikerte og observerte verdier, spesielt for Byflaten, der alle observasjoner for alle alternativer befinner seg godt over identitetslinjen. Den laveste beregnede verdien for RMSE for Byflaten er 81.7 mm (SIM5), noe som ansees som en høy verdi. For Byflaten er i tillegg snølasten på taket i visse tilfeller større enn snølasten på bakken (se Tab. 4.2). Dette er et resultat av at bakkens konstante varme-fluks for marklastsimuleringen er større enn snøerosjonen for taklastsimuleringen. Det ble observert større marklast enn taklast for enkelte av simuleringene med SIM1, SIM2 og SIM4. Modellen gitt av disse simuleringene gir høyere verdier for u_{*t} enn de øvrige alternativene. Kriteriet for at snøerosjon skal oppstå om at $u_* \geq u_{*t}$ (se Likn. 3.5) vil som resultat oppfylles i færre tilfeller. Det er derfor logisk at disse simuleringene gir lave erosjonsmengder. Taklastene simulert gjennom SIM1, SIM2 og SIM4 har innbyrdes ikke store forskjeller. SIM3 og SIM5 har heller ikke store forskjeller i simulert taklast seg i mellom, men ligger på et lavere nivå enn de andre alternativene. Dette gir en indikasjon på at modellen er sensitiv for u_{*t} -verdier i intervallet mellom disse to gruppene simuleringer. Med andre ord er modellen sensitiv for terskelfriksjonshastigheter i intervallet 0.07 - 0.10 m/s.

Taklastsimuleringene i Ås har noe bedre korrelasjon med målingene til Høibø (1989). Lavest verdi for RMSE er 36.1 mm SWE, gitt av SIM3. Dette er fortsatt et ganske høyt tall, men betraktelig lavere enn RMSE beregnet for taklastene i Byflaten (RMSE = 81.7 mm). Som man kan se av Fig. 4.6 er det omtrent like mange punkter på hver side av identitetslinjen. Avstanden mellom punktene og identitetslinjen er riktignok fortsatt ganske stor i mange tilfeller. En annen observasjon fra samme figur er at punktene ser ut til å legge seg på horisontale «linjer» i plottet. Dette kommer av at de aktuelle observasjonene er hentet fra samme år for ulike bygg i en periode der det er simulert nokså like snølaste. ESCIMO tar ikke hensyn til de gitte betingelsene for hver enkelt bygning (f.eks. vindretning, vegetasjon, geometri til bygg etc.), som fysiske målinger vil kunne detektere. Det understrekes at en eksakt gjengivelse av alle situasjoner ikke er målet med snømodellen heller, da meteorologiske data vil gjelde for store områder, og feilestimeringer i visse tilfeller vil være uunngåelig som følge.

Som vi har sett er det visse svakheter i korrelasjonen mellom simulert og observert snølast på tak for både Ås og Byflaten. Den svake korrelasjonen kan skyldes det re-analyserte datagrunnlaget. ERA5-data er hentet for perioden 1968 - 1985, og det kan stilles spørsmål rundt nøyaktigheten til data hentet fra så langt tilbake i tid. Mesteparten av målingene ble gjort før 1979, noe som betyr at mye av dataene er hentet fra den midlertidig utgitte databasen i CDS. Hvor nøyaktig disse dataene er i forhold til den opprinnelige databasen går riktignok utenfor omfanget til denne gradsoppgaven. Optimalt sett skulle man også hatt meteorologiske målinger for å gjøre simuleringene, men dette var riktignok ikke mulig å oppdrive.

I Kap. 4.1.4 presenteres resultatene for beregning av eksponeringskoeffisienter tilknyttet valideringen. For Vordersteinwald er de simulerte C_e -verdiene større for simuleringer med meteorologisk data som input, enn med ERA5 (se Tab. 4.3). Eksponeringskoeffisienten beregnet med meteorologiske målinger gir verdier mellom 1.23 og 1.24, mens ERA5-simuleringer gir verdier mellom 1.07 og 1.19. Siden snølastmålingene simulert med input fra den meteorologiske feltstasjonen samsvarer best med snølastobservasjonene, anses disse målingene å gi de mest realistiske verdiene for C_e . De høye C_e -verdiene som ble simulert anses som sannsynlige for området Vordersteinwald. Området består av store skogområder, nokså skjermet for vind. Klimaet er preget av nokså milde vintre med temperaturer rett i underkant av null grader i januar og februar. Lave vindhastigheter vil føre til lite drivsnø, og milde temperaturer gir grunnlag hardpakkede snøoverflater som ikke lett lar seg påvirke av vinden. Snømodellen anses derfor å gi representative verdier for eksponeringskoeffisienten i Vordersteinwald.

Eksponeringskoeffisientene beregnet med ERA5-data er som vi har sett noe lavere enn beregningene med input fra de meteorologiske målinger. SIM1 og SIM4 kommer nærmest

med $C_e = 1.19$. Grunnen til at lavere eksponeringskoeffisienter ble simulert med ERA5 kan skyldes at de reanalyserte vindhastighetene er høyere enn de som ble gitt av den meteorologiske stasjonen (Se Fig. 4.1 c.). Grunnen til at vindhastighetene er høyere for det reanalyserte datasettet kan komme av at topografien til gridet som observasjonene ble hentet fra, har en annen karakteristikk enn det som er tilfellet for Vordersteinwald. Nærmere inspeksjon avslører at store områder med åpent lende er inkludert i gridet, noe som kan være grunnen til at vindhastighetene er høyere. Den gjennomsnittlige ruhetslengden for gridet er på 0.84 m, noe som er lavere enn både Ås og Byflaten. Dette antyder at terrengets ruhet er av betydning for at modellen skal beregne korrekte vindhastigheter, noe som videre påvirker beregnede eksponeringskoeffisienter.

Fordelingen av alle C_e -verdiene for Ås og Byflaten viser at simulerte verdier er større enn verdier beregnet gjennom målingene til Høibø (1989). Dette kan sees gjennom Fig. 4.7, hvor de fleste simulerte C_e -verdiene er forskjøvet mot høyre sammenliknet med Høibø (1989) sine målinger. Av de simulerte verdiene skiller SIM5 seg ut ved å ha verdier spredt over et større spenn. Grunnen til dette er at u_{*t} har en fast verdi på 0.10 m/s. Som tidligere nevnt er terskelfriksjonshastigheten sensitiv rundt denne verdien, og dette kan gi stor variasjon i resultatene. Beregning av RMSE for eksponeringskoeffisienten avslører at SIM3 (RMSE = 0.17) og SIM5 (RMSE = 0.39) har lavest verdi for henholdsvis Ås og Byflaten (se Tab. 4.4). I likhet med taklastene er dette ganske høye verdier for RMSE. Med tanke på at 0.2 utgjør forskjellen mellom hver topografikategori i NS-EN 1991-1-3, er både 0.17 og 0.39 ansett som høye verdier.

Fig. 4.8 viser de dimensjonerende eksponeringskoeffisientene for hver simulering fordelt etter område. Resultatene viser at $C_{e,dim}$ er nærmest observasjonene til Høibø (1989) for SIM3 i Ås og for SIM5 i Byflaten. Ingen av de dimensjonerende eksponeringskoeffisientene ser ut til å treffe de målte verdiene godt. Differansen er spesielt stor for Byflaten, hvor målte og simulerte verdier (SIM5) er på henholdsvis 0.76 og 1.14. Forklaringen på dette er vanskelig å si, men en potensiell utenomliggende faktor kan være høy varme-gjennomgang gjennom de observerte takene. Som nevnt tidligere tas det ikke hensyn til termiske bidrag fra innsiden av konstruksjonen, siden de fleste av byggene undersøkt av Høibø (1989) er uoppvarmede bygninger. De fire byggene i Byflaten er riktignok oppvarmede bygninger i form av skolebygg eller gymsal (se bilder av bygningene i Fig. 3.3). Historiske flyfoto indikerer at mesteparten av den samme bygningsmassen som er der i dag er den samme som da målingene ble utført. Det er usikkert om taket består av et kompakt tak eller et oppforet tretak, men siden bygget ble reist på 50- eller 60-tallet er det rimelig å anta at taket har dårlige isolerende egenskaper, noe som fører til snøsmelting på taket. I masteroppgaven til Krogsrud (2021) ble den termiske koeffisienten for forskjellige bygningstyper beregnet ut i fra U-verdien til taket. For boliger reist etter byggeforskrifter av 1. august 1969, hvor U-verdien var satt til $0.46 \text{ W/m}^2\text{K}$, ble den ter-

miske koeffisienten i Oslo estimert til 0.78. Det er vanskelig å si noe om overførbarheten av denne verdien til Byflaten, men tatt i betraktning at skolebygget ble reist før den nevnte byggeforskriften, ansees sannsynligheten som stor for at bygget hadde betydelige varmetap da Høibø (1989) gjorde sine målinger på 60-, 70- og 80-tallet.

For Ås er forskjellen mellom observert og simulert $C_{e,dim}$ ikke like markant som for Byflaten, med observert $C_{e,dim}$ lik 0.98 og simulert $C_{e,dim}$ (SIM3) lik 1.11. På samme måte som for Byflaten kan de målte verdiene for eksponeringskoeffisienten være et resultat av utenforliggende faktorer. Flere av byggene i Ås er oppvarmede bygninger, og på den måten kan man ikke utelukke termiske påvirkninger gjennom taket. Historiske flyfoto avslører også at vegetasjon og omliggende bebygning endret seg i måleperioden for flere av tomtene som ble undersøkt, noe som kan forklare store forskjeller i eksponeringskoeffisient fra år til år. Eksempelvis har lagerbygningene i Fig. 3.3 stor differanse i observert C_e , noe som kan skyldes redusert terrengruhet på grunn av hogst på en nærliggende tomt. Dette ansees riktignok ikke å ha stor innvirkning på observert $C_{e,dim}$.

