

# DNMI-RAPPORT

**DET NORSKE METEOROLOGISKE INSTITUTT**

POSTBOKS 43 BLINDERN 0313 OSLO 3

TELEFON: 22 96 30 00

ISBN 0805-9918

RAPPORT NR.

**11/01 KLIMA**

DATO

05.11.01

TITTEL

## **BEHANDLING AV TOPOGRAFI I NY NORSK STANDARD FOR VINDLASTER, NS3491-4**

UTARBEIDET AV

**Knut Harstveit - DNMI**  
**Rune Sandvik - NBR**

OPPDRAGSGIVER

**Norges Byggstandardiseringsråd - NBR**

OPPDRAGSNR.

SAMMENDRAG

Rapporten omhandler topografisk modifikasjon ved økning av middelvinden over en ås og skjerming i delsektorer bak middels bratte åser.

Rapporten behandler økning av turbulensintensitet og vindkastforsterkning nær bratt terreng. Utfra teori, målinger og vindskader er det gitt en dokumentasjon på typiske terrengtyper som kan gi slike effekter. Det er også gitt en veiledning for uttak av terrengparametre, slik som bratthet, nærhet og retning til fjellet. Det er angitt hvilke verdier av disse parametrene som medfører bruk av forsterkningsfaktorer.

Rapporten omhandler også endring av basishastighet,  $V_b$  med høyde over havet, der  $V_b$  refererer seg til midlere vindhastighet over 10 minutter, 10 m over flatt land på terrengkategori II («flyplassterreng») med årlig sannsynlighet 0.02 (dvs. med en returperiode på 50 år). Denne grunnverdien er gitt i form av kommuneverdier i NS 3491-4.

UNDERSKRIFT

.....  
**Knut Harstveit**  
SAKSBEHANDLER

.....  
**Bjørn Aune**  
FAGSJEF

<b>SAMMENDRAG .....</b>	<b>3</b>
<b>1. INNLEDNING .....</b>	<b>5</b>
<b>2. FORSTERKNING AV VINDEN OVER EN ÅSER OG SKRENTER .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1 Generelt om beregning av topografifaktoren, <math>c_t</math>, i NS 3491-4.....</b>	<b>6</b>
<b>2.2 Beregning av topografifaktoren ved bruk av vinddata .....</b>	<b>9</b>
2.2.1 Beregning av topografifaktor ved Sula fyr .....	9
2.2.2 Beregning av topografifaktor ved Askervein hill .....	10
<b>3. Modifisert strømming etter passasje av fjell og åser .....</b>	<b>14</b>
<b>3.1 Modifikasjon av forsterkningskoeffisienten ved strømming over åser og skrenter ved passasje av foranstående ås .....</b>	<b>14</b>
<b>3.2 Strømningsbilde bak idealiserte, bratte terrengformer .....</b>	<b>15</b>
3.2.1 Idealisert, 2-D åsrygg.....	15
3.2.2 3D fjell - Symmetrisk omstrømming.....	16
3.2.3 3D fjell - Asymmetrisk omstrømming .....	17
3.2.4. Fjellbølge - effekter.....	19
<b>3.3 Vindskader .....</b>	<b>19</b>
3.3.1 Nyttårsorkanen på Nordvestlandet 01.01.92.....	19
3.3.2 Skadestudier i Hadsel kommune.....	21
3.3.3 Stormene i Oppdal .....	23
<b>3.4 Bruk av vindmålinger i Norge. Innflytelse av bratt terreng.....</b>	<b>24</b>
<b>3.5 Litteraturstudier.....</b>	<b>27</b>
<b>3.6 Anbefalt modifikasjon ved omkringliggende fjell og åser.....</b>	<b>27</b>
3.6.1 Identifikasjon av topografiske parametre i bratt terreng.....	27
3.6.2 Skjerming.....	28
3.6.3 Implementering i ny standard, NS 3491-4 .....	28
<b>3.7 Sektoriell modifikasjon .....</b>	<b>30</b>
<b>4. VARIASJON AV BASISHASTIGHET MED HØYDE OVER HAVET .....</b>	<b>31</b>
<b>5. REFERANSELISTE .....</b>	<b>32</b>



## Sammendrag

Rapporten omhandler topografisk modifikasjon ved økning av middelvinden over en ås slik denne er gitt i NS 3491-4. På dette punktet er NS3491-4 dels en oversettelse av anbefalingene i ISO 4354:1997, utvidet til 3-dimensjonale åser etter en idé av Lemelin, Surry og Davenport.

Middelvindhastighetsøkningen over relativt bratte åser er undersøkt ved hjelp av observasjonsdata funnet i litteraturen. Ved nivået 10 meter over bakken er vindøkningen, beregnet etter NS 3491-4, i meget god overenstemmelse med beregninger basert på vindmålinger nær toppunktet av åsene. Overenstemmelsen er tilfredstillende også for høyden 100m over toppunktet. Men NS 3491-4 utvider betydelig området (intervallet av  $x$ ) omkring toppunktet der topografifaktoren beregnes større enn 1,0 sammenlignet med resultatet av målinger. På lesiden er denne utvidelsen størst. Inntil mer generell kunnskap er tilgjengelig på dette området, må eventuelle behov for nøyaktigere beregninger baseres på målinger eller modellforsøk.

Målingene viser også at blokkering og skjerming er betydelig i områder på hhv. lo- og leside av den høyeste åsen. Det er observert inntil 20% og 60% reduksjon av vindhastigheten for områdene med hhv. blokkering og områder med skjerming. Tilsvarende gir NS 3491-4 20% reduksjon i middelvindhastigheten for skjerming. En er klar over at skjermingen i virkeligheten ofte er større enn gitt i NS 3491-4.

Når det ligger en ås foran åsen på byggestedet, reduseres virkningen av sistnevnte, og virkningen er gitt som en formel i NS 3491-4. I denne rapporten er det gitt en motivasjon for formelen.

Ut fra vindtunnelmålinger og numeriske studier finner en at når åssiden er brattere enn ca. 30 grader, separeres vindfeltet. På le-siden av en bratt skråning settes det opp en virvel og vinden på bakken bak fjellet strømmer tilbake mot fjellet. Vanligvis minker da middelvinden, men vinden blir turbulent og sterke vindkast kan forekomme. Særlig sterke kan vindkastene bli dersom vinden strømmer over og rundt en bratt fjellrygg. Vinden strømmer da på ulik måte over og rundt fjellet og det kan oppstå korketrekkevirkninger som lett transporterer sterk vind ned mot bakken.

Rapporten beskriver teoretiske anskuelser, skadesteder og målesteder for sterk vind bak bratte fjellformasjoner. Skader etter blant annet nyttårsorkanen i 1992 og sterke stormer i Lofoten 1993 er gjennomgått. Det viser seg at bratte fjellformasjoner ofte kan ha en eller flere vindretninger som kan gi særlig sterke vindkast enkelte steder bak fjellet.

Rapporten tar for seg måleresultater fra flyplasser som ligger i nærheten av fjellformasjoner og beskriver hvorledes avstand til fjellet, fjellets bratthet og beliggenhet i forhold til plassen spiller inn.

Rapporten ender opp med en anbefaling av hvorledes topografifaktoren bør anvendes i bratt terreng. Dersom fjellet er brattere enn 30 grader, er det innenfor 15 fjellhøyder bak fjellet risiko for områder med 10% forsterkning av vindkastene, og innenfor 10 fjellhøyder ved 40 grader eller brattere, også områder med 20% økning. Det innføres en turbulensforsterkningsfaktor i NS 3491-4 i disse områdene, mens middelvinden antas uendret eller svekket med 10%. Det blir gitt nøyere avgrensingsanvisninger for å identifisere områdene.

Rapporten behandler også vindøkningen i høyfjellet i forhold til basisvind i havnivå. Det antas at ved høyder over 400 m (700 m i Nord-Trøndelag - Troms, 900 m lenger sør), øker basisvinden fra referansevind, som ligger på 22-30 m/s, opp mot 30 m/s etter hvert som høyden øker. Høydeøkningen får størst betydning for de områdene som har lav basisvind. Filosofien er at høyfjellet og kyststrekningen fra Lindesnes til Finnmark er eksponert for sterk vind, mens større områder ellers er skjermet av topografien.

## 1. Innledning

Denne rapporten er ment som et bakgrunnsdokument til den nye norske vindstandarden, NS – 3491-4 (1). Rapporten er utført på oppdrag av NBR, med økonomisk støtte fra NBR's vindprosjekt og faglig støtte fra NBR' vindlastkomité. Dersom en ikke kjenner 3491-4 godt fra før, anbefales det å ha standarden for hånden når denne rapporten leses.

Referansevindhastigheten,  $V_{REF}$  er definert som midlere vindhastighet over 10 minutter, 10 m over flatt land i havets nivå (i praksis, lavlandet under tregrensen) med terrengkategori II («flyplasssterreng») og med årlig sannsynlighet 0.02 (dvs. med en returperiode på 50 år).  $V_{REF}$  er gitt som kommuneverdier i (1), tillegg A og bakgrunnen for utregningene vil bli publisert i egen DNMI - Rapport (2).

Basisvindhastigheten, dvs. tilsvarende middelvindhastighet på et idealisert byggested finnes ved å korrigere  $V_{REF}$  for sektor, sesong, høyde over havet og evt. avvikende returperiode, dvs.

$$V_b = c_{RET} \cdot c_{\text{ÅRS}} \cdot c_{HOH} \cdot c_{SAN} \cdot V_{REF}.$$

For å komme fram til stedsvindhastighet,  $V_s$  skal det også multipliseres med en ruhetsfaktor og en topografifaktor,  $V_s(z) = c_r(z) \cdot c_t(z) \cdot V_b$ .

Ruhetsfaktoren,  $c_r(z)$  er gitt ved  $k_r \ln(z/z_0)$ , hvilket transformerer basisvinden over til stedets terrengruhetskategori, med angitt sett av terrengruhetsfaktor,  $k_r$  og ruhetslengde,  $z_0$  og gir samtidig vindhastighetens høydeprofil på et flatt område med den angitte ruhetslengden. I (1) er det gitt beskrivelse av til sammen 5 ruhetskategorier. Siden statisk vindlast i standarden er basert på vindkasthastighetstrykket, må  $V_s(z)$  multipliseres med en statistisk bestemt faktor som avhenger av turbulensintensiteten,  $I_v(z)$ . Vindkasthastigheten er gitt ved

$$V_{kast}(z) = V_s(z) \sqrt{(1 + 7 \cdot I_v(z))} \approx V_s(z)(1 + 2,8I_v(z)).$$

Topografifaktoren  $c_t$  kommer inn når terrenget på eller nær byggestedet ikke er flatt og behandles i denne rapporten. Vi tar for oss topografisk modifikasjon ved økning av middelvinden over en ås, økning av vindkasthastighet og turbulensintensitet ved bratt terreng, samt skjerming i delsektorer bak middels bratte åser. Dessuten blir faktoren for endring av basishastighet med høyde over havet,  $c_{HOH}$  behandlet.

## 2. Forsterkning av vinden over en åser og skrenter

For byggverk som ligger i kupert terreng er det viktig å ta i betraktning vindhastighetsøkningen på toppen av en ås og toppen av en skrent. Slik vindforsterkning skyldes konvergens av strømlinjer over toppen.

### 2.1 Generelt om beregning av topografifaktoren, $c_t$ , i NS 3491-4

Basert på en rekke forsøk finnes det et formelapparat som kan brukes for slik forsterkning. I NS 3491-4 følges anbefalingene gitt i ISO 4354:1997 (3) som er utvidet til 3-dimensjonale åser i NS 3491-4 etter en skisse gitt av Lemelin *et al.* (4). Formelen (2.1) brukes til å bestemme faktoren  $c_t$ , som multipliseres med basisvindhastigheten i flatt omkringliggende terreng for å bestemme den forhøyede middelvindhastigheten nær toppen av åser og bakker.

For byggested nær toppen av en frittliggende ås eller skråning er  $c_t$ , gitt ved:

$$c_t(z) = 1 + \Delta S_{z,\text{maks}} \cdot \left[ \frac{B/L_0}{B/L_0 + 0,4} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{|x|}{k_{\text{virk}} L_H} \right] \cdot e^{-\left(\frac{a-z}{L_H}\right)} \quad (\text{lign. 2.1})$$

der

$z$  er lokal høyde over terrengnivået på byggestedet.  
For  $z < z_{\text{min}}$  i tabell 2.1 antas:  $z = z_{\text{min}}$

$x$  er horisontal avstand, (positiv i vindretningen) i vindvektorplanet  $xz$ , fra lokal topp av åsen til byggestedet, se ligning 2.2 og figurene 2.1, 2.2 og 2.3. For en skråning representerer  $x$  den tilsvarende avstand fra skråningens lokale, høyeste punkt.

$\Delta S_{z,\text{maks}}$  er hastighetstillegget på toppen av åsen og nær bakken. Det avhenger av åsens form og  
bratthet og er angitt i tabell 2.1

$k_{\text{virk}}$  er virkningskoeffisienten for vindforsterkning langs horisontal avstanden fra åskammen. Virkningsområdet er  $1.5L_H$ , unntatt ved passasje fra toppen av en skrent innover et platå, hvor det er  $4L_H$ .

$L_H$  er halve den lokale ås- eller bakkebredden på vindsiden i vindvektorplanet  $xz$ , gjennom byggestedet målt i nivå med halve den største lokale ås- eller bakkehøyden,  $H$ ; i det samme planet; se figurene 2.1, 2.2 og 2.3

$B$  horisontal avstand fra åsens høyeste punkt, til et punkt der åsens høyde,  $H'$ , over det omkringliggende terrenget, er halvert; langs en linje på tvers av vindvektorplanet  $xz$ , se figurene 2.2 og 2.3. Ved irregulær ås velges  $B$  fra den siden som gir størst verdi.

$L_0$  horisontal avstand mot vindretningen fra åsens høyeste punkt til et punkt der åsens største høyde,  $H'$ , over det omkringliggende terreng, er halvert

$a$  er en reduksjonskoeffisient for vindforsterkningsfaktoren med økende høyde over

bakken. Reduksjonen er størst for en 3-dimensjonal, aksesymmetrisk ås, minst for en 2-dimensjonal skrent.  $a$  er angitt i tabell 2.1

Hvis forholdet,  $B/L_0 < 0,5$ , benyttes  $B/L_0 = 0,5$  i ligning 2.1. Dette er lagt inn som en konservativ grense for å hindre at  $c(z) \rightarrow 1$  for vind inn mot kortsiden av en lang, smal ås. Formelen vil neppe gjelde i slike tilfelle.

Ligning 2.1 gjelder for:

$$|x| < k_{\text{virk}} \cdot L_H \quad (\text{lign. 2.2})$$

**Tabell 2.1** Bestemmelse av  $\Delta S_{z,\text{maks}}$

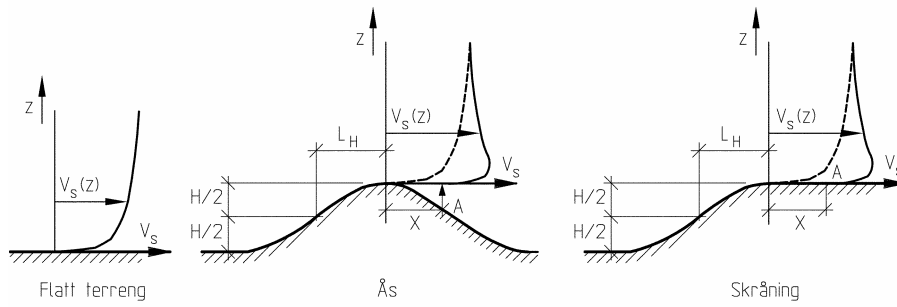
Topografiform	$\Delta S_{z,\text{maks}}$	a	$k_{\text{virk}}$	
			x < 0	x > 0
Ås	2 $H/L_H$	3	1,5	1,5
Skråning	1,8 $H/L_H$	2,5	1,5	4
MERKNAD	For $H/L_H > 0,5$ , anta at $H/L_H = 0,5$			
MERKNAD	Hvis en ås i vindvektorplanet er vesentlig mindre bratt på lesiden enn på losiden, se figur 2.3, kan dette tilfellet, for $x > 0$ , behandles ved å benytte interpolerte verdier for $k_{\text{virk}}$ og $a$			

Vi ser av lign. (2.1) at topografifaktoren avtar med høyden,  $z$ , over det lokale terrengnivået. Reduksjonen med økende  $z$  er størst for en 3-dimensjonal, aksesymmetrisk ås, og er minst for en 2-dimensjonal skråning. Dette skyldes at mer luft strømmer rundt åsen.

Verdiene av  $a$  og  $\Delta S_{z,\text{maks}}$  avhenger av åsens form og bratthet. Representative verdier for maksimum vindforsterkningsfaktor er gitt i Tabell 2.1. Tabellen viser at hastighetstillegget øker med brattheten inntil  $H/L_H = 0,5$ , dvs. med maksimal helningsvinkel (se lign.3.2),  $\alpha_1=21^\circ$ . For slike åser og skrenter er forsterkningen gitt som forsterkning av middelvinden, mens turbulensintensiteten på toppen av åsen viser en svak reduksjon se lign. 6.2 i (1). For brattere åser kan det etter hvert forventes separasjon av vindfeltet og økning av turbulensen også på selve toppen. Det kan da dannes et lokalt sjikt nær bakken med økt turbulens og redusert middelvindsøkning, eller endog middelvindreduksjon. Dette er vanskelig å gi gode anvisninger for, da det er meget avhengig av geometrisk form, ruhet og vindretning. Derfor er det antatt samme forsterkning uansett bratthet, når  $H/L_H > 0,5$ . Det ligger da implisitt at økning av turbulensintensitet og reduksjon av middelvind kompenseres hverandre slik at den statiske vindlasten holdes konstant ved videre økning i bratthet. Dette er selvfølgelig en «omtrentlig» tenkemåte.

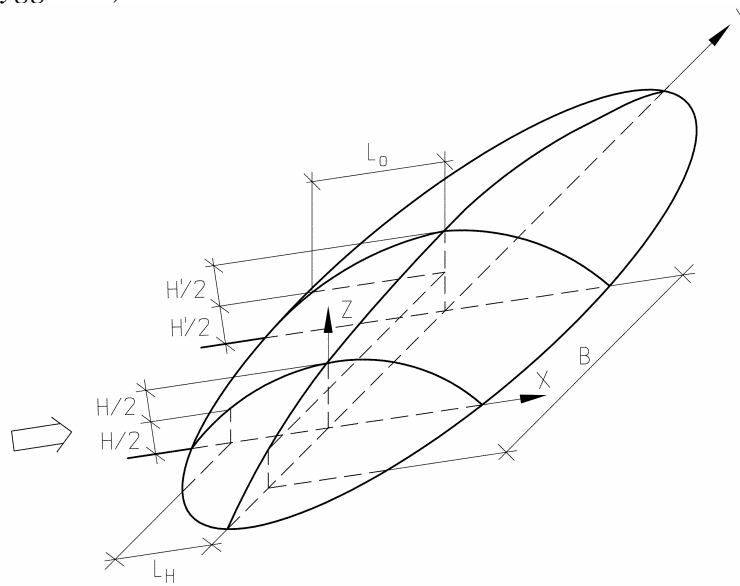
Origo for  $z$  i  $xz$ -planet i figurene 2.1, 2.2 og 2.3, er bestemt ved byggestedets plassering i samme plan, markert ved hjelp av et vikårlig punkt A i figur 2.1.



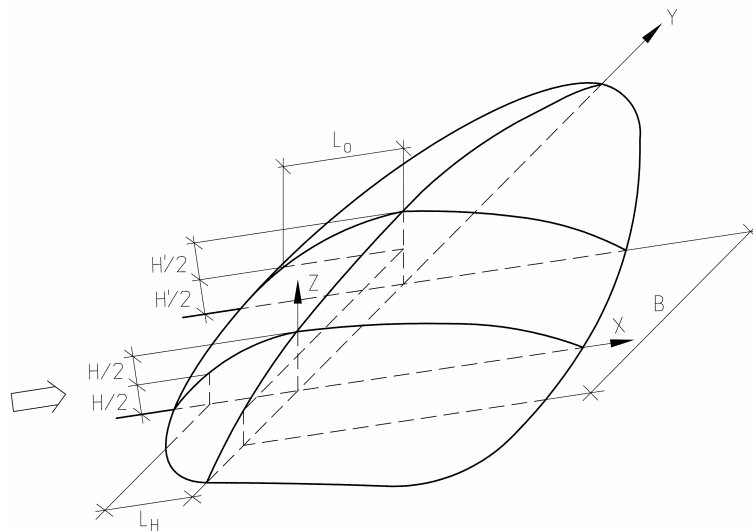


**Figur 2.1**

Vindforsterkning over åser og skråninger i et vertikalt vindvektorplan gjennom byggestedet (A er et vilkårlig byggested).

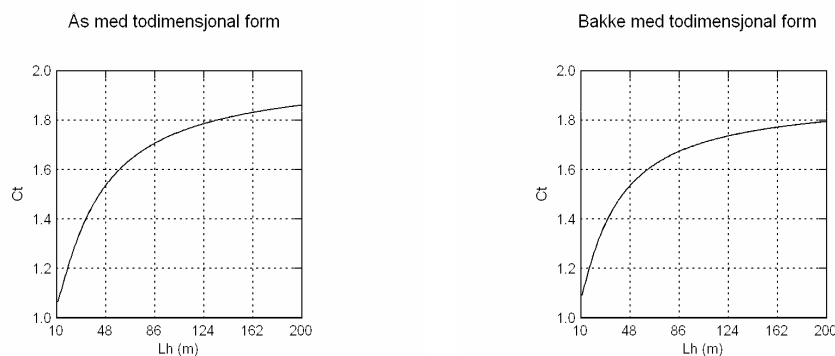


**Figur 2.2** Regulær ås



**Figur 2.3** Irregulær ås/skråning

Figur 2.4 viser eksempel på bruk av ligning 2.1 til bestemmelse av  $c_t$  ved åsens toppunkt,  $x=0$ , i nivået,  $z=10\text{m}$  forutsatt at  $H/L_H > 0,5$ ; se figur 2.1. Diagrammene i figur 2.4 forutsetter også at  $B \gg L_0$ ; se figur 2.2; dvs at åsen har todimensjonal form. Langs den horisontale akse i diagrammene er avsatt horisontal dimensjon for ås,  $L_H$ , jf figur 2.1. Hvis kriteriet  $B \gg L_0$  ikke er oppfylt, multipliseres verdien i diagrammet med  $(B/L_0)/(B/L_0 + 0,4)$ .



**Figur 2.4**

Topografifaktor  $c_t$  beregnet etter NS 3491-4 ved toppunktet med  $z=10\text{ m}$  for bratt topografi; dvs  $H/L_H > 0,5$ . og med todimensjonal. form dvs.  $B \gg L_0$ .

## 2.2 Beregning av topografifaktoren ved bruk av vinddata

Noen aktuelle resultater fra de tre måleseriene for middelvindhastigheten nevnt i innledningen gjennomgås i punktene 2.2.1 og 2.2.2.

For målepunkter benyttes parameteren  $V_s(\text{ref}, z=10\text{m})$  og  $V_s(x=0, z=10\text{m})$  for middelvindhastigheten ved hhv. referansepunktet i flatt terreng og ved toppunktet ( $x=0$ ), der  $x$  er avstanden fra toppunktet i vindretningen i meter. Topografifaktoren ved toppunktet beregnes:

$$c_t(x=0, z=10\text{m}) = V_s(x=0, z=10\text{m}) / V_s(\text{ref}, z=10\text{m}) \quad (\text{linn. 2.3})$$

Det kan antas nøytral termisk stabilitet for måleseriene som her er benyttet slik det også blir gjort i rapportene (sterk sørvestlig vind mot land ved moderate høyder).

### 2.2.1 Beregning av topografifaktor ved Sula fyr

Beregning av  $c_t$  jf ligning (2.3) på grunnlag av målinger i to punkter er gitt i rapporten utarbeidet for NBRs vindprosjekt av Alm og Nygaard (5). Referansemålepunktet ligger nær havnivå på en liten holme, Fyllingen, 1200 m fra det andre målepunktet ved Sula fyr, som ligger i nivå 36 m o.h. For begge punktene antas  $z=10\text{ m}$ . Kart over området er gitt i rapporten. Ruhetslengden varierer fra 0,006 m for hav, til 1,0 m for bebyggelsen på øya. Bebyggelsen har imidlertid liten arealutstrekning og den påvirker neppe vesentlig målingene av middelvindhastigheten ved toppunktet.

Begge målepunktene ligger eksponert for vind fra alle retninger. Sula fyr kan, ved målepunktet, idealisert oppfattes som en "regulær" tredimensjonal ås jf figur 2.2 ved vindretning omkring rett vest (270 grader).

Etter NS 3491-4 blir  $c_t$  og parameterene i figur 2.1 og 2.2 for Sula fyr som angitt i tabell 2.2.

**Tabell 2.2** Beregning av  $c_t$  for Sula fyr.

H	$L_H=L_0$	$H/L_H$ maks: 0,5	B	$B/L_0$	$e^{-(az/L_H)}$	$(B/L_0)/$ $(B/L_0+0,4)$	$\Delta S_{z,\text{maks}}$	$ x <$	$c_t$
36m	30m	1,2 (dvs.:0,5)	80m	2,7	0,37	0,87	1,0	45m	1,32

Alm og Nygaard (5) beregnet etter ligning 2.3,  $c_t = 1,33$  på grunnlag av vinddata. Dette stemmer meget bra med verdien  $c_t = 1,32$  etter NS 3491-4; jf tabell 2.2. Numeriske beregninger gav  $c_t$  – verdiene 1,34 og 1,28 for ved bruk av hhv. WaSP (lineær modell) og PHOENICS (ikkelineær modell).

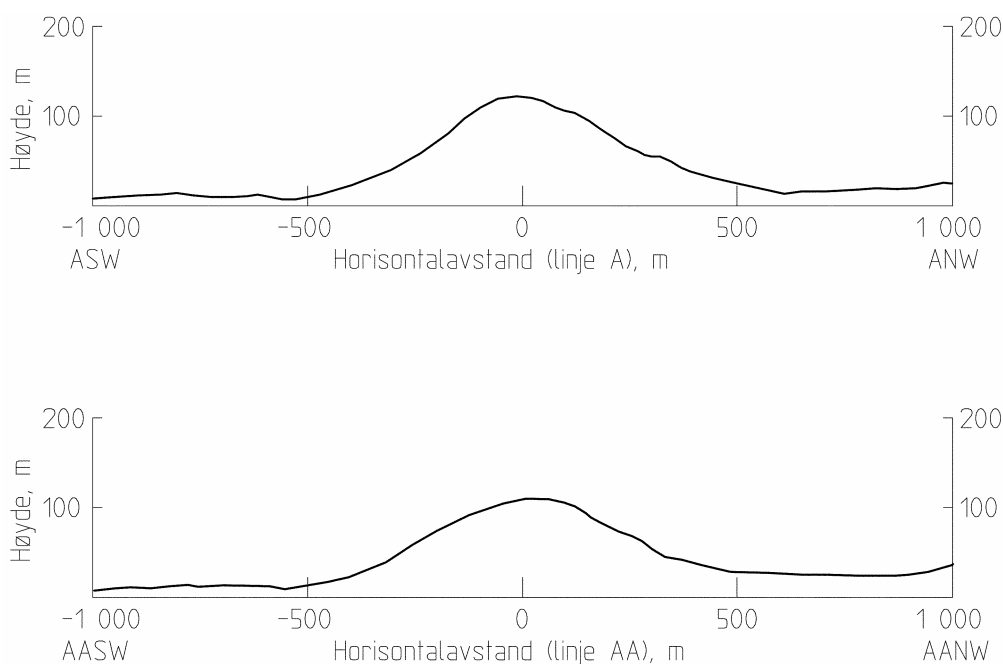
Kort sagt bekrefter resultatene fra Sula fyr (liten bratt ås) formel 2.1 som er hentet fra NS 3491 -4.

## 2.2.2 Beregning av topografifaktor ved Askervein hill

Vindmålingene ved Askervein hill er et omfattende materiale. Studiene av dette er gjengitt i Taylor, P.A. og Teunissen H.W. (6), Taylor *et al.* (7) samt vindtunnelsimulering ved Teunissen *et al* (8). Fra disse studiene er det benyttet noen aktuelle resultater.

I horisontalplanet er Askervein hill ellipseformet med lengdeakser, omlag 1 km og 2 km, og største høyde er ca. 120 m o.h. Åsen ligger på en liten øy tilhørende de ytre Hebridene. Parametrene for åsen, jf figur 2.1, og figur 2.2 blir, for sørvestlig vindretning, som angitt i tabell 2.3 (vindretning omtrent normalt på den lengste aksen)

Langs denne retningen er det lagt inn to parallelle observasjonslinjer, A: (ASW-ANW) og AA (AASW-AANW), i ca 400 m innbyrdes avstand, se figur 2.5. Begge observasjonslinjene har mange målepunkter. Målepunktene langs disse to linjene gir, ved sørvestlig vindretning (langs linjen), god informasjon om middelvindhastighetens variasjon, se figurene 2.6 og 2.7, over en høy relativt bratt ås. Det er bare denne vindretningen som er benyttet her.



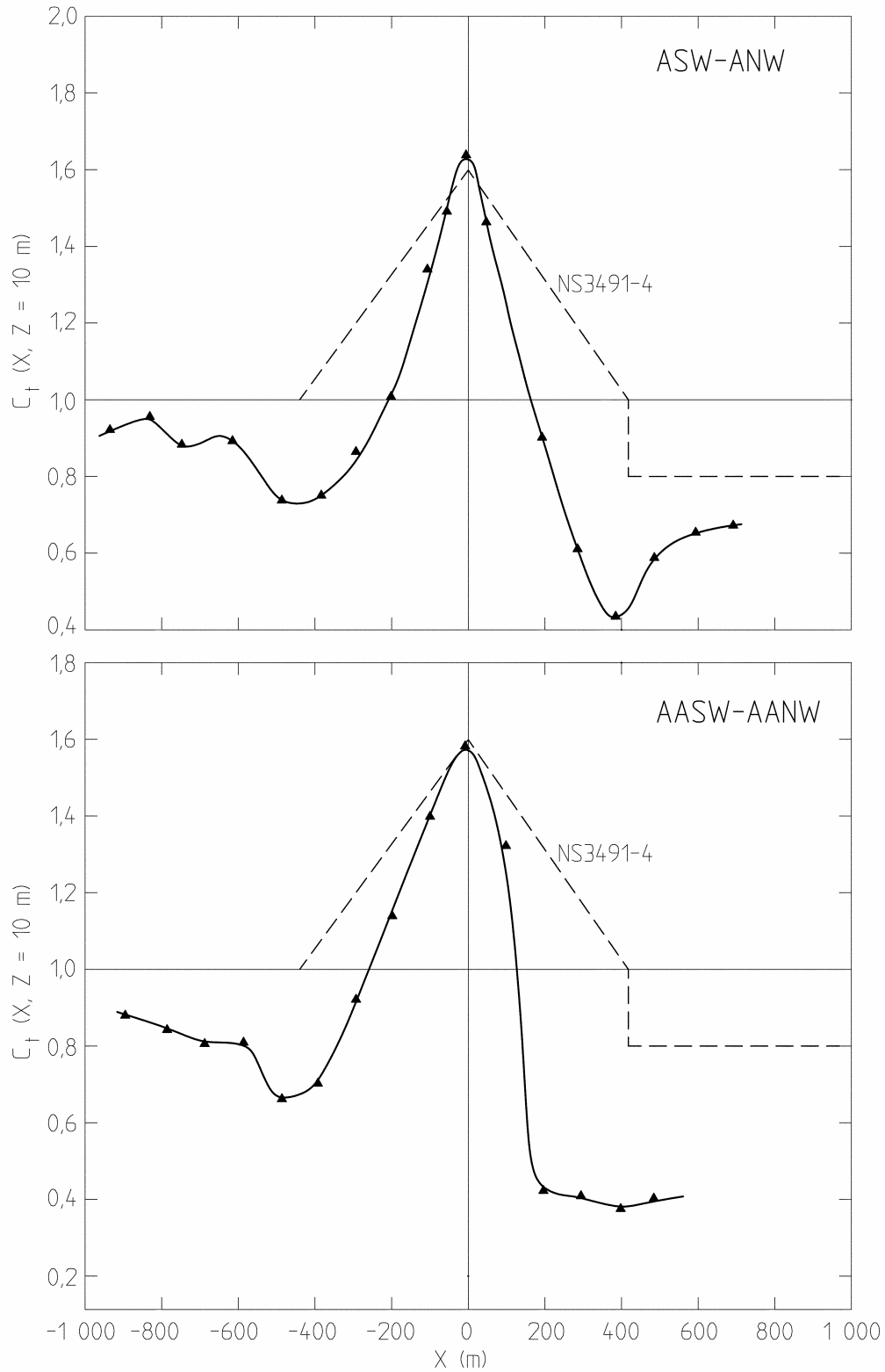
**Figur 2.5** Askervein hill. Høydeprofiler for linjene A og AA.

**Tabell 2.3** Beregning av  $c_t$  for Askervein hill.

Observasjonslinje	A (ved $x=0$ m)	AA (ved $x \approx 0$ m)
H	ca: 110 m	ca.100 m
$L_H$	ca. 295 m	ca. 285 m
$ x  <$ (jf ligning 2.2)	442 m	428 m
$\Delta S_{z,maks}$	0,75	0,70
$B/L_0$	ca. 3,22	ca. 3,33
$(B/L_0)/((B/L_0)+0,4)$	0,89	0,89
$e^{-(az/L_H)}$ ( $z=10$ m)	0,90	0,90
$c_t(0, 10$ m) ved beregning på grunnlag av vindmålinger	1,63	1,58
$c_t(0, 10$ m) ved beregning på grunnlag av NS 3491-4	1,60	1,58
$v_s(0, 100)/v_s$ (Ref, 10 m) ved beregning på grunnlag av vindtunnelmålinger.	1,65	-
$v_s(0, 100)/v_s$ (Ref, 10 m) ved beregning på grunnlag av NS 3491-4	1,79	1,76

I figur 2.6 er vist fullskala målinger i punkter langs begge målelinjene A og AA for den faste høyden  $z = 10$  m. Tilsvarende beregnede verdier etter NS 3491-4; ligning 2.1 er også tegnet inn i diagrammet.

Beregning av  $c_t$  ved bruk av NS 3491-4 og vindmålingene gir tilnærmet sammenfallende resultat;  $c_t \approx 1,6$  for nivå 10 m over bakken ved toppen av Askervein hill for begge linjene, A og AA; jf tabell 2.3 og figur 2.6. Til begge sider av toppen blir fort NS 3491-4 noe konservativ for Askervein hill.



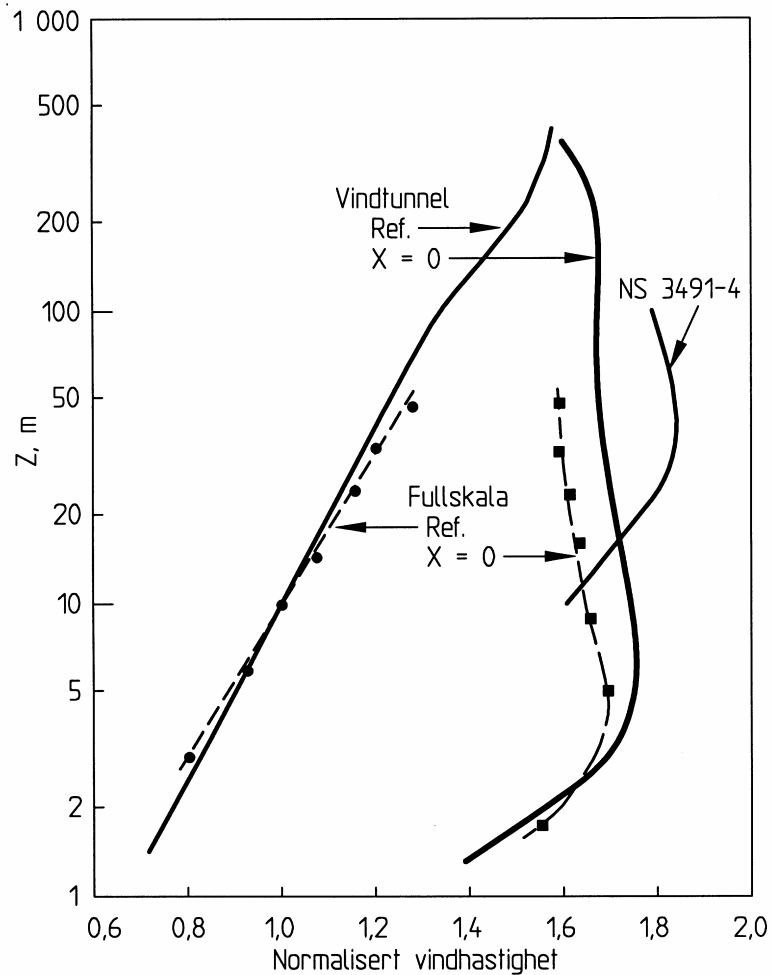
**Figur 2.6** Topografifaktoren  $c_t$ , 10 meter over terreng langs målelinjene, A og AA.

Tabell 2.3 og figur 2.7 viser også beregninger av  $c_t$  basert på vindmålinger langs en høydeprofil ved toppunktet på åsen. Her er også noen tilsvarende resultatene fra vindmålinger i vindtunnel tegnet inn.

Forholdet,

$$V_s(0, z)/V_s(\text{Ref}, 10 \text{ m}) = c_r(z) c_t(0, z) \quad (\text{lign. 2.4})$$

gir vindhastigheten ved toppunktet i høyde  $z$  etter forslag til NS 3491-4 normalisert med vindhastighet i 10 m over flatt terreng i åpent landskap når ruhetslengden  $z_0 = 0,05\text{m}$  er den samme i begge punktene. Ruhetsfaktoren,  $c_r = 1,44$ , bestemmes fra NS 3491-4. Beregningene er gitt i Tabell 2.3. NS 3491-4 stemmer her bra med beregninger basert på vindtunnelmålinger, jf figur 2.7.



**Figur 2.7**

Normalisert vindhastighet for referansepunkt (Ref) og toppunkt ( $x=0$ ) for verdier av  $z$ .



virkingen er redusert til  $e^{-1}$  etter  $x$  åshøyder og reduksjonsfaktoren blir  $e^{-xH_0/L}$ , der  $L$  er avstanden og  $H_0$  åshøyden. Med  $x=12$  får vi samme reduksjon i  $\Delta S$  som Hunt.

Dersom åshøydene er forskjellige benyttes i stedet til  $e^{-(12H_0/L)(H_0/H)}$ , der  $H$  er høyden på byggestedets ås og  $H_0$  høyden av den skjermende åsen. Dette gir fortsatt  $e^{-1}$  etter 12 åshøyder for identisk høye åser. Ved liten skjerming,  $H \gg H_0$ , faller innflytelsen raskt med økende  $L$ ,  $e^{-1}$  nåes etter 4 åshøyder når  $H_0=0.5H$ .

$$c_t'(z) = 1 + (c_t(z) - 1) \cdot e^{-(12H_0^2/HL)}; \quad H \geq H_0 \quad (\text{lign. 3.1})$$

Når foranliggende ås,  $H_0$  er større enn byggestedets, vil formelen ikke fungere. I stedet kan vi sette begge høydene like i et slikt tilfelle. Vi kan i tillegg vurdere stedet i forhold til ordinær skjerming (kap. 3.6.2) eller forsterkning bak bratt terreng (kap. 3.6.1). Da både ordinær skjerming og effekter bak bratte åser er knyttet til områder nær åsen, vil (lign.3.1) gi  $c_t'$  nær 1.0 i slike tilfelle slik at forsterkningseffekten over den lokale åsen spiller liten rolle.

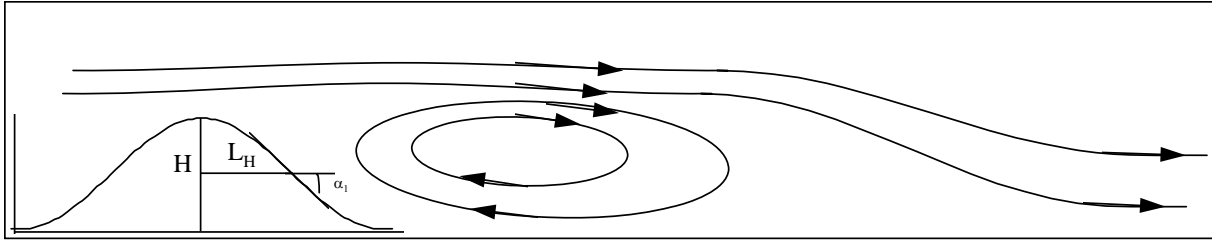
## **3.2 Strømningsbilde bak idealiserte, bratte terrengformer**

### **3.2.1 Idealisert, 2-D åsrygg**

Vi antar nå den idealiserte terrengmodellen gitt som 2D-ås (Figur 2.1). Ved moderate helningsvinkler vil det inntre en reduksjon av vindhastigheten etter at terrenghindringen er passert. Strømlinjene som kan ligge langt fra hverandre i lavere nivåer, konsentreres i et vindskjær i høyde med fjellet. Dersom vi tenker oss flere forsøk der terrenget blir brattere, vil vi komme til et punkt der strømlinjene ikke lenger kan følge terrenglinjene på le-siden. Draget fra den sterke vinden over vindskjæret blir for stort og luft fra lavere nivåer trekkes opp. Det oppstår et markert undertrykk i le-sonen, strømmen er separert. I denne bakevjen, eller resirkulasjonssonen, blir det turbulente forhold og varierende vindretning, men med en tendens til at vindretningen nær bakken er motsatt rettet av den opprinnelige.

Gjennomsnittsvinden vil imidlertid bli svakere enn i samme høyde dersom åsen ikke var tilstede. Farten i de sterkeste kastene kan derimot bli mer sammenlignbar med de sterkeste av de uforstyrrede kastene. Resirkulasjonssonen fortsetter ca. 10 fjellhøyder nedstrøms, noe avhengig av brattheten, mens en kan vente forhøyet turbulens flere ti-talls fjellhøyder nedstrøms fjellet. Separasjon på nedstrømsiden synes å inntre når helningen overstiger ca.  $30^\circ$ , se figur 3.2. Både numeriske og fysiske modeller støtter denne teorien, se Utnes and Eidsvik (10).





**Figur 3.2** Snitt gjennom en 2 - dimensjonal fjellrygg med fjellhøyde,  $H$ , halverdibredde,  $L_H$  og maksimal helningsvinkel,  $\alpha_1$ . og med separert strømming etter passasje av fjellet.

De utførte forsøk gjelder et  $\cos^2$  - fjell, der lokal høyde i posisjon  $x$  er gitt ved:

$$h(x) = H \cos^2 \{ \operatorname{tg}(\alpha_1) \cdot x / H \} \quad (\text{lign.3.2})$$

der fjellhøyden er gitt ved  $H=h(0)$  og  $\alpha_1$  er maksimalvinkelen. Ved halve fjellhøyden gjelder at

$$h(L_H) = \frac{H}{2} = H \cos^2 \{ \operatorname{tg}(\alpha_1) \cdot L_H / H \} \quad \Rightarrow$$

$$L_H = \frac{\pi H}{4 \operatorname{tg}(\alpha_1)} \quad \text{og} \quad \alpha_1 = \operatorname{Arctg} \left( \frac{\pi H}{4 L_H} \right) \quad (\text{lign.3.3})$$

Fjellet går ut til  $x=2L_H$  slik at  $h(2L_H)=0$ .

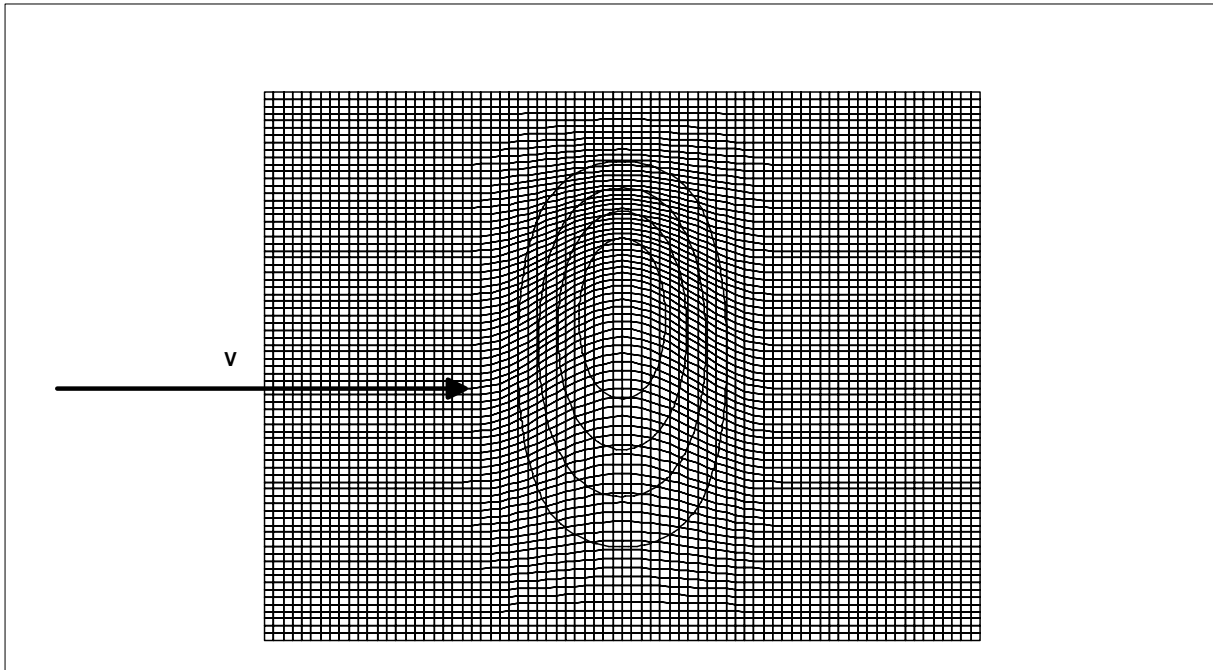
### 3.2.2 3D fjell - Symmetrisk omstrømning

Vi lar så fjellet bli 3 - dimensjonalt. Igjen starter vi idealisert med et  $\cos^2$ -fjell, nå med endelig lengde:

$$h(x, y) = H \cos^2 \{ \operatorname{tg}(\alpha_1) \cdot x / H \} \cdot \cos^2 \{ \operatorname{tg}(\alpha_2) \cdot y / H \} \quad (\text{lign. 3.4})$$

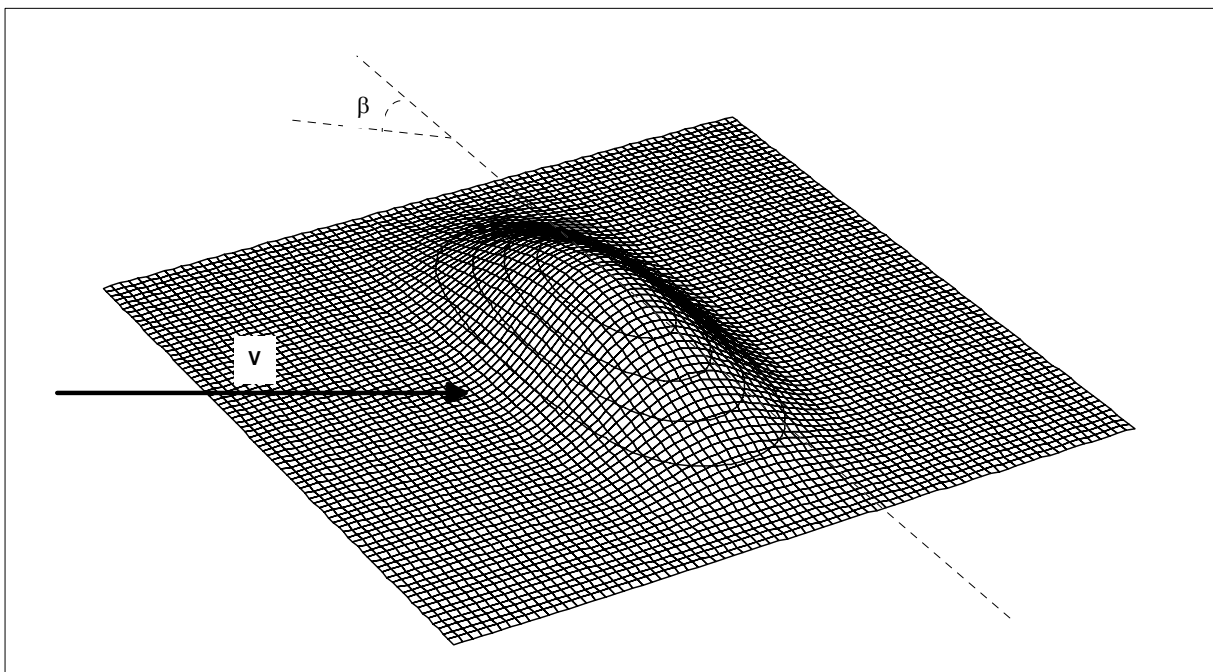
der  $H = h(0,0)$  er høyden av fjellet,  $h(x,y)$  lokal høyde i posisjon  $(x,y)$ ,  $\alpha_1$  og  $\alpha_2$  maksimalvinkler langs  $x$  og  $y$  - aksene.

Fjellet er framstilt på figur 3.3. Dersom fjellet er bratt nok, vil vi få en separasjonslinje som krummer litt mot nedstrømssiden. Numeriske og fysiske modeller (9) viser at vindskjæret da blir liggende som et fallende «tunnel-tak». Den sterke vinden på «tunnel-lokket» drar med seg luft fra laget under. Denne luften erstattes i sin tur av luft som kommer inn fra sidene. Resultatet blir en indre sirkulasjon der vinden hele tiden trekkes inn mot sentrallinjen hvor den stiger til værs og brer seg utover. Det kan dannes to spiralgående virvler i resirkulasjonssonen rett bak fjellet, en på hver side. Utstrekningen av resirkulasjonssonen blir nå kortere enn i det 2-dimensjonale tilfellet.

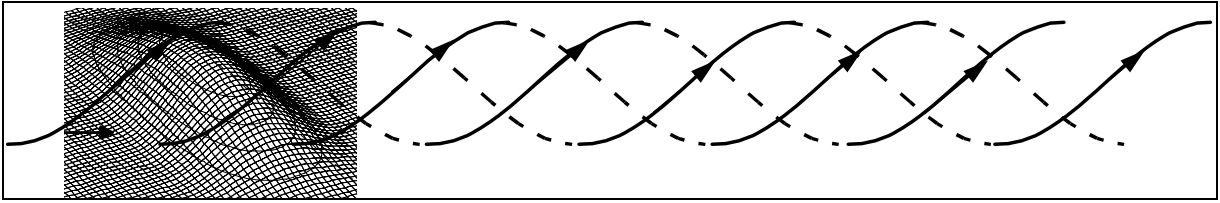


**Figur 3.3** Vind vinkelrett inn mot et cosinuskvadratfjell, sett i skrått fugleperspektiv.

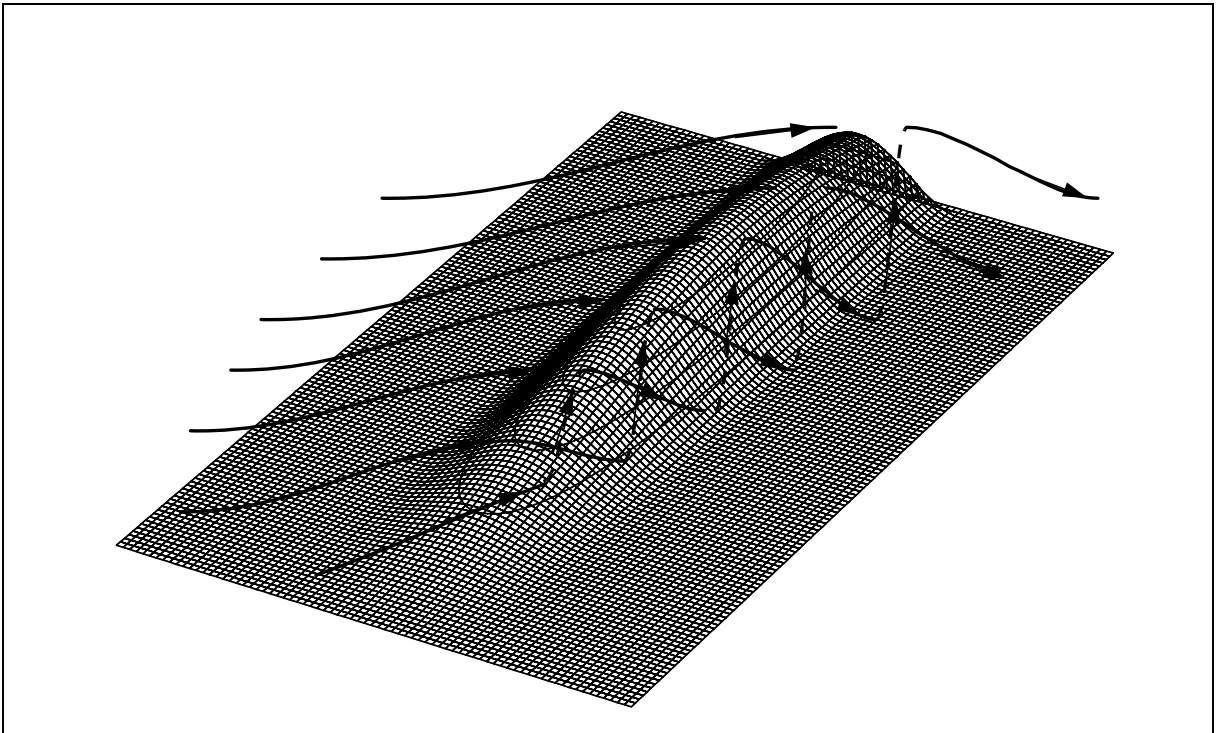
### 3.2.3 3D fjell - Asymmetrisk omstrømning



**Figur 3.4** Vind på skrå inn mot et cosinuskvadratfjell, sett i skrått fugleperspektiv.



**Figur 3.5a.** Eksempel på virvel ved strømming over en asymmetrisk fjellrygg.



**Figur 3.5b.** Eksempel på virvel ved strømming over en asymmetriske fjellrygg.

I eksperimentet ovenfor var omstrømmingen symmetrisk, dvs. det går like mye vind på hver side av fjellet. Vi innfører nå en asymmetri ved å la vinden dreie slik at den treffer fjellet med en vinkel,  $\beta$ , se Figur 3.4 og 3.5. Hvis fjellets lengderetning ligger sørøst - nordvest og vinden kommer fra vest (Figur 3.4 og 3.5a), strømmer det mer luft på sørsiden enn på nordsiden, og mer luft over den sørøstre delen enn over den nordvestre. Undertrykket bak fjellet blir mer markert der luftstrømmen «slipper» overflaten, dvs. på øst - sørøstsiden. Luften i bakevjen dras inn mot fjellet i sør, dvs. som en nordlig eller nordvestlig vind, opp til  $90^\circ$  på tvers av den vestlige vinden over fjellet. Derved er det i gang en «virvelmotor» der sterk høydevind trekkes ned mot bakken og virvles opp igjen i en spiral nedover langs fjellet og videre nedover hovedstrømmen på le-siden. Effekten blir mye sterkere enn i det symmetriske tilfellet der virkningen fra hver side har en tendens til å motvirke hverandre. Virvelen starter ofte der den tre-dimensjonale krumningen er størst (flyvingetipp, hustakhjørner, singulærpunkter i en fjellformasjon) og får mulighet til å vokse ved asymmetri som nevnt over. Rett bak fjellet vil

midlere vindretning ofte ligge ca. 90° på hovedretningen, men vinden er turbulent og skifter mye i styrke og retning. Beskrivelsen over er bekreftet i numeriske og fysiske forsøk (10), og passer godt med observasjoner fra for eksempel Fræna ((11), (24)) og Værøy (12).

Nær terrenget kan vinden i denne virvelen på nedstrømssiden bli sterkere enn den uforstyrrede vinden oppstrøms. Dette påvirker størrelsen av vindkastene spesielt. Ved særlig bratt terreng kan det i tillegg bli store vertikalhastigheter i dette tilfellet.

#### **3.2.4. Fjellbølge - effekter**

Når termisk stabil luft passerer en fjellkjede oppstår det indre tyngdebølger i luften, her kalt fjellbølger siden de er generert av fjellet. Luften er termisk stabil når en hevet luftpakke er tyngre enn de omgivelser den blir hevet opp til. Det er da forholdsvis varm luft i høyere nivåer. I Norge er det særlig slike forhold om vinteren ved lufttransport fra øst til sør, men også i en del situasjoner med sterk vind fra vest der stabiliteten er svakere, men tykkere lag er involvert. Da oppstår fjellbølger som kan bringe sterk vind og turbulens ned mot lavere strøk på le-siden av fjellet.

Ved stor stabilitet kan det bli markerte fjellbølger også bak mindre fjellpartier. Både data og skader indikerer imidlertid at de største effektene finnes når det ligger bratte, lokale fjellsider i et område med fjellbølgegenerert vind på le-siden av et større fjellområde. Både på Sandnessjøen ((13), (14)), Oppdal (15), Bu i Eidfjord (16) og Sunndalsøra ((13), (17)) eksisterer slike koblinger ved vind fra øst til sør, mens Vestfjorddalen i Tinn kommune er av de mer kjente områdene for sterke nedslag av vindfelter omkring vest ((18), (19)). Imidlertid blir disse områdene identifisert som forsterkningsområder også utfra en rent aerodynamisk betraktning (kap.3.1.1 - 3.1.3), selv om det er sannsynlig at betraktningen undervurderer maksimaleffektene. Noe av effekten er også innbakt ved vurderingen av regional, sektoriell ekstremvind i NS 3491-4. Det er neppe aktuelt å forsøke en nærmere identifikasjon innenfor rammene av en standard.

### **3.3 Vindskader**

#### **3.3.1 Nyttårsorkanen på Nordvestlandet 01.01.92**

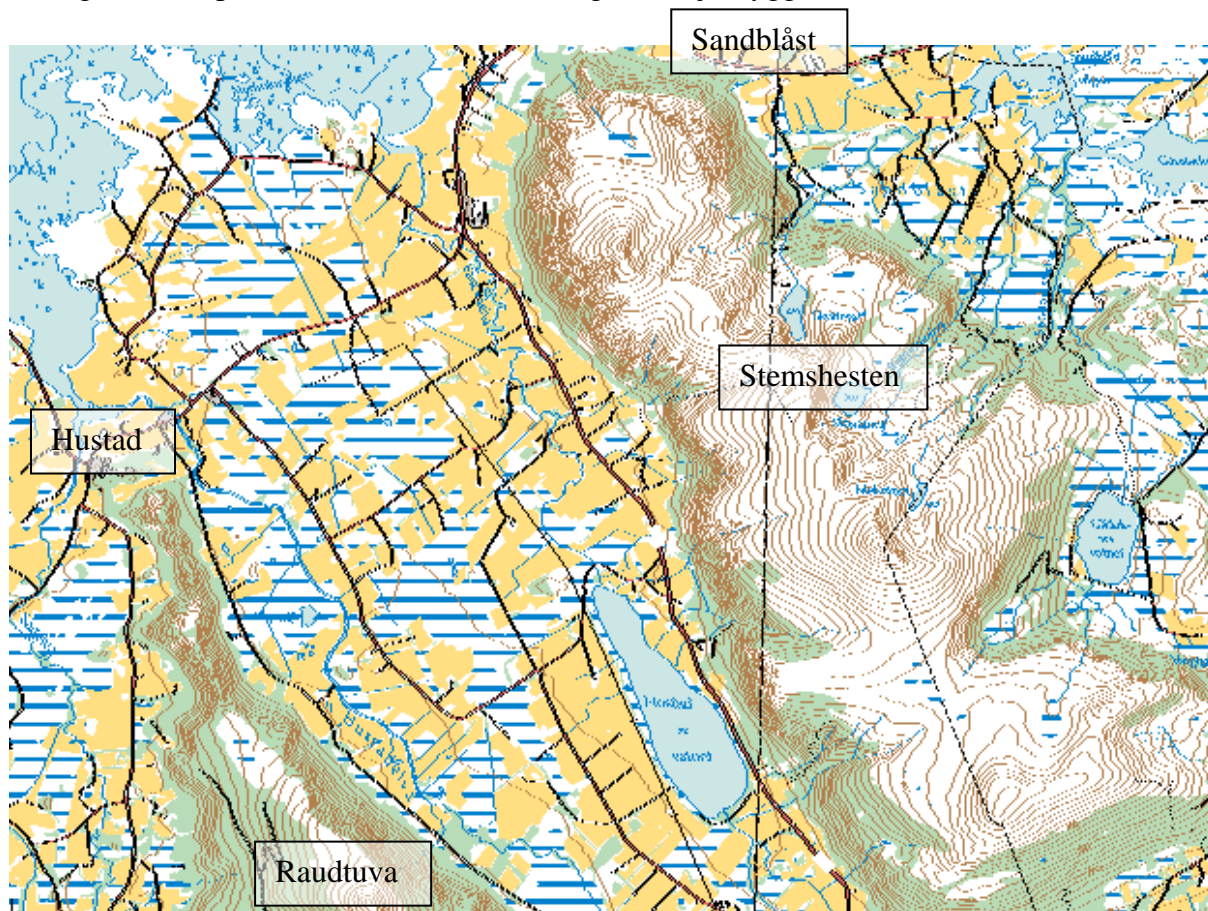
I (20) ble det gjort en studie av skader fra nyttårsorkanen, 1.1.92. Orkanen rammet særlig Møre og Romsdal, men også de nordlige deler av Sogn og Fjordane og deler av Trøndelag. Boken «Orkanen» av O. Bruaseth (21) ble benyttet og de beskrevne skadetilfellene plukket ut fra denne. Ut fra beskrivelsene i (21) ble det funnet 30 alvorlige tilfelle med rene vindskader. Opplagt svake konstruksjoner, slik som garasje under oppføring, ble ikke tatt med. Skadetilfellene er godt beskrevet, bl.a. er det med en tidsangivelse slik at det er mulig ved hjelp av meteorologisk informasjon å rekonstruere det uforstyrrede vindfelt over skadeområdet.



**Figur 3.6.** Kart over skadestedene 1.1.92, Gjerdesvika og Rovdestranda på Sunnmøre.  
Vindretning fra SV til V.  
Kilde: Statens kartverk: "Opplev Norge"

De 30 tilfellene representerer selvfølgelig noe forskjellig evne til å motstå vindkrefter, både av utforming, elde og hva annen styrke angår. Resultatet må likevel sies å være oppsiktsvekkende: 24 av de 30 tilfellene var lokalisert slik at vinden har passert på skrå over en bratt fjellrygg. Dette inkluderer også de kanskje 2 mest omtalte skadestedene: Gjerdesvika og Rovdestranda (Figur 3.6).

Det ble etter nyttårsorkanen også utført en studie av skadene i Fræna kommune (11). Resultatet var det samme. De hardest rammede områdene lå nær de to bratte fjellryggene som bryter opp Hustadsletta, og i særlig grad området nær inntil Raudtuva - Hustad sentrum der vestlig vind har passert den bratte SØ - NV - gående fjellryggen ut mot Hustad.

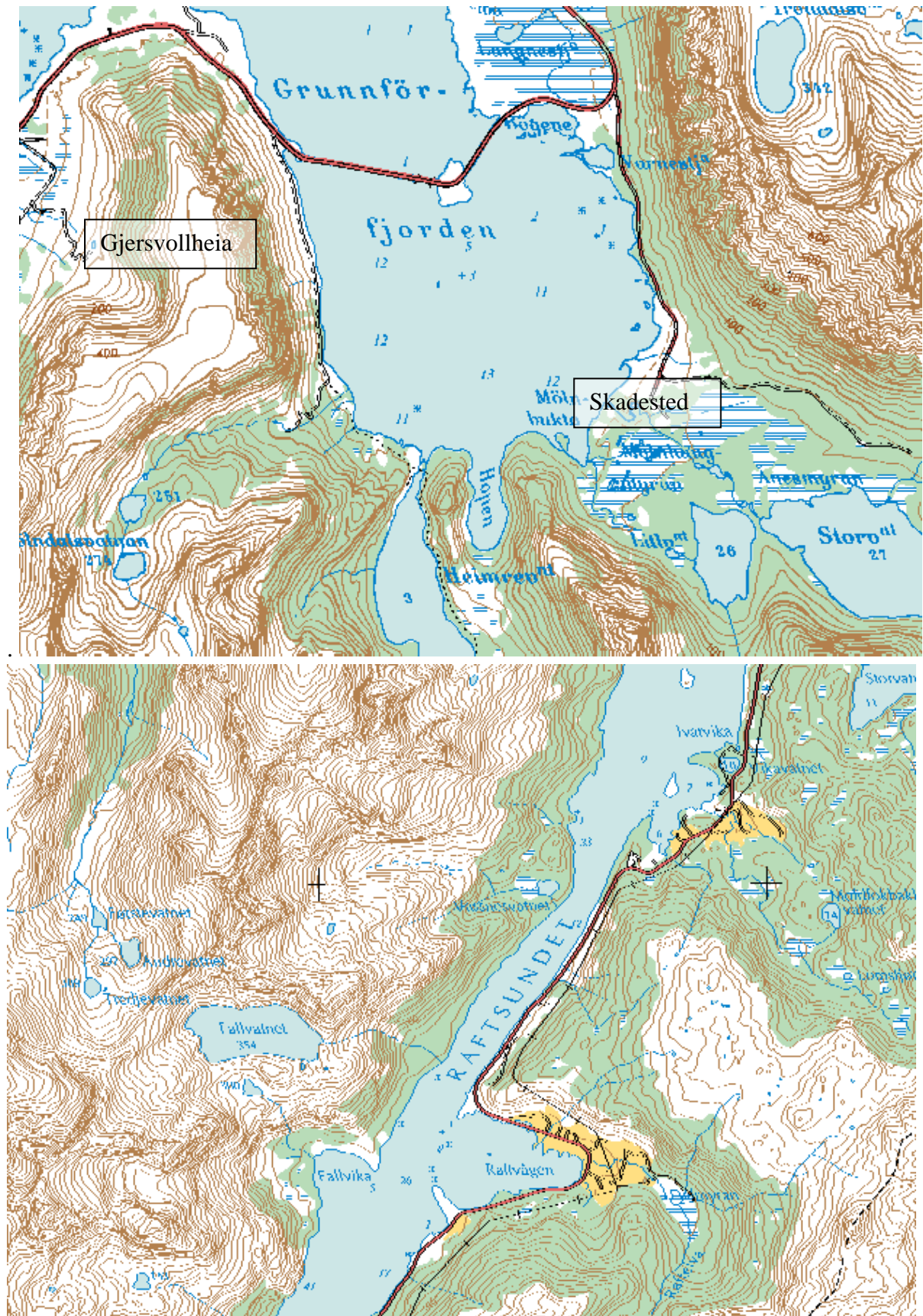


**Figur 3.7.** Kart over Hustadsletta i Fræna kommune, Møre og Romsdal.

Kilde: Statens kartverk: "Opplev Norge"

### 3.3.2 Skadestudier i Hadsel kommune

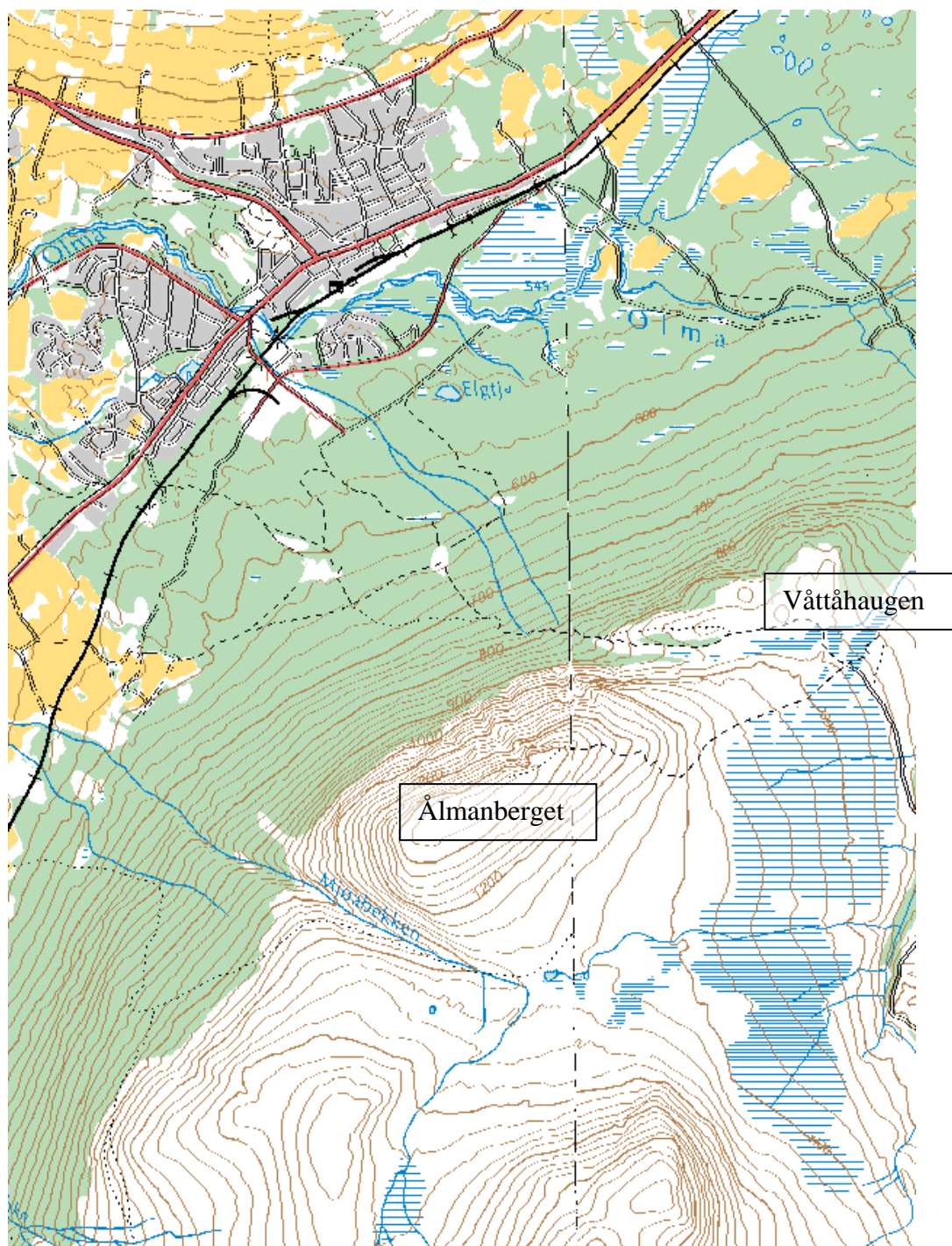
Det ble gjort en undersøkelse av vindskader i Hadsel kommune (22) etter vinterstormene i 1993. Alle de besøkte skadestedene så nær som ett lå nær bratt terreng og slik at vinden hadde passert dette først. I mange av tilfellene var det tydelig at fjellet har en form som indikerer at 3-dimensjonal omstrømning med virvler av korketrekkerform er den sannsynlige årsaken til



**Figur 3.8.** Kart over Grunnfjorden og Raftsundet i Lofoten.  
 Kilde: Statens kartverk: "Opplev Norge"

skaden. Dette må feks. ha skjedd i Grunnfjorden der vestnordvestlig vind som passerte fjellryggen Gjersvollheia medførte brudd i grove konstruksjoner i en spesialdimensjonert uthusbygning. Lokalt kom vinden da inn fra nord. I Raftsundet var det også flere alvorlige skader og lokalbefolkningen gav en levende skildring av hvordan vinden oppfører seg med sterke vindkast, tilbakestrømning, undertrykk og virvler når sterk vestlig vind passerer den bratte fjellskrenten på vestsiden av den sørvest - nordøstgående fjorden.

### 3.3.3 Stormene i Oppdal

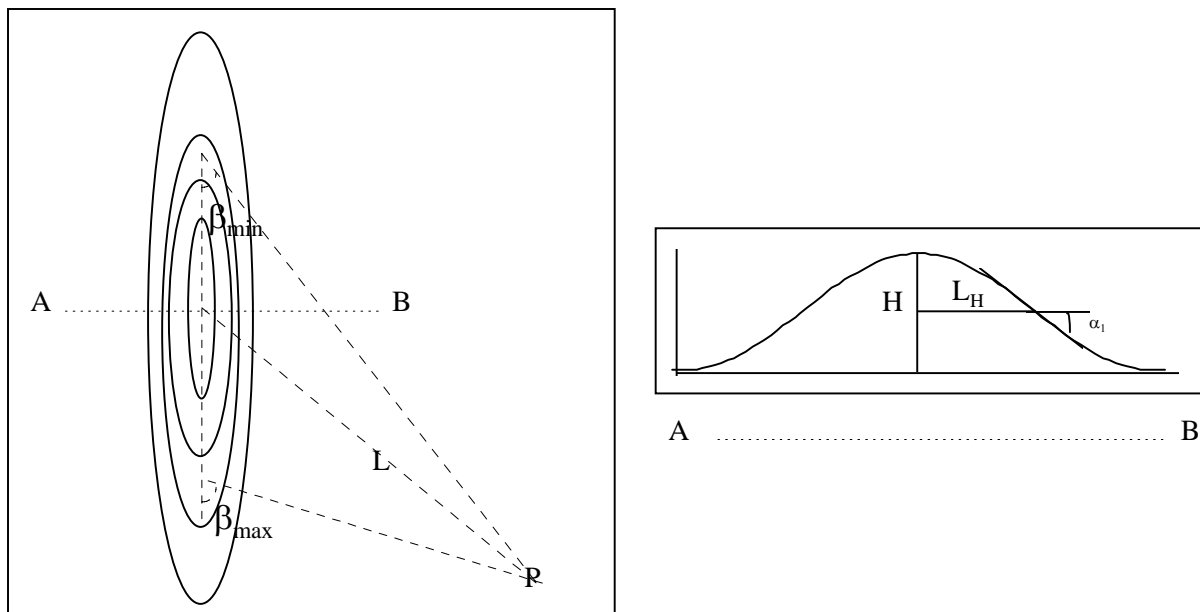


**Figur 3.9.** Kart over Oppdal. Kilde: Statens kartverk: "Opplev Norge"



Det var i alt 5 stormer i Oppdal i årene 1994 og 1995 som utrettet stor skade (15). Vindfeltet i høyden ble modellert ved DNMI, og det var tydelig at en fjellbølge-effekt førte til sterk vind fra sørlig kant (SSØ til SSV) over fjellene i Oppdal. Denne vinden gjorde dog stor skade bare på sporadiske steder, hvorav Oppdal sentrum og umiddelbare nærhet ble rammet. Nøyere studier av skadested og vindretning viste at fjellet Ålmanberget lå i siktelinjen fra skadestedet og rett opp mot vinden, og at dette var tilfelle i alle de 5 stormene. Ålmanberget er røft sett et 3D - cosinuskvadratfjell på kanten av et større platå. Fjelllets lengdeaksen ligger SV- NØ. Fjellet er 800 m høyere enn Oppdal sentrum og skadestedene 2 til 5 km fra fjelllets høyeste punkt. Lokalt kalles denne vinden for Våttåhaugvinden, siden den synes å komme fra Våttåhaugen, på nordøstsiden av Ålmanberget. Dette er konsistent med en korketrekkevirkning fra kanten av fjellet ved asymmetrisk omstrømming. Samtidig må det presiseres at luften i slike tilfelle har stabil sjiktning slik at fysikken ikke er helt klarlagt (se kap. 3.2.4).

### 3.4 Bruk av vindmålinger i Norge. Innflytelse av bratt terreng.



**Figur 3.10**

*Illustrasjon av topografiske parametre i bratt terreng. En idealisert fjellrygg er vist i fugleperspektiv med høydekoter og beliggenhet i forhold til observasjonspunktet, P; samt som et 2D - snitt på tvers gjennom fjelllets toppunkt langs linjen AB.*

Data fra flyplasser er velegnet fordi plassene inneholder nær kontinuerlige vindmålinger og flaten omkring måleren er plan. Mange av plassene har i tillegg bratt terreng innenfor få km avstand. Vi samler nå data fra de 23 flyplassene i Norge som ligger nærmere enn 15 fjellhøyder fra et fjell med  $15^\circ$  stigning eller mer. I tillegg er det tatt med data fra værstasjoner med vindmålinger som viser forsterkninger fra bratt terreng (Sundalsøra og Mosjøen aluminiumsverk (23)), samt data fra undersøkelsen i Fræna (24) slik at samlet antall stasjoner

blir 27. For øvrig er det ingen faste værstasjoner utenom fyr, hav- eller fjelltoppstasjoner som har mer enn 8 % høyere 50-års verdi av vindkast enn den som kan regnes ut fra basisvinden i kategori II i området.

**Tabell 3.1**

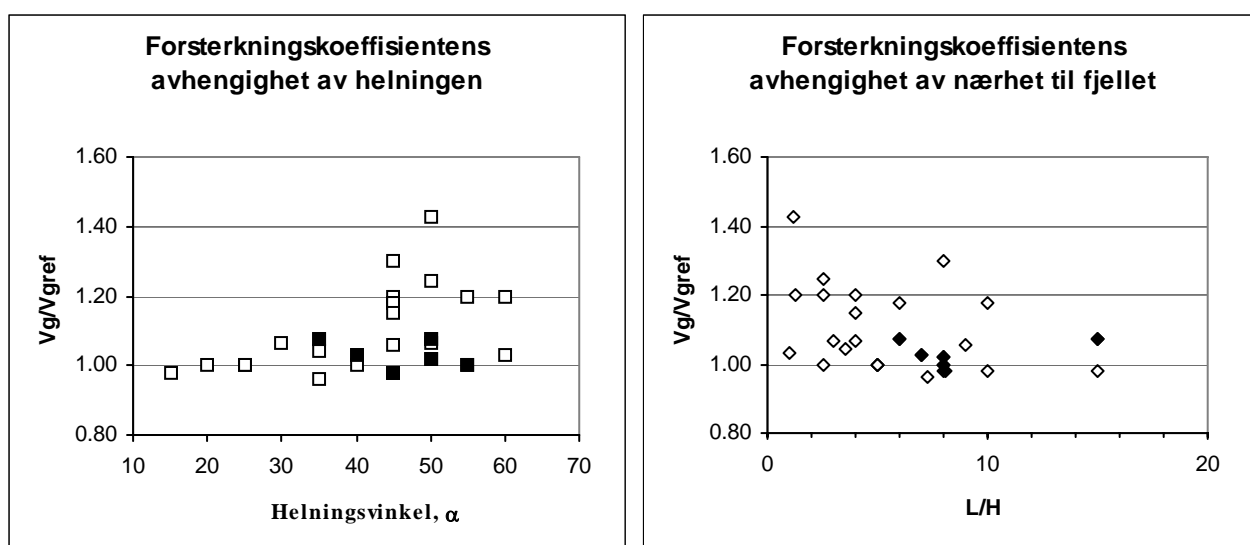
*Forsterkningskoeffisienter og topografiske parametre for flyplasser nærmere et fjell med helning 15°, enn 15 fjellhøyder, samt enkelte andre stasjoner med topografisk innflytelse.*

Stasjon (f=flyplass)	$V_g/V_{g,ref}$	L/H	$\alpha_1$	H/L <sub>H</sub>	$\beta_{min}$	$\beta_{maks}$
Sunnalsøra	1,43	1,2	50	1,5	0	90
Honningsvåg (f)	1,30	8	45	1,3	30	50
Mosjøen alum.verk	1,24	2,5	50	1,5	15	90
Værøy (f)	1,20	1,3	60	2,2	0	90
Fræna - Kvendset	1,20	2,5	55	1,8	0	90
Sandnessjøen (f)	1,20	4	45	1,3	15	90
Banak (f)	1,18	6	45	1,3	30	90
Andøya (f)	1,18	10	45	1,3	40	60
Sandane (f)	1,15	4	45	1,3	60	90
Namsos (f)	1,08	6	50	1,5	70	80
Værnes (f)	1,08	15	35	0,9	70	90
Førde - S (f)	1,07	3	50	1,5	30	45
Sørkjosen (f)	1,07	4	30	0,7	30	90
Mo i Rana (f)	1,06	9	45	1,3	30	40
Hammerfest (f)	1,04	3,5	35	0,9	25	90
Fræna - Sandblåst	1,03	1	60	2,2	0	90
Sogndal (f)	1,03	7	40	1,1	70	90
Leknes (f)	1,02	8	50	1,5	70	90
Hovden (Ørsta) (f)	1,00	2,5	40	1,1	40	90
Førde - B (f)	1,00	8	55	1,8	9	12
Molde (f)	1,00	5	20	0,5	30	90
Dagali (f)	1,00	5	25	0,6	20	90
Notodden (f)	1,00	5	25	0,6	30	90
Brønnøysund (f)	0,98	8	45	1,3	70	90
Skagen (f)	0,98	15	45	1,3	50	70
Narvik (f)	0,98	10	15	0,3	60	90
Svolvær (f)	0,96	7	35	0,9	30	40

Den maksimale fjellsidevinkelen,  $\alpha_1$  (se Figur 3.10) er tatt ut fra et kart. Siden fjellet i regelen ikke er idealformet, er parameteren midlet over kartruter. Her er valgt rektangler langs fjellsiden på  $H/2 \times 2H$ . Derved dekkes en halv fjellhøyde og en viss lengdeutstrekning er med. Dersom den bratte fjellskråningen ikke kan sees fra målestedet, slik som feks. ved Narvik lufthavn, tas denne ikke med. Forholdet mellom avstanden, L og høydeforskjellen, H; L/H; tas ut og  $H/L_H$  utregnes etter lign. 3.3.  $L_H$  er avstanden fra fjelltopp til halve fjellhøyden nåes. Samtidig tegnes også den maksimale vinkel,  $\beta_{maks}$ , og den minimale vinkel,  $\beta_{min}$ , som kan konstrueres mellom fjellets lengdeakse og en linje fra den bratte le-siden til målepunktet. For

bestemmelse av  $\beta_{\text{maks}}$  og  $\beta_{\text{min}}$  går vi så langt ut til sidene av fjellet som mulig, slik at alle mulige  $\beta$  blir med.  $\beta$  trekkes slik at den maksimalt kan bli  $90^\circ$ , denne verdi finnes når linjen fra målepunktet blir normal til høydekotene. Minimalt kan vinkelen bli  $0^\circ$ , da ligger målepunktet i forlengelsen av høydekotene, men ikke inne ved selve fjellet. Når vinkelen  $\beta_{\text{min}}$  ligger mellom  $70$  og  $90^\circ$ , vil fjellet oppleves tilnærmet symmetrisk for alle vindretninger som krysser fjellet mot målepunktet. Når  $\beta_{\text{maks}}$  ligger mellom  $0$  og  $20^\circ$  vil målepunktet ligge utenfor fjellets forsterkningsområde for alle retninger. Ved endret posisjonering i forhold til fjellet kan sistnevnte virkning komme brått, trolig ved en vinkel på omkring  $30^\circ$ . Dersom fjellet har form som en skarp rygg, er det bratthenget på tvers av ryggen på samme side som målepunktet som bestemmer parameterne.

For alle de utvalgte stedene finnes det beregninger av 50 - års vinden ut fra lange tidsserier. Det finnes også beregninger av referansevinden ut fra den generelle kartleggingen (2),  $V_{g,\text{ref}}$ , som er vindkastverdier som svarer til grunnverdien ved havnivå (kat. II - terreng). Denne verdien er basert på stasjoner som alle vil ha noe lokal innflytelse, og nøyaktigheten er selvfølgelig noe lavere enn ekstremverdier i et punkt basert på målinger i punktet. Forsterkningskoeffisienten,  $V_g/V_{g,\text{ref}}$ , er gitt i Tabell 3.1 og benyttet som sorteringsindeks, men parameteren må ikke tolkes for strengt på grunn av den reduserte nøyaktigheten i  $V_{g,\text{ref}}$ .



**Figur 3.11**

*Forsterkningskoeffisientens variasjon med topografiske parametre.*

I Figur 3.11 er forsterkningskoeffisienten plottet opp mot helningsvinkelen og nærheten til fjellet. De svarte plottene viser tilfellene der  $\beta_{\text{min}}$  ligger mellom  $70$  og  $90^\circ$ , eller  $\beta_{\text{maks}}$  ligger mellom  $0$  og  $20^\circ$ . Figuren illustrerer tydelig at det ofte blir en forsterkning når vi er innenfor 10 fjellhøyder og vinkelen overstiger  $40^\circ$ .

### 3.5 Litteraturstudier

Der er lite materiale i den internasjonale litteratur omkring virkningen av bratte fjell og åser på vinden. De mest kjente studiene er virkningen av Craigøya utenfor England, se Jenkins et.al, 1981 (25) og strømming over Gibraltarklippen, se Cook et. al., 1979 (26). På begge disse stedene er det utført målinger med droppsonder fra fly, samt målinger på bakken.

Gibraltarklippen er i tillegg kjørt i vanntunnel. Begge undersøkelsene viser en dramatisk turbulensøkning med sterke vindkast når vinden passerer bratte, asymmetriske fjell. På nedstrømssiden ruller det da ut tydelige korketrekkevirlvler. Nå vinden treffer disse klippene mer på tvers slik at det skjer en tilnærmet symmetrisk omstrømming, er det også mye turbulens, men den er mindre organisert, og maksimale kast følgelig noe svakere.

### 3.6 Anbefalt modifikasjon ved omkringliggende fjell og åser.

#### 3.6.1 Identifikasjon av topografiske parametre i bratt terreng.

##### Forsterkningskoeffisient 1,2

Vi definerer nå  $c_{g,t} = V_g/V_{g,ref}$  som topografisk vindkastforsterkningskoeffisient, der  $V_g$  er aktuell 50 – års verdi for vindkast på stedet og  $V_{g,ref}$  er tilsvarende for et referanseterreng. Utfra figur 3.10 kan vi angi en typisk verdi for  $c_{g,t} = 1,2$  når:

- 1)  $L \leq 10H$ ,  $20^\circ < \beta < 70^\circ$  for minst én  $\beta$ ;  $\beta_{max}$  eller  $\beta_{min}$ , og  $H/L_H > 1.0$  ( $\alpha_1 > 40^\circ$ ), se Figur 3.9.

##### Forsterkningskoeffisient 1,1

Det vil være naturlig å gi  $c_{g,t}=1,1$  i overgangstilfelle, dvs. når forholdene dekkes av minst en av disse 3 tilfellene:

- 1)  $L \leq 8H$ ,  $20^\circ < \beta < 70^\circ$  for minst én  $\beta$ ;  $\beta_{max}$  eller  $\beta_{min}$ , og  $0.7 < H/L_H \leq 1.0$  ( $30^\circ \leq \alpha_1 \leq 40^\circ$ ), der den noe kortere maksimalavstand til fjellet skyldes at det er klare tegn i modellene til at virkningen ikke når like langt nedstrøms når stigningsvinkelen avtar.
- 2)  $L \leq 10H$  og  $\beta_{min} \geq 70^\circ$  og  $H/L_H > 1.0$  ( $\alpha_1 > 40^\circ$ )
- 3)  $10H < L \leq 15H$ ,  $20^\circ < \beta < 70^\circ$  for minst én  $\beta$ ;  $\beta_{max}$  eller  $\beta_{min}$ , og  $H/L_H > 1.0$  ( $\alpha_1 > 40^\circ$ ),

men det er vanskelig å gi noen god dokumentasjon fordi usikkerheten blir stor

i  $V_g/V_{g,ref}$ .

Figur 3.11 og Tabell 3.1 viser ellers at det er en del uforklart varians. Den meget høye verdien på Sunddalsøra skyldes innvirkning fra fjellbølger, som ikke er med i denne modellen. Ellers skyldes den lave  $c_{g,t}$  verdien for Førde sentrum, Mo i Rana og Hovden (Ørsta) at høydevinden over de genererende skrentene ikke er sterk nok, delvis på grunn av skjerming av høyere terreng eller fordi det er lavere basishastighet over det bratte fjellet enn i enkelte andre retninger. Fræna-Sandblåst har lav verdi til tross høyeste basisvind over det bratte fjellet,

men stedet har svært skiftende forhold under en kort måleperiode og følgelig stor usikkerhet ved beregning av 50 - års tilfellet. Sandblåst - stasjonen ligger dessuten meget nær fjellveggen ( $L/H=1$ ), og der kan det finnes skjermingssoner som motvirker noe av forsterkningen.

Vi ser altså at kriteriet for  $c_{g,t}=1,2$  fanger opp alle tilfelle med forsterkning, men at forsterkningen på de mest ekstreme stedene kan gå enda høyere. Ifølge tabell 3.1 utpeker kriteriet ca. 50% for mange tilfelle, noen av disse kan elimineres ved innføring av sektoriell basishastighet (se kap. 3.7).

Også ved  $c_{g,t}=1,1$  utpekes det for mange tilfelle, men usikkerheter knyttet til referanseverdien forstyrrer bildet. Også her er det flere tilfeller med regional skjerming foran den antatt genererende skrent.

### 3.6.2 Skjerming

Når terrenget er moderat bratt, inntreter istedet en skjerming som må bestemmes for hver av de 8 hovedsektorene (se kap. 3.7). Denne skjermingen inntreter når det ikke er avløsning. Samtidig må det være en viss helning. Vi anbefaler at  $V_g=0,9V_{g,ref}(Z)$  når  $L < 20H$  og  $5^\circ < \alpha_1 < 25^\circ$  ( $0,1 < H/L_H \leq 0,6$ ) for alle retninger i sektoren. Dette betyr at hvis vi ligger i en rimelig trang, 2 - dimensjonal dal hvis lengderetning følger en av de 8 hovedretninger, har vi skjerming i 6 av 8 sektorer når dalsiden har helning mellom  $12,8$  og  $25^\circ$ , mens det ved vinkler mellom  $5,4$  og  $12,8^\circ$  bare er skjerming i de to sektorene på tvers av dalføret. Ved avløsning og bratt terreng kan også skjermingen for enkelte vindretninger være stor, til dels meget stor, men dette avhenger av topografien, og vil være vanskelig å lage regler for. Dessuten tilkommer at ved vinddreining kan vinden slå kraftig ned slik at nytteverdien av beregningene kan være begrensede. Vi har derfor ikke gått videre inn på dette temaet. Målinger og/eller modellstudier bør benyttes dersom en er særlig interessert i nærmere analyser i konkrete områder.

### 3.6.3 Implementering i ny standard, NS 3491-4

Forsterkning bak bratt terreng gjelder i all hovedsak vindkast og turbulens. Av stasjonene i tabell 3.1 er det bare Honningsvåg som har forsterkning av middelvind som følge av topografien (ikke vist). De fleste av stasjonene har noe reduksjon av middelvinden fra de sektorer der de topografiske effektene er tydelige. Samtidig kan det være andre sektorer som har ureduisert middelvind. Det synes derfor mest korrekt å beholde middelvindhastigheten og øke turbulensintensiteten, for derigjennom å øke vindkasthastigheten og det statiske vindtrykket. Ligning (14, NS3491-4) gir

$$V_{kast}(z) = V_S(z) \sqrt{(1 + 7 \cdot I_v(z))} \quad (\text{lign. 3.5})$$

der  $V_{kast}$  er vindkasthastigheten ved middelvind  $V_S$ . En endring av turbulensintensitet kan implementeres i den tradisjonelle formelen

$$I_v(z) = \frac{1}{c_t(z) \ln(z/z_0)} \quad (\text{lign. 3.6})$$

gjennom konstanten  $c_{tt}$  og med en  $z$ -uavhengig  $c_t$ , dvs  $c_t(z)=c_t$ . Her er da  $c_t=1,0$  dersom middelvinden ikke påvirkes og

$$I_v(z) = \frac{c_{tt}}{c_t \ln(z/z_0)} \quad (\text{lign. 3.7})$$

Dersom vi nå setter  $c_t=1,0$  og  $c_{tt}=1,75$ , dvs, vi øker turbulensintensiteten ved å multiplisere med 1,75 ved uendret middelvind, vil vi fra lign. 3.5 få at  $V_{\text{kast}}(10\text{m})$  øker med 1,19, 1,21 og 1,22 ved  $z_0=0,05, 0,1$  og  $0,3$  m. Ved  $z=50$  m blir økningen 1,17 – 1,19. Det er derfor omtrent samme virkning på vindkastene som ved å bruke 1,2 direkte som kastøkningfaktor

Dersom vi setter  $c_t=0,9$  og  $c_{tt}=1,75$ , forutsettes middelvinden litt svekket, mens turbulensintensiteten økes. Vi har da at  $V_S'(z)=0,9V_S(z)$  og følgelig gir regnestykket over 1,12 til 1,15 i 10 m nivå og 1,09 til 1,12 i 50 m nivå. Dette er også rimelig konsistent med 10 % økning i vindkastene.

Ved skjerming antas middelvinden redusert og turbulensintensiteten økt, om enn ikke like sterkt som ved bratt terreng. Det kan da benyttes  $c_t=0,8$  og  $c_{tt}=1,2$ , og alle regneeksemplene over gir resultater i området 0,90 til 0,92. Dvs, vi får 20% reduksjon av middelvinden og omtrent 10% reduksjon i vindkastene.

### 3.7 Sektoriell modifikasjon

**Tabell 3.7**

Retningsfaktoren,  $c_{RET}$ , for ulike områder i Norge.

Region	N	NØ	Ø	SØ	S	SV	V	NV
Østfold, Akerhus, Oslo, Vestfold	1.0	0.9	0.8	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9
Hedmark	1.0	0.9	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0
Oppland, Buskerud, Telemark	0.9	0.9	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0
Aust-Agder	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9
Vest-Agder	0.7	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0
Rogaland, Hordaland	0.9	0.6	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Sogn og Fjordane: Askvoll, Bremanger, Eid, Fjaler, Flora, Gulen, Hyllestad, Selje, Solund, Vågsøy	0.9	0.6	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0
Sogn og Fjordane, øvrige kommuner	0.8	0.6	0.8	1.0	0.9	0.9	1.0	0.9
Møre og Romsdal: Nesset, Norddal, Rauma, Rindal, Stordal, Stranda, Sunndal, Surnadal	0.7	0.6	0.9	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9
Møre og Romsdal, øvrige kommuner	0.8	0.8	0.6	0.6	0.9	1.0	1.0	0.9
Sør-Trøndelag: Agdenes, Bjugn, Frøya, Hemne, Hitra, Osen, Snillfjord, Roan, Ørland, Åfjord	0.9	0.8	0.8	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0
Sør-Trøndelag, øvrige kommuner	0.8	0.7	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Nord-Trøndelag: Flatanger, Fosnes, Leka, Namdalseid, Namsos, Nærøy, Vikna	0.9	0.8	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Nord-Trøndelag, øvrige kommuner	0.8	0.7	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Nordland: Gildeskål, Meløy, Rødøy (Væringen og nordover)	0.9	0.8	0.7	0.7	0.8	1.0	1.0	0.9
Nordland: Narvik, Ballangen og Tysfjord	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9
Nordland: Lofoten og Vesterålen	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	0.9
Nordland, øvrige grensekommuner samt Grane, Vefsn, Hemnes, Beiarn, Skjerstad	0.8	0.8	0.9	0.9	0.8	1.0	1.0	0.9
Nordland, øvrige kommuner, inkl. Rødøy sør for Væringen	0.9	0.8	0.9	1.0	0.8	1.0	1.0	0.9
Troms: Berg, Bjarkøy, Harstad, Karlsøy, Kvæfjord, Lenvik, Lyngen, Skjervøy, Torsken, Tranøy, Tromsø	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	0.9
Troms, øvrige kommuner	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	0.9
Berlevåg, Båtsfjord, Vardø	1.0	0.8	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0
Tana, Nesseby, Vadsø, Sør-Varanger, Karasjok, Kautokeino	1.0	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0
Finnmark, øvrige kommuner	1.0	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0
Svalbard og Arktiske strøk	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Basert på sektoriell basishastighetsfordeling på referansestasjonene ((1), (2)) kan vi sette opp en tabell for sektoriell fordeling av basishastigheten skalert til 1,0. Tabellen kan også brukes ved beregning av turbulensforsterkning eller tilsvarende kastforsterkning ved å betrakte bratt terreng - parametre mot hver sektor. I denne analysen kan det også legges inn skjerming for de sektorer der middels bratt terreng skjermer for vinden. Også ulike ruhetsklasser kan her legges inn sektorielt, for eksempel på en strand der vinden kan komme over land og sjø. Lasttilfellet finnes da fra den sektor som gir størst last. Ved dynamiske betraktninger vil vi kanskje oppnå størst last nær bratt terreng uansett sektor.

#### 4. Variasjon av basishastighet med høyde over havet

Vi kan anta at hovedgrunnen til at basishastigheten i havnivå,  $V_{REF}$  i deler av Norge er lavere enn på havet utenfor er en skjerming på grunn av landskapet. Denne skjermingen antas gå opp mot midlere fjellhøyde (1500 m i Sør - Norge), men skjermingen reduseres for høyder som nærmer seg denne. I de lavere nivåer antas imidlertid full skjerming.

For å knytte vindhastigheten på høyfjellet til basishastigheten i havnivå innfører vi derfor en høydekorreksjon som trer i kraft straks denne ligger lavere enn en viss grense. Det kan synes fornuftig å benytte  $V_0 = 30$  m/s som denne grense, jf kartleggingen av  $V_{REF}$  (1). Ut fra data ser det ut til at typiske vindhastigheter under ca. 1000 m på Østlandet er uavhengig av høyde over havet, mens det er stor hastighetsøkning til nivåer over 1000 m. Vi velger derfor en modell som gir lineær avtaking av skjermingen fra 900 til 1500 m i Sør-Norge. Dette gjøres ved å innføre en nivåfaktor,  $c_{HOH}$ , som maksimalt kan bringe basishastigheten,  $V_b$  opp i 30 m/s. Når vi ser bort fra evt. reduksjoner for årstid og retning, som er korreksjoner som legges på senere, har vi

$$V_b = c_{HOH} \cdot V_{REF} \quad (\text{lign. 4.1})$$

der

$$c_{HOH} = \begin{cases} 1,00 & \text{for } V_{REF} \geq V_0 \\ 1,00 + \frac{(V_0 - V_{REF})}{V_{REF}} \frac{(H - H_0)}{(H_{topp} - H_0)} & \text{for } V_{REF} < V_0 \end{cases} \quad (\text{lign. 4.2})$$

der  $H$  er høyde over havet med  $H_0$  som laveste innslag for nivåkorreksjon og  $H_{topp}$  høyden der  $c_{HOH}$  ikke lenger øker med økende høyde over havet.

Over tregrensen vil vi vanligvis benytte  $z_0=0,01$  m og  $k_r=0,17$  fordi den sterkeste vinden må forventes å ha størst sannsynlighet for forekomst ved snø på bakken. Dette gir ytterligere økning av stedsvindhastigheten på høyfjellet.

Skjermingsreduksjoner gjelder de høyere deler av fjellområdene,  $H > H_0$ , der  $H_0$  anbefales satt til 900m i Sør-Norge, 700 m for Nord - Trøndelag, Nordland og Troms, mens Finnmark og Svalbard får 400 m. Vi regner med at skjermingen opphører i en omtrentlig gjennomsnittshøyde for fjellrekken,  $H_{topp}$ , ca. 1500 m høyde for Sør - Norge, 1300 m for Nord - Trøndelag, Nordland og Troms og 1000m for Finnmark og Svalbard. Skjermingen er antatt å reduseres lineært mellom  $H_0$  og  $H_{topp}$ .



**Tabell 4.1**

Konstanter for bruk i nivåfaktoren.

$V_0$	$k_1$	$H_0$	$H_{\text{topp}}$	Område
30	0,05	900	1500	Sør-Norge inkl. Sør-Trøndelag
30	0,05	700	1300	Nord-Trøndelag, Nordland, Troms
30	0,05	400	1000	Finnmark, Svalbard

**Tabell 4.2**

Nivåfaktoren,  $c_{\text{HOH}}$  og basisvinden,  $V_b$  (når vi ser bort fra årstid- og retningskorreksjon) i høydeintervallet 1000 - 1500 m i Sør-Norge og tilsvarende intervaller i Nord-Trøndelag til Troms, samt Finnmark og Svalbard.

$c_{\text{HOH}}$	H						$V_b$	H					
	1000	1100	1200	1300	1400	1500		1000	1100	1200	1300	1400	1500
	800	900	1000	1100	1200	1300		800	900	1000	1100	1200	1300
$V_{\text{REF}}$	500	600	700	800	900	1000	$V_{\text{REF}}$	500	600	700	800	900	1000
20	<b>1,08</b>	<b>1,17</b>	<b>1,25</b>	<b>1,33</b>	<b>1,42</b>	<b>1,50</b>	20	<b>21,7</b>	<b>23,3</b>	<b>25,0</b>	<b>26,7</b>	<b>28,3</b>	<b>30,0</b>
21	<b>1,08</b>	<b>1,15</b>	<b>1,23</b>	<b>1,30</b>	<b>1,38</b>	<b>1,43</b>	21	<b>22,6</b>	<b>24,2</b>	<b>25,7</b>	<b>27,3</b>	<b>28,9</b>	<b>30,0</b>
22	<b>1,07</b>	<b>1,13</b>	<b>1,20</b>	<b>1,27</b>	<b>1,33</b>	<b>1,36</b>	22	<b>23,5</b>	<b>24,9</b>	<b>26,4</b>	<b>27,9</b>	<b>29,3</b>	<b>30,0</b>
23	<b>1,06</b>	<b>1,12</b>	<b>1,18</b>	<b>1,23</b>	<b>1,29</b>	<b>1,30</b>	23	<b>24,3</b>	<b>25,7</b>	<b>27,0</b>	<b>28,4</b>	<b>29,7</b>	<b>30,0</b>
24	<b>1,05</b>	<b>1,10</b>	<b>1,15</b>	<b>1,20</b>	<b>1,25</b>	<b>1,25</b>	24	<b>25,2</b>	<b>26,4</b>	<b>27,6</b>	<b>28,8</b>	<b>30,0</b>	<b>30,0</b>
25	<b>1,04</b>	<b>1,08</b>	<b>1,13</b>	<b>1,17</b>	<b>1,20</b>	<b>1,20</b>	25	<b>26,0</b>	<b>27,1</b>	<b>28,1</b>	<b>29,2</b>	<b>30,0</b>	<b>30,0</b>
26	<b>1,03</b>	<b>1,07</b>	<b>1,10</b>	<b>1,13</b>	<b>1,15</b>	<b>1,15</b>	26	<b>26,9</b>	<b>27,7</b>	<b>28,6</b>	<b>29,5</b>	<b>30,0</b>	<b>30,0</b>
27	<b>1,03</b>	<b>1,05</b>	<b>1,08</b>	<b>1,10</b>	<b>1,11</b>	<b>1,11</b>	27	<b>27,7</b>	<b>28,4</b>	<b>29,0</b>	<b>29,7</b>	<b>30,0</b>	<b>30,0</b>
28	<b>1,02</b>	<b>1,03</b>	<b>1,05</b>	<b>1,07</b>	<b>1,07</b>	<b>1,07</b>	28	<b>28,5</b>	<b>28,9</b>	<b>29,4</b>	<b>29,9</b>	<b>30,0</b>	<b>30,0</b>
29	<b>1,01</b>	<b>1,02</b>	<b>1,03</b>	<b>1,03</b>	<b>1,03</b>	<b>1,03</b>	29	<b>29,2</b>	<b>29,5</b>	<b>29,7</b>	<b>30,0</b>	<b>30,0</b>	<b>30,0</b>
30	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	30	<b>30,0</b>	<b>30,0</b>	<b>30,0</b>	<b>30,0</b>	<b>30,0</b>	<b>30,0</b>

## 5. Referanseliste

1. NS 3491-4., 2001: *Prosjektering av konstruksjoner – Dimensjonerende laster – Del 4 Vindlaster*. Norges Byggstandardiseringsråd, NBR, Oslo.
2. Harstveit, K.: 2001, *Basisvindhastighet ved havnivå - kartlegging i ny norsk standard for vindlaster, NS3491-4*. DNMI Klima. Det Norske Meteorologiske Institutt, Oslo. Under trykking.
3. ISO 4354: 1997, *Wind actions on structures*. International Standard, First edition, Sveits 1997.

4. Lemelin, D.R. Surry, D. and Davenport, A.G.: 1988, "Simple approximations for wind speed-up over hills", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **28**: 117-127
5. Alm, L.Kr. og Nygaard, T. A.: 1993, *Numerical estimation of spatial variations of extreme winds at Sula*, IFE/KR/F-93/167; NBRs vindprosjekt, rapport nr 1 (1993).
6. Taylor, P.A., and Teunissen, H.W.: 1987, "The Askervein hill project: Overview and Background Data", *Boundary-Layer Meteorology* **39**: 15-39
7. Taylor, P.A., Mason, P.J., and Bradley, E.F.: 1987, "Boundary-Layer Flow Over Low Hills", *Boundary-Layer Meteorology* **39**: 107-132
8. Teunissen, H.W., Shokr, M.E., Bowen, A.J., Wood, C.J. and Green, D.W.R.: 1987, "The Askervein hill project: Wind-tunnel simulations at three length scales", *Boundary-Layer Meteorology* **40**: 1-29
9. Hunt, J.C.R.: 1978, "Wind over Hills." *Workshop on the planetary boundary layer, Colorado*, pp. 107-175. Edited by J.C. Wyngaard. American Meteorological Society, 1978.
10. Utnes, T., and Eidsvik K.J.: 1996, "Turbulent flows over mountainous terrain", *Boundary-Layer Meteorology* **79**: 393-416
11. Andresen, L. og Harstveit, K.: 1993, *Fræna kommune. Kartlegging av vindhastigheter*, DNMI Klima, 06/93. Det Norske Meteorologiske Institutt, Oslo.
12. Harstveit, K.: 1991, *Værøy flyplass. Vindforhold*, DNMI Klima, 38/91. Det Norske Meteorologiske Institutt, Oslo.
13. Andresen, L. og Harstveit, K.: 1994, *Ekstremvindanalyse for kyststrekningen Rogaland - Finnmark*, DNMI Klima, 07/94. Det Norske Meteorologiske Institutt, Oslo. NBRs vindprosjekt, rapport nr 3.
14. Utnes, T., og Eidsvik, K.J.: 1996, *Vindforhold ved Sandnessjøen lufthavn. Numerisk simulering av terrenginduserte vindeffekter*, NTNU R-12-96, Norges teknisk – naturvitenskapelig universitet, Trondheim.
15. Harstveit, K., Andresen, L., and Midtbø, K.H.: 1995, *Downslope windstorms at Oppdal, Norway. Local description and numerical simulations*, DNMI Klima, 23/95. Det Norske Meteorologiske Institutt, Oslo.
16. Harstveit, K.: 1993, *Hardangerbrua. Sluttrapport for vindmålinger*, DNMI Klima, 32/93. Det Norske Meteorologiske Institutt, Oslo.

17. Holstad, A., Lie, I., Utnes, T., og Ødegaard, V.: 2001, *Wind conditions in Sunndalsøra: A study using fine-scale models*, Research Report No. 125, ISSN 0332-9879. Norwegian Meteorological Institute, Oslo.
18. Fikke, S.: 1984, "Da toget blåste av sporet." *Været*, Nr.2/1984, 68-71. Universitetsforlaget, Oslo.
19. Sandvik, A.D. og Harstveit, K.: 2001, *Strong downslope wind at the Rjukan valley*", In press.
20. Andresen, L. og Harstveit, K.: 1993, *Ekstremvindanalyse for Møre og Romsdal*, DNMI Klima, 07/93. Det Norske Meteorologiske Institutt, Oslo.
21. Bruaset, O.: 1992, *Orkanen*, Det Norske Samlaget, Oslo.
22. Harstveit, K., Andresen, L., og Sandvik, R.: 1995, *Lokal vindforsterkning i le av bratt terreng. Befaring av steder med vindskader i Hadsel kommune i Vesterålen*, NBRs vindprosjekt, rapport nr 4 (1995).
23. Harstveit, K.: 1986, *Ekstreme vindforhold ved Mosjøen aluminiumsverk*, DNMI Klima, 35/86. Det Norske Meteorologiske Institutt, Oslo.
24. Sandvik, R.: 1997, *Vindforsterkning på leside av bratt terreng. Analyse av vindmålinger i Fræna*, NBRs vindprosjekt, rapport nr 8 (1997).
25. Jenkins, J., Mason, P.J., Moores, W.H., and Sykes, R.I.: 1981: "Measurements of the flow structure around Ailsa Craig, a steep three dimensional, isolated hill." *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, **107**, 833-851
26. Cook, N.J., Coulson, B.H., and McKay, W.: 1978: "Wind Conditions around the Rock of Gibraltar." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **2**, 289-309