

# Zur (Wetter-) Vorhersage von Leewellen

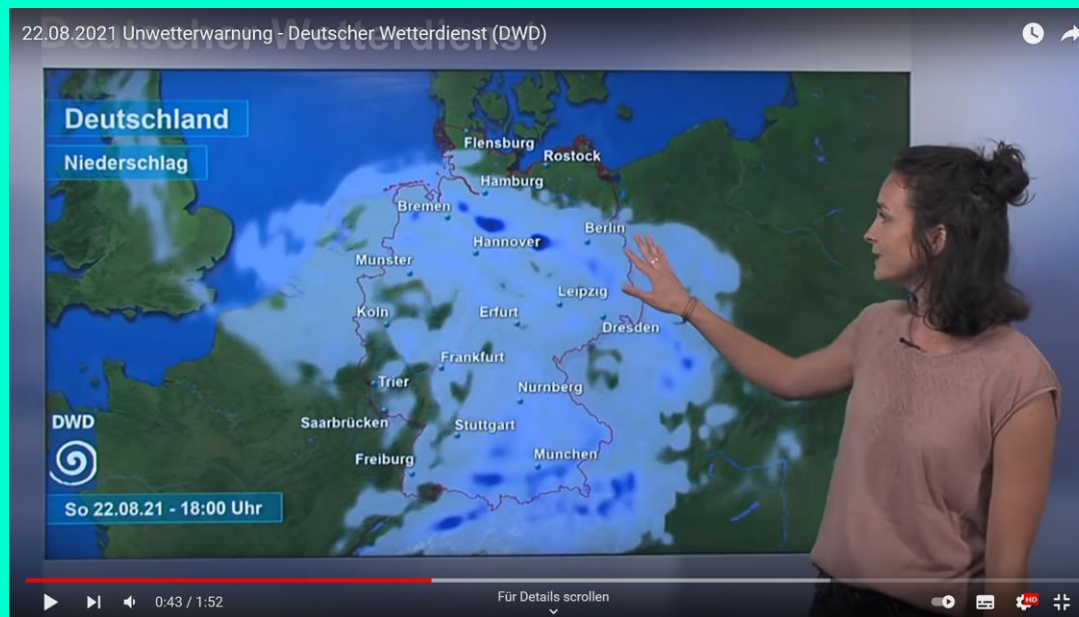


Eine Lenti namens **Taieri Pet** in Neuseeland. © NASA

Dieter Etling , [etling@meteo.uni-hannover.de](mailto:etling@meteo.uni-hannover.de)

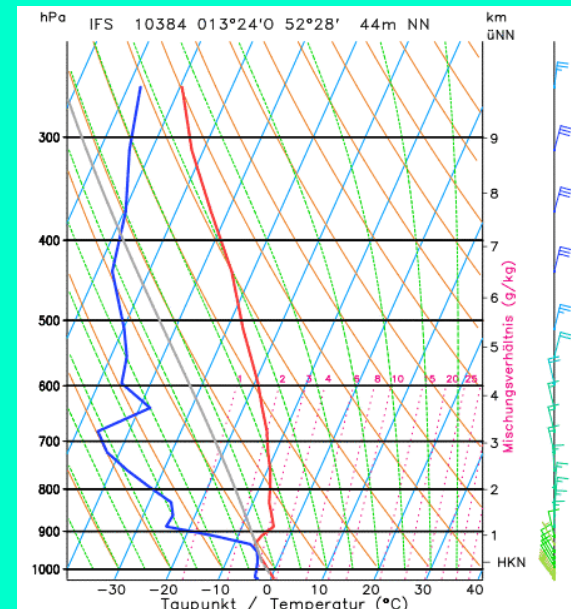
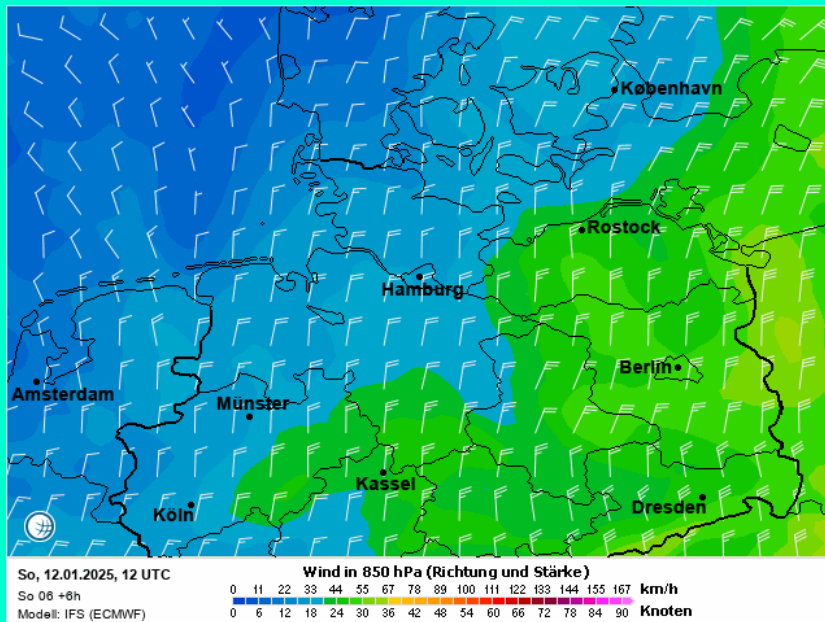
Die **Wettervorhersage** beruht heute ausschließlich auf der **numerischen Simulation** der die Vorgänge in der Atmosphäre beschreibenden physikalischen Gleichungen (**Wettermodelle**)

Die **Wetterberichte** in den Medien stellen lediglich eine verständliche Interpretation der Ergebnisse der Wettermodelle dar.



Erläuterung der vorhergesagten Regenmengen. © DWD

Die graphisch aufbereiteten **Ergebnisse** der Wettermodelle werden von vielen Wetterdiensten in Form von **Wetterkarten** im Internet (frei) zur Verfügung gestellt. Jede sachkundige Person kann sich daraus eine eigene Wettervorhersage erstellen.



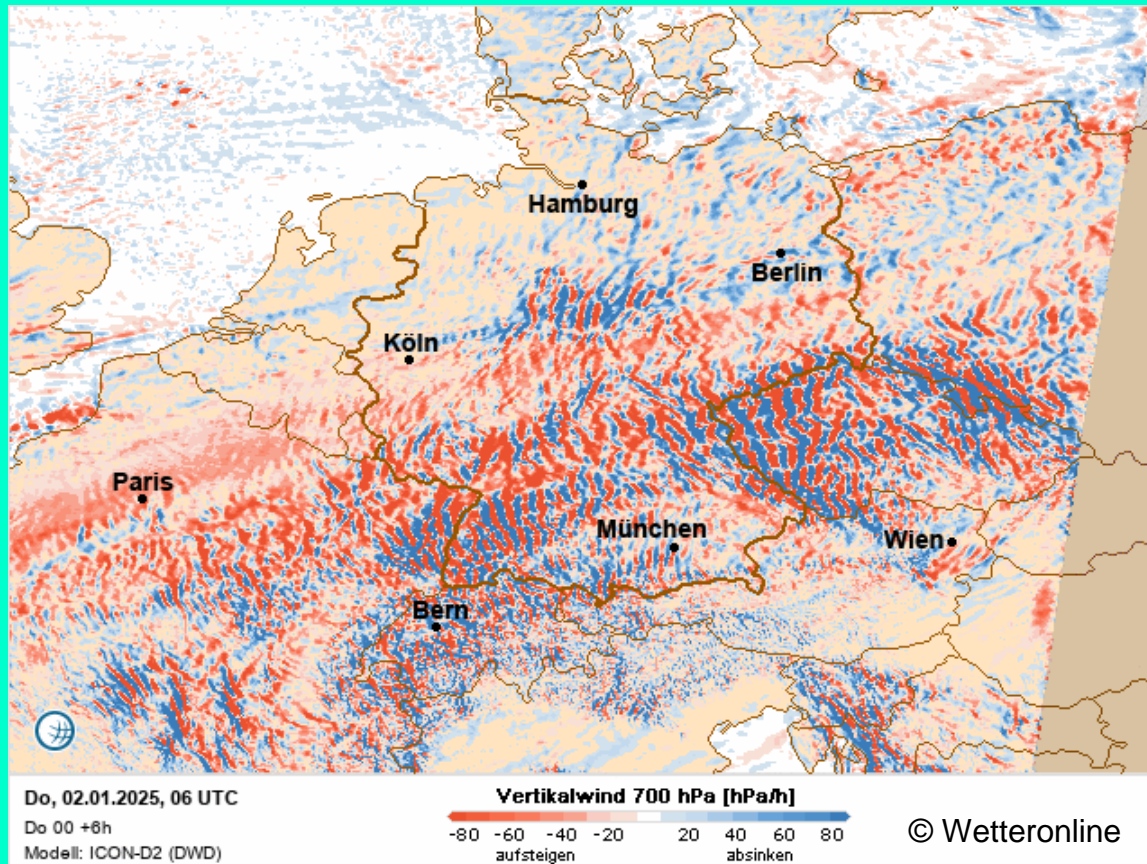
Wettervorhersage des ECMWF für 12.01.2025,12UTC

links: Wind in 850 hPa, rechts: Temp von Berlin. © ECMWF/Wetteronline

Aus Wind und Temperaturprofil abschätzen:

Schwerewellen ja oder nein (z.B. aus Scorer-Parameter)

# „Wetterkarte“ für Segelflieger



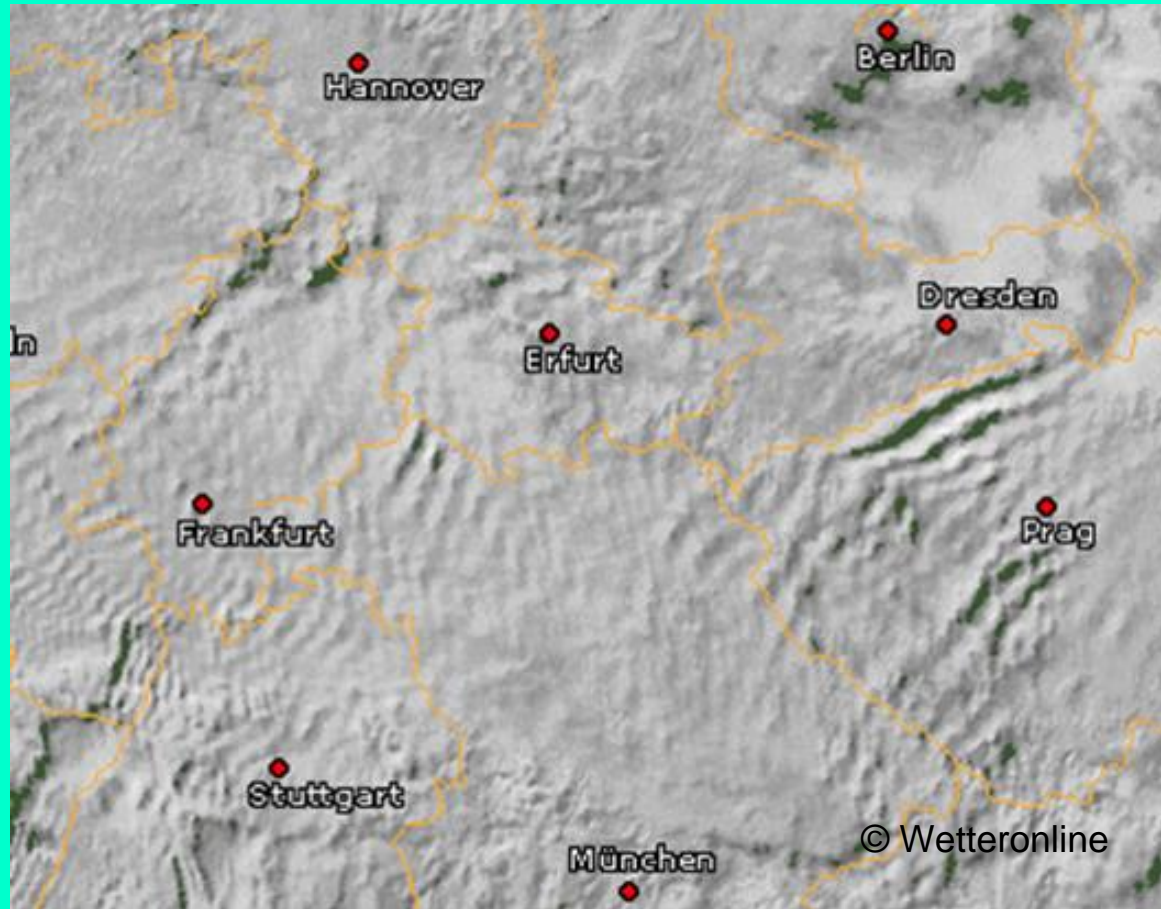
**Vertikalwind** (Aufsteigen, Absinken) bedingt durch  
Schwerewellen, Thermik, Hangwind, Konvergenz



Einspielung der Wellenvorhersage in das Cockpit-Display  
von Perlan-2 © Perlan-Project

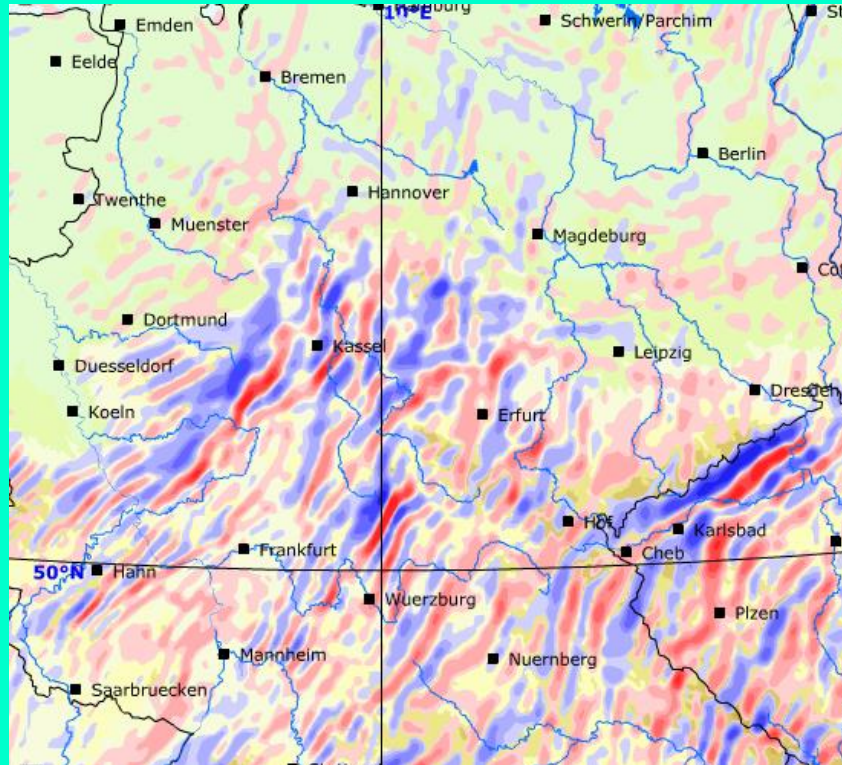
## Leewellen sind das am besten vorhersagbare Wetterphänomen

Warum? Leewellen sind stationär, d.h. sie sind an die (feste) Orographie gebunden und ändern sich nicht (nur wenig) mit der Zeit



Schwerewellen über Zentraleuropa am 11.12.2010

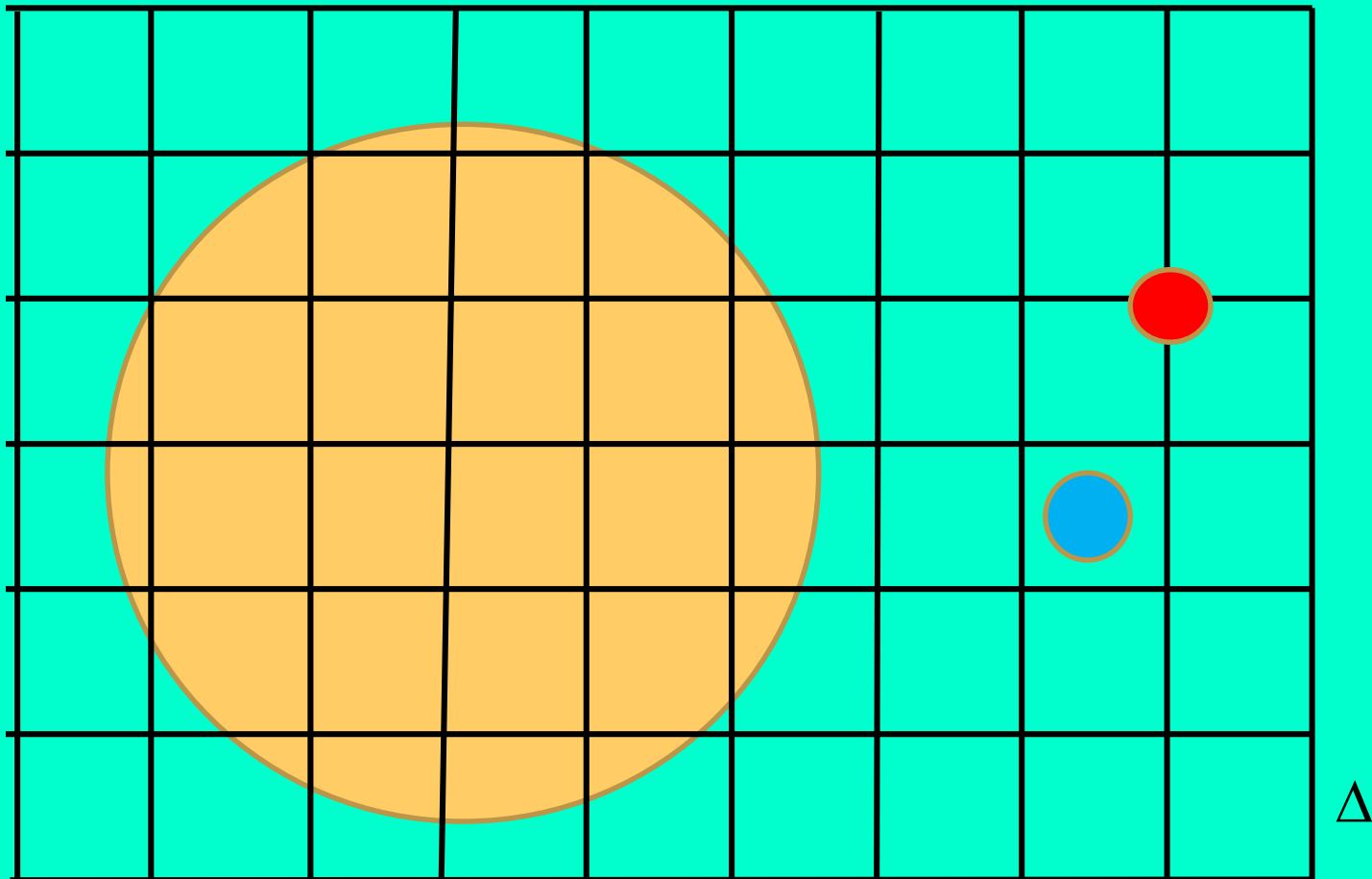
# Beweis: Simulation der Vertikalgeschwindigkeit in 3000 m Höhe mit dem DWD-Modell COSMO-DE



Ausschnitt aus PC-Met für den 11.12.2010, 12UTC  
© DWD

## Anforderungen an Wettermodelle für eine Wellenvorhersage:

1. Die Modellgleichungen enthalten die Physik der Schwerewellen
2. Es ist eine Orographie im Modell vorhanden
3. Das Rechengitter des Modells muss Schwerewellen erfassen



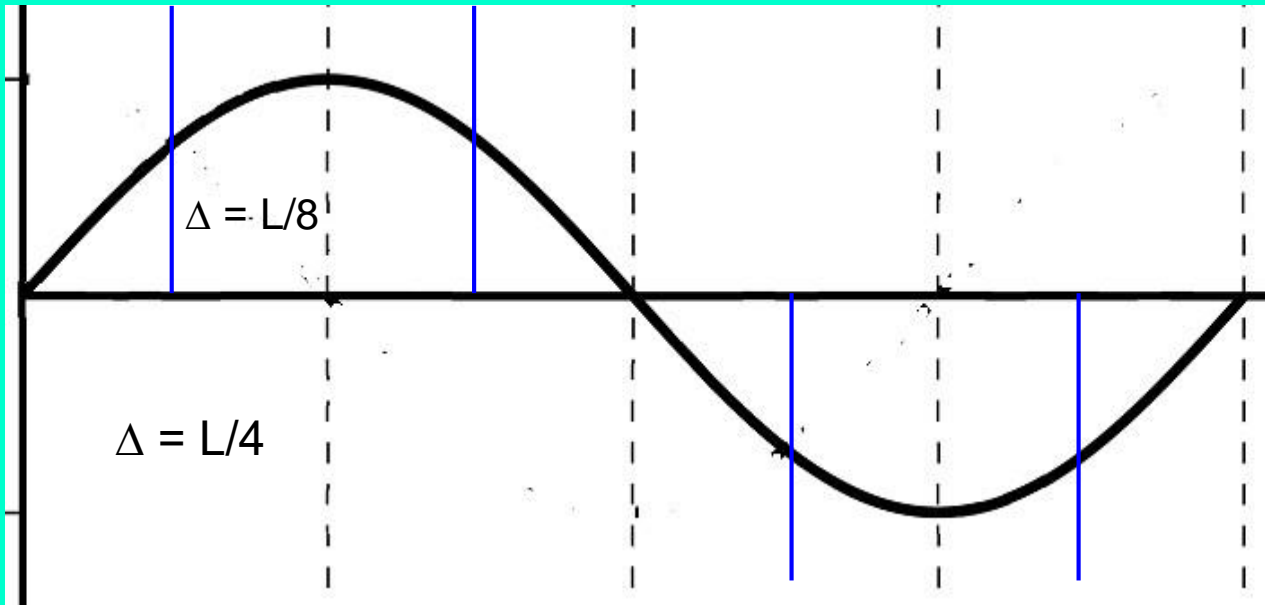
Rechengitter des Modells mit Gitterweite  $\Delta$

**Kreisobjekt:** wird aufgelöst

nicht aufgelöst



# Gitterweite $\Delta$ zur Simulation von Schwerewellen

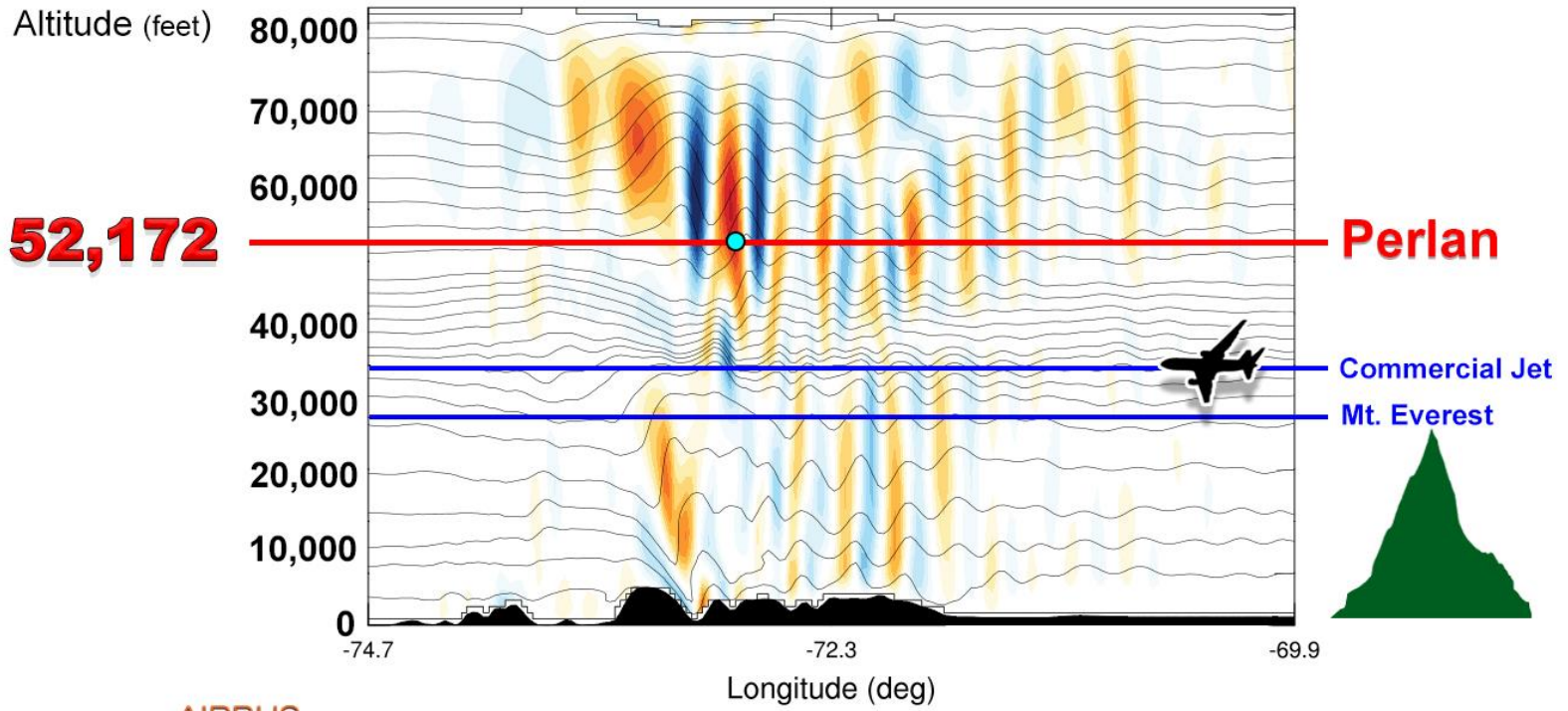


$$\Delta = L/8 \text{ (km)}$$

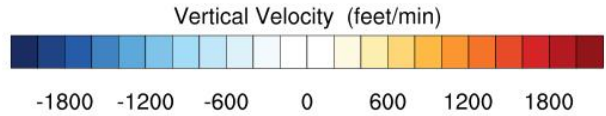
L	0,8	4	8	16	32	64
$\Delta$	0,1	0,5	1	2	4	8

# WORLD RECORD FLIGHT

1730 UTC September 3, 2017

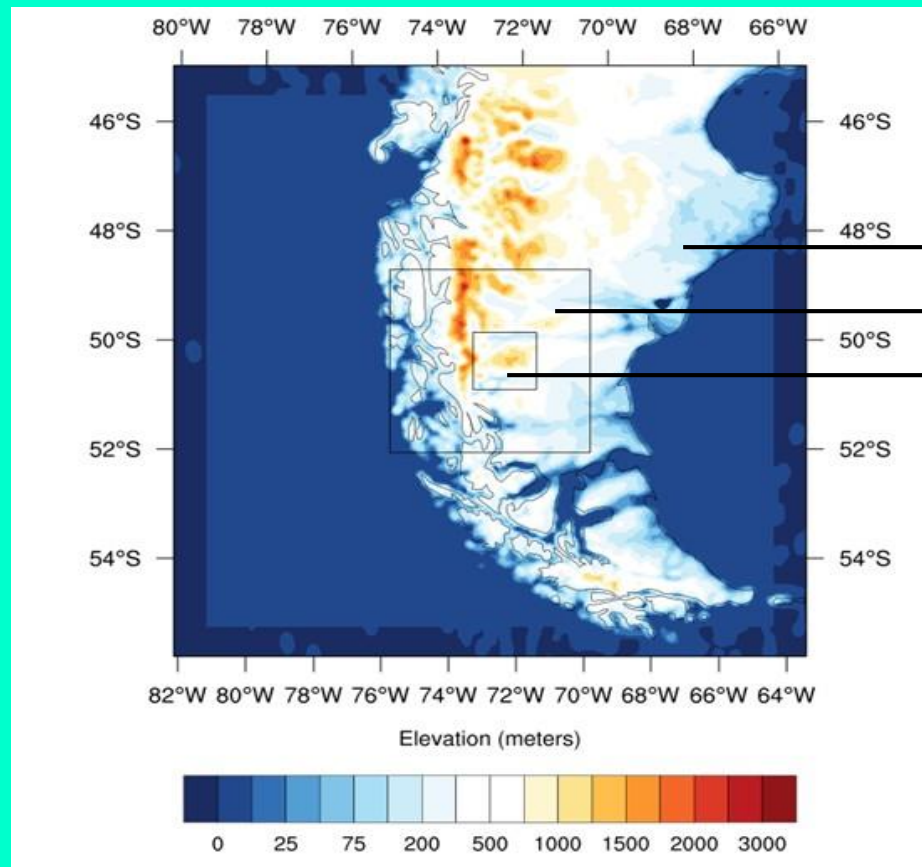


AIRBUS  
**PERLAN**  
MISSION II



Wellenvorhersage vom WRF model (© WeatherExtreme)

# Rechengebiete des Wellenmodells von WeatherExtreme Ltd.



Auflösung	Gebietsgröße
6 km	1300 km
2 km	350 km
0,67 km	130 km

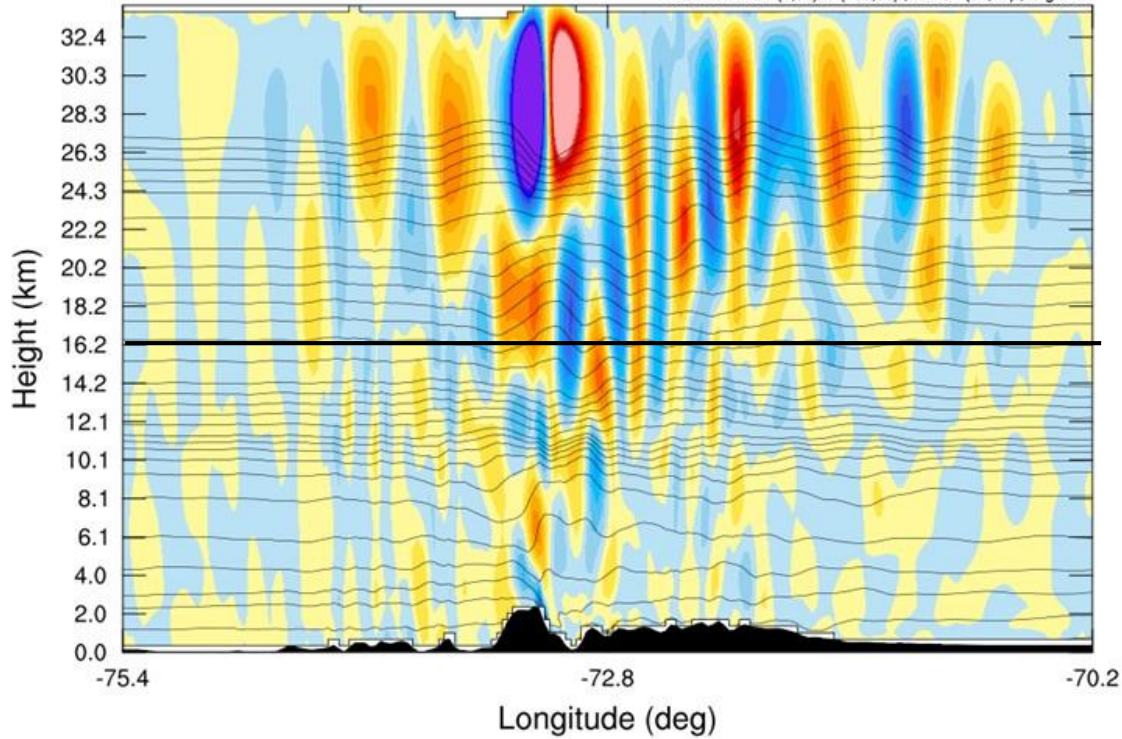
Weather Research and Forecast (WRF) model

