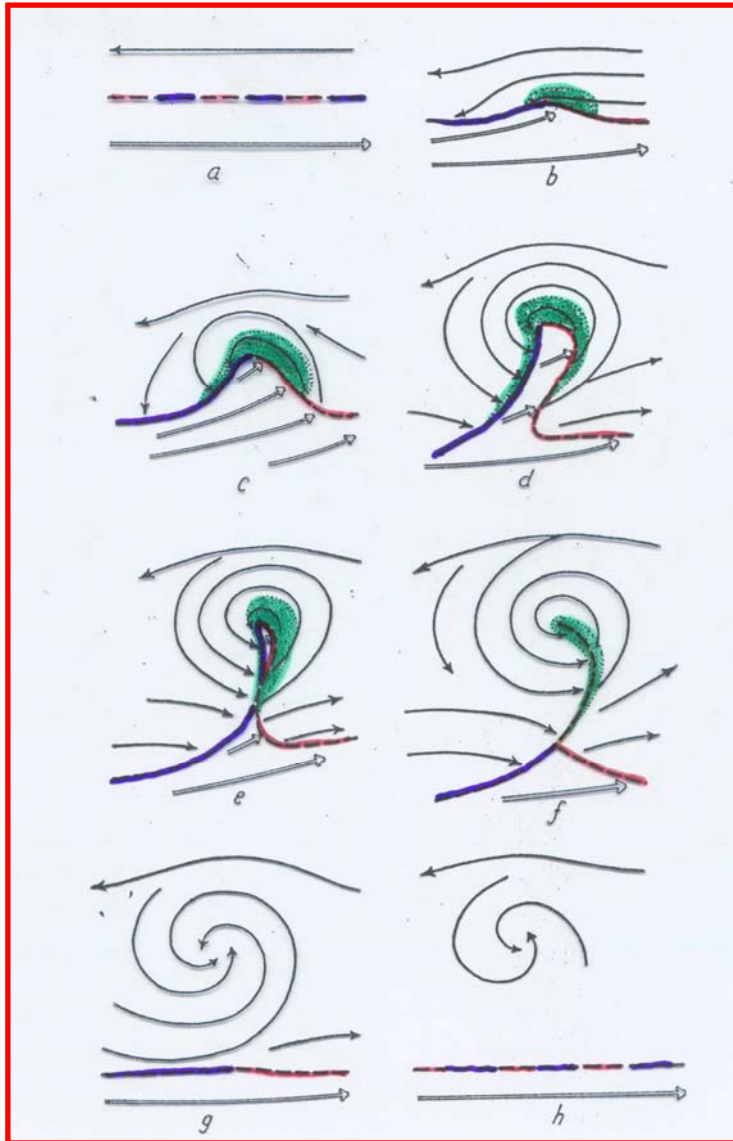


„Und es regnet doch im Warmsektor!“

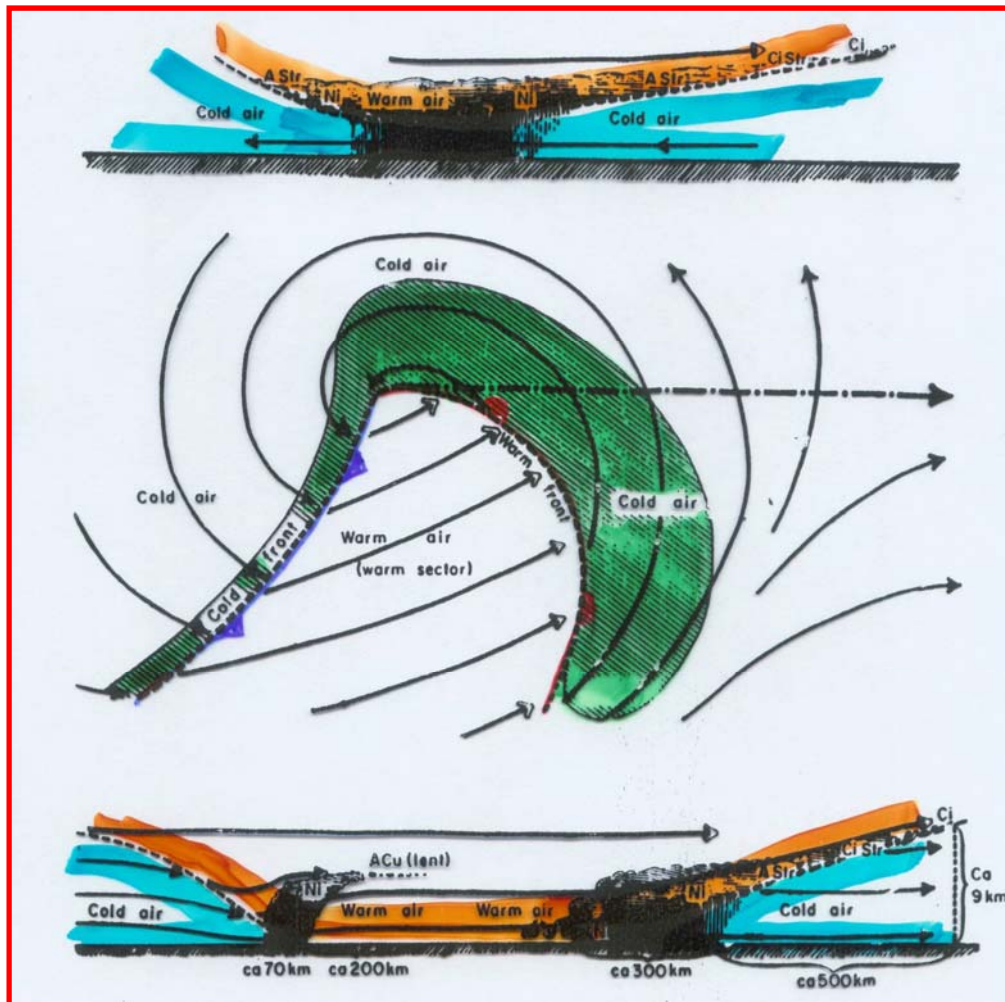
- Eine kritische Betrachtung zum immer noch populären Zyklonenmodell der „Bergener Schule“

Manfred Kurz
Neustadt/Weinstraße

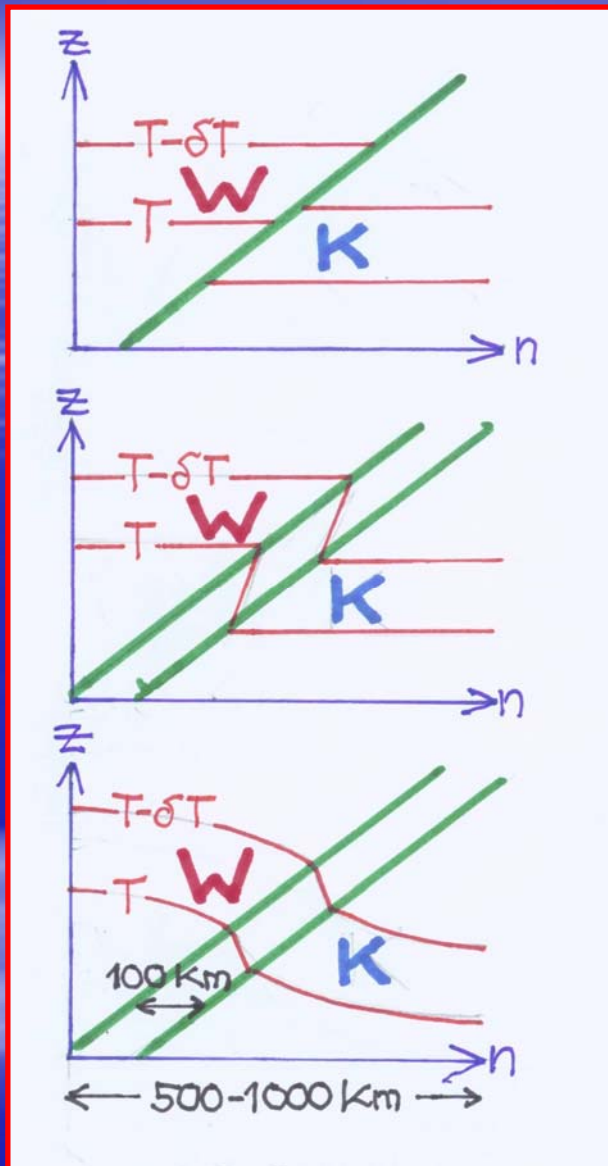


Die „Bergener Schule“ (J. Bjerknes, Solberg et al.) gab 1922 die erste komplette Beschreibung der Zyklonenentwicklung über dem Nordatlantik und Westeuropa. Sie benutzten dabei das Konzept der immateriellen Frontfläche bzw. Frontlinie zwischen den unterschiedlich temperierten Luftmassen, das 1905 Margules eingeführt hatte.

Zur Zyklonogenese kommt es, wenn sich an der „Polarfront“, der zunächst zonal orientierten Frontlinie zwischen Polarluft und Tropikluft, eine Wellenstörung bildet und instabil wird. Der durch Warm- und Kaltfront gebildete Warmsektor der Zyklone wird dabei immer mehr eingeeengt, bis sich zum Schluss eine gemeinsame Frontlinie bildet, die Okklusionsfront genannt wird.



Während dieses Vorgangs soll sich höher reichende Bewölkung mit Niederschlag durch „Aufgleiten“ der Warmluft über die Kaltluft entlang der vorwärts geneigten Warmfront sowie durch Heben der Luft über der keilförmig vorstoßenden Kaltfront bilden. **Innerhalb des Warmsektors ist nach diesem Modell keine Hebung und keine zu stärkerem Niederschlag führende Wolkenbildung möglich. Allenfalls Sprühregen aus niedriger Schichtbewölkung wird dort als möglich betrachtet.**



Das Frontenkonzept der „Bergener Schule“ wurde von den Synoptikern übernommen und wird auch heute noch – weitestgehend ohne Modifikationen – bei der Analyse der Bodenwetterkarten benutzt.

Man kann das mit dem Maßstab der Karten rechtfertigen. Aber in Wirklichkeit gibt es in der Atmosphäre keine echte Temperaturdiskontinuität mit einer immateriellen Frontfläche, sondern nur Frontalzone mit einer typischen Breite von 50-100 km.

Aber auch eine Anordnung mit einer Frontalzone, in der die gesamte Baroklinität konzentriert ist, und völlig uniformen Luftmassen beiderseits davon wird nur selten beobachtet.

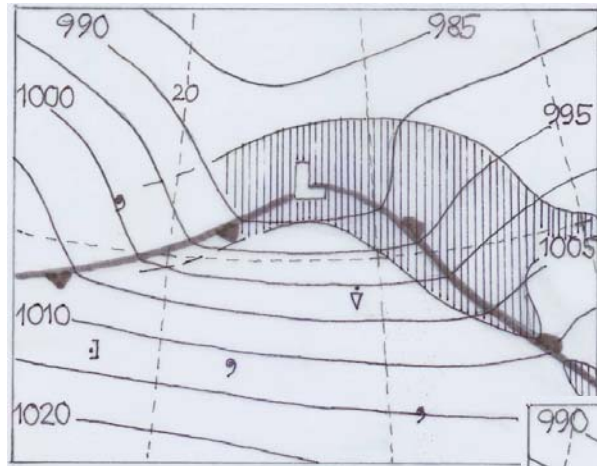
Meist erstreckt sich der barokline Bereich über eine Breite von 500-1000 km und in ihm befindet sich die Frontalzone dort, wo der horizontale Temperaturgradient maximiert ist.

Leider folgt die Beschreibung der Fronten sowie der Zyklogenese in vielen aktuellen Büchern – populärwissenschaftlichen Schriften wie auch Lehrbüchern – immer noch ziemlich genau den Vorstellungen der „Bergener Schule“. D.h., auch die Darstellungen mit den Niederschlägen nur auf der kalten Seite der Bodenfront und die Vertikalschnitte mit dem „Aufgleiten“ über der Warmfront-fläche und der Hebung über dem Kaltluftkeil werden als nach wie vor gültige Auffassung präsentiert.

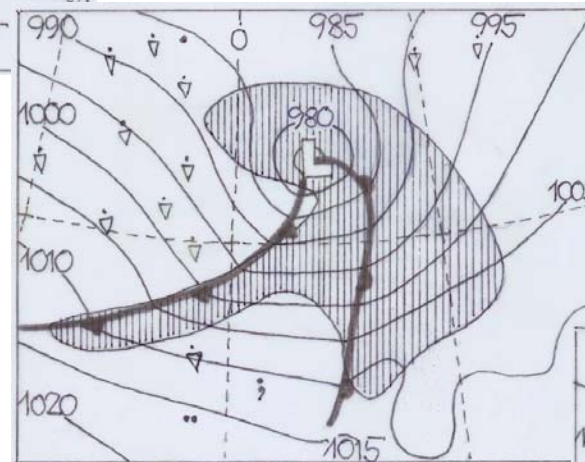
Das Festhalten an diesen veralteten und übertrieben vereinfachten Vorstellungen ist sehr bedauerlich, da dadurch dem interessierten Laien, aber auch den Studenten der Einblick in die wirkliche Physik der Zyklonenentwicklung und der Vertikalbewegungen an Fronten verbaut wird!

Nun ein Beispiel für Regen im Warmsektor !

Die Abbildungen zeigen eine Wetterlage, bei der es im Verlauf einer Zyklonenentwicklung nicht nur an den Bodenfronten und auf ihrer...

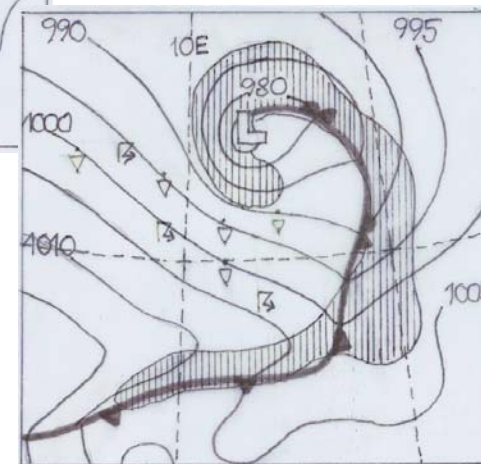


20.10.1986, 00 UTC

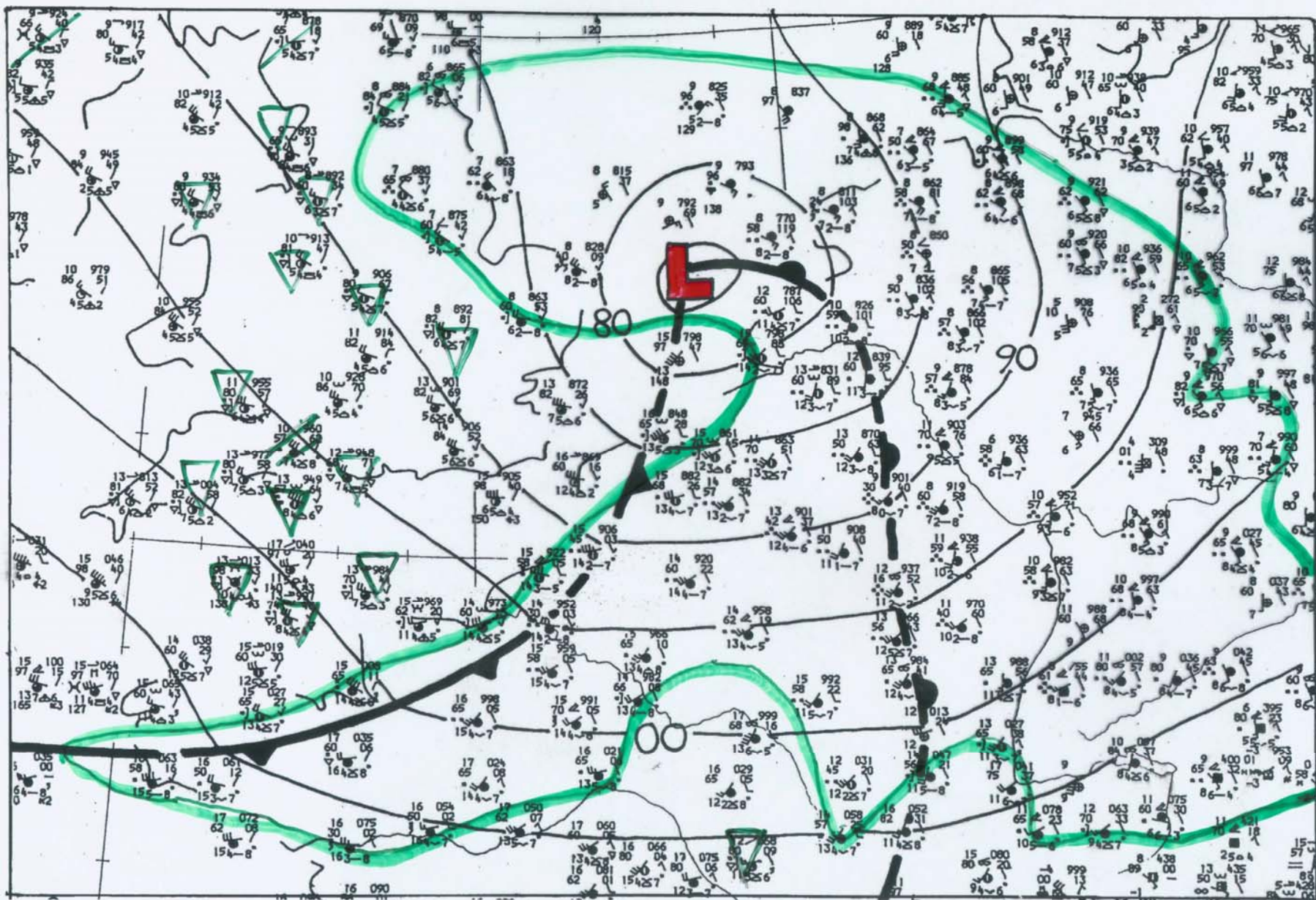


20.10.1986, 12 UTC

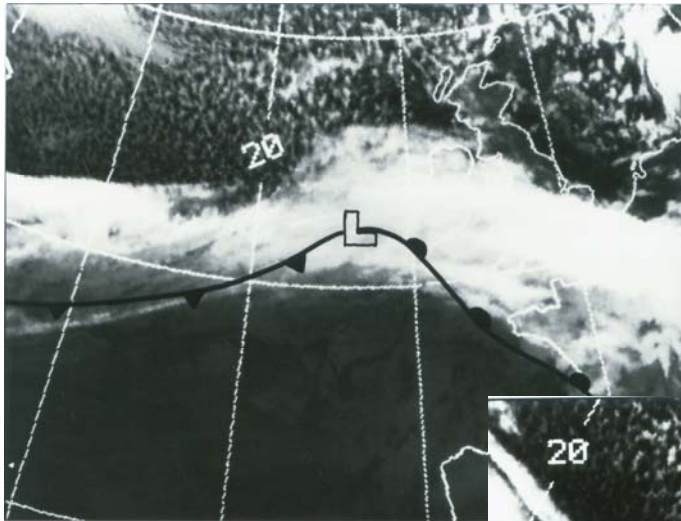
...kalten Seite zu Niederschlägen kommt, sondern gerade auch im Warmsektor von vielen Stationen leichter bis mäßiger Regen ohne Unterbrechung gemeldet wird



21.10.1986, 00 UTC

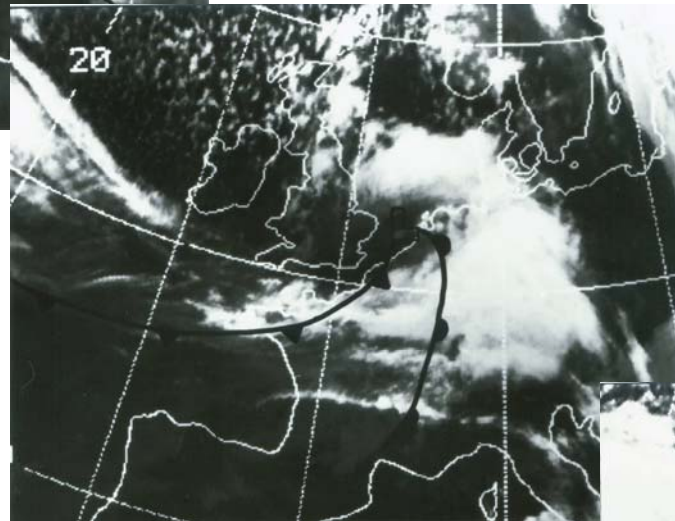


Hier die Mittagskarte im Detail!

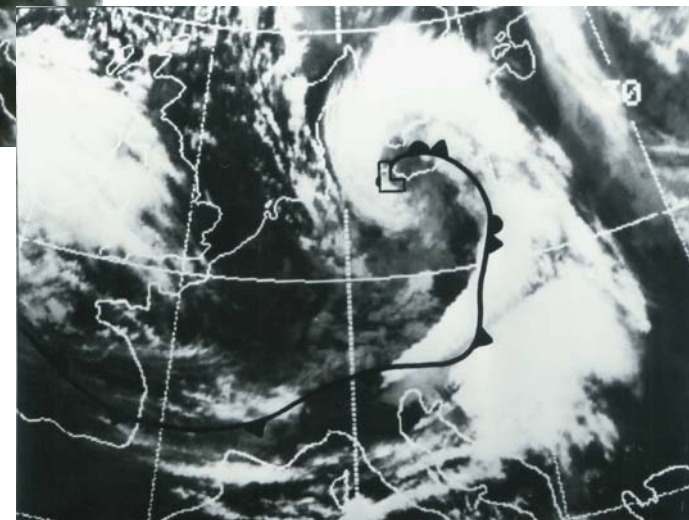


20.10.1986, 00 UTC

Auffällig ist das Vorschieben einer Zunge trockener Luft bis über den Tiefkern und das Innere des Warmsektors bis zum Mittagstermin. Es korrespondiert mit dem Ende des Niederschlags bereits vor der Kaltfront, das südlich des Kerns gemeldet wird. Diese trockene Luft findet man zwölf Stunden später hinter der Okklusionsfront wieder.



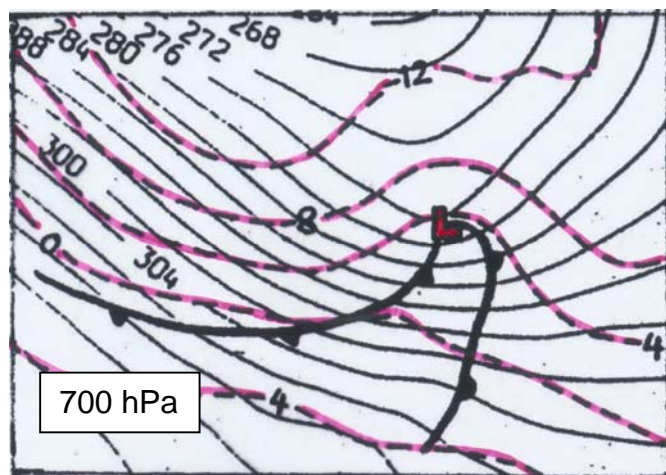
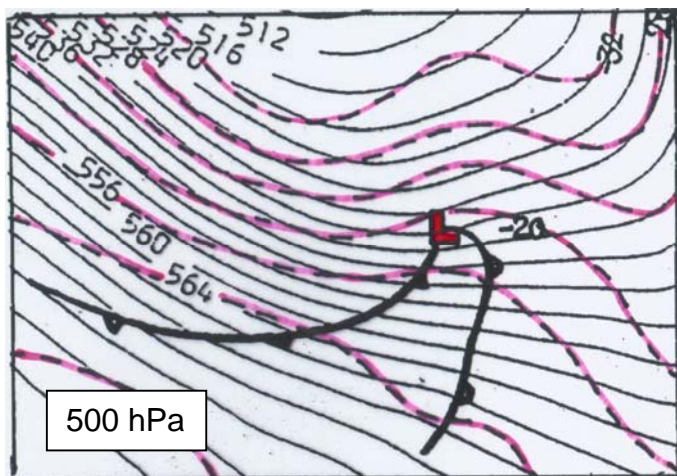
20.10.1986, 12 UTC



21.10.1986, 00 UTC

Die IR-Satellitenbilder von METEOSAT spiegeln die Veränderung des Niederschlagsgebiets wider: Aus dem anfangs zonal orientierten Wolkenband entwickelt sich bis zum Mittagstermin eine Komma-Form der hochreichenden Bewölkung, die in den folgenden zwölf Stunden in meridionaler Richtung gestreckt wird.

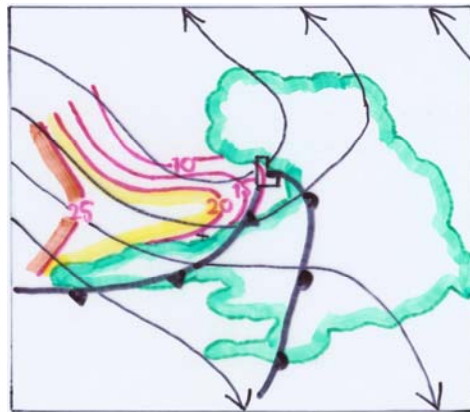
**Regen im Warmsektor setzt Hebung der Luft in diesem Bereich voraus.
Auf der Suche nach den Ursachen dafür müssen wir die Verhältnisse in
der Höhe betrachten!**



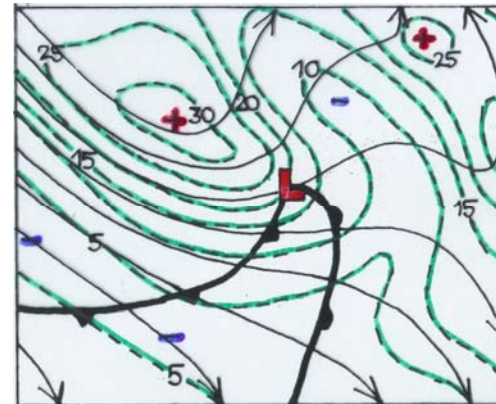
Die Temperaturanalyse für 700 und 500 hPa zeigt Isothermen, die eine warme Aufwölbung korrespondierend zum unteren Warmsektor aufweisen. Allerdings ist die Baroklinität keineswegs in einer schmalen Frontalzone konzentriert, sondern erstreckt sich über einen breiten Bereich sowohl zur kalten als auch zur warmen Seite. Über dem Warmsektor ergibt sich in beiden Niveaus eine Temperaturzunahme von ca. 8 K nach außen, wobei die Isothermen die Bodenfronten schneiden.

Die Geopotentialanalyse zeigt in 700 hPa einen Trog etwa über dem Bodentief, während in 500 hPa ein schwach ausgeprägtes Wellenmuster der Strömung zu erkennen ist – mit zyklonaler Isohypsenkrümmung stromauf und antizyklonaler Krümmung stromab vom Bodentief.

Aus der Baroklinität in der Warmluft resultiert, dass gemäß der thermischen Windgleichung die Winde über dem Warmsektor mit der Höhe zunehmen müssen. Wenn man unterstellt, dass die Zyklone bis zum Reifestadium mit der Geschwindigkeit der unteren Warmsektor-Strömung wandert, folgt daraus, dass der Kern der Zyklone und der Warmsektor in der Höhe relativ zur Verlagerung von hinten nach vorn überströmt werden.



Relativstromlinien in 500 hPa mit Linien gleicher Taupunktdifferenz (in K) und Begrenzung der hochreichenden Bewölkung (grün).



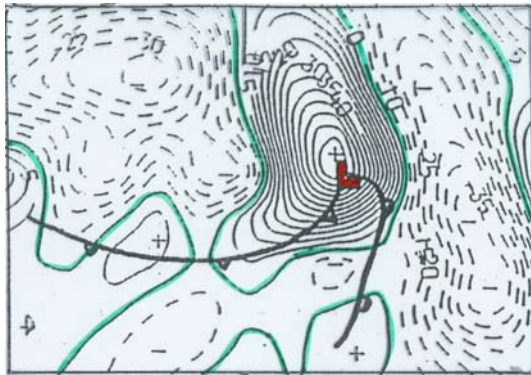
Relativstromlinien und Isoplethen der absoluten Vorticity (strichliert, in 10^{-5}s^{-1}) in 300 hPa

Das wird durch die Analyse der Relativstromlinien für 500 und 300 hPa bestätigt. Mit diesen Relativwinden wird die hochreichende Bewölkung der Zyklone nach vorn verfrachtet und streckt sich in meridionaler Richtung. Ihr folgt von der Rückseite die trockene Luft. In 300 hPa wird das obere Vorticitymaximum in Richtung auf das Bodentief advehiert. Dieser Vorgang wird offensichtlich durch das Verschieben der Zunge trockener Luft angezeigt.

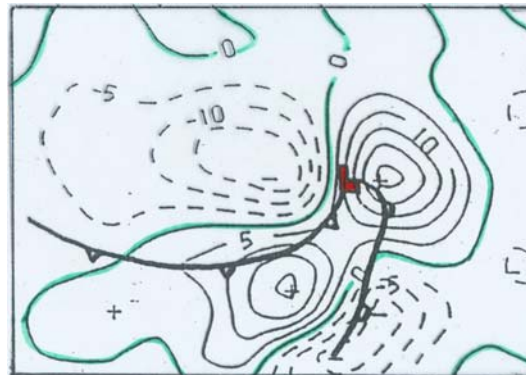
Die Advektion von Vorticity ist ein wesentlicher Faktor für die Verlagerung der Vorticityextreme und damit der Wellen und Wirbel in der Strömung. Sie liefert aber auch einen Beitrag zur Auslösung großräumiger Vertikalbewegungen, wenn sie vertikal unterschiedlich ist. Nach der quasi-geostrophischen Omega-Gleichung gilt:

Ein Antrieb für Hebung resultiert bei positiver Vorticityadvektion (PVA), mit der Höhe zunehmend, ein Antrieb für Absinken bei negativer Vorticityadvektion (NVA), mit der Höhe zunehmend.

Im Folgenden wird deshalb die geostrophische Vorticityadvektion in 300 und 700 hPa für den Mittagstermin betrachtet.

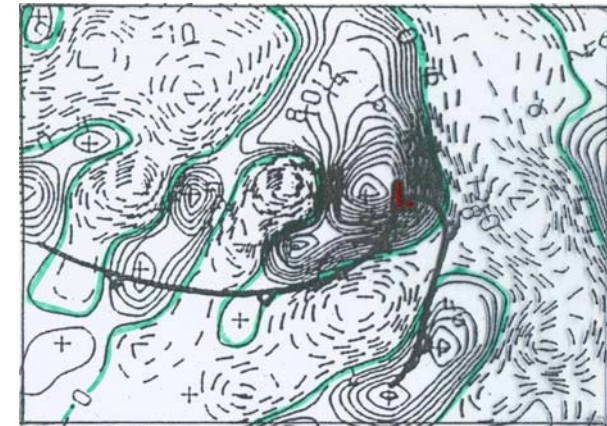


300 hPa



700 hPa

Vorticityadvektion (in 10^{-10} s^{-2})



Omega-Forcing für 500 hPa, resultierend aus der Differenz der Vorticityadvektion 300-700 hPa (in $10^{-18} \text{ m kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$). Positive Werte zeigen einen Antrieb für Hebung an.

In 300 hPa herrscht starke positive Advektion (PVA) zwischen dem Vorticitymaximum im Höhentrog und dem Minimum im Rücken stromab davon und damit genau über dem Bodentief und dem Inneren des Warmsektors.

In 700 hPa ist die Advektion generell schwächer und positiv östlich vom Bodentief und über dem Warmsektor.

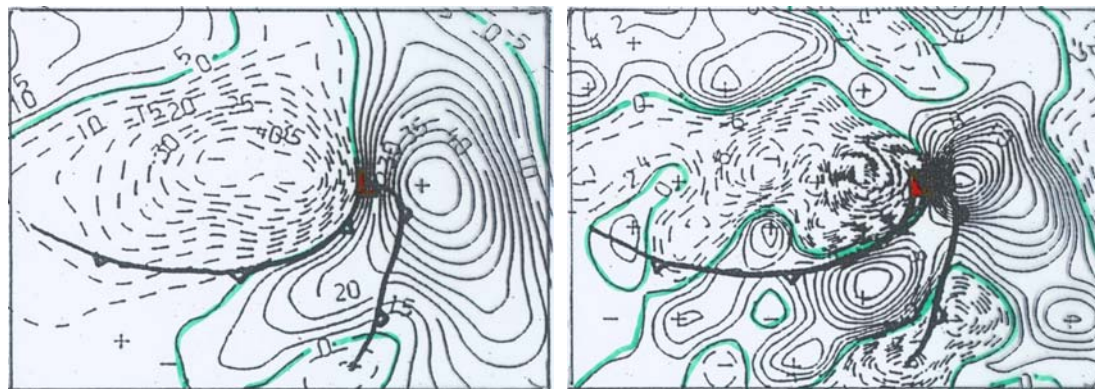
Aus der vertikal unterschiedlichen Vorticityadvektion resultiert ein Antrieb für Hebung hinter Bodentief und Kaltfront, aber auch über dem Kern des Tiefs und dem Innern des Warmsektors.

Ein Antrieb für Absinken wird östlich von Tief und Warmfront sowie über großen Teilen des Warmsektors angezeigt.

Der zweite wesentliche Auslösemechanismus für die Auslösung von Vertikalbewegungen ist die Temperaturadvektion über den Laplace ihrer horizontalen Verteilung:

Ein Antrieb für Hebung ergibt sich im Bereich relativ starker Warmluftadvektion (WLA), ein Antrieb für Absinken im Bereich relativ starker Kaltluftadvektion (KLA).

Schichtdickenadvektion
300/700 hPa (in
 $10^{-8} \times 9.81/3.6 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$)



Omega-Forcing für 500 hPa
durch Schichtdickenadvektion
(in $10^{-18} \text{ m kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$)

Die Advektion der Schichtdicke (Mitteltemperatur) zwischen 300 und 700 hPa zeigt das Maximum der WLA vor Tief und Warmfront, das Maximum der KLA hinter der Kaltfront. WLA herrscht aber auch über dem Warmsektor.

Daraus ergibt sich ein Hebungsantrieb östlich von Tief und Warmfront, aber auch über dem größten Teil des Warmsektors. Ein kräftiges Forcing für Absinken wird hinter der Kaltfront wirksam.



Gesamtantrieb für Vertikalbewegungen in 500 hPa
 (in $10^{-18} \text{ m kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$)

Die beiden Antriebsterme verstärken sich teilweise, kompensieren sich aber auch:

Im Gesamtantrieb ergibt sich ein Hebungsgebiet, das sich von der kälteren Luft nordwestlich vom Bodentief über den Tiefkern nach Süden erstreckt und sowohl die Bodenfronten als auch den Warmsektor einschließt. Der Antrieb ist östlich des Tiefs am stärksten.

Durch die Hebung kann es nicht nur zu Wolkenbildung und Niederschlägen kommen. Die Divergenz oberhalb des Niveaus der stärksten Hebung verursacht Druckfall, während durch die Konvergenz unter diesem Niveau zyklonale Vorticity produziert wird. Beides ist für die Intensivierung der Zyklone erforderlich. Das rückwärtige Absinken bewirkt die Entstehung der Zunge trockener Luft in der Höhe sowie über obere Konvergenz Vorticityzunahme im Höhentrog.

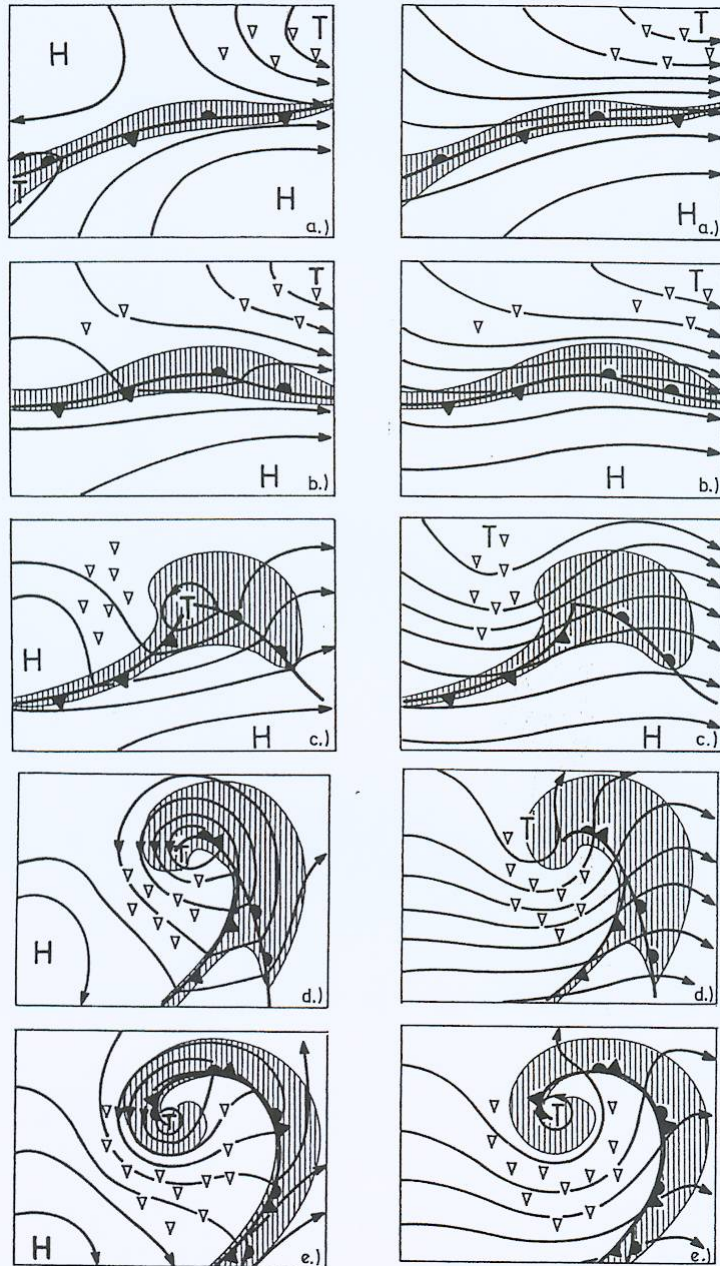
Die durchgeführte Diagnose erklärt befriedigend genau die beobachtete Verteilung der Niederschläge in dem ausgesuchten Fall, insbesondere die Tatsache, dass auch im Warmsektor verbreitet Regen fiel. Grundvoraussetzung dafür ist, dass die Warmluft nicht uniform ist, sondern eine gewisse Baroklinität aufweist, so dass PVA u./o. WLA eine Hebung auslösen können, die zu Wolkenbildung und Niederschlägen in dieser Luftmasse führt.

Die beschriebene Situation kann als typisch für eine sich intensivierende Zyklone betrachtet werden. Regen im Warmsektor als Folge der Hebung über dem Tief und seiner Umgebung ist somit geradezu ein Indikator für den laufenden Vertiefungsprozess – ganz im Gegensatz zum Zyklonense-Schema der „Bergener Schule“, bei dem ja bis zum Okklusionsprozess kein Tropfen Regen im sich einengenden Warmsektor fallen sollte!

FAZIT

Es ist höchste Zeit, die Uralt-Schemata der „Bergener Schule“ zu vergessen und zu ersetzen durch Darstellungen, die die Erkenntnisse, die durch mehr als achtzig Jahre Beschäftigung mit der Wetterwirklichkeit gewonnen wurden, widerspiegeln.

Nachfolgend werden einige Vorschläge dafür gemacht!



Lebenslauf einer Polarfrontzyklone

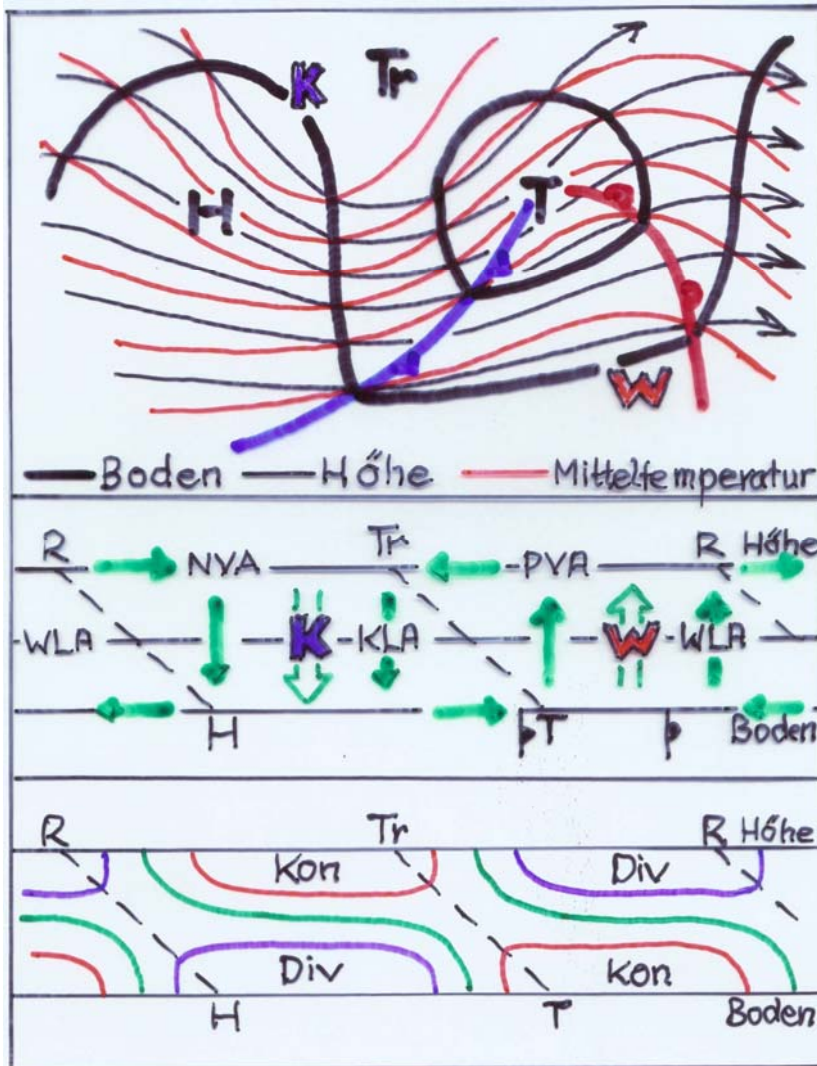
Links: Bodenfronten und Stromlinien des geostrophischen Winds in Bodennähe.

