

WESTFÄLISCHE GEOGRAPHISCHE STUDIEN

Herausgegeben vom Institut für Geographie und Länderkunde der
Universität und der Geographischen Kommission für Westfalen, Münster,
durch Wilhelm Müller-Wille und Elisabeth Bertelsmeier

26

GERHARD BAHRENBERG

Auftreten und Zugrichtung von Tiefdruckgebieten in Mitteleuropa

1973

Im Selbstverlag des Instituts für Geographie und Länderkunde
und der Geographischen Kommission für Westfalen, Münster

WESTFÄLISCHE GEOGRAPHISCHE STUDIEN

Herausgegeben vom Institut für Geographie und Länderkunde der
Universität und der Geographischen Kommission für Westfalen, Münster,
durch Wilhelm Müller-Wille und Elisabeth Bertelsmeier

26

GERHARD BAHRENBERG

Auftreten und Zugrichtung von Tiefdruckgebieten in Mitteleuropa

mit 19 Tabellen und 63 Abbildungen

1973

Im Selbstverlag des Instituts für Geographie und Länderkunde
und der Geographischen Kommission für Westfalen, Münster

Bezug durch den Selbstverlag, 44 Münster (Westf.), Robert-Koch-Str. 26,
Geographische Kommission (Institut für Geographie und Länderkunde)
Schriftleitung: Dr. E. Bertelsmeier

Promotionsschrift, die im Institut für Geographie und Länderkunde der
Universität Münster bei Herrn Prof. Dr. Dr. h. c. J. Blüthgen angefertigt
und von der Math.-Naturwissenschaftlichen Fakultät angenommen wurde.
Die mündliche Prüfung war am 10. und 11. Februar 1969.

Druck und Klischees:

C. J. Fahle GmbH, 44 Münster (Westf.), Neubrückenstraße 8—11

Inhalt

	Seite
Einleitung	1
I. Die Zugbahnenforschung in historischer Sicht	4
II. Kriterien der Bahnklassifikation	10
1. Die Eigenschaften der Tiefdruckgebiete	10
a) Definition und vertikale Struktur der Tiefdrucktypen	10
b) Die Struktur der Fronten	22
c) Die Wanderungsgeschwindigkeit	23
d) Umfang und Einflußbereich der Zyklonen	23
e) Der Luftdruck der Zyklonen	24
2. Der räumliche Gesichtspunkt	24
III. Die Tiefdruckbahn- und Tiefdrucklagetypen	25
1. Das Ausgangsmaterial und die Konstruktion der Bahnen	25
2. Die Eigenschaften der Bahn- und Lagetypen	29
a) Die SW- und WSW-Bahnen	29
b) Die W- bis N-Bahnen	38
c) Die Bahnen süd- bis östlicher Herkunft	50
d) Die zyklonal gekrümmten Bahnen	62
e) Die wirren Tiefdruckgebiete	72
f) Die Lagetypen der Bodentiefdruckgebiete	80
g) Bahn- und Lagetypen der Kaltlufttropfen	90
IV. Das Jahreszeitenproblem	108
1. Der Jahresgang der Bahn- und Lagetypen	108
2. Definition und Charakterisierung der Jahreszeiten	114
Zusammenfassung	120
Summary	122
Literatur	123

TABELLEN

Seite

1. Verteilung der SW- und WSW-Bahnen nach Zyklontypen und Jahreszeiten (1957—66)	30
2. Die ch^2 -Koeffizienten für den Vergleich der SW- und WSW-Bahnen	30
3. Verteilung der W-Bahn nach Zyklontypen und Jahreszeiten (1957—66) . .	39
4. Verteilung der NW-Bahn nach Zyklontypen und Jahreszeiten (1957—66) .	43
5. Verteilung der N-Bahn nach Zyklontypen und Jahreszeiten (1957—66) .	45
6. Verteilung der Vb-Bahn nach Zyklontypen und Jahreszeiten (1957—66) .	51
7. Verteilung der S-Bahn nach Zyklontypen und Jahreszeiten (1957—66) .	55
8. Verteilung der SO-Bahn nach Zyklontypen und Jahreszeiten (1957—66) .	58
9. Verteilung der W-SW-Bahn nach Zyklontypen und Jahreszeiten (1957—66)	62
10. Verteilung der Trog-Bahn nach Zyklontypen und Jahreszeiten (1957—66)	66
11. Verteilung der NW-W-Bahn nach Zyklontypen und Jahreszeiten (1957—66)	70
12. Verteilung der Bahn Wirr-Tief nach Zyklontypen und Jahreszeiten (1957—66)	72
13. Verteilung der Lagetypen der Bodentiefdruckgebiete nach Jahreszeiten (1957—66)	81
14. Verteilung der KO-Bahn nach Kaltlufttropfentypen und Jahreszeiten (1957—66)	91
15. Verteilung der KN-Bahn nach Kaltlufttropfentypen und Jahreszeiten (1957—66)	94
16. Verteilung der KNW-Bahn nach Kaltlufttropfentypen und Jahreszeiten (1957—66)	100
17. Verteilung der KW-Bahn nach Kaltlufttropfentypen und Jahreszeiten (1957—66)	101
18. Verteilung der Bahn K-Wirr nach Kaltlufttropfentypen und Jahreszeiten (1957—66)	104
19. Verteilung des Lagetyps K-Kurz nach Kaltlufttropfentypen und Jahreszeiten (1957—66)	105

ABBILDUNGEN

1. Schleifendes Tief vom 9. 2. 1966	16
2. Nichtschleifende Frontalwelle vom 7. 1. 1959	16
3. Kaltfronttief vom 12. 6. 1966 :	17
4. Warmfrontwelle vom 30. 1. 1960	17
5. Zentraltief vom 11. 10. 1960	18
6. Kaltes Tief vom 11. 5. 1965	19
7. Flaches Kaltlufttief vom 15. 3. 1962	19
8. Kaltlufttropfen in einem symmetrischen Höhentrog vom 22. 4. 1966	20
9. Kaltlufttropfen in einem asymmetrischen Höhentrog vom 1. 2. 1959	21
10. Die SW-Bahnen im Herbst und Winter (1957—66)	32

11. Die SW-Bahnen im Frühjahr und Sommer (1957—66)	33
12. Die WSW-Bahnen im Herbst und Winter (1957—66)	36
13. Die WSW-Bahnen im Frühjahr und Sommer (1957—66)	37
14. Die W-Bahn im Herbst und Winter (1957—66)	40
15. Die W-Bahn im Frühjahr und Sommer (1957—66)	41
16. Die NW-Bahn (westlicher Zweig) (1957—66)	44
17. Die NW-Bahn (nördlicher Zweig) im Herbst und Winter (1957—66)	46
18. Die NW-Bahn (nördlicher Zweig) im Frühjahr und Sommer (1957—66) . . .	47
19. Die N-Bahn im Herbst und Winter (1957—66)	48
20. Die N-Bahn im Frühjahr und Sommer (1957—66)	49
21. Die Vb-Bahn im Herbst und Winter (1957—66)	52
22. Die Vb-Bahn im Frühjahr und Sommer (1957—66)	53
23. Die S-Bahn im Herbst und Winter (1957—66)	56
24. Die S-Bahn im Frühjahr und Sommer (1957—66)	57
25. Die SO-Bahn (1957—66)	59
26. Die O-Bahn (1957—66)	60
27. Die W-SW-Bahn im Herbst und Winter (1957—66)	64
28. Die W-SW-Bahn im Frühjahr und Sommer (1957—66)	65
29. Die Trog-Bahn im Herbst und Winter (1957—66)	68
30. Die Trog-Bahn im Frühjahr und Sommer (1957—66)	69
31. Die NW-W-Bahn (1957—66)	71
32. Das Tiefdruckgebiet vom 8. 10. bis 15. 10. 1960	74
33. Das Tiefdruckgebiet vom 29. 5. bis 1. 6. 1961	75
34. Die Bahn Wirr-Tief im Herbst und Winter (1957—66)	76
35. Die Bahn Wirr-Tief im Frühjahr und Sommer (1957—66)	77
36. Die Bahn Wirr-Flach (1957—66)	79
37. Die Lagetypen V1a und V1a-S im Herbst und Winter (1957—66)	82
38. Die Lagetypen V1a und V1a-S im Frühjahr und Sommer (1957—66)	83
39. Der Lagetyp V1b im Winter und Frühjahr (1957—66)	84
40. Der Lagetyp V1b im Sommer und Herbst (1957—66)	85
41. Der Lagetyp V2 im Winter und Frühjahr (1957—66)	87
42. Der Lagetyp V2 im Sommer und Herbst (1957—66)	88
43. Die Lagetypen III und IV (1957—66)	89
44. Die KO-Bahn im Herbst und Winter (1957—66)	92
45. Die KO-Bahn im Frühjahr und Sommer (1957—66)	93
46. Die KN-Bahn im Herbst und Winter (1957—66)	96
47. Die KN-Bahn im Frühjahr und Sommer (1957—66)	97
48. Die KNW-Bahn im Herbst und Winter (1957—66)	98

49. Die KNW-Bahn im Frühjahr und Sommer (1957—66)	99
50. Die KW-Bahn im Herbst und Winter (1957—66)	102
51. Die KW-Bahn im Frühjahr und Sommer (1957—66)	103
52. Die Typen K-Wirr und K-Kurz im Herbst und Winter (1957—66)	106
53. Die Typen K-Wirr und K-Kurz im Frühjahr und Sommer (1957—66)	107
54. Häufigkeit der Bahnen SWNW, SWK und SWSO im Jahresgang (1957—66)	109
55. Häufigkeit der Bahnen WSWN, WSWK und WSWS im Jahresgang (1957—66)	109
56. Häufigkeit der Bahnen W, NW und N im Jahresgang (1957—66)	109
57. Häufigkeit der Bahnen Vb, S, SO und O im Jahresgang (1957—66)	110
58. Häufigkeit der Bahnen W-SW, Trog und NW-W im Jahresgang (1957—66)	110
59. Häufigkeit der Typen Wirr-Tief, Wirr-Flach, III und IV im Jahresgang (1957—66)	110
60. Häufigkeit der Lagetypen V1a, V1a-S, V1b und V2 im Jahresgang (1957—66)	111
61. Häufigkeit der Bahnen KO, KN und KNW im Jahresgang (1957—66)	112
62. Häufigkeit der KW-Bahn und der Typen K-Wirr und K-Kurz im Jahresgang (1957—66)	112
63. Die Tiefdruckbahn- und Tiefdrucklagetypen (1957—66)	116

Einleitung

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit dem Auftreten und der Zugrichtung von Tiefdruckgebieten in Mitteleuropa und behandelt damit das Problem der Zyklonenbahnen für einen begrenzten Raum. Entscheidend für die Wahl Mitteleuropas als Untersuchungsgebiet waren zwei Gründe. Entweder wandten sich die bisherigen Arbeiten über Zyklonenbahnen Gebieten außerhalb Mitteleuropas zu, oder sie behandelten einen zu großen Raum und ließen deshalb keine feinere Differenzierung für Mitteleuropa zu. So trat bei der großräumigen Betrachtung eine „Lücke“ zwischen Bahnen in der Nordsee und der sogenannten Vb-Bahn auf (vgl. z. B. die Van Bebergschen Bahnen). Diese Lücke konnte leicht den Eindruck erwecken, daß Zyklonen in Mitteleuropa nur äußerst selten auftreten, ein Eindruck, der durch die tägliche Erfahrung des Wetterdienstes widerlegt wird. Es lag daher nahe zu versuchen, diese Lücke durch eine räumlich differenzierte Untersuchung der zyklonalen Entwicklungen in Mitteleuropa zu schließen und einen Beitrag zur regionalen Klimatologie Mitteleuropas zu leisten. Folgt man der Klimadefinition Blüthgens: „Das geographische Klima ist die für einen Ort, eine Landschaft oder einen größeren Raum typische Zusammenfassung der erdnahen und die Erdoberfläche beeinflussenden atmosphärischen Zustände und Witterungsvorgänge während eines längeren Zeitraumes in charakteristischer Verteilung der häufigsten, mittleren und extremen Werte“ (Blüthgen 1966, S. 4), so ruht die Klimaforschung auf den beiden Pfeilern „atmosphärischer Zustand“ und „Witterung“ (aufgefaßt als Auswirkung der atmosphärischen Zustände und somit als „effektiver“ Teil des Klimas), die zusammen das Dach „Klima“ tragen.

Der Begriff Witterung impliziert schon eine Abkehr von der klassischen (auch Mittelwerts-, analytischen oder separativen) Klimatologie, die sich damit begnügte, im Klima eine lose Bündelung von Mittelwerten der einzelnen Klimaelemente zu sehen. Diese ausschließlich statisch-analytische Betrachtungsweise konnte nicht nur dem effektiven Teil des Klimas (der Witterung) nicht gerecht werden, sondern führte auch im Bereich der atmosphärischen Zustände zu Fehlschlüssen (Karten der mittleren Luftdruckverteilung), die z. B. lange Zeit eine Revision der Vorstellungen über die allgemeine Zirkulation erschwerten. Die Forderung, das Klima als die „Gesamtheit der Witterungen“ aufzufassen, wurde schon früh erhoben (Hann 1883, S. 1). Die „Auflösung des Mittelwertes“ (Knoch 1924) und der Übergang von der analytischen zur synthetischen Betrachtungsweise reichen jedoch zu einer dem tatsächlichen Witterungsablauf gerecht werdenden Erfassung der atmosphärischen Zustände nicht aus, sofern man sich bei deren Studium auf das Meeresniveau beschränkt.

Wie die rasche Entwicklung der Meteorologie in den letzten 40 Jahren gezeigt hat, müssen vielmehr auch die Verhältnisse in höheren Schichten der Atmosphäre (die „die Erdoberfläche beeinflussenden atmosphärischen Zustände“ in Blüthgens Definition) berücksichtigt werden. Sonst sind z. B. bestimmte „Schlechtwettererscheinungen“ bei ungestörter Bodendruckverteilung nicht zu verstehen (Kaltlufttropfen). Atmosphärische Zustände sind also immer als dreidimensionale dynamische Gebilde aufzufassen. Ihre Ordnung bezüglich der Witterung ist die vornehmliche Aufgabe der synoptischen Klimageographie (vgl. Blüthgen 1965).

Als Elemente des atmosphärischen Zustandes treten uns die Druckgebilde (Hochs, Tiefs, Rücken, Tröge, Keile usw.) und ihre Fronten entgegen. Legt man den Schwerpunkt auf ihr räumliches Gefüge, gelangt man zu den Wetterlagen, in die zudem noch eine zeitliche Integration eingehen kann. Die genannten Einheiten haben statischen Charakter. Mit ihrer Hilfe lassen sich durchaus schon grundsätzliche Aussagen über das Klima eines Raumes gewinnen, wie die Arbeiten von Dammann (1952 und 1960), Evjen (1953 und 1954) und Maede (1954) für Druckgebilde, von Band (1955) für Fronten

und von Baur (1947 und 1948), Hess und Brezowsky (1952) und Maede (1952 und 1953 a, b, c) für Wetterlagen gezeigt haben.

Will man der Lebendigkeit des Witterungsgeschehens stärker Rechnung tragen, also dem Witterungsablauf, muß daneben auch eine genetische Sicht treten, die die Entwicklung und zeitlichen Änderungen berücksichtigt. Dazu bieten sich sowohl Luftmassentransporte wie Kaltlufteinbrüche und Wärmewellen (vgl. Blüthgen 1940 und 1941) als auch Wetterlagenfolgen und die Bahnen der Druckgebilde an. In einer idealen Klimadarstellung müßten also atmosphärische Zustände und die Witterung integriert sein und zwar in statischer und genetischer Betrachtung.

Dieses Ziel sollte „mit aller Macht“ angestrebt und kann auch mit dem entsprechenden technischen Einsatz (Computer) erreicht werden. Ein einzelner Bearbeiter muß sich jedoch heute aus Zeitgründen noch eine notwendige Beschränkung auferlegen, die in zweierlei Hinsicht vorgenommen wurde:

1. Es werden nicht die Bahnen aller Druckgebilde, sondern nur die der Tiefdruckgebiete dargestellt. Die Hochdruckbahnen sind noch kürzlich auf dynamischer Grundlage unter besonderer Berücksichtigung Mitteleuropas untersucht worden (Reinel 1959). Eine Lösung dieses Problems für Zyklonen steht aber noch aus (s. o.).

2. Die Begleitwitterung der Bahnen wird nur kurz behandelt. Eine genauere Schilderung bleibt einer weiteren Arbeit vorbehalten.

Zum Problem der Erfassung der Witterung auf der Basis klassifizierter atmosphärischer Zustände sei auf eine Untersuchung von Nolle (mündliche Auskunft) über die Wetterwirksamkeit der Reinelnschen Hochdruckbahnen in Westfalen und die klimatistische Auswertung der Großwetterlagen von Hess und Brezowsky durch Bürger (1958) hingewiesen.

Statt einer thematischen wäre auch eine zeitliche Begrenzung möglich gewesen in dem Sinn, die Bahnen aller Druckgebilde nur in ein oder zwei bestimmten Jahreszeiten zu untersuchen. Dazu hätte jedoch eine Gliederung des Jahres in Jahreszeiten (z. B. meteorologische Jahreszeiten) vorausgesetzt werden müssen, ein sicher nicht ganz unproblematisches Unterfangen. Stattdessen soll das Problem der Jahreszeiteinteilung aus der Sicht der Tiefdruckbahnen neu aufgegriffen werden.

Da die Lücke in der Zugbahnenforschung im wesentlichen die festländischen Teile Mitteleuropas betrifft, lag es nahe, den Schwerpunkt auf diese zu legen. Um auch einen Vergleich zu den ozeanischen Randbezirken zu ermöglichen, wurden die Grenzen des Untersuchungsraumes wie folgt festgelegt (die Abgrenzung ist also keine „herkömmlich geographische“, sondern ergab sich aus dem besonderen Zweck der Arbeit). Im Norden verläuft die Grenze etwa von Calais über den Punkt 55° N, 5° O zur Nordspitze Dänemarks, biegt dort, die dänischen Inseln einschließend, nach Südosten um und wendet sich auf dem 55. Breitenkreis nach Osten. Die Ostgrenze wird im Norden durch den Meridian 15° O gebildet und verschiebt sich im Süden etwas nach Westen, die ungarische Tiefebene einschließend. Die Süd- und Südwestgrenze folgt zunächst Donau, Drau und Mur und fällt anschließend mit dem Alpenrand zusammen, bevor sie bei Bern in Richtung Calais nach Nordwesten umbiegt. Die Aussparung der Alpen erfolgte aus zwei Gründen. Einmal gibt es kaum alpenüberquerende Zyklonen, zum anderen sind die dort vorkommenden Tiefdruckgebiete meist nur auf das Meeresniveau beschränkt (Reduktionsfehler) und für das Witterungsgeschehen ziemlich belanglos.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Dr. h. c. J. Blüthgen, der mich in die Probleme der Klimatologie einführte und für den Fortgang der Untersuchung reges und hilfreiches Interesse zeigte. Er bemühte sich überdies erfolgreich um ein Doktorandenstipendium der Deckwitz'schen Stiftung, das mir die Fertigstellung der Arbeit wesentlich erleichterte.

Dank des Einsatzes von Herrn Regierungsdirektor Dr. Klug, Essen, konnte ich am Wetteramt Essen des Deutschen Wetterdienstes sechs Wochen lang hospitieren. In zahlreichen Diskussionen mit den dort tätigen Meteorologen und Klimatologen erhielt ich wertvolle Ratschläge zum Verständnis meteorologischer Fragestellungen, die für die Bewältigung der gestellten Aufgabe eine große Hilfeleistung bedeuteten. Für beide Möglichkeiten sage ich noch einmal aufrichtigen Dank.

Schließlich nehme ich mit Freude und Dank die Gelegenheit der Veröffentlichung in dieser Form wahr.

I.

Die Zugbahnenforschung in historischer Sicht

Im folgenden soll ein kurzer Überblick über die bei der Erforschung der Tiefdruckbahnen angewandten Methoden und angestrebten Ziele in historischer Sicht gegeben werden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Europa betreffenden Arbeiten. Auf entsprechende Untersuchungen über Hochdruckbahnen wird nur eingegangen, wenn sie von besonderer methodischer Bedeutung sind. Ansonsten sei auf die Übersichten bei Klein (1957, S. 2) und Reinel (1959, S. 5—12) verwiesen.

Die Bestimmung der Zugbahnen der Bodendruckgebilde erfolgte im wesentlichen auf drei verschiedene Arten, von denen die ersten beiden indirekter, die dritte direkter Natur sind:

1. Bei der sogenannten Gradfeldstatistik wird die Anzahl der in einem bestimmten Gradfeld vorkommenden Tiefs berechnet und auf eine Einheitsfläche reduziert. Aus der sich daraus ergebenden Häufigkeitsverteilung kann die durchschnittliche Verlagerung der Zyklonen indirekt durch die Verbindungslinien der Häufigkeitsmaxima erschlossen werden. Der Nachteil dieser Methode besteht in der Auflösung der Einzelbahnen, wodurch genetische und dynamische Zusammenhänge getrennt und willkürlich neue scheinbare geschaffen werden.

2. Ähnlich ist die Methode der Statistik der Meridianschnittpunkte. Ihr gegenüber müssen die gleichen Vorbehalte angemeldet werden. Hier werden die Schnittpunkte der Zyklonen mit ausgewählten Meridianen bestimmt und nach Intervallen ausgezählt. Die Achsen der Häufigkeitsmaxima stellen die mittleren Bahnen dar.

Theoretisch denkbar ist auch die Benutzung von Breitenkreisschnittpunkten. Jedoch ist ihre Anzahl bei der vorwiegend west-östlichen Verlagerung der Druckgebilde in der ektropischen Westwinddrift zu gering, so daß in der Praxis die Fehlerwahrscheinlichkeit zu groß wird. Breitenkreisschnittpunkte könnten höchstens auf tropische Wirbelstürme im Bereich des Umkehrpunktes der Parabelbahnen angewendet werden.

3. Bei der direkten Methode werden die Einzelbahnen der Tiefs bestimmt und anschließend gebündelt. Aus dieser Bündelung können mittlere Bahnen konstruiert werden. Das Problem dieses Verfahrens beruht in der nicht gewährleisteten „Objektivität“ bei der räumlichen Mitteilung. Zu welchen unterschiedlichen Ergebnissen man je nach Konzeption kommen kann, hat Klein am Beispiel der Bahnen der westindischen Wirbelstürme veranschaulicht (1957, S. 5, Abbildung 5).

Durch die Einführung der telegraphischen Nachrichtenübermittlung in den Wetterdienst ab Mitte des vorigen Jahrhunderts wurde die routinemäßige Beobachtung des Verhaltens der Druckgebilde in größerem Umfang ermöglicht. Der U. S. Army Signal Service und die Deutsche Seewarte begannen 1871 bzw. 1876 mit der monatlichen Veröffentlichung von Bahnen der einzelnen Tiefdruckgebiete. Das umfangreiche Material legte eine Bearbeitung zugunsten einer Berechnung der mittleren Zyklonenbahnen nahe. Als erster beschäftigte sich Loomis (1874) in den Vereinigten Staaten mit diesem Problem. Ihm folgten in Europa van Bebbber (ab 1880) und Köppen (ab 1882).

Van Bebbber, der übrigens auch Bahnen der Hochdruckgebiete untersuchte (1894), veröffentlichte zunächst die Karte der Zugstraßen der barometrischen Minima in Europa aufgrund eines fünfjährigen Beobachtungszeitraumes (1880 und 1881). Später weitete er den Untersuchungszeitraum auf 15 Jahre aus, konstruierte aber nur monatliche Übersichtskarten für die Tiefdruckbahnen (1891).

Zwischenzeitlich bearbeitete Köppen (1882) die Häufigkeit und mittleren Zugstraßen der Depressionen zwischen Felsengebirge und Ural, also über einen erheblich größeren Raum. Für Mitteleuropa und die angrenzenden Gebiete ergab sich bei ihm das gleiche Bild wie auf den Karten von Bebbers. Ganz im Zeichen der klassischen Isobarenmeteorologie stand auch Rykatschews Untersuchung der Zyklonenbahnen in Europa (1896). Die zahlreichen entsprechenden Arbeiten für den Nordatlantik, die USA, Indien, die westindischen Inseln und Ostasien seien hier nicht mit angeführt.

Die erste Darstellung der mittleren Zugbahnen der Zyklonen pro Monat über die ganze Nordhalbkugel veröffentlichte Dunwoody (1894). Er konnte sich dabei auf zehnjähriges Beobachtungsmaterial stützen.

Alle genannten Arbeiten benutzten die Häufigkeitsstatistik nach Gradfeldern oder Meridianschnitten. Ihr Ziel war zumeist eine Verbesserung der kurzfristigen Wettervorhersage, wie aus der Fragestellung „Welches Wetter haben wir bei einer gegebenen Verteilung der meteorologischen Elemente für die nächste Zeit zu erwarten?“ (van Bebbber 1891, S. 361) deutlich wird. Neben den praktischen Zweck trat ein theoretischer, nämlich „die den atmosphärischen Erscheinungen zu Grunde liegenden Gesetze zu erforschen“ (van Bebbber 1881, S. 414). Van Bebbber hebt die Bedeutung der Zugbahnen hervor, indem er deutlich auf die Problematik der ausschließlich auf Mittelwerte gegründeten Arbeitsweise (Karten der mittleren Luftdruckverteilung) hinweist: „Allein gerade der anziehendste Theil unseres Studienobjektes, nämlich der scheinbare regellose, launenhafte Gang der Witterung . . . wird durch Mittelwerte verdeckt“ (1881, S. 414).

Die ersten von van Bebbber veröffentlichten Bahnkarten erreichten in Europa die größte Popularität und sind bis heute noch durch keine neue, moderne Gesichtspunkte berücksichtigende Darstellung ersetzt worden. Von seinen Bezeichnungen wurde besonders die Vb-Bahn schnell zu einem eingebürgerten Begriff, was auf ihre einzigartige Stellung im mitteleuropäischen Witterungsgeschehen zurückzuführen ist. So überrascht es nicht, daß ihr von verschiedenen Seiten viel Aufmerksamkeit geschenkt wurde: Kassner (1897) konnte aufgrund zwanzigjährigen Beobachtungsmaterials die Vorstellungen über die absolute Häufigkeit und die jahreszeitliche Verteilung der Vb-Tiefs erweitern. Scherhag (1936) widmete sich der Entstehung der Vb-Depressionen. Knothe (1938) und Knothe und Moese (1939) untersuchten ihre auffallend hohen Niederschlagsmengen. Heute spricht man sogar von Vb-Lagen (z. B. Maede 1953b; Flohn und Huttary 1950) und überträgt damit den ursprünglichen Bahnbegriff auf solche Wetterlagen, bei denen feuchtwarme Mittelmeerluft in Mitteleuropa auf kalte Polarluft aufgleitet.

Nachdem Weickmann (1922) mit Hilfe der Häufigkeitsverteilung der Meridiandurchgänge die Kenntnis der Zyklonenbahnen Europas auf das östliche Mittelmeer ausgedehnt hatte — er konnte dabei die Ergebnisse von Bebbbers weitgehend bestätigen —, gerieten die Zugbahnen der Druckgebilde fast völlig aus dem Blickpunkt des Interesses. Dieses verlagerte sich zu den Luftmassen und den sie begrenzenden Fronten — ein Einfluß der Bergener Schule und der von ihr entwickelten Polarfronttheorie. Abgesehen von einigen Arbeiten zur Häufigkeitsverteilung der Zyklonen ruhte die Erforschung der Tiefdruckbahnen bis zum Ende des zweiten Weltkrieges. Schedler (1924) berechnete aufgrund fünfundzwanzigjähriger Beobachtungen die durchschnittliche Jahres- und jahreszeitliche Häufigkeit der Minima auf dem Atlantischen Ozean und den angrenzenden Teilen der Kontinente für 5°/5°-Felder getrennt für Tiefs mit Kerndruck $p \leq 760$ mm bzw. $p \leq 750$ mm. Die Werte sind jedoch für Felder verschiedener Breite nicht vergleichbar, da sie nicht auf eine Einheitsfläche bezogen wurden. Die Gestalt der Linien gleicher Häufigkeit vermittelt darum nur einen groben

Eindruck von der Verlagerungstendenz der Zyklonen. Beachtenswert ist jedoch, daß zum ersten Mal bei einer Häufigkeitsdarstellung die Depressionen differenziert wurden, wenn auch der Kerndruck kein ideales Kriterium ist.

Auf einem dreißigjährigen Zeitraum beruht eine ähnliche gradfeldstatistische Untersuchung von Richter (1938), die die Erfassung von Singularitäten der Zyklonenfrequenz zum Ziel hatte, ohne auf das Bahnproblem einzugehen. Schließlich sei noch Schmidt (1939) erwähnt, der zwei Zyklonen auf ungewöhnlichen Zugbahnen verfolgte und damit eine Verbesserung der Prognose erreichen wollte. Sein Beitrag veranschaulicht nicht nur exemplarisch die Komplexität der atmosphärischen Erscheinungen, sondern auch, welche große Abweichungen von der durchschnittlichen Zugrichtung bei einzelnen Zyklonen vorkommen können.

Daß man nach dem zweiten Weltkrieg allmählich die klimatologische Bedeutung der Druckgebilde, ihrer Fronten und Zugstraßen erkannte, beweist die ansteigende Zahl der Veröffentlichungen zu diesem Thema. Dammann (1952) stellte diesen klimatologischen Aspekt deutlich heraus: „Klimatologisch müßte es daher das Ziel sein, diese Einzelglieder der Zirkulation (Hoch- und Tiefdruckgebiete; der Verf.) geographisch und statistisch zu behandeln“ (S. 395). Zuvor hatte Weightman (1945) monatliche Bahnen der Depressionen in den USA aufgestellt, und zwar — das war das wesentlich Neue — getrennt für verschiedene Zyklontypen. Die Arbeit von Müller-Annen (1950) liefert hauptsächlich einen Beitrag zur Vorhersage von Tiefdruckzugbahnen und ist für die eigentlich klimatologischen Belange kaum von Interesse. Das ist anders bei Schoenwälders „Die Zyklonen der nördlichen Halbkugel“ (1953). Er konstruierte aufgrund elfjährigen Beobachtungsmaterials die Zugbahnen der Zyklonen auf der gesamten Nordhalbkugel mit Hilfe der Meridianschnitte für die einzelnen Monate und Jahreszeiten. Neben der ungewöhnlichen Definition der Jahreszeiten fällt auf, daß er unter Berücksichtigung der Lage der Polar- und Arktisfront neben der Häufigkeit und den Zugstraßen auch zyklonenetische Zentren und die Wanderungsgeschwindigkeit der Tiefs behandelte. Dadurch verdient seine Arbeit zusätzliche Aufmerksamkeit. Nachteilig wirken sich die Beschränkung auf die Verhältnisse im Meeresniveau und — für unsere Fragestellung — der zu große Untersuchungsraum aus, der keine detaillierte Auskunft für Mitteleuropa gibt.

Evjen (1953) beschäftigte sich mit Norwegen überquerenden Zyklonen mit dem praktischen Ziel einer Verbesserung der Prognose, lieferte damit aber gleichzeitig einen wichtigen Beitrag zur regionalen Klimatologie Norwegens. Seine Differenzierung der Tiefs beruht einzig auf deren Kerndruck. Das gleiche gilt für seine Berechnung der Häufigkeitsverteilung von Tiefs und Hochs in Nordwest- und Mitteleuropa (1954), die trotzdem von klimatologischem Interesse ist. Denn sie bringt deutlich das entgegengesetzte Verhalten von Land und Meer im Sommer und Winter zum Ausdruck, so z. B. die Tendenz zur Bildung flacher sommerlicher „Hitzetiefs“ im festländischen Mitteleuropa.

Von einer ähnlichen Fragestellung gingen Maede (1954) und Dammann (1960) aus. Dabei legte Maede eine differenzierte Tiefdrucktypisierung zugrunde, indem er folgende Einteilung vornahm:

1. Quasistationäre Tiefdruckgebiete, sogenannte Kerntiefs, „die vielfach bei dem langsamen (subtropischen) Wettertyp Mügges vorkommen“ (S. 161)
2. Schnellwandernde Tiefdruckgebiete, „die zum schnellen (polaren) Wettertyp Mügges gehören“ (S. 161)
3. „Vb-Tiefs“, „die aus südlicher bis östlicher Richtung kommend den Untersuchungsraum durchwandern“ (S. 161)
4. Kleine Wärmetiefs, „die sich bei flacher Druckverteilung vielfach als Gewittertiefs über dem Festland zu bilden pflegen“ (S. 161).

Der Nachteil der Wahl verschiedener Kriterien für die Typisierung (Geschwindigkeit bzw. Herkunft der Zyklonen) mußte bei dem angestrebten Ziel (Darstellung des Einflusses der Land-See-Verteilung in den Monaten größter Temperaturgegensätze zwischen Land und Meer auf das Verhalten von Depressionen) in Kauf genommen werden und wird außerdem durch die entscheidende, wenn auch indirekte Berücksichtigung der Höhenströmung wieder kompensiert. Außer der Häufigkeitsverteilung behandelte Maede auch die klimatologisch nicht unwichtigen Entstehungs- und Auf-füllungsgebiete, die 24-stündigen Druckänderungen und die Wanderungsgeschwindigkeit der Tiefs. Dammann unterschied nur zwischen flachen und tieferen Zyklonen (Kerndruck größer bzw. kleiner/gleich 1000 mb), setzte aber die Verteilung der Höhen-hochs, Höhenhochkeile und Höhentiefs an warmen Sommer- bzw. kalten Wintertagen in Beziehung zur Verteilung der Bodendruckgebilde. Den letztgenannten Arbeiten ist die Beschränkung auf die Häufigkeitsverteilung der Tiefs gemein, ohne daß Schlüsse auf deren Verlagerung gezogen werden. Lediglich bei Dammanns Darstellung sind mit Hilfe der konstruierten Häufigkeitslinien einige Grundzüge der Bewegungsrichtung der Zyklonen zu erkennen.

Mildner (1954) befaßte sich mit dem Zusammenhang zwischen Höhenströmung und Wanderung der Bodendruckgebilde, indem er deren Wege in eine über einen Zeitraum gleichartiger Zirkulation gemittelte Höhenkarte eintrug. Seine Bahnklassifikation mit dieser Methode beruhte also einzig auf ähnlichen Zirkulationsverhältnissen und konnte nur in geringem Maß auf die Witterung ausgerichtet sein.

Bei der Untersuchung der zyklonenetischen Gebiete auf dem nordatlantischen Ozean erzielten Macht und Markgraf (1955/56) als Nebenergebnis auch Aufschluß über die Zugbahnen der Zyklonen. Ausgehend von den drei zyklonenetischen Zentren am Rand des nordamerikanischen Kontinentes ergaben sich jeweils drei Verlagerungs-richtungen, insgesamt also neun Bahnen. Es wurden jedoch keine mittleren Bahnen gezeichnet, sondern nur umhüllende, innerhalb derer die einzelnen Zugstraßen nicht gleichmäßig verteilt sind, die Begehungshäufigkeit großen Schwankungen unterliegt und außerdem ganz verschiedene synoptische Situationen vorkommen können.

Eine Auflösung des isländischen Aktionszentrums bei Sturmweatherlagen in einzel-ne Bahntypen gelang schließlich Mertins (1957). Er konnte damit u. a. deutlich machen, wie wenig die noch von der Mittelwertsklimatologie her gebräuchlichen, wenig differenzierten Karten der durchschnittlichen Druckverteilung den tatsächlichen Zirkulationsverhältnissen und Witterungsvorgängen gerecht werden. Schließlich sei noch die Arbeit Weickmanns über die Häufigkeitsverteilung und Zugbahnen der Depressionen im Mittleren Osten (1960) erwähnt, in der besonders die Abhängigkeit der Bahnen vom Relief (als überlagernder Komponente zur großräumigen Steuerung) zum Ausdruck kommt und für den Mittelmeerraum weitgehende Übereinstimmung mit seinen früheren Ergebnissen und einer bei Kendrew (1954, S. 355) veröffentlichten Karte erzielt wird. Eine Differenzierung nach Tiefdrucktypen nahm Weickmann nicht vor.

Einen vorläufigen Höhepunkt der Zugbahnenforschung bildet ohne Zweifel Kleins Untersuchung der „Principal tracks and mean frequencies of cyclones and anticyclones in the Northern Hemisphere“ (1957). Klein ging von der Häufigkeitsverteilung nach Gradfeldern in einem zwanzigjährigen Zeitraum aus, wobei jedes Tief, unbeachtet der tatsächlichen Dauer seines Aufenthaltes in einem Gradfeld, nur einmal pro Gradfeld gezählt wurde. Die ermittelten Häufigkeiten wurden anschließend auf eine Einheitsfläche bezogen.

Außer der Häufigkeitsverteilung benutzte Klein auch ältere Darstellungen, insbesondere die von Berry, Owen und Wilson (1952), die neuestes Beobachtungsmaterial aus der Arktis zur Aufstellung von mittleren Hoch- und Tiefdruckbahnen der Nordhalbkugel nördlich von 35 ° N herangezogen hatten. Klein konstruierte die „princi-

pal tracks“ zwar im wesentlichen nach der Häufigkeitsverteilung durch die Verbindung der Häufigkeitsmaxima unter Berücksichtigung der Gestalt der Häufigkeitsisolinen, ging dabei jedoch sehr kritisch vor, indem er zur Konstruktion auch die durchschnittliche Druckverteilung und -abweichung jedes einzelnen Monats im 700 mb-Niveau heranzog. Der subjektive Einfluß bei der Bündelung konnte zwar nicht ganz ausgeschaltet werden — „Thus, selection of the final tracks was necessarily a subjective process in which many different factors were influential“ (S. 11) —, blieb jedoch gering. Als Endresultat erhielt Klein für jeden Monat die „principal tracks“, die er nach der Begehungshäufigkeit in primäre und sekundäre Bahnen unterschied. Aus der Art der Darstellung ergibt sich ferner die ungefähre Lage der wichtigsten Entstehungs- und Auffüllungsgebiete und der Gebiete der größten Zyklonenfrequenz. Außerdem zeigen die Karten einige klimatologisch bedeutsame Eigenschaften im Verhalten der Zyklonen auf: das Ausscheren der Zyklonen bzw. Antizyklonen aus der Höhenströmung nach links bzw. rechts, was zuerst von Rossby erkannt wurde; die Bevorzugung der warmen Gewässer und das Meiden der Festländer und Gebirge; die Zyklogenese im Lee der Gebirge in den quasistationären Höhentritten; die jahreszeitliche Verschiebung der Bahnen mit der Verlagerung der Gürtel der allgemeinen Zirkulation; die im Durchschnitt um einen Tag geringere Lebensdauer der Tiefs gegenüber den Hochs usw.

Abstriche an Kleins Arbeit müssen in zweierlei Hinsicht gemacht werden. Für Klein stand neben der klimatologischen Fragestellung das Problem des „mechanism of the general circulation“ (S. 1) im Vordergrund. Das verlangte eine großräumige Betrachtung mit starker räumlicher Mittelung. Entsprechend weisen seine Bahnen eine zu große Streubreite auf, als daß durch sie die feineren Züge der Zyklonalität Mitteleuropas erfaßt werden könnten. Die mitteleuropäische „Lücke“ bleibt also weiterhin bestehen.

Die anderen Einwände sind mehr grundsätzlicher Art:

1. Die Bahnen gelten nur für die Bodendruckgebilde. Die Höhenströmung und -druckverteilung wurden nicht berücksichtigt, obwohl sie für die Wetterwirksamkeit eine große Rolle spielen.
2. Eine Differenzierung der Bodendruckgebiete wurde nicht vorgenommen, obwohl sie für die Zyklonen (nach Vorhandensein und Struktur der Fronten) schon angelegt war.
3. Nur die „wirklich“ wandernden Frontalwellen und tropischen Wirbelstürme wurden in die Bahnstatistik aufgenommen.

Ähnliche Erwägungen veranlaßten Reinel (1959), die Zugbahnen der Hochdruckgebiete über Europa neu zu bearbeiten. Ausgehend von der Tatsache, daß „unser Untersuchungsraum, nämlich Europa, unter dem Einfluß sowohl vorwiegend kalter polarer als auch warmer subtropischer Hochdruckgebiete steht“ (S. 10) und diese jeweils andere Wetterwirkungen haben, begründet er die dreidimensionale Betrachtungsweise der Antizyklonen, die auch indirekt in die Bahnklassifikation eingeht. In der Darstellung beschränkt sich Reinel auf die sogenannten „Statistischen Sammelkarten“ und vermeidet das allzusehr vereinfachende Bild gemittelter Bahnen als mehr oder minder dünner Striche, um die die Einzelbahnen pendeln.

Reinel hat damit als erster der vertikalen Struktur der Hochs bei der Aufstellung der Bahnen Rechnung getragen. Die Aufgabe der vorliegenden Arbeit ist ähnlich. Jedoch werden außer einem anderen Untersuchungsraum (Mitteleuropa) auch andere barische Gebilde (Zyklonen) gewählt. Außerdem soll die vertikale Struktur der Tiefs eine direkte Berücksichtigung bei der Bahnklassifikation finden, indem jeder Bahn eine typische Verteilung der Anteile bestimmter, vorher definierter Tiefdrucktypen zugeordnet wird.

Daß dazu auch Kaltlufttropfen in die Betrachtung einbezogen werden, ergibt sich zwangsläufig. Sind sie es doch, die als zyklonale Zustandseinheiten der Troposphäre das Witterungsgeschehen in Bodennähe entscheidend mitbestimmen, auch wenn am Boden keinerlei zyklonale Isobarenkrümmung zu erkennen ist. So nimmt es eigentlich wunder, daß sie seit ihrer erstmaligen Erwähnung durch Scherhag (1937) zunächst lange Zeit keine klimatologische Behandlung erfuhren. Sie wurden vielmehr nur auf ihre dreidimensionale Struktur, den Aufbau, die Bewegung und räumliche Verteilung der Witterung hin untersucht. Jedoch wurden immer nur Einzelfälle herangezogen, besonders aus dem Winterhalbjahr, in dem Kaltlufttropfen bei uns in der reinsten Form auftreten. Erst Weimann (1958), ein Schüler Scherhags, konnte diesen unbefriedigenden Zustand durch Auswertung fünfjährigen Wetterkartenmaterials beenden. Er kümmerte sich insbesondere um die jahreszeitliche Verteilung der Einzelbahnen und die Entstehungs- und Auffüllungsgebiete der Kaltlufttropfen. Dabei stellte sich heraus, daß von Zugbahnen im van Bebberschen Sinn in Europa kaum gesprochen werden kann, was nur zum Teil an der Kürze des untersuchten Zeitraumes liegt. Denn die Bewegung der Kaltlufttropfen ist im allgemeinen viel komplizierter als die der Bodentiefs und im einzelnen vielen Schwankungen und plötzlichen Änderungen der Zugrichtung unterworfen — ein schönes Beispiel dafür hat Meyer (1949) aufgezeigt —, so daß der Bahnbegriff nur *cum grano salis* auf Kaltlufttropfen übertragen werden kann. Darum wird in dieser Untersuchung das Schwergewicht bei der Bahntypisierung der Kaltlufttropfen auf ihrem Herkunftsgebiet liegen; denn dieses ist der wichtigste Faktor für ihre Wetterwirksamkeit.

II.

Kriterien der Bahnklassifikation

Eine Klassifikation der Tiefdruckbahnen für einen klimageographischen Zweck darf nie die Ausprägung der Witterung aus dem Auge verlieren, d. h. ihre Kriterien müssen auf der verschiedenen Art und der räumlichen Verteilung des Witterungsablaufes aufbauen. Neben dem eigentlichen Weg der Tiefs müssen also in erster Linie ihre charakteristischen Merkmale wie vertikale Struktur, Wanderungsgeschwindigkeit, Struktur der Fronten usw. beachtet werden.

1. Die Eigenschaften der Tiefdruckgebiete

a) Definition und vertikale Struktur der Tiefdrucktypen

Unter Tiefdruckgebieten (Zyklonen, Depressionen) wollen wir Druckgebilde verstehen, die allseitig von höherem Luftdruck umgeben sind und auf der veröffentlichten Wetterkarte mindestens eine geschlossene Isobare aufweisen. Es kommt also für die Einordnung eines atmosphärischen Zustandes als Tiefdruckgebiet weniger auf den absoluten als vielmehr auf den relativ zur Umgebung niedrigen Luftdruck an. Außerdem soll eine gewisse Abgeschlossenheit des zyklonalen Systems (eine geschlossene Isobare) vorausgesetzt werden. Tiefdruckausläufer und Randtiefs ohne geschlossene Isobare fallen damit aus der Betrachtung heraus. In den veröffentlichten Wetterkarten werden die Bodenisobaren nur im 5-mb-Abstand gezeichnet. Um subjektive Einflüsse auszuschalten, wurden nur solche Bodentiefs berücksichtigt, die von mindestens einer dieser freilich willkürlich ausgewählten Isobaren umschlossen sind. So wird z. B. eine Zyklone, die von einer offenen 1010-mb, aber einer eventuell geschlossenen 1008-mb-Isobare umgeben ist, nicht in die Statistik aufgenommen. Entsprechend wurde bei den Höhenzyklonen verfahren. Das bedeutet eine beträchtliche, angesichts des Ausgangsmaterials aber unvermeidliche Siebung gegenüber dem tatsächlich abgelaufenen Wetter.

Gemäß der Definition können Tiefdruckgebiete in jeder Höhe der Atmosphäre auftreten. Diese Arbeit widmet sich Bodenzyklonen — als den Tiefdruckgebieten des Meeresniveaus — und Kaltlufttropfen, die nicht stets im Meeresniveau als Zyklonen zu erkennen sind. Auf die genauere Definition der letzteren wird weiter unten noch eingegangen.

Der „normale“ Ablauf einer Zyklonenentwicklung stellt sich wie folgt dar (vgl. Blüthgen 1966, S. 319ff; Scherhag 1948, S. 195), wobei auf die physikalischen Ursachen der Entwicklung nicht eingegangen wird. Ein Tief bildet sich zunächst als flache Welle an einer Luftmassengrenze zwischen wärmerer und kälterer Luft. Daraus entwickelt sich bald eine gut ausgeprägte Zyklone mit breitem Warmsektor; die Höhenströmung ist dabei noch weitgehend ungestört. In diesem Stadium spricht man von einer Frontalwelle. Dieser Zustand hält jedoch nicht lange an. Vielmehr wird die Warmfront von der schneller wandernden Kaltfront eingeholt, das Tief beginnt zu okkludieren. Gleichzeitig krümmt sich die Höhenströmung zyklonal. Bei Fortschreiten dieses Alterungsprozesses okkludiert das Tief weiter, und es bildet sich eine Höhenzyklone aus, die zunächst noch verhältnismäßig weit vom Bodentief entfernt ist. Mit der Ausweitung des Tiefs in die Höhe geht meist auch eine solche in der Horizontalen einher. Man kann das Tief (als dreidimensionale Einheit) in diesem Zustand als Frontalwelle mit Höhentief bezeichnen, wobei die vertikale Achse noch stark schräggestellt ist. Boden- und Höhentief rücken allmählich zusammen, und es entsteht die sogenannte Zentralzyklone, bei der Boden- und Höhentief nahezu senkrecht übereinander liegen, in deren Bereich aber noch Luftmassenunterschiede vorhanden sind. Mit der weiteren

Alterung geht das Zentraltief in das kalte Tief über, das ganz von kalter Luft erfüllt ist. Damit ist der Höhepunkt der Entwicklung überschritten. Das Bodentief füllt sich, falls es nicht durch äußere Einflüsse regeneriert wird, auf. Übrig bleibt das Höhentief in Verbindung mit einem troposphärischen Kältezentrum, der sogenannte Kaltlufttiefen.