# Record Flight W-E Cross Section

Init: 2017-09-03\_12:00:00  
Valid: 14:00

Potential Temperature (deg K)  
Vertical Velocity (feet/min)  
Main

Cross-Section: (1,96) to (185,96) ; center=(93,95) ; angle=90



$$\Delta = 2 \text{ km}$$

1000 ft/min

$\approx 5 \text{ m/s}$

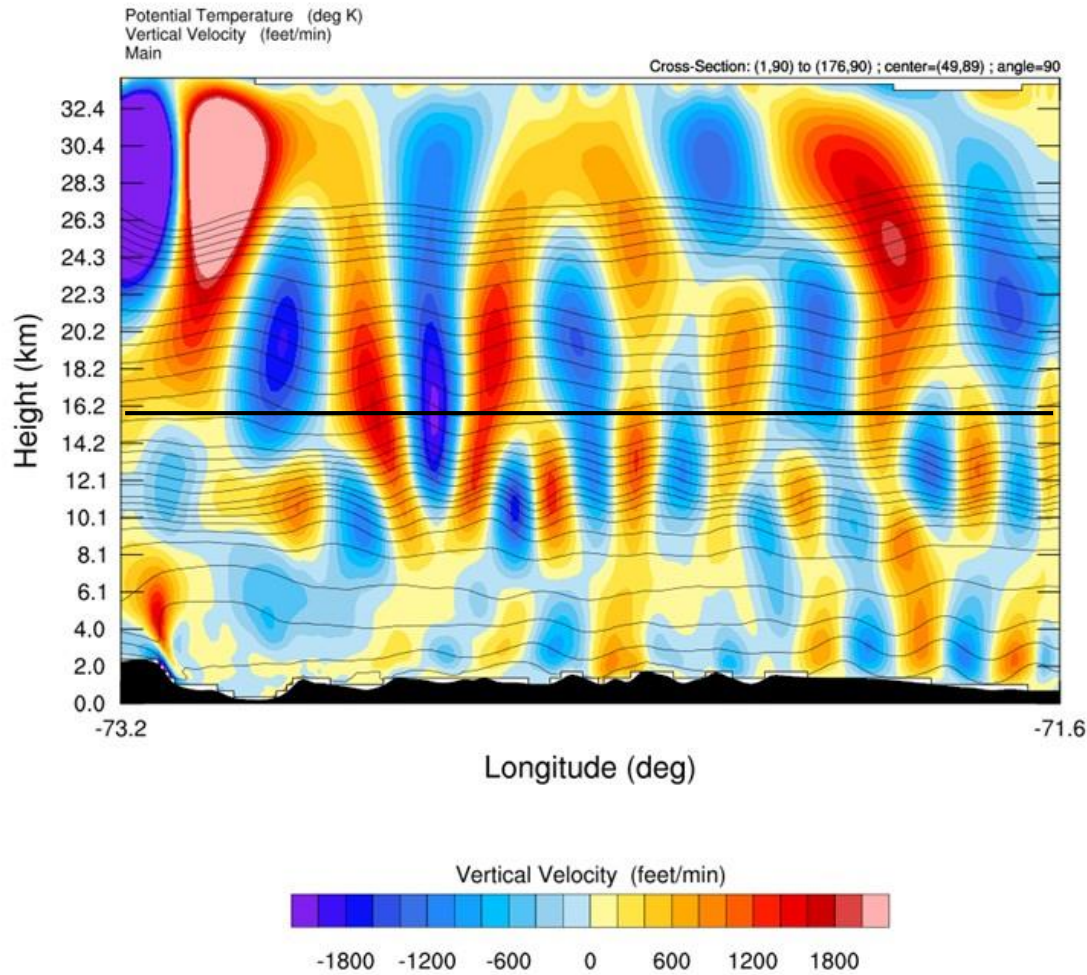
Wave forecast for the record flight

© WeatherExtreme Ltd.

# Record Flight W-E Cross Section

Init: 2017-09-03\_12:00:00

Valid: 18:40



$$\Delta = 0,67 \text{ km}$$

1000 ft/min

~ 5 m/s

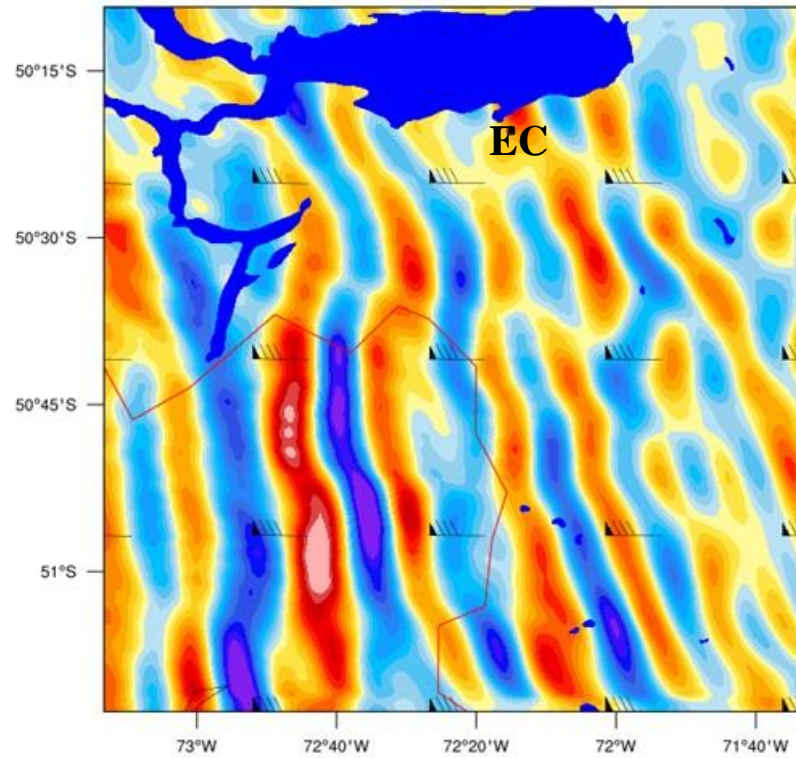
High resolution wave forecast

© WeatherExtreme Ltd.

100 mb Height

Init: 2017-09-03\_12:00:00  
Valid: 2017-09-03\_18:40:00

Vertical Velocity (feet/min) at 100 hPa  
Wind (kts) at 100 hPa



$L \approx 20 \text{ km}$

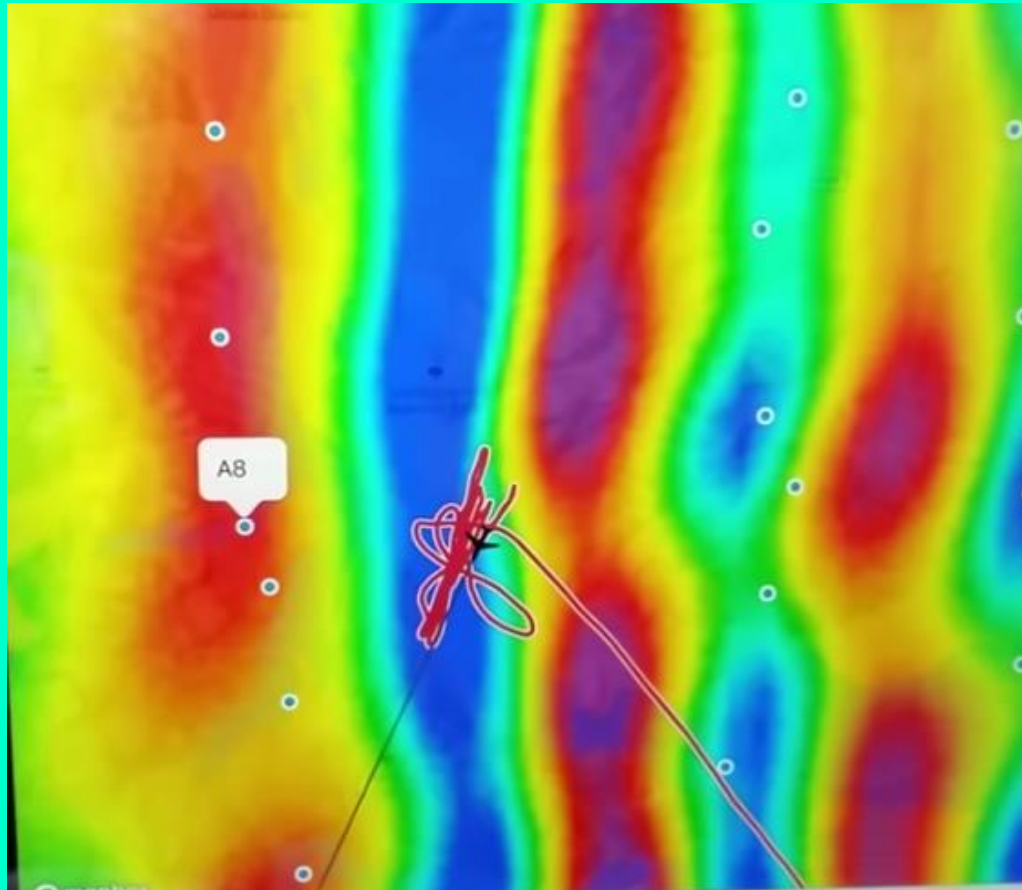
1000 ft/min

$\sim 5 \text{ m/s}$

Leewellen in 100 hPa ( $\sim 52,000 \text{ ft}$ )

© WeatherExtreme Ltd.

# Direkte Verifikation der Wellenvorhersage



Wellenfeld und Flight-Track auf dem Smartphone-Display  
(© Perlan Project)

# Wellenvorhersage für alle

Ist es heute für jeden Segelflieger möglich, eine Wellenvorhersage für das Gebiet der PERLAN-Kampagne (kostengünstig) zu erhalten?

Antwort: (im Prinzip) **ja**

Eine direkte Vorhersage von Leewellen ist heute mit routinemäßigen regionalen Wettervorhersagemodellen der Wetterdienste möglich, wenn deren horizontale Gitterweite etwa 2 km beträgt

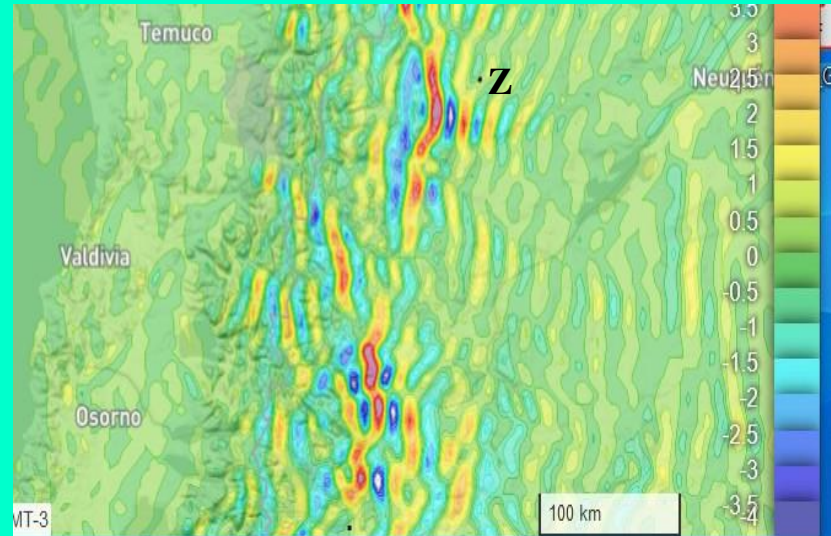
Zur genauen Erfassung der Wettersituation erfolgt eine Einbindung dieser Modelle in großräumige Wettermodelle (Gebiet Europa, Global) mit geringerer Auflösung (ca. 10 -20 km) (sog. „Nesting“)

Eine Bereitstellung der für den Segelflug interessierenden Feldern der Vertikalgeschwindigkeit aus den Ergebnissen der Modelle wird durch verschiedene Anbieter für Segelflugwetter durchgeführt

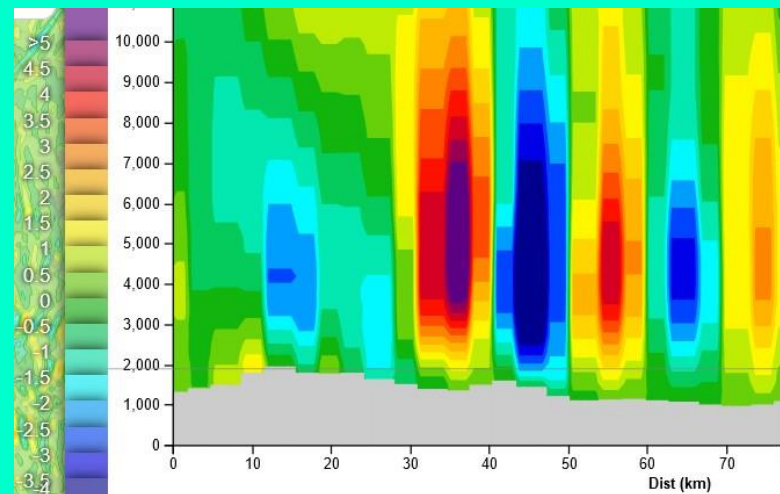


# SkySight

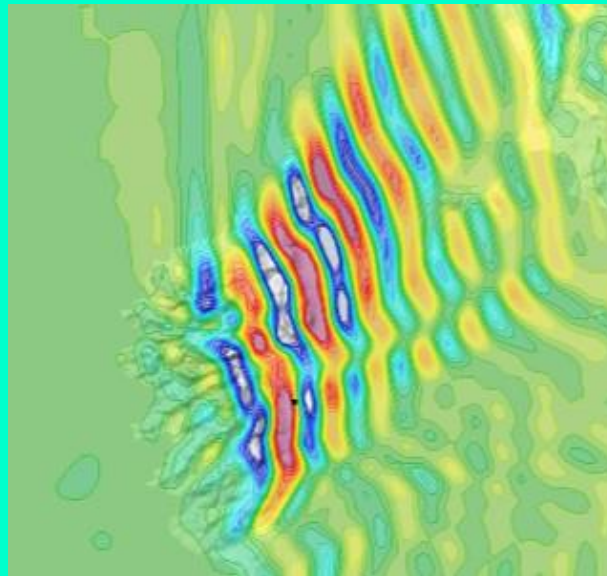
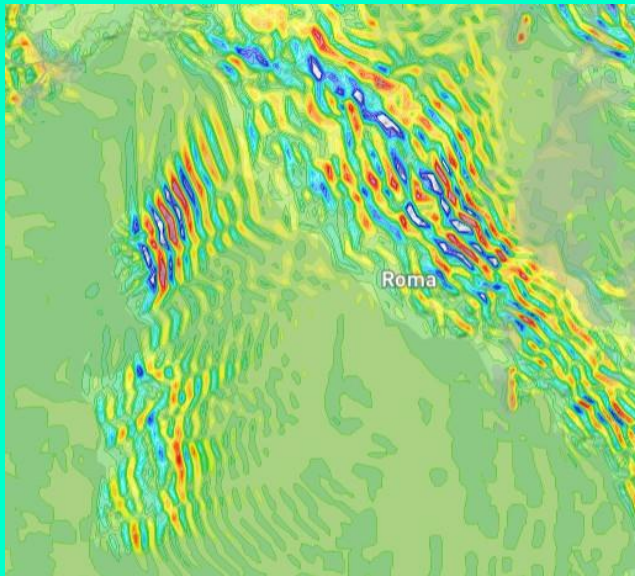
Wellen-und Thermikvorhersage für verschiedene Segelfluggebiete weltweit  
Direkter online-Zugriff, Jahresabo ca. 90 Euro



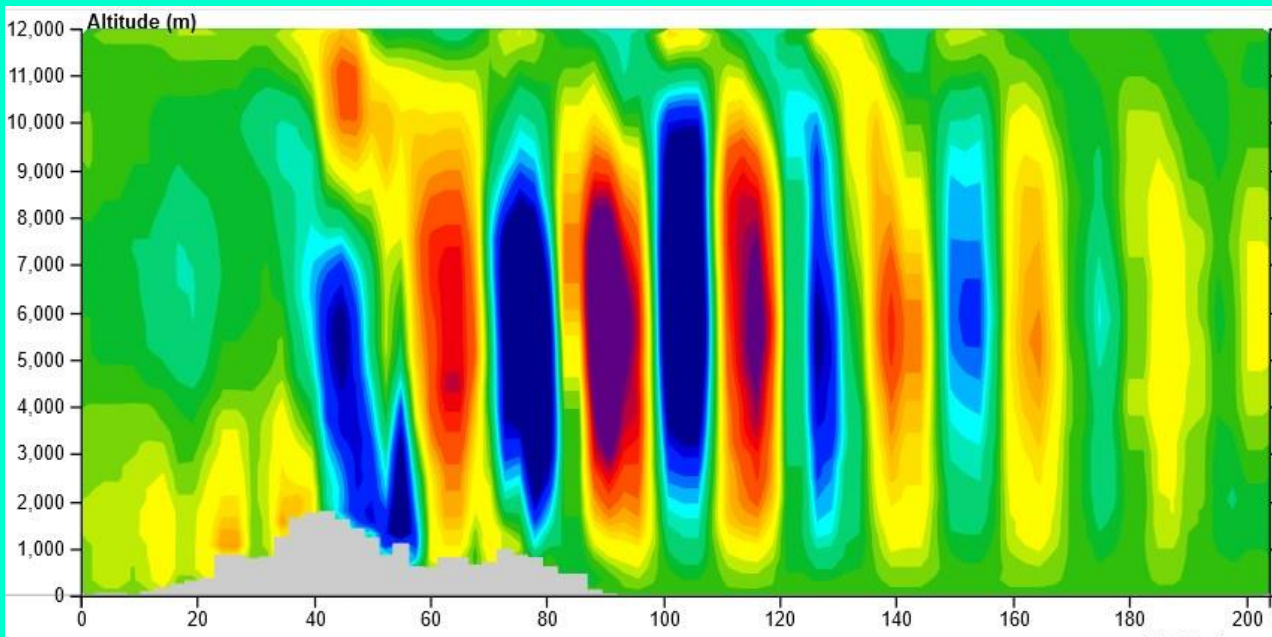
Vorhersagegebiet Argentinien-Chile  
Wellenvorhersage 02.02.2025



# Wellenvorhersage für den 28.01.2025 im Raum Italien-Korsika © SkySight



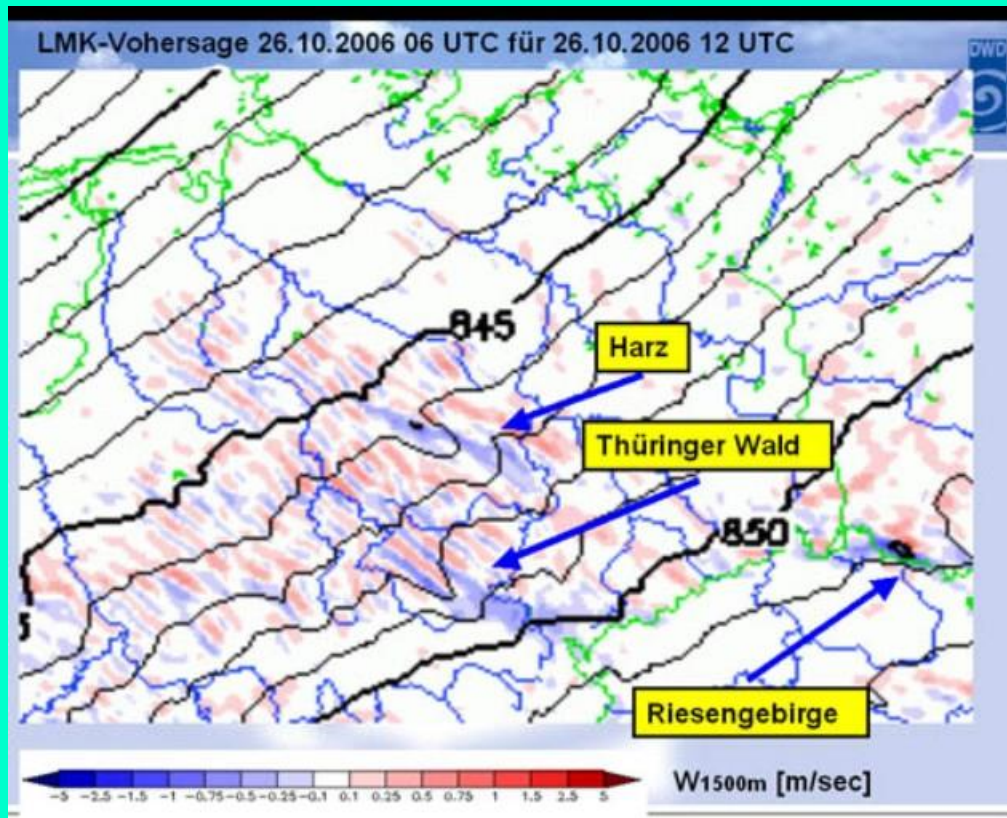
Vertikalwind  
in 5000 m



Querschnitt  
Vertikalwind  
Korsika

# Deutscher Wetterdienst DWD. Kostenpflichtig über PC-Met. Vorhersage mit Routine-Modellen:

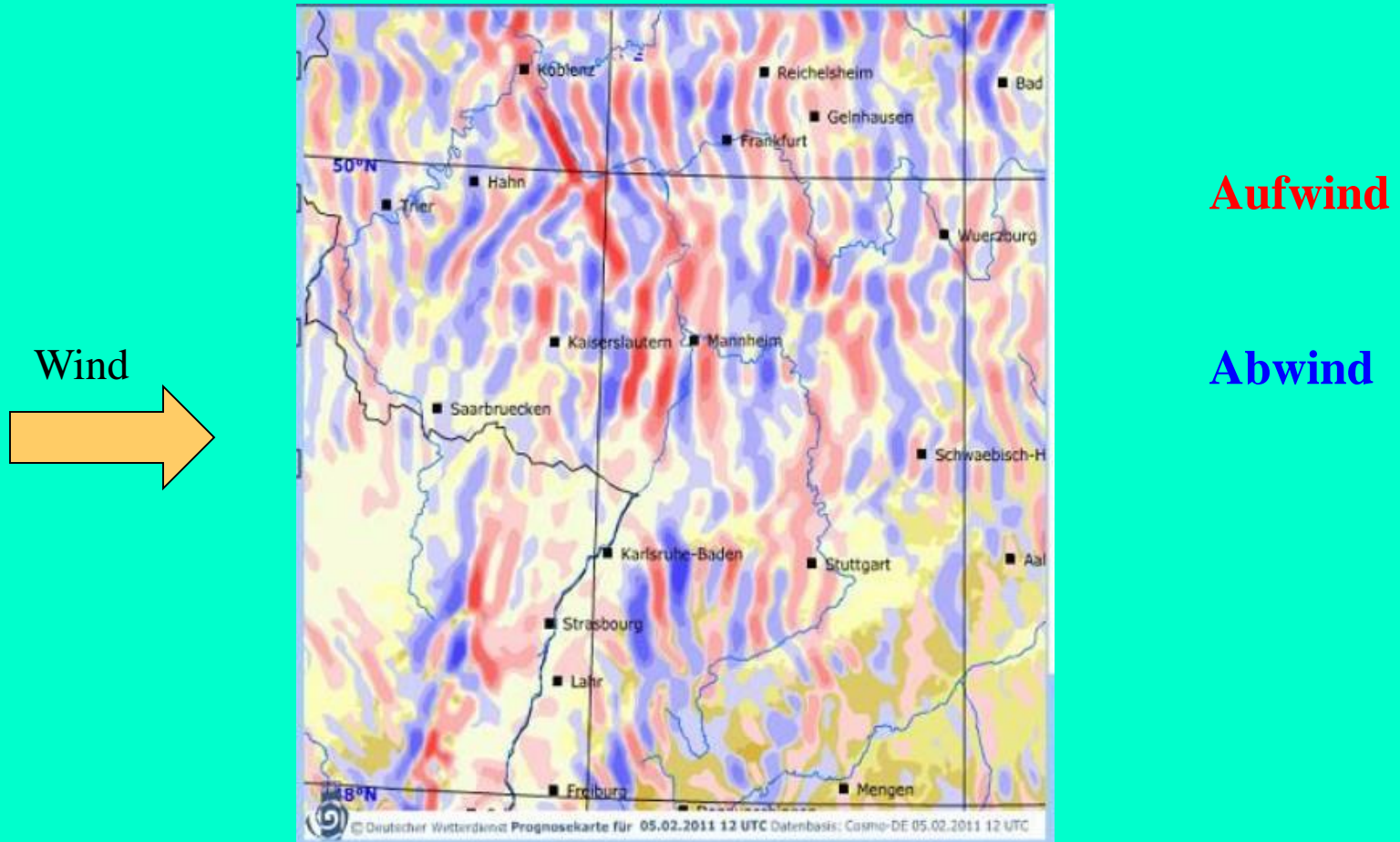
ca. 2008 LMK  $\Delta = 2,8$  km, Zeitraum 18 h



Vertikalgeschwindigkeit  
in 1500 m

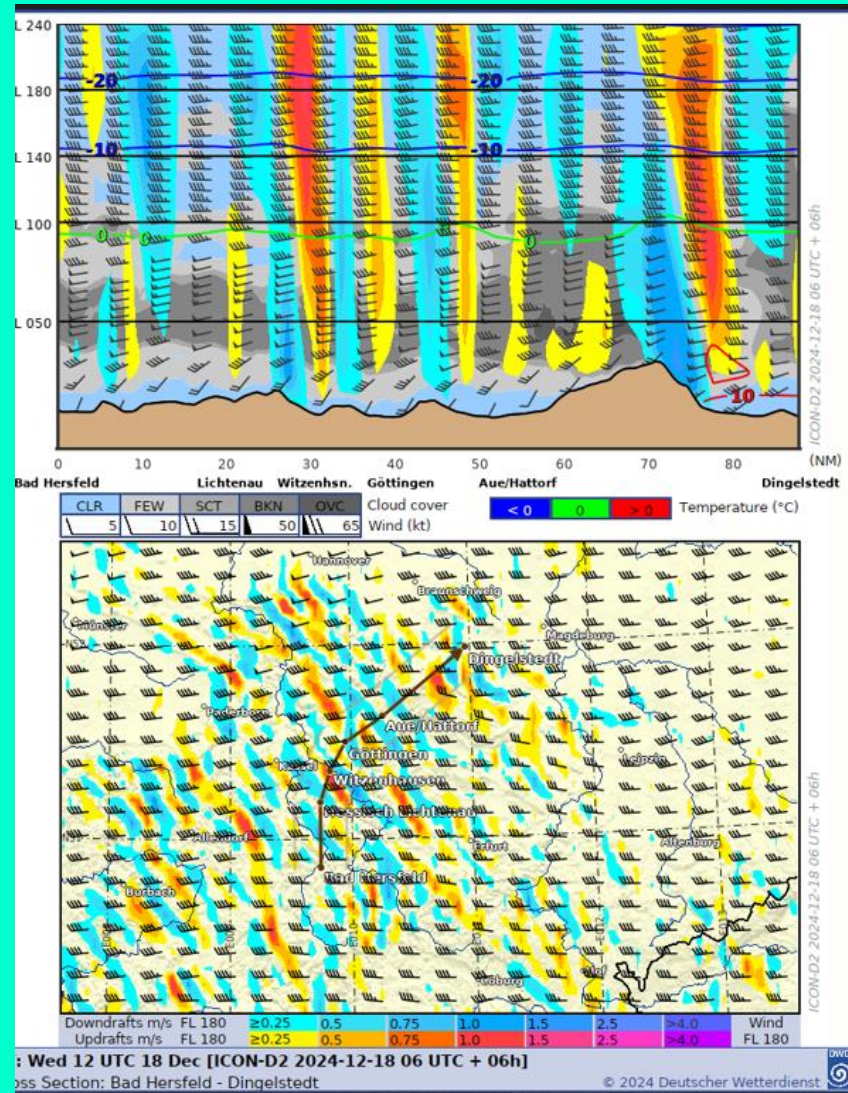
© DWD/Erland Lorenzen

ca. 2013 COSMO-DE  $\Delta = 2,8$  km, Zeitraum 27 h



Wellenvorhersage für FL50 mit COSMO-DE © DWD

aktuell ICON-D2  $\Delta = 2,1$  km, Zeitraum 48 h



Wellenvorhersage mit dem Modell ICON-D2 © DWD

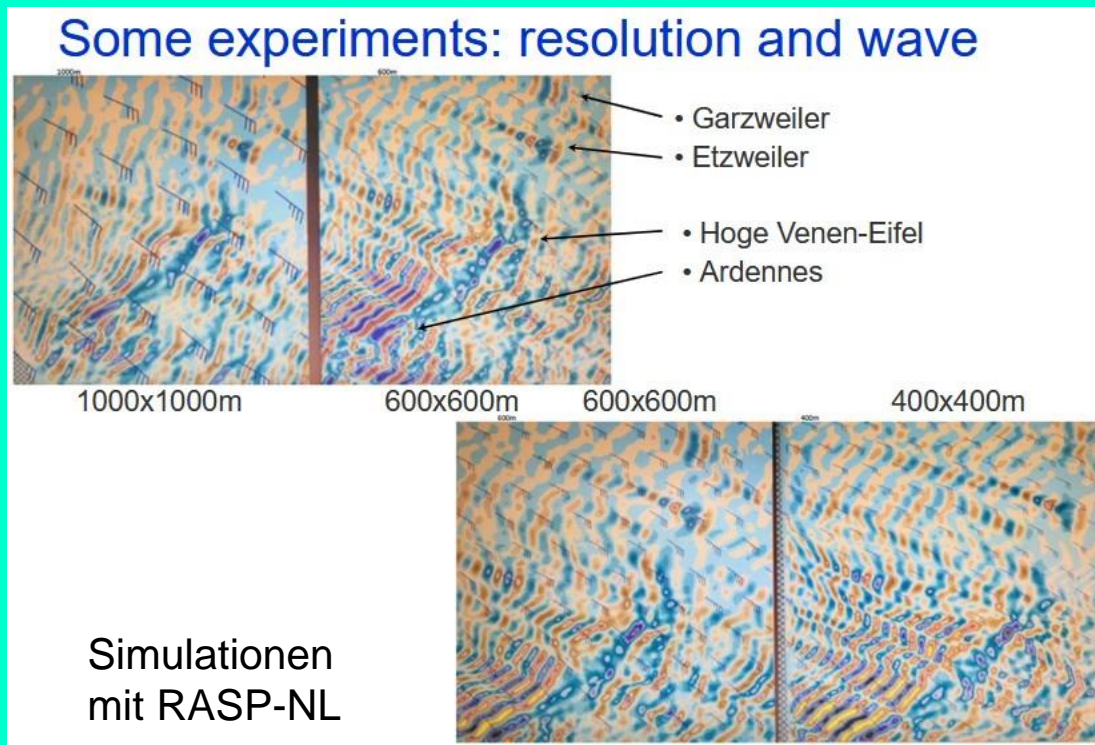
# RASP - Modell

Regional Atmospheric Soaring Prediction – Model  $\Delta = 1 - 4$  km

Basiert auf dem WRF Vorhersagemodell

Frei verfügbar für Betreiber und Kunden

Häufig privat betrieben von Segelflugwetter-Enthusiasten



Blipmaps.nl  
Michael Hagoort  
SW-Treffen  
Hannover 2024

# Stand der direkten Wellenvorhersage

**Regionale Wettervorhersagemodelle** mit hoher horizontaler Auflösung ( $\Delta \approx 2$  km) im routinemäßigen Einsatz der Wetterdienste (z.B. DWD ICON-D2) können Leewellen vorhersagen. Die entsprechenden Felder der Vertikalgeschwindigkeit müssen nur für **fliegerische Anwendungen grafisch aufbereitet und zur Verfügung gestellt werden.**

**Spezialmodelle für Flugwetter** mit hoher Auflösung (z.B. RASP), welche an Routinemodelle der Wetterdienste mit geringerer Auflösung ( $\Delta \approx 10$  km) gekoppelt werden, sind ebenfalls für die Leewellenvorhersage geeignet.

Die Umsetzung der Modellergebnisse in die **Bedürfnisse der Segelflieger** geschieht durch (kommerzielle) Spezialanbieter für Flugwetter, z.B. DWD, Topmeteo , SkySight, aufwin.de, RASP-BLIPMAPS.nl

Alle genannten regionalen Wettervorhersagemodelle werden auch (hauptsächlich) für die **Thermikvorhersage** verwendet. Jedoch: einzelne Kumuluswolken oder Thermikschläuche werden (noch) nicht direkt aufgelöst.

# Was sollte eine direkte Simulation von Wellen liefern?

- Lage der Wellen (in Bezug zur auslösenden Orographie)
- Wellenlänge (Lage von Auf- und Abwinden)
- Stärke und vertikale Erstreckung von Auf- und Abwinden

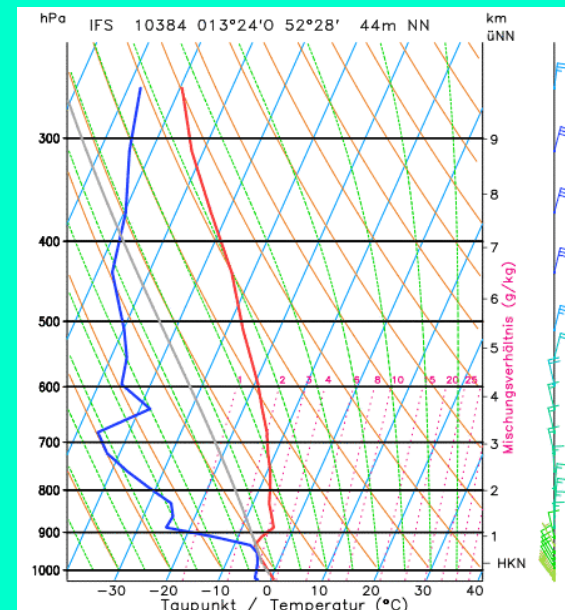
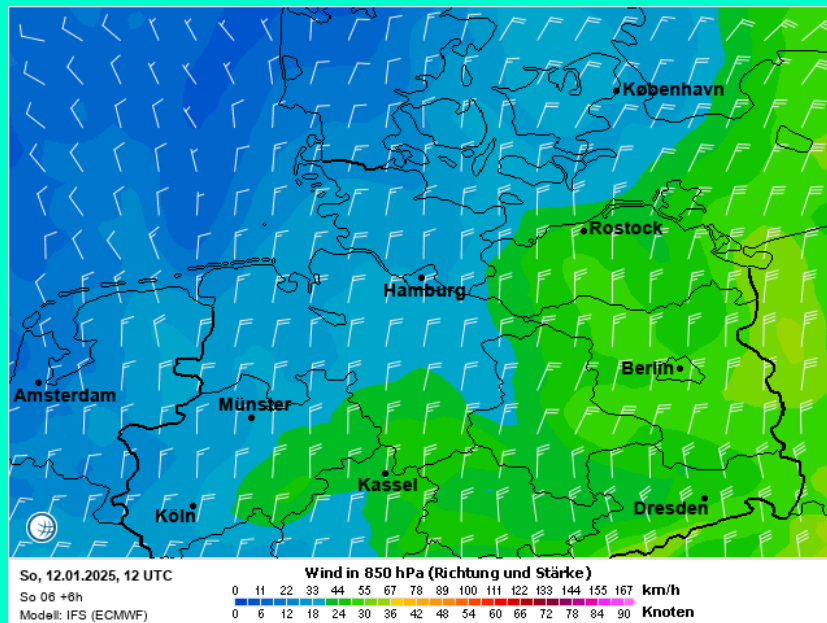
## Güte der Wellenvorhersage hängt ab von:

- Verwendetes großräumiges Wettermodell (ECMWF, GFS, ICON) für Eingabedaten (besonders Windrichtung und Windgeschwindigkeit, vertikaler Temperaturverlauf) in Regionalmodelle
- Verwendetes Regionalmodell (ICON-D2, WRF, Firmeneigenes)
- Auflösung der Orographie in allen Modellen (für die Leewellen)

Ein **Vergleich der Ergebnisse verschiedener Wellenvorhersagen** bei unterschiedlichen Wetterlagen wäre zur Bewertung der Vorhersagegüte der Modelle hilfreich



Die graphisch aufbereiteten **Ergebnisse** der Wettermodelle werden von vielen Wetterdiensten in Form von **Wetterkarten** im Internet (frei) zur Verfügung gestellt. Jede sachkundige Person kann sich daraus eine eigene Wettervorhersage erstellen.



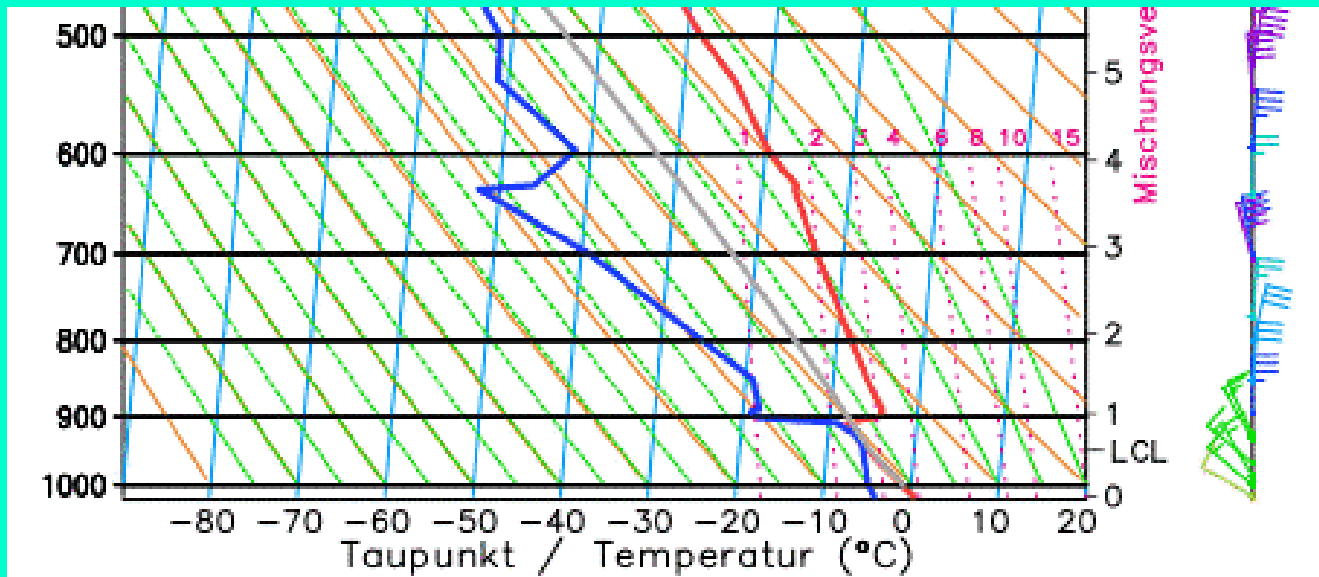
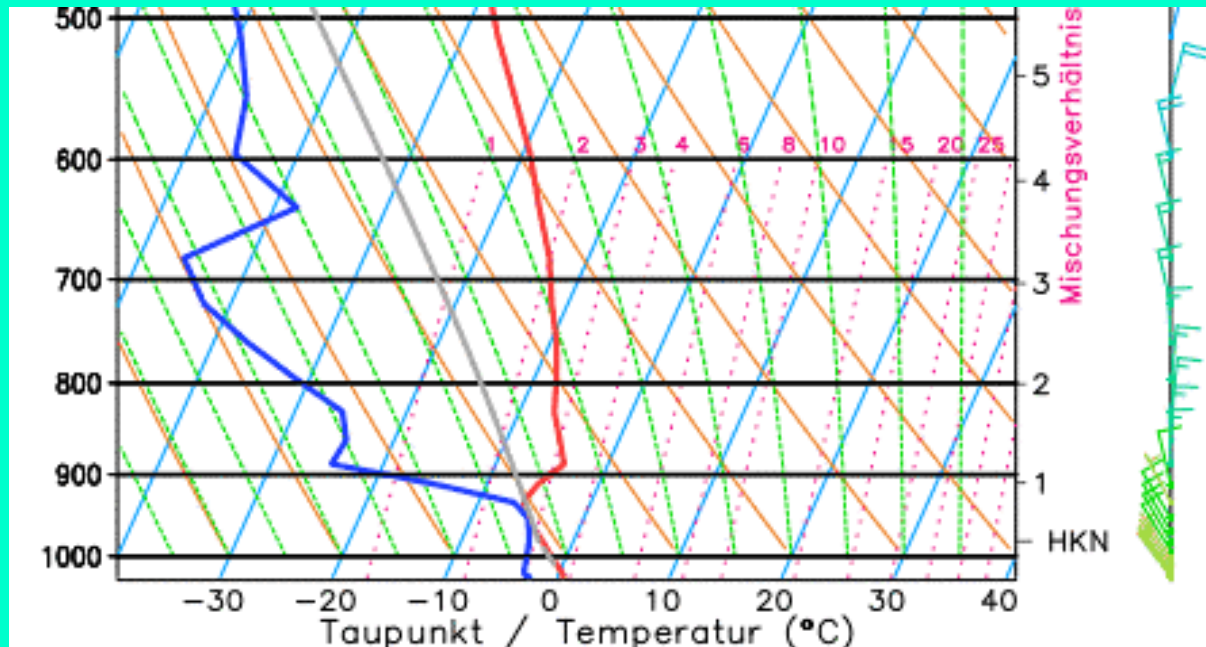
Wettervorhersage des ECMWF für 12.01.2025,12UTC

links: Wind in 850 hPa, rechts: Temp von Berlin. © ECMWF/Wetteronline

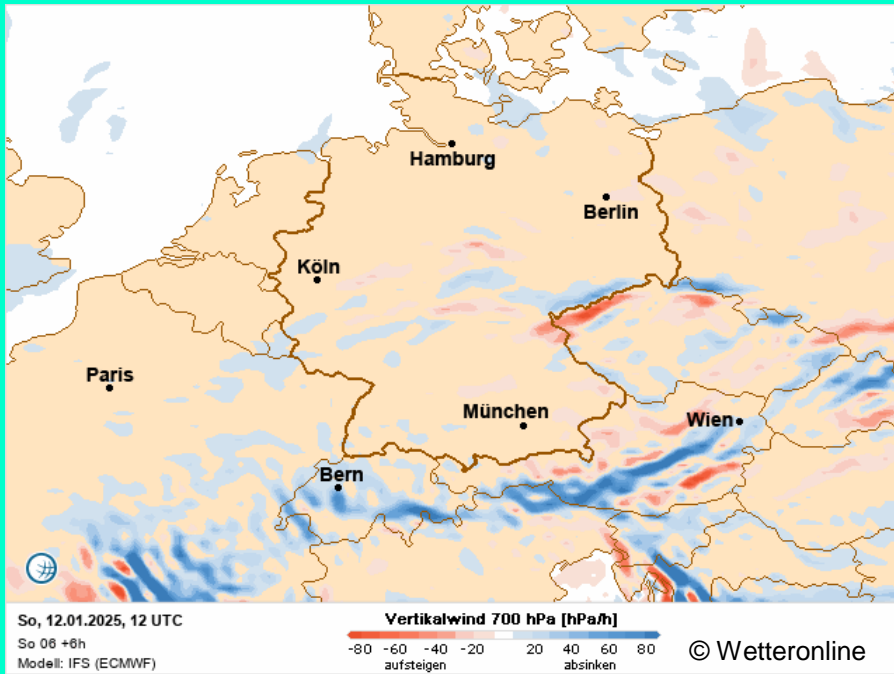
Aus Wind und Temperaturprofil abschätzen:

Schwerewellen ja oder nein (z.B. aus Scorer-Parameter)

Temp Berlin  
ECMWF

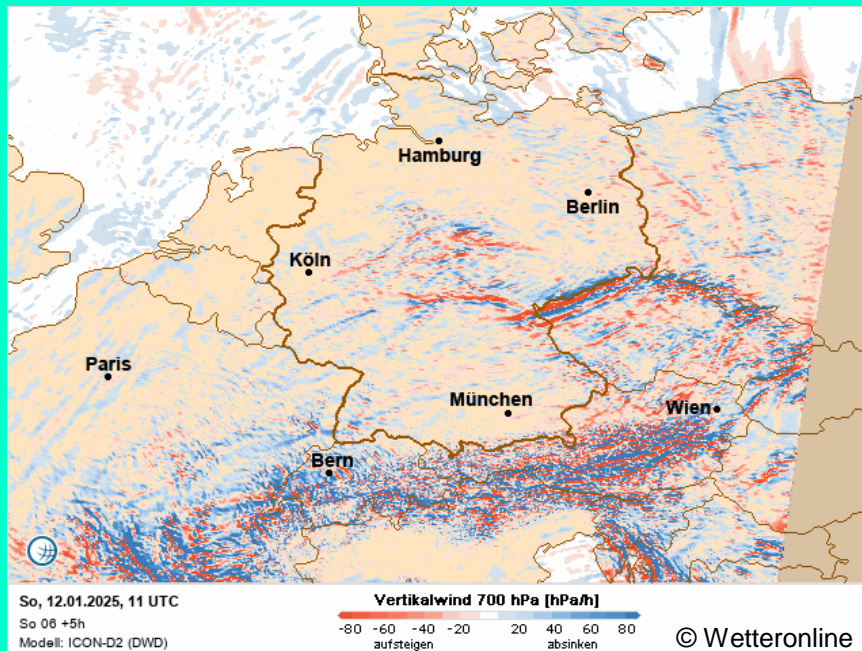


Temp Lindenberg  
Beobachtung DWD



ECMWF  $\Delta = 9$  km

$100 \text{ hPa/h} \approx 0,25 \text{ m/s}$

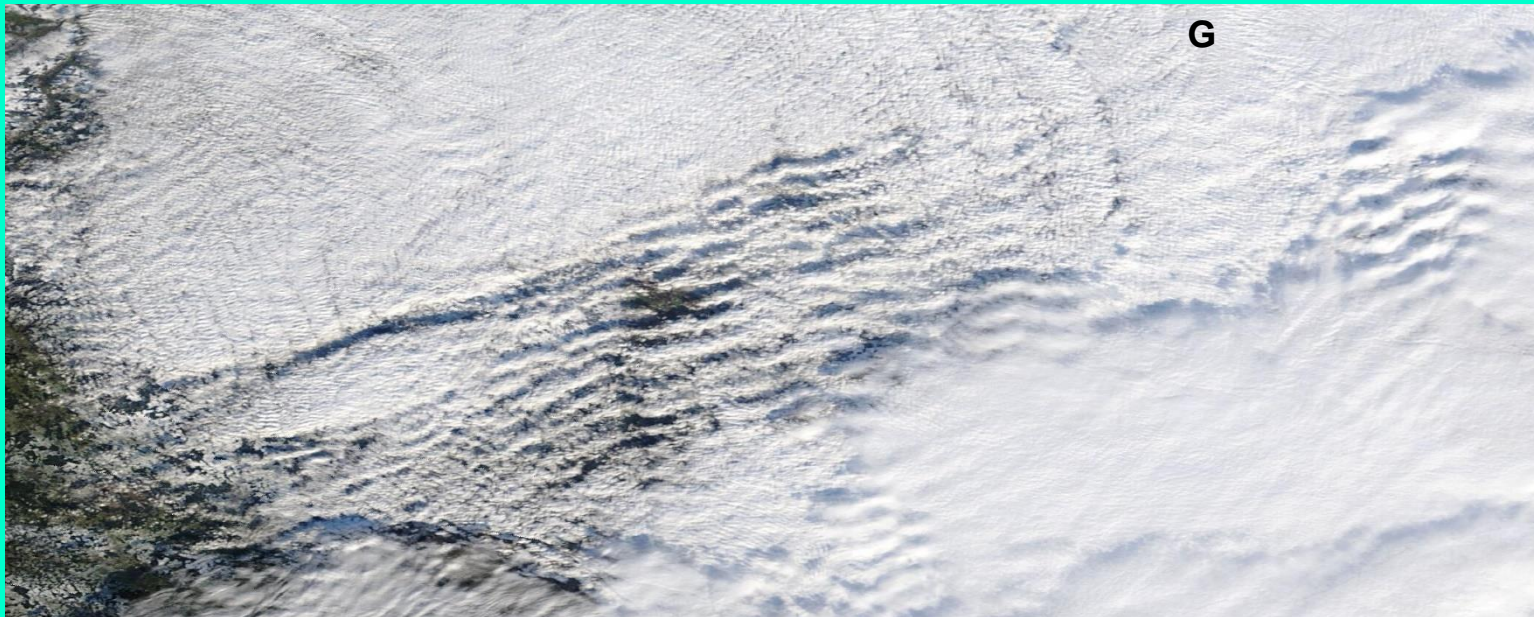
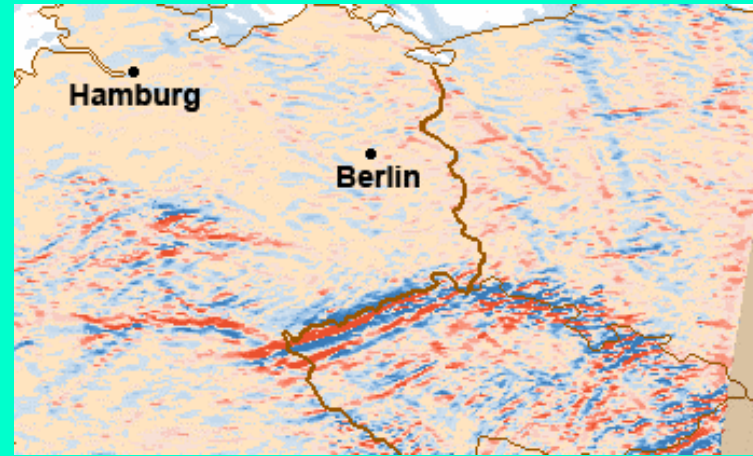


ICON-D2  $\Delta = 2$  km

ECMWF

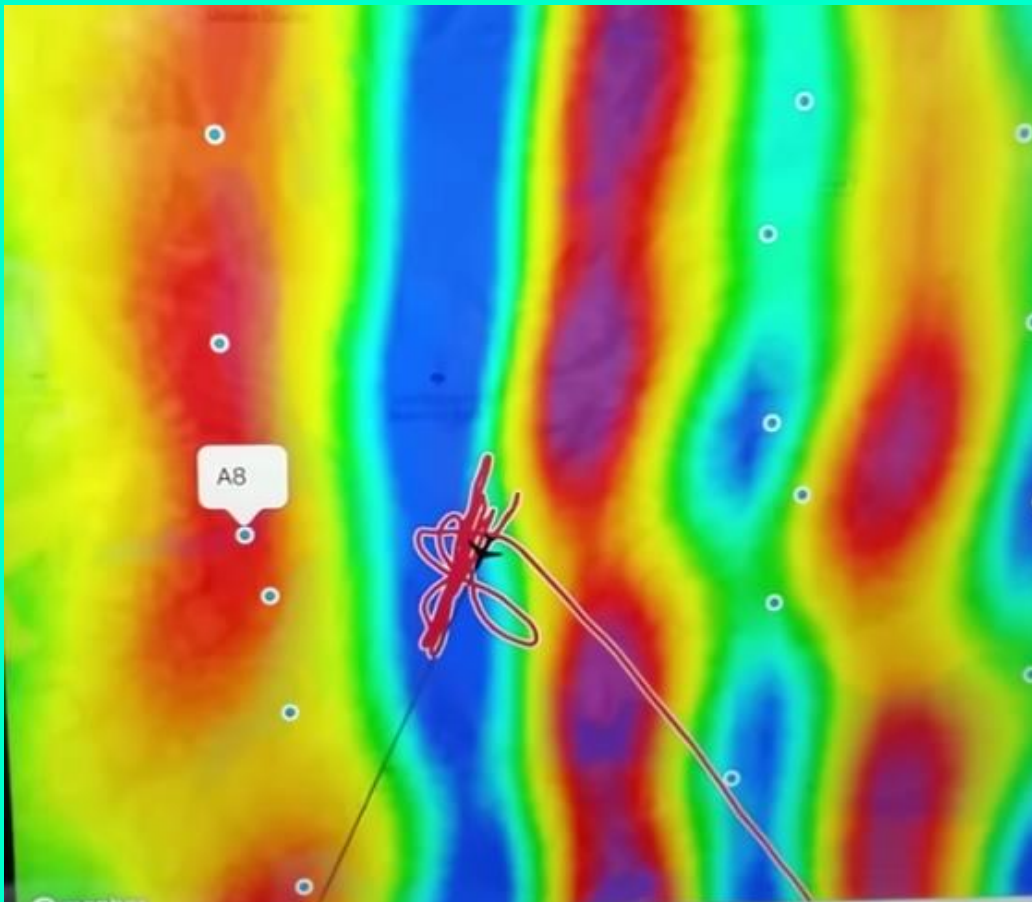


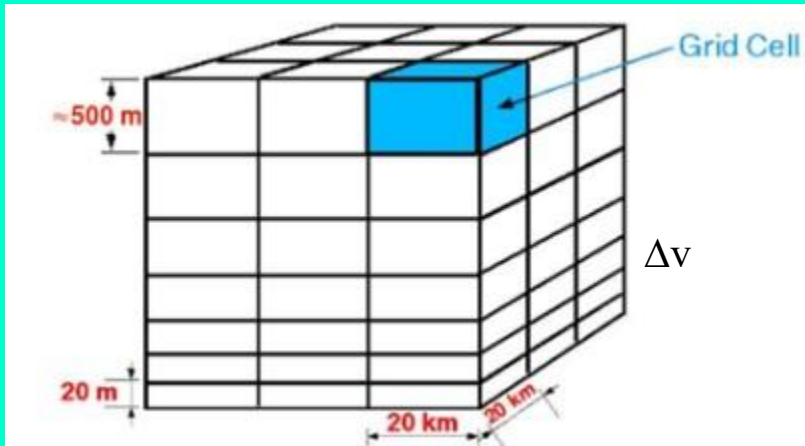
ICON-D2



Aber letztendlich:

Die quantitative **Verifikation der Wellenvorhersage** (z.B. Lage und Stärke der Aufwinde) kann nur an Hand von Segelflügen erfolgen.





Die vertikale Gitterweite  $\Delta v$  variiert mit der Höhe

Hohe Auflösung in den untersten 2-3 km

Grund: Erfassung der starken vertikalen Änderungen von Wind und Temperatur (Inversion) in der Grenzschicht