Rechts: Verlauf der Höhenströmung (mittlere und obere Troposphäre)

Die einzelnen Entwicklungsstadien folgen im Abstand von etwa 12 Stunden aufeinander.

Zusätzlich eingezeichnet das Gebiet mit kontinuierlichem Niederschlag sowie der Bereich mit Schauern.

(Nach Kurz, M., 1990: Synoptische Meteorologie. Leitfäden für die Ausbildung im Deutschen Wetterdienst Nr.8. Deutscher Wetterdienst. Offenbach am Main.)

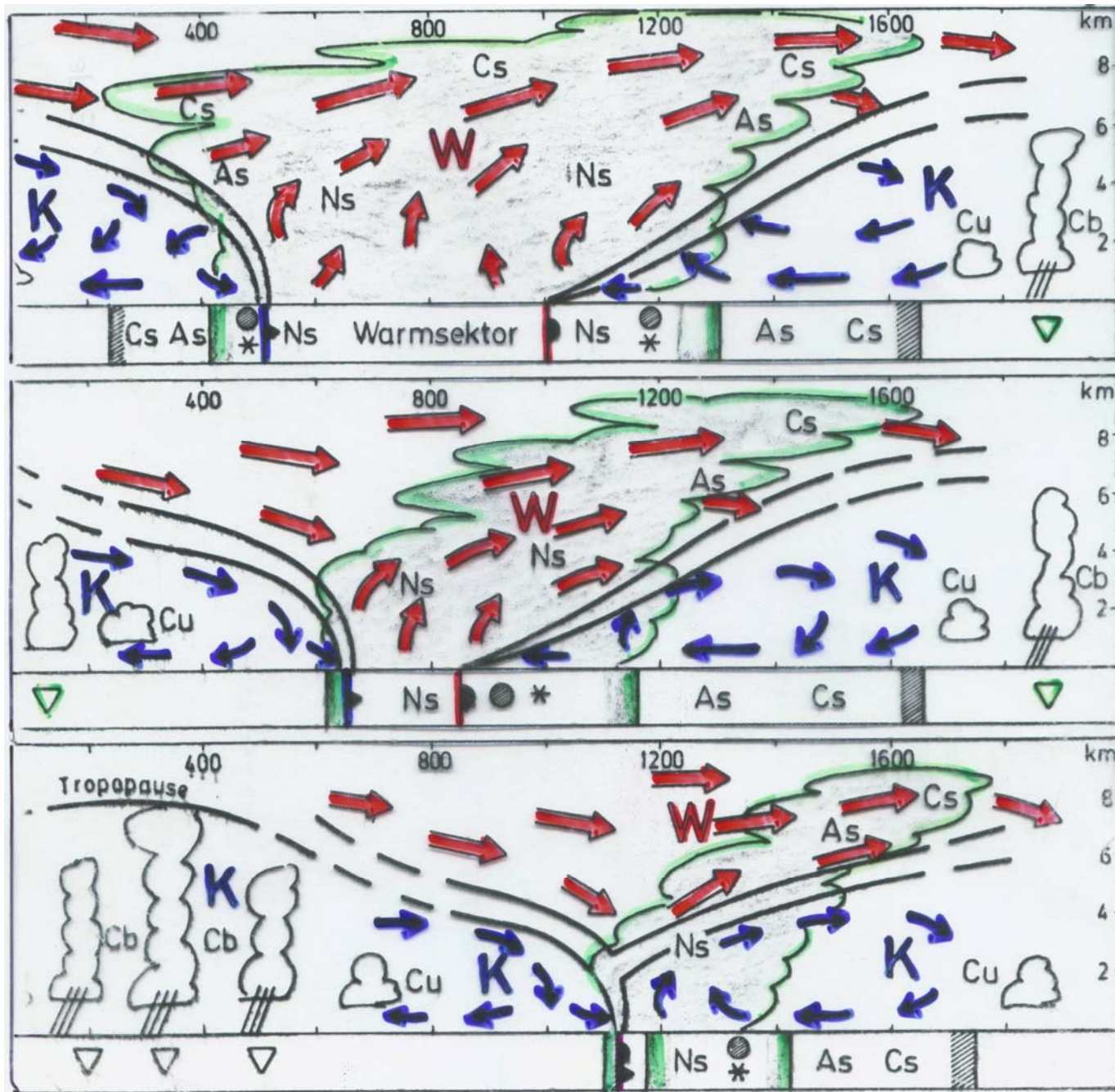


Schema von Zyklogenese und Antizyklogenese in einer labilen baroklinen Welle

Oben Horizontalprojektion mit geostrophischen Stromlinien der Höhenströmung (dünn ausgezogen), Stromlinien der Strömung in Bodennähe (dick ausgezogen) und Isothermen der Mitteltemperatur (rot).

In der Mitte Vertikalschnitt mit Verteilung der ageostrophischen Windkomponenten. Strichliert Trog- und Rückenachsen. PVA positive, NVA negative Vorticityadvektion; WLA Warmluft-, KLA Kaltluftadvektion. Unten Vertikalschnitt mit Verteilung von Horizontaldivergenz und Horizontal-Konvergenz.

(Nach Kurz 1990)



Vertikalschnitte durch das Frontensystem einer sich entwickelnden Zyklone (entsprechend den Stadien c-e in den vorigen Abbildungen). Die Pfeile stellen Relativbewegungen dar in einem mit der Zyklone mitwandernden Koordinatensystem.