Die „Lebensgeschichte einer Zyklone“ gewinnt für den Klimatologen dadurch Bedeutung, daß je nach dem Zustand des Tiefs seine Wetterwirksamkeit eine andere ist. Das gilt für die Art der Wettererscheinungen (z. B. Niederschlag, Wind, Temperatur, Bewölkung usw.) ebenso wie für ihren Umfang, die Intensität und Geschwindigkeit des Witterungsablaufs. Insofern liegt es nahe, eine Differenzierung der Tiefdruckgebiete nach ihrem Entwicklungsstadium vorzunehmen. Es ist nun denkbar, jedes Stadium als einen Zyklontyp aufzufassen. Da aber die genetische Betrachtungsweise im Mittelpunkt steht (Bahnen!), müssen die Strukturänderungen bei der Differenzierung mit berücksichtigt werden, d. h. die Tiefs, deren vertikaler Aufbau sich während der Wanderung in Mitteleuropa entscheidend wandelt, müssen in einer eigenen Klasse zusammengefaßt werden. Eine solche entscheidende Änderung vollzieht sich mit der Ausbildung eines Höhentiefs. Daraus ergibt sich folgende vorläufige Gliederung:

1. Nur am Boden ausgeprägte, an Fronten oder frontenähnliche Grenzflächen gebundene Tiefs
2. Am Boden und in der Höhe ausgeprägte Tiefs
3. Zyklonen, die während ihrer Wanderung sowohl nur am Boden als auch am Boden und in der Höhe auftreten. Bei ihnen handelt es sich um Tiefdruckgebiete mit einer besonders starken Änderung der vertikalen Struktur. Sie werden darum als „genetische Zyklonen i.e.S.“ bezeichnet, wobei im folgenden der Einfachheit halber von genetischen Zyklonen gesprochen wird.
4. Nur in der Höhe ausgeprägte Zyklonen, die Kaltlufttiefen.

Aus der ersten Klasse wurden zunächst die Warmfrontwellen ausgegliedert. Sie zeichnen sich im allgemeinen durch eine große Wanderungsgeschwindigkeit (also kurze Wetterwirksamkeit), fehlenden Kaltluftausbruch auf der Rückseite und seltene Verwirbelung aus. Die übrigen Tiefs der ersten Klasse wurden in drei Gruppen aufgeteilt:

- a) Tiefs im Anfangsstadium der Welle, die sich an einer strömungsparallelen Luftmassengrenze bilden und sich parallel zu ihr fortbewegen, ohne sie stärker zu deformieren. Es handelt sich hier um flache Wellen, die häufig bei Schleifzonenlagen auftreten und darum als schleifende Tiefs bezeichnet werden sollen.
- b) Frontalwellen, die sich nicht mehr im schleifenden Zustand befinden. Zu ihnen sind insbesondere die Teiltiefbildungen an Okklusionspunkten zu rechnen.
- c) Tiefs, die sich an einer Kaltfront oder Kaltfrontokklusion bilden, sich mit ihr bewegen, aber mit einer größeren frontsenkrechten als frontparallelen Bewegungskomponente. Sie sind in gewisser Weise für den mitteleuropäischen Sommer kennzeichnend, indem sie sich häufig an der Grenze trockener Festlandluft mit von Westen nachrückender Meeresluft bilden und ergiebige, mit Gewittern verbundene schauerartige Niederschläge liefern. Im Gegensatz zu den normalen Frontalwellen mit größerer frontparalleler Bewegungskomponente treten bei den „Kaltfronttiefs“ kaum Aufgleitniederschläge auf.

Die zweite Klasse konnte in Zentralzyklonen und Kaltlufttiefs unterteilt werden. Um die Abgeschlossenheit und die steuernde Wirkung des zyklonalen Systems berücksichtigen zu können, wurden beide Typen noch nach der Anzahl der geschlossenen Isogeopotentialen im 500-mb-Niveau zur Zeit der maximalen Entwicklung differenziert. Eigentlich gehören die Frontalwellen mit Höhentief eben-

falls dieser Klasse an. Sie treten aber fast nur als Übergangsstadium auf und konnten den genetischen Tiefs zugerechnet werden. Diese wurden in zwei Gruppen gegliedert:

a) Zyklonen, die in Mitteleuropa mindestens bis zur Frontalwelle mit Höhentief verwirbeln. Diese Gruppe wurde wie die zweite Klasse aus den gleichen Gründen nach der Anzahl der geschlossenen Isogeopotentialen unterteilt.

b) Die Zyklonen mit „umgekehrter Genese“. Darunter werden solche verstanden, die zunächst in Verbindung mit einem Höhentief standen, sich dann von diesem aber lösten und als Frontalwelle weiterwanderten. Das Höhentief kann sich dabei an Ort und Stelle auflösen oder sich in anderer Richtung als das Bodentief bewegen.

Aus diesem Vorgang wird schon ersichtlich, daß die oben beschriebene ideale Entwicklung der Zyklonen nur annähernd der Wirklichkeit entspricht und im einzelnen mannigfache Abweichungen davon auftreten können. So mußten auch solche Tiefs bei den genetischen eingereiht werden, bei denen das Höhentief nicht erst durch die Ausweitung der zyklonalen Rotation vom Boden in die Höhe entstand, sondern schon vorher selbständig in größerem Abstand vom Bodentiefzentrum vorhanden war, sich diesem aber im Lauf der Zeit allmählich näherte, so daß beide schließlich eine Einheit bildeten.

Innerhalb der ersten bzw. zweiten Klasse sind die Zyklonen natürlich auch Zustandsänderungen unterworfen. Als Beispiele seien die Entwicklung vom schleifenden Tief zur Frontalwelle und vom Zentral- zum kalten Tief genannt. Es hätte nahegelegen, auch diese Fälle den genetischen Zyklonen zuzuordnen. Da jedoch derartige Veränderungen für die Witterungsgestaltung nicht so bedeutungsvoll sind wie die Ausbildung eines Höhentiefs und außerdem die Zahl der Typen nicht zu groß werden sollte, wurden bei derartigen Zustandsänderungen die Zyklonen dem Typ zugeordnet, dem sie bei ihrer Wanderung in Mitteleuropa die längste Zeit angehörten.

Neben diesen drei Klassen von Bodentiefs gibt es noch einige Sonderformen, die meist nicht sehr wetterwirksam sind, aber der Vollständigkeit halber doch aufgeführt werden müssen. Zu ihrer Bildung führen meist besondere Ursachen.

Zunächst sind hier die Leetiefs bei hohem Luftdruck auf der Alpennordseite zu erwähnen. Es handelt sich um ganz flache Tiefs, deren Kerndruck oft über dem normalen liegt und die fast vollkommen wetterunwirksam sind, da ihnen die günstigen zyklogenetischen Bedingungen ihrer Pendants auf der Südseite der Alpen im Mittelmeer fehlen. Die Leetiefs sind an eine schwache Südströmung über den Alpen gebunden.

Es sei hier darauf hingewiesen, daß auch bei zyklonalen Wetterlagen durch den Loeffekt auf der Alpennordseite Zyklonen entstehen können, die dann erhebliche Wetterwirksamkeit besitzen. Sie wurden jedoch den Frontalwellen zugerechnet, so daß — wenn nicht ausdrücklich anders vermerkt — unter Leetiefs im folgenden nur solche bei hohem Luftdruck gemeint sind.

Von größerer Bedeutung sind flache Kaltlufttiefs in der Nordsee. Sie entstehen besonders im Winter, wenn hochreichende Kaltluft die relativ warme Nordsee erreicht und sich die zyklonale Rotation der Höhe bis zum Boden durchsetzen kann. Soweit sie von einem Höhentief begleitet sind, werden sie in der zweiten Klasse miteingereiht. Im andern Fall (wenn z. B. in der Höhe nur ein Trog vorhanden ist) werden sie gesondert aufgeführt. Die flachen Kaltlufttiefs sind frontenlos,

werden manchmal aber von einer Konvergenz oder sekundären Kaltfront begleitet und haben nur geringe Wetterwirksamkeit, sieht man von einigen Konvektionsschauern mit eventuell auftretenden Gewittern ab. Charakteristisch für diese Fälle ist die gegenüber der Luft- höhere Wassertemperatur. Wandern sie vom Meer aufs Land, sterben sie schnell ab. Häufig können sie als Resttief aufgefaßt werden: Bildet sich am Okklusionspunkt einer hochreichenden Nordmeerzyklone ein Teiltief im Skagerrak, bleibt ein Höhentrog zurück, der leicht zur Entstehung eines flachen Kaltlufttiefs führt.

In gewisser Hinsicht (Erwärmung vom Untergrund her) können die sommerlichen „Hitzetiefs“ als Pendant zu den winterlichen flachen Kaltlufttiefs in der Nordsee gelten. Sie wurden deshalb nicht in einem eigenen Typ zusammengefaßt, weil sie in Mitteleuropa in reiner Form kaum auftreten und der Faktor „Erwärmung von der Erdoberfläche“ bei der Zyklogenese schwer abzuschätzen ist. Stattdessen bot sich an, alle kleinen Tiefs, die nur einmal auf den täglichen Wetterkarten auftraten und sonst kaum zu erkennen waren, in eine eigene Klasse einzuordnen. Denn bei diesen nur kurzfristig sichtbaren Tiefs ist es sowieso nicht sinnvoll, von einer Bahn zu sprechen. Um die Erwartung, daß bei ihrer Entstehung die sommerliche Erhitzung des Festlandes entscheidend beteiligt ist, zu prüfen, wurden sie noch differenziert.

Die erste Gruppe umfaßt solche Tiefs, die sich an einer ausgeprägten Front bei einer Geschwindigkeit der Höhenströmung von mindestens 15 Knoten bilden. Sie wurden noch nach der Richtung der Höhenströmung im Vergleich zur Lage der Front differenziert, wobei die mit der größeren frontsenkrechten (als frontparallelen) Bewegungskomponente von denen getrennt wurden, bei denen die frontparallele die frontsenkrechte Bewegungskomponente überragte. Erstere entsprechen also den Kaltfront-, letztere den schleifenden Tiefs. Von den kurzfristig sichtbaren schleifenden Tiefs werden noch die bei südlicher Höhenströmung auftretenden ausgesondert. In der zweiten Gruppe vereinigen sich die kurzfristigen Tiefs ohne Fronten bzw. mit Fronten bei flacher Druckverteilung (Geschwindigkeit der Höhenströmung kleiner/gleich 15 Knoten). Diese Tiefs sind natürlich nicht alle reine Wärmetiefs. Ihre jahreszeitliche Verteilung, die später noch besprochen wird, zeigt jedoch deutlich den Einfluß der starken sommerlichen Einstrahlung.

Außer diesen kommen auch die Leetiefs und ein Teil der flachen Kaltlufttiefs nicht als Bahnzyklonen in Frage. Sie erfahren deshalb ebenfalls nur eine statische Behandlung (räumliche Verteilung getrennt nach Jahreszeiten).

Zum Begriff „Kaltlufttropfen“ sind noch einige Erläuterungen nötig. Scherhag (1937) führte ihn in dem noch heute gebräuchlichen Sinn ein. Er bezeichnete damit den zyklonenbegleitenden Kaltluftkörper, der nach Auffüllung des Bodentiefs als Höhentief und Kaltluftzentrum in der mittleren oder oberen Troposphäre zurückbleibt und „durch den nachfolgenden Warmluftvorstoß zum Kaltlufttropfen abgeschnürt und dessen Zugrichtung dann durch das Bodendruckfeld bestimmt wird“ (S. 27). Seither hat dieser Begriff jedoch infolge uneinheitlichen Gebrauchs viel Verwirrung gestiftet.

König (1947) wollte für abgeschlossene Kaltluftkörper der mittleren Troposphäre, wenn sich diese mehrere Tage halten, lieber den Ausdruck „Kaltluftinsel“ benutzt sehen. Der Begriff „Kaltlufttropfen“ sollte auf den Abschnürungsvorgang beschränkt bleiben. Sein Vorschlag fand keine allgemeine Zustimmung. Schwerdtfeger (1948) stellte für die Bodendruckverteilung keine Bedingungen, forderte jedoch geschlossene Isohypsen für die relativen Topographien 500/1000 mb und 225/500 mb, setzte also eine bestimmte Mächtigkeit der Kaltluftmassen voraus. Kruhl (1948)

dagegen stellt keine Bedingungen für die Mächtigkeit des Kaltlufttropfens und das Druckfeld unter ihm. Buschner (1951) bezeichnet als Kaltlufttropfen „Höhentiefdruckgebiete, die am Boden nicht erkennbar sind“ (S. 3) und bemerkt, daß sie besonders gut ausgeprägt in strengen Wintern sind.

In den Wetterkarten des Deutschen Wetterdienstes wird schon von Kaltlufttropfen gesprochen, wenn in der relativen Topographie mindestens eine geschlossene Isolinie auftritt. Während im amerikanischen Wetterdienst ein spezifischer Begriff für Kaltlufttropfen fehlt, hat sich in der englischen Literatur der Ausdruck „cold drop“ eingebürgert — Palmer (1949) spricht dagegen von „high-level-cyclone“ —, wenn in der relativen und absoluten Topographie 500/1000 mb bzw. 500 mb geschlossene Isolinien, am Boden aber keine geschlossenen Isobaren zu finden sind. Tritt jedoch auch am Boden ein abgeschlossenes zyklonales System auf, benutzt man die Bezeichnung „cold low“ (kaltes Tief). In der relativen Topographie abgeschlossene Kaltluftzentren werden allgemein „cold pool“ genannt, gleichgültig mit welcher Bodendruckverteilung sie verbunden sind.

Neuerdings haben sich Weimann (1958) und Scherhag (1962) um eine Klarstellung der Begriffe bemüht. Danach sind Kaltlufttropfen Kaltluftzentren (abgeschlossen in der relativen Topographie 500/1000 mb) mit abgeschlossenem Höhentief (abgeschlossen in der absoluten Topographie 500 mb), wobei die Bodenströmung antizyklonal oder schwach zyklonal gekrümmt sein muß. Ein Bodentief darf zwar kurzfristig vorhanden sein, aber nur als ein „sehr kleiner, sekundär induzierter, zyklonaler Wirbel, der frontenlos sein muß“ (Weimann, S. 6). Für diese Arbeit soll die vorstehende Definition übernommen werden. Während Weimann bei seiner Untersuchung nur Kaltlufttropfen mit mindestens zwei geschlossenen Isolinien berücksichtigte, sollen hier auch die kleineren Gebilde mitbehandelt werden, die jeweils nur eine geschlossene Isolinie in der relativen und absoluten Topographie 500/1000 mb und 500 mb aufweisen.

Wie oben schon bemerkt wurde, vollzieht sich nicht jede zyklonale Entwicklung nach dem angegebenen Schema. So können Kaltlufttropfen nicht nur als Endstadien einer Zyklogenese auftreten, sondern ebenso unmittelbar durch Abschnürung eines Kältezentums und damit verbundener Höhenzyklogenese entstehen (vgl. Weimann, S. 22). Ebenso kann sich aus einem Kaltlufttropfen durch vertikalen Impulsaustausch ein kaltes Tief entwickeln (vgl. Buschner 1951, Meyer 1953), das wiederum Fronten bilden und nach eventueller Ablösung des Bodentiefs vom Höhentief als Frontalwelle weiterwandern kann. Die Lebensgeschichte einer Zyklone ist also umkehrbar. Wenn dieser Fall auch relativ selten eintritt, ist er doch von klimatologischer Bedeutung, da schon die räumliche Verteilung der Wettererscheinungen (Niederschlagsfelder, Bewölkung usw.) in Kaltlufttropfen und kalten Tiefs grundverschieden ist (Meyer 1950 a, b; Buschner 1951). Aus diesem Grund wurden die Kaltlufttropfen gesondert behandelt. Die Entwicklung vom Kaltlufttropfen zum kalten Tief ist jedoch im festländischen Mitteleuropa so selten, daß sie beim Tiefdrucktyp mit „umgekehrter Genese“ nicht gesondert berücksichtigt zu werden brauchte.

Die Einteilung der Kaltlufttropfen wurde nach der Anzahl der geschlossenen Isogeopotentialen der absoluten Topographie 500 mb vorgenommen. Kriterium war also die Intensität und Abgeschlossenheit gegenüber ihrer Umgebung. Es wurden zu Gruppen zusammengefaßt:

1. Sehr intensive Kaltlufttropfen mit mindestens drei geschlossenen Isolinien
2. Kaltlufttropfen mittlerer Intensität mit zwei geschlossenen Isolinien
3. Kaltlufttropfen geringerer Intensität mit einer geschlossenen Isolinie.

Letztere wurden noch unterschieden in

- a) Kaltlufttropfen bei flacher Höhendruckverteilung
 - b) Kaltlufttropfen in asymmetrischen Höhentrog mit starker Höhenströmung auf der einen und schwacher Höhenströmung auf der anderen Seite
 - c) Kaltlufttropfen in einem symmetrischen Höhentrog.
- Damit sollte der sich auch auf die Witterung auswirkenden Steuerung der kleinen Kaltlufttropfen Rechnung getragen werden, die als ein „Mitschwimmen in der Gleichgewichtsdrift der Großwetterlage“ (Raethjen 1937, S. 9) gedeutet werden muß und durchaus nicht immer von der Bodenströmung her erfolgt.

Die verschiedenen Tiefdrucktypen seien noch einmal einschließlich ihrer Begleitwitterung übersichtlich zusammengefaßt. Zudem werden die für den Geographen etwas ungewöhnlichen Typen durch jeweils eine Wetterkarte illustriert (entnommen dem Täglichen Wetterbericht des Deutschen Wetterdienstes). Dabei sind bei den Bodentiefdruckgebieten die Bodenisobaren (im 5-mb-Abstand) ausgezogen, die Isogeopotentialen des 500-mb-Niveau (im 8-dkm-Abstand) gestrichelt. Bei den Kaltlufttropfen sind die Isogeopotentialen des 500-mb-Niveau (im 8-dkm-Abstand) ausgezeichnet, die der relativen Topographie 500/1000 mb (im 8-dkm-Abstand) gestrichelt.

I. Nur am Boden ausgeprägte, an Fronten oder frontenähnliche Grenzflächen gebundene Zyklonen

(1) Kaltfrontwellen

a) Schleifende Tiefs: Sie bewegen sich in schneller Folge an einer quasistationären Luftmassengrenze und sind jeweils von einem kleinräumigen Schlechtwettergebiet begleitet. Die Niederschläge entstehen durch Aufgleiten der wärmeren Luft. Die Kaltluft setzt sich nur allmählich gegen den Warmluftbereich durch (vgl. Abb. 1).

b) Nichtschleifende Frontalwellen: Den Aufgleitniederschlägen an der Warmfront folgt im Warmsektor heiter bis wolkenfreies Wetter ohne Niederschläge (Abb. 2), dessen Dauer von der Breite des Warmsektors abhängt. Der anschließende Kaltfrontdurchgang leitet eine Periode mit kräftiger Abkühlung und häufigen Schauern ein.

c) Kaltfronttiefs; frontsenkrechte Bewegungskomponente größer als frontparallele: Sie sind durch zum Teil gewittrige Schauer mit Abkühlung ausgezeichnet. Aufgleitniederschläge fehlen (Abb. 3).

(2) Warmfrontwellen: Ihnen fehlt das Rückseitenwetter. Nach dem Durchzug eines engbegrenzten Schlechtwettergebietes folgt rascher Druckanstieg mit warmem und wolkenfreiem Wetter (Abb. 4).

II. Am Boden und in der Höhe ausgeprägte Zyklonen

(1) Zentralzyklonen

a) mit schwacher Verwirbelung; weniger als drei geschlossene Isolinien im 500-mb-Niveau

b) mit starker Verwirbelung; mindestens drei geschlossene Isolinien im 500-mb-Niveau.

Die Zentralzyklonen sind im Kern schon okkludiert (Abb. 5). Nur in Randbereichen sind Warm- und Kaltfront mit den entsprechenden Wettererscheinungen noch getrennt. Im übrigen herrscht Schauerwetter vor, das wegen der geringen Wandergeschwindigkeit und der starken Konvektion lange anhält. Die Temperaturen liegen in allen Jahreszeiten unter dem Mittel. Der Unterschied zwischen den schwach und stark verwirbelten Zentralzyklonen beruht vor allem auf dem

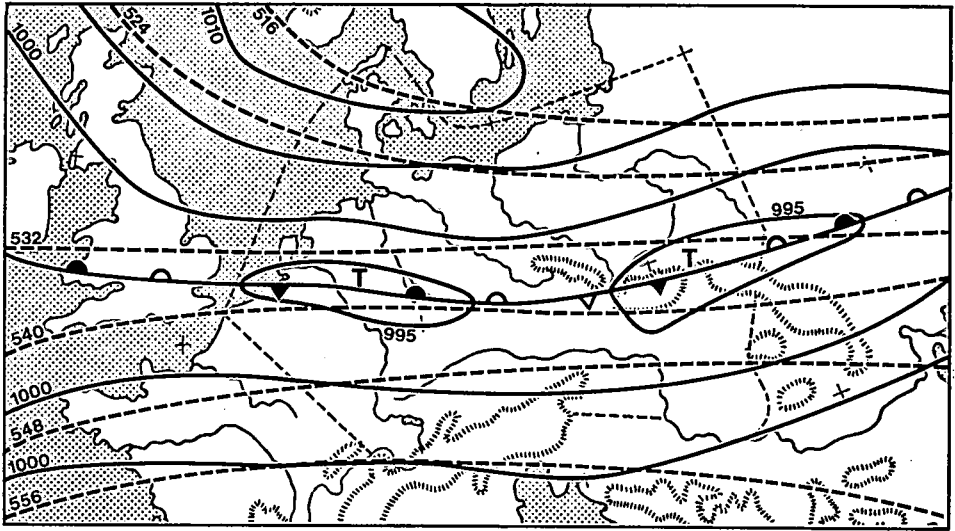


Abb. 1: Schleifendes Tief vom 9. 2. 1966

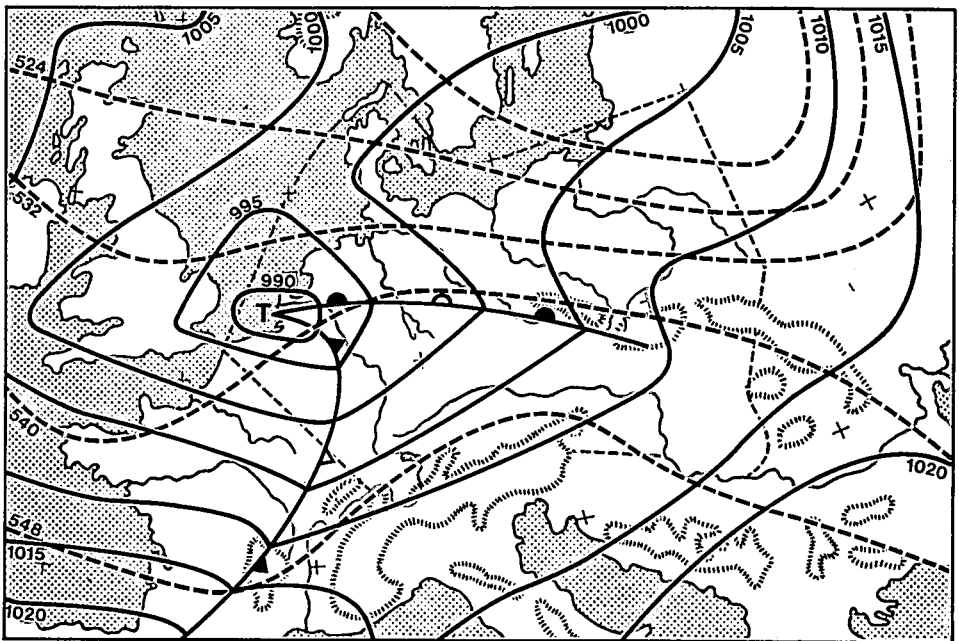


Abb. 2: Nichtschleifende Frontalwelle vom 7. 1. 1959

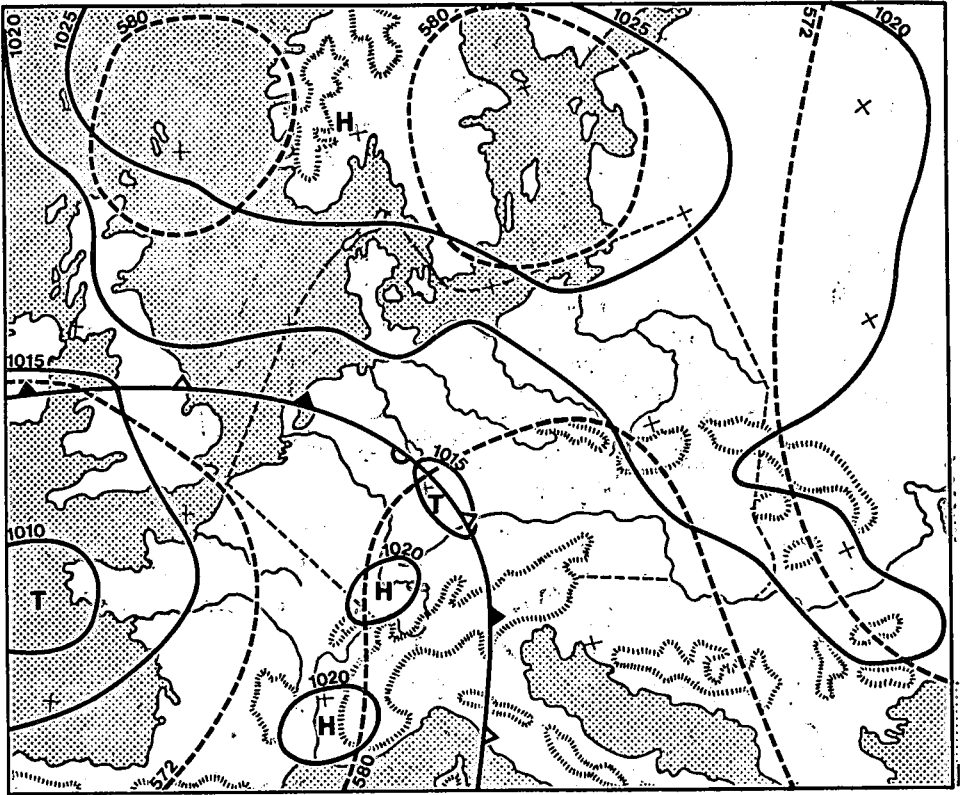


Abb. 3: Kaltfronttief vom 12. 6. 1966

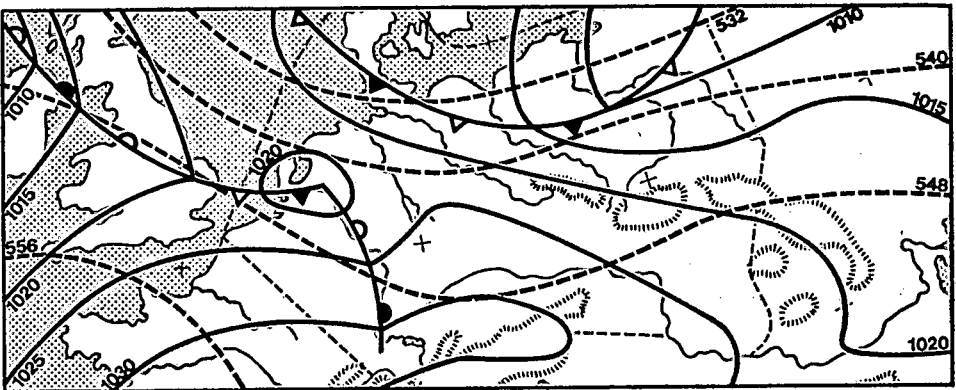


Abb. 4: Warmfrontwelle vom 30. 1. 1960

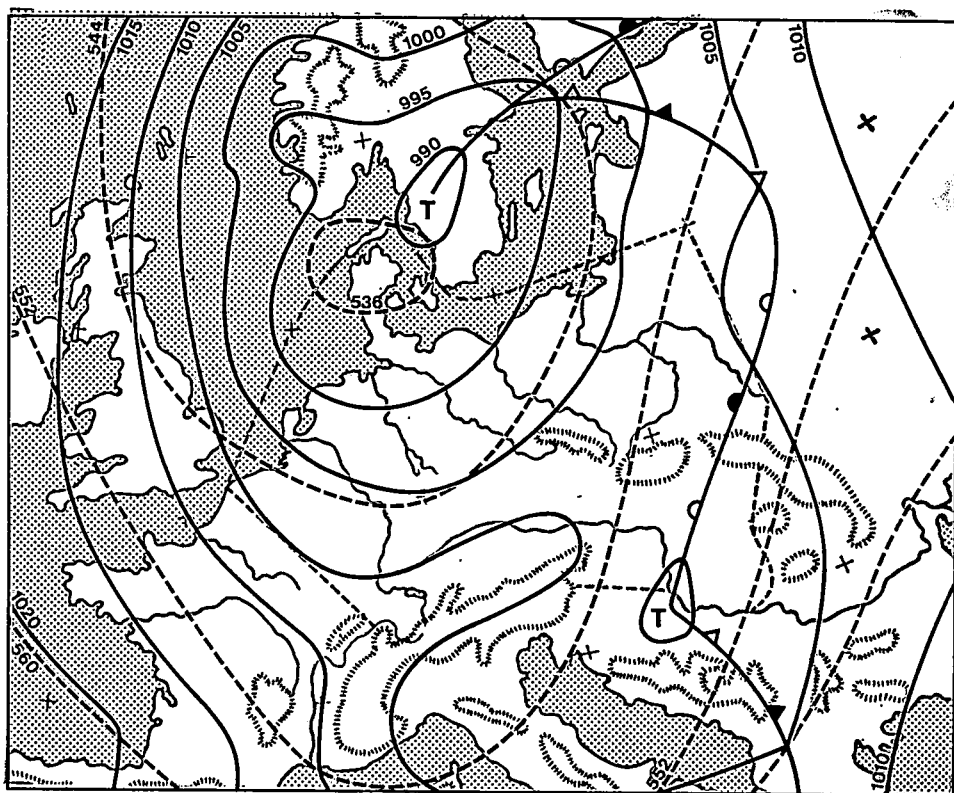


Abb. 5: Zentraltief vom 11. 10. 1960

unterschiedlichen Einflußbereich, der bei letzteren größer ist. Außerdem zeichnen sich die stark verwirbelten Zentraltiefs durch niedrigere Temperaturen und größere Konvektionsbereitschaft aus. Als Beispiel wurde die Wetterkarte vom 11. 10. 1960 gewählt.

(2) Kalte Tiefs

- a) mit schwacher Verwirbelung; weniger als drei geschlossene Isolinien im 500-mb-Niveau
- b) mit starker Verwirbelung; mindestens drei geschlossene Isolinien im 500-mb-Niveau.

Den kalten Tiefs fehlen Fronten (Abb. 6). Im gesamten Einflußbereich herrscht kaltes Schauerwetter vor. Die Unterschiede zwischen den schwach und stark verwirbelten sind die gleichen wie bei den Zentraltiefs. Als Beispiel wurde die Wetterkarte vom 11. 5. 1965 gewählt.

(3) Genetische Zyklonen

- a) Schwache Verwirbelung bis mindestens zur Frontalwelle mit Höhentief; weniger als drei geschlossene Isolinien im 500-mb-Niveau
- b) Starke Verwirbelung bis mindestens zur Frontalwelle mit Höhentief; mindestens drei geschlossene Isolinien im 500-mb-Niveau
- c) „Umgekehrte Genese“; das Bodentief trennt sich während der Wanderung in Mitteleuropa von dem Höhentief.

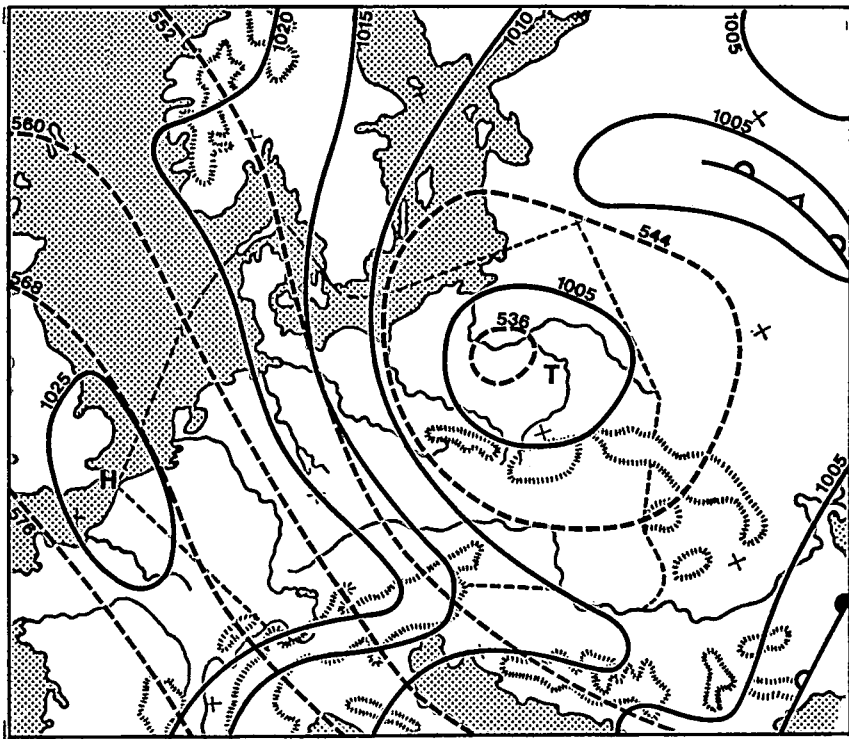


Abb. 6: Kaltes Tief vom 11. 5. 1965

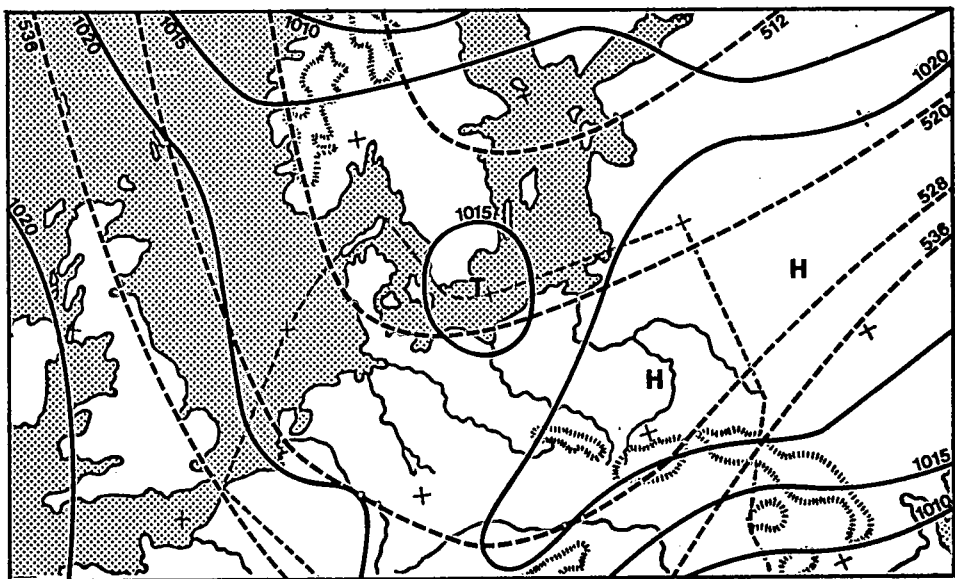


Abb. 7: Flaches Kaltlufttief vom 15. 3. 1962

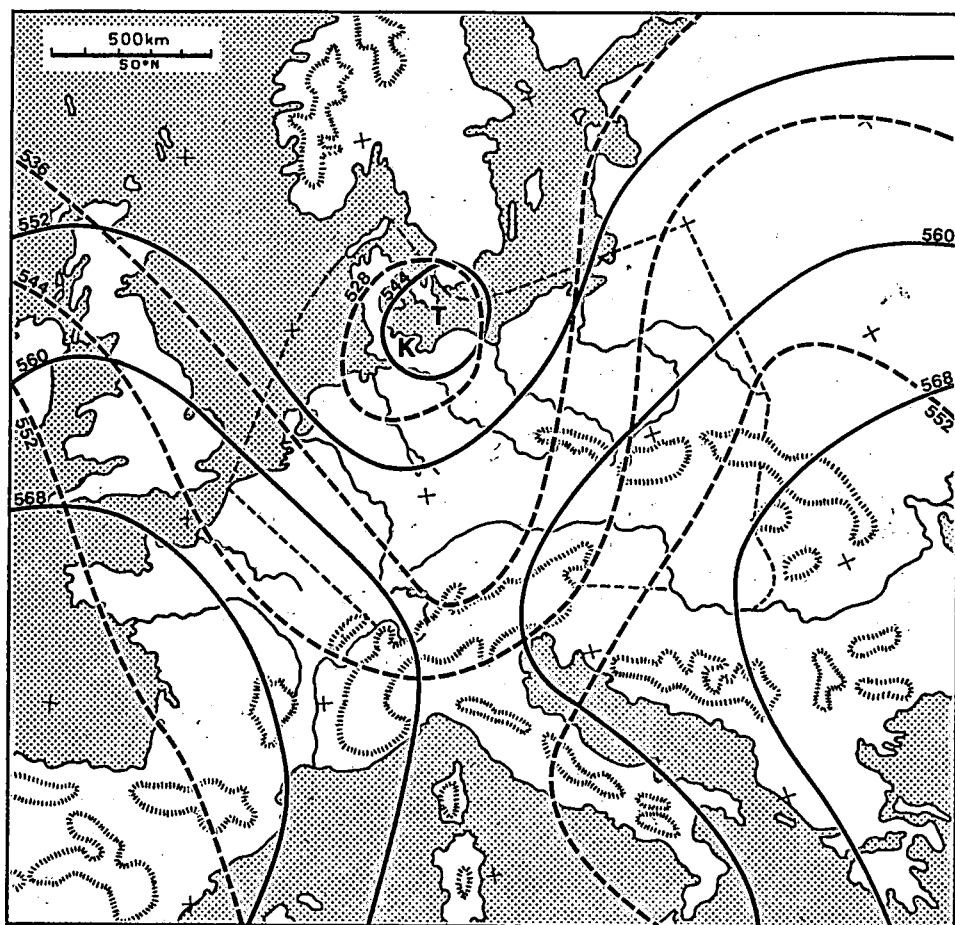


Abb. 8: Kaltlufttropfen in einem symmetrischen Höhentrog vom 22. 4. 1966

Die genetischen Zyklonen durchlaufen die Stadien vom schleifenden Tief über die Frontalwelle, die Zentralzyklonen und das kalte Tief bis zum Kaltlufttropfen. Entsprechendes gilt für ihre Begleitwitterung. Bei den Zyklonen mit „umgekehrter Genese“ ist die Reihenfolge umgekehrt.

III. Leertiefs bei hohem Luftdruck auf der Alpennordseite: Sie sind kaum wetterwirksam.

IV. Flache Kaltlufttiefs ohne Ausbildung eines Höhentiefs: Die Schauertätigkeit ist kurzfristiger und weniger ergiebig, die Abkühlung ist schwächer als bei den kalten Tiefs. Als Beispiel wurde die Wetterkarte vom 15. 3. 1962 gewählt (Abb. 7).

V. Nur kurzfristig sichtbare Zyklonen

(1) Bildung an Fronten bei einer Geschwindigkeit der Höhenströmung im 500-mb-Niveau von mindestens fünfzehn Knoten

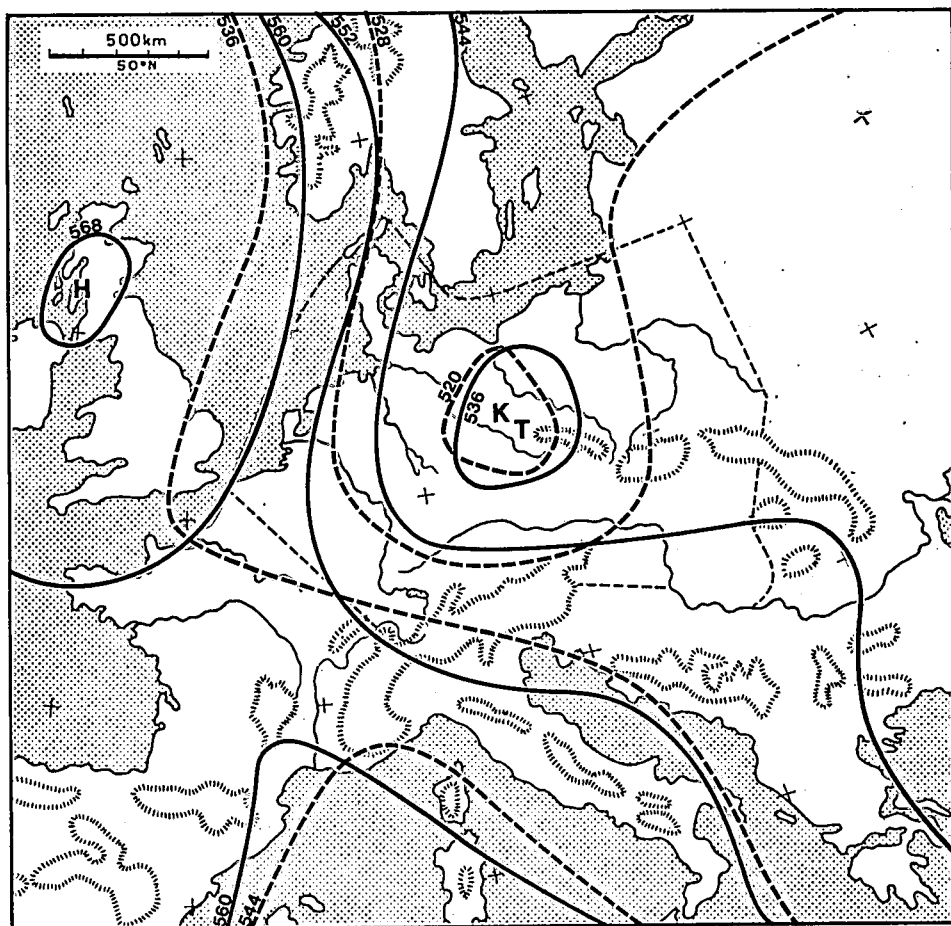


Abb. 9: Kaltlufttropfen in einem asymmetrischen Höhentrog vom 1. 2. 1959

a) Schleifend; bei südwest- bis nördlicher Höhenströmung

a-S) Schleifend; bei süd- bis östlicher Höhenströmung

b) Bei größerer frontsenkrechter als frontparalleler Bewegungskomponente.

Die Wetterwirksamkeit der Typen VIa, VIa-S bzw. VIb entspricht der der schleifenden bzw. Kaltfronttiefs.

(2) Bildung an Fronten bei flacher Luftdruckverteilung (Geschwindigkeit der Höhenströmung kleiner als fünfzehn Knoten) oder ohne Fronten. Die Wetterwirksamkeit dieser Tiefs ist gering. Sie erschöpft sich in kurzfristigen Konvektionsschauern, die im Sommer gewittrig sein können.

VI. Kaltlufttropfen

(1) Mit einer geschlossenen Isolinie im 500-mb-Niveau

a) Bei flacher Höhendruckverteilung: nur geringe Wetterwirksamkeit. Wenig ergiebige Konvektionsschauer.

b) In einem symmetrischen Höhentrog: Die Witterung entspricht der während eines Kaltfrontdurchganges. Die Abkühlung ist nur kurzfristig (Abb. 8).

c) In einem asymmetrischen Höhentrog: Auswirkung wie bei b). Die Zufuhr höhenkalter Luft wird jedoch nach dem Durchgang des Tropfens nicht abgeschnitten, sondern das kalte Schauerwetter hält an (Abb. 9).

(2) Mit zwei geschlossenen Isolinien im 500-mb-Niveau

(3) Mit mindestens drei geschlossenen Isolinien im 500-mb-Niveau.

Die beiden letztgenannten Kaltlufttropfentypen bringen langanhaltende, starke Abkühlung und ergiebige Niederschläge, die als Aufgleitniederschläge und Schauer mit dazwischen geschalteten Aufheiterungsperioden fallen. Der Abkühlungsbetrag und die Ergiebigkeit der Niederschläge sind beim Typ VI2 geringer.

b) Die Struktur der Fronten

Während die Wetterwirksamkeit der Antizyklen infolge ihrer frontenauflösenden Wirkung verhältnismäßig leicht abzuschätzen ist, fällt dies bei den Tiefdruckgebieten schwerer. Denn gerade die Fronten sind weitgehend, wenn auch keineswegs ausschließlich, die Träger des zyklonalen Witterungsgeschehens. Letzteres ist darum stark asymmetrisch um den Tiefkern angeordnet.

Der Bedeutung der Fronten gerecht werdend, hat Band 1955 die Frontdurchgänge in Mitteleuropa in einem Nord-Süd-Profil ausgezählt und konnte dadurch die Eigenschaft des Maingebietes als Wetterscheide zwischen Nord- und Süddeutschland nachweisen.

Die unterschiedliche Lage und Struktur der Frontensysteme wirken sich verschieden auf die Witterung aus. In die Klassifikation der Tiefdruckgebiete sind die Typen der Frontensysteme zwar schon weitgehend mit eingegangen, aber nur indirekt. Besonders bei den Kaltfrontwellen und den genetischen Zyklonen gibt es noch mehrere Möglichkeiten für die Art des begleitenden Frontensystems, und zwar hinsichtlich der Geschwindigkeit, mit der die Fronten okkludieren. Die folgende Einteilung der Frontensysteme ist jedoch so gefaßt, daß sie grundsätzlich auf alle Tiefdruckgebiete angewendet werden kann. Als Kriterien wurden die Anordnung der Warm- und Kaltfront und ihre zeitliche Änderung (genetisches Prinzip) gewählt:

1. Die Fronten sind ohne Ausbildung eines Warmsektors schleifzonenartig angeordnet, d. h. sie bilden eine mehr oder minder geradlinige, quasistationäre, zur Höhenströmung parallele Luftmassengrenze (entsprechender Tiefdrucktyp: Schleifendes Tief).
2. Das Frontensystem besitzt einen breiten Warmsektor, der Okklusionsprozeß hat noch nicht begonnen (Stadium der Zyklogenese: Frische Frontalwelle).
3. Das Frontensystem okkludiert allmählich während der Wanderung des Tiefs in Mitteleuropa, behält aber die ganze Zeit einen deutlich ausgeprägten Warmsektor (Stadium der Zyklogenese: Alternde Frontalwelle, Frontalwelle mit Höhentief).
4. Das Frontensystem okkludiert schnell, nachdem das Tief Mitteleuropa erreicht hat (Stadium der Zyklogenese: Übergang von der Frontalwelle mit Höhentief zur Zentralzyklone).
5. Das Frontensystem ist bereits okkludiert, bevor das Tiefdruckgebiet Mitteleuropa erreicht (Stadium der Zyklogenese: Kaltes Tief).
6. Kaltfronten, Kaltfrontokklusionen und schwache Luftmassengrenzen, an denen sich Zyklonen vom Typ der Kaltfronttiefs bilden.
7. Sekundäre Kaltfronten, die keine echten Luftmassengrenzen sind, sondern nur Strömungskonvergenzen in einer einbrechenden Kaltluftmasse darstellen und in Begleitung von flachen und den normalen Kaltlufttiefs auftreten.

Eine Typisierung der Tiefdruckgebiete nach der Struktur der Fronten wäre grundsätzlich auch möglich gewesen. Da jedoch zwischen der Art des Frontensystems und der vertikalen Struktur der Zyklonen sowieso ein enger Zusammenhang besteht, die vertikale Struktur aber das Primäre ist, wurde diese als Kriterium für die Einteilung der Zyklonen gewählt.

c) Die Wanderungsgeschwindigkeit

Die Wanderungsgeschwindigkeit ist für die Wetterwirksamkeit der Tiefdruckgebiete in zweierlei Hinsicht von Bedeutung. Sie charakterisiert nicht nur die Schnelligkeit, mit der die Witterungsvorgänge beim Durchzug des Tiefs einander folgen, sondern auch ihre Dauer.

