

## **FFI RAPPORT**

### **Målinger av hastighetsfelter i fly-genererte virvler nær hus under innflyvningstraséen ved Kjevik flyplass**

ANDREASSEN Øyvind, HELGELAND Anders

**FFI/RAPPORT-2001/04317**

FFIBM/820/170

Godkjent

Kjeller 7 september 2001



Bjarne Haugstad  
Forskningssjef

**MÅLINGER AV HASTIGHETSFELTER I FLY-  
GENERERTE VIRVLER NÆR HUS UNDER  
INNFLYVNINGSTRASEEN VED KJEVIK  
FLYPLASS**

ANDREASSEN Øyvind, HELGELAND Anders

FFI/RAPPORT-2001/04317

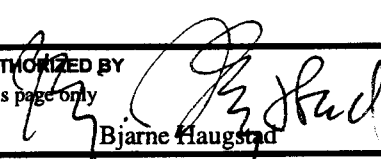
**FORSVARETS FORSKNINGSINSTITUTT**  
**Norwegian Defence Research Establishment**  
Postboks 25, 2027 Kjeller, Norge

**FORSVARETS FORSKNING SINSTITUTT (FFI)**  
**Norwegian Defence Research Establishment**

**UNCLASSIFIED**

P O BOX 25  
 NO-2027 KJELLER, NORWAY  
**REPORT DOCUMENTATION PAGE**

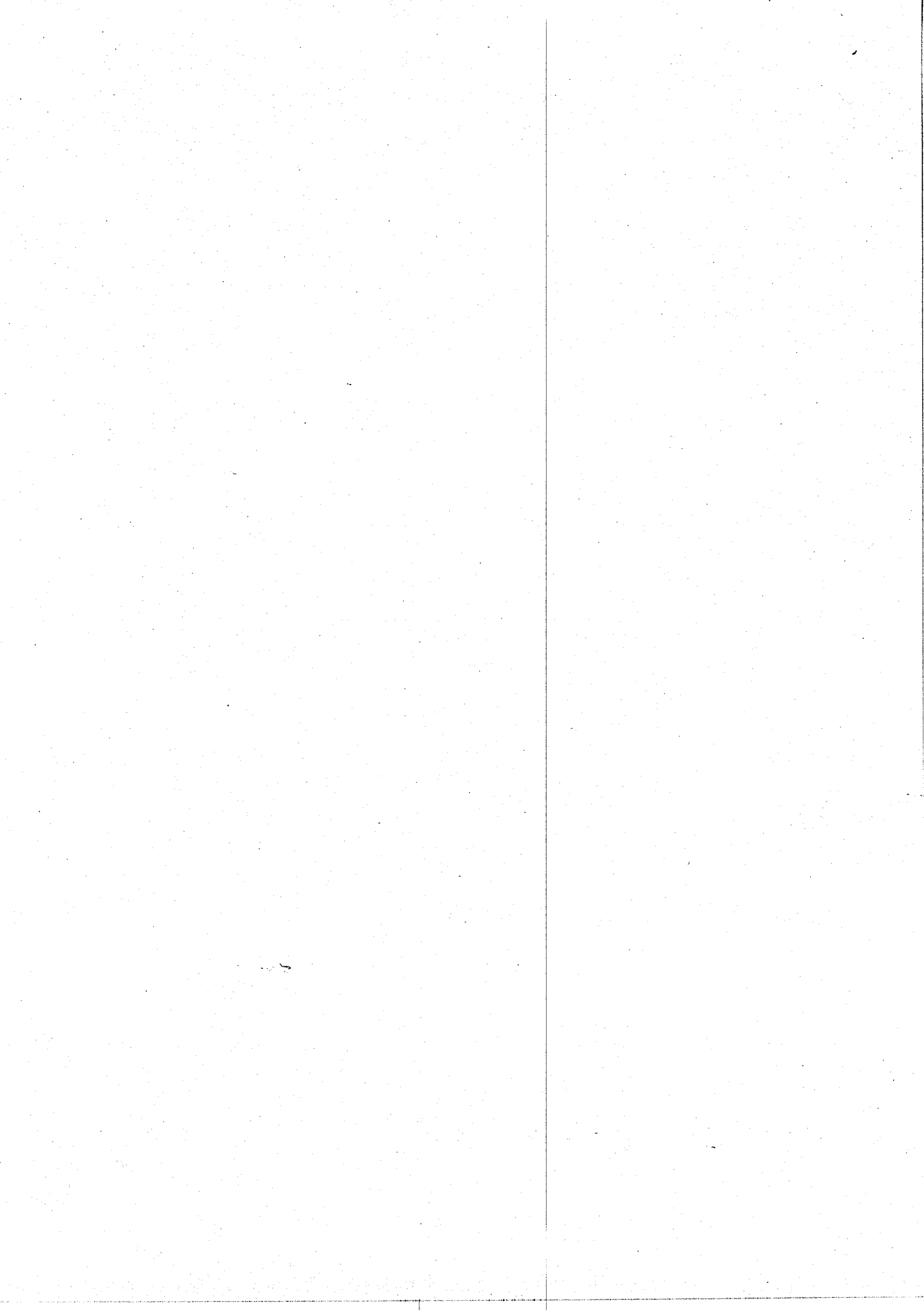
**SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE**  
 (when data entered)

1) PUBL/REPORT NUMBER FFI/RAPPORT-2001/04317	2) SECURITY CLASSIFICATION UNCLASSIFIED	3) NUMBER OF PAGES 17
1a) PROJECT REFERENCE FFIS/FFIBM/820/170	2a) DECLASSIFICATION/DOWNGRADING SCHEDULE -	
4) TITLE Målinger av hastighetsfelter i fly-genererte virvler nær hus under innflyvningstraseen ved Kjevik flyplass  Measurements of velocity fields caused by wing tip vortices from aircrafts in the approach to Kjevik airport		
5) NAMES OF AUTHOR(S) IN FULL (surname first) ANDREASSEN Øyvind, HELGELAND Anders		
6) DISTRIBUTION STATEMENT Approved for public release. Distribution unlimited. (Offentlig tilgjengelig)		
7) INDEXING TERMS IN ENGLISH: IN NORWEGIAN:		
a) <u>Vortices</u>	a) <u>Virvler</u>	
b) <u>Velocity fields</u>	b) <u>Hastighetsfelter</u>	
c) _____	c) _____	
d) _____	d) _____	
e) _____	e) _____	
THESAURUS REFERENCE:		
8) ABSTRACT Winds caused by aircraft generated vortices are measured close to a roof in the approach to Kjevik airport. It is reported that aircraft vortices have caused tiles to fall down from roofs. In this report measurements of wind velocities caused by aircrafts are presented. We find wind speeds up to only 5 m/s, which is small compared to wind caused by storms which are typically 15m/s. Based upon measurements, it is our impression that the influence from aircraft vortices on roofs are not strong.  On the other hand, winds do not alone indicate hydrodynamical forces. The topology of the wind field might be of importance and we have no ability to assess that by a one point wind registration alone. We know that the aircraft caused vortices are strongly turbulent, as is the boundary layer close to the roofs and ground. To make a final conclusion about the vortex influences, we suggest that pressure measurements are performed at the actual roof. Then the forces can be estimated directly.		
9) DATE 5 September 2001	AUTHORIZED BY This page only  Bjarne Haugstad	POSITION Director of Research

ISBN-82-464-0541-1

**UNCLASSIFIED**

**SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE**  
 (when data entered)



**INNHold****Side**

1	INNLEDNING	6
2	INSTRUMENTERING	7
3	METODE FOR ANALYSE AV DATA	7
4	RESULTATER	9
5	KONKLUSJON	14
	Referanser	16
	Distribusjonsliste	17

## **MÅLINGER AV HASTIGHETSFELTER I FLY-GENERERTE VIRVLER NÆR HUS UNDER INNFLYVNINGSTRASEEN VED KJEVIK FLYPLASS.**

### **1 INNLEDNING**

Ved 4-6 anledninger de siste årene har virvler forårsaket av fly av typen B737 idet de går inn for landing til Kjevik flyplass, ført til nedfall av takstein fra fire forskjellige hus. Husene ligger under innflyvningstraseen til Kjevik ved tettstedet Ryen, se figur 2.2. Et av husene har mistet takstein tre ganger, sist i september 1999. Man har stilt seg spørsmål om hvilke sikringstiltak som er nødvendige for å forhindre at det skjer skade. Luftfartsverket har engasjert Forsvarets forskningsinstitutt (FFI) til å undersøke hvilke vindhastigheter/krefter som kan forventes å opptre i innflygingstraseen slik at relevante tiltak kan iverksettes for å forhindre fremtidig skade.

I en innledende undersøkelse [1] har vi foretatt numeriske estimater av typiske vindhastigheter forårsaket av virvler fra B737, som er den største og tyngste flytypen som flyr på Kjevik. Til disse estimatene ble det antatt som startbetingelse en maksimal tangensialhastighet på 25m/s, som er i overensstemmelse med det som måles nær B737 flyene under innflyvning. Det er en viss usikkerhet i simuleringene siden 3-dimensjonalitet og turbulente effekter ikke var inkludert i simuleringene. Det er ikke tatt hensyn til det turbulente grensesjiktet som dannes like over terreng og hustak i feltet fra virvelene. Det ble heller ikke tatt hensyn til at virvelenes ytre deler er sterkt turbulente. Den største usikkerheten ligger i beregningene av trykket på taket. Vi våget ikke å beregne trykket ut fra ikke-turbulente data når vi vet at grensesjiktet nær taket er turbulent. Det er likevel god overensstemmelse mellom målte og simulerte vindhastigheter.

For innflyvningen til Kjevik og andre flyplasser, er det rapportert at fly-genererte vortex-par gjør størst skade under forhold med bra vær. Dette er ikke overraskende. Da er atmosfærens stratifikasjon stabil og vind-skjærene er svake. Under slike forhold er det lav turbulens-aktivitet i atmosfæren. Fly-genererte vortex-par vil da være temmelig stabile. De bevarer sin form og styrke best under forhold med høy stabilitet, lite vind og lite turbulens. Med lite vind på tvers av flyenes glidebane er det enkelt å å prediktere virvlens bane, hor de "treffer" bakken eller hustak. Under forhold med moderat til sterk vind på tvers av glidebanen, transporteres virvlene vekk og det blir vanskelig å prediktere deres baner. Det forenkler vår analyse at det kun er under forhold med lite vind at nedfall av takstein forekommer.

## 2 INSTRUMENTERING

En vindmåler som måler vindstyrke og vindretning er leid inn fra Det Norske Meteorologiske Institutt. Vindstyrke og vindretning logges hvert sekund og skrives sammen med tid (Universal Tid) ut på en data-disk. Vindmåleren er plassert på taket til hus nr 208 hvor det er rapportert nedfall, se kartskisse figur 2.2. Huset er orientert slik at mønet er rettet langs glidebanen. Vindmåleren er plassert på den takflaten som vender mot glidebanen, omtrent 1/4 avstand fra mønet i forhold til takets størrelse, se figur 2.1. Sensoren registrerer vinden i takplanet, med vindretning (som vi ikke har benyttet i denne analysen) og vindstyrke målt i meter per sekund (m/s). Sensorens tidsrespons er meget god og det er ingen problemer å registrere raske variasjoner i vindstyrke.

## 3 METODE FOR ANALYSE AV DATA

Dataene fra vindmåleren blir logget av en datamaskin og skrevet på disk. De blir siden koipert til CD. Dataloggingen startet i april 2000 og har pågått et år frem i tid. Dataene omfatter tre vind komponenter sammen med tiden i UT. Output er fire tall for hver avlesning. Vi har også tilgang til landingstider og kallesignal som identifiserer alle landinger.

Husene hvor takstein har falt ned, ligger nord for flyplassen. Retningsinformasjon, dvs om flyene flyr inn fra sør eller nord, mangler imidlertid. Derfor er det endel tilfeller av registrerte landinger hvor vi ikke observerer noen vindøkning. Hvis det er bra landingsforhold med lite vind, er det normalt at fly som lander tett på hverandre i tid, taes inn i motsatte retninger.

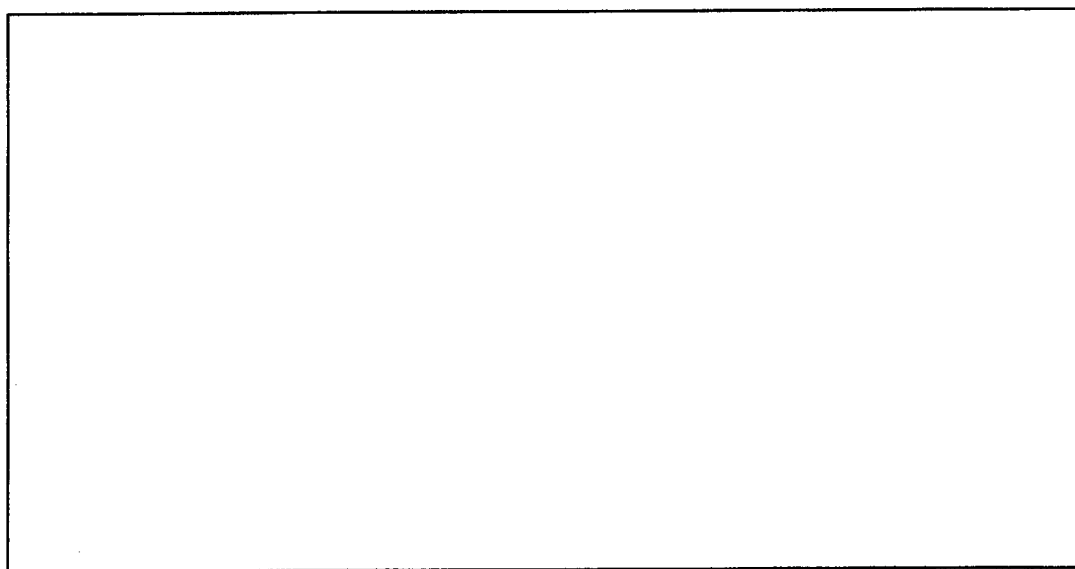
Vi har gått igjennom vinddata fra april 2000 og omtrent et år frem i tid og har med grunnlag i dette datamaterialet, dannet oss et bilde av vindhastigheter ved det aktuelle hustaket forårsaket av vingetipp-virvler fra B737.

Det er et meget stort data-materiale vi har til rådighet. Det registreres et datapunkt hvert sekund og den totale datamengden blir omtrent  $31 \times 10^6$  registreringer i året. Totalt blir det mer enn 1GByte med data. Dataene foreligger på ASCII form, og vi har utviklet et sett av data-script for lesing og plotting av data sammen med markering av landingstider. Systemet Gnuplot er brukt til å plote dataene.

Det forekommer oss at dager med mye vind er ubrukbare for analysen siden det er umulig å skille fly-generert vind fra bakgrunns-vind eller geofysisk forårsaket vind i disse tilfellene. Ved å plote vindstyrkene for disse dagene og sammenligne med landingstider, fremgår det klart at det er umulig å identifisere fly fra vind-dataene i disse tilfellene. Den største vindstyrken som ble registrert i hele perioden var 15.6m/s, og dette skjedde den 27.05.00. Ellers var det en del registreringer med maksimum vindstyrker over 10m/s. Vi vet at nedfall fra takstein ikke forekommer under forhold med mye geofysisk vind. For å begrense



*Figur 2.1: Vindmåleren montert på taket.*



*Figur 2.2: Utsnitt av kart som viser huset nr 208 hvor vindmåleren er montert og hvor det har vært nedfall av takstein.*



datamaterialet, identifiserte vi først dager med mye vind, og tok disse ut av den videre analysen. I figurene 3.1 og 3.2 vises vindstyrken plottet mot tiden for to typiske dager med sterk vind. Det er umulig å skille fly fra naturlig vind på disse plottene.

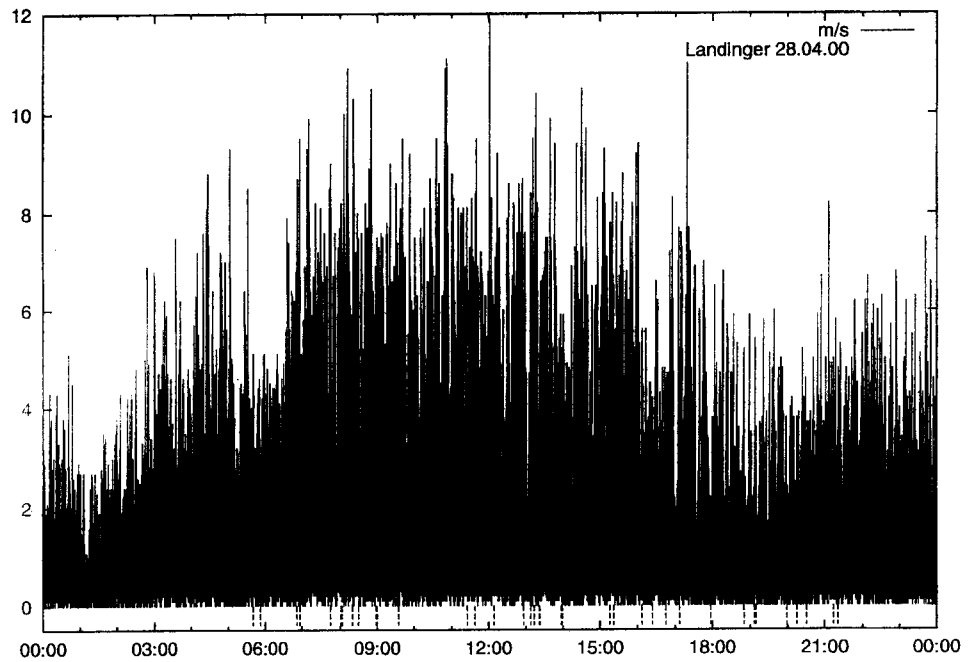
Vi avgrenset søket etter flygenererte virvler ved å beregne RMS (root mean square) verdier for vindstyrker for hele dager, og å begrense søket til de dager som har de minste RMS verdier. Vi fant da en del topper i vindstyrke som vi mener er forårsaket av fly. Noen av de beste eksemplene er vist i figurene 3.3 og 3.4. Vi ser kvalitative forskjeller på de fly-vortex genererte toppene sammenlignet med de geofysiske forårsakede toppene. En vortex transporteres vekk fra senterlinja for innflyvningen. Vi vet at de er turbulente og de vil da etterlate seg et turbulent "kjølvann". Vi forventer et vindprofil hvor vindstyrken raskt stiger for siden å avta langsomt. I senter av vortexen er vindstyrken lav, så en kan forvente at vindstyrken avtar for så å øke igjen etter at senteret har passert. Ettersom turbulensen i kjølvannet dør ut, vil vindstyrken avta. Dette kan ta opptil 3 – 4 minutter. Det er interessant å merke seg at de numeriske data dør raskere ut enn de virkelige data, men at maksimalverdiene for vindstyrke er sammenlignbare. Dette kan forklares ut fra at den numeriske modellen ikke beskriver den turbulente delen av vortexene godt, men at den mer laminære kjernen lar seg beskrive bedre slik, som påpekt i [1].

Figurene 3.3, 3.4, 3.5 og 3.6 viser topper i vindhastighet forårsaket av fly. Flyveledere ved Kjevik forteller at det er vanlig å ta ned to fly som er tett på hverandre i tid, eksempelvis BRA229 og DAN118, i motsatt retning. Det første taes ofte ned fra syd mens det andre taes ned fra nord, slik at vi da registrerer kun en event slik som i figurene 3.3 og 3.4

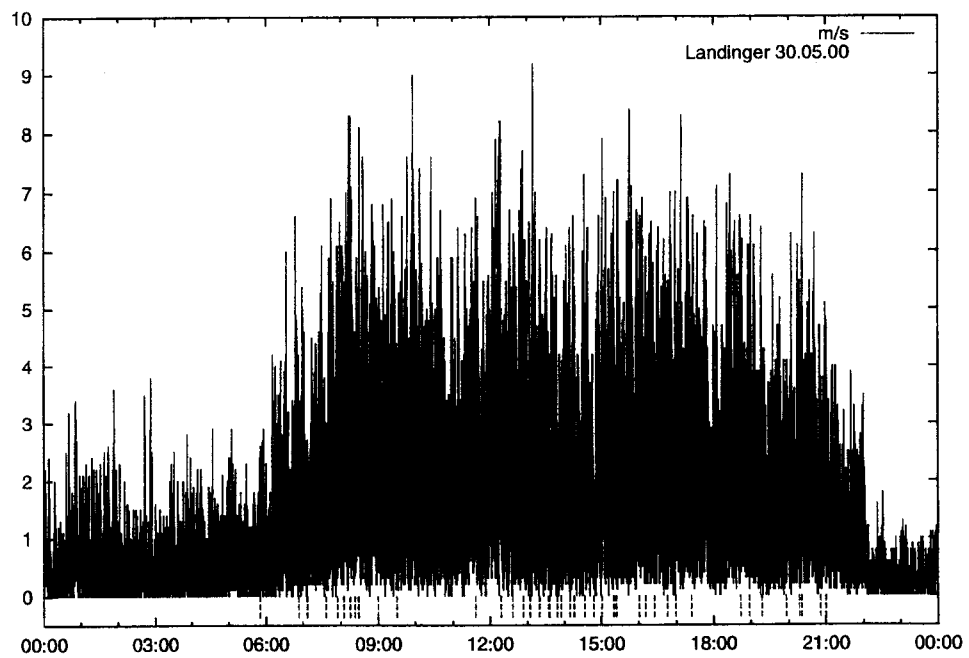
## 4 RESULTATER

Jeg har snakket med piloter som har flydd B373 på Kjevik. Et tilfelle er spesielt interessant siden det helt sikkert er forbundet med nedfall av takstein. Det rapporteres at været var godt, og at flyet fulgte glidebanen nøyaktig. Det ble ikke registrert noen uregelmessigheter. Likevel forårsaket innflyvningen nedfall av takstein. Målingene foretatt gjennom det siste året viser ingen store utslag med hensyn til vindstyrke knyttet til flyvning. Vi observerer noen events som vi kan knytte til fly og maksimal observert vindstyrke for disse events er 5m/s, hvilket ikke burde forårsake nedfall.

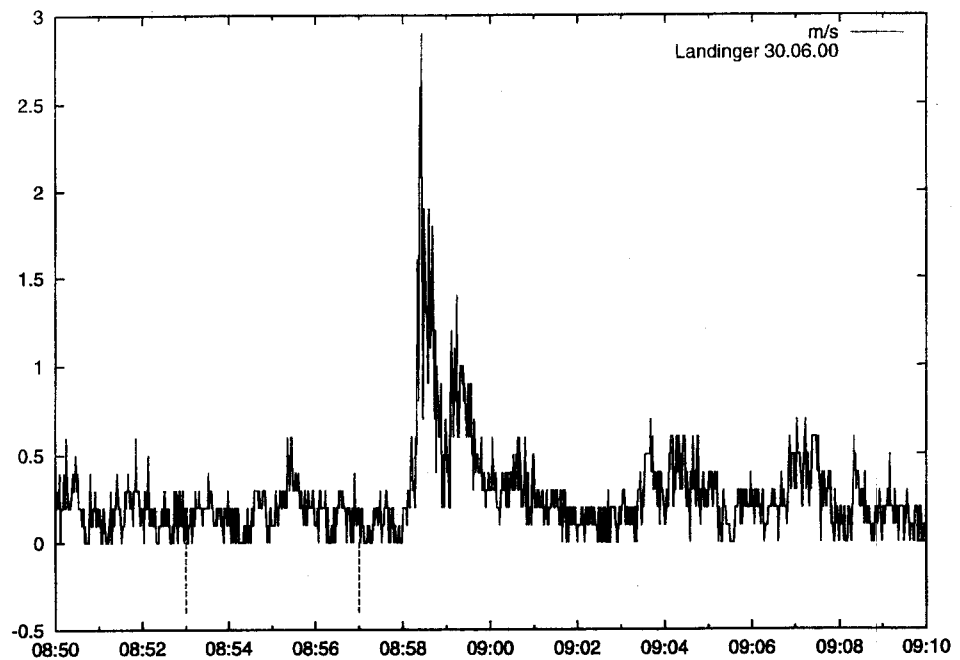
Av årsaker vi ikke kjenner til, ser vi topper i vindhastighet som kommer før de etter loggen skulle ha landet. Slike tilfeller er vist på figurene 4.1 og 4.2. Det er mulig det er noe galt med tidsregistreringen i disse tilfellene.



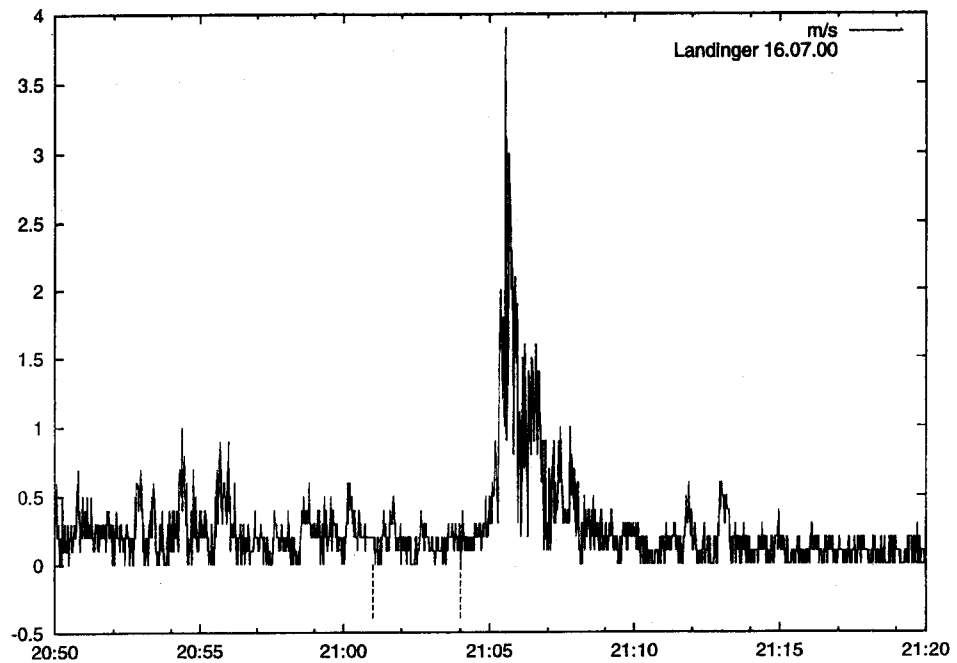
Figur 3.1: Målte vindstyrker i m/s den 28.04.2000, en dag med mye vind, plottet mot tid. De stiplede linjene like over tidsaksen angir tiden for registrerte landinger.



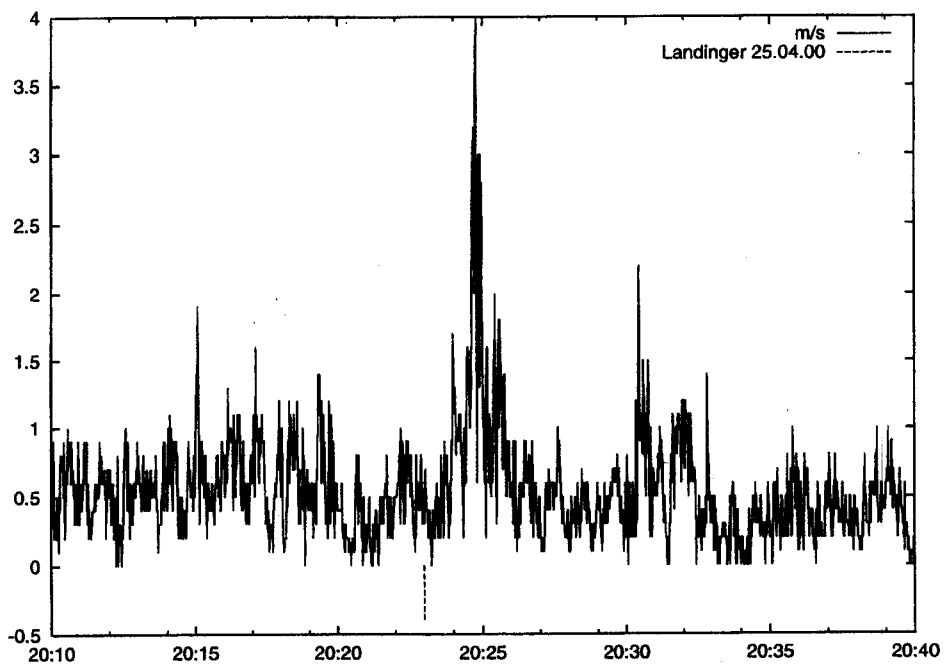
Figur 3.2: Målte vindstyrker i m/s den 30.05.2000, en dag med mye vind, plottet mot tid. De stiplede linjene like over tidsaksen angir tiden for registrerte landinger.



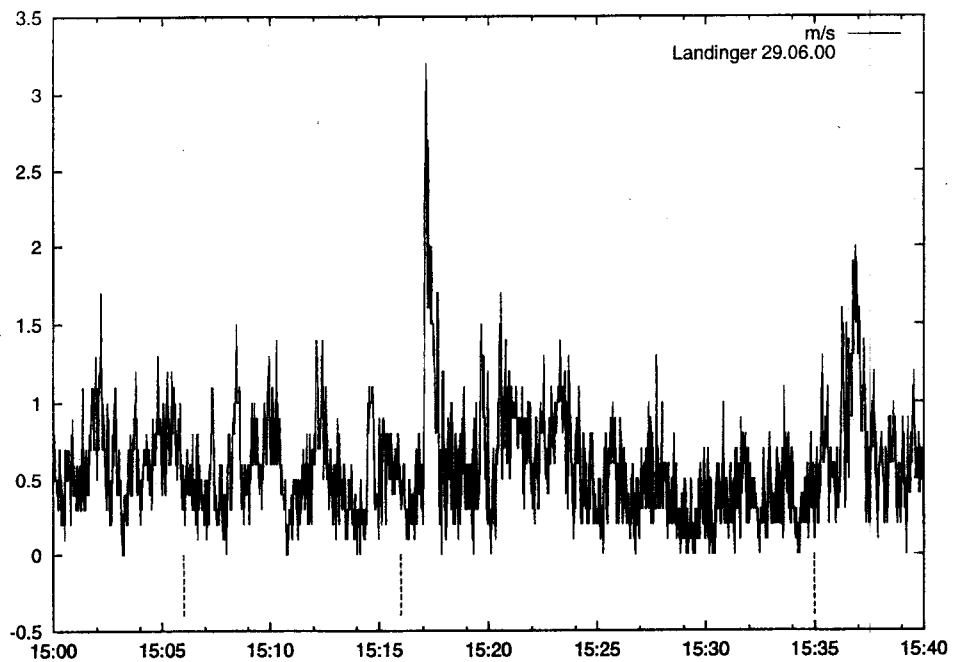
*Figur 3.3: Målte vindstyrker i m/s den 30.06.2000 plottet mot tid. Det ble rapportert to landinger på denne tida, LNNAL og NOO04. LNNAL gir ingen signatur og har sansynligvis flydd inn fre sør. Toppen er forårsaket av NOO04, en Beech 200 med vekt i underkant 7 tonn. Denne forårsaker en vind oppunder 3m/s. De stiplede linjene like over tidsaksen angir tiden for de to landingene.*



Figur 3.4: Målte vindstyrker i m/s den 16.07.2000 plottet mot tid. Det ble rapportert to landinger i tidsrommet som er plottet. BRA229 med B734 og DAN118 med B735. BRA229 fyr etter all sansynlighet inn fra sør mens DAN118 generer en klar signatur. Legg merke til formen. De stiplede linjene like over tidsaksen angir tiden for de to landingene.



Figur 3.5: Målte vindstyrker i m/s den 25.04.2000 plottet mot tid. Det er signaturen av SAS2389, en B736 som vises på plottet. De stiplede linjene like over tidsaksen angir tiden for registrerte landinger.



*Figur 3.6: Målte vindstyrker i m/s den 29.06.2000 plottet mot tid. Det er tre innflyvninger i løpet av tiden angitt på plottet. Først BRA4322 med F50 som ikke genererer noen signatur, så BRA221 med B735 som genererer den sterke toppen i midten, og til slutt HBYDX med en BX2 som muligens genererer noe som såvidt stikker opp av støyen til høyre i plottet. De stiplede linjene like over tidsaksen angir tiden for registrerte landinger.*

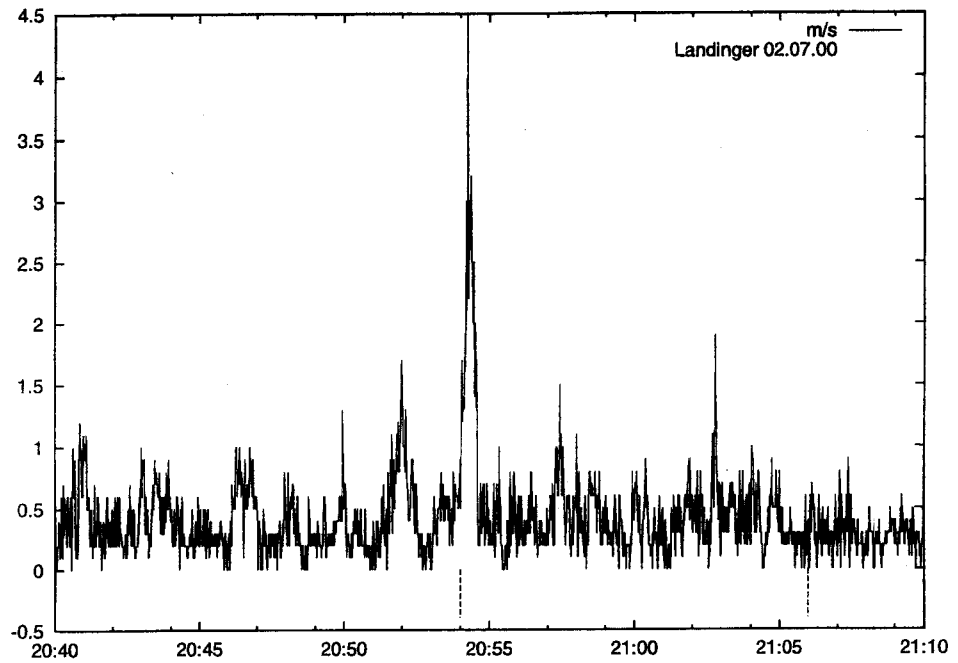
## 5 KONKLUSJON

Vindmålinger viser at virvler generert av B737 forårsaker et vindfelt med typisk vindstyrke på 4 – 5m/s i hustakhøyde langs innflyvningstraseen til Kjevik flyplass. Dette er en moderat vindstyrke. Resultatene er i samsvar med de simuleringer vi tidligere har foretatt.

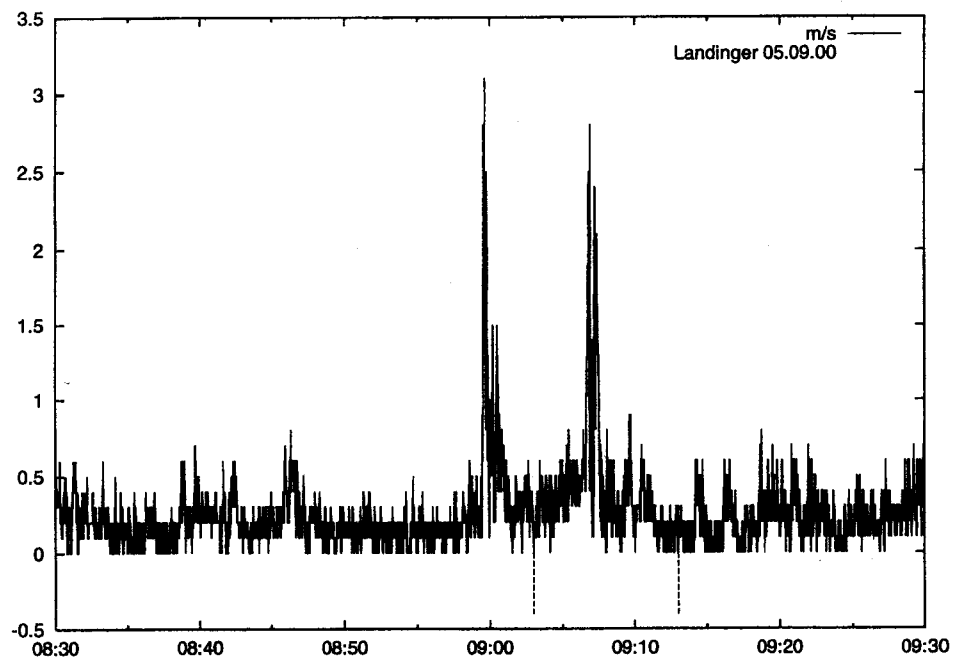
Geofysiske vindstyrker er betydelig kraftigere enn de som er forårsaket av fly, uten at dette fører til nedfall av takstein. Det ble registrert vindstyrker fra vær på opp mot 15m/s i måleperioden.

Basert på vindstyrker på 5m/s, er det for oss uforståelig at takstein rives av husene. Det bør her bemerkes at vi fra vindmålinger alene ikke er istand til å estimere de krefter som virker på takstein. Det faktum at flygenererte virvler er sterkt turbulente i den ytre delen, gjør resultatene usikre. Vi har ikke god forståelse for turbulens som er et av de uløste problemer i klassisk fysikk. Ingen er i stand til å simulere numerisk og med høy nøyaktighet turbulens med høy Reynolds-tall. I for vårt problem er de karakteristiske Reynolds-tal omkring  $10^6$ . For endelig å verifisere kreftene fra de flygenererte virvler som virker på hustak foreslår vi å måle trykket lokalt flere steder på det aktuelle hustaket gjennom en periode. Da kan de kreftene som virker på taksteinene direkte beregnes og usikkerheten omkring dette vil reduseres.

Vi kan ikke underslå det faktum at takstein har falt ned, at dette er forårsaket av fly. Dette har dessuten skjedd under helt normale landinger under gode værforhold hvor flyene har fulgt glidebanen nøyaktig. Effekten syntes å være ganske marginal siden kun et meget lite antall nedfall er rapportert i forhold til det store antall overflyvninger med medfølgende "vortex-treff" på hustakene.



*Figur 4.1: Tidlige topper 2.07.2000. Mulighet for feil ved tidsregistreringen. Vindhastighet plottet mot tid*



*Figur 4.2: Tidlige topper 5.09.2000 noe som tyder på feil ved tidsregistreringen. Vindhastighet plottet mot tid*



**Referanser**

- [1] Ø. Andreassen and J. O. Langseth. Et estimat av effekten fra fly-genererte virvler i nærheten av kjevik flyplass. Technical report, Forsvarets forskningsinstitutt, Postboks 25, 2027 Kjeller, Norway, 2000. FFI/RAPPORT-2000/00120.



## FORDELINGSLISTE

**FFIBM**
**Dato:** 7 september 2001

RAPPORTTYPE (KRYSS AV) <input checked="" type="checkbox"/> RAPP <input type="checkbox"/> NOTAT <input type="checkbox"/> RR	RAPPORT NR. 2001/04317	REFERANSE FFIBM/820/170	RAPPORTENS DATO 7 september 2001
RAPPORTENS BESKYTTELSESGRAD  UGRADERT		ANTALL EKS UTSTEDT  75	ANTALL SIDER  17
RAPPORTENS TITTEL MÅLINGER AV HASTIGHETSFELTER I FLY- GENERERTE VIRVLER NÆR HUS UNDER INNFLYVNINGSTRASEEN VED KJEVIK FLYPLASS		FORFATTER(E) ANDREASSEN Øyvind, HELGELAND Anders	
FORDELING GODKJENT AV FORSKNINGSSJEF: 		FORDELING GODKJENT AV AVDELINGSSJEF: 	

**EKSTERN FORDELING**
**INTERN FORDELING**

ANTALL	EKS NR	TIL	ANTALL	EKS NR	TIL
50		Luftfartsverket v/ Jan I Lunde P O Box 8 124 Dep 0032 Oslo	14		FFI-Bibl
			1		Adm direktør/stabssjef
			1		FFIE
			1		FFISYS
			5		FFIBM
			1		FFIN
			1		Anders Helgeland, FFIBM
			1		Øyvind Andreassen, FFIBM
					FFI-veven

FFI-K1

Retningslinjer for fordeling og forsendelse er gitt i Oraklet, Bind I, Bestemmelser om publikasjoner for Forsvarets forskningsinstitutt, pkt 2 og 5. Benytt ny side om nødvendig.