Som forklart i metodekapittelet ble ett alternativ tatt med videre til langtidssimuleringene. Tab. 4.5 viser at SIM3 har lavest RMSE for både $SW E_{tak}$ og C_e , dersom alle observasjoner for Ås og Byflaten er lagt sammen (markert i grønn i tabellen). På bakgrunn av dette vurderes SIM3 å gi den beste modellen for erosjon av snø fra flate tak. Det kan virke noe overraskende at alternativet med den laveste verdien for $u_{*t,min}$ ble valgt. Potensielle årsaker til dette vil diskuteres videre i det neste kapittelet.

5.2 Langtidssimulering av snølast

For å danne et tydeligere bilde av modellen, ble simuleringer med SIM3 utført for Ås, Byflaten og Tromsø over en 30-årsperiode. Det ble simulert snølast på tak og mark, som videre ga utgangspunkt for beregning av eksponeringskoeffisienten. Ved å benytte både meteorologiske målinger og reanalyserte data i form av ERA5, kunne de forskjellige datatypene også sammenlignes. I dette delkapittelet forklares analyser som er utført for langtidssimuleringene.

Ekstremverdianalysen for beregning av 5-års returlast ga utgangspunkt for seleksjon av år for beregning av taklast og eksponeringskoeffisient. Som observert gjennom Tab. 4.6 ble det for Tromsø beregnet størst returlast med ERA5-data, mens det for Ås ble beregnet størst returlast med meteorologiske målinger. Disse beregningene kan forklares av det interne størrelsesforholdet mellom input-parameterene fra forskjellige datakilder. Videre analyseres derfor hvilke parametre som har hatt størst påvirkning på 5-års returlast.

Fig. 4.9 a. viser at de meteorologiske målingene gir tydelig høyere verdier for tempe-

ratur i Tromsø. Dette gjør at sannsynligheten for at nedbør faller som regn istedenfor snø øker. Siden regn adderes til total SWE betyr ikke dette at nedbøren nødvendigvis har en negativ innvirkning på snølasten, men sannsynligheten for at vannbeholdningskapasiteten til snødekket overskrides blir større, og dette vil føre til redusert akkumulert SWE i form av avrenning. Det er derfor rimelig å anta at temperaturforskjeller mellom ERA5-datasettet og de meteorologiske målingene har bidratt til forskjeller i 5-års returlast i Tromsø. For Ås korrelerer datasettet med ERA5 og meteorologiske målinger nokså godt, derfor er det ikke mulig å dra slutninger om at temperatur forklarer forskjeller i snølast.

Fig. 4.9 d. viser sterk korrelasjon mellom gjennomsnittlig nedbør mellom de to datakildene i Tromsø. Dataene antyder at ERA5 har noe høyere verdier enn de meteorologiske målingene. Siden de fleste gjennomsnittstemperaturene i graf a. er under frysepunktet til vann, vil økt nedbør typisk assosieres med akkumulert snø, og større total SWE. Nedbør kan altså også forklare hvorfor ERA5-datasettet gir høyere 5-års returlast enn de meteorologiske målingene for Tromsø.

I likhet med Vordersteinwald kan årsaken til at større returlaster er simulert med ERA5 for Tromsø være at topografien for det definerte gridområdet er forskjellig fra stedet de meteorologiske målingene er hentet fra. For Tromsø er dette nokså tydelig, da gjennomsnittshøyden til gridet er ca. 200 meter høyere enn den meteorologiske stasjonen. Dette vil som følge gi ERA5-datasettet mer nedbør og lavere temperaturer (som vist gjennom Fig. 4.9 a. og d.), noe som øker akkumulert SWE. For Ås er det ikke like store forskjeller i input-dataen mellom ERA5 og meteorologiske målinger, noe som gjør at forskjellene mellom beregnede returlaster ikke er like stor. ERA5-data ansees derfor for å gi bedre estimater for snølast i Ås enn i Tromsø. Dette kan komme av at høydeforskjellene i gridområdet ikke er like store i Ås, noe som gir bedre estimater.

Det er viktig å påpeke at ingen av datasettene for langtidssimuleringene som er benyttet i denne oppgaven består utelukkende av data med meteorologiske målinger. Som observert av Tab. 3.3 er reanalyserte data benyttet for strålingsparameterne i datasett 4 (Tromsø), på grunn av mangel på dataserier som strekker seg langt tilbake i tid. For datasett 1 (Ås) er i tillegg nedbør erstattet med ERA5. Som nevnt i Kap. 3.2.2 er visse andeler av dataserien til hver parameter også erstattet med reanalyserte data (se Tab. 3.4), på grunn av «hull» i dataene eller urealistiske målinger. Kombinasjoner av målinger fra meteorologiske observasjoner og ERA5 kan i visse tilfeller være urealistiske, i og med at datatypene måler forskjellig verdier. Dette kan ha innvirkning på reliabiliteten til simuleringene med meteorologiske målinger, spesielt for datasett 1 (Ås) der meteorologiske målinger for nedbør er erstattet.

Fig. 4.10 viser korrelasjonen mellom C_e beregnet gjennom SIM3 og den alternative

modellen til Tabler (1994) og O'Rourke mfl. (2005). Hvert punkt tilsvareer ett av årene med 5-års returlast, og grafen er delt inn etter datasettype. Eksponeringskoeffisienten virker å korrelere sterkt for høye verdier av C_e , og datasett 2 (Ås), 3 (Byflaten) og 5 (Tromsø) virker å ha verdier som legger seg tett inntil identitetslinjen. For lavere verdier av C_e samsvarer de to modellene ikke i like stor grad. Datasett 1 (Ås) og 4 (Tromsø) har verdier som faller noe lenger vekk fra identitetslinjen, og den alternative modellen beregner lavere verdier for C_e enn SIM3. Dette er de to eneste datasettene med input-data fra en meteorologisk stasjon.

Man kan spekulere rundt hva som er årsaken til forskjellene mellom de to modellene. Noe av årsaken kan forklares av hvordan de to modellene beregner erosjonsmengde. En nærmere analyse av dette gis i Kap. 5.3. Det er samtidig viktig å ta i betraktning forskjellene mellom de to modellene når man skal gjøre sammenlikninger. Modellen utviklet av Tabler (1994) og O'Rourke mfl. (2005) er av enklere sort enn modellen utviklet i denne oppgaven, i form av at vindhastighet er eneste meteorologiske parameter som legges til grunn for utregning av snøerosjonsmengde fra tak. Snømodellen i ESCIMO bruker i midlertidig seks meteorologiske parametere som input, og gjør en mengde avanserte beregninger av snødekkets energi- og massebalanse. Sammenlikning av de to modellene gir riktignok en pekepinn på om de to modellene beregner sammenlignbare eksponeringskoeffisienter.

Fig. 4.11 viser et stolpediagram med beregnede verdier for $C_{e,dim}$ ved hjelp av SIM3, den alternative modellen, forslag til ny snølaststandard (prEN) og NS-EN 1991-1-3. Resultatene er fordelt etter de fem ulike datasettypene. $C_{e,dim}$ er som nevnt i Kap. 3.4.3 gjennomsnittet av alle eksponeringskoeffisientene beregnet for år med last større enn 5-års returlast for hvert aktuelle datasett.

Sammenliknet med NS-EN 1991-1-3 virker oppgavens modell å overestimere eksponeringskoeffisienten. Datasett 1 (Ås), 2 (Ås) og 3 (Byflaten) gir C_e -verdier på henholdsvis 1.15, 1.13 og 1.14. Dette er markant større verdier enn i snølaststandard, hvor verdien er 1.0 for både Ås og Byflaten. For datasett 4 og 5 (Tromsø) gir SIM3 også ganske høye C_e -verdier ($C_{e,dim}$ lik 0.94 og 1.02 for henholdsvis datasett 4 og 5) sammenliknet med NS-EN 1991-1-3, hvor verdien er satt til 0.8. I forhold til den nye metoden for bestemmelse av eksponeringsfaktoren i forslaget til ny snølaststandard, virker SIM3 riktignok å estimere eksponeringskoeffisienten bedre i Tromsø. I henhold til prEN settes C_e for Tromsø lik 1.0, noe som er ganske nært de simulerte verdiene. For den alternative modellen virker hvilken datatype som er brukt å være avgjørende for eksponeringskoeffisienten. Datasett 2 (Ås) og 5 (Tromsø), som har ERA5 som datkilde, gir høyere verdier for C_e enn simulering med meteorologiske målinger for samme sted. En annen bemerkning er at den alternative modellen har størst avvik fra SIM3 for datasett 1 (Ås) og 4

(Tromsø), hvor $C_{e,dim}$ har betydelig lavere verdi.

Totalt sett antyder resultatene at eksponeringskoeffisienten beregnet med SIM3 er overestimert i forhold til de standardiserte verdiene. Det kan være ulike grunner til dette. Den mest åpenbare årsaken er at modellen simulerer mindre snøerosjon enn det som faktisk er tilfellet. Snøerosjon er bestemt av variabler som vindhastighet, friksjonshastighet og terskelfriksjonshastighet. Hvordan hver av disse parameterene er implementert i modellen kan ha store innvirkninger på erosjonsmengden. Det er derfor nødvendig å undersøke hver parameter grundig.