Ausgehend von 40 km/h als mittlerer Geschwindigkeit der Zyklonen, die Schoenwälder (1953) für die gesamte Nordhalbkugel berechnet hat, wurde folgende Einteilung gewählt:

1. Langsame Wanderung; $v < 25 \text{ km/h}$
2. Mittlere Wanderungsgeschwindigkeit; $25 \text{ km/h} \leq v \leq 50 \text{ km/h}$
3. Schnelle Wanderung; $v > 50 \text{ km/h}$

Diesen Geschwindigkeiten entsprechen täglich zurückgelegte Wege von weniger als 600 km, zwischen 600 und 1200 km und mehr als 1200 km. Bleibt ein Tief mehrere Tage in Mitteleuropa, werden die täglich erreichten Geschwindigkeiten gemittelt.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit hängt weitgehend vom Tiefdrucktyp ab: je weiter ein Tief verwirbelt ist, desto geringer wird seine Wanderungsgeschwindigkeit.

Eng mit der Geschwindigkeit der Zyklone auf einer bestimmten Bahn ist die Dauer ihrer Wetterwirksamkeit verknüpft, und zwar sowohl für eine bestimmte Station als auch für einen größeren Raum entlang der Bahn. Allerdings ist die Dauer des Einflusses nur schwer abzuschätzen und muß einer genaueren Untersuchung vorbehalten bleiben, da es oft vorkommt, daß hinter einem abziehenden Tief schnell ein neues Frontensystem folgt und sich die Wirkungen beider miteinander verzahnen. Für eine grobe Abschätzung der Dauer des Einflusses reicht die Wanderungsgeschwindigkeit aber aus, da sich beide im allgemeinen etwa umgekehrt proportional verhalten.

Um die durchschnittliche Wanderungsgeschwindigkeit der Bahnen miteinander vergleichen zu können, wurde ein Geschwindigkeitskoeffizient GK berechnet, indem langsame Wanderung mit 1, normale mit 2 und schnelle Wanderung mit 3 bewertet wurden. Die Summe dieser Werte wurde durch die absolute Häufigkeit der Bahn dividiert:

$$GK = \frac{1 A(l) + 2 A(n) + 3 A(s)}{N}$$

$A(l)$ = Absolute Häufigkeit der Tiefs mit langsamer Wanderung

$A(n)$ = Absolute Häufigkeit der Tiefs mit normaler Wanderungsgeschwindigkeit

$A(s)$ = Absolute Häufigkeit der Tiefs mit schneller Wanderung

N = Absolute Häufigkeit der Bahn.

GK liegt also zwischen 1 (alle Tiefs der Bahn wandern langsam) und 3 (alle wandern schnell) und erreicht genau 2, falls $A(l) = A(s)$ ist.

d) Umfang und Einflußbereich der Zyklonen

Eine Klassifikation der Bahnen nach ihrem Einflußbereich (Bahnen mit ähnlichem Wirkungsbereich werden dem gleichen Typ zugeordnet) ist äußerst schwierig. Denn dazu müßte zunächst definiert werden, was unter Einflußbereich verstanden werden soll.

Flohn und Huttary (1950) haben dieses Problem für eine Wetterlage, die sogenannte Vb-Lage, aufgegriffen, indem sie deren spezifische Niederschlagsdichte zur mittleren Niederschlagsdichte aller Wetterlagen in Beziehung setzten. Jedoch läßt sich dieses Verfahren nicht ohne weiteres auf andere Wetterlagen übertragen (vgl. Maede 1951). Die Lösung dieser Frage für Zyklonenbahnen setzt in jedem Fall detailliertere Untersuchungen über die Wetterwirksamkeit voraus, die im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden sollen.

Da die Bahntypisierung im wesentlichen nach räumlichen Gesichtspunkten vorgenommen wird (s. u.), ist der Lage des Einflußbereichs schon in starkem Maß Rechnung getragen. Seine Größe kann aus den genannten Gründen nur grob abgeschätzt werden, so daß auf eine feinere Differenzierung verzichtet wurde.

Der Umfang der Zyklonen spielt als Klassifikationskriterium keine große Rolle. Denn 1. wird er zum Teil schon durch die Tiefdrucktypisierung erfaßt, da stärker verwirbelte Zyklonen im allgemeinen einen größeren Umfang haben, wenn auch Ausnahmen von dieser Regel zahlreich sind; 2. hängt die Wetterwirksamkeit der Zyklonen nur bedingt von ihrem Umfang ab, da die Fronten in der Hauptsache die Träger des zyklonalen Witterungsgeschehens sind. Höchstens bei den Kaltlufttropfen (keine Fronten) ist der Umfang von Bedeutung. Bei deren Typisierung hat er deshalb auch eine entscheidende Berücksichtigung gefunden.

e) Der Luftdruck der Zyklonen

Der Kerndruck der Tiefs ist ähnlich wie der Umfang von untergeordneter Bedeutung. Statt seiner absoluten Größe sollte vielmehr der Druckgradient berücksichtigt werden, der die Witterung direkt beeinflusst (Windstärke!). Als Kriterium der Bahnklassifikation ist er aber nicht notwendig, da er weitgehend in der Typisierung der Zyklonen impliziert ist: der Luftdruckgradient nimmt nämlich im allgemeinen mit der Verwirbelung der Zyklonen zu und wird bei den Zentralzyklonen am größten, um sich dann mit der allmählichen Auffüllung der Tiefs abzuschwächen. Alle genannten wetterwirksamen Eigenschaften der Tiefdruckgebiete hängen mehr oder minder stark von der vertikalen Struktur der Zyklonen ab, so daß es genügt, wenn letzterer bei der Bestimmung der Bahnen das Hauptgewicht zukommt.

2. Der räumliche Gesichtspunkt

Alle bisher genannten Aspekte haben, so wichtig sie im einzelnen auch sein mögen, gegenüber dem räumlichen als dem eigentlich geographischen, nur untergeordnete Bedeutung. Darum müssen als wichtigste Kriterien für die Klassifikation und Beschreibung der Bahnen die Herkunft und Verlagerungsrichtung der Zyklonen angesehen werden. Sie sind nicht nur dafür entscheidend, welche Gebiete, sondern auch wie diese Gebiete zyklonal beeinflusst werden. Bezüglich der Art der Beeinflussung sei nur an die je nach Herkunft der Zyklonen verschiedenen mitgeführten Luftmassen erinnert.

Bildet die räumliche Anordnung die Grundlage der Bahntypisierung, so haben die anderen Faktoren mehr modifizierenden Einfluß, von denen wiederum die vertikale Struktur der Tiefs der wichtigste ist. Es bleiben also für die Klassifikation zwei Gesichtspunkte entscheidend:

1. Die räumliche Anordnung der Einzelbahnen
2. Die vertikale Struktur der Zyklonen.

Für die Kaltlufttropfen reduziert sich der Raumfaktor im wesentlichen auf ihre Herkunft, da ihre Verlagerungsrichtung in Mitteleuropa häufig zu großen Änderungen unterliegt (s. o.).

III.

Die Tiefdruckbahn- und Tiefdrucklagetypen

1. Das Ausgangsmaterial und die Konstruktion der Bahnen

Als Ausgangsmaterial der Untersuchung diente der Tägliche Wetterbericht des Deutschen Wetterdienstes mit den Bodenwetterkarten von 0°GMT und 6°GMT und den Karten der absoluten und relativen Topographie 500 mb bzw. 500/1000 mb, beide zum 0°GMT-Termin. Daneben wurde die ebenfalls täglich erscheinende Wetterkarte des Seewetteramtes in Hamburg benutzt, die die Luftdruckverteilung am Boden um 13°MEZ (12°GMT) angibt und außerdem die Druckverteilung im 500-mb-Niveau vom gleichen Termin enthält. Bei letzterer werden die Isolinien allerdings nur von 12 zu 12 Dekametern (bei den Offenbacher Höhenkarten von 4 zu 4) gezeichnet.

Während des zehnjährigen Zeitraumes 1957—1966 wurden die diesen Karten entnommenen Positionen jedes Tiefs samt seinem Kerndruck, Anzahl der geschlossenen Isobaren, Lage der Fronten und des eventuell vorhandenen Höhentiefs in eine Arbeitskarte eingetragen und die aufeinanderfolgenden Positionen zur Einzelbahn verbunden. Zur Festlegung des Tiefdrucktyps wurde außerdem für jeden Tag eine kleine Karte der Höhendruckverteilung zum 0°GMT-Termin, in die auch die Geschwindigkeit der Höhenströmung eingetragen wurde, angefertigt, die überdies Aufschluß über die Großwetterlage gab. Der Witterungsablauf wurde für jede Einzelbahn in groben Zügen auf einem eigenen Karteiblatt festgehalten.

Die Festlegung der Bahntypen ergab sich folgendermaßen. Die nach Herkunft und Bewegungsrichtung ähnlichen Einzelbahnen wurden vorläufig in einem Typ zusammengefaßt, wobei zunächst möglichst viele Typen mit jeweils nur wenig Einzelbahnen aufgestellt wurden. Anschließend wurde der vertikalen Struktur in zweierlei Hinsicht Rechnung getragen:

1. Es wurde ein eigener Typ, die „wirre“ Bahn, aufgestellt, dem nicht nur die Zyklonen, die ihre Verlagerungsrichtung häufig änderten, zugeordnet wurden, sondern auch die, die mehr als 2 Tage ihres Aufenthaltes in Mitteleuropa quasistationär waren, auch wenn ihre Fortpflanzungsrichtung konstant blieb. Außerdem wurde die wirre Bahn unter Berücksichtigung der vertikalen Struktur noch in zwei Typen unterteilt.

2. Bei den räumlich benachbarten Bahnen wurden jeweils die Anteile der beteiligten Zyklonentypen verglichen. Ergaben sich dabei „große“ Unterschiede, wurde die Trennung beibehalten; waren die Unterschiede „zu klein“, wurden beide Bahnen zu einem neuen Typ vereinigt, der dann wiederum auf seine Ähnlichkeit mit den Nachbarbahnen untersucht wurde. Auf diese Weise wurden z. B. die Teilungen der WSW- und SW-Bahnen in jeweils drei Bahntypen beibehalten, während die W- und S-Bahn nicht geteilt wurden, obwohl bei alleiniger Berücksichtigung des räumlichen Faktors eine Trennung in zwei oder drei Äste nahegelegen hätte. Bei weiter entfernten Bahnen konnte auf eine Prüfung des Unterschiedes in der Verteilung der Tiefdrucktypen verzichtet werden, da in diesem Fall die Lage des Einflußbereichs und die mitgeführten Luftmassen sowieso zu unterschiedlich waren.

Die Definition der „genügend großen“ bzw. „zu kleinen“ Unterschiede wurde mit Hilfe des Chi-Quadrat-Tests¹⁾ vorgenommen (vgl. dazu Lienert 1962, S. 32—33; Kreyszig 1965, S. 229—231).

1) Chi-Quadrat wird im folgenden als χ^2 geschrieben

Gegeben seien zwei Bahnen A und B, auf die sich drei Tiefdrucktypen 1, 2 und 3 wie folgt verteilen:

Bahn	Tiefdrucktyp			Summe
	1	2	3	
A	20	10	10	40
B	10	20	30	60
Summe	30	30	40	100

Geht man davon aus, daß A und B keine wesentlich verschiedene Verteilung der Tiefdrucktypen aufweisen, kann man die unter dieser Voraussetzung zu erwartenden Häufigkeiten der Tiefdrucktypen bei A und B berechnen und mit den tatsächlich beobachteten vergleichen. 40 der insgesamt 100 Tiefdruckgebiete gehören zu A. Also hat A die relative Häufigkeit 40/100. Entsprechend hat der Tiefdrucktyp 1 die relative Häufigkeit 30/100. Daraus ergibt sich für diejenigen Tiefdruckgebiete, die sowohl der Bahn A als auch dem Tiefdrucktyp 1 angehören, die relative Häufigkeit $40/100 \cdot 30/100 = 12/100$ und, bei insgesamt 100 Tiefdruckgebieten, die erwartete Häufigkeit 12. Die tatsächlich beobachtete Häufigkeit beträgt dagegen 20.

Entsprechend lassen sich die anderen 5 erwarteten Häufigkeiten berechnen, und es ergibt sich folgende Verteilung:

Bahn	Tiefdrucktyp			Summe
	1	2	3	
A	12	12	16	40
B	18	18	24	60
Summe	30	30	40	100

Bezeichnet man die erwarteten Häufigkeiten mit e_i , die tatsächlich beobachteten mit b_i , so ist das Maß χ^2 für die Abweichung der Verteilungen voneinander als

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(b_i - e_i)^2}{e_i} \quad \text{definiert.}$$

In dem betrachteten Beispiel ergibt sich $\chi^2 = 13,18$.

Der χ^2 -Koeffizient ist so definiert, daß einer bestimmten Größe von χ^2 eine bestimmte Wahrscheinlichkeit entspricht, mit der die Abweichung der tatsächlichen von der erwarteten Verteilung überzufällig ist. Bei der Klassifikation wurden in der Regel nur solche Bahnen getrennt, bei deren Vergleich der χ^2 -Koeffizient so groß war, daß die Unterschiede in der Typenverteilung mit mindestens 95%-iger Wahrscheinlichkeit überzufällig waren. In diesem Fall spricht man auch davon, daß der

χ^2 -Koeffizient mindestens „auf dem 5 %-Niveau signifikant“ ist. Das Signifikanzniveau hängt außerdem noch von der Anzahl der Freiheitsgrade ab (vgl. dazu Lehrbücher der Statistik, z. B. Kreyszig, Lienert). In dem obigen Beispiel und den unten folgenden Anwendungen ist die Anzahl der Freiheitsgrade gleich der um eins verminderten Anzahl der beim Vergleich zweier Bahnen herangezogenen Tiefdrucktypenklassen.

Für die praktische Durchführung des χ^2 -Tests ist folgendes zu beachten: Um den χ^2 -Test anwenden zu können, müssen die erwarteten Häufigkeiten e_i mindestens 5 sein. Um das sicherzustellen, wurden beim Vergleich zweier Bahnen jeweils mehrere Tiefdrucktypen in Klassen zusammengefaßt. Diese Klassenbildung konnte jedoch nicht einheitlich durchgeführt werden, sondern mußte sich nach den im Einzelfall gegebenen Verhältnissen richten. Im allgemeinen wurde darauf geachtet, genetisch möglichst ähnliche Tiefdrucktypen in Klassen zusammenzufassen. Diesem Grundsatz konnte jedoch nur gefolgt werden, wenn dadurch nicht die Unterschiede zwischen den Bahnen verwischt wurden.

In einigen Fällen waren auch bei nur zwei Klassen nicht alle erwarteten Häufigkeiten mindestens 5. Dann konnte ein nach Yates korrigierter χ^2 -Wert zum Vergleich der Verteilungen benutzt werden (vgl. dazu Weber 1967, S. 495—496; Linder 1964, S. 77—78).

Dreimal wurde die Trennung zweier Bahnen aufrechterhalten, obwohl der χ^2 -Wert für den Vergleich der Häufigkeiten der Tiefdrucktypenklassen nicht signifikant war. Dann waren entweder die Unterschiede hinsichtlich der jahreszeitlichen Verteilung signifikant, oder die absolute Häufigkeit einer der beiden Bahnen war so gering, daß kaum signifikante Unterschiede zur benachbarten Bahn festgestellt werden konnten. Im letzten Fall muß die Trennung vorbehaltlich einer späteren Korrektur nach Untersuchung eines längeren Zeitraums gesehen werden.

Unter Berücksichtigung der genannten Kriterien wurden die folgenden 23 Bahntypen aufgestellt — in Klammern die später benutzte Abkürzung —, von denen ähnliche in Klassen vereinigt wurden.

A. Bahnen mit am Boden ausgeprägten Zyklonen

I. SW- und WSW-Bahnen (= 6)	Häufigkeit
1. SW-Bahnen	
a) durch die Nordsee und angrenzende küstennahe Gebiete (SWNW) .	37
b) durch den Kernraum (SWK)	33
c) durch die Donautiefebene (SWSO)	20
2. WSW-Bahnen	
a) durch die Nordsee und angrenzende küstennahe Gebiete (WSWN) . .	50
b) durch den Kernraum (WSWK)	35
c) durch die Donautiefebene (WSWS)	34
II. W- bis N-Bahnen (= 3)	
1. W-Bahn	65
2. NW-Bahn	54
3. N-Bahn	28

III. Bahnen süd- bis östlicher Herkunft (= 4)

1. Vb-Bahn im engeren Sinn (Vb)	42
2. S-Bahn	55
3. SO-Bahn	15
4. O-Bahn	6

IV. Stark zyklonal gekrümmte Bahnen (= 3)

1. von W kommend, auf SW umbiegend (W-SW)	36
2. von NW kommend	
a) Trog-Bahn	20
b) von NW auf W umbiegend (NW-W)	16

V. Wirre Bahnen (= 2)

1. mit ausgeprägtem Höhentief (Wirr-Tief)	59
2. bei flacher Druckverteilung oder kreisförmiger Bewegung (Wirr-Flach)	15

B. Kaltlufttropfenbahnen (= 5)

I. Kontinentale O-Bahn (KO)	29
II. Skandinavische N-Bahn (KN)	37
III. NW-Bahn (KNW)	30
IV. W-Bahn (KW)	29
V. Wirre Bahn (K-Wirr)	35

Faßt man die Bahntypen als Bewegungstypen auf, müssen ihnen die Lagetypen gegenübergestellt werden. In ihnen werden die Tiefdruckgebiete erfaßt, für die eine Bahnbestimmung im Einzelfall oder in der Gesamtheit nicht möglich ist. Letzteres gilt für die im Untersuchungsgebiet wirr wandernden Zyklonen, die strenggenommen nicht in einem Bahntyp integriert werden können. Sie wurden jedoch um der Systematik willen in die Klassifikation aufgenommen. Außerdem sollten sie von den nur kurzfristig auftretenden Tiefdruckgebieten getrennt werden, bei denen auch für das einzelne Tief nicht von einer zurückgelegten Bahn gesprochen werden kann und die die eigentlichen Lagetypen bilden. Neben den nur kurzfristig auftretenden Kaltlufttropfen (K-Kurz) handelt es sich dabei um die Bodentiefdrucktypen III, IV und V, von denen der Typ IV jedoch eine Zwischenstellung einnimmt, da er manchmal mehrere Tage erhalten bleiben kann (vergl. zur Bezeichnung II, 1a, S. 10 ff.).

Bei der zeichnerischen Darstellung der Bahnen wurde bewußt auf eine räumliche Mittelung verzichtet. Stattdessen wurde jede Einzelbahn in die Karte eingetragen. Dadurch sollte das von mittleren Bahnen leicht suggerierte Bild großer Einfachheit vermieden werden, wie es sowieso sinnvoller erscheint, von dem Bahnbegriff abzugehen und besser von Bahnstreifen zu sprechen.

Ausgehend von der gebräuchlichen meteorologischen Jahreszeiteinteilung, wurden für jede Bahn zwei Jahreszeiten auf einer Karte zusammengefaßt, wobei die Einzelbahnen in der häufiger begangenen ausgezogen, in der anderen gestrichelt wurden. Gepunktete Abschnitte der Einzelbahnen weisen darauf hin, daß das Tiefdruckgebiet noch keine oder schon nicht mehr geschlossene Isobaren hat, aber trotzdem noch deutlich zu verfolgen war.

Die eingetragenen Positionen der Tiefdruckgebiete liegen jeweils vierundzwanzig Stunden auseinander. Dadurch wird ein Überblick über die durchschnittliche Geschwindigkeit der Zyklonen ermöglicht. Außerdem wurden die Kerne je nach dem Typ des Tiefdruckgebietes signiert, um einen Eindruck von der Zusammensetzung der Zyklonentypen an der Bahn zu vermitteln. Um der Gefahr der Unübersichtlichkeit zu entgehen, wurden einige ähnliche Typen in Klassen zusammengefaßt: In der Klasse „I schwach“ sind die Typen II1a, II2a, II3a und II3c, in der Klasse „I stark“ die Typen II1b, II2b und II3b enthalten.

Bei den nur kurzfristig entwickelten Lagetypen wurden nur die Standorte in die Karten eingetragen, bei den flachen Kaltlufttiefs (soweit sie länger bestanden) und den wirren Bahntypen jeweils die Standorte um 6° GMT.

2. Die Eigenschaften der Bahn- und Lagetypen

a) Die SW- und WSW-Bahnen

Diese Klasse ist mit 209 Zyklonen bei weitem die stärkste. Es handelt sich dabei um Tiefdruckgebiete, die bei west- bis südwestlicher Höhenströmung Mitteleuropa durchwandern. Typische Großwetterlagen für ihr Auftreten sind zyklonale West- und Südwestlagen. Die Tiefdruckgebiete selbst sind meist Randstörungen atlantischer Zentraltiefs, wie der hohe Anteil der IIa- und IIb-Typen zeigt. Die Ausbildung von Höhentiefs erfolgt selten. Im Winter bringen diese Bahnen im allgemeinen starke Erwärmung und Tauwetter; im Sommer beenden sie häufig eine Schönwetterperiode und leiten mit Gewittern verbundene Einbrüche maritimer Polarluft nach Mitteleuropa ein. Dies findet auch Ausdruck in der großen Anzahl der IIc-Tiefs, die diese Bahnen gegenüber allen anderen auszeichnet. Doch sind auch die Unterschiede innerhalb der Klasse so beträchtlich, daß es sinnvoll war, sie in mehrere Bahntypen zu gliedern, die sich untereinander außer bezüglich ihrer Jahreszeitenverteilung besonders hinsichtlich der auf sie entfallenden Tiefdrucktypen unterscheiden. Tabelle 1 zeigt die Verteilung der Tiefdrucktypen bei den einzelnen Bahnen für jede Jahreszeit. Da außer den Frontalwellen, schleifenden Tiefs und Kaltfronttiefs alle anderen Zyklonentypen nur selten auftreten, wurden sie in einer Gruppe (= Rest) zusammengefaßt.

Ein grober Überblick zeigt schon, daß die Zyklonen der WSW-Bahnen stärker dazu neigen, zu verwirbeln bzw. schon verwirbelt in Mitteleuropa ankommen als die der SW-Bahnen. Das drückt sich in der gegenüber letzteren großen Zahl der Frontalwellen und Zyklonen mit Höhentief und der zu geringen Anzahl der schleifenden Tiefs (IIa) aus. Dagegen stimmt die Häufigkeit der Kaltfronttiefs bei beiden Bahnen gut überein.

Tabelle 1

**Verteilung der SW- und WSW-Bahnen nach Zyklonentypen
und Jahreszeiten (1957—66)**

Bahn	Winter				Frühjahr				Sommer				Herbst			
	I1a	I1b	I1c	R	I1a	I1b	I1c	R	I1a	I1b	I1c	R	I1a	I1b	I1c	R
SWNW	—	8	—	3	—	1	—	—	4	5	2	5	2	4	1	2
SWK	1	2	1	—	4	4	3	2	3	3	7	—	3	—	—	—
SWSO	2	1	—	1	2	2	1	—	2	1	1	1	5	1	—	—
SW	3	11	1	4	6	7	4	2	9	9	10	6	10	5	1	2
WSWN	—	10	—	4	—	10	1	2	—	4	—	4	1	10	—	4
WSWK	1	4	—	1	3	1	6	1	4	3	5	—	2	2	—	2
WSWS	2	6	—	3	2	4	2	3	1	4	2	—	1	4	—	—
WSW	3	20	—	8	5	15	9	6	5	11	7	4	4	16	—	6
Gesamt	6	31	1	12	11	22	13	8	14	20	17	10	14	21	1	8

Mit Hilfe des χ^2 -Tests wurde die Abweichung von einer angenommenen Gleichverteilung der Tiefdrucktypen auf den einzelnen Bahnen auf ihre Zufälligkeit geprüft, wobei sich die in Tabelle 2 aufgeführten Koeffizienten ergaben.

Tabelle 2 Die χ^2 -Koeffizienten für den Vergleich der SW- und WSW-Bahnen

Bahnen	χ^2 - Koeffizient	Freiheitsgrad Anzahl	Tiefdrucktypenklassen
SW — WSW	11,08	3	I1a, I1b, I1c, Rest
SWNW — WSWN	6,22 ¹⁾	1	I1a+I1c, I1b+Rest
SWK — WSWK	0,35	2	I1a, I1c, I1b+Rest
SWSO — WSWS	8,32	2	I1a, I1b, I1c+Rest
SWNW — SWK	14,19	3	I1a, I1b, I1c, Rest
SWK — SWSO	2,51 ¹⁾	1	I1c, I1a+I1b+Rest
SWNW — SWSO	9,34	2	I1a, I1b, I1c+Rest
WSWN — WSWK	32,71	2	I1a+I1c, I1b, Rest
WSWK — WSWS	6,88	2	I1a, I1c, I1b+Rest
WSWN — WSWS	8,69 ¹⁾	1	I1a+I1c, I1b+Rest

¹⁾ Die χ^2 -Koeffizienten sind nach der Formel von Yates korrigiert.

Das $\chi^2=11,08$ für den Vergleich der gesamten WSW- und SW-Bahnen ist mindestens auf dem 5 %-Niveau signifikant, d.h. die Abweichungen zwischen beiden bezüglich der Verteilung der Tiefdrucktypen sind mit mindestens 95%iger Wahrscheinlichkeit überzufällig. Der große χ^2 -Koeffizient legt eine Trennung in die beiden Bahnklassen nahe. Dabei fällt der stärkste Unterschied auf die schleifenden Tiefs, deren Anteil an den SW-Bahnen fast 1/3, an den WSW-Bahnen nur knapp 1/10 ausmacht. Von den übrigen Tiefdrucktypen liefern die Frontalwellen den größten Beitrag. Dagegen haben die Restklasse und die Kaltfronttiefs kaum eine Bedeutung für die grobe Differenzierung, da sie bei beiden Bahnklassen etwa gleich häufig sind.

Zur Gliederung der S W - B a h n e n wurden folgende Grenzen gewählt:

1. Die Linie vom französischen Zentralmassiv über den Mittelrhein und Rügen nach Nordosten als Grenze zwischen dem zentralen (SWK) und nordwestlichen Ast (SNNW).
2. Die Linie von Triest über den Westrand der Karpaten nach Nordosten als Grenze zwischen dem südöstlichen (SWSO) und zentralen Ast.

Es sei deutlich darauf hingewiesen, daß es sich bei den drei Ästen um drei verschiedene Bahnen handelt, die trotz der großen Unterschiede im Wirkungsbereich aus formalen Gründen (gleiche Verlagerungsrichtung) und wegen gemeinsamer Merkmale in der Verteilung der Tiefdrucktypen (im Gegensatz zu den anderen Bahnen) zur Gruppe der SW-Bahnen zusammengefaßt wurden. Gleiches gilt für die noch zu besprechende Gruppe der WSW-Bahnen.

Der χ^2 -Test für den paarweisen Vergleich der einzelnen Bahnen liefert nur zwischen dem zentralen und südöstlichen Ast keine signifikanten Unterschiede (χ^2 -Koeffizient 2,51). Trotzdem wurde diese Trennung beibehalten, da sie sich bei den WSW-Bahnen bewährt hat und die Klassen der SW- und WSW-Bahnen eine analoge räumliche Struktur aufweisen. Zum anderen sind bei der niedrigen absoluten Häufigkeit der SWSO-Bahn gesicherte Ergebnisse nur sehr schwer zu erzielen. Schon ganz geringe Änderungen in der Verteilung der Tiefdrucktypen können das Bild entscheidend zugunsten einer „sicheren“ Trennung verändern. Drittens spricht die unterschiedliche Häufigkeitsverteilung bezüglich der Jahreszeiten für die Trennung der beiden Äste. Wendet man nämlich auf sie den χ^2 -Test an, ergibt sich bei der Zusammenfassung von Frühjahr und Sommer bzw. Herbst und Winter der nach Yates korrigierte Wert 4,74, der auf dem 5%-Niveau signifikant ist.

Der χ^2 -Wert von 14,19 für den Vergleich des nordwestlichen und zentralen Astes ist auf dem 1%-Niveau signifikant. Er resultiert besonders aus den unterschiedlichen Anteilen der Kaltfronttiefs und der Restklasse. Insgesamt zeigt der zentrale Ast eine fast ausschließliche Beschränkung auf die Frontalwellen, schleifenden und Kaltfronttiefs, die alle etwa die gleiche Häufigkeit erreichen, während beim nordwestlichen die Frontalwellen eindeutig dominieren — sie stellen die Hälfte aller Fälle —, die Zyklonen mit Höhentief auch relativ stark, die Kaltfronttiefs selten vertreten sind. Im allgemeinen ist also die SWK-Bahn durch flache, die SNNW-Bahn durch intensivere und stärker verwirbelte Tiefdruckgebiete ausgezeichnet. Der südöstliche Ast unterscheidet sich vom zentralen besonders hinsichtlich der Kaltfronttiefs, die bei ihm nur 1/10 im Gegensatz zu 1/3 beim letzteren ausmachen. Bei den anderen Zyklonentypen treten nur geringe Unterschiede auf. Beim Vergleich des südöstlichen und nordwestlichen Astes treten wieder signifikante Unterschiede auf ($\chi^2 = 9,43$). Während beim letzteren das Schwergewicht auf den Frontalwellen liegt, wird der Südosten durch den hohen Anteil von schleifenden Tiefs gekennzeichnet (mehr als 50%). Außerdem sind die Zyklonen mit

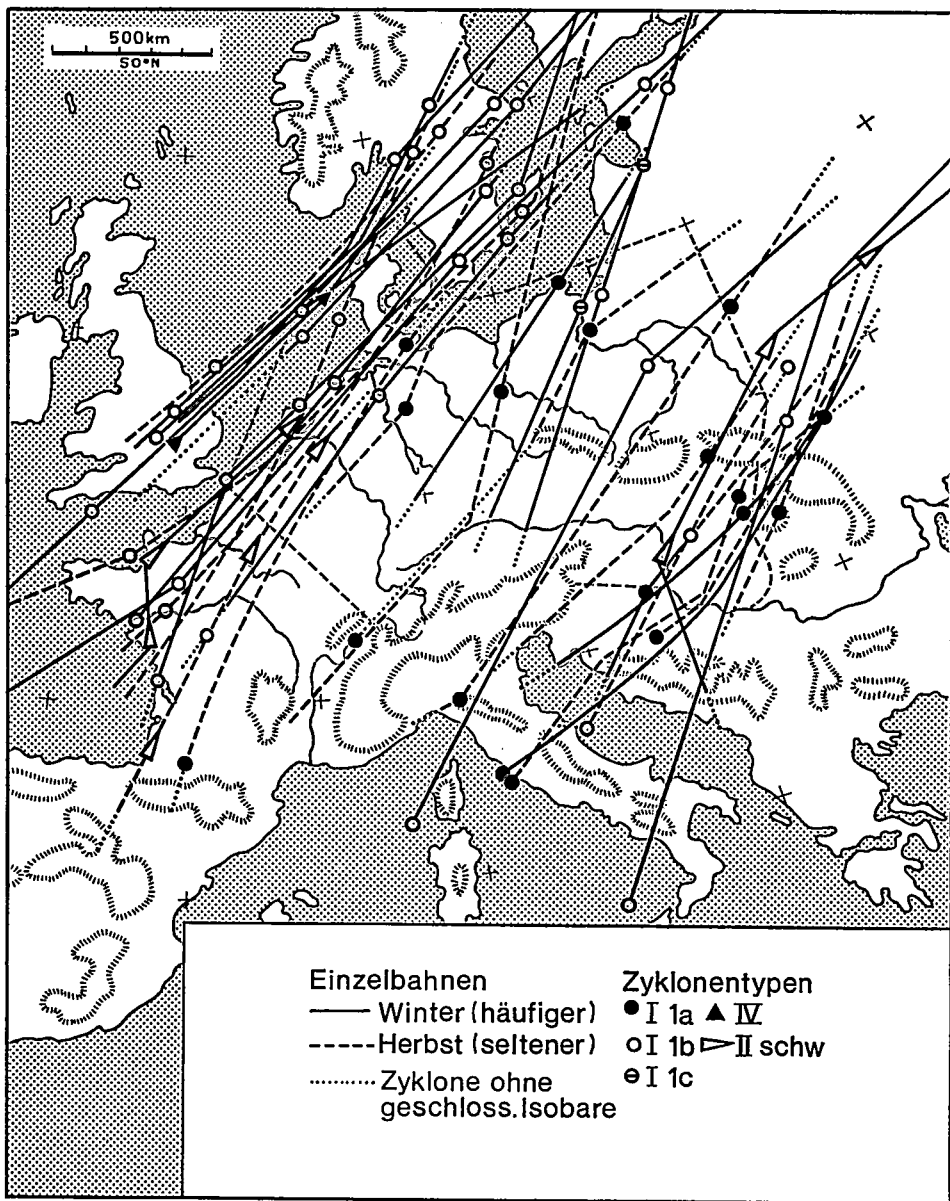


Abb. 10: Die SW-Bahnen im Herbst und Winter (1957—66)

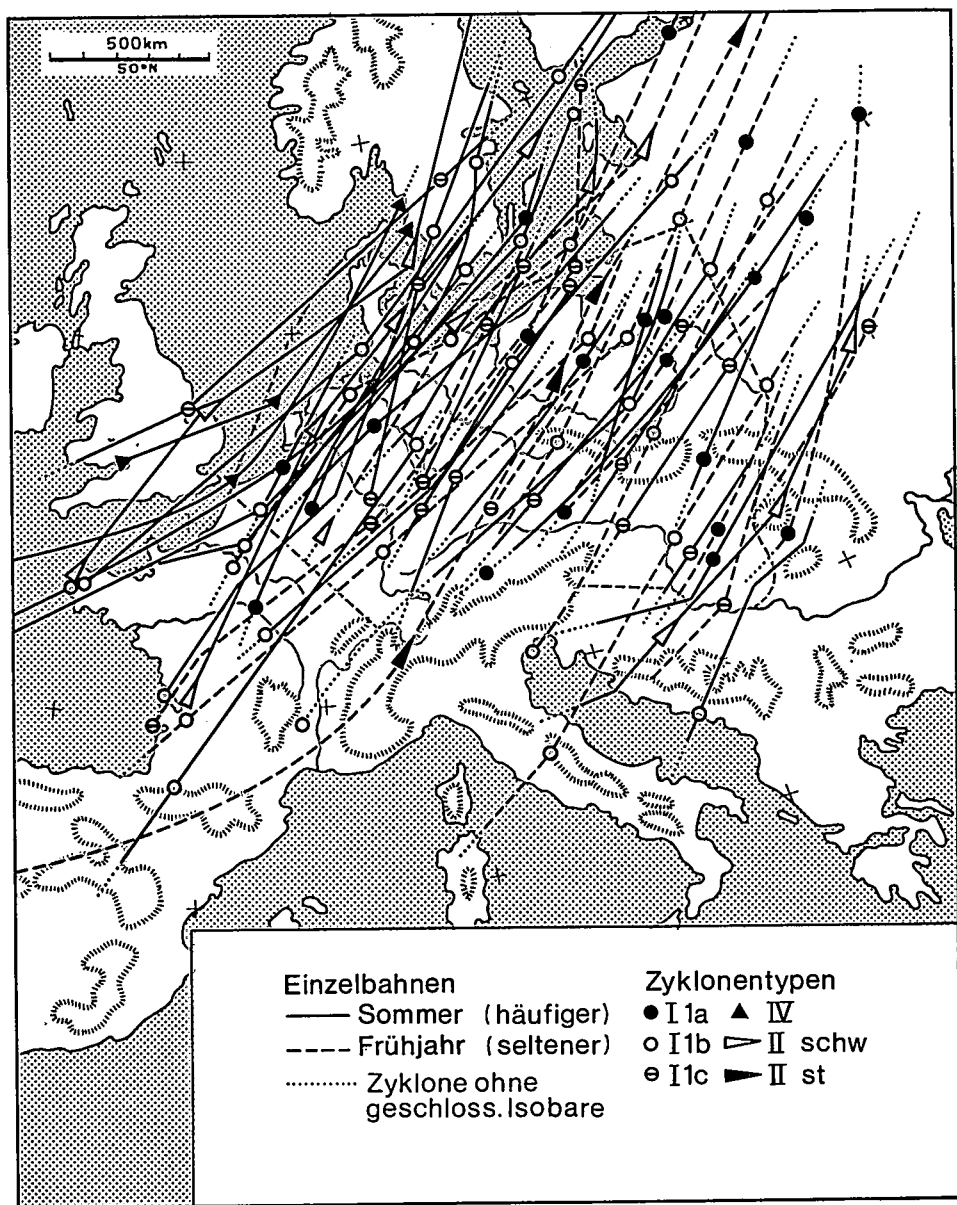


Abb. 11: Die SW-Bahnen im Frühjahr und Sommer (1957—66)

Höhentief im Nordwesten häufiger. Insgesamt kann die SWSO-Bahn als typische Schleifzonenbahn bezeichnet werden, eine Tatsache, in der ihre Verwandtschaft zur Vb- und S-Bahn (s.u.) zum Ausdruck kommt.

Abbildung 10 zeigt die räumliche Verteilung der SW-Bahnen im Herbst und Winter. Kennzeichnend ist die Seltenheit von Zyklonen im Kernraum Mitteleuropas. Das Schwergewicht der Tiefdrucktätigkeit liegt beim nordwestlichen Ast, der noch in zwei Teile gespalten ist. Der eine ist küstennah und weist eine stärkere Frequentierung im Herbst auf; der zweite am Rande des Untersuchungsgebietes wird im Winter häufiger begangen. Diese unterschiedliche räumliche Konzentration der SWNW-Bahn im Herbst und Winter resultiert aus der im Winter stärkeren blockierenden Wirkung des Festlandes auf Tiefdruckgebiete, während im Herbst, besonders im September, sich die Einstrahlung noch positiv auf die Entstehung und den Erhalt von Zyklonen auf dem Land auswirken kann. Der nordwestliche Ast wird im Winter weitgehend von den Frontalwellen beherrscht, die mehr als 3/4 aller Fälle ausmachen. Sie sind gut entwickelt, besitzen noch einen breiten Warmsektor und sind für die kräftigen südwestlichen Frontalwellen verantwortlich, die ganz Mitteleuropa Tauwetter mit hohen Niederschlägen bringen, die auch bis zu den höheren Lagen der Mittelgebirge als Regen fallen. Sie kennzeichnen besonders den Frühwinter; im Spätwinter treten sie seltener auf.

Die selten vorkommenden Zyklonen auf dem zentralen Ast sind entweder schwache Gebilde, die sich durch den zyklonenetischen Leeffekt auf der Alpen-nordseite bei Südwestlagen gebildet haben, oder starke Störungen aus dem Mittelmeer, die genügend Energie hatten, die Alpen zu überqueren und in Mitteleuropa nicht gleich abzusterben. Der südöstliche Ast wird wieder häufiger begangen, ohne jedoch die Intensität des nordwestlichen zu erreichen. Die Schleifzonentiefs haben zwar ein Übergewicht, eine statistische Sicherung ist jedoch bei der geringen Zahl der Fälle nicht möglich. Die Zyklonen dieser Bahn tragen stark zum Erhalt der winterlichen Schneedecke im Südosten Mitteleuropas bei, da letzterer meist auf der kalten Seite der Frontalzone liegt, während weiter östlich starke Erwärmung stattfindet.

In den Frühjahrs- und Sommermonaten ist die räumliche Verteilung ganz anders (Abb. 11). Die Einzelbahnen sind über den ganzen Raum gleichmäßig gestreut. Der nordwestliche Ast zeigt keine Trennung mehr in zwei Teile, sondern ähnelt mehr einem breiten Band, dessen Schwerpunkt in Küstennähe auf dem Festland liegt. Im Frühjahr bewegen sich auf dieser Bahn praktisch keine Tiefs. Der Grund dafür ist einmal in der Tendenz zu hohem Luftdruck über dem Atlantik während dieser Zeit zu suchen, woraus allgemein mehr nördliche Bewegungsrichtungen über Mitteleuropa resultieren; zum anderen wirkt das kalte Wasser auch direkt einer Zyklonense entgegen (stabilisierende Wirkung des noch vom Winter kalten Wassers). Der Schwerpunkt der Tiefdrucktätigkeit auf den SW-Bahnen hat sich im Frühjahr eindeutig auf den Kernraum verschoben. Entsprechend weist die SWK-Bahn in dieser Zeit (zusammen mit dem Sommer) ihr Begehungsmaximum auf. Die Zyklonen kommen aus Südwestfrankreich oder entstehen nördlich der Alpen in Mitteleuropa, wobei neben dem schon erwähnten Leeffekt auch die gegenüber dem Winter stärkere Erwärmung des Landes im Frühling als Faktor bei der Zyklonense nicht übersehen werden darf. Gleiches gilt für den zentralen Ast im Sommer.

Die Tiefdruckgebiete gehören überwiegend den Typen IIa und IIc an und bilden sich an Kaltfronten, die den Untersuchungsraum von Nordwesten (IIa-Typ) oder Südwesten (IIc-Typ) erreichen. Mit den schleifenden Tiefs ist ein meist kleines Schlechtwettergebiet verbunden, das aber häufig länger anhaltende Aufgleitnieder-

schläge und anschließend stärkere Abkühlung mit Schauern liefert. Bei den Kaltfronttiefs sind Aufgleitniederschläge selten. Sie werden vielmehr durch Schauerwetter mit Kaltfrontgewittern gekennzeichnet. Im allgemeinen tritt die SWK-Bahn am Ende einer Schönwetterperiode auf (abziehendes mitteleuropäisches Hoch) und leitet mit der Zufuhr kühlerer Meeresluft die für den mitteleuropäischen Spätfrihling und Sommer charakteristischen Kälterückfälle ein. Die Tiefdruckgebiete sind meist nur schwach entwickelt; die eigentlich wetterwirksame Aktivität geht von den Kaltfronten aus. Falls sich die Zyklonen jedoch zu kräftigeren Frontalwellen entwickeln oder ein Höhentief ausbilden, können sie im Frühjahr in den Mittelgebirgen sogar zu starken Schneefällen führen, die zur Bildung einer mehrere Tage haltenden Schneedecke beitragen, und zwar besonders dann, wenn auf der Rückseite des Tiefdruckgebietes ein mächtiger Ausbruch skandinavischer Kaltluft nach Süden erfolgt, der auch im Tiefland noch zu Schneeschauern Anlaß gibt (Aprilwetter).

Gleiches wie für den zentralen Ast (Beendigung einer Schönwetterperiode und Einleitung eines Kälterückfalles) gilt für den nordwestlichen im Sommer, der jetzt sein Jahreszeitenmaximum und außerdem im August sein Monatsmaximum aufweist. Im Gegensatz zum Kernraum sind hier fast alle Tiefdrucktypen beteiligt, einschließlich der mit ausgeprägtem Höhentief — eine Folge der größeren Neigung zur Verwirbelung über dem Meer. Die Zyklonen dieser Bahn sind meist auch stärker entwickelt. Entsprechend sind die Wettererscheinungen intensiver. Insbesondere die Windgeschwindigkeiten sind größer, erreichen aber nicht die des Herbstes und Winters. Außerdem zeichnen sich die Zyklonen im Sommer gegenüber dem Winterhalbjahr durch eine geringere Wanderungsgeschwindigkeit aus und okkludieren langsamer — manchmal verjüngen sie sich sogar —, kommen aber andererseits nicht in dem gleichen frischen Zustand wie im Winter in Mitteleuropa an.

Der südöstliche Ast wird im Frühjahr und Sommer gleich häufig begangen wie im Winterhalbjahr. Auch die Verteilung der Zyklonentypen ist in beiden Halbjahren ähnlich. Der Einflußbereich ist auf den südöstlichen Randbereich beschränkt, wo die Zyklonen der SWSO-Bahn erhebliche Aufgleitniederschläge bei verhältnismäßig niedrigen Temperaturen bringen.

Für die Einteilung der WSW - B a h n e n wurden folgende Grenzen gewählt:

1. die Linie von Paris über den Mittelrhein, Berlin und die Weichselmündung nach Ostnordosten als Grenze zwischen dem nördlichen und zentralen Ast
2. die Linie von der Poebene über den Westrand der Karpaten nach Ostnordosten als Grenze zwischen dem zentralen und südlichen Ast.

Die χ^2 -Koeffizienten für den Vergleich der Bahnen bezüglich der Zyklontypverteilung sind alle mindestens auf dem 5%-Niveau signifikant. Der nördliche und zentrale Ast differieren besonders in dem Anteil der schleifenden und Kaltfronttiefs. Die Unterschiede bei den anderen Tiefdrucktypen sind aber ebenfalls beträchtlich. Allgemein sind bei der WSWN-Bahn die Frontalwellen und Zyklonen mit Höhentief, bei der WSWK-Bahn die schleifenden und Kaltfronttiefs häufiger, was ähnlich wie bei den SW-Bahnen auf eine höhere Bereitschaft zur Verwirbelung im nordwestlichen Sektor deutet (Meeresfläche). Die Unterschiede zwischen dem zentralen und südlichen Ast bewegen sich in der gleichen Richtung — Frontalwellen und Tiefs mit Höhenzyklone sind im Südosten, schleifende und Kaltfronttiefs sind beim zentralen Ast häufiger —, sie sind aber geringer.

Dem entspricht für den Vergleich des südlichen Astes mit dem nördlichen ein kleineres χ^2 als beim Vergleich des zentralen und nördlichen Astes. Zwar sind im

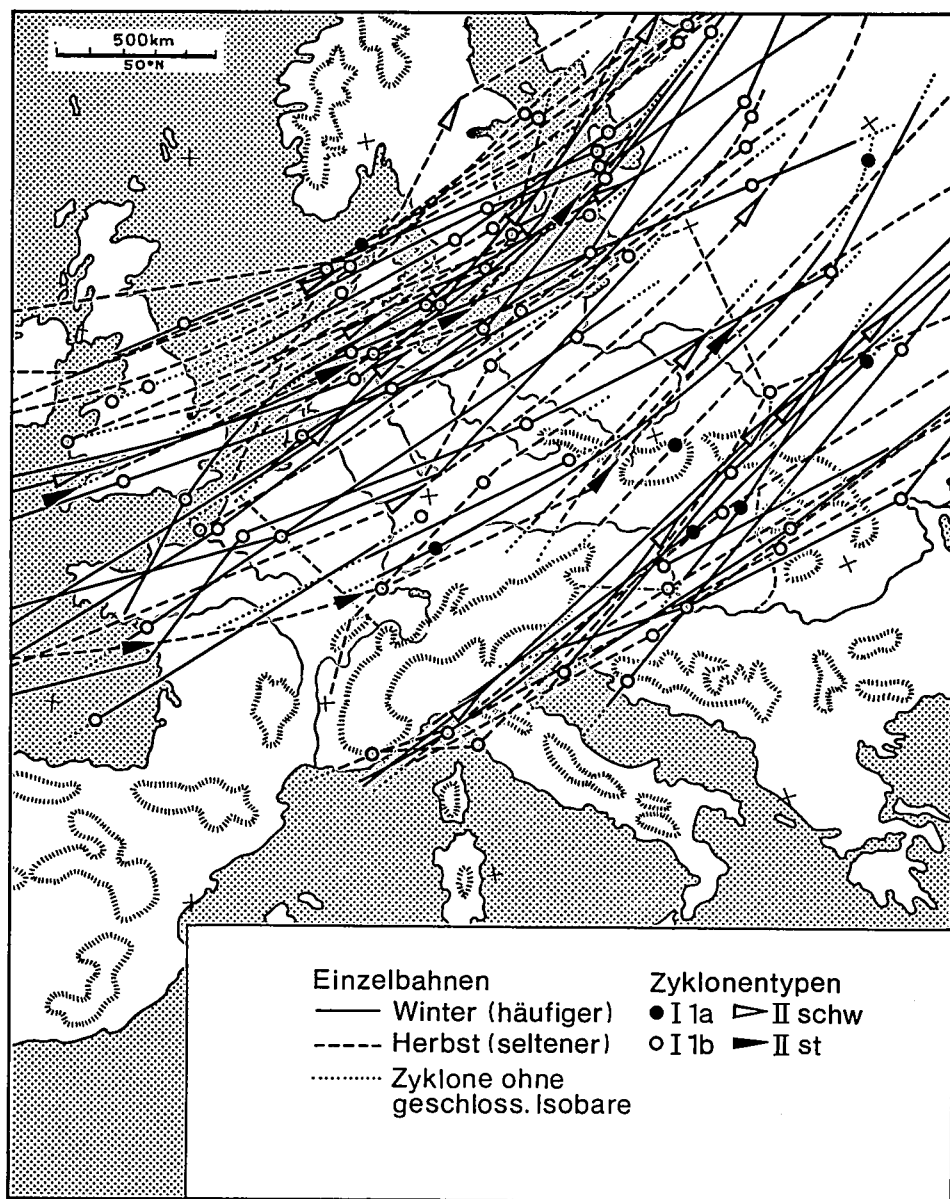


Abb. 12: Die WSW-Bahnen im Herbst und Winter (1957—66)

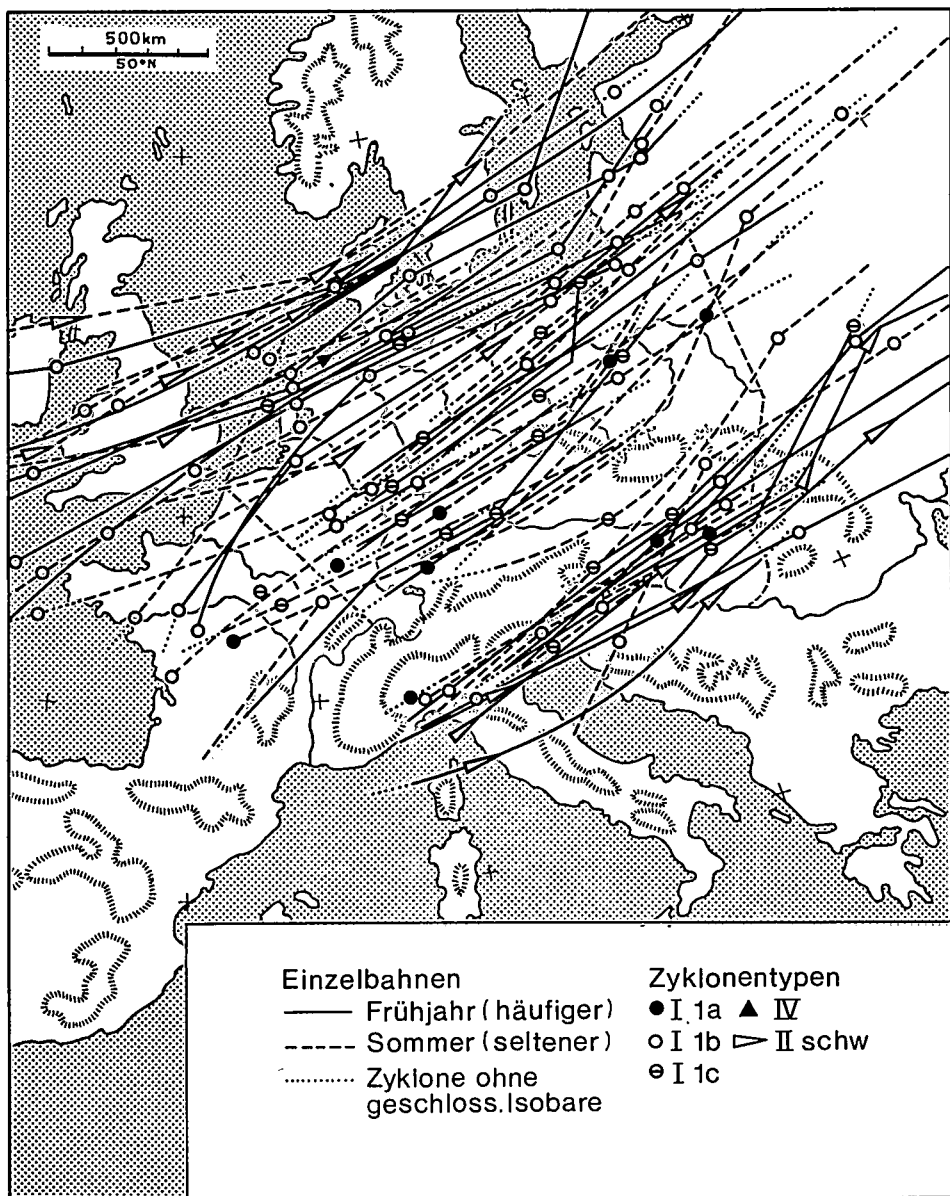


Abb. 13: Die WSW-Bahnen im Frühjahr und Sommer (1957—66)

Südosten Schleifzonen- und Kaltfronttiefs häufiger bzw. Frontalwellen und Tiefs mit Höhenzyklone seltener als im Nordwesten, aber im Gegensatz zum zentralen Ast sind die Unterschiede schwächer. Die WSW-Bahn ist also als Zwischenglied zwischen der maritim getönten WSW-Bahn mit größerer Neigung zur Verwirbelung der Zyklonen und der kontinentalen WSW-Bahn mit geringerer Entwicklungsmöglichkeit der Tiefdruckgebiete anzusehen. In dieser Beziehung spiegelt sich der Einfluß des Mittelmeeres auf den südlichen Ast wider.

Die räumliche Verteilung der WSW-Bahnen ist der der SW-Bahnen ähnlich. Im Herbst und Winter (Abb. 12) ist der zentrale Ast kaum vertreten. Das Schwergewicht liegt eindeutig im nördlichen Zweig, der als breites Band ohne besondere Häufigkeitszentren entwickelt ist. Der gegenüber dem Herbst im Winter etwas südlichere Verlauf der Einzelbahnen hat seine Ursache in der entsprechenden Verlagerung der Frontalzone. Die Zyklonen dieser Bahn haben ähnliche Wetterwirksamkeit wie die des nordwestlichen Astes der SW-Bahnen. Zwar bringen sie nicht so starke Erwärmung, sind aber trotzdem typische Tauwetterbringer, wobei ihr Einfluß weiter nach Osten reicht als bei der SW-Bahn.

Die Seltenheit von Zyklonen auf dem zentralen Ast hat den gleichen Grund wie bei der SW-Bahn. Der südliche Ast nimmt seinen Ursprung im Mittelmeer und ist im Winter stärker ausgeprägt als im Herbst. Er beeinflusst hauptsächlich den Südosten Mitteleuropas, dem er ergiebige Aufgleitniederschläge, die meistens als Schnee fallen, bringt.

Im Frühjahr und Sommer ist die räumliche Verteilung gleichmäßiger (Abb. 13). Besonders der zentrale Ast weist jetzt eine größere Frequenzierung auf. Eindeutig stehen die schleifenden und Kaltfronttiefs im Vordergrund. Sie haben die gleiche Wirkung wie die entsprechenden der SW-Bahn (s. o.). Überhaupt sind die Unterschiede zwischen der WSW- und SW-Bahn sehr gering ($\chi^2 = 0,35$), so daß beide in einem Bahntyp hätten zusammengefaßt werden können, wenn nicht zuvor eine Trennung in WSW- und SW-Bahnen vorgenommen worden wäre. Der nördliche Ast wird — anders als der entsprechende der SW-Bahnen — auch im Frühjahr häufig begangen. Er sorgt im gesamten Sommerhalbjahr für Abkühlung, Aufgleitniederschläge mit nachfolgenden Schauern, die zum Teil mit Gewittern verbunden sind, und leitet Kälterückfälle ein, die allerdings im Südosten und äußersten Süden oft kaum spürbar sind, da dieses Gebiet dann häufig unter abgeschwächtem Hochdruckeinfluß steht und nur randlich von den Ausläufern der Tiefdruckgebiete berührt wird. Der südliche Ast hat wiederum nur Bedeutung für den Südosten, dem er aber infolge des Aufgleitens feuchtlabiler mittelmeeerischer Warmluft erhebliche Niederschläge bringt. Die Häufigkeit seines Auftretens nimmt zum Sommer allmählich ab.

Die Geschwindigkeitskoeffizienten der SW- und WSW-Bahnen liegen im allgemeinen etwas über dem Durchschnitt: am größten ist GK bei der SW-Bahn (2,2), am niedrigsten bei der WSW-Bahn (2,0); sonst erreicht er jeweils 2,1.

b) Die W- bis N-Bahnen

Die W-Bahn tritt bei zyklonalen West- und südlichen Westlagen auf, wenn sich das Azorenhoch in normaler bzw. etwas nach Süden verschobener Lage befindet und sich in der zwischen 50° bis 60° Nord west-östlich verlaufenden Frontalzone Wellenstörungen bilden, die Mitteleuropa überqueren. Tabelle 3 zeigt den Anteil der verschiedenen Zyklontypen an der W-Bahn.

Tabelle 3 **Verteilung der W-Bahn nach Zyklontypen und Jahreszeiten**
(1957—66)

Zyklontyp	Winter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Jahr
Ila	8	5	2	—	15
Ilc	1	—	1	—	2
Ilb, (I2)	17 (2)	3	5	5	32
IV, II schwach	9	1	1	1	12
II stark	2	1	1	—	4
Gesamt	39	10	10	6	65

Faßt man die Tiefdrucktypen zu den Gruppen 1) Ila, 2) Ilc, 3) Rest zusammen und vergleicht ihre Verteilung bei der W-Bahn mit derjenigen, die aus der Zusammenlegung des nordwestlichen und zentralen Astes der WSW-Bahnen folgt, ergibt sich ein χ^2 von 7,00, d. h. die Unterschiede zwischen beiden bezüglich der Verteilung der Tiefdrucktypen sind auf dem 5%-Niveau signifikant. Sie beruhen vor allem auf dem ungleichen Anteil der Kaltfronttiefs, sind aber auch bei den schleifenden Zyklonen beträchtlich. Während die schleifenden Zyklonen bei der W-Bahn häufiger auftreten, liegt das Schwergewicht der Kaltfronttiefs bei den WSW-Bahnen. Darin kommt noch einmal die überragende Bedeutung der Kaltfronttiefs für die WSWK-Bahn im Sommerhalbjahr (entsprechend auch für die SWK-Bahn, s. o.) und damit für das sommerliche mitteleuropäische Witterungsgeschehen zum Ausdruck. Der verhältnismäßig hohe Anteil der schleifenden Tiefs (fast 1/4) bei der W-Bahn wird später noch erläutert.

Abbildung 14 zeigt die räumliche Verteilung der W-Bahn im Herbst und Winter. Im Herbst sind Zyklonen auf dieser Bahn sehr selten. Anfang Dezember nimmt die Frequenz schlagartig zu und bleibt während des ganzen Winters ziemlich gleichmäßig hoch. Die Zyklonen sind bis Ende Januar zum überwiegenden Teil Frontalwellen. Aus dem allgemein verschärften Gegensatz zwischen kalten polaren und warmen subtropischen Luftmassen und der dadurch gradientstärkeren Frontalzone resultiert die große durchschnittliche Geschwindigkeit auf der W-Bahn ($GK = 2,2$). Auf ihrer Südseite bringen die Tiefdruckgebiete kräftige Erwärmung durch die Zufuhr maritimer Tropik- oder gemäßigter Polarluft mit ergiebigen Aufgleitniederschlägen (meist als Regen), wobei sich das Tauwetter allmählich immer weiter nach Osten durchsetzt. Auf der Nordseite ist es dagegen im Bereich kontinentaler Polarluft empfindlich kalt, die Niederschläge fallen als Schnee und nehmen nach Norden ab.

Besonders extreme Temperaturgegensätze zwischen dem nördlichen und südlichen Mitteleuropa treten auf, wenn sich zwischen den beiden extrem temperierten Luftmassen eine quasistationäre Schleifzone ausbildet, an der schleifende Tiefs in schneller Folge und mit großer Geschwindigkeit Mitteleuropa von Westen nach Osten ohne Intensitätsänderung und Verwirbelungsmöglichkeit durchlaufen. Diese Situationen kommen besonders am Ende des Winters und in der ersten Frühjahrshälfte vor, wenn die „Kaltluftproduktion“ in der Arktis genügend fortgeschritten ist und die Frontalzone südlicher verläuft als im Frühwinter. Bezeichnend ist, daß in dieser Zeit von den 20 aufgeführten Tiefdruckgebieten der W-Bahn mehr als die Hälfte (nämlich 11) schleifende Tiefs sind, ihr Anteil während des ganzen Jahres aber nicht ganz 25% ausmacht. Darin wirkt sich unter anderem aus, daß bei Schleifzonenlagen gleich mehrere

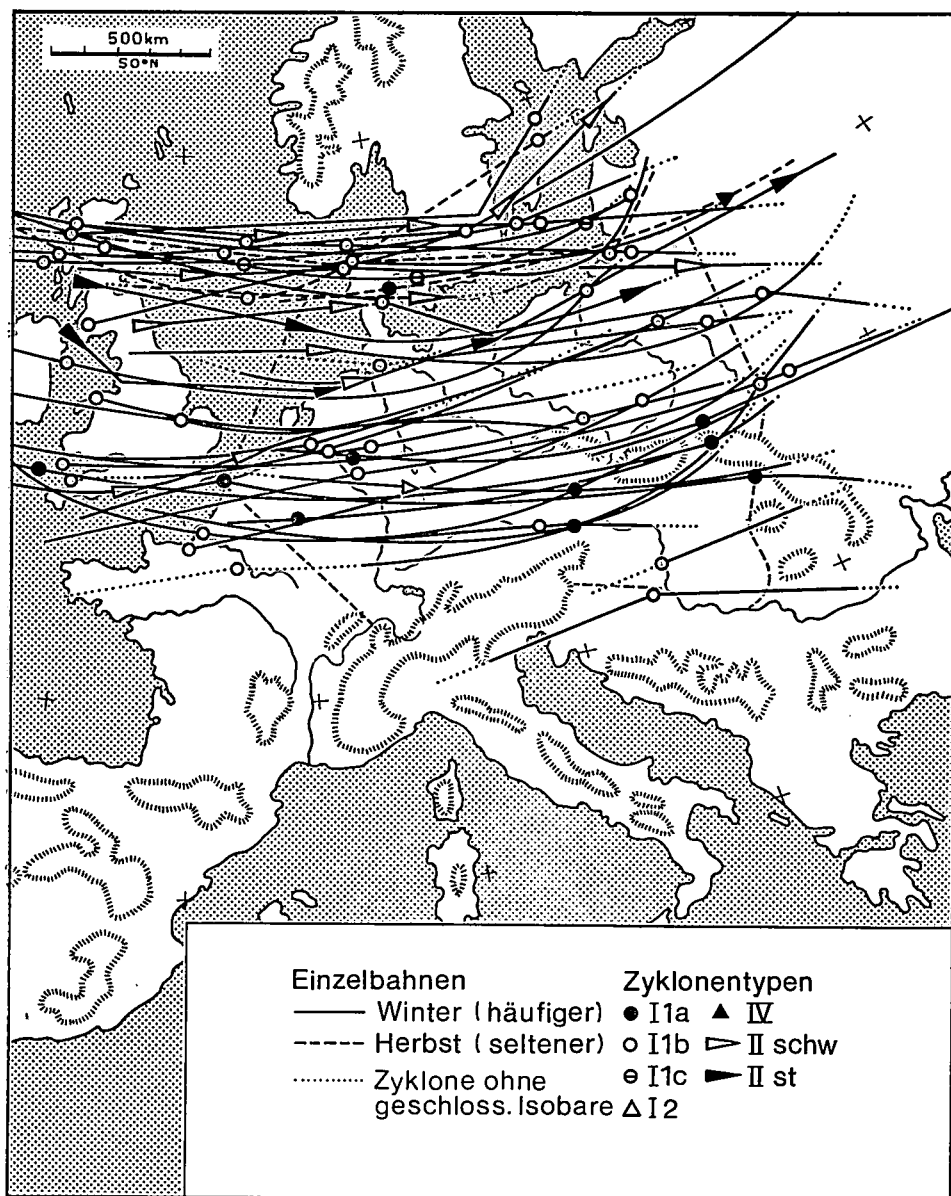


Abb. 14: Die W-Bahn im Herbst und Winter (1957—66)

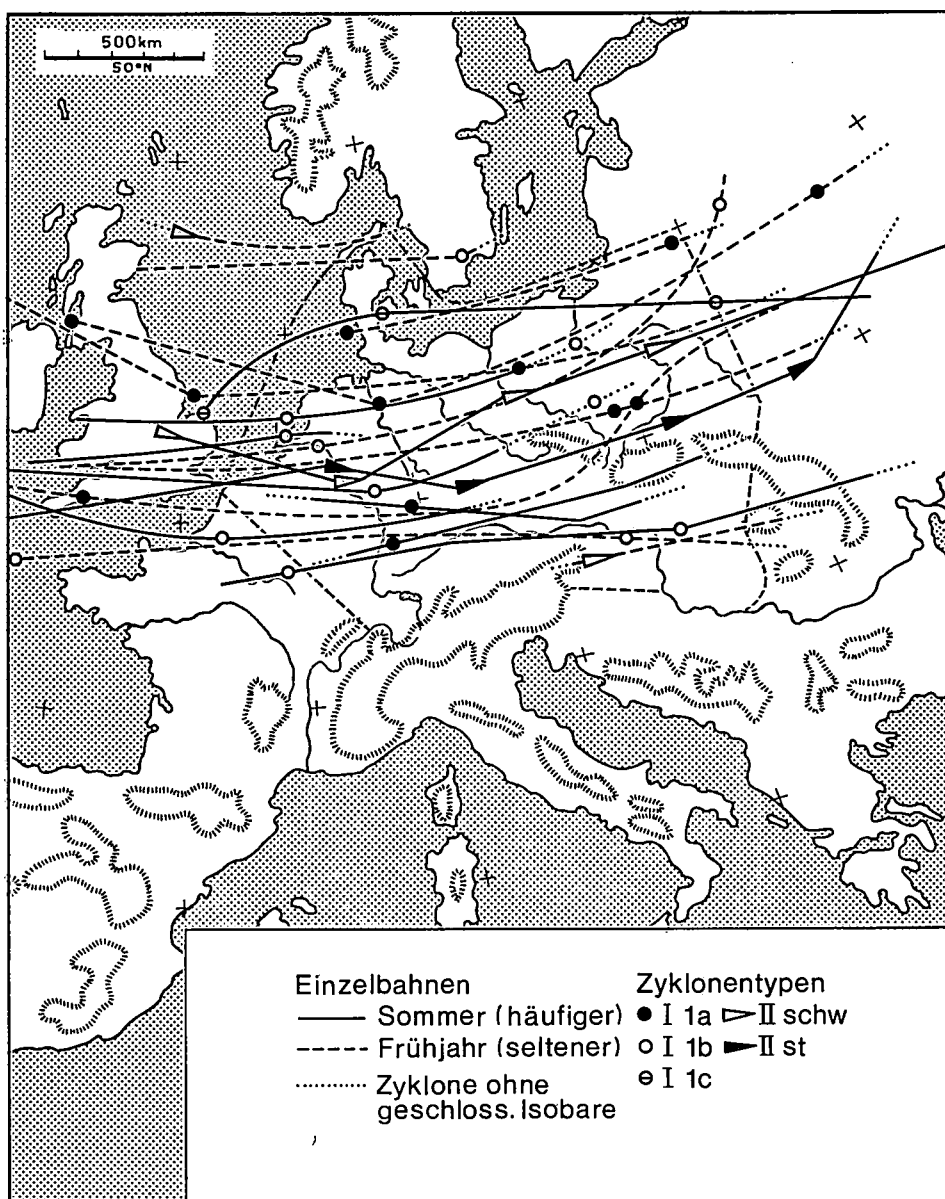


Abb. 15: Die W-Bahn im Frühjahr und Sommer (1957—66)

Ila-Zyklonen hintereinander auftreten, wenn auch nicht alle geschlossene Isobaren aufweisen. Ein besonders augenfälliges Beispiel einer solchen Wetterlage bieten die Tage vom 7. bis 13. Februar 1966, als eine quasistationäre Luftmassengrenze zwischen kontinentaler Polarluft im Norden und gemäßigter maritimer Tropikluft im Süden in Mitteleuropa lag (vgl. Kohlbach 1966; Roediger 1966). In Süddeutschland war es ungewöhnlich mild (Tagesmaxima zum Teil über 10°C), in Norddeutschland dagegen sehr kalt (Tagesmaxima zum Teil unter -5°C). Während sich im Norden eine geschlossene Schneedecke von über 25 cm Höhe bildete, blieb der Süden schneefrei. Besonders kraß waren die Witterungsgegensätze im engeren Bereich der Luftmassengrenze, in dem außer erheblichen Niederschlägen — an manchen Orten fielen mehr als 20 mm an einem Tag — auch stürmische Winde häufig auftraten. Sogar einige Gewitter konnten vermerkt werden.

Solch extreme Wetterlagen bringen neben einer ungewöhnlichen Temperaturverteilung — Abnahme der Temperatur von Süden nach Norden — auch die Gefahr großer wirtschaftlicher Schäden mit sich — Überschwemmungen, Sturmschäden, Verkehrsbehinderungen durch starken Schneefall — und sind nicht zuletzt für den vorhersagenden Meteorologen ein großes Problem, da schon geringfügige Lageveränderungen der Luftmassengrenze für das betroffene Gebiet einen extremen Wetterumschwung zur Folge haben.

Bemerkenswert bei der räumlichen Verteilung der W-Bahn ist die Zone geringerer Dichte im mittleren Bereich zwischen den beiden Zentren größerer Konzentration im nördlichen und südlichen Mitteleuropa. Es handelt sich hierbei möglicherweise um eine Fernwirkung der Britischen Inseln, die sich an ihrer breitesten Stelle als Landmasse im Winter ungünstig auf die Entstehung und den Erhalt von Tiefdruckgebieten auswirken.

Im Frühjahr und Sommer ist die Zahl der Zyklonen auf der W-Bahn bedeutend geringer (vgl. Abb. 15). Während im ersten Teil des Frühjahrs noch die spätwinterlichen Verhältnisse herrschen, nimmt in der zweiten Aprilhälfte der Einfluß der W-Bahn auf das mitteleuropäische Witterungsgeschehen schnell ab. Die Einzelbahnen verlaufen durchweg auf dem Land — eine Folge der stärkeren sommerlichen Erhitzung des Kontinents —, die Tiefdruckgebiete wandern und okkludieren langsamer, erreichen Mitteleuropa aber auch nicht im gleichen frischen Zustand wie im Winter. Der Anteil der schleifenden Tiefs sinkt unter den Jahresdurchschnitt. Ein leichter Anstieg der W-Bahn zu einem sekundären Maximum ist im August zu verzeichnen. Er charakterisiert ähnlich wie bei der SWNW- und WSWN-Bahn die verstärkte Zufuhr kühler Meeresluft nach Mitteleuropa, die in diesem Sommermonat am augenfälligsten in Erscheinung tritt.

Im allgemeinen bringt die W-Bahn im Sommer empfindliche Abkühlung mit oft ergiebigen Niederschlägen — als Aufgleit- und Schauerniederschläge —, die häufig mit Gewittern verbunden sind. Sie ist damit ein typisches Glied der verschiedenen Phasen des sogenannten „europäischen Sommermonsuns“, wenn sie auch für das sommerliche Witterungsgeschehen in Mitteleuropa nicht die gleiche Bedeutung hat wie die zentralen Äste der SW- und WSW-Bahnen. Dabei ist jedoch zu beachten, daß letztere mehr den Frühsommer charakterisieren.

Die NW-Bahn setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, einer nördlichen und einer westlichen, die beide aus Gründen der Übersichtlichkeit getrennt dargestellt wurden, aber doch zu einem Bahntyp integriert wurden. Beim Vergleich beider Komponenten macht sich durchaus schon die Tatsache bemerkbar, daß mit der Änderung des Herkunftsgebietes und der Bewegungsrichtung eine allmähliche Änderung der an der Bahn beteiligten Tiefdrucktypen verbunden ist. So weist die nördliche Komponente relativ mehr Tiefs mit Höhenzyklone (einschließlich der flachen Kaltlufttiefs) und

weniger Frontalwellen als die westliche auf, worin sich die jeweilige Nachbarschaft der Komponenten zur N- bzw. W-Bahn widerspiegelt, doch sind die Unterschiede nicht signifikant. Zudem ist die Häufigkeitsverteilung bezüglich der Jahreszeiten der beiden Komponenten ähnlich, so daß die Zusammenlegung zu einer NW-Bahn nahe liegt.

Tabelle 4 **Verteilung der NW-Bahn nach Zyklontypen und Jahreszeiten**
(1957—66)

Zyklontyp	Winter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Jahr
I1, I1b	7	4	—	—	11
I2	14	9	2	7	32
IV	2	1	—	—	3
II1a	1	1	—	—	2
II1b	—	—	1	—	1
II2a	—	2	—	1	3
II3a	1	—	1	—	2
Gesamt	25	17	4	8	54

Die NW-Bahn zeichnet sich gegenüber allen anderen Bahnen durch den hohen Anteil am I2-Typ (Warmfrontwellen und -okklusionspunktwellen) aus (vgl. Tab. 4).

Wählt man als Klasseneinteilung der Zyklontypen 1) I1a + I1b, 2) I2, 3) Rest, ergibt sich beim Vergleich der NW- mit der W-Bahn der χ^2 -Koeffizient 48,20, der auf dem 0,1 %-Niveau signifikant ist und wesentlich aus dem verschiedenen Anteil der Warmfrontwellen resultiert.

Da auf der NW-Bahn langsam wandernde Tiefdruckgebiete (abgesehen von den flachen Kaltlufttiefs) kaum vertreten sind, ist die durchschnittliche Geschwindigkeit der NW-Bahn höher als die der W-Bahn. Insgesamt weist die NW-Bahn den größten Geschwindigkeitskoeffizienten aller Bahnen, nämlich $GK = 2,4$, auf, wobei die westliche gegenüber der nördlichen Komponente noch etwas hervorgehoben ist, was auch aus den Abbildungen 16—18 ersichtlich ist. Wir haben es hier mit einer typischen „Winterbahn“ zu tun: Auf den Zeitraum Dezember bis April entfallen mehr als 2/3 aller Fälle.

Kennzeichnend für die NW-Bahn sind tiefer Luftdruck über dem östlichen Mittel- bis westlichen Osteuropa (Höhentrog) und hoher Luftdruck über dem östlichen Nordatlantik, wobei für die westliche Komponente Trog und Hochkeil nicht sehr stark ausgeprägt zu sein brauchen und viele Bahnen bei einer schwach mäandrierenden Westströmung auftreten. Handelt es sich bei den Tiefdruckgebieten um Warmfrontwellen, was meistens der Fall ist, verlieren sie während ihrer Wanderung schnell an Energie und werden von dem von Westen nachfolgenden Druckanstieg rasch aufgefüllt — oft schon, bevor sie den Trog erreicht haben. Folglich sterben fast 2/3 aller Zyklonen dieser Bahn schon in Mitteleuropa ab. Der schnelle Druckanstieg auf der Rückseite läßt auch kaum ein ausgeprägtes Rückseitenschauerwetter zu, so daß diese Bahn meist nur kurzfristig kleine Aufgleitniederschlagsfelder mit sich bringt, die von geringfügigen Schauern abgelöst werden. Lediglich bei gut entwickelten Frontalwellen bzw. verwirbelnden Zyklonen hält das Rückseitenwetter länger an, und es

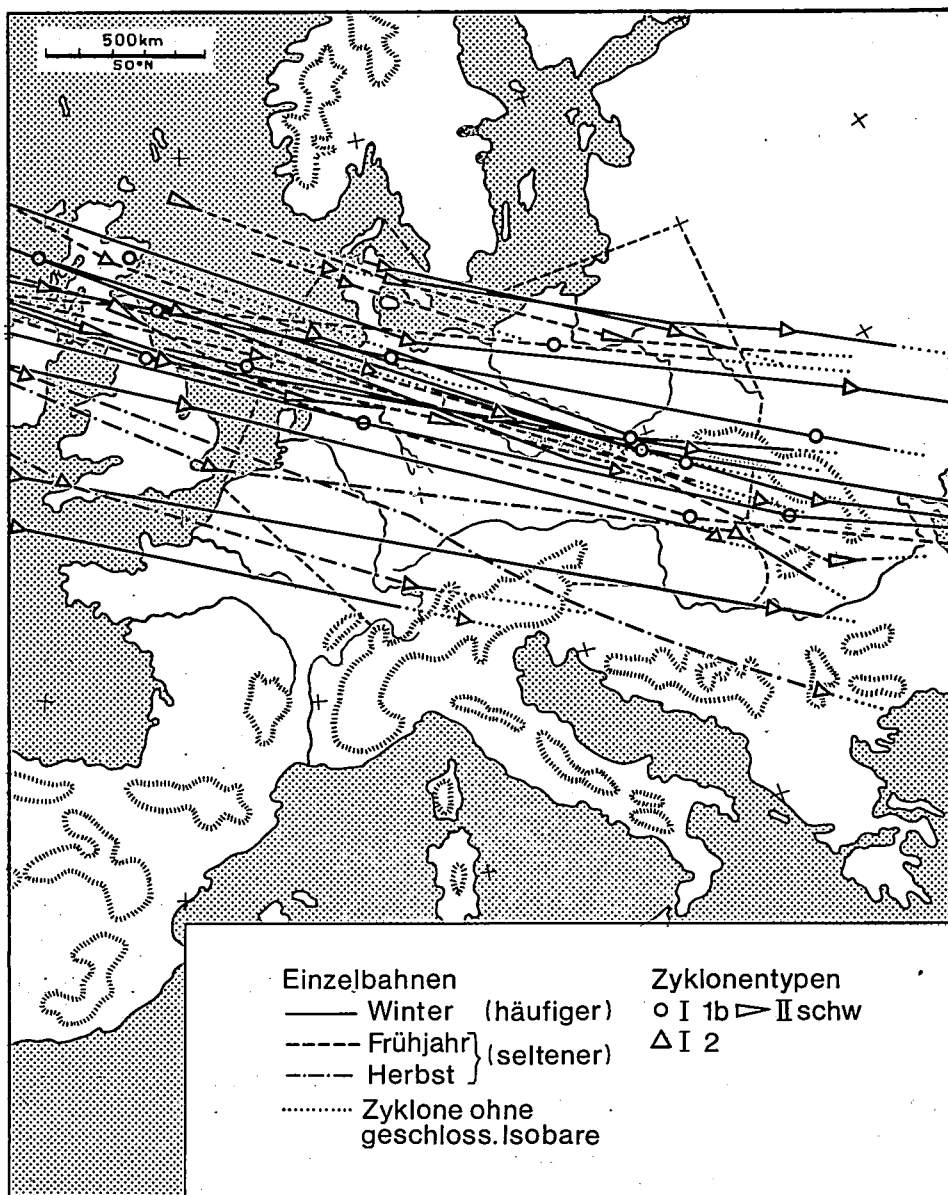


Abb. 16: Die NW-Bahn (westlicher Zweig) (1957—66)

kann eine erhebliche Abkühlung eintreten. Im allgemeinen ist mit der NW-Bahn aber mäßige Erwärmung durch die Zufuhr gemäßiger maritimer Polarluft verbunden. Die Temperaturen erreichen aber längst nicht so hohe Werte wie bei den bisher besprochenen Bahnen.

Im Sommer hat die NW-Bahn keine Bedeutung. Mit den selten auftretenden Zyklonen sind Schlechtwettergebiete verbunden, mit denen kräftige Abkühlung einhergeht, bevor sich der von Westen nachfolgende Hochdruckeinfluß durchsetzen kann.

Die N-Bahn unterscheidet sich von allen Bahnen ohne starke zyklonale Krümmung durch den hohen Anteil an Tiefdruckgebieten mit ausgebildeter Höhenzyklone, wie Tabelle 5 zeigt.

Tabelle 5 Verteilung der N-Bahn nach Zyklontypen und Jahreszeiten (1957—66)

Zyklontyp	Winter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Jahr
I1b	6	2	—	—	8
I1c	1	—	—	—	1
IV	3	1	—	1	5
II1a	1	—	—	—	1
II2a	2	1	—	1	4
II3a	1	3	—	1	5
II3b	2	2	—	—	4
Gesamt	16	9	—	3	28

Beim Vergleich der Verteilung der Tiefdrucktypen mit der benachbarten NW-Bahn wurden die Klassen 1) I1a + I1b + I1c, 2) I2, 3) Rest gebildet. Zum $\chi^2 = 29,01$, das auf dem 0,1 %-Niveau signifikant ist, trägt erwartungsgemäß der Anteil an den Warmfrontwellen am meisten bei. Doch sind auch die Unterschiede hinsichtlich der Häufigkeit der Restklasse beträchtlich. Sie kommen durch die starke Verwirbelungstendenz der Zyklonen auf der N-Bahn zustande.

Das Auftreten der N-Bahn ist in wesentlichen an drei verschiedene synoptische Situationen gebunden:

1. Bei zyklonalen Nordlagen mit von Nordskandinavien bis in den Mittelmeerraum durchgehender nördlicher Höhenströmung entwickeln sich kräftige Frontalwellen, die entsprechend der starken Höhenströmung sehr schnell wandern, dabei auch ein Höhentief ausbilden können und meistens bis ins Mittelmeer gelangen, ohne vorher abzusterben.
2. Bei den Hoch-Nordmeer-Lagen und ähnlichen wandern Frontalwellen von Skandinavien nach Mitteleuropa, wobei sie verwirbeln, am Boden bald absterben und in der Höhe ein Kaltlufttropfen zurückbleibt, der abgeschnürt wird, wenn das Nordmeerhoch seinen Einfluß nach Osten ausdehnt und die Kaltluftzufuhr allmählich abgeschnitten wird.
3. Bei flacher Druckverteilung treten die schwachen Kaltlufttiefs auf, und zwar sowohl mit als auch ohne Höhentief. Sie sind Reste von atlantischen Störungen, die von Westen kommend die Skanden nicht überqueren konnten und unter Auf-

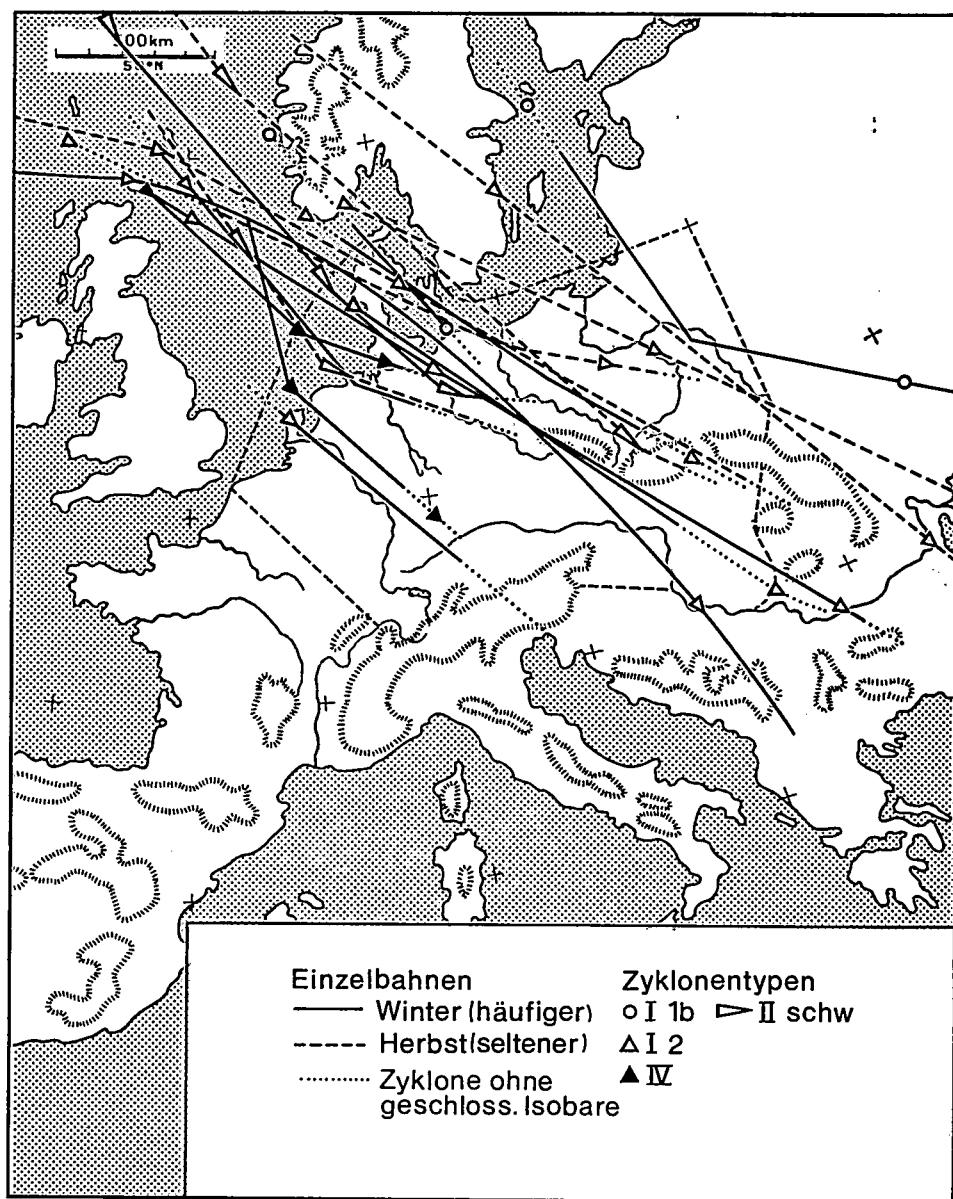


Abb. 17: Die NW-Bahn (nördlicher Zweig) im Herbst und Winter (1957—66)

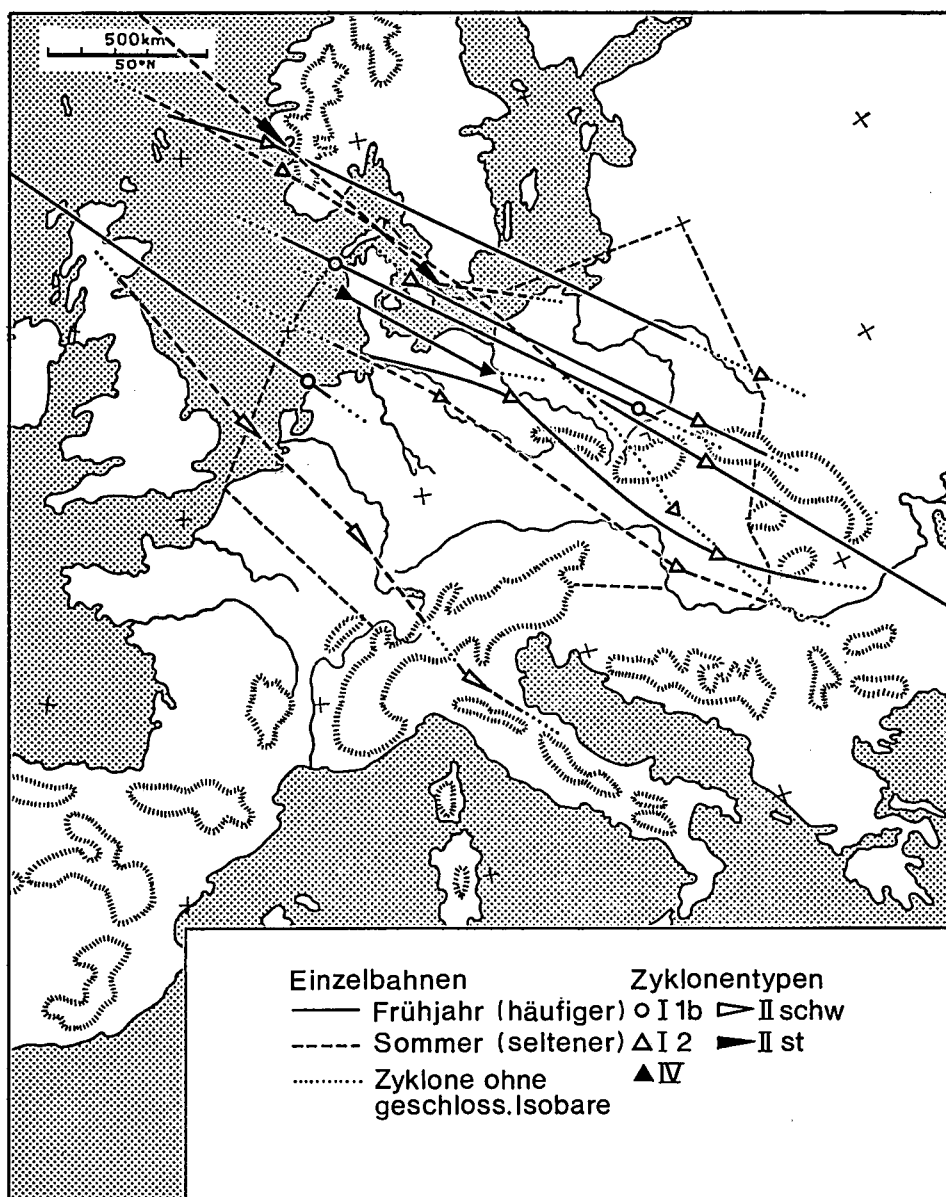


Abb. 18: Die NW-Bahn (nördlicher Zweig) im Frühjahr und Sommer (1957—66)

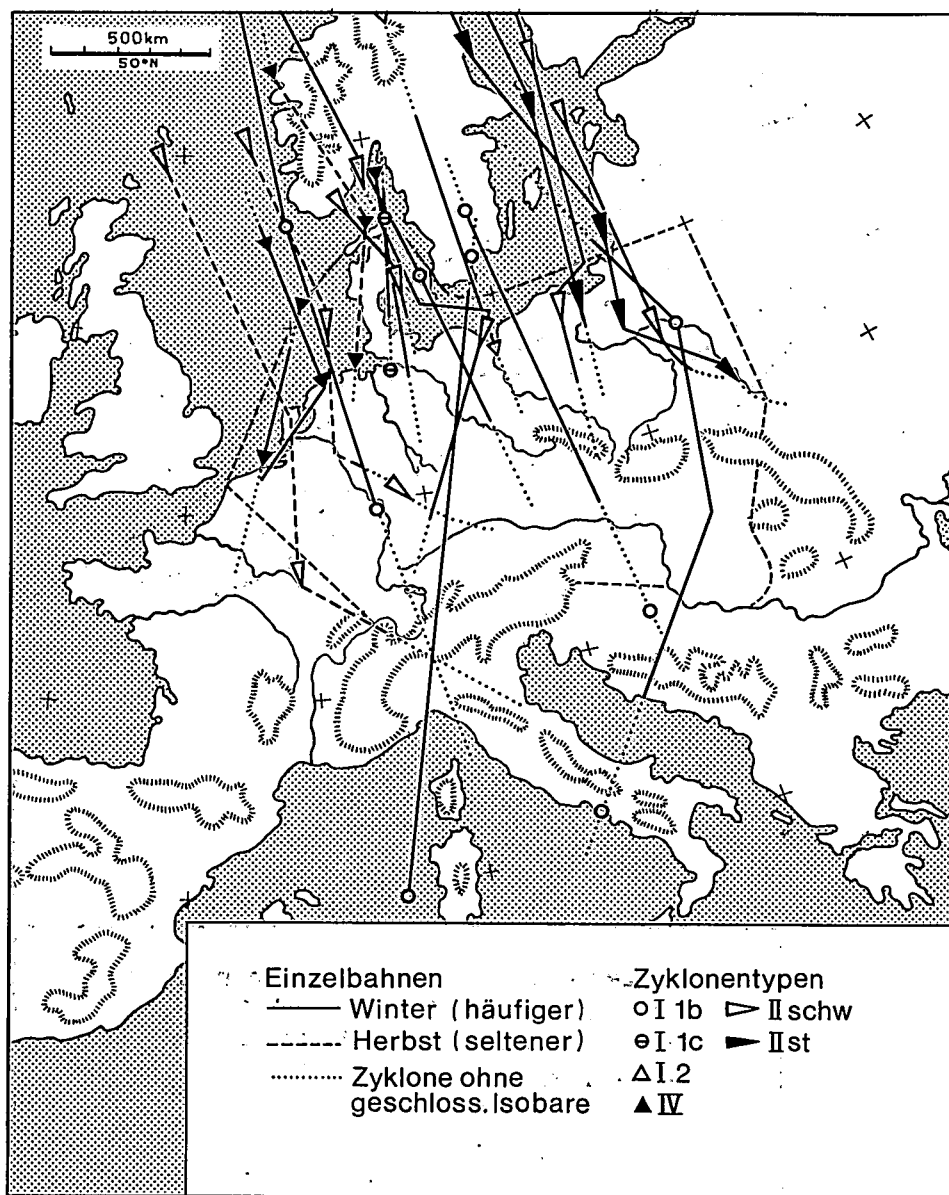


Abb. 19: Die N-Bahn im Herbst und Winter (1957—66)

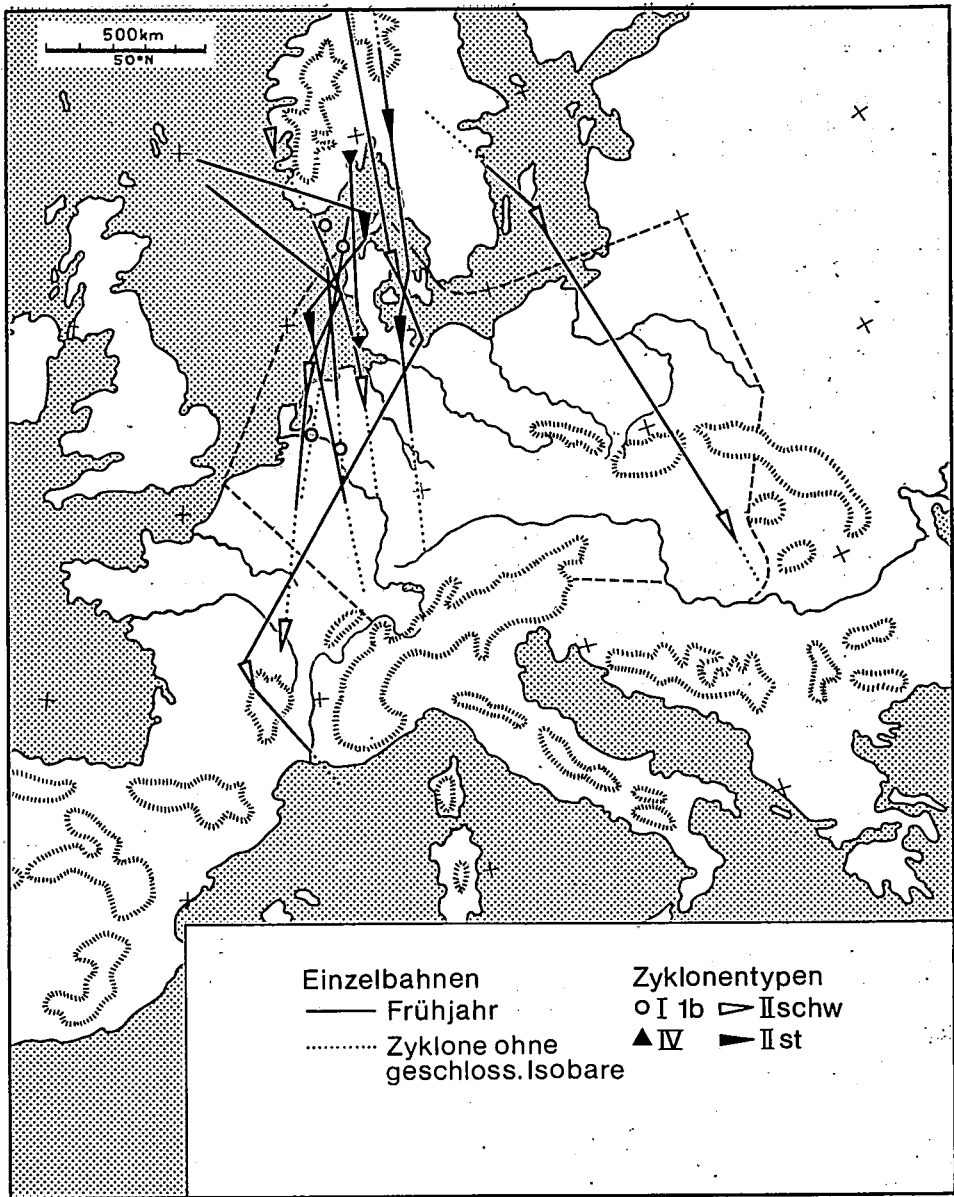


Abb. 20: Die N-Bahn im Frühjahr und Sommer (1957—66)

füllung langsam nach Süden wanderten, während sich an ihrem Okkulationspunkt ein Teiltief bildete, das unter rascher Vertiefung nach Osten abzog. Daneben entstehen aber auch flache Kaltlufttiefs in der Nordsee bzw. im Skagerrak durch vertikalen Impulsaustausch, wenn kalte Luft auf das im Winter warme Wasser übertritt. In beiden Fällen handelt es sich jedoch um äußerst schwache Druckgebilde mit geringer räumlicher Ausdehnung, die beim Übertritt aufs Festland bald absterben.

Die N-Bahn ist wie die NW-Bahn eine reine „Winterbahn“ (Abb. 19, 20). In den vier Monaten Dezember bis März treten mehr als $\frac{2}{3}$ aller Fälle auf, obwohl gerade in diesen Monaten die Nordlagen nicht ihr Häufigkeitsmaximum haben. Dieser scheinbare Widerspruch findet seine Auflösung, wenn man bedenkt, daß im Frühsommer, wenn die Nordlagen am häufigsten sind, die Zyklonen bei verminderten Luftmassengegensätzen zu schwach sind, um Mitteleuropa noch mit geschlossenen Isobaren zu erreichen. Falls sie aber noch kräftig genug sind, verwirbeln sie so schnell und kräftig, daß sie die nordsüdliche Bewegungsrichtung nicht lange beibehalten und der wirren Bahn zugerechnet werden müssen. Im Winter (vgl. Abb. 19) ist die Nordbahn in ihrer Ost-West-Erstreckung breitgestreut, wobei sich die Tiefdruckgebiete eng an die Land-Meer-Verteilung anlehnen. So tritt besonders ein Ast vom Bottnischen Meerbusen nach Süden deutlich heraus, dem ein breiterer und häufiger begangener um Dänemark gegenübersteht. Die Zyklonen sterben später ab als im Frühjahr, was auf ihre höhere Energie vor dem Erreichen Mitteleuropas hinweist. Im Frühjahr konzentrieren sich die Tiefdruckgebiete auf den Westteil. Die Ostsee ist noch sehr kalt und wirkt der Zyklonogenese und dem Zyklonenerhalt entgegen, so daß der östliche Ast praktisch fehlt.

Die Nordbahn hat naßkalte Witterung zur Folge. In der mitgeführten maritimen Polar- oder arktischen Polarluft (mP bzw. mPA) treten bei den Frontalwellen nach kurzfristig andauernden Aufgleitniederschlägen Schneeschauer auf, die außer im Nordstau der Gebirge nicht sehr ergiebig sind. In Verbindung mit den niedrigen Temperaturen wird die Witterung vom Menschen als äußerst unangenehm empfunden. Während der Einflußbereich der durchwandernden Zyklonen sich bis in den Mittelmeerraum erstreckt, bleibt er bei den Kaltlufttiefs auf die nördlichen Randgebiete beschränkt. Die Wirksamkeit dieser Zyklonen ist sehr gering und auf einige Konvektionsschauer beschränkt.

Die Geschwindigkeit ist nur bei den durchwandernden Störungen groß. Langsame Wanderung kommt in $\frac{1}{3}$, normale Wanderung in der Hälfte aller Fälle vor. Daraus resultiert der GK = 1,8, der der geringste unter denen der nahezu geradlinigen Bahnen ist und schon nahe bei denen der zyklonal gekrümmten Bahnen liegt.

c) Die Bahnen süd- bis östlicher Herkunft

Dieser Klasse gehören die Vb-Bahn im engeren Sinn, die S-, SO- und O-Bahn an. Die Bezeichnung „Vb-Bahn im engeren Sinn“ soll verdeutlichen, daß es sich hierbei nicht um die seit van Berber eingebürgerte Vb-Bahn handelt, sondern nur um einen Teil derselben. Van Berber mußte wegen des nur fünfjährigen Wetterkartenmaterials und des großen Untersuchungsgebietes (Europa) stärker generalisieren. Seine Vb-Bahn setzt sich aus unserer Vb-Bahn i. e. S. und dem östlichen Teil der S-Bahn zusammen. Letzterer ist aber bezüglich der Struktur der Zyklontypen den übrigen Teilen der S-Bahn ähnlicher als der Vb-Bahn i. e. S. und wurde deshalb der S-Bahn zugerechnet. Die unterschiedliche Ausprägung der Zyklonen auf der S- und Vb-Bahn i. e. S. spiegelt sich vor allem im Anteil der schleifenden Tiefs wider, worauf noch näher eingegangen wird.

Die Vb-Bahn i. e. S. — im folgenden wird der Einfachheit halber von Vb-Bahn gesprochen — tritt auf, wenn Kaltluft westlich der Alpen ins Mittelmeer vorstößt und sich östlich der Alpen ein korrespondierender Warmluftstrom nach Norden in Bewegung setzt. Es ist dies die Situation eines Troges im westlichen Mitteleuropa und eines blockierenden Osteuropahochs. Durch den Kaltluftausbruch ins nördliche Mittelmeer bilden sich dort Resonanztiefs, für deren Entstehung der Scherhagsche Divergenzeffekt eine große Rolle spielt (vgl. Scherhag 1936). Nach der Bildung wandern die Tiefdruckgebiete zunächst in östlicher Richtung in die Donautiefenebene und biegen dort, der Höhenströmung auf der Vorderseite des Troges folgend, nach Nordnordosten um (vgl. Abb. 21 und 22). Wie aus Tabelle 6 hervorgeht, handelt es sich dabei überwiegend um Frontalwellen, die mehr als die Hälfte aller Fälle stellen. Die schleifenden Tiefs erreichen etwa einen Anteil von 25 %, der Rest entfällt auf die genetischen Zyklone. Letztere kommen dann vor, wenn auf der Rückseite des Bodentiefs Kaltluft nach Osten vordringen kann. Diese Situation ist mit einer Drehung der Trogachse gegen den Uhrzeigersinn und einer Verwirbelung der Zyklone verbunden. Ist die Verwirbelung sehr stark, ändern die Tiefdruckgebiete aber meist ihre Richtung und wandern nach Westen (sogenannte retrograde Vb-Tiefs).

Tabelle 6 Verteilung der Vb-Bahn nach Zyklontypen und Jahreszeiten (1957—66)

Zyklontyp	Winter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Jahr
I1a	2	2	3	4	11
I1b	7	7	4	7	25
II3a	1	—	4	—	5
II3b	—	1	—	—	1
Gesamt	10	10	11	11	42

Diese Fälle wurden der wirren Bahn zugeordnet, so daß Tiefdruckgebiete mit Höhenzyklone auf der Vb-Bahn nur selten auftreten. Demgemäß ist die durchschnittliche Geschwindigkeit sehr groß. Langsame Wanderung kommt nur einmal vor, schnelle in mehr als $\frac{1}{3}$ der Fälle. Mehr als die Hälfte aller Zyklone bewegt sich mit normaler Geschwindigkeit. Der Geschwindigkeitskoeffizient von 2,35 rangiert zwar hinter dem der NW-, aber vor dem der W-Bahn. Dabei sind außer im Sommer, in dem nur einmal schnelle Wanderung vorkommt, die Anteile von schnell bzw. mit normaler Geschwindigkeit wandernden Zyklone in allen Jahreszeiten gleich. Das bedeutet, daß im Sommer die Höhenströmung auf der Trogvorderseite nicht so stark ausgeprägt ist und die Kaltluft leichter nach Osten durchbricht. Diese Tatsache macht sich auch im Anteil der II3a-Zyklone im Sommer bemerkbar. Der Grund für dieses Verhalten liegt darin, daß im Sommer die blockierenden osteuropäischen Hochs wegen der starken Erwärmung der Erdoberfläche leichter von Westen her abgebaut werden können als in den übrigen Jahreszeiten und damit die Höhenströmung auch leichter verformt wird. Diese Tendenz kommt auch in der Struktur der Fronten zum Ausdruck. Während im Herbst und Winter die Typen mit breitem Warmsektor vorherrschen, sind es im Sommer und auch schon im späten Frühjahr die langsam okkludierenden Typen. Allgemein ist aber der frische Zustand der Zyklone der Vb-Bahn gegenüber den bisher besprochenen Bahnen festzuhalten. Die Frontalwellen unterscheiden sich nur wenig von den Schleifzonentiefs, die ja auch noch gegenüber den anderen Bahnen verhältnismäßig häufig auftreten. Das

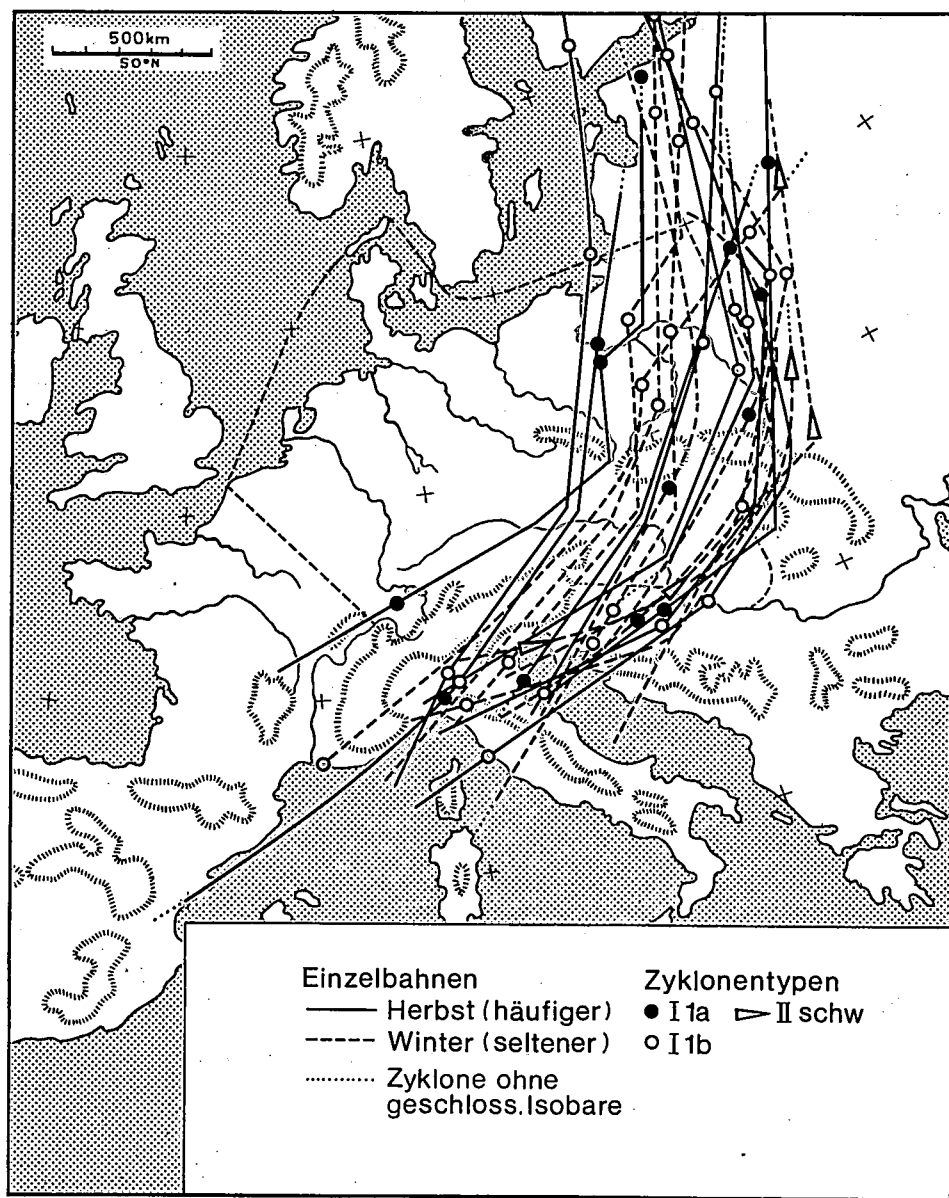


Abb. 21: Die Vb-Bahn im Herbst und Winter (1957—66)

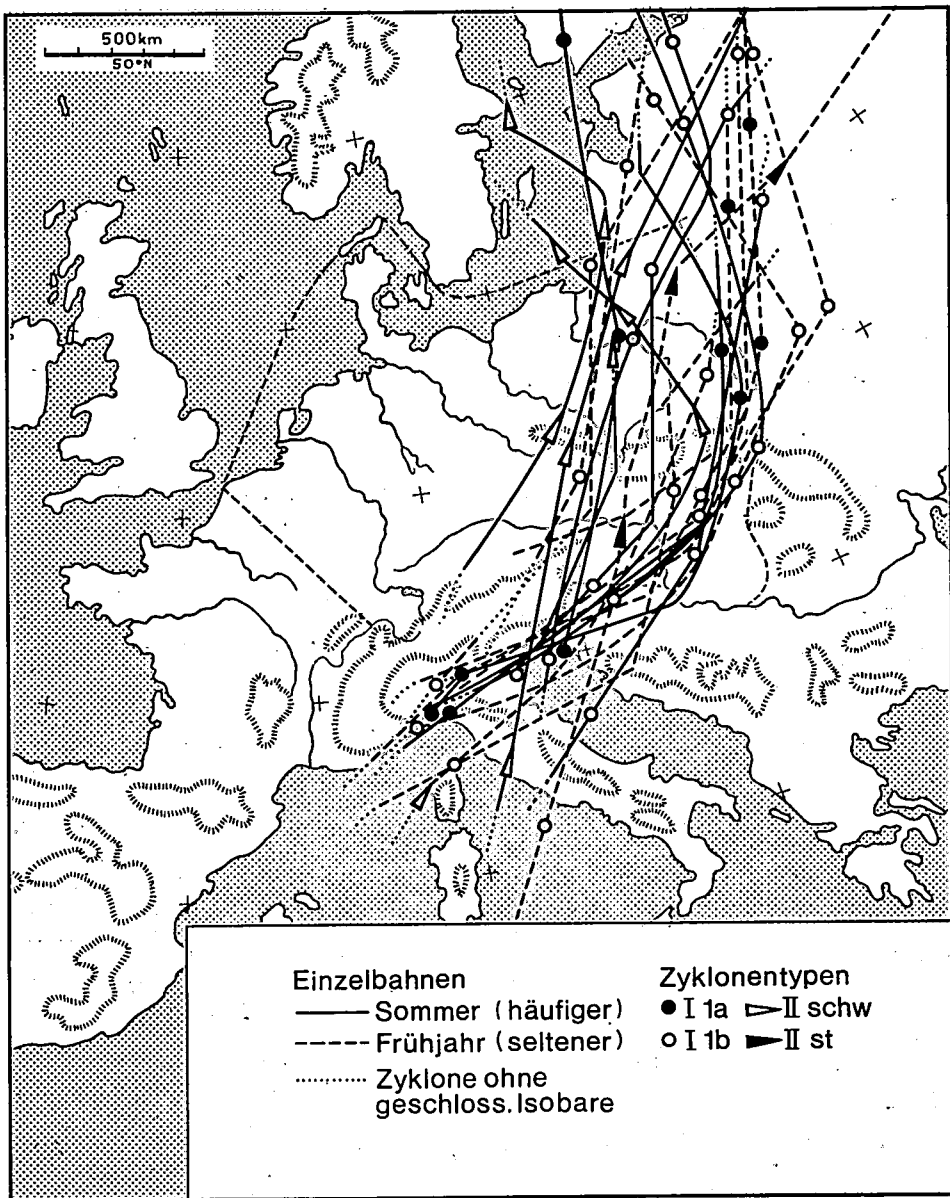


Abb. 22: Die Vb-Bahn im Frühjahr und Sommer (1957—66)

deutet auf eine gewisse Erhaltungstendenz dieser Wetterlage hin, eine Tatsache, die ihre wirtschaftliche Gefahr bedingt (Überschwemmungskatastrophen). Dabei wird die Gefahr von Überschwemmungen noch gesteigert, wenn das Flußnetz und die Zugbahn der Zyklonen wie bei der Oder gleiche Richtung haben. Die Erhaltungstendenz ist jedoch bei der S-Bahn in weit stärkerem Maß gegeben und wird dort in ihrer Auswirkung ausführlicher besprochen.

Die großen Niederschlagsmengen bei den Vb-Tiefs haben nicht zuletzt ihre Ursache in der mitgeführten Mittelmeerluft, die auf der Ostseite der Bahn nach Nordnordosten geführt wird und dem westlichen Osteuropa kräftige Erwärmung, dagegen beim Aufgleiten auf die polare Kaltluft auf der Westseite wegen ihrer hohen Feuchtekapazität sehr ergiebige Niederschläge bringt, die im Winter überwiegend als Schnee fallen. Der Einflußbereich der Vb-Bahn selbst reicht — soweit es sich nicht um verwirbelte Zyklonen handelt — nicht weit nach Westen. Die hier auftretenden Niederschläge sind vielmehr an den Höhentrog bzw. einen in ihm abgeschnürten Kaltlufttropfen gebunden. Ein jahreszeitlicher Einfluß auf die Häufigkeit der Vb-Bahn ist nicht festzustellen. Im Gegenteil, sie weist von allen Bahnen den ausgeglichensten Jahresgang auf, zumindest bei Zugrundelegung der meteorologischen Jahreszeiten. Lediglich August-September (insgesamt 10 Fälle) und der Januar (6 Fälle) scheinen etwas bevorzugt zu sein, ohne jedoch signifikant überdurchschnittliche Häufigkeiten zu erreichen.

Die S-Bahn ist an ein blockierendes osteuropäisches Hoch gebunden, das in der Höhe nur als Keil ausgebildet zu sein braucht und sich in nord-südlicher Richtung erstreckt. Je weiter das Hoch im Westen liegt, desto westlicher bewegen sich die Tiefdruckgebiete. Der westliche Teil der S-Bahn ist darum mit einem westeuropäischen Höhentrog gekoppelt, beim östlichen liegt der Trog schon in Mitteleuropa. Die beiden wichtigsten Entstehungsgebiete für die Tiefdruckgebiete der S-Bahn liegen direkt nördlich und südlich der Alpen. Zunächst ist wie bei der Vb-Bahn das nördliche Mittelmeer zu erwähnen, wo der schon bei der Vb-Bahn beschriebene Effekt wirksam ist. Die hier entstandenen Zyklonen umwandern die Alpen im Osten und biegen dann, der Höhenströmung zwischen dem mitteleuropäischen Trog und der russischen blockierenden Antizyklone folgend, nach Norden um. Sind der Trog und das Hoch etwas nach Westen verschoben, stellt sich über den Alpen eine südliche Höhenströmung ein. Dann bilden sich an der nord-südlich verlaufenden Luftmassengrenze durch den Leffekt auf der Alpennordseite schwache Tiefdruckgebiete, die mit der Höhenströmung nach Norden wandern. Manchmal greift auch der Druckfall eines Genuatiefs auf die Alpennordseite über und erzeugt dort ein Resonanztief. Allerdings ist die Zyklogense auf der Alpennordseite längst nicht so stark wie im Golf von Genua, da

1. über Land die zum Druckausgleich beitragende Reibung größer ist, und
2. bei der Südströmung über den Alpen keine solch extremen Düseneffekte wie beim Einbruch von Kaltluft ins westliche Mittelmeer (Rhonetal) mit anschließender Deltabildung (Divergenzeffekt) auftreten, was durch die verschiedene Art der Ausbreitung von Warm- und Kaltluft bedingt ist. — Folglich sind die Tiefdruckgebiete im östlichen Teil der S-Bahn im allgemeinen kräftiger, d. h. mit niedrigerem Luftdruck entwickelt als im zentralen.

Alpenüberquerende Zyklonen sind selten. Zistler (1952) untersuchte sechs solcher Fälle und stellte fest, daß es sich meist um aus der Sahara stammende, in Verbindung mit einem Schirokkoausbruch stehende Tiefdruckgebiete handelte, die sich bei extremen Luftmassengegensätzen so vertiefen konnten, daß ihre Energie für eine Überquerung der Alpen ausreichte. Häufiger kommt es jedoch vor, daß Zyklonen aus dem Mittelmeer sich mit Annäherung an die Alpen langsam auf-

füllen und sich auf der Alpennordseite ein Resonanztiefl bildet, während im Golf von Genua ein Resttiefl zurückbleibt. In diesen Fällen kann von einer Alpenüberquerung nicht gesprochen werden. Jedoch sind diese beiden verschiedenen Prozesse nicht leicht auseinander zu halten, wenn die Wetterkarten nur in Abständen von 6—12 Stunden vorliegen. Insgesamt ähnelt die Wirkung der Alpen der der Skanden auf Zyklonen aus westlicher Richtung, wenn auch die Skanden schon allein deswegen häufiger von Zyklonen überschritten werden, weil eine kräftige westliche Höhenströmung über Norwegen häufiger ist als eine gleich starke südliche über den Alpen. Tabelle 7 zeigt den Anteil der verschiedenen Tiefdrucktypen an der S-Bahn.

Tabelle 7 Verteilung der S-Bahn nach Zyklonentypen und Jahreszeiten (1957—66)

Zyklonen- typ	Winter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Jahr
I1a	2	5	9	11	27
I1b	7	4	5	6	22
I1c	1	—	—	—	1
II1b	—	1	—	—	1
II3a	1	1	—	2	4
Gesamt	11	11	14	19	55

Bei einem Vergleich mit der Vb-Bahn ergab sich der χ^2 -Koeffizient 5,24 bei der Klasseneinteilung 1) I1a, 2) Rest. Dieses χ^2 ist auf dem 5%-Niveau signifikant. Die größten Unterschiede treten beim Anteil der Schleifzonentiefs auf, der bei der Vb-Bahn etwa 1/4, bei der S-Bahn dagegen die Hälfte der Zyklonen umfaßt. Die Frontalwellen und Zyklonen mit Höhentief sind bei der Vb-Bahn häufiger, so daß auf ihr eine größere Tendenz zur Verwirbelung besteht. Das weist auf die größere Erhaltungstendenz der die S-Bahn hervorruhenden Wetterlagen hin und zeigt sich auch schon darin, daß die Einzelbahnen der S-Bahn (vgl. Abb. 23 und 24) geradliniger als die der Vb-Bahn verlaufen.

Die S-Bahn kann als typische Schleifzonenbahn charakterisiert werden, zumal auch die Frontalwellen fast immer einen breiten Warmsektor aufweisen.

Die großen Niederschlagsmengen der S-Bahn resultieren nicht aus den einzelnen Tiefs, sondern aus der Erhaltungstendenz der entsprechenden Wetterlagen, d. h. aus dem häufigen Stationärwerden der Luftmassengrenze zwischen Tropikluft im Osten und polarer Kaltluft im Westen. Die Tiefdruckgebiete selbst sind nämlich nur schwach entwickelt und bewegen sich zudem verhältnismäßig schnell: langsame Wanderung kommt nur in 10 %, schnelle in etwa 30 % und normale in ungefähr 60 % der Fälle vor, der Geschwindigkeitskoeffizient erreicht 2,2. Hat sich aber erst eine stabile Luftmassengrenze eingestellt, wandern an ihr viele kleine Wellen schnell hintereinander nach Norden, von denen allerdings nicht alle eine geschlossene Isobare aufweisen. Jedoch schwappt dadurch dauernd Warmluft nach Westen und zurück, die Luftmassengrenze oszilliert, und es kommt zu langanhaltenden Aufgleitniederschlägen, die leicht zu Hochwasserkatastrophen führen, u. z. besonders im Frühjahr, wenn sie mit der Schneeschmelze zusammenfallen. Während der Oszillation schiebt sich die Luftmassengrenze allmählich nach Osten

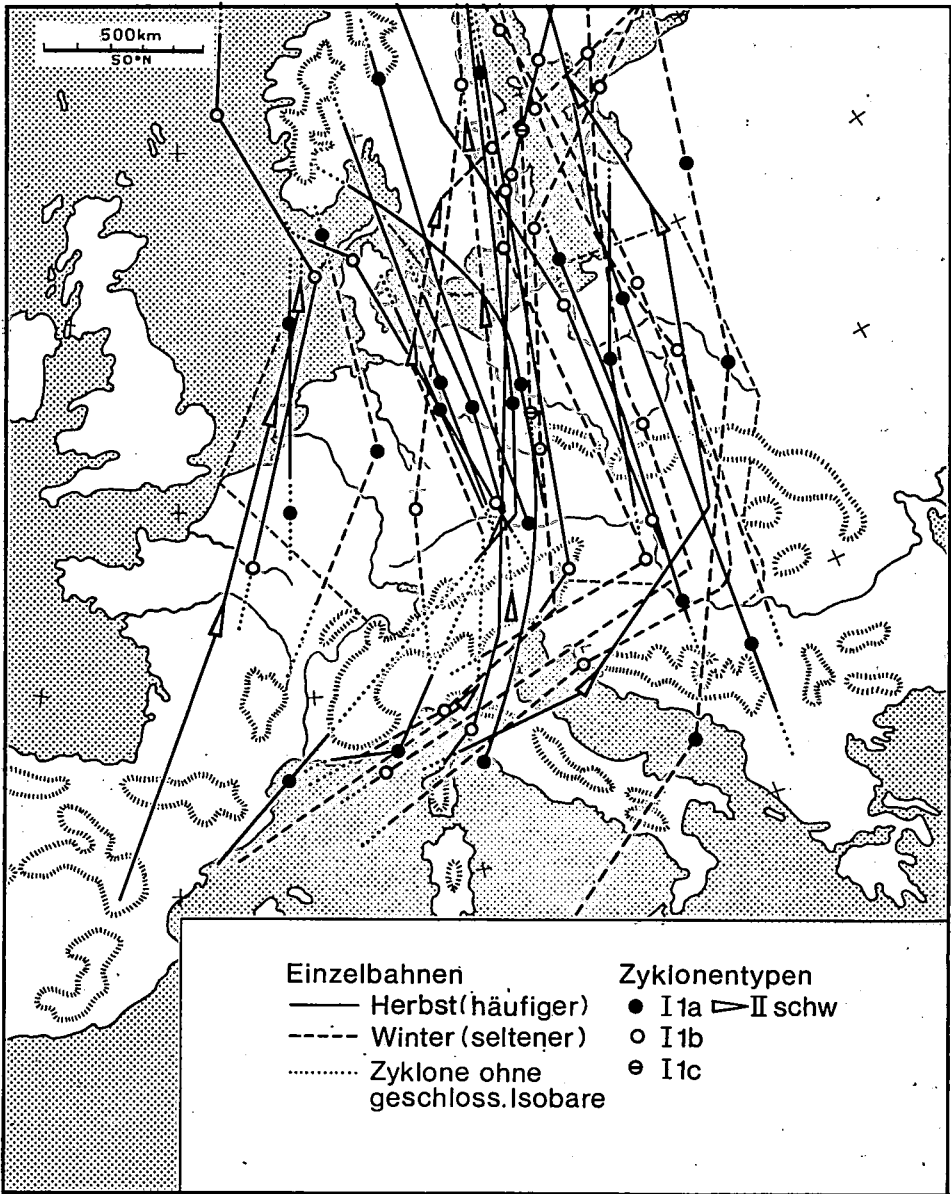


Abb. 23: Die S-Bahn im Herbst und Winter (1957—66)

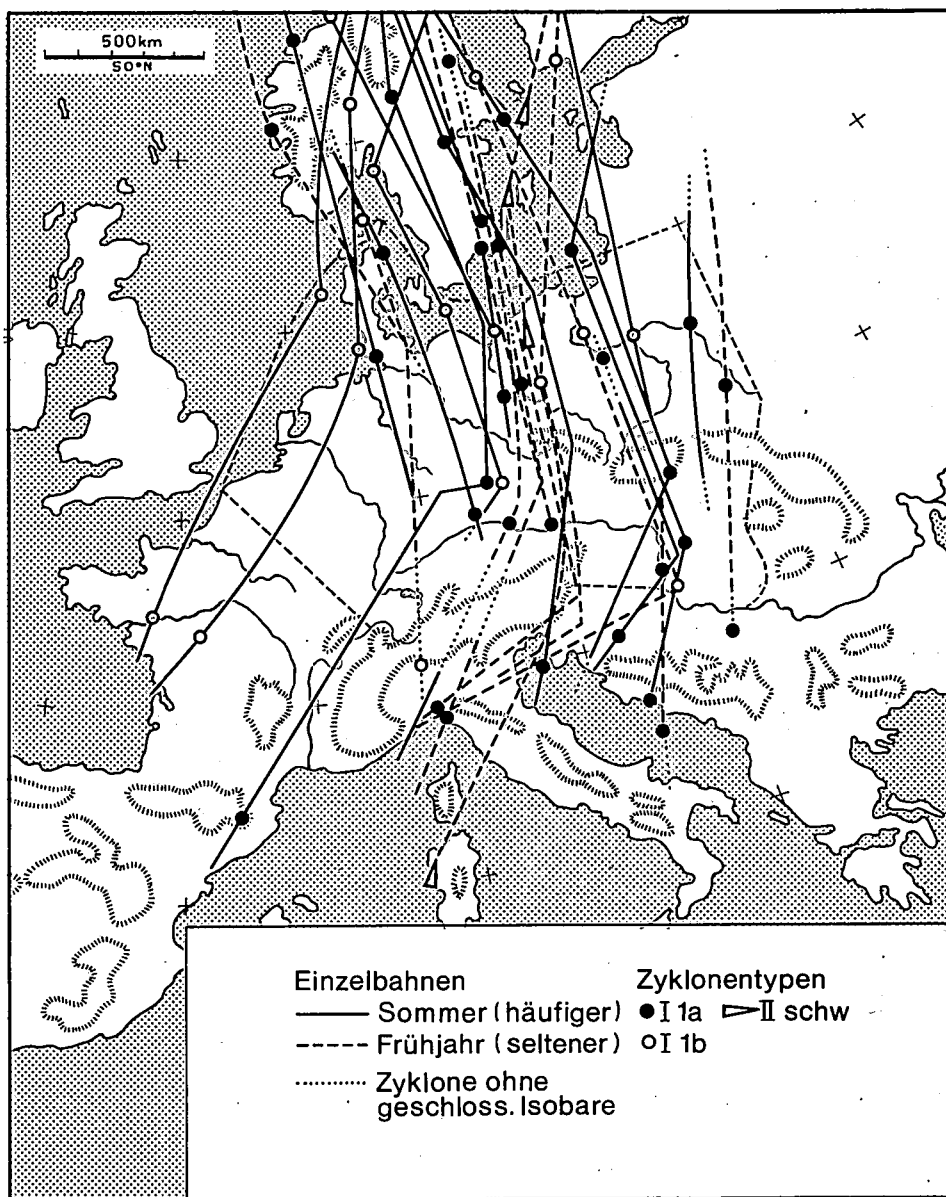


Abb. 24: Die S-Bahn im Frühjahr und Sommer (1957—66)

vor, einer entsprechenden Bewegung des Höhentrogs und der Zurückdrängung des blockierenden Hochs folgend. Im gleichen Sinn verlagern sich die einzelnen Tiefdruckbahnen, bis ganz Mitteleuropa von der Kaltluft überflutet ist.

Wie bei der Vb-Bahn ist der Einflußbereich der Zyklonen klein. Die Niederschläge, die westlich in größerem Abstand von der Luftmassengrenze fallen, sind vielmehr durch den Höhentrog hervorgerufen, müssen aber erwähnt werden, da Höhentrog und S-Bahn ursächlich aneinander gebunden sind.

Vergleichen läßt sich die S-Bahn am besten mit den spätwinterlichen Schleifzonenlagen der W-Bahn. Der einzige Unterschied zwischen beiden besteht darin, daß das gesamte Zirkulationssystem um 90 Grad gedreht ist. Entsprechend wird aus dem N-S-Witterungsgegensatz bei der W-Bahn ein W-O-Gegensatz bei der S-Bahn. Östlich der Schleifzone erreichen die Temperaturen infolge der anhaltenden Warmluftzufuhr auf der Westseite des blockierenden Hochs Höchstwerte, im Westen ist es auch im Sommer regnerisch und kühl.

Der gesamte Westteil der S-Bahn weist nur geringe Zyklonenfrequenz auf. Es ist dies eine Folge des Fehlens günstiger zyklogenetischer Bedingungen für die S-Bahn westlich der Alpen.

Die jahreszeitliche Verteilung der S-Bahn zeigt große Ausgeglichenheit, wenn auch Sommer und Herbst etwas bevorzugt erscheinen. Im östlichen Teil ist jedoch die Frequentierung im Herbst und Winter größer als im Sommerhalbjahr. Dies resultiert aus der vermehrten Zyklonalität im nördlichen Mittelmeer im Winterhalbjahr.

Hat das blockierende russische Hoch eine Südost-Nordwest-Erstreckung und ist die Achse des Höhentroges um etwa 45 Grad nach Osten gedreht, wandern die Tiefdruckgebiete von Südosten nach Nordwesten auf der SO-Bahn (Abb. 25). Diese Fälle treten seltener auf, da bei ihnen die Erhaltungstendenz nicht so groß ist wie bei nordsüdlicher Anordnung der Achsen der langen Wellen. Vielmehr wird beim Auftreten der SO-Bahn schon die Abschnürung eines Kaltlufttropfens im Trog eingeleitet. Der Kaltlufttropfen vereinigt sich dann schnell mit einem in der Frontalzone wandernden Bodentief zu einer am Boden und in der Höhe verankerten Zyklone. Das wirkt sich dahingehend aus, daß bei der SO-Bahn im Vergleich zur S-Bahn die Tiefs mit Höhenzyklone relativ stark vertreten sind (Tab. 8). Insbesondere sind die Fälle mit kräftigen Höhentiefs (mindestens drei geschlossene Isohypsen in der absoluten Topographie 500 mb) häufiger.

Tabelle 8 Verteilung der SO-Bahn nach Zyklontypen und Jahreszeiten (1957—66)

Zyklontyp	Winter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Jahr
I1a	—	—	3	1	4
I1b	1	1	2	2	6
II1a, II3a	—	1	—	1	2
II1b, II3b	—	—	2	1	3
Gesamt	1	2	7	5	15

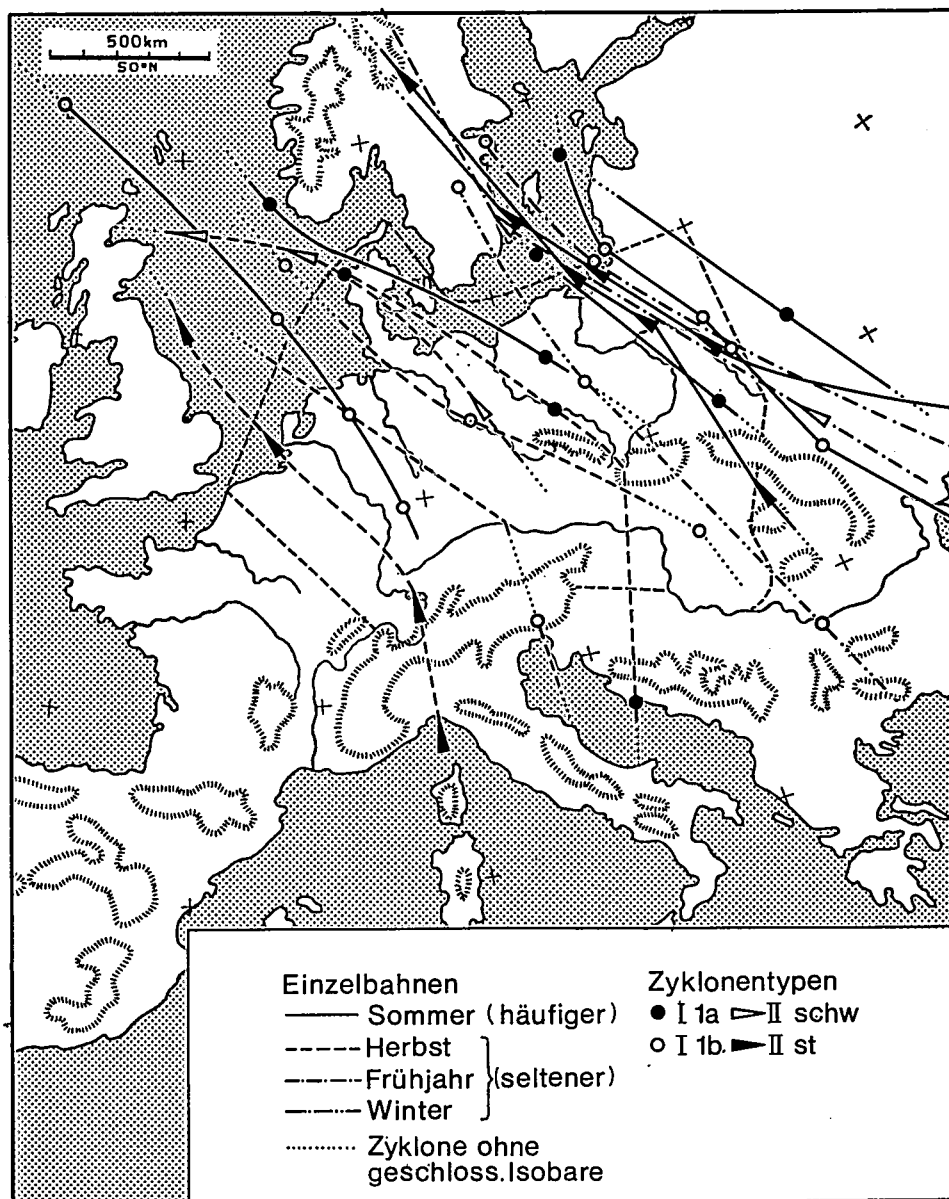


Abb. 25: Die SO-Bahn (1957—66)

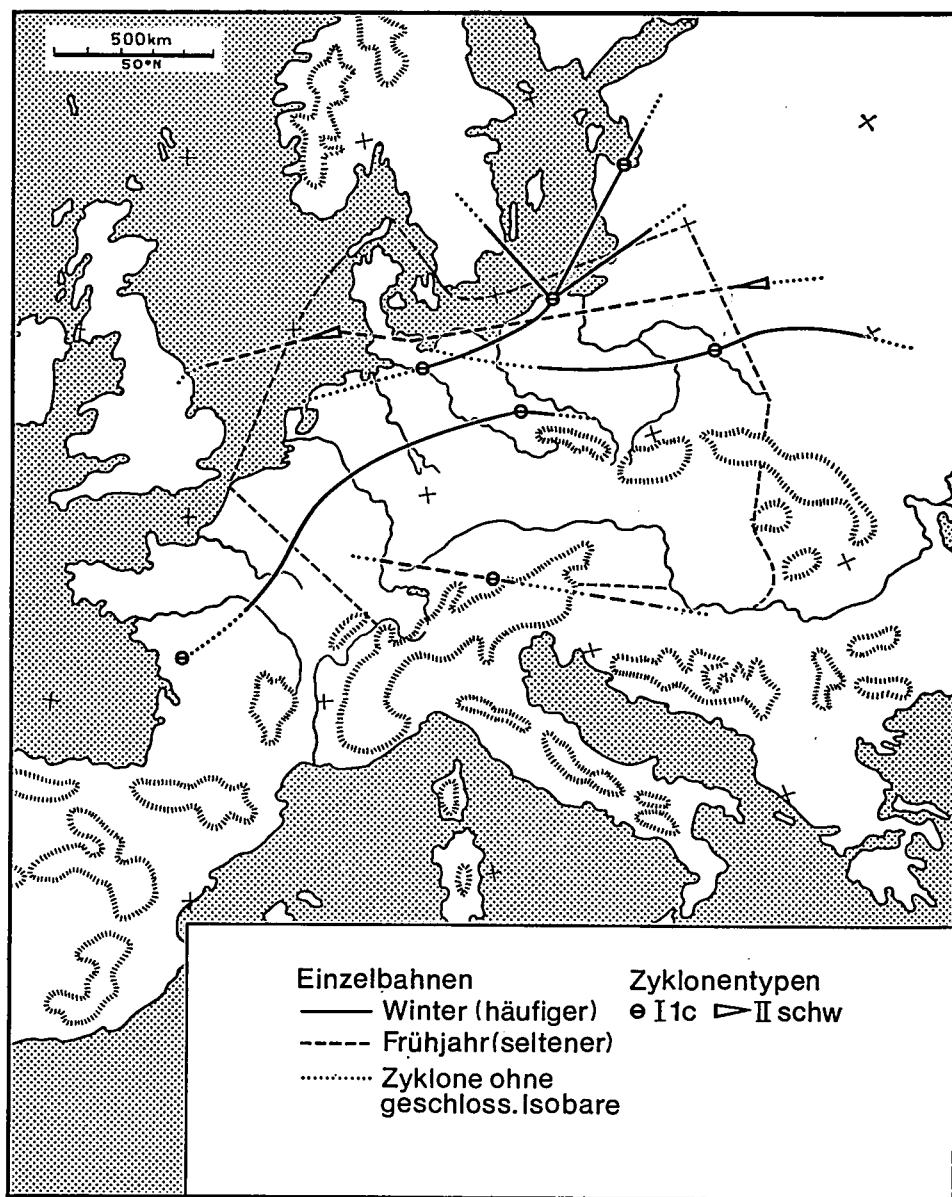


Abb. 26: Die O-Bahn (1957—66)

Bildet man die Typenklassen 1) I1a + I1b + I1c, 2) Rest und vergleicht dann ihren Anteil an der S- und SO-Bahn, ergibt sich der nach Yates korrigierte χ^2 -Koeffizient 3,85, der auf dem 5%-Niveau signifikant ist. Dabei liefert der unterschiedliche Anteil der Tiefs mit Höhenzyklone den größten Beitrag, während die Differenzen in der Häufigkeit der Frontalwellen minimal sind.

Die stärkere Bereitschaft zur Verwirbelung auf der SO-Bahn wird auch durch den Geschwindigkeitskoeffizienten von 1,8 — gegenüber 2,2 bei der S-Bahn — zum Ausdruck gebracht, der nur ganz geringfügig über dem der N-Bahn liegt.

Die Witterung zeichnet sich nordöstlich der Bahnen durch Trockenheit und hohe Temperaturen aus, während es auf der Südwestseite kühl und regnerisch ist.

Erwähnenswert sind ferner die in Begleitung der SE-Bahn im Sommer gelegentlich auftretenden Ostgewitter Scherhags (1931a, b), die sich an den erhitzte Kontinentalluft herantransportierenden Warmfronten bilden.

Bildet sich eine schleifzonenartige Anordnung aus, können erhebliche Niederschlagsmengen fallen — wie z. B. am 27. 9. 65 in Norddeutschland (vgl. Kohnke 1965): eine Deutschland von Westen überquerende Kaltfront wurde in Sachsen durch die Bildung eines flachen Tiefs rückläufig; das Tief wanderte mit der südöstlichen Höhenströmung nach Nordwesten, wobei an der schleifenden Front feuchtwarme Tropikluft auf die im Westen liegende Kaltluft aufglitt und in einem schmalen Streifen westlich der Front im südlichen Schleswig-Holstein mehr als 60 mm Niederschläge fielen. An manchen Orten wurden an diesem Tag sogar mehr als 100% der durchschnittlichen Niederschlagsmenge im September gemessen. Dabei trug wohl auch eine verstärkte Konvektion infolge einer dauernden Vertiefung des Tiefs erheblich zu den Starkregen bei. Mit dieser Vertiefung erfolgte gleichzeitig die Ausbildung eines Höhentiefs. Bei der geringen Frequentierung der SO-Bahn ist eine gesicherte Aussage über die Jahreszeitenverteilung kaum möglich. Beschränkt man sich jedoch auf eine Zweiteilung des Jahres in Sommer-Herbst und Winter-Frühjahr, ergibt sich ein χ^2 -Koeffizient von 5,4 als Maß für die Abweichung von einer angenommenen Gleichverteilung (in beiden Zeiträumen treten gleich viele Zyklone auf), der auf dem 5%-Niveau signifikant ist. Die größere Häufigkeit von Tiefdruckgebieten im Sommer und Herbst hat als wesentliche Ursache die Tendenz zur Bildung flacher sommerlicher Tiefs über dem Festland, die sich bei entsprechenden Luftmassengegensätzen leicht intensivieren können, wie das eben angeführte Beispiel gezeigt hat. Diese Tatsache wird auch dadurch bekräftigt, daß viele Zyklone der SO-Bahn ihren Ursprung im sommerheißen Südosteuropa haben.

Die O-Bahn (Abb. 26) tritt in Mitteleuropa am seltensten auf, da die sie bedingenden Voraussetzungen sich kaum einstellen. Von Osten nach Westen wandernde Tiefdruckgebiete sind an eine östliche Höhenströmung gebunden — also an eine gegenüber der normalen entgegengesetzte räumliche Anordnung der steuernden atmosphärischen Druckgebilde. Östliche Höhenströmung kann sich nur zwischen einem steuernden, echt blockierenden Hoch im Norden und einem Zentraltief bzw. Kaltlufttropfen im Süden einstellen, setzt also eine Temperaturabnahme in der Höhe von Norden nach Süden voraus. Damit die östliche Höhenströmung über eine längere Strecke erhalten bleiben kann, müssen das blockierende Hoch und der Kaltlufttropfen große räumliche Ausdehnung haben. Derartige für die O-Bahn in Mitteleuropa in Frage kommende Wetterlagen sind HNFz, HFz (nach Hess und Brezowsky) und ähnliche, bei denen einem umfangreichen, blockierenden skandinavischen Hoch ein ausgedehntes Höhentief im südlichen Mitteleuropa oder Mittelmeer gegenübersteht. Sie sind im Winter am häufigsten. Die Folge ist die

Konzentration der O-Bahn im Winter und frühen Frühjahr. Die Seltenheit der Zyklonen resultiert aus der ihre Entstehung behindernden, stabilisierenden Wirkung des ausgekühlten Festlandes.

Die Tiefdruckgebiete der O-Bahn sind nur schwach entwickelt. Sie entstehen an okklusionsartigen Grenzflächen, die das Höhentief umkreisen, und liefern langanhaltende Aufgleitniederschläge, die meist als Schnee fallen. Im allgemeinen ist es in Mitteleuropa bei derartigen Lagen im Vergleich zu den langjährigen Mittelwerten zu kalt.

Die geringe absolute Häufigkeit der O-Bahn läßt jedoch keine statistisch sicheren Schlüsse zu, die erst nach der Untersuchung eines längeren Zeitraums gezogen werden könnten. Insofern bleibt die Bildung einer O-Bahn problematisch und muß unter dem Vorbehalt eventueller späterer Änderungen gesehen werden.

d) Die zyklonal gekrümmten Bahnen

Die zyklonal gekrümmten Bahnen wurden unterteilt in die von Westen kommende und auf Südwesten umbiegende W-SW-Bahn und in die von Nordwesten kommenden Bahnen. Bei letzteren wurde zwischen der Trog-Bahn und der nach Osten auslaufenden NW-W-Bahn unterschieden.

Die W-SW-Bahn ähnelt vor dem Erreichen Mitteleuropas der W-Bahn, biegt aber im Gegensatz zu ihr scharf nach Nordosten um. Die Umbiegungsstelle liegt je nach der Stärke der auf Mitteleuropa gerichteten Frontalzone direkt am Rand des Kontinentes oder erst im Landinnern.

Das Abknicken der Bahnen kommt deutlich in dem Anteil der Tiefdrucktypen zum Ausdruck.

