

Tornados und Gewitterböen in Deutschland

Klassifikation und Klimatologie

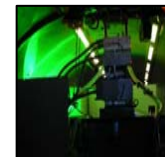
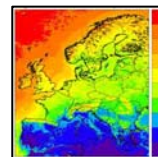
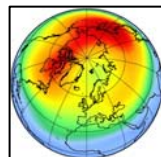
Nikolai Dotzek

DLR - Institut für Physik der Atmosphäre
Oberpfaffenhofen

Fortbildungstag DMG Zweigverein München, Uni Regensburg, 3. 6. 2005



Institut für
Physik der Atmosphäre



Überblick

- **Klassifikation** von Tornados und Downbursts (Gewitterfallböen)
- **Intensitätseinstufung** anhand von Fujita- und TORRO-Skala
- **Klimatologie** auf Basis der TorDACH Daten (<http://tordach.org>)



Definition der Phänomene

Luftwirbel mit senkrechter Achse: konvergentes Windfeld am Erdboden

- Kleintromben, thermisch (Staubteufel) bzw. dynamisch erzeugt („gustnado“)
- Blindtromben („funnel clouds“)
- Großtromben (Tornados) -> Wind- und Wasserhosen

Geradlinige Windböenphänomene : divergentes Windfeld am Erdboden

- Böenfronten, Downbursts (Gewitterfallböen), Bow Echos, Derechos

Trennung der Tornados von den Kleintromben

Herkunft: „Tornado“ = span. „gedreht“

Meteorologisch: **Trombe** (ital. „Trichter“)
=> kleinräumiger, senkrechter Luftwirbel

	Kleintrombe (Wirbelwind) bodennah bei „Schönwetter“	Großtrombe (Tornado allg.) unter Quellbewölkung (Schauer / Gewitter)
über Land	Staubteufel, Heuteufel	Tornado (i.e.S.), Windhose
über Wasser	Wasserteufel, Nebelteufel	Tornado, Wasserhose

Beispiele von Kleintromben

Kleintromben entstehen bodennah bei „Schönwetter“:
Über **Land** meist durch Überhitzung der Bodenschicht -
instabile Luft steigt unter Wirbelbildung rasch auf. Analog
über **Wasser** auch in kalter Luftmasse wenn das Wasser
deutlich wärmer ist.



*Staubteufel im Park Sanssouci 7. August 2003
Foto: Martin Ziemann*



*Seltenes Bild eines Nebelteufels
Blaibacher See (Bayerwald) 2. Oktober 2003
Lufttemperatur ca. -2°C
Foto: Stefan Engl*

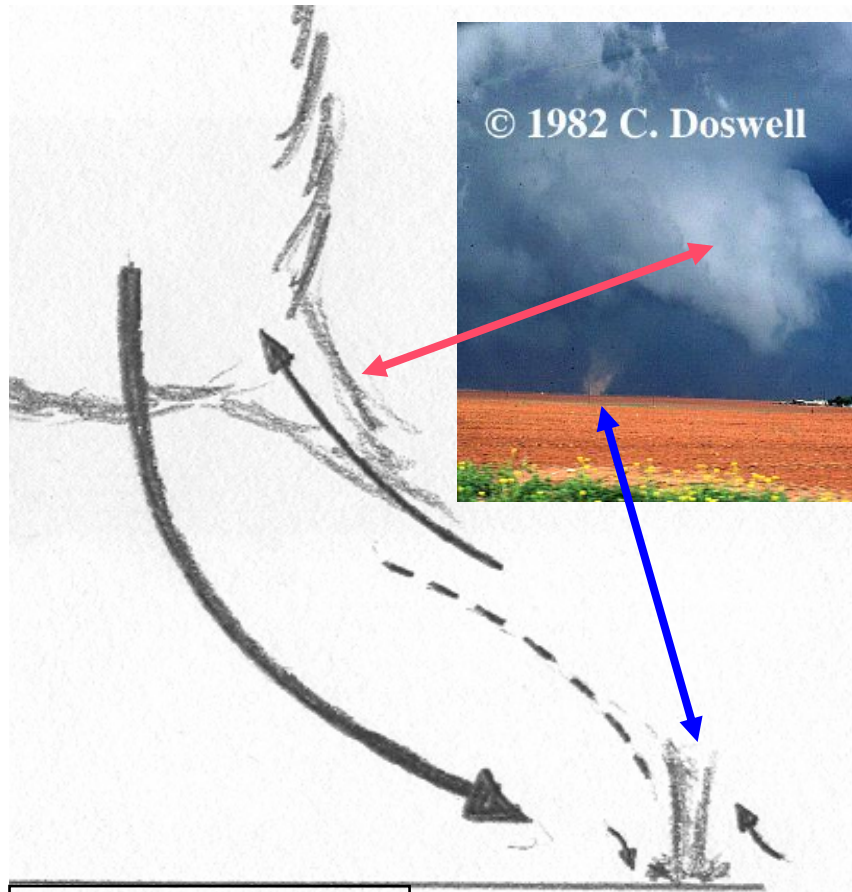
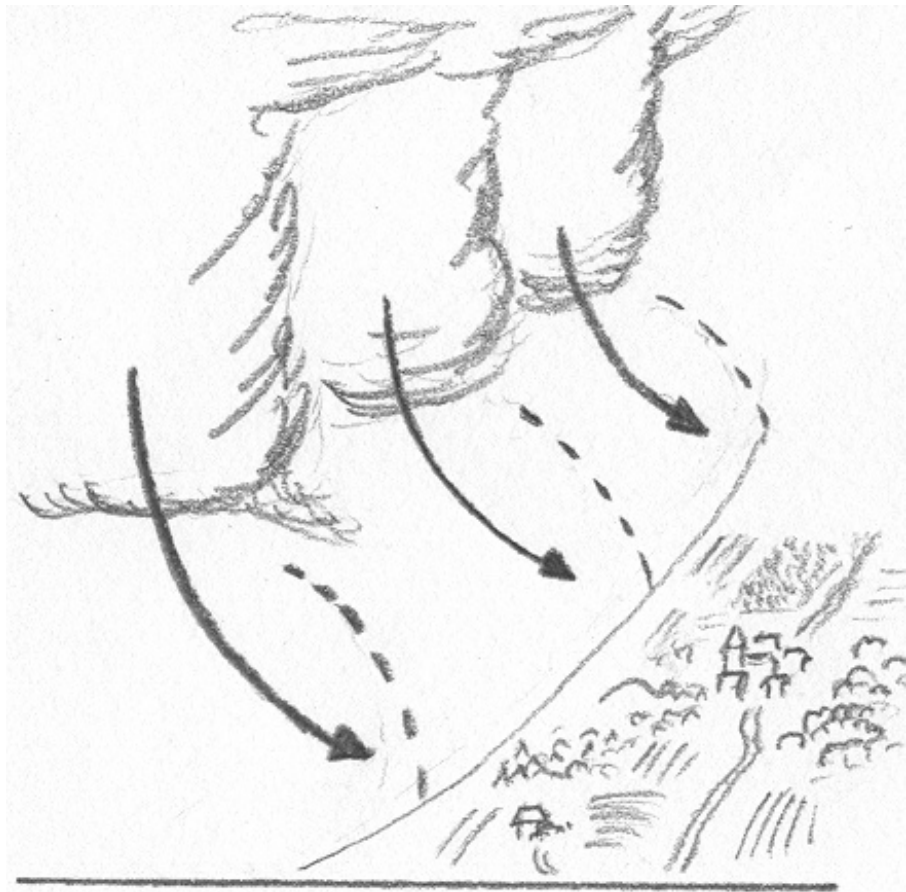
Beispiele von Kleintromben



13. Mai 2001

Bei stark konvektiver Grenzschicht können auch Kleintromben in Mitteleuropa bis in beträchtliche Höhen heraufwachsen. Dies kann zu fälschlichen Tornado-meldungen führen.

Böenfrontwirbel ("Gustnado")

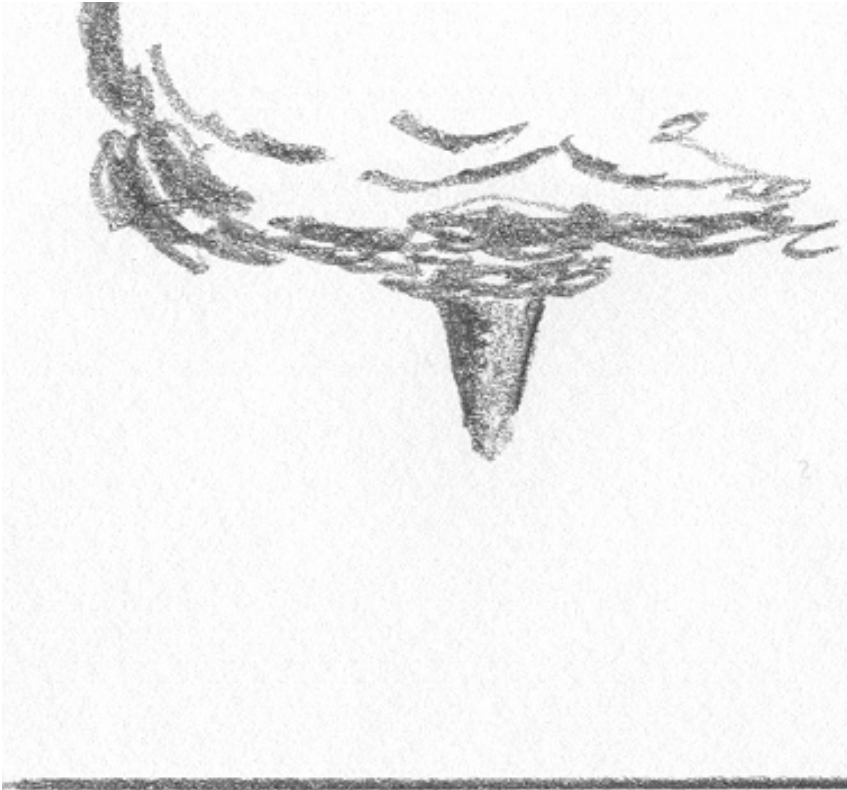


© 1982 C. Doswell

Eisenbach (2004)

Bisher liegen in D nur sehr wenige Meldungen vor. Kommt der Gustnado in den Aufwindbereich einer konvektiven Wolke, kann er sich zum Tornado entwickeln („landspout“, wie z.B. am 19. Mai 2003 in der Nähe von Starnberg).

Blindtromben



Eisenbach (2004)



Blindtrombe



Tornado

So. 07.05.00 Windhose über Morbach (c) Lothar Franz

Evtl. Vor-, Zwischen- oder Endstadium eines Tornados, daher hohe Verwechslungsgefahr. Entscheidend ist **der nicht vorhandene Bodenkontakt des Wirbels!**



Definition von Alfred Wegener (1917)

"Wind- und Wasserhosen (= *Großtromben* = *Tornados*) sind große Luftwirbel mit vertikaler Achse, die vom Rande einer Cumulo-Nimbus-Wolke meist bis zum Erdboden herabreichen, in ihrem Inneren durch Kondensation in Form eines herabhängenden Zapfens, Trichters, Schlauches oder Säule, im unteren Teil auch durch Staub, ganz oder teilweise sichtbar sind und in einer meist nach Hektometern zählenden Spurbreite durch stürmisches Hinzuströmen der Luft zu dem stark luftverdünnten Raum um die Wirbelachse gewöhnlich derartige Verwüstungen verursachen, wie sie auch bei den schwersten Stürmen größerer Ausdehnung nicht beobachtet werden."

Tornado-Kenngrößen sind sehr variabel:

Windgeschwindigkeit: **bis über 500 km/h**

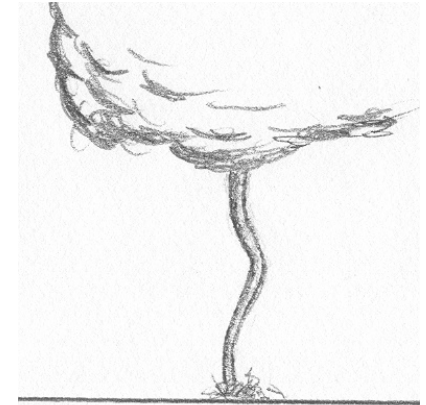
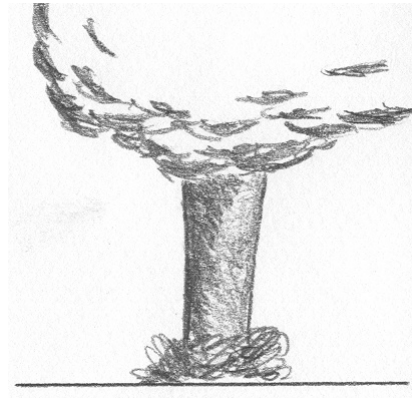
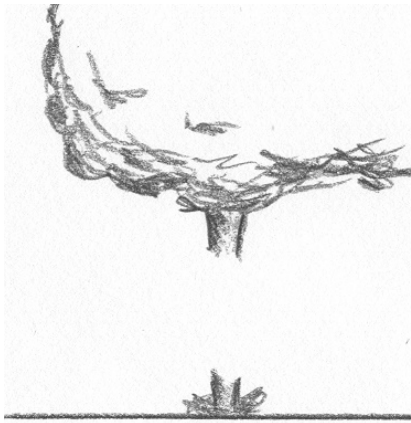
Durchmesser: **10 m bis über 1 km**

Lebensdauer: **1 min bis über 1 h**

Zugstrecke: **50 m bis über 100 km**

Zuggeschwindigkeit: **ca. 60 km/h**

Tornado-Formen (schematisch)



Eisenbach (2004)

Die Erscheinungsformen von Tornados sind sehr vielfältig.

Das Entscheidungskriterium für einen Tornado ist stets der Kontakt des Luftwirbels mit dem **Erboden** und der cumuliformen Mutterwolke.

In welchem Umfang im Wirbel **Kondensation** statt findet, ist **unerheblich**.

Aus der Breite des Wirbels kann **nicht direkt** auf die Intensität geschlossen werden (Brooks, 2004).

Wasserhosen

Diese Tornados entstehen meist über **größeren** warmen Wasserflächen (vorzugsweise im Spätsommer) bei recht ruhigem Wetter im Bereich von zusammenströmender Luft (Schauer- und Konvergenzlinien) unter Quellbewölkung – dabei oft keine Gewitter und nur leichte Schauer. Allgemein schwächer als Tornados über Land (Windhosen), aber **signifikante Einzelfälle möglich**.



Linie von Wasserhosen über dem Mittelmeer, August 1999

F1 Tornado Kreinitz am 5. 5. 2004

© by Andreas und Ringo Kunath



© by Andreas und Ringo Kunath



© BY Ringo und Andreas Kunath



Institut für
Physik der Atmosphäre



Fortbildungstag DMG ZV München, 3. 6. 2005



F3 Tornado Micheln am 23. 6. 2004

© by Fam. König

© by Thomas Fritz



Institut für
Physik der Atmosphäre

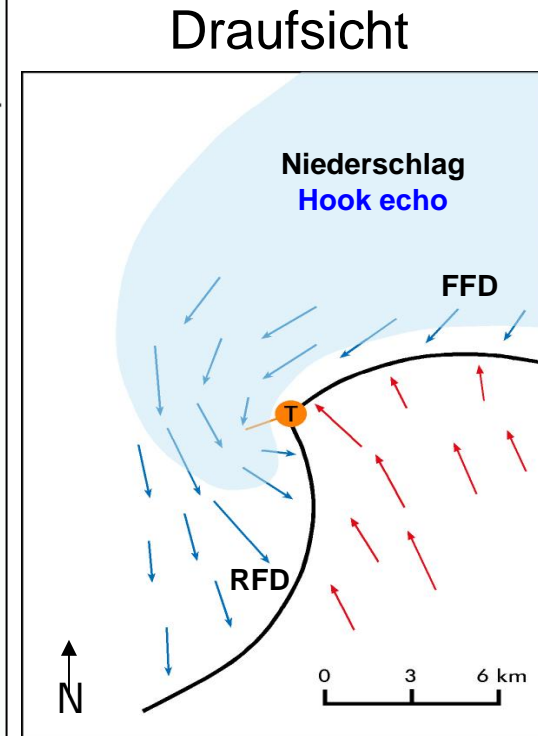
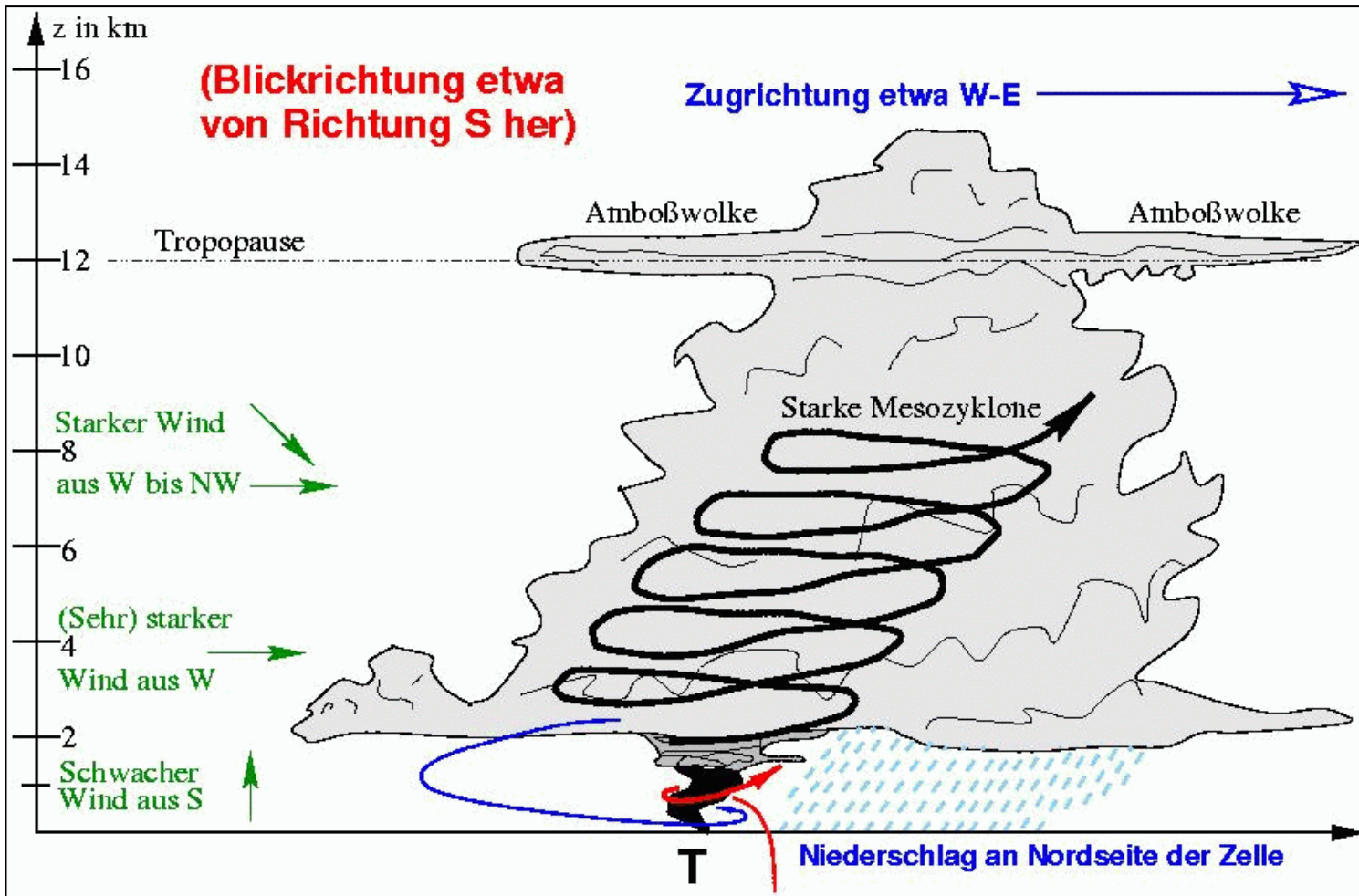


Fortbildungstag DMG ZV München, 3. 6. 2005



Aufbau einer Superzelle (schematisch)

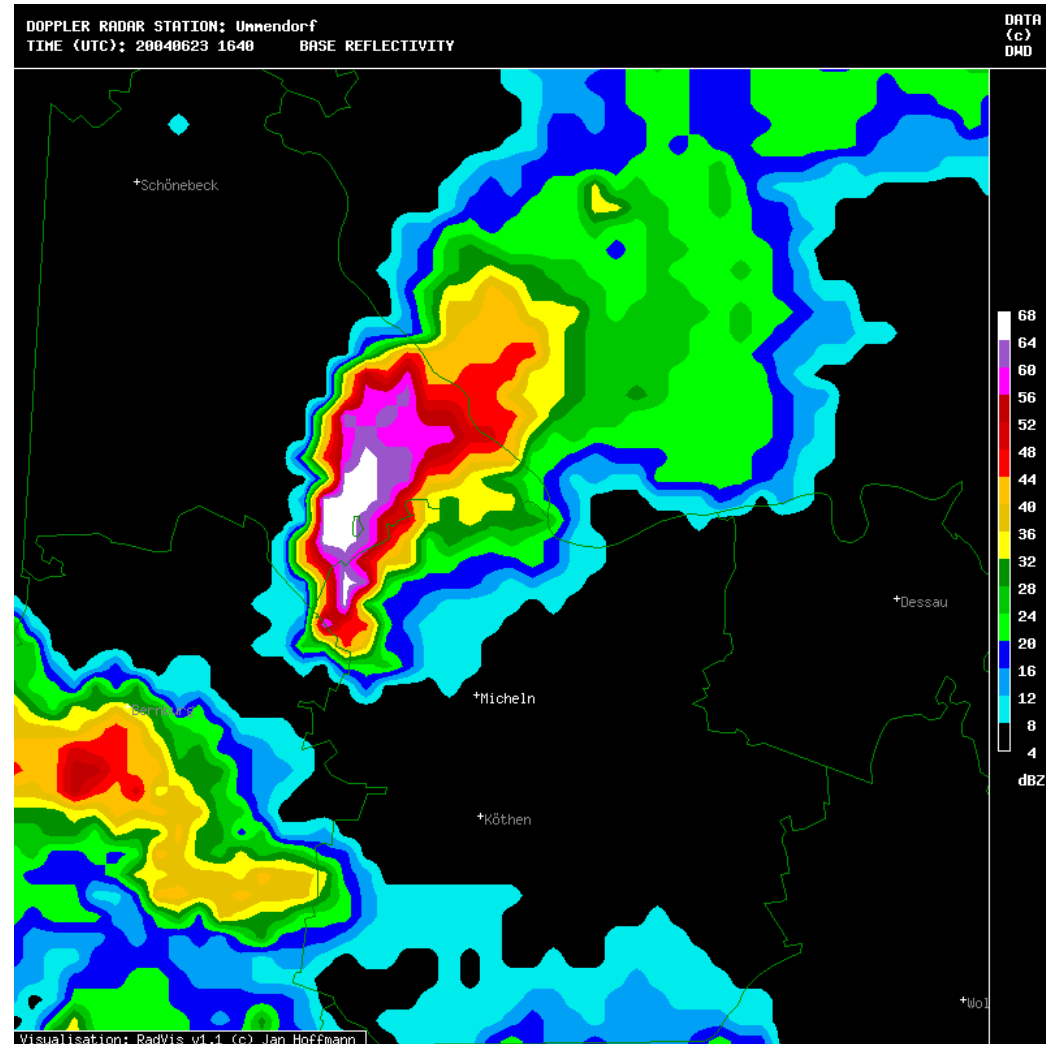
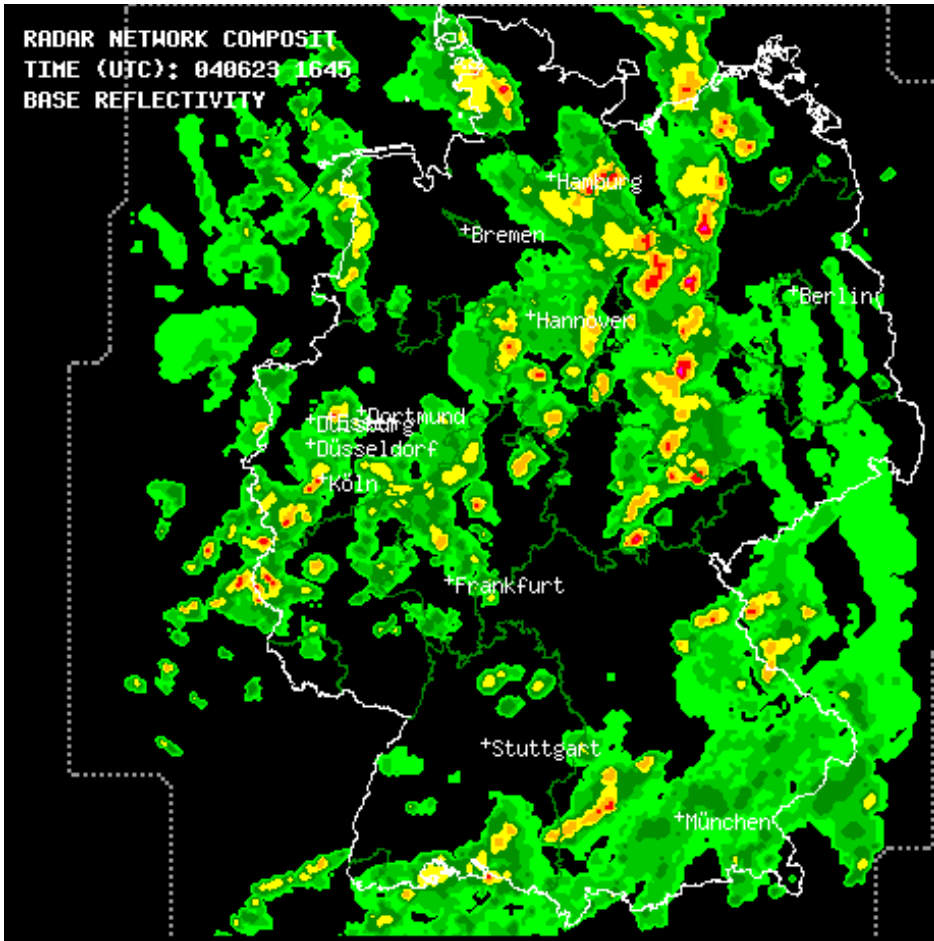
Perspektivische Seitenansicht senkrecht zum Zugweg



(nach Lemon & Doswell, 1975)

(nach Dotzek, 1999)

Hakenecho des F3 Micheln-Tornados

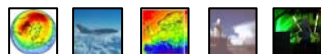


DWD Doppler-Radarverbund
Compositbild + Ummendorf.

23. Juni 2004, Bilder: Jan Hoffmann



Institut für
Physik der Atmosphäre



Fortbildungstag DMG ZV München, 3. 6. 2005



Rotation der Mesozyklone, sichtbar an Wolkenbasis

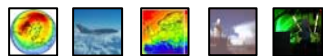


Ein Doppler Radar kann dies als **mesozyklonale Wirbelsignatur (MVS)** erkennen



DLR

Institut für
Physik der Atmosphäre



Fortbildungstag DMG ZV München, 3. 6. 2005



HELMHOLTZ
GEMEINSCHAFT

Superzellengewitter treten am häufigsten im mittleren Westen der USA auf ...

... aber sie sind auch in Europa keine Seltenheit!



Hochrhein D-CH, 2.5.2003

Foto: Thies Stillahn



Colorado, USA

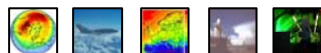
**Hauptgefahren (neben Tornados)
vor allem:**

Fallböen bis über 200 km/h

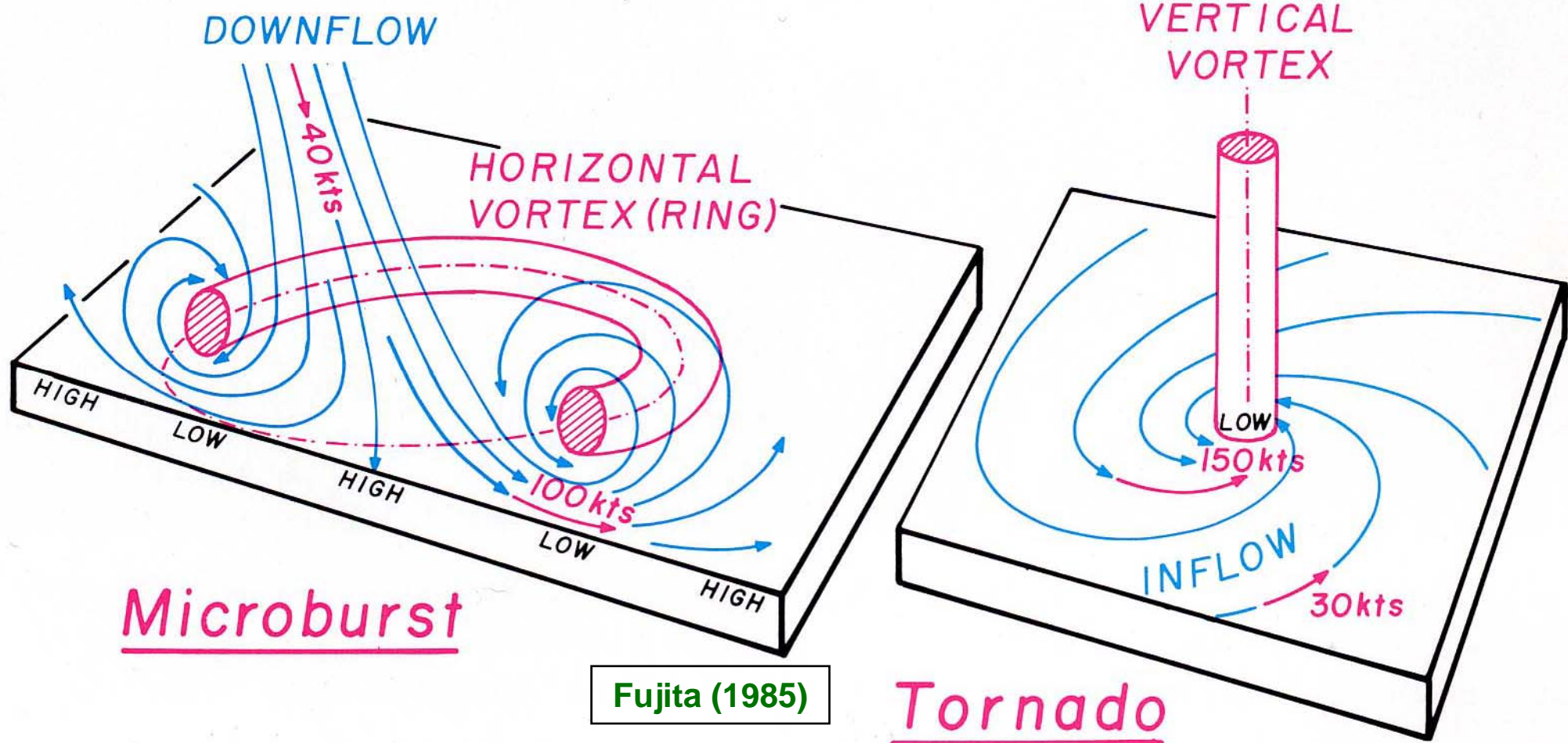
Sturzfluten

Großer Hagel

Blitzschlag



Prinzipielle Abgrenzung von Downburst und Tornado



Downbursts und Tornados können aus demselben Gewittertyp entstehen. Ein Antrieb für kalte Abwinde ist aber in allen Gewittern vorhanden. Daher sind Downbursts die wahrscheinlicheren Phänomene.

Einteilung der Downbursts (Gewitterfallböen)

Man unterscheidet prinzipiell zwei Arten: „**trockene**“ und „**nasse**“ Downbursts.

a) **Trockener Downburst**: (fast) kein Niederschlag am Erdboden.

Notwendige meteorologische Bedingungen in Europa aber nur sehr selten (z.B. möglicherweise in Zentralspanien) erfüllt.

b) **Nasser Downburst**: verbunden mit heftigem Niederschlag aus Gewittern oder starken Schauern.

Meteorologische Bedingungen an Gewittertagen **sehr oft** in Mitteleuropa erfüllt. Als Antrieb für die starken Ab- und Scherwinde werden das **Schmelzen von kleinerem Hagel** und die Verdunstung flüssigen Niederschlags favorisiert, weniger große Hagelsteine.



Downburst vom 9.7.2002 SW München

Einige Merkmale dieser Gewitterfallböe lassen eine Superzelle als erzeugenden Gewittertyp plausibel erscheinen.



Foto: Rainer Timm



Foto: Rainer Timm

Beispiel: F1/T2 Downburst im Forstenrieder Park. Neben Starkregen und Hagel bis 3 cm auch Waldschäden.

Downburst vom 21.5.2005 SW München



Webcambild: Meteorologisches Institut LMU München, 18:41 MESZ

Hagel (1.5-2 cm), Starkregen und Bft 10 (F0/T1) Wind

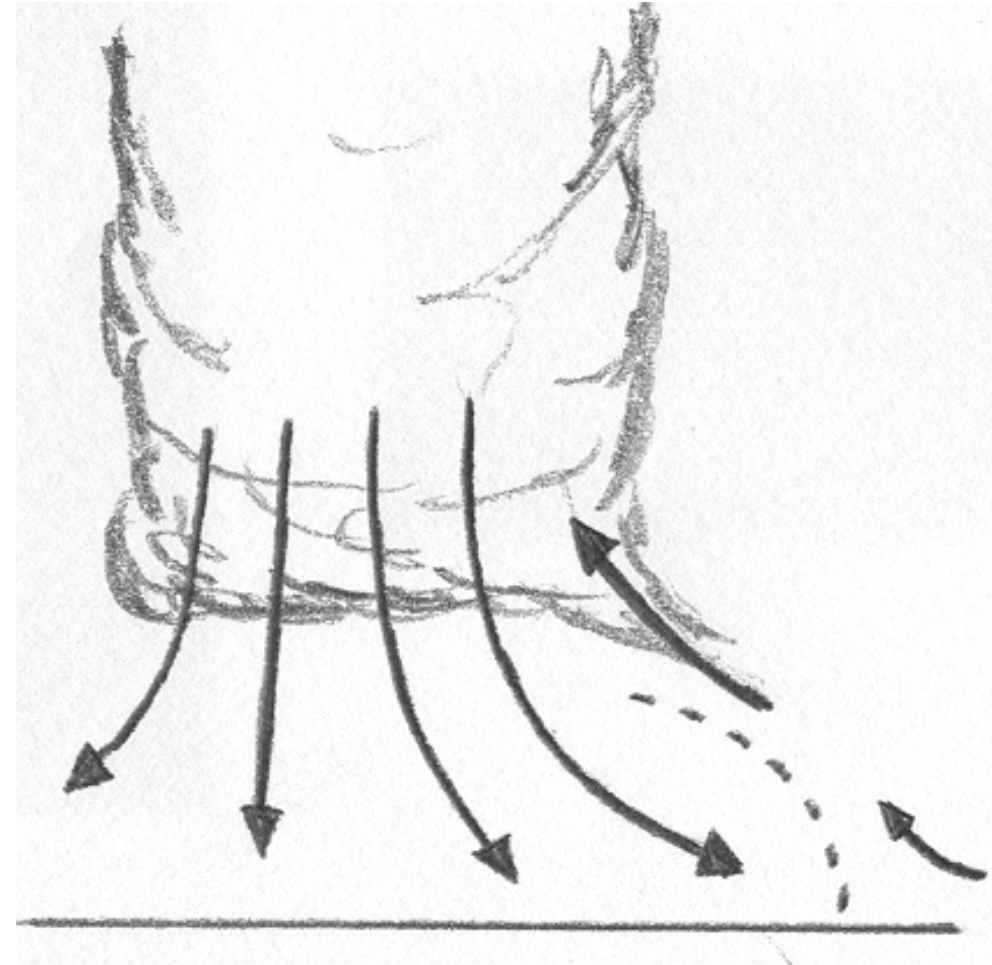
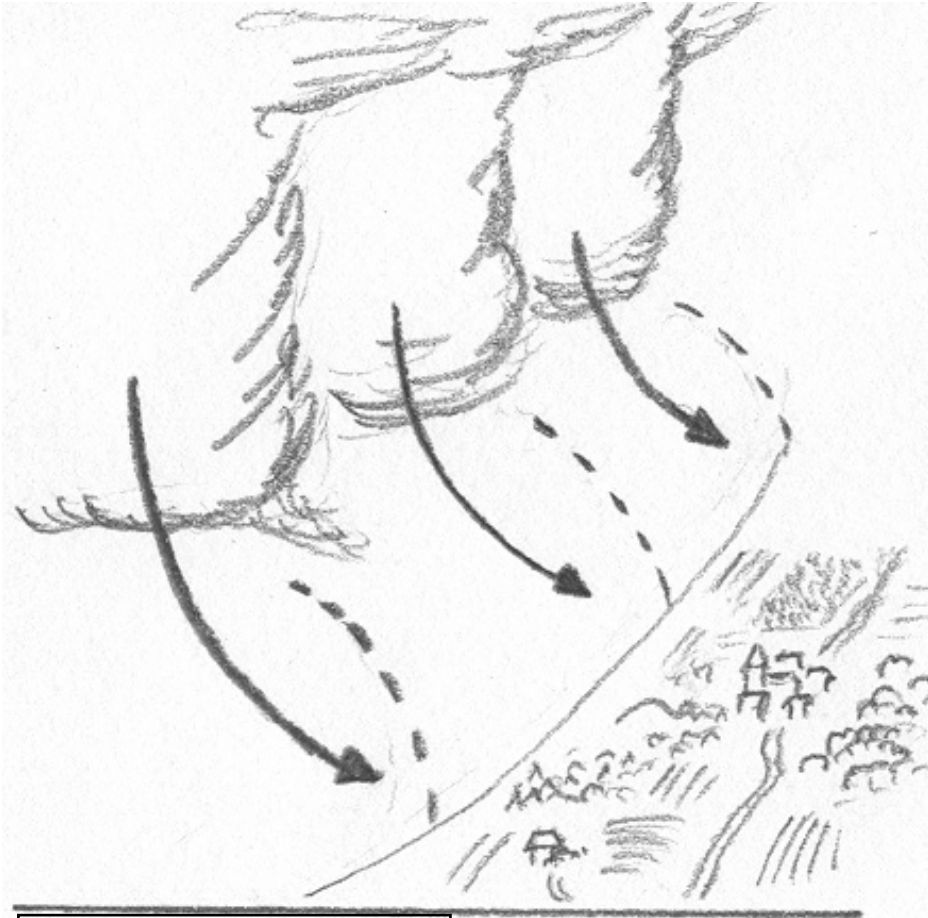


Video: G. Osterloh, 17:57-18:34



Video: W. Stieglmair, ca. 18:10

Gewitterfronten



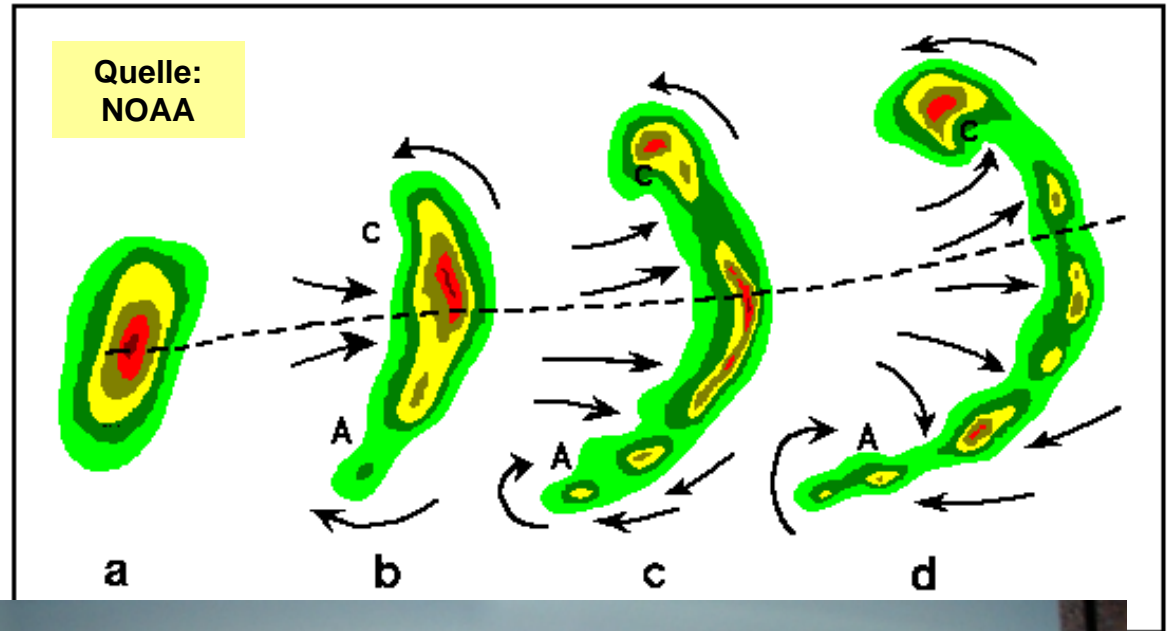
Eisenbach (2004)

Entlang einer Gewitterfront können mehrere Downbursts **gleichzeitig nebeneinander** oder auch **zyklisch** von der selben Zelle gebildet werden. Dies kann zur Bildung von „**Bow Echos**“ oder im Extremfall „**Derechos**“ führen.

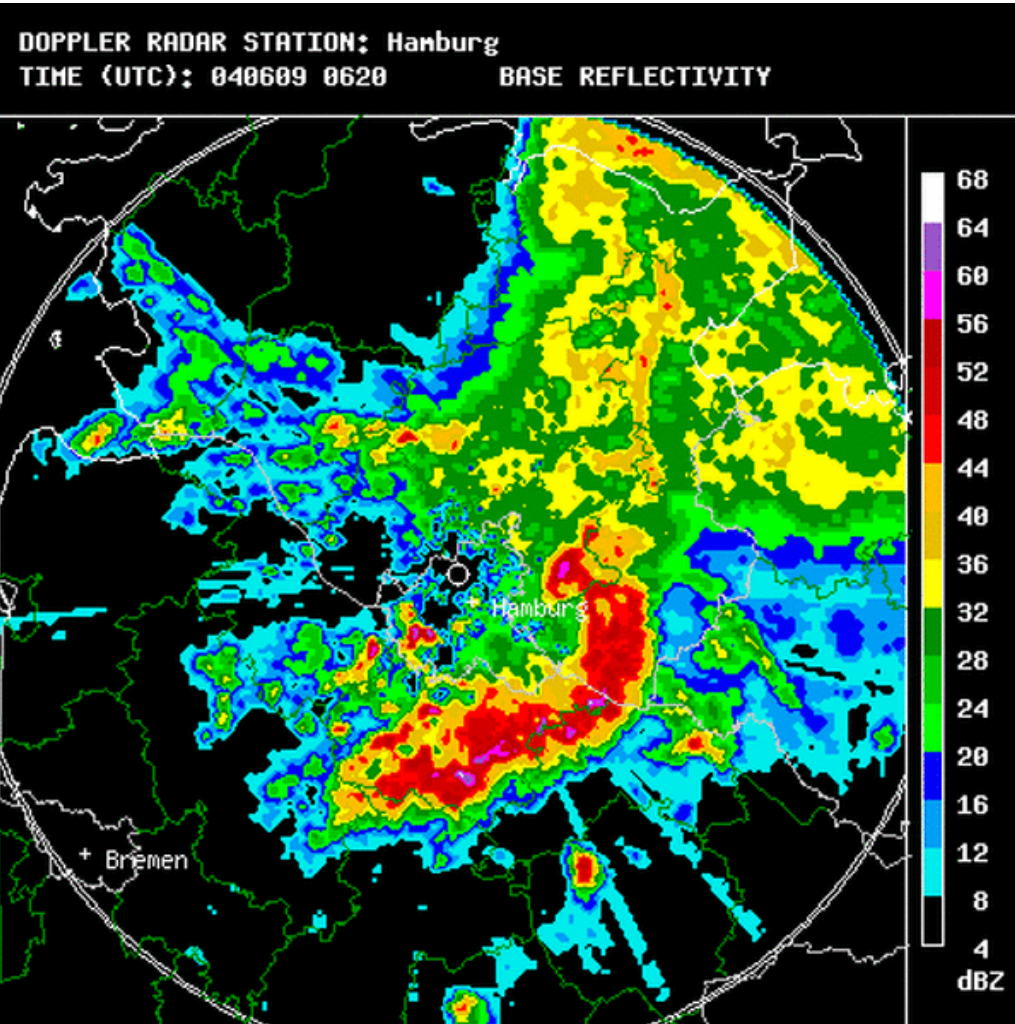
Bow Echo ("bogenförmiges Radarecho")

Downburst-Potenzial im Zentrum, Tornado-Potenzial am zyklonalen (Nord-)Ende

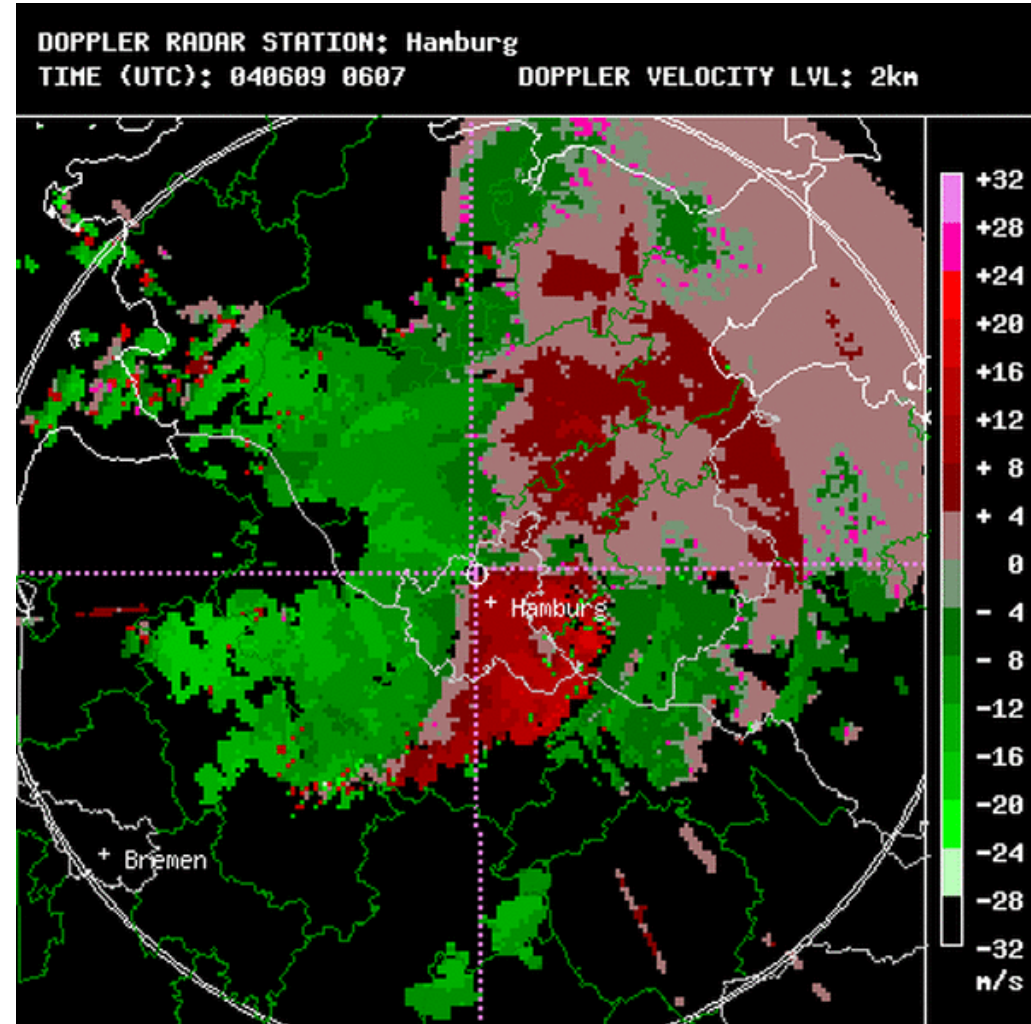
Visuelles Anzeichen eines Bow Echo: **Ausgeprägter Böenkragen (shelf cloud)**



F1 Bow Echo: Hamburg, 9. 6. 2004



Reflektivitätsfaktor

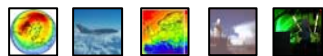


Doppler Geschwindigkeit



DWD Doppler-Radarverbund: Hamburg.

Institut für
Physik der Atmosphäre



Bilder: Jan Hoffmann

Fortbildungstag DMG ZV München, 3. 6. 2005



Derechos

USA



Derecho (span.): „geradeaus“ ([Hinrichs, 1888](#)), vgl. Köppen (1896)
Wieder in der Meteorologie eingeführt durch [Johns und Hirt \(1987\)](#)

Langlebige, konvektive Sturmzone eingebettet in einer Gewitterfront

Deutschland



Berliner Derecho vom 10. Juli 2002

Foto: Naumburg W von Kassel, 10.07.2002 sturmjagd.de



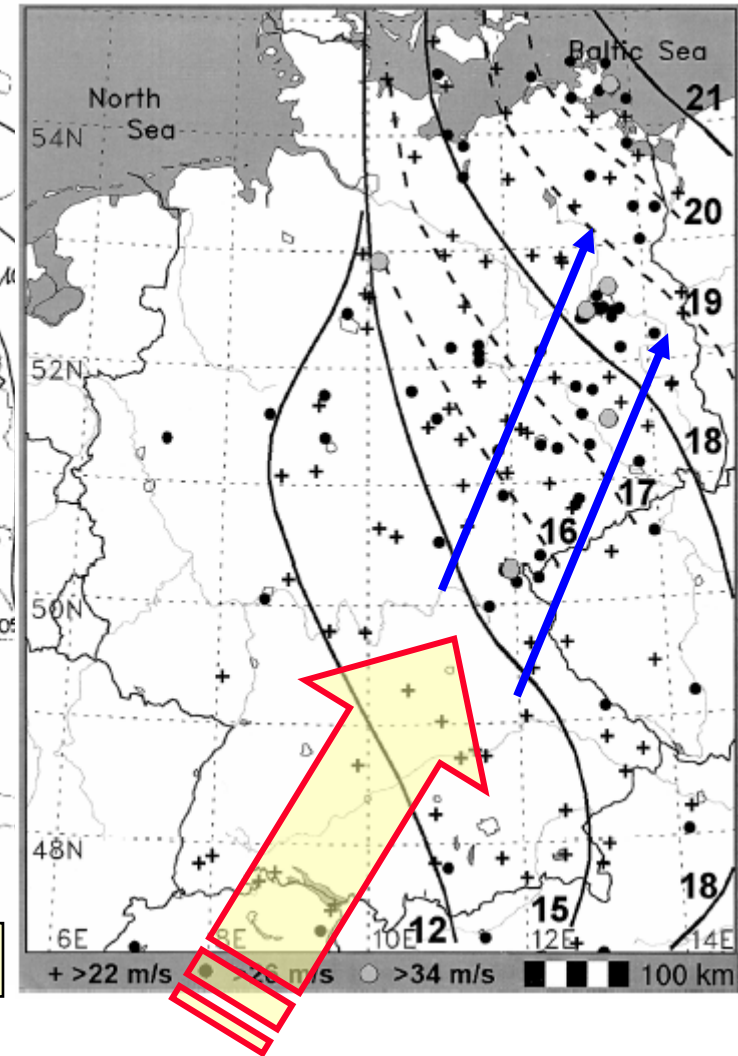
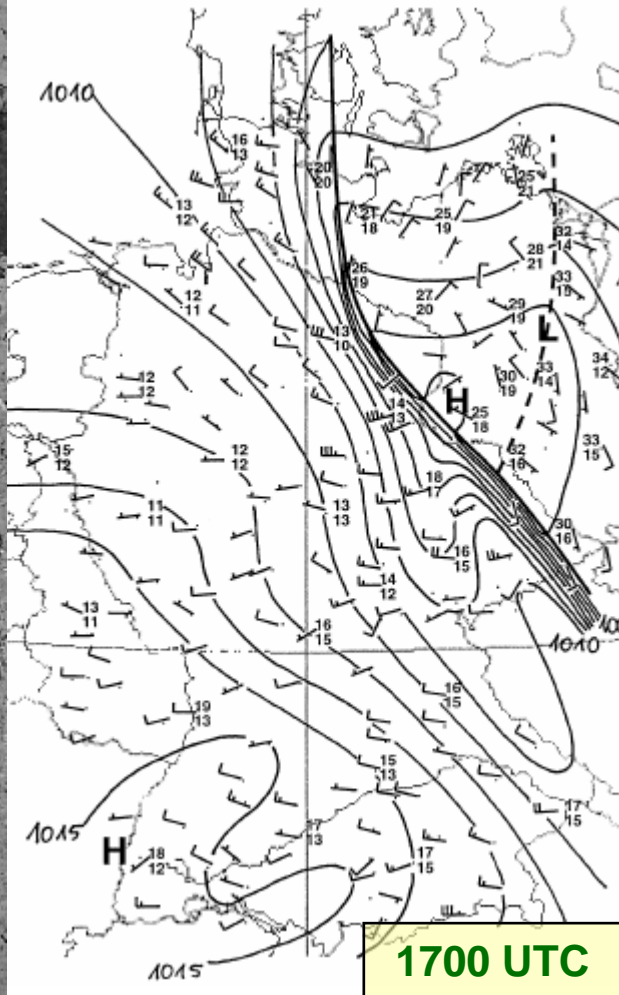
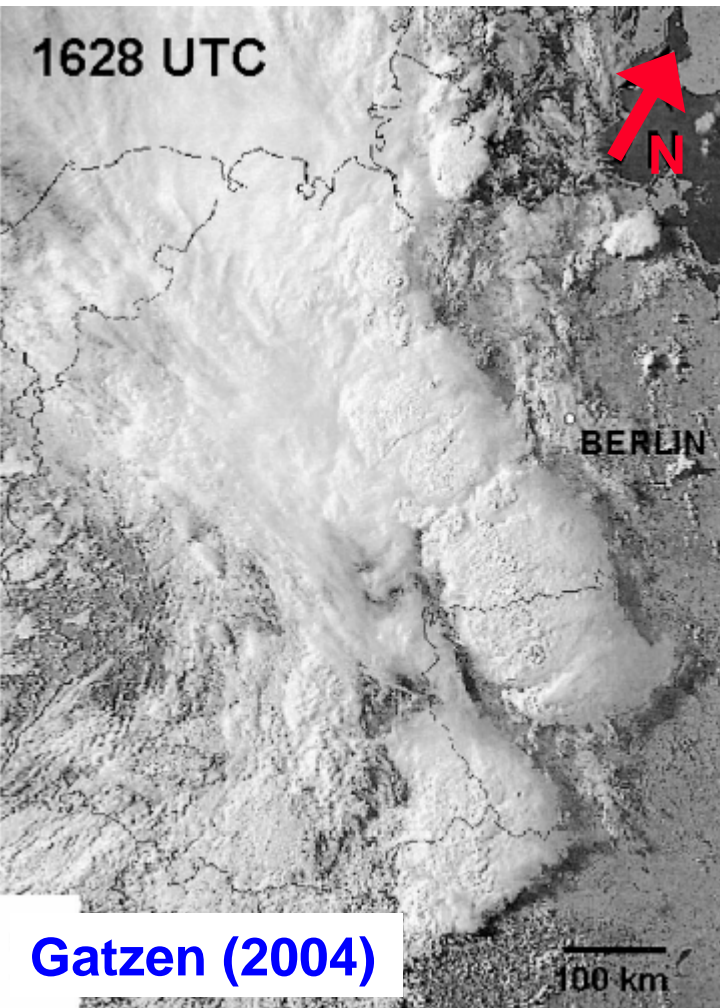
Institut für
Physik der Atmosphäre



Fortbildungstag DMG ZV München, 3. 6. 2005



F1 Derecho Berlin vom 10.7.2002



Zone stärkster Winde (mind. F1) erzeugt Schadensschneise **quer** zu Gewitterfront

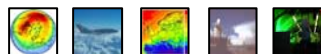
Intensitätseinstufung

Fujita- und TORRO-Skala:

- Design, Einstufung anhand der aufgetretenen Schäden

Fragestellungen:

- Intensitätsverteilung von Downbursts und Tornados
- Anpassung der Schadenbeschreibung an europäische Gegebenheiten



Die Fujita Skala

Vom **Design** her: **Geschwindigkeits-Skala**

F-2 = Windstille, **F0 = Bft 8**, **F1 = Orkan (Bft 12)**, **F6 = 515 km/h**

$$v(F) = 6.3(F + 2)^{3/2}, v(T) = 2.36(T + 4)^{3/2}, v(B) = .84(B + 0)^{3/2}$$



Ted Fujita (1920 –1998)

In der **Praxis** (mangels direkter Messwerte):

Abschätzung über **Schäden** in 6 Stufen (**F0 – F5**)

Drei Intensitätsklassen: **Schwach (F0, F1)**

Stark (F2, F3)

Verheerend (F4, F5).

Die englische TORRO Skala ist vom Design her identisch, hat aber doppelt so viele Intensitätsabstufungen (in der Praxis T0 bis T11).

Kurze Veranschaulichung der F-Skala

F0: Leichte Schäden an Dächern, Holzzäune werden umgeworfen.

F1: Dächer stärker beschädigt, einzelne Bäume entwurzelt.

F2: Einsturz einzelner Gebäude, Autos werden angehoben.

F3: Schwere Schäden an Massivbauten, Einsturz zahlreicher Gebäude.

F4: KFZ weite Strecken geschleudert, Totalschäden an Massivbauten.

F5: Totalschäden an Massivbauten, Baumstümpfe total entrindet

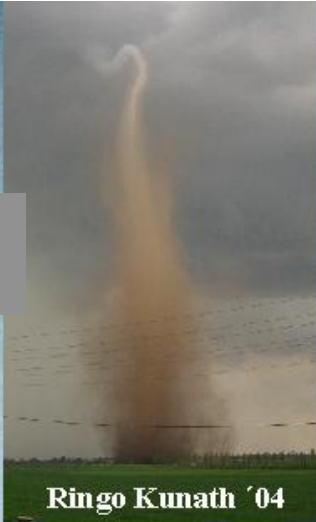
F6 (?) : Unvorstellbare Schäden, aber kaum von F5 zu unterscheiden

Eine detaillierte, in [Zusammenarbeit mit der Münchener Rückversicherung](#) an Mitteleuropa angepasste Beschreibung von Sach- und Flurschäden als Funktion der F- und T-Skala ist [bei TorDACH als pdf- und htm-Datei](#) verfügbar, im Menüpunkt "Education". Die Beschreibung der Waldschäden darin basiert hauptsächlich auf der Analyse von Hubrig (2004).



Beispiele von Tornados und F-Skala Bewertung

F1



Ringo Kunath '04

F3



Alexander Hildebrandt '04

F0



Lothar Franz '00



Jürgen Kaschner '01

F1

F2



Markus Michel '04

Hardy Schmidt '02



Karl-Heinz Ott '04

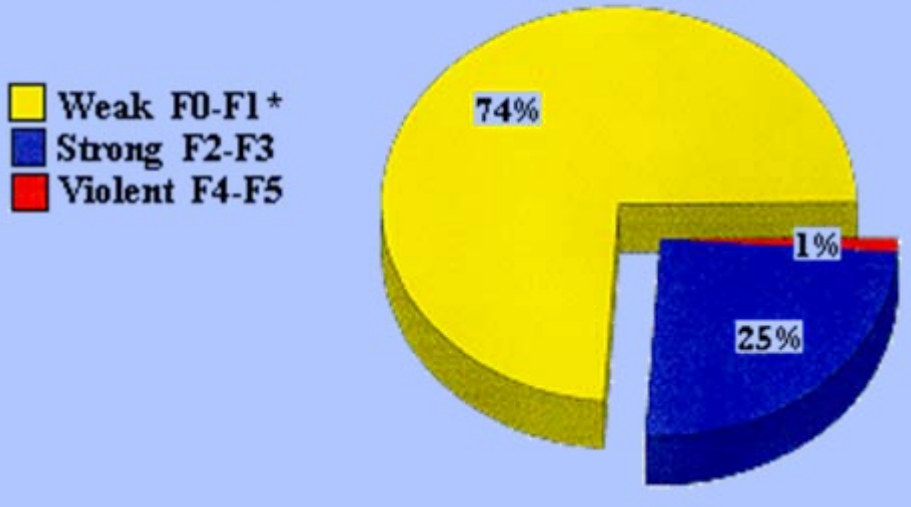


Jürgen Günther '02



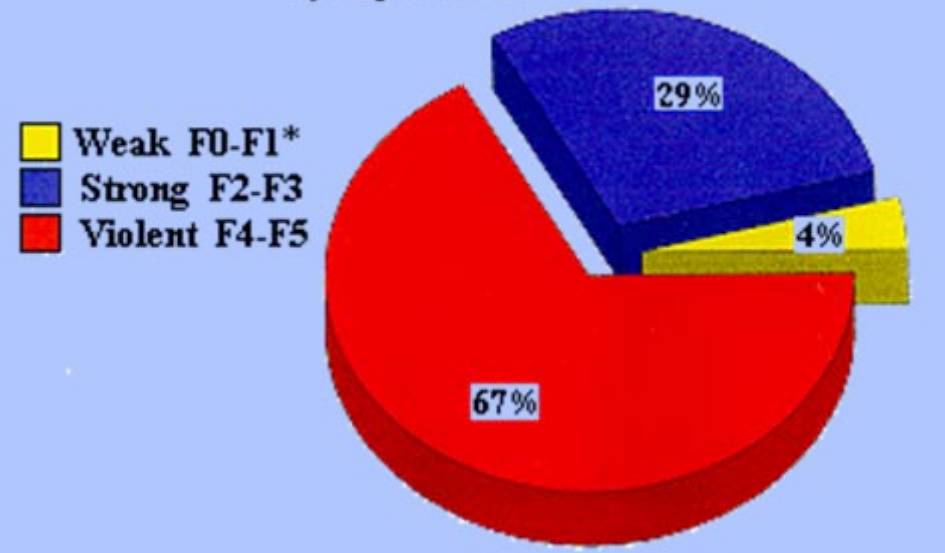
Häufigkeit von und Bedrohung durch Tornados in den USA

Percent of All Tornadoes 1950-1994
by Fujita Scale Class



Intensitätsverteilungen:
Europa **sehr ähnlich** den USA

Percent of Tornado Related Deaths 1950-1994
by Fujita Scale Class



Todesopfer:
Europa **sehr anders** als die USA

Potenziell gefährliche Unterschätzung des Risikos in Europa!

Klimatologie anhand der TorDACH Daten

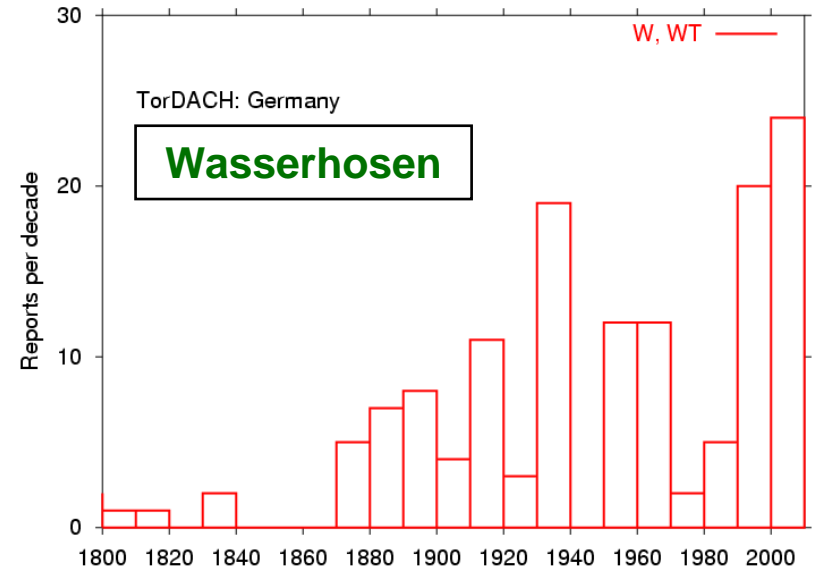
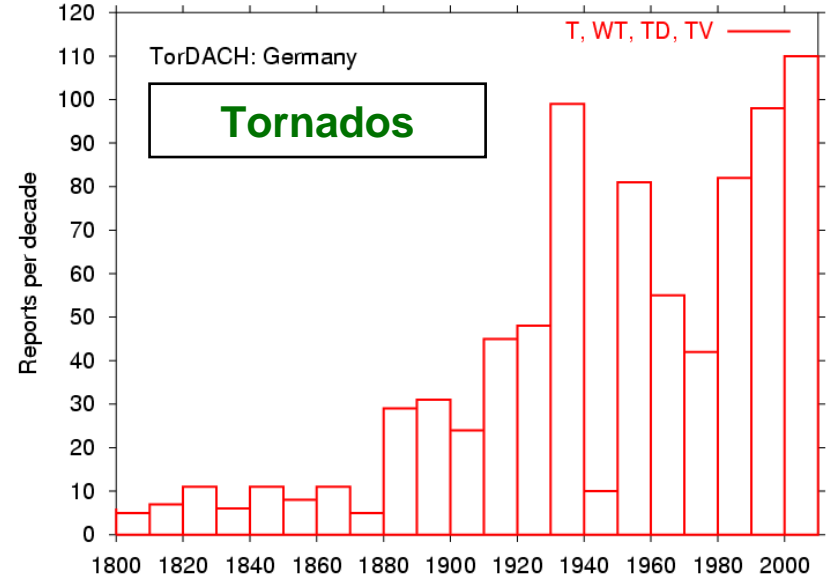
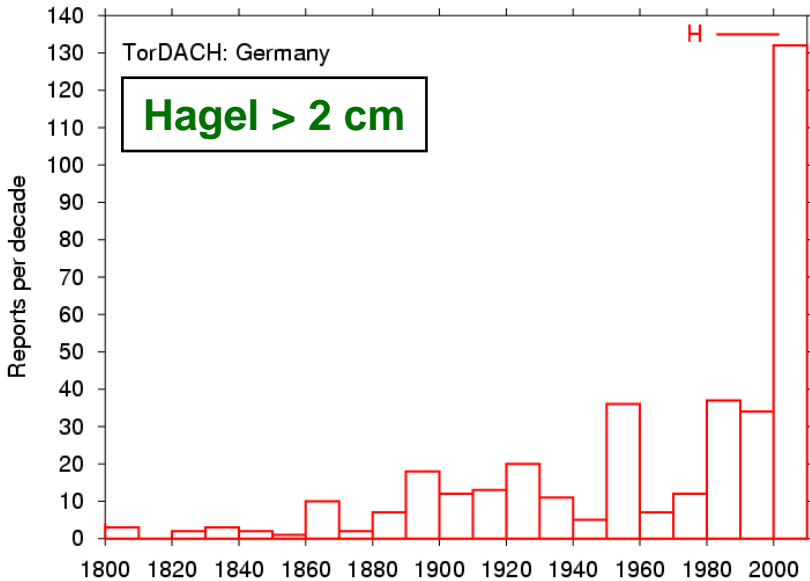
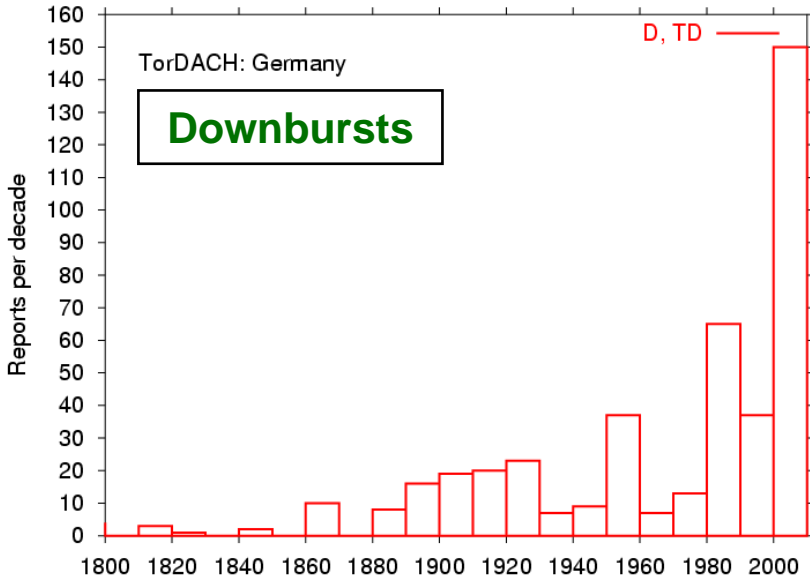
Fragestellung:

- Wie sind **Jahres- und Tagesgänge** verschiedener Unwetterarten?
- Wie ist die **regionale Verteilung** der Ereignisse?
- Wie sind die **Intensitäten** der Ereignisse verteilt, ist **Risikoanalyse** möglich?
- Gibt es klimabedingte Trends?

Methoden:

- Möglichst **vollständige Erfassung** der betrachteten Unwetterphänomene
- **Qualitätskontrolle** (z.B. Belastbarkeit und Konsistenz)

Starke Zunahme gemeldeter Ereignisse seit ca. 2000



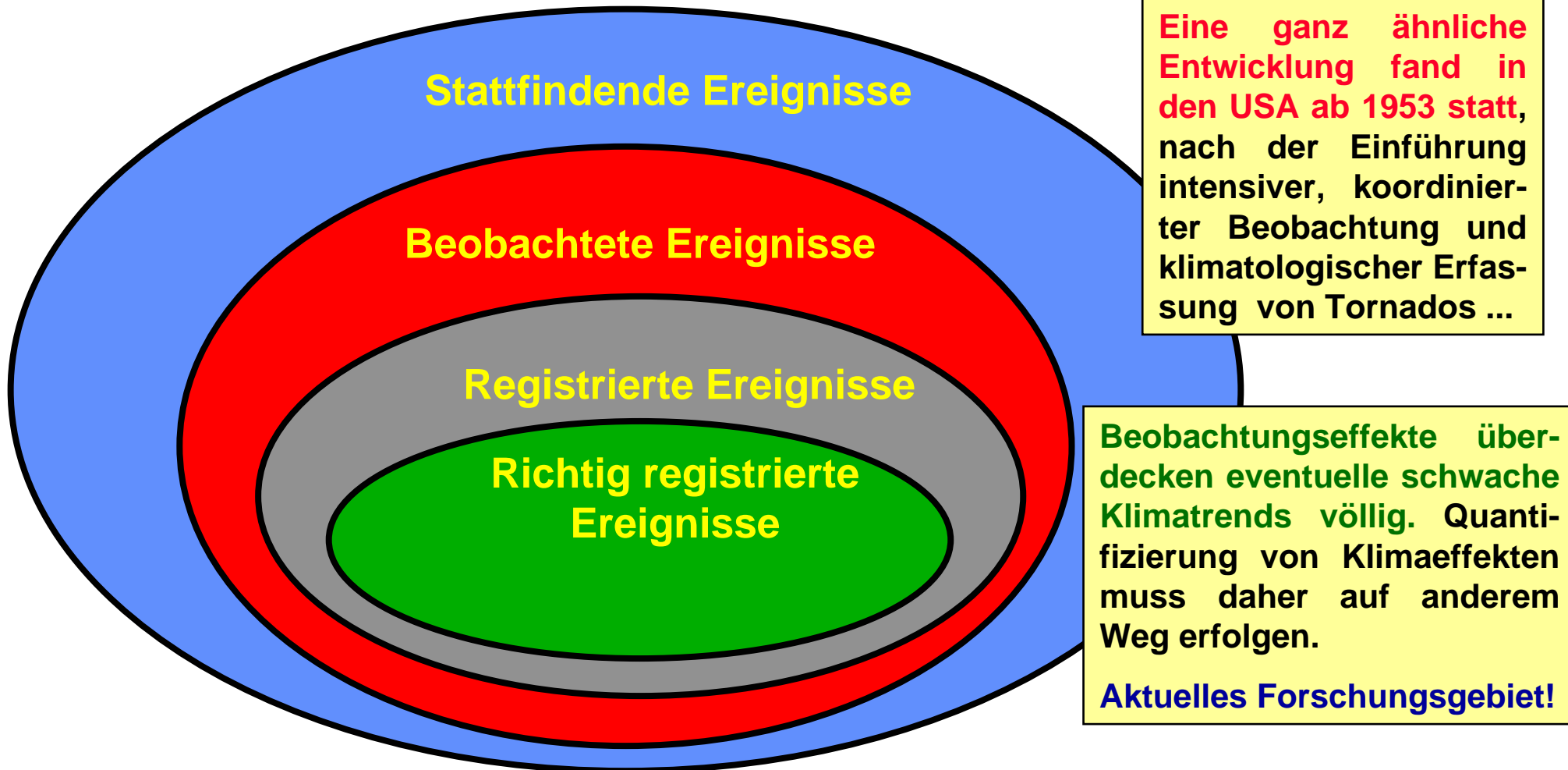
???

Ein
Klima-
trend?

???

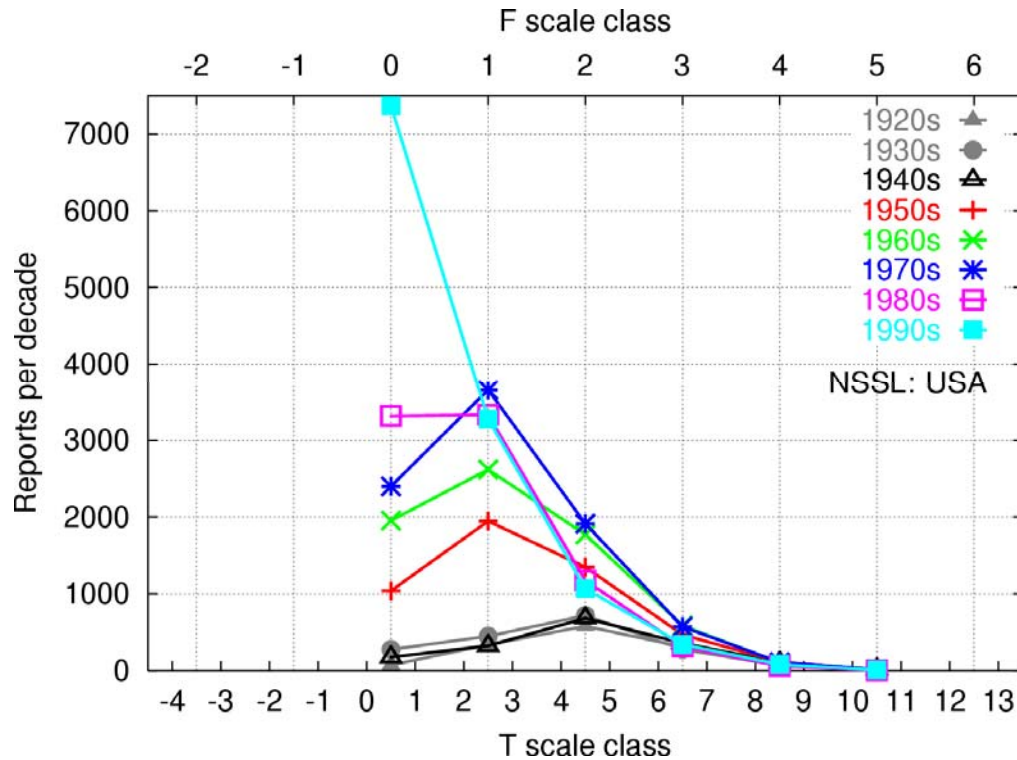


Zunahme kein Klimatrend, sondern Beobachtungseffekt

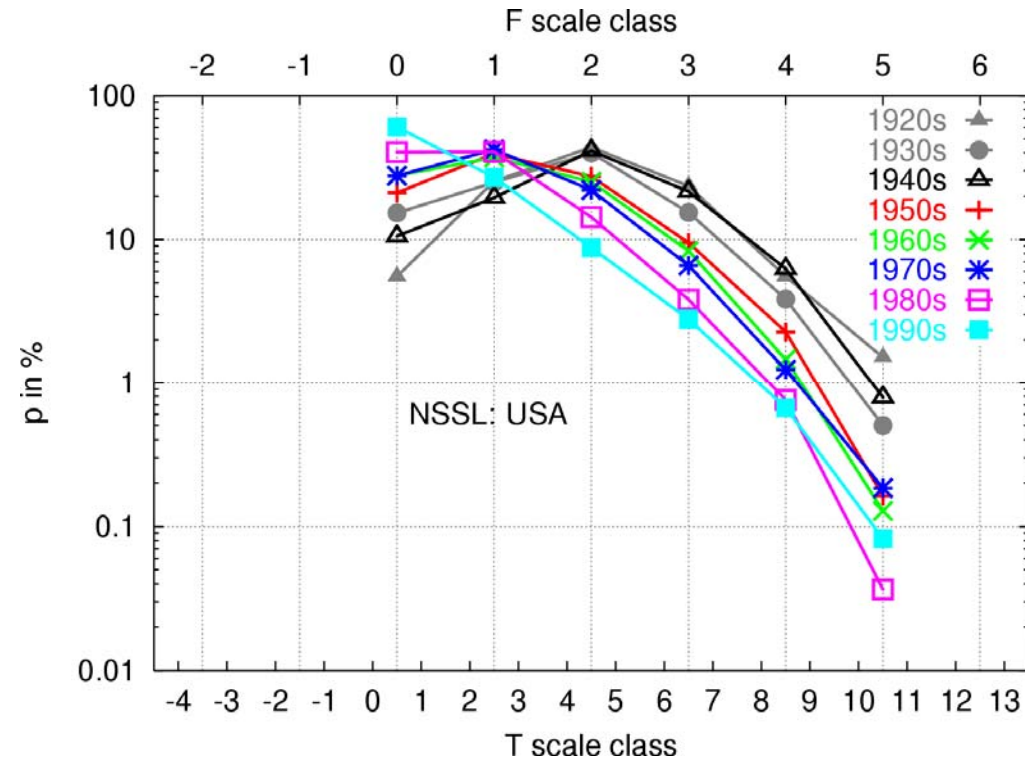


Besonders bei Downbursts, Hagel und Wasserhosen gibt es derzeit noch eine besonders **hohe Dunkelziffer** an nicht registrierten Ereignissen. Dies lässt weiterhin hohe „**Steigerungsraten**“ der Meldungen erwarten.

Zunahme gemeldeter Tornados in den USA seit ca. 1950



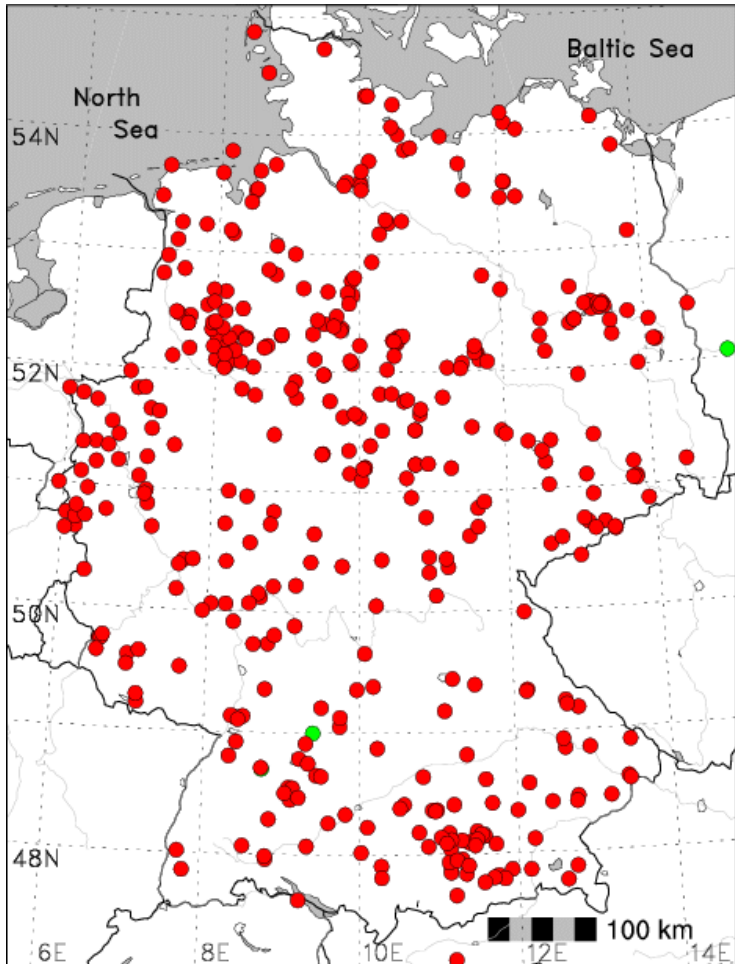
Meldungen pro F-Skala Klassen, aufgeschlüsselt nach Dekaden



F-Skala Intensitätsverteilungen, aufgeschlüsselt nach Dekaden

In den **1930er** Jahren ging der US-Wetterdienst von **ca. 130 Tornados pro Jahr** aus, Ende der **1990er** Jahre jedoch von **ca. 1200 Tornados pro Jahr**. Diese Steigerung um einen Faktor 9 entstand in erster Linie durch **intensivere Beobachtung seit 1953**.

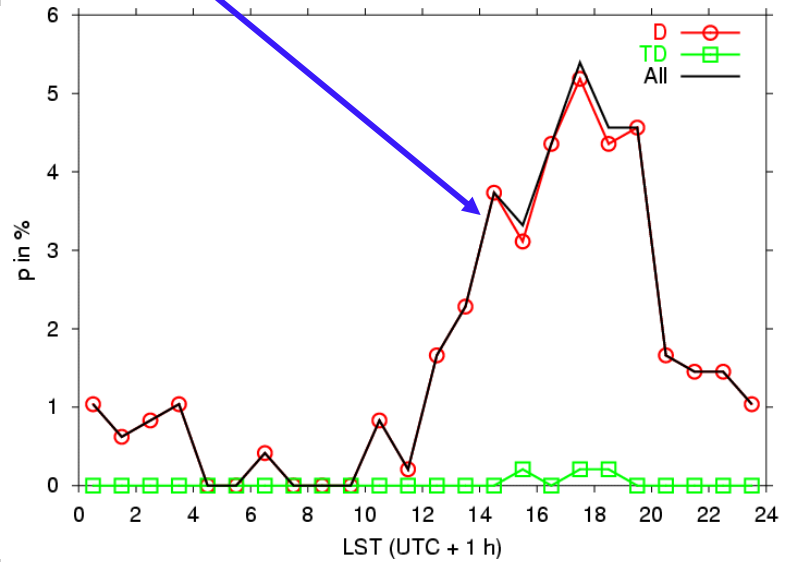
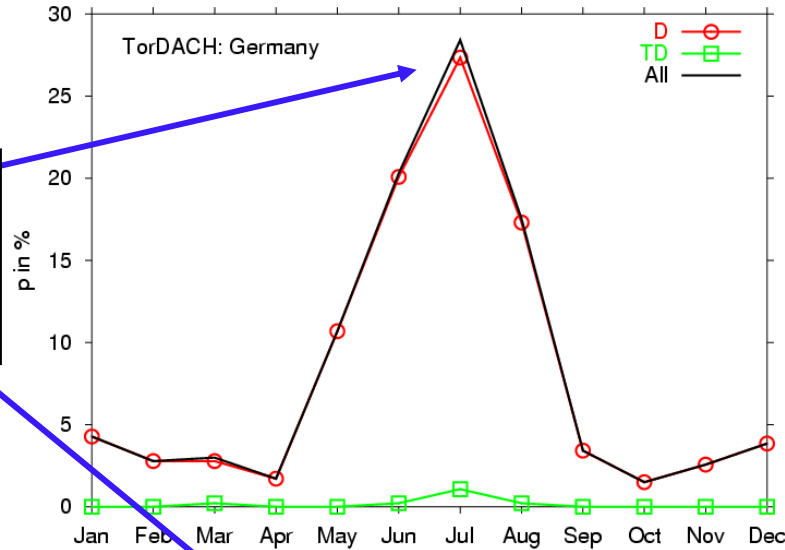
Orte, Jahres- und Tagesgang der Downbursts



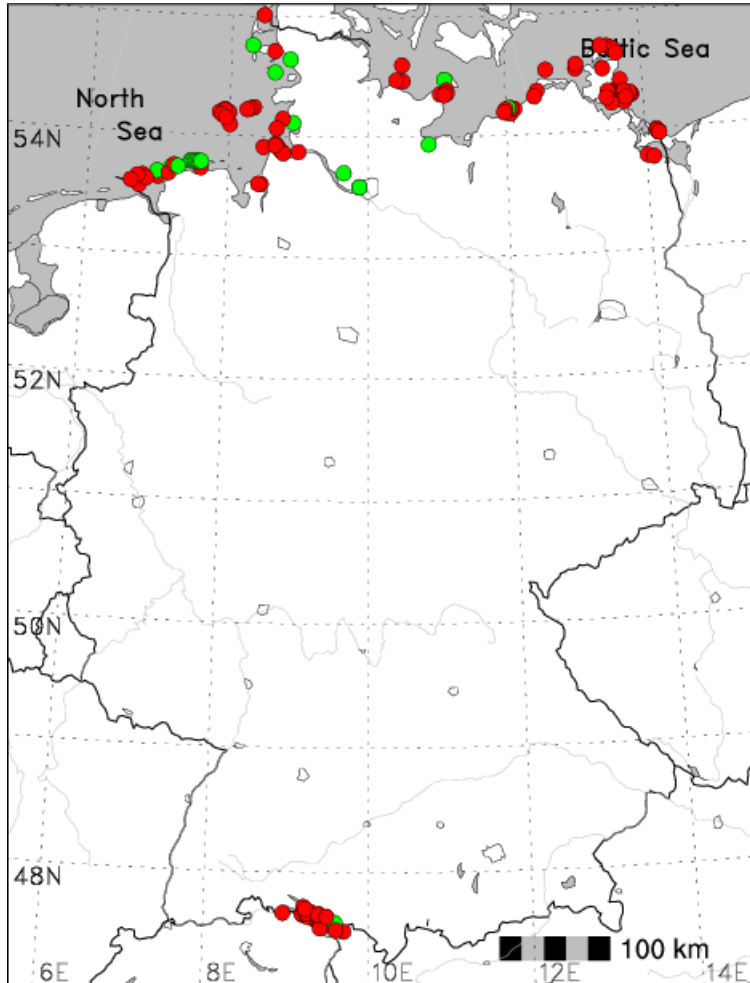
TorDACH-Daten bis 2003

Maximum im Juli, nachmittags bzw. abends / nachts.

Starke Indizien für **underreporting**, es werden viele Fälle nicht bekannt.
Solide quantitative Risikoschätzung ist derzeit noch nicht möglich. Genauere klimatologische Erfassung notwendig



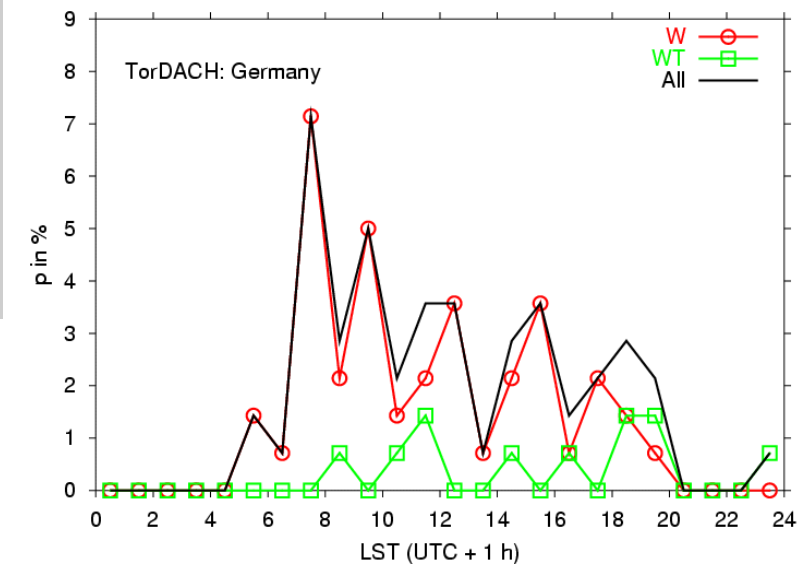
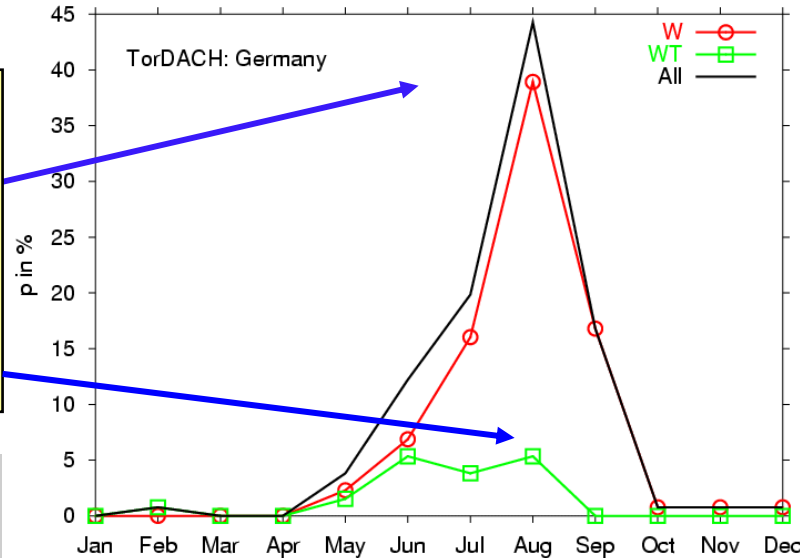
Orte, Jahres- und Tagesgang der Wasserhosen



August-Max. reiner Wasserhosen, anders als bei Wasserhosen, die auch Land erreichen!

Wasserhosen werden offenbar zu selten gemeldet. Risikoschätzung ist derzeit noch nicht möglich.

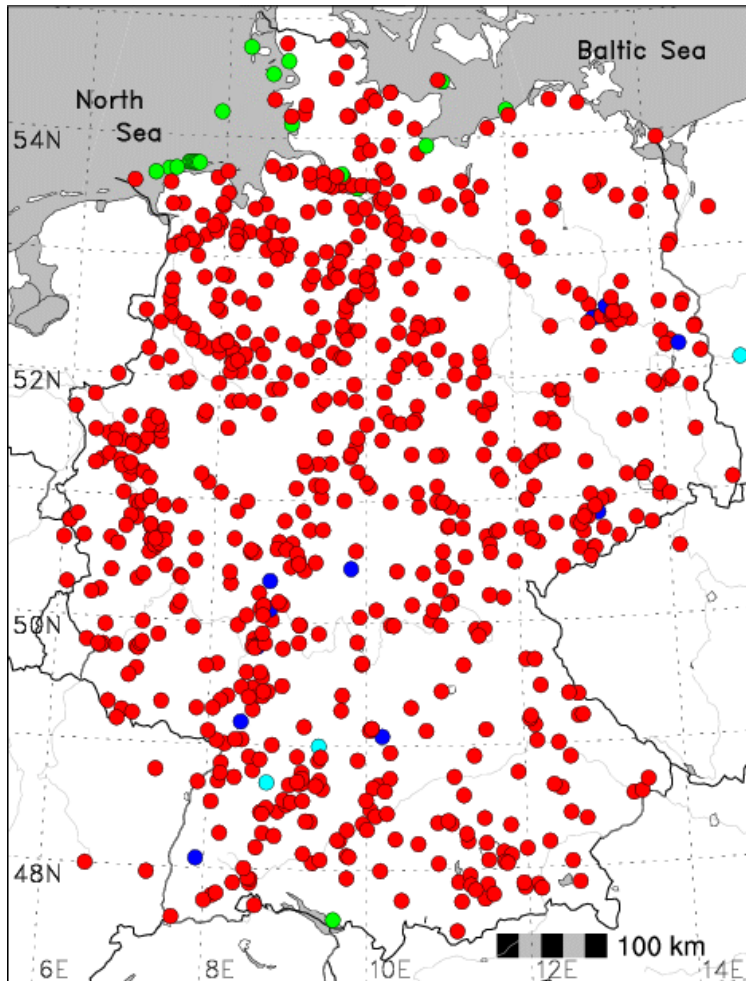
TorDACH-Daten bis 2003



Institut für Physik der Atmosphäre



Orte, Jahres- und Tagesgang der Tornados

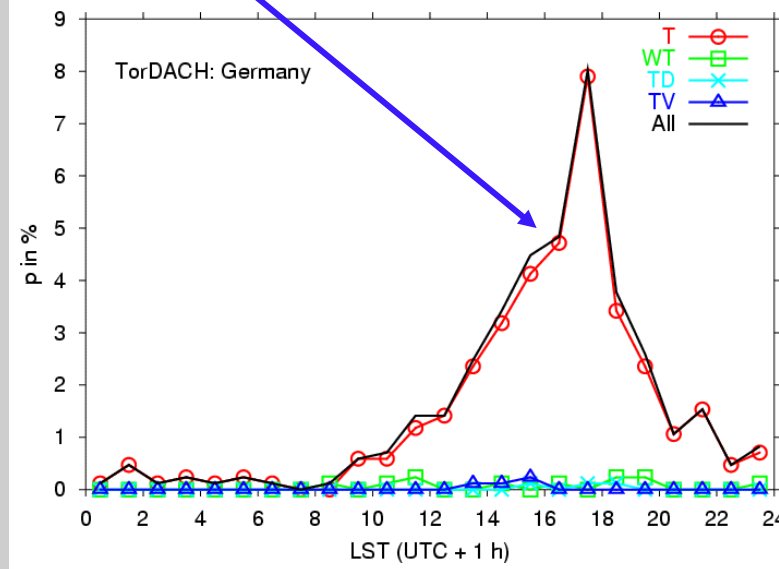
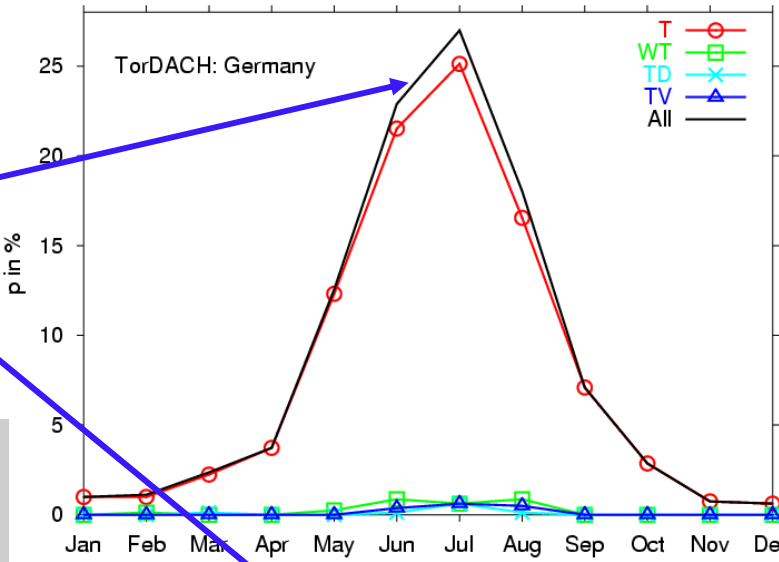


Maximum im Juli,
nachmittags bzw.
abends.

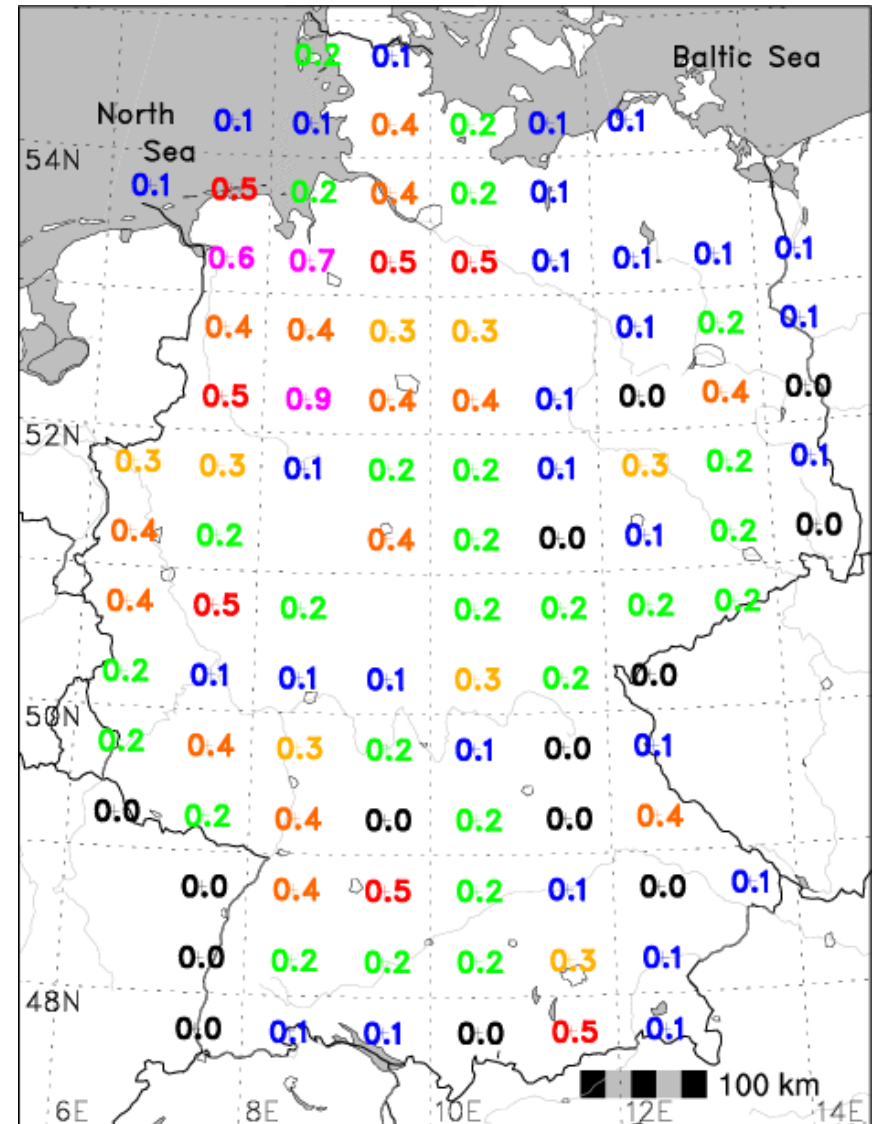
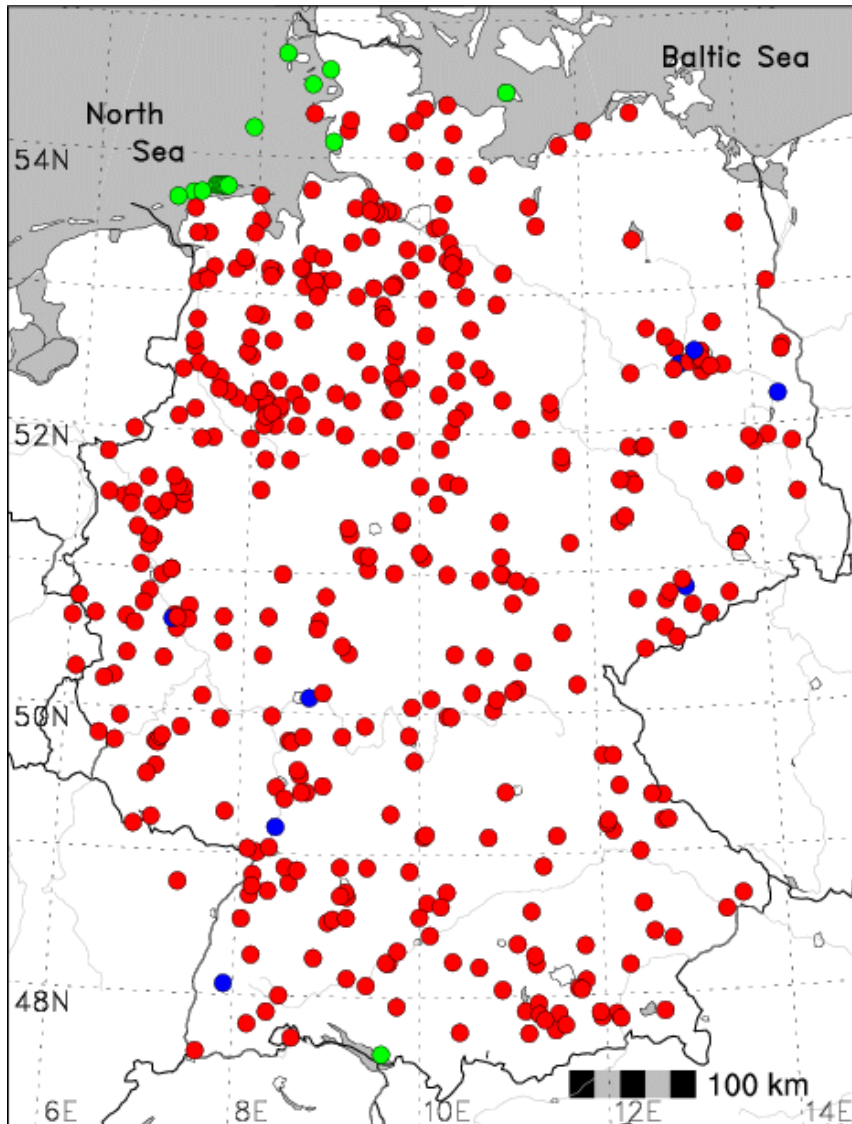
Trotz bereits guten
Datenumfangs **viele**
historische Fälle
noch unbekannt,
z.B. aus den zwei
Weltkriegen oder
aus dem Osten
Deutschlands von
1950-1990.

Risikoschätzung ist
bereits möglich.

TorDACH-Daten bis 2003



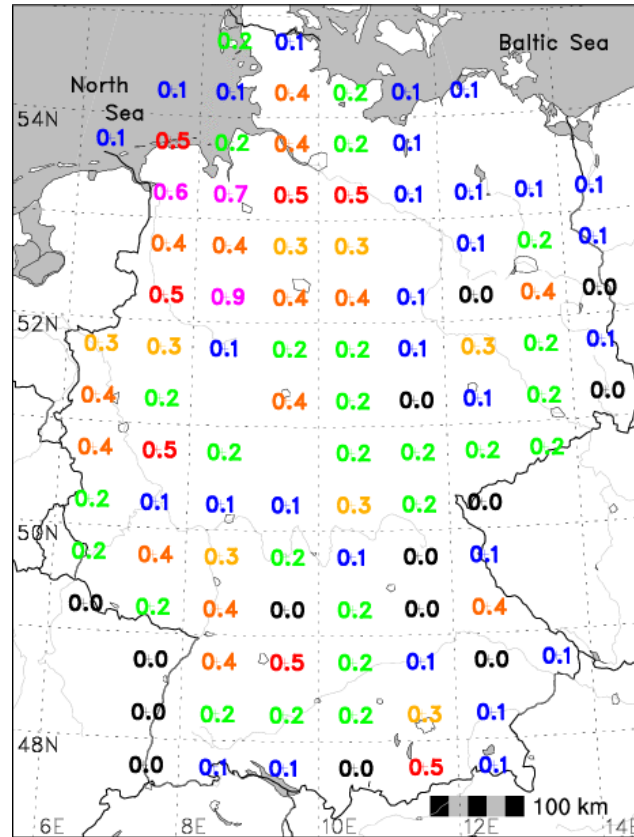
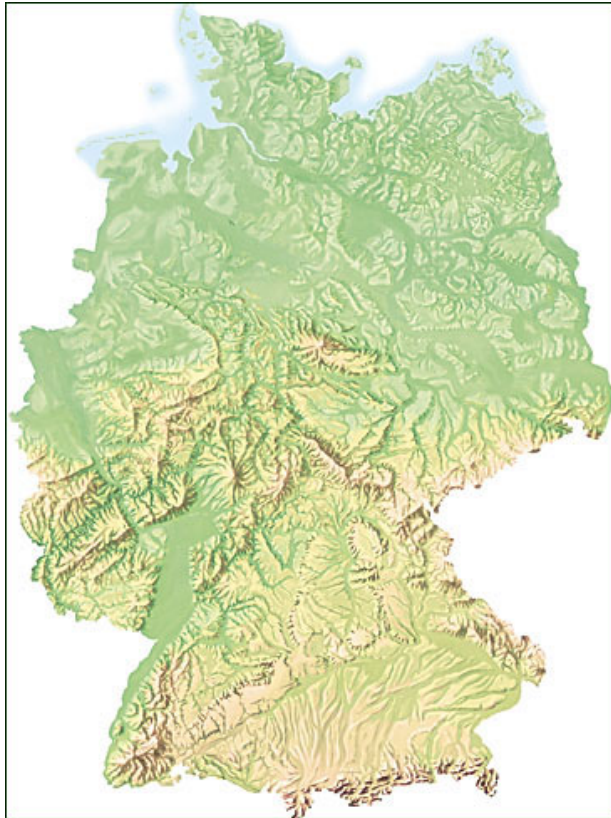
Tornadomeldungen und -häufigkeit im Zeitraum 1950-2003



Häufigkeiten bis 0.9 pro Jahr und 10000 km² in der norddeutschen Tiefebene



Einflüsse auf Meldungen: Geländeform / Bevölkerungsdichte



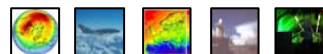
Bevölkerungsdichte



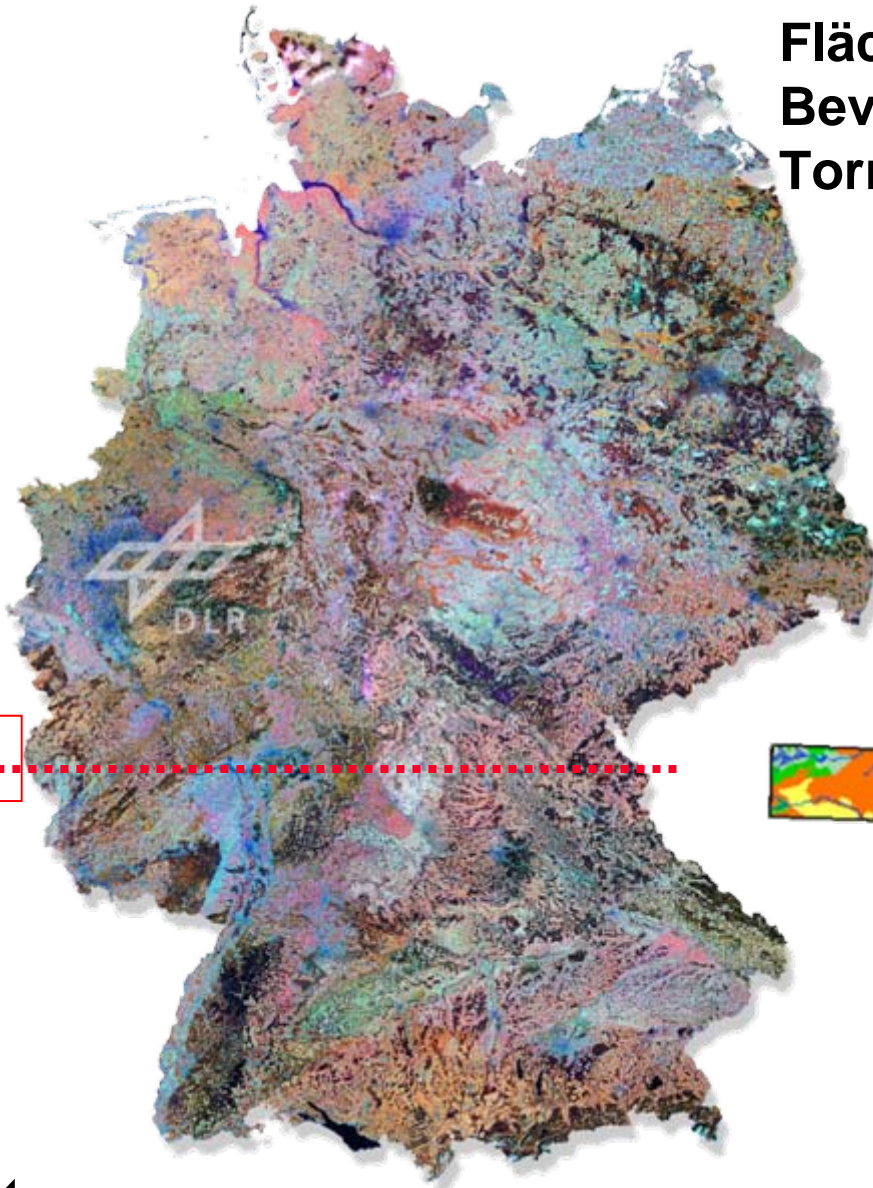
© BBR Bonn 2002
 Gemeinden, Stand 1.1.1996
 Datenbasis: Laufende Raumbeobachtung des BBR
 Anmerkung: Zur besseren Vergleichbarkeit wurde die Bevölkerungsdichte auf Ebene der Gemeinden und folgenden Gemeindegliederungen dargestellt: Ämter in Schleswig-Holstein, Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern; Samtgemeinden in Niedersachsen; Verbandsgemeinden in Rheinland-Pfalz; Verwaltungsgemeinschaften in Baden-Württemberg, Bayern, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen; Verwaltungswirbale in Sachsen und Kirchspallandsgemeinden in Schleswig-Holstein.

Abgesehen von der norddeutschen Tiefebene existiert eine deutliche Korrelation der Tornado-beobachtungen mit der Bevölkerungsdichte.

Das lässt weiterhin auf eine hohe Dunkelziffer von Ereignissen schließen!



Besserer Risikovergleich bei D - Oklahoma als bei D - USA

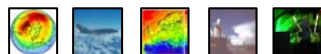
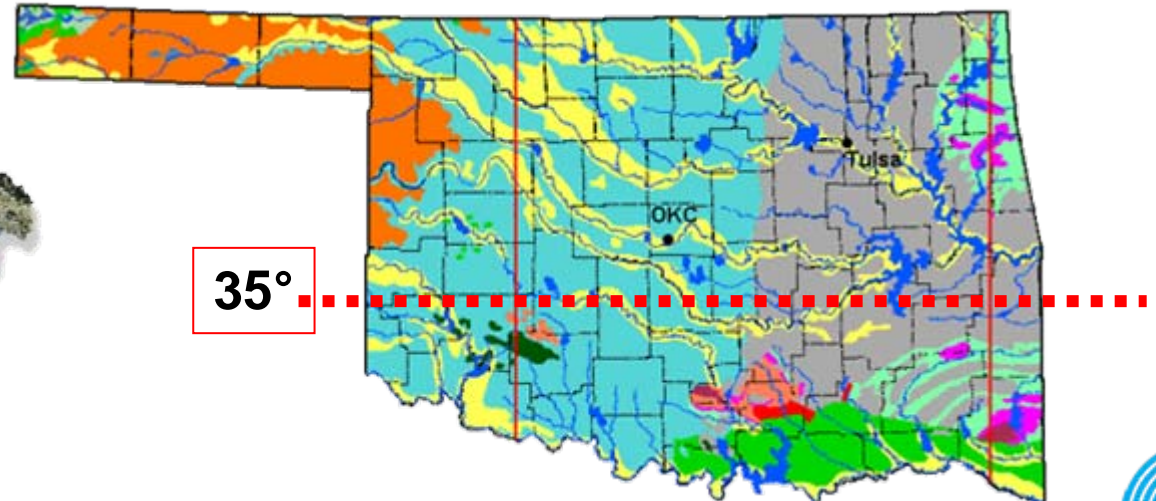


Fläche: 356984 km²
Bevölkerung: 82000000
Tornados / a: +/- 15

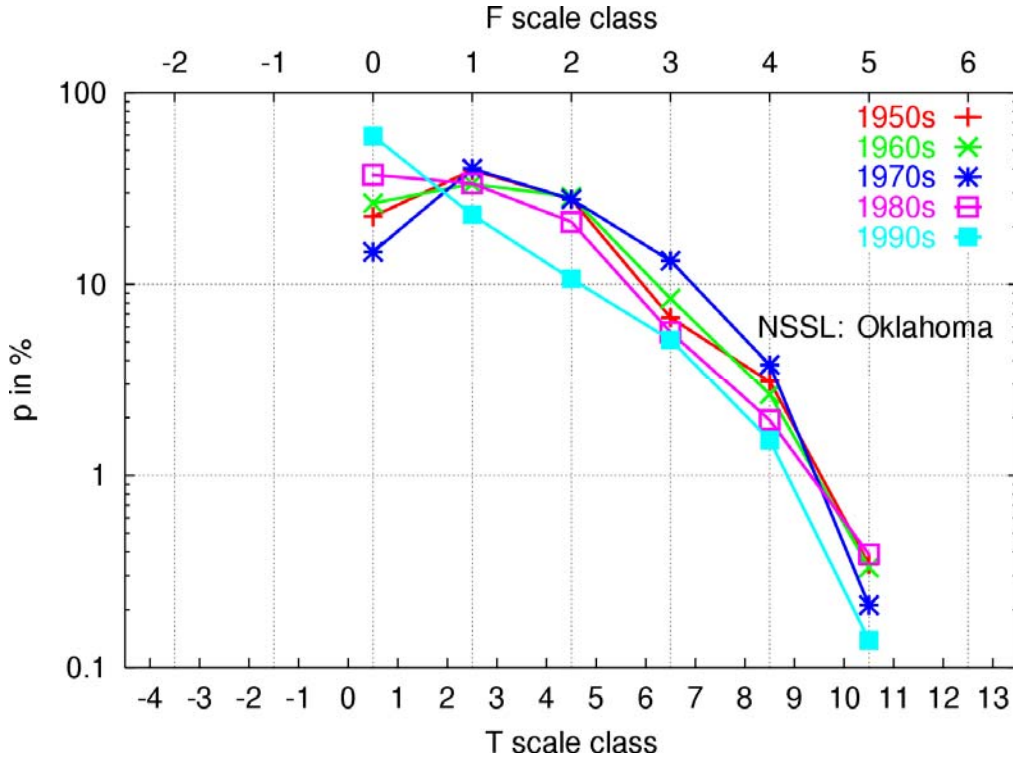
Verhältnisse D / Oklahoma

Fläche : 2.0
Bevölkerung : 23.7
Tornado Inzidenz : 0.1

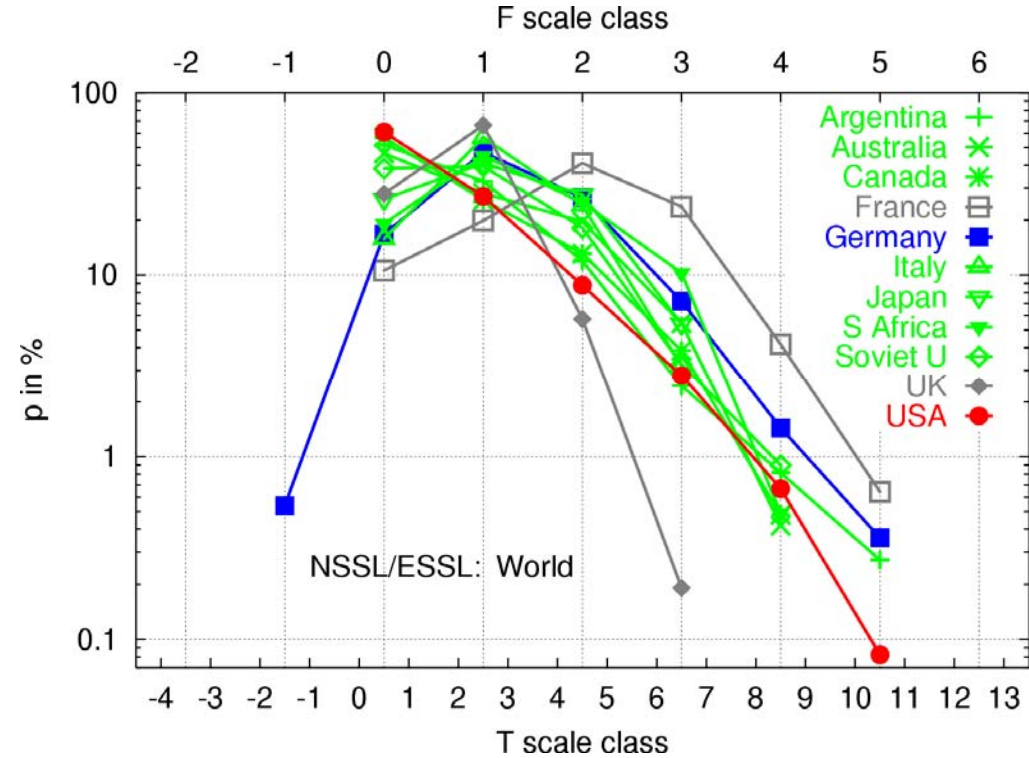
Fläche: 177802 km²
Bevölkerung: 3500000
Tornados / a: +/- 52



Intensitätsverteilungen Oklahoma und Länder weltweit



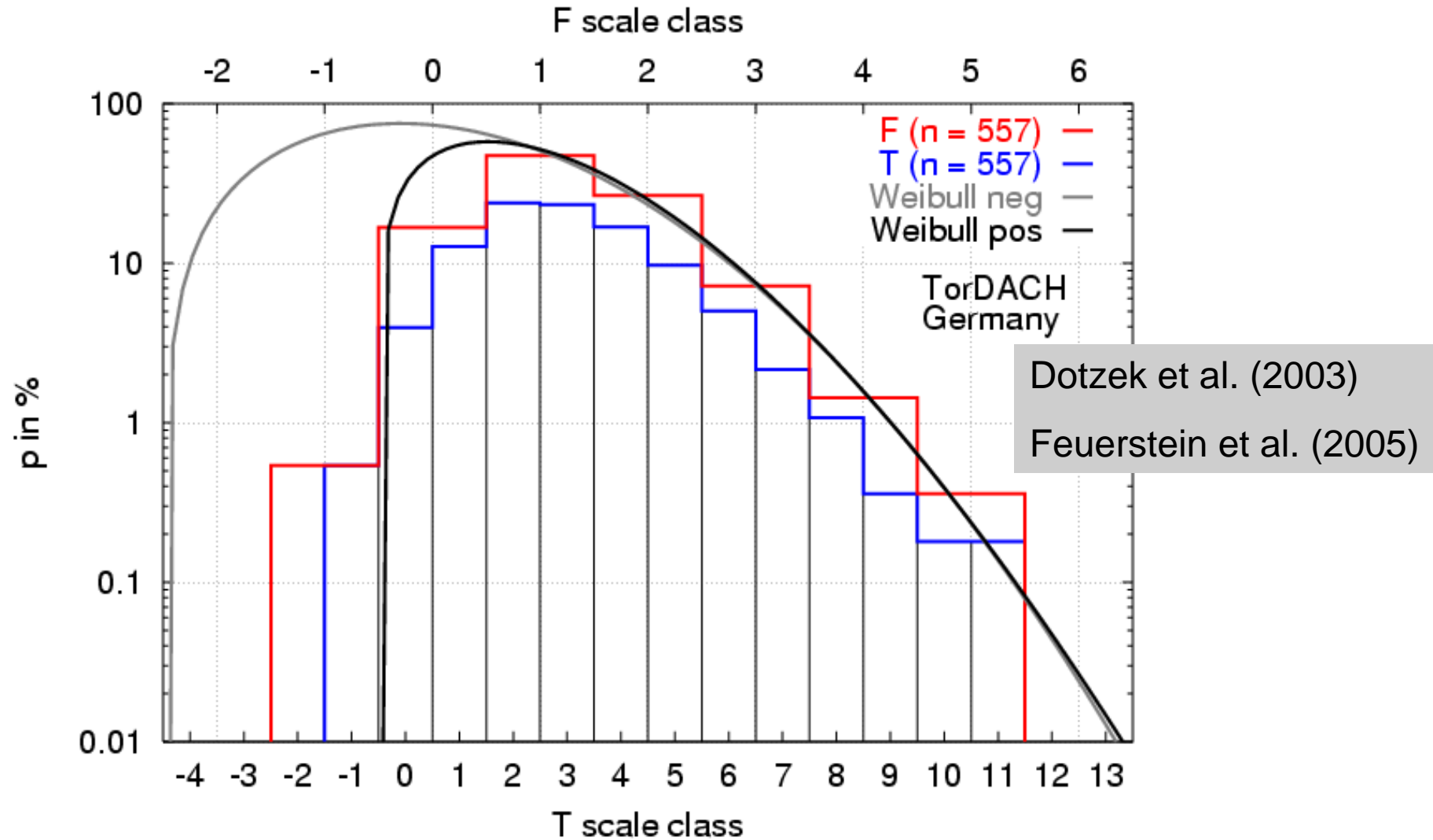
Oklahoma



Weltweit

Die Verteilungen für Oklahoma und für viele andere Länder weltweit legen eine Anpassung mit rechtsgekrümmten Weibullverteilungen nahe. Was ergibt sich daraus für die deutsche Tornado-Intensitätsverteilung?

Weibull-Modellierung der Intensitätsverteilung Deutschland



Sehr ähnlich wie in den USA in den 1950er, 1960er Jahren

Erkenntnisse aus der Intensitätsverteilung

Die erstmals von TorDACH erarbeitete deutsche Tornado-Intensitätsverteilung basiert z.Zt. auf **557 Ereignissen** (von 863, d.h. 64.5 %) mit **F-Skala Bewertung** und erlaubt bei konservativer Annahme von etwa 10 Tornados pro Jahr mit mindestens F0 Intensität in Deutschland folgende Aussagen:

F-Skala	n_{obs}	p_{obs}	n_{Weibull}	p_{Weibull}	t_{Weibull}
F-2	0	0.0 %	123.8	9.3 %	ca. 1 Jahr
F-1	3	0.5 %	350.7	26.2 %	< 1 Jahr
F0	93	16.7 %	398.6	29.8 %	< 1 Jahr
F1	263	47.2 %	279.3	20.9 %	< 1 Jahr
F2	148	26.5 %	131.5	9.8 %	ca. 1 Jahr
F3	40	7.2 %	42.7	3.2 %	ca. 3 Jahre
F4	8	1.4 %	9.7	0.7 %	Jahrzehnte
F5	2	0.4 %	1.5	0.1 %	ca. 100 Jahre
Total	557	=>	1338	=>	<u>Underreporting: 58 %</u>

Weibullverteilung **basiert auf Beobachtungswerten ab F1** und erlaubt daher eine sinnvollere Schätzung der Wiederkehrintervalle als direkt aus wenigen einzelnen Beobachtungen, wie z.B. im Fall der seltenen F4 und F5 Ereignisse.

Derzeit interessante Frage: Genauere Wiederkehrperiode t der F3 Tornados ...

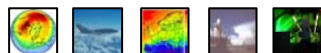
Schlussfolgerungen

Folgende Ergebnisse der Klimatologie von Downbursts und Tornados wurden in den vergangenen Jahren erzielt:

- Klassifizierung und Intensitätsbewertung von Unwetterereignissen
- Regionale Verteilung der Unwetter, Verknüpfung mit Bevölkerungsdichte
- Modellierung weltweiter Intensitätsverteilungen, Vergleich mit den USA

In den folgenden Jahren ist mit weiter zunehmenden Zahlen gemeldeter Unwetter zu rechnen, u.a. durch Initiativen wie Skywarn (www.skywarn.de) und erhöhte Aufmerksamkeit in Öffentlichkeit und Medien. Dies wird in Zukunft umfangreichere klimatologische Analysen, und dank des Doppler Radar Verbunds des DWD auch vermehrt Fallstudien ermöglichen.

Ausblick: (1) Kooperation mit DWD bzgl. der deutschen TorDACH-Datenbank.
(2) Entwicklung einer einheitlichen europ. Datenbank (auf der ESSL Webseite)



Literatur

Erweiterte Fassung des Vortrags ist bei tordach.org zum Download verfügbar, unter dem Menüpunkt: "Education".

Buch:

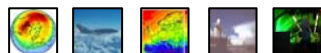
- H. Kraus & U. Ebel, 2003: Risiko Wetter, Springer, Berlin.

Artikel:

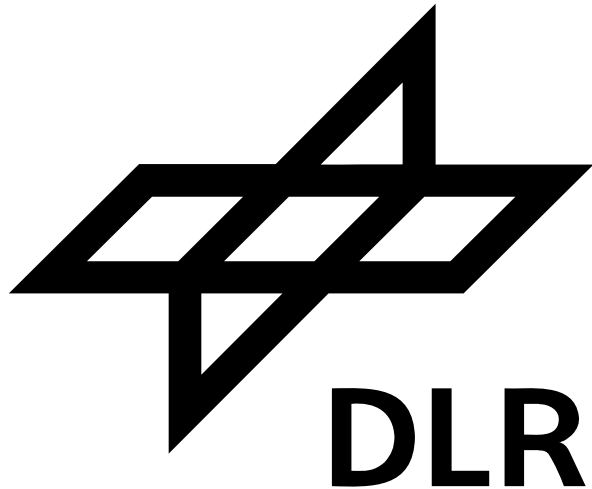
- N. Dotzek, 2005: Beitrag im Klimastatusbericht des DWD, Offenbach.
- B. Feuerstein, N. Dotzek, J. Grieser, 2005: *J. Climate*, **18**, 585-596.

Proceedings

- *Atmos. Res.*, 2001 + 2003: Sonderbände der ECSS Tagungen 2000 + 2002.
- Beiträge zum *Atmos. Res.* Sonderband der ECSS 2004 derzeit eingereicht.



Weitere Informationen



DLR: www.dlr.de/ipa/

TorDACH: tordach.org

ESSL: essl.org

eMail: nikolai.dotzek@dlr.de

