



EINGEGANGEN

25. Nov. 2013

Stadt Flörsheim am Main

Fraport AG - 60547 Frankfurt (Brielepost) - 60549 Frankfurt (Paketpost)

Herrn Bürgermeister
Michael Antenbrink
Bahnhofstraße 12
65439 Flörsheim am Main

Telefax E-Mail
-49561070 t.lurz@fraport.de

Ihr Zeichen

Unser Zeichen
RAV-AU tl-mw

Telefon
+49 69 690 -61070

Datum
22.11.2013

Gutachten des DLR über Wirbelschleppen im Zusammenhang mit Schadensmeldungen bei Anflügen auf den Flughafen Frankfurt Main

Sehr geehrter Herr Antenbrink,

anlässlich unseres gemeinsam mit Herrn Bürgermeister Jühe geführten Gesprächs am 01.11.2013 hatten wir Ihnen den aktuellen Stand unseres Vorsorgeprogramms Dachsicherung und wesentliche Ergebnisse aus dem Entwurf des vom Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) erstellten Gutachtens über Wirbelschleppen im Zusammenhang mit Schadensmeldungen bei Anflügen auf den Flughafen Frankfurt Main vorgestellt.

Wie angekündigt, dürfen wir Ihnen das nunmehr ausgefertigte Gutachten vom 18.11.2013, welches wir auch im Rahmen laufender Verfahren beim Hessischen Verwaltungsgerichtshof einreichen werden, übersenden. Das Gutachten stützt unsere bisherige – auch mit Ihnen abgestimmte – Vorgehensweise einer fachlich fundierten Sicherung von Dacheindeckungen. Wir werden weiterhin zügig und unbürokratisch unser Vorsorgeprogramm Dachsicherung umsetzen.

Mit freundlichen Grüßen

Fraport AG

ppa:

Dr. P. Prumm

i. V.

Th. Lurz

Fraport AG
Frankfurt Airport
Services Worldwide
60547 Frankfurt/Main
Telefon +49 69 690-0
Telefax +49 69 690-70081
info@fraport.de
www.fraport.de

Sitz der Gesellschaft:
Frankfurt/Main
Amtsgericht Frankfurt/Main
HRB 7042

USt-IdNr.: DE 114150623

Vorsitzender des Aufsichtsrates:
Hess. Minister der Finanzen a.D.
Karlheinz Weinmayr

Vorstand:
Dr. Stefan Schulte
(Vorsitzender)
Anke Giesen
Michael Müller
Peter Schmitz
Dr. Matthias Zieschang

Commerzbank AG:
S.W.I.F.T./BIC DRESDEFF
BLZ 500 800 00, Kto. 330000600 EUR
IBAN DE34 5008 0000 0330 0006 00
BLZ 500 800 00, Kto. 330000602 USD
IBAN DE77 5008 0000 0330 0006 02

Deutsche Bank AG:
S.W.I.F.T./BIC DEUTDEFF
BLZ 500 700 10, Kto. 2008407 EUR
BLZ 500 700 10, Kto. 2008407 USD
IBAN DE44 5007 0010 0200 8407 00
Frankfurter Sparkasse:
S.W.I.F.T./BIC HELADEF1822
BLZ 500 502 01, Kto. 36814
IBAN DE05 5005 0201 0000 0368 14

Landesbank Hessen-Thüringen:
S.W.I.F.T./BIC HELADEF1
BLZ 500 500 00, Kto. 14690002 EUR
IBAN DE09 5005 0000 0014 6900 02
BLZ 500 500 00, Kto. 964333603 USD
IBAN DE24 5005 0000 0964 3336 03



Deutsches Zentrum
DLR für Luft- und Raumfahrt

Gutachten
über Wirbelschleppen im Zusammenhang mit
Schadensmeldungen bei Anflügen auf die Landebahnen
07R, 07C, 07L und 25R des Flughafens Frankfurt Main

Dr. Thomas Gerz & Dr. Frank Holzäpfel

Institut für Physik der Atmosphäre
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Oberpfaffenhofen

18. November 2013

Gutachten über Wirbelschleppen im Zusammenhang mit Schadensmeldungen bei Anflügen auf die Landebahnen 07R, 07C, 07L und 25R des Flughafens Frankfurt Main

Untersucht werden etwaige Auswirkungen von Wirbelschleppen, die von Flugzeugen (Luftfahrzeugen, LFZ) im Anflug auf die Bahnen 07R, 07C, 07L und 25R des Flughafens Frankfurt zwischen dem 20.10.2011 und dem 16.04.2013 sowie am 08.06.2013 erzeugt wurden, auf von Eigentümern gemeldete Einzelschäden an Gebäuden. Darüber hinaus beziehen wir in allgemeiner Form auch Stellung zur Gefährdung von Personen, Gebäuden und Flugzeugen durch Wirbelschleppen von Verkehrsflugzeugen.

1 Was sind Wirbelschleppen?

Als unvermeidbare Konsequenz des Auftriebs erzeugt jedes Flugzeug (LFZ) hinter seinen Tragflächen ein Paar gegensinnig rotierender und langlebiger Wirbel – die so genannte Wirbelschleppe. Die Wirbelschleppe bildet sich an den Spitzen der Flügel und Klappen hinter dem Flugzeug. Bild 1 links zeigt einen der ansonsten unsichtbaren Wirbel, der hier vom DLR-Forschungsflugzeug ATTAS, einer VFW614, beim Durchstarten am Flughafen Braunschweig erzeugt und durch roten Rauch sichtbar gemacht wurde. Bild 1 rechts zeigt in einem Schnitt senkrecht zur Flugrichtung die entsprechende Strömung verursacht durch beide Wirbel.

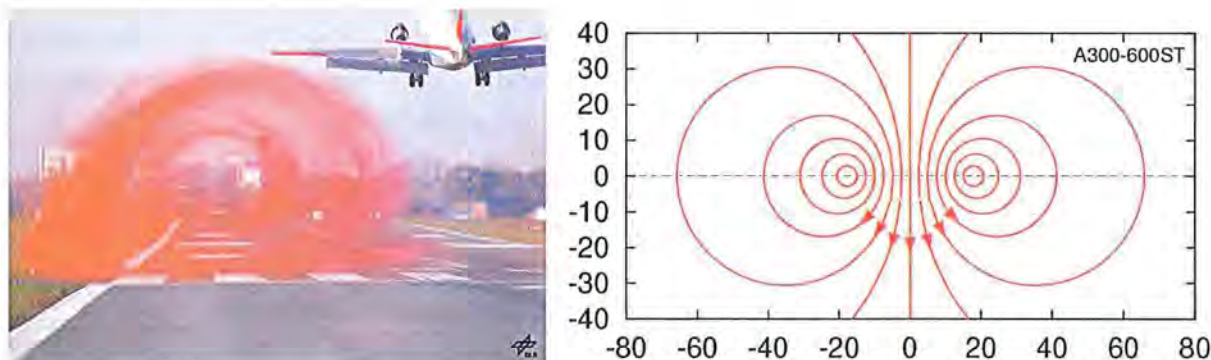


Bild 1. Sichtbarmachung eines Wirbels durch Rauch (links)
und momentane Struktur der Wirbelschleppe (rechts); Abmessungen in Meter.

Im Wirbelzentrum ist die Geschwindigkeit null und nimmt nach außen bis zum sog. Kernradius (proportional zum Abstand vom Wirbelzentrum) zu. Außerhalb des Wirbelkerns nimmt die Geschwindigkeit wieder kontinuierlich (und zwar umgekehrt proportional zum Abstand vom Wirbel) ab (Bild 2 links). Bild 2 rechts zeigt zusätzlich in blau die Geschwindigkeitsverteilung des linken Wirbels. In rot sind die Geschwindigkeiten der beiden Wirbel zur resultierenden Geschwindigkeitsverteilung der Wirbelschleppe überlagert. Man erkennt, dass zwischen den Wirbelzentren die Geschwindigkeiten (im sog. *downwash*) nach unten gerichtet sind. Außerhalb der Wirbelzentren zeigen die Geschwindigkeiten (im sog. *upwash*) nach oben. Bild 2 rechts erklärt außerdem, warum die Wirbelschleppe absinkt: Jeder Wirbel erfährt in seinem Zentrum durch seinen Nachbarwirbel eine nach unten gerichtete Geschwindigkeit W , die der Sinkgeschwindigkeit des Wirbelpaares entspricht. Die nach unten gerichtete Geschwindigkeit W wächst mit der Stärke der Wirbel (Zirkulation Γ) und ist umso kleiner, je größer der Abstand b der Wirbel voneinander ist.

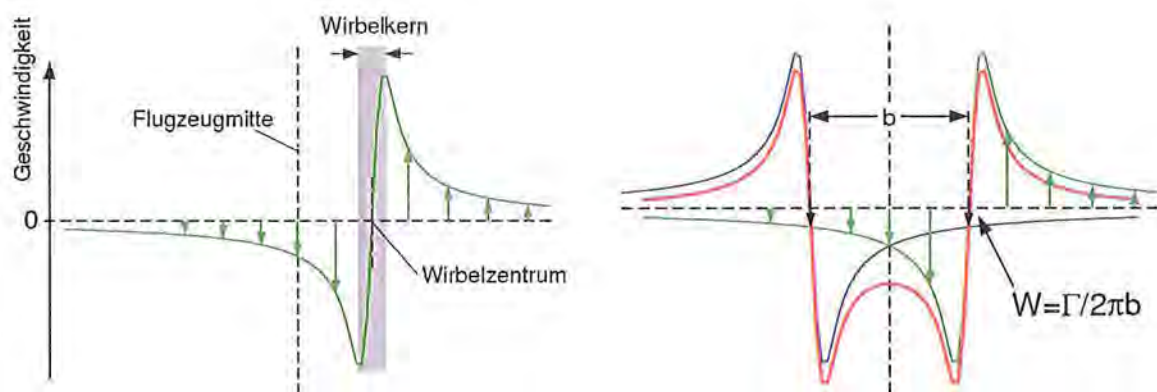


Bild 2. Geschwindigkeitsverlauf durch den rechten Wirbel (links) und die gesamte Wirbelschleppe (rechts in rot).

Die Zirkulation Γ der Wirbel folgt direkt aus dem Auftrieb, den das Flugzeug erzeugen muss, um zu fliegen: Je schwerer es ist, umso mehr Auftrieb muss es erzeugen und umso stärker ist die Intensität der Wirbel; umgekehrt wird der benötigte Auftrieb reduziert, wenn das Flugzeug schneller fliegt oder eine größere Spannweite hat, also ist die Stärke der Wirbel umso kleiner je größer die Fluggeschwindigkeit und Flügelspannweite eines LFZ sind. Schließlich spielt noch die Dichte der Luft eine Rolle: je dichter die Luft umso größer der Auftrieb, also reduziert eine größere Luftdichte ebenfalls die Zirkulation der Wirbel.

Transport und Zerfall der Wirbel werden maßgeblich durch die umgebende Atmosphäre bestimmt. Die durch eigenen Antrieb absinkende Wirbelschleppe wird gleichzeitig durch den sie umgebenden Wind verdriftet. Da die Windgeschwindigkeiten der Atmosphäre nicht gleichförmig sind, werden die beiden Wirbel entsprechend deformiert (Bild 3).

Die Lebensdauer der Wirbel hängt vor allem von der Turbulenz der Atmosphäre aber auch von der Temperaturverteilung (Schichtung) der umgebenden Luft ab. Bild 4 zeigt die zeitliche Abnahme der Wirbelstärke Γ für verschieden starke Turbulenz der Atmosphäre. Je älter die

Wirbel umso mehr geht die in Bildern 1 und 2 gezeigte Struktur verloren: die Geschwindigkeiten werden geringer und zunehmend regellos; am Ende sind sie von atmosphärischer Turbulenz nicht mehr zu unterscheiden.

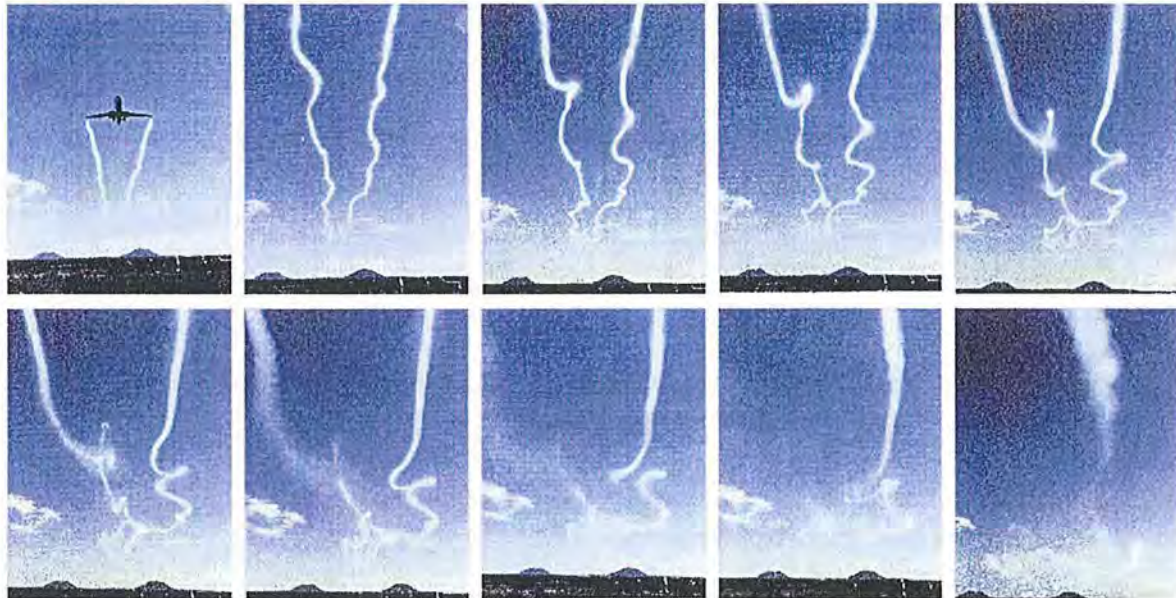


Bild 3. Durch Rauch sichtbar gemachte deformierte Wirbelschleppen (Foto: NASA).

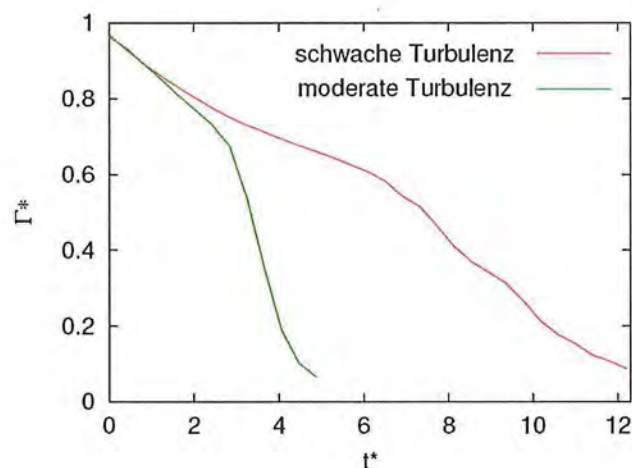


Bild 4. Abnahme der (normierten) Wirbelstärke Γ^* mit der (normierten) Zeit t^*
für geringe und moderate Turbulenz, typischer Wert für t^* ist 30 s.

Der Einfluss des Bodens trägt ebenfalls zum Zerfall bei: In Bodennähe sinken die Wirbelzentren in der Regel bis auf den halben Abstand der Wirbel zum Boden ab und laufen dann seitlich weg. Durch die Wechselwirkung mit dem Boden entstehen zusätzliche kleinere Wirbel, die zum einen zum Wiederaufsteigen der Hauptwirbel führen (Bild 5), zum anderen aber auch den Zerfall beschleunigen.

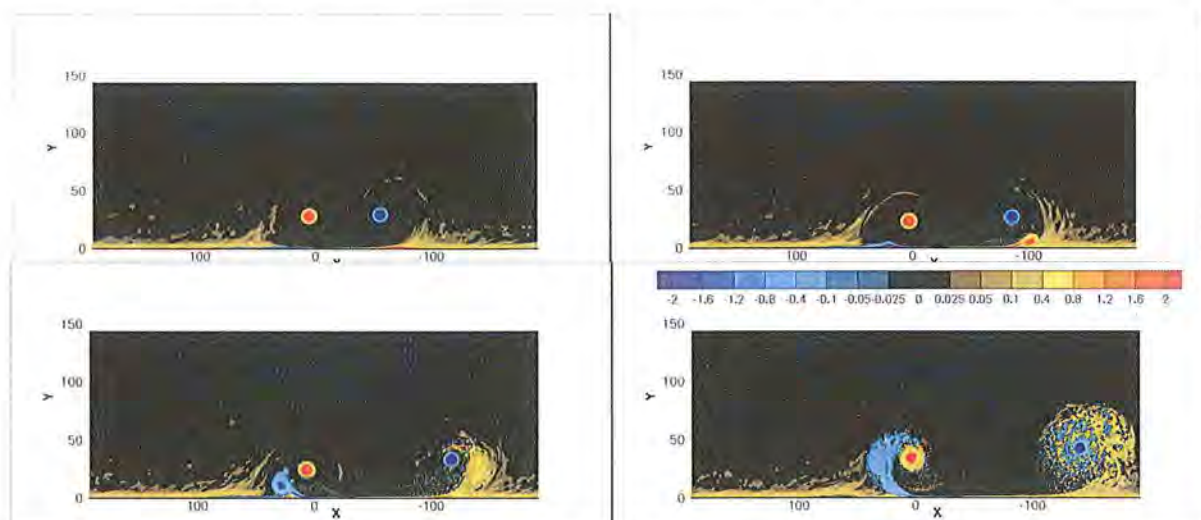


Bild 5. Sequenz des Verhaltens der Wirbelschleppe bei Annäherung an den Boden und Querwind
(Quelle: Anton Stephan, DLR).

2 Berechnung der Wirbelschleppe

Das Verhalten der Wirbelschleppen kann in Abhängigkeit der Flugzeugparameter und der meteorologischen Einflüsse berechnet werden. Aufgrund des Zufallscharakters sowohl der atmosphärischen Turbulenz als auch der Wirbelströmung selbst sind jedoch brauchbare Berechnungen oder Vorhersagen nur im Sinne von Wahrscheinlichkeitsaussagen möglich. Solche Berechnungen werden typischerweise mit sog. parametrischen Modellen erstellt. Zur Ermittlung der Absinkhöhe, des lateralen Transports und des Zerfalls der Wirbelschleppen verwenden wir unser im Rahmen der DLR-Projekte *Wirbelschleppe* und *Wetter & Fliegen* entwickeltes parametrisches Wirbelschleppenmodell P2P (für *probabilistic 2-phase wake vortex model*)¹. P2P berechnet obere und untere Grenzen für die vertikale und laterale Position sowie die Zirkulation der Flugzeugwirbel unter Berücksichtigung der Flugzeugparameter und der Umgebungsparameter Wind, Turbulenz, Temperaturschichtung und dem Einfluss des Bodens. Das probabilistische Vorhersagekonzept berücksichtigt die natürliche Variabilität der Entwicklung der Wirbelschleppe, die hauptsächlich in der stochastischen Natur der turbulenten Atmosphäre begründet ist.

Zunächst berechnet die deterministische Variante D2P des Modells Transport und Zerfall der Wirbelschleppe in einer zwei-dimensionalen Ebene (quer zur Flugrichtung und vertikal) unter Verwendung von Gewicht, Flügelspannweite und Geschwindigkeit des LFZ sowie dessen Position, Höhe über Grund und Neigung des Flugweges. D2P berücksichtigt ferner die den Transport und Zerfall der Wirbel kontrollierenden meteorologischen Parameter. Dies sind die

¹ Holzäpfel F. 2003: Probabilistic Two-Phase Wake Vortex Decay and Transport Model. *J. Aircraft* **40**, No. 2, 323-331.

Holzäpfel F., Robins R.E. 2004: Probabilistic Two-Phase Aircraft Wake-Vortex Model: Application and Assessment. *J. Aircraft* **41** Nr. 5, 1117-1226.

Holzäpfel F. 2006: Probabilistic Two-Phase Aircraft Wake-Vortex Model: Further Development and Assessment, *J. Aircraft* **43** No. 3, 700-708.

vertikalen Profile von Gegenwind, Querwind, vertikaler Luftbewegung, Windscherung, Turbulenz und potentieller Temperatur (thermische Schichtung). Die zwei-dimensionale Ebene wird mit dem Gegenwind verfrachtet. Kommt die Wirbelschlepe in die Nähe des Bodens (ab halbem anfänglichen Wirbelabstand über Grund) werden auch die Spiegel- und Sekundärwirbel berechnet und deren Auswirkung auf die primäre Wirbelstruktur behandelt. Die Berechnungen mit D2P geben in etwa den Mittelwert der zu erwartenden Wirbelentwicklung wieder.

Mit der probabilistischen Komponente P2P werden dann die Unsicherheiten und Abweichungen vom deterministischen Verlauf der Wirbelschleppenentwicklung berücksichtigt. Kenntnisse über den Charakter und das Ausmaß der Unsicherheiten wurden durch hochgenaue numerische Simulationen (sog. *large-eddy simulations*, LES) und durch Messkampagnen an Flughäfen gewonnen. Die Unsicherheitszuschläge für einen konkreten Fall werden durch zwei weitere Berechnungen mit unterschiedlichen festen und dynamischen Unsicherheitsparametern ermittelt. P2P verwendet in seiner Prognose von Wirbelposition und -stärke Sicherheitsmargen, die 95,4% bzw. 99,7% der beobachteten Fälle abdecken. Diese Margen der in der Wissenschaft üblichen zwei- und dreifachen Standardabweichung wurden anhand von Messungen kalibriert. Die Ungenauigkeiten der Flugspurdaten und Abweichungen vom ILS-Pfad sind in der Regel so gering, dass sie nicht gesondert berücksichtigt werden.

Die niedrigste Absinkhöhe der deterministischen Modellprognosen liegt bei etwa 60% des anfänglichen Wirbelabstands, b_0 , wobei ein anfänglicher Wirbelabstand sich zu $\pi/4 \approx 0,785$ der Spannweite errechnet. Da die Wirbel in der atmosphärischen Grenzschicht häufig stark deformiert werden, können einzelne Wirbel oder Wirbelsegmente deutlich tiefer absinken. Dies wird durch die probabilistischen Unsicherheitszuschläge berücksichtigt, die anhand von Messungen am Flughafen Frankfurt² kalibriert wurden. Bei zwei Standardabweichungen (95,4%) liegt die geringste Absinkhöhe bei etwa $0,5 b_0$ und bei drei Standardabweichungen (99,7%) bei etwa $0,3 b_0$, also etwa 14 m für eine A340-300. Da die Anzahl der Messungen am Flughafen Frankfurt nur begrenzt Aussagen über selten auftretende Absinktiefen erlaubt, kann hier angenommen werden, dass in Fällen, in denen die äußerste Einhüllende der Wirbelprognosen bis auf etwa $0,3 b_0$ an den Boden reicht, die Wirbel mit einer nicht genau spezifizierten Wahrscheinlichkeit auch auf Dächer treffen können.

P2P wurde anhand umfangreicher wissenschaftlicher theoretischer und praktischer Untersuchungen entwickelt und in zehn Feldmesskampagnen in Europa und den USA mit weit über 10.000 Landungen verifiziert. Damit können die probabilistischen Prognosen durchaus als belastbar betrachtet werden. Mit keinem anderen Wirbelschleppenmodell existieren derartig umfangreiche Tests.³ Wie immer ist die Prognosegüte von der Qualität der Eingangsdaten abhängig. Hier werden die besten verfügbaren Eingangsdaten genutzt. Moderate Unsicherheiten in den LFZ-Parametern ändern die Prognose nur geringfügig, da z.B. eine erhöhte Masse

² Diese Messungen wurden 2004 im Rahmen des DLR-Projektes *Wirbelschlepe II* am NE-Ende des Parallelbahnsystems in Frankfurt durchgeführt. Siehe Holzäpfel, F., Steen, M. 2007: Aircraft Wake-Vortex Evolution in Ground Proximity: Analysis and Parameterization, AIAA Journal, Vol. 45, No. 1, pp. 218-227.

³ Dies wurde beispielsweise auf dem *Specific WakeNet Workshop "Operational Wake Vortex Models"* am 7./8. 11. 2011 an der Université Catholique de Louvain (UCL) festgestellt, <http://www.wakenet.eu/index.php?id=183>

zwar die anfängliche Wirbelstärke (Zirkulation) und Sinkgeschwindigkeit erhöht, gleichzeitig aber die Lebensdauer reduziert; beide Größen kontrollieren die maximale Absinktiefe der Wirbelschleppe gegenläufig. Andererseits können die meteorologischen Bedingungen im Einzelfall nicht unerheblich von den verwendeten zeitlichen und räumlichen Mittelwerten abweichen, was sich dann auch auf die Güte der Prognose auswirkt.

Die P2P-Prognosen erlauben also letztlich lediglich Aussagen über die Plausibilität, ob ein Schadensereignis tatsächlich auf Wirbelschleppen zurückzuführen ist. Mit einer Berechnungszeit unter 0,01 s auf einem Standard PC kann P2P für reale Anwendungen wie Wirbelschleppenprognosen an Flughäfen eingesetzt werden. Weiterhin wird das Modell auch in Schnellzeit- und Realzeitsimulationen von Wirbelschleppenbegegnungen, in der Risikoanalyse und in experimentellen Wirbelschleppenprognose- und Wirbelschleppenvermeidungssystemen im Flugzeug und am Boden eingesetzt.

3 Potentielle Gefährdungen für Flugzeuge bzw. Objekte und Personen am Boden

Die potentielle Gefährdung von Flugzeugen durch Wirbelschleppen rührt daher, dass diese in einen der Wirbel, die vom voraus oder darüber fliegenden LFZ erzeugt wurden, einfliegen können. Im ungünstigsten Fall kann ein nachfolgendes Flugzeug direkt in das Zentrum eines Wirbels einfliegen (Bild 6), wo es die maximalen Rollmomente und somit die größte Gefährdung erfährt. Die Drehbewegung des LFZ um seine Längsachse (das Rollen) ist dabei umso größer je größer die Stärke des Wirbels ist, ausgedrückt durch die Zirkulation (vergleichbar einem Drehmoment, also "angreifende Geschwindigkeit * Hebelarm", Einheit m^2/s). Um dieser Gefahr vorzubeugen, hat die ICAO horizontale Mindestabstände zwischen zwei LFZ festgelegt.

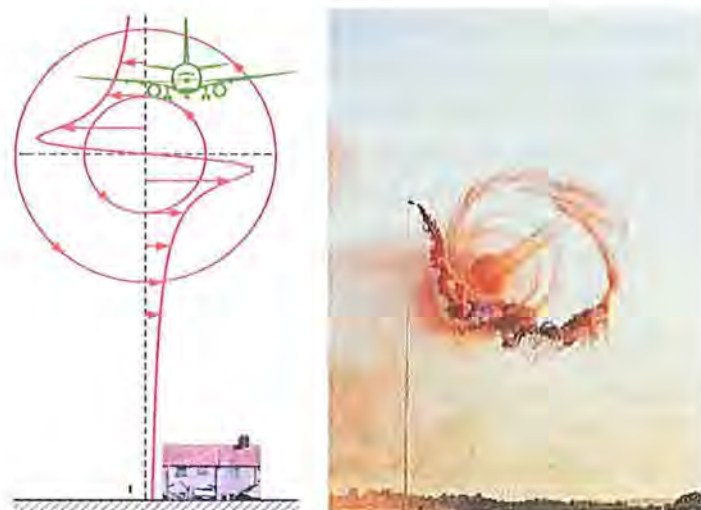


Bild 6. Links: Skizze zur Verdeutlichung der Wirkung einer Wirbelschleppe auf einfliegende LFZ bzw. Personen und Objekte am Boden. Die annähernd maßstäbliche Darstellung zeigt den von einem großen LFZ in 50 m über Grund erzeugten Wirbel, ein einfliegendes LFZ mit 30 m Flügelspannweite und eine 1,8 m große Person neben einem Haus. Rechts: Wirbelsichtbarmachung durch Vorbeiflug an einem Mast mit Rauchgenerator (NASA), zur Verdeutlichung der Skizze links.

Wie Bild 6 ebenfalls verdeutlicht, ist für die Gefährdung von Personen oder Objekten am Boden entscheidend, wie weit sich der Wirbel dem Boden annähert. Eine mögliche Gefährdung von Personen oder Objekten am Boden resultiert aus der durch den Wirbel dort induzierten Geschwindigkeit (plus atmosphärischem Wind) und dem im Wirbelkern herrschenden Unterdruck. Die maximalen Geschwindigkeiten treten am Rand des Wirbelkerns auf (Bild 2), der maximale Unterdruck im Zentrum des Wirbelkerns. Um Ziegel anzuheben, muss der Wirbel so tief absinken, dass der Wirbelkern das Hausdach berührt.

Wirbelschleppen großer Flugzeuge können je nach meteorologischer Situation bis zu 300 m, im Einzelfall auch tiefer absinken, bevor sie zerfallen. Falls das Flugzeug in etwa dieser Höhe oder tiefer fliegt, können die Wirbel also den Boden erreichen. Im Mittel sinken die Wirbel allerdings nur bis etwa den halben Abstand ihrer Wirbelzentren zum Boden (beispielsweise sind das bei der B757 etwa 15 m, da bei einer Spannweite von 40 m die Wirbelzentren 30 m auseinander liegen). Gelegentlich können Teile der Wirbelschleppe durch Deformation auch tiefer absinken, dann erreichen die Wirbelkerne auch Dächer von eingeschossigen Gebäuden. Deshalb können beim Überfliegen von Hausdächern in Höhen bis zu etwa 300 m (ohne nennenswerten Gegenwind, Landeanflug) kleinteilige und nicht spezifisch gesicherte Dacheindeckungen durch die Wirbel aus ihrem Verbund gelöst werden.

Der Wirkungsbereich – i.e. die Zone unter dem Anflugweg und quer dazu, der durch Wirbelschleppen erreicht werden kann – wird wesentlich durch den natürlichen Wind und die Turbulenz bestimmt. Beim Landeanflug führt Gegenwind dazu, dass Wirbelschleppen, die bis zu Hausdächern absinken können, tatsächlich in geringerer Höhe als der Überflughöhe über diese Dächer erzeugt werden. So können in seltenen Fällen (angesichts der großen Anzahl von Landungen) auch Schäden an Hausdächern auftreten, die in größerer Höhe als 300 m überflogen werden.

Ebenso verfrachtet Querwind die Wirbel seitlich quer zur Anflugrichtung. Je stärker der Wind (mit Gegen- und Querwindkomponenten) umso weiter werden die Wirbelschleppen längs gegen die Anflugrichtung und seitlich quer dazu verfrachtet. Gleichzeitig wird mit zunehmendem Wind auch die Turbulenz stärker, die die Lebensdauer der Wirbel reduziert (Bild 4). Diese gegenläufigen Effekte der Advektion der Wirbel durch den Wind und des beschleunigten Zerfalls der Wirbel durch Turbulenz neutralisieren sich also teilweise. Die entsprechenden physikalischen Abläufe und Abhängigkeiten werden im P2P-Modell berücksichtigt.

Bezüglich der zeitlichen und räumlichen Charakteristika ist eine Wirbelschleppen-Bö einer Wind-Bö ähnlich. Allerdings herrscht im Wirbelkern ein Unterdruck, der den Unterdruck bei weitem übersteigen kann, der durch das schnelle Überströmen z.B. eines Daches erzeugt wird. Die z.B. aus London Heathrow berichteten Schadensfälle lassen erkennen, dass die Ziegel durch den Unterdruck im über das Dach streichenden Wirbelkern angehoben und aus dem Verbund gelöst werden und dann wieder auf das Dach zurückfallen. Die Rotation des Wirbels kann auch dazu führen, dass die Ziegel gedreht werden. Durch die Wechselwirkung mit dem Dach wird der Wirbel selbst gestört und der Unterdruck nimmt zeitlich schnell ab, so dass Spuren herausgelöster Ziegel eine gewisse Länge nicht überschreiten (Bild 7). Der Unterdruck ist auch über den Querschnitt des Wirbels nicht konstant, sondern nimmt vom Wirbel-

zentrum zum Wirbelrand hin rasch ab. Deshalb ist der Wirbel nicht in der Lage, Ziegel über eine größere Distanz zu transportieren.

Die durch Wirbelschleppen an Hausdächern verursachten Schäden werden weltweit an sehr vielen Flughäfen beobachtet. Während einer 27-monatigen Beobachtungsperiode an Häusern in der Einflugschneise des Flughafens London Heathrow dokumentiert Blackmore⁴ 714 Schäden an Dächern. 70% der Schäden wurden bei Umgebungswindgeschwindigkeiten unter 5 m/s (18 km/h), nur einer bei einem Wind von 10,4 m/s (37 km/h) und darüber überhaupt kein Schaden festgestellt. An einem 1.400 m von der Landebahnschwelle entfernten und nahezu direkt unter dem Flugweg liegenden Testgebäude wurden durch Drucksensoren durchschnittlich 1,5 Wirbelschleppen pro Tag gemessen. Bei einem Anflug unter 10.000 Anflügen hatten die Wirbel das Potential Ziegel aus ihrem Verbund zu lösen.



Bild 7. Von Wirbelschleppen verursachte Dachschäden an Häusern in der Einflugschneise des Flughafens London-Heathrow (aus Blackmore⁵).

Gebäude, die weiter von der Landebahnschwelle entfernt sind, werden weniger häufig getroffen. Generell gilt, dass umso mehr Flugzeugtypen Dachschäden durch Wirbelschleppen verursachen können, je näher die Gebäude an der Schwelle liegen.

Aus dem bisher Geschilderten wird deutlich, dass das Herauslösen von Ziegeln aus dem Verbund durch Wirbelschleppen ein seltenes Ereignis darstellt. Noch seltener kommt es vor, dass die gelösten Ziegel das Dach ein Stück herunterrutschen, die Dachkante erreichen und (falls keine Schneefanggitter vorhanden sind oder der Ziegel nicht von der Regenrinne aufgefangen wird) vom Dach fallen. Als ein extrem seltenes Ereignis ist es anzusehen, dass sich genau in dem Moment eines vom Dach fallenden Ziegels eine Person dort aufhält und durch den Ziegel verletzt wird. Uns sind weltweit keine Schäden an Personen durch herabfallende Ziegel (oder andere Objekte), die von Wirbelschleppen gelöst wurden, bekannt.

Ebenso sind uns keine Schäden an Personen bekannt, die auf die direkte Einwirkung der Wirbelschleppe auf die Person zurückzuführen wären. Sehr selten kommt es vor, dass der Wirbel

⁴ Blackmore P.A. 1994: The effect of aircraft trailing vortices on house roofs. *J. Wind Engin. Ind. Aerodyn.* **52**, 155-170.

⁵ Blackmore P.A. 2002: Slate and tile roofs: avoiding damage from aircraft wake vortices. *Digest* **467**, 12 pp.

den Boden erreicht. Da hohe und somit potentiell gefährliche Geschwindigkeiten nur in einem kleinen Bereich um den Rand des Wirbelkerns auftreten, und weil der Wirbel schnell verfliegt, nachdem er Kontakt mit dem Boden hatte, ist dieses Phänomen räumlich und zeitlich sehr begrenzt und damit die Wahrscheinlichkeit, dass sich an dieser Stelle gerade eine Person aufhält, äußerst gering. Die gleiche Schlussfolgerung gilt auch für Kanuten auf dem Main.

4 Analyse der zwischen dem 20. 10. 2011 und dem 16. 04. 2013 sowie am 08. 06. 2013 von Eigentümern gemeldeten Einzelschäden an Gebäuden

39 Meldungen über Schäden an Gebäuden/Dächern, möglicherweise verursacht durch Wirbelschleppen (WS) landender Flugzeuge, liegen uns seit der Inbetriebnahme der nordwestlichen Bahn in Frankfurt am 20. Oktober 2011 bis zum 16. April 2013 vor. Hinzu kommt eine 40. Meldung am 8. Juni 2013. Davon geben 20 Meldungen einen Zeitraum des Schadenseintritts an, der eng genug ist, um Überflüge (Flugspuren der LFZ) und meteorologische Bedingungen relativ genau zuordnen zu können. Diese 20 Fälle sind im Folgenden gelistet und ihre Lage in einer Karte (Bild 8) dargestellt. Die Höhe, in der die LFZ die geschädigten Gebäude überflogen, ist in allen 20 Fällen größer als etwa 250 m über Grund (ermittelt mit einem Anflugwinkel von 3° und dem aus den Flugspurdaten hervorgehenden Abstand der Objekte von der Landebahnschwelle, die in 15 m Höhe überflogen wird). Da die Absinktiefe der Wirbelschleppe mit der Spannweite des LFZ skaliert, können diese relativ großen Absinkhöhen üblicherweise nur von WS von LFZ der Klassen HEAVY oder SUPER (nach ICAO) überwunden werden. Zu beachten ist ferner, dass diese Bebauungen weiter von der Landebahnschwelle entfernt liegen und deshalb deutlich höher überflogen werden als die Siedlungsgebiete im oben genannten Fall am Flughafen London Heathrow.

- Überflughöhen Δh für die 20 Fälle, infrage kommende LFZ, Landebahn, Datum und Uhrzeit des Schadens und geographische Lage des Gebäudes:

5 Fälle mit $\Delta h < 300$ m:

# 9:	2 A346, 1 B764 (07L);	18.05.12, 11:30, 50°01'13.34"N, 8°25'45.13"E
# 13:	1 A346 (07L);	18.02.13, 15:10, 50°00'40.39"N, 8°27'35.57"E
# 16:	1 B77W, 1 B752 (07L);	05.04.13, 18:14, 50°01'07.94"N, 8°26'04.14"E
# 17:	1 B77W, 1 B752 (07L);	05.04.13, 18:14, 50°01'09.96"N, 8°26'04.46"E
# 20:	1 B77W (07L);	08.06.13, 17:05, 50°01'09.96"N, 8°26'04.46"E

11 Fälle mit $300 \text{ m} < \Delta h \leq 350$ m:

# 1:	1 A332, 1 A346, 1 B77W (07L);	31.10.11, 14:15, 50°01'11.56"N, 8°25'25.60"E
# 2:	2 B744, 1 B77L, 1 MD11 (07R);	11.11.11, 14:53, 50°00'41.41"N, 8°27'19.93"E
# 5:	4 B744, 1 B763 (07R);	03.03.12, 06:13, 50°00'50.51"N, 8°27'35.28"E
# 6:	2 A333, 1 A343, 1 B744 (07R);	03.03.12, 05:05, 50°00'48.46"N, 8°27'23.96"E
# 7:	1 B744 (07C);	20.05.12, 20:06, 50°00'31.07"N, 8°27'34.09"E
# 8:	1 B744 (07C);	20.05.12, 20:06, 50°00'38.23"N, 8°27'32.22"E
# 11:	1 A343 (07R);	19.06.12, 19:30, 50°00'20.13"N, 8°27'09.06"E
# 12:	1 A343, 2 A388, 1 B744, 1 MD11 (07R);	
	1 A333, 1 B744 (07C);	18.08.12, 05:30, 50°00'41.51"N, 8°27'15.65"E
# 14:	1 B744, 1 MD11 (07R);	06.03.13, 19:20, 50°00'38.20"N, 8°27'33.73"E
# 18:	1 A306, 1 B77L (07L);	06.04.13, 18:45, 50°00'52.69"N, 8°25'08.26"E

19: 1 A388, 1 B744, 1 B748 (07R); 06.04.13, 18:23, 50°00'21.46"N, 8°27'18.42"E

4 Fälle mit $\Delta h > 350$ m:

3: 1 A346, 1 A333, B763 (25R); 06.01.12, 11:29, 50°04'39.58"N, 8°38'28.10"E

4: 1 B77W (07R); 28.01.12, 16:40, 50°00'05.62"N, 8°26'00.51"E

10: 1 A346 (07R) 23.05.12, 15:40, 50°01'00.10"N, 8°26'10.08"E

15: 1 A332, 2 B744, 1 B77W (07R); 31.03.13, 19:15, 49°59'48.75"N, 8°25'41.70"E

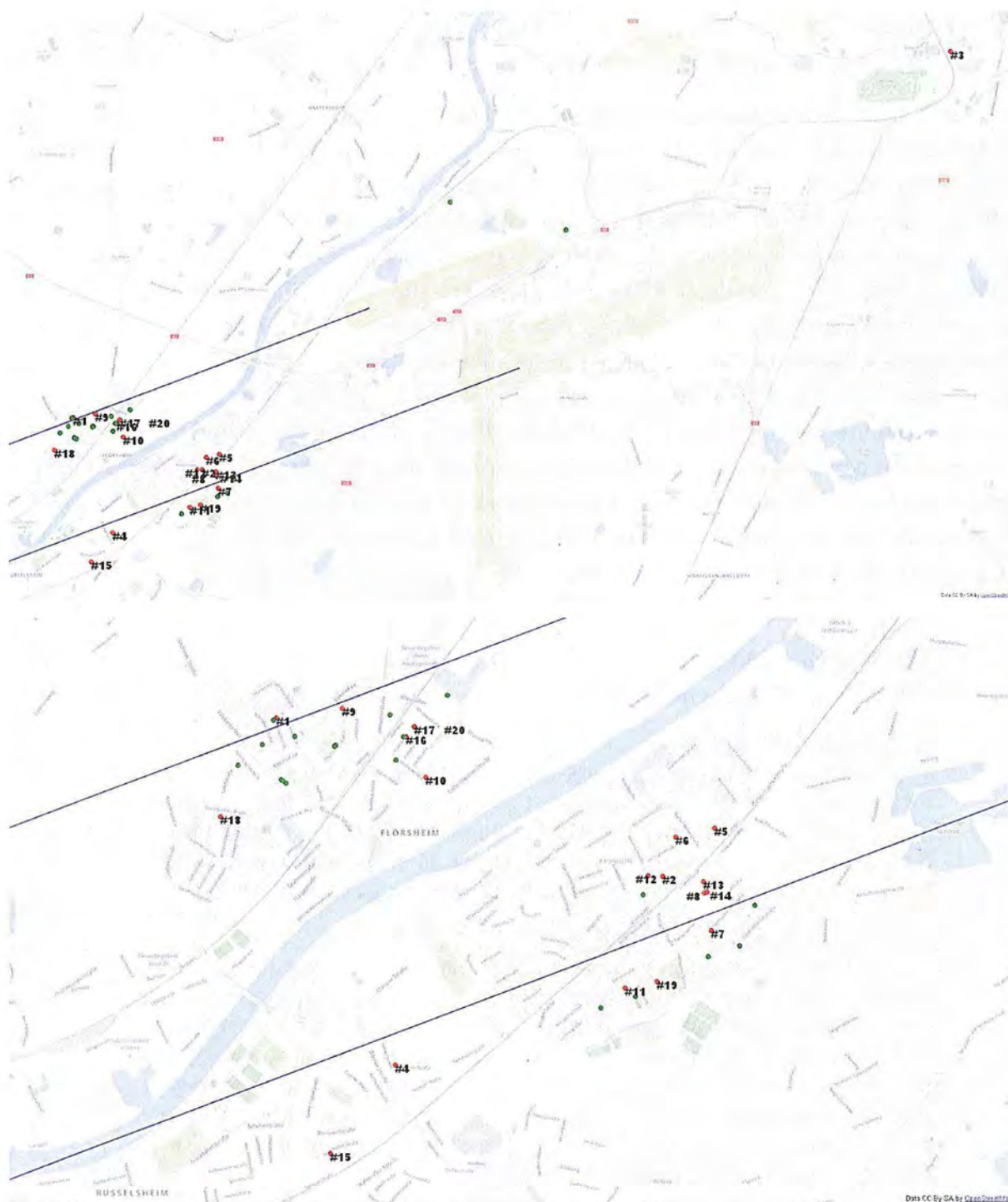


Bild 8. Lage der 20 analysierten Schadensereignisse in rot und nummeriert;
oben Übersicht, unten Detail im Südwesten.

Für alle 20 Fälle und alle infrage kommenden LFZ wurde mit dem Modell P2P (siehe Abschnitt 2) untersucht, ob die Schäden an den Hausdächern bei den zur jeweiligen Zeit vorherrschenden meteorologischen Parametern durch Wirbelschleppen verursacht worden sein können oder ob dies auszuschließen ist. Als Eingabegrößen benötigt P2P die Flugzeugparameter Masse, Spannweite und Anfluggeschwindigkeit (Tabelle 1), sowie die vertikalen Profile der horizontalen und vertikalen Windkomponenten, der Temperaturschichtung und ein Maß für die Turbulenz.

Tabelle 1: Verwendete Flugzeug- und Wirbelschleppen-Parameter; die Luftdichte wurde mit $1,17 \text{ kg/m}^3$ (Standardatmosphäre in 500 m Höhe über Meeresspiegel und Temperatur von $11,5^\circ\text{C}$) angenommen. Die Massen der landenden LFZ wurden konservativ mit dem maximalen Gewicht ohne Treibstoff (MZFW) plus einer Restmenge Kerosin von 5.000 kg abgeschätzt; die Anfluggeschwindigkeiten (TAS = True Air Speed) stammen aus der von Fraport zur Verfügung gestellten Tabelle „130425_Flugspurpunkte“ vom 07.05.13 (*ground speed*) und wurden um den vorherrschenden Gegenwind korrigiert.

LFZ-Typ	Landemasse	Spannweite	Anfluggeschwindigkeit	Wirbel-		
				Abstand	Zirkulation	Absinkgeschwindigkeit
	MZFW + 5t Fuel [10 ³ kg]	B [m]	TAS V [m/s]	b_0 [m]	Γ [m ² /s]	W [m/s]
A321	76,5	34,1	74-80	26,8	299-323	1,78-1,92
A300-600	135	44,8	75	35,2	429	1,94
A330-200	173	60,3	72-85	47,4	360-425	1,21-1,43
A330-300	178	60,3	66-88	47,4	358-477	1,20-1,60
A340-300	185	60,3	69-75	47,4	436-474	1,47-1,59
A340-600	250	63,5	77-87	49,8	484-547	1,55-1,75
A380-800	366	79,8	67-77	62,7	636-731	1,61-1,86
B757-200	88,5	38,1	67	29,9	370	1,97
B767-300	131	47,6	70-88	37,4	334-420	1,42-1,79
B767-400	154	51,9	74	40,8	428	1,67
B777-W/L	243	64,8	69-85	50,9	471-580	1,47-1,81
B747-400	251	64,4	70-82	50,5	508-595	1,60-1,88
B747-8	300	68,5	85	53,8	550	1,63
MD11 Cargo	209	51,7	75-78	40,6	553-575	2,17-2,26

Die meteorologischen Daten wurden aus Analysen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) extrahiert. Diese liegen stündlich im horizontalen Abstand von 2,8 km und vertikalen Abständen mit 10 m bis 100 m vor. Es wurde der den Schadenszeitpunkten nächstgelegene Analysezeitpunkt gewählt; ebenso wurde der nächstgelegene horizontale Gitterpunkt des Modells verwendet. Als turbulente Schwankungsgeschwindigkeiten wurden 5% des Betrages des horizontalen Windvektors angesetzt.

Die Ergebnisse der Berechnungen für jeden Fall sind im Anhang beschrieben und hinsichtlich der Frage analysiert und bewertet, ob die Wirbelschleppen der infrage kommenden LFZ bei der gegebenen meteorologischen Situation die Schäden an den Hausdächern verursacht haben könnten. Dabei wird abgestuft zwischen „plausiblen“, „bedingt plausiblen“ und „unplausiblen“ Ereignissen unterschieden. Eine eindeutige kausale Zuordnung ist nicht möglich, weil

dazu die Parameter des Flugzeuges aber vor allem die der Meteorologie nicht genau genug bekannt sind. Der Zuordnung liegen jedoch konservative Ansätze zugrunde.

Es sei darauf hingewiesen, dass mittels unseres Berechnungsmodells und der konservativen Parameter nur eingeschätzt werden kann, ob eine Wirbelschlepe überhaupt das betreffende Dach in noch nennenswerter Stärke treffen könnte. Ob der gemeldete Schaden tatsächlich durch eine Wirbelschlepe verursacht wurde, könnte anhand einer Begutachtung des konkreten Schadens durch Sachverständige des Dachdeckerhandwerks genauer beurteilt werden.

Bei unserer Bewertung wurde in Betracht gezogen, dass die meteorologischen Daten stündlich und auf einem horizontalen Gitter mit einer Gitterweite von 2,8 km vorliegen. Sie sind zwar für diese räumlichen und zeitlichen Skalen repräsentativ, können aber erfahrungsgemäß in der atmosphärischen Grenzschicht erheblich um diese Mittelwerte schwanken. Der tatsächliche Querwind kann sogar ein anderes Vorzeichen haben als in den Profilen ausgewiesen.

Die Kriterien für die Bewertung werden in folgender Reihenfolge abgearbeitet:

1. In welcher Zeitspanne transportiert der Gegenwind die Wirbel axial (entgegen der Flugrichtung) zum Haus ?
2. Reicht der Querwind aus, um die Wirbel in dieser Zeitspanne lateral zu verfrachten ? Hierbei sind die typischerweise starken Schwankungen der Profile von Gegen- und Querwind um die zugrunde gelegten Mittelwerte zu beachten.
3. Kommen die Wirbel in dieser Zeitspanne zum Boden ?
4. Sind sie dann höchstens moderat geschwächt ?

Bei diesen Kriterien handelt es sich um qualitative Kriterien, die keinen Rückschluss auf die Häufigkeit der beschriebenen Ereignisse und auch keinen Nachweis der Kausalität zwischen Schaden und Wirbelschleppen zulassen. Sind beispielsweise alle Kriterien erfüllt, spricht mehr für eine mögliche Verursachung einer Dachbeschädigung durch Wirbelschleppen als in dem Fall, in dem nicht alle Kriterien erfüllt sind und daher ein Ursachenzusammenhang stärker infrage zu stellen ist.

Wenn diese Kriterien also alle erfüllt sind, ist das „Ereignis plausibel“ (z.B. Fall 20 auf S. 20 des Anhangs). Diese Bewertung wird durch das Verhalten der beiden deterministisch berechneten Wirbel in Bodennähe (in den Abbildungen Höhe z über Zeit t des Anhangs rot und blau dargestellt) gestützt: In allen als plausibel eingestuften Fällen kommen die beiden Wirbel der Wirbelschlepe sogar im Mittel (deterministisch) in Bodenkontakt und steigen dann wegen der asymmetrischen Wirkung des Querwindes unterschiedlich weit wieder auf (siehe Bild 5).

Ein Fall wird mit „Ereignis bedingt plausibel“ bewertet, wenn die Wirbelschlepe nicht rechtzeitig oder zu schnell zur Position des Schadensfalls driftet, aber den Boden höchstens nur moderat geschwächt erreicht (z.B. Fall 9 auf S. 9 des Anhangs) oder wenn die Wirbel zwar in der fraglichen Zeit zum Hausdach driften und auch den Boden erreichen, aber in der deterministischen Berechnung die Wirbel schon so geschwächt sind, dass sie trotz Querwind kein asymmetrisches Verhalten zeigen (z.B. Fall 15 auf S. 15 des Anhangs).

Wenn die Wirbel den Boden zu spät oder gar nicht erreichen (z.B. aufgrund stabiler thermischer Schichtung, die oft persistent ist), ist das „Ereignis unplausibel“, auch wenn sonst alle weiteren Kriterien für ein Ereignis erfüllt sind (z.B. Fall 12, S.12 des Anhangs).

Wir fassen die Bewertungen aus dem Anhang hier wie folgt zusammen:

5 Fälle mit $\Delta h < 300$ m:

# 9:	2 A346, 1 B764 (07L);	Ereignis bed. plausibel, durch beide LFZ
# 13:	1 A346 (07L);	Ereignis bedingt plausibel
# 16:	1 B77W, 1 B752 (07L);	Ereignis plausibel, durch beide LFZ
# 17:	1 B77W, 1 B752 (07L);	Ereignis plausibel, durch beide LFZ
# 20:	1 B77W (07L);	Ereignis plausibel

11 Fälle mit $300 \text{ m} < \Delta h \leq 350$ m:

# 1:	1 A332, 1 A346, 1 B77W (07L);	Ereignis plausibel, durch alle 3 LFZ
# 2:	2 B744, 1 B77L, 1 MD11 (07R);	Ereignis plausibel, durch alle 3 LFZ
# 5:	4 B744, 1 B763 (07R);	Ereignis unplausibel
# 6:	2 A333, 1 A343, 1 B744 (07R);	Ereignis unplausibel
# 7:	1 B744 (07C);	Ereignis bedingt plausibel
# 8:	1 B744 (07C);	Ereignis bedingt plausibel
# 11:	1 A343 (07R);	Ereignis bedingt plausibel
# 12:	1 A343, 2 A388, 1 B744, 1 MD11 (07R);	
	1 A333, 1 B744 (07C);	Ereignis unplausibel
# 14:	1 B744, 1 MD11 (07R);	Ereignis unplausibel
# 18:	1 A306, 1 B77L (07L);	Ereignis plausibel, eher durch B77L
# 19:	1 A388, 1 B744, 1 B748 (07R);	Ereignis plausibel, durch alle 3 LFZ

4 Fälle mit $\Delta h > 350$ m:

# 3:	1 A346, 1 A333, B763 (25R);	Ereignis unplausibel
# 4:	1 B77W (07R);	Ereignis unplausibel
# 10:	1 A346 (07R) (Distanz > 1000 m);	(Ereignis unplausibel)
	2 A321 (07L) (Distanz ~ 580 m);	Ereignis unplausibel
# 15:	1 A332, 2 B744, 1 B77W (07R);	Ereignis bed. plausibel durch B744, B77W

In der Summe ergibt sich also: 7 x Ereignis unplausibel, 6 x Ereignis bedingt plausibel, 7 x Ereignis plausibel.

Die Analysen zeigen, dass es in 13 der 20 Fälle plausibel oder bedingt plausibel war, dass die Schäden durch Wirbelschleppen verursacht worden waren. Weiterhin ist nicht auszuschließen, dass beim Überfliegen von Hausdächern auch in Höhen über 300 m kleinteilige Dacheindeckungen bei einem Zusammentreffen ungünstiger Kombinationen von Flugzeugparametern und meteorologischen Bedingungen durch die Wirbel aus ihrem Verbund gelöst werden können. Solche Wirbel werden von Flugzeugen der ICAO-Klassen HEAVY und SUPER erzeugt.

Bei einer Sortierung nach meteorologischen Parametern fällt auf, dass 18 der 20 Fälle einen Gegenwind von mindestens 2 m/s, 8 Fälle sogar Gegenwinde von über 5 m/s zu verzeichnen hatten. 5 dieser 8 Fälle waren bedingt plausibel oder plausibel Ereignisse, bei denen die Höhe der Wirbelerzeugung bis 40 m unter der Überflughöhe lag. In 2 weiteren dieser 8 Fälle waren wegen der thermisch stabil geschichteten Grenzschicht Ereignisse unplausibel.

Insgesamt war in 10 Fällen die Grenzschicht stabil geschichtet, in 9 Fällen war sie neutral und in 1 Fall labil geschichtet. Von den 10 stabilen Fällen kamen in 4 (schwach stabilen) die Wirbel dennoch bis zum Boden und machten Ereignisse bedingt plausibel (3) oder plausibel (1). Lag die Stabilitätsfrequenz N aber über $0,014 \text{ s}^{-1}$, waren Ereignisse unplausibel (4 Fälle).

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Definition Wirbelschleppe:

- Zwei gegensinnig rotierende, langgestreckte horizontale Wirbel mit Wirbelkern und Wirbelaußenbereich.
- Die beiden Wirbel entstehen am Flugzeug und bewegen sich selbstinduziert langsam und gleichförmig nach unten.
- Am Rand der Wirbelkerne treten sehr hohe Windgeschwindigkeiten auf, die aber nur relativ geringe Luftmassen bewegen.
- Größere Luftmengen rotieren mit geringerer Geschwindigkeit um den Wirbelkern.
- Wirbelschleppen driften mit dem Wind (Gegen/Rückenwind und Querwind).

Wirkung von Wirbelschleppen auf Flugzeuge:

- Es gab Unfälle von Flugzeugen, bei denen Wirbelschleppen eine Rolle gespielt haben.
Lösung: sichere Mindestabstände einhalten

Wirkung von Wirbelschleppen auf Gebäude:

- Der Wirkungsbereich von Wirbelschleppen hängt von Wind und Turbulenz ab. Je stärker der Wind (mit Gegen- und Querwindkomponenten) umso weiter werden die Wirbelschleppen längs gegen die Anflugrichtung und seitlich quer dazu verfrachtet. Gleichzeitig zerfallen die Wirbel schneller mit zunehmendem Wind.
- Beim Überfliegen von Hausdächern auch in Höhen über 300 m können kleinteilige Dacheindeckungen unter ungünstigen Bedingungen durch die Wirbel aus ihrem Verbund gelöst werden. Der Wirkungsbereich wird dabei wesentlich durch den natürlichen Wind bestimmt.
- Das in Frankfurt beobachtete Schadensbild an Dacheindeckungen wird weltweit an sehr vielen Flughäfen beobachtet, üblicherweise allerdings bei geringeren Überflughöhen. Eine Untersuchung am Flughafen London Heathrow zeigt, dass dies (abhängig vom Abstand der Bebauung zur Landebahn) etwa bei einem aus 10.000 Anflügen geschieht.

Lösung: Sicherung der Ziegel

Wirkung von Wirbelschleppen auf Menschen:

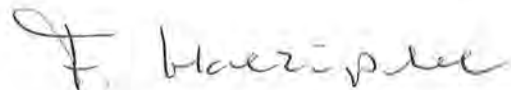
- Es sind uns keine Schäden an (nicht fliegenden) Personen bekannt, die direkt durch das Einwirken von Wirbelschleppen verursacht worden wären. Uns sind weltweit auch keine indirekten Schäden an Personen durch Wirbelschleppen bekannt (z.B. durch herabfallende Ziegel, die von Wirbelschleppen aus dem Verbund gelöst wurden).

- Wirbelschleppen von niedrig fliegenden Flugzeugen können am Boden als Windböen wahrgenommen werden. Gelegentlich kann man sie auch hören.
- Wir schlussfolgern, dass im Zusammenhang mit Wirbelschleppen Personenschäden am Flughafen Frankfurt nicht rein zufällig bisher nicht auftraten, sondern dies aus physikalischen Gründen ein so extrem seltenes Ereignis darstellt, dass es nach unserer Kenntnis auch weltweit noch nicht aufgetreten ist.

Oberpfaffenhofen, 18. November 2013



Dr. Thomas Gerz



Dr. Frank Holzäpfel



**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**

Anhang

zum Gutachten

**über Wirbelschleppen im Zusammenhang mit
Schadensmeldungen bei Anflügen auf die Landebahnen
07R, 07C, 07L und 25R des Flughafens Frankfurt Main**

Dr. Thomas Gerz & Dr. Frank Holzäpfel

Institut für Physik der Atmosphäre

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Oberpfaffenhofen

18. November 2013

Anhang

zum Gutachten

über Wirbelschleppen im Zusammenhang mit Schadensmeldungen bei Anflügen auf die Landebahnen 07R, 07C, 07L und 25R des Flughafens Frankfurt Main

Die folgenden Abbildungen enthalten für jeden Schadensfall aus Kapitel 4 des Gutachtens:

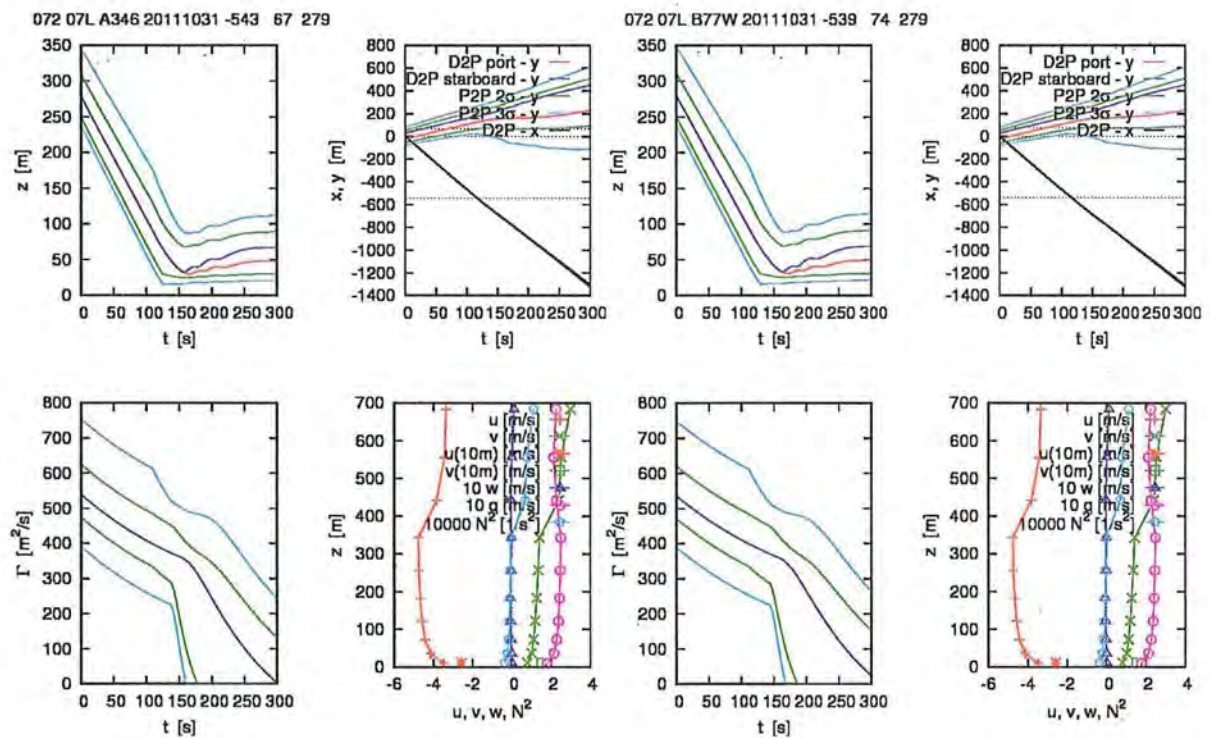
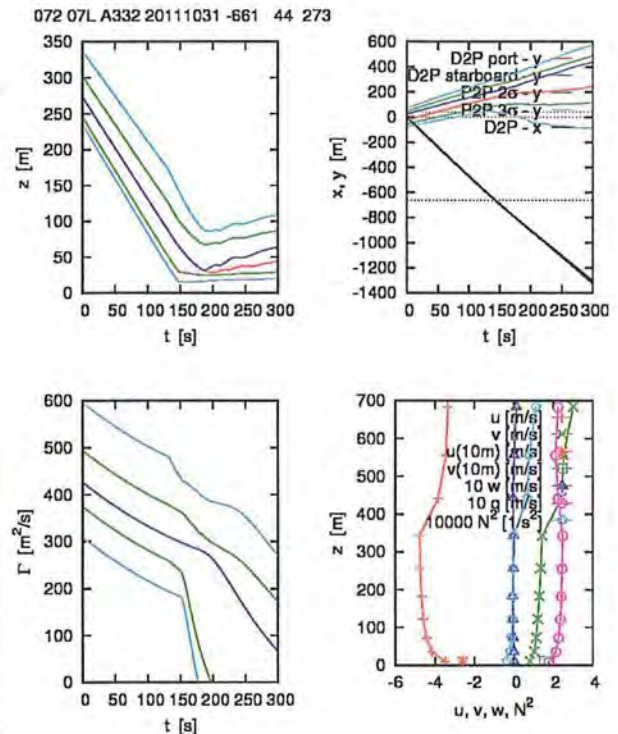
- die Fallbezeichnung mit Überflughöhe, infrage kommende LFZ (angeflogene Landebahn), Datum, Uhrzeit und Position des Schadens;
- ein Resümee des Ergebnisses;
- ein Bild der (blauen) Flugspuren von LFZ, die zum Schadensereignis (markiert durch roten Punkt) beigetragen haben könnten;
- die Ergebnisse der Berechnungen mit P2P/D2P für jeden infrage kommenden LFZ-Typ mit Titel und in vier Teilbildern:
 - Titel mit Fallnummer, Landebahn, LFZ-Typ, Datum, axiale, laterale und vertikale Position des LFZ in Bezug auf die Schadensposition in einem in Flugrichtung ausgerichteten Koordinatensystem; diese LFZ-Position gibt an, wo die Wirbelschleppe generiert wurde, die zum Schaden geführt haben soll; sie wird durch Iteration (Suche nach der zum axialen und lateralen Transport sowie zur Lebensdauer der Wirbelschleppe am besten passenden Position des Anflugs) gefunden;
Beispiel Fall 1: „-661 44 273“ heißt der Wirbel wurde in einem axialen Abstand von 661 m hinter dem Haus (nach dem Überflug) in einem lateralen Abstand von 44 m und einer Höhe von 273 m über dem Boden erzeugt;
 - Vertikale Position z der Wirbel gegen die Zeit;
 - Axiale, laterale Positionen x , y der Wirbel im Bezugssystem des LFZ gegen die Zeit; x negativ kennzeichnet die axiale Drift der Wirbelschleppe entgegen der Flugrichtung durch Gegenwind, y positiv kennzeichnet eine Drift der Wirbelschleppe nach links;
 - Zirkulation (Stärke) Γ der Wirbel gegen die Zeit;
für z , y und Γ gilt: rote/dunkelblaue Kurven sind D2P-Berechnung des linken/ rechten Wirbels (deterministisch), grüne / hellblaue Kurven sind P2P-Berechnungen der Einhüllenden mit Wahrscheinlichkeiten von 95,4 / 99,7% (vgl. Kap. 2 des Gutachtens);
 - Höhenprofile der meteorologischen Parameter im Bezugssystem des LFZ:
Axialwind u (negativ bei Gegenwind), Querwind v (positiv wenn von rechts wehend), Vertikalwind w (positiv bei aufsteigenden Luftmassen), turbulente Fluktuation q , Maß für die thermische Stabilität N^2 (negativ/positiv bei thermisch labiler/stabiler Schichtung, $N^2=0$ bedeutet neutrale Schichtung); ebenso sind die am Flughafen gemessenen Werte des Windes in 10 m Höhe, u , v (10 m), eingetragen¹; w , q und N^2 sind mit Zehnerpotenzen skaliert, um sie in der Graphik darstellen zu können.

iF / eF = in Flugrichtung („hinter dem Haus“) / entgegen der Flugrichtung („zum Haus hin“)

¹ Aus Tabelle „130423_Meteorologie_WebWerdis_final.xlsx“, von Fraport zur Verfügung gestellt

Fall 1: $\Delta h = 308$ m; 1 A332, 1 A346, 1 B77W (07L);
31.10.11, 14:15, 50°01'11.56"N, 8°25'25.60"E

Die Wirbel werden in einer Höhe von 273 bis 279 m erzeugt. Nach 110 bis 140 s hat der Gegenwind die Wirbel zum Haus transportiert; der pos. Querwind versetzt sie passend nach N; die Wirbel sind bis dahin zum Boden abgesunken und haben sich nur wenig abgeschwächt; Bodenwinde bestätigen in etwa Windprofil. Fazit: Ereignis durch alle drei LFZ plausibel.

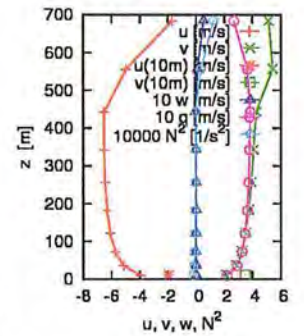
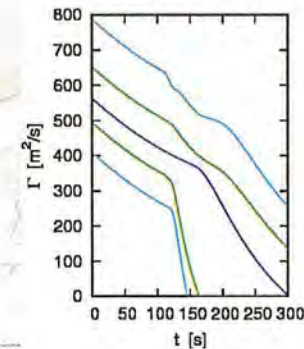
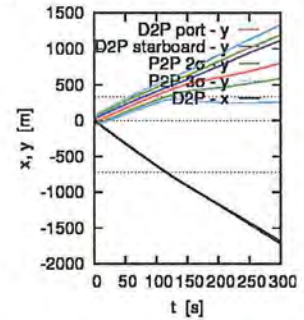
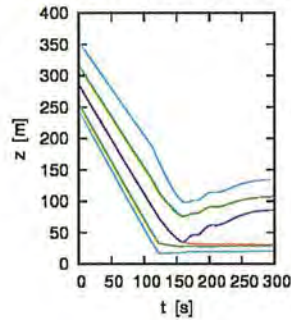


Fall 2: $\Delta h = 324$ m; 2 B744, 1 B77L, 1 MD11 (07R);
11.11.11, 14:53, 50°00'41.41"N, 8°27'19.93"E

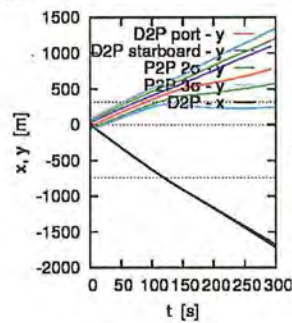
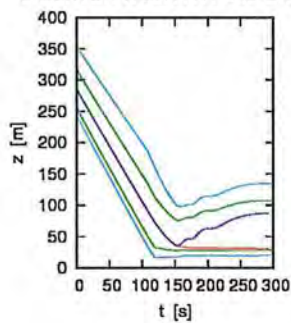
Die Wirbel werden in einer Höhe von 285 bis 295 m erzeugt. Nach 80 bis 120 s hat der Gegenwind die Wirbel zum Haus transportiert; der pos. Querwind versetzt sie passend nach N; die Wirbel sind bis dahin nur wenig geschwächt zum Boden abgesunken; Bodenwinde bestätigen die Vorzeichen des Windprofils.
Fazit: Ereignis durch alle drei LFZ plausibel.



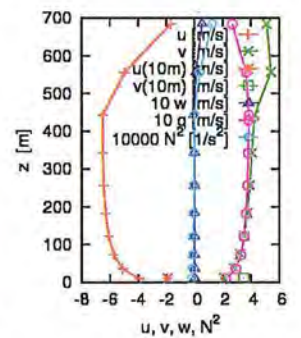
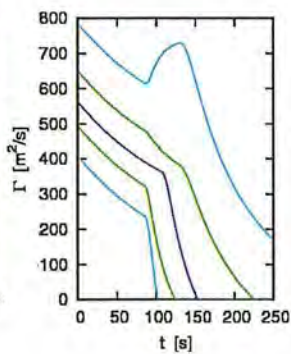
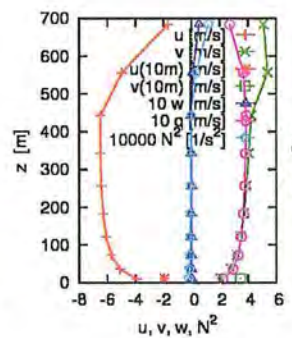
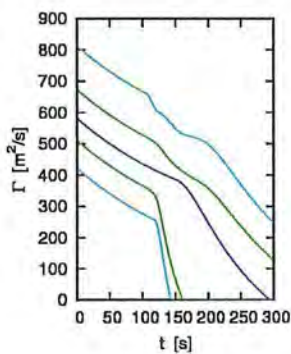
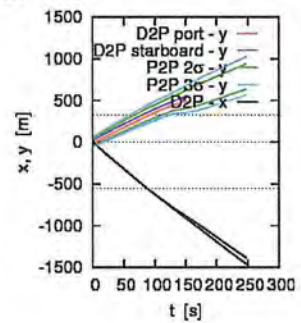
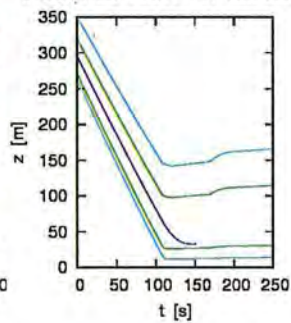
075 07R B744 20111111 -722 327 286



075 07R B77W 20111111 -742 319 285



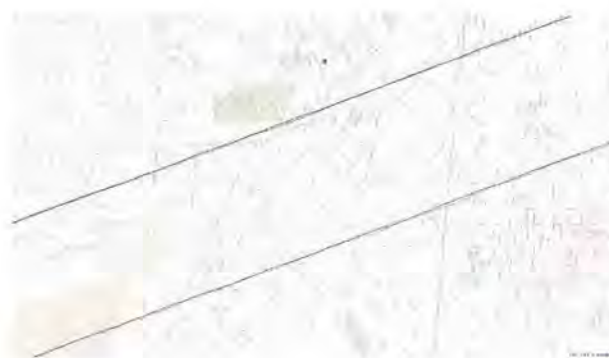
075 07R MD11 20111111 -558 328 295



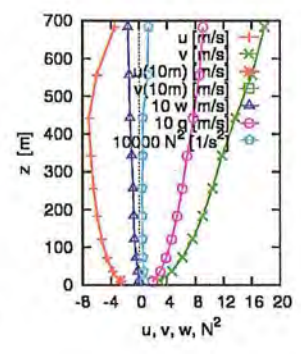
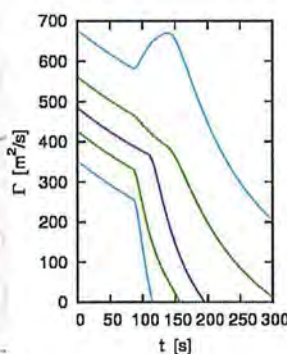
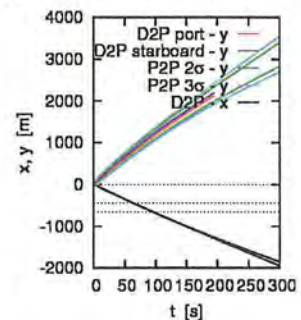
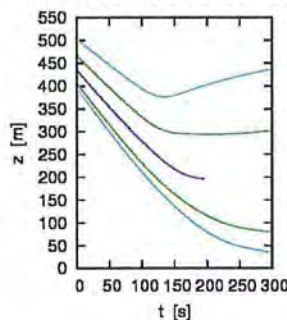
Fall 3: $\Delta h = 458$ m; 1 A346, 1 A333, B763 (25R);
06.01.12, 11:29, 50°04'39.58"N, 8°38'28.10"E

Die Wirbel werden iF in einer Höhe von 415 bis 437 m erzeugt. Nach 50 bis 60 s hat der starke Gegenwind die Wirbel eF transportiert; der positive und kräftige Querwind versetzt sie aber nach S und nicht zum Haus; die Wirbel sind bis dahin auch nicht zum Boden abgesunken, trotz zusätzlich absinkender Luftmassen; Bodenwinde bestätigen Windprofil.

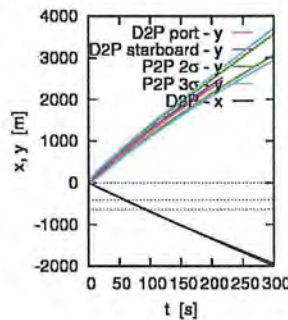
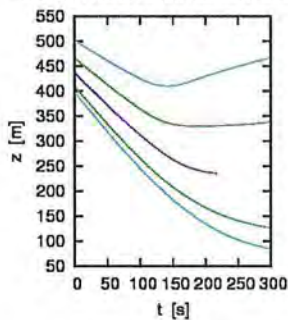
Fazit: ein Ereignis durch diese LFZ unplausibel.



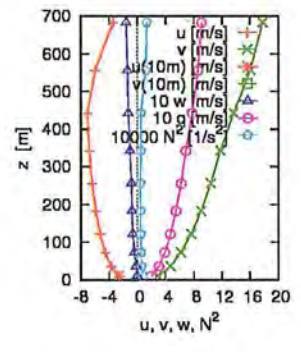
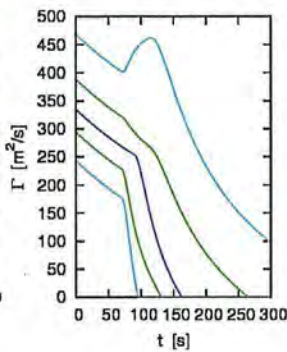
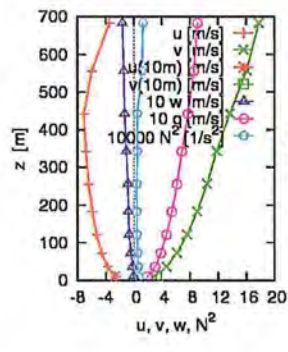
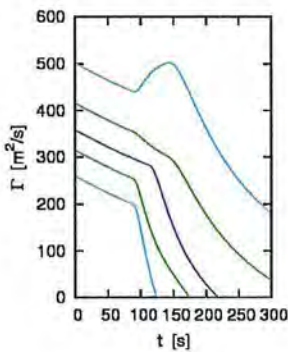
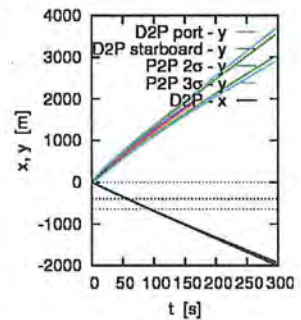
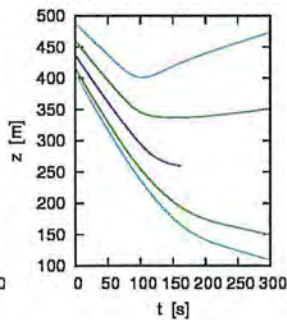
076 25R A346 20120106 -447 -649 435



076 25R A333 20120106 -403 -644 437



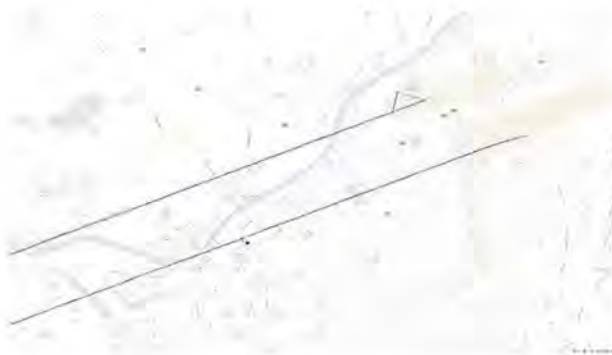
076 25R B763 20120106 -399 -631 437



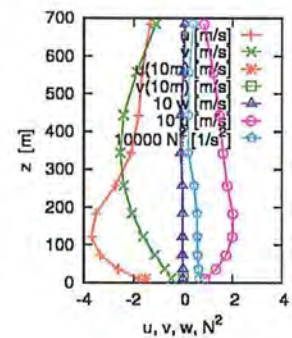
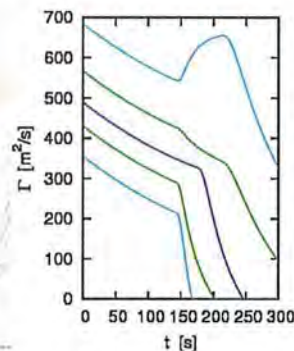
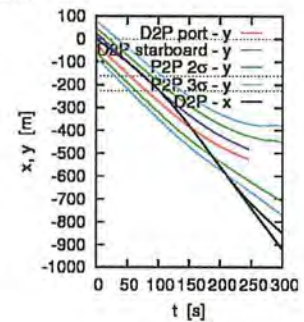
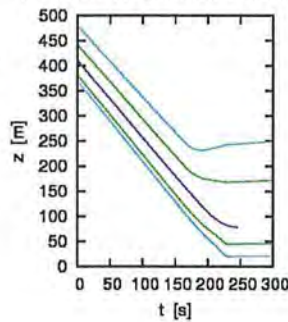
Fall 4: $\Delta h = 422$ m; 1 B77W (07R);
28.01.12, 16:40, 50°00'05.62"N, 8°26'00.51"E

Die Wirbel werden in einer Höhe von 410 m erzeugt.
Nach etwa 100 s hat der stark höhenvariable
Gegenwind die Wirbel zum Haus transportiert; der
neg. Querwind versetzt sie passend nach S; die Wirbel
sind aber bis dahin nicht zum Boden abgesunken; sie
können den Boden erst nach ca. 230 s erreichen und
sind dann sehr geschwächt; Bodenwinde bestätigen
Windprofil.

Fazit: Ereignis unplausibel.



077 07R B77W 20120128 -225 -162 410

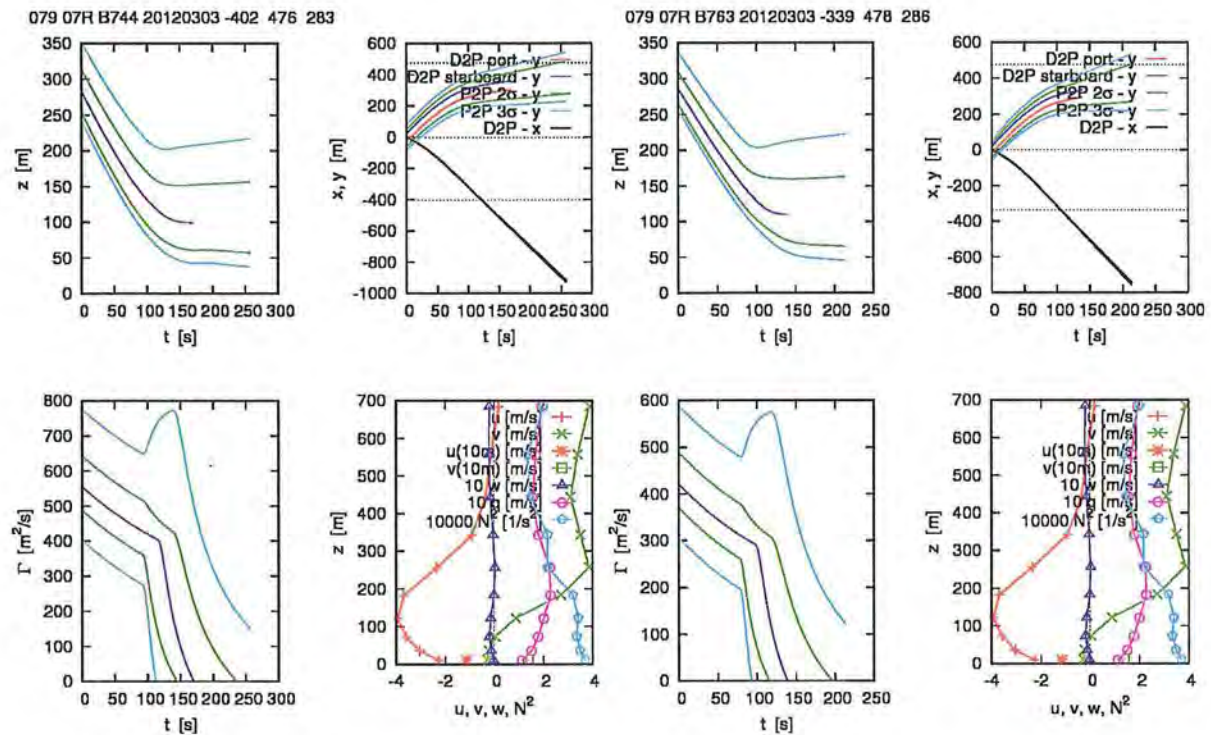


Fall 5: $\Delta h = 304$ m; 4 B744, 1 B763 (07R);
03.03.12, 06:13, 50°00'50.51"N, 8°27'35.28"E



Die Wirbel werden iF in einer Höhe von 283 bis 286 m erzeugt. Nach 100 bis 120 s hat der stark höhenvariable Gegenwind die Wirbel eF zum Haus transportiert; der stark höhenvariable pos. Querwind versetzt sie aber nur unzureichend und zu langsam nach N; die Wirbel beider LFZ erreichen nicht den Boden, auch bedingt durch die stabile thermische Schichtung; Bodenwinde bestätigen in etwa Windprofil.

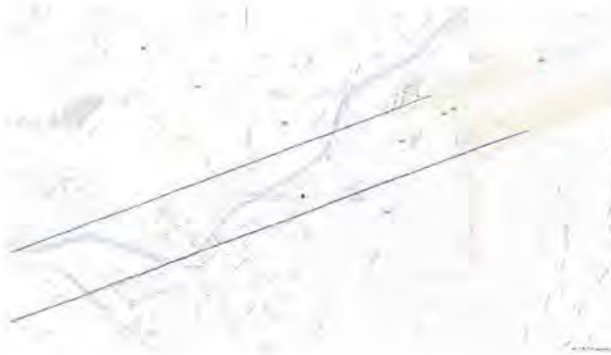
Fazit: Wg. der stabilen Luftschichtung ist ein Ereignis unplausibel.



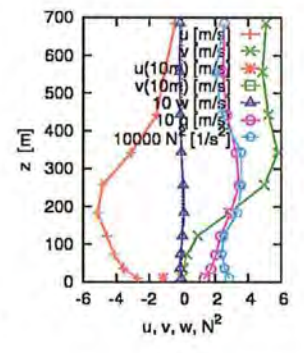
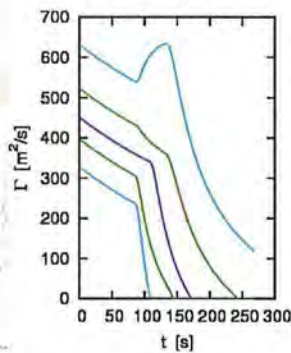
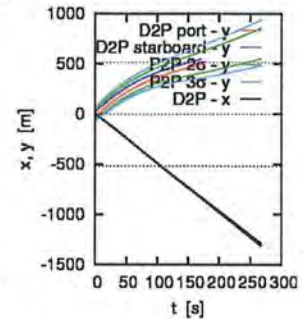
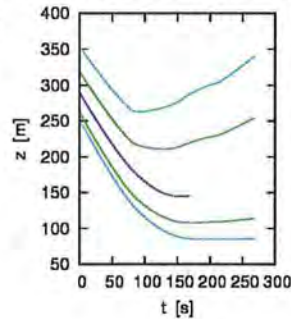
Fall 6: $\Delta h = 315$ m; 2 A333, 1 A343, 1 B744 (07R);
03.03.12, 05:05, 50°00'48.46"N, 8°27'23.96"E

Die Wirbel werden iF in einer Höhe von 284 bis 289 m erzeugt. Nach 100 bis 130 s hat der stark höhenvariable Gegenwind die Wirbel eF zum Haus transportiert; der stark höhenvariable pos. Querwind versetzt sie gerade ausreichend nach N; kein Wirbel erreicht den Boden, da die stabile thermische Schichtung das Absinken der Wirbel begrenzt; Bodenwinde bestätigen in etwa Windprofil.

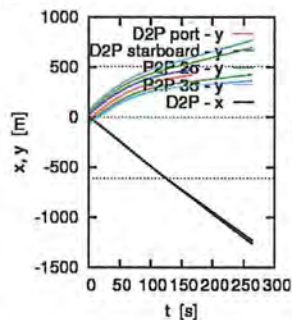
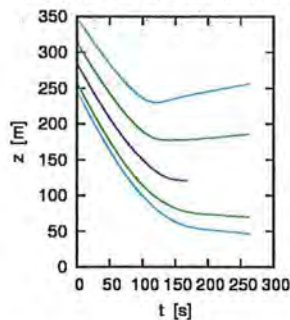
Fazit: Ereignis unplausibel.



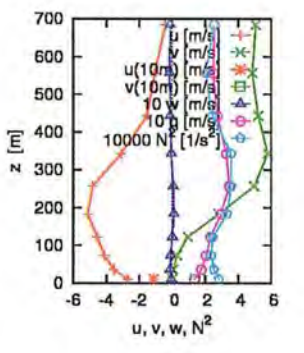
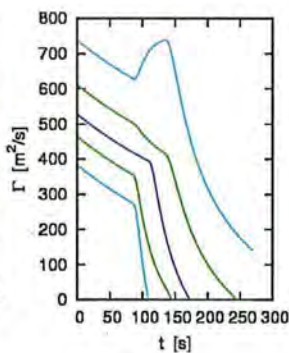
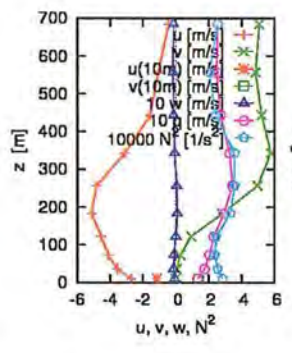
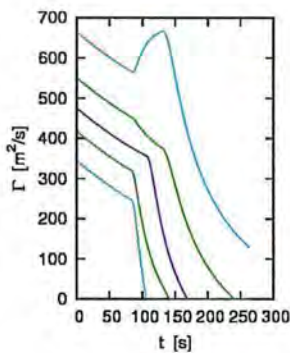
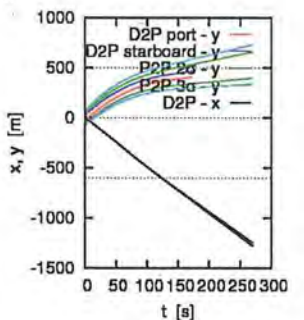
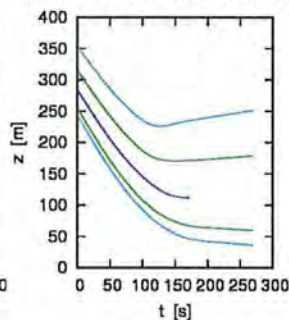
080 07R A333 20120303 -517 513 289



080 07R A343 20120303 -610 509 284

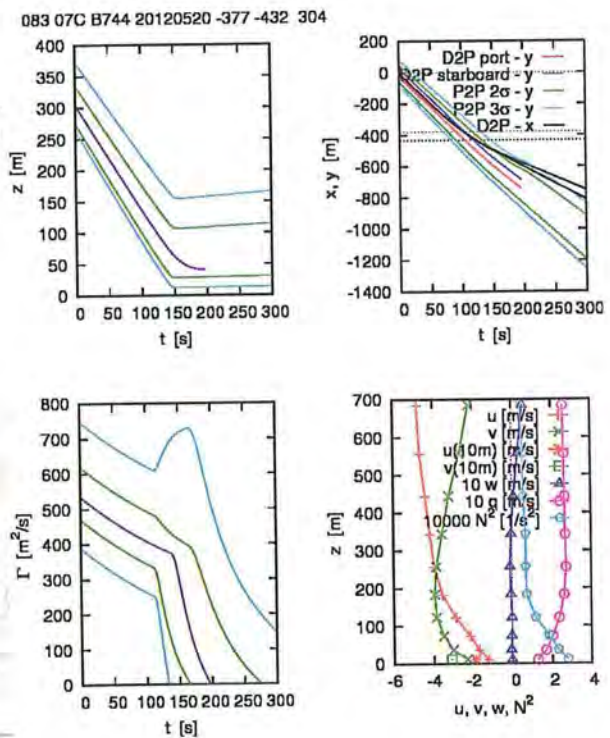


080 07R B744 20120303 -600 502 284



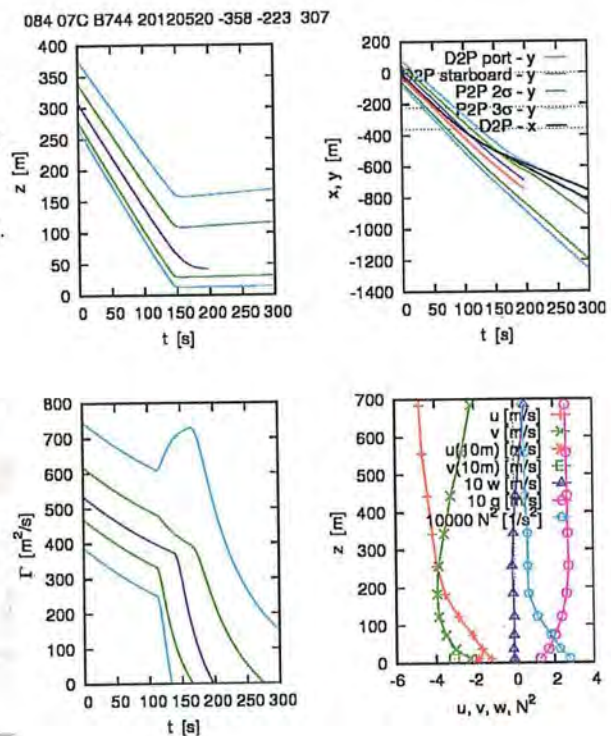
Fall 7: $\Delta h = 334$ m; 1 B744 (07C);
20.05.12, 20:06, 50°00'31.07"N, 8°27'34.09"E

Die Wirbel werden iF in einer Höhe von 304 m erzeugt. Nach etwa 100 s hat der Gegenwind die Wirbel eF zum Haus transportiert; der neg. Querwind versetzt sie im Zeitraum 100 bis 150 s passend nach S; die Wirbel können dann nur wenig geschwächt gerade bis zum Boden abgesunken sein; Bodenwinde bestätigen in etwa Windprofil. Fazit: Ereignis bedingt plausibel.

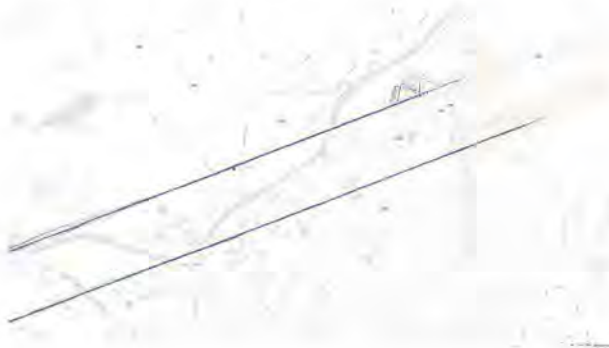


Fall 8: $\Delta h = 328$ m; 1 B744 (07C);
20.05.12, 20:06, 50°00'38.23"N, 8°27'32.22"E

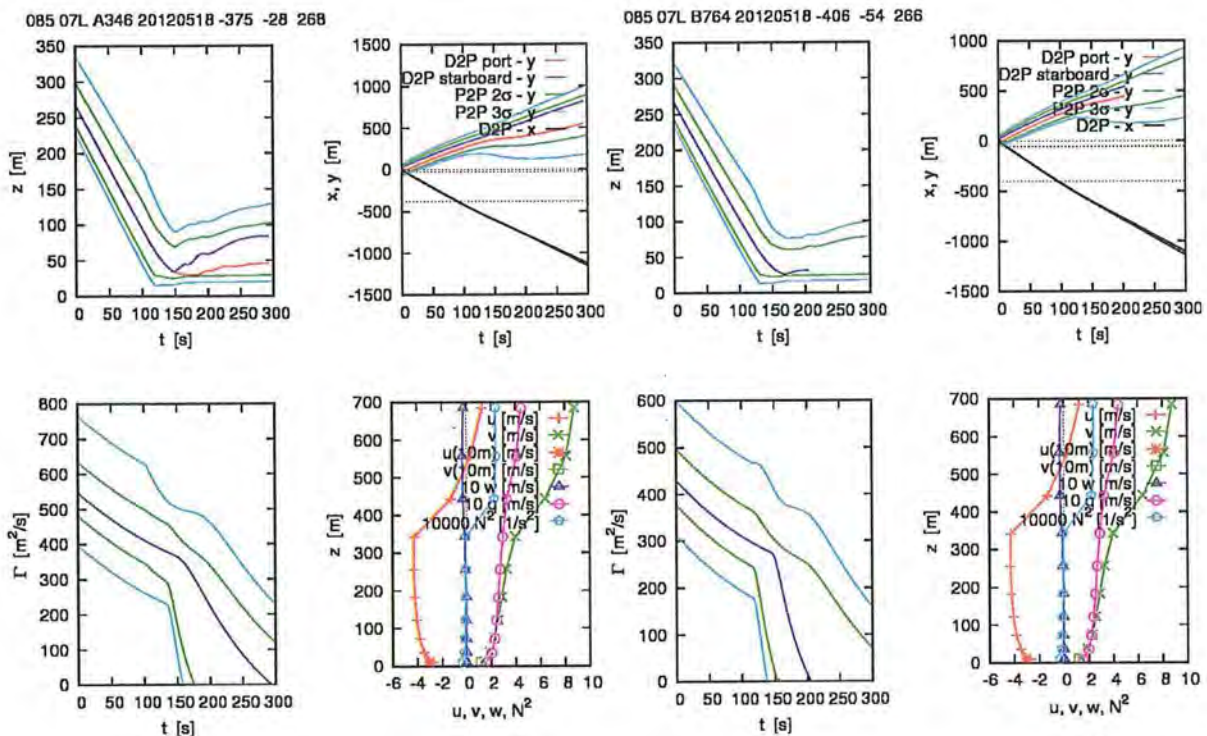
Die Wirbel werden iF in einer Höhe von 307 m erzeugt. Nach etwa 100 s hat der Gegenwind die Wirbel eF zum Haus transportiert; der neg. Querwind versetzt sie etwas zu weit nach S; die Wirbel könnten nur wenig geschwächt und etwas verspätet bis zum Boden abgesunken sein; Bodenwinde bestätigen in etwa Windprofil. Fazit: Ereignis bedingt plausibel.



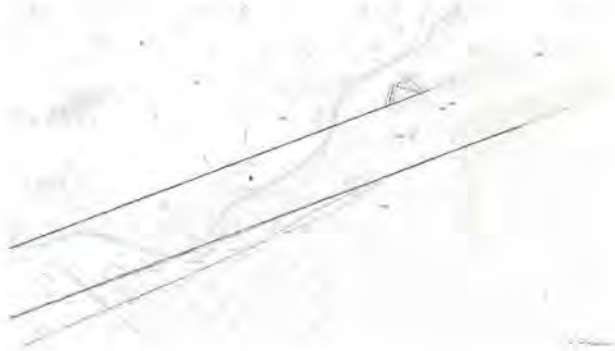
Fall 9: $\Delta h = 287$ m; 2 A346, 1 B764 (07L);
18.05.12, 11:30, $50^{\circ}01'13.34''\text{N}$, $8^{\circ}25'45.13''\text{E}$



Die Wirbel werden in einer Höhe von 266 bis 268 m erzeugt. Nach 85 bis 90 s hat der Gegenwind die Wirbel zum Haus transportiert; der pos. Querwind versetzt sie aber zu stark nach N; die Wirbel können nahezu ungeschwächt, wenn auch verspätet, den Boden erreichen; Bodenwinde bestätigen Windprofil. Fazit: Ereignis bedingt plausibel, da Windprofile innerhalb einer Stunde erheblich schwanken können.

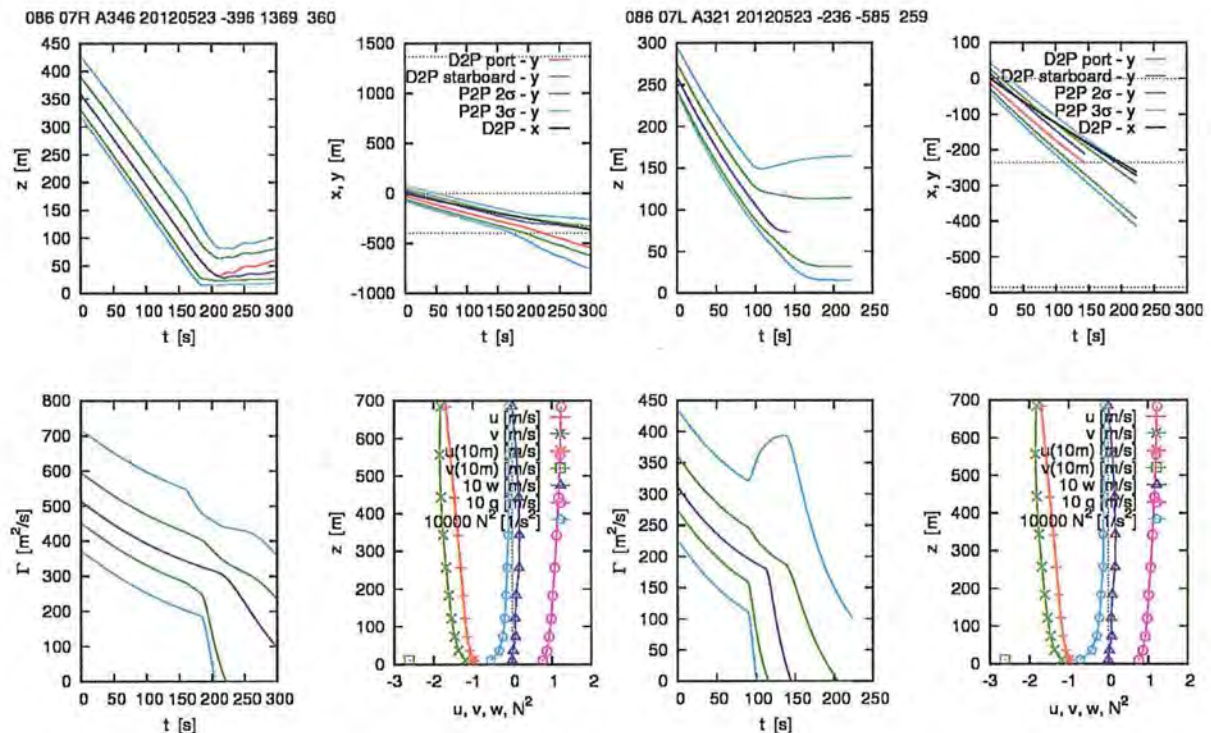


Fall 10: $\Delta h = 381$ m; 1 A346 (07R); Distanz > 1000 m;
 $\Delta h = 269$ m; 2 A321 (07L); Distanz ~ 580 m;
23.05.12, 15:40, 50°01'00.10"N, 8°26'10.08"E



A346 auf 07R: Die Wirbel werden nach S transportiert, das Haus liegt aber im N. Fazit: Ereignis unplausibel. Deshalb wurde auch das im Zeitfenster schwerste die Bahn 07L anfliegende LFZ betrachtet:

A321 auf 07L: Die Wirbel werden in 259 m Höhe erzeugt und sehr langsam verfrachtet; bis die Wirbel den Boden nach ca. 150 s erreichen könnten, wären sie größtenteils zerfallen. Fazit: Ereignis unplausibel.

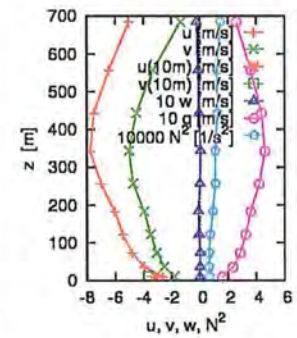
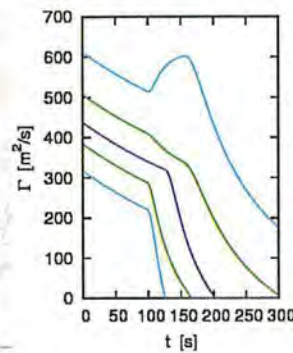
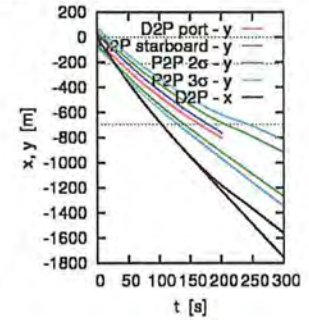
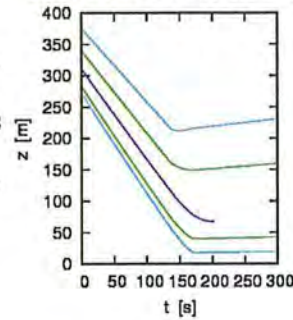


Fall 11: $\Delta h = 347$ m; 1 A343 (07R);
19.06.12, 19:30, 50°00'20.13"N, 8°27'09.06"E

Die Wirbel werden in einer Höhe von 311 m erzeugt. Nach etwa 100 s hat der Gegenwind die Wirbel zum Haus transportiert; der neg. Querwind versetzt sie etwas zu rasch nach S; die Wirbel erreichen erst nach 170 s und dann moderat geschwächt den Boden; Bodenwinde bestätigen in etwa Windprofil.

Fazit: Ereignis bedingt plausibel, da Windprofile innerhalb einer Stunde erheblich schwanken können.

087 07R A343 20120619 -695 -209 311



Fall 12: $\Delta h = 328$ m; 1 A333, 1 B744 (07C); 18.08.12, 05:30, 50°00'41.51"N, 8°27'15.65"E
1 A343, 2 A388, 1 B744, 1MD11 (07R)

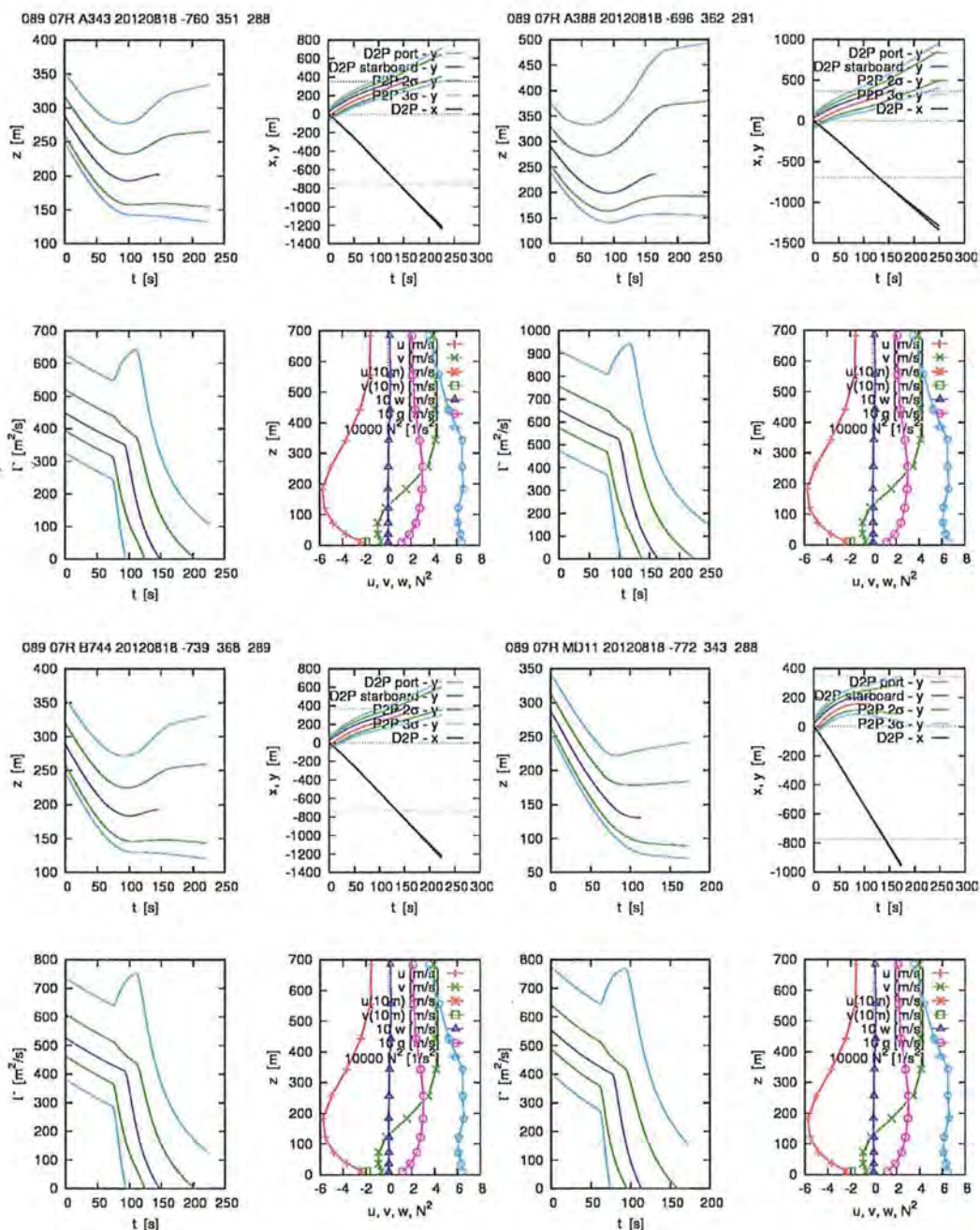


Zwischen 3 und 4 h UTC ist die atmosphärische Grenzschicht stark stabil geschichtet.

Richtung 07C scheidet wegen überwiegend S-lichem Querwind aus, der die Wirbel nach N verfrachtet.

Richtung 07R: Die Wirbel werden in einer Höhe von 288 bis 291 m erzeugt. Nach 125 bis 140 s hat der Gegenwind die Wirbel zum Haus transportiert; der pos. Querwind versetzt sie auch passend nach N; allerdings wird der Boden von keinem der Wirbel erreicht (starke stab. Schichtung); Bodenwinde bestätigen Windprofil.

Fazit: Ereignis unplausibel.



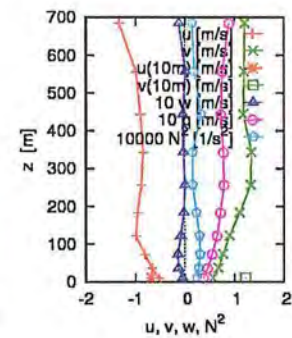
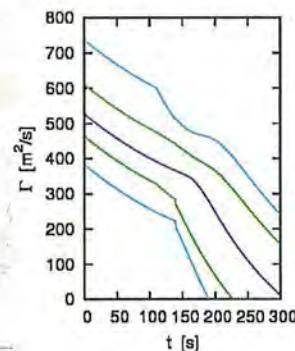
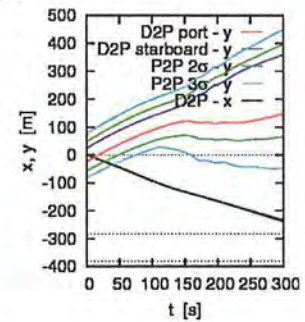
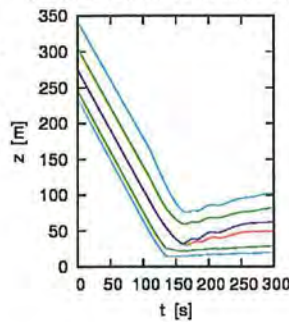
Fall 13: $\Delta h = 293$ m; 1 A346 (07L);
18.02.13, 15:10, 50°00'40.39"N, 8°27'35.57"E

Die Wirbel werden iF in einer Höhe von 274 m erzeugt. Die Wirbel erreichen den Boden nahezu ungeschwächt nach etwa 130 s. Der Wind weht aber nur schwach und versetzt die Wirbel nach N. Bodenwinde bestätigen in etwa Windprofil.

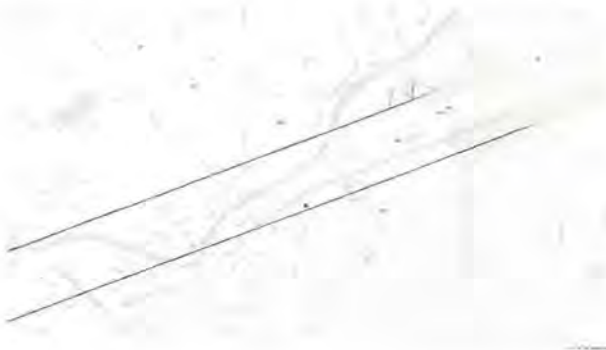
Fazit: Ereignis bedingt plausibel, da Windprofile innerhalb einer Stunde erheblich schwanken können



094 07L A346 20130218 -381 -283 274



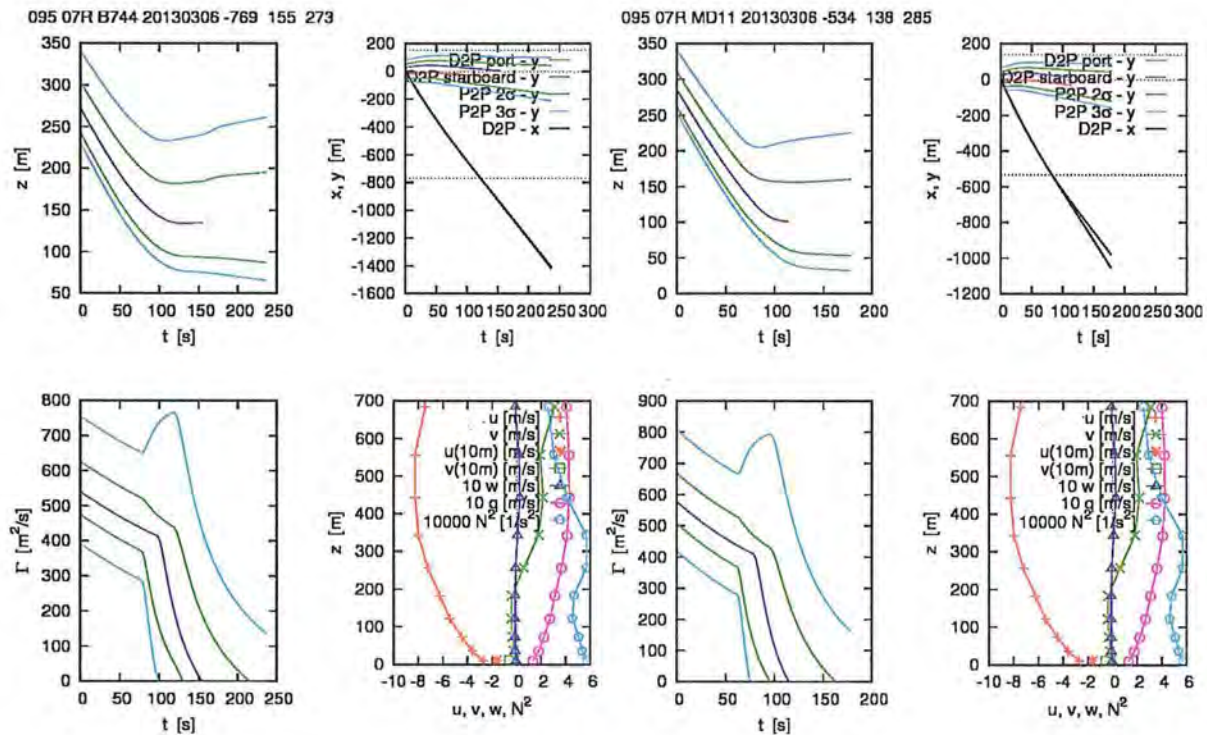
Fall 14: $\Delta h = 313$ m; 1 B744, 1 MD11 (07R);
06.03.13, 19:20, 50°00'38.20"N, 8°27'33.73"E



Die Grenzschicht ist stark stabil geschichtet.

Die Wirbel werden iF in einer Höhe von 273 bis 285 m erzeugt; zwischen 1,5 und 2 min hat der Gegenwind die Wirbel eF zum Haus transportiert; der schwache pos. Querwind versetzt sie nur wenig nach N; kein Wirbel erreicht den Boden; Bodenwinde bestätigen Windprofil.

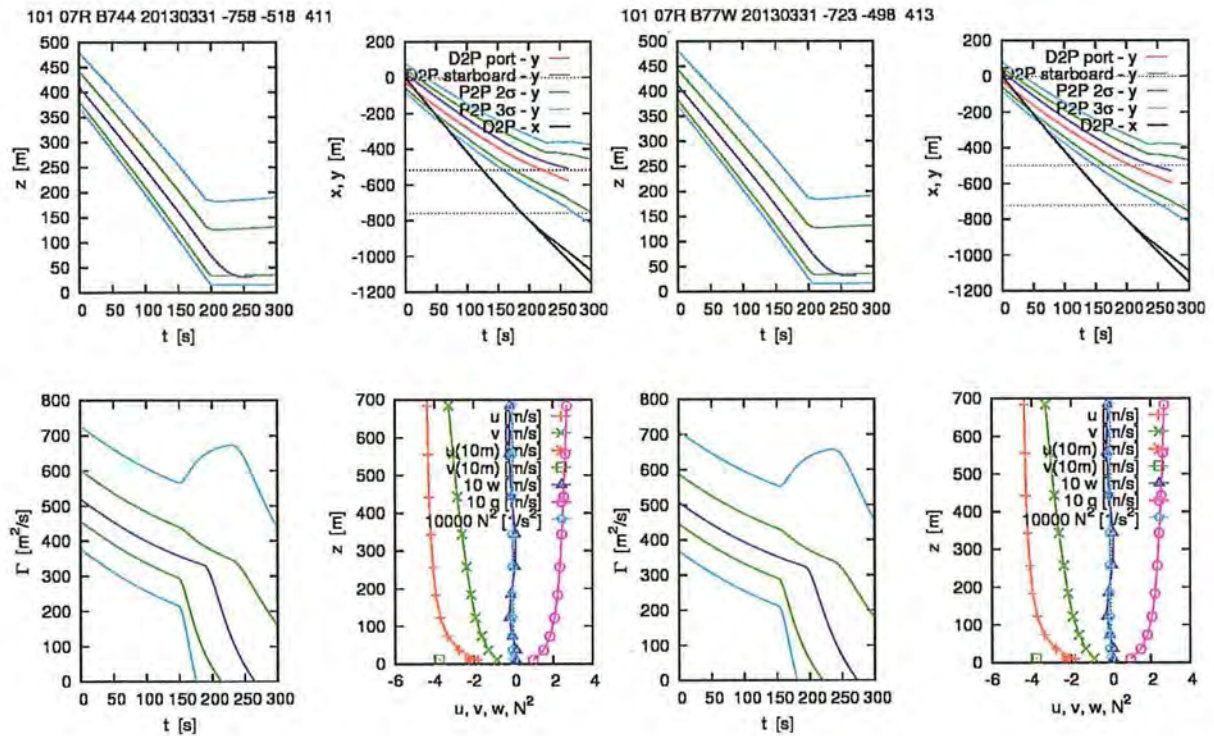
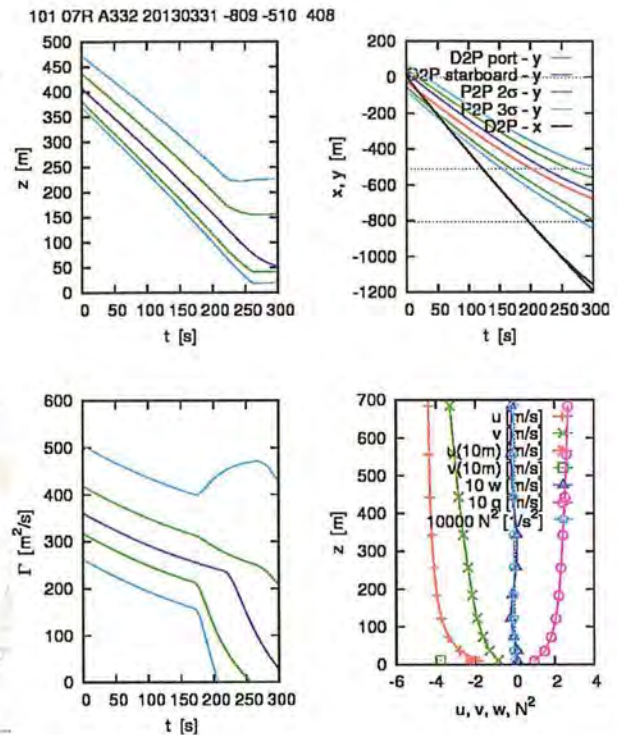
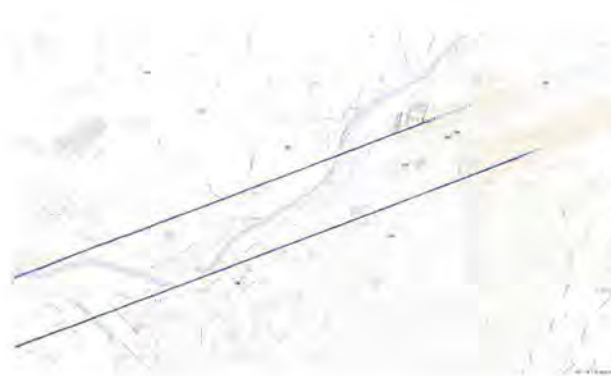
Fazit: Ereignis unplausibel



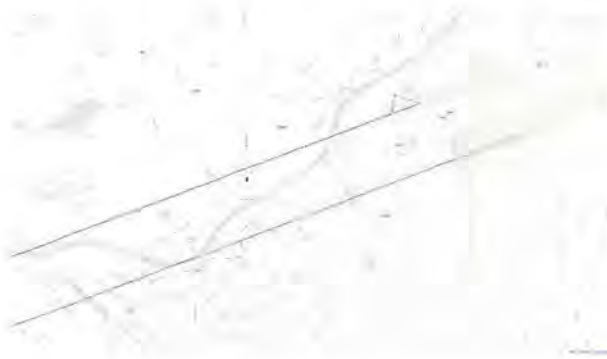
Fall 15: $\Delta h = 450$ m; 1 A332, 2 B744, 1 B77W (07R);
31.03.13, 19:15, 49°59'48.75"N, 8°25'41.70"E

Die Wirbel werden iF in einer Höhe von 408 bis 413 m erzeugt. Nach 180 bis 200 s hat der Gegenwind die Wirbel eF zum Haus transportiert; der neg. Querwind versetzt sie passend nach S; die Wirbel von B744 und B77W sind in dieser Zeit bis zum Boden abgesunken und nur wenig geschwächt; Bodenwinde bestätigen nicht das Querwindprofil.

Fazit: Ereignis bedingt plausibel

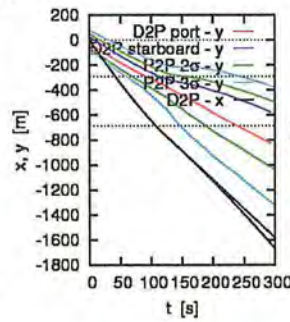
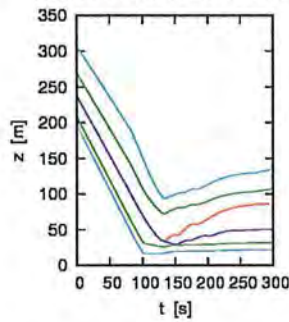


Fall 16: $\Delta h = 271$ m; 1 B77W, 1 B752 (07L);
05.04.13, 18:14, 50°01'07.94"N, 8°26'04.14"E

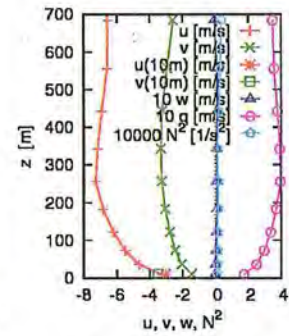
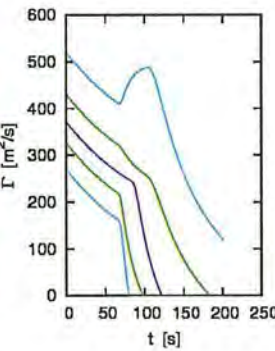
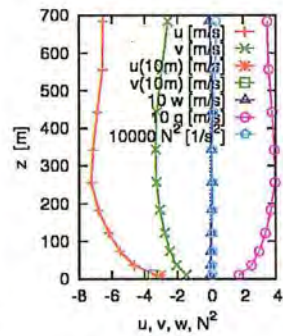
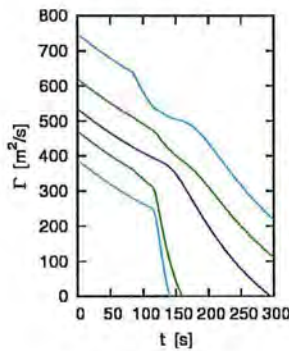
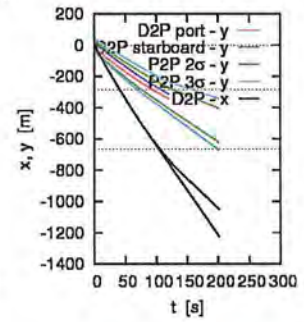
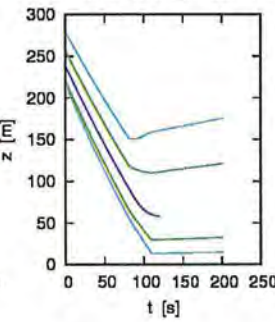


Die Wirbel werden in einer Höhe von 237 bis 238 m erzeugt. Nach etwa 100 s hat der Gegenwind die Wirbel zum Haus transportiert; der neg. Querwind versetzt sie passend nach S; die Wirbel beider LFZ sind in dieser Zeit bis zum Boden abgesunken, die Wirbel der B752 sind dann moderat, die der B77W wenig geschwächt; Bodenwinde bestätigen in etwa das Windprofil.
Fazit: Ereignis plausibel

106 07L B77W 20130405 -684 -290 237



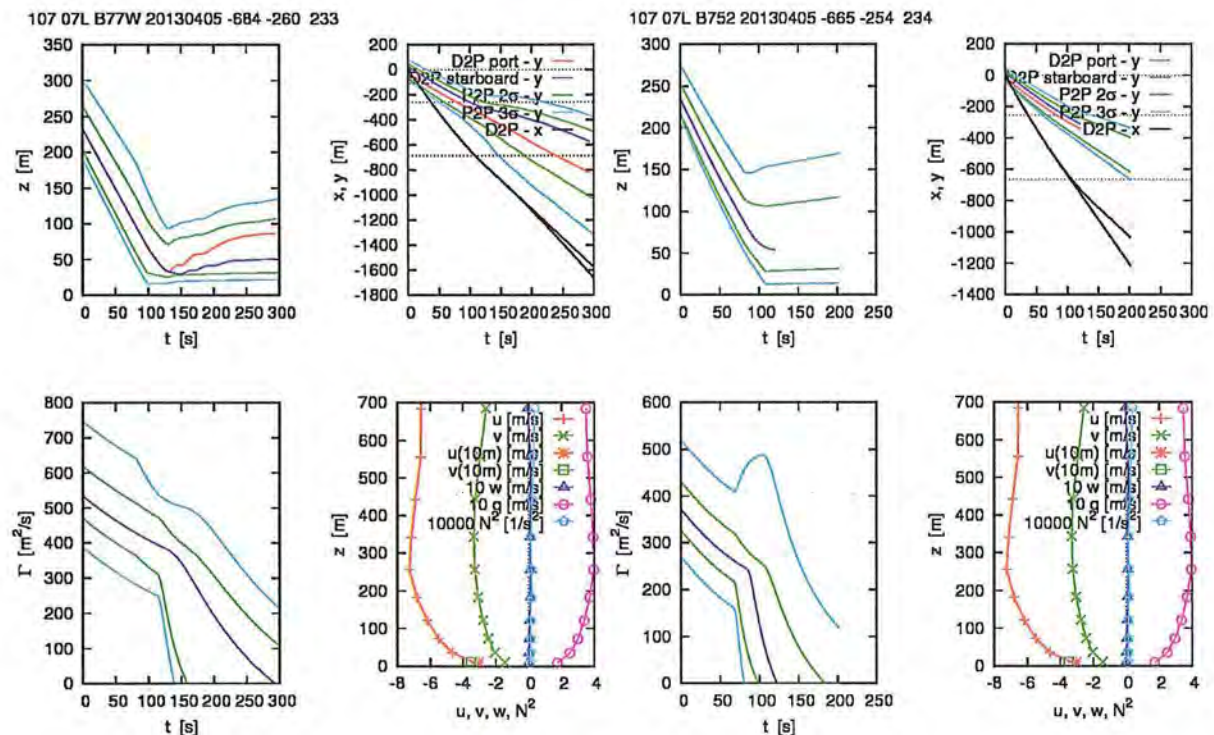
106 07L B752 20130405 -665 -282 238



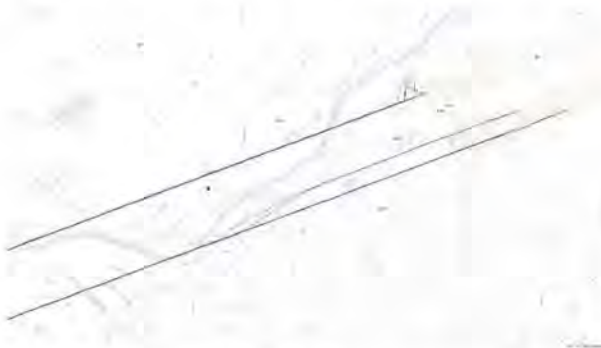
Fall 17: $\Delta h = 268$ m; 1 B77W, 1 B752 (07L);
05.04.13, 18:14, 50°01'09.96"N, 8°26'04.46"E



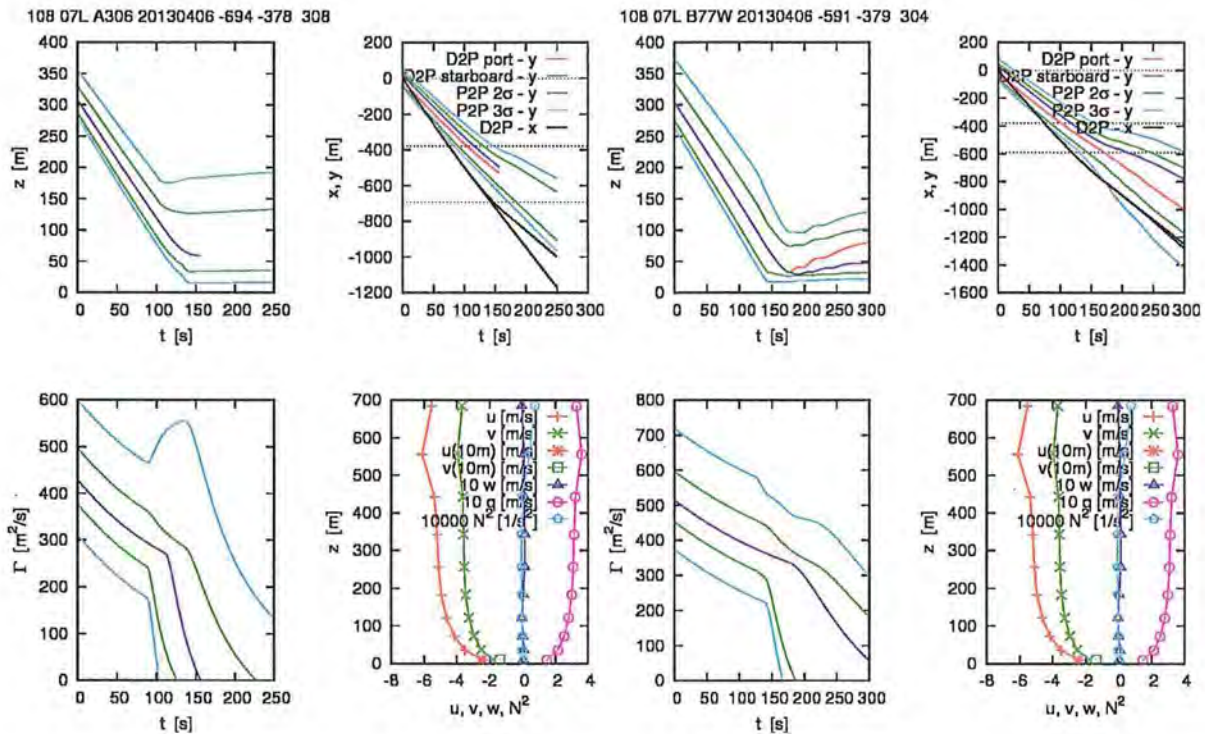
Die Wirbel werden iF in einer Höhe von 233 bis 234 m erzeugt. Nach etwa 100 s hat der Gegenwind die Wirbel eF zum Haus transportiert; der neg. Querwind versetzt sie passend nach S; die Wirbel beider LFZ sind in dieser Zeit bis zum Boden abgesunken, die Wirbel der B752 sind dann moderat, die der B77W wenig geschwächt; Bodenwinde bestätigen in etwa das Windprofil.
Fazit: Ereignis plausibel



Fall 18: $\Delta h = 336$ m; 1 A306, 1 B77L (07L);
06.04.13, 18:45, 50°00'52.69"N, 8°25'08.26"E



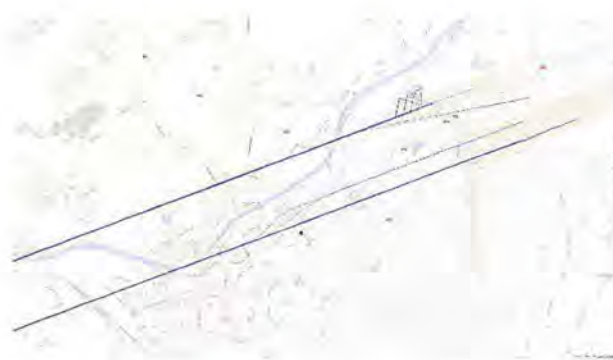
Die Wirbel werden iF in einer Höhe von 304 bis 308 m erzeugt. Nach 110 bis 150 s hat der Gegenwind die Wirbel eF zum Haus transportiert; der neg. Querwind versetzt sie passend nach S; die Wirbel beider LFZ sind in dieser Zeit bis zum Boden abgesunken, allerdings sind die Wirbel der A306 dann stark geschwächt; Bodenwinde bestätigen das Windprofil.
Fazit: Ereignis durch B77L-Wirbel plausibel



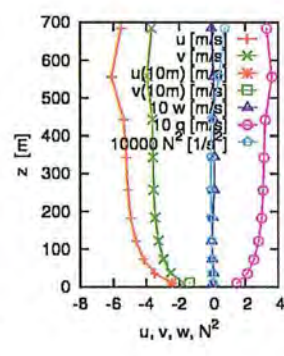
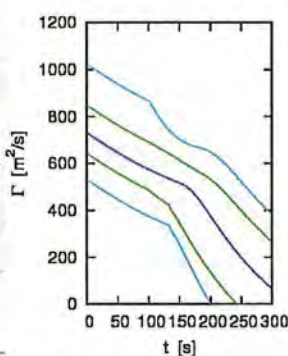
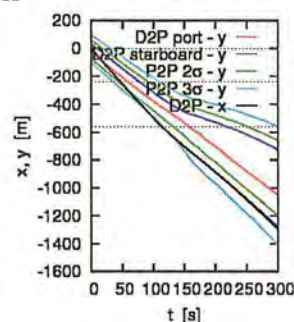
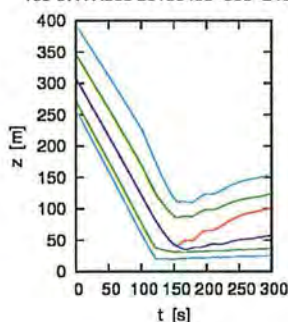
Fall 19: $\Delta h = 336$ m; 1 A388, 1 B744, 1 B748 (07R);
06.04.13, 18:23, 50°00'21.46"N, 8°27'18.42"E

Die Wirbel werden iF in einer Höhe von 304 bis 308 m erzeugt. Nach 110 bis 125 s hat der Gegenwind die Wirbel eF zum Haus transportiert; der neg. Querwind versetzt sie passend nach S; die Wirbel der LFZ sind etwa in dieser Zeit und nahezu ungeschwächt bis zum Boden abgesunken; Bodenwinde bestätigen das Windprofil.

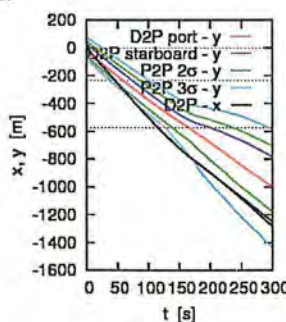
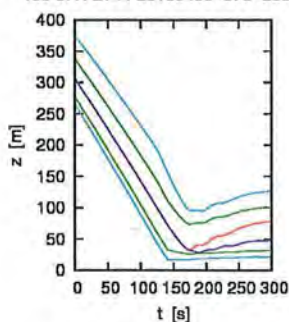
Fazit: Ereignis durch Wirbel aller LFZ plausibel



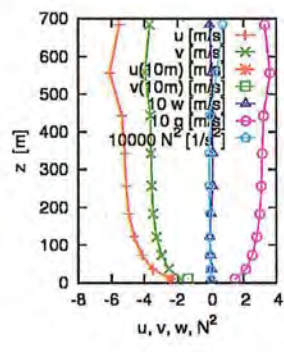
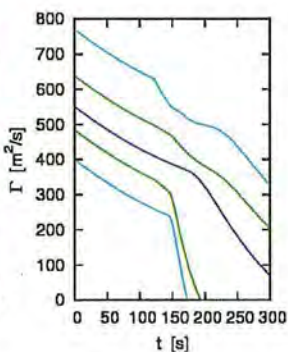
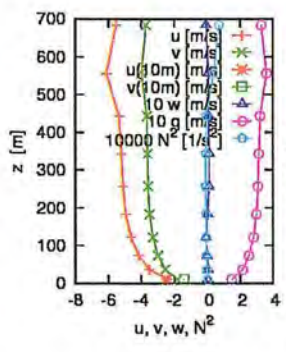
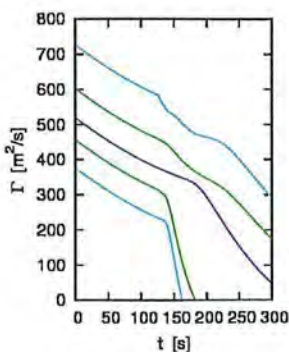
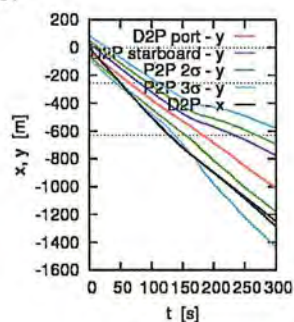
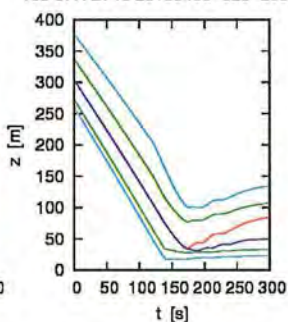
109 07R A388 20130406 -563 -240 308



109 07R B744 20130406 -575 -235 307



109 07R B748 20130406 -629 -255 304



Fall 20: $\Delta h = 268$ m; 1 B77W (07L);
08.06.13, 17:05, 50°01'09.96"N, 8°26'04.46"E

Die Wirbel werden in einer Höhe von 235 m erzeugt. Nach 100 s hat der Gegenwind die Wirbel zum Haus transportiert; der neg. Querwind versetzt sie passend nach S; die Wirbel sind etwa in dieser Zeit nahezu ungeschwächt bis zum Boden abgesunken. Fazit: Ereignis durch Wirbel plausibel

