

UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITENSKAP



Forord

Denne masteroppgaven markerer fullføringen av studiet Byggeteknikk og Arkitektur ved Institutt for matematiske realfag og teknologi, ved Universitet for miljø- og biovitenskap, UMB. Oppgaven er skrevet høsten 2011.

Det er utført feltstudier og numeriske simuleringer i forbindelse med oppgaven.

Hovedveileder for oppgaven har vært Professor Thomas K. Thiis og sideveileder har vært stipendiat Jan Potac, begge ved UMB.

En stor takk til T. K. Thiis for inspirerende og oppmuntrende veiledning på høyt faglig nivå.

Jan Potac har vært til uvurderlig hjelp, spesielt ved tekniske utfordringer vedrørende simuleringer.

Videre ønsker jeg å takke EDR for at jeg fikk komme på kurs i Ansys CFX og Mathilde Heldal for tålmodig korrekturlesning.

Fotografier og modeller som ikke er merket med annet er tatt eller laget av meg.

Aleksander Andersen

Universitetet for miljø- og biovitenskap

Ås 2011

Sammendrag

Denne masteroppgaven omhandler snølaste på flate tak og saltak.

Formfaktor for flate tak og saltak er studert ved hjelp av numeriske simuleringer.

Simuleringsresultatene er videre brukt til å beregne symmetrifaktor for saltak.

Dannelse av snøfonner på flate tak med nivåforskjell er studert både med forsøk og simuleringer.

De fremkomne formfaktorer og symmetrifaktorer er i sin tur sammenlignet med formfaktorer og symmetrifaktorer basert på måledata fra fullskalabygg.

Resultatene er sammenlignet med normene for snølastberegninger i NS-EN 1991-1-3:2003+NA:2008 (Eurokode 1: Del 1-3 med nasjonalt tillegg) som per tiden er gjeldende snølaststandard i Norge og med den internasjonale snølaststandard ISO 4355:1998.

Formfaktorer og symmetrifaktorer fra amerikanske ASCE 7-05 og kanadiske NBC 2005 er også omtalt i teoridelen, men er mindre viktige i de videre vurderingene.

For flernivåtak, eller flate tak med nivåforskjell, er det hvordan takutstikk på det øvre taket påvirker drivsnølaste på det lavereliggende taket som er studert. For denne problemstillingen er det først og fremst måledata fra feltforsøk med skalamodeller på Finse som foreligger.

Simuleringen av skalamodellen og simulering av fullskalatilfelle måtte til slutt avsluttes uten tilfredsstillende resultater på grunn av tidsmangel etter en tids problemer.

NS-EN 1991-1-3:2003+NA:2008 og ISO 4355:1998 viser seg å ha svakheter når det gjelder å fremstille skjevlastene som drivsnø kan forårsake på bygninger med eksponert plassering.

Endringer i fonnens plassering på flernivåtak grunnet takutstikk som ikke tas hensyn til kan gi uheldige effekter selv om ikke størrelsen synes å bli påvirket i betydelig grad.

Summary

This master thesis deals with snow loads on flat roofs and on gable roofs.

Shape factors of flat roofs and gabled roofs are studied using numerical simulations.

Furthermore, the symmetry factor of gabled roofs is calculated from simulation results.

Flat roofs with level difference are studied using models and simulations.

The resulting form factors and symmetry factors are in turn compared with form factors and symmetry factors based on measured data from full-scale buildings.

The results are compared with norms for snow load calculations in NS-EN 1991-1-3:2003 + NA:2008 (Eurocode 1: Part 1-3 of with national annex) as per the time is applicable snow load standard in Norway, and the international snow load standard ISO 4355:1998.

Form factors and symmetry factors from U.S. ASCE 7-05 and Canadian NBC 2005 is also discussed in the theory part, but play a minor role in the further assessments.

For the two leveled roofs, or flat roofs with a level difference, it is how the eaves of the upper roof affects drift snow loads on the lower roof that is studied. For this problem it is first and foremost measured data from field experiments with scale models that is presented. The simulation of the scale model and simulation of a full-scale case was eventually to be given up because of time shortage after a period of problems.

NS-EN 1991-1-3:2003 + NA:2008 and ISO 4355:1998 are shown to have weaknesses when it comes to presenting the uneven loads drifted snow can cause to buildings on exposed locations.

Changes in the drifts location on two leveled flat roofs due eaves that are not taken into account can result in adverse effects even if the size of the drift does not seem to be affected significantly.

Innhold

Forord	2
Sammendrag	3
Summary	4
Innhold	5
1 Innledning.....	7
1.1 Problemstilling	7
1.2 Bakgrunn	8
2 Teori	11
2.1 Generelt	11
2.2 Snøfysikk.....	12
2.2.1 Snøtransport	14
2.2.2 Snøfonnutvikling	17
2.2.3 Densitet.....	20
2.2.4 Snøfluks.....	21
2.3 CFD-analyser	22
2.3.1 Teori	22
2.3.2 Numerisk modell	24
2.4 Laster	26
2.4.1 Saltak i NS-EN-1991-1-3:2003+NA:2008.....	26
2.4.2 Saltak i ISO 4355:1998	27
2.4.3 Flernivåtak i NS-EN-1991-1-3:2003+NA:2008.....	27
2.5 Formfaktor.....	28
2.6 Symmetrifaktor.....	30
3 Metode/oppsett	32

3.1 Numeriske simuleringer	32
3.2 Saltak	32
3.3 Flernivåtak	34
3.4 Formfaktor	37
3.5 Klimadata	37
3.6 Fangsteffektivitet	38
4 Resultater	39
4.1 Feltstudier	39
4.1.1 Saltak	39
4.1.2 Flernivåtak	42
4.2 Simuleringer	47
4.2.1 Saltak	47
4.2.2 Fangsteffektivitet	55
4.2.3 Flernivåtak	55
5 Diskusjon	59
5.1 Generelt	59
5.2 Saltak	60
5.2.1 Formfaktor	60
5.2.2 Skjevlaster	62
5.2.3 Fangsteffektivitet	64
5.3 Flernivåtak	66
5.4 Feilkilder	67
6 Konklusjon	68
7 Litteraturliste	70
Vedlegg	72

1 Innledning

Vind under snøfall og snø redistribuert av vind forårsaker store problemer. Trafikkulykker, stengte veier, jernbane og flyplasser opplever vi også i Norge, selv om vi er gode på vinterdrift av ulike typer infrastruktur. Stengte skoler er mer vanlig i områder der store snøfall ikke er dagligdagse. Noe av det som har størst økonomisk og sosial innvirkning er hvis bygninger bryter sammen og påfører skader på mennesker.

Denne oppgaven vil blant annet undersøke om simuleringer er et godt verktøy for å verifisere eller forbedre bygningsstandardene. Vi ser på enkelte punkter og faktorer i bygningsstandardene som omhandler snølaste for å se om disse samsvarer med resultater fra simuleringer og feltstudier.

1.1 Problemstilling

I arbeidet benyttes en kombinasjon av numeriske simuleringer og fysiske målinger.

Målsetning:

- Undersøke opptredende formfaktorer på saltak og flate tak, og sammenligne resultater med gjeldene standarder.
- Undersøke opptredende symmetrifaktor på saltak, og sammenligne resultater med gjeldende standarder.
- Studere snøfonnsutvikling på flate tak med nivåforskjell der øvre tak har takutstikk.

Numeriske simuleringer i et CFD-program (computational fluid dynamics) kan være et godt verktøy om resultatene fra disse kan vise tilstrekkelig likhet med måldata fra feltstudier.

Formfaktor og symmetrifaktor for saltak skal undersøkes med simuleringer.

Fonnsdannelse på flernivåtak med takoverheng vil bli undersøkt både ved CFD-simuleringer og ved verifisering av disse med skalaforsøk i felt.

1.2 Bakgrunn

Klimaet i Norge endrer seg. For landet som helhet er det en økende trend for nedbør vinterstid (met.no 2011). Noen steder kan vise til økning i snødybde, mens andre steder har en svak nedgang hvis man studerer trenden for de siste 70 år.

Dette skjer samtidig med økning i vintertemperatur på omtrent 1 °C i gjennomsnitt for landet som helhet (Dyrrdal 2010). Dermed kommer mer av nedbøren som regn, og flere mildværsperioder gjennom vintersesongen fører til smelting mellom snøfallene. Slik smelting eller perioder med regn uten at det blir helt bart vil gi snøen økt densitet.

Det har også de siste årene vært flere snøfall som betegnes som ekstreme. Friskt i minnet er fortsatt kaoset på Sørlandet etter store snøfall i 2007 og 2010.

I Tromsø, hvor trenden for maks snødybde er stigende, ble de største snødybdene i hele 70-årsperioden 1939 til 2009 registrert i 1997 og 2000. I Oslo er snødybden svakt avtagende for den samme perioden, likevel var 2009 det året med 7. mest snø mellom 1939 og 2009 (Thiis 2010).

Vindforholdene under snøfallet og i de første påfølgende dagene er avgjørende for snøens distribusjon på taket.

Endringene i værforhold skaper nye utfordringer for moderne konstruksjoner og tak med store arealer. Store snømengder over en kort tidsperiode kombinert med vind vil føre til rask danning av store fonner. De store konsentrerte lastene dette skaper må tas hensyn til. For sal- og buetak vil det kunne oppstå store skjevlaster som kan være kritiske. Lette konstruksjoner og lette tekkematerialer vil forverre problemet.

Saltak med en viss takvinkel på utsatte, vindeksponerte steder med entydig fremherskende vindretning vinterstid har kunnet vise tendenser til større skjevlaster enn det standardene beskriver.

Det kan derfor stilles spørsmål ved om dagens standardverk er tilstrekkelig for å møte disse utfordringene.

Åstak som var vanligst i tidligere tider, særlig på laftede bygninger, er ikke følsomme for skjevlaster på samme måte som takstoler og sperretak.

Simuleringer i CFD-programmer har de siste årene blitt benyttet til å studere disse problemstillingene som et supplement til feltstudier, vindtunelltester og målinger på eksisterende bygg.

Det er imidlertid ikke noen standardisert metode for slike simuleringer. Ved å forandre ulike variabler kan man få svar på om disse har stor betydning for resultatet.

Dagens snølaststandarder er basert på måledata og empiri.

Det har vært flere tilfeller av sammenbrudd i konstruksjoner forårsaket av snølast i Norge de siste par tiårene, også med tap av liv. Saltak og buetak er sensitive for skjevlaster.

Returperioden for dimensjonerende marklast er økt fra 5 til 50 år i løpet av de siste tiårene.

Returperiode på 50 år slik det er nå i Eurokoden (NS-EN 1991-1-3:2003+NA:2008), heretter kalt NS-EN, som også er eneste gjeldende standard i Norge fra 01.01.2010 er i tråd med det ISO 4355:1998 anbefaler.

Før 1970 var det kun en generell bestemmelse om $1,5 \text{ kN/m}^2$. Denne kunne økes hvis lokale myndigheter fant dette nødvendig (Meloy Sund et al. 2006).

Standarden angir en terrengfaktor som gir lavere snølast når bygningen er mer vindeksponert. Begrunnelsen for dette er at mye av snøen vil blåse ned fra taket. Det er i midlertid slik de aller fleste steder i Norge at det er en vindretning som er dominerende gjennom store deler av vintersesongen. Det fører til at bygninger med takryggen ugunstig (ortogonalt) plassert i forhold til denne vindretningen vil få en le- og en loside på taket. Losiden kan blåse mer eller mindre ren, mens store fonner kan bygge seg opp på lesiden. Man må derfor stille spørsmål ved om eksponeringsfaktoren heller skulle vært brukt til å øke dimensjonerende skjevlast fra snø i vindusatt terreng.

Det bør også undersøkes om man kan legge mer fokus på å orientere bygninger på langs av områdets fremherskende vindretning, slik at faren for store skjevlaster reduseres.

Totalt sett betyr muligens dette at standardene dimensjonerer for 50-års snølast, men at vi i praksis kanskje ikke dimensjonerer for 50-års drivsnølast.

Noe av den eksisterende bygningsmassen vil uansett ha behov for snøfjerning på taket gjennomsnittlig hvert 5. år eller oftere. Hvis bygningen har sal- eller buetak og ligger utsatt for fremherskende vindretning i vintermånedene, kan dette bety at snøfjerning er nødvendig

så godt som årlig. Dette er det viktig å være klar over og å ha gode rutiner på, slik at det ikke blir glemt nå som kravene til nye bygg er endret.

Siden det tidligere er gjort simuleringer på en snøfonns plassering på saltak med 2D-modeller vil det være av stor interesse å se på tilsvarende modeller i 3D for å se om resultatene blir noenlunde de samme (Potac & Thiis 2010).

Oppgavens andre formål er å se på flernivåtak og effekten takoverheng har på dannelsen av snøfonner.

I dagens ISO 4355 og NS-EN er ikke takoverheng nevnt som faktor med innvirkning på laststørrelse eller plassering. Det er imidlertid grunn til å tro at et takoverheng av en viss størrelse over et lavereliggende tak vil ha effekt på både størrelse og plassering av snøfonn.

Det finnes en stor database ved UMB med måledata fra saltak på landbruksbygg. Disse ble samlet inn av Halvor Høibø gjennom en 20-årsperiode fra 1966 til 1986.

Dette datagrunnlaget vil være sammenligningsgrunnlag for CFD-simuleringene.

Fra simuleringsresultatene skal det også beregnes en formfaktor som deretter skal sammenlignes med måleresultater fra fullskala bygninger.

Dette vil være med på å verifisere CFD-resultatene og evt. danne grunnlag for ytterligere forskning med tanke på å videreutvikle standardens formfaktor.

En fremsatt påstand er at om tak har brattere vinkel enn 45° vil det ikke deponeres snø der.

2 Teori

2.1 Generelt

I Tyskland var det store skader vinteren 2005/2006. Her er det ikke spesielt vanlig å fjerne snø fra takene.

2. januar 2006 kollapset en ishall med fatale konsekvenser. Det var mange bygninger som brøt sammen helt frem til slutten av februar, både i Tyskland og i nabolandet Polen. På tross av hendelsene ble tiltak i liten grad satt i verk på andre bygninger.

Situasjonen i Tyskland var spesiell; siden slutten av november hadde snø og regn kommet vekselvis og temperaturen hadde svinget frem og tilbake rundt nullpunktet. Dette førte til at snøen sank sammen og ble svært kompakt. Den store egenvekten førte til sammenbrudd selv om dybden var meget moderat. Det var kun flate tak som ble rammet og dette kan ha noe med forhindret avrenning, samt relokasjon av lastene ved tining og frysing å gjøre (Strasser 2008). Dette kan tyde på at en varslingsordning kan være nødvendig etter hvert som snøfjerning fra tak blir mer kuriøst.

Nedbøyning i felt mellom takbjelkenes opplagspunkt kan forsterke seg med økende last, noe som igjen kan føre til økt relokasjon ved tining, og en samling av lasten som gir stor økning av momentkrefter.

En ugunstig plassering av nedløp eller tilfrysing av disse er trolig av stor betydning for å få så alvorlige konsekvenser som i tilfellene over, med så liten snødybde.

På saltak, buetak og pulttak vil dette problemet ikke forekomme siden vannet her vil renne bort. Her er relokasjon grunnet vind det eneste problemet av betydning. Tilfrysing og opphopning av smeltevann som is ved raften vil sjelden eller aldri kunne nå et nivå som er en fare for konstruksjonenes stabilitet. Dette vil også være synlig.

CFD-simuleringene vil være en ganske grov tilnærming til virkeligheten. I naturen vil vindretning, temperatur og andre parametre endre seg kontinuerlig.

I simuleringene vil snøkornene være ensartede både med hensyn på vekt og størrelse.

Vindhastigheten og vindens angrepsvinkel på bygningen er fast.

Takras vil ikke forekomme. Som det meste annet i naturen er kompleksiteten ved snø og snøtransport for stor til at det kan gjenskapes på detaljnivå.

2.2 Snøfysikk

Snø avsettes på flere måter. Fallende snø ved vindstille gir uniform distribuering. Ved snøfall kombinert med vind får vi ofte konsentrert avsetning i fonner, noe avhengig av vindstyrke.

Takflaten det kan redistribueres snø fra på småhus er begrenset.

For store bygninger med store takflater er derimot redistribuering forårsaket av vind i etterkant av snøfall av større betydning.

For å oppnå transport av snø opp fra bakken trengs tilstrekkelig vindhastighet og turbulens til å løfte snøen.

Bygninger med liten vegghøyde og bygninger i strøk med mye snø og hvor langvarig sterk vind forekommer er utsatt. Hvis en stor fonn kan bygges opp mot loveggen kan denne virke som en rampe og sørge for stor transport av snø opp fra bakken.

Dette vil si at spesielt i høyfjellsstrøk og i arktiske områder kan fonnene bli så store at de strekker seg kontinuerlig fra takflaten og ned til terreng.



Figur 1: I dette bildet fra Finse 1222 meter over havet ses lefonn som strekker seg fra taket og ned på bakken.



Figur 2: Her vises lofonn som strekker seg fra bakken og opp på taket.

Snø kan opptre i mange former. Temperaturen i atmosfæren bestemmer størrelsen på snøpartiklene som faller ned.

Snø dannes når vanndamp blir underkjølt. Den kommer inn i kald luft som holder under 0°C og kjøles ned til under frysepunktet uten at ispartikler dannes. Når temperaturen synker mot -5°C , begynner snøkrystallene å vokse fra små ispartikler med diameter vanligvis mindre enn $75\ \mu\text{m}$.

Aerosoler, mikroskopiske partikler i atmosfæren, letter denne partikkeldannelsen da vannet lettere kondenserer på disse.

Et snøfnugg er sammensatt av flere snøkrystaller. Høye temperaturer gir både større snøkrystaller og større snøfnugg siden snøkrystallene lettere fester seg til hverandre. Lave temperaturer gir små snøfnugg. Snøkrystaller som faller gjennom fuktig luft etter dannelsen kan bli utsatt for riming som fører til at snøkrystallene blir større og mer kompakte (Schemenauer et al. 1981).

Snøpartikler som er ferske er større enn de i redistribuert snø. Det er også i fersk snø vi finner størst variasjon. Størrelsen avhenger av temperaturen i atmosfæren der snøkrystallene oppstod, samt fuktighetsprosenten i skyen.

Hvis det blåser mens det snør, eller like etter snøfallet, vil de ferske og skjøre snøkrystallene bli knust og vi får store mengder små partikler. Får snøen derimot hvile noen dager vil vi få en restrukturering av snøkrystallene. Sammenpressing fra overliggende snøfnugg eller kondensering og refrysing vil gi en mer solid struktur. De blir mer kompakte og tåler mer. Dermed vil de ikke knuses ved vindtransport på samme måte som ferskere snø (Tabler 1988). Mildvær eller varme fra bygningen vil bidra til ytterligere økning i terskelfriksjonshastigheten.

For vindbåret snø vil partikkelstørrelsen synke med høyden over bakken.

Målt middelvei for partikkelstørrelse i vindtransportert snø er ved 5 cm høyde $181\ \mu\text{m}$, ved 50 cm $115\ \mu\text{m}$ og ved 1 m $87\ \mu\text{m}$ (Schmidt 1982). Etter dette reduseres partikkelstørrelsen mindre, slik at den fortsatt i de fleste tilfeller vil være over $50\ \mu\text{m}$ ved 10 m høyde (Nishimura & Nemoto 2005). Vindhastigheten vil også ha innvirkning på partikkelstørrelse ved de ulike

høydene.

Økende vindhastighet vil også gi generelt mindre partikler da økt hastighet og økt fallhøyde gir mer knusning.

En ikke-sfærisk form er dominerende hos vindtransportert snø. Typisk forhold mellom største lengde og største bredde vinkelrett på lengdeaksen er 1,41 (Gordon & Taylor 2007).

I arktiske områder kan det forekomme vindbåret snø i luften så ofte som 25 % av tiden i løpet av et år, det vil si omtrent halve vinterperioden for disse strøkene. Dette er ekstremverdier, og 5 % er mer realistiske tall i bebodde områder. Likevel er det mange hundre timer, slik at det kan bli betydelig transportert snømengde gjennom vinteren (Gordon & Taylor 2007).

2.2.1 Snøtransport

Snøtransport forårsaket av vind deles i tre ulike kategorier etter snøpartiklens oppførsel, kalt kryp, saltasjon og suspensjon. Når det gjelder grad av snøtransport med vind kan dette måles i masse eller volum over tid.

Målinger viser at ved 12 m/s vil 90 % av snøen transporteres i de første 1,2 m over bakken mens tilsvarende tall ved 22 m/s var 68 % (Tabler 1988). Dette vil selvfølgelig variere etter snøens beskaffenhet, men tallene over tegner et beskrivende bilde.

(Meløysund 2010) skriver at vindens påvirkning blir tydelig med vindhastigheter over 4 m/s ved snøfall og at snødrev kan forekomme fra 6,5 m/s uten persipitasjon.

Det er klart at snø allerede pakket av vind eller våt snø vil ha større terskelhastighet.

Kryp:

Ved kryp ruller partiklene langs bakken uten å miste kontakten med snølaget under. Typisk partikkeldiameter for snø transportert ved kryp er 1 mm (Schneiderbauer et al. 2008). Det skal lite til for å stoppe disse partiklene, og det kan dannes en form som små bølger på snøoverflaten. Bølgene skapes hvis det finnes et reservoar av noen dager gammel snø som kan redistribueres. Bølgene vil flytte seg sakte i vindens retning (Tabler 1988). Ut fra resultatene til (Tabler 1988) kan vi anta at inntil en fjerdedel av redistribuering innad på og ned fra tak kan skje ved kryp i lavlands- og andre skjermede områder.

Saltasjon:

Saltasjon vil si at partiklene hopper og spretter bortover. De fleste partiklene når ikke opp i høyder over 50 mm over underlaget, men høyder opptil en meter kan forekomme (Ramberg 2007)

Dette er likevel en definisjonssak siden (Mellor 1965) setter grensen mellom saltasjon og suspensjon (under) ved 1 m eller øyehøyde.

Partikkeldiameteren ligger vanligvis mellom 0,005 og 0,5 mm. Tilbakelagt lengde mellom hver kontakt med overflaten varierer også stort, men et typisk "hopp" har en høyde på omtrent 15 mm og lengde på 200 mm (Tabler 1988; Thiis 2000).

Salterende snøpartikler vil feste seg til hverandre og slås løs igjen, etter hvert som partiklene støter borti hverandre. Partiklene kan også knuses til mindre partikler og knyttes sammen igjen.

Banen vil ofte ha parabolisk form, og nedslaget til en partikkel kan enten føre til at partikkelen spretter tilbake opp i luften, eller til at en eller flere nye partikler blir slått løs fra overflaten (Mellor 1965). Det er mange partikler i bevegelse som stadig slår i bakken. Over tid vil dette gjøre snøoverflaten mer kompakt slik at terskelhastigheten øker. Det er verdt å merke seg at også de salterende partiklene endrer egenskaper over tid, i det de blir mindre og mer kompakte.

Videre kan saltasjon deles i to underkategorier, ren saltasjon hvis luftstrømmene er lineære, og modifisert saltasjon hvis det er turbulente luftstrømmer.

Saltasjon er den kategorien av snøtransport som gir det største volumbidraget til transportert snø (Schneiderbauer et al. 2008; Tabler 1988).

Suspensjon:

Hvis snøpartiklene løftes opp fra bakken over en lengre strekning av sterk og/eller turbulent vind kalles dette suspensjon. Partiklene er ofte mindre enn i saltasjonslaget, men kan også her støte sammen slik at det dannes en større partikkel. Dette fører som oftest til at den faller mot bakken grunnet økt tyngde.

Når forholdene ligger til rette for det kan snøpartikler nå flere hundre meter opp i luften (Schneiderbauer et al. 2008).

Suspensjon vil dermed kunne medføre transport av snø fra bakken og opp til en takflate.

Under snøstorm på fjellet og i arktiske strøk vil en betydelig del av snøtransporten kunne skje som suspensjon.

2.2.1.1 Terskelfriksjonshastighet

Terskelfriksjonshastigheten er den vindhastigheten som trengs for at saltasjon ikke skal stoppe opp. Siden salterende partikler slår løs nye partikler når de treffer snøoverflaten vil det kreve en lavere vindhastighet å holde saltasjon i gang, enn det trengs for å få i gang saltasjon.

Results of the field experiments: snow properties, roughness length and threshold friction velocity.

Date	Temperature (°C)	Density (kg m ⁻³)	Grain Size (μm)	Dendricity	Type of snow	z_0 (mm)	u_{*t} (m s ⁻¹)
13 April 2000	-3	120	550 ± 285	2.6 ± 1.0	/	9.0	0.29 ± 0.04
16 April 2000	-2	-	676 ± 287	2.5 ± 0.8	•	9.0	0.29 ± 0.04
21 February 2001	-6	177	540 ± 243	2.1 ± 0.8	/	11.3	0.69 ± 0.12
27 February 2001	-12	185	314 ± 118	2.3 ± 1.6	/	8.8	0.50 ± 0.13
2 March 2001	-9	167	267 ± 174	2.0 ± 0.9	•	1.3	0.21 ± 0.05
4 March 2001	-1	354	313 ± 144	2.7 ± 1.6	/	11.2	0.42 ± 0.14
12 March 2001	2	167	440 ± 178	2.6 ± 1.4	/	4.9	0.51 ± 0.07
22 March 2001	-2	166	342 ± 183	2.6 ± 1.2	/	15.6	0.35 ± 0.18

Figur 3: Fra (DOORSCHOT et al. 2004). Tabellen viser forhold mellom temperatur, densitet, kornstørrelse og terskelfriksjonshastighet (u_{*t}). Resultatene er basert på data fra feltstudier utført nær Davos i de sveitsiske alper.

Det kan være vanskelig å se tydelige sammenhenger her, men generelt kan det sies at økt densitet, økt partikkelstørrelse og økt alder på snøen vil gi høyere terskelfriksjonshastighet. I tillegg vil vindeksponering over tid gi økt terskelfriksjonshastighet.

2.2.2 Snøfonnutvikling

Snøfonner utvikler seg veldig forskjellig ved ulike forhold. Likevel må tre elementære ting være til stede for at fonner skal dannes: Snø, tilstrekkelig vindhastighet for snøtransport og noe som forstyrrer vindens strømningsmønster. Under beskrives utviklingen av snøfonner ved snøgjerder.

Utviklingen av snøfonner kan deles inn i fire hovedstadier. Et snøgjerde bremser vinden, vinden vil miste fart allerede før gjerdet. Dette gjør at snøpartiklene faller til bakken, dermed blir det avsatt på losiden av snøgjerdet. For et gjerde plassert på falt mark med 50 % porøsitet (50 % åpninger) vil fonnen på losiden ha omentrent 15 % av volumet til fonnen på lesiden. De to fonnene vil vokse proporsjonalt med hverandre.

I det første stadiet skapes det en linseformet fonn når krypende og salterende partikler stopper på grunn av redusert vindhastighet. Vindhastigheten reduseres i et område med en utstrekning rundt 15 ganger høyden til gjerdet, H . Noe snø avsettes, mens noe blir ført videre med vinden. Den linseformede fonnen forsetter å vokse så lenge vinden følger formen på fonnen fullt ut. Når dette ikke lenger er tilfelle skapes det turbulens eller en virvelstrøm/ resirkulasjonssone på lesiden av fonnen, som da får en mer rett avskåret form. Det dannes gjerne et overheng i toppen.

Fonnen er nå inne i andre fase. Nå begynner snøfonnen selv også å skape betydelig vindbremsende effekt. Noe av snøen som passerer toppen av fonnen vil bli fanget i resirkulasjonssonen og avsatt i fonnens bakkant.

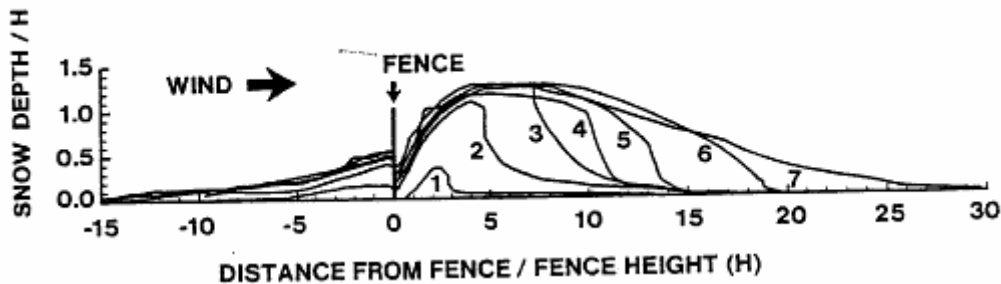
Gjennom denne fasen vokser fonnen mest i høyden og begrenset i lengderetningen. Vanligvis er dette det stadiet hvor størst andel av den passerende snøen vil bli fanget opp og avsatt.

Når lefonnen når sin maksimale høyde går vi inn i 3. trinn i utviklingsfasen. For gjerde med 50 % porøsitet er maksimal høyde 1 til 1,2 ganger gjerdets høyde.

Etter hvert som resirkulasjonssonen fylles opp vil fonnen gå mot å vokse mest i lengde samtidig med at mer snø igjen vil passere hindringene, og bli båret videre bort med vinden. Dette skjer på grunn av at virvelstrømmene avtar i styrke i det fonnen får en mer strømlinjet form.

Stadium fire begynner når resirkulasjonssonen forsvinner helt og lengdeveksten også avtar. For disse snøgjerdene som er omtalt her vil det være når fonnen har en lengde omkring $20H$.

Lengdeveksten vil fortsette til en lengde på 30H til 35H er nådd, da er fonnen fullt utviklet og mengde avsatt snø vil tilsvare mengde erodert snø, såkalt «steady state» (Tabler 1991).

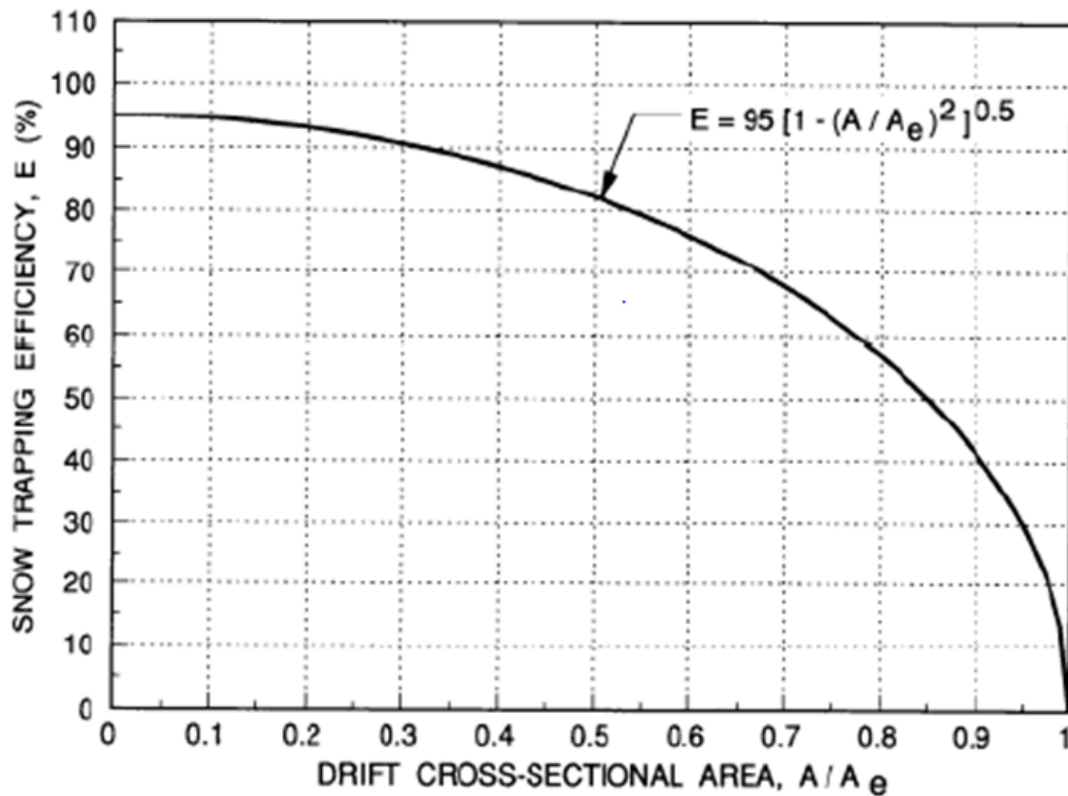


Figur 4: Her er fonnoppbyggingen delt opp i 7. Dette viser utviklingen til fonnen bak snøgjerdet ved 7 måletidspunkter gjennom vinteren (Tabler 1988).

Tak er helt tette og vi har dermed en situasjon som ligner på stadium 2 for porøse gjerder. Vi vil ha en virvelstrøm med resirkulasjon fra starten av lignende den som oppstår bak den først avsatte snøen. Det betyr at fangsten vil være på topp fra starten av.

For noen former, som T-modellen om ble bygget på Finse, og også fullskala flernivåtak, vil lofonnen vokse raskest i starten. Når denne er godt utviklet bidrar den til å lette transport av snø over til lesiden. Da vil lefonnen vokse raskest.

Fangsteffektiviteten, hvor stor andel av snøen som passerer som blir fanget opp og avsatt i snøfonnen beregnes for snøgjerder ved hjelp av den horisontale snøfluksen og gjerdets vertikale areal (Hæhnel & Lever 1994; Tabler 1988).



Figur 5: Nedgang i fangsteffektivitet etter hvert som et 50 % porøst snøgjerde fylles med snø, forutsatt at fangsteffektiviteten i starten, E₀, er 0,95 (Tabler og Jairell 1993).

(O'Rourke & Auren 1997) og (Thiis) anslår at for tak med mer enn 20° vinkel vil lefonnen strekke seg $\frac{1}{4}$ og $\frac{1}{2}$ lengden av takflaten på lesiden for henholdsvis skjermet og eksponert plassering.

I kanadiske undersøkelser av flernivåtak er det observert at snøfonnene ikke får lengder lengre enn to ganger høydeforskjellen opp til det øvre taket, unntatt for tak der høydeforskjellen er veldig liten (under en etasje). Dette kan komme av at mengde snø ikke tillot videre utvikling, noe som ofte er tilfelle i mindre ekstreme områder for hindringer over en viss størrelse (Taylor 1984).

2.2.3 Densitet

Densiteten, eller massetettheten, til snø er høyst varierende. Fra lett, tørr nysnø på under 100 kg/m^3 , til hardpakket snø som etter tining eller regn og ny innfrysing kan overstige 500 kg/m^3 (Canada 2005).

Til sammenligning er is 917 kg/m^3 ved $0 \text{ }^\circ\text{C}$ og vann $999,8 \text{ kg/m}^3$ ved $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Vann er tyngst ved $4 \text{ }^\circ\text{C}$ med 1000 kg/m^3 . Som kjent er vann et av få stoffer som utvider seg når det fryser (går over til fast form).

Dette skjer fordi vannmolekylene danner sekskantede krystaller når temperaturen går under $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

I de samme kanadiske undersøkelsene som nevnt i 2.2.2 er det registrert en egenvekt for snø på flate tak på 295 kg/m^3 , noe som var 15 % høyere enn for snø på bakken ved samme tid. Dette kan forklares med forhindret avrenning ved smelting, samt at varme fra bygget fører til at snøen siger sammen. Det kan også nevnes at det ikke ble funnet entydige sammenhenger mellom snødybde og egenvekt. Grunnen til dette er trolig at mildvær og regn i større grad enn ytterligere lag med snø fører til sammenpressing av eksisterende snødekke, og dermed økt densitet (Taylor 1984).

Blant annet basert på dette benyttes det i den kanadiske standard en densitet på 3 kN/m^3 for beregning av snølast, bortsett fra i ekstra vindutsatte strø og kyststrøk med vekslende regn og snø der 4 kN/m^3 anbefales.

I ISO4355, Annex E anbefales en densitet lik 300 kg/m^3 , altså 3 kN/m^3 , for snø på bakken.

I NS-EN er 2 kN/m^3 det anbefalte for snø på takflate, mens det i tillegg E gis en oversikt over tyngdetettheter. Tabellen viser at brukte verdi 2 kN/m^3 tilsvarer "Fast snø (flere timer eller dager etter snøfall)", mens eldre snø gis verdi 3 kN/m^3 .

2.2.4 Snøfluks

For å uttrykke mengdestrømmen av snø gjennom luften benyttes vanligvis uttrykket snøfluks. Fluks ble først brukt om magnetisme, men brukes i dag mer generelt om ulike strømminger gjennom et tverrsnitt eller et areal per tid.

Snøfluks er en massefluks med benevning ($\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$) i motsetning til for eksempel volumfluks som måles i ($\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^{-2}$) og energifluks som har ($\text{J m}^{-2}\text{s}^{-1}$) som enhet.

Når vi studerer drivsnø er det den horisontale massefluksen som er interessant. Målinger som gir en kontinuerlig vertikal modell er komplekse, og snøfluksprofiler er noe som i praksis blir brukt til drivsnøberegninger. Modeller som blant annet er stadfestet av (Nishimura & Nemoto 2005) og Mellor og Fellers regresjonsligningen fra 1986 er mye brukt.

Som tidligere nevnt er snøtransporten størst nede ved bakken mens vindhastigheten øker oppover. Samtidig gir økt vindhastighet økt total snøtransport og økt andel transportert snø høyere over bakken. Dette betyr at måle høyden er av den største betydning.

Mellor og Fellers ligning gir snøfluksen ($q(z)$), der z er høyden over bakken, i forhold til vindhastigheten i 10m høyde u_{10} , men den tar ikke høyde for nedbør (Font et al. 1998; Mellor 1965; Schmidt 1982).

2.3 CFD-analyser

2.3.1 Teori

CFD-analysene er numeriske simuleringer og gjøres i denne oppgaven i programmet Ansys 13 CFX. Det finnes flere ulike CFD-programmer som alle har til felles et oppsett med tre hoveddeler.

I Ansys CFX er preprosessoren igjen oppdelt i tre deler der modellen kan designes i et enkelt tegneprogram eller importeres fra annet DAK-program. De neste to er meshing der man lager et grid, og et setup-vindu der initialbetingelser bestemmes. Et mesh eller grid er et tredimensjonalt nett av celler og nodepunkter. Nodepunktene er punkter i volumet der strømninger, deformasjoner og så videre beregnes. Flere punkter (finere mesh) gir større nøyaktighet, men gjør at simuleringen tar lengre tid.

Den andre hoveddelen er en ligningsløser der selve simuleringen skjer. Etter dette kan man åpne resultatfiler i en postprossessor der man kan analysere resultatene.

Løsningsformen programmet baserer seg på er «finite volumers metode», som er nært beslektet med «finite elementers metode».

Det kan gjøres flere kjøringar av hvert tilfelle med ulike mesh og evt. randbetingelser som vindhastighet, snøkornstørrelse, snødensitet, pakkingsgrad (pakkingskoeffisient) og størrelse på domenet. Dette gjøres for å se hva slags innvirkning ulike innstillinger i programmet og ulike naturforhold har på den virtuelle snøfonnoppbyggingen.

Det som i første rekke er forsøkt variert i denne oppgaven er vindhastigheten, siden den er det elementet som varierer mest også i virkelige tilfeller

2D-simuleringer vil gi et resultat som viser plassering av fonn på taket som tilsvarer midten på et uendelig langt tak. En 3D-simulering vil avsløre om dette er reelt på et mindre tak og hva slags “3D-effekter” som opptrer; hva som skjer ut mot røster.

CFD-simuleringer i 3D er tidkrevende, selv med moderne PCer med flerkjerneprosessorer tar beregningene lang tid, siden det er svært mange gjennomregninger som må gjøres.

Det er også mulig å simulere en halv modell, eller retttere sagt en modell av en halv bygning ved å sette inn et symmetriplan midt på en tenkt bygning. Dette gir raskere løsning, men kan

gi større unøyaktigheter ved at strømminger som ved simulering på full modell ville krysset symmetriplanet blir forhindret i dette.

I følge Potac er det betydelig forskjell mellom de ulike turbulensmodellene. Under simuleringer han har utført på buetak har endring av turbulensmodell ført til en forskyvning av snøfonnens toppunkt med opptil en meter.

I denne oppgaven benyttes k-ε-RNG som er kjent for å gi realistiske resultater (Thiis et al. 2009).

Reynolds Averaged Navier-Stokesligninger

Forkortet RANS, er tidsavhengige ligninger for bevegelser i fluider der man ønsker å skille ut de turbulente komponentene av strømmingen for å kunne visse denne med en turbulensmodell. Ligningene representerer gjennomsnittlig strømningsvolum, og modellerer strømmingseffekter uten å behøve bestemt kjennskap til de turbulente strømmingene. Slike modeller er kjent som statistiske turbulensmodeller på grunn av den statistiske midlingen som brukes for å finne ligningene (Ansys 2010; Naaim et al. 1998; Thiis 2000).

Euler-Euler

I Euler-Euler simuleringer er de ulike fasene fullt ut blandet med hverandre. Det vil si at i et gitt punkt vil det være en viss volumfraksjon av hver fase og det finnes ikke klare grensesnitt mellom fasene.

Partiklene og fluidet behandles som egne strømningsfelt og fasene påvirker hverandre gjennom *drag* F_d .

$$F_d = \frac{1}{2} \rho_{snow} A C_d (U_{snow} - U_{air})$$

Her er $(U_{snow} - U_{air})$ er den relative lufthastigheten, C_d er *drag*-koeffisienten, A partikkelarealet og ρ_{snow} er snøpartiklenes densitet (Thiis et al. 2009).

En oversettelse for *drag* er luftmotstand, men den anses ikke fullt ut dekkende her, siden det i dette er snakk om gjensidig påvirkning, så det engelske uttrykket benyttes.

2.3.2 Numerisk modell

I Ansys CFX som ble benyttet til simuleringene ble det brukt RANS-ligninger og RNG k- ϵ turbulensmodell. Tofasestrømningene er løst med Euler-Euler-tilnærming. Gass- og partikkelfasen har egne strømningsbaner, men påvirker hverandre gjennom *drag*.

Det benyttes fast partikkeldiameter her, men det finnes formler som kan benyttes, som $\rho_{\text{snow}} d^2 = 0,02$ introdusert av C. Magono i 1965. ρ_{snow} er i denne formelen i g/cm^3 og d er i cm .

Det er benyttet ulike *drag*-koeffisienter, C_d , for de ulike simuleringene. Noen har en fast verdi, 0,44, mens i andre er det benyttet en verdi beregnet i Ansys på bakgrunn av Schiller-Neumann-ligningen.

$$C_d = 24/Re(1 + 0,15Re^{0,687}),$$

der Re er Reynoldstallet (Ansys 2010).

Det logaritmiske vindprofilet er gitt av ligningen $u_{\text{wind}}(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$,

der $u_{\text{wind}}(z)$ er vindhastigheten i høyden z , u_* er friksjonshastigheten, von Karman's konstant κ er 0,41 og z_0 er ruhetshøyden.

Meshet deformeres for å simulere den dynamiske utviklingen. Avsetning, erosjon og meshdeformasjonen oppdateres for hvert tidssteg.

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

$$q_{\text{dep}} = Cw_f \frac{u_{*,t}^2 - u_*^2}{u_{*,t}^2} \quad u_* < u_{*,t}$$

B er en koeffisient som representerer bindingene mellom partiklene i overflatelaget, u_* er friksjonshastigheten, $u_{*,t}$ er terskelfriksjonshastigheten, C er snøkonsentrasjonen og w_f er snøens fallhastighet. I simuleringene i denne oppgaven bestemmes snøens fallhastighet av snøens densitet.

Terskelfriksjonshastigheten er 0,3 m/s og 0,2 m/s som representerer henholdsvis kram (våt) og tørr snø.

Når avsetning og erosjon er beregnet kalkuleres differansen som så blir påført meshet som forskyvning etter følgende likning:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{q_{dep} - q_{ero}}{\gamma}$$

der h er snødybden, t er tiden og γ er densiteten til den avsatte snøen.

Tilnærmingen er basert på (Naaim et al. 1998) med forklaringer fra (Thiis et al. 2009) og (Potac & Thiis 2010).

For å verifisere dataene fra simuleringen var planen å bruke måledata fra Finse av T-modellen som det ble gjort målinger av på. Siden det ikke er produsert simuleringsresultater på denne, er det ikke gjort egne verifiseringer. Modellen er imidlertid verifisert i tidligere masteroppgave ved UMB (Kyllingstad & Saltveit 2009) og benyttet av (Potac & Thiis 2010) med gode resultater.

Til denne simuleringen skulle det benyttes en snøprofil for å fremstille forholdene på Finse i måletidsrommet.

De øvrige simuleringene gjøres med fast snøkonsentrasjon. Dette anses som mer relevant for bygninger som ikke er plassert i høyfjellsstrøk.

2.4 Laster

Det er vanlig å dele inn snølastene i ulike lastsituasjoner. En situasjon er uten drivlast, snøen er upåvirket av vind, og lasten er dermed jevnt fordelt over hele takflaten på både le- og lo side. Dette vil bli omtalt som ikke-drevet lastsituasjon.

Deretter er det en eller flere situasjoner med drivsnølast, der drivsnødelen av lasten sørger for en usymmetrisk belastning av konstruksjonen.

Det er ofte behov for å regne frem og tilbake mellom laster og nedbørsekvivalent. Dette gjøres enkelt siden 1 mm nedbør tilsvarer 1 kg/m².

2.4.1 Saltak i NS-EN-1991-1-3:2003+NA:2008

Vi ser på et eksempel med en bygning med 22° takvinkel som ligger vindutsatt til med ru tekking på lokalitet med karakteristisk marklast 4,5 kN/m², noe som er en ganske gjennomsnittlig norsk marklast. Termisk faktor er 1, formfaktor 0,8, eksponeringsfaktor 0,8.

$$\begin{aligned} s &= \mu_i C_e C_t s_k \\ &= 0,8 * 0,8 * 1 * 4,5 \\ &= 2,88 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Situasjon (i) gir da 2,88 kN/m² på begge sider av mønet.

Situasjon (ii) gir 2,88 kN/m² på en side av mønet og 2,88*0,5 = 1,44 kN/m² på andre siden.

Situasjon (iii) er uaktuell siden taket her er symmetrisk om mønet.

Dette gir en total forskjell på karakteristisk marklast og dimensjonerende taklast på 0,64.

Denne verdien kan sammenlignes med den som kalles formfaktor for tak med 22° og vindhastighet 8 m/s i resultatdelen.

Symmetrifaktoren er 2.

Det som i praksis gjøres i denne beregningen er at lasten på losiden reduseres på grunn av snødrev, men lasten på lesiden er uendret.

Det står for øvrig beskrevet i standardens generelle del at ekstra drivlasttillegg kan gis i det nasjonale tillegget. Dette er gjort i det nasjonale tillegget for Norge for buetak, men ikke for saltak.

Det står imidlertid at dette kan vurderes individuelt der særskilte forhold forekommer.

(Norge 2003; 2008)

2.4.2 Saltak i ISO 4355:1998

Hvis vi igjen ser på et eksempel med en bygning med 22° takvinkel som ligger vindutsatt til med ru tekking på lokalitet med karakteristisk marklast $4,5 \text{ kN/m}^2$, som over. Termisk faktor C_t er 1, formkoeffisient 0,8, eksponeringskoeffisient C_e 0,8 og overflatekoeffisient C_m er 1,0.

Balansert last:

$$s_b = s_0 C_e C_t \mu_b$$

$$\text{der } \mu_b = \sqrt{\cos(C_m 1,5 \beta)} = \sqrt{\cos(1 * 1,5 * 22^\circ)} = 0,8367$$

$$s_b = 4,5 * 0,8 * 1 * 0,8367 = 3,012 \text{ kN/m}^2 \text{ jevnt fordelt last.}$$

$3,012/4,5 = 0,67$ kan sammenlignes med det som kalles formfaktor for tak med 22° og vindhastighet 8 m/s i resultatdelen.

Drivsnølast:

I ISO 4355 regnes drivsnølastene som et tillegg:

$$s_d = s_0 C_e C_t (\mu_b \mu_d)$$

$$\text{der } \mu_d = \mu_b (2,2 C_e - 2,1 C_e^2) \sin(3\beta) = \mu_b (2,2 * 0,8 - 2,1 * 0,8^2) \sin(3 * 22) = 0,318$$

$$s_d = 4,5 * 0,8 * 1 (0,8367 * 0,318) = 0,958 \text{ kN/m}^2$$

Drivlastsituasjonen gir da $3,012 \text{ kN/m}^2$ på en side av mønet og $3,012 + 0,958 = 3,97 \text{ kN/m}^2$ på andre siden.

Symmetrifaktoren er 1,32.

(Standardization 1998)

2.4.3 Flernivåtak i NS-EN-1991-1-3:2003+NA:2008

Ved nivåforskjeller mellom tak på samme bygning eller nærliggende bygning kommer tillegg til den jevnt fordelte lasten som er forårsaket av ras fra høyereliggende tak og vind. Vi studerer her betydningen av takutstikk på øvre tak, og det er da drivsnødelen som er interessant. Fønnen forårsaket av vind beregnes som en trekantlast med høyde tilsvarende nivåforskjellen og lengde tilsvarende 2 ganger nivåforskjellen begrenset nedad til 5 m og oppad til 15 m. Volumet av fønnen multipliseres så med 2 kN/m^3 for å finne opptredende last. Betydningen av takutstikk er ikke beskrevet, og ved beregning må det således ses bort fra.

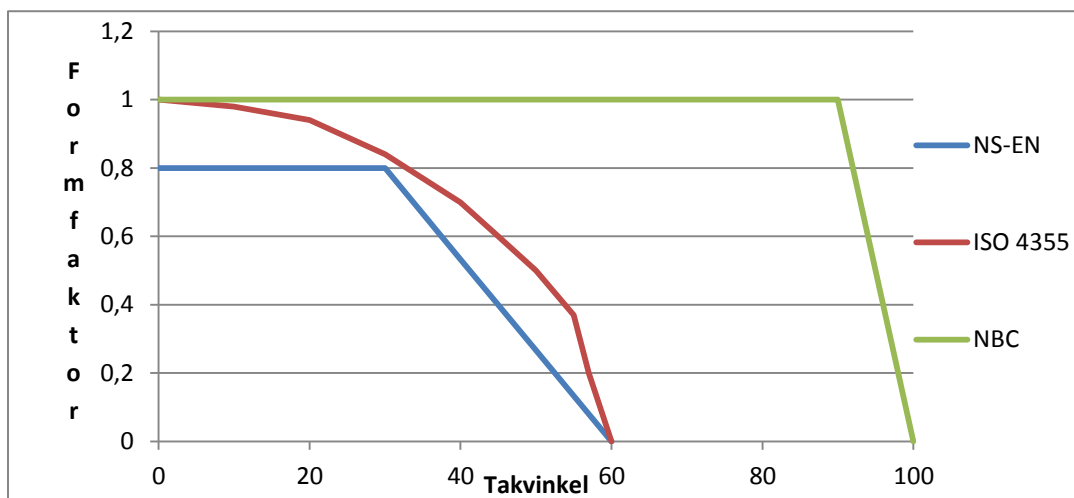
2.5 Formfaktor

Formfaktoren er en faktor som reduserer eller øker taklasten i forhold til karakteristisk marklast. Hovedtrekket er at formfaktoren og dermed lasten avtar med økende takvinkel, men det er store forskjeller mellom de ulike nasjonale standardene.

Sagtak, og tak med nivåforskjeller samt drivlaster kan ha formfaktorer på over 1.

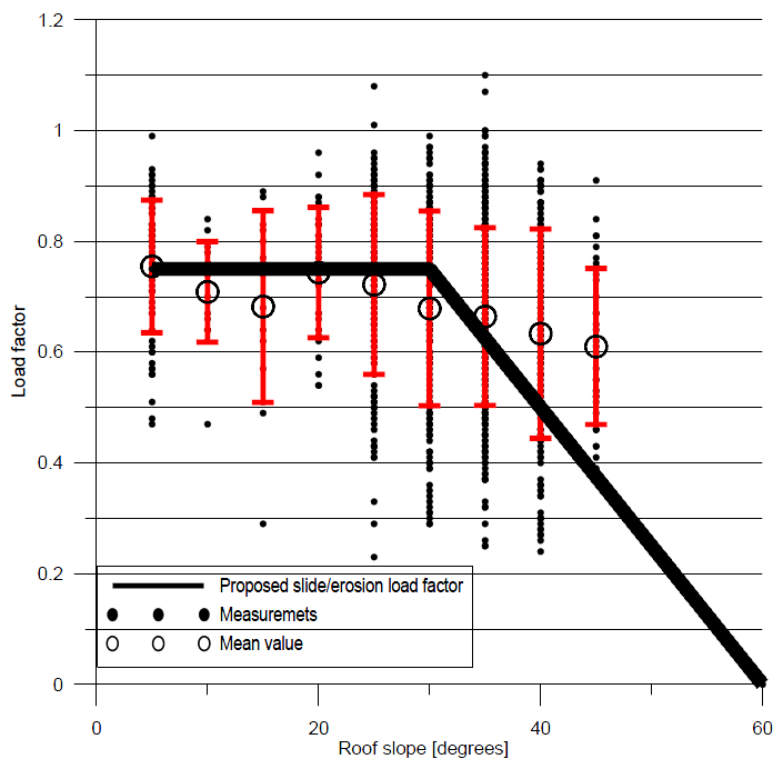
De ulike standardene har ulik formfaktor og tilnærming til dette. Eurokoden holder formfaktoren for seg selv som en selvstendig faktor. ISO-standarden kombinerer den med eksponeringsfaktor, men ved å sette eksponeringsfaktoren til 1 vil vi få en formfaktor vi kan sammenligne med Eurokoden. I Kanada (NBC) gis det, med noen unntak, i praksis ikke reduksjon av taklasten gjennom formfaktor for vanlige tak (se figur).

Standarden ASCE som gjelder i USA har en lignende form som den i NBC, men går til null noe tidligere, ved 70° . ASCE tar også hensyn til tekkingens ruhet og i hvor stor grad takflaten får tilført varme nedenfra. For tak på kalde bygninger og tak på oppvarmede bygninger med isolert konstruksjon og luftet tekking er formfaktoren 1 frem til henholdsvis 45° og $37,5^\circ$ (ASCE 2005).



Figur 6: Formfaktorer for saltak fra to nasjonale- og internasjonal snølaststandard.

Formfaktoren fra simuleringen er beregnet ved å dividere taklasten på marklasten. Det er også beregnet en formfaktor i forhold til nedbør ved å dividere taklasten på nedbøren.



Figur 7: Høibøs målinger. Stor ring er gjennomsnitt, prikker er målinger og rød strek er standardavvik. Tykk svart strek er ny modell foreslått for ISO 4355. Figur T. K. Thiis.

2.6 Symmetrifaktor

Symmetrifaktor for simuleringene finnes ved å dividere lasten på lesiden på lasten på losiden. Den beskriver forholdet mellom snøakkumulasjonen på henholdsvis le- og lo side av taket.

I NS-EN er lastsystemet slik at ikke-drevet last og drivlast er to/tre ulike lastsituasjoner avhengig om taket er symmetrisk eller ikke. Drivlastsituasjonen er slik at lasten på losiden reduseres med 50 % i forhold til ikke-drevet lastsituasjon. På le side benyttes 100 %. Dermed er symmetrifaktoren 2.

I ISO 4355 er lasten fra drevet snø et tillegg på lesiden. På losiden benyttes last som for situasjonen uten drivlast. Dette gir en lav symmetrifaktor.

I ASCE 7-05 legges ren ensidig last på lesiden til grunn for beregninger av tak med mindre horisontal avstand fra raft til møne enn 6,1 m. Det vil si at losiden ikke har noen snølast, mens lesiden har last tilsvarende den som opptrer i udrevet lastsituasjon. For øvrige saltak kan en litt forenklet si at losiden belastes med 30 % av den jevnt fordelte lasten på lesiden. Lesiden belastes også med en tilleggslast med begrenset utstrekning øverst på taket for å illustrere lefonnen.

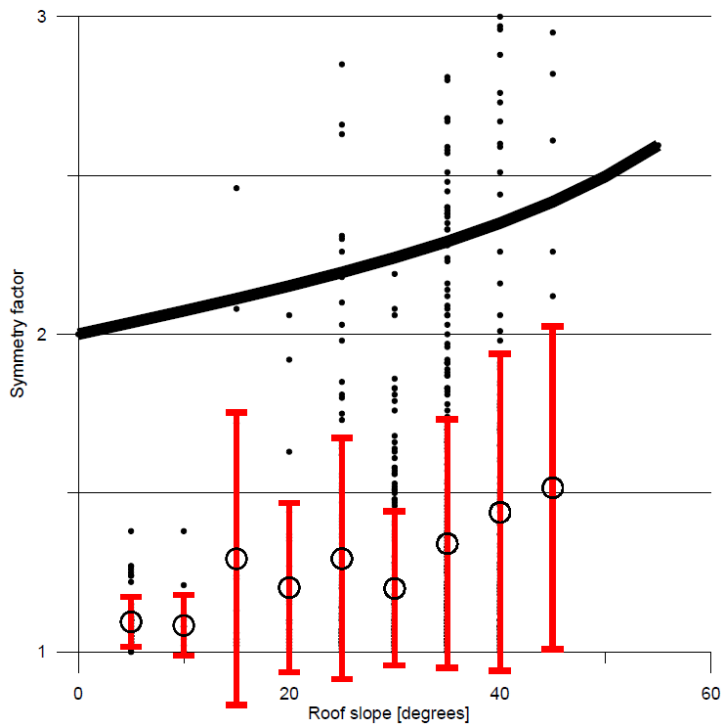
NBC 2005 opererer også med ensidig snølast i drivlastsituasjonen. Det gjelder for alle saltaksbygninger med vinkel over 15° . For bygninger med vinkel over 20° er den ensidige lasten på losiden større enn lasten på lesiden i ikke-drevet lastsituasjon.

Dette betyr at for snølasten alene opereres det med en uendelig stor symmetrifaktor.

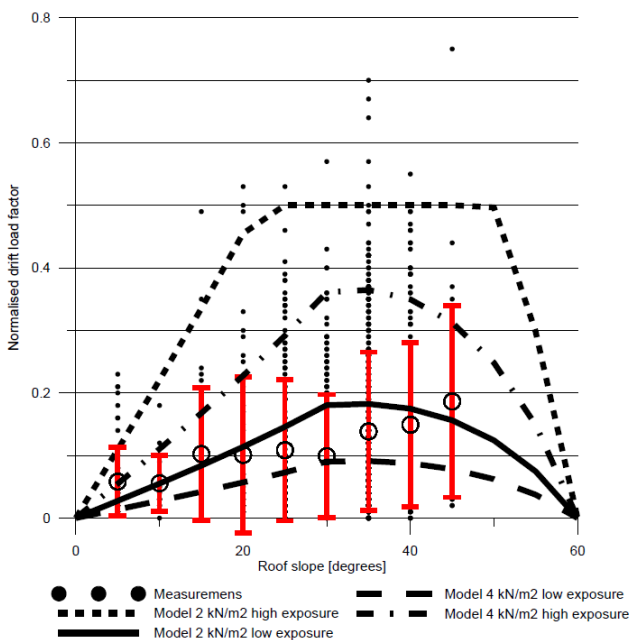
Amerikanske undersøkelser av bygninger som har blitt rammet av delvis eller totalt sammenbrudd og mindre strukturelle skader forårsaket av snølast tyder på for store skjevlaster ofte er en del av årsakssammenhengen. For tilfellene med mellom 10° og 50° som det foreligger data for er det beregnet en gjennomsnittlig symmetrifaktor på 6,3 og det taket med størst skjevhet i belastningen hadde en snødybde på 1,7 m på lesiden, mens det ikke var snø på losiden. Dette taket hadde en vinkel på $18,4^\circ$. Det andre tilfellet som er registrert med ensidig snølast hadde også en takvinkel på 18° (O'Rourke & Auren 1996).

Ut fra målingene til Høibø ses det (figur 8) at en symmetrifaktor på 3 forekommer. Det er også tydelig at spredningen og standardavviket øker med økende takvinkel.

Målingene kan ikke ses på som ekstremverdier siden det er flere tilfeller i en 20-årsperiode. Bygningenes plassering er ikke kjent i detalj, men lokale forhold anses som ordinære.



Figur 8: Symmetrifaktor fra Høibøs målinger og en modell utarbeidet av T.K.Thiis for revidering av ISO4355 (ikke implementert). Store sirkler er gjennomsnitt, svarte prikker målinger og rød strek er standardavvik.
Figur: T.K.Thiis



Figur 9: Høibøs måledata og resultatene fra en modifisert foreslått modell for drivsnølaster som ikke er implementert i ISO 4355. Figur: T.K.Thiis.

3 Metode/oppsett

3.1 Numeriske simuleringer

Simuleringen er en forenkling av virkeligheten, og det benyttes en fast snøkornstørrelse, pakkingskoeffisient, snødensitet og vindhastighet i hver simulering.

Vindhastigheten er innlagt som en logaritmisk vindprofil.

Snømengden er kjørt både med konstant mengde over innløpets tverrsnitt og med profil. Med konstant snømengde simuleres forhold som ligner de som forekommer ved snøfall. Ved bruk av en snøprofil kan det simuleres forhold der kun vinddrevet snø er i luften eller en kombinasjon av vinddrevet snø og nedbør.

Den snøprofilen som ble benyttet i forbindelse med denne oppgaven var et forsøk på å fremstille forholdene som var på Finse under feltforsøkene.

3.2 Saltak

Siden det allerede foreligger resultater fra 2D-simuleringer som det er ønskelig å sammenligne med legger oppsettet brukt på disse føringer for hva som skal bruke på saltakssimuleringen i 3D.

Vekten på den fallende snøen er 50 kg/m^3 for hus 1 til hus 8_O med pakkingskoeffisienten 3. Partikkeldiameter er 0,2mm og *drag*-koeffisienten som beskriver fasenes innvirkning på hverandre er 0,44.

For hus 0-2 til hus 50-8 har snøen en densitet på 400 kg/m^3 , og pakkingskoeffisient 1, som vil si ingen pakking. *Drag*-koeffisienten beregnes med Schiller-Neuman ligningen i stedet for en fast koeffisient.

	Takvinkel	Bygnings- bredde, m	Bygnings- lengde, m	Vind- hastighet, m/s	Form- faktor	Symmetri- faktor
HUS 0-2	0°	30	40	2	Ja	Ja
HUS 0-5	0°	30	40	5	Ja	Ja
HUS 0-8	0°	30	40	8	Ja	Ja
HUS 22-2	22°	30	40	2	Ja	Ja
HUS 22-5	22°	30	40	5	Ja	Ja
HUS 22-8	22°	30	40	8	Ja	Ja
HUS 50-2	50°	30	40	2	Ja	Ja
HUS 50-5	50°	30	40	5	Ja	Ja
HUS 50-8	50°	30	40	8	Ja	Ja
HUS 1	10°	10	40	8		Ja
HUS 2	10°	30	40	8		Ja
HUS 3	45°	10	40	8		Ja
HUS 4	45°	30	40	8		Ja
HUS 5	30°	15	30	8		Ja
HUS 6	30°	15	30	8		Ja
HUS 7	30°	15	30	5		Ja
HUS 8_O	30°	15	40	8		Ja

Figur 10: Tabell over modeller for beregning av formfaktor og symmetrifaktor.

Domenet er 300 meter langt og 100 meter bredt. Dette er fordelt med 100 meter på losiden og 200 meter på lesiden av mønet.

Det er ikke gjort systematiske målinger i felt for saltak, men det er foretatt visuelle sammenligninger med fotografier.

3.3 Flernivåtak

	Tak- utstikk	Bygnings- bredde, m	Bygnings- lengde, m	Lengde Takover- heng leside, m	Høyde, m	Simulering	Måle- data
t1	Tosidig	1,225	7,5	0,61	0,62	Ja	Ja
t2	Tosidig	1,225	7,5	0,61	0,62		Ja
t3	Tosidig	1,225	7,5	0,61	0,62		Ja
L_O	Ensidig	1,23	12	1,22	1,05	Nei	Ja
L_O_B	Ensidig	2,44	7,5	2,43	0,7	Nei	Ja
T_S	Tosidig	14,8 (totalt 40)	40	2,4	2,4	Ja	Nei

Figur 11: Tabell med oversikt over modeller brukt til måling av snøfonner ved nivåforskjell på tak.

Fra 28.01.2011 til 01.02.2011 ble det gjort feltarbeid på Finse forskningsstasjon av Thomas K. Thiis, Jan Potac, Dimitrios Kraniotis og Aleksander Andersen.

I oppgaven benyttes også noen måledata innhentet av Jan Potac forut for og i etterkant av dette.

Denne forskningsstasjonen eies av UiB og UiO og brukes i første rekke til feltkurs og utferder i høyfjellsøkologi, biologi og limnologi. Beliggenheten er flott også for feltforsøk av snøtransport der den ligger like ved Finsevann, i en høyfjellsdal der vindretningen er ganske konstant og snøstormer er hyppig forekommende. Stasjonen er dessuten lite brukt vinterstid, slik at det er mulig for UMB å leie seg inn der.

Thomas K. Thiis og Jan Potac hadde også tidligere i januar vært på stedet og satt opp en modell med overheng på lesiden med målene høyde 105 cm, overheng 123 cm og konstruksjonens lengde var 12 m. Da vi kom opp 28.01 ble straks arbeidet med å sette opp en mindre modell med T-form igangsatt. Modellen ble som den andre bygget i 15 mm kryssfiner. Målene var høyde 62 cm, overheng på hver side 61 cm og lengde 7,5 m.

Modellen ble plassert 90° på vindretningen slik at det ble dannet på lo- og lefonn.

Senere på vinteren bygget Potac og Thiis ytterligere en modell med vegghøyde 0,7 m og

takoverheng på hele 2,43 m.

Målinger ble gjennomført systematisk og det ble samtidig målt vindhastighet i 0,5 m og 2 m høyde.

Snøfluks ble målt ved hjelp av en digital partikkelteller og snøfeller med sirkelformet åpning på 1 dm^2 og nylonpose i vev som slipper luften gjennom.

Posene vil etter hvert som de begynner å bli fulle får redusert sin evne til å slippe igjennom luft. Det er dermed viktig å følge med dette, og gjøre målinger over relativt kort tidsrom.

(Schmidt 1984) forteller om høy nøyaktighet for målinger med snøfeller av en noe mer avansert konstruksjon etter sammenligning med en elektronisk snøpartikkelteller (SPC). Selv om disse posene kunne veies av apparatet er prissippet det samme med polyesterstoff med porer på 0,105 mm.

(Font et al. 1998) forteller imidlertid om en fangst i feller som lignet mer på de som ble benyttet i forsøkene på Finse så langt ned som 45 % av fangsten i en boksformet snøfanger.

Disse hadde porer i stoffet på 0,11 mm.

Det som skiller disse fra de som ble benyttet i forsøkene på Finse er at åpningen her er rektangulær og mindre; 50 cm^2 .

Det ble skikkelig snøstorm med gode forhold for snøtransport, men med dårlige forhold for de som skulle ut å finne modellene og måle utviklingen av snøfonnene. I tillegg endret vindretningen seg noen grader frem og tilbake slik at det ikke hele tiden var perfekte forhold.

Fonnene rundt modellen ble helt fjernet to ganger slik at det ble tre uavhengige måleserier.



Figur 12: Skalamodell tømmes for snø for å gjøre nye målinger. Snøen fraktes langt nok til at den ikke vil forstyrre de nye målingene.

På denne T-modellen er øvre tak 1,225 m, mens “nedre tak” er uendelig både på le og lo side. Snøen vil i hovedsak være vindtransportert fra “lavereliggende tak”/terreng. På en virkelig bygning i mindre værharde omgivelser vil snøen komme fra det øvre taket i stor grad.

T-modellen modelleres i Ansys CFX med samme mål som i feltforsøket, mest for å verifisere at programmet gir virkelighetsnære resultater. Det er laget en snøprofil for denne simuleringen basert på snømålingene på stedet, vindhastigheten er også den samme. Det var store problemer med simuleringer av denne modellen med snøprofil, slik at dataene som foreligger er mangelfulle.

Deretter skaleres formen opp til fire ganger T’ens størrelse som gir etasjehøyde 2,4 m og det var planlagt ulike utgaver med takoverheng $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ og $\frac{3}{4}$ av etasjehøyden H.

Modellens øvre tak har utstrekning 10 m pluss lo- og le takutstikk, mens de nedre takene er totalt 15 meter på hver side.

Det foreligger ikke fullstendige resultater fra simuleringer av denne modellen.

3.4 Formfaktor

Formfaktoren er beregnet på saltak med vinklene 0° , 22° og 50° på bygning 30×40 m.

Vindhastighetene er 2 m/s, 5 m/s og 8 m/s i 10 m høyde og det benyttes logaritmisk vindprofil. Det er brukt en snødensitet på 400 kg/m^3 , pakkingskoeffisient 1, Schiller-Neuman ligningen for *drag* og k - ϵ -RNG turbulensmodell. Domenet har målene høyde x bredde x lengde $150 \times 240 \times 300$ m.

Volumfraksjonen av snø i innløpet er 0,001 %.

Terskelfriksjonshastigheten er en verdi som er med på å bestemme hvor lett en snøpartikkel fester seg til bakken, taket eller eksisterende snødekke og hvor lett den kan rives løs ved erosjon. Med å endre denne kan vi simulere forskjellen på kram og tørr snø.

Dette er gjort ved formfaktorberegningen der både 0,2 og 0,3 er brukt.

3.5 Klimadata

Under feltforsøkene på Finse ble klimadata innhentet med vindmålere i 0,5 og 2 m høyde med portabel værstasjon. Snøfluks måles med poser for snøfangst og digital partikkelteller.

Vindretning og lufttemperatur ble også loggført under forsøket.

Like ved forsøksfeltet ligger også Meteorologisk institutt sin værstasjon. Fra eklima.no kan man laste ned værdata. Denne værstasjonen måler vinden i 10 m høyde.

3.6 Fangsteffektivitet

Hvor mye av snøen som passerer over taket blir fanget opp og avsatt. Dette kan være interessant å se nærmere på, og for snøgjerder er dette greit å beregne etter metode omtalt i 2.2.2. For bygninger med større utstrekning i vindretningen er det en større utfordring å gjøre dette på en god måte. I denne oppgaven er det valgt en tilnærming der snøpartikkelens fallvinkel brukes til å kalkulere arealet som kan fange snø til taket. Bygningens gesimshøyde trekkes fra bygningens totalhøyde, det vil si at den vertikale høyden r mellom raft og møne benyttes. Dette adderes til partikkelens høydetap, Δh , over bygningens utstrekning i vindens retning. For saltaksbygningene det er gjort simuleringer på i oppgaven, med 30 m bredde og 40 m lengde, vil det for eksempel for bygning med 22° takvinkel og vindhastighet 8 m/s gi følgende verdier: Horisontal hastighet 7,4 m/s, vertikal hastighet -0,187 m/s. Dette gir:

$$r = 30/2 \text{ m} * \tan(22) = 6,06 \text{ m}$$

$$90 - \arctan\left(\frac{7,4}{0,187}\right) = 1,448^\circ$$

$$\Delta h = 30 \text{ m} * \tan(1,448) = 0,758 \text{ m}$$

Total høyde blir da 6,818 m som gir et areal på $272,72 \text{ m}^2$. Arealet multiplisert med snøfluks og tid vil gi potensiell snømengde i kg.

4 Resultater

4.1 Feltstudier

4.1.1 Saltak

Det er ikke gjort systematiske vitenskapelige feltstudier av saltak i forbindelse med denne oppgaven. Bearbejdede data fra H. Høibøs feltnålinger samt bilder er brukt som grunnlag for diskusjon av simuleringresultatene.

På et hus jeg kjenner til i Leirfjord i Nordland vil jeg anslå normal last på loside til maksimalt 1/4 av lasten på leside, som vil si en symmetrifaktor på 4. Takvinkel er 27° med ru tekking og huset er 7,5X12,5 m. Høyde fra bakken til raft på loside er ca.5 m, mens på leside ca.3 m.

Losiden ligger nesten rett mot sør.

På bildet under vises et av nabohusene som har en noe slakere takvinkel, glatt tekking delvis med snøfangere og langvegg vridd mer mot øst. Her er snølasten mye mer balansert.



Figur 13: Hus i Leirfjord tekket med malte metallplater.



Figur 14: Hytte Kaldågvatn 2010, fasade mot sørøst.
Foto J. M. Bing.



Figur 15: Hytte Kaldågvatn mars 2011, sett fra øst.
Foto: J. M. Bing.



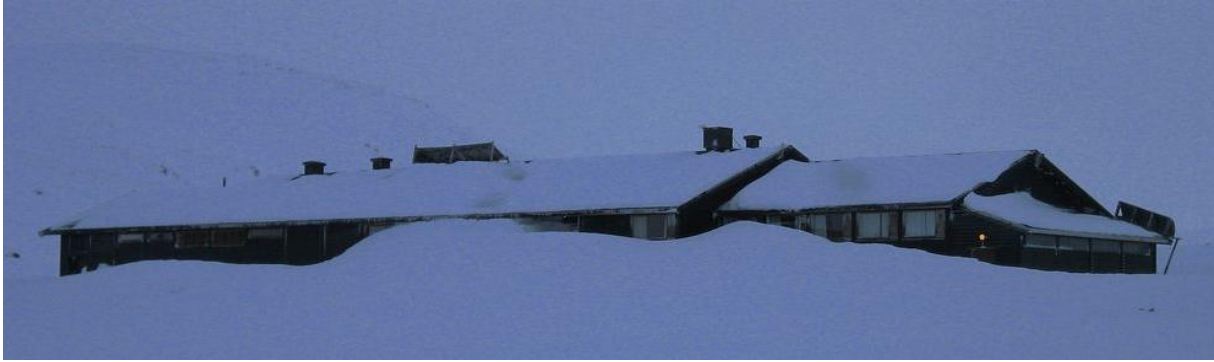
Figur 16: Hytte Kaldågvatn april 2011, sett fra sørøst.
Foto: J.M. Bing.



Figur 17: Foto: D. Forsmo.

På bildene her ser vi ei hytte på snaufjellet i Vefsn kommune, ca. 600 m.o.h. Det første bildet er fra april 2010, mens de andre to er fra henholdsvis mars og april 2011. Det viser tydelige forskjeller i værforhold gjennom de to vintrene. 2011 var en snørik vinter med spesielle vindforhold. Likevel ser vi tydelig betydelige snølaster på lesiden selv om dette er eksponert plassering. Selv om vinden og snømengde ikke har bidratt til en kontinuerlig fonn fra taket og ned på bakken er det likevel både betydelig med snø på taket og oppover langs veggen.

Tilfellet på figur 17 er fra en fjelldal på omtrent 250 m.o.h. i Leirfjord kommune. Denne hytta er godt skjermet for vind nede i dalen og av omkringliggende skog. Snøen har en symmetrisk fordeling på taket.



Figur 18: Bildet viser Finse forskningsstasjon der feltforsøkene ble foretatt. Her på losiden, spesielt ved hovedinngangen er lofonnen nesten opp til taket. Dette er i månedsskiftet januar/februar, så det er fortsatt noe igjen av vinteren. Foto: D. Kraniotis.

Bildene av Finse forskningsstasjon viser stor lofonn og noe snø på taket på losiden. På lesiden er det en del av takflaten som er helt snøfri, mens lengre bort fra fotografen strekker fonnen seg fra mønet og helt ned på bakken. Forskjellen skyldes trolig i hovedsak at bygningen ikke ligger helt perpendikulært på fremherskende vindretning.



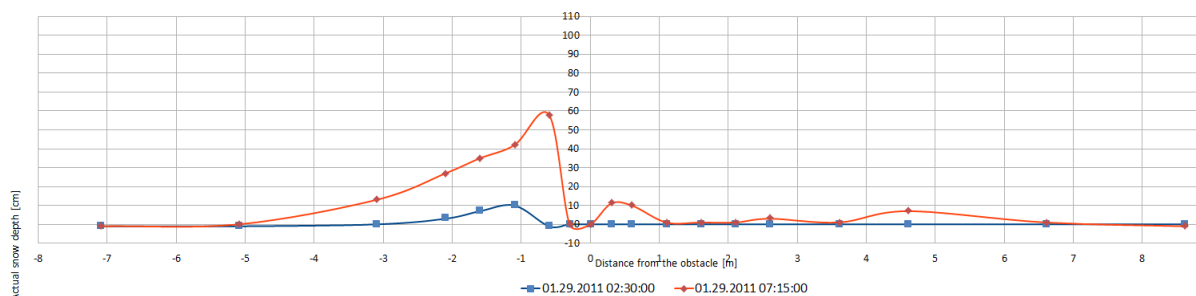
Figur 19: Lesiden av samme bygning som over. Lengst bort på taket strekker fonnen seg fra mønet og ned på bakken. Legg forøvrig merke til «spylehatten» til venstre i bildet som ved hjelp av vinden fjerner snøen i lesonen ved porten.

4.1.2 Flernivåtak

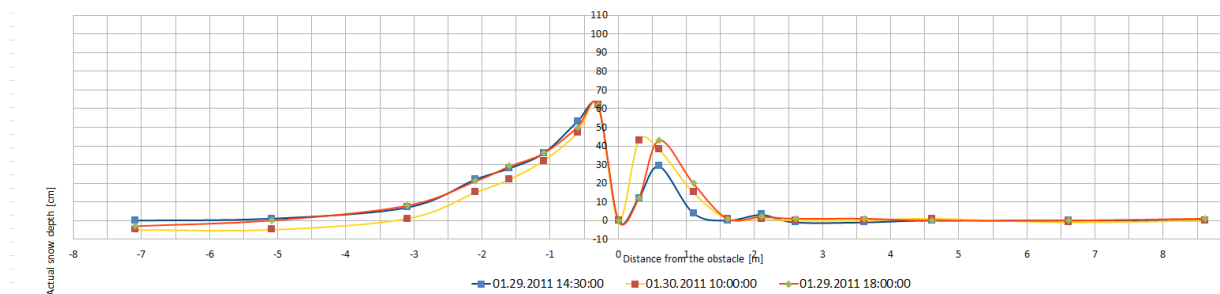
Målingene på Finse ble utført på modeller bygd på stedet. Det ble også foretatt målinger av vindhastighet og nedbør. Grafene under viser fonnens utvikling ved å illustrere formen ved de ulike registreringstidspunktene.



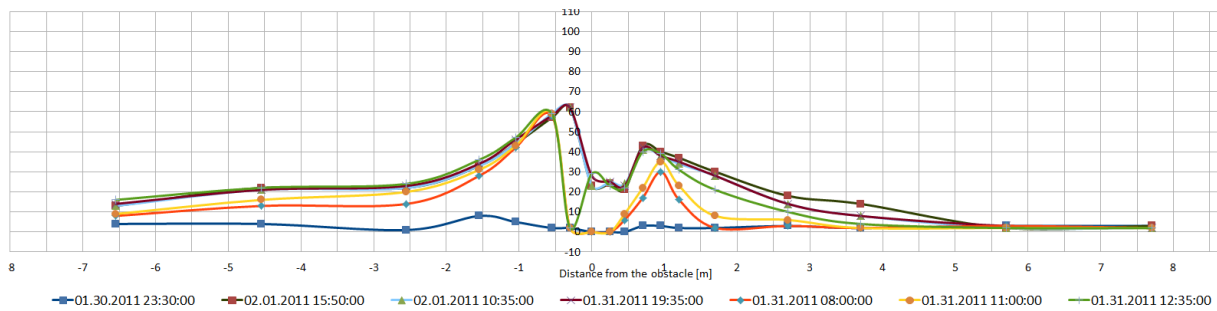
Figur 20: Oppsetting av medbrakt værstasjon og datalogger i tett kasse.



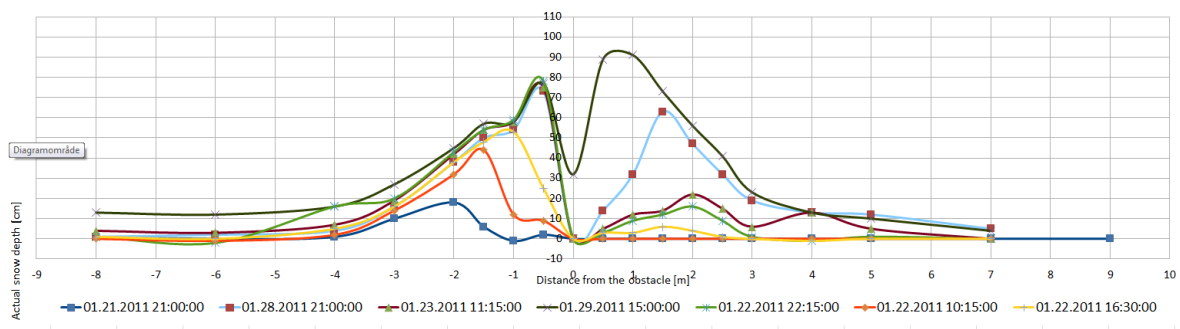
Figur 21: Grafen viser lo- og lefonn midt på T-modellen. Tilsvare T1. Ingen endring i referansesnødybde. Viser tydelig at lofonna dannes først når det kun er vindbåret snø som avsettes. Illustrasjon av Jan Potac.



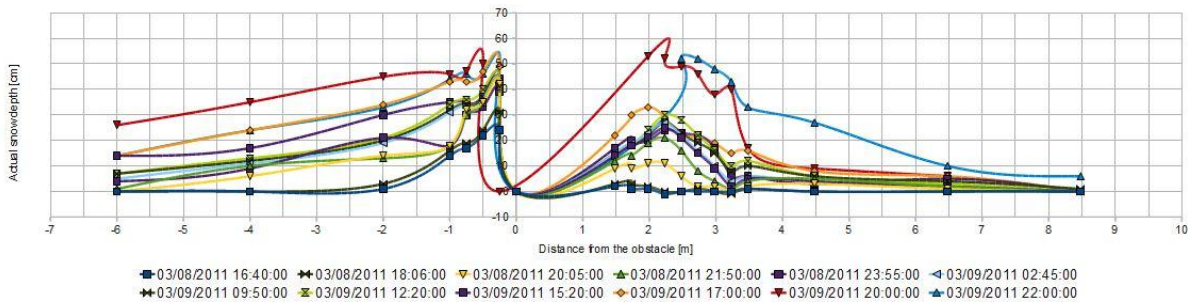
Figur 22: Lo- lefonn T-modell etter første tømning. Ingen endring i referansesnødybde. En liten dreining i vindretning ført til avsliping av lefonna fra orange til gul linje gjennom natten. Tilsvare T2. Ill: J. Potac.



Figur 23: Etter andre tømning (T3). Referansesnøydybden økte med 9 cm i perioden. Fyllingen inn mot veggen skjedd i en periode med over 10 m/s i 2 m høyde, og med vindkast som nærmet seg 20 m/s. III: J. Potac.

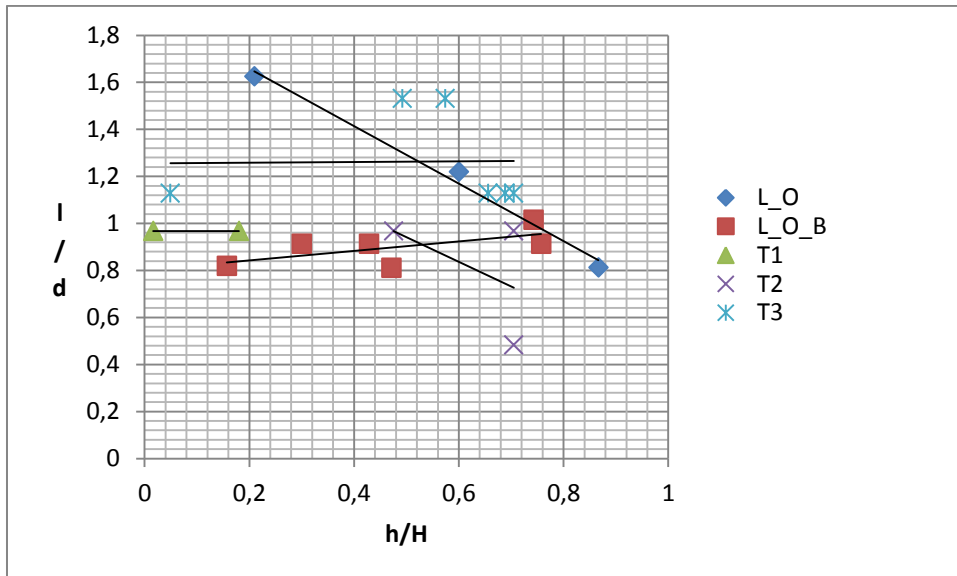


Figur 24: Graf over snødybde rundt modell med takoverheng på 123 cm kun på lesiden 105 cm over bakken (L_O). Referansesnøydybden økte med 3 cm i perioden. III: Jan Potac.



Figur 25: Grafene viser snøfonnutviklingen på le- og loside av ensidig overheng på 244 cm 70 cm over bakken (L_O_B). Referansesnøydybden økte med 27 cm i perioden. III: J. Potac.

Ved sterk vind ble det deponert snø helt inn mot modellenes vegger i høyde inntil 30 cm som tilsvarer henholdsvis $H/2$ for T3 og $H/3$ for L_O. For T3 var vindstyrken over 10 m/s ved høyde 2 m og omkring 15 m/s i 10 m høyde, og det var moderat nedbør deler av perioden. For L_O finnes ikke data for vindhastighet i 2 m høyde i perioden, men i 10 m høyde var den mellom 12 og 15 m/s i slutten av perioden. For første del av perioden finnes ikke pålitelige data. T1, T2 og T3 er samme modell målt på i flere omganger og er symmetrisk.



Figur 26: Figuren viser at når toppen på fonna nærmer seg høyden på hindringen, nærmer fonnens toppunkt seg en avstand fra veggen på 80 % av takutstikkets lengde.



Figur 27: Stor oppfylling etter sterk vind. Ensidig overheng 123 cm. Se graf for L_O.

Figur 28: Skiftninger i vindretning har gitt usymmetrisk fonnndannelse på lesiden. Vinden har til tider kommet inn fra bildets øvre høyre del (T2).

Når fonnen nærmet seg høyden på nivåforskjellen flyttet toppen på fonna seg litt innunder kanten på modellen. Snøens vinkel fra fonnen og inn mot veggen varierte sterkt, fra jevn vinkel til tunellformen med overheng i toppen som vises på bildet over.

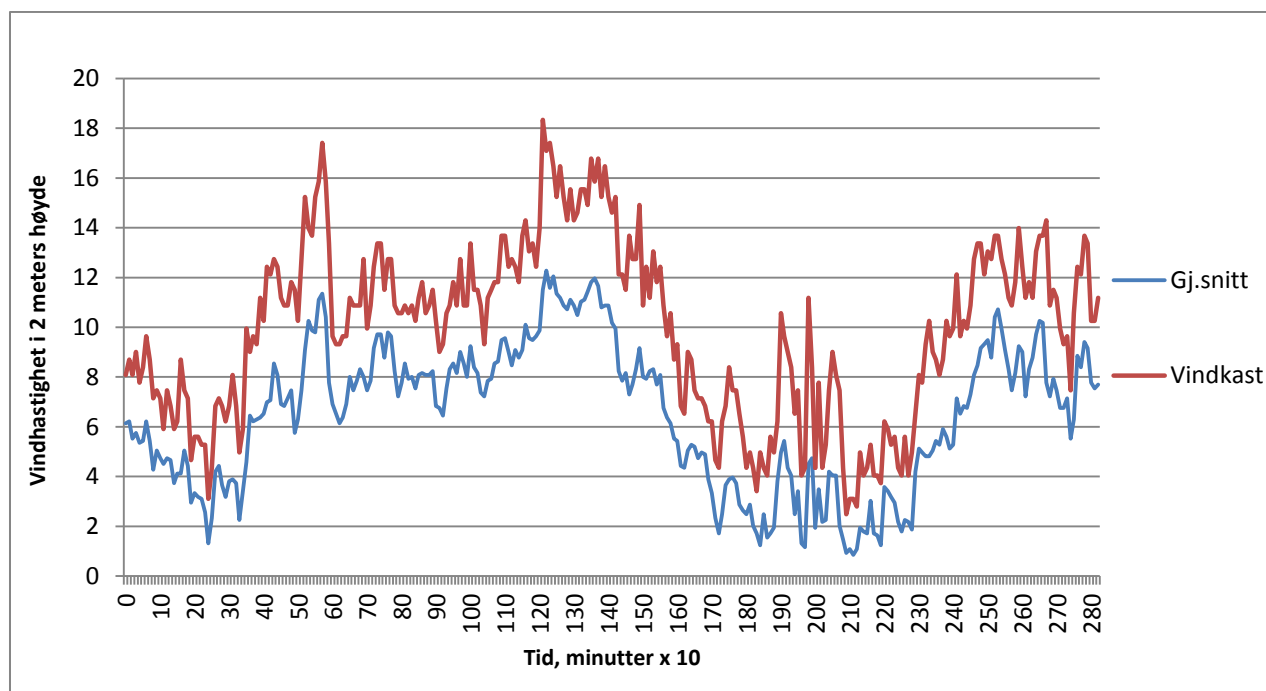
Tallene for T2 er ikke helt representative, siden det her foregikk en liten skiftning i vindretning i måleperioden slik at vinden kom inn fra siden.

4.1.2.1 Værforhold

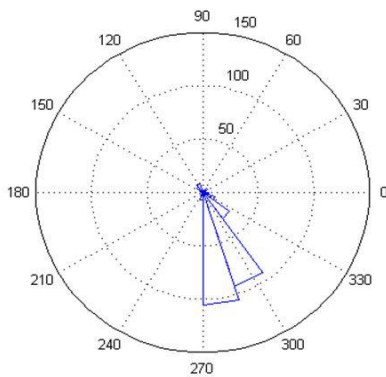
Resultatene fra værmålingen, der vindhastigheten er plottet som en graf og en vindrose viser vindretning. Det er ikke gjennomført synkronisering av værdata fra den faste metrologiske stasjonen og den flyttbare som ble benyttet. Vindmåler på høyde 0,5 m fungerte ikke under registreringen.

De topografiske forholdene på Finse gjør at vinden følger en dal som har retningen nordvest-sørøst. I måletidsrommet 30.01.11 til 01.02.11 kom vinden en betydelig del av tiden fra en noe mer vestlig retning. Dette førte til at modellene ikke hele tiden stod perfekt plassert i forhold til vindretningen.

Vindrosen for vintermånedene den siste tiårsperioden viser at fremherskende vindretning for vinteren 2011 er representativ for 10-årsperioden.



Figur 29: Målingene er gjort i perioden 30.01.11 kl.17.14 til 01.02.11 kl. 14.20.



Figur 30: Vindrose for måleperioden.
Fremherskende vindretning er vestnordvest.
Ill: D. Kraniotis.

Vindrose, frekvensfordeling av vind

Vindretning deles i sektorer på 30°

Frekvensfordeling av vindhastighet i prosent %

Vindhastighet (m/s)

- >20.2
- 15.3-20.2
- 10.3-15.2
- 5.3-10.2
- 0.3-5.2

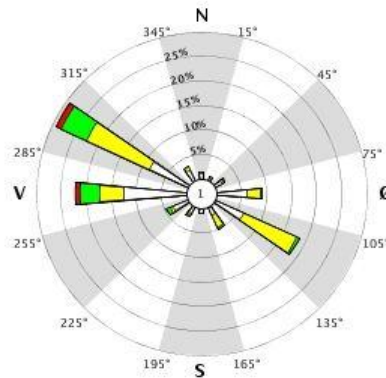
Stille (%)

1

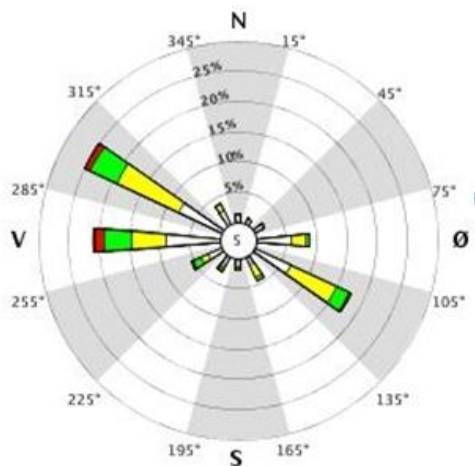


År: 2010 - 2011
jan, feb, mar, des
Tidspunkt: 1, 7, 13, 19 (NMT)

25 830 FINSEVATN



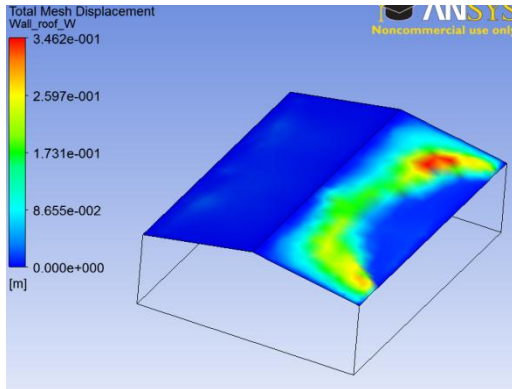
Figur 31: Vindrose fra klima.no for perioden desember 2010 til mars 2011. Fremherskende vindretning er vest (265°-275°) og nordvest (295°-305°).



Figur 32: Denne vindrosen er for desember til mars i tiårsperioden 2001-2011 (klima.no).

4.2 Simuleringer

4.2.1 Saltak



Figur 33: Tak med slak vinkel og bueformet fonn.

Det vi ser her er en bueformet fonn som strekker seg ned mot raftene når vi nærmer oss gavlene. I en 2D-simuleringen har vi en fonnform og plassering på taket som tilsvarer midten på et uendelig langt tak, og disse 3D-effektene som vi ser her vil ikke komme til syne.

4.2.1.1 Formfaktor

Det vises tydelig i simuleringen at vind og takvinkel har betydning.

Eksponeringsfaktoren er ikke omhandlet her direkte, men det er tydelig at dette har en sammenheng.

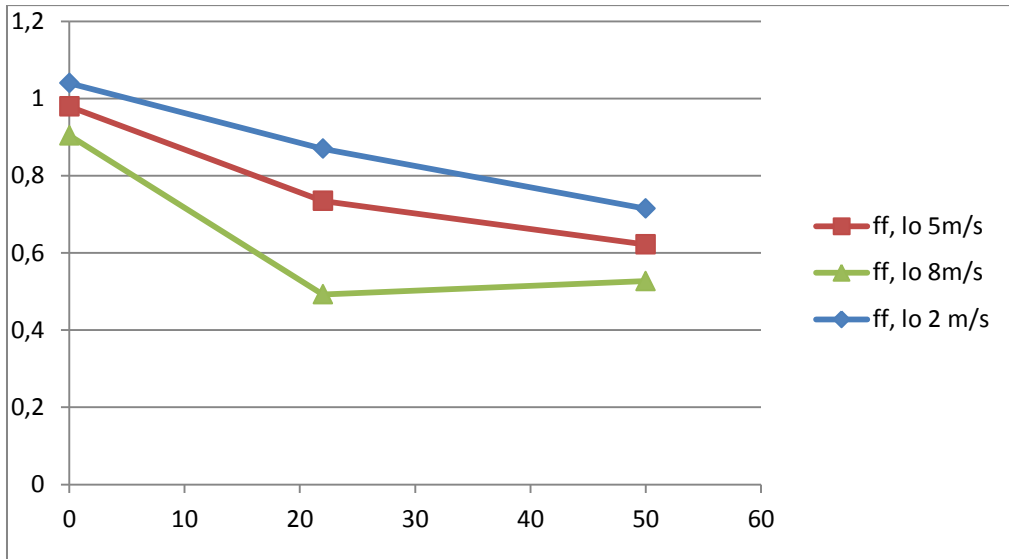
Man kan likevel si at simuleringene med vindhastighet 8m/s tilsvarer standardenes kategori *eksponert plassering*, mens 2 m/s tilsvarer *skjermet plassering*.

Det deponeres snø også på takene med 50° vinkel.

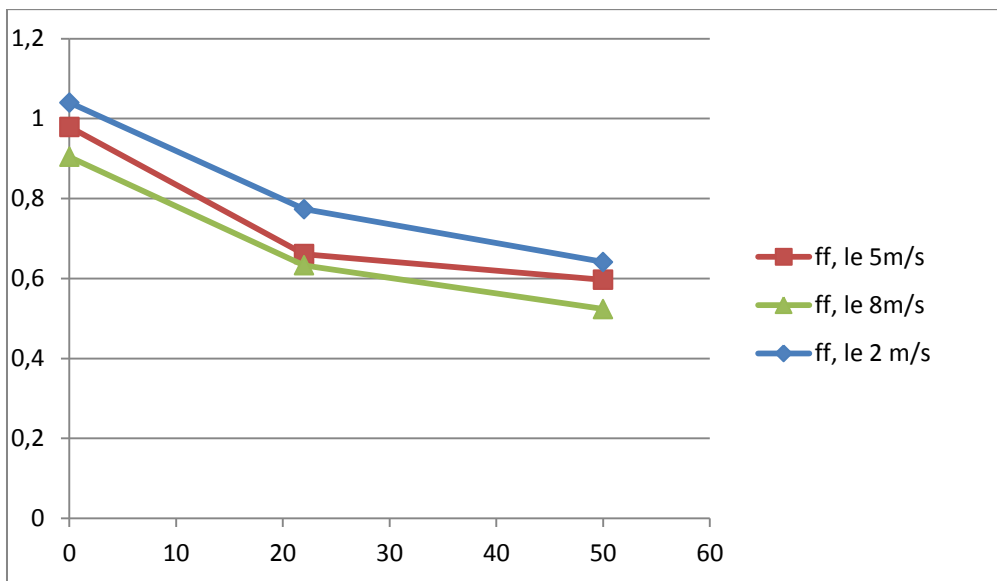
Tallene som er hentet ut er gjennomsnittlig snødybde for hver takflate. Dette er tilstrekkelig siden standardene vi ser på fordeler drivsnølasten over hele takarealet.

Den tradisjonelle formfaktoren er normalisert i forhold til marklast.

For flate tak er det kun en verdi for taklast, det vil si at formfaktor l_0 og formfaktor l_e er den samme.

Terskefriksjonshastighet 0,3m/s

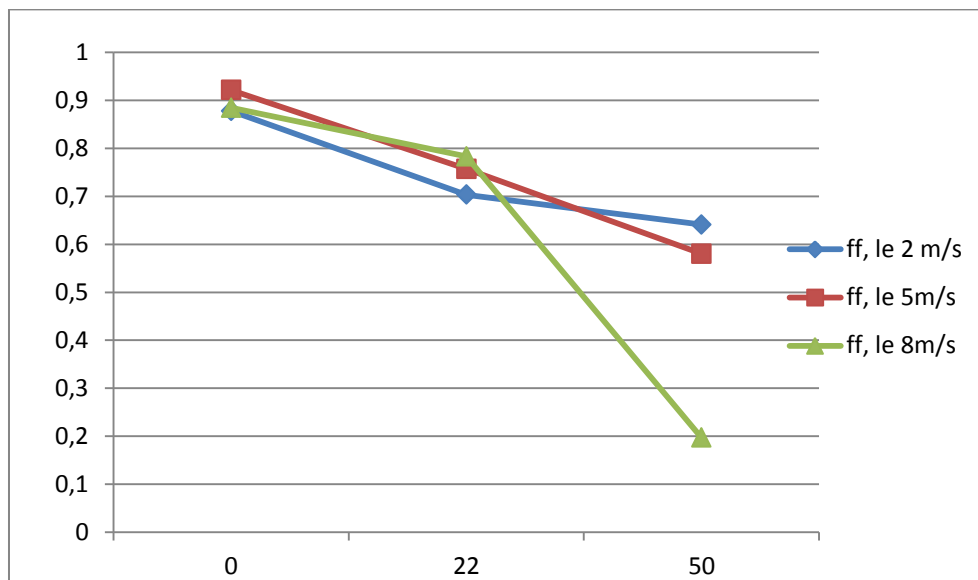
Figur 34: Viser formfaktorer (ff) (y-aksen) for lo side normalisert i forhold til marklast for ulike takvinkler (x-aksen) og vindhastigheter.



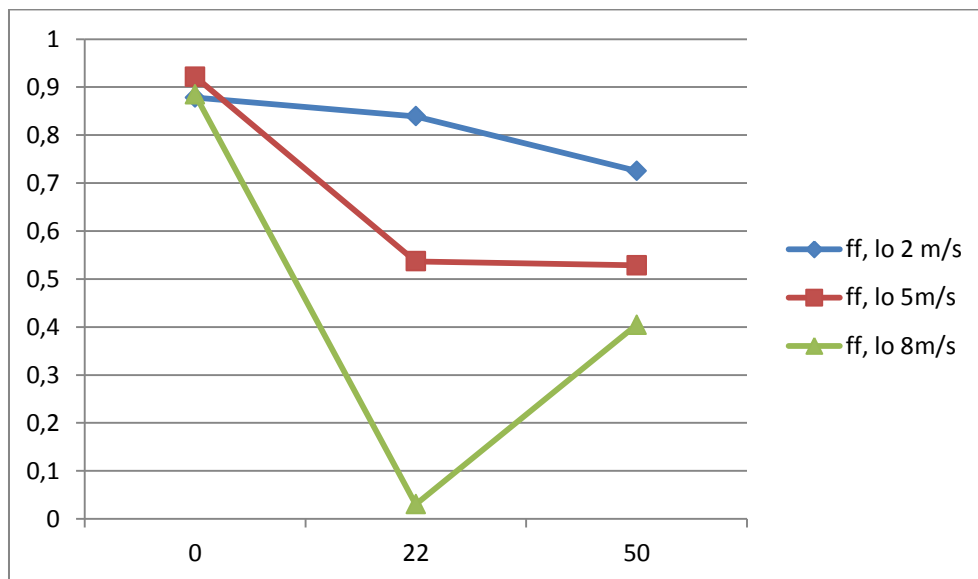
Figur 35: Viser formfaktorer (ff) (y-aksen) for le side normalisert i forhold til marklast for ulike takvinkler (x-aksen) og vindhastigheter.

Økende vindhastighet gir lavere formfaktor. Særlig losiden på taket med vinkel 22° peker seg ut for den høyeste vindhastigheten.

Den store snøakkumulasjonen på losiden er noe overraskende.

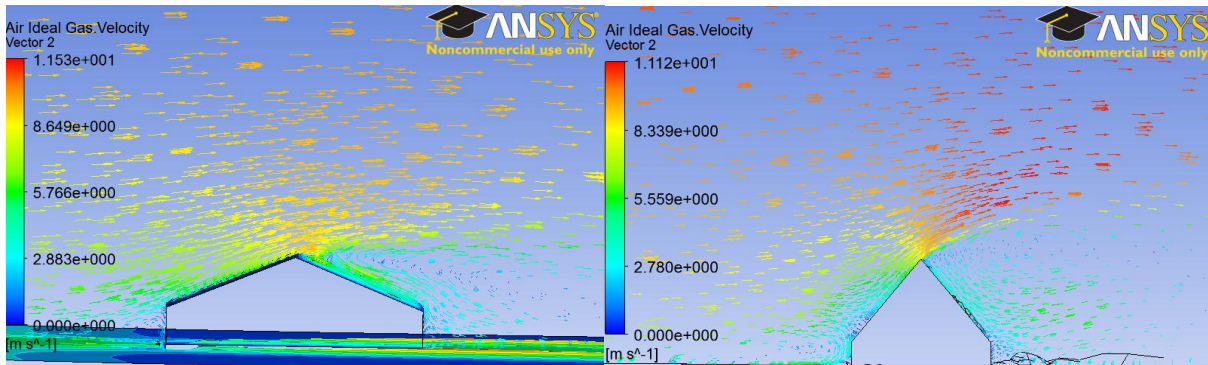
Terskelfriksjonshastighet 0,2m/s

Figur 36: Viser formfaktorer (y-aksen) for le side normalisert i forhold til marklast for ulike takvinkler (x-aksen) og vindhastigheter.



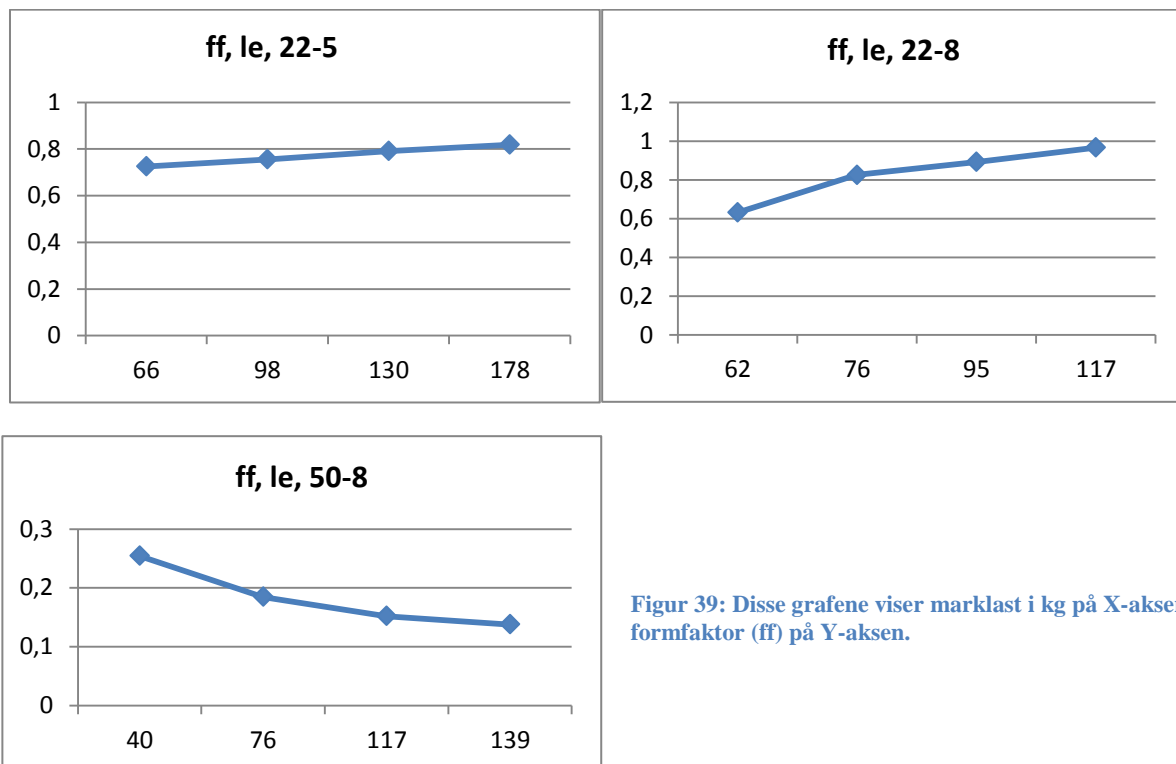
Figur 37: Viser formfaktorer (y-aksen) for lo side normalisert i forhold til marklast for ulike takvinkler (x-aksen) og vindhastigheter.

Lavere terskelfriksjonshastighet gjør at erosjonen vinden forårsaker øker og dermed blir mer snø redistribuert. For takvinkel 22° er snøakkumulasjonen på losiden nesten lik 0 ved den høyeste vindhastigheten 8 m/s. For takvinkel 50° akkumuleres veldig lite snø på lesiden av taket for vindhastighet 8 m/s.



Figur 38: Viser strømningshastighet midt på bygget og resirkulasjonssone bak mønet. Vindhastighet i 10 m høyde er 8 m/s.

Figuren over til høyre kan forklare den lave formfaktoren for lesiden av taket med 50° vinkel, og vindhastighet 8 m/s. Hastigheten over mønet er så stor at snøpartiklene som kommer over vil passere hele takflaten og heller avsettes på bakken i bygningens lesone.



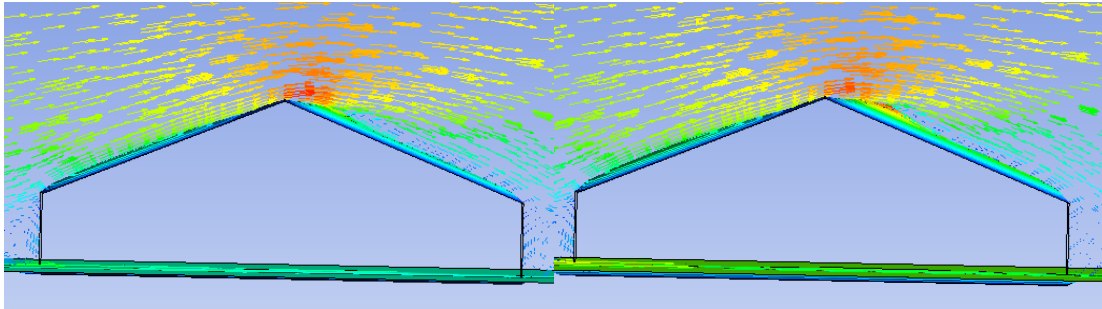
Figur 39: Disse grafene viser marklast i kg på X-aksen og formfaktor (ff) på Y-aksen.

Det disse grafene viser er at det for tak med helling 22° er tiltagende formfaktor for økende marklast og at det motsatte er tilfelle for tak med 50° vinkel.

Dette kan delvis forklares med at når fonnens høyde vokser vil arealet der snø avsettes i bakkant av fonnen vokse. Med et større areal vil mer snø avsettes. Dette varer fram til taket begynner å bli fylt opp.

Da minker fangstprosenten og mere av snøen vil passere hindringen bygningen representerer. Dette gjelder for bygningen med 22° takvinkel.

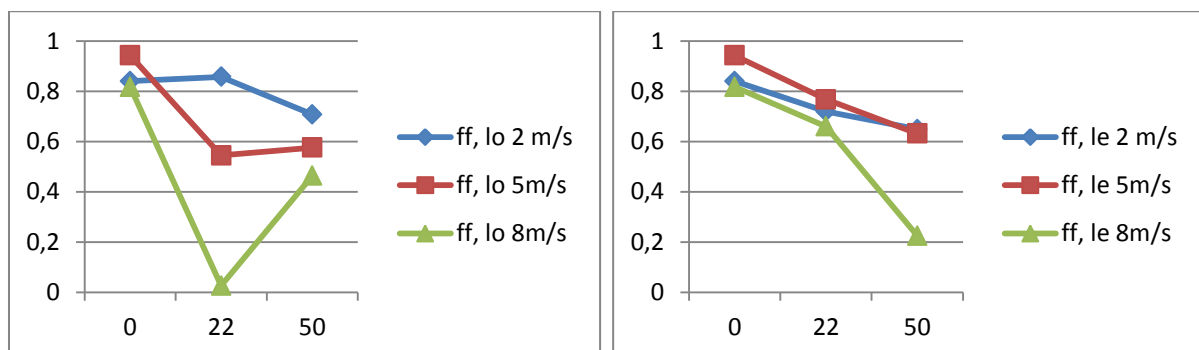
For bygningen med 50° takvinkel dannes det ikke en lefonn med resirkulasjonssone som på bygningen med 22° takvinkel, og dermed skapes heller ikke denne effekten.



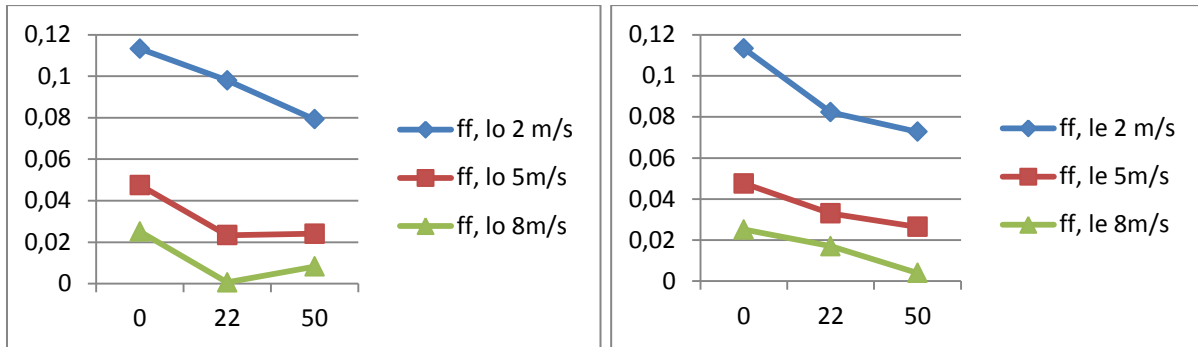
Figur 40: Etterhvert som fonnens høyde vokser vil arealet der snø avsettes i bakkant av fonnens vokse. Når taket begynner å bli fylt opp minker fangsten av snø.

4.2.1.2 Formfaktor normalisert i forhold til nedbør

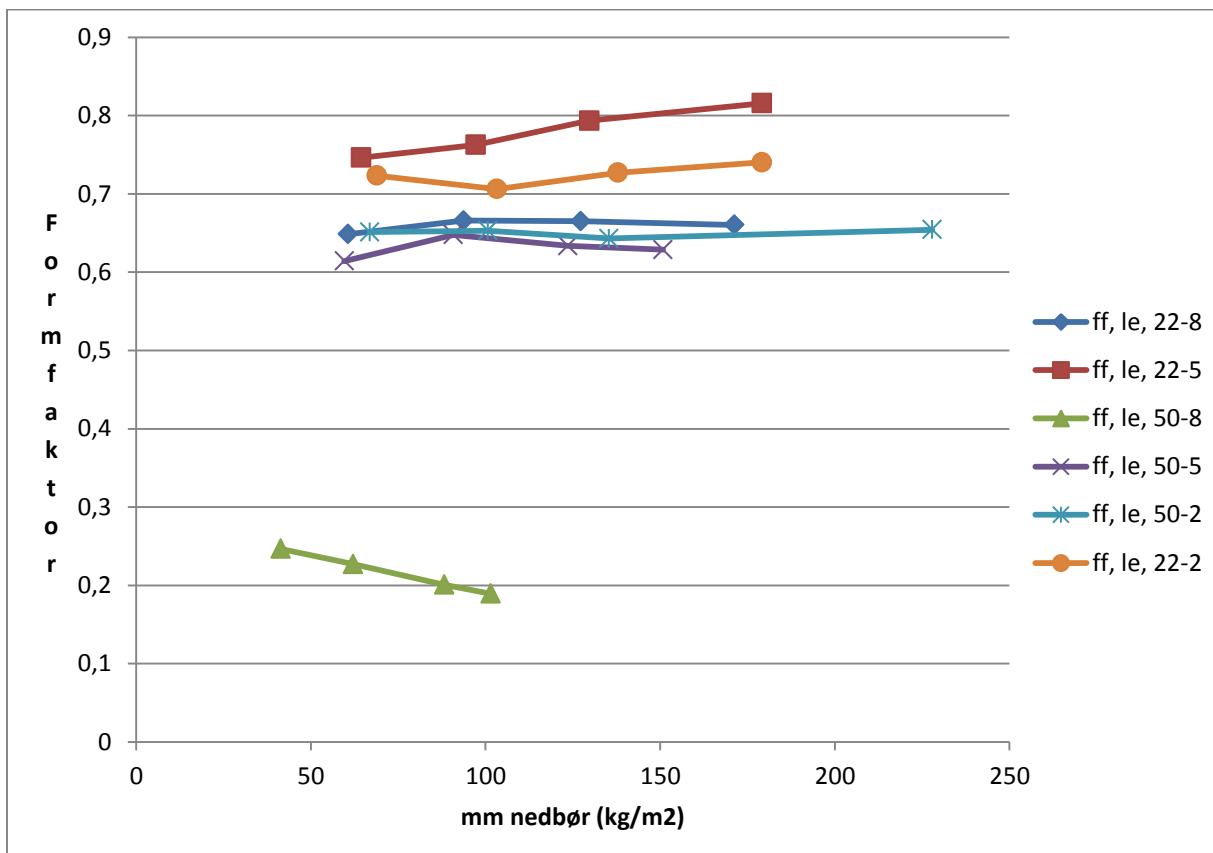
Terskefriksjonshastighet er her fortsatt $0,2$ m/s, noe som tilsvarer tørr, lett nysnø. Her er formfaktoren normalisert mot henholdsvis vertikal og horisontal nedbør i stedet for marklast som tidligere. Noe av motivasjonen for å gjøre dette er en usikkerhet knyttet til marklastverdiene som er benyttet til normalisering mot marklast, særlig for terskefriksjonshastighet $0,2$ m/s og høy vindhastighet. Mye snø vil da kunne bli relokalisert av vinden og av den grunn kan marklastverdier som representerer den faktiske nedbøren være vanskelig å finne.



Figur 41: Formfaktoren normalisert med hensyn på vertikal nedbør ligner mye på formfaktoren normalisert med marklast. Takvinkel på x-aksen.



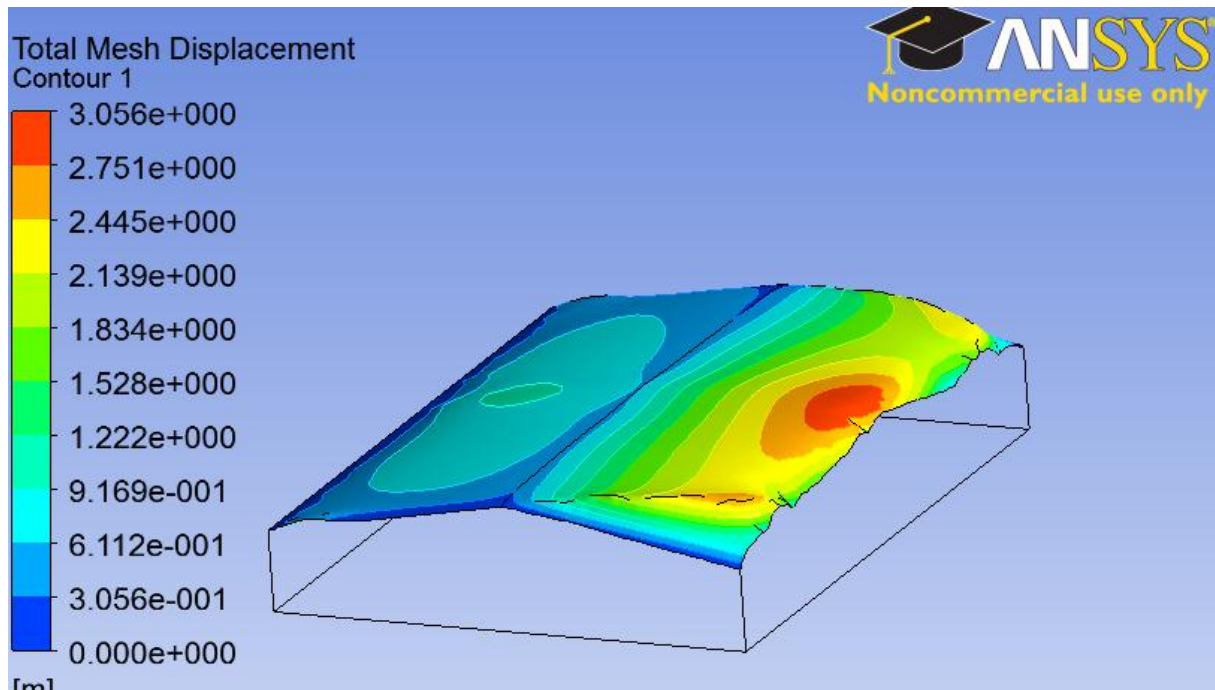
Figur 42: Formfaktor normalisert i forhold til horisontal nedbør. Takvinkel på x-aksen.



Figur 43: Formfaktor normalisert i forhold til vertikal nedbør for ulike takvinkler vindhastigheter.

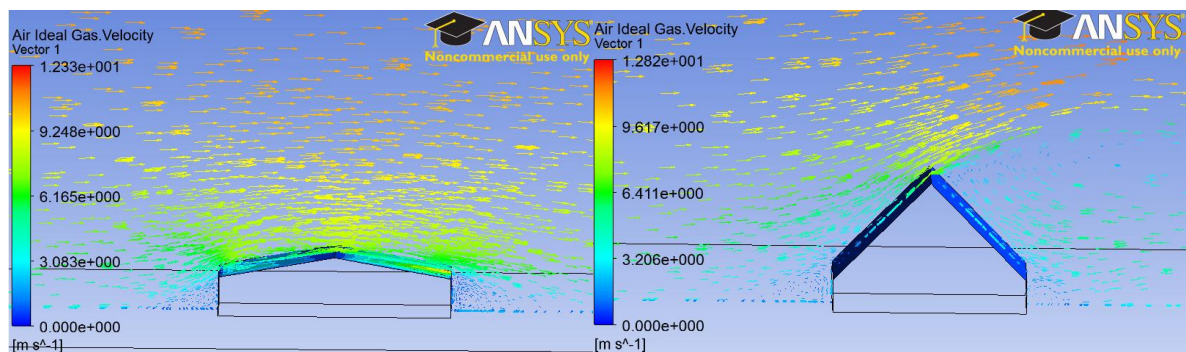
På figuren over der formfaktor for saltakenes leside med de ulike vindhastighetene er samlet i ett koordinatsystem er det særlig 50-8 som stikker seg ut.

4.2.1.3 Skjevlaster



Figur 44: Bygning med bredde 30 m, lengde 40 m, takvinkel 10° og vindhastighet 8 m/s. Største snødybde på lesiden er over 3 m. Fordelt over hele takflaten på lesiden tilsvarer dette 1,32 m, tilsvarende for losiden er 0,41 m.

Bildet over viser et tak med lav vinkel der symmetrifaktoren er 3,18. Det er verdt å merke seg at det ikke forekommer ras i simuleringene. I praksis ville nok noe av kanten ha rast av her.

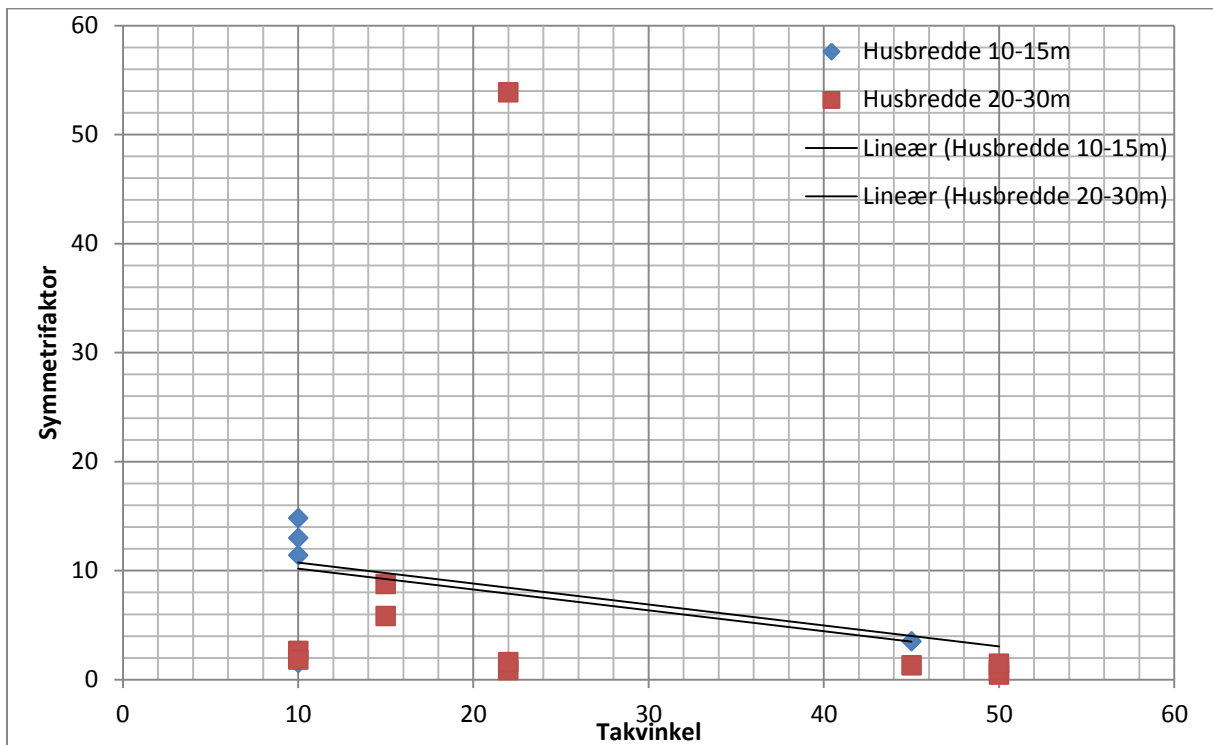


Figur 45: Disse to bildene viser strømmingene over tak med 10° og 45° vinkel.

Noe som også er interessant som er observert er at det ikke skapes en fullstendig resirkulasjonssone rett bak mønet på tak ved lav vinkel, her 10° . Luftstrømmen følger takflaten. Dette betyr at fonnen i større grad bygger seg opp over hele taket på en gang, i stedet for som ved brattere vinkler der fonnen bygges opp øverst på taket i starten for så å

“vokse” nedover takflaten. Se forøvrig figur 38 (4.2.1.1) for illustrasjon av resirkulasjonssonen på tak med 22° vinkel.

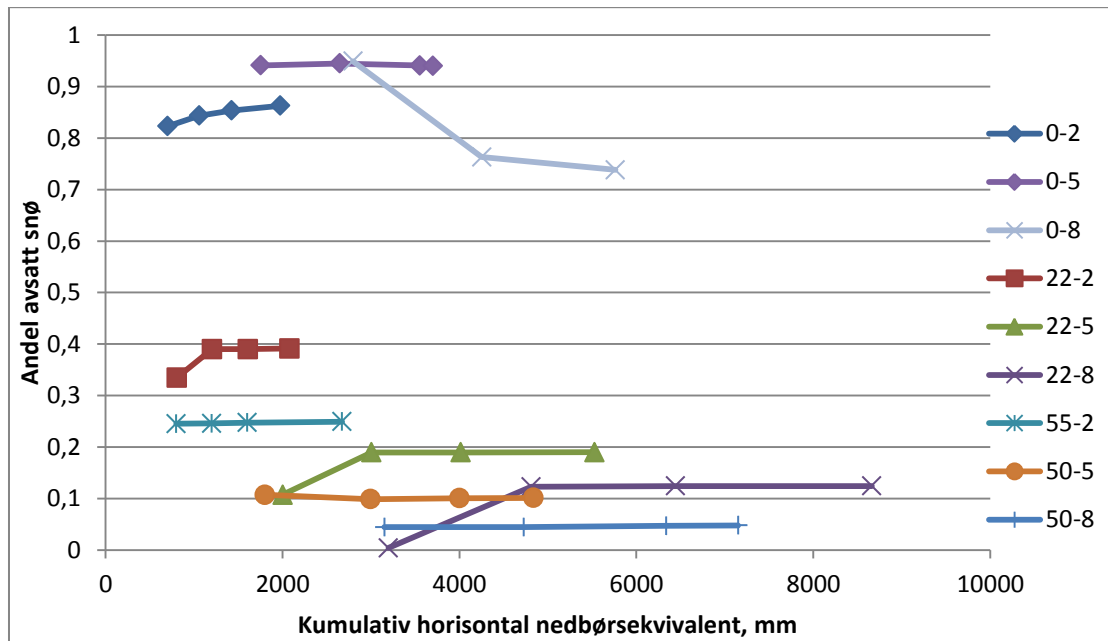
Dette er ikke i overenstemmelse med de 2D-data jeg har sett på, der også takvinkel 10° viste resirkulasjonssone, men stemmer med kommentarer Jan Potac fikk på sin artikkel om slike tak.



Figur 46: Symmetrifaktor delt i to klasser for husbredde.

Simuleringsresultatene viser mange tilfeller av symmetrifaktor på over 5, og med en ekstremverdi på 54 som stikker seg klart ut. Trendlinjene viser tydelig avtagende tendens for symmetrifaktor med økende takvinkel.

4.2.2 Fangsteffektivitet



Figur 47: Fangsteffektivitet for de ulike taktypene med ulik opptredende vindhastighet, plottet mot kumulativ horisontal nedbørsekvivalent.

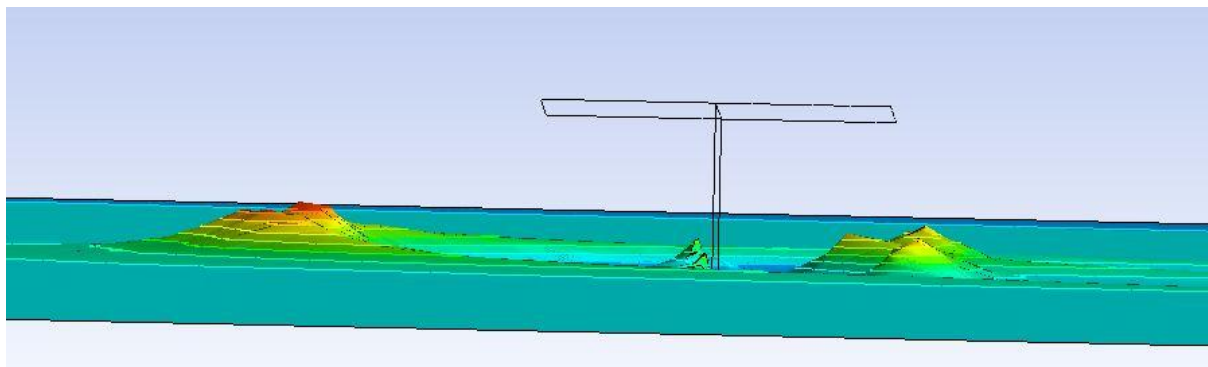
Fremgangsmåten for denne beregningen er beskrevet i kapittel 3.6. Bratt takvinkel og lav vindhastighet gir stort vertikalt fangstareal. Høy vindhastighet gir lav fangstprosent.

Den store forskjellen i areal som benyttes for å kalkulere potensiell masse for akkumulasjon gir store utslag.

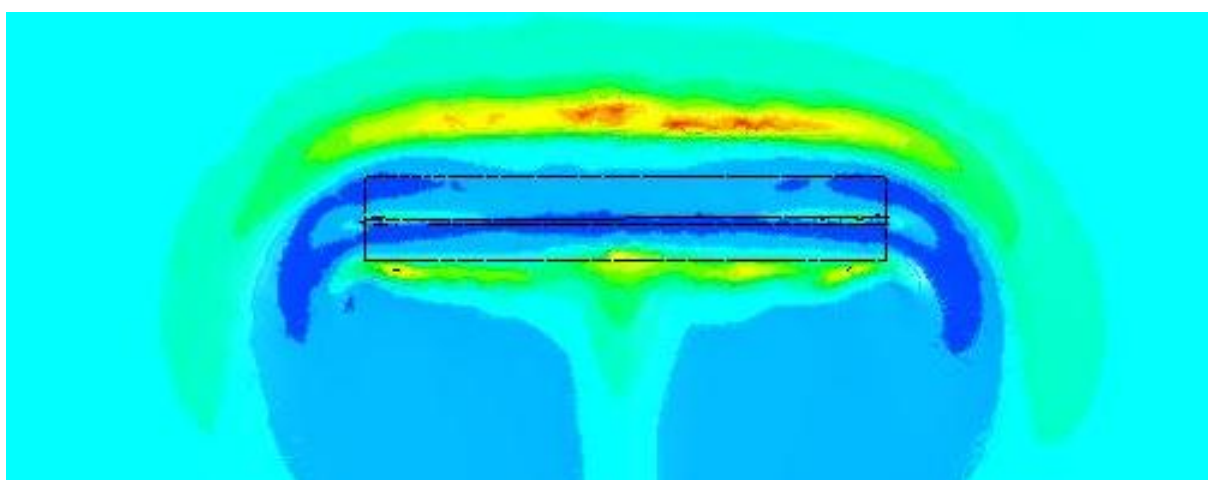
4.2.3 Flernivåtak

Fra skalaforsøkene har vi resultater som viser at området under takoverhenget blir oppfylt av snø i betydelig grad ved høye vindhastigheter. Lengden på fonna er også stor i forhold til det som er omtalt over, opptil 4,2 m eller nesten 7H (T3). Høyden er derimot mindre med maksimalverdier opp mot 0,9 H (L_O).

På grunn av store problemer under simuleringen av T-modellen med snøprofil basert på måledata fra Finse, foreligger det ikke endelige resultater her. Som det kan ses er det imidlertid stor likhet mellom figur og måledata når det gjelder fonna størrelse og plassering i tidlig stadium på både le- og loside.

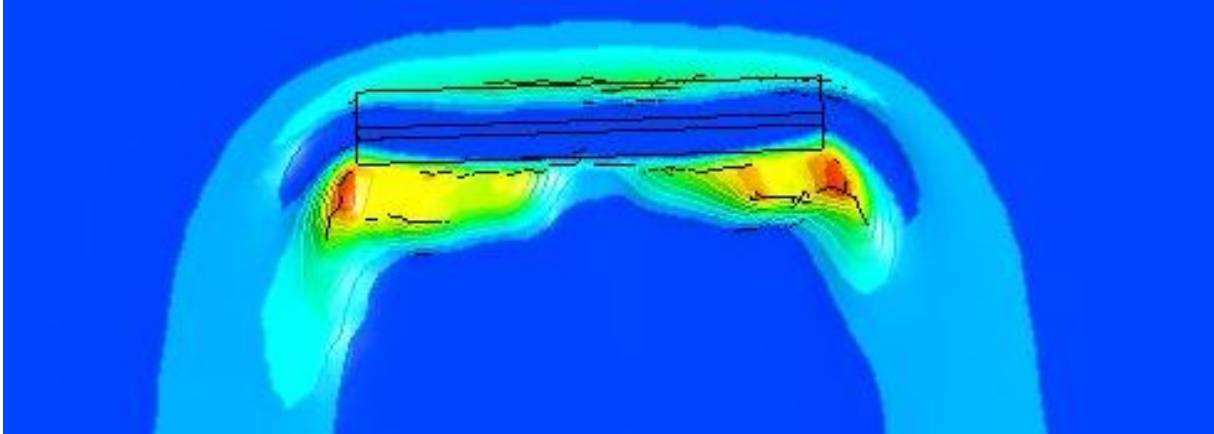


Figur 48: Deformasjonene, det vil si fonnene, her er vist med skala 2:1, mens selve modellen er i 1:1. Maks snødybde er med andre ord 10 cm.

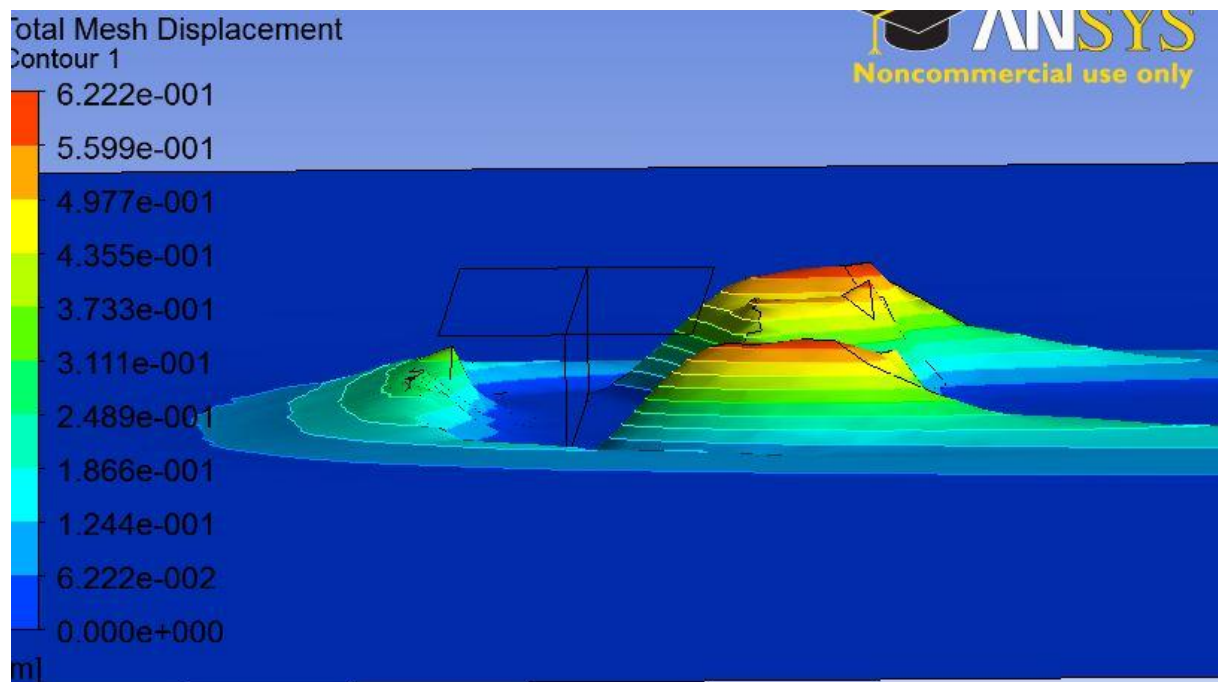


Figur 49: Fonnens form.

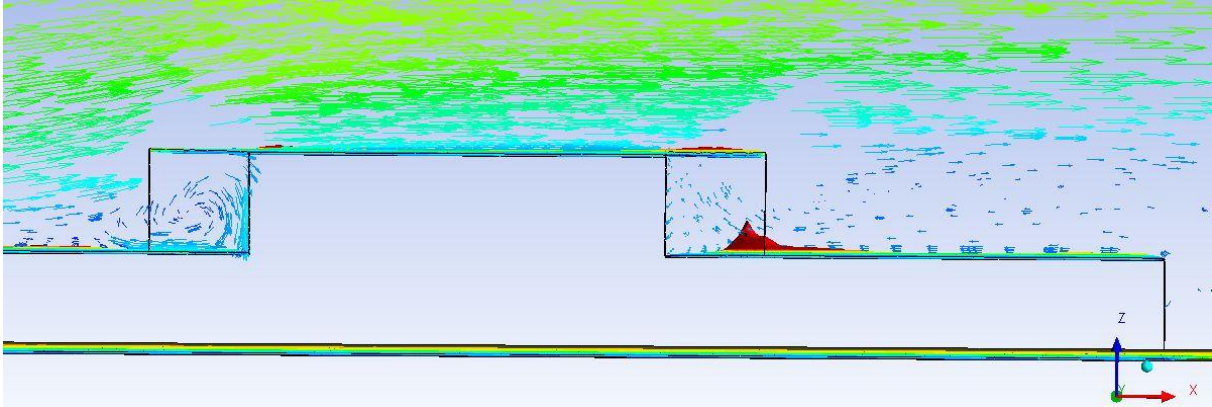
For simulering uten snøprofil og med noe lavere vindhastighet var det mulig å få resultater for velutviklede fonner, men erformlikheten er liten. Toppen av fonnen ligger godt utenfor takutstikket og det er nesten ingen fonn bak midten av modellen. Det ble observert liknende tendenser på Finse, men på langt nær så karakteristisk som her.



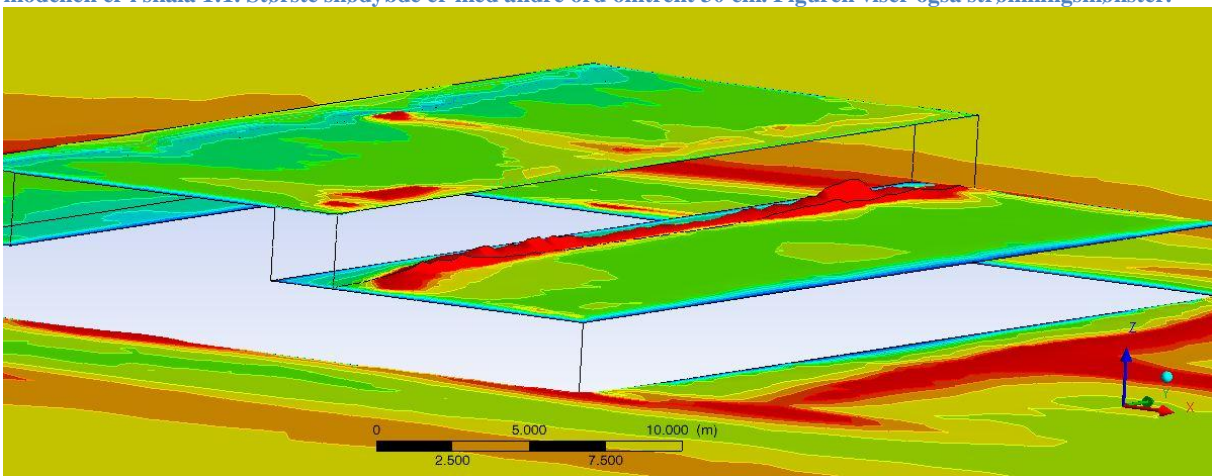
Figur 50: Fonnens form.



Figur 51: Fonnens høyde.



Figur 52: Modell stor med takoverheng lik nivåforskjellen, 2,4 m. Deformasjonen, snøfonnen, er i skala 2:1, mens modellen er i skala 1:1. Største snødybde er med andre ord omtrent 30 cm. Figuren viser også strømningsmønstre.



Figur 53: Modell stor med takoverheng lik nivåforskjellen, 2,4 m, tilsvarende som over, sett fra en annen vinkel. Deformasjonen er også her i skala 2:1.

Som for T-modellen med vindprofil ble simuleringene av disse fullskalabygningene avsluttet på grunn av tidsmangel forårsaket av problemer med simuleringen.

Det kan forøvrig nevnes at det på Finse ved målinger og visuell observasjon ble registrert minimale endringer på fonnen i perioder med nedbør kombinert med sterk vind. Det var da heller ingen endring i referansesnødybde. Det betyr at nesten all snøen ble transportert bort av vinden.

5 Diskusjon

5.1 Generelt

Som nevnt i innledningen er returperioden for marklastene kraftig økt de siste tiår. Vi kan si at standarden har endret prinsipp fra at snøfjerning på tak nesten skal være rutine til at takene skal klare seg uten snøfjerning. Bare ekstreme snøfall som forekommer hvert 50-ende år skal kreve mekanisk fjerning av snø. Fra å være noe vanlig blir dette en jobb som må gjøres to ganger i løpet av 100 år, et tidsrom som ikke er langt unna dagens faktiske gjennomsnittlige levetid for bygninger.

Kollaps under fjerning av snø er ikke ukjent, dette skjer når snøfjerningen gjøres ubalansert og skjevlaster oppstår. Så endringen er til det gode. Det gir også stor økning i sikkerhet i mer normale vintre.

Ulike forhold belyst i oppgaven gjør at man kan stille spørsmål ved eurokodens anbefalte snødensitet på 2 kN/m^3 . Med en økning til 3 kN/m^3 vil man komme på linje med de andre standardene omtalt i denne oppgaven. Det vil gi en mer riktig fremstilling av drevet snø, siden det er for drivsnø densiteten i hovedsak blir benyttet til lastberegninger.

Den jevnt fordelte lasten beregnes fra karakteristisk marklast som allerede er gitt i kN/m^2 .

Flertallet av Norges bygninger er bygget for snølast med returperiode på inntil 5 år. Det bør vurderes en merkeordning for snølast for disse ved omsetning på linje med for eksempel energimerkeordningen.

5.2 Saltak

På en virkelig bygning med noe skiftende vindretning rundt den dominerende vindretningen vil det trolig skje en viss avsliping av de store fonnene mot gavlene som vi ser CFD-simuleringene gir. Dermed vil ikke disse stemme helt overens med målinger i felt eller det man kan se av foto.

ASCE-standarden (USA) har et lastsystem som skal forestille en virkelig fonn som er ulik etter takvinkel, med en større last ute oppe ved mønet. I NS-EN og ISO 4355 er vekten av drevet last fordelt over hele overflaten på en side av mønet. Dette er en nokså grov tilnærming til virkeligheten, men gir en mer brukervennlig beregningsmetode.

Det kan likevel virke som lastarrangementet slik det er i dag underdimensjonerer skjevfordelingen av snø på vindeksponerte saltak.

Det bør vurderes om man for å få utnytte eksponeringsfaktorene fullt ut må ta hensyn til økt skjevlast. Eventuelt kan det vurderes et punkt i standarden der forhold til fremherskende vindretning tas inn, slik at man for å få utnytte eksponeringsfaktorene må ta hensyn til økt skjevlast hvis bygningen er orientert på tvers av fremherskende vindretning der vindretningen er bestemt av topografi og ikke av vegetasjon.

Det virker som det kan være grunnlag for å stille spørsmål ved om karakteristisk marklast er det rette å bruke som grunnlag for beregning av drivlasten.

5.2.1 Formfaktor

Formfaktoren slik den er i dag virker å gi et for gunstig bilde av snølasten, spesielt for flate tak.

Forholdet mellom karakteristisk marklast og dimensjonerende taklast, det som i oppgaven benevnes formfaktor, er i eksemplene i 2.4.1 og 2.4.2. Med eksponert plassering for begge standardene rundt 0,65 for takvinkel 22°. Dette stemmer bra med simuleringresultatene for høyere vindhastigheter.

For de flate takene derimot, viser resultatene en formfaktor fra i underkant av 0,9 og oppover mot 1. NS-EN vil gi en formfaktor på 0,64 og 0,8 for eksponert og delvis eksponert plassering, mens den for skjermet plassering er 0,96. ISO 4355 vil for eksponert plassering gi

0,8, og er dermed nærmere resultatene enn NS-EN.

Det er tydelig hvordan vinden virker inn, og å la eksponeringsfaktoren og formfaktoren virke sammen som i ISO 4355 virker fornuftig.

Det som fremkommer når det simuleres med terskelfriksjonshastighet 0,3 m/s er at losiden får mer snø enn lesiden selv når det blåser. Den høye terskelfriksjonshastigheten som tilsvarer egenskapene til kram snø fører til at snøen som treffer taket på losiden ikke fraktes videre ved normale vindhastigheter, men stopper her. Det blir dermed en lokal nedbørsskygge bak mønet på bratte tak.

Med terskelfriksjonshastighet 0,2 m/s gir simuleringene et annet bilde. Figuren viser at losiden på et tak med vinkel 22° blåser nærmest helt ren når snøen er tørr og lett.

På et tak med vinkel 50° synes ikke dette å forekomme i samme grad da den bratte takvinkelen bremser vinden såpass mye at den vertikale vindhastigheten ikke blir tilstrekkelig til å løfte snøen over mønet. Det vises på illustrasjonen fra Ansys (figur 38) at dette gjelder særlig nedre halvdel av taket, og det er også her det er en akkumulasjon av snø. Over mønet er vindhastigheten såpass stor at mye av snøen som løftes over her fortsetter forbi lesiden av taket og legger seg på bakken i le av huset.

Når terskelfriksjonshastigheten ble redusert til 0,2 m/s ble det et problem at domenet ikke fikk marklast i den delen som lå etter huset i vindretningen, utenom akkurat i lesonen bak huset, for vindhastighet 8 m/s. Dette tilsvarer observasjonen fra Finse der det ble observert konstant referansesnødybde selv om det snødde når vindhastigheten var høy nok. Dette taler for at normalisering i forhold til marklasten ikke er en metode som er god nok.

Det ble derfor bestemt å prøve normalisering i forhold til andre kriterier.

Et annet interessant fenomen som er oppdaget, og som går på tvers av etablert vitenskap, er at formfaktoren øker med økende marklast på tak med 22° takvinkel. En sannsynlig forklaring på dette er at det etter hvert som snøfonnen bygges opp fra mønet og nedover, øker høyden på lesiden av fonnen slik at arealet der det avsettes snø øker. Dermed øker andelen snø som avsettes her, fangstprosenten går opp.

Når takflaten etter hvert fylles opp vil snøfangsten avta, og grafen vil gå motsatt vei.

Dette vil trolig ikke gjelde på samme måte for tak med 10° vinkel siden resultatene tyder på at det ikke dannes en resirkulasjonssone på samme måte på disse takene.

Heller ikke på 50° tak er det tilfellet det samme. Her avtar formfaktoren med økende marklast. Her utvikles det heller ikke en karakteristisk lefonn, og snøakkumulasjonen er generelt lav.

For figurene som viser formfaktor normalisert i forhold til vertikal nedbør i 4.2.1.2 kan vi se at det er stor formlikhet og verdilikheter mellom disse og figurene for formfaktor normalisert med marklast. Dette viser også at marklastverdiene, som var det største usikkerhetsmomentet ved normalisering til marklast, var representative.

Etter hvert som vindhastighet og eksponeringsgrad øker vil marklasten bli mer usikker, både for feltmålinger og simuleringer. Den økte vindhastigheten vil redistribuere mer snø fra eksponerte områder til lesener dannet av bygninger, topografi eller vegetasjon.

Det kan imidlertid være vanskelig å få gode målinger av vertikal nedbør i felt, når det ikke er vindstille. Da er det enklere å måle den horisontale snøfluksen og dermed horisontal nedbør.

Dette kan gjøres enkelt ved hjelp av de posene som vi benyttet på Finse og som er nærmere beskrevet i kapittel 3.3.

5.2.2 Skjevlaster

Mange av simuleringene gir større symmetrifaktor enn standardene. For eksempel for bygget med takvinkel 10° , bredde 30 m og lengde 40 m er det, når fonnen er fullt utviklet, en last på lesiden over 3 ganger lasten på losiden. For større takvinkler vil dette kunne bli enda større siden det er mer plass før fonnen når mønehøyde og erosjonen går mot deposisjonen. En forutsetning er selvfølgelig rikelig tilgjengelig snø.

Med simuleringsresultatene og måleresultatene fra USA som bakgrunn er det grunnlag for å diskutere om en symmetrifaktor på 2 slik den er i dagens NS-EN, eller enda mindre i ISO 4355, er tilstrekkelig når eksponeringsfaktoren benyttes fullt ut ($C_e=0,8$).

Resultatene fra simuleringen er ikke helt i tråd med måledataene etter H. Høibø, men her er avrasning, tining, mildvær og regn ukjente faktorer. Ut over dette er det verdt å ta med at Høibøs måledata er fra driftsbygninger på Østlandet og i liten grad kan antas å representere ekstremverdier.

Mest usikkerhet skaper motsatt trend for symmetrifaktor sett i forhold til takvinkel. Målingene til Høibø viser økende symmetrifaktor med økende takvinkel, mens simuleringene viser avtagende symmetrifaktor med økende takvinkel. Data fra (O'Rourke & Auren 1996) for tak med vinkel mellom 10° og 45° som er skadet som følge av snølast viser også avtagende symmetrifaktor med økende takvinkel (se vedlegg). Dette er 9 tilfeller, mens det er rundt 1300 registreringer gjort av Høibø.

Noe snø vil alltid i løpet av en vinter falle under vindstille. Hvis denne snøen får ro noen dager, eller blir utsatt for mildvær er det mindre sjanse for senere vinderosjon. Dermed vil losiden sjelden bli helt tømt for snø slik simuleringene viser for kombinasjonen tørr snø, 22° takvinkel og vindstyrke 8 m/s. Likevel viser dataene fra USA at det kan skje, og resultatene kan tyde på at takvinkler i området rundt 20° er ekstra utsatt.

Under store snøfall kombinert med vind og med lite snø på taket fra før er det størst sjanse for at skjevlastene blir større enn det som beskrives av standarden.

Dette bør tas hensyn til når man skal dimensjonere for snølast med 50-års returperiode. Det bør være samme sannsynlighet for maks opptredende drivsnølast som for jevnt fordelt last. Den økonomiske faktoren anses å være underordnet her, siden det allerede er innført 50-års returperiode, og det vil kunne bidra til å skape en falsk trygghet om denne ikke også inkluderer drivlast.

Ren ensidig snølast kan for øvrig også forekomme på glatte tak. Ras fra en takflate grunnet stor last fra drivsnø eller varme fra den lave vårsola kan forårsake dette. Dette vil gi en uendelig stor symmetrifaktor for snølasten.

I høyfjellsstrøk og i høyarktiske områder er det ikke ukjent at snøfonnen kan strekke seg helt fra mønet og fortsette utover terrenget. Dette kan ses på bildene fra Finse. Ofte vil dette opptre i kombinasjon med minimal last på lo side.

På sikt bør en muligens vurdere en overgang fra karakteristisk marklast til horisontalfluks for beregning av snølast. Dette vil gi bedre lokal tilpassing, særlig av drivlasten, og kan bidra til å redusere unødvendig og kostbar overdimensjonering. Dette vanskeliggjøres av en felleseuropeisk standard, slik at endringene ikke kan gjøres av Norge alene. Det er også nødvendig å innhente en stor mengde måledata.

En mulig løsning er å innføre i standarden et punkt som sier at på særlig utsatte steder må situasjon (iii) ensidig snølast påføres konstruksjonen slik som det er gjort for buetak i det nasjonale tillegget for Norge. Dette kan eventuelt begrenses til de takvinklene som er mest utsatt hvis videre undersøkelser finner en slik sammenheng.

Et annet alternativ er å redusere reduksjonsfaktoren som i NS-EN i dag benyttes for losiden fra 0,5 til 0,2.

For ISO 4355 er det allerede en drivsnølast som legges til. Det bør også her gjøres noe og i første omgang kan man innføre på samme måte som i NS-EN en reduksjonsfaktor på for eksempel 0,3 for losiden for bruk i kombinasjon med eksponeringsfaktor 0,8 slik at større skjevlaste blir ivaretatt.

5.2.3 Fangsteffektivitet

Formfaktoren for tilfellet 22° takvinkel, vindhastighet 8 m/s og 0,2 m/s terskelfriksonshastighet tydet på først en økning i og så avtagende fangsteffektivitet. I 4.2.2 er fangsteffektiviteten forsøkt gjengitt, her ses en mer lineær utvikling etter en økning i starten for dette taket.

Bildet grafen gir er brukbart for sammenligningen mellom ulike vindhastigheter for samme takvinkel. Om den er like godt for å sammenligne mellom takvinklene er diskutert. Måten det vertikale arealet som det potensielt kan fanges opp snø fra blir beregnet på gir mye større areal for bratte tak enn for tak med slakere vinkel. Økt fallvinkel for snøpartiklene gir også større areal, og det som gir stor fallvinkel er lav vindhastighet og høy densitet.

De ulike formfaktorene viser samme tendens som fangsteffektiviteten, men det er større forskjell i fangsteffektivitet enn for formfaktor for de ulike takene på grunn av beregningsmetoden.

Formfaktoren normalisert med horisontal nedbør er beregnet med nedbørsekivalent i horisontal retning i forhold til akkumulert nedbørsekivalent på taket.

Fangsteffektivitet i figur 47 er beregnet som massen av nedbør for et bestemt areal og er et forsøk på å fremstille fangsteffektiviteten på lignende måte som Tablers metode for snøgjerder. At bygninger har mye større utstrekning i vindens retning enn snøgjerder gjør at partikkelens fallvinkel har stor betydning for hvor mye snø som kan akkumuleres. Modellen overbeviser ikke, og ved fremtidig omlegging av beregningsgrunnlag for drivsnølaster anses formfaktoren i forhold til horisontalfluks som et bedre verktøy enn takets fangsteffektivitet slik den er beregnet i 4.2.2.

5.3 Flernivåtak

Den kanadiske undersøkelsen nevnt i 2.2.2 viste til at fonn lengden vanligvis ikke overgår to ganger nivåforskjellen. Unntaket er for de lave nivåforskjellene under 2,2 m.

NS-EN angir en fonnsutstrekning som er felles for ras fra ovenforliggende tak og drevet snø. Denne er lik 2H begrenset nedad til 5 m og oppad til 15 m, noe som virker meget fornuftig. ISO-standarder har egen utstrekningsberegning for drevet last alene som er det som er interessant her. Den er basert på lastens størrelse og begrenset oppad til 15 m.

Sammenlignet med Finse-forsøkene kan det se ut som om utstrekning på 2H er lite, siden høydeforskjellen på 62 cm ga en fonn med utstrekning på ca. 4,2 m, noe som er 7 ganger nivåforskjellen, men NS-EN er på sikker side med sin minsteutstrekning på 5 m.

Takutstikk ser ut til å ha effekt på fonnens plassering. I stedet for at fonnens topp nærmer seg veggen når fonnen går mot høyde tilsvarende nivåforskjellen slik (Kyllingstad & Saltveit 2009) fant for sine målinger på såkalte skilt, går den mot en avstand fra veggen tilsvarende 80 % av takutstikkets lengde. Siden dette forekommer på modeller med ulik vegghøyde og ulikt takutstikk er det grunn til å tro at det også kan gjelde for tilfeller med større vegghøyde. Hva som skjer når lengden på takutstikket blir betydelig mindre enn vegghøyden er ikke kjent.

På en fullskalabygning vil det meste av snøen komme fra takets øvre nivå. En viss vegghøyde fra lavereliggende nivå og ned til bakken vil bidra til å redusere transporten av snø inn fra enden slik som det ble observert på T2.

Det finnes ikke grunnlag i undersøkelsene for å anta volumreduksjon av lefonnen. Dette kan undersøkes videre.

Plassering lengre ut på taket kan bety plassering lengre ut på konstruksjonens bjelkespenn og dermed gi økte momentkrefter.

På grunnlag av dette er det liten sannsynlighet for at store takutstikk over lavereliggende tak kan forsvares økonomisk grunnet lettere takkonstruksjon for lavereliggende tak. Kanskje nettopp på grunn av faren for større momentkrefter enn forutsatt er resultatene som foreligger likevel interessante og viser at dette er en aktuell problemstilling som bør undersøkes videre.

Figur 52 og 53 viser fonnen i en tidlig fase i et fullskalatilfelle. Fonnens plassering gir grunnlag for å tro at sammenhengen som ble funnet i måledata fra feltforsøket også gjelder for lignende tilfeller i større skala.

5.4 Feilkilder

Det er først og fremst simuleringen som er beheftet med mange mulige feilkilder. Modellen som er benyttet er anerkjent og validert tidligere, men kan likevel ha sine svakheter. Derfor må ikke resultatene ses på som en fasit.

Måledata vil være mer virkelighetsnære, men lokale forhold og vind- og værforhold i måleperioden vil påvirke resultatene. Når det nå benyttes 50-års returperiode er veldig lange måleserier på fullskalabygg nødvendig for å gi et representativt bilde. Med den økende endringstakten i klima som vi trolig står ovenfor vil værforholdene endres raskere. Måledata kan dermed være som utdatert å regne når måleserien er over. Likevel, hovedtrekkene for akkumulasjon av snø på tak vil ikke endre seg.

Skalamodeller gir raskere resultater, men skalaeffekter kan opptre og det er ikke sikkert resultatene kan overføres direkte til fullskalatilfeller.

Det som vi opplevde på Finse med en liten vinddreining i løpet av natten som gjorde at lefonnen minket og fikk ujevn form er et problem. God instrumentering vil redusere risikoen for at slike feilkilder påvirker resultatene.

Noen av de største feilkildene for simuleringene som er kjent er mangelen av ras på bratte fønner.

Min manglede kjennskap til fluiddynamikk, Ansys CFX og numeriske simuleringer generelt kan ha bidratt til å øke faren for mulige feilkilder i simuleringene.

En svakhet med analysen sett i ettertid er at det også skulle vært inkludert et tak med vinkel mellom 10° og 15° .

6 Konklusjon

Det ene formålet med oppgaven var å undersøke om formfaktorer og symmetrifaktorer for saltak og flate tak i ISO 4355:1998 og NS-EN 1991-1-3:2003+NA:2008 er gode nok for dagens situasjon.

Det andre formålet var å prøve å gi en beskrivelse av forhold som opptrer i lesenen når flernivåtak har store takutstikk og se om disse avviker mye fra de forhold standardene beskriver uten takutstikk.

For saltak tyder resultatene i oppgaven på at symmetrifaktoren som fremkommer av lastsituasjonene som benyttes i NS-EN og ISO 4355 er for lave. For formfaktoren står resultatene bedre i stil med standardene, men også her kan det være forbedringspotensial. En optimalisering bør kunne være mulig uten at standardene blir for kompliserte i bruk.

Oppgaven viser at det kan være noe å vinne på videre arbeid med disse problemstillingene ved hjelp av dataverktøy.

Det er spesielt kombinasjonen av høye marklaster og vindeksponering av tak med vinkel mellom 10° - 36° som bør undersøkes videre, og særlig interessant vil det være å undersøke om det er større sjanser for minimal akkumulasjon av snø på losiden på tak med vinkel rundt 20° enn for andre takvinkler.

Det ser ut som skjevbelastningen her kan bli betydelig større enn forutsatt, kombinert med at dette er vanlige takvinkler som benyttes på de fleste hus med saltak gjør det til et viktig tema.

Studiene av flernivåtak gikk ikke helt som planlagt, og det foreligger ikke brukbare simuleringsresultater.

Måledataen viser at takutstikk har effekt på fonnens plassering, men det finnes ikke grunnlag for å si at totalt volum reduseres.

Fonnens toppunkt får en avstand fra veggen på 80 % av takutstikkets lengde.

Siden dette forholdet ser ut til å gjelde for de ulike modellene i feltforsøket er det grunn til å tro at sammenhengen også gjelder for andre lignende geometrier. Simuleringen av tilfellet

med 4 x størrelse på vegghøyde og takoverheng som viser fonnen i en tidlig fase styrker denne påstanden.

Det bør forskes videre på takutstikk og snøfonner med tanke på effekten takutstikkene kan ha på fonnens plassering, slik at takutstikkets innvirkning kan innføres som et moment i standardene når kunnskapen om fenomenet er tilstrekkelig.

Med manglende simuleringer av fullskala takoverheng og ingen måledata eller simuleringresultater der takoverhenget er mindre enn vegghøyden H er det ikke grunnlag for ytterligere konklusjoner.

Drivsnølaster bør beregnes ut fra horisontal snøfluks. Standardene bør ved neste korsvei inkorporere dette.

Den modellen for snøfangsteffektivitet for ulike takvinkler som ble utprøvd i denne oppgaven viste seg lite egnet.

Numeriske simuleringer har vist seg å være et godt verktøy brukt med fornuft, særlig som et supplement til tradisjonelle metoder. Verifisering ved sammenligning med måledata fra feltstudier er et godt prinsipp.

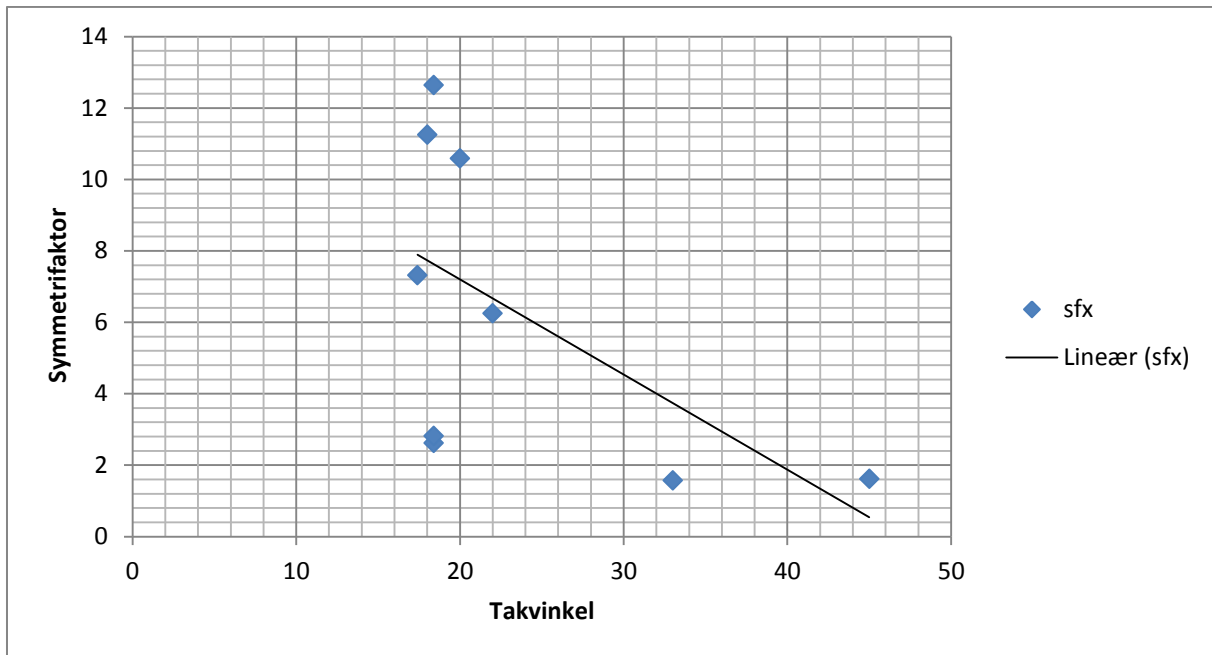
Større forkunnskaper i fluiddynamikk og numeriske simuleringer hadde vært å foretrekke i arbeidet med denne oppgaven.

7 Litteraturliste

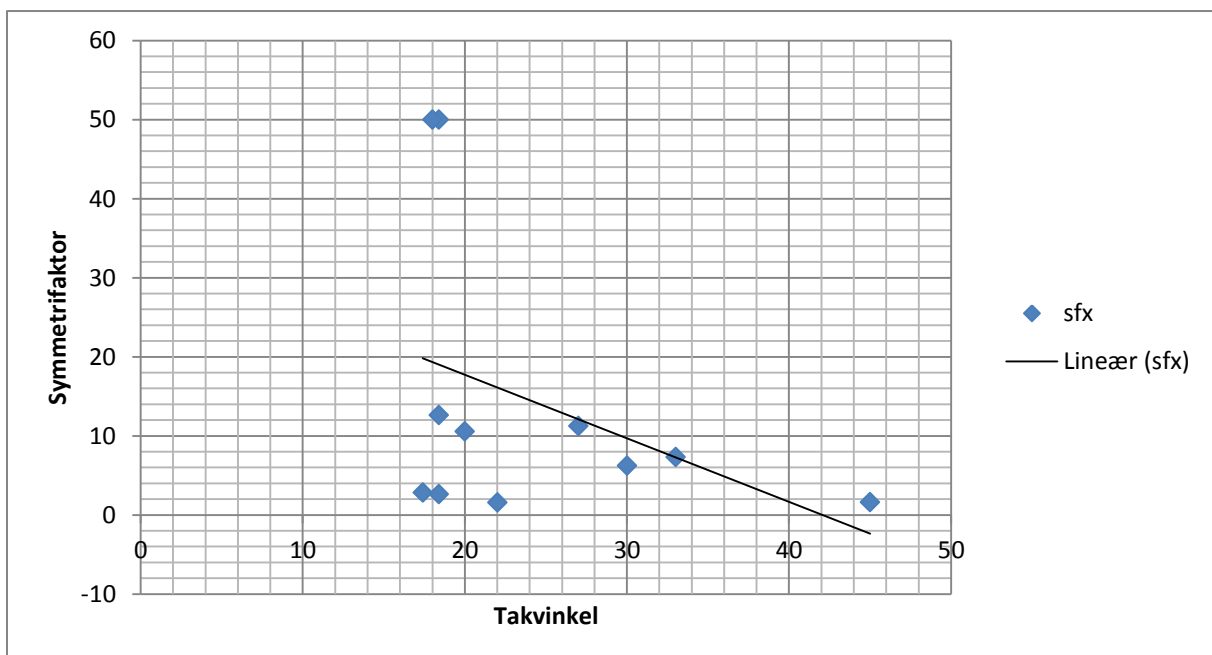
- Ansys, I. (2010). *Ansys CFX-Solver Theory Guide*, b. 13. Canonsburg, PA: Ansys, Inc.
- ASCE. (2005). *ASCE 7 -05. Snow Loads*.
- Canada, N. B. C. o. (2005). *NBC 2005. Commentary G -Snow Loads, G-1: National Building Code of Canada*. 17 s.
- DOORSCHOT, J. J. J., LEHNING, M. & VROUWE, A. (2004). Field measurements of snow-drift threshold and mass fluxes, and related model simulations. *Boundary Layer Meteorology*, 113: 21.
- Dyrrdal, A. V. (2010). Analysis of past snow conditions in Norway -Time periods 1931-60, 1961-90 and 1979-2008. Oslo: Norwegian Meteorological Institute. 32 s.
- Font, D., Mases, M. & Vilaplana, J. M. (1998). Experimental mass-flux measurements: a comparison of different gauges with estimated theoretical data. *Annals of Glaciology*, 26 (1): 6.
- Gordon, M. & Taylor, P. A. (2007). Measurements of blowing snow, Part I: Particle shape, size distribution, velocity, and number flux at Churchill, Manitoba, Canada. *Cold Regions Science and Technology*, 2009 (55): 11.
- Haehnel, R. B. & Lever, J. H. (1994). *Field Measurements of Snowdrifts*. ASCE/ISSW Workshop on the Physical Modelling of Wind Transport of Sand and Snow, Snowbird, UT.
- Kyllingstad, S. & Saltveit, T. (2009). *EN SAMMENLIGNING OG EVALUERING AV DRIVSNØLASTER I SNØLASTSTANDARDENE EN-1991-1-3 OG ISO-4355 -MÅLINGER, SIMULERINGER OG FORSLAG TIL NYTT FORMELVERK.*: Universitetet for Miljø- og Biovitenskap, Institutt for matematiske realfag og teknologi. 150 s.
- Mellor, M. (1965). *Section A3c BLOWING SNOW*. Cold Regions Science and Engineering Part III. Hanover New Hampshire: US Army Materiel Command, Cold Regions Research & Engineering Laboratory.
- Meløysund, V., Liso, K. R., Siem, J. & Apeland, K. (2006). Increased snow loads and wind actions on existing buildings: Reliability of the Norwegian building stock. *Journal of Structural Engineering-Asce*, 132 (11): 1813-1820.
- Meløysund, V. (2010). *Prediction of local snow loads on roofs*. Trondheim og Oslo: NTNU, Norwegian University of Science and Technology (NTNU) and SINTEF Building and Infrastructure. 130 s.
- met.no. (2011). Meteorologisk institutt. Tilgjengelig fra: <http://met.no/Klima/Klimastatistikk/Klimanormaler>.
- Naa'im, M., Naa'im-Bouvet, F. & Martinez, H. (1998). Numerical simulation of drifting snow: erosion and deposition models. *Annals of Glaciology*, 26 (26).
- Nishimura, K. & Nemoto, M. (2005). Blowing snow at Mizuho station, Antarctica. *Philosophical Transactions of The Royal Society*, 365: 17.
- Norge, S. (2003; 2008). *NS-EN 1991-1-3:2003+NA:2008 Eurokode 1: Laster på konstruksjoner Del 1-3: Almenne laster Snølaster*.
- O'Rourke, M. J. & Auren, M. (1996). Snow Loads on Gable Roofs. *Journal of Structural Engineering-Asce*, 123 (12): 7.
-

- O'Rourke, M. J. & Auren, M. (1997). *Unbalanced Snowload on Gable Roofs*. 3. International Conference On Snow Engineering, Sendai, Japan: AA Balkema.
- Potac, J. & Thiis, T. K. (2010). Numerical simulation of snow drift development on a gabled roof. 8.
- Ramberg, J. F. (2007). *VINDPÅVIRKET AVSETTING OG REDISTRIBUERING AV SNØ PÅ TAK –EN EVALUERING AV SNØLASTSTANDARDEN NS-EN 1991-1-3*. ÅS: Universitetet for miljø- og biovitenskap, Institutt for matematiske realfag og teknologi. 136 s.
- Schemenauer, R. S., Berry, M. O. & Maxwell, J. B. (1981). SNOWFALL FORMATION. I: Gray, D. M. & Male, D. H. (red.) *Handbook of Snow*. Saskaton, Kanada: Pergamon Press.
- Schmidt, R. A. (1982). Vertical profiles of wind speed, snow concentration, and humidity in blowing snow. *Boundary Layer Meteorology*, 23: 24.
- Schmidt, R. A. (1984). Transport rate of drifting snow and the mean wind speed profile. *Boundary Layer Meteorology*, 34: 28.
- Schneiderbauer, S., Tschachler, T., Fischbacher, J., Hinterberger, W. & Fischer, P. (2008). Computational fluid dynamic (CFD) simulation of snowdrift in alpine environments, including a local weather model, for operational avalanche warning. *Annals of Glaciology* (48): 8.
- Standardization, I. O. f. (1998). *ISO 4355*. Bases for design of structures -Determination of snow loads on roofs.
- Strasser, U. (2008). Snow loads in a changing climate: new risks? *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8 (1): 1-8.
- Tabler, R. D. (1988). *Snow Fence Handbook*. 1.1 utg. Laramie, Wyoming: Tabler & Associates.
- Tabler, R. D. (1991). *Snow Fence Guide*. Strategic Highway Research Program. Washington, DC: National Research Council.
- Taylor, D. A. (1984). *Snow loads on two-level flat roofs*. Eastern Snow Conference V.29 41st Annual Meeting June 7-8, Washington DC: National Research Council Canada. 3-13 s.
- Thiis, T. K. *A MODEL FOR THE DISTRIBUTION OF SNOW LOAD ON GABLE ROOFS*, Poland. Norwegian University of Life Sciences.
- Thiis, T. K. (2000). *Experimental validations of numerical simulations of snowdrifts around buildings and in terrain*. Longyerbyen: NTNU HiN, UNIS.
- Thiis, T. K., Potac, J. & Ramberg, J. F. (2009, 19th – 23rd July 2009). *3D numerical simulations and full scale measurements of snow depositions on a curved roof*. EACWE 5, Florence, Italy, s. 10: Norwegian University of Life Sciences, Department of Mathematical Sciences and Technology.
- Thiis, T. K. (2010). *Snow load on buildings in a changing climate (2)*: <http://isotc.iso.org/livelink/livelink/open/tc98sc3wg1>.
-

Vedlegg



Graf basert på verdier i (O'Rourke & Auren 1996) registrert på tak med skade. To tilfeller med ren ensidig snølast er ikke inkludert.



De to tilfellene av ensidig snølast har her fått verdien 50, ellers som over.