

FFIBM/170

Godkjent  
Kjeller 12 januar 2000



Bjarne Haugstad  
Forskningssjef

**ET ESTIMAT AV EFFEKTEN FRA  
FLY-GENERERTE VIRVLER PÅ BEBYGGELSE  
I NÆRHETEN AV KJEVIK FLYPLASS**

ANDREASSEN Øyvind, LANGSETH Jan Olav

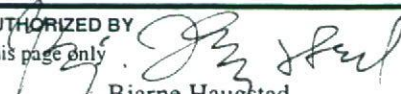
FFI/RAPPORT-2000/00120

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

P O BOX 25  
2027 KJELLER, NORWAY

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE  
(when data entered)

REPORT DOCUMENTATION PAGE

<p>1) PUBL/REPORT NUMBER FFI/RAPPORT-2000/00120</p> <p>1a) PROJECT REFERENCE FFIBM/170</p>	<p>2) SECURITY CLASSIFICATION UNCLASSIFIED</p> <p>2a) DECLASSIFICATION/DOWNGRADING SCHEDULE -</p>	<p>3) NUMBER OF PAGES</p>												
<p>4) TITLE ET ESTIMAT AV EFFEKTEN FRA FLY-GENERERTE VIRVLER PÅ BEBYGGELSE I NÆRHETEN AV KJEVIK FLYPLASS</p> <p>AN ESTIMATE OF THE IMPACT OF AIRCRAFT INDUCED VORTICES ON BUILDINGS CLOSE TO KJEVIK AIRPORT</p>														
<p>5) NAMES OF AUTHOR(S) IN FULL (surname first) ANDREASSEN Øyvind, LANGSETH Jan Olav</p>														
<p>6) DISTRIBUTION STATEMENT Approved for public release. Distribution unlimited. (Offentlig tilgjengelig)</p>														
<p>7) INDEXING TERMS</p> <table border="0"> <tr> <td>IN ENGLISH:</td> <td>IN NORWEGIAN:</td> </tr> <tr> <td>a) <u>Vortex dynamics</u></td> <td>a) <u>Vortex dynamikk</u></td> </tr> <tr> <td>b) <u>Computational fluid dynamics</u></td> <td>b) <u>Numerisk væske-dynamikk</u></td> </tr> <tr> <td>c) _____</td> <td>c) _____</td> </tr> <tr> <td>d) _____</td> <td>d) _____</td> </tr> <tr> <td>e) _____</td> <td>e) _____</td> </tr> </table>			IN ENGLISH:	IN NORWEGIAN:	a) <u>Vortex dynamics</u>	a) <u>Vortex dynamikk</u>	b) <u>Computational fluid dynamics</u>	b) <u>Numerisk væske-dynamikk</u>	c) _____	c) _____	d) _____	d) _____	e) _____	e) _____
IN ENGLISH:	IN NORWEGIAN:													
a) <u>Vortex dynamics</u>	a) <u>Vortex dynamikk</u>													
b) <u>Computational fluid dynamics</u>	b) <u>Numerisk væske-dynamikk</u>													
c) _____	c) _____													
d) _____	d) _____													
e) _____	e) _____													
<p>THESAURUS REFERENCE:</p>														
<p>8) ABSTRACT</p> <p>At some occasions, gusty winds caused by aircrafts during approach to Kjevik airport, have caused tiles to fall down from roofs, causing potential damage. In the current study, initiated by the Norwegian airtraffic and airport management, the evolution of air-craft generated vortices, as they hit simple buildings and/or the ground is simulated using the numerical package CLAWPACK. The simulations show that even for B-737 generated vortices, only modest wind-speeds (up to 10 m/s) will occur close to buildings, expected to cause in worst cases only minor if at all any damage.</p>														
<p>9) DATE 10 January 2000</p>	<p>AUTHORIZED BY This page only  Bjarne Haugstad</p>	<p>POSITION Director of Research</p>												

ISBN 82-464-0395-8

UNCLASSIFIED

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE  
(when data entered)

**INNHOOLD**

		<b>Side</b>
1	INNLEDNING	4
2	DEFINISJONER OG FORMULERINGER	7
3	INITIALBETINGELSER OG NUMERISK MODELL	9
4	ANALYSE OG DISKUSJON AV DE NUMERISKE RESULTATER	10
4.1	Vortex-utvikling over et flatt terreng uten hindringer	10
4.2	Vortex-utvikling ved tilstedeværelsen av et hus med 45° takvinkel	12
4.3	Vortex-utvikling ved tilstedeværelsen av et hus med flatt tak	15
4.4	Vortex-utvikling ved tilstedeværelsen av hus med flatt og skrått tak	16
5	VURDERING AV USIKKERHETER	16
6	KONKLUSJON	20
	Referanser	22
	Distribusjonsliste	23

## ET ESTIMAT AV EFFEKTEN FRA FLY-GENERERTE VIRVLER PÅ BEBYGGELSE I NÆRHETEN AV KJEVIK FLYPLASS



### 1 INNLEDNING

Ved 4-6 anledninger de siste årene er det sansynlig at vindkast fra fly, idet de går inn for landing, har forårsaket nedfall av takstein fra fire forskjellige hus som ligger under innflyvningstraseen på Ryen utenfor Kjevik. Et av husene har mistet takstein tre ganger, sist i september 1999. Det har skjedd ved flere anledninger at takstein har falt ned. Man har stilt seg spørsmål om hvilke sikringstiltak som er nødvendige for å forhindre at det skjer skade. Luftfartsverket har engasjert Forsvarets Forskningsinstitutt til å utarbeide en rapport om hvilke vindhastigheter/krefter som kan forventes å opptre i innflygingstraseen slik at relevante tiltak kan iverksettes for å forhindre fremtidig skade.

Løft er nødvendig for flyvning, og for å generere tilstrekkelig løft, så må det være en viss sirkulasjon omkring vingene. Dette vil i sin tur føre til at det produseres virvling, eller "vorticity". For et fly vil denne virvlingen manifestere seg i form av et virvel-par eller "vortex-par" (i denne rapporten vil vi benytte uttrykket virvel og vortex om hverandre). Det vil opptre en virvel for hver vinge i flyets "kjølvann". En manifestasjon av disse

vortex-parene er de typiske kondens-striper som opptrer etter fly under forhold med riktig luftfuktighet. Vortex-parene opptrer uansett luftfuktighet, men det kondenseres ikke alltid ut vanddamp og da er de ikke heller direkte synlige. Virvlene som opptrer i par, vil ha motsatt "polaritet", dvs være motsatt rettede. Et vortex-par med to motsatt rettede virvler, vil indusere en nedover-rettet bevegelse på hverandre. Denne bevegelsen kan tallfestes om vortex'enes beskaffenhet er kjent.

Sirkulasjonens styrke  $\Gamma_0$  og følgelig virvlernes intensitet vil øke i takt med flyets masse  $M$ , og avta med økt vingespenn  $b_0$ , etter formelen:

$$\Gamma_0 = CM/(\rho V b_0), \quad (1.1)$$

Løftet  $L$  pr enhetlig vingespenn, er tilsvarende gitt ved:

$$L = \rho V \Gamma_0, \quad (1.2)$$

her er  $\rho$  luftens tetthet og  $V$  er luftens hastighet i forhold til flyet,  $C$  er en konstant. Fra formel (1.1) ser vi at de tyngste flyene genererer sterkest sirkulasjon og vorticity. Generering av et vortex-par er altså en nødvendighet for flyvning. Man kan derfor fra et flyteknisk perspektiv ikke forhindre at det dannes et vortex-par. Ved å optimalisere vingene, kan man kanskje smøre ut vortex-kjernene noe, men her er det ikke mye å hente. Genereringen av tildels kraftige vortex-par fra fly er altså noe vi må leve med.

For innflyvningen til Kjevik flyplass og andre flyplasser, er det rapportert at fly-genererte vortex-par gjør størst skade under forhold med bra vær. Dvs for meteorologiske forhold hvor stratifikasjonen er stabil og vind-skjærene er svake. Under slike forhold er det lav turbulens-aktivitet. Dette er nettopp hva som kan forventes å skje utfra en fluid-dynamisk betraktning. Ifølge flere forskere som har studert dette, bla Spalart [8], så er de instabilitetene som påvirker vortex-par, sterkt influert av vind-skjær og turbulens. Instabiliteter vil føre til at vortex-paret splittes opp og mister sin koherens og kraft. For ved sterk sidevind vil vortex-parets signatur meget raskt bli slettet ut. Vortex-paret vil da raskt bli transportert bort fra rullebanens senter-linje og gå i oppløsning i et kaotisk mønster som er vanskelig å prediktere. Vortex-paret vil ikke rekke å gjøre mye skade før dets identitet er gått tapt.

For de innflyvningene som har ført til skade, rapporteres det at den normale innflyvnings-prosedyre og trasé er fulgt.

For moderat turbulens-styrke vil sk Crow instabiliteter, se [1], føre til at vortex-paret endrer form og at det mister sin styrke, ganske raskt. Under slike forhold vil vortex paret danne bla ringformede geometrier slik som demonstrert i 3-dimensjonale (3D) simuleringer av Jim Garten og flere, se [4], og i laboratorie-eksperiment av Don Delisi og andre, se [3]. Under forhold med lite turbulens, vil imidlertid disse instabilitetene bruke flere minutter på å utvikle seg. En slik langtids-utvikling av vortex-par er av interesse for problemer relatert til

utnyttelsen av luftrommet ved økt flytrafikk, og er gjenstand for en omfattende forsknings-virksomhet som omfatter simuleringer av strømming ved høye Reynolds-tall og turbulens. I vårt tilfelle er det den tidlige fasen i utviklingen av vortex-paret som er av interesse, og dette problemet er adskillig enklere å håndtere.

For den næreste delen av innflyvnings-traseen til Kjevik, hvor flyhøyden er mindre enn 150 meter over bakken, vil det ta mellom 1 og 2 minutter fra overflyvning, til vortex-paret når bakken. Under forhold med lite turbulens, vil vortex-parene beholde sin koherens og styrke til de når bakken. Deres "impact" vil være maksimal under slike forhold. Dette er i overensstemmelse med de erfaringer som er gjort i nærheten av flyplasser.

Under rolige meteorologiske forhold vil Crow instabilitetene ikke ha rukket å utvikle seg av betydning idet vortex-paret når bakken. Vortex'ene er i denne fasen temmelig 2-dimensjonale, slik at 2D simuleringer vil være tilstrekkelige til å fange opp det meste av fysikken i problemet. En annen fordel er at vortex-parets styrke og geometri lettere kan predikteres. Det finnes dessuten mengder av gode data av slike vortex-par, tatt opp under innflyvning, som kan benyttes i denne undersøkelsen. Observasjoner viser at vortex-par taper mindre enn 10% av sirkulasjonen eller tangential-hastigheten i tidsrommet 1-2 minutter etter at de er generert. Vortex-sentrene avtar med ca 10% over det samme tidsrommet. I denne studien vil det derfor ikke være nødvendig å beregne vortex-parenes utvikling fra full glidebane-høyde og til de når bakken, hvilket sparer oss for mye regning. I stedet kan vi fra observasjoner, estimere sirkulasjon og vortex-styrke for den gitte maximale tangential hastighet. Dette kan vi gjøre for en høyde som er hensiktsmessig som start-betingelse for våre simuleringer.

De observerte vortex-data som benyttes som startbetingelse for våre simuleringer, er stilt til rådighet av Don Delisi, [2]. De er tatt under overflyvninger med lav hastighet og full-flap setting. Det siste er en kompliserende faktor og det må tas forbehold her. Under full flap setting vil det dannes tre virvler på hver side av flyet. En nær vingespissen og en på hver side av "flappet". Disse tre virvlene vil raskt "merge" til en større virvel som vil være sterkt turbulent. Måling av maks-hastighet i en slik turbulent virvel er ifølge Delisi en vanskelig sak som er forbundet med endel usikkerhet, og det er derfor noe usikkerhet forbundet til de start-hastigheter som vi benytter i simuleringene. Hastigheten i de turbulente virvler vil fluktuere endel og målestyret er kanskje ikke istand til å få med seg de aller største hastighetene. Målingene uttrykker gjennomsnittlige høye verdier snarere enn de aller høyeste verdiene. Vi vil derfor benytte noe høye verdier for maksimum tangential-hastigheter og sirkulasjon, for ikke å underestimere de effekter som opptrer i interaksjonen mellom virvlene og hustak.

I den videre analysen, vil vi se på effekten av et vortex-par med styrke og geometri tilsvarende det som er observert fra fly av typen B-737 (den største flytypen som betjener Kjevik flyplass) og under innflyvning med en glidebane med vinkel på ca. 3 grader. Vortex-paret induserer en nedadgående bevegelse på hverandre. For å halvere regnetiden vil vi anta at scenen er symmetrisk om et vertikalt plan midt mellom virvel-paret. Denne

randen som faller sammen med senterlinja for innflyvning er definert som en ugjennomtrengelig vegg ( $v_{\perp} = 0$ ), men med en mulig tangential-hastighet. For den oppløsningen som trengs, blir regnetiden likevel 3 døgn for en enkelt simulering. Foruten test-simuleringene som er nødvendige for å “skyte oss inn”, foretar vi 4 produksjons-kjøringer. 1) uten hus, for å demonstrere at vortex-utviklingen blir slik den skal etter analytisk teori, 2) tilfellet med  $45^{\circ}$  takvinkel, 3) tilfellet flatt tak og 4) tilfellet med flatt tak under senterlinjen for innflyvning og et hus med  $45^{\circ}$  takvinkel et stykke unna. Initielt plasseres vortex'en slik at påvirkningen skal bli maksimal. Først plasserte vi den rett over huset, men den bøyde da av og passerte et godt stykke utenfor huset. For best mulig treff måtte vi plassere huset et stykke fra senterlinja, se figur 3.1. Observerte data fra B-737 benyttes, og simuleringene er foretatt ved å løse gass-dynamikk likningene i 2-romlige dimensjoner ved hjelp av programpakken CLAWPACK, utviklet av R. LeVeque, se [5].

Hvordan vortex-par genereres av fly, er ikke forstått i minste detalj, men man har likevel følgende bilde: Vortex-sjikt genereres fra vinger og kontroll-flater. Slike sjikt er turbulente. Sirkulasjonen som “gir flyet lift”, er betydelig. Det er derfor også betydelig med vorticity som genereres. Vortex-sjiktene “twister” seg opp til virvler med ganske sirkulært tverrsnitt. Reynolds-tallene er hele tiden høye slik at virvlene har turbulente kjerner. Det er meget overraskende og fremdeles en gåte at disse turbulente vortex-kjernene, nesten roterer som stive legemer (ifølge Delisi), og derved beholder sin koherens og intensitet over så lang tid som 1-2 minutter.

I følge teorien vil vortex-separasjonen, dvs avstanden mellom vortex-kjernene være  $s = (\pi/4)b_0$ , hvor  $b_0$  er flyets vingespenn. For flyet B-737, er vingespennet  $b_0 = 29m$ . Vi kan derfor forvente at vortex-separasjon er ca  $s_0 = 20m$  nær bakke-nivå. Vi benytter denne avstanden som utgangspunkt for våre simuleringer.

## 2 DEFINISJONER OG FORMULERINGER

For å estimere virkningen på hustak fra fly-genererte vortex-par, må vi beregne hastighetsfeltet forårsaket av vortex-paret. Som nevnt innledningsvis, er det tilstrekkelig å benytte et 2D utsnitt av observerte vortex-data som en startbetingelse for de numeriske simuleringene som også er 2-dimensjonale. Vi anser det for tilstrekkelig å modellere dette problemet i 2D. Dette reduserer beregningsbehovet enormt sammenlignet med eventuelle 3D modeller. Vi vil benytte en 2-d modell med meget høy oppløsning, og som beskriver den lokale fysikken i henhold til Euler-likningene.

For å angi initialbetingelsene, benytter vi analytiske uttrykk for hastighet, vorticity og sirkulasjon. Vi benytter observerte data til å angi variablene som inngår i disse uttrykkene. Vi kan anta i overensstemmelse med observasjoner, at vortex-kjernenes omtrentlige radius (oppgitt av Delisi og andre) er ca  $r_0 = 2m$ . Kjernen utgjør den innerste delen av virvelen ut til radien  $r = r_0$ , hvor vi finner den maksimale tangential-hastigheten. For en Gaussisk vortex er denne radius  $r_0 = 1.58\sigma$ . Dermed kan vi i uttrykkene under benytte  $\sigma = 1.3m$ .

For å estimere effekten av en vortex må vi beregne lokale hastighets-felt og trykkfelt. Som tidligere nevnt, har en fly-generert vortex en turbulent kjerne hvor hastighet og trykk fluktuerer om en middelfordeling. En slik vortex har Reynolds-tall som er utenfor rekkevidde selv for dagens superdatamaskiner og følgelig er den umulig å beskrive kvantitativt i detalj. Vi vil istedet benytte en tilnærming hvor en Gaussisk fordeling beskriver den initielle vorticity-fordeling. For en solitær og sylinder-symmetrisk vortex, kan vorticity-fordelingen  $\omega$  skrives:

$$\omega(r) = \frac{\Gamma_0}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2.1)$$

her er  $r$  radien fra vortexens sentrum,  $\Gamma$  er sirkulasjonen og  $\sigma$  uttrykker vortexens bredde. En vortex, er et balansert fenomen. For å kunne bibeholde den sirkulære bevegelsen, trengs ett lokalt minimum i trykket i sentrum av kjernen. Initialbetingelser for trykket kan om ønskelig bestemmes ved å integrere uttrykket:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = -\rho \frac{v_\theta^2}{r}, \quad (2.2)$$

her er  $v_\theta$  tangential hastigheten og  $\rho$  er mediets tetthet. I vårt tilfelle er dette unødvendig. Startbetingelsene i hastigheten som gitt under kan benyttes sammen med konstant trykk, og en vil raskt oppnå trykk-balanse uten at hastighetsfordelingen endres i særlig grad. Vorticity  $\omega$  og sirkulasjon  $\Gamma$  er relaterte størrelser, og for en sirkulær-symmetrisk vortex som gitt over, kan vi skrive:

$$\Gamma(r) = \oint_s v \cdot dl = \int_A \omega \cdot dA = \Gamma_0(1 - \exp\{-r^2/2\sigma^2\}) = 2\pi r v_\theta(r) \quad (2.3)$$

Hastighets-fordelingen blir dermed:

$$v_\theta(r) = \frac{\Gamma_0}{2\pi r} (1 - \exp\{-r^2/2\sigma^2\}) \quad (2.4)$$

En typisk maksimal-hastighet, målt i vortex-par dannet av B-737, er  $v_{\max} = 25\text{m/s}$ , ifølge Delisi. Denne hastigheten vil avta noe før vortex-paret når bakken (10 – 20%), men for ikke å underestimere kreftene som vil opptre, skal vi benytte denne verdien i beregningene. Innsatt denne hastigheten i likning 2.4 gir følgende sirkulasjon ved  $r = r_0$ ,  $\Gamma_0 = 450\text{m}^2/\text{s}$ . Dette gjelder for en sirkulær vortex, og verdien er nok noe høy. Når et vortex-par superponeres som i neste kapittel, blir den superponerte maksimal-hastigheten noe høyere enn for en solitær vortex. Ved å sette initielt  $\Gamma_0 = 400\text{m}^2/\text{s}$ , oppnåes en maksimum-hastighet i vortex-paret på ca 25m/s. Vi vil benytte denne verdien i initialbetingelsene for simuleringene.



### 3 INITIALBETINGELSER OG NUMERISK MODELL

Vi skriver den initielle virvling  $(0, \omega, 0)$ , i kartesiske koordinater som en superposisjon av to sirkulære Gaussiske virvler.

$$\omega(x, 0, z, t = 0) = -\frac{\Gamma_0}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{r_1^2}{2\sigma^2}\right) + \frac{\Gamma_0}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{r_2^2}{2\sigma^2}\right), \quad (3.1)$$

hvor  $r_1^2 = (x - s_0/2)^2 + (z - z_0)^2$ , og  $r_2^2 = (x + s_0/2)^2 + (z - z_0)^2$ , og vi velger  $\Gamma_0 = 400\text{m}^2/\text{s}$ , som kommentert i avsnittet over. Komponentene av hastighetsfeltet kan tilsvarende skrives  $(u, 0, w)$ , hvor :

$$u(x, z, t = 0) = -\frac{\Gamma_0}{2\pi} \frac{(z - z_0)}{r_1^2} (1 - \exp\{-r_1^2/2\sigma^2\}) \quad (3.2)$$

$$+ \frac{\Gamma_0}{2\pi} \frac{(z - z_0)}{r_2^2} (1 - \exp\{-r_2^2/2\sigma^2\}) \quad (3.3)$$

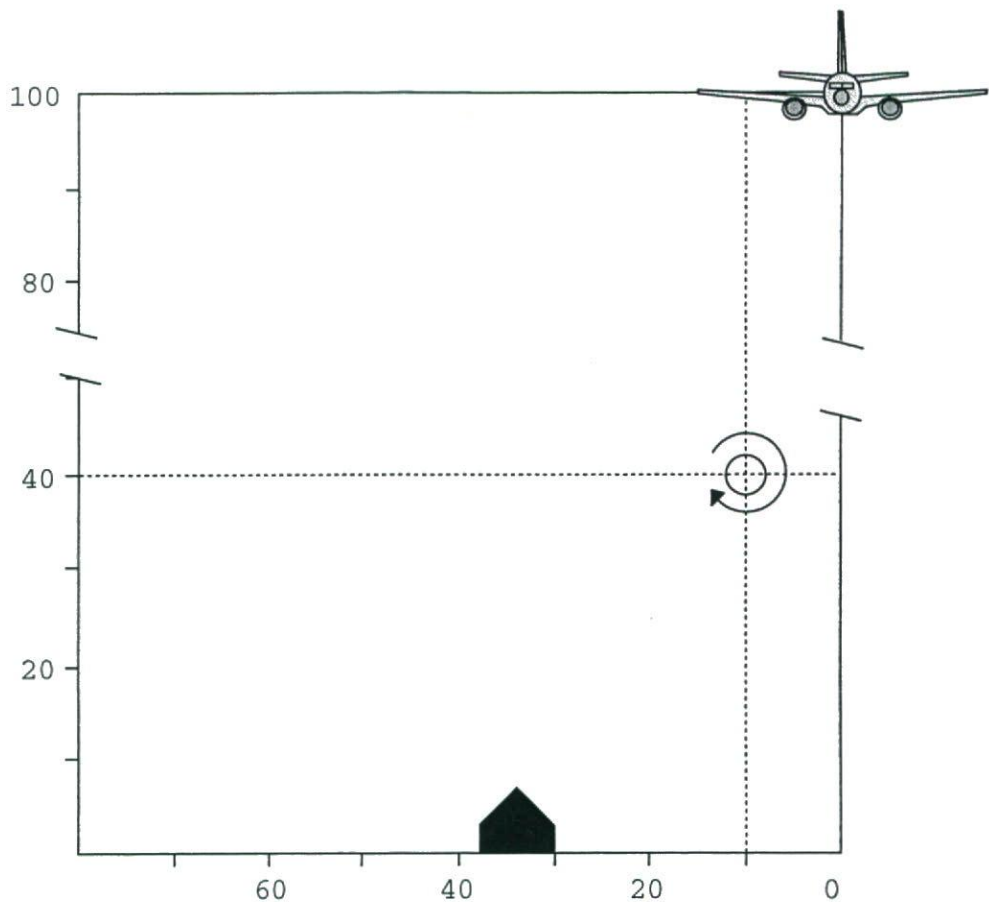
og

$$w(x, z, t = 0) = \frac{\Gamma_0}{2\pi} \frac{(x - s_0/2)}{r_1^2} (1 - \exp\{-r_1^2/2\sigma^2\}) \quad (3.4)$$

$$- \frac{\Gamma_0}{2\pi} \frac{(x + s_0/2)}{r_2^2} (1 - \exp\{-r_2^2/2\sigma^2\}) \quad (3.5)$$

Til simuleringene vil vi benytte CLAWPACK, som er en programpakke for hyperbolske konserveringslover. Vi tar utgangspunktet i de to-dimensjonale Euler likningene uten gravitasjon. Effekten av gravitasjon er liten siden tetthets-fluktuasjonene er små. Over det tidsrommet som simuleringene tar vil opdrifts-krefter gi et hastighets-bidrag som er mindre enn 10% sammenlignet med vortex-senterets hastighet. Vi kan derfor neglisjere tyngden. Euler-likningene beskriver kompressibel og ikke-viskøs strømning i gasser. Ideelt sett ville man benyttet en liknings-løser som kan håndtere viskøse ledd eksplisitt, men CLAWPACK har innebygget en "limiter" som virker som viskositet på de fineste skalane. Selv om vi ikke håndtere viskositet "riktig", så mener vi at de modellerte feltene likevel er ganske realistiske inklusive hastighetene nær hustaket og nær bakken.

I de numeriske simuleringene vil effekten av vortex-paret være størst om vindfeltet er rettet på tvers av mønet, dvs at virvlingen og flyets glidebane er rettet langs mønet. Situasjonen er vist i figur 3.1. Under forhold med lite turbulens, viser målinger at sirkulasjon og geometri er godt bevart for fly-genererte vortex-par over et tidsrom på vel 1-2 minutter. Vi sparer mye regnetid ved å sette igang virvlene i en høyde som tilsvarer bare et vingespenn over huset istedet for i full glidebane-høyde. Den tidsreferansen som benyttes, refererer til tiden etter overflyvning. Simuleringene starter på høyden 40m og ved tiden  $t = 30\text{s}$ .



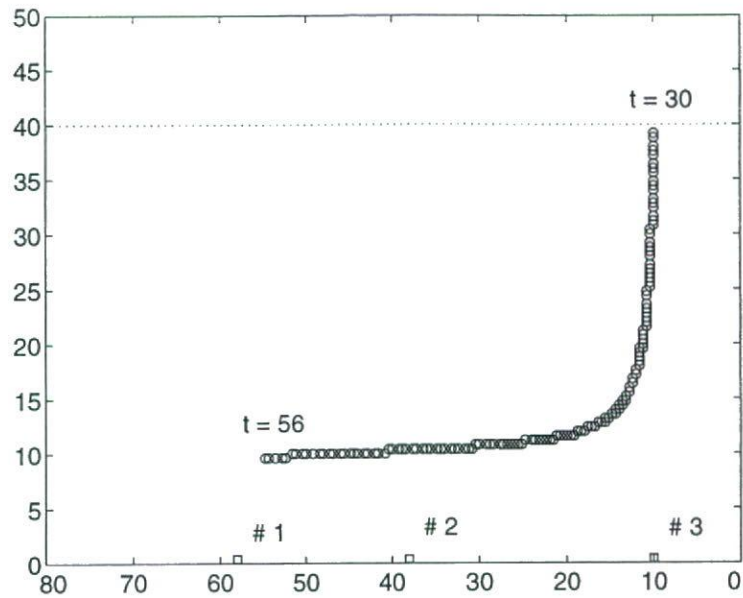
Figur 3.1: Skisse av startbetingelsen for de numeriske simuleringene. Vortex-paret har i denne fasen nådd ned til en høyde på vel et vingespenn over hustaket. Hastighetsfeltets retning er angitt ved pilen. Avstanden mellom virvlene og deres styrke er spesifisert for fly av typen B-737. Antatt flyhøyde er 100m

#### 4 ANALYSE OG DISKUSJON AV DE NUMERISKE RESULTATER

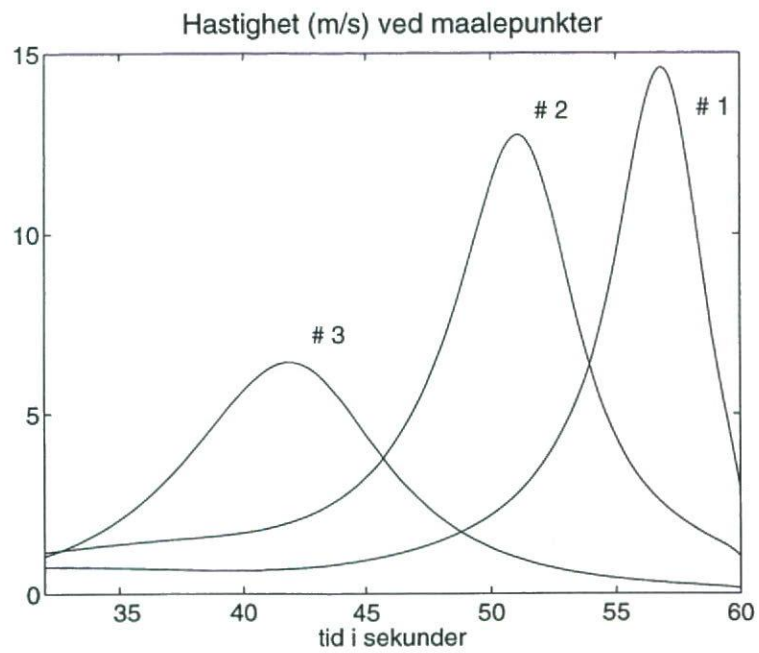
Vi har gjennomført en serie på fire simuleringer. Disse gir utviklingen av hastighets-felter, trykk, og tetthetsfelter i tid og rom. For å estimere påvirkningen på huset, angir vi de simulerte vind-hastighetene like inntil hustaket, og ved bakke-nivå. Empiriske data bør benyttes til sammenligning for å vurdere et eventuelt skadeomfang. Krefter som oppstår er vanskelige å estimere direkte fra simuleringene. Dette vil kreve en oppløsning som er utenfor rekkevidde for dette oppdraget, og en mer detaljert grensesjiktets-beskrivelse.

##### 4.1 Vortex-utvikling over et flatt terreng uten hindringer

Ifølge teorien for vortex-interaksjoner vil hver vortex i et vortex par gjensidig "indusere" en bevegelse på den andre. Bevegelsen vil være nedadrettet for et fly-generert vortex-par. Når dette vortex-paret nærmer seg bakken, vil hver vortex bli påvirket av en "virtuell



Figur 4.1: Virvelens bane i tilfellet flatt terreng, uten hindringer. Banen er beskrevet ved å følge virvelens lokale trykk-minimum



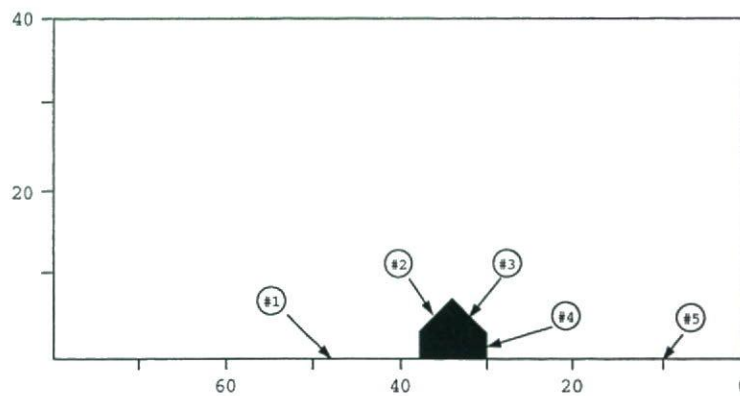
Figur 4.2: Hastighet som funksjon av tiden, målt i punktene 1, 2 og 3 vist i figur 4.1

speil-vortex” som befinner seg under bakken, se Saffman [7]. Dette er et resultat av at bakken opptrer som en ugjennomtrengelig symmetri-rand hvor normal-hastigheten er null. Det “induseres” en horisontal bevegelse slik at de to fysiske virvlene etter hvert får en økende hastighet horisontalt fra hverandre. Hvis bakken er plan, vil hver vortex følge en hyperbel-bane. På sin vandring utover, vil vortex-senteret etterhvert nå en høyde over bakken som tilsvarer halvparten av den initielle separasjonen, dvs  $s_0/2 = 10\text{m}$ . Simuleringene gir nettopp dette resultatet, se fig. 4.1. Vortex-senteret kan for vårt problem beskrives ved et lokalt minimum i trykk-feltet. Vi benytter dette til å beskrive vortex banene. For å opprettholde en relativt stasjonær og sirkulær bevegelse (som kjennetegner en vortex), trengs en kraft rettet mot bevegelsens sentrum. Det sentrale lavtrykket forårsaker en slik kraft og er et resultat av den balanserte bevegelsen.

Vi plasserte tre observasjons-punkter for hastighet nær bakken som vist i figur 4.1. Siden virvelen dempes lite over tidsrommet for simuleringen, vil de målte hastigheter få størst verdi ettersom virvelen nærmer seg bakken. Målepunkt 3 vil ha lavest maks-hastighet, mens målepunkt 1 følgelig vil få høyest verdi, slik som i figur 4.2. I tilfellet med flat bakke uten hindringer, kan man vente seg hastigheter opp mot 15m/s før vortexen desintegrerer.

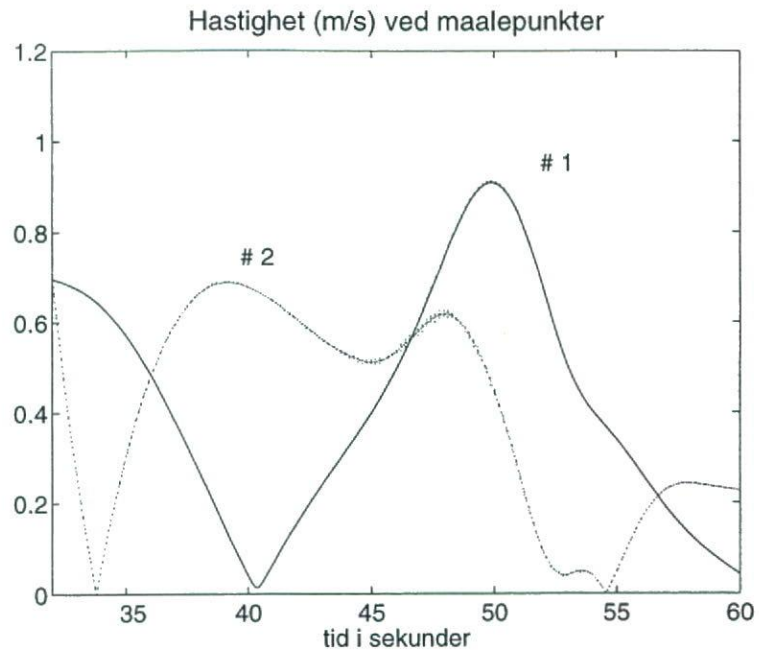
#### 4.2 Vortex-utvikling ved tilstedeværelsen av et hus med 45° takvinkel.

I de første simuleringene plasserte vi huset ca 10 – 15m fra senterlinja for innflyvning. Virvelen styrte da over hustaket i god høyde og de maksimale hastighetene nær huset ble i underkant av 5m/s. For å treffe bedre, plasserte vi huset i en avstand på 30 – 40m fra senterlinja. Vi oppnådde da en vortex-bane som vist i figur 4.6. I dette tilfellet ble vindstyrken nær hustaket ca 10m/s.

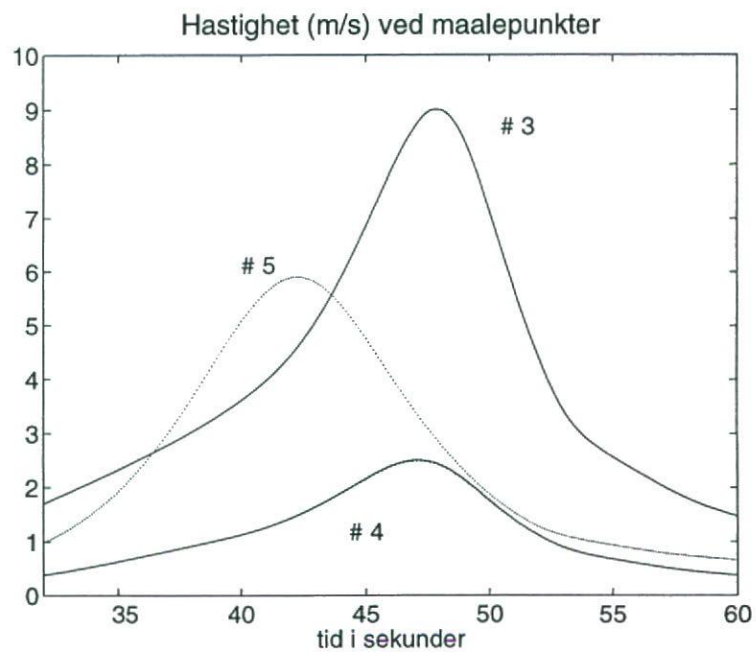


Figur 4.3: Skisse som viser målepunktene for hastighet for huset med 45° takvinkel

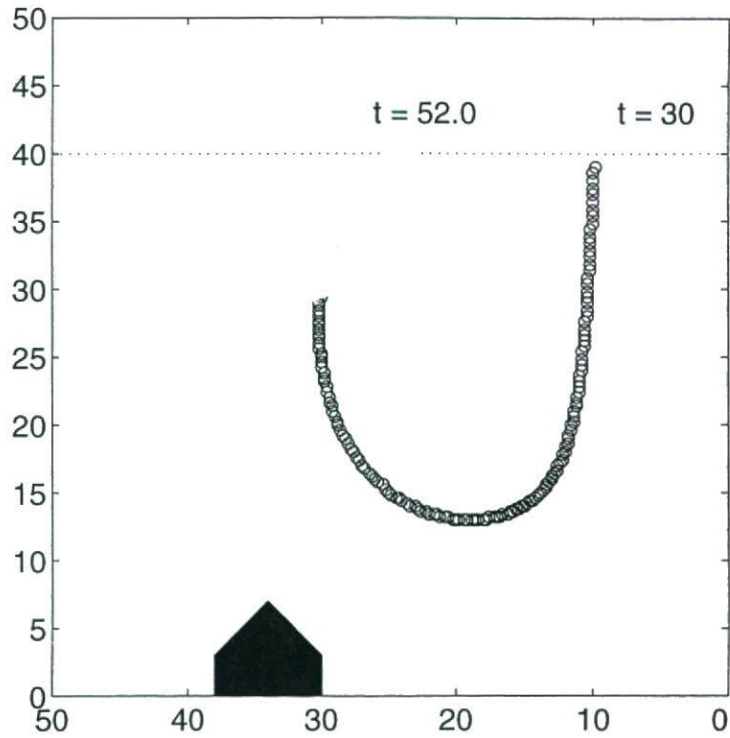
Det er vanskeligere å forutse hvordan virvelen vil oppføre seg når det er en hindring i veien slik som et hus. De faste rendene som husveggene representerer opptrer som spillingsplan for “virtuelle virvler”, og den totale virvel-bevegelsen blir et resultat av interaksjonen med disse. Vi kan også forvente at det dannes en virvel på motsatt side av taket som resultat av virvelavløsning. Denne virvelen vil ha vorticity rettet motsatt av den primære virvelen.



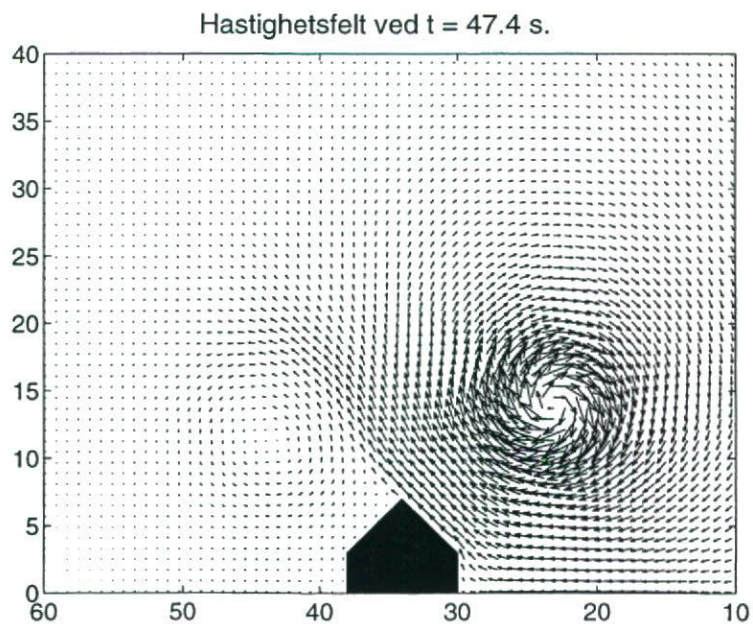
Figur 4.4: Hastigheter målt som funksjon av tiden i målepunkt 1 og 2 for huset med  $45^\circ$  takvinkel



Figur 4.5: Hastigheter målt som funksjon av tiden i målepunkt 3, 4 og 5 for huset med  $45^\circ$  takvinkel



Figur 4.6: Virvelens bane med et 7.5m høyt hus som hindring. Avstanden fra senterlinja til huset er 30m. Det settes opp en sekundær virvel og begge virvlene får en oppadrettet bevegelse



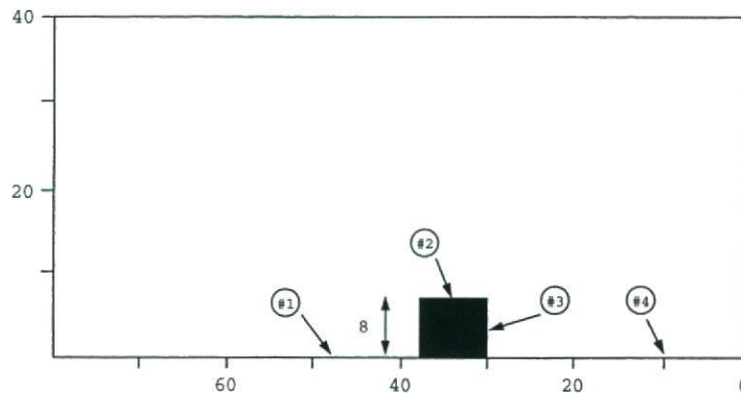
Figur 4.7: Hastighetsfelt ved tiden  $t = 47.4s$ , i det tidspunktet hvor virvelen er nærest hustaket, og påvirkningen er størst

Interaksjonen med denne vil gi dem samlet en oppadrettet, ja nesten vertikal bevegelse. Den avløste virvelen vil påvirkes av den primære virvelen som er den sterkeste. Den vil rotere med, og bli deformert. Det er vanskelig å anslå størrelsen på den vertikale bevegelses-komponenten. De riktige forhold aksesserer imidlertid i simuleringene. En kan forvente å få forskjellige resultater for et hus med  $45^\circ$  takvinkel sammenlignet med et hus med flatt tak, noe som også fremgår av simuleringene.

Det er "utplassert" 5 målepunkter for huset med  $45^\circ$  takvinkel slik som vist i figur 4.3. Tidsutviklingen av vindhastighetene i disse målepunktene er vist i figur 4.4 og i figur 4.5. Som et resultat av tilstedeværelsen av huset får virvelen en oppadstigende bevegelse. Påvirkningen på le side av huset blir minimal som indikert ved hastighetene i figur 4.4. Den sterkeste påvirkningen skjer på lo side av huset, her blir de høyeste vindhastighetene opp mot 10m/s som vist i figur 4.5.

Hastighetsfeltet i det den primære virvel er nærmest huset, er vist i figur 4.7. Ved tiden  $t = 47.4s$  er hastigheten i målepunkt 3 størst. Den primære virvel er dominerende på figuren. Samtidig genereres et sterkt vind-skjær over hustaket i forlengelsen av taket og det settes opp en sekundær virvel på lo side. Påvirkningen fra virvelene vil etter dette avta idet de stiger oppover. Ved  $t = 66s$  har den primære virvelen nådd en høyde på ca 30m, og den beholder fremdeles mye av sin koherens. Den sekundære virvel er strukket kraftig ut ved dette tidspunkt grunnet "straining" fra den primære virvelen.

### 4.3 Vortex-utvikling ved tilstedeværelsen av et hus med flatt tak



Figur 4.8: Plassering av målepunkter for hastighet for huset med flatt tak

For å se på effekten av takvinkel på vortex-dynamikken, plasserte vi et hus, 8m høyt, med flatt tak, 30m fra senterlinja for innflyvningen. Ellers var alt som for huset med  $45^\circ$  takvinkel. Målepunktene for hastigheter var plassert som vist i figur 4.8

Det oppstår nå også en virvel-avløsning over taket, og et betydelig hastighets-skjær ved lo tak-hjørne, nesten som for huset med  $45^\circ$  takvinkel. Skjæret blir i dette tilfellet nesten vertikalt rettet og sterkere enn for  $45^\circ$  tilfellet. Den sekundære virvel blir generert nærmere

primær-virvelen enn i 45° tilfellet, se figur 4.11. Resultatet blir at den primære virvel får en enda sterkere oppadrettet bevegelse sammenlignet med 45° tilfellet. Den primære virvel snur tidligere og dens minste avstand til huset blir større enn i 45° tilfellet. Dens påvirkning på huset blir også svakere, kanskje med unntak av hjørnene hvor vindhastigheten likevel er stor. Midt på hustaket blir vindhastigheten liten. Figurene 4.9 og 4.10 viser tidsutviklingen av hastigheten i målepunktene i figur 4.8. Vi ser at de maksimale vindhastighetene i målepunktene er mindre for huset med flatt tak enn for huset med 45° takvinkel. Det flate taket blir sterkt "skjermet" for vind. Den maksimale hastigheten midt på taket blir ca 1m/s. Følgelig kan vi forvente et langt lavere skade-potensiale for et flatt tak sammenlignet med et skrått tak.

#### 4.4 Vortex-utvikling ved tilstedeværelsen av hus med flatt og skrått tak

Vi har etter spesiell anmodning fra Luftfartsverket, foretatt en simulering hvor et hus med takvinkel 45° er plassert 30m fra senterlinja for innflyvning, og et hus med flatt tak er plassert midt under senterlinja. Dette tilsvarer et transverselt snitt som vi finner ca 1900m fra nedslagspunktet på rullebanen. Figur 4.13 viser den geometrien som er benyttet i simuleringen. Denne konfigurasjonen skal beskrive det huset hvor det er rapportert mest nedfall av takstein. Plasseringen av den flate bygningen midt under senterlinja, fører til at vortexens bane blir litt høyere enn for tilfellet 4.2, dvs hus med takvinkel på 45° alene. Figur 4.14 viser tidsutviklingen av vindfeltet i målepunktene på huset. Den maksimale vindstyrken er omtrent den samme som i tilfellet 4.2.

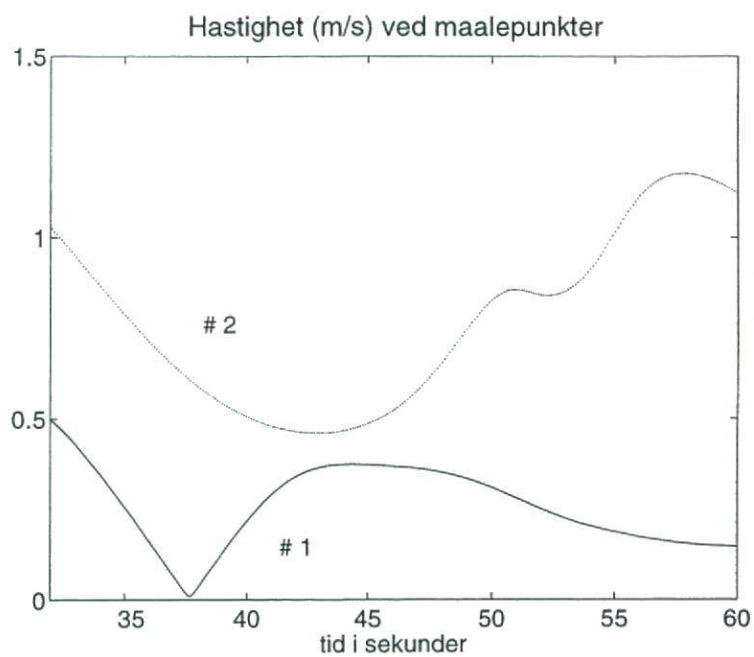
## 5 VURDERING AV USIKKERHETER

Det er usikkerhet forbundet med våre simuleringer. Observasjoner viser at fly-genererte vortex-par, har turbulente kjerner. Målte Reynolds-tall for fly-genererte vortex-par ligger i området  $10^7$ . Dette er langt høyere enn hva som kan oppnåes gjennom en direkte numerisk simulering slik som vi har foretatt. En Navier-Stokes løser vil i 2D kunne fange opp Reynolds-tall på kanskje  $10^5$ . En Navier-Stokes løser basert på praktiske Reynolds-tall vil underestimere styrken i de sekundære og mindre virvler i det turbulente grensesjiktet over hustaket, og følgelig underestimere de kreftene vi er ute etter å kvantifisere.

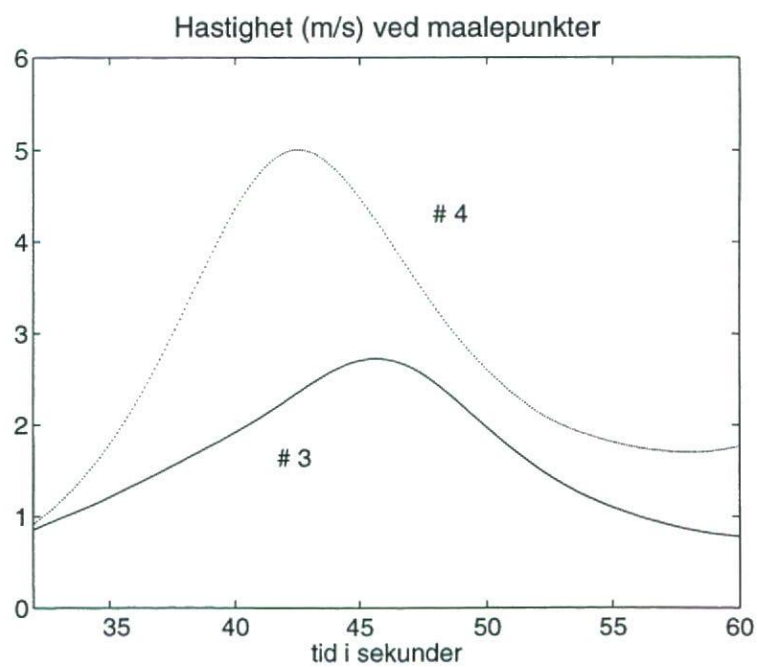
En annen fremgangsmåte ville være å benytte en "Large-Eddy-Simulation" (LES) kode til undersøkelsen. I LES fremkommer ikke den detaljerte dynamikken, og effektene av luftstrømmen nær takene ville være vanskelige å kvantifisere i detalj.

Vi har benyttet CLAWPACK til simuleringene. CLAWPACK inkluderer ikke viskositet, og kan derfor ikke gi en god beskrivelse av grensesjikt. CLAWPACK vil dempe oscillasjoner som opptrer på de aller fineste skalane, og trolig forsterke dynamikken på litt større skalaer. Derfor blir trolig de estimerte vindstyrker noe overestimerte, hvilket kan være en fordel for vurderingen av et eventuelt skadeomfang.

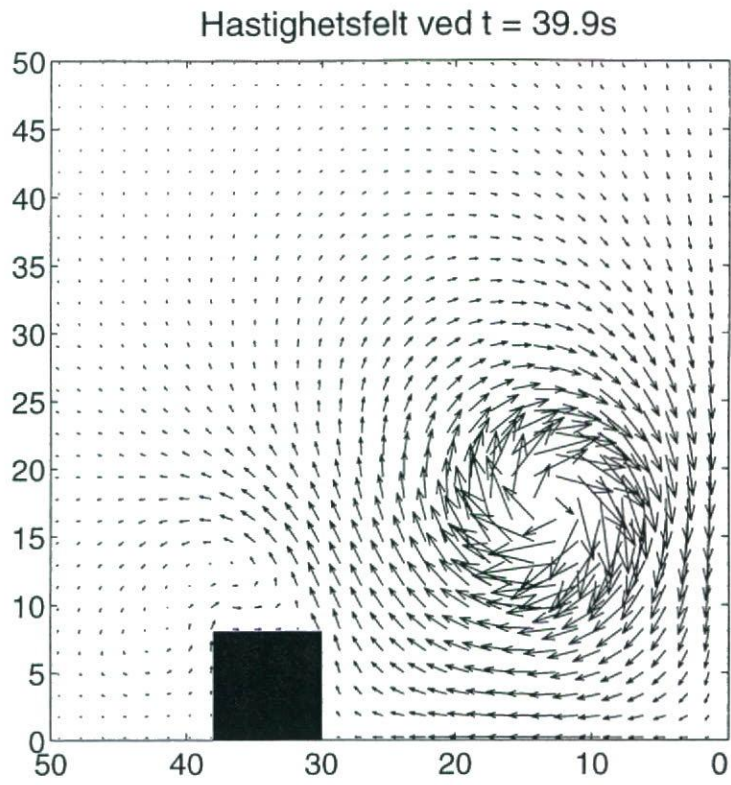




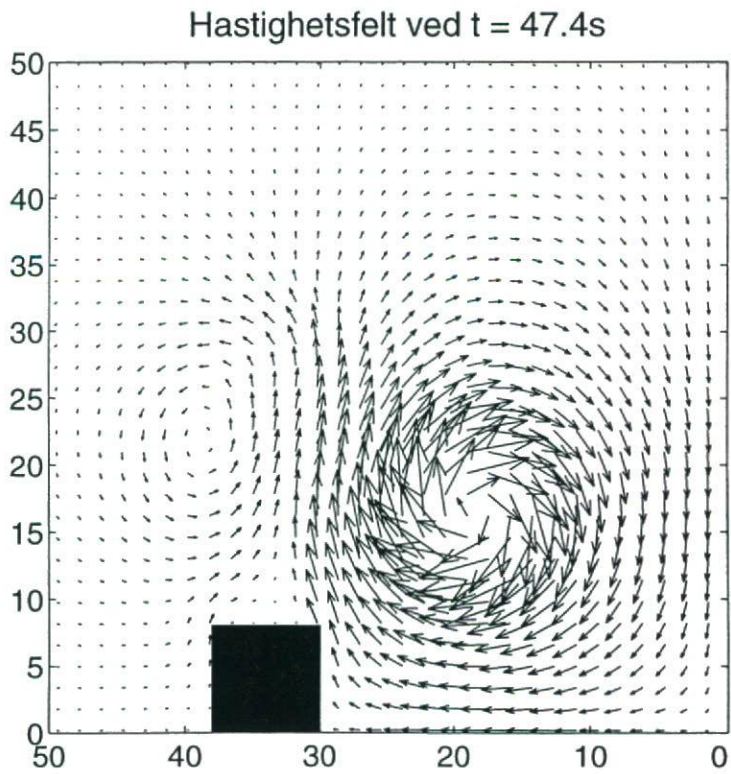
Figur 4.9: Tidsutviklingen av hastigheter i angitte målepunkter for huset med flatt tak



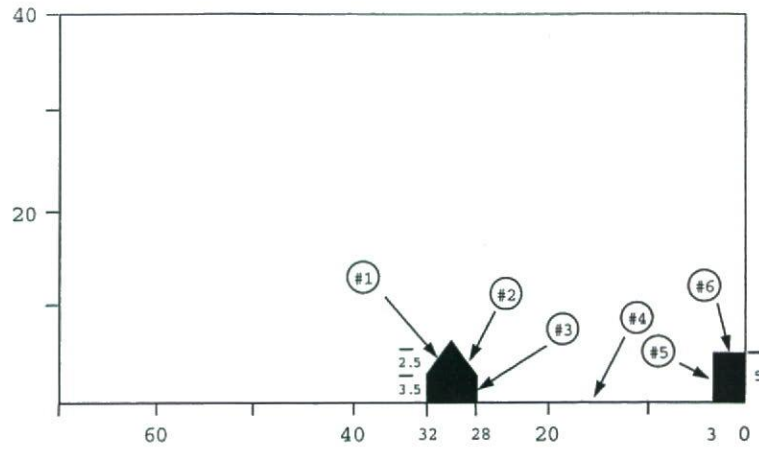
Figur 4.10: Tidsutviklingen av hastigheter i angitte målepunkter for huset med flatt tak



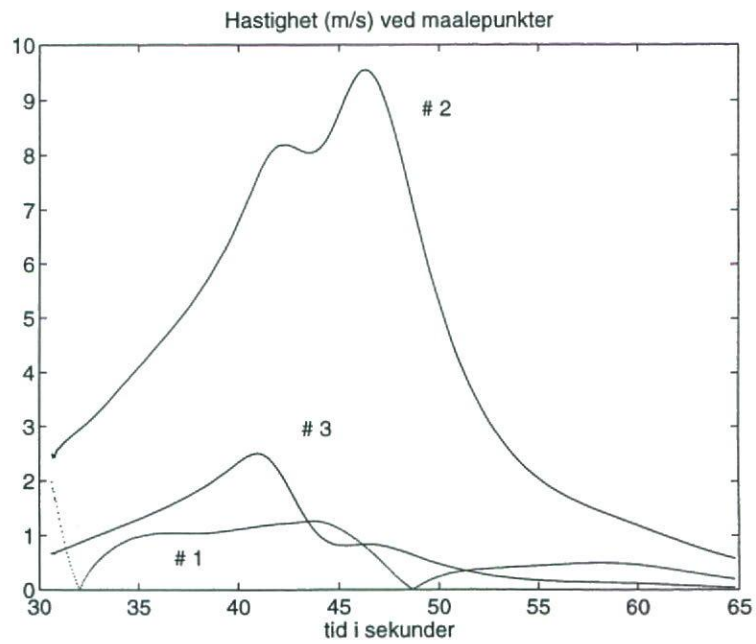
Figur 4.11: Hastighetsvektorer i tilfellet hus med flatt tak ved tiden  $t = 39.9s$ .



Figur 4.12: Hastighetsvektorer i tilfellet hus med flatt tak ved tiden  $t = 47.4s$ .



Figur 4.13: Plassering av målepunkter fra simuleringen som inkluderer hus med flatt og med skrått tak



Figur 4.14: Hastigheter målt som funksjon av tiden i målepunkt 1, 2 og 3 for tilfellet med flatt og skrått tak

Våre simuleringer er foretatt kun i 2D. Det er noe usikkerhet forbundet ved 2D modelleringer. For frittliggende hus på flatt terreng, er det å forvente at en vortex vil følge bakken utenfor huset, i vortexens lengderetning. Den delen av vortexen som treffer huset vil bli løftet opp. Dette er en 3D effekt, og en nøyaktig kvantifisering krever 3D simuleringer. Det er likevel mulig å foreta et grovt overslag over den vorticity-økningen som i dette tilfellet blir et resultat av vortex-strekking. En typisk høydeforskjell med og uten hus for vortex-banen vil kunne være 5m. Som grunnlag for denne påstanden, benytter vi resultatene fra våre 2D simuleringer med og uten hus. Et 20m langt vortex segment vil strekkes til 30m, og dette vil kunne gi en økning i vorticity og i tangentiell hastighet trolig opp mot 50%, men sannsynligvis ikke høyere.

Variierende luftfuktighet og luft-tetthet vil trolig ikke være av noen stor betydning for problemet. Hvis luft-tettheten øker, vil den fly-genererte sirkulasjonen og følgelig vortex-styrken være mindre enn når tettheten er lavere. Flyet blir mer "effektivt", (se uttrykket 1.1). Men dette vil trolig balanseres av at økt tetthet vil føre til større hydrodynamisk påvirkning på de strukturer som vindfeltene kommer i kontakt med. Tilsvarende for lavere tetthet. Ved lav temperatur vil tettheten være høyest, ved høy temperatur vil tettheten være lavere.

## 6 KONKLUSJON

Vi har simulert den dynamiske utviklingen av fly-genererte virvler og estimert vindhastigheter fra disse i nærheten av hus. Vi har forsøkt å generere virvler som ligner de man kan forvente fra et B-737 fly under landing. Vi har også benyttet det faktum at fly-genererte virvler endres lite i et tidsrom på et til to minutter etter at flyet har passert. Våre simuleringer viser at det potensielt kan oppstå størst skade på taket til et hus som er plassert med mønet parallelt med innflyvningens senterlinje, og som har stor takvinkel. Som uttrykk for skade-potensial benytter vi simulerte vindhastigheter nær taket. Maks-hastigheten i virvlene som vi har benyttet i simuleringen var 25m/s. Vi har benyttet en takvinkel på 45° for "huset med stor takvinkel". Vi fant likevel ganske beskjedne vindhastigheter, disse var i underkant av 10m/s.

Virkningen på flatt tak med unntak av hjørnene, var mye mindre, med vindhastigheter på ca 1m/s. De trykkforskjeller som vi målte i nærheten av hustakene var i alle tilfeller så små at de ligger ned mot grensen av hva modellen kan uttrykke, så konsekvensen av disse ble ikke analysert. Det var tidlig et håp om at disse kunne benyttes til direkte å estimere krefter, men vi vurderte at oppløsningen i modellen ikke var tilstrekkelig til å gi noe sikker kvantitativt svar for krefter. Dette ville uansett være spekulativt uten en beskrivelse av grensesjiktet.

For en "plan åpen slette" vil vindpåvirkningen være aller størst, her målte vi hastigheter opp mot 15m/s i en avstand på 50m fra senterlinja for fly-traséen.

Vi fant at det vortex-genererte vindfeltet hadde størst virkning om huset ligger 30m eller noe lenger fra senterlinja.

Vi har ikke fulgt virvlene lenger enn 50m fra senterlinja, og vi kan kun spekulere på hva som skjer ettersom de beveger seg lenger utover. Vi forventer at ujevnheter på bakken og eventuelle konvektive strømmer, vil føre til at vortex'ene raskt mister sin koherens og styrke og at de i en avstand på mer enn 80m fra senterlinja vil gå i oppløsning samtidig som de lett blir advektert oppover.

Vi konkluderer med at vortex'er generert av B-737 og mindre fly, under normale landingsforhold, ikke vil forvolde særlig skade på hus i innflyvningstraséer slik som til Kjevik flyplass. De maksimale vindhastigheter som vi finner nær hustak, er kun opp mot 10m/s som altså tilsvarer frisk bris/liten kuling. Hus hvor mønet er rettet langs innflyvningstraséen blir sterkest påvirket. Med tillegg for et eventuelt vortex-strekk, oppnår vi 15m/s. Vi presiserer at det er usikkerheter forbundet ved våre resultater, og at en eventuell avbrutt landing, hvor flyet utsettes for en akselersajon på 2g, vil kunne generere vinder kanskje opp mot 20m/s som tilsvarer stiv kuling/liten storm.

De som er interesserte i å laste ned vortex-animasjoner, kan hente disse på internett, se [6].

**Referanser**

- [1] S. C. Crow. Stability theory for a pair of trailing vortices. *AIAA Journal*, 1970.
- [2] D. P. Delisi. Measured vortex strengths caused by a B-737 aircraft. Private communication.
- [3] D. P. Delisi, G. C. Greene, R. E. Roberts, and R. Singh. Recent laboratory and numerical trailing vortex studies. In *The characterisation & modification of wakes from lifting vehicles in fluids*, AGARD-CP-584, pages 34–1, 7 Rue Ancelle, 92200 Neuilly-sur-Seine, France, 1996. Advisory group for aerospace research & development.
- [4] J. F. Garten. *An investigation of the effect of environmental stratification and shear on the evolution of vertically-propagating vortex pairs*. PhD thesis, Faculty of the graduate school of the University of Colorado, Department of Physics, 1997.
- [5] R. LeVeque. Wave propagation algorithms for multi-dimensional hyperbolic problems. *J. Comput. Phys.*, 131:327, 1997.
- [6] Get mpeg files kjevik1.mpg, . . . , kjevik4.mpg from <ftp://ftp.ffi.no/spub/stsk/oya>.
- [7] P. G. Saffman. *Vortex Dynamics*. Cambridge Monographs on Mechanics and Applied Mathematics, 1995.
- [8] P. R. Spalart and A. A. Wray. Initiation of the crow instability by atmospheric turbulence. In *The characterisation & modification of wakes from lifting vehicles in fluids*, AGARD-CP-584, pages 34–1, 7 Rue Ancelle, 92200 Neuilly-sur-Seine, France, 1996. Advisory group for aerospace research & development.