Dersom vi undersøker de meteorologiske input-dataene sin påvirkning på eksponeringskoeffisienten ser vi at vindhastighetene er høyere for Tromsø enn Ås og Byflaten (se Fig. 4.9). Økt vindhastighet gir naturligvis større erosjon av snø fra tak. Siden Ås og Byflaten har verdier for C_e som samsvarer dårligere med standardiserte verdier enn Tromsø, kan dette tyde på at modellen har utfordringer med å detektere snøerosjon for områder med små vindhastigheter. Denne deteksjonen av snøerosjon vil være styrt av hvordan u_* og u_{*t} er definert. Det kan være to årsaker til at modellen detekterer mindre erosjon av snø enn det som skjer i virkeligheten: 1) u_{*t} er overestimert i for mange tilfeller i tidsserien, eller 2) u_* er underestimert i den implementerte modellen. For SIM3 varierer terskelfriksjonshastigheten mellom 0.07 og 0.2 m/s avhengig av hvordan snødekket er påvirket av regn. Dette er nokså lave verdier for u_{*t} og vil i henhold til mange av studiene som er undersøkt i denne oppgaven kunne karakteriseres som nysnø, jf. de tabulerte verdiene gitt i Tab. 2.4. Det er derfor lite sannsynlig at u_{*t} er overestimert. Det er derimot mer sannsynlig at friksjonshastigheten kan ha forårsaket underestimerte erosjonsmengder. Verdien til u_* er satt til 4 % av vindhastigheten i 10 meters høyde. Som nevnt i Kap. 2.4.5 har andre studier vist at friksjonshastigheten kan nå høyere verdier enn dette (Qiang mfl., 2021; Abediy, 2022). Eksempelvis viste CFD-simuleringer utført av Abediy (2022) at dersom bygningen er orientert 45° i forhold til vindretningen kan friksjonshastigheten være i overkant av 6 % av vindhastigheten i takhøyde. Dette indikerer at oppgavens modell kan ha underestimert friksjonshastigheten i snøoverflaten. Det presiseres at denne studiens undersøkelser er begrenset, og at andre kombinasjoner av u_* og u_{*t} kan gi en modell som reflekterer fysikken bak vindtransport av snø på en mer tilfredsstillende måte.

Som vi har sett tenderer oppgavens modell i visse tilfeller å simulere lavere C_e -verdier enn det som er tabulert i NS-EN 1991-1-3 og prEN. Det er riktignok viktig å poengtere at metoden for bestemmelse av C_e i disse standardene er basert på store forenklinger. I NS-EN 1991-1-3 er topografien rundt den aktuelle bygningen det eneste kriteriet for valg av eksponeringskoeffisient. I prEN hensyntas i tillegg den forventede vindhastigheten i snøsesongen. Siden prEN i større grad evner å ta hensyn til de fysiske prosessene bak

snøerosjon fra tak, ansees denne metoden å gi mer representative verdier for C_e .

I videre analyse er det derfor aktuelt å sammenlikne beregningene av $C_{e,dim}$, med resultatene fra studien for utvikling av eksponeringsfaktoren i ny snølaststandard. Som vi har sett gir simuleringene fra Tromsø verdier for $C_{e,dim}$ som er på størrelse med verdiene i prEN, og følgelig ansees modellen å fungere godt for dette området. For simuleringene i Ås og Byflaten er derimot C_e -verdiene noe underestimert sammenliknet med prEN. Samtidig gir modellen verdier for $C_{e,dim}$ som samsvarer godt med den gjennomsnittlige eksponeringskoeffisienten beregnet for ulike vindhastigheter i Thiis mfl. (2022). Fig. 2.2 viser variasjonen i C_e med månedlig gjennomsnittlig vindhastighet beregnet gjennom den parametriske undersøkelsen i denne studien (som er beskrevet nærmere i Kap. 2.1.2). Som observert av figuren er den gjennomsnittlige eksponeringskoeffisienten rundt 1.10 for observasjonene med vindhastighet lik 2.5 m/s. For datasett 1 (Ås), 2 (Ås) og 3 (Byflaten) er gjennomsnittlig eksponeringskoeffisient beregnet til henholdsvis 1.15, 1.13 og 1.14. I viten om at disse tre datasettene har respektive gjennomsnittlige vindhastigheter på 2.3, 2.6 og 2.3 m/s (for år med 5-års returlast), indikerer dette at modellen samsvarer relativt godt med resultatene fra studien bak utviklingen av ny snølaststandard. For Tromsø samsvarer også eksponeringskoeffisientene, hvor Thiis mfl. (2022) beregnet C_e til å være rundt 1.02 for vindhastigheter på 3.0 m/s, mens oppgavens modell beregnet eksponeringskoeffisienter på 0.94 og 1.02 for vindhastigheter på henholdsvis 3.0 og 2.8 m/s. Dette viser at eksponeringskoeffisienten samsvarer godt med arbeidene som er gjort i utviklingen av prEN 1991-1-3 for alle de undersøkte områdene i oppgaven.

Siden prEN og simuleringene i denne oppgaven har differanser i estimert eksponeringskoeffisient, vil det neste spørsmålet være hva som ansees å være realistiske verdier for $C_{e,dim}$ for de undersøkte områdene. Ut i fra snølastobservasjonene til Høibø (1989), ble den dimensjonerende eksponeringskoeffisienten beregnet til å være 0.98 for Ås, noe som er nære verdien gitt av både NS-EN 1991-1-3 og prEN. Siden man ikke kan utelukke termisk påvirkning for takene som ble undersøkt i Ås (siden mange av bygningene er oppvarmede), ansees denne verdien å være noe underestimert. Undersøkelsene i oppgaven viser at den gjennomsnittlige vindhastigheten om vinteren i Ås er nokså lav, og selv om området er definert under terrengkategori III, som skulle tilsi $C_e = 1.0$, viser de mer avanserte analysene i oppgaven at verdien er noe større. For Byflaten ble $C_{e,dim}$ ut i fra målingene til Høibø (1989) beregnet å være 0.76. For dette området er det mer sannsynlig at bygningene som ble undersøkt lider av varmetap gjennom taket, siden differansen mellom simulert og observert eksponeringskoeffisient er såpass stor. Terrenget i Byflaten er nokså likt det i Ås, bestående av områder med lav vegetasjon og spredte hindringer som bygninger og trær. I tillegg er vindhastigheten i vinterhalvåret lave, derfor ansees også verdien for C_e fastsatt av prEN og NS-EN 1991-1-3 på 1.0 som underestimert. Tromsø var ikke en av områdene som var med i valideringen, så her har

man ingen verdier å sammenlikne med. Analysene viser riktignok at Tromsø har mer vind og lavere terrengkategori, noe som indikerer lavere eksponeringskoeffisient. Siden de beregnede verdiene for $C_{e,dim}$ samsvarer godt med verdiene i prEN 1991-1-3, ansees derfor en eksponeringskoeffisient på rundt 1.0 som realistisk.

En viktig bemerkning med modellen for oppgaven er at den kun er testet for områder med relativt lave vindhastigheter. Som nevnt i Kap. 2.1.2 identifiserer Thiis mfl. (2022) en gjennomsnittlig vindhastighet i den kaldeste måneden i året på 4.5 m/s som en mulig grenseverdi for når et område skal ansees som vindutsatt. I denne oppgaven overskrider ikke middelvindhastigheten for år med 5-års returlast 3.0 m/s i noen tilfeller, derfor finnes det ikke grunnlag for å si at modellen fungerer i vindutsatte klima. Dette er spesielt viktig siden modellen viser seg å være sensitiv for lave terskelfriksjonshastigheter (0.07-0.10 m/s). Det vektlegges at fremtidige analyser bør gjøres for modellen med en større database som dekker et bredere spekter av klimatiske forhold, inkludert høyere vindhastigheter. Dette kan være med på å minske usikkerhetene som er knyttet til modellen.

Som vi har sett tidligere i dette kapittelet har det definerte gridområdet til de reanalyserte dataene påvirkning på snølast. Dette betyr ikke nødvendigvis at eksponeringskoeffisienten påvirkes, siden C_e er definert ut i fra forholdet mellom tak- og marklast. Dersom vi henvender oss til forskningsspørsmål 2, og undersøker de reanalyserte dataene sin evne til å estimere eksponeringskoeffisienten, ser vi at forskjellene i $C_{e,dim}$ mellom datasettypene i Ås og Tromsø er noe forskjellig. For Ås er det ikke stor forskjell i dimensjonerende eksponeringskoeffisient mellom datasett 1 og 2 (se Fig. 4.11). Av Tab. 3.5 vet vi samtidig at topografiforskjellene mellom grid og meteorologisk stasjon heller ikke er store. ERA5-dataene virker altså å simulere eksponeringskoeffisienten på en samsvarende måte som meteorologiske målinger, for steder uten stor variasjon i topografi. Det såes riktignok tvil rundt hvor mye vi kan stole på dette resultatet, grunnet at datasett 1 består av tre input-parametere med ERA5 som datakilde. Dette kan være en årsak til at datasettene får lignende resultater.

For Tromsø er forskjellen mellom $C_{e,dim}$ beregnet gjennom datasett 4 og 5 noe større, men ikke markant ($C_{e,dim} = 0.94$ og 1.02 for henholdsvis datasett 4 og 5). Grunnen til at datasett 4 simulerer lavere eksponeringskoeffisient enn datasett 5 kan ha med at ERA5-datasettet har høyere vindhastigheter, noe som gir mer snøerosjon. I tillegg er nedbøren større, og temperaturen lavere for ERA5-datasettet. Dette gir lavere terskelfriksjonshastighet i en større andel av vintersesongen, fordi sannsynligheten for nysnø er større. Selv om forskjellene i beregnet $C_{e,dim}$ ikke er markante, ansees de som store nok til at det ikke er grunnlag for å si at reanalysert data gir representative verdier for eksponeringskoeffisienten for steder med varierende topografi. I tillegg viste analysen fra

Vordersteinwald at forskjellene i eksponeringskoeffisient var store. Her ble det drøftet at årsaken skyldtes variasjon i ruhetslengde i gridområdet til de reanalyserte dataene. I viten om at det også er store forskjeller i høyde mellom den meteorologiske stasjonen og den gjennomsnittlige høyden i gridet (se Tab. 3.5), kan dette også ha påvirket eksponeringskoeffisienten.

5.3 Ytelse av implementert modell

I Kap. 4.3 ble resultater for ytelsen til modellen presentert. Formålet med dette kapitlet er å analysere hvordan de ulike implementerte parameterne i ESCIMO opererer. På denne måten gis en bedre innsikt i om modellen virker etter sin intensjon. Dessuten sammenliknes også modellen med den alternative snømodellen laget av Tabler (1994), og videreutviklet for å gjelde tak av O'Rourke mfl. (2005).

Den implementerte modellen i ESCIMO har som hensikt å være korrigerende for snøerosjonen ettersom betingelser i snøoverflaten endrer seg. Dette innebærer at den nedre grenseverdien for snøens motstandsdyktighet mot snødriv, herunder terskelfriksjonshastigheten, øker lineært dersom snøoverflaten står uberørt for nedbør. Dersom det kommer nedbør i form av snø, nullstilles modellen og terskelen settes til minimum, mens terskelen settes til maksimum dersom nedbøren kommer i form av regn. Denne dynamikken er illustrert gjennom Fig. 4.12, hvor terskelfriksjonshastigheten og erosjonsmengden simulert gjennom SIM3 er vist for snøsesongen 05/06 i Ås. Den blå linjen i diagrammet, som viser terskelfriksjonshastighet, gjør plutselige «hopp» fra maksimumsverdi til minimumsverdi. Dette kommer av at et nytt snøfall detekteres, noe som forårsaker u_{*t} å gå fra 0.2 til 0.07 m/s . Etter snøfallet kan man se at den blå kurven stiger lineært med tiden. Stigningstallet til kurven er bestemt av parameterene i Likn. 3.7. Mot slutten av hver lineær stigning gjør kurven et «hopp» til enten maksimum eller minimum terskelverdi. Dette kommer av at det den gitte timen simuleres enten flytende eller fast nedbør. I tilfeller med fast nedbør «hopper» grafen til minimumsverdi, og i tilfeller med flytende nedbør «hopper» grafen til maksimumsverdi.

Den forklarte dynamikken representerer en forenkling av hvordan faktiske forhold i snøoverflaten vil være. For det første er det ikke sikkert at terskelfriksjonshastigheten øker lineært med tiden. Variasjoner i temperatur og luftfuktighet kan påvirke raten terskelfriksjonshastigheten øker med. For det andre vil antall dager det tar for terskelfriksjonshastigheten å gå fra minimum til maksimum også være situasjonsbestemt. Poenget med modellen er riktignok ikke å være korrekt for alle situasjoner, men heller beregne snøerosjon mest mulig likt det som ansees som et gjennomsnittstilfelle for et gitt område.

Den oransje kurven i Fig. 4.12 viser forløpet for Q_{ero} , altså mengden snø som eroderer

av taket. Mindre andeler erosjon oppstår når terskelfriksjonshastigheten er på maksimumsverdien på 0.2 m/s. De største erosjonsmengdene oppstår imidlertid ved lave verdier for terskelfriksjonshastighet. Ettersom u_{*t} øker, synker Q_{ero} , noe som følger naturlig av Likn. 3.5. Hvor stor snømengde som eroderer av taket for forskjellige verdier for u_{*t} er vist i Fig. 4.13. X-aksen i figuren angir 9 intervaller for terskelfriksjonshastighet, og y-aksen angir prosentvis andel av den totale erosjonen som skjer ved hvert aktuelle intervall.

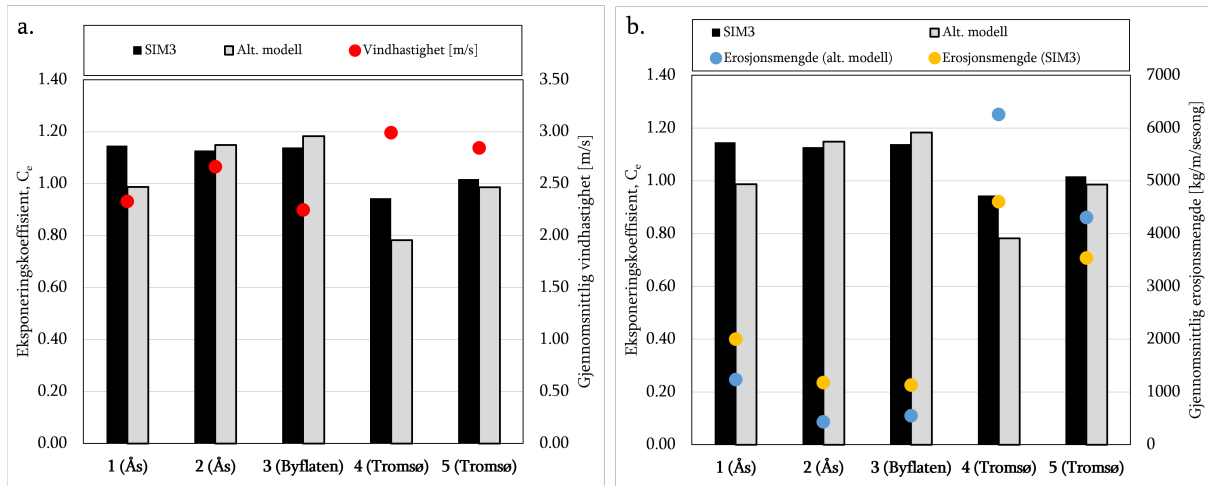
Som observert av stolpene i figuren oppstår mesteparten av snøerosjonen ved det laveste intervallet for terskelfriksjonshastighet. Med andre ord simuleres det mest snøerosjon under og rett etter snøfall. Den øvre grensen for u_{*t} for det første intervallet ($u_{*t} = 0.085$ m/s) inntreffer etter 57 timer; i overkant av 2 dager etter snøfallet. Det betyr at over to tredeler av den totale snøerosjonen for den aktuelle snøsesongen inntreffer under eller innen 57 timer etter et snøfall. Dette indikerer at den nedre verdien for terskelfriksjonshastighet ($u_{*t,min}$) er av stor betydning for hvor mye snø som blåser av taket. En annen bemerkning ved diagrammet i Fig. 4.13 er at den nest største andelen av erosjonen skjer ved det høyeste intervallet for terskelfriksjonshastighet. Dette kommer av at modellen vil være lik maksimumsverdien for u_{*t} i størsteparten av tiden i snøsesongen, noe som øker sannsynligheten for at vindhastigheter høyere enn terskelvindhastigheten for snøerosjon vil inntreffe. $u_{*t,max}$ er med andre ord også viktig for snøerosjonsmengden.

Som nevnt i metoden ble SIM3 simulert med T_d lik 20 dager for å teste hvilken effekt denne parameteren har. Resultatene viste at snøerosjonen var størst ved $T_d = 30$ dager ($Q_{ero} = 1741$ kg/m/sesong). Dette er ikke så overraskende siden stigningstallet for den lineære økningen mellom terskelgrensene er minst, noe som betyr at snødekket vil ha lengre perioder med lave terskelfriksjonshastigheter. For simuleringen med T_d lik 20 dager er erosjonsmengden 1663 kg/m/sesong. Dette tilsvarer en prosentvis nedgang på 4.5 %. Med andre ord har ikke T_d noen stor effekt på snøerosjonen denne vintersesongen.

Det er viktig å poengtere at den ovennevnte analysen kun er gjort for en enkelthendelse, det vil si for vintersesongen 05/06 i Ås. Under andre betingelser for andre områder kan snøerosjonen i løpet av en vintersesong se annerledes ut. Eksempelvis kan man se for seg at en større andel av snøerosjonen vil oppstå ved lave verdier for u_{*t} for steder med lavere temperatur (f.eks. Tromsø), fordi en større andel av nedbøren vil komme som snø istedenfor regn. Dette vil gjøre at u_{*t} vil holdes på et lavere nivå over en lengre periode i tidsserien, noe som gir et svar på hvorfor større snøerosjon er simulert i Tromsø enn i Ås. Dette gjør at eksponeringskoeffisienten også blir lavere.

Fig. 4.14 viser snøerosjonsmengde simulert med SIM3 vs. snøerosjonsmengde beregnet med den alternative modellen til Tabler (1994) og O'Rourke mfl. (2005). Som observert av figuren har de to modellene sterk korrelasjon ($R^2 = 0.84$). Det er svakere korrelasjon

for høye verdier av snøerosjon. Dette kan forklare hvorfor de to modellene korrelerer svakere for lave verdier for C_e (se Fig. 4.10). Sammenlikner man Fig. 4.10 og Fig. 4.14 ser man en tydelig sammenheng mellom erosjonsmengde og eksponeringskoeffisient. Dette er ikke så overraskende, siden disse egenskapene er nært tilknyttet, men viser at oppgavens modell gir sammenliknbare resultater som den alternative modellen. Det er riktignok noen forskjeller mellom modellene. For å forstå effektene vindhastighet og erosjonsmengde har på modellene, er disse parameterene plottet sammen med $C_{e,dim}$ i Fig. 5.1:



Figur 5.1: Sammenlikning av $C_{e,dim}$ for SIM3 og den alternative modellen. Stolpediagrammet viser eksponeringskoeffisienten for de forskjellige modellene og datasettene. I a. er gjennomsnittlig vindhastighet (for årene med marklast større enn 5-års returlast) vist gjennom røde punkter. b. viser samme figur, men med plot av erosjonsmengde (blå og gule punkter) for de to modellene.

Av Fig. 5.1 b. kan man se at for Tromsø er snøerosjonen for SIM3 mindre sammenliknet med den alternative modellen. På den annen side er snøerosjonen for SIM3 større enn den alternative modellen for Ås og Byflaten. Dette impliserer at SIM3 beregner mer snøerosjon for områder med lave vindhastigheter (Ås og Byflaten), og mindre snøerosjon for områder med større vindhastigheter (Tromsø), sammenliknet med den alternative modellen. Sammenlikner man datasett 4 og 5 (Tromsø) kan man se at det er sammenheng mellom erosjonsmengde og eksponeringskoeffisient for begge modellene. Vindhastigheten er større for de meteorologiske målingene enn ERA5-data, noe som kan forklare hvorfor datasett 4 har lavere C_e -verdi enn datasett 5. SIM3 har riktignok mindre forskjell mellom C_e -verdiene. Grunnen til det er at SIM3 tar hensyn til hvordan egenskapene til snøoverflaten endrer seg med tiden. Ettersom snøalder øker, og regn påvirker snødekket vil det erodere mindre snø fra taket. Den alternative modellen legger kun terskelvindhastighet til grunn for om det en gitt time vil foregå snøerosjon, og i likhet med u_{*t} vil terskelvindhastigheten avhenge av forholdene til snøoverflaten.

For Ås og Byflaten kan man se at datasettene har simulert omtrent like verdier for $C_{e,dim}$

med SIM3. Dette viser at ved vindhastigheter rundt 2.5 m/s er modellen lite sensitiv for snøerosjon. For den alternative modellen er $C_{e,dim}$ større for datasett 2 (Ås) enn 1 (Ås). Dette er noe motstridende, gitt at vindhastigheten fra ERA5-datasettet (datasett 2) er høyere enn de meteorologiske observasjonene (datasett 1). Det kan riktignok være misvisende å bruke gjennomsnittsverdier for vindhastighet for å forklare forskjeller i C_e . Dette fordi de aller største vindhastighetene vil være av størst betydning for snøerosjonen i den alternative modellen. Thiis mfl. (2022) viser en klar negativ korrelasjon mellom eksponeringskoeffisienten og gjennomsnittlig antall erosjonstimer. En erosjonstime defineres her som en observasjon i dataserien hvor det er snø på taket og vindhastigheten er over terskelvindhastigheten. Med andre ord vil de høyeste vindhastighetene være av størst betydning for beregningen av C_e , og forskjellen i beregnet eksponeringskoeffisient for datasett 1 og 2 (Ås) med den alternative modellen kan være grunnet at de meteorologiske målingene har flere høye vindhastigheter i løpet av vintersesongen.

En annen faktor som også må tas i betraktning om den alternative modellen er hvilke antakelser modellen gjør om snøoverflatens egenskaper. Terskelvindhastigheten beregnet gjennom den alternative modellen er satt til 5.0 m/s. I studien til Thiis mfl. (2022) ble det gjort to beregninger med både 5.0 og 6.0 m/s som terskelverdi for snøerosjon. Disse beregningene skulle hensynta at snødekket bestod av henholdsvis tørr og våt snø. Siden det i denne oppgaven kun er valgt å benytte den laveste terskelverdien av disse to, gjør det at snøen karakteriseres som tørr, noe som resulterer i større snøerosjon enn det som muligens er tilfellet. Dette kan forklare hvorfor den alternative modellen beregner lavere eksponeringskoeffisienter enn oppgavens modell, spesielt for områder som Ås, hvor de klimatiske forholdene varierer i større grad om vinteren.

5.4 Oppsummering

I dette kapitlet oppsummeres alle funn kartlagt i diskusjonen. De ovennevnte analysene for hvert enkelt forskningsspørsmål vil i det neste bli forklart på en konsis måte, slik at leseren har en klar formening om oppgavens betydning for forskning på det aktuelle fagområdet.

Forskningsspørsmål 1 er som følger:

-
1. Gir simuleringer med den implementerte modellen representative verdier for eksponeringskoeffisienten?
-

Analysen viser at oppgavens snømodell gir representative verdier for eksponeringskoeffisienten for de undersøkte caseområdene. For Tromsø samsvarer beregnede eksponeringskoeffisienter med verdier gitt i forslaget til ny snølaststandard (prEN 1991-1-3). For Ås og Byflaten gir modellen høye C_e -verdier sammenlignet med prEN og NS-EN 1991-1-3.

Valideringen opp mot snølastmålinger utført av Høibø (1989) viser svak korrelasjon mellom observert og simulert eksponeringskoeffisient. Simulerte verdier for C_e er betydelig høyere enn verdiene beregnet gjennom snølastobservasjoner. Dette er særlig tilfellet for Byflaten, hvor den dimensjonerende eksponeringskoeffisienten ble beregnet til å være 0.76 og 1.19 for henholdsvis observert og simulert verdi. Det kan ikke utelukkes for verken Byflaten eller Ås at den svake korrelasjonen skyldes en utenforliggende faktor i form av varmetap gjennom taket. Dette kommer av at de undersøkte bygningene er oppvarmede og gamle, noe som indikerer at takkonstruksjonens høye U-verdi kan ha hatt en effekt på takets varmegjennomgang.

En nærmere analyse av modellens ytelse viser at parameterne som ble implementert til ESCIMO fungerer etter sin hensikt. Modellen er sensitiv for verdier for terskelfriksjonshastighet mellom 0.07 og 0.10 m/s. Sammenlikningen med modellen til Tabler (1994) og O'Rourke mfl. (2005) viste sterk korrelasjon for erosjonsmengde mellom de to modellene. Analysene indikerer at oppgavens modell i større grad hensyntar fysiske endringer i snøoverflaten for beregning av eksponeringskoeffisienten, enn den alternative modellen.

Det presiseres at det er knyttet usikkerheter til modellen grunnet resultatene fra valideringen. Det vektlegges også at ingen undersøkelser er gjort for vindutsatte områder. Før modellen kan anvendes for steder med mye vind må modellen verifiseres for slike områder. Det anbefales også at modellen testes med input utelukkende fra meteorologiske målestasjoner, da dette ikke har blitt gjort i denne oppgaven.

Forskningsspørsmål 2 lyder som følger:

-
2. Er reanalyserte meteorologiske data tilstrekkelig nøyaktig for å kunne benyttes til å estimere eksponeringskoeffisienten?
-

Analysene viser at reanalyserte data har usikkerheter knyttet til å estimere eksponeringskoeffisienten i områder med variert topografi og terrengruhet. Dette kommer av at disse variasjonene er omfattet av gridområdet data hentes fra, noe som påvirker påliteligheten til viktige parametre for snøtransport, som temperatur, nedbør og vindhastighet.

Dersom området de reanalyserte dataene omslutter har en høyere gjennomsnittlig høyde enn lokasjonen til bygningen, vil dette føre til høyere snølast som følge av økt nedbør og lavere temperaturer. Snødekkets motstandsdyktighet for snøerosjon vil påvirkes av dette i form av lavere verdier for snøens terskelfriksjonshastighet. Dette gjør at takene får større snøerosjon, som igjen gir lavere eksponeringskoeffisient. Tromsø er et eksempel hvor dette var tilfellet.

I tilfeller med stor variasjon i gridets terrengruhet, påvirkes vindhastigheten. Resultatene fra Vordersteinwald indikerer at dersom terrenget omsluttet av gridet har lav gjennomsnittlig ruhetlengde i forhold til det som er typisk for stedet de meteorologiske målingene ble foretatt, vil den reanalyserte dataen ha høyere vindhastigheter enn de meteorologiske målingene. De økte vindhastighetene har videre negativ påvirkning på eksponeringskoeffisienten.

Simuleringene med oppgavens snømodell gir små forskjeller i beregnet eksponeringskoeffisient med reanalyserte data og meteorologiske målinger for områder uten de ovennevnte utfordringene knyttet til topografi og ruhet. For simuleringene i Ås (hvor høydeforskjellen mellom gridet og den meteorologiske stasjonen er liten) ga meteorologiske målinger og ERA5-data omtrentlig samme eksponeringskoeffisient. Det må understrekes at ingen av simuleringene ble gjort utelukkende med meteorologiske data (bortsett fra analysen i Vordersteinwald). Resultatene representeres derfor med en viss usikkerhet.

6. Konklusjon

Målet for denne oppgaven har vært å utvikle en modell for erosjon av snø fra flate tak ved hjelp av timesbaserte meteorologiske data. Oppgavens modell ble konstruert for å ta hånd om endringer i snødekkets terskelfriksjonshastighet ettersom de meteorologiske forholdene i omgivelsene endrer seg. Tre områder i Norge ble valgt ut for simulering av snølast over en 30-årsperiode, som videre dannet grunnlag for beregning av eksponeringskoeffisienten. Et datasett bestående av 68 snølastmålinger på flate tak utført på 17 bygninger utgjorde grunnlaget for validering av modellen. Siden værdata i lange tidsserier ikke alltid er lett tilgjengelig, ble ERA5-data sin egnethet til å estimere eksponeringskoeffisienten også testet.

Analysene indikerer at modellen gir representative verdier for eksponeringskoeffisienten. Modellen gir estimater for C_e som er høyere enn i NS-EN 1991-1-3. Metoden for bestemmelse av C_e i prEN 1991-1-3 ansees å hensynta vind bedre, og resultatene viser at modellen samsvarer bedre med denne standarden. Modellen er sensitiv for terskelfriksjonshastigheter mellom 0.07 og 0.10 m/s. Det legges vekt på at modellen ikke er testet for vindutsatte klima, og at fremtidige analyser bør anvende en større database med et videre spekter av klimatiske forhold.

Valideringen opp mot snølastmålinger på flate tak viste svak korrelasjon mellom simulert og observert eksponeringskoeffisient. Observerte C_e -verdier viste seg å være betydelig lavere enn simulerte verdier. Termisk påvirkning gjennom taket pekes på som en potensiell årsak til de lave eksponeringskoeffisientene i valideringsgrunnlaget. Dette med bakgrunn i at målingene ble utført for over 50 år siden på tak med lavere antatt U-verdi enn dagens standard.

Når det gjelder forskningsspørsmålet knyttet til reanalyserte data, antyder resultatene at variasjoner i gjennomsnittlig høyde og ruhetslengde i gridområdet data hentes fra, har betydning for treffsikkerheten til de meteorologiske parameterne. Dette påvirker viktige parametere for snøtransport som temperatur, nedbør og vind. På bakgrunn av dette svekkes ERA5-data sin relevans med tanke på estimering av eksponeringskoeffisienten. Resultatene viser riktignok at områder uten store forskjeller i gridet gir

samsvarende verdier for eksponeringskoeffisienten som datasett med tradisjonelle meteorologiske målinger. Ingen av datasettene for langtidssimuleringene i denne oppgaven bestod utelukkende av meteorologiske målinger, og at det derfor kan såes tvil rundt disse resultatene.

6.1 Videre arbeid

For videre arbeid relatert til oppgavens tematikk kommer det her anbefalinger til studier som kan gjøres i framtiden:

- **Undersøke modellen for vindutsatte klima**

Som nevnt i oppgaven overskrider ikke den gjennomsnittlige vindhastigheten 3.0 m/s for noen av de undersøkte områdene. Ifølge prEN 1991-1-3 ansees et område som vindutsatt dersom middelvinden i den kaldeste måneden av året er høyere enn 4.5 m/s. Det anbefales derfor at modellen testes for vindutsatte klima. Siden oppgaven har vist at modellen er sensitiv for lave verdier av u_{*t} er dette nødvendig for å verifisere modellen. Det understrekes også at denne studien har undersøkt et begrenset utvalg av områder. Fremtidige analyser bør derfor ta i bruk en større database som dekker et bredere spekter av klimatiske forhold.

- **Videreutvikling av modellen**

I denne oppgaven er det kun tatt hensyn til hvordan nedbør og snøalder påvirker terskelfriksjonshastigheten. Positive lufttemperaturer vil smelte snø, og gir mange av de samme effektene på snøoverflaten som regn. Dette utgjør en potensiell forbedring av oppgavens modell. Dessuten har modellen undersøkt et begrenset antall alternativer. Fremtidige studier burde undersøke ulike kombinasjoner med både u_* og u_{*t} , gjerne i kombinasjon med et større og mer mangfoldig datasett.

Referanser

- Abediy, H. O. E. (2022). Evaluating the friction velocity of flat-roofed buildings in relation to snow erosion using numerical simulation. Upublisert manuskript. Masteroppg. Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet.
- Bobbitt, Z. (mai 2021). *How to Interpret Root Mean Square Error (RMSE)*. Statology. URL: <https://www.statology.org/how-to-interpret-rmse/>.
- C3S (udatert). *Climate reanalysis*. URL: <https://climate.copernicus.eu/climate-reanalysis>.
- Clifton, A., Rüedi, J.-D. og Lehning, M. (sep. 2006). Snow saltation threshold measurements in a drifting-snow wind tunnel. *Journal of Glaciology* 52 (179): 585–596. DOI: [10.3189/172756506781828430](https://doi.org/10.3189/172756506781828430).
- Dannevig, P. (jul. 2021). *monsun*. <https://snl.no/monsun>.
- Doorscot, J. J. J., Lehning, M. og Vrouwe, A. (2004). Field measurements of snow-drift threshold and mass fluxes, and related model simulations. *Boundary-Layer Meteorology* 113 (3): 247–368. DOI: [10.1007/s10546-004-8659-z](https://doi.org/10.1007/s10546-004-8659-z).
- ECMWF (nov. 2021). *ERA5: How to calculate wind speed and wind direction from u and v components of wind?* ECMWF. URL: <https://confluence.ecmwf.int/pages/viewpage.action?pageId=133262398>.
- ECMWF (udatert). *ERA5*. URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>.
- ESCIMO.spread(v2) (2016). *ESCIMO (versjon 2)*. Programvare. URL: www.alpinehydroclimatology.net.
- Gray, D. M., Norum, D. I. og Dyck, G. E. (1970). Densities of Prairie snowpacks. *Proc. 38th Annu. Meet. West. Snow Conf.*: 24–30.
- Grimenes, A. A., Jerstad, P. og Sletbak, B. (udatert). *Fluidmekanikk - Kopieringsgrunnlag for tillegg til Rom Stoff Tid Forkurs kapittel 6: Fysikk i væsker og gasser*. URL: <https://www.uio.no/studier/emner/matnat/fys/nedlagte-emner/FYS1000/v11/Fluidmekanikk.pdf>.
- Høibø, H. (1989). Form factors for snow loads on gable roofs: Extending use of snow load data from inland districts to wind exposed areas. *Proc., 11th Int. Congress on Agriculture Engineering*: 1159–1164.
- Judson, A. og Doesken, N. (jul. 2000). Density of Freshly Fallen Snow in the Central Rocky Mountains. *Bulletin of the American Meteorological Society* 81 (7): 1577–1587. DOI: [10.1175/1520-0477\(2000\)081<1577:DOFFSI>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2000)081<1577:DOFFSI>2.3.CO;2).
- Kang, L., Zhou, X., van Hooff, T., Blocken, B. og Gu, M. (jun. 2018). CFD simulation of snow transport over flat, uniformly rough, open terrain: Impact of physical and computational

- parameters. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 177: 213–226. DOI: [10.1016/j.jweia.2018.04.014](https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.04.014).
- Kind, R. (1981). Snow drifting. I: *Handbook of Snow - Principles, processes, management and use*. Red. av D. Gray og D. Male. Toronto: Pergamon Press Canada Ltd. Kap. 8: 338–359.
- Krogsrud, V. H. (2021). Modellering og analyse av den termiske koeffisienten på flate tak med ulik varmegjennomgang - Casestudier i Oslo, Bergen og Tromsø. Masteroppg. Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet.
- Lawrence, M. G. (2005). The Relationship between Relative Humidity and the Dewpoint Temperature in Moist Air: A Simple Conversion and Applications. *Bulletin of the American Meteorological Society* 86 (2): 225–234. DOI: [10.1175/BAMS-86-2-225](https://doi.org/10.1175/BAMS-86-2-225).
- Li, L. og Pomeroy, J. (mar. 1997). Estimates of Threshold Wind Speeds for Snow Transport Using Meteorological Data. *Journal of Applied Meteorology - J APPL METEOROL* 36: 205–213. DOI: [10.1175/1520-0450\(1997\)036<0205:EOTWSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1997)036<0205:EOTWSF>2.0.CO;2).
- Liston, G. E., Haehnel, R. B., Sturm, M., Hiemstra, C. A., Berezovskaya, S. og Tabler, R. D. (2007). Simulating complex snow distributions in windy environments using SnowTran-3D. *Journal of Glaciology* 53 (181): 241–256. DOI: [10.3189/172756507782202865](https://doi.org/10.3189/172756507782202865).
- Marke, T., Mair, E., Förster, K., Hanzer, F., Garvelmann, J., Pohl, S., Warscher, M. og Stras-ser, U. (feb. 2016). ESCIMO.spread (v2): parameterization of a spreadsheet-based energy balance snow model for inside-canopy conditions. *Geoscientific Model Development* 9 (2): 633–646. DOI: [10.5194/gmd-9-633-2016](https://doi.org/10.5194/gmd-9-633-2016).
- Meløysund, V., Leira, B., Høiseth, K. V. og Lisø, K. R. (2007). Predicting snow density using meteorological data. *Meteorological Applications* 14 (4): 413–423. DOI: [10.1002/met.40](https://doi.org/10.1002/met.40).
- Meteorologisk Institutt (jan. 2021). *Ny normal i klimaforskning*. <https://www.met.no/vaer-og-klima/ny-normal-i-klimaforskningen>.
- NASA (udatert). *Panoply netCDF, HDF and GRIB Data Viewer*. URL: <https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/>.
- Nilsen, Y. (mai 2021). *ECMWF*. <https://snl.no/ECMWF>.
- Norsk Klimaservicesenter (udatert). *Seklima - Observasjoner og værstatistikk*. URL: <https://seklima.met.no/>.
- Naa'im, M., Naa'im-Bouvet, F. og Martinez, H. (1998). Numerical simulation of drifting snow: erosion and deposition models. *Annals of Glaciology* 26. DOI: [10.3189/1998aog26-1-191-196](https://doi.org/10.3189/1998aog26-1-191-196).
- O'Rourke, M., DeGaetano, A. og Tokarczyk, J. D. (2005). Analytical Simulation of Snow Drift Loading. *Journal of Structural Engineering* 131 (4): 660–667. DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2005\)131:4\(660\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:4(660)).
- Oke, T., Mills, G., Christen, A. og Voogt, J. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press.
- Pomeroy, J. W., Gray, D. M. og Landine, P. G. (1993). The Prairie Blowing Snow Model: characteristics, validation, operation. *Journal of Hydrology* 144: 165–192.
- Pomeroy, J. og Gray, D. (1995). Snowcover accumulation, relocation and management. *Bulletin of the International Society of Soil Science* no 88 (2).
- Qiang, S., Zhou, X., Gu, M. og Kang, L. (2021). A novel snow transport model for analytically investigating effects of wind exposure on flat roof snow load due to saltation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 210: 104505. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104505>.

- Rokka, L. (mar. 2021). *Shiny Weather Data*. Tilgjengelig fra: <https://shinyweatherdata.com/>.
- Seter, K. (okt. 2020). *vind*. <https://snl.no/vind>.
- SLF (udatert). *Snow metamorphism*. URL: <https://www.slf.ch/en/snow/snow-as-a-material/snow-metamorphism.html#tabelement1-tab2>.
- Standard Norge (2008). *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner - Del 1-3: Almenne laster - Snølaster (NS-EN 1991-1-3:2003+NA:2008)*. Tekn. rapp. Oslo, Norge: Standard Norge.
- Standard Norge (2009). *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner - Del 1-4: Almenne laster - Vindlaster (NS-EN 1991-1-4:2005+NA:2009)*. Tekn. rapp. Oslo, Norge: Standard Norge.
- Strasser, U. og Marke, T. (2010). ESCIMO.spread - A spreadsheet-based point snow surface energy balance model to calculate hourly snow water equivalent and melt rates for historical and changing climate conditions. *Geoscientific Model Development* 3 (2): 643–652. DOI: [10.5194/gmd-3-643-2010](https://doi.org/10.5194/gmd-3-643-2010).
- Tabler, R. D. (1994). *Design Guidelines for the Control of Blowing and Drifting Snow*: 364.
- Tabler, R. D. (2003). Controlling blowing and drifting snow with snow fences and road design, NCHRP Project 20-7(147). *National Cooperative Highway Research Program Transportation Research Board of the National Academies* (August): 346.
- Thiis, T., Formichi, P., Landi, F. og Sykora, M. (feb. 2022). Physical-based model for exposure coefficient and its validation towards the second generation of Eurocode EN 1991-1-3 for roof snow loads. Upublisert manuskript.
- Thiis, T. og O'Rourke, M. (jul. 2015). Model for Snow Loading on Gable Roofs. *Journal of Structural Engineering* 141: 04015051. DOI: [10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001286](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001286).
- Thiis, T. K. og Ramberg, J. (2008). Measurements and numerical simulations of development of snow drifts of curved roofs. I: *Proceedings of the 6th international conference on snow engineering, Whistler, Canada, June*: 1–5.
- Thiis, T. K. (2005). *Bygg i snørike områder - en veileder i klimatilpasning*. Prosjektrapport 389. Forskningsveien 3B, 0314 OSLO: Byggforsk - Norges byggforskningsinstitutt.
- Thue, J. V. (2016). *Bygningsfysikk - Grunnlag*. Bergen: Fagbokforlaget: 464.
- Tominaga, Y., Mochida, A., Okaze, T., Sato, T., Nemoto, M., Motoyoshi, H., Nakai, S., Tsutsumi, T., Otsuki, M., Uamatsu, T. og Yoshino, H. (apr. 2011). Development of a system for predicting snow distribution in built-up environments: Combining a mesoscale meteorological model and a CFD model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 99 (4): 460–468. DOI: [10.1016/j.jweia.2010.12.004](https://doi.org/10.1016/j.jweia.2010.12.004).
- UiO (des. 2019). *Gumbelfordelingen*. <https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/matematikk/gumbelfordelingen.html>.
- Utaaker, K. (des. 1991). *Mikro- og lokalmeteorologi - Det atmosfæriske miljø på liten skala*. Bd. 7: 242.
- Yong, N. R. og Metaxas, I. (1985). Influence of age-hardening and strain-rate on confined compression and shear behaviour of snow. *J. Terramech* 22 (1): 37–49.
- Young, H. D., Freedman, R. A., Sandin, T. R. og Ford, A. L. (1996). *University physics: Extended version with modern physics*. Addison-Wesley.
- Zhou, X., Kang, L., Gu, M., Qiu, L. og Hu, J. (jun. 2016). Numerical simulation and wind tunnel test for redistribution of snow on a flat roof. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 153: 92–105. DOI: [10.1016/j.jweia.2016.03.008](https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.03.008).

Vedlegg A.

Vedlegg A viser beregninger av marklast, taklast og C_e for alle observasjonene i valideringen. Måledata angir observasjonene i valideringsgrunnlaget, mens SIM1 - SIM5 angir simuleringene med oppgavens modell. «Bnr.» angir bygningsnummeret som er beskrevet i Fig. 3.3.

Byflaten:

RINGSAKER				MÅLEDATA			SIM5			SIM4			SIM3			SIM2			SIM1		
Sted	Bnr.	År	Uke	SWE _{tak} [mm]	SWE _{mark} [mm]	C _e	SWE _{mark} [mm]	SWE _{tak} [mm]	C _e	SWE _{mark} [mm]	SWE _{tak} [mm]	C _e	SWE _{mark} [mm]	SWE _{tak} [mm]	C _e	SWE _{mark} [mm]	SWE _{tak} [mm]	C _e	SWE _{mark} [mm]	SWE _{tak} [mm]	C _e
Byflaten	438	1969	11	119	170	0.88	241.1	227.3	1.18	241.1	239.5	1.24	241.1	227.4	1.18	241.1	235.3	1.22	241.1	236.3	1.23
Byflaten	438	1970	12	71	127	0.70	169.2	156.5	1.16	169.5	170.2	1.25	169.5	162.7	1.20	169.5	166.9	1.23	169.5	170.6	1.26
Byflaten	438	1971	9	75.5	135	0.70	162.6	143.8	1.10	162.6	165.9	1.28	162.6	157.9	1.21	162.6	164.2	1.26	162.6	167.6	1.29
Byflaten	438	1980	9	143	206	0.86	204.7	186.2	1.14	204.7	198.0	1.21	204.7	194.2	1.19	204.7	201.3	1.23	204.7	202.3	1.24
Byflaten	438	1981	10	78.5	173	0.56	183.1	163.5	1.12	183.1	179.9	1.23	183.1	172.0	1.17	183.1	178.0	1.21	183.1	179.2	1.22
Byflaten	439	1969	11	111	170	0.81	241.1	227.3	1.18	241.1	239.5	1.24	241.1	227.4	1.18	241.1	235.3	1.22	241.1	236.3	1.23
Byflaten	439	1970	12	68	127	0.68	169.2	156.5	1.16	169.5	170.2	1.25	169.5	162.7	1.20	169.5	166.9	1.23	169.5	170.6	1.26
Byflaten	439	1971	9	71	135	0.66	162.6	143.8	1.10	162.6	165.9	1.28	162.6	157.9	1.21	162.6	164.2	1.26	162.6	167.6	1.29
Byflaten	439	1980	9	146.5	206	0.89	204.7	186.2	1.14	204.7	198.0	1.21	204.7	194.2	1.19	204.7	201.3	1.23	204.7	202.3	1.24
Byflaten	439	1981	10	83.5	173	0.60	183.1	163.5	1.12	183.1	179.9	1.23	183.1	172.0	1.17	183.1	178.0	1.21	183.1	179.2	1.22
Byflaten	440	1969	11	114	170	0.84	241.1	227.3	1.18	241.1	239.5	1.24	241.1	227.4	1.18	241.1	235.3	1.22	241.1	236.3	1.23
Byflaten	440	1970	12	75	127	0.74	169.2	156.5	1.16	169.5	170.2	1.25	169.5	162.7	1.20	169.5	166.9	1.23	169.5	170.6	1.26
Byflaten	440	1971	9	80	135	0.74	162.6	143.8	1.10	162.6	165.9	1.28	162.6	157.9	1.21	162.6	164.2	1.26	162.6	167.6	1.29
Byflaten	440	1981	10	94.5	173	0.69	183.1	163.5	1.12	183.1	179.9	1.23	183.1	172.0	1.17	183.1	178.0	1.21	183.1	179.2	1.22
Byflaten	441	1969	11	133	170	0.98	241.1	227.3	1.18	241.1	239.5	1.24	241.1	227.4	1.18	241.1	235.3	1.22	241.1	236.3	1.23
Byflaten	441	1970	12	84.5	127	0.84	169.2	156.5	1.16	169.5	170.2	1.25	169.5	162.7	1.20	169.5	166.9	1.23	169.5	170.6	1.26
Byflaten	441	1971	9	82.5	135	0.76	162.6	143.8	1.10	162.6	165.9	1.28	162.6	157.9	1.21	162.6	164.2	1.26	162.6	167.6	1.29

Ås:

Ås	Sted	Bnr.	År	Uke	MÅLEDATA			SIM5			SIM4			SIM3			SIM2			SIM1		
					SWE _{Tak} [mm]	SWE _{mark} [mm]	Ce	SWE _{mark} [mm]	SWE _{Tak} [mm]	Ce	SWE _{mark} [mm]	SWE _{Tak} [mm]	Ce	SWE _{mark} [mm]	SWE _{Tak} [mm]	Ce	SWE _{mark} [mm]	SWE _{Tak} [mm]	Ce	SWE _{mark} [mm]	SWE _{Tak} [mm]	Ce
Ås	38	1984	7		52.5	99	0.68	0.8	0.7	1.06	0.9	0.9	1.32	0.9	0.9	1.34	0.9	0.9	1.34	0.9	0.9	1.34
Ås	38	1970	8		88.5	97	1.14	107.3	66.5	0.77	107.3	103.3	1.20	107.3	92.9	1.08	107.3	100.3	1.17	107.3	103.4	1.20
Ås	38	1970	8		89	97	1.15	107.3	66.5	0.77	107.3	103.3	1.20	107.3	92.9	1.08	107.3	100.3	1.17	107.3	103.4	1.20
Ås	38	1978	8		56.5	72	0.98	102.4	89.4	1.09	102.7	99.8	1.21	102.7	101.1	1.23	102.4	102.1	1.25	102.4	102.1	1.25
Ås	38	1981	11		47	65	0.90	4.2	3.4	1.02	4.2	5.3	1.59	4.2	2.2	0.66	4.2	3.4	1.01	4.2	3.1	0.93
Ås	39	1984	7		47	99	0.59	0.8	0.7	1.06	0.9	0.9	1.32	0.9	0.9	1.34	0.9	0.9	1.34	0.9	0.9	1.34
Ås	39	1978	8		56.5	72	0.98	102.4	89.4	1.09	102.7	99.8	1.21	102.7	101.1	1.23	102.4	102.1	1.25	102.4	102.1	1.25
Ås	39	1981	11		47.5	65	0.91	4.2	3.4	1.02	4.2	5.3	1.59	4.2	2.2	0.66	4.2	3.4	1.01	4.2	3.1	0.93
Ås	65	1969	5		149	173	1.08	86.5	54.4	0.79	86.6	80.9	1.17	86.6	83.0	1.20	86.6	85.9	1.24	86.2	86.2	1.25
Ås	65	1968	8		102.5	145	0.89	153.7	121.4	0.99	153.7	138.7	1.13	153.7	130.3	1.06	153.7	140.5	1.14	153.7	142.3	1.16
Ås	65	1968	8		102.5	145	0.89	153.7	121.4	0.99	153.7	138.7	1.13	153.7	130.3	1.06	153.7	140.5	1.14	153.7	142.3	1.16
Ås	65	1972	11		87.5	124	0.89	112.0	52.5	0.59	112.0	76.7	0.86	112.1	97.9	1.09	112.1	107.1	1.19	112.1	108.4	1.21
Ås	65	1970	7		62	76	1.03	91.9	54.7	0.74	91.9	89.2	1.21	91.9	79.8	1.08	91.9	85.2	1.16	91.9	87.9	1.20
Ås	66	1969	5		158	173	1.14	86.5	54.4	0.79	86.6	80.9	1.17	86.6	83.0	1.20	86.6	85.9	1.24	86.2	86.2	1.25
Ås	66	1968	8		109.5	145	0.95	153.7	121.4	0.99	153.7	138.7	1.13	153.7	130.3	1.06	153.7	140.5	1.14	153.7	142.3	1.16
Ås	66	1972	11		92	124	0.93	112.0	52.5	0.59	112.0	76.7	0.86	112.1	97.9	1.09	112.1	107.1	1.19	112.1	108.4	1.21
Ås	66	1970	7		65	76	1.08	91.9	54.7	0.74	91.9	89.2	1.21	91.9	79.8	1.08	91.9	85.2	1.16	91.9	87.9	1.20
Ås	67	1968	8		113	186	0.76	153.7	121.4	0.99	153.7	138.7	1.13	153.7	130.3	1.06	153.7	140.5	1.14	153.7	142.3	1.16
Ås	67	1969	5		159	177	1.13	86.5	54.4	0.79	86.6	80.9	1.17	86.6	83.0	1.20	86.6	85.9	1.24	86.2	86.2	1.25
Ås	67	1982	8		126.5	153	1.04	101.7	59.8	0.74	101.7	88.1	1.08	101.7	74.4	0.91	101.7	87.1	1.07	101.7	91.3	1.12
Ås	67	1970	7		65	74	1.10	91.9	54.7	0.74	91.9	89.2	1.21	91.9	79.8	1.08	91.9	85.2	1.16	91.9	87.9	1.20
Ås	160	1968	8		129.5	186	0.88	153.7	121.4	0.99	153.7	138.7	1.13	153.7	130.3	1.06	153.7	140.5	1.14	153.7	142.3	1.16
Ås	160	1985	11		136.5	173	0.99	119.8	108.5	1.13	120.4	118.1	1.23	120.4	108.4	1.13	120.4	115.0	1.19	120.4	117.1	1.22
Ås	160	1969	4		135.5	164	1.04	84.8	52.8	0.78	84.8	79.1	1.17	84.8	81.1	1.20	84.8	84.1	1.24	84.8	84.3	1.24
Ås	160	1982	8		89	146	0.75	101.7	59.8	0.74	101.7	88.1	1.08	101.7	74.4	0.91	101.7	87.1	1.07	101.7	91.3	1.12
Ås	160	1977	7		64	126	0.64	124.3	105.0	1.06	124.3	118.6	1.19	124.3	107.0	1.08	124.3	115.0	1.16	124.3	116.8	1.17
Ås	160	1978	7		82.5	93	1.11	84.4	72.7	1.08	84.5	81.5	1.21	84.5	82.8	1.23	84.5	83.7	1.24	84.5	83.7	1.24
Ås	160	1970	11		67	89	0.94	143.3	94.7	0.83	143.4	136.7	1.19	143.3	124.0	1.08	143.4	133.0	1.16	143.4	136.5	1.19
Ås	160	1972	12		48.5	87	0.70	111.9	46.0	0.51	112.3	76.2	0.85	112.3	98.2	1.09	112.5	107.5	1.19	112.5	108.9	1.21
Ås	160	1981	11		45	59	0.95	4.2	3.4	1.02	4.2	5.3	1.59	4.2	2.2	0.66	4.2	3.4	1.01	4.2	3.1	0.93
Ås	245	1969	6		128.5	163	0.99	89.1	40.9	0.57	89.1	78.4	1.10	89.1	83.3	1.17	89.1	89.5	1.26	89.1	89.9	1.26
Ås	245	1970	7		61	71	1.08	91.9	54.7	0.74	91.9	89.2	1.21	91.9	79.8	1.08	91.9	85.2	1.16	91.9	87.9	1.20
Ås	252	1969	5		121	162	0.94	86.5	54.4	0.79	86.6	80.9	1.17	86.6	83.0	1.20	86.6	85.9	1.24	86.2	86.2	1.25
Ås	252	1968	9		146	146	0.98	154.6	121.7	0.98	154.7	139.6	1.13	154.7	131.3	1.06	154.7	141.5	1.14	154.7	143.3	1.16
Ås	252	1970	6		55	66	1.04	89.3	52.1	0.73	89.3	86.5	1.21	89.2	77.4	1.09	89.3	82.5	1.16	89.3	85.2	1.19
Ås	253	1970	6		53	66	1.00	89.3	52.1	0.73	89.3	86.5	1.21	89.2	77.4	1.09	89.3	82.5	1.16	89.3	85.2	1.19
Ås	254	1968	9		147	187	0.99	154.6	121.7	0.98	154.7	139.6	1.13	154.7	131.3	1.06	154.7	141.5	1.14	154.7	143.3	1.16
Ås	254	1969	5		136	162	1.05	86.5	54.4	0.79	86.6	80.9	1.17	86.6	83.0	1.20	86.6	85.9	1.24	86.2	86.2	1.25
Ås	254	1970	6		40.5	66	0.76	89.3	52.1	0.73	89.3	86.5	1.21	89.2	77.4	1.09	89.3	82.5	1.16	89.3	85.2	1.19
Ås	255	1969	5		128	162	0.99	86.5	54.4	0.79	86.6	80.9	1.17	86.6	83.0	1.20	86.6	85.9	1.24	86.2	86.2	1.25
Ås	255	1968	5		130	145	1.13	110.4	90.1	1.02	110.4	100.8	1.14	110.4	93.9	1.06	111.3	100.5	1.13	111.3	102.1	1.15
Ås	255	1970	5		47.5	64	0.93	75.0	40.1	0.67	75.1	73.0	1.22	75.0	65.9	1.10	75.1	69.5	1.16	75.4	71.5	1.19
Ås	256	1968	9		133	187	0.89	154.6	121.7	0.98	154.7	139.6	1.13	154.7	131.3	1.06	154.7	141.5	1.14	154.7	143.3	1.16
Ås	256	1969	5		141	162	1.09	86.5	54.4	0.79	86.6	80.9	1.17	86.6	83.0	1.20	86.6	85.9	1.24	86.2	86.2	1.25
Ås	256	1970	5		50.5	64	0.99	75.0	40.1	0.67	75.1	73.0	1.22	75.0	65.9	1.10	75.1	69.5	1.16	75.4	71.5	1.19
Ås	258	1969	5		122	162	0.94	86.5	54.4	0.79	86.6	80.9	1.17	86.6	83.0	1.20	86.6	85.9	1.24	86.2	86.2	1.25
Ås	258	1968	9		106	145	0.91	154.6	121.7	0.98	154.7	139.6	1.13	154.7	131.3	1.06	154.7	141.5	1.14	154.7	143.3	1.16
Ås	258	1970	6		47	63	0.94	89.3	52.1	0.73	89.3	86.5	1.21	89.2	77.4	1.09	89.3	82.5	1.16	89.3	85.2	1.19
Ås	259	1968	9		149	187	1.00	154.6	121.7	0.98	154.7	139.6	1.13	154.7	131.3	1.06	154.7	141.5	1.14	154.7	143.3	1.16
Ås	259	1969	5		141	162	1.09	86.5	54.4	0.79	86.6	80.9	1.17	86.6	83.0	1.20	86.6	85.9	1.24	86.2	86.2	1.25
Ås	259	1970	6		55	68	1.01	89.3	52.1	0.73	89.3	86.5	1.21	89.2	77.4	1.09	89.3	82.5	1.16	89.3	85.2	1.19

Vedlegg B.

Vedlegg B viser beregning av marklast, taklast og eksponeringskoeffisient for SIM3 for alle datasett. I tillegg er marklast og eksponeringskoeffisient vist for den alternative modellen. Alle årene angitt er år med last større enn 5-års returlast.

Langtidssimulering			SIM3			Alternativ modell	
Sted	Datasett	År	SWE _{mark} [mm]	SWE _{tak} [mm]	C _e	S _g kg/m ²	C _e
Ås	1	2006	153.8	178.5	1.08	179.1	0.99
Ås	1	2009	123.8	125.1	1.24	125.6	1.10
Ås	1	2003	117.3	116.5	1.26	122.6	0.88
Ås	1	2011	90.0	105.0	1.07	114.2	0.69
Ås	1	2002	114.0	112.0	1.27	112.0	1.24
Ås	1	2019	96.3	106.0	1.14	106.6	1.10
Ås	1	2018	75.7	90.4	1.05	93.5	0.84
Ås	1	2010	77.1	89.9	1.07	90.8	1.06
Ås	2	2006	148.7	172.3	1.08	173.3	1.21
Ås	2	2019	120.8	131.2	1.15	131.2	1.14
Ås	2	2009	109.1	110.4	1.23	110.5	1.18
Ås	2	2011	93.9	104.0	1.13	104.0	1.06
Ås	2	2018	83.5	99.5	1.05	99.9	0.97
Ås	2	2010	77.4	89.9	1.08	90.7	1.19
Ås	2	2003	80.0	87.9	1.14	88.2	1.19
Ås	2	2002	78.3	84.2	1.16	84.2	1.24
Byflaten	3	2018	254.2	268.3	1.18	235.7	1.22
Byflaten	3	2006	236.2	250.8	1.18	204.0	1.24
Byflaten	3	2009	233.2	243.7	1.20	239.7	1.22
Byflaten	3	1994	216.7	234.8	1.15	236.0	1.22
Byflaten	3	2008	211.7	223.5	1.18	223.5	1.19
Byflaten	3	1993	171.6	203.8	1.05	206.5	1.05
Byflaten	3	1995	138.9	199.4	0.87	201.2	1.08
Byflaten	3	2019	185.8	191.6	1.21	203.9	1.19
Byflaten	3	2003	198.9	203.5	1.22	195.9	1.23
Tromsø	4	2000	363.3	428.9	1.06	432.6	1.03
Tromsø	4	1996	322.8	443.8	0.91	307.2	0.78
Tromsø	4	1997	264.7	380.0	0.87	327.1	0.51
Tromsø	4	2020	292.6	389.6	0.94	328.8	0.81
Tromsø	5	1997	490.8	610.0	1.01	498.7	0.93
Tromsø	5	2020	469.8	526.2	1.12	444.6	1.12
Tromsø	5	2000	419.6	490.1	1.07	426.9	1.11
Tromsø	5	1996	373.1	457.9	1.02	320.9	0.96
Tromsø	5	1993	279.0	436.6	0.80	391.4	0.64
Tromsø	5	2005	333.4	380.2	1.10	381.3	1.14



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway