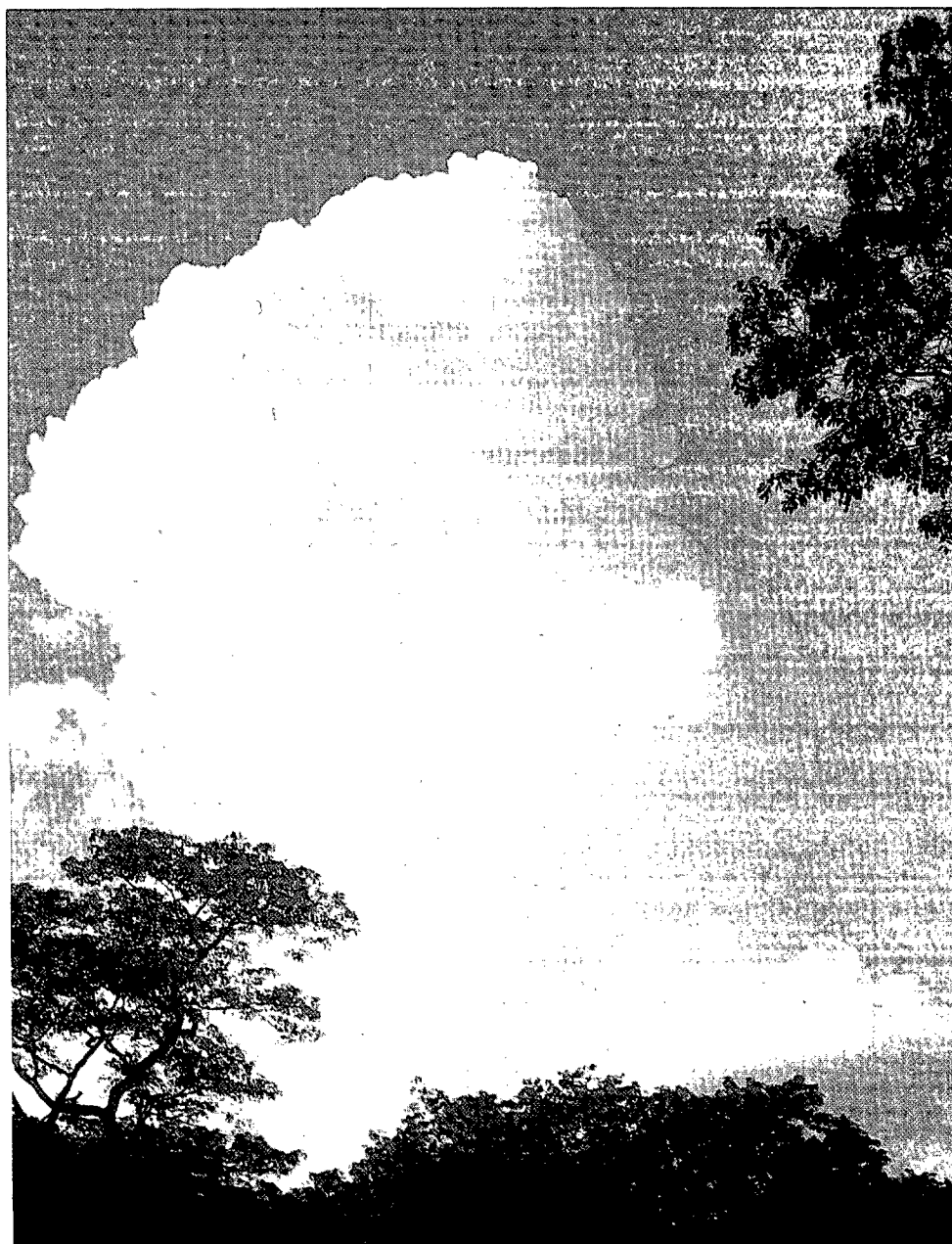


DNMI DET NORSKE METEOROLOGISKE INSTITUTT

klima

**HOVEDFLYPLASS - GARDERMOEN - VINDFORHOLD
SLUTTRAPPORT**

KNUT HARSTVEIT OG LARS ANDRESEN
RAPPORT NR. 14/92



DNMI-RAPPORT

DET NORSKE METEOROLOGISKE INSTITUTT
POSTBOKS 43 BLINDERN 0313 OSLO 3
TELEFON: (02) 96 30 00

ISBN

RAPPORT NR.

14/92

DATO

1.04.92

TITTEL

HOVEDFLYPLASS - GARDERMOEN - VINDFORHOLD SLUTTRAPPORT

UTARBEIDET AV

Knut Harstveit og Lars Andresen

OPPDRAKSGIVER

LUFTFARTSVERKET HOVEDFLYPLASSPROSJEKTET

OPPDRAKSNR.

SAMMENDRAG

Radiosondemålinger fra Gardermoen er bearbejdet. Data fra 1980 til 1987 er benyttet for langtidsstatistikk og data fra 11 måneder i 1990/91 er benyttet for å beregne vindprofiler og turbulens. Vind omkring 300° er funnet å ha størst høydeøkning og høyest turbulens.

Målinger med sodar høsten 1991 viser at en sone med vindskjær ligger i aktuell flytrasé 5 km nord for baneenden ved vestre rullebanealternativ. Skjæret er størst ved vind omkring 270°. Sterk turbulens er vurdert til en forekomst av 0.2% ved nåværende rullebane, 0.1-0.2% ved østre banealternativ og 1% av tida ved vestre alternativ.

Det er foretatt en enkel konsekvensanalyse mhp. flyturbulens og vindskjær.

Kombinasjonen sterk vind fra vest og nordvest - lavt skydekke på Gardermoen forekommer sjelden.

UNDERSKRIFT

...*Knut Harstveit*...

Knut Harstveit

SAKSBEHANDLER

...*Bjørn Aune*...

Bjørn Aune

FAGSJEF

SAMMENDRAG.

Meteorologiske måledata.

Radiosondata fra Gardermoen er utnyttet for å gi statistikk over vindforholdene over flyplassen. Registreringer som er representative for 100, 400 og 700m's høyde over plassen er benyttet. Registreringen i en 8-års periode er benyttet for langtidsstatistikk, men registreringer over ca. 1 år er benyttet for å gi vindprofiler ved middels til sterk vind. Disse profilene er benyttet for omregning til turbulensintensiteter (eller standardavvik).

Det er fra juli 1991 til februar 1992 utført vindmålinger for hver 25. m opp til ca. 400m nivået i området. Målingene er utført på Stensgård, 5 km nord for nordre del av vestre rullebanealternativ, og på Trugstad 8 km sør for søndre del. I tillegg til vindretning og vindhastighet blir vertikalvind og standardavvik i 3 komponenter målt.

Statistikken viser at en markant nord - sør føring av vinden i de nederste få hundre meter vil utjevnes over ca. 400 m's høyde. Derved blir innslaget av vestlige vinder høyere enn på bakken.

Materialet viser at den sterkeste vindøkningen med høyden forekommer ved nordvestlig vind på Gardermoen. Økningen er størst ved tilfelle med temperaturinversjoner (temperaturøkning med høyden).

Ved Stensgård er det vind omkring vest som har størst vindøkning med høyden.

Det er få tilfelle med lavt skydekke (tåke i Romeriksåsen) ved vestlig til nordvestlig vind, men ved sørvestlig vind kan lavt skydekke og sterk vind opptre samtidig.

Turbulens.

Moderat turbulens ansees typisk å bli rapportert ved horisontale standardavvik på 4-6m/s, og sterk turbulens ved 6-8m/s. Typiske verdier for maksimum vertikal vindkast ligger da i området 15-20 fps (fot pr. sek.), og 20-30fps.

Moderat turbulens er estimert til 2% av tida og sterk turbulens i 0.2% av tida ved flygning på nåværende flyplass.

Det må presiseres at begrepene moderat og sterk turbulens rapporteres gjennom virkning på fly, og således er flytype-, vekt- og flyhastighetsavhengig. Tallene over må derfor ikke tolkes for langt.

I nordområdet ved en vestre rullebanealternativ kan fps-verdiene komme til å øke med 20% fordi flyene flyr inn i en sone med negativ midlere vertikalvind i løpet av få sekunder. Moderat turbulens vil da oppleves i 5% [2-7%] av tida og sterk turbulens i 1% [0.5-1.5%] av tida.

Ved et østre rullebanealternativ vil tallene for moderat turbulens ligge i området 1-2% av tida og sterk turbulens i 0.1-0.2% av tida, dvs., noe sjeldnere enn ved eksisterende flyplass.

Vindskjær.

Det er meget sjelden knyttet problemer til vindskjær ved operasjoner på eksisterende bane. Dette vil også være tilfelle ved operasjoner øst for denne.

Ved inn/utflygning i nordområdet ved vestre rullebanealternativ må en regne med å krysse en vindskjærssone ved sørenden av Hurdalssjøen, 200-400 m over bakken. Målinger har vist at man i 13 % av tida har vindøkning over 175-375m høydeintervall på 5 m/s, 6.7 m/s i 5% av tida og 10 m/s i 0.8% av tida. Skjæret er mer intenst over smalere intervaller med 2 m/s / 50m i 5% av tida og 3.5 m/s / 50m i 0.2% av tida. Høyden opp til maksimalskjæret kan da variere, men er typisk i området 250m - 350m. Ved relativt svak vestlig vind oppstår det et relativt tynt, men markert skjær på 2 m/s / 50 m omkring 300 - 350m nivået. Maksimalskjæret er til dels så smalt at det er vanskelig å måle pga. midlingsfeil og tilfeldige målefeil.

Vindretningen i disse vindskjærssituasjonene ligger typisk i vestlig og tildels nordvestlig sektor over ca. 300 m, mens det under 200 m's høyde er variabel vindretning av lav styrke.

Det er også en mulighet for vindskjær i horisontalplanet i nordområdet av en vestlig rullebane, men det er ikke foretatt målinger som kan verifisere dette.

HOVEDFLYPLASS - GARDERMOEN - VINDFORHOLD.

INNHOLDSFORTEGNELSE

1. INNLEDNIG.	2
2. STED OG TOPOGRAFI.	2
3. DATAGRUNNLAG.	5
3.1. Gardermoen radiosonde-stasjon.	5
3.2. Gardermoen vær-stasjon.	6
3.3. Gardermoen prosjekt-stasjon.	7
3.4. Sodarmålingene.	7
4. RESULTATER.	9
4.1. Vindstatistikk fra radiosonde-stasjonen.	9
4.2. Vindprofiler og vindskjær over Gardermoen.	11
4.3. Turbulens over Gardermoen.	18
4.4. Sodarmålinger, vestre rullebanealternativ.	19
4.4.1. Midlere vindskjær i faste nivåer over Stensgård.	19
4.4.2. Vindskjævariasjon innenfor høydeintervallet 175-375m.	24
4.5. Turbulens over Stensgård.	29
4.6. Kombinasjonen av lavt skydekke og vind.	32
5. KONSEKVENSANALYSE.	34
5.1. Komfort og kabinsikkerhet. Strukturelle påkjenninger.	34
5.2. Retnings- og stillingskontroll av et luftfartøy.	38
5.3. Luftfartøyets yteevne.	38
6. REFERANSELISTE.	42

1. INNLEDNIG.

Denne rapporten er sluttrapport for prosjektet:

HOVEDFLYPLASS - GARDERMOEN - VINDFORHOLD, k.nr.23613.036.2

Prosjektet kom i gang etter en henvendelse fra Luftfartsverkets hovedflyplassprosjekt, LV (HP). DNMI foreslo et 2-delt prosjekt der DNMI skulle utrede vindforholdene på Gardermoen ved bruk av radiosondedata og bakke­data fra flyplassen. Samtidig skulle det settes i gang målinger av vind og turbulens ved fjernmålings­utstyr (sodar) langs inn/utflygningstraséen til planlagt vestre rullebane, i regi av Universitetet i Bergen (UiB).

Sodar-målingene ble utført i tida juli 1991 - februar 1992. Aktuelle målesteder ble tatt ut på en befaring 24. juli der representanter fra Luftfartsverket, Geofysisk Institutt og DNMI var til stede. Flyttinger av sodaren mellom aktuelle målepunkter ble besørget av DNMI, som også besørget datauttak med jevne mellomrom. Det var enkelte driftsbrudd av teknisk art under måleperioden, men samlet registrert datamengde var tilfredsstillende.

UiB leverte en foreløbig rapport i oktober 1991 (1) og en sluttrapport for sodarmålingene i mars 1992 (2). DNMI leverte en statusrapport pr. 1.11.91 (3) som vesentlig tok for seg radiosondedata på Gardermoen. Sluttrapporten er en utvidelse av (3). Utvidelsen består i at en har benyttet sodarregistreringer og resultater fra (2) og koblet dette til en lengre dataserie, hentet fra (3). Sluttrapporten har også med det viktigste stoffet fra (3), bare enkelte deler vedr. saksgangen er utelatt. Dessuten er det foretatt en oppdatering på enkelte punkter. Sluttrapporten står derfor for seg selv.

Ved DNMI har det vært i gang en arbeidsgruppe bestående av K. Harstveit og L. Andresen (Klima), T. Aasen (Klima, tidligere Flymet.) og O. Nilsen (Flymet., sjef for Fornebu met. kontor). Gruppen har hatt jevnlig møtevirksomhet under første del av arbeidet, der hensikten har vært å øke kompetansen på forholdet turbulens/vindskjær/flygning. Gruppen har fått god støtte fra K. Ausland, LV.

2. STED OG TOPOGRAFI.

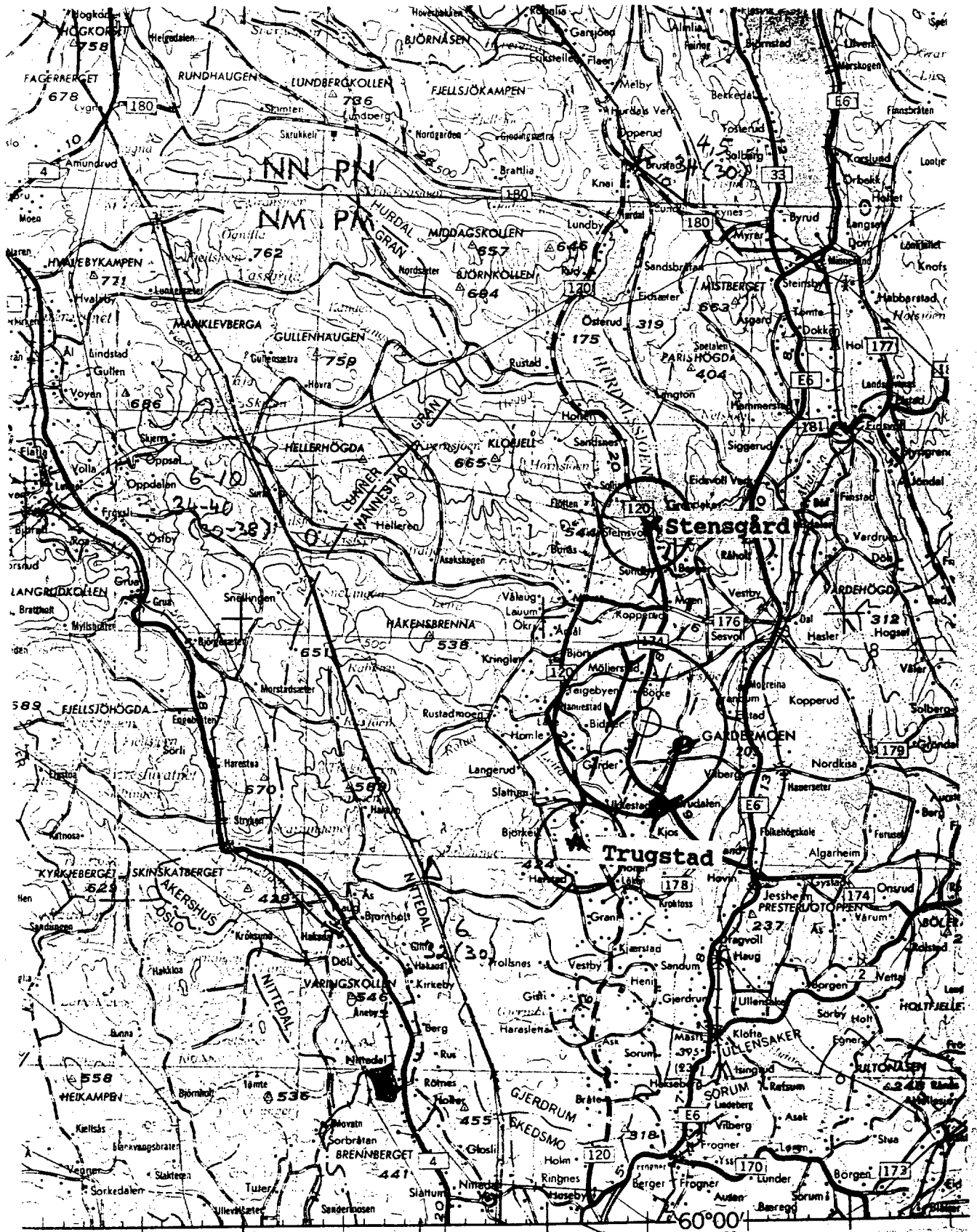
Gardermoen flyplass ligger 40 km nordøst for Oslo. Stedet ligger på Romerikslettas nordvestre del, 200 moh.. Området rundt flyplassen er ganske flatt. Vegetasjonen veksler mellom barskog og åkerlandskap.

5 km vest for flyplassen ligger Romeriksåsen, 300 - 600 moh. Skogbevokste åser i denne høyden finnes i større områder mot sørvest, vest, nordvest og nord. Mot nordvest går høydene opp i 600 - 800 m. Alle åsene er kledt med barskog. I nord ligger imidlertid Hurdalssjøen som et slags dalføre mellom åsene, 25 m lavere enn flyplassen.

For øvrig er det et ravineterreng, 20 m lavere enn Gardermoen, 3 km mot vest, der Leiravassdraget etter hvert formes. Dette fortsetter sørover mot Øyern.

Mot nordøst, øst, sørøst og sør er det skogbevokste sletter avbrudt av en del åkre og enkelte skogbevokste koller inntil 100 m's høyde over sletta.

Vestre rullebane er planlagt ca. 2 km vest for nåværende. Forlengelsen av denne banen krysser ganske tett inntil Nipkollen (544 moh.) i nord og Raudfjell (424 moh.) i sør. Begge disse skogklede åsene utgjør lokale utløpere fra Romeriksåsen.



Figur 1
Kart over Gardermoen.

3. DATAGRUNNLAG.

Data fra denne undersøkelsen er hentet fra Gardermoen radiosonde-stasjon og DNMI's prosjektstasjon vedr. vind- og siktholdene på Gardermoen. I tillegg finnes også Gardermoen vær-stasjon.

3.1. Gardermoen radiosonde-stasjon.

Gardermoen radiosonde-stasjon slipper opp en sonde 2 ganger pr. døgn. Offisiell slipptid er kl. 00z og 12Z, (kl. 01 og 13 norsk normaltid). I praksis slippes sonden 58 - 59 min. før disse klokkeslett.

Utstyret er levert av Vaisala. Hvert 10. sekund posisjonsbestemmes sonden ved hjelp av Omega-systemet eller LORAN-C (4). Stigehastigheten er ca. 5 m/s. Derved kan man bestemme vindhastigheten og vindretningen i disse punktene. Samtidig sendes ut trykk, temperatur og fuktighetsverdier fra sonden.

Systemet (4) har en posisjonsusikkerhet på ca. 10 m, og en nøyaktighet i vindhastigheten på 0.5 m/s. I områder med turbulens vil dessuten øyeblikksvariasjonene av vinden føre til en svært hakkete registreringskurve. Systemet har derfor innebygget en filtreringsprosess. Først sjalter filteret ut alle usannsynlige verdier. Deretter midles 11 punkter ad gangen og midtpunktet bestemmes ved en slags minste kvadraters metode. Punkt for punkt på en slik utjevningsskurve dannes ved å kaste av nederste og legge til et nytt på toppen. De nederste 6 punktene blir gitt ut fra de 11 første, punkt nr.7 ut fra 2 til 12, nr.8 fra 3 til 13 osv.

Det er helt nødvendig å gjennomføre ovennevnte filtrering for å få en kurve som ikke er for sterkt preget av øyeblikksvindens skiftende karakter og tilfeldige feil ved posisjonsbestemmelsen av sonden. Men prisen er at skarpe vindskjær vil bli avdempet. Dette må en være klar over ved tolkningen av dataene. WMO har spesifisert hvilke krav som skal stilles til filteret, dvs. hvilken utjevningseffekt det skal ha.

Temperaturdata gjennomgår en lignende filtreringsprosess.

Det er nå i prinsippet mulig å hente ut data hvor som helst på de utjevnedede kurvene. På Gardermoen lagres verdier for hvert 10. sekund de første 5 minutter, deretter lagres minuttverdier. Data for faste nivåflater, 300, 600, 900 moh., osv., samt data fra faste trykkflater blir også registrert. Nivåflatedataene er praktiske ved utkjøring av statistikk. DNMI har tidligere laget frekvenstabeller for vind i perioden 1980 - 87 basert på data fra disse nivåene.

Radiosondedataene samles månedlig inn i datalageret på DNMI, Klima-avdelingen. Bortsett fra siste året ligger slike data for tida på en noe tungvint form, og det er tidkrevende å hente ut informasjon som det ikke er laget uttaksprogrammer for. Enten må slike programmer lages, dataene omlegges, eller utplukk gjøres for hånd. For dette prosjektet har vi hentet ut vind og temperaturdata fra faste nivåer: 300, 600, 900 og 1200 moh., (dvs. 100, 400, 700 og 1000m over Gardermoen). For å lage vindprofiler har vi brukt data fra 1.11.90 til 30.09.91, med unntak av enkelte brudd i serien, hovedsakelig i periodene 1.- 7.12.90 og 26.07. - 19.08.91.

3.2. Gardermoen værstasjon.

Det har vært en synoptisk værstasjon på Gardermoen siden 1946. Denne stasjonen inngår i et internasjonalt nett for samtidige meteorologiske observasjoner. Det foretas standard SYNOP observasjoner hver time, hele døgnet igjennom. Hovedobservasjonene hver 6.time, kl. 01, 07, 13 og 19 (normaltid), er lagret for EDB- bruk fra 1957 og fremover. Det arbeides med å legge timevise observasjoner for samme tidsrom inn på EDB-medium.

Aktuelle parametre for denne rapporten er vind- og skyparametre.

Det observeres 10-minutters middelvind, hastighet og retning, fra en 10 meter høy målemast i den nordlige del av flyplassområdet, ikke langt fra den visuelle observasjonspost. Høyeste 10-minutters middelvindhastighet og høyeste vindkast blir registrert hver 3. time, for 6 timer bakover i tiden ved hovedobservasjonstiden, og 3 timer bakover ved mellomobservasjonstidene, kl. 04, 10, 16 og 22.

Det observeres skytyper i 3 forskjellige høydenivåer, samlet skydekke i antall 8-deler og høyden opp til laveste skylag i intervaller på 50 m opp til 100 m-nivå, intervaller på 100 m opp til 300 m-nivå, og deretter i intervaller på 300-500 m opp til 2500 m. I tillegg observeres mengden av alle lave skyer (spesielle skytyper med høyde under 2500 m) i antall 8-deler og mengden av dominerende skylag, med tilhørende skyhøyde i intervaller på 30 m.

Skyer og skymengde observeres visuelt. Skyhøyden observeres ved hjelp av skyhøydemåler og lyskaster (spesielt om natten).

3.3. Gardermoen prosjektstasjon.

I tidsrommet 1.november 1990 - 1.februar 1991 ble det etablert flere målestasjoner langs rullebanen på Gardermoen. Av interesse her er 2 skyhøydemålere, en i hver baneende og 2 vindmålere, en ved hver landingssone, i sør og nord. Instrumentene registrerer forskjellige parametre kontinuerlig hvert 10.minutt. Dataene overføres via telenettet til DNMI hver dag, hvor de blir kontrollert og tilrettelagt for EDB-bruk. Dataene er bearbeidet med henblikk på siktforholdene langs rullebanen (5).

Skyhøydemåler-sør og -nord kom i drift hhv. 1. november 1990 og 1.februar 1991. Vindmåler-sør og -nord kom i drift hhv. 14.januar 1991 og 7.desember 1990.

Av aktuelle parametre kan nevnes median skyhøyde, minimum skyhøyde, middelvindhastighet og retning, høyeste 3 sekunders middelvind (vindkast), høyeste 1-minutts middelvind og turbulensintensitet i vindretningen.

Datatilgangen har vært meget god.

3.4. Sodarmålingene.

Målingene er utført på Gardermoen, Trugstad og Stensgård. Disse 3 stedene representerer nåværende flyplass, samt antatt vanskeligste steder i sør- og nordenden av inn/utflygningssonen for et vestre rullebanealternativ. Stensgård ligger ved sørenden av Hurdalssjøen, 175 moh. Ca. 1 km vest for stedet stiger Nipkollen

opp fra 200 moh til 540 moh over en avstand på ca. 2 km. Typisk helning på skråningen fra Nipkollen er 10 - 20°. Se Fig. 13.

Trugstad (170 moh) ligger 1 km øst for skråningen opp mot Raudfjell, med toppen (424 m) i ca. 2 km's avstand, og skråningshelning 10 - 15°.

Både Nipkollen og Raudfjell er østlige utløpere fra Romeriksåsen, et nord-sør gående fjellparti som skiller Romerikssletta fra Nittedal og Nordmarka.

Sodären måler vinden i 3 komponenter, her som midler over hvert 20. minutt, og for hver 25 m høydeintervall. Det måles også standardavvik i de 3 komponentene.

Målingene synes å ha bra kvalitet over ca. 100 m, under dette forekommer en del falske ekko. Se ellers (2).

4. RESULTATER.

4.1. Vindstatistikk fra radiosonde-stasjonen.

Tabell 1 - 3 viser frekvensfordelinger av vinden i 300, 600 og 900 m's nivå (100, 400 og 700 m over Gardermoen). Statistikken viser at det i nivået 100 m over Gardermoen, blåser mest i 160 - 210° og 350 - 050°. I høyere nivåer er maksimumsonene mindre markert. Dessuten er den sørlige maksimumsone flyttet til 180 - 240° 700 m over flyplassen, mens tilsvarende effekt ikke kan sees på den nordlige. Terrengstyringsmekanismene synes å være de mest dominerende effektene ved disse dreiningene, men dreining ved dempende friksjon (Ekmaneffekt) spiller nok også en viss rolle.

Tabell 1.

Frekvenstabell av vind 100 m over Gardermoen, 1980-87. Vindhastigheten, U er gitt i intervaller på 3 m/s og vindretningen i intervaller på 30°.

U	0.0	2.5	5.5	8.5	11.5	14.5	17.5	>	SUM
DD	2.4	5.4	8.4	11.4	14.4	17.4	20.4	20.4	
30	5.2	6.3	2.4	0.5	0.1	0.1	0.0		14.6
60	2.9	3.3	0.6	0.2	0.0				7.0
90	2.1	1.6	0.3	0.1					4.1
120	1.9	2.0	0.5	0.1	0.0				4.5
150	2.5	2.8	1.0	0.2	0.0		0.0		6.4
180	5.8	8.6	3.2	0.9	0.3	0.0	0.0	0.0	18.8
210	3.9	5.0	2.7	0.8	0.2	0.0			12.7
240	1.9	1.8	1.6	0.2	0.1	0.0			4.7
270	1.7	1.3	0.4	0.2	0.0				3.6
300	2.6	1.6	0.6	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	5.2
330	1.9	1.9	0.9	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	5.4
360	4.8	4.6	2.0	1.1	0.5	0.1	0.0	0.0	13.1
SUM	37.2	40.6	15.2	4.9	1.6	0.3	0.1	0.1	100

Tabell 2.

Frekvenstabell av vind 400 m over Gardermoen, 1980-87. Vindhastigheten, U er gitt i intervaller på 3 m/s og vindretningen i intervaller på 30°.

U DD	0.0 2.4	2.5 5.4	5.5 8.4	8.5 11.4	11.5 14.4	14.5 17.4	17.5 20.4	> 20.4	SUM
30	1.5	4.8	2.4	1.0	0.5	0.2	0.0	0.0	10.6
60	1.3	3.2	1.5	0.6	0.3	0.0		0.0	7.0
90	1.4	3.2	1.1	0.4	0.2				6.3
120	0.8	2.3	1.2	0.4	0.2	0.1	0.0		4.9
150	1.0	2.9	1.6	0.7	0.2	0.1	0.0	0.0	6.5
180	1.4	5.4	3.2	1.5	0.7	0.4	0.1	0.1	12.8
210	1.3	5.3	3.8	2.7	0.9	0.5	0.1	0.1	14.7
240	0.9	3.3	2.2	1.1	0.8	0.1	0.0	0.1	8.6
270	1.1	2.2	1.2	0.7	0.4	0.2	0.0		5.8
300	0.6	2.7	0.9	0.5	0.3	0.1	0.1		5.3
330	1.1	2.4	1.3	0.9	0.5	0.3	0.1	0.0	6.7
360	1.6	3.6	2.5	1.7	0.9	0.4	0.1	0.1	10.9
SUM	14.0	41.4	22.8	12.5	5.9	2.4	0.6	0.4	100

Tabell 3.

Frekvenstabell av vind 700 m over Gardermoen, 1980-87. Vindhastigheten, U er gitt i intervaller på 3 m/s og vindretningen i intervaller på 30°.

U DD	0.0 2.4	2.5 5.4	5.5 8.4	8.5 11.4	11.5 14.4	14.5 17.4	17.5 20.4	> 20.4	SUM
30	1.0	3.1	2.4	1.3	0.7	0.4	0.1	0.1	9.2
60	0.8	2.5	1.5	0.7	0.3	0.2			6.1
90	0.8	2.2	1.2	0.6	0.3	0.1	0.0		5.3
120	0.7	2.4	1.8	0.8	0.3	0.2	0.1		6.2
150	0.6	2.6	1.6	0.9	0.6	0.2	0.1	0.1	6.6
180	0.8	3.5	2.6	1.7	1.0	0.5	0.3	0.2	10.5
210	0.9	3.8	3.7	2.5	1.6	0.6	0.5	0.3	14.3
240	0.7	3.2	2.1	2.0	1.2	0.6	0.3	0.2	10.2
270	0.7	2.6	2.2	1.1	0.6	0.4	0.2	0.2	8.0
300	0.8	2.4	1.4	1.0	0.6	0.5	0.2	0.0	6.8
330	0.8	2.2	1.7	1.2	0.8	0.5	0.3	0.2	7.7
360	0.9	2.6	2.0	1.6	0.9	0.8	0.3	0.1	9.1
SUM	9.4	33.0	24.4	15.4	9.0	5.2	2.3	1.3	100

4.2. Vindprofiler og vindskjær over Gardermoen.

Materialet er inndelt i grupper på 30°'s sektorer: 030, 060, 090° osv. 300°'s gruppen omfatter feks. alle tilfelle med $284 < DD(700m) < 315^\circ$. Dette materialet er videre inndelt etter vindhastighet og stabilitet. Vi har tatt for oss alle tilfelle der $U(700m) > 10.0$ m/s.

Tabell 4.

Eksponenter i den ekponensielle vindformel beregnet mellom høydene 400 og 700 m (n_1), samt 100 og 400 m (n_2) over Gardermoen. Bare tilfelle > 10.0 m/s i 700 m's høyde er tatt med. Beregningene er gjort pr. 30° sektor, hvor vindretningen er referert til 700 m's høyde. I tabellen er det gitt resultater for vilkårlig stabilitet, samt inndelt i 3 stabilitetsklasser etter temperaturredifferansen, ΔT mellom 100 og 700 m's høyde ($\Delta T < 0.0^\circ C$ (inversjon), $0.0^\circ C \leq \Delta T < 3.0^\circ C$ (stabile forhold), $\Delta T \geq 3.0^\circ C$ (nøytrale forhold)).

SEKT-OR	ALLE			INVERSJON			STABIL			NØYTRAL		
	n_1	n_2	N	n_1	n_2	N	n_1	n_2	N	n_1	n_2	N
030	.06	.20	16						1	.07	.19	15
060			3						1			2
090	.06	.21	6						4			2
120			2						2			
150			3						1			2
180	.23	.37	10			1			3	.25	.47	6
210	.23	.27	34	.29	.33	7	.21	.29	15	.20	.22	12
240	.14	.23	29	.27	.35	11	.07	.15	9	.04	.15	9
270	.17	.20	11			3	.16	.28	6			2
300	.40	.37	17	.55	.36	7			2	.32	.40	8
330	.18	.25	14			2			4	.25	.31	8
360	.16	.26	25						4	.11	.24	21

Vi har benyttet dataserien fra 1.11.90 til 30.09.91.

Det er bare gitt n-eksponenter i grupper med 5 eller flere tilfeller for å unngå for mye støy i tabellen.

Stabilitetsinndelingen er 3-delt. Tilfelle med temperaturøkning (inversjon) med høyden ($T(700m) > T(100m)$) er definert som sterkt stabile (INV). Tilfelle med svakt temperaturfall med høyden, $0.0^\circ C \leq (T(100m) - T(700m)) < 3.0^\circ C$ (dvs. en temperaturgradient mellom 0.0 og -0.5 °C/100m) er definert som middels stabile

(STAB). Tilfelle med mer markant temperaturfall med høyden, $(T(100m) - T(700m)) \geq 3.0^{\circ}C$ (dvs. en temperaturgradient på minst $-0.5^{\circ}C/100m$) er definert som nøytrale, NØY (egentlig svakt stabile, nøytrale eller instabile).

Vi har kartlagt vindprofilene gjennom den eksponensielle vindformel, lign. 1

$$\frac{U_2}{U_1} = \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^n \quad \text{lign. (1)}$$

hvor n er en eksponent som forbinder vinden i 2 høyder, z_2 og z_1 .

Tabellen inneholder en del informasjon:

- Vind omkring 300° har sterkest økning med høyden, særlig gjelder dette mellom 400 og 700 m over Gardermoen. Dette gjelder alle stabilitetsforhold og synes være reelt fordi det er brukbart med data i denne sektorgruppen. (Unntaket er sektor 180° mellom 100 og 400 m, men her er det få tilfelle slik at resultatet ikke uten videre kan aksepteres.)
- Inversjoner og middels stabile forhold forekommer hyppig i sektoren $180 - 330^{\circ}$, selv ved vind over 10 m/s.
- Til tross for at sterk vind hyppig forekommer i sektorene 360 og 030° er det ingen registrerte tilfelle med inversjon og få tilfelle med middels stabile forhold.
- Vindøkningen med høyden er som ventet størst ved inversjonsforhold og minst ved nøytrale forhold, dette kommer best fram i de 2 sektorene med flest data, 210 og 240° .

Vi vil nå konsentrere oss om gruppen på 300° siden denne retningen ser ut til å gi størst økning med høyden. Vi benytter en ligning som kobler vind over friksjonslaget (gradientvinden), V_G , til lokal vindhastighet, $U(Z)$ i høyden Z :

$$U(Z) = 0.285 \cdot V_G \cdot \left(\frac{V_G}{f \cdot Z_0} \right)^{-0.065} \cdot \ln \left(\frac{Z}{Z_0} \right) \left[\frac{m}{s} \right] \text{ lign. (2)}$$

Ligningen er foreslått av Davenport (1963) og senere av Swinbank (1974) (6). f er coriolisparameteren (0.00012 ms^{-2} ved 60°N) og Z_0 ruhetslengden som definerer overflatens friksjonsevne. Vanligvis regner vi $Z_0=0.02\text{m}$ for flyplassforhold og $Z_0=1\text{m}$ for barskog.

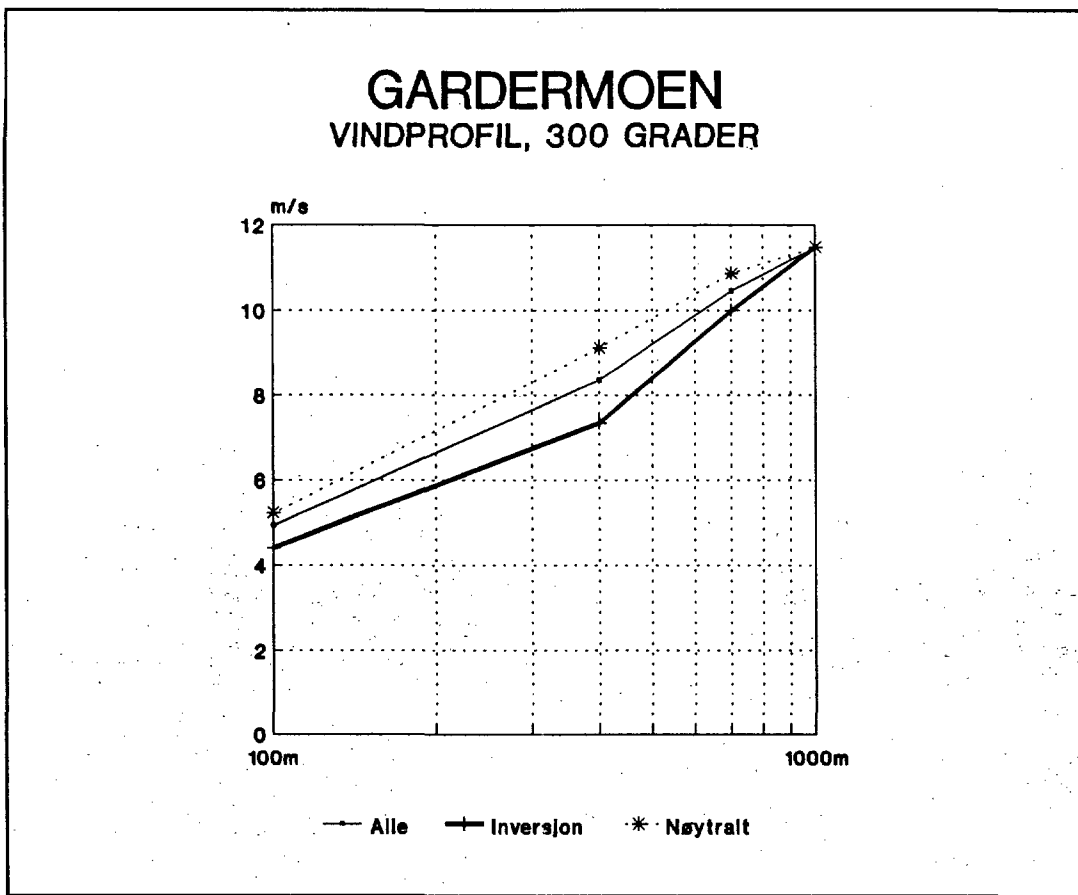
Input i lign.2 gir ved bruk av data fra 100 til 400 m, sektor 300° , nøytral sjiktning: $Z_0=15\text{m}$, og fra 400 til 700 m: 23m . Dette er ruheter som bare kan forklares ved at Gardermoen ligger i le av Romeriksåsen. Vi snakker altså om et terrengskapt vindskjær, ikke om en tradisjonell vindøkning med høyden skapt ved stor ruhet på bakken. Definisjonen av en slik beregnet Z_0 er derfor egentlig ikke riktig og må tolkes med forsiktighet. Bemerk at beregnet Z_0 er størst ved bruk av data mellom 400 og 700 m over Gardermoen. Dette har nok å gjøre med at toppen av åsen ligger i dette nivået.

Det er de markerte le-sonene som gjør det mulig å danne kaldluft og temperaturinversjoner ved bakken, også i situasjoner med sterk høydevind.

Dersom vi benytter data også for 1000 m (sektor 300°), finner vi at n -eksponenten for de 8 tilfellene med nøytral sjiktning blir 0.16 fra 700 og opp til 1000 m. Bruk av lign. 2 gir da $Z_0=1.3\text{m}$, hvilket er en mer normal verdi for skogsruhet. Vi er da over le-sonen av Romeriksåsen for begge nivåene. Ved bruk av lign. 2 over 700m's lokal høyde på Gardermoen bør man derfor benytte en ruhet på 1m.

Fra 100 m og opp til 700 m's høyde er det en sterk økning av vinden med høyden, spesielt ved nordvestlig vind (sektor 300°). Dette skyldes at nedre nivåer er skjermet av Romeriksåsen. Fra 700 og opp til 1000 m er det en vindøkning som er mer sammenlignbar med det en må vente over en skogsflate.

Det er ikke tilstrekkelig oppløsning i materialet til å kunne si noe om det finnes skarpere vindskjærssoner over vertikale høyder av størrelsesorden 100 m.

**Figur 2**

Vindprofil basert på radiosondedata skalert i forhold til vindhastighet i 1000 m's høyde.

Figur 2 viser hvor mye vindøkningen er med høyden fra 100 til 1000 m over Gardermoen. Vindprofilet er tilnærmet logaritmisk. Mellom 400 og 700 m er det noe raskere endring enn en gjennomsnittlig logaritmisk kurve, ved 700 til 1000 m noe langsommere.

For å gi et godt bilde av vindprofilet mellom 100 m og opp til gradientvinden (fristrøms hastigheten) er det nødvendig å bruke 2 sammensatte vindprofiler. Vi benytter $Z_0=15\text{m}$ fra 100 m opp til 700 m og $Z_0=1\text{m}$ over 700 m. Bruk av ligning 2 med $Z_0=1\text{m}$ gir da:

$$U(2000\text{m}) = 0.95 U_F \quad \text{lign. (3)}$$

$$U(850\text{mb}) \approx U(1400\text{m}) = 0.90 U_F \quad \text{lign. (4)}$$

$$U(700\text{m}) = 0.81 U_F \quad \text{lign. (5)}$$

Bruk av $Z_0=15\text{m}$ gir tilsvarende:

$$U(700\text{m}) = 0.56 U_F \quad \text{lign. (6)}$$

$$U(400\text{m}) = 0.48 U_F \quad \text{lign. (7)}$$

$$U(100\text{m}) = 0.27 U_F \quad \text{lign. (8)}$$

Kobling av disse profilene ved å la $Z_0=1\text{m}$ over 700 m, gir da at:

$$U(400\text{m}) = \frac{0.81}{0.56} 0.48 U_F = 0.69 U_F \quad \text{lign. (9)}$$

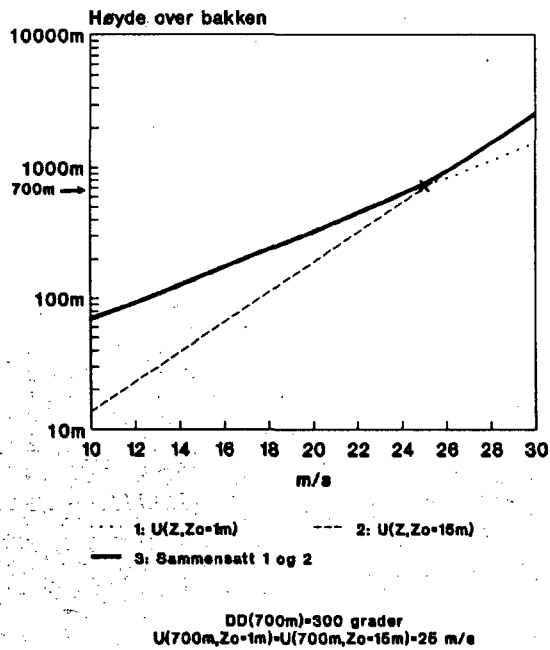
$$U(100\text{m}) = \frac{0.81}{0.56} 0.27 U_F = 0.39 U_F \quad \text{lign. (10)}$$

Alle koeffisienter som kobler lokal hastighet til fristrøms-hastigheten i lign. 3 til lign. 10 er beregnet ved fristrøms-hastighet ved 40 m/s. Ved 30 m/s er koeffisientene 2% høyere, ved 20 m/s, 5% høyere.

Figur 3 viser logaritmiske vindprofiler med $Z_0=1\text{m}$ og $Z_0=15\text{m}$, samt et profil som er bygget opp ved $Z_0=1\text{m}$ over 700m og $Z_0=15\text{m}$ under 700m, høyder referert til Gardermoen. Profilene er satt opp ved lign.2. og har som krav at begge skal vise samme hastighet i 700 m's høyde.

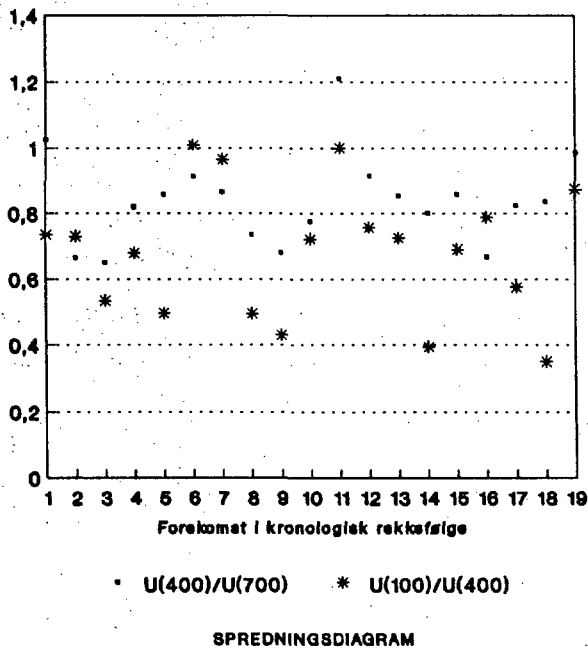
Figur 4 viser spredningsdiagram over vindprofilene. Diagrammet viser at profilene har en del spredning, som ventelig er.

GARDERMOEN VINDPROFILER

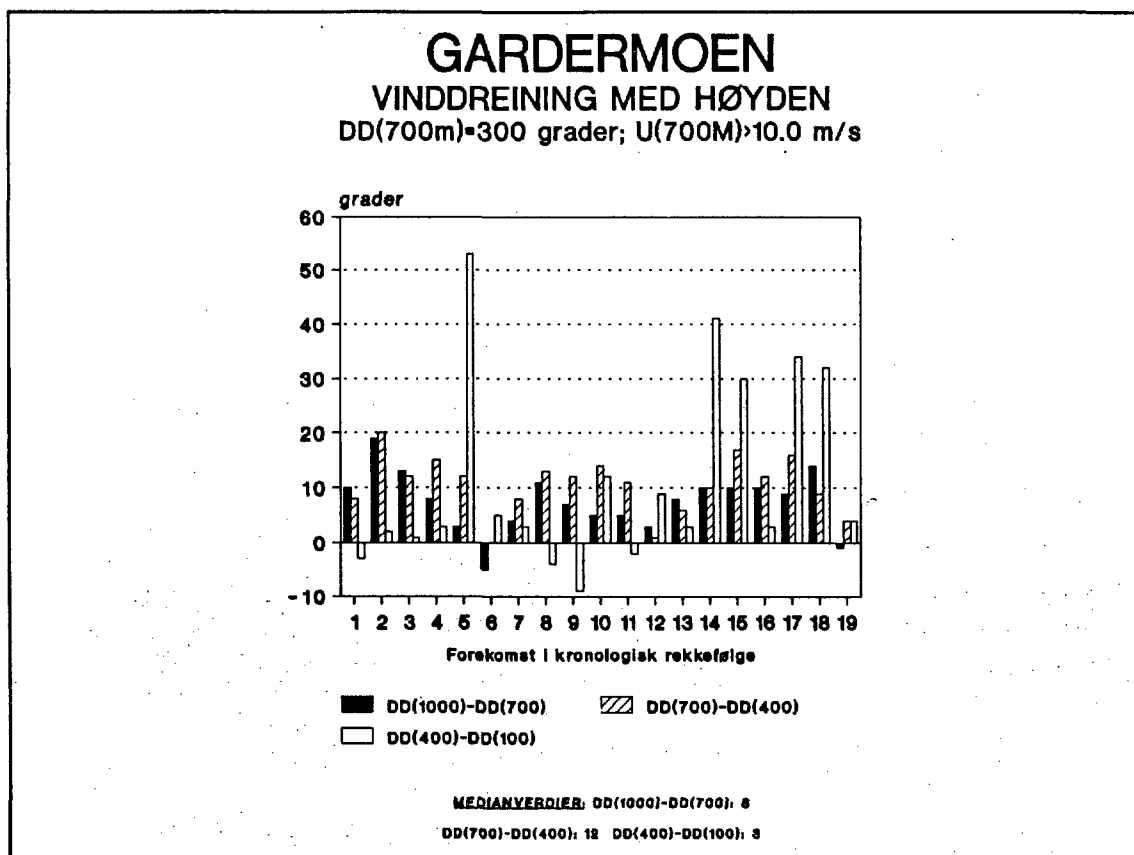


Figur 3
Typiske vindprofiler ved nordvestlig vind, $U(700m) > 10$ m/s.

GARDERMOEN SEKTOR 300 grader $U(700m) > 10.0$ m/s



Figur 4
Spredningsdiagram over forholdet mellom vindhastigheten i 2 og 2 nivåer ved nordvestlig vind, 1.11.90 - 30.09.91.



Figur 5

Vi har sett litt på vinddreining med høyden for sektor 300°. Resultatet er vist i Figur 5. Der er differensen i vindretning mellom 2 og 2 nivåer i de 19 tilfellene med $U(700m) > 10.0$ m/s tegnet kronologisk opp. Figuren viser at det er en tendens til at vinden i høyden dreier med urviseren, slik en kan vente som følge av Ekmaneffekten (minkende friksjonsbremsing i høyden). Men merk at mellom 100 og 400 m er det relativt liten endring i medianverdien. Imidlertid forekommer en del større avvik, også negative. Det er rimelig at en tydelig Ekmaneffekt først framkommer ved vind fra toppen av åsene og oppover, mens vind i lavere nivåer opplever betydelig grad av terrengstyring.

4.3. Turbulens over Gardermoen.

Det skarpe vindprofilet ved vind omkring 300° må forventes å skape en del turbulens. Dette stemmer godt med fly - observasjonene om at sterk turbulens forekommer ved sterke vindfelt fra nordvest.

Vindprofilet for sektor 300° synes rimelig logaritmisk med ruhet, $Z_0=15$ m. Vi kan derfor benytte analogien om logaritmiske turbulensintensitetsprofiler.

Etter Panofsky and Dutton (7) har vi:

$$\frac{\sigma_u}{u} = I_u = 0.41 A \frac{1}{\ln \frac{Z}{Z_0}} \quad \text{lign. (11)}$$

hvor A i flatt terreng iflg. målinger er 2.39 ± 0.03 , mens den i ujevnt terreng ligger høyere, anslagsvis på ca. 3.0. Vi har brukt verdien 3.0 for nordvestlig vind på Gardermoen. Dette gir:

$$\frac{\sigma_u}{u} = I_u = 1.23 \frac{1}{\ln \frac{Z}{Z_0}} \quad \text{lign. (12)}$$

Ligningen gir konstante standardavvik med høyden, noe som synes å gjelde mellom 100 og 700 m. Vi får at:

$$\sigma_u = 1.23 \frac{u(400)}{\ln \frac{400}{15}} = 0.37 u(400) \quad \text{lign. (13)}$$

$U(400m)$ er iflg. lign.9 69% av fristrøms hastigheten (73% ved gradientvind 20 m/s). Derved blir standardavviket iflg. lign. 13: 26% (27%) av fristrøms hastigheten. Standardavviket kommer da opp

i 4.1 m/s ved en gradientvind på 15 m/s, 5.5 m/s ved 20 m/s, 6.7 m/s ved 25 m/s og 8.0 m/s ved 30 m/s. I 400 m's høyde har vi da viindhastigheter på $15 \times 0.69 \times 1.06 = 11.0$ m/s, $20 \times 0.69 \times 1.05 = 14.5$ m/s, $25 \times 0.69 \times 1.03 = 17.8$ m/s og $30 \times 0.69 \times 1.02 = 21.1$ m/s.

Forekomsten av slike hastigheter innenfor 30 graders sektoren omkring 300 grader kan beregnes ut fra langtidstatistikken, Tabell 2. Dette gir 0.5%, 0.2%, 0.1% og 0.0%.

Vi betrakter en større sektor, 255 - 344° utfra den erkjennelse at det langs utflygningsbanen kan være områder der vinden kan være turbulent innenfor nærliggende retninger til 300°. Data-grunlaget for deler av sektoren er dessuten mangelfullt. Derved får vi 2.2%, 0.8%, 0.3% og 0.04%.

4.4. Sodarmålinger, vestre rullebanealternativ.

Sodarmålinger fra Stensgård og Trugstad er i (2) systematisert og plottet ut. Fig. 6 og Fig. 7 er hentet fra {(2): Fig.4.2 og Fig. 4.13)}. Disse viser at det er tydelige vindskjær i 175 - 375m's høyde over bakken. Vindskjærene er av omtrent samme gjennomsnittstørrelse over dette høydeintervallet på de 2 stedene, dog er skjærene ved sektor vest (240 - 300°) særlig sterke på Stensgård.

Det er planlagt flere flyoperasjoner i nordre del av vestre rullebanealternativ (sodarstasjon: Stensgård) enn i sørlige del (sodarstasjon: Trugstad). Dessuten kommer flybanene i lav høyde nærmest åspartiet i vest ved operasjoner i nordområdet. Når dertil vindskjærene synes omtrent like, men dog noe mer markert ved Stensgård, finner en det rimelig å konsentrere seg om Stensgårdområdet ved denne utredningen.

4.4.1. Midlere vindskjær i faste nivåer over Stensgård.

Fra Fig. 7 har vi plukket ut utjevnedde prosentiler for vindskjær, V_s , definert ved forholdet mellom middelvindhastigheten i nivåene 175 og 375m over bakken, $V_s = U_{175m}/U_{375m}$. For 4 sektorer, E_{180} , SW_{60} , W_{60} og NW_{60} er verdien av V_s ved prosentilene 5, 10, 25, 50, 75 (og ellers etter behov) avlest, og således finner vi forekomst av

vindskjær over/under faste grenser. Det er tilnærmet lik middelvind over Stensgård (375m) og Gardermoen flyplass (400m) (2). Ved bruk av Tabell 2 (s.10), eller egentlig en tabell over antall tilfelle innenfor grupper på 10° og 1 m/s som ikke er vist her, kan vi derfor få et beregnet uttrykk for hvor ofte vindhastighetsdifferansen overstiger faste verdier (5, 6, 7, 8, 9 og 10 m/s) i en lang rekke (1980 - 1987).

Tabell 5.

Frekvens (%) av vindhastighetsdifferens $V_d = U_{375m} - U_{175m}$ over Stensgård basert på sodarmålinger høsten 1991 og normalisert til en lengre rekke (1980-87) ved data fra Gardermoen radiosonde-stasjon.

V_d over faste grenser	E_{180}	SW_{60}	W_{60}	NW_{60}	$0-360^\circ$
	$f_{7.5}=10.5^1$	$f_{7.5}=8.9^1$	$f_{7.5}=2.8^1$	$f_{7.5}=5.0^1$	$f_{7.5}=27.2^1$
≥ 5 m/s	3.9	3.1	2.7	3.1	12.8
≥ 6 m/s	2.0	1.9	2.1	1.9	7.9
≥ 7 m/s	0.9	1.0	1.5	1.1	4.5
≥ 8 m/s	0.3	0.5	0.8	0.7	2.3
≥ 9 m/s	0.2	0.3	0.3	0.4	1.2
≥ 10 m/s	0.1	0.2	0.2	0.3	0.8

¹ $f_{7.5}$ representerer frekvens av $U_{400m} \geq 7.5$ m/s på Gardermoen i perioden 1980-87.

Tabell 5 viser at det er tilnærmet like mange tilfelle med vindhastighetsdifferans over 5 m/s mellom 375 og 175m's høyde i de 4 sektorgruppene. For større differanser blir bidragene fra østlig sektor etter hvert mindre. Her må en bemerke at østlig sektor representerer hele halvsirkelen fra 0 til 180°, mens de øvrige 3 sektorer representerer hver sin 3.dje - part av den andre halvsirkelen. Tabellinjen med $f_{7.5}$ angir total frekvens av $U_{400m} \geq 7.5$ m/s på Gardermoen innen de forskjellige sektorer. Linjen viser at mens vestlig sektor har færrest tilfelle med slik vind totalt sett, så er vindskjærbidragene like store, til dels også større, som for sektorer med vesentlig mer vind. Tabellen viser tydelig at risikoen for vindskjær er størst når vinden er fra vest, men risikoen er høy også ved nordvestlig vind. Ved vind fra sørvest er risikoen mindre. Minst er den når vinden har en østlig komponent (vind i sektor 0 - 180°).

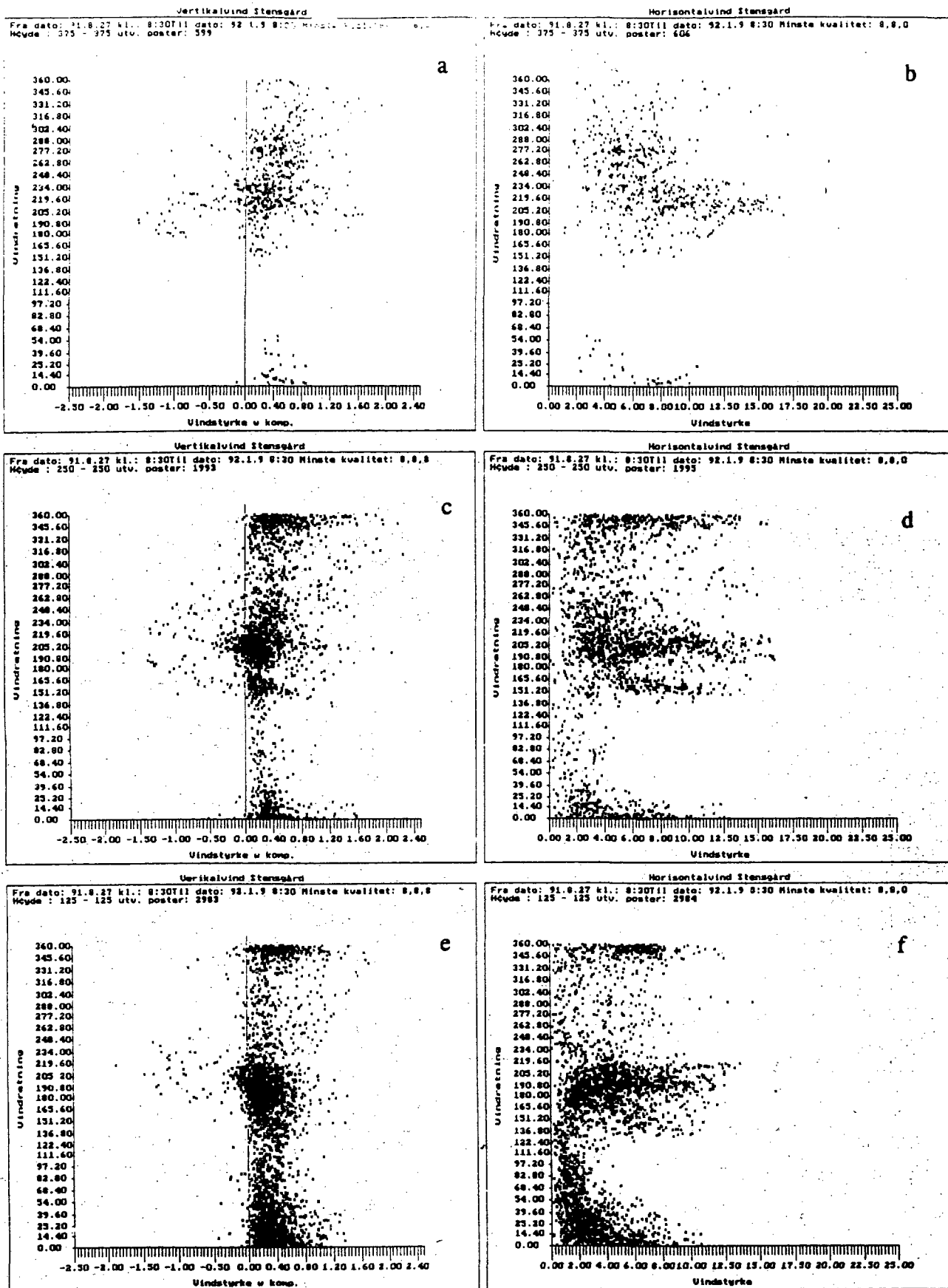
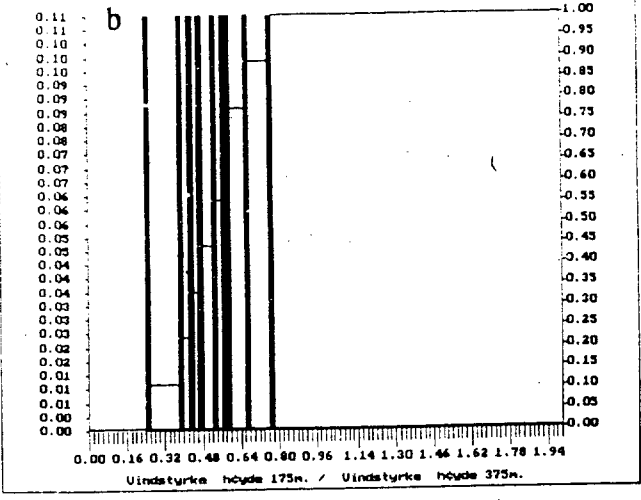
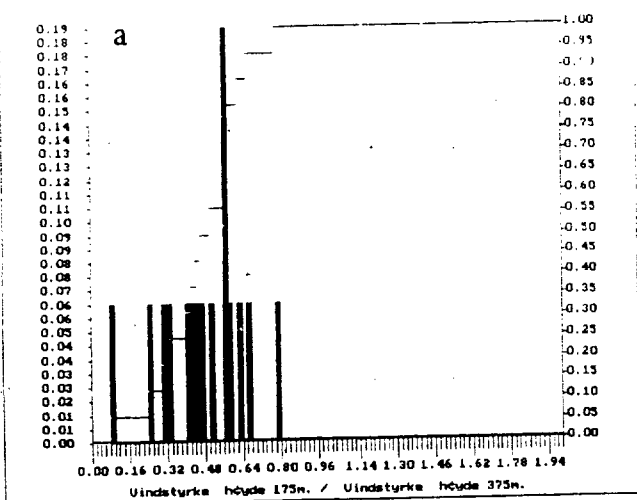


Fig. 4.2 Stensgård: Vertikale (venstre) og horisontale (høyre) 20 min vindhastigheter plottet mot vindretningen i hhv 375 m, 250 m og 125 m nivå.

Figur 6.

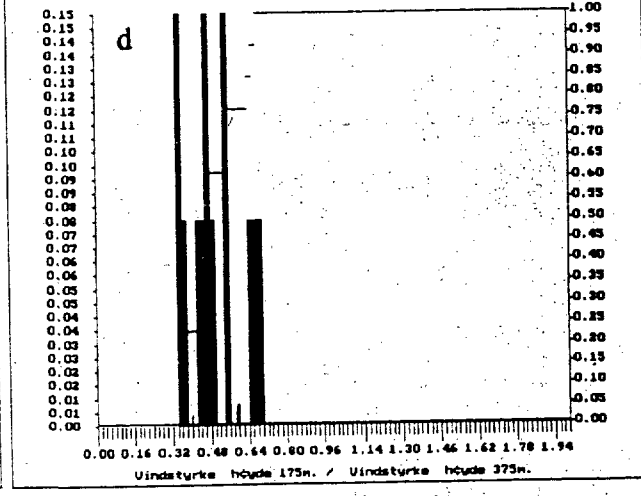
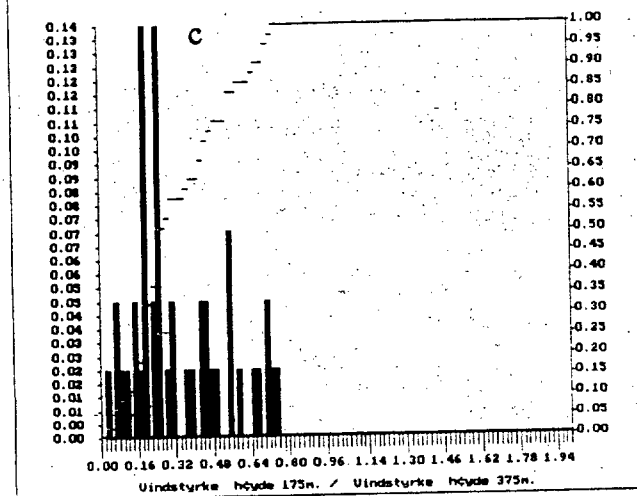
Vindskjær Stensgård NW
 Fra dato: 91.8.27 kl.: 8:30 til dato: 92.1.9 8:30 Minste kvalitet: 8,0
 Høyde: 375 - 375 Vindretning: 300,00 - 360,00 Vindstyrke: 7,50 - 12,50
 utv. poster: 16

Vindskjær Stensgård N
 Fra dato: 91.8.27 kl.: 8:30 til dato: 92.1.9 8:30 Minste kvalitet: 4,4,0
 Høyde: 375 - 375 Vindretning: 300,00 - 360,00 Vindstyrke: 12,50 - 100,00
 utv. poster: 9



Vindskjær Stensgård SW
 Fra dato: 91.8.27 kl.: 8:30 til dato: 92.1.9 8:30 Minste kvalitet: 8,0
 Høyde: 375 - 375 Vindretning: 240,00 - 300,00 Vindstyrke: 7,50 - 12,50
 utv. poster: 43

Vindskjær Stensgård W
 Fra dato: 91.8.27 kl.: 8:30 til dato: 92.1.9 8:30 Minste kvalitet: 4,4,0
 Høyde: 375 - 375 Vindretning: 240,00 - 300,00 Vindstyrke: 12,50 - 100,00
 utv. poster: 13



Vindskjær Stensgård SW
 Fra dato: 91.8.27 kl.: 8:30 til dato: 92.1.9 8:30 Minste kvalitet: 8,0
 Høyde: 375 - 375 Vindretning: 180,00 - 240,00 Vindstyrke: 7,50 - 12,50
 utv. poster: 143

Vindskjær Stensgård SW
 Fra dato: 91.8.27 kl.: 8:30 til dato: 92.1.9 8:30 Minste kvalitet: 8,0
 Høyde: 375 - 375 Vindretning: 180,00 - 240,00 Vindstyrke: 12,50 - 100,00
 utv. poster: 42

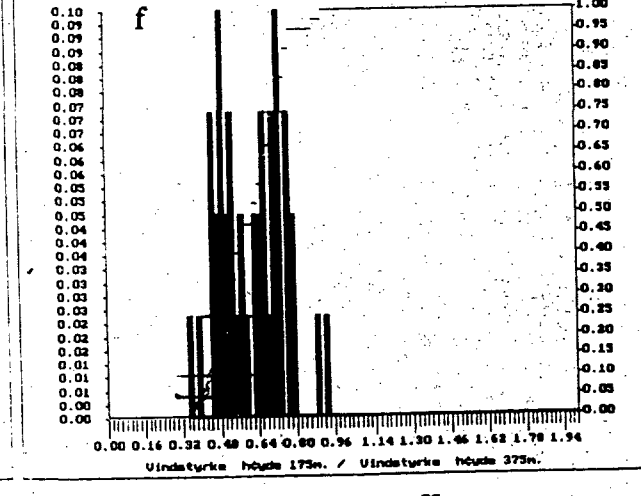
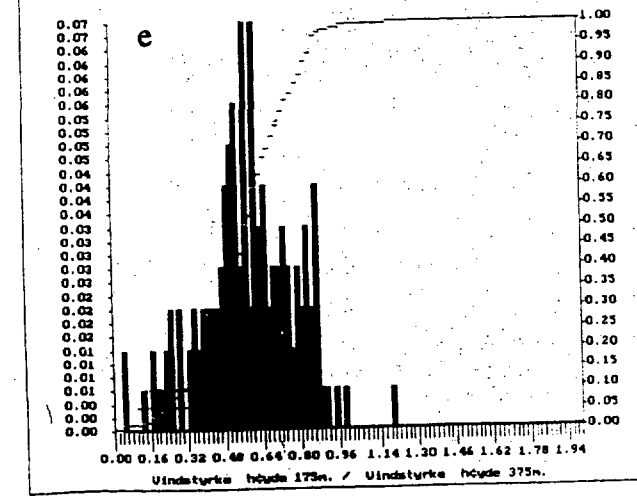
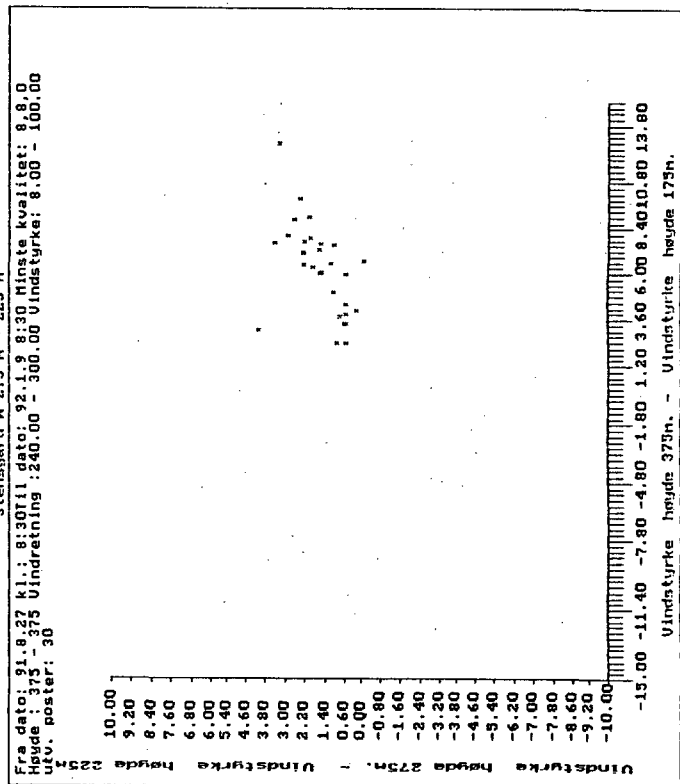
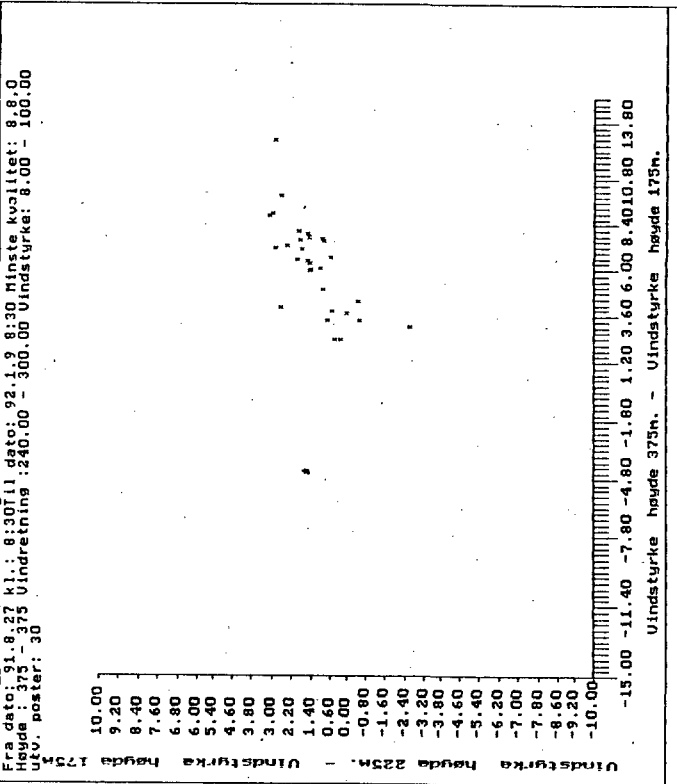
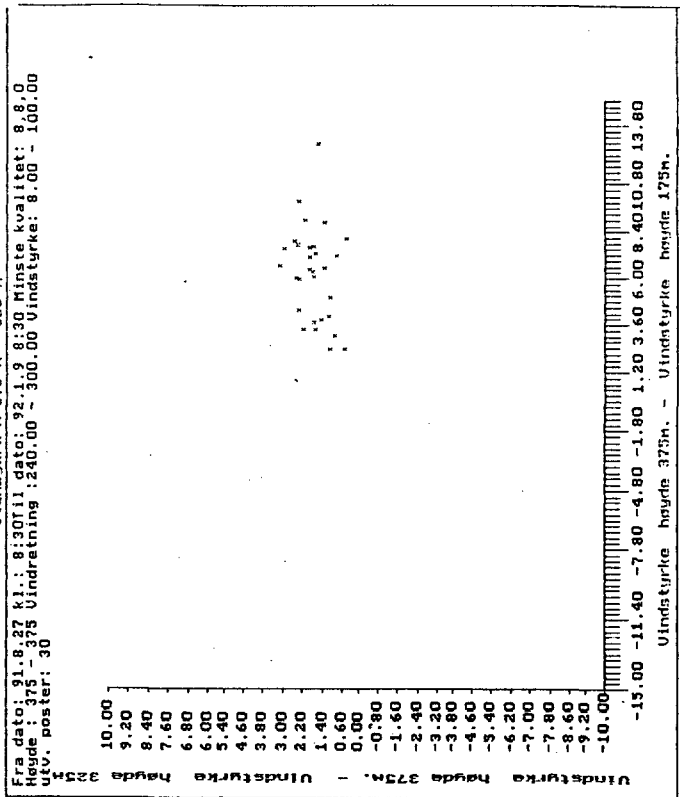
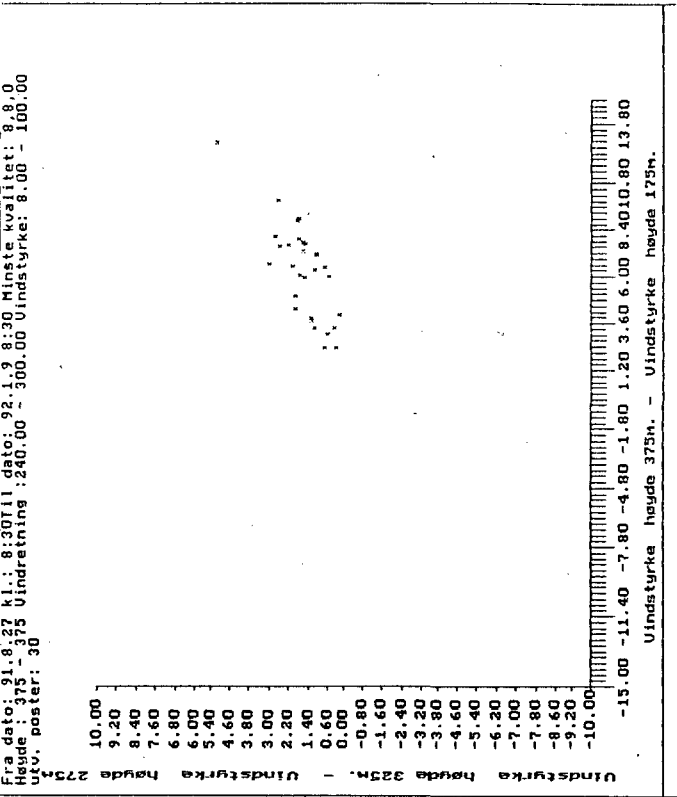


Fig. 4.13 Stensgård: Fordeling av forholdstallet $U_{175} : U_{375}$ innenfor vindretningssektorene NW_{60} , W_{60} og SW_{60} (se tekst) i 375 m nivå. Det er skilt mellom tilfeller med 375 m vind mellom 7.5 og 12.5 m/s hhv tilfeller med 375 m vind over 12.5 m/s.

Figur 7.



Figur 8.

4.4.2. Vindskjævariasjon innenfor høydeintervallet 175-375m.

Faste delintervaller.

Vi skal nå se litt på vindskjærvariasjonen innenfor høydeintervallet. Vi har inndelt intervallet i 4 delintervaller, hver på 50m. Ved Universitetet i Bergen har man kjørt ut en del figurer som for de 4 vindsektorer E_{180} , SW_{60} , W_{60} og NW_{60} plotter opp vindhastighetsdifferansen, V_d for $U_{375m} - U_{175m}$ mot V_d over hver av de 4 delintervallene. Fig. 8 viser plottet for vestlig sektor, W_{60} .

Resultatet viser at V_d over delintervallene i hovedsak er like, og $1/4$ av $U_{375m} - U_{175m}$. Dette viser at vindhastigheten øker lineært med høyden i dette intervallet. Ved W og til dels NW - vind er det imidlertid visse avvik. Skjær $\leq (6 \text{ m/s} / 200\text{m})$ har en tendens til å være skarpere rundt 350m enn rundt 200m. Det er også en tendens til at $V_d(375 - 325\text{m})$ er den samme for små og middels store verdier av $V_d(375 - 175\text{m})$, som for store. Fra Tab. 4.3 (2) har vi at medianverdien for $U_{175m}/U_{375m} = 0.25$ for U_{375m} mellom 7.5 og 12.5 m/s og 0.47 for $U_{375m} > 12.5$ m/s. Dersom vi antar at medianverdien i 375m's nivå for de 2 gruppene er 10.0 og 15.0 m/s, får vi hastighetsdifferanser på 7.5 (ved 10 m/s) og 7.9 m/s (ved 15 m/s), dvs., tilnærmet konstant differans.

Dette kan tolkes slik: Svak og middels sterk vind blåser over åsene og blandes lite med laget på le-siden. Når vindhastigheten øker, øker turbulensen fordi skjærspenningen blir stor. Derved blandes laget ut til et tykkere skjærlag. Det relative (hastighetsskalerte) vindskjæret i laget nær åskammen blir således mindre, mens vi får en tilsvarende økning i lavere lag på lesiden av åsen. En kan heller ikke se bort fra at strålingsavkjølt, stabil luft på lesiden av åsen kan motvirke blanding, og at denne virkningen er størst ved svak vind.

Betydningen av variabel høyde opp til vindskjærets maksimum. Studie av en vindepisode med sterk vestlig vind.

Tabell 5 og også studiene over delintervaller representerer midlere forhold i faste nivåer. En kan imidlertid tenke seg at maksimalsonen i vindskjæret varierer noe med høyden i tid. For å undersøke dette har en tatt for seg perioden 14.12.92 kl. 00 - 06.40. Ved denne episoden blåste det sterk vestlig vind, ca. 25 m/s over friksjonslaget, 1000m over bakken.

Figur 9 viser et plot av 20 tilfeller med 20 min. middelvind med registrert vind i 250m's nivå i denne episoden (250m er valgt fordi det ligger nær vindskjærets maksimum, se Figur 10). Vindretningen i dette nivået varierte mellom 265 - 295°, og vindhastigheten mellom 9 og 17 m/s. I 10 av disse tilfellene var det registrert vind også i 375m's nivå, med vindhastighet mellom 13 og 20 m/s. I 175m's nivå varierte vindhastigheten mellom 5 og 11 m/s.

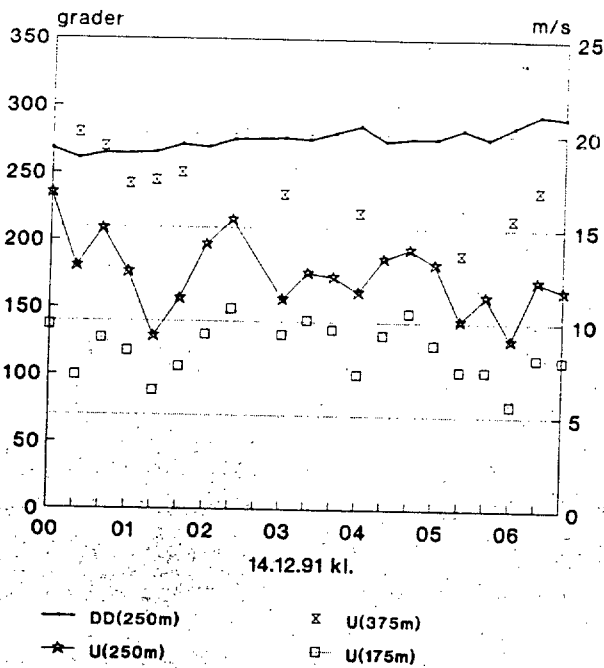
Figur 10 viser et plot av vindskjær, gitt som vindhastighetsdifferanser over 50m's høydeforskjell, innenfor disse nivåene. Figuren viser at det midlere vindskjær mellom de faste flatene 225 og 275m har samme styrke som middelet over hele intervallet 175 - 375m, verdien er 2.5 m/s / 50m. I Tabell 5 angis et slikt (eller sterkere) vindskjær (10 m/s / 200m) innenfor vestlig sektor å forekomme i 0.2% av tiden. Tabell 2 (s.10), eller egentlig en tabell over antall tilfelle innenfor grupper på 10° og 1 m/s som ikke er vist her, viser at vindhastigheten i vestlig sektor [240-300°] ligger på minst 17.5 m/s i 400m's nivået på Gardermoen i 0.2% av tida. Som vi ser, stemmer dette godt med observasjonene fra 375m's nivå på Stensgård i denne episoden. Episoden synes altså på mange måter å være typisk for sterk vestlig vind.

I Figur 10 har vi også plottet høyden opp til det nivået som har størst vindhastighetsdifferans over 50m. Middelhøyden var 250m, men med en tydelig tidsvariasjon. Tilsvarende har vi plottet opp det maksimalt registrerte vindskjær over 50m høydeforskjell, samt maksimalt registrert skjær over 25m skalert til 50m høydeforskjell.

Disse plot viser at mens tidsmidlet fastnivå vindskjær over hele intervallet 175 - 375m var 2.5 m/s / 50m med ubetydelig vertikal variasjon innenfor dette nivået, så var tidsmidlet maksimalt vindskjær over 50m: 3.6 m/s / 50m og tidsmidlet maksimalt vindskjær over 25m: 4.8 m/s / 50m. En må altså regne med 40 - 50% sterkere skjær over 50m et eller annet sted innenfor nivået 175 - 375m, enn innenfor et fast 50m's nivå. Størst sannsynlighet for forekomst er omkring 250m's nivået. Dersom vi går ned i 25m's tykkelse øker intensiteten med 90%.

STENSGÅRD - SODAR

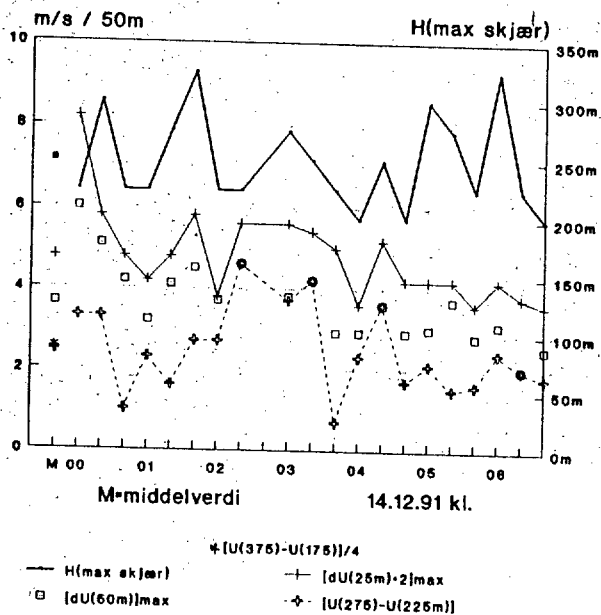
Kronologisk vindfordeling



Figur 9.

STENSGÅRD - SODAR

Kronologisk fordeling av vindskjær og høyden, H av max. 50m - vindskjær



Vindskjæret er plottet som skjær i fast nivå og som max. verdi over hhv. 25 og 50m høydedifferens.

Figur 10.

Metodikken er imidlertid kritisk for tilfeldige målefeil, som vil gi feilbidrag til maksimaldifferanser dersom flere intervaller har jevnbyrdige skjær. Feilen i maksimalbidraget kan bli systematisk på plussiden, spesielt ved 25 m's differansen som har små absolutte forskjeller. Figur 9 og 10 viser imidlertid det interessante trekk at for vind omkring 250 - 280° er det korrelasjon mellom maksimal skjærstyrke og høyden av dette maksimalskjæret, som kommer tydelig fram ved 25 m's skjær. Dette synes fysisk riktig og gir troverdighet.

Som vi har sett, har vindskjærene (gitt som hastighetsdifferans pr. høydeintervall) ved vind under 12.5 m/s en tendens til å være nesten like sterke som ved vind over 12.5 m/s. Vindskjærene ligger da høyere enn 250m, fortrinnsvis omkring 350m ved vind under 12.5 m/s.

I nivå 325 - 375m er gjennomsnittlig vinddifferans 1.5 m/s når differansen for 175-375m er 6 m/s eller mindre (Fig. 8), dvs. $1.5\text{m/s} / [10\text{m/s} / 4] = 0.6$ av skjæret på 10 m/s / 200m. Vi antar at maksimalskjæret følger samme kurve, og vi får $3.6 * 0.6 = 2.2$ m/s / 50m (maksimalt 50m skjær) og $4.8 * 0.6 = 2.9$ m/s / 50m (maksimalt 25m skjær) ved $V_d(375-175\text{m}) \approx 6$ m/s. For vindskjær på 6 m/s og oppover øker disse maksimalskjærene proporsjonalt med $V_d(375-175\text{m})$.

Dette gir følgende:

Ved bruk av Tabell 5 og informasjonen over kan vi sette opp en fordeling for hvor hyppig maksimalskjæret overstiger visse grenser innenfor vestlig sektor. For sørvestlig og østlig sektor er maksimalskjæret satt lik gjennomsnittsskjæret. For nordvestlig vind har vi korrigert maksimalskjæret med 1/2-parten av korreksjonen ved vestlig vind. Dette er gjort fordi vi ikke har noe varierende gjennomsnittsskjær avhengig av vindstyrken ved sørvest og østlig sektor, mens antydninger finnes ved nordvest. Figurer er ikke vist for dette.

Tabell 6.

Frekvens (%) av maksimal vindhastighetsdifferens $V_{d1} = U(x) - U(x-50m)$ og $V_{d2} = [U(x) - U(x-25)]*2$ [m/s] over Stensgård basert på sodarmålinger høsten 1991 og normalisert til en lengre rekke (1980-87) ved data fra Gardermoen radio-sondestasjon.

V_{d1}	V_{d2}	E_{180}^1	SW_{60}^1	W_{60}	NW_{60}	0-360°
≥2.0	≥2.6	0.3	0.5	3.0	1.0	4.8
≥2.5	≥3.3	0.1	0.2	1.5	0.5	2.3
≥3.0	≥4.0			0.6	0.2	0.8
≥3.5	≥4.6			0.2		0.2

¹ Frekvensen av V_{d2} er trolig noe lavere enn angitt i tabellen.

Datakvalitet og usikkerhet.

Det er naturlig å diskutere datakvaliteten på de sodar - oppmålte vindskjærene.

En mulig systematisk undertrykking av situasjoner med svakt skjær kan forekomme fordi situasjoner med markerte skjær vil gi skarpe ekko som er lettere å registrere enn situasjoner med mindre markerte skjær (2). Denne effekten fører til at informasjonen i Tabell 5 ligger på den konservative side, dvs, forekomsten av midlere vindskjær over 200m's intervallet 175 - 375m er neppe større enn det tabellen viser.

På den annen side representerer alle vindverdiene midler over et 25m vertikalt sjikt, og noen hundre (kvadrat) meter horisontalt område. Det vil si at maksimalskjæret over 25m ikke kan registreres fullt ut, og at også maksimalskjæret over 50m kan være noe underestimert.

De 2 ovennevnte effekter går altså hver sin vei hva gjelder hyppigheten av maksimalskjær (Tabell 6). Det er usikkert hvilken effekt som er størst. Ut fra den kunnskap en har, vurderes verdiene i Tabell 6 til å være de mest sannsynlige verdier.

Andre usikkerheter ved målingene (kalibrering, falske ekko etc.) synes iflg. (2) å være relativt små i hele høydeintervallet 175 - 375m. Relativ usikkerhet for nivåene i Tabell 6 kan tenkes å ligge på ca. 50%, dvs 3.0 ± 1.5 osv., hvilket er mer å betrakte som et "educated guess" enn en nøye beregnet verdi.

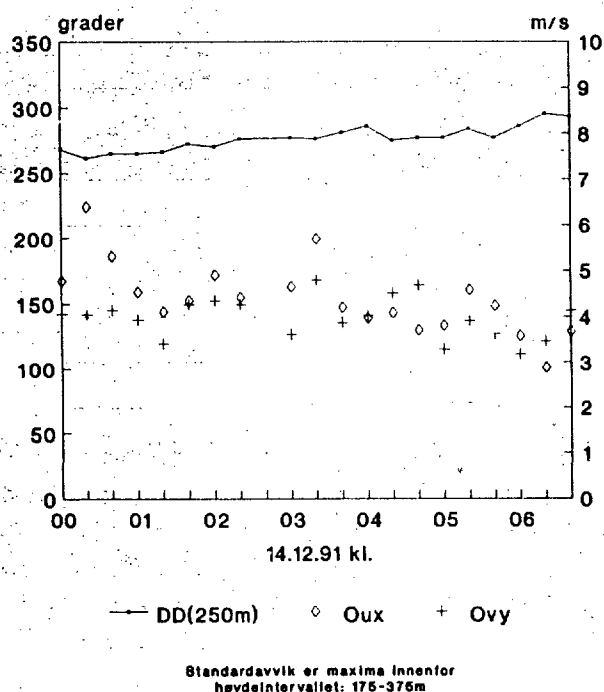
4.5. Turbulens over Stensgård.

Standardavvik.

Det måles komponenter av standardavvik langs faste akser i x, y og z-retningen ved sodar-utstyret. Figur 11 viser et plot over maksimale standardavvik for x og y-retningen (σ_{ux} , σ_{vy}) i episoden 14.12.91.

STENSGÅRD - SODAR

Kronologisk fordeling av
vindretning og standardavvik



Figur 11.

Gjennomsnittsverdiene for maksimalverdiene av σ_{ux} og σ_{vy} er 4.40 m/s resp. 3.98 m/s, vindretning omkring 270 - 280°. Siden disse er målt i forhold til retning 241 og 331° (2), inneholder begge både longitudinale og transversale komponenter. Forholdet mellom en ren longitudinal og en ren transversal komponent er typisk 1.24 (7). I vårt tilfelle med standardavvik langs faste akser, har vi $\sigma_{ux}\sigma_{vy}=1.11$. Vi kan oppnå 1.24 ved å korrigere σ_{ux} opp med 6% og σ_{vy} ned med 6%. Dette er da en rimelig korreksjon for å transformere standardavvikene over på akser som følger vindens retning (longitudinalt) og tvers på denne (transversalt). Verdien av σ_u blir da 4.66 og σ_v 3.74 m/s. Verdien av midlere maksimalt

standardavvik i vindretningen, σ_u , settes derfor til 4.66 m/s i denne perioden.

Vi har tidligere sett at ovennevnte episode representerer 0.2% - nivået for midlere skjær over 175 - 375m intervallet, vind fra vest. Standardavviket er da sodar - oppmålt til 4.66 m/s. Tabell 5 viser at vi må regne med et samlet vindskjærbilde på 0.8% når alle retninger tas i betraktning, vi antar at standardavviket på 4.66 m/s blir å regne til disse 0.8%. Dette tallet avrundes til 1% pga. usikkerhet og ut fra den tankegang at noe svakere vestlige middelskjær kan være skarpe over et lite vertikalområde og gi høye standardavvik der.

Vi antar videre at det maksimale standardavviket er proporsjonalt med det midlere vindskjæret over 175-375m (Tabell 5), slik at en reduksjon av standardavviket til 2/3, dvs. fra 4.66 til 3.1 m/s, svarer til en reduksjon av vindskjæret fra 10 m/s til 6.7 m/s. Iflg. Tabell 5 forekommer vindskjær på 6.7 m/s / 200m i 5 % av tida, hvilket da skulle gjelde også for $\sigma_u \geq 3.1$ m/s.

Figur 12 (b,d) viser at i 0.3% av tida var enten σ_{ux} eller σ_{vy} over 4.4 m/s (σ_u over 4.66 m/s) og i 2.1% av tida var enten σ_{ux} eller σ_{vy} over 2.9 m/s (σ_u over 3.1 m/s) (omtrentlige verdier av σ_u).

Figur 6 viser at sterk sørvestlig vind er noe hyppigere i registreringsperioden enn i en lengre serie (Tabell 2), sterk vind med østlig komponent noe mindre hyppig, mens sterk vest og nordvest er omtrent som i serien 80-87. Dette gir omtrent representative turbulensforhold. Figur 12 gir imidlertid bare turbulensforhold i et fast nivå (250m). I episoden 14.12.91 var standardavviket her 3.44 mot 4.4 som maksimalavvik (σ_{ux}). Dersom vi korrigerer grensene i Figur 12 med $3.44/4.4=0.78$, får vi $4.4 * 0.78 = 3.4$ m/s og $2.9 * 0.78 = 2.3$ m/s. Dette gir 1.2% og 4.7%, hvilket stemmer godt med 1 og 5%.

Det sodar - målte standardavviket er utjevnet over en vertikal avstand på 25m og en horisontal avstand på noen hundre meter. Siden skjærlagene produserer turbulens må vi regne med en del småskala turbulens som vil bli utjevnet ved denne måleteknikken. Sodar - målte standardavvik i skjærlagene, må derfor forventes å være lavere enn det som blir målt ved fast apparatur i et enkelt punkt, og som er vanlig referanse for turbulensvurderinger.

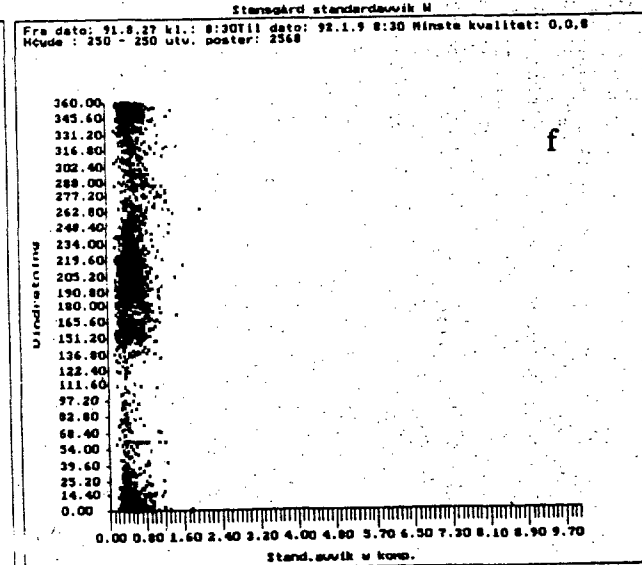
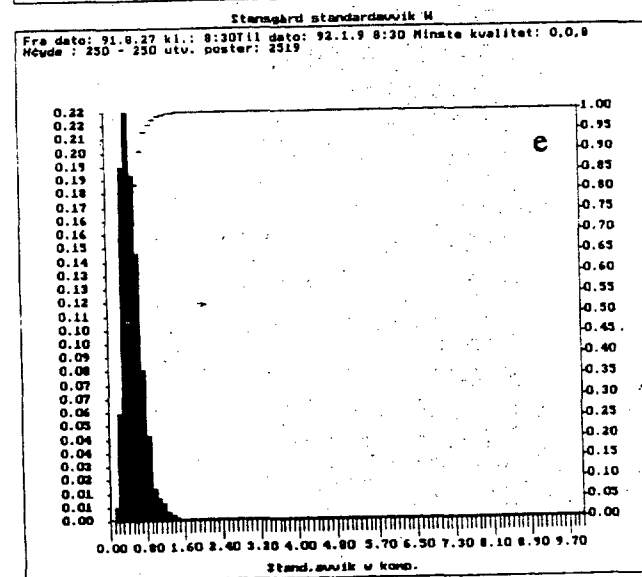
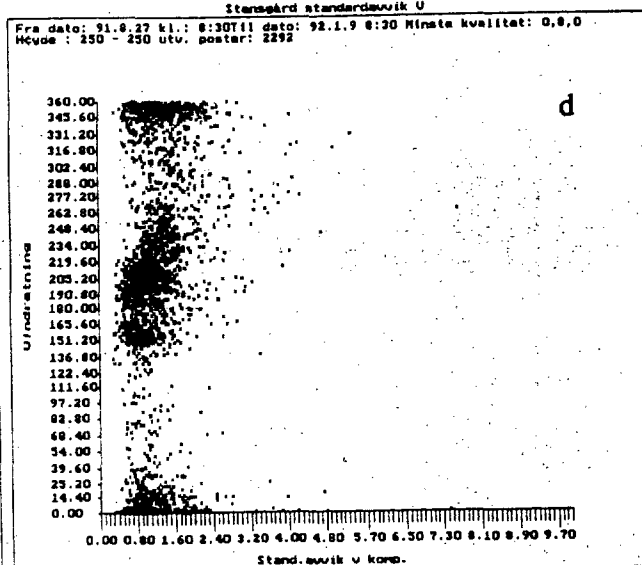
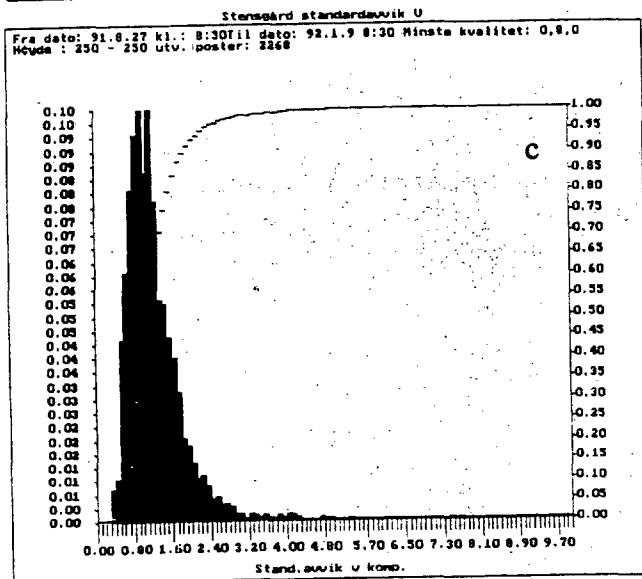
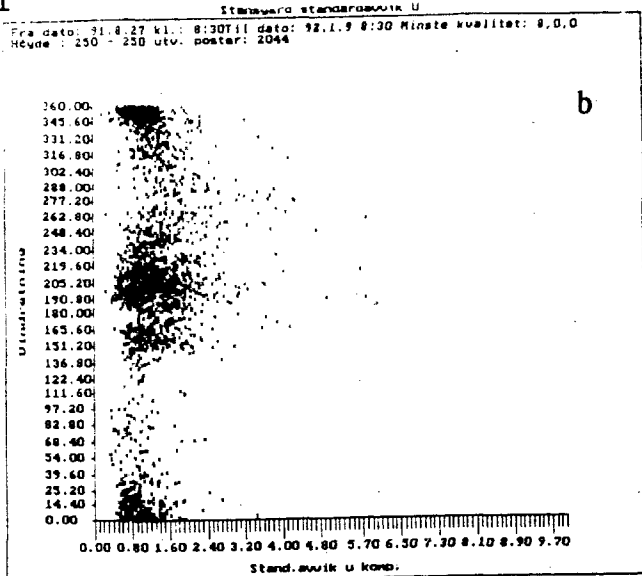
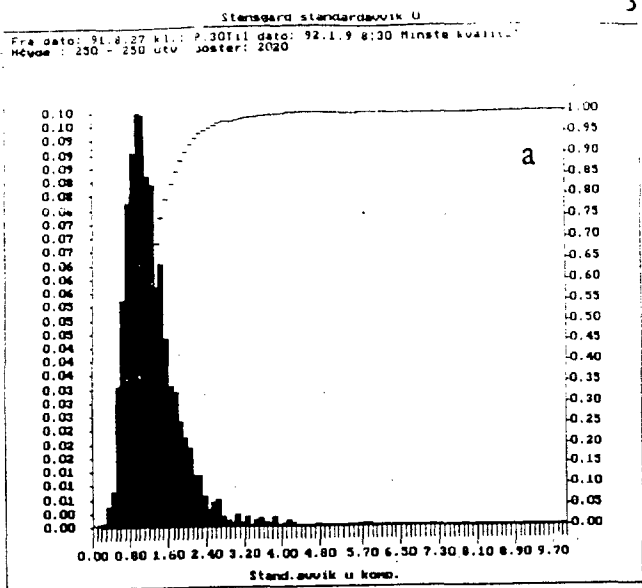


Fig. 4.16 Stensgård: Fordelinger (venstre) av σ_v , σ_v og σ_w i 250 m nivå, sammen med de samme standardavvik plottet mot vindretning (høyre).

Figur 12.

Etter dette kan vi anta at standardavvik på 4.66 m/s representerer en absolutt nedre grense for den mest sannsynlige verdi. Øvre grense ligger kanskje 50% høyere, dvs. på 7 m/s. Midtverdien i dette intervallet blir 5.8 m/s. For 3.1 m/s får vi tilsvarende øvre verdi på 4.65 m/s og midtverdi på 3.9 m/s.

Vi har da beregnet standardavvik, $\sigma_u \geq 4$ m/s til å forekomme i 5% av tida, og $\sigma_u \geq 6$ m/s i 1% av tida, et eller annet sted i sjiktet 175 - 375m over Stensgård.

I (2) angis at forholdet mellom medianverdiene av målte vertikale og horisontale standardavvik er omtrent som funnet i andre undersøkelser. I (2) oppgis også maksimalverdier for σ_w på 1.5 - 2 m/s og 6 - 8 m/s for σ_{ux} og σ_{vy} hvilket tyder på at høye verdier av vertikale standardavvik måles for lavt. Dette er også påvist andre steder (8). Årsaken er trolig at midligsfeilene blir store. Målingene av vertikale standardavvik er derfor ikke analysert videre.

4.6. Kombinasjonen av lavt skydekke og vind.

I forbindelse med mulig turbulens generert av Romeriksbåsene (sektor 195-344°), er det av interesse å kartlegge forekomst av lavt skydekke.

For perioden november 1990 - august 1991 er det plukket ut alle skyhøydeobservasjoner fra prosjektstasjonen på Gardermoen-sør omkring tidspunktet for radiosondeoppstigning, dvs. 10-20 minutter over kl.00 og 12 (norsk normaltid). Det totale antall observasjoner i nevnte periode er 606 (2 obs. mangler). Skyobservasjonene er fordelt etter vindhastighet og retning i nivå 700 m over Gardermoen. Resultatet er vist i Tabell 7.

Tabellen viser at lavt skydekke i vestlig sektor, 195-344°, har forekommet 80 ganger i måleperioden. Dette tilsvarer nær 80 % av samtlige observasjoner av skyhøyde under 200 m. De 80 observasjonene tilsvarer ca 13 % av total tid i måleperioden.

Tabell 7.

Hyppighet av skyhøyde under 200 m på Gardermoen, 2 ganger pr. døgn (00 og 12) i tidsrommet 1.11.1990-31.8.1991, fordelt på vindhastighet og vindretning i nivå 700 m over Gardermoen.

ANT. OBS.	0.0 - 5.4 m/s	5.5 10.4	10.5 15.4	15.5 20.4	≥ 20.5 m/s	SUM
180	1	3	3	2	1	10
210	6	12	13	7	1	39
240	4	8	6	4		22
270	3	3	0	1		7
300	1	1	1	1		4
330	4	4				8
360	3					3
ØST 030-150°	2	5	0	1	1	9
STILLE	1					1
SUM	25	36	23	16	3	103

Vi ser at det er størst hyppighet i sektor 210° (195-224°) med omtrent halvparten av tilfellene i hele vestlig sektor. Vindhastigheten 700 m over Gardermoen har her for det meste vært mellom 5 og 15 m/s.

I sektoren 255-344° har det vært 19 tilfelle av lavt skydekke (3 % av tiden). Vinden har da sjelden vært over 10 m/s. I en del av disse tilfellene har det vært tåke på Gardermoen, anslagsvis 2 % av tiden. I strålingståke-situasjoner, ca 1.5 % av tiden, kan man med sikkerhet si at det har vært lite eller ingen skyer over tåkelaget. Vanlig tykkelse er begrenset til 2-300 m, dvs. i høyde med Romeriksåsene. I adveksjonståke-situasjoner og i de øvrige vær-situasjoner, med skyhøyde under 200 m, antar vi at skylagets tykkelse strekker seg noen hundre meter over de høyeste toppene i området Hurdal/Romerike, for øvrig henvises til (2).

5. KONSEKVENSANALYSE.

5.1. Komfort og kabinsikkerhet. Strukturelle påkjenninger.

Ausland (9) har påpekt 4 problemområder for flygning under turbulente forhold/flygning ved vindskjær.

- 1) Komfort og kabinsikkerhet.
- 2) Strukturelle påkjenninger.
- 3) Retnings- og stillingskontroll av et luftfartøy.
- 4) Luftfarttøyets yteevne.

Komfort og kabinsikkerhet er relatert til passasjerer og besetning. Under turbulente forhold tar flyet opp hurtige og skiftende bevegelser. Dette kan være ubehagelig og under visse forhold farlig for personer inne i flyet. Kabinopplevelsene er avhengig av turbulensforholdene, flytype, vekt, samt flyhastighet og tiltak flygeren treffer ved flygningen. Vanligvis skal det benyttes en "Turbulence penetration speed", en hastighet som ikke kan være for høy pga. de sterke aksellerasjoner som da vil oppstå. Hastigheten må imidlertid alltid overskride steilehastigheten.

Det reiser seg et naturlig spørsmål knyttet til midlertidige. Ved vindendringer på 3 til 40 sekunder, sett fra flyet, snakker man i flyterminologi om vindskjær. Nå er anvendt tidsskala relatert til flygerens opplevelse. Med flyhastighet 100 m/s flyr maskinen 300m på 3 sekunder. Ved 40 sekunder gjennomflys 4000m. Ved innflygning på 3° synker flyet 200 m på 4000m, ved utflygning på 5-10% stiger flyet 2-400m.

Dersom middelvinden ikke endres over disse avstander, hverken i horisontalplanet eller i vertikalplanet, vil arealmiddel og tidsmiddel ligne hverandre. Situasjonen kan da sammenlignes med et referansepunkt i ro som gjennomblåses med en viss middelvindhastighet, U. Med U=30 knop (15 m/s) tilbakelegges 300m på 20 sekunder og 4000m på 4½ minutt. Alt dette ville sortert under turbulens ved en slik tankegang.

Vi befinner oss i et grenseland der langperiodisk turbulens i meteorologisk forstand ofte blir å oppfatte som vindskjær for flygeren.

Men sterk turbulens forekommer ofte i tilfelle der en analogi mellom areal- og tidsmiddel ikke holder, feks. i tordenvær-situasjoner, eller i områder med kompleks topografi.

Gardermoen er oppgitt til å ha sterk turbulens ved vindfelter over 40/50 knop (20 - 25 m/s), retning nordvest. Vi antar at det med vindfelt siktes til 850 mb - vinden som ved Gardermoen svarer til 95 % av beregnet fristrøms hastighet. Derved blir tilsvarende verdier av fristrøms hastigheten 21 - 26 m/s, og 25 m/s anslåes som grenseverdi for sterk turbulens.

Slike forhold forekommer i den smale 300° sektoren (285-314°) i 0.1% av tida, i den utvidete vest-nordvest sektoren (255 - 344°) overstiger gradientvinden 25 m/s i 0.3% av tida. Se kap.4.

Moderat turbulens rapporteres ved vindfelter på 30 knop (15 m/s) eller mer, dvs fristrøms hastighet på 16 m/s og 400m's vind på 12 m/s. Slike vindfelter forekommer i 0.4% av tida i smal sektor og 1.8% av tida i utvidet sektor. Moderat turbulens vil trolig også forekomme ved gradientvind over 25 m/s for endel andre sektorer, til sammen ca. 0.6%. Etter dette er det rimelig å angi moderat turbulens i 2% av tida og sterk turbulens i 0.2% av tida.

Vi kobler sammen ovennevnte anslag for hyppigheter av moderat/sterk turbulens med beregnet hyppighet av horisontale standardavvik over visse grenser (kap.4.3). Dette gir anslag for moderat turbulens på 4-6m/s og sterk turbulens ved 6-8 m/s ved de flyoperasjoner som vanligvis foretas på Gardermoen. Tidligere har vi (vedlegg til (3)) anslått at 5 m/s er en cirka nedre grense for sterk turbulens, utfra mer løse antagelser. Det synes være en rimelig grad av overenstemmelse i disse estimater.

Vestre og østre rullebanealternativ.

Fra kap 4.5. har vi at standardavviket ligger i området 4-6 m/s i 4% av tida og over 6 m/s i 1% av tida. Det er relative usikkerheter på minst 50% i disse tall.

Moderat eller sterk turbulens forekommer etter dette i 5% [2-7%] av tida og sterk turbulens i 1% [0.4-1.5%] av tida ved 200 - 400 m's høyde over Stensgård, hvilket vil si at flygning i nordområdet ved vestre rullebanealternativ må regne med slike forhold. Forholdene er også slik i sørområdet, men maksimalverdiene kan

der ligge lavere enn en del av flyoperasjonene.

Ved utbygging av en eventuell østre bane vil turbulensen dempes pga. økt avstand til åsene. Vi anslår 0.1-0.2% og 1-2% som frekvenser av sterk og moderat turbulens.

Designkrav.

I [(9), vedlegg 2] er det referert til forskjellige designkrav der vertikal turbulens er uttrykt i form av maksimale vertikalgust. Turbulens er i denne sammenheng definert som vindhastighetsendringer som typisk oppleves på en tidsskala på inntil 3 sekunder [(9), vedlegg 5]. Det sies intet om midlingstid for slike gust. Imidlertid er flyets responstid 1-2 sek, og flystrekningen 300m ved 100 m/s over 3 sekunder.

Turbulens kan feks. uttrykkes som maksimale vertikalgust, slik det er gjort i vedlegg 2 i (9). Sidens flyets responstid er 1-2 sek. og hastigheten 100 m/s, bør gustene ha en utstrekning på 100 - 200 m. Ved vindhastighet på 20 m/s gir dette 10 sek. responstid; ved 30 m/s, 5 sek. Det er derfor rimelig å benytte standardmidlede (3-5 sek.) vindkast for å uttrykke denne turbulensen.

Sodarmålingene (2) viser at vertikal turbulensintensitet i Gardermoenområdet er lavere enn 50 % av den horisontale, men maksimalverdiene måles trolig for lavt. Andre undersøkelser antyder 30-60%. Vi bruker 50% på Gardermoen flyplass og på Trugstad og Stensgård, nær inn/utflygningsbanen ved en planlagt vestre rullebane, men dette er trolig på den sikre siden. (Under konvektive forhold, feks. i byggeskyer, vi dette endre seg). Etter lign.13, kap.4.3 vil da fristrømskoblet vertikal turbulensintensitet, I_{Pw} , ligge på 18% av fristrøms hastigheten, U_P , ved vind omkring 300°.

I (10), (11) og (12) er det vist at sammenhengen mellom horisontal turbulensintensitet, I_u (koblet til lokal middelvind) og sterkeste vindkast innenfor en 10 min. periode er koblet ved lign.(14).

$$I_u = \frac{\sigma_u}{\bar{U}} = \frac{GF_{3-5sek} - 1}{2.6} = \frac{U_{3-5s} - 1}{2.6} \quad \text{lign. (14)}$$

som lett omregnes til lign. (15) og (16):

$$2.6 \cdot \sigma_u = U_{3-5s} - \bar{U} \quad \text{lign. (15)}$$

$$U_{3-5s} = 2.6 \cdot \sigma_u + \bar{U} \quad \text{lign. (16)}$$

Lign.(14)-(16) bør da også gjelde for vertikalhastigheten, og vi får

$$W_{3-5s} = 2.6 \cdot \sigma_w + \bar{W} \quad \text{lign. (17)}$$

Over eksisterende rullebane kan vi anta at det er meget små midlere vertikalhastigheter, unntatt ved situasjoner med konvektiv turbulens som vi ser bort fra her.

Derved gir lign. 17 (med $\sigma_w = 1/2 \sigma_u = 0.13 U_F$, se kap.4.3) at vertikale vindkast ved 30 knops fristrøms hastighet kommer opp i 17 fps (10 knop); ved 40 knop: 23 fps (13.5 knop) og ved 50 knop: 29 fps (17 knop). De store rute-flyene har strenge designkrav og skal tåle 60-70 fps (9). En del småfly har mindre strenge designkrav, Twin-otter har iflg. K. Ausland (pers. komm.) krav på 50 fps.

Det ser ut til at moderat turbulens typisk vil ligge i området 15-20 fps, som i områder med ikke alt for kompleks topografi, slik som Gardermø-området, gir horisontale standardavvik på ca. 5 m/s. Sterk turbulens ligger i området 20-30 fps, som svarer til horisontale standardavvik på ca. 6-8 m/s. En må imidlertid understreke at begrepene ofte relateres til flybevegelser. Verdier basert på opplevelser er således avhengig av flytype, vekt og hastighet. De skisserte vertikalhastigheter er trolig konservativt vurdert slik at tall på 20 - 30 fps er ekstremverdier som meget sjelden forekommer.

Vestre rullebane alternativ.

Sodarmålingene gir indikasjoner på at midlere vertikalhastigheter kan komme opp i 1.5 m/s ved 12 m/s i 400 m's nivået. En må anta at flyet brått kan komme inn i et slikt område slik at midlere vertikalvind må legges oppå kastene.

Vertikalhastigheten synes da maksimalt å kunne komme opp i $W=0.69 \times (1.5/12) \times U_F = 0.09 U_F$. Vi har fra før at $\sigma_w = 0.13U_F$.

Dette gir ved lign. (17) at kastene i vertikalretningen kan bli ca. $0.4U_F$, hvilket er 20% høyere enn over nåværende flyplass på Gardermoen.

Vertikalhastighetene over kan da økes med 20%.

5.2. Retnings- og stillingskontroll av et luftfartøy.

Dette har å gjøre med ulike vindlaster på flykroppen som kan medføre at flyet blir vanskelig å kontrollere. Det er iflg. (9) svært vanskelig å tallfeste disse effektene. Det må antas at kontrollproblemer oppstår i situasjoner der også 1) og 2) er relevante, men dette er neppe relevante problemer noe sted i Gardermoen-området.

5.3. Luftfartøyets yteevne.

Ved signifikant endring av horisontal vindhastighetskomponent langs flybanen eller ved vertikalhastighetskomponent forskjellig fra 0, vil flyets høyde endres dersom ikke spesielle tiltak settes i verk. Dette kan være svært alvorlig og har vært medårsak i mange flyulykker. Ved flygning i lav høyde inn/ut fra en del flyplasser må slike vindskjærssoner ofte krysses.

Kraftoverskuddet flyet må ha defineres gjennom en F-faktor, se lign. 18. Ligningen er ment som en forenklet illustrasjon.

$$F = \frac{dV_s}{gdt} - \frac{V_w}{V_t} \quad \text{lign. (18)}$$

Her er dV_s endringen av horisontal motvindkomponent, V_s , i flybanens retning over tiden, dt . V_w er nedoverrettet vertikalvindkomponent og V_t flyhastigheten "initial groundspeed".

Som ligningen viser, forbrukes kraftoverskuddet (negativ F), dersom man flyr inn i en sone med økende medvind (negativ V_s ,

eller nedoverret vertikalvind (positiv V_w). [Fortegniskonvensjonene kommer av at en benytter flyet som referansepunkt og definerer V_w som "downdraught" (nedslagsvind).]

Til tross for de høye verdiene er vindskjæret (her: vertikal endring i horisontalhastigheten) maksimalt på den utjevne kurven bare 1 m/s pr. 100 m ved 10 m/s og 2 m/s pr. 100m ved 20 m/s, ved stabile forhold. Dersom flyene flyr 100 m/s og stiger 10%, vil de stige 200 m på 2 km i løpet av 20 sek og ha en stige-hastighet på 10 m/s. Ved vindhastighet 20 m/s vil vindskjæret gi 4 m/s i tapt stige-hastighet (relatert til underlaget), dersom dette oppleves langs flyruta. Ved landing vil en rute for synkning på 3° føre til 100m synkning på 2 km, dvs. 2 m/s ekstra synke-hastighet.

Ytelsesligningen, lign. 18, gir horisontalledd på ca. 1/50 - 1/100, eller 5-10 % av det som var representativt for Værøy flyplass. Dette stemmer meget godt med erfaringen på Gardermoen: Det er sjelden problemer med vindskjær på nåværende rullebane (13).

Spredningsdiagrammet over vindprofilene (Figur 4) viser at vindskjærene kan variere en god del. Sporadisk kan vindskjæret være relativt stort mellom 100 og 400 m. Største registrerte verdi i perioden 1.11.90 til 30.09,91 var den 20. juli kl 12Z,. Da var vindhastigheten 6.5 m/s i 100 m's nivå og 16.5 m/s i 400 m's nivå. Dette tilfellet hadde også en betydelig vinddreining fra 290° i 400 m's høyde til 250° i 100 m's høyde. Avgang mot vinden og dreining av kursen mot sørøst vil være en manøver som i en slik situasjon krever nødvendig kraftoverskudd. Da er motvinds-komponenten i 100 m's nivå $6.5 \cos 50 = 4$ m/s, mens medvinds-komponenten etter sving og stigning til 400 m, 16.5 m/s. Endringen i medvinds-komponenten er da hele 20.5 m/s, hvilket gir 7 m/s pr. 100 m. Ytelsesligningen gir da, ved flyhastighet 100 m/s og stigning 10%: $7\text{ms}^{-1}/(-10\text{ms}^2 \cdot 10\text{s}) = -0.08$. Dette er en verdi som en kanskje bør være oppmerksom på.

Hovedkonklusjonen er: Vindskjær over Gardermoen representerer sjelden noe problem på dagens rullebane (13).

Nå må en straks tilføye at dersom det ligger skarpe vindskjær av 100 - 200 m's vertikal utstrekning kan radiosonedataene komme til å utjevne disse, slik at vindendringen kan komme til å bli fordelt over et større høydeintervall. Vi kan her rapportere at

skarpe vindskjær ikke er målt, men slike skjær kan unnslippe registreringen. På toppen av inversjonslag kan det helt klart ligge skarpere vindskjær enn det som her er framkommet. Erfaring med flygning på plassen tilsier imidlertid at slike vindskjær sjelden er av en slik størrelse at de gir operative problemer.

Med flyhastighet 100 m/s vil en endring av medvindskomponenten på 10 m/s over 300 m gi $-1/3$ fra første ledd i lign. 7. For å få tilsvarende effekt av vertikalvindledet må vertikalvinden helt opp i 30 m/s. Slike vertikalhastigheter vil være langt unna relevante forhold på Gardermoen. Operativ erfaring tilsier at horisontale vindskjær ikke er noe problem på dagens rullebane.

Vestre rullebane alternativ.

Flyoperasjonelt snakker en om vindskjær ved skiftninger ned til ca. 3 sekunder, sett fra flyet. Med flyhastighet 100 m/s representerer dette en avstand på 300m. Med 3° helning vil dette si ca. 15m vertikal gjennomsynkning, med 10% helning ca. 30m stigning. Skjærintensiteten over 25m er da relevant.

De sterkeste og hyppigste vindskjærene kommer ved vestlig vind. Inn/utflygning vil da skje på tvers, slik at skjærene ikke er så merkbare i området nærmest flyplassen. Ved sving til/fra øst (se Fig. 13) må imidlertid vindskjærene tas i betraktning.

Sodarmålinger på Stensgård viser imidlertid at det er registrert vindskjær på 5 m/s over et vertikalt område på 50 m. Dette gjennomflys ved 100 m/s og 10% stigning på 500m, eller ca. 5 sek. Skjæret oppstår ved vestlig vind. Dersom flyene kommer fra området sør for Stensgård i 2-300 m's høyde og legger seg i sving mot øst, vil ytelsesligningen gi -0.10 for horisontalt ledd, men korttidsskjær (se dette) kan gi enda større høydetap innenfor dette tidsrom.

Figur 13 viser et kart over nordområdet ved vestre rullebanealternativ med inntegnet mulige flytraséer.

Det er usikkerheter knyttet til utbredelsen av vindskjæret i horisontalplanet. Dersom det er skjær i dette planet, kan de komme til å gjennomflys raskere og lage større tallverdier i ytelsesligningen.

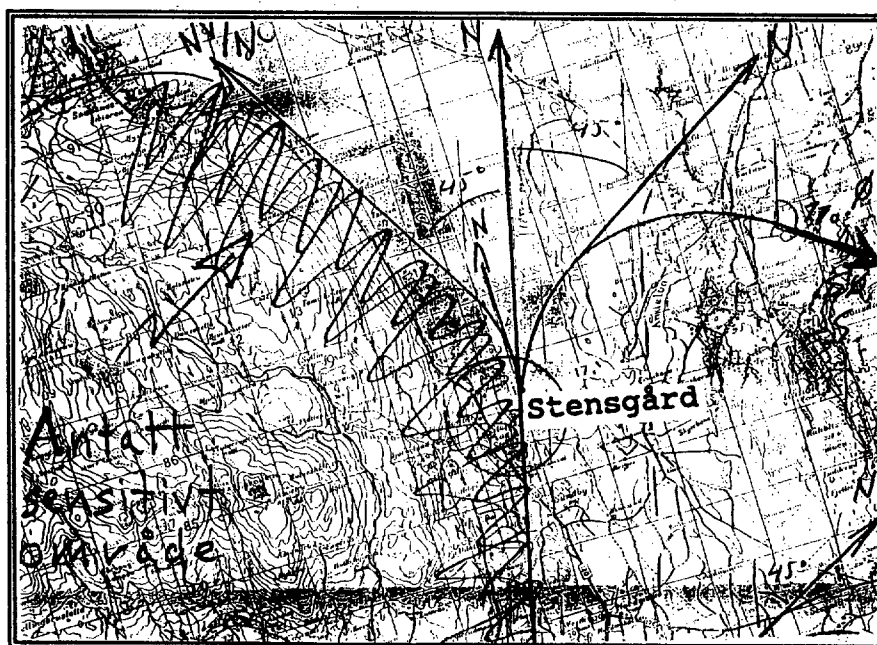
Korttidsskjær

300m horisontal avstand gjennomblåses på 30 sekunder ved $U = 10$ m/s. Det er da rimelig å se på $U_{\max}(\bar{\tau})$. Ligningen:

$$U_{\max}(30s) = \sigma_u \cdot k(30s) + U_{10\min} = \sigma_u \cdot 1.64 + U_{10\min} \quad \text{lign. (19)}$$

gjelder ved gaussisk fordeling av vindkast med varighet 30 sekunder (10). Med standardavvik, σ_u i vindretningen på 5 m/s blir $U_{\max}(30s) = U_{10\min} + 8$ m/s = 18 m/s.

Vindskjærene som oppleves ved flygningen kan altså bli betydelige, det er mulig å møte vind mellom 2 og 18 m/s ved middelvind 10 m/s og standardavvik 5 m/s, vindskjæret opplevd over 3 sekunder flytid kan maksimalt gå opp i 16 m/s. Betydningen av slike korttidsvindskjær ansees størst dersom flygeren befinner seg nær terrenghindringer, men vil ellers trolig kunne oppleves som såkalte "lufttomme rom". Virkningen bør derfor vurderes ved flybaner nær en ås, slik som over Stensgård.



Figur 13.

Kart over området nord for et vestlig rullebane på Gardermoen. Mulige flytraséer splittes 5 km nord for baneenden, hvor det er påvist vindskjær.

6. REFERANSELISTE.

- (1) Gjessing, Y. og Skartveit A.:
Sodarmålinger av vindskjær i atmosfærens grenselag rundt Gardermoen.
Meteorological Report Series, University of Bergen, 5 - 1991.
- (2) Gjessing, Y. og Skartveit A.:
Sodarmålinger av vindskjær i atmosfærens grenselag rundt Gardermoen.
Meteorological Report Series, University of Bergen, 1 - 1992. Sluttrapport.
- (3) Harstveit, K. og Andresen, L.:
Hovedflyplass - Gardermoen. Vindforhold.
Oppdragsrapport for Luftfartsverket.
DNMI KLIMA 42/91. Oslo 1991.
- (4) Vaisala:
Met Program Manual.
Application Programs, APPL-p0039-7.4. Appendix B. Wind Editing.
Helsingfors, 1989.
- (5) Andresen, L. og Kjensli, K.:
Gardermoen-prosjektet.
Meteorologiske målinger pr. 31. august 1991.
DNMI KLIMA 37/91. Oslo 1991.
- (6) Plate, E.:
Engineering meteorology.
Chpt. 12: The interaction of wind and structures (by Davenport, A.G.).
Elsevier, Amsterdam, 1982.

- (7) **Panofsky, H.A., and Dutton, J.A.:**
Atmospheric Turbulence.
John Wiley & Sons, U.S., 1984.
- (8) **Keder, J., Foken, Th., Gerstmann, W., and Schindler, V.:**
Measurement of Wind Parameters and Heat Flux with the Sensitron Doppler Sodar.
Boundary-Layer meteorology 46 (1989) 195-204.
- (9) **Ausland, K.:**
Hovedflyplass - Gardermoen - vindforhold.
Luftfartsverket, Notat /KA/LV/SPP/, 7.10.91.
Oslo 1991.
- (10) **Harstveit, K.:**
Askøy bro. Vindmålinger på Storebuneset 01.12.87 - 29.02.88.
Oppdragsrapport for Statens vegvesen. DNMI KLIMA 12/88.
Oslo 1988.
- (11) **Harstveit, K.:**
Hardangerbrua. Vindmålinger 11.11.88 - 01.09.90.
Oppdragsrapport for Statens vegvesen. DNMI KLIMA 31/90.
Oslo 1990.
- (12) **Harstveit, K.:**
Vealøs. Vindmålinger 1989/90.
Oppdragsrapport for Televerket.
DNMI KLIMA xx/91. Under trykking.
- (13) **Dannevig, P., og Hoem, V.:**
Turbulensforholdene ved norske flyplasser.
Technical Report No. 30.
DNMI 1979.