

DNMI DET NORSKE METEOROLOGISKE INSTITUTT

klima

**GARDERMOEN
SNNØLASTER PÅ EKSPEDISJONSBYGNINGEN**

KNUT HARSTVEIT

RAPPORT NR. 21/94 KLIMA



DNMI-RAPPORT

DET NORSKE METEOROLOGISKE INSTITUTT

POSTBOKS 43 BLINDERN 0313 OSLO 3

TELEFON: 22 96 30 00

ISBN

RAPPORT NR.

21/94 KLIMA

DATO

01.06.94

TITTEL

**GARDERMOEN
SNØLASTER PÅ EKSPEDISJONSBYGNINGEN**

UTARBEIDET AV

Knut Harstveit

OPPDRAKSGIVER

**NTH - Avd. for konstruksjonsteknikk
for Oslo Hovedflyplass A/S**

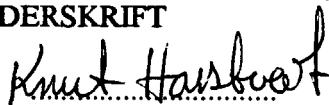
OPPDRAKSNR.

SAMMENDRAG

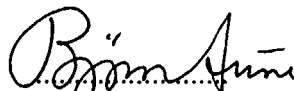
Formfaktorer for snølaster på taket av ekspedisjonsbygningen og angitte områder nær denne er beregnet.

Datagrunnlaget er snø- og vindstatistikk fra Gardermoen, 1957-93 og resultater fra en simulering av strømming nær overflaten av bygningen ved forskjellige vindretninger, kjørt ved NTH.

UNDERSKRIFT



Knut Harstveit
SAKSBEHANDLER



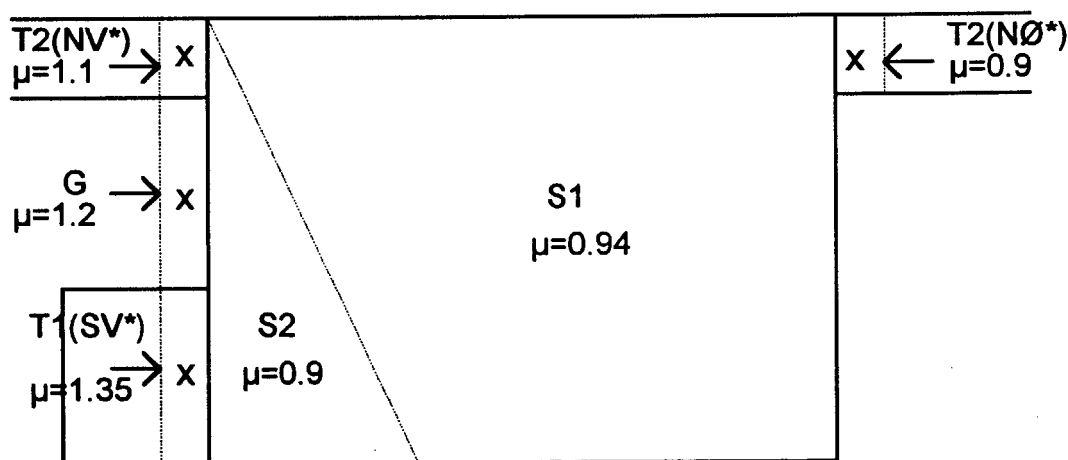
Bjørn Aune
FAGSJEF

SAMMENDRAG

Snø og vindstatistikk fra perioden 1957-93 fra Gardermoen er benyttet. Snødata er fordelt på 8 vindretningssektorer, hver på 45°. Disse er orientert 15° skjevt i forhold til geografisk N, slik at $N^*=N+15^\circ$, $N\emptyset^*=N\emptyset+15^\circ$ osv. Dette fordi sentralbygningen på Gardermoen har en slik orientering.

I hver vindretningssektor er data inndelt etter vindstyrke. 67 % av all snønedbør er definert som tørr snø, mens 46 % av snønedbøren var tørr snø ved vindhastighet over 1.5 m/s. Av disse 46 % kom over halvparten (0.56) fra sektor N^* , mens 0.39 deler var fordelt over sektorene $N\emptyset^*$, \emptyset^* , $S\emptyset^*$ og S^* . Sektorene SV^* , V^* og NV^* hadde samlet bare 0.05 deler. Det meste av denne vinden kom i området 3-5 m/s. Bare unntaksvis var vindhastigheten over 8 m/s.

Ut fra modellkjøringene ved NTH har vi fått vindens respons på bygningen ved forskjellige vindretninger. Ved å gjøre en fysisk betraktning av transport av snøpartikler, har vi kommet fram til hvilke vindforhold som transporterer snø på de forskjellige stedene på sentralbygningens tak og områder nær denne. På denne måten har vi fått fram beregnede estimater for områder som får tilført eller blir fratatt snø. Derved kan man estimere formfaktorer for snølast, slik figuren under viser. Det er forutsatt at all transport kun foregår når snøen faller og kun når snøen er tørr.



Figuren viser midlere formfaktorer. På sentralbygningens tak, S er det små variasjoner. I områdene T1, G, T2(NV*) og T2(NØ*) er tallene middeltall i avstand 7.5 m fra sentralbygningen. Nær bygningen er verdiene 1.4, 1.3, 1.9 og 1.0. I avstand 15 m og mer er verdiene 0.8, 1.1, 0.8 og 0.8. Variasjon mellom maksimums og minimumsverdier er lineær.

Usikkerheten ved metoden er stor. Det er likevel grunn til å tro at den gir et vesentlig bedre estimat enn bruk av en standard der kjennskap til vindfordelt snø og vindfordeling på bygningen ikke er med.

INNHALDSFORTEGNELSE

SAMMENDRAG	1
1. INNLEDNING	3
2. SNØ OG VINDSTATISTIKK	3
3. VINDKREFTER PÅ SNØLAGET	7
4. ESTIMERING AV FORMFAKTORER FOR SNØLAST	12
4.1 Sentralbygningens tak	12
4.2 Spesifiserte områder nær opp til sentralbygningen	15
5. REFERANSELISTE	18
APPENDIKS (Figurer fra Utnes og Eidvik (R-3-94 og R-4-94))	19

1. INNLEDNING

Denne utredning er gjort på oppdrag for NTH, avd. for konstruksjonsteknikk og er en del av arbeidet som der gjøres på oppdrag for Oslo Hovedflyplass A/S. Ved NTH er det utført beregninger for vindrespons på sentralbygningen ved Oslo Hovedflyplass, Gardermoen. Disse beregningene danner sammen med statistikk over snø- og vindfordeling på Gardermoen, et utgangspunkt for å estimere formfaktorer for snølast på sentralbygningens tak, og spesifiserte områder som grenser opp til sentralbygningen.

Utredningen styrke er at den følger en teoretisk/fysisk metodikk der vindkreftenes omforming av snølaget er diskutert. Svakheten er dels at tilbakekobling mellom snøfonner og dynamikk ikke er med, dels at en del parametre har store innebygde usikkerheter og har variasjoner i tid og rom som ikke er tatt hensyn til. Dels er ikke alle vindretninger modellert ved nøyaktig overflate og for alle undertak på bygningen. Det er neppe realistisk å utføre beregninger som tar hensyn til alle disse forhold.

2. SNØ OG VINDSTATISTIKK

Snølast på mark er beregnet til 3.8 kN/m^2 for Gardermoen (NS3479, 1979). Verdien er framkommet ved bearbeiding av snøstatistikk og svarer til en årlig sannsynlighet for overskridelse på 0.05, dvs., returperioden for en slik last er 20 år. Verdien er senere bekreftet ved bruk av data fram til 1992 (Aune, 1992). Vi vil derfor anbefale denne verdien som lastgrunnlag på grunnnivå.

Klimadata fra Gardermoen i perioden 1957-93 ligger elektronisk lagret ved DNMI. Bruk av observerte nedbørsummer og visuelle observasjoner der nedbørstypen er notert, gir en samlet gjennomsnittlig årsnedbør som snø på 233 mm.

Vi har imidlertid valgt å sortere nedbørstypen etter lufttemperatur. Dette gir noe enklere statistisk behandling ved kombinasjon mellom vind og nedbør, hvilket er en fordel ved den korte tid vi har til rådighet. Nedbørsummer hver 12. time og temperaturmålinger (2 m over bakken) ved nedbørobservasjonstidspunktet er benyttet. Sorteringen gjøres ved å definere all nedbør som snø når $T \leq T_0$. Vi har kjørt perioden 1957-1993 ved forskjellige omslagstemperaturer og ved $T_0=0.4^\circ\text{C}$ oppnås 235 mm som årlig snømengde. Både Killingtveit (1976) og Furmyr (1975) oppgir 1.1°C som typisk omslagstemperatur for fjellområdene i Norge. Den lavere verdi kan forklares ved at Gardermoen ligger lavt i terrenget, slik at mye magasinert kaldluft kan finnes i det bakkenære sjikt. Vi skal også huske på at det er temperaturen etter 12t oppsamlet nedbør som er benyttet her. Dette kan da inkludere en del tilfelle med oppklaring og

fall i temperaturen slik at grensen er kunstig lav. Vi ser bort fra dette og bruker temperaturgrensen på $T_0=0.4^\circ\text{C}$ i den senere kombinasjonsstatistikk.

Dette er en forenkling av forholdene, idet underkjølt regn tidvis forekommer, likeledes kan snø forekomme ved tørr, kald luft i høyere luftlag ved flere plussgrader i det bakkenære sjikt. Med de usikkerheter som denne utredningen omfatter, synes det dog lite aktuelt å gå nærmere inn på slike forhold.

På grunn av den lave omslagstemperaturen mellom snø og regn må en regne med at en del av nedbøren like under 0°C er underkjølt regn. Siden snø over omslagstemperaturen alltid skal klassifiseres som våt snø, må vi klassifisere snøen som våt over et intervall som strekker seg noe under 0°C . Vi klassifiserer derfor nedbøren som våt snø ved $-0.5 < T < 0.5^\circ\text{C}$. For tidsrommet 1957-93 falt det 157 mm nedbør som tørr snø pr. gjennomsnittsår og 78 mm som våt snø etter denne definisjonen, dvs 67 og 33 % av total snømengde.

Målinger av vindhastighet og vindretning i 10 m høyde ved samme tidspunkt som temperaturmålingene er benyttet til videre klassifisering. Siden en del av standardprogrammene ved DNMI fordeler vinden etter vindstyrke (Beaufort, B) er dette gjort her, idet bare små feil introduseres ved videre midlinger og tilbakeregning til m/s. Alle nedbørobservasjonene er fordelt i bokser på 1B, fra 0B (stille) og opp til 5B. Tilfelle med nedbør og vindstyrke $> 6B$ er så sjeldne at ingen tilfelle ble registrert ved prosedyren over. (I sporadiske tilfelle ble det notert maksimalverdi av vindstyrke $> 6B$ under nedbørepisoden).

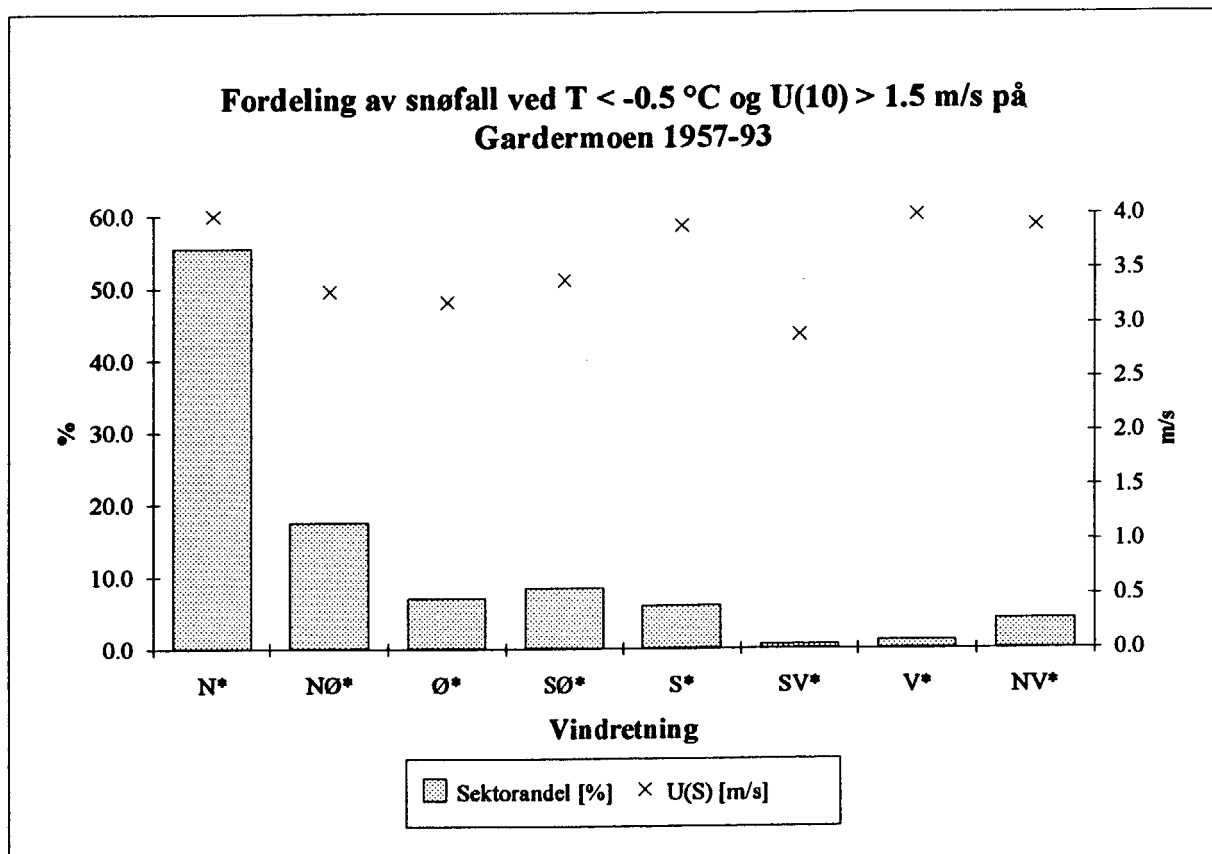
Ved disse moderate vindstyrkene antas våt snø ha så stor heft til underlaget at den ikke transporteres videre. Bare den tørre snøen er derfor vindfordelt. 13.0 mm pr. år (5.5 % av all snønedbør) var tørr snø ved helt stille vær (0B, 0.0-0.2 m/s). 36.8 mm (15.7 %) falt som tørr snø ved 1B (0.3-1.5 m/s), 43.8 mm (18.6 %) falt tilsvarende ved 2 B (1.6-3.3 m/s), mens 45.1 mm (19.2 %) falt ved 3 B (3.4-5.4 m/s), 16.1 mm (6.9 %) falt ved 4 B (5.5-7.9 m/s), 2.2 mm (0.9 %) falt ved 5B (8.0-10.7 m/s) og 0.1 mm (0.04 %) falt ved 6B (10.8-13.8 m/s), alt som tørr snø.

Vi antar at tørr snø ved stille eller flau vind ikke transporteres. Derved står vi igjen med 107.3 mm tørr snø ved $U_{10} > 1.5$ m/s, hvilket er 45.7 % av samlet snøfall. Vi gjør nå følgende forenkling: Vi antar at denne prosentsetsen kan brukes også i 20-års tilfellet. Videre antar vi at denne snøen fordeles med vindretning og vindstyrke på samme måte i 20-års-tilfellet som den gjør i det lange løp (1957-93).

Vi skal nå retningsfordele den tørre snøen. For enkelhets skyld skalerer vi nå mot 100%, dvs vi fordeler grupper av tørr snø ved $U_{10} > 1.5$ m/s i forhold til all slik snø. Vi benytter nå retningsgrupper. Observasjonene har en oppløsning på 10° over 360° , der nord= 360° . Ved en slik inndeling ville N omfatte $337.5-22.5^\circ$. Imidlertid er sentralbygningen på Gardermoen orientert $15 - 195^\circ$. Vi har derfor valgt å gruppeinndeles med

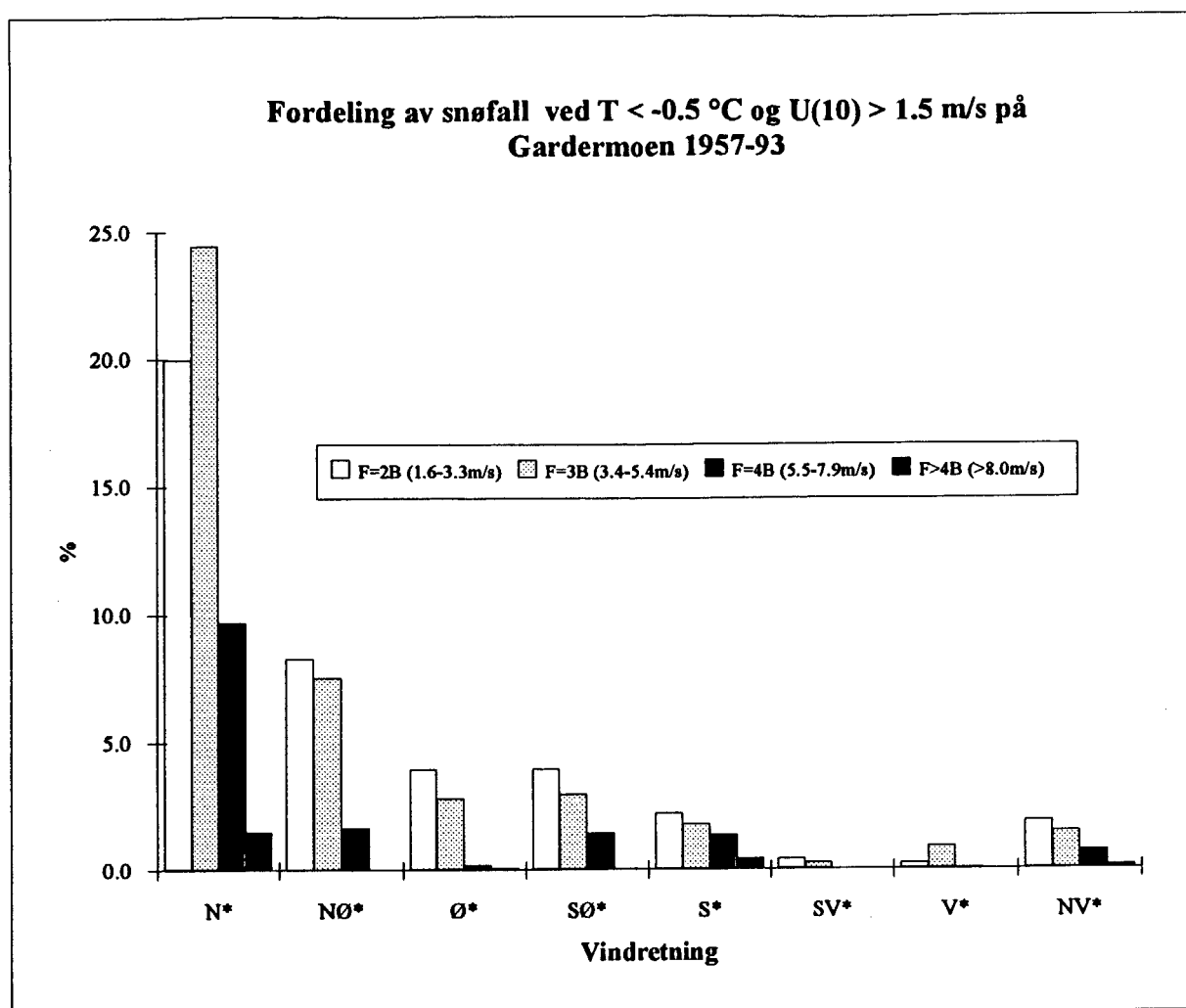
$N^* = N + 15^\circ = 352.5 - 37.5^\circ$. Derved blir antall observasjoner i N^* summen av observasjonene innenfor 360, 010, 020, 030°, samt 1/4 av observasjonene innenfor 350 og 040°, med snitt på 015°. Tilsvarende blir $N\emptyset^*$ = summen av observasjonene innenfor 050, 060, 070°, samt 3/4 av observasjonene innenfor 040 og 080°, med snitt på 060°.

Figur 1 viser fordelingen av tørr snø og $U_{10} > 1.5$ m/s, skalert mot 100 %. Retningsfordeling og midlere hastighet for hver retningsgruppe er vist. Figuren viser at over halvparten (55.5 %) av den tørre snøen kommer ved vind fra N^* (352.5-37.5°). Resten er stort sett fordelt i sektoren $N\emptyset^*$ - S^* (37.5 - 195°): 17.4 % kommer fra $N\emptyset^*$ (37.5 - 82.5°), 6.9 % kommer fra \emptyset^* (37.5 - 82.5°) og 8.3 % fra $S\emptyset^*$ (82.5 - 127.5°), mens 5.9 % kommer fra S^* (172.5 - 217.5°). Bare 0.6 % og 1.1 % kommer fra SV^* (217.5 - 262.5°) og V^* (262.5 - 307.5°), mens 4.2 % kommer fra NV^* (307.5 - 352.5°).



Figur 1

Figur 1 viser at midlere vindhastighet U_{10} (når $U_{10} > 1.5$ m/s) ligger på 3.8 m/s ved tørr snøvær ($RR(12t) > 0.0$ og $T < -0.5^\circ\text{C}$). Ved vind fra nordøst til sørøst, samt sørvest, ligger verdien noe lavere (2.9 - 3.4 m/s) enn dette.



Figur 2

Figur 2 viser hvorledes retningsfordelingen ved tørt snøfall ligger ved forskjellige vindstyrker. Nordlig sektor er den helt dominerende retning i alle styrkeintervaller. Vi ser også at ved sterk vind får sørlig sektor forholdsvis større betydning, mens sektor nordøst til øst faller bort. Dog er betydningen av sørlig sektor fortsatt lav.

3. VINDKREFTER PÅ SNØLAGET

Vi antar at snøen er tørr, hvilket her defineres ved at $T < -0.5^\circ\text{C}$. En typisk snøkrystall har da form som en romlig (3-dimensjonal) snøstjerne. Snøstjernen kan tenkes ha dimensjon som en "kule". Etter Mason (1975) er typiske tall for en slik snøstjerne: $d_s = 4.0 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, $m_s = 1.5 \cdot 10^{-7} \text{ kg}$ og $w_s = 0.6 \text{ m/s}$, der d_s er "kule" diameter, m_s massen og w_s fallhastigheten.

En fallende snøstjerne er i kraftbalanse, ved at luftmotstand, F_L og oppdrift, B balanserer tyngden, $m_s g$ og gir den konstante fallhastigheten, w_s . Luftmotstanden er gitt ved $F_L = K_s v_L w_s$, der K_s er en formfaktor og v_L er viskositeten i luft, $v_L = 1.7 \cdot 10^{-5} \text{ N s/m}^2$ ved -5 til 0°C . Når tyngden av en luftkule med samme volum som snøstjerne "kula" er gitt ved m_L og tettheten av lufta ρ_L (1.3 kg/m^3), har vi

$$m_s g - F_L - B = 0 \Rightarrow$$

$$m_s g - K_s v_L w_s - m_L g = 0 \Rightarrow$$

$$K_s = \frac{(m_s - m_L)g}{w_s v_L} = \frac{(m_s - \frac{4\pi}{3} r_s^3 \cdot \rho_L)g}{w_s v_L} = \frac{m_s^* g}{w_s v_L} \approx 0.1 m \quad (\text{lign. 1})$$

Tallet 0.1 m vil variere mye fordi snøkrystallenes form og vekt varierer. Hensikten er her å få fram et typisk tall for K_s ved tørr snø. Ved fuktig snø vil snøstjerner lett henge sammen til større snøfiller og tallene over blir ikke representative.

Den turbulente skjærspenningen, eller Reynoldspenningen, $\tau_h = \tau \cdot u/u$, er et uttrykk for vindstresset på underlaget. Reynoldspenningen er parallell med underlaget og rettet langs vindretningen nær bakken. Dens tallverdi er gitt ved $\tau = \rho_L U_*^2 = \rho_L C_f^2 U_{10}^2$, der ρ_L er luftas tetthet, U_* friksjonshastigheten, C_f luftas friksjonskoeffisient, og U_{10} middelvindhastigheten i 10 m referanse høyde. Ved løfting og horisontal transport av snøstjernen vil spenningskraften bremses av bakkefriksjon, F og motvirkes av tyngdens komponent langs underlaget dersom dette skrår med en stigningsvinkel, α , mens bakkevinden vil føre snøstjernen i vindens retning med en kraft, D_L . Kraftsummen er gitt ved snøstjernens reduserte masse, m_s^* ganger dens akselerasjon, a_s .

$$\begin{aligned} \tau \cdot A_s - F - m_s^* g \sin \alpha + D_L &= m_s^* a_s \Rightarrow \\ \tau \cdot A_s - (\mu_s + \sin \alpha) m_s^* g + K_s v_L (u - u_s) &= m_s^* \frac{du_s}{dt} \\ \rho_L C_f^2 U_{10}^2 \cdot A_s - (\mu_s + \sin \alpha) m_s^* g + K_s v_L (C_f U_{10} - u_s) &= m_s^* \frac{du_s}{dt} \quad (\text{lign.2}) \end{aligned}$$

Her er spenningskraften gitt ved τA_s , der $A_s = \pi r_s^2$ er arealet som snøstjernen opptar og μ_s er snøstjernens bakkefriksjonskoeffisient. Denne er ventelig en størrelse som avhenger av underlag, krystallstruktur, vind, temperatur mm. F er gitt ved snøstjernens tyngde multiplisert med μ_s . D_L er "omvendt" luftmotstand og er gitt ved formfaktoren, K_s ganger luftas viskositet multiplisert med differansen mellom vind, u som stryker langs bakken og horisontal transporthastighet for snøkrystallene, u_s . u er her satt lik U_* , siden $U_* \approx U(1.5Z_0) = U(0.0075m)$, dvs. vindhastighet på ca. 0.0025 m over vindens nullnivå når vi har homogene forhold. Siden snøstjernenenes antatte radius er 0.002 m, synes dette være et realistisk høydenivå for u .

Ved sterk vind vil snøstjernene skures og omformes slik at både μ_s og K_s endrer verdi. Dessuten virvles snøen da opp slik at den kommer under innflytelse av høyere vindhastigheter i noen høyde over bakken. Dette ser vi bort fra her, idet vi bare betrakter vind omkring balansetilstanden.

Dersom forholdene er homogene i tid og rom, har vi

$$U_s = \frac{C_f U_{10} (\rho_L A_s C_f U_{10} + K_s v_L) - (\mu_s + \sin \alpha) m_s^* g}{K_s v_L} (1 - e^{-\frac{K_s v_L t}{m_s^*}}) \quad (\text{lign.3})$$

Responstiden, t' er her gitt ved $t' = m_s^* / K_s v_L \approx 0.1s$. Dvs., responsen er svært hurtig. Løsningen har da gyldighet unntatt meget nær brå endringer i skjærspenningsbildet, feks. nær 90° hjørner. Vi betrakter løsninger etter en viss tid t , slik at siste parentes i ligningen over forsvinner. Balansetilstand inntreer når $U_s = 0$, dvs.

$$C_f U_{10} = \frac{K_s v_L}{\rho_L A_s} \left(-\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{1 + 4 \left(\frac{\rho_L A_s}{K_s v_L} \right) \left(\frac{(\mu_s + \sin \alpha) m_s^* g}{K_s v_L} \right)} \right)$$

Positiv løsning har fysisk gyldighet og innsetting av tall gir

$$C_f U_{10} \approx 0.052(\sqrt{1 + 24(\mu_s + \sin \alpha)} - 1) \quad (\text{lign.4})$$

Lign.4 gir verdien av friksjonshastigheten som akkurat løfter en snøstjerne. Høyere verdier gir transport, lavere verdier gir ingen transport. Videre vil μ_s trolig variere slik at hvilefriksjonen er høyere enn friksjonen etter at transport inntreer. Vi har ingen referansetall for μ_s , men vi ser at $\mu_s = 0.25$ tilsier balanse mellom tyngdekraft og glidefriksjon ved $\alpha = 15^\circ$, $\mu_s = 0.5$ gir balanse ved $\alpha = 30^\circ$ og $\mu_s = 0.7$ gir balanse ved $\alpha = 45^\circ$, dersom ingen vind er tilstede. Det mest aktuelle tilfelle her er mellom et fastere snøunderlag og nylig falne snøstjerner. Det kan synes realistisk at balanse inntreer ved 45° helning og μ_s velges derfor til 0.7. Ved skarelag vil μ_s være lavere enn dette, ved islag vesentlig lavere. Likeledes er μ_s lavere ved nysnø direkte på glatte tak, mens forhold på ruflete tak trolig er sammenlignbare med gammel snøflate, eller endog med høyere μ_s .

Med homogene forhold og overflateruhet, $Z_0 = 0.005\text{m}$ er $C_f = 0.4/\ln(10/0.005) \approx 0.053$. Dette gir balanse for $U_{10} = 3.2$ m/s for $\mu_s = 0.7$ for horisontalt underlag ($\alpha \approx 0$). For $\mu_s = 0.6$ og 0.8 hhv., blir $U_{10} = 2.9$ og 3.5 m/s. Transport under slike forhold synes altså å foregå når U_{10} overstiger ca. 3 m/s.

Lign.4 kan også drøftes for varierende C_f under konstant U_{10} . For $U_{10} = 3, 4, 5, 6, 7$ og 8 m/s får vi for $\mu_s = 0.7$, balanse for C_f -verdier på 0.056, 0.042, 0.033, 0.028, 0.024 og 0.021. Dette tilsier at ved verdier for $C_f \leq 0.01$ vil snøen meget sjelden transporteres i Gardermoen-området, og også ved $0.01 < C_f < 0.02$ skjer transport i sjeldne tilfelle. Først i områder der C_f ligger på 0.03 eller mer vil endel vær-situasjoner kunne gi snøtransport.

Taket på sentralbygningen på Gardermoen har stigning, $\alpha \approx 10^\circ$ for $X \in (H, 2.8H)$, positiv retning mot nord og $H = 27\text{m}$. Utenom dette er $\alpha \leq 1^\circ$. Dette gir $|\sin \alpha| \approx 0.17$ for $X \in (H, 2.8H)$ og $|\sin \alpha| \leq 0.03$ ellers. Dette betyr at virkningen av en positiv takvinkel på $\alpha \approx 10^\circ$ slik vi har ved vind fra sør på deler av taket av sentralbygningen, er identisk med en økning av μ_s på 0.17, mens ved vind fra nord inntreer en virkning lik minkning på 0.17. Forskjellen mellom sørlig og nordlig vind gir 0.34. Utenom nevnte del av taket er slike forskjeller vesentlig mindre og vurderes ikke her.

Dersom $\mu_s = 0.7$, vil det i det bratteste takpartiet bli en "effektiv" $\mu_s = 0.53$ for vind fra nord og 0.87 for vind fra sør. Med $U_{10} = 4$ m/s, tilsier dette transport for de bratte takpartier dersom C_f overstiger hhv. 0.035 og 0.048.

Ved en 2-dimensjonal betraktning (Utnes og Eidsvik (R-3-94), Figur 5 og 11) ser vi at snøtransport er sannsynlig over nordre del av taket på sentralbygningen ved vind fra sør allerede ved $U_{10} = 3.5$ m/s. Transport på sørlige del av taket er lite sannsynlig.

Videre kreves noe sterkere vind for å transportere snøen langs den bratteste delen av taket. Slik transport foregår ved 4 m/s bare i øvre del av skråningen, ved 5 m/s også i midtre del, mens det skal 9 m/s for å gi transport også rett etter stigningen starter.

Vind fra nord har meget lav C_f - verdi som meget sjelden vil transportere snø, selv nedover den bratteste del av taket. Bare nær takutstikket i sørenden kan transport forekomme, realistisk sett, og da ved U_{10} oppe i ca. 10 m/s.

Variasjon av U_s .

Lign. 3 betraktes generelt i 3-dimensjonalt tilfelle. $\nabla_h \cdot$ - operasjon (etter en kort tid, t og med konstant U_{10} og μ_s , gir

$$\begin{aligned} \nabla_h \cdot U_s &= \nabla_h \cdot \frac{A_s \rho_L U_{10}^2}{K_s \nu_L} C_f^2 \frac{U_s}{|U_s|} + \nabla_h \cdot U_{10} C_f \frac{U_s}{|U_s|} + \nabla_h \cdot \frac{-m_s g}{K_s \nu_L} (\mu_s + \sin \alpha) \frac{U_s}{|U_s|} \\ &\approx 9.6 U_{10}^2 \nabla_h \cdot C_f^2 \frac{U_s}{|U_s|} + U_{10} \nabla_h \cdot C_f \frac{U_s}{|U_s|} - 0.63 \nabla_h \cdot (\mu_s + \sin \alpha) \frac{U_s}{|U_s|} \\ &= ((19.2 C_f U_{10}^2 + U_{10}) \nabla_h C_f - 0.63 \nabla_h \sin \alpha) \cdot \frac{U_s}{|U_s|} + (9.6 C_f^2 U_{10}^2 + U_{10} C_f - 0.63 (\mu_s + \sin \alpha)) \nabla_h \cdot \frac{U_s}{|U_s|} \quad (\text{lign.5}) \end{aligned}$$

Divergens i transporthastighet betyr uttynning av snøpartikler, hvilket kan assosieres med erosjon, mens konvergens betyr at snøpartikler hopes opp, hvilket assosieres med fonndannelser. Divergens betyr at $\nabla_h \cdot U_s > 0$, mens konvergens betyr at $\nabla_h \cdot U_s < 0$. Lign. 5 har 3 hovedledd. Første ledd angir økning/minkning av C_f med avstanden. Andre ledd er virkningen av en varierende takvinkel. Leddet gir et positivt bidrag ved en avtagende, positiv takvinkel, og kan da assosieres med en konveks taksone. Ved 2-dimensjonal strømning blir bare de 2 første leddene stående. 3. ledd er konvergens/divergens av strømlinjer. Første ledd betyr at hurtig variasjon av C_f med avstanden kombinert med høy C_f gir sterk endring i snødekket. Annet ledd betyr at områder med sterk konvergens av strømlinjene kombinert med høy C_f gir fonndannelse, og tilsvarende divergens gir erosjon. En stor, positiv takvinkel svekker disse virkningene, mens en stor, negativ takvinkel øker dem. Virkningen er beskjedent ved $\alpha=10^\circ$.

2D

I dette tilfellet betraktes bare strømning i xz-planet, slik at U_s bare strømmer langs x-aksen. Lign. 5 reduseres nå til

$$\frac{dU_s}{dx} = (19.2 C_f U_{10}^2 + U_{10}) \frac{dC_f}{dx} - 0.63 \frac{d(\sin \alpha)}{dx} \quad (\text{lign.6})$$

Av denne ligningen ser vi at transporthastigheten øker når $dC_f/dx > 0$ og avtar dersom $dC_f/dx < 0$, dersom $C_f > 0$ og α er konstant. Dette medfører at i områder der transport skjer, eroderer snøen når C_f øker i positiv x-retning, mens snøen avsettes i områder der C_f avtar, dersom $C_f > 0$. Dersom $C_f < 0$ har vi resirkulasjon. Lign. 6 viser at stor negativ endring kombinert med stor negativ C_f gir stor negativ endring i U_s . Dette betyr erosjon, siden U_s er negativ her. Tilsvarende gir stor positiv endring av C_f fonn-dannelse. Lign. 6 viser også at negativ endring av takvinkelen bidrar til erosjon. Bidraget kan bli stort ved krappe endringer, men vær oppmerksom på at ligningen ikke gjelder når denne endringen er for krap. Vi ser at endring av takvinkelen på sentralbygningen fra ca. 10° til ca. 0° over en avstand på ca. 20 m gir et bidrag som fører til økt erosjon i dette området ved sørlig vind. Bidraget ved 4 m/s er dog bare halvparten så stort som virkningen av økt C_f like før krumningen starter.

2-D og vind fra nord (Fig. 5, Utnes og Eidsvik (R-3-94))

C_f er høy nok til transport bare nær sørspissen av sentralbygningen. Her vil det transporteres snø fra takutstikket og ned på taket nedenfor når det er nysnø og U_{10} kommer opp i 10 m/s eller mer.

2D og vind fra sør (Fig. 11, Utnes og Eidsvik (R-3-94))

Det transporteres ganske mye snø langs taket. Området med sterkeste helning og høyest $C_f dC_f/dx$ ca. 1.5 til 2 takhøyder innenfor søndre utstikker eroderes når U_{10} overstiger 4 m/s. Snøen avsettes på bakken nord for bygningen.

3D og vind fra nord (Fig. 2 og 5, Utnes og Eidsvik (R-4-94))

C_f er lav og transport skjer bare nær begge sørhjørner av bygningen. Disse hjørnene vil tynges noe i snødekket og snøen avsettes på taket nedenfor. Imidlertid er denne kjøringen utført med forenklet bygningskonstruksjon. Sammenligning av 2-dimensjonal kjøring fra nord på forenklet kjøring og kjøring med takutsnitt, tyder på at en må legge på litt effekt for takutspring. I det 2-dimensjonale tilfelle ble effekten på takutspringet ca. 60% økning av C_f nær nordlig kant. Ved å multiplisere maksimalverdiene nær nordlig kant med 1.6, får vi da 0.026 som maksimalverdier nær hjørnene i SØ og SV. Dette tilsier at transport kan forekomme ved $U_{10} > 6.5$ m/s. Det synes som om den nedblåste snøen legger seg på taket nedenfor.

Foran bygningen har vi divergens og erosjon. Snøen kan i noen grad finnes sør for begge nordre hjørner, fortrinnsvis et stykke ut fra veggen. Bak bygningen er det tilløp til fonn-dannelse langs midtlinjen i en avstand av ca. 4 takhøyder fra bygningen.

3D og vind fra nordvest (Fig. 9 og 12, Utnes og Eidsvik (R-4-94))

Her kan sees konturene av 2 horisontale virvler ut fra nordvestre hjørne og utover taket. På begge sider av diagonalen NV - SV er det divergensområder for strømmingen nær taket. Vinden kommer ovenfra og brer seg vifteformet ut til sidene. Denne transporten er tydeligst på sørvestsiden av takdiagonalen på grunn av at bygningen er

lengre i Ø - V retning enn i N - S retningen. Snøtransporten i dette området er markant ved sterk vind. Fig. 9 og 12 viser at økning i C_f langs strømlinjene gir erosjon i starten, mens divergensen i strømlinjene etter hvert blir betydelig og overtar all erosjon i området der C_f er høy, men varierer lite. Denne vifteformede sonen fra nordvest mot østre del av sørsiden av bygningen blåses raskt tom for tørr nysnø ved sterk vind. Figur 12 viser en betydelig negativ gradient i C_f nær tak-kanten på østre del av sørlig tak-kant. Her vil mye snø falle ned på taket nedenfor, tildels kan det i sjeldne tilfelle bli hengende over taket. Virkningen av takutspring vil trolig forsterke virkningen omkring østre del av sørlig tak-kant.

På begge sider av bygningen er det tilløp til fonndannelse et stykke utenfor veggene. Videre synes det dannes to fonner ut mot sør fra ca. 4 takhøyder sør for sørvestre og nordøstre hjørne. Det vil også bli fonndannelse langs østre del av sørlig vegg. Det synes bli erosjon nord for nordøstre og sør for sørøstre hjørne.

3D og vind fra sørøst (Fig. 15 og 18, Utnes og Eidsvik (R-4-94))

Dette skiller seg fra nordvest tilfellet ved at taket heller oppover i vindretningen. Virkningen er at større deler av taket nå kan blåses bort for tørr nysnø, og også at det blåser snø ned langs større deler av taket. Det vil bli fonndannelser på nedstrømsider av bygningen, særlig 1-2 høyder nord for nordre vegg. Virkningen foran og på siden av bygningen synes være som ved nordvest-tilfellet.

4. ESTIMERING AV FORMFAKTORER FOR SNØLAST

4.1 Sentralbygningens tak

Utgangspunktet er statistikken fra kap.2 og virkningsgraden ved forskjellige vindretninger og vindstyrker, hentet fra kap.3. Ut fra kap. 3 tar vi med sektorene N*, NØ*, Ø*, SØ* og S*.

N*

Dette er hovedvindretningen ved snøfall. Hele 55.5% av den tørre snøen kommer fra denne sektor. Fra kap.3 har vi imidlertid at C_f er svært lav for denne vindretningen. Årsaken er dels at 3-dimensjonal effekt gjør virkningen lav ved vind rett mot bygningen. Dels er årsaken at taket skråner nedover i vindens retning, hvilket motvirker en generell avblåsningseffekt fra taket. De mest belastede områdene blir avblåsning av sørøstre og sørvestre hjørne. Her er C_f estimert til 0.026 når en tar hensyn til tak-utstikket. Dette betyr at U_{10} må opp i over 6 m/s for å forflytte snø. Fra kap.2 har vi at dette skjer ved ca. 9 % av tilfellene med tørr snø og $U_{10} > 1.5$ m/s, eller ca. 10 mm pr. år. Sonene der dette skjer kan for enkelhets skyld avmerkes ved en skrålinje fra NV -

hjørnet til et punkt 1/3 av linjen SØ - SV, med utgangspunkt i SV. Ved denne situasjonen er det symmetri, slik at vi får en tilsvarende sone omkring det sørøstre hjørne. Det er mulig noe snø blir liggende langs kanten av linjene NV* - SV* og NØ* - SØ*. Dette ser vi bort fra her.

S*

Det er betydelig mindre snønedbør fra denne sektor. Til gjengjeld er vindtransporten mer effektiv fordi taket nå skrå oppover med vinden, slik at strømlinjene konvergerer over takets nordlige del. Det er bare kjørt 2-dimensjonalt tilfelle for denne vindretningen. Viss vi antar at forholdet mellom takutstikk/ikke takutstikk er den samme i 3 som i 2-dimensjonalt tilfelle og forholdet mellom 2 og 3-dimensjonalt er det samme for S* som for N*, kommer vi fram til at maksimalområder for C_f ligger i NV* og NØ* - hjørner med en størrelse på ca. 0.06, eller omtrent det samme som nordkanten i det 2-dimensjonale tilfelle. Maksimalsonene kan nå være litt bredere på grunn av den positive takstigningen. Vi får transport når U_{10} overstiger 2.8 m/s. Fra kap. 2 har vi at dette skjer i 4 % av tilfellene med tørr snø og $U_{10} > 1.5$ m/s, eller ved ca. 4 mm pr. år. For enkelhets skyld antar vi at sonene på taket er som ved nord (dog nå ved NØ* og NV* hjørner). Dette er nok ikke helt korrekt, idet sonen trolig er bredere enn antatt for S* og smalere enn antatt for N*.

Ø*

Det er ikke kjørt modell ved østlig sektor. Siden bygningen nå ikke har takhelning langs denne vindretningen, antas at maksimum C_f ligger mellom tilfellene ved S* og N*, dvs. i området 0.03-0.04. Iflg. kap. 3 inntre balansetilstand da ved U_{10} på 4-5 m/s. Dette omfatter ca. 2 % av mengden med tørr snø og $U_{10} > 1.5$ m/s, eller ca. 2 mm pr. år. Det regnes samme fordeling som ved N* og S*, nå med utgangspunkt i SV* og NV* - hjørner.

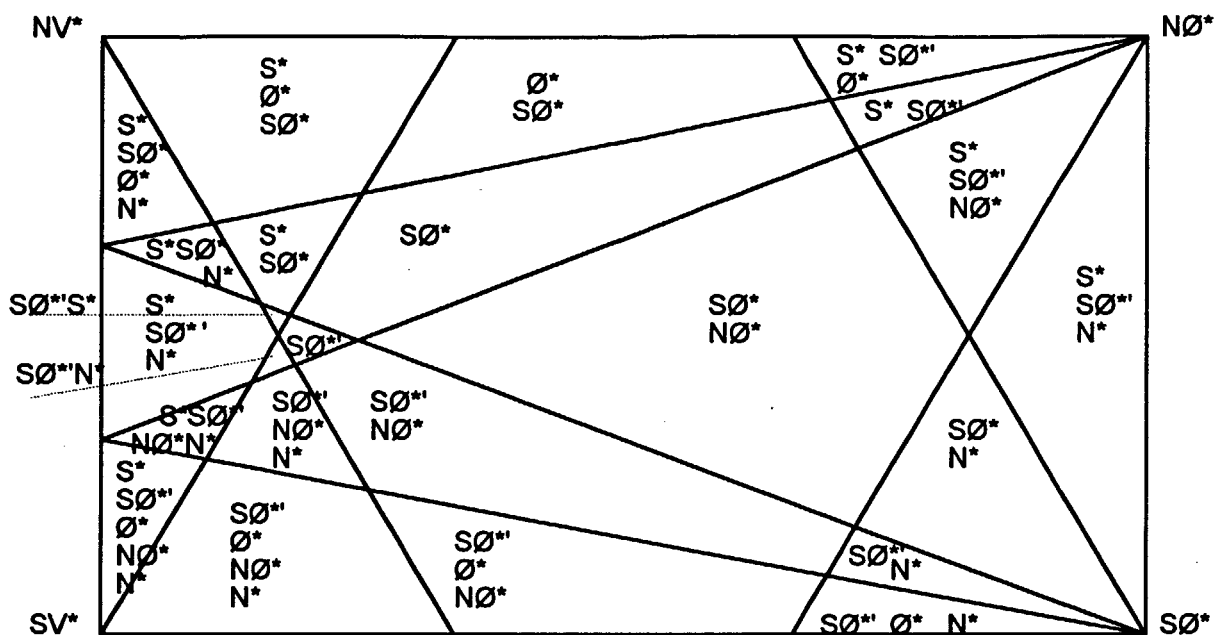
NØ*

Modellkjøringen ved NV* kan brukes også ved NØ*, bare ved å bytte om hjørner. Transporten skjer ut gjennom en vifteform begrenset av hjørnet NØ* og 2 skrålinjer herfra mot et punkt 1/3 av bygningens lengde regnet vestover fra SØ-hjørnet, og mot et punkt 1/3 bygningsbredde nord for sørvestre hjørne. Transport foregår ut fra viften som begrenses av disse linjer. Ved beregning av transport i maksimalområdet for viften brukes $C_f = 0.056$, i minimalområdet for viften, 0.032 (Figur 12, Eidsvik og Utnes, R-4-94). Dette svarer til balanse ved 3 og 5 m/s hhv. Tas hensyn til takutstikk, vil ventelig C_f - verdiene øke. Vi betrakter derfor 3 m/s som grenseverdi for transport ut av hele viften. Fra kap. 3 har vi da at ca. 11 % av mengden med tørr snø og $U_{10} > 1.5$ m/s, eller ca. 12 mm pr. år transporteres bort fra taket.

SØ*

Viften omfatter nå større deler av taket. For samme sonen som skissert under NØ*, men nå tilpasset SØ*, velges $C_f = 0.056$, som vist i Figur 18 (Eidsvik og Utnes, R-4-94). Fra Eidsvik og Utnes (R-3-94) har vi at takutstikk betyr mindre ved vind fra sør.

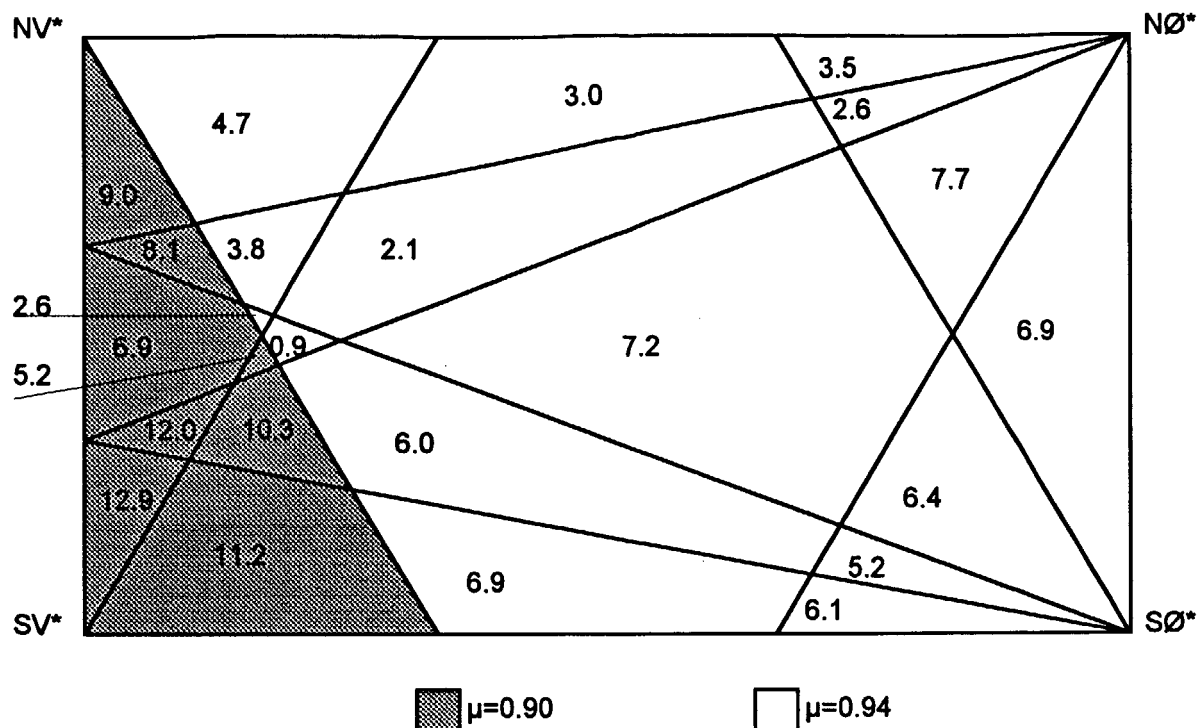
Utenfor maksimalsonen velges $C_f = 0.032$. Grenseverdiene for U_{10} blir da 3.0 og 5.2 m/s hhv. Fra kap. 3 får vi 5 % og 2% av mengden med tørr snø og $U_{10} > 1.5$ m/s hhv., dvs. 5 og 2 mm pr. år.



Figur 3

Oversikt over de forskjellige vindsektorer som bidrar til erosjon forskjellige steder på sentralbygningens tak.

Figur 3 viser hvilke deler av taket som blir erodert ved forskjellige vindretninger. I Figur 4 er det gitt summerte tall for hver takdel som er en sum av et eller flere sektorbidrag. Tallene er gitt som prosent av totalt snømagasin. Figuren representerer et snitt over en rekke på 37 år og har store innebygde usikkerheter. Tallene og sonene kan derfor ikke tas bokstavelig. Figuren viser imidlertid et hovedtrekk som det kan være grunn til å vektlegge. Tallene er systematisk høyere nær sørvestre hjørne, skravert med grått på Figur 4, enn for resten av taket. Årsaken er at bidrag fra flere sektorer blåser av snø på denne delen av taket. Et tilnærmet arealvektet snitt gir 10% innenfor skravert areal og 6% utenfor. Dette kan tolkes som avblåst snø, dvs. reduksjon av formfaktor, μ fra 1.0 til 0.90 og 0.94 henholdsvis. Disse formfaktorer anbefales brukt på sentralbygget. Årsaken til at formfaktorene ligger noe høyere enn 0.8, som er vanlig i Norsk standard på mange taktyper, er lav erosjon ved dominerende vindretning for tørr snø.

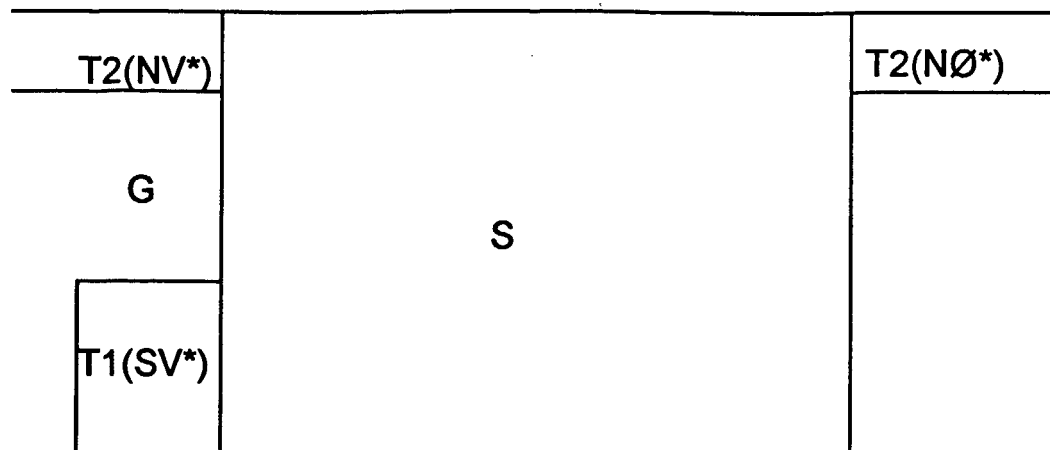


Figur 4

Beregnet avblåsning fra taket på sentralbygningen. Tallene er gitt i prosent av totalt snømagasin. Skravert areal gir midlere formfaktor, $\mu=0.90$ mot 0.94 på taket for øvrig.

4.2 Spesifiserte områder nær opp til sentralbygningen

Takområdene T1(SV*), T2(NØ*), T2(NV*), og gårdsplassen G er tegnet inn på Figur 5. Det er ikke kjørt vindmodell med disse takområdene innlagt, slik at en er henvist til å benytte virkningen av sentralbygningen og så tenke seg takområdene innlagt.



Figur 5

Skisse over sentralbygningen, *S* og småtakene *T1* og *T2*, samt gårdsplassen, *G*. Skissen er tilnærmet proporsjonsriktig.

Ved nordlig vind (vind fra N^*) varierer C_f mellom -0.008 og 0.04 nær bakken der $T2$ ($NØ^*$ og NV^*) ligger, med 0.03 som midlere verdi. Ved $T1$ er C_f noe lavere, ca. 0.025 i snitt. I denne kjøringen er imidlertid $T1$ og $T2$ tatt vekk. Vi er derfor henvist til å spekulere i C_f . Viss vi antar at C_f øker når småtakene $T1$ og $T2$ settes på plass, kan vi kanskje operere med et intervall på 0.03 til 0.05 på begge takene. Dette tilsvarer balansetilstand ved U_{10} på ca. 3 og ca. 5 m/s hhv. Derved vil takene, $T1$ og $T2$ blåses tomme for tørr nysnø når vinden overstiger ca. 3 m/s (nedre usikkerhetsgrense) eller ca. 5 m/s (øvre usikkerhetsgrense). Vi antar samme verdier for sørlig vind (vind fra S^*). En må regne med at G mottar snøen fra $T1(SV^*)$ ved sørlig vind og fra $T2(NV^*)$ ved nordlig vind. Samlet resultat for S^* og N^* blir -8.3% og -19.6% hhv., for $T1$ og tilsvarende for $T2$, mens lav og høy verdi for G blir 4.0 og 9.3% , alt av total snømengde.

Ved vind fra $Ø^*$, $NØ^*$ og $SØ^*$ tilføres det snø fra sentralbygningens tak til området langs bygningens vegg der $T1(SV^*)$, G og $T2(NV^*)$ ligger. Det antas at området er begrenset til 15 m ($0.56H$) ut fra veggen, slik tankegangen er i NS3479. $T1(SV^*)$ og G tar opp ca. 40% av veggen hver, men G tar opp de resterende 20% . Ved utregningen regner vi med at $SØ^*$ og $NØ^*$ dekker halve taket på sentralbygningen, slik at $1/3$ av disse sektorene dekker ca. $1/6$ av taket, eller $7.4H^2$. Det antas at snøen fanges opp over avstanden $0.56H$ over $1/3$ av siden på sentralbygningen, dvs over $1.01H^2$. Derved kan en regne med at 1 mm på sentralbygningen utgjør 7.4 mm på $T1$, $T2(NV^*)$ og G , som et middel for de innerste 15 m. $Ø^*$ dekker $1/3$ av taket og halvparten blåser ned på $1/3$ av sidearealet slik at forholdet blir det samme som ved $SØ^*$ og $NØ^*$.

Ved vind fra $NØ^*$ tilføres søndre tredjedel av langsiden snø fra sentralbygningens tak. Taket $T1(SV^*)$ får da $33/40 \cdot 5.1 \cdot 7.4 = 31\%$ av total snømengde. Det blir neppe noen nettovirkning på taket $T2(NV^*)$ eller plassen G . Fra modellkjøringen har vi at stedet der taket $T2(NØ^*)$ skal ligge har C_f på ca. 0.02 . Dette forventes økt når taket kommer

opp, vi benytter intervallet 0.03 til 0.05, dvs 3 m/s som lavt anslag og 5 m/s som høyt anslag for balansetilstand. Dette gir 1.4% avblåst snø (av totalt snømagasin) som lavt anslag (ved 5m/s) og 5% som høyt anslag (ved 3 m/s).

Ved vind fra SØ* blåser det snø ned på taket T1(SV*), taket, T2(NV*) og bakken, G. Taket T2(NV*) får ca. 1/3 av avblåst snø fra SØ*, G mottar tilsvarende 13/40 fra SØ* og 27/40 fra SØ*', mens taket T1(SV*) mottar 1/3 av SØ*. Dette blir ialt 6.7%, 12.6% og 15.5% av total snømengde for T1(SV*), G og T2(NV*). Taket T2(NØ*) behandles som ved NØ*, men nå med $C_f = 0.04$ som lav verdi, hvilket gir 4 og 5 m/s som lav og høy verdi for U_{10} . Det oppnås 0.9 og 1.6% som avblåste verdier i lavt og høyt tilfelle.

Ved vind fra Ø* vil T1(SV*) og T2(NV*) motta snøen fra sentralbygningen, mens T2(NØ*) trolig blåses rent, mens mindre nettovirkning på G ventes. Verdiene blir 5.6, 2.2 og 6.7% for T1(SV*), G og T2(NV*). Lavt anslag (ved 5 m/s) gir avblåsning på 0.4% på T2(NØ*), mens høyt anslag (ved 3 m/s) gir 1.7%.

Tabell 1 gir en oversikt over virkningen på småtakene T1, og T2 samt gårdsplassen, G. Tabellen gir sektorbidrag for prosentvis snøtillegg. Ved utregning av formfaktor, μ , for snølast, har vi at 10% tillegg til total snømengde svarer til et tillegg på 0.1μ , mens 0% tillegg (100% snødekke), gir $\mu=1.0$.

Tabell.1

Prosentvis økning av totalt snødekke på takene T1, T2 og gårdsplassen, G, ved den planlagte sentralbygningen på Gardermoen. Tilleggene er fordelt på forskjellige vindsektorer og dels også i form av høye og lave anslag. Sektorbidragene er summert og anbefalt formfaktor, μ , er gitt i siste kolonne. Tallene gjelder som et middel i innerste 15 m.

	N*		NØ*		Ø*		SØ*		S*		Σ		μ
	LAV	HØY	LAV	HØY	LAV	HØY	LAV	HØY	LAV	HØY	LAV	HØY	
T1	-17.9	-7.4	31.1		5.6		6.7		-1.7	-0.9	23.8	36.0	1.35
G	3.1	7.6	0		2.2		9.6		0.9	1.7	15.8	21.1	1.2
T2NV	-17.9	-7.4	0		6.7		15.5		-1.7	-0.9	2.6	13.9	1.1
T2NØ	-17.9	-7.4	-4.9	-1.4	-1.7	-0.4	-1.6	-0.9	-1.7	-0.9	-27.8	-11.0	0.9

I NS3479 er formfaktorene fordelt lineært over de innerste 15 m med den skala det er på takene på Gardermoen. Siden vi ikke har noe tilleggsinformasjon på dette punkt, gjøres dette også her. For T1 gir dette $\mu=1.9$ som maksimum inntil sentralbygningen, 1.35 i avstand 7.5 m og 0.8 i avstand 15 m og utover. For T2(NV*) blir tilsvarende tall 1.6, 1.2 og 0.8.

For gårdsplassen, G, gjelder 1.1 fra 15 m og utover, 1.2 i avstand 7.5 m og 1.3 nær sentralbygningen.

For taket, T1(NØ*) gjelder 1.0 nær bygningen, 0.9 i avstand 7.5 m og 0.8 i avstand 15 m og utover.

De høyeste snøtilleggene kommer ved vind fra nordøst ned på taket T1. Studerer vi Figur 9 (Utnes og Eidsvik (R-3-94)) og tenker oss vind fra NØ* istedet for NV*, ser vi at der er en viss konvergens inn mot veggen der T1 skal ligge, og det synes være meningsfullt å betrakte snøtillegget over de nærmest 15 m (0.56H).

5. REFERANSELISTE

Aune, B. (1992) *Dimensjonerende klimaverdier for Gardermoen.* DNMI-Rapport 50/92 KLIMA, Oslo 1992.

Furmyr, S. (1975) *Resultater og erfaringer av nedbørundersøkelser i Fillefjell representative område 1967 - 74.* NHK-Rapport 6, Oslo 1980.

Killingtveit, Å. (1976) *En studie av vannbalansen i Sagelva hydrologiske forskningsfelt.* Institutt for Vassbygging, NTH - Trondheim, 1976.

Mason, B.J. (1975) *Clouds, Rain & Rainmaking.* Cambridge University Press. Second edition Cambridge University Press, Great Britain, 1975.

NS3479 (1979) *Prosjektering av bygningskonstruksjoner. Dimensjonerende laster.* Norges byggstandardiseringsråd - NBR, Oslo 1979.

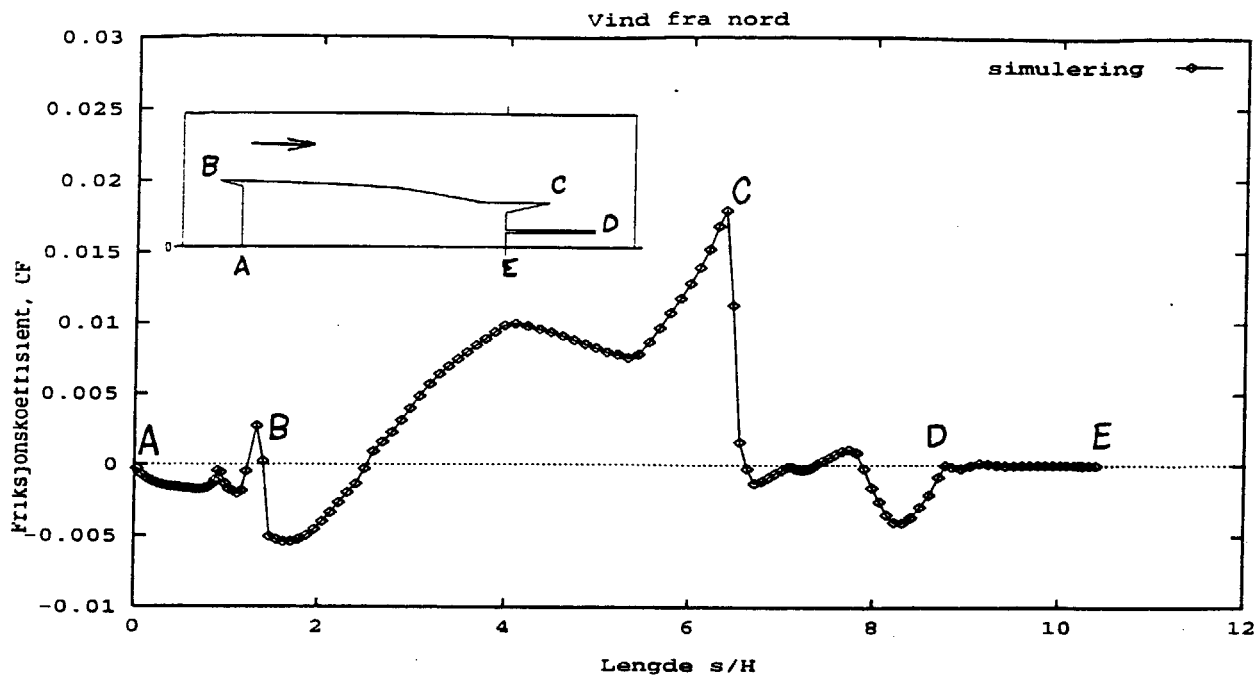
Utnes, T. og Eidsvik, K.J. (R-3-94) *Beregning av vindlaster på ekspedisjonsbygning, Gardermoen Lufthavn. To-dimensjonale simuleringer.* - NTH-rapport R-3-94.

Utnes, T. og Eidsvik, K.J. (R-4-94) *Beregning av vindlaster på ekspedisjonsbygning, Gardermoen Lufthavn. Tre-dimensjonale simuleringer.* - NTH-rapport R-4-94.

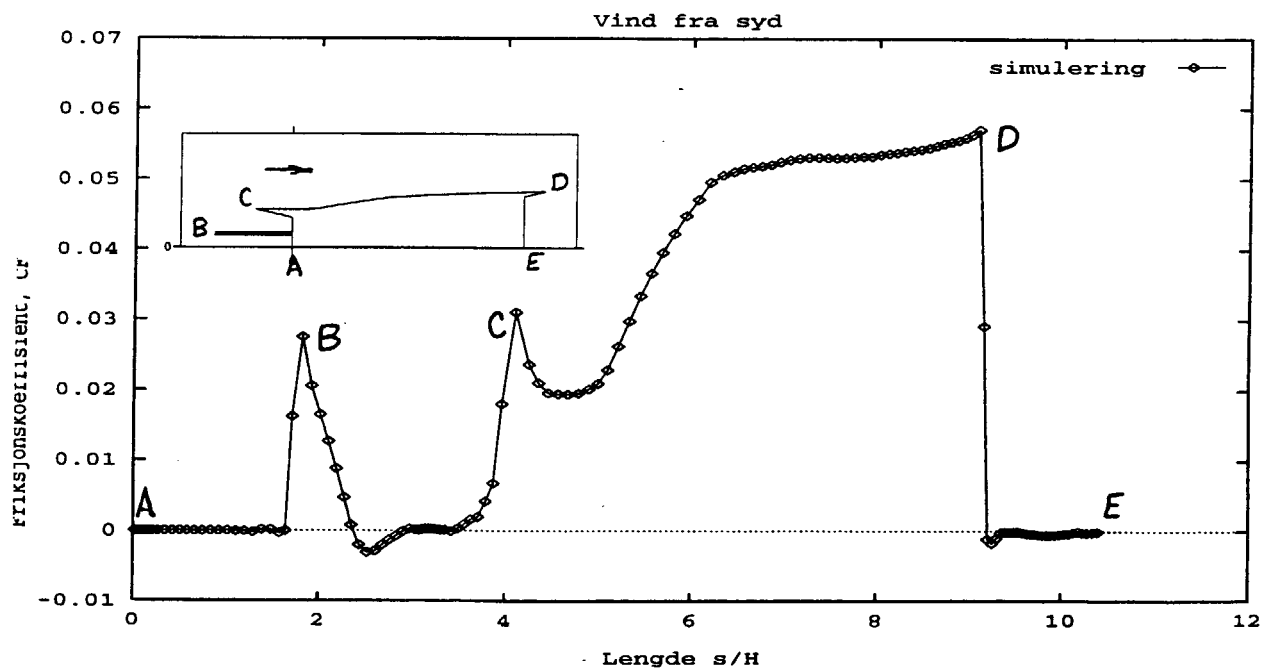
APPENDIKS

Figur 5 og 11 fra Utnes og Eidvik (R-3-94)

Utvalgte figurer fra Utnes og Eidvik (R-4-94)



Figur 5: Friksjonskoeffisient langs konturen av hele bygningen.



Figur 11: Friksjonskoeffisient langs konturen av hele bygningen.

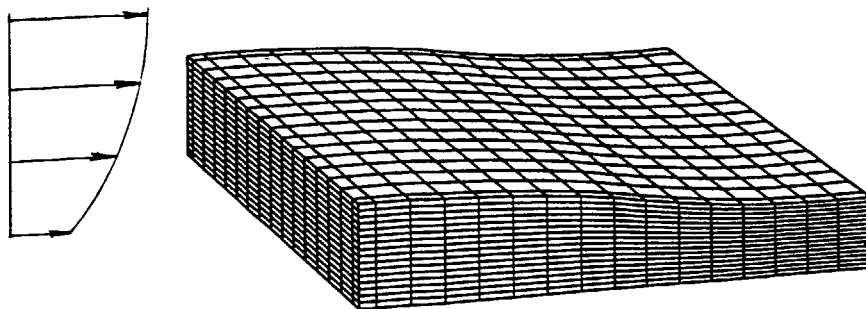


Figure 1: Perspektiv av forenklet ekspedisjonsbygning med vind fra nord, dvs vindretning 90 grader inn mot bygningens høyeste side.

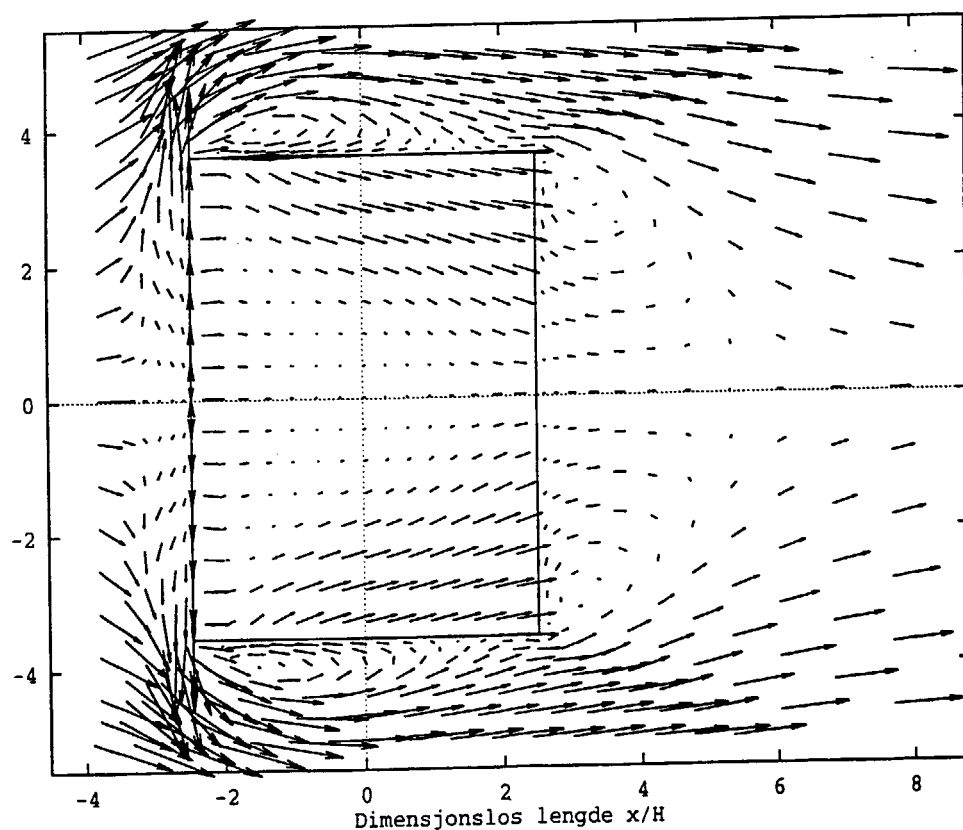


Figure 2: Horisontalperspektiv av hastighetsfelt nær bakken og taket på bygningen. Vindretning 90 grader inn mot høyeste side av bygningen. Alle lengder skalert med $H=27$ m.

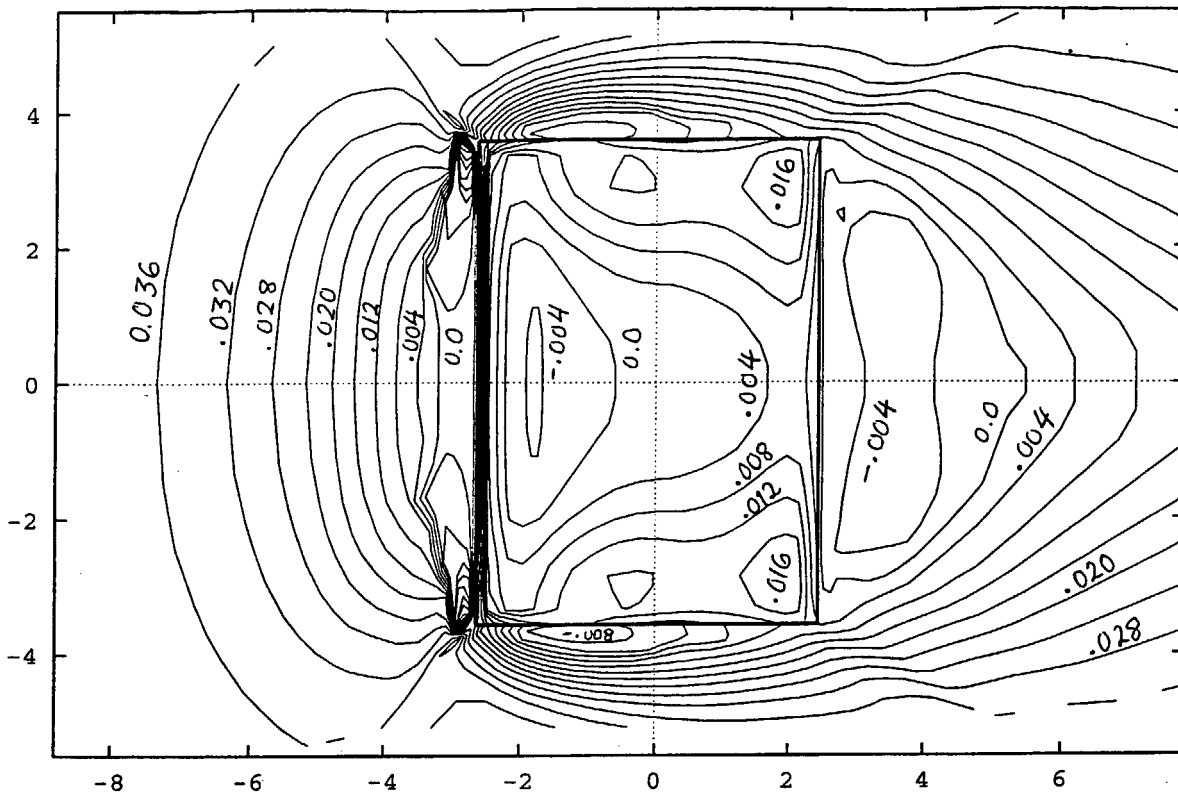


Figure 5: Friksjonskoeffisient (C_f) på taket og bakken utenfor bygningen sett ovenfra. Avstand mellom isolinjene er $\Delta C_f = 0.004$.

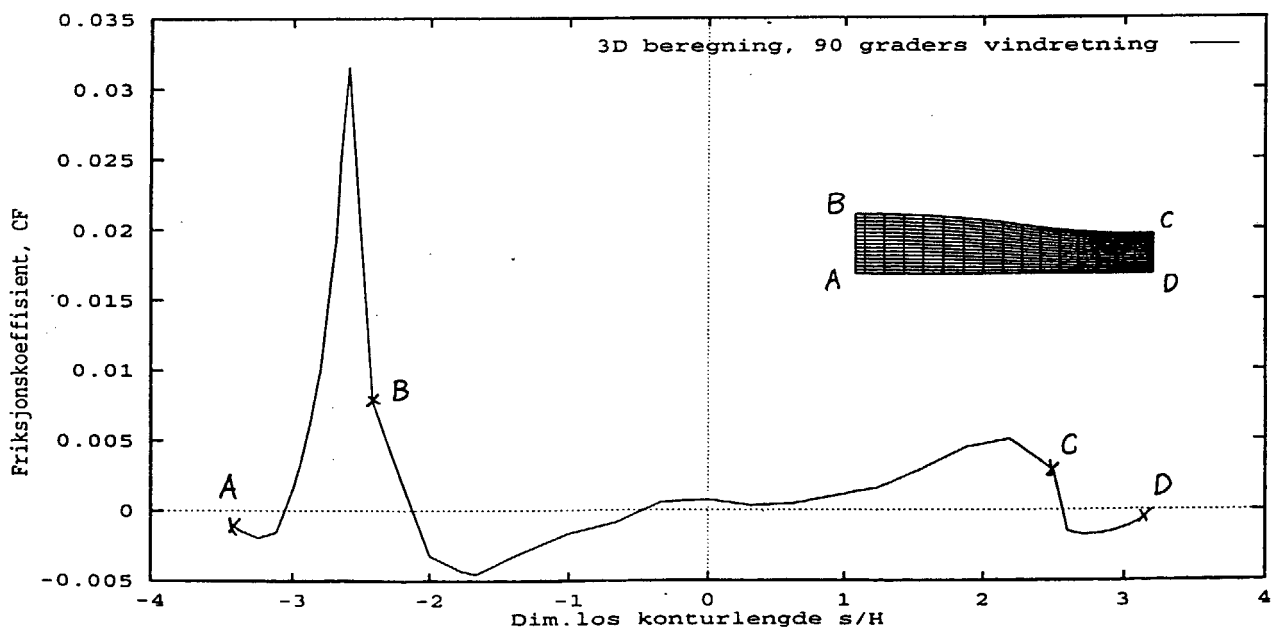


Figure 6: Friksjonskoeffisient langs bygningens midtseksjon.

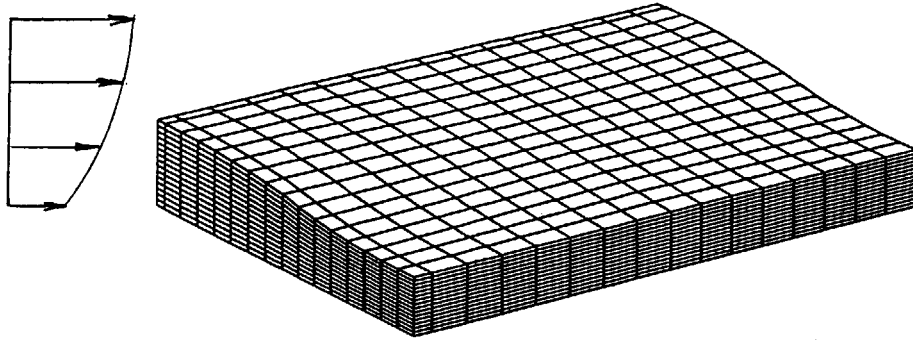


Figure 8: Perspektiv av forenklet ekspedisjonsbygning med vind fra nordvest.

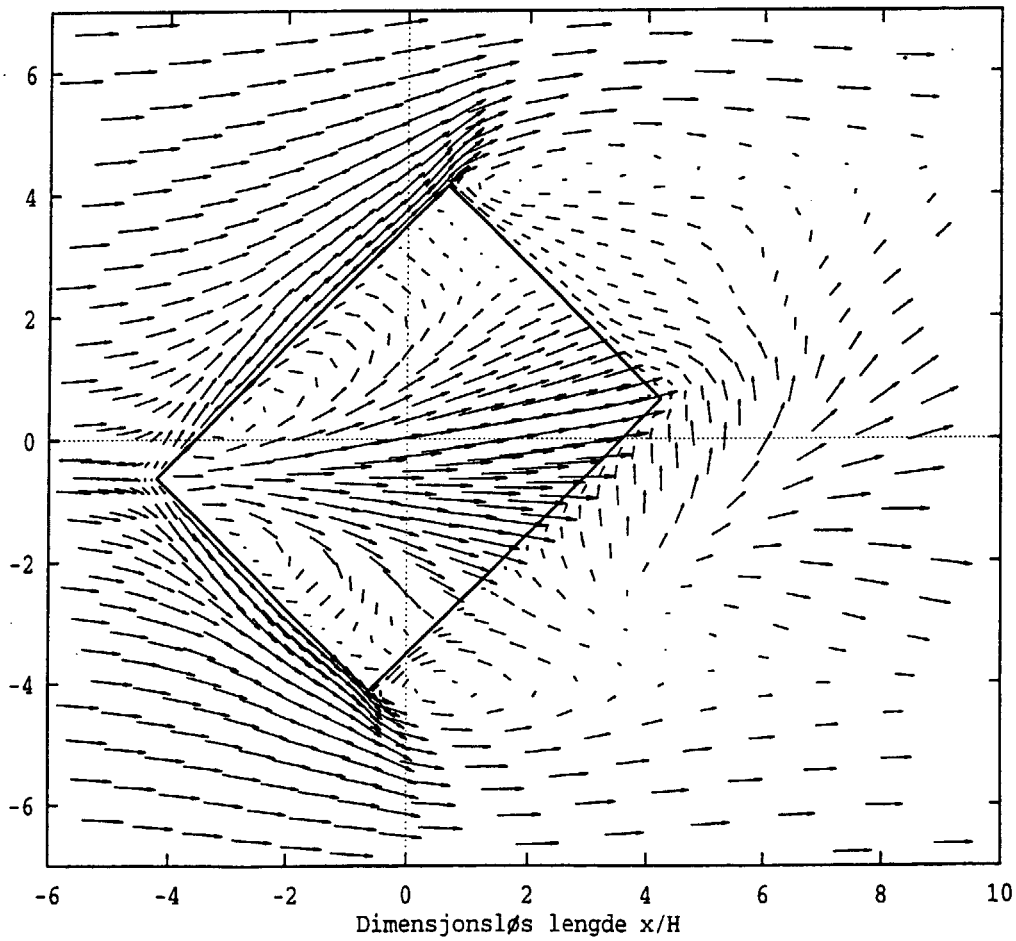


Figure 9: Vind fra nordvest: Horisontalperspektiv av hastighetsfelt nær bakken og taket på bygningen.

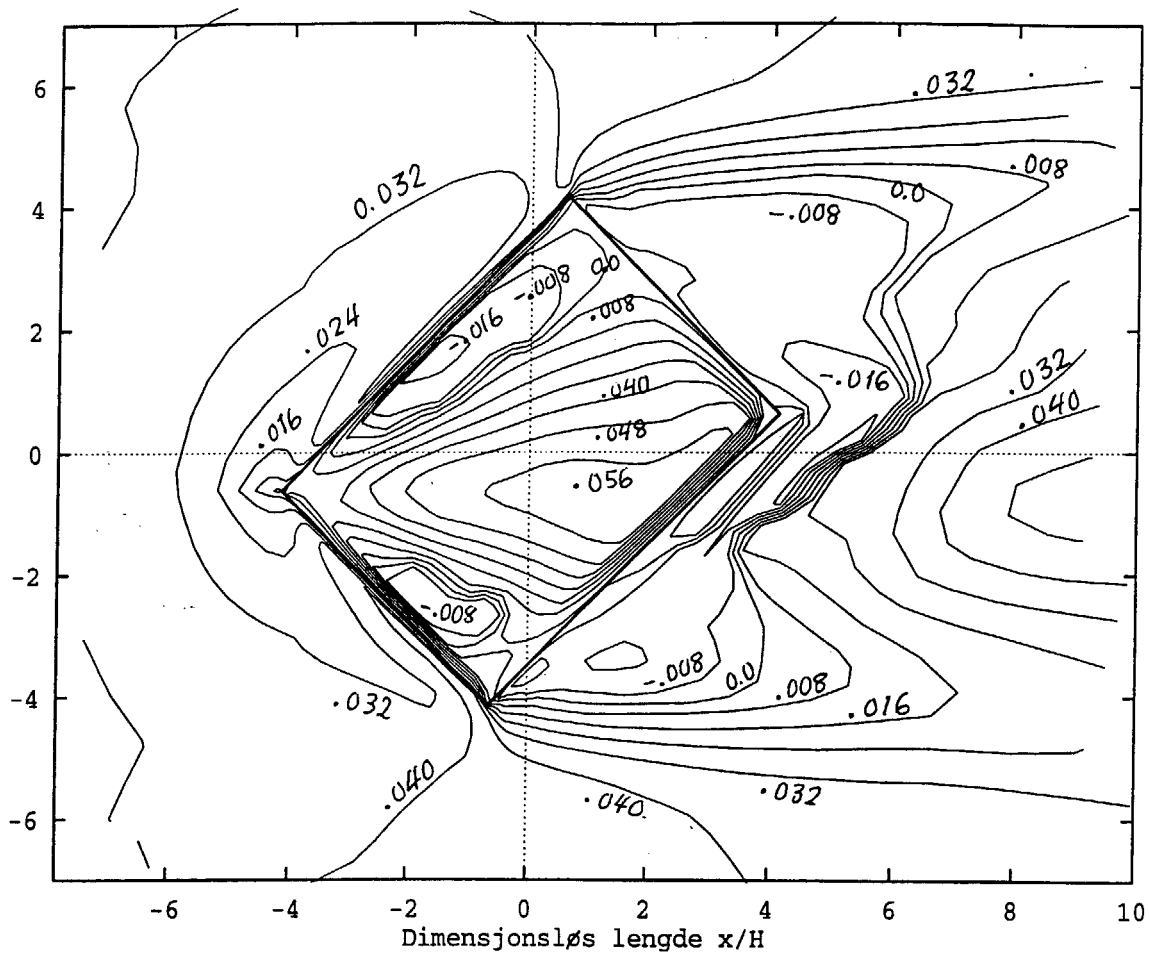


Figure 12: Vind fra nordvest: Friksjonskoeffisient på taket og bakken utenfor bygningen sett ovenfra. Avstand mellom isolinjene er $\Delta C_f = 0.008$.

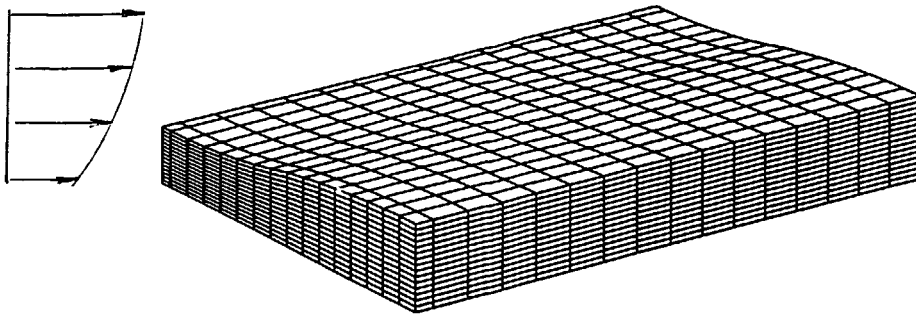


Figure 14: Perspektiv av forenklet ekspedisjonsbygning med vind fra sørøst

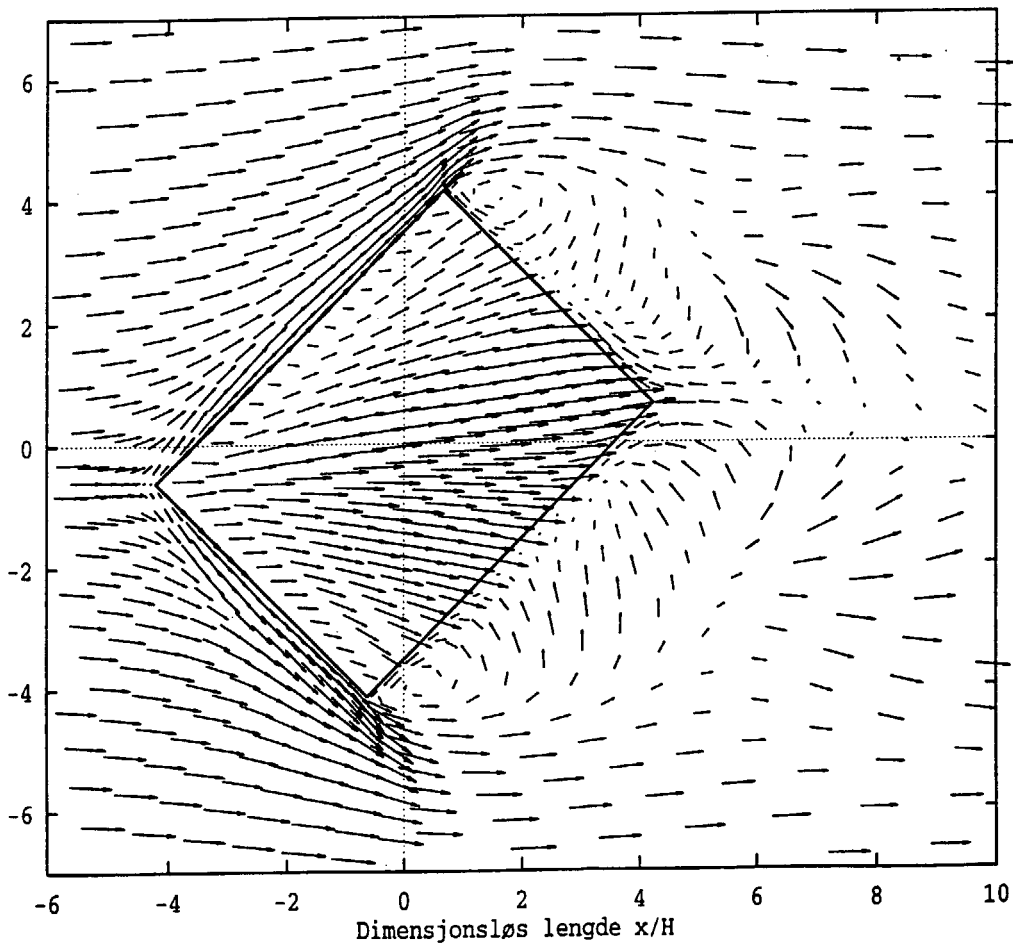


Figure 15: Vind fra sørøst: Horisontalperspektiv av hastighetsfelt nær bakken og taket på bygningen.

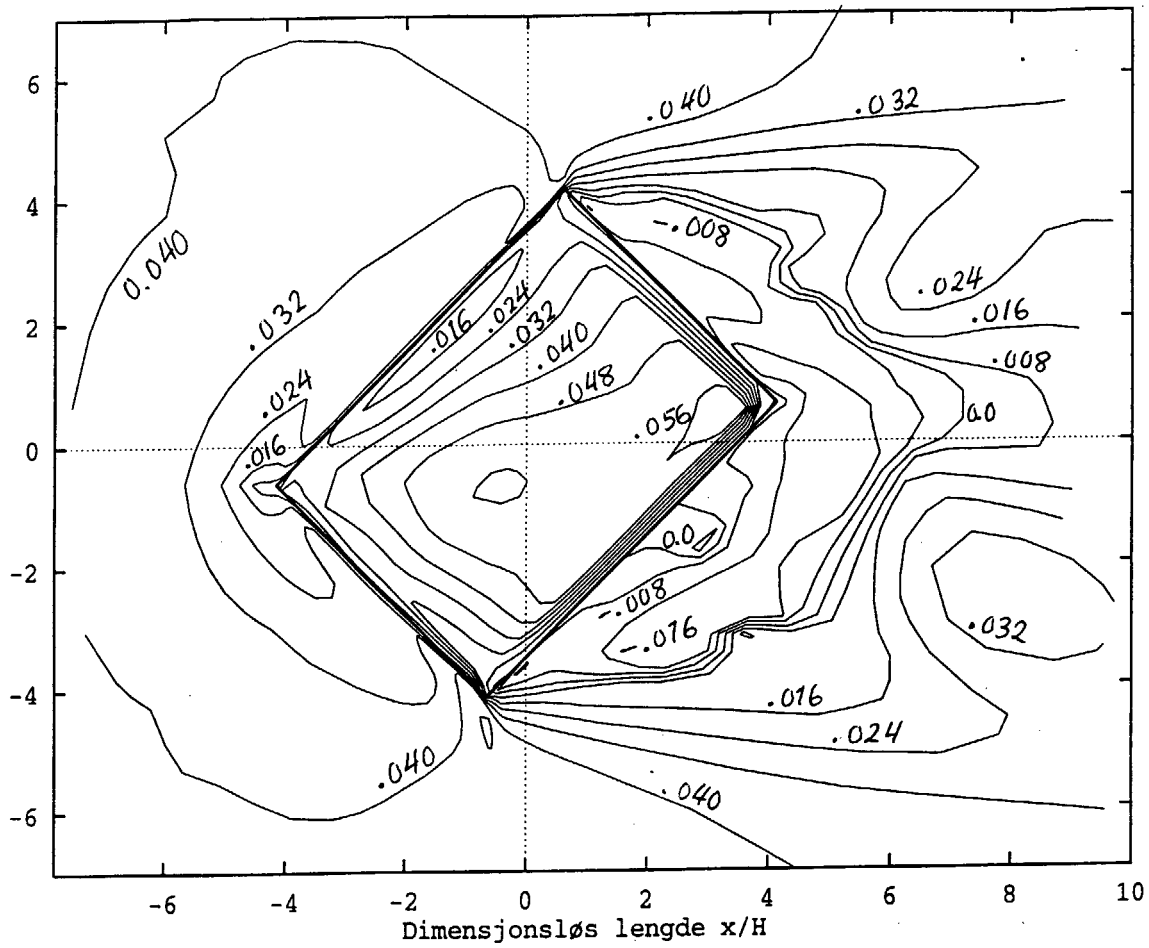


Figure 18: Vind fra sørøst: Friksjonskoeffisient på taket og bakken utenfor bygningen sett ovenfra. Avstand mellom isolinjene er $\Delta C_f = 0.008$.