Tabelle 9 **Verteilung der W-SW-Bahn nach Zyklonentypen und Jahreszeiten (1957—66)**

Zyklonen- typ	Winter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Jahr
IIb	7	2	6	2	17
IV	—	—	1	1	2
II1a	1	—	1	1	3
II1b	—	—	2	—	2
II2a	—	—	1	—	1
II3a	3	3	1	1	8
II3b	—	—	—	1	1
II3c	—	1	1	—	2
Gesamt	11	6	13	6	36

Bildet man die 2 Typenklassen 1. Tiefdruckgebiete mit Höhentief, einschließlich des Typs IV, 2. Tiefdruckgebiete ohne Höhentief und vergleicht deren Anteil an der W- und W-SW-Bahn, ergibt sich der χ^2 -Koeffizient 8,11, der bei einem Freiheitsgrad auf dem 5%-Niveau signifikant ist. Die Frontalwellen stellen zwar bei beiden Bahnen etwa die Hälfte der Fälle, aber die Schleifzonentiefs fehlen bei der W-SW-Bahn völlig. Dagegen hat sie einen höheren Anteil von Tiefdruckgebieten mit

ausgeprägter Höhenzyklone. Besonders häufig und typisch sind die genetischen Tiefs, die erst während ihres Aufenthaltes in Mitteleuropa ein Höhentief ausbilden. Sie umfassen 1/4 der Fälle; ihr Anteil ist nur bei der wirren Bahn und der Nordbahn größer.

Die Richtungsänderung der Zyklonen der W-SW-Bahn erfolgt gleichzeitig mit der Verwirbelung. Letztere tritt dann ein, wenn sich hinter dem Tief ein kräftiges Hoch aufbaut, das polare Kaltluft weit nach Süden ausbrechen läßt und zur Trogbildung hinter der Zyklone Anlaß gibt. Auf der Vorderseite des Tiefdruckgebietes verstärkt die Warmluftzufuhr die Ausbildung eines Höhenkeils, so daß die gesamte Zirkulation eine Umstellung von der zonalen zur meridionalen Form erfährt und das Tiefdruckgebiet sich auf der Vorderseite des Troges nach Nordosten bis Norden wendet. Schnürt sich in dem Trog ein Höhentief ab, liegt ein genetisches Tief vor, das seine Geschwindigkeit verlangsamt und allmählich zu einem kalten Tief verwirbelt. Kommt es zu keiner Abschnürung, wandert das Tief mit kaum verminderter Geschwindigkeit auf der Trogvorderseite als Frontalwelle weiter. Der geschilderten synoptischen Situation entspricht, daß die Zyklonen der W-SW-Bahn meistens als Endglieder einer Zyklonenfamilie auftreten, hinter denen der Kaltluftausbruch nach Süden erfolgt. Gegenüber der W-Bahn zeichnet sich die W-SW-Bahn durch den kräftigen und länger anhaltenden Kälterückfall aus. Sie markiert gleichsam den Übergang vom schnellen (polaren) zum langsamen (subtropischen) Wettertyp Mügges (1938). Entsprechend häufig sind mit ihr Großwetterlagenübergänge von der zyklonalen Westlage zu einer zyklonalen Nordlage oder zum Trog Mitteleuropa verbunden.

Die räumliche Verteilung (vgl. Abb. 27 und 28) zeigt deutlich die Abhängigkeit der Lage der Häufungsgebiete und Umkehrpunkte von der Land-See-Verteilung: Die W-SW-Bahn ist in zwei Äste geteilt. Der erste führt vom Norden der Britischen Inseln nach Dänemark und biegt dort nach Nordnordosten um. Der andere erreicht Mitteleuropa vom Südrand Englands. Die Tiefdruckgebiete ändern ihre Wanderungsrichtung entweder schon an der Nordseeküste oder nach dem Übertritt aufs Festland. Das zwischen beiden Ästen liegende Gebiet bleibt praktisch frei. Der Grund dafür ist wahrscheinlich wieder in der Lage der Britischen Inseln zu suchen (wie bei der W-Bahn), deren „große“ Festlandausdehnung im mittleren Teil zu einer Verdünnung der Zyklonenbahnen in dem ostwärts anschließenden Gebiet führt. Außerdem ist aber noch ein zweiter Faktor zu beachten. Selbst wenn Zyklonen von Westen in dieses „Zwischengebiet“ gelangen, besteht für sie nur selten die „Notwendigkeit“, ihre Bewegungsrichtung zu ändern. Stattdessen werden sie bei Bevorzugung der Meeresflächen Mitteleuropa nach Osten durchwandern, da sich nach der leichten Überquerung der dänischen Halbinsel ja sofort wieder eine große Wasserfläche — die Ostsee — mit geringer Reibung als Weg anbietet. Dagegen sind die größeren Landmassen im Norden (Südschweden) und im Süden (Festland Mitteleuropas) schwieriger zu überwindende Hindernisse, die eine Richtungsänderung der Tiefdruckgebiete bewirken.

Während die Umkehrpunkte des nördlichen Astes sich in der Nähe der schwedischen Westküste häufen, ist ein solches Zentrum beim südlichen Ast nicht festzustellen. Nur die niederländische Küste ist ein sekundäres Verdichtungszentrum der Umkehrpunkte. Hier biegen vor allem die schwachen Tiefdruckgebiete um. Es handelt sich dabei nicht nur um die flachen Kalttiefe, sondern auch um schwache Frontalwellen, die, anders als die kräftigen, manchmal als Anfangsglieder einer Zyklonenfamilie ein vor ihnen liegendes kontinentales Hoch nicht abbauen können und unter allmählicher Auffüllung nach links ausweichen, dabei der für ihren Erhalt günstigeren Wasserfläche der Nordsee folgend.

Bei den beiden Ästen fällt ferner die stärkere Richtungsänderung des südlichen Astes auf, eine Folge der größeren Landmasse und deren stärkerer blockierender

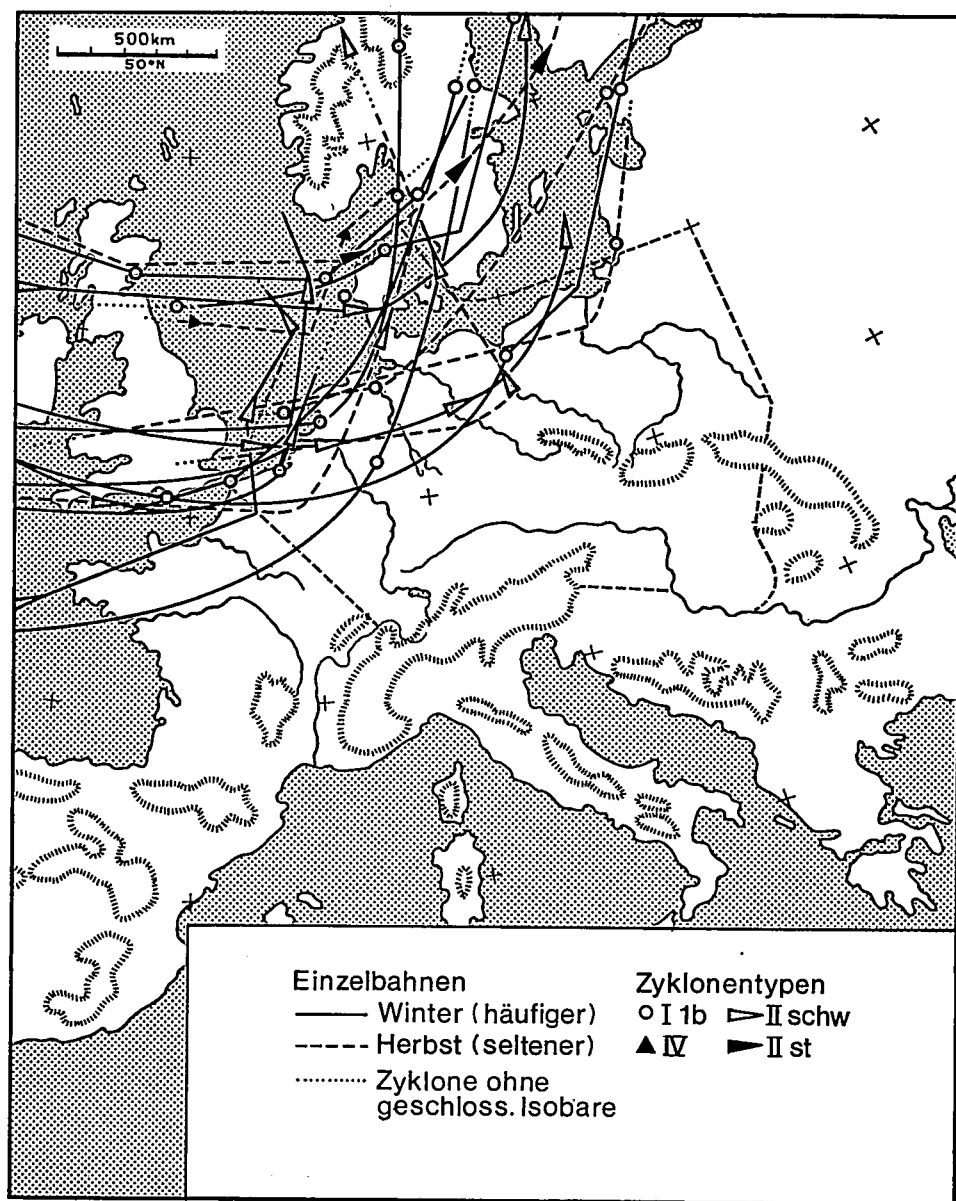


Abb. 27: Die W-SW-Bahn im Herbst und Winter (1957—66)

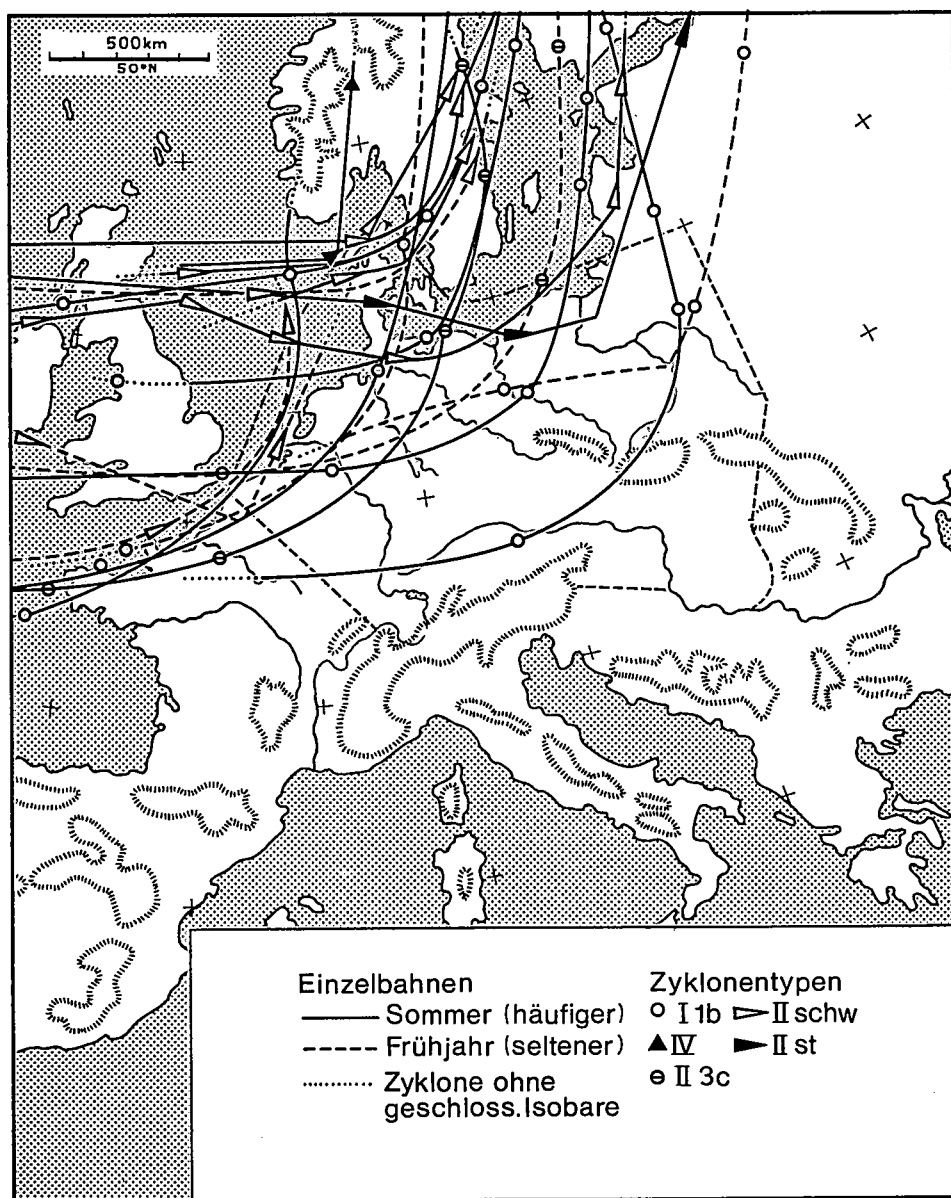


Abb. 28: Die W-SW-Bahn im Frühjahr und Sommer (1957—66)

Wirkung auf atlantische Tiefdruckgebiete im Süden. Unterschiede zwischen Sommer- und Winterhalbjahr hinsichtlich der Lage der Umkehrpunkte sind kaum festzustellen, sieht man davon ab, daß die Tiefdruckgebiete im Sommer dazu neigen, weiter landeinwärts zu dringen, während sie im Winter früher nach Norden umbiegen, eine Folge der mit der Abkühlung des Festlandes einhergehenden Stabilisierung der Luft im Winter, die den Zyklonen das Vordringen auf den Kontinent erschwert.

Mit dem Umbiegen und der Verwirbelung ist eine entsprechende Verlangsamung und Okkludierung der Zyklonen verbunden. Demgemäß erreicht der Geschwindigkeitskoeffizient der W-SW-Bahn nur 1,75 (bei der W-Bahn ist $GK = 2,2$) und liegt damit von allen bisher besprochenen Bahnen am niedrigsten. Die frühzeitige Okklusion spiegelt sich in der Struktur der Fronten wider: nur fünfmal tritt ein breiter Warmsektor auf; schnelle Okklusion findet in 15 Fällen statt, und siebenmal ist das Frontensystem schon bei Erreichen Mitteleuropas okkludiert.

Der Einfluß der W-SW-Bahn auf das Witterungsgeschehen ähnelt auf der Vorderseite dem der W-Bahn. Auf der Rückseite tritt jedoch stärkere Abkühlung ein (Trogdurchgang), das Rückseitenwetter hält auch länger an als bei der W-Bahn. Der Einflußbereich reicht im Gegensatz zur W-Bahn nicht so weit nach Osten und Südosten.

Ihr Häufigkeitsmaximum hat die W-SW-Bahn im Sommer und Winter, was gut mit den Maxima der Westlagen in diesen Jahreszeiten übereinstimmt. Während das Wintermaximum auf die Monate Dezember und Januar konzentriert ist (vgl. dazu die Verteilung der Winkelwestlage bei Hess und Brezowsky), verteilt sich das Sommermaximum gleichmäßig auf alle drei Sommermonate.

Die Abweichung der Jahreszeitenverteilung der W-SW-Bahn von einer angenommenen Gleichverteilung ist jedoch nicht signifikant, so daß für eine detailliertere Betrachtung ein längerer Untersuchungszeitraum gewählt werden muß.

Die Zyklonen der T r o g - B a h n sind noch stärker verwirbelt als die der W-SW-Bahn. Stellten bei letzterer die Frontalwellen noch die Hälfte aller Tiefs, liegt ihr Anteil bei der Trogbahn nur noch bei $\frac{1}{5}$ (Tab. 10).

Tabelle 10 **Verteilung der Trog-Bahn nach Zyklontypen und Jahreszeiten**
(1957—66)

Zyklonen- typ	Winter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Jahr
I1b	2	—	1	1	4
IV	1	—	—	—	1
II1a	4	1	—	—	5
II1b	—	2	—	2	4
II3a	1	—	2	—	3
II3b	—	—	—	1	1
II3c	1	—	—	1	2
Gesamt	9	3	3	5	20

Beim Vergleich der Anteile der Tiefdrucktypen an der Trog- und W-SW-Bahn konnten wegen der geringen absoluten Häufigkeiten nur die beiden Klassen 1) I1b

und 2) Rest gebildet werden. Das $ch^2 = 4,07$ ist auf dem 5%-Niveau signifikant. Der unterschiedliche Anteil der Frontalwellen fällt dabei am stärksten ins Gewicht. Innerhalb der Restklasse macht sich die Differenz der Häufigkeiten der Tiefdruckgebiete mit umfangreichem Höhentief am deutlichsten bemerkbar. Gegenüber der W-SW-Bahn sind bei der Trog-Bahn also eine größere Neigung zur Verwirbelung und eine stärkere Ausprägung der Höhentiefs festzustellen.

Die Zyklonen stammen zum überwiegenden Teil aus dem isländischen Raum und wandern in der Höhenströmung zwischen einem nach Norden vorgeschobenen mittelatlantischen Hoch (mit Höhenhochkeil) und einem ostatlantischen Höhentief (zwischen Island und Norwegen, mit Trogausläufer nach Süden) nach Südosten in die Deutsche Bucht (Abb. 29 und 30). Währenddessen wird ihnen aus dem nordatlantischen Kaltluftreservoir dauernd Kaltluft zugeführt, die hinter dem Tief keilförmig nach Süden vorstößt und zu seiner Vertiefung und Verwirbelung führt. Die Verwirbelung erfolgt um so schneller und intensiver, je stärker die Zirkulation über dem Atlantik meridionalisiert ist. Folglich treten Frontalwellen häufiger bei Nordwest- und schwach mäandrierenden Westlagen auf, die anderen Zyklontypen entwickeln sich besser bei Troglagen (z. B. bei von Westen langsam nach Mitteleuropa wanderndem Höhentrog).

Die meisten Tiefdruckgebiete sind schon vor Erreichen der Deutschen Bucht verwirbelt — der Anteil der Zentralzyklonen erreicht fast die Hälfte und ist bei keiner anderen Bahn so groß. Bei den genetischen Tiefs bildet sich das Höhentief erst im Umkehrpunkt oder noch später. Entsprechend erfolgt die stärkste Vertiefung bei den Zentraltiefs schon vor Erreichen Mitteleuropas, bei den genetischen Zyklonen und Frontalwellen erst in der Deutschen Bucht bzw. in der Nähe des Umkehrpunktes. Die Häufung der Umkehrpunkte in der Nordsee und Dänemark (Abb. 29 und 30) sich besser bei Troglagen (z. B. bei von Westen langsam nach Mitteleuropa wanderndem auch die Verwirbelung von Zyklonen in der Deutschen Bucht.

Allgemein zeichnen sich die Zyklonen der Trog-Bahn infolge der stetigen Vertiefung (Kaltluftzufuhr auf der Rückseite) durch ungewöhnlich niedrigen Luftdruck und große Druckgradienten aus. In $\frac{2}{3}$ aller Fälle kommt es in ihrem Gefolge in Mitteleuropa zu Stürmen. Diese Sturmhäufigkeit wird von keiner anderen Bahn erreicht. Da außerdem die Tiefdruckgebiete in der Deutschen Bucht häufig quasi-stationär werden, ist die Trog-Bahn prädestiniert für Nordseesturmfluten.

Es sei in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen, daß die Sturmfluten an der deutschen Ostseeküste andere Entstehungsursachen haben. Für sie ist nämlich entscheidend, daß nach einer Periode mit südwest- bis westlichen Winden und Wassereinstrom in die Ostsee der Wind auf Nord bis Nordost umschlägt, stürmisch auffrischt und die eingeströmten Wassermassen gegen die Südküste der Ostsee rückfluten. Besonders günstige Bahnen für Ostseesturmfluten sind daher

1. die Vb-Bahn, wenn ihr eine Westlage voranging und das Vb-Tief einen großen Druckgradienten aufweist,
2. die NW-W-Bahn, soweit die auf ihr wandernden Tiefdruckgebiete kräftig entwickelt sind und bei der Wanderung entlang der Ostseeküste ihre Geschwindigkeit stark verringern.

Der große Anteil der verwirbelten Zyklonen bedingt die niedrige Durchschnittsgeschwindigkeit der Trog-Bahn. Nur einmal kommt schnelle Wanderung vor, der Geschwindigkeitskoeffizient von 1,65 liegt eindeutig unter dem der W-SW-Bahn. Die besondere Stellung der Trog-Bahn spiegelt sich auch in der Struktur der Frontensysteme wider: langsames Okkludieren tritt dreimal, schnelles sechsmal auf. In zehn Fällen sind die Tiefdruckgebiete schon okkludiert bzw. haben nur eine sekundäre Kaltfront.

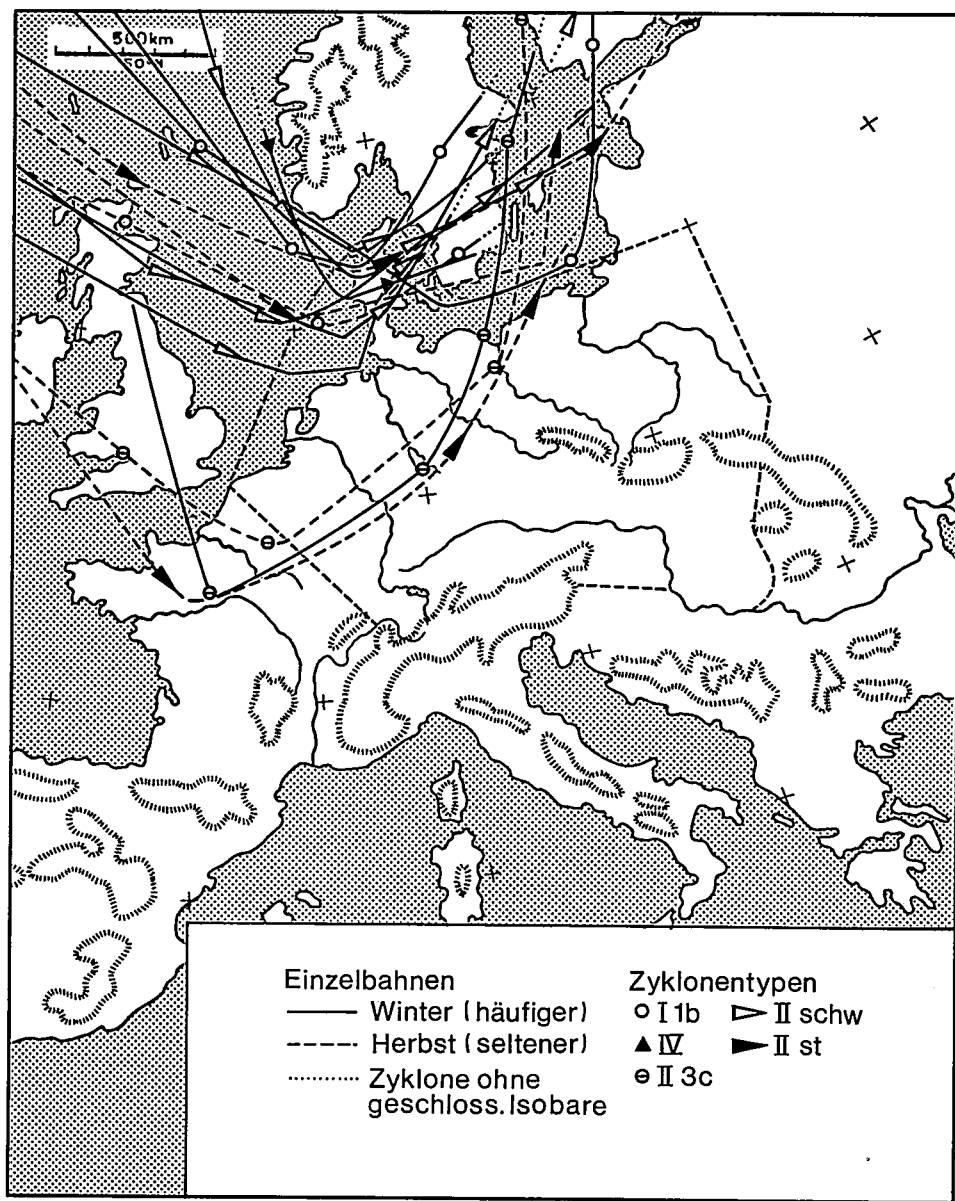


Abb. 29: Die Trog-Bahn im Herbst und Winter (1957—66)

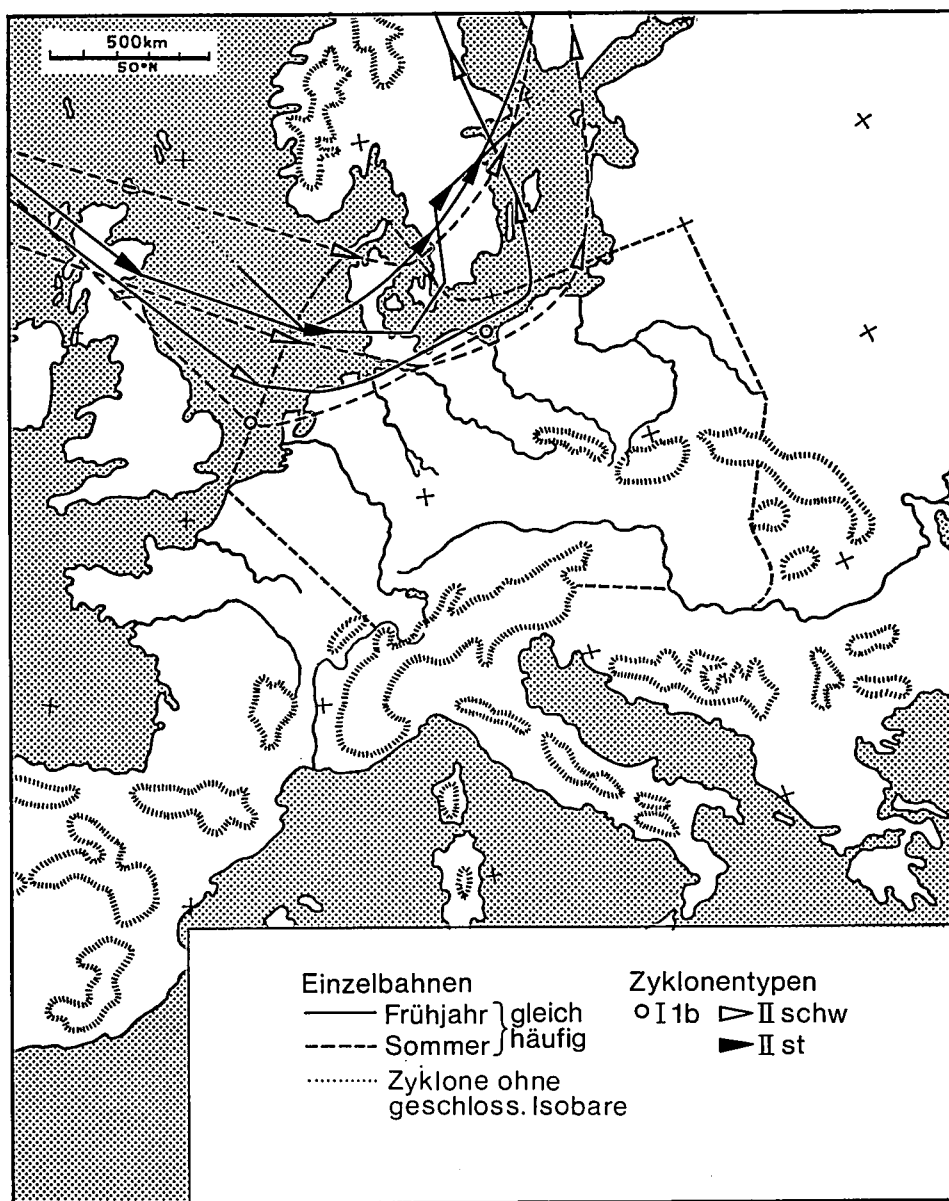


Abb. 30: Die Trog-Bahn im Frühjahr und Sommer (1957—66)

Das Witterungsgeschehen zeichnet sich außer durch Sturm durch die den nur kurz anhaltenden Aufgleitniederschlägen rasch folgenden kräftigen Schauer aus, die in der hereinbrechenden maritimen Polar- bzw. Arktisluft längere Zeit anhalten, und mit denen kräftige Abkühlung einhergeht. Die Niederschläge fallen im Winter meist als Schnee, der aber im Flachland in der Regel zu keiner geschlossenen Schneedecke führt. Der Einfluß der Trog-Bahn nimmt zwar nach Süden ab — besonders hinsichtlich der Windstärke —, verstärkt sich aber örtlich im Nordstau der Gebirge.

Der nord- bis nordwestliche Kaltlufteinbruch reicht im allgemeinen bis ins Mittelmeer und induziert dort die schon erwähnten orographischen Zyklonen.

Die jahreszeitliche Verteilung zeigt eine Konzentration im Spätherbst und Winter: 3/5 aller Fälle liegen zwischen Mitte November und Ende Februar. Jedoch ist diese Häufung wegen der geringen absoluten Häufigkeit für eine statistische Prüfung nicht stark genug. Dazu müßte ein längerer Zeitraum untersucht werden.

Die Zyklonen der NW-W-Bahn wandern vom Nordmeer zwischen Skandinavien und Schottland nach Norddeutschland und laufen hier allmählich nach Osten aus (Abb. 31).

Die geringere Krümmung der NW-W- gegenüber der Trog-Bahn läßt auf eine schwächere Verwirbelungstendenz schließen. Das kommt auch deutlich im Anteil der Tiefdrucktypen zum Ausdruck. (Tab. 11).

Tabelle 11 **Verteilung der NW-W-Bahn nach Zyklontypen und Jahreszeiten (1957—66)**

Zyklontyp	Winter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Jahr
I1b	3	2	—	2	7
IV	2	—	—	—	2
II1a	—	1	1	—	2
II1b	1	—	—	—	1
II2a	—	—	1	—	1
II3a	—	3	—	—	3
Gesamt	6	6	2	2	16

Wegen der geringen absoluten Häufigkeit der Trog- und NW-W-Bahn sind signifikante Unterschiede zwischen beiden kaum nachzuweisen. Immerhin ergab sich bei der Klasseneinteilung 1) I1b + IV, 2) Rest für den Vergleich der beiden Bahnen bezüglich der Verteilung der Klassen der χ^2 -Wert 3,65, der zwar nicht auf dem 5%-, aber wenigstens auf dem 10%-Niveau signifikant ist. Daher scheint es gerechtfertigt, die NW-W-Bahn als eigenständige Bahn beizubehalten, wenn auch mit den gleichen Vorbehalten wie bei der O-Bahn.

Die Tiefdruckgebiete der NW-W-Bahn folgen der Höhenströmung zwischen einem nach Norden verschobenen, aber nicht blockierenden atlantischen Hoch und einem Höhentief über Skandinavien mit Trogausläufer nach Süden. In diesen Trog laufen sie ein, ohne die Höhenströmung wesentlich zu deformieren. Sie entwickeln sich selten zu ausgedehnten Zentraltiefs, verwirbeln andererseits aber weitaus häufiger als die Zyklonen der NW-Bahn. Beim Vergleich mit letzterer ergab sich immerhin der

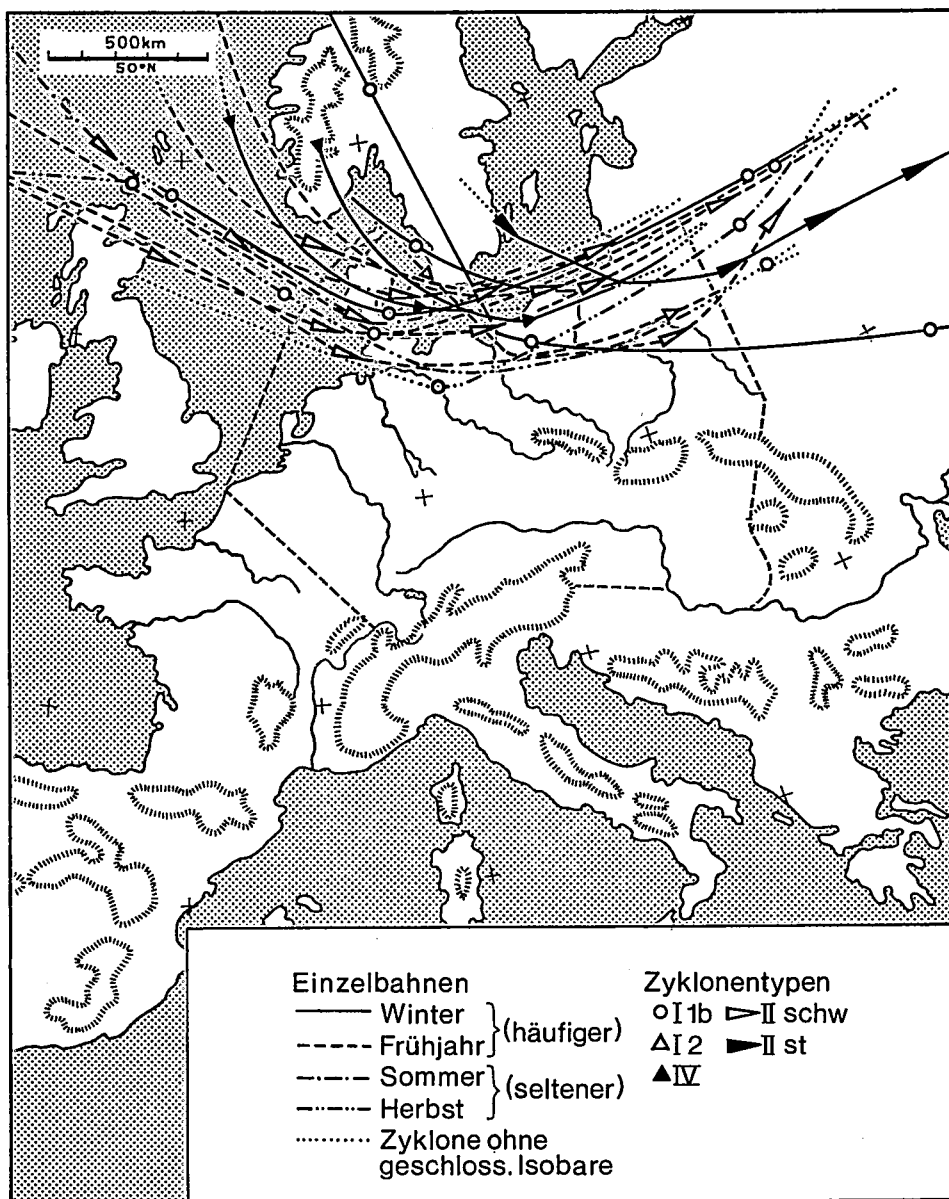


Abb. 31: Die NW-W-Bahn (1957—66)

nach Yates korrigierte χ^2 -Koeffizient 6,13 — bei den beiden Klassen 1) IIa + IIb + II2 und 2) Rest —, der auf dem 5 %-Niveau signifikant ist. Die NW-W-Bahn kann als verbindendes Glied zwischen NW- und Trog-Bahn angesehen werden. Einerseits erfahren ihre Zyklonen eine stärkere Kaltluftzufuhr auf der Rückseite als diejenigen der NW-Bahn — letztere werden überdies schneller von dem rasch folgenden Warmlufthoch durch überlagernden Druckanstieg aufgefüllt. Andererseits ist die Kaltluftzufuhr auf ihrer Rückseite aber auch nicht so stark, daß sie die gleiche Verwirbelungstendenz wie die Zyklonen der Trog-Bahn aufweisen. Entsprechendes gilt für die Geschwindigkeit und die Struktur der Fronten. Der Geschwindigkeitskoeffizient von 2,06 liegt zwischen denen der NW- (2,39) und der Trog-Bahn (1,65). Bei den Frontensystemen erreichen die Typen „breiter Warmsektor“ und „langsam okkludierend“ etwa einen Anteil von 25%, der Rest entfällt auf die übrigen.

Typisch für die NW-W-Bahn ist das verhältnismäßig frühe Absterben der Tiefdruckgebiete. Nur sieben von ihnen kommen deutlich mit geschlossenen Isobaren über die Ostgrenze des Untersuchungsgebietes hinaus. Die übrigen sterben im Bereich der Grenze kurz nach Erreichen des Trog ab.

Die Witterung ist zu allen Jahreszeiten, besonders im Sommer, zu kühl, jedoch nicht so kalt wie bei der Trog-Bahn, da auf der Rückseite der Zyklonen nur maritime Polarluft, aber keine Arktisluft nach Mitteleuropa einströmt. Der Einfluß der NW-W-Bahn nimmt nach Süden ab, reicht jedoch weit nach Osten.

Die Niederschläge fallen sowohl als länger anhaltende Aufgleitregen als auch als Schauer, die im Nordweststau der Gebirge ebenfalls längere Zeit andauern können. Schneefälle treten nur im Winter in den Mittelgebirgen auf.

Die jahreszeitliche Verteilung zeigt die größte Häufigkeit im Spätwinter und Frühjahr — 10 Tiefdruckgebiete entfallen auf die Monate Februar bis Mai. Eine signifikante Abweichung von einer angenommenen Gleichverteilung auf die Jahreszeiten ist bei der geringen Zahl der Einzelbahnen jedoch nicht festzustellen.

e) Die wirren Tiefdruckgebiete

Die wirren Tiefdruckgebiete wurden in 2 Gruppen eingeteilt: in die mit ausgeprägtem Höhentief und die nur am Boden ausgebildeten. Die erste Gruppe umfaßt also die Tiefdrucktypen II1a, II1b, II2a, II2b, II3a, II3b und II3c, deren Anteile aus Tabelle 12 ersichtlich sind.

Tabelle 12 Verteilung der Bahn Wirr-Tief nach Zyklontypen und Jahreszeiten (1957—66)

Zyklonen- typ	Winter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Jahr
II1a	—	2	1	1	4
II1b	3	1	9	4	17
II2a	1	2	1	1	5
II2b	1	1	2	—	4
II3a	3	3	4	—	10
II3b	4	6	2	5	17
II3c	1	1	—	—	2
Gesamt	13	16	19	11	59

Bildet man die beiden Klassen 1) I1b + IV + II schwach, 2) II stark + II3c und vergleicht ihren Anteil bei der wirren und der Trog-Bahn (letztere weist von allen bisherigen Bahnen die stärkste Verwirbelungstendenz auf), ergibt sich der χ^2 -Koeffizient 6,67, der auf dem 5%-Niveau signifikant ist.

Die Gruppe Wirr-Tief unterscheidet sich von allen anderen Bahnen durch den auffallend hohen Anteil der Zyklonen mit umfangreichem Höhentief. Er erreicht fast 2/3. Das läßt darauf schließen, daß gerade bei den Zyklonen mit umfangreichem Höhentief die Tendenz zu einer wirren Bahn am stärksten ausgeprägt ist. Das geht auch aus der Entstehungsgeschichte der wirr wandernden Tiefs hervor. Hat sich zu einem Bodentief durch intensive Verwirbelungsprozesse eine Höhenzyklone ausgebildet, so nähern sich beide im allgemeinen allmählich, wobei sie sich gegenseitig umkreisen. Das Höhentief bewegt sich in der Verlagerungsrichtung der Kaltluft und fällt dabei mit dem troposphärischen Kältezentrum zusammen, das von der Strömung in den unteren Schichten gesteuert wird. Das Bodentief folgt der Höhenströmung, weicht aus ihr aber nach links aus und wandert in das Höhentief hinein. Mit dieser gegenseitigen Kreissteuerung ist eine stetige Richtungsänderung verbunden, falls nicht von außen einwirkende Impulse diesen Prozeß stören. Derartige Impulse sind umso seltener und schwächer, je abgeschlossener das System ist, d. h. je umfangreicher das Höhentief ist. Die Abgeschlossenheit wächst also mit der Intensität der Höhenzyklone.

Während der gegenseitigen Umkreisung des Boden- und Höhentiefkerns und ihrer Annäherung wird die Wanderungsgeschwindigkeit geringer. Liegen endlich beide Kerne senkrecht übereinander, füllt sich das Bodentief an Ort und Stelle auf, und der Kaltlufttropfen bleibt zurück.

Damit tritt als zweites wesentliches Kriterium für eine wirre Bahn neben die stetige Richtungsänderung noch die geringe Wanderungsgeschwindigkeit hinzu, aus der wiederum der langdauernde Einfluß der wirren Bahnen zu erklären ist. So liegt der Geschwindigkeitskoeffizient der wirren Bahn mit 1,19 beträchtlich unter dem der Trog-Bahn (1,65). Die Herkunft der wirren Zyklonen ist sehr unterschiedlich. Folgende Möglichkeiten sind am häufigsten:

1. Ein kräftiges Tiefdruckgebiet bewegt sich aus westlicher Richtung nach Mitteleuropa und verwirbelt während der Wanderung. Es handelt sich dabei meist um Zentraltiefs (falls die vertikale Achse schon vor der Ankunft in Mitteleuropa fast senkrecht ist) oder um genetische Zyklonen. Letztere erreichen Mitteleuropa frischer und sind noch nicht so stark okkludiert. Die Witterung ähnelt zunächst der bei den Zyklonen der W-Bahn, ihr Ablauf verlangsamt sich aber zusehends und geht zu den für Zentraltiefs typischen Schlechtwetterlagen über. Ein Beispiel für eine solche Entwicklung ist das Tiefdruckgebiet vom 8. bis 15. 10. 1960 (Abb. 32), das am 8. noch als Frontalwelle, vom 9. bis 11. als Zentraltief und vom 12. bis 15. als Kaltlufttief ausgeprägt war.
2. Nach einem hochreichenden Einbruch atlantischer oder skandinavischer Kaltluft wurde in Mitteleuropa ein Kaltlufttropfen abgeschnürt, auf dessen Ostseite ein Vb-artiges Tief zunächst nach Norden und später nach Westen wandert und sich dabei mit dem Höhentief vereinigt. Es handelt sich in diesem Fall um die sogenannte retrograde Vb-Bahn. Ihr zyklonaler Einfluß reicht weiter nach Westen als der der normalen Vb-Bahn, wobei dem Höhentief für die Witterungsgestaltung eine besondere Bedeutung zukommt.

Eine typische retrograde Vb-Bahn ist in Abbildung 33 dargestellt. Daraus ist deutlich zu sehen, daß die Änderung der Wanderungsrichtung des Tiefs an die Drehung der Höhentrogachse um etwa 90° gekoppelt ist, wobei sich in dem Trog ein kleines Höhentief abschnürt.

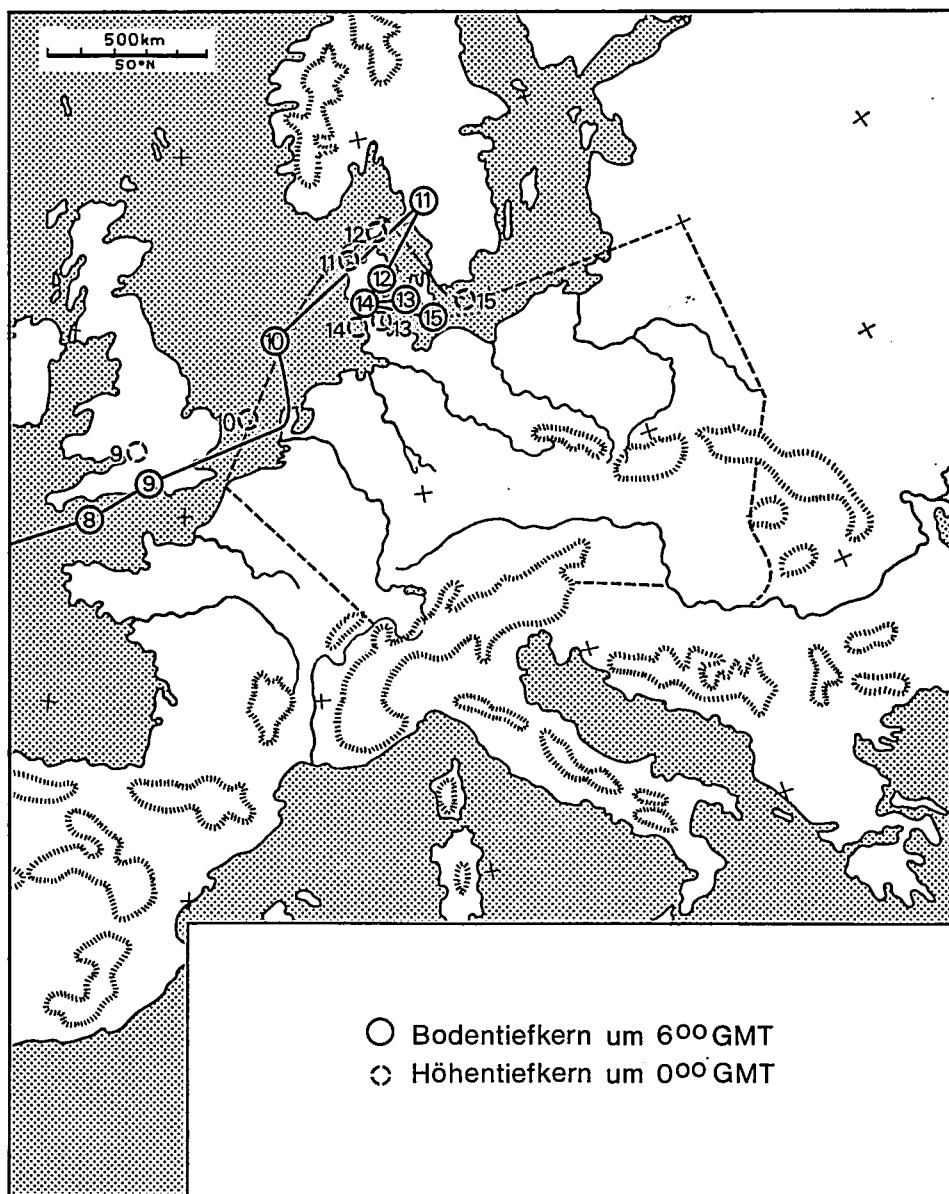


Abb. 32: Das Tiefdruckgebiet vom 8. 10. — 15. 10. 1960

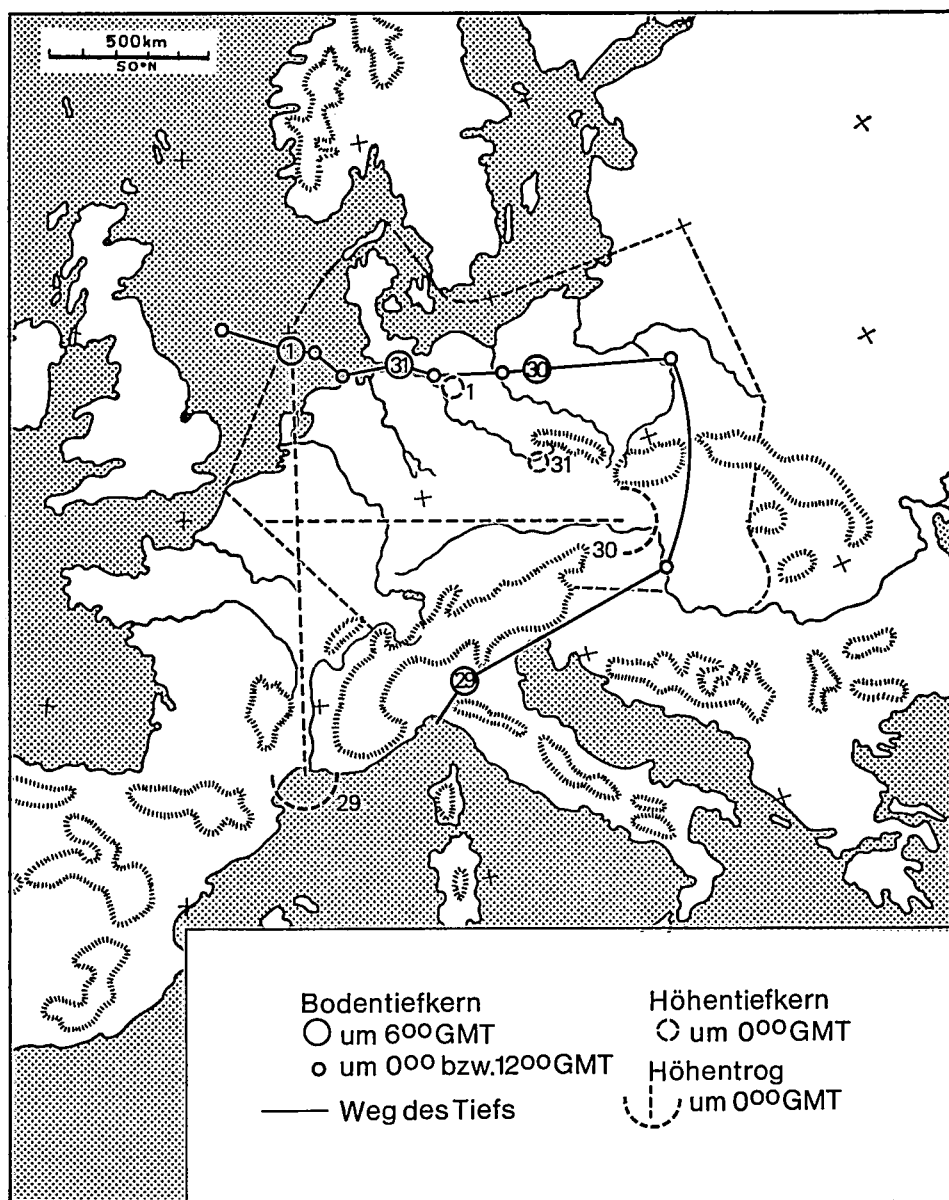


Abb. 33: Das Tiefdruckgebiet vom 29. 5. — 1. 6. 1961

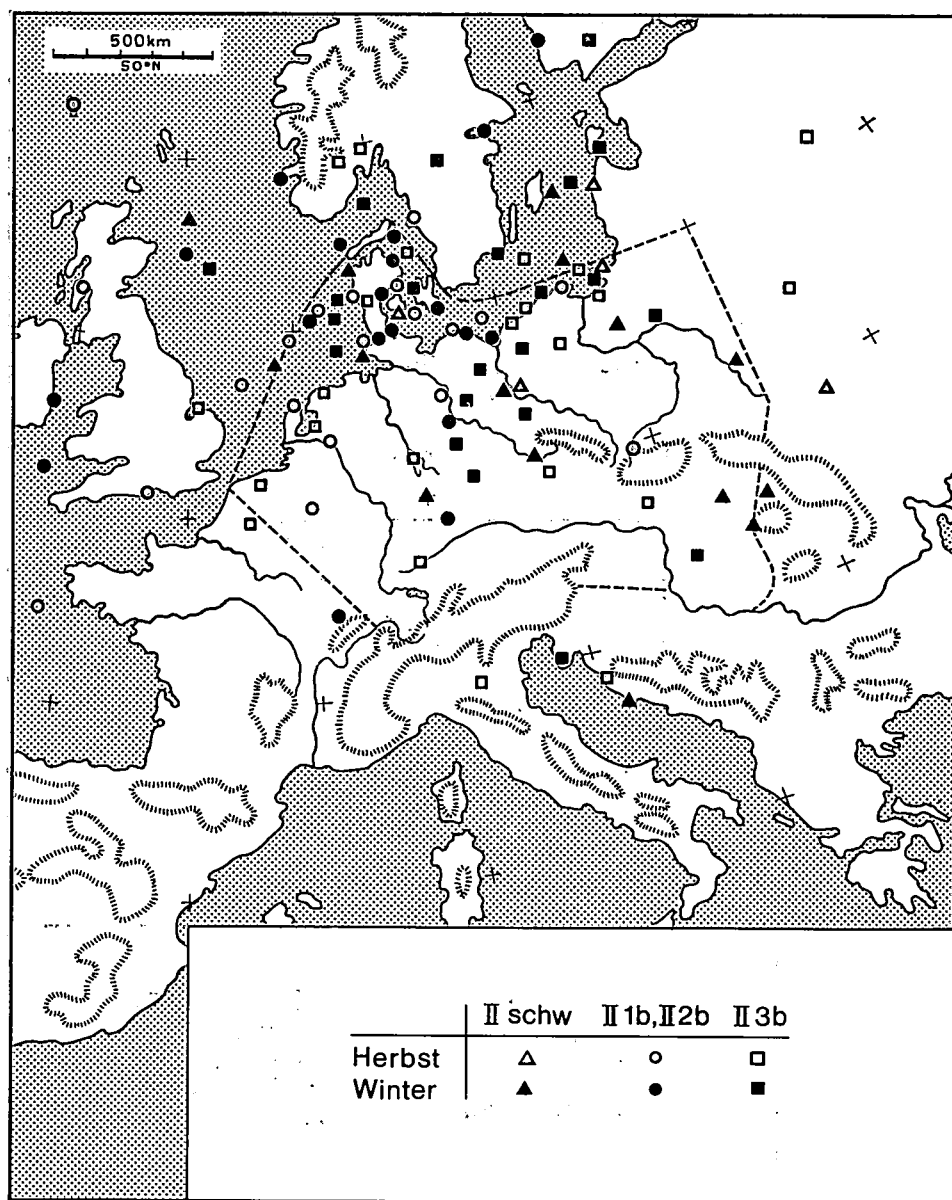


Abb. 34: Die Bahn Wirt-Tief im Herbst und Winter (1957—66)

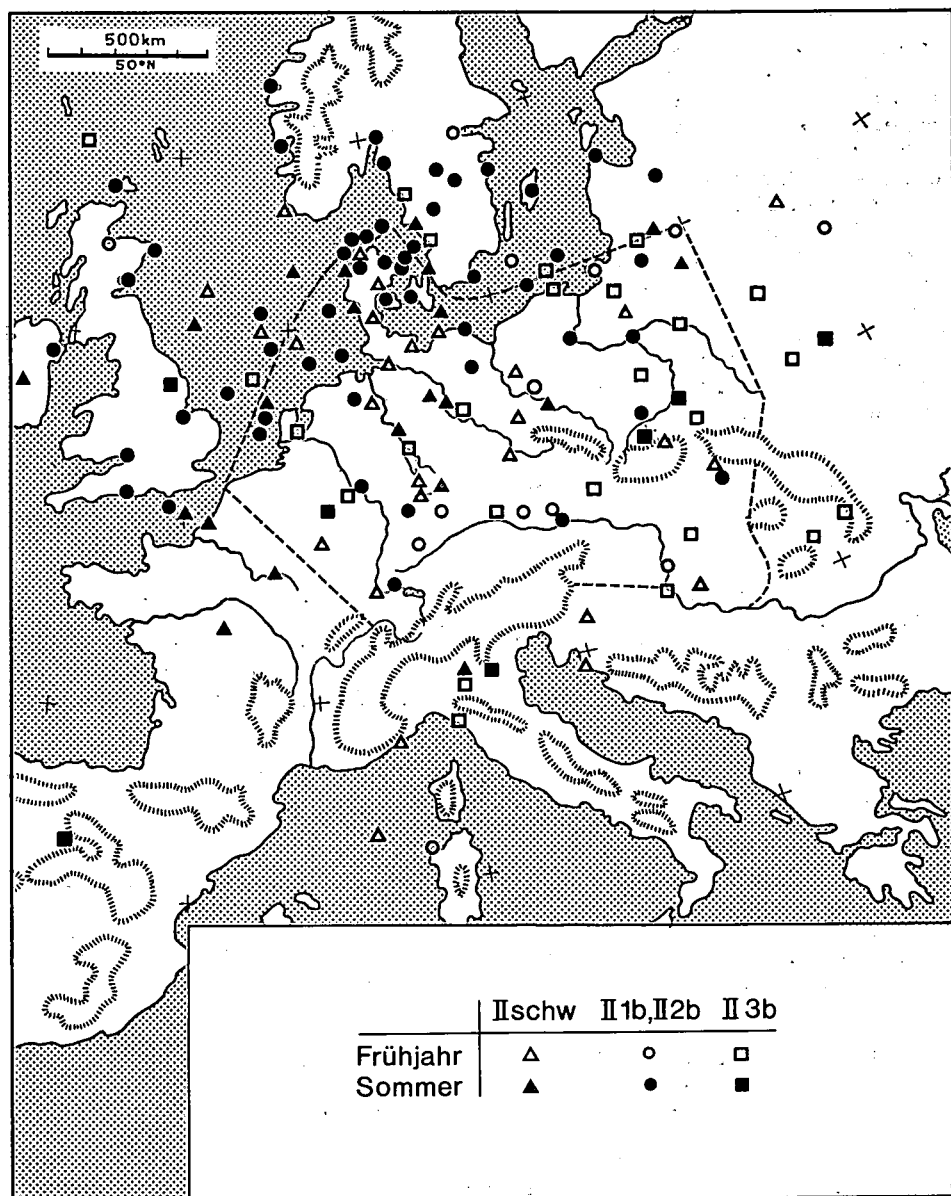


Abb. 35: Die Bahn Wirt-Tief im Frühjahr und Sommer (1957—66)

3. Wenn Kaltluft aus dem nordatlantischen Raum an der skandinavischen Westküste nach Süden vorstößt, bildet sich unter ihr am Boden (besonders über relativ — zur Luft — warmem Wasser) durch vertikalen Impulsaustausch häufig ein Bodentief aus, zu dessen Entstehung auch die orographischen Verhältnisse an der Südspitze Norwegens beitragen. Häufig wird die Zyklogenese durch eine schwache Front begünstigt. Schnürt sich in der Kaltluft ein Höhentief ab, entsteht ein Kaltlufttief, in dem keine Luftmassenunterschiede mehr vorhanden sind. Diese echten Kaltlufttiefs sind am Boden meist schwach ausgeprägt, können jedoch in der Höhe außerordentliche Intensität erreichen. Ein eindrucksvolles Beispiel für eine derartige Entwicklung stellt das Tiefdruckgebiet vom 6. 1. bis 13. 1. 1964 dar, dessen Genese von Roediger (1964) ausführlich beschrieben wurde. Besonders auffallend an diesem Beispiel ist, daß sich das Bodentief (Kerndruck 1025 mb) mitten in einem mitteleuropäischen Hochdruckgebiet von über 1030 mb bilden konnte. Außerdem veranschaulicht seine Wanderung den komplizierten Steuerungsmechanismus (z. B. die Bedeutung der Asymmetrie der Höhenströmung) einer abgeschlossenen und sich „fast selbst steuernden“ Zykclone.

Welche der drei aufgezeigten Möglichkeiten man auch betrachtet, für eine wirre Bahn ist immer ein hochreichender Kaltluftausbruch mit anschließender Abschnürung des Kaltluftkörpers notwendig. Darum treten wirre Tiefs meist bei blockierenden Nordmeer- oder fennoskandischen Antizyklonen auf.

Die wirren Tiefs bringen zu allen Jahreszeiten starke Abkühlung und langanhaltende Niederschläge — im Winter überwiegend als Schnee —, die zum Teil durch Aufgleiten wärmerer Luft auf die Kaltluft ausgefällt werden, aber auch als Schauer fallen. Besonders stark sind die Niederschläge im Sommer, wenn die Tendenz zur Konvektion in der labil geschichteten Kaltluft durch die Erwärmung vom Untergrund noch verstärkt wird.

Das Auftreten der wirren Tiefs ist nicht an eine bestimmte Jahreszeit gebunden (Abb. 34 und 35). Vielmehr verteilen sie sich ziemlich gleichmäßig auf das ganze Jahr, wenn auch im Frühjahr und Sommer Häufigkeitsmaxima liegen. Das Sommermaximum hat entscheidenden Anteil am mitteleuropäischen „Sommermonsun“. Betrachtet man die Verteilung auf die einzelnen Monate, fällt das Januarmaximum auf, was gut mit dem Häufigkeitsmaximum der Großwetterlage „Tief Mitteleuropa“ (vgl. Hess und Brezowsky 1952, S. 9) zu gleicher Zeit übereinstimmt. Die Jahreszeiten- bzw. Monatsmaxima konnten jedoch trotz der großen absoluten Häufigkeit der wirren Bahn nicht gesichert werden, was für eine angenäherte Gleichverteilung spricht.

Hinsichtlich der räumlichen Verteilung nimmt das Frühjahr eine Sonderstellung ein. Während sich in den übrigen Jahreszeiten die Zyklonenkerne in der Nordsee, Ostsee und den angrenzenden Festlandgebieten (insbesondere in Dänemark) häufen, sind sie im Frühjahr gleichmäßiger auf den gesamten Untersuchungsraum verteilt. Die Tiefdrucktätigkeit hat sich also jetzt mehr nach Süden verschoben, eine Folge der Bevorzugung nördlicher Bewegungsrichtungen im Frühjahr.

Die flachen wirren Tiefdruckgebiete haben im Gegensatz zur vorigen Gruppe kein Höhentief ausgebildet. Sie wurden je nach ihrer Entstehungsursache in zwei Gruppen unterteilt.

Die erste umfaßt flache Wellenstörungen, die um ein ausgeprägtes Höhentief kreisförmig gesteuert werden. Es handelt sich dabei um Tiefdruckgebiete, die nicht nur an Bodenfronten, sondern ebenso an Höhenwarmfronten oder Okklusionen

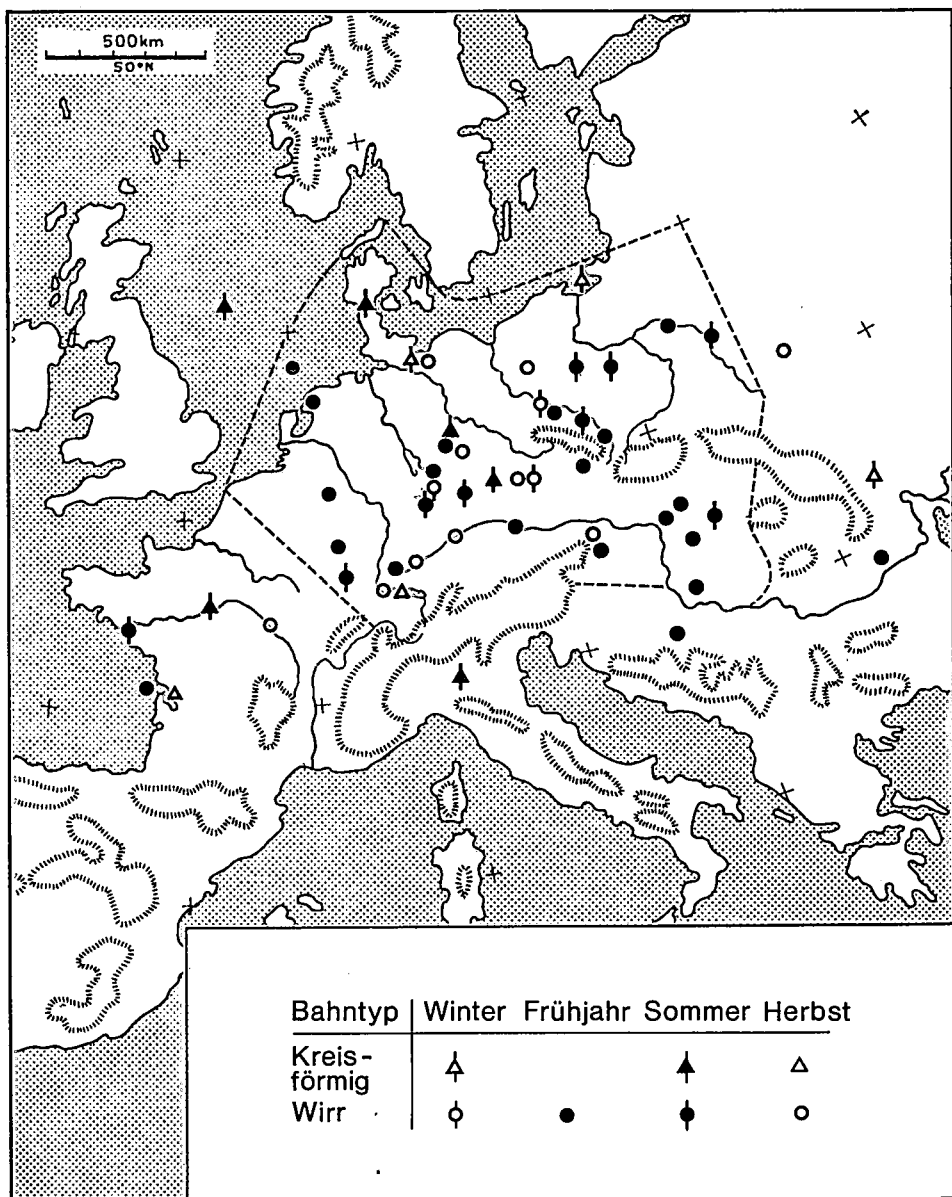


Abb. 36: Die Bahn Wirr-Flach (1957—66)

gebunden sein können. Die häufig nur in der Höhe vorhandenen Störungslinien kennzeichnen den Rand der Kaltlufttropfen, an dem die Warmluftadvektion in der Höhe vor sich geht. Die kreisförmig gesteuerten Tiefdruckgebiete sind zwar selten, liefern aber langanhaltende, ergiebige Niederschläge, ohne daß am Boden Luftmassenunterschiede zu erkennen sind. Da sich die „kreisförmigen“ Tiefs manchmal — wenn auch erst außerhalb Mitteleuropas — mit dem Kaltlufttropfen vereinigen, wurden einige von ihnen als genetische Tiefs eingeordnet (siehe Abb. 63).

Die zweite Gruppe tritt bei ganz flacher Höhen- und Bodendruckverteilung mit minimalem Gradienten auf, gehört also dem „marais barométrique“ an. Da eine richtungskonstante Höhenströmung fehlt, ändern die Tiefdruckgebiete dauernd ihre Bewegungsrichtung. Der geringe Druckgradient bewirkt die langsame Wanderung. Entsprechend beträgt der Geschwindigkeitskoeffizient nur 1,0 — alle Zyklonen dieser Gruppe wandern also langsam — und ist damit von allen Bahnen am geringsten.

Diese flachen wirren Tiefs entstehen bevorzugt nach einer Periode mit Kaltluftzufuhr nach Mitteleuropa, ohne daß es zur Abschnürung eines Kaltlufttropfens kommt. Wird die Kaltluftzufuhr allmählich abgestoppt und erwärmt sich die Luft bei zunehmender Einstrahlung, so wird die Druckverteilung in der Höhe zusehends flacher, wobei noch einige kleine Kaltluftinseln zurückbleiben. Die flachen wirren Tiefs bilden sich unter diesen Kaltluftinseln, die in der absoluten Topographie nicht abgeschlossen sind, oder an alten, schon okkludierten Luftmassengrenzen, die nach einem zum Stillstand gekommenen Kaltlufteinbruch übrigbleiben und sich langsam auflösen. Dabei ist die Bodenerwärmung infolge der sommerlichen Sonneneinstrahlung ein wichtiger Faktor ihrer Entstehung. Demgemäß sind sie vorwiegend auf dem Festland konzentriert (Abb. 36). Die labile Schichtung der Luft, die am Boden schon erwärmt, in der Höhe aber noch kalt ist, hat die intensiven und ergiebigen Niederschläge zur Folge, die meistens mit Gewittern verbunden sind. Die flachen wirren Tiefs können somit als typische Gewittertiefs bezeichnet werden. Die Niederschlagsmengen sind von Ort zu Ort stark unterschiedlich.

Von den 13 Fällen dieser Gruppe entfallen fast die Hälfte, nämlich 6, auf die zweite Maihälfte. In diesem Monat sind flache Druckverteilungen nach vorheriger skandinavischer Kaltluftzufuhr häufig. Außerdem ist die Sonneneinstrahlung schon kräftig genug, um zur Bildung von „Wärmetiefs“ beitragen zu können. Die Tendenz zu flacher Druckverteilung besteht zwar auch Ende September. Jedoch überwiegt jetzt antizyklonale Druckverteilung, und die Einstrahlung ist schon vermindert, so daß von Mitte September bis Mitte Oktober nur drei flache wirre Tiefs gezählt wurden. Die Jahresverteilung weist also zwei Maxima auf: das Hauptmaximum im Mai und ein Nebenmaximum Ende September bis Anfang Oktober.

Legt man die meteorologischen Jahreszeiten zugrunde, läßt sich keine signifikante Abweichung von einer angenommenen Gleichverteilung nachweisen. Dazu ist der Beobachtungszeitraum zu kurz.

f) Die Lagetypen der Bodentiefdruckgebiete

Es handelt sich bei dieser Klasse um Tiefdruckgebiete, die nur zu einem der drei Termine eine geschlossene Isobare aufwiesen und für die eine Bahnbestimmung nicht sinnvoll ist. Letzteres gilt auch für die Typen III und IV, die während einer längeren Zeit erhalten sein können. Die jahreszeitliche Verteilung der verschiedenen Typen gibt Tabelle 13 wieder.

**Tabelle 13 Verteilung der Lagetypen der Bodentiefdruckgebiete nach Jahreszeiten
(1957—66)**

Lagetypp	Winter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Jahr
V1a	16	10	19	5	50
V1a-S	3	14	12	20	49
V1b	4	31	37	16	88
V2	15	58	67	27	167
III	6	4	7	14	31
IV	18	6	4	6	34

Bei den Schleifzonentiefs wurden die bei süd- bis östlicher Höhenströmung auftretenden von den übrigen getrennt, um eine feinere Differenzierung der jahreszeitlichen Verteilung zu ermöglichen.

Die V1a-Tiefs haben ein Hauptmaximum im Sommer und ein nur wenig schwächer ausgeprägtes Nebenmaximum im Winter. Ihr Minimum liegt eindeutig im Herbst. Sie bilden sich meist bei Südwest- bis Nordwestlagen. Daher ist ihre Häufung im Sommer und Winter verständlich. Die das Entstehen flacher Tiefdruckgebiete begünstigende verstärkte sommerliche Einstrahlung bewirkt, daß der Sommeranteil etwas größer ist. Die Bedeutung der Erwärmung des Festlandes im Sommer kommt auch beim Vergleich der Abbildungen 37 und 38 zum Ausdruck. Während im Herbst und Winter die Tiefs sich gleichmäßig über ganz Mitteleuropa verteilen, häufen sie sich im Frühjahr und Sommer südlich des 50. Breitengrades.

Die V1a-Tiefdruckgebiete zeichnen sich durch kleinräumige Schlechtwettergebiete mit länger anhaltenden Aufgleitniederschlägen aus. Der entscheidende wetterwirksame Faktor sind aber nicht sie, sondern die schleifende Luftmassengrenze, an der sie entstehen.

Die bei Süd- bis Ostlagen auftretenden Schleifzonentiefs V1a-S haben eine andere räumliche und jahreszeitliche Verteilung (vgl. Abb. 37 und 38). Zunächst fällt ihr Häufigkeitsgipfel im Herbst auf, der auf dem 5 %-Niveau signifikant ist und an dem besonders die Monate Oktober und November mit 7 bzw. 8 Fällen einen hohen Anteil haben. Noch auffälliger ist aber das Monatsmaximum im Mai mit 9 Fällen, die alle in der zweiten Maihälfte liegen. Da im März und April die V1a-S-Tiefs jedoch nur selten auftreten, liegt der Anteil des Frühjahrs nur geringfügig über dem des Sommers. Die V1a-S-Zyklonen verteilen sich also so, wie es von der S- bzw. Vb-Bahn eigentlich erwartet wurde, aber nicht zutraf (s. o.). Das läßt darauf schließen, daß im Mai und Herbst die südlichen Schleifzonenlagen zwar häufig sind, sich dabei aber nur selten kräftigere Tiefdruckgebiete entwickeln und es meist nur zur Bildung stabiler Wellen ohne geschlossene Isobare kommt. Diese stabilen Wellen haben aber kaum geringere Wetterwirksamkeit als die mit geschlossenen Isobaren.

Der zyklonale Einfluß der V1a-S-Tiefs ähnelt also dem der schleifenden Tiefs der S-Bahn, sieht man davon ab, daß er räumlich noch etwas enger begrenzt ist.

Die räumliche Verteilung der V1a-S-Zyklonen zeigt zwei Schwerpunkte. Der eine liegt in der Donautiefenebene. In ihm spiegelt sich der östliche Teil der S-Bahn wider. Der andere, nördlich der Ostalpen, entspricht dem mittleren Teil der S-Bahn. Er ist wesentlich durch den Lee-Effekt der Alpen bedingt. Im Westen werden die V1a-S-Tiefs seltener, entsprechend der hier ebenfalls geringeren Dichte der S-Bahn.

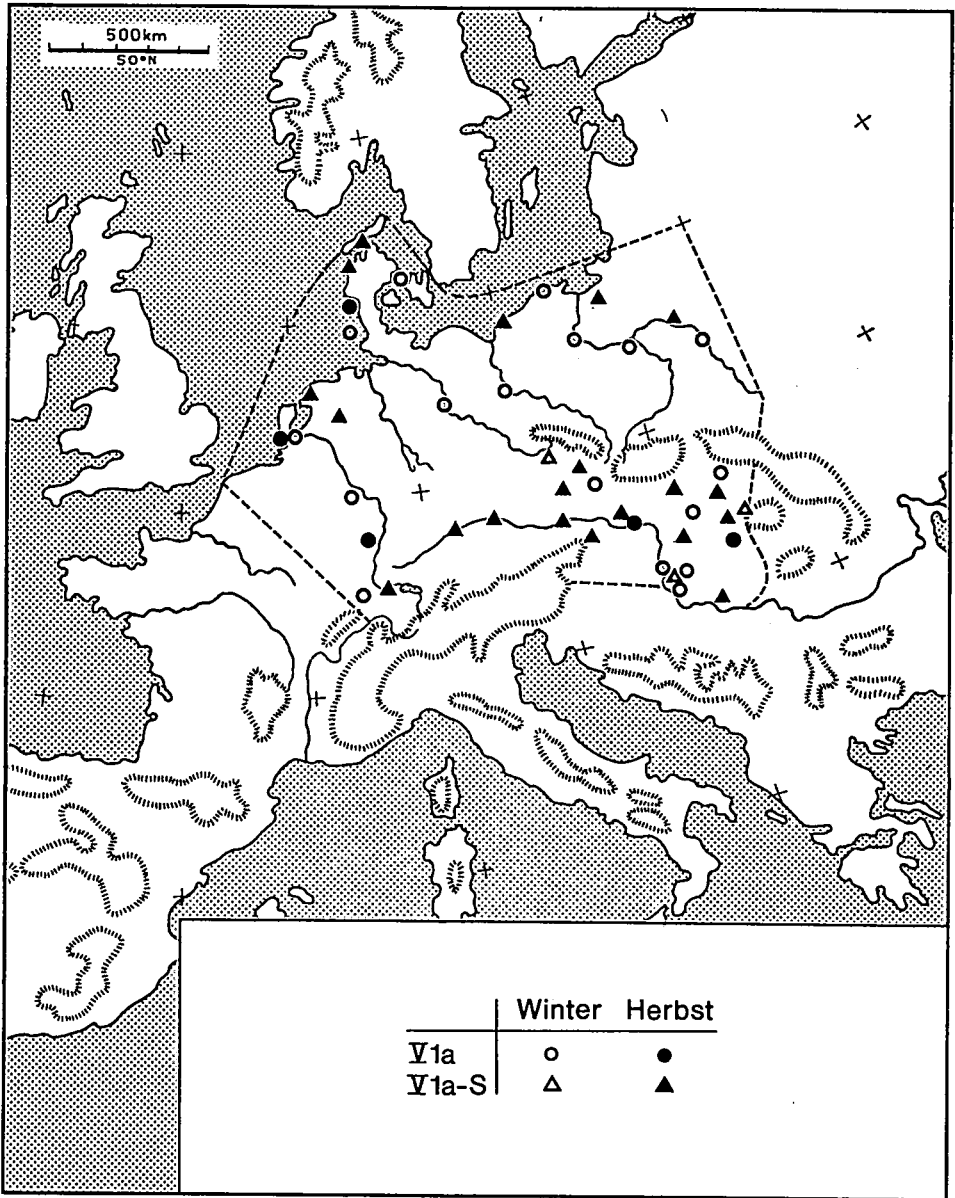


Abb. 37: Die Lagetypen V1a und V1a-S im Herbst und Winter (1957—66)

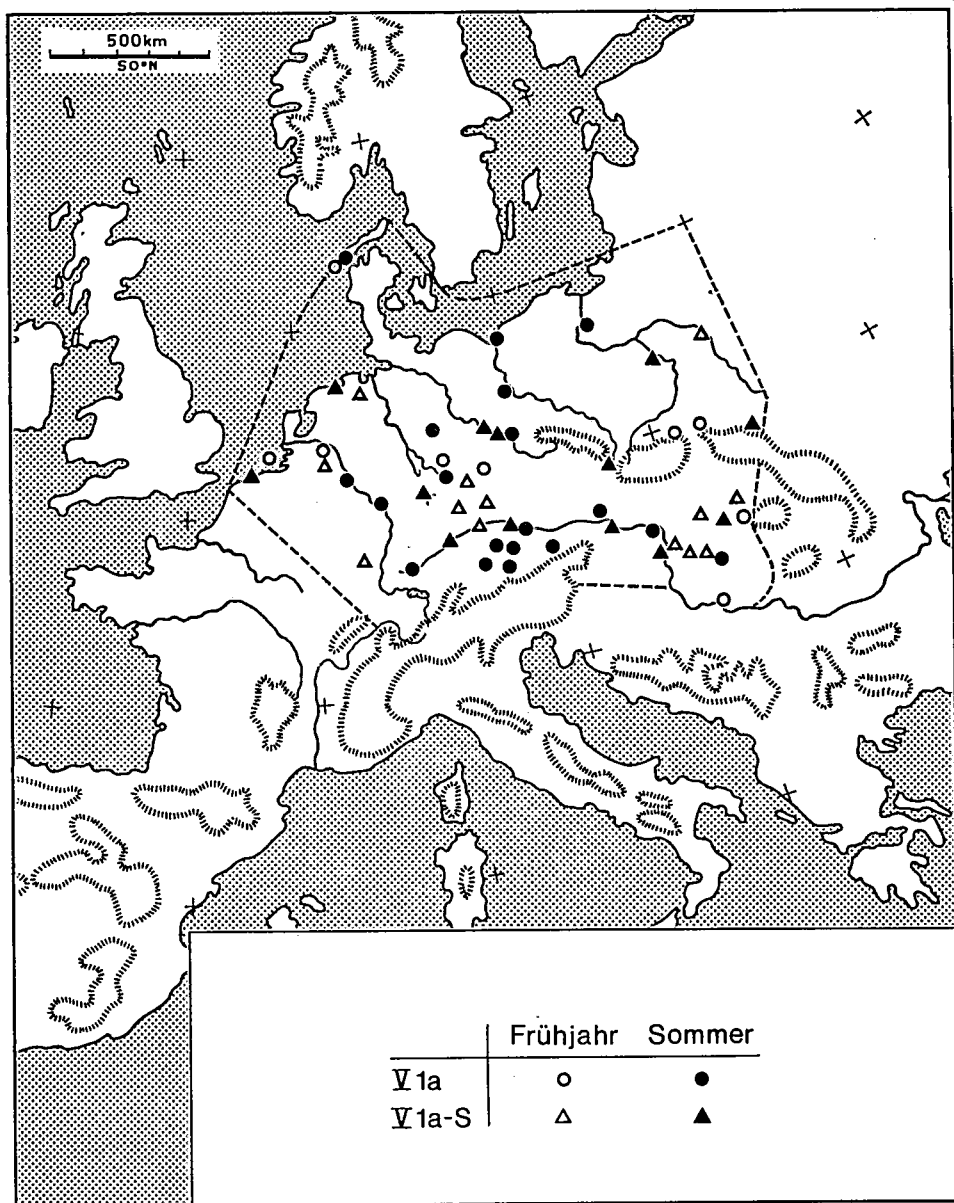


Abb. 38: Die Lagetypen V1a und V1a-S im Frühjahr und Sommer (1957—66)

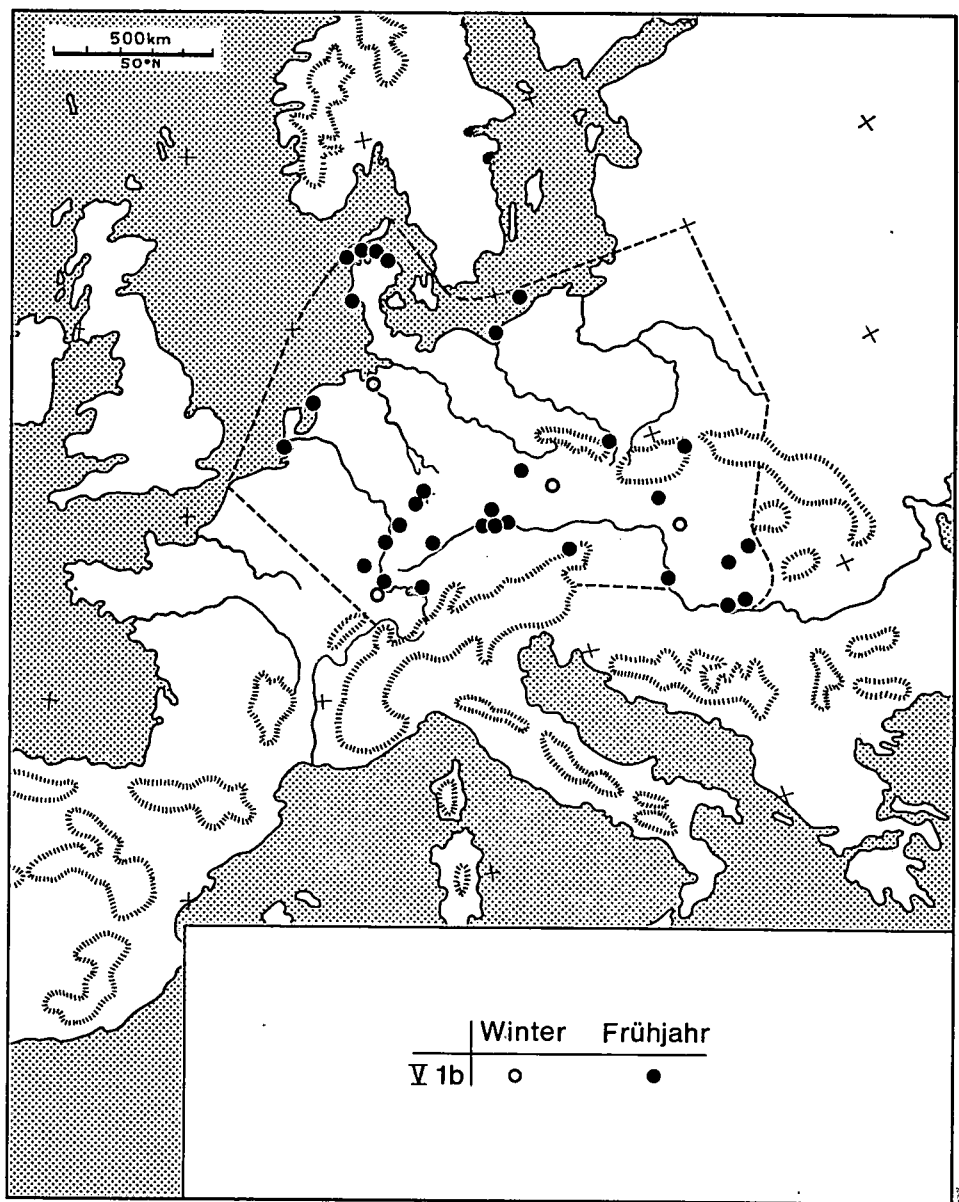


Abb. 39: Der Lagotyp V1b im Winter und Frühjahr (1957—66)

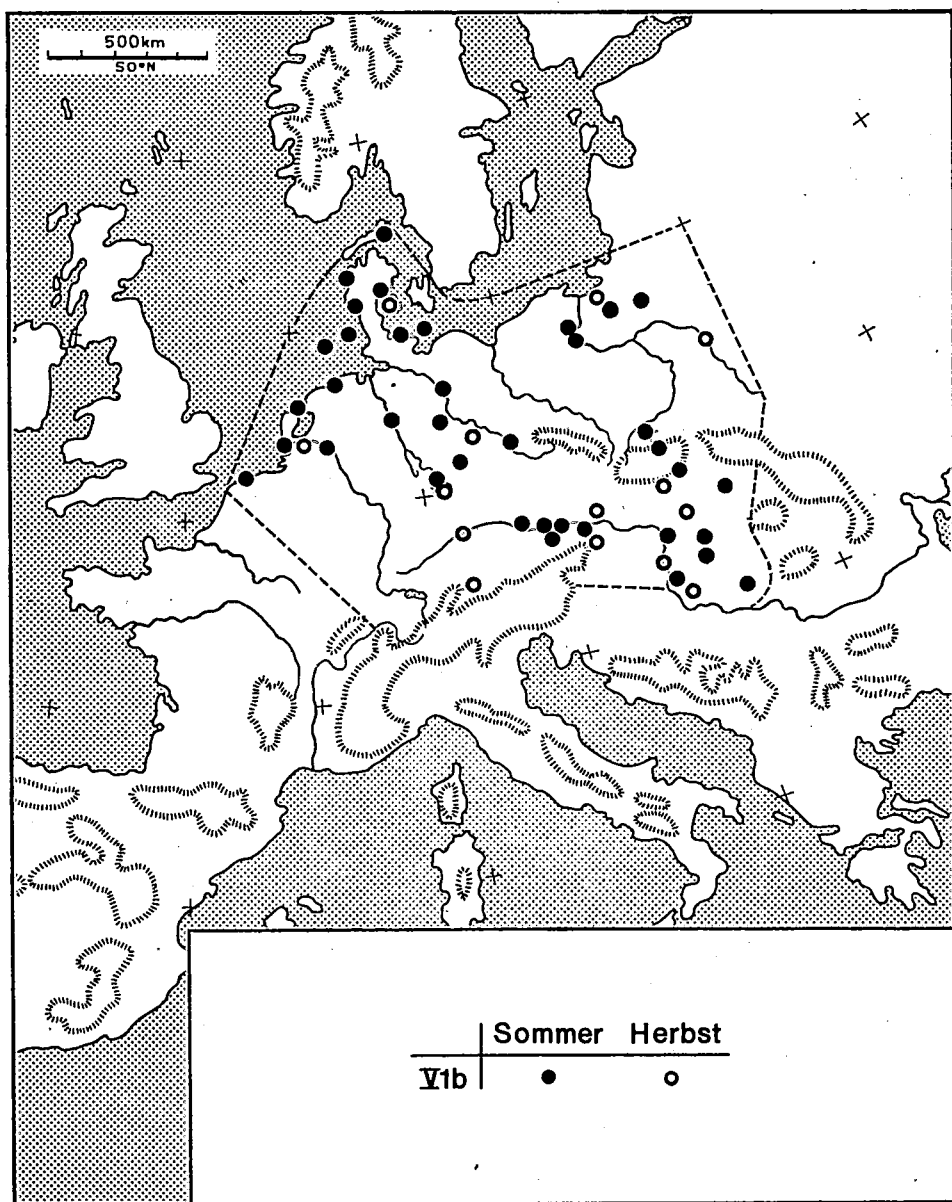


Abb. 40: Der Lagetyp V1b im Sommer und Herbst (1957—66)

Bei den V1b-Tiefs macht sich die sommerliche Erwärmung des Bodens in der jahreszeitlichen Verteilung deutlich bemerkbar (Abb. 39 und 40). Sommer und Frühjahr weisen eindeutig die meisten Tiefdruckgebiete auf, wohingegen im Winter fast keine vorkommen. Der Anstieg vom März zum April und der Abfall vom Juli zum August sind am steilsten.

Die räumliche Verteilung zeigt im Frühjahr zwei streifenförmig angeordnete Schwerpunkte: Der eine liegt im südlichen Mitteleuropa und zwar südlich des 50. Breitenkreises. Er ist im wesentlichen strahlungsbedingt, wenn auch östlich der Alpen bei west- bis nordwestlicher Strömung schwache Lee-Effekte die Entstehung von Tiefdruckgebieten zusätzlich fördern. Ein zweites Häufungsgebiet befindet sich im Küstengebiet. Hier macht sich der Reibungsgegensatz zwischen der Land- und Meeresfläche bemerkbar, der an der Küste zur Konvektion und damit auch zur Tiefdruckbildung Anlaß gibt.

Im Sommer und Herbst sind die V1b-Tiefs gleichmäßiger verteilt, wenn auch der Ostrand der Alpen wieder etwas bevorzugt ist. Die gleichmäßigere Verteilung beruht darauf, daß jetzt auch in den nördlichen Festlandsteilen die Einstrahlung stark genug ist, um einen wesentlichen Beitrag zur Neubildung von flachen Tiefdruckgebieten leisten zu können.

Da die V1b-Tiefs am häufigsten bei südwest- bis westlicher Höhenströmung auftreten, können sie am besten mit den zentralen Ästen der SW- und WSW-Bahnen verglichen werden, deren jahreszeitliche Verteilung gut mit der ihrigen übereinstimmt. Sie sind nämlich nur kurzfristig entwickelte Kaltfronttiefs (Typ 11c) und kennzeichnen den mitteleuropäischen Sommer, indem sie vorwiegend an schwachen Kaltfronten entstehen, die hinter einem langsam abziehenden mitteleuropäischen Hoch die Zufuhr kühlerer Meeresluft einleiten und mit zum Teil kräftigen Schauern und Gewittern das Ende einer vorausgegangenen Schönwetterperiode anzeigen.

Können die V1b-Tiefs teilweise als sommerliche Wärmetiefs angesprochen werden, so gilt das in erhöhtem Maße für die V2-Depressionen, die die gleiche jahreszeitliche Verteilung aufweisen. Sie treten bei flacher Druckverteilung auf, und in ihrem Bereich finden sich, wenn überhaupt, nur ganz schwache Luftmassengegensätze. Somit können sie wie die flachen wirren Tiefs als typische Erscheinungen des „marais barométrique“ angesehen werden.

Ihre räumliche Verteilung spiegelt deutlich den Einfluß der sommerlichen Einstrahlung wider, sind doch gerade im Oberrheintal und in der Donautiefenebene ausgeprägte Dichtezentren vorhanden (Abb. 41 und 42). Im übrigen kann eine allmähliche Verdünnung nach Norden festgestellt werden, entsprechend der nach Norden abnehmenden Strahlungsintensität. Dabei ist zu beachten, daß für die Bildung der V2-Tiefs im Alpenvorland die Leewirkung der Alpen zum Teil eine Rolle spielt — besonders im Herbst —, so daß die Abgrenzung zu den eigentlichen Leetiefs nicht ganz leicht fällt. Zu letzteren wurden nur die gerechnet, bei denen die Druckverteilung im südlichen Mitteleuropa überwiegend antizyklonal war, d. h. bei denen der Lee-Effekt der entscheidende zyklonenetische Faktor war.

Die Wetterwirksamkeit der V2-Tiefdruckgebiete ist recht unterschiedlich. So kommen in ihrem Bereich je nach der Höhendruckverteilung sowohl platzregenartige Schauer und Gewitter als auch fast störungsfreies Wetter mit niedrigen Schönwettercumuli vor.

Die Leetiefs sind an eine meist schwache südliche Strömung über den Alpen gebunden. Sie bilden sich zwischen dem Alpennordrand und der Donau, sind meist nur von kurzer Dauer, können aber auch 2—3 Tage ortsfest liegen bleiben.

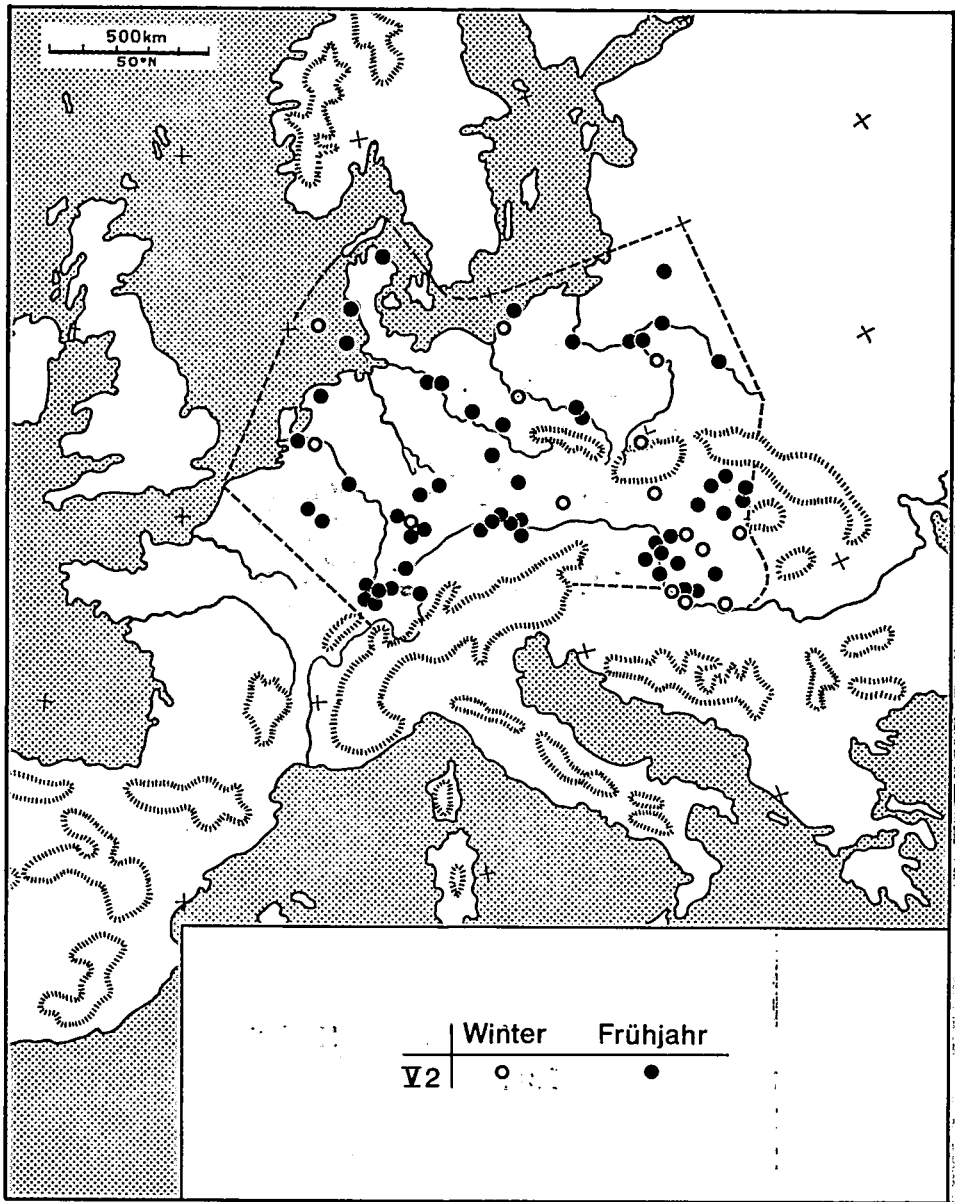


Abb. 41: Der Lagetyp V2 im Winter und Frühjahr (1957—66)

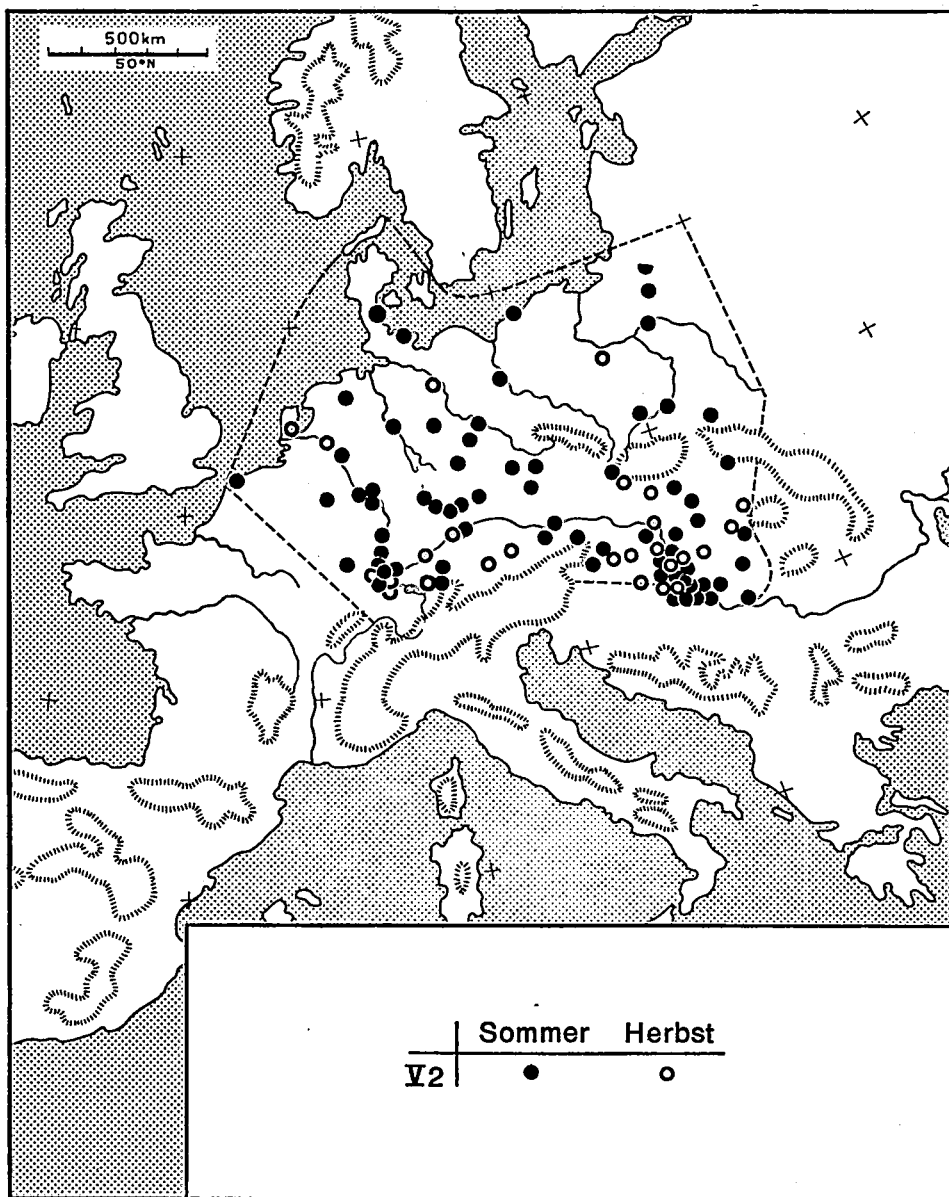


Abb. 42: Der Lagetyp V2 im Sommer und Herbst (1957—66)

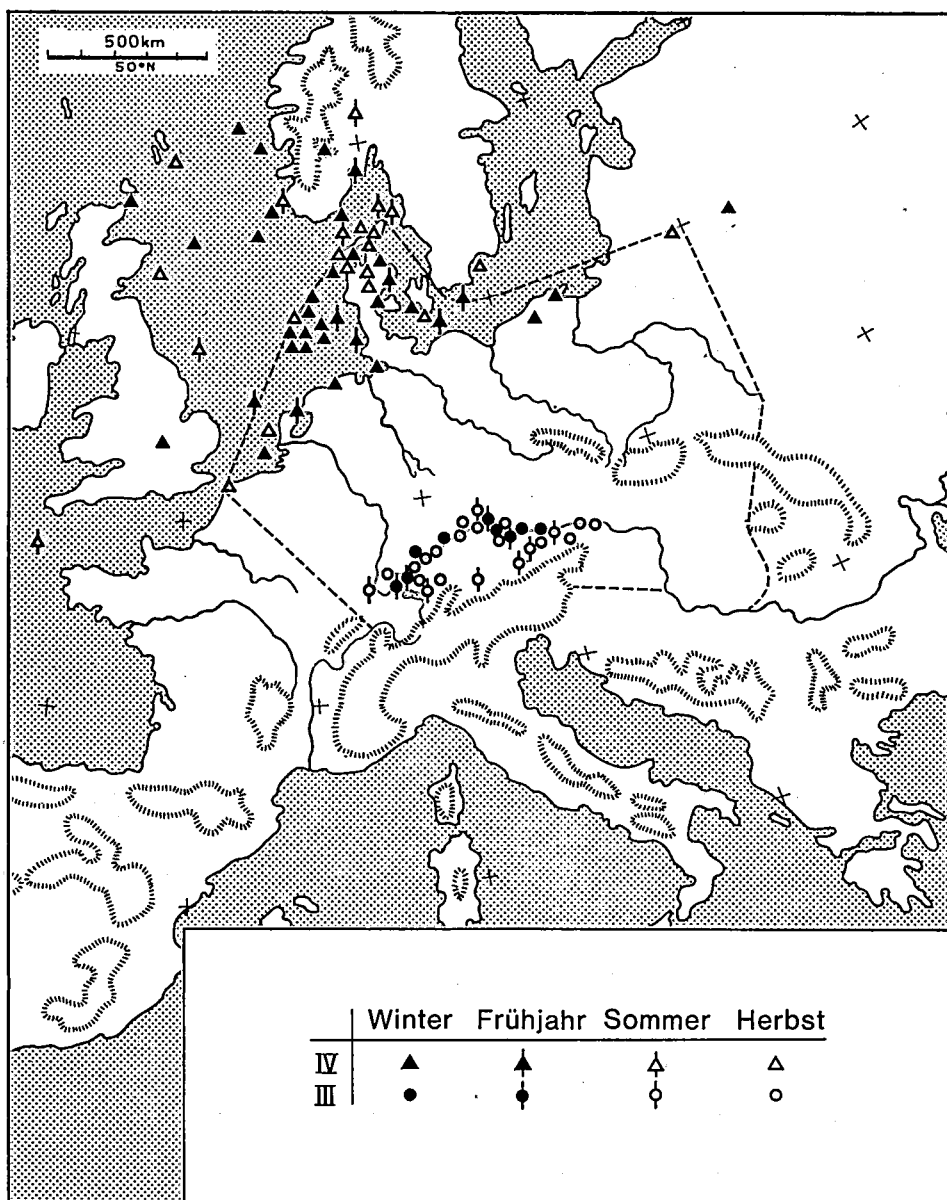


Abb. 43: Die Lagetypen III und IV (1957—66)

Ein Wettereinfluß ihrerseits ist kaum zu spüren, da der überlagernde hohe Luftdruck keine Konvektion zuläßt und sie selbst einen hohen absoluten Kerndruck — meistens über 1020 mb — aufweisen. Die Voraussetzungen ihres Auftretens — südliche Höhenströmung bei antizyklonaler Luftdruckverteilung — erklären ihr Häufigkeitsmaximum im Herbst. In den übrigen Jahreszeiten kommen sie selten vor.

Räumlich nicht so eng begrenzt wie die Leetiefs sind die IV- oder flachen Kaltlufttiefs, die im wesentlichen am nördlichen Rand des Untersuchungsgebietes zu finden sind. Sie sind in mancher Hinsicht das Pendant zu den sommerlichen „Wärmertiefs“, da sie dann entstehen, wenn sich hochreichende Kaltluft über warmem Wasser bewegt und sich der niedrige Luftdruck in der Höhe durch vertikalen Impulsaustausch bis zum Boden bzw. der Wasseroberfläche durchsetzt. Über ihnen befindet sich deshalb meist ein Höhentrog — im Gegensatz dazu werden die II2a-Zyklonen von einem kleinen Höhentief begleitet. Das wirkt sich dahingehend aus, daß die flachen Kaltlufttiefs schwächer entwickelt sind und dementsprechend in ihrem Bereich die Konvektionsbereitschaft der Luft geringer ist. Die flachen Kaltlufttiefs sind nicht nur Neubildungen in der Nordsee, sondern ebenso Reste sich westlich der Skanden auffüllender hochreichender Zyklonen. Außer der gegenüber der Luft höheren Temperatur des Wassers ist auch die gegenüber dem Land geringere Reibung für ihren Erhalt maßgebend. Das spiegelt sich in der räumlichen Verteilung wider, die durch das fast völlige Fehlen von Tiefkernen auf dem Festland und die große Dichte auf dem Meer — einschließlich Dänemarks — gekennzeichnet ist (Abb. 43).

Mit der raschen Auffüllung beim Übertritt aufs Festland läßt die Wetterwirksamkeit der flachen Kaltlufttiefs schnell nach. Sie ist auch auf dem Meer nur gering und erschöpft sich in einigen Konvektionsschauern.

Die Voraussetzungen für die Bildung der flachen Kaltlufttiefs sind im Winter am besten erfüllt. Das Häufigkeitsmaximum fällt darum in diese Jahreszeit. Das Minimum liegt im Sommer, wenn das gegenüber der Luft kalte Wasser eine stabilisierende Wirkung ausübt. In den Übergangsjahreszeiten sind die flachen Kaltlufttiefs etwas häufiger. Dabei beruht die zyklonenetische Wirkung im Herbst mehr auf der Wärme des Wassers, im Frühjahr mehr auf der Kälte der Luft, da in dieser Zeit die Kaltluftproduktion in der Arktis ihr Maximum erreicht hat.

g) Bahn- und Lagetypen der Kaltlufttropfen

Für die Bahnen der Kaltlufttropfen gilt allgemein, daß sie nicht so geradlinig verlaufen wie die der Bodenzyklonen. Außerdem ist ihre durchschnittliche Geschwindigkeit geringer. Die räumliche Verteilung zeigt also ein unregelmäßigeres Bild als die der Bahnen der Bodentiefs. Die Bahnen wurden im wesentlichen nach der Herkunftsrichtung der Kaltlufttropfen ausgeschieden. Aus der jahreszeitlichen Verteilung ergibt sich dann die Richtung, aus der in einer bestimmten Jahreszeit die Kaltluftzufuhr nach Mitteleuropa am häufigsten erfolgt.

Um zu zeigen, daß eine derartige Abgrenzung sinnvoll ist, werden die Abweichungen der Anteile der Kaltlufttropfentypen zwischen je zwei Bahnen wieder mit dem χ^2 -Test auf Signifikanz geprüft.

In der KO-Bahn wurden alle Kaltlufttropfen aus Osteuropa zusammengefaßt. Wie aus dem Anteil der verschiedenen Kaltlufttropfentypen ersichtlich ist (Tab. 14), handelt es sich dabei um zwei verschiedene synoptische Situationen.

Tabelle 14 **Verteilung der KO-Bahn nach Kaltlufttropfentypen und Jahreszeiten**
(1957—66)

Tropfentyp	Winter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Jahr
VI1a	1	2	—	5	8
VI1b	1	2	—	—	3
VI1c	2	—	—	—	2
VI2	1	3	—	—	4
VI3	6	4	—	2	12
Gesamt	11	11	—	7	29

1. Lagen mit kräftigem, blockierendem fennoskandischen Hoch, auf dessen Südseite ein meist intensiver Kaltlufttropfen Mitteleuropa aus dem russischen Raum kommend in westlicher Richtung überquert. Diesem Fall sind die Tropfentypen VI2, VI3 und VI1c zuzuordnen. Er könnte als KO-Bahn im engeren Sinn bezeichnet werden.

2. Schwachgradientige Lagen, bei denen am Rand eines osteuropäischen Hochs VI1a-Tropfen mit schwacher östlicher Bodenströmung nach Mitteleuropa wandern.

Während bei der ersten Bahngruppe ein hochreichender Kaltlufteinbruch kontinentaler Polarluft erfolgt, der ganz Mitteleuropa von Osten nach Westen erfaßt, sind beim zweiten Typ die Wetterauswirkungen gering. Sie erschöpfen sich praktisch in einigen schauerartigen Niederschlägen. Die VI1a-Tropfen sind im wesentlichen auf den Spätherbst beschränkt. Die Tropfen der anderen Gruppe sind die typischen winterlichen Kaltlufttropfen in meist klassischer Ausprägung, d. h. sie sind intensiv — der Anteil der VI3-Tropfen ist nirgends so hoch wie bei der KO-Bahn —, von hohem Bodenluftdruck begleitet, im Kern extrem kalt und häufig regelmäßig aufgebaut. Ihre Niederschlagsintensität ist gering; es kommt auf der Vorderseite nur zu wenig ergiebigen schauerartigen Schneefällen, die bei vorhandenen, zum Teil reliefbedingten Bodenkonvergenzen verstärkt werden, ansonsten aber von längeren Aufheiterungsperioden unterbrochen sind. Auf der Rückseite gleitet Warmluft auf, so daß hier mit umfangreichen Aufgleitniederschlagsfeldern (Schnee) gerechnet werden muß. Die geringe Niederschlagsergiebigkeit resultiert aus der niedrigen Wasserdampfkapazität der kalten Luft, die zudem noch kontinentalen Ursprungs ist.

Dieses Idealbild der räumlichen Verteilung der Wettererscheinungen im Kaltlufttropfen ist jedoch nicht immer gegeben. So kommen gerade bei der KO-Bahn auch Kaltlufttropfen vor, die ganz regelmäßig aufgebaut, jedoch überhaupt nicht wetterwirksam sind. Allgemein gilt jedoch für alle Tropfen der KO-Bahn i.e.S., daß sie in Mitteleuropa strengen Frost bringen und somit für den Erhalt einer unter Umständen vorher abgelagerten Schneedecke günstige Bedingungen schaffen.

Betrachtet man die jahreszeitliche Verteilung der KO-Bahn, fällt zunächst das Sommerminimum auf (Abb. 44 und 45). Bei der sommerlichen Erwärmung des Kontinents sind nur Warmlufttransporte von Osten nach Westen möglich. Im Winter hat die KO-Bahn ihr Häufigkeitsmaximum, eine Folge des jetzt vorherrschenden Strahlungsverlustes und der Auskühlung des eurasiatischen Kontinentes. Dabei fällt das Monatsmaximum auf den Spätwinter bzw. den März, wozu nicht zuletzt die zu dieser Zeit sichere Schneedecke in Osteuropa beiträgt. Danach sinkt die

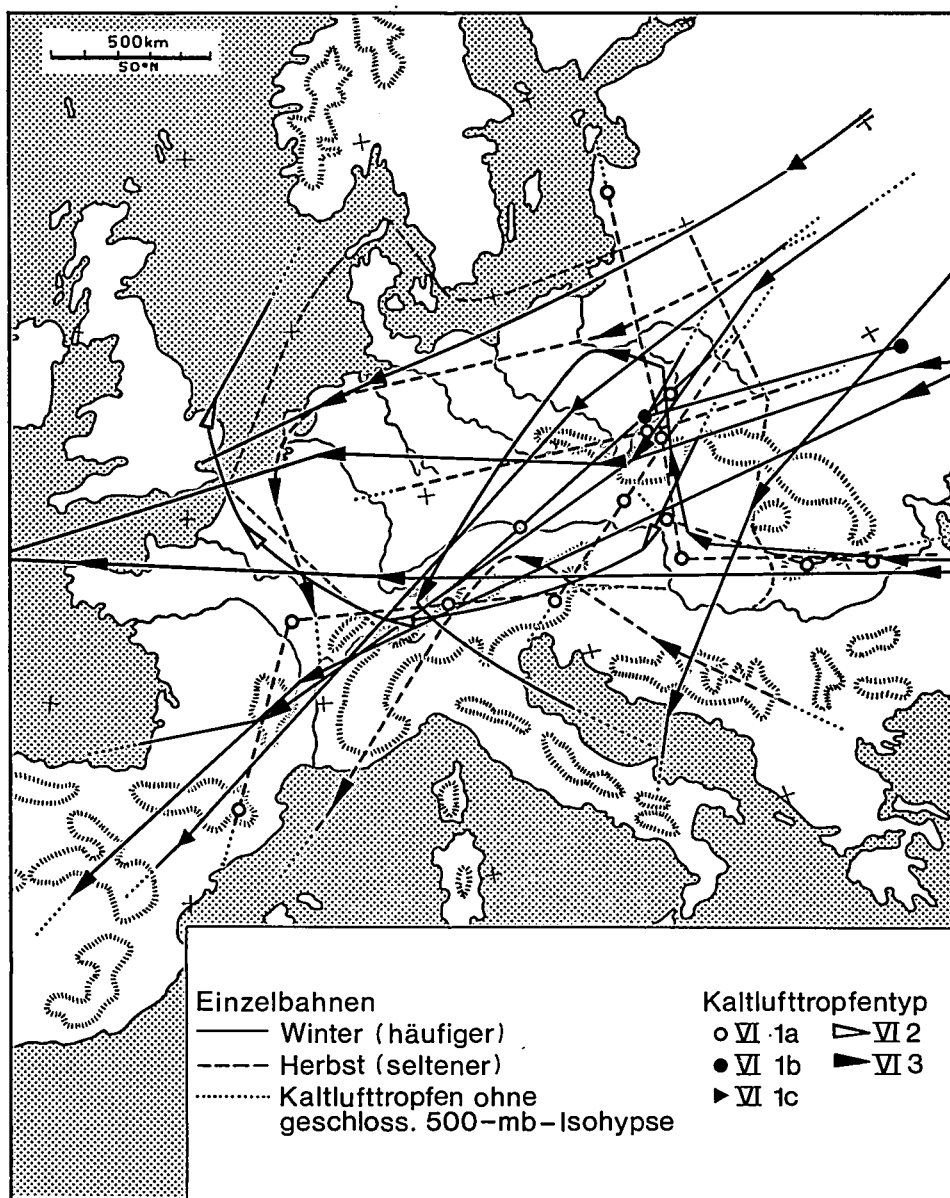


Abb. 44: Die KO-Bahn im Herbst und Winter (1957—66)

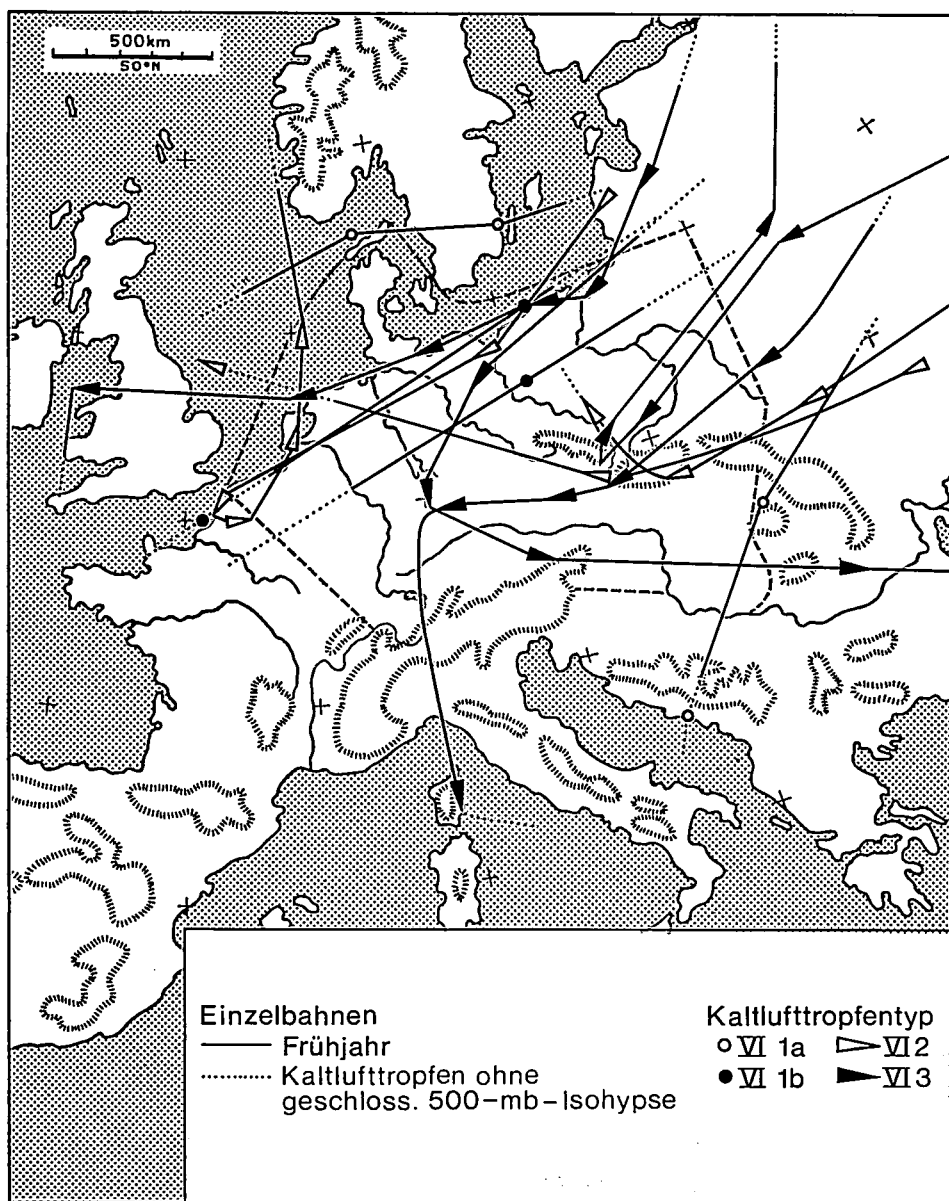


Abb. 45: Die KO-Bahn im Frühjahr und Sommer (1957—66)

Häufigkeit wieder ab. Der früheste Zeitpunkt, an dem die KO-Bahn vorkommt, liegt im November, sieht man von einigen VIIa-Tropfen im Oktober ab. Für die gegenüber Herbst und Winter etwas nördlichere Herkunft der Lage der KO-Bahn im Frühjahr lassen sich zwei Gründe angeben:

1. Die Ostsee gleicht im frühen Frühjahr in ihrem thermischen Verhalten mehr dem Kontinent als im Winter, d. h. sie wirkt im Frühjahr als Kältereservoir und damit Kaltlufttropfen erhaltend, während sie im Winter die Luftmassen erwärmt.
2. Im Frühjahr ist im Süden des Kontinents schon wieder die Erwärmung des Festlandes durch die verstärkte Sonneneinstrahlung zu spüren.

Insgesamt gilt für die beiden Gruppen der KO-Bahn:

a) Die KO-Bahn i.e.S. mit intensiven, umfangreichen und klassisch ausgebildeten Kaltlufttropfen und dem Häufigkeitsmaximum im Spätwinter ist für lang anhaltende Frostperioden bei sonst recht unterschiedlicher Wetterwirksamkeit verantwortlich.

b) Die zweite Gruppe mit deutlichem Spätherbstmaximum besteht aus kleinen VIIa-Tropfen, die bei flacher, unter Umständen sogar auch in der Höhe antizyklonaler Druckverteilung nur geringe Wetterwirksamkeit haben, die sich in einigen Konvektionsschauern erschöpft.

Die gesamte KO-Bahn ist eindeutig auf das Winterhalbjahr konzentriert, wobei sie im Spätwinter und Frühjahr nördlicher als im Herbst und frühen Winter liegt. Der Geschwindigkeitskoeffizient beträgt 1,62 und ist noch etwas kleiner als der der Trog-Bahn, der zweitlangsamsten Bodenbahn.

Die KN-Bahn hat eine wesentlich andere Genese. Das spiegelt sich sowohl im Jahresgang als auch in den Anteilen der Tropfentypen wider (Tabb. 15).

Tabelle 15 Verteilung der KN-Bahn nach Kaltlufttropfentypen und Jahreszeiten (1957—66)

Tropfentyp	Winter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Jahr
VIIa	2	—	—	1	3
VIIb	1	4	—	—	5
VIIc	4	5	—	—	9
VI2	2	8	2	—	12
VI3	2	4	1	1	8
Gesamt	11	21	3	2	37

Bildet man die Typenklassen 1) VIIa + VI3, 2) VIIb + VIIc, 3) VI2 und vergleicht deren Anteil an der KO- und KN-Bahn, ergibt sich der χ^2 -Koeffizient 10,42, der auf dem 1 %-Niveau signifikant ist.

Könnte man als Hauptvertreter der KO-Bahn die Typen VIIa und VI3 ansehen, liegt das Hauptgewicht der KN-Bahn beim Typ VI2, dem die Typen VI3 und VIIc mit etwa gleichen Anteilen folgen. Darin kommt die geringere Intensität und Verwirbelung auf der KN-Bahn zum Ausdruck. Der hohe VIIc-Anteil (fast 25 %) verdient besondere Beachtung, da er die KN-Bahn gegenüber allen anderen Bahnen auszeichnet. Wird auf dem östlichen Atlantik ein meridional gerichtetes Hoch mit weit nach Norden reichendem Höhenkeil aufgebaut, so setzt sich auf seiner Ost-

seite arktische Kaltluft nach Süden in Bewegung. In dieser wird ein Kaltlufttropfen abgeschnürt, wenn der korrespondierende Warmluftstrom auf der Ostseite der Kaltluft im Norden nach Westen vordringen und sich mit dem ostatlantischen Hoch vereinigen kann. Kaltlufttropfen dieser Entstehung sind die Typen VI2 und VI3. Häufig kommt es nicht zu einer Abschnürung der Kaltluftmasse, sondern nur zur Trogbildung. In der Westhälfte des Troges bilden sich kleine Kaltlufttropfen vom Typ VIIc, da der Trog insbesondere im Anfangsstadium, wenn der korrespondierende Warmluftstrom nicht kräftig ist, eine asymmetrische Geschwindigkeitsverteilung aufweist. Einer schwachen Südwest- bis Südströmung auf der Ostseite steht eine sehr starke Nordströmung auf der Westseite gegenüber. Diese bestimmt dann die großräumige Gleichgewichtsströmung, und der Tropfen wandert in ihrer Richtung nach Süden. Die VIIc-Tropfen erreichen im Durchschnitt die größte Geschwindigkeit aller Tropfentypen. Sie sind außerdem dadurch ausgezeichnet, daß nach ihrem Durchzug die Kaltluftzufuhr nicht gestoppt wird. Ihnen fehlen darum die Aufgleitniederschläge auf der Rückseite. Vielmehr wirken sie wie schnell wandernde Kaltfronten mit kräftigen Schauern. Ähnliches gilt für die VIIb-Tropfen in symmetrischen Trögen. Nur haben diese eine geringere Wanderungsgeschwindigkeit, und ihre Bewegungsrichtung wird in stärkerem Maß von der Bodenströmung bestimmt. Die Entstehungsorte der VIIb- und VIIc-Tropfen sind bei 24-stündigem Abstand der 500-mb-Karten nicht genau zu bestimmen. Eine Häufung ist jedoch im südlichen Skandinavien südöstlich der Skanden festzustellen (orographischer und kontinentalisierender Effekt der Skanden). Die Wanderungsgeschwindigkeit der bei Abschnürung der Kaltluftmasse entstehenden VI2- und VI3-Tropfen ist weitaus geringer als die der VIIc-Tropfen. Gleiches gilt für die Richtungskonstanz bei der Wanderung. Die umfangreicheren Tropfentypen zeichnen sich dafür durch den größeren Einflußbereich und breite Aufgleitniederschlagsfelder aus.

Die räumliche Verteilung der KN-Bahn zeigt eine ausgeprägte Verdichtung der Bahnen in einem Streifen von der skandinavischen Halbinsel nach Süden (Abb. 46 und 47). Diese Erscheinung ist eine Folge der durch die Nord- und Ostsee hervorgerufenen Erwärmung der Luft beiderseits der skandinavischen Halbinsel und der Bevorzugung der Festländer durch die Kaltlufttropfen im Winterhalbjahr. Dabei zeichnet sich die Ostsee entsprechend ihrer niedrigen Temperaturen gegenüber der Nordsee durch eine höhere Begehungsfrequenz aus, was sich hauptsächlich im Frühjahr und Sommer bemerkbar macht. Im Vergleich zur KO-Bahn hat sich das Maximum der KN-Bahn wegen der subarktischen Herkunft der Luftmassen auf das Frühjahr verschoben, und zwar auf die Monate April und Mai, die auf sich die Hälfte aller Vorkommen vereinigen. Im Sommer und Herbst tritt die KN-Bahn nur selten auf. Im Winter ist die zweite Januarhälfte etwas bevorzugt, was gut mit der Tendenz zu meridionaler Zirkulation in dieser Zeit übereinstimmt.

Die Witterung der KN-Bahn ist je nach Tropfentyp verschieden. Gemeinsam ist allen Typen der kräftige und hochreichende Kaltlufteinbruch mit steilem vertikalen Temperaturgefälle, der bedingt, daß die Niederschläge auch im Frühjahr im Flachland als Schnee fallen. Dadurch hat die KN-Bahn entscheidenden Anteil an den für das Klima Mitteleuropas charakteristischen Kälterückfällen im späten Frühjahr (Eisheilige im Mai).

Sind die KO- und KN-Bahnen charakteristisch für die Kaltlufteinbrüche im Winter und Frühjahr, so kennzeichnen die KNW- und KW-Bahnen die häufigste Richtung der Kaltluftzufuhr im Sommer. Dabei kommt der KNW-Bahn gemäß der Verteilung der Tropfentypen eine Mittelstellung zwischen der KN- und der KW-Bahn zu (Tab. 16).

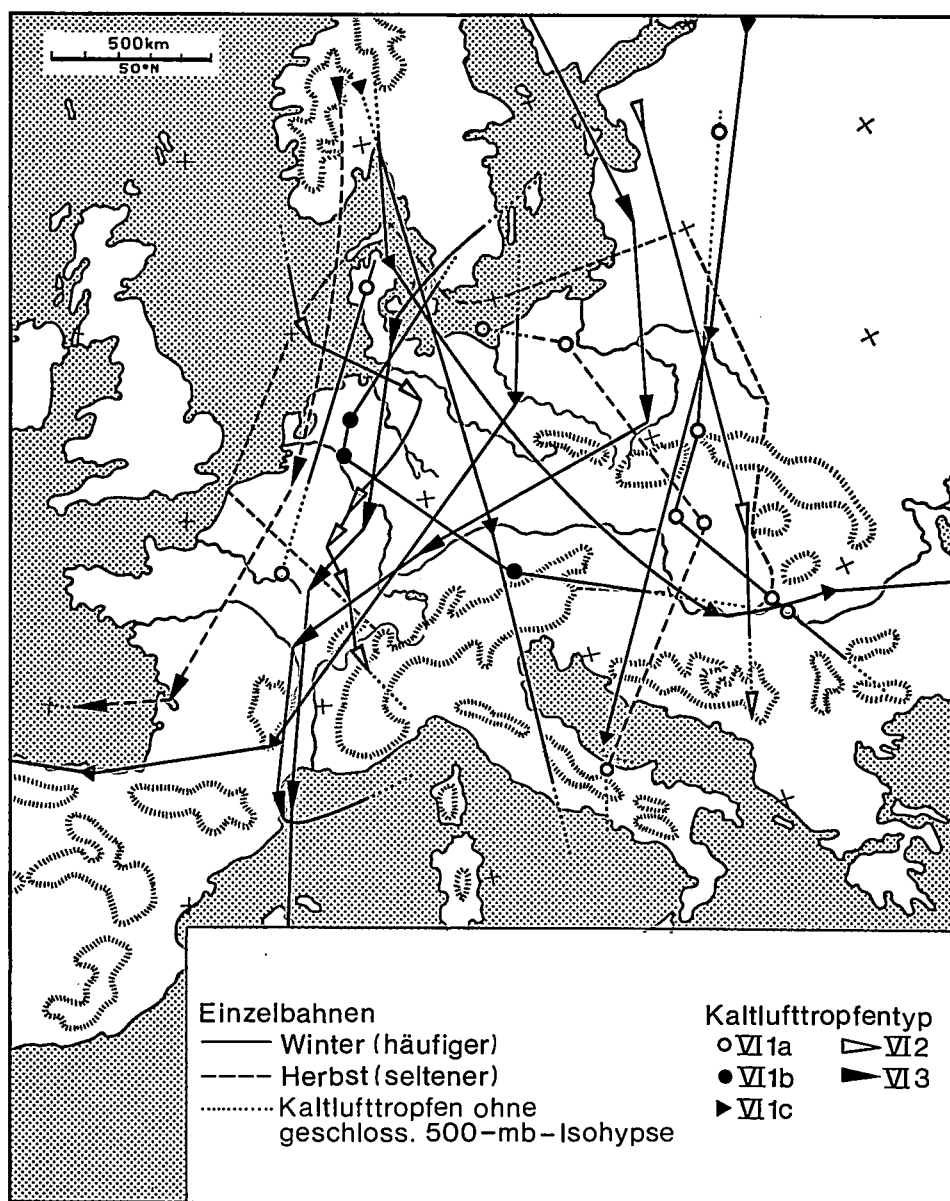


Abb. 46: Die KN-Bahn im Herbst und Winter (1957—66)

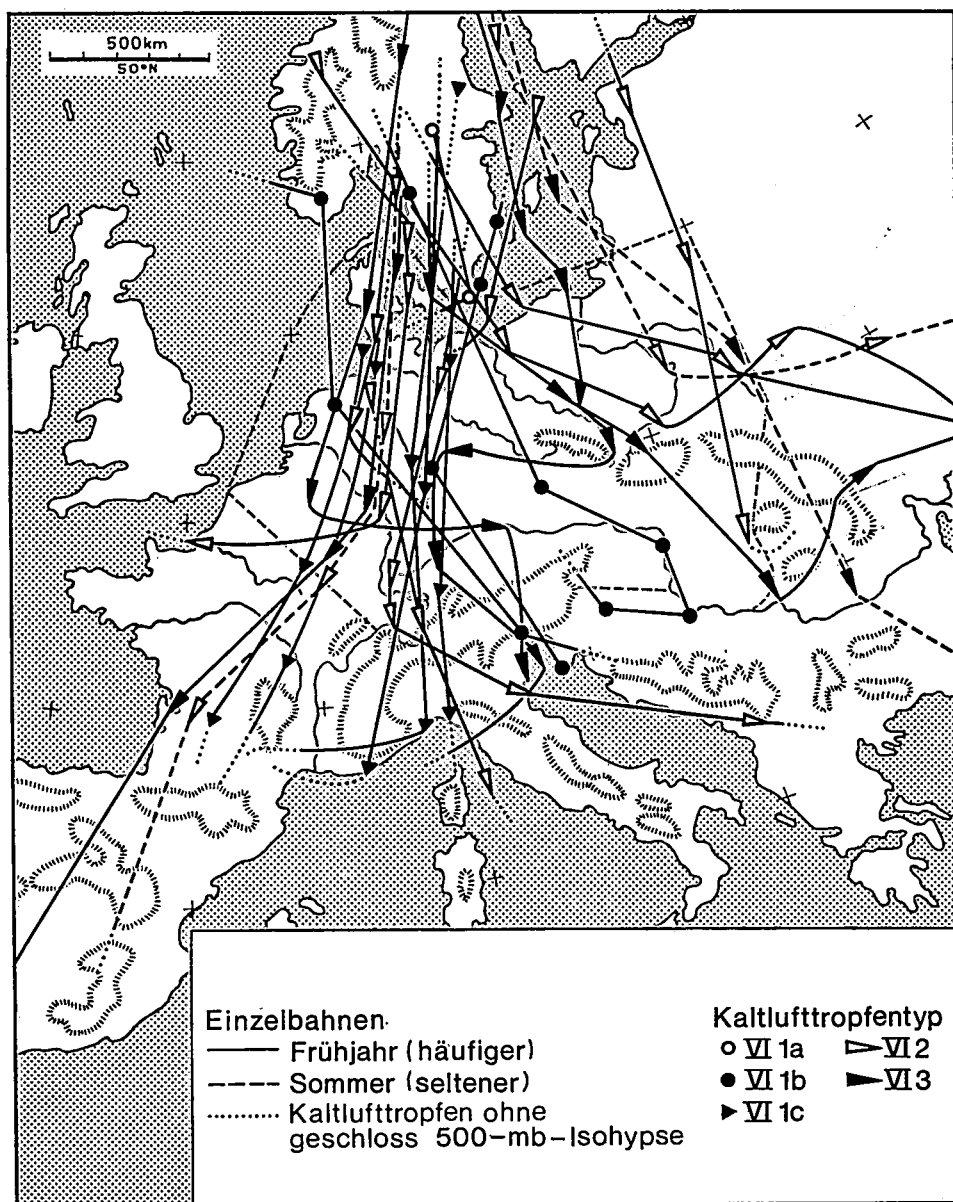


Abb. 47: Die KN-Bahn im Frühjahr und Sommer (1957—66)

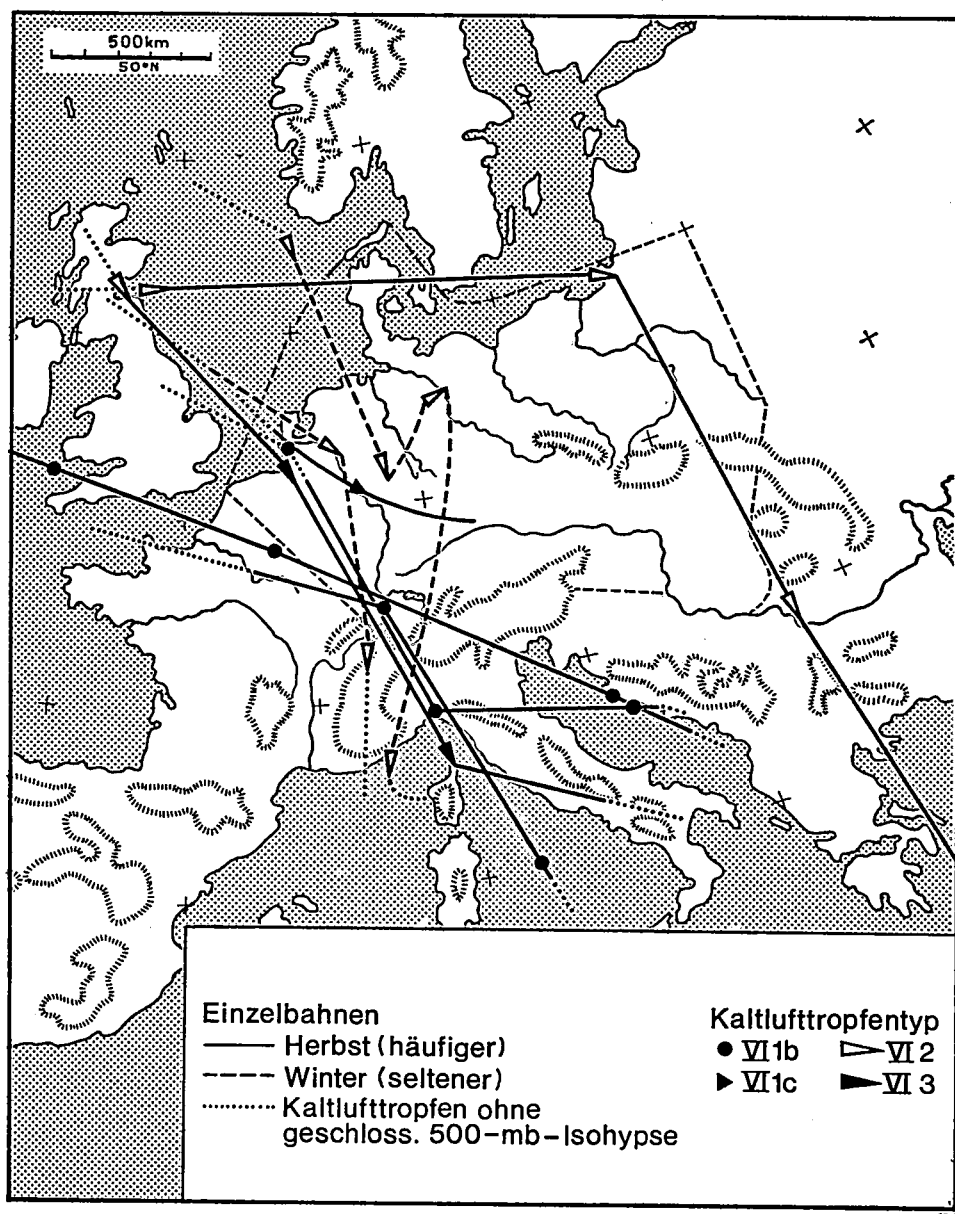


Abb. 48: Die KNW-Bahn im Herbst und Winter (1957—66)

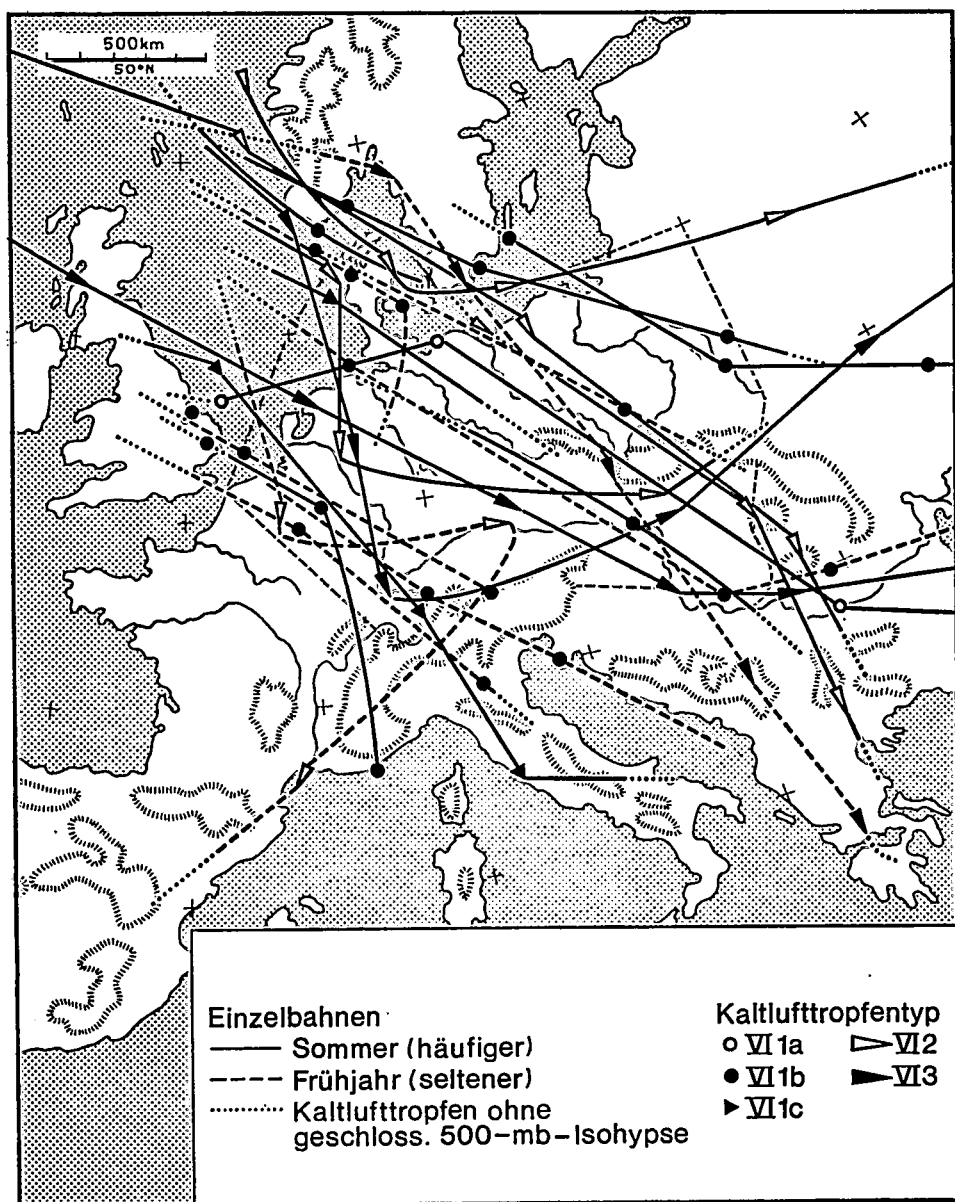


Abb. 49: Die KNW-Bahn im Frühjahr und Sommer (1957—66)

Tabelle 16 Verteilung der KNW-Bahn nach Kaltlufttropfentypen und Jahreszeiten (1957—66)

Tropfentyp	Winter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Jahr
VI1a	—	—	1	—	1
VI1b	—	6	5	3	14
VI1c	—	—	2	1	3
VI2	2	1	4	1	8
VI3	—	1	2	1	4
Gesamt	2	8	14	6	30

Die Unterschiede zwischen der KNW-Bahn einerseits und der KO- bzw. KN-Bahn andererseits hinsichtlich der Verteilung der Tropfentypen sind mit mindestens 95 %iger Wahrscheinlichkeit überzufällig, denn bei der Klasseneinteilung 1) VI1a + VI1c, 2) VI1b, 3) VI2, 4) VI3 ergibt sich der χ^2 -Koeffizient 15,01 beim Vergleich von KNW- und KO-Bahn und 6,77 beim Vergleich von KNW- und KN-Bahn.

Die K N W - B a h n zeichnet sich durch den hohen Anteil an VI1b-Tropfen aus. Diese Eigenschaft rückt sie in die Nähe der KW-Bahn (s. u.). Der Anteil der VI2- und VI3-Tropfen, der bei der KW-Bahn viel geringer ist, unterstreicht dagegen die Verwandtschaft zwischen der KNW- und KN-Bahn. Wegen der großen Zahl von kleinen Kaltlufttropfen mit nur einer geschlossenen Isohypse ist die räumliche Verteilung der KNW-Bahn nicht so verwirrend wie bei den bisher besprochenen Bahnen, d. h. die einzelnen Kaltlufttropfen laufen ziemlich geradlinig und schnell (Abb. 48 u. 49). Der Geschwindigkeitskoeffizient 1,72 ist der größte aller Kaltlufttropfenbahnen.

Eine Verdichtung zeigt sich in zwei Streifen. Der erste führt von der Südspitze Norwegens durch die Ungarische Tiefebene nach Südosten. Der zweite erstreckt sich vom Kanal über die Alpen ins Mittelmeergebiet. Im Herbst und Winter ist wegen der zu geringen absoluten Häufigkeit allerdings keine Verdichtung zu bemerken. Das jahreszeitliche Maximum liegt im Sommer, und zwar im Juli und August. Ein sekundäres Maximum fällt auf die Monate April und Mai und entspricht dem Frühjahrsmaximum der KN-Bahn. In den übrigen Monaten sind Kaltlufttropfen auf der KNW-Bahn selten, sieht man von einer schwachen Häufung im Oktober und November ab.

Insgesamt ist die KNW-Bahn ein wichtiges Glied des „Sommermonsuns“, trägt aber auch zu den Kälterückfällen des späten Frühjahrs bei. Die Witterung ist neben der Abkühlung bei den VI1b-Tropfen durch Schauer (zum Teil mit Gewittern) gekennzeichnet, entspricht also Kaltfrontdurchgängen. Bei den intensiveren VI2- und VI3-Tropfen kommt es auch zu ergiebigen Aufgleitniederschlägen.

Die K W - B a h n zeigt ein ähnliches Verhalten wie die KNW-Bahn. Das betrifft nicht nur die jahreszeitliche Verteilung, sondern auch die Anteile der Tropfentypen (Tab. 17).

**Tabelle 17 Verteilung der KW-Bahn nach Kaltlufttropfentypen und Jahreszeiten
(1957—66)**

Tropfentyp	Winter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Jahr
VI1a	—	4	2	2	8
VI1b	1	3	6	4	14
VI1c	—	—	2	—	2
VI2	—	2	2	1	5
VI3	—	—	—	—	—
Gesamt	1	9	12	7	29

Beim Vergleich mit den Anteilen der Tropfentypen bei den schon besprochenen Bahnen ergaben sich folgende χ^2 -Werte, die jeweils mindestens auf dem 5 %-Niveau signifikant sind:

12,88 KO-Bahn, Klassen: 1) VI1a + VI1c, 2) VI1b, 3) VI2 + VI3,
 19,29 KN-Bahn, Klassen: 1) VI1a + VI1b, 2) VI1c + VI2 + VI3,
 4,22 KNW-Bahn, Klassen: 1) VI1a + VI1b, 2) VI1c + VI2 + VI3.

Die Unterschiede zwischen der KW- und KNW-Bahn beruhen vor allem auf den verschiedenen Anteilen der intensiven Kaltlufttropfen und des VI1a-Typs.

Die relativ häufigen flachen Kaltlufttropfen drücken im übrigen den Geschwindigkeitskoeffizienten der KW-Bahn auf 1,54, der damit der niedrigste aller Kaltlufttropfenbahnen ist — abgesehen von den quasistationären Kaltlufttropfen.

Die Verteilung der Tropfentypen bei der KW-Bahn bestätigt die Tendenz, daß bei südlicherer Herkunft die Kaltlufttropfen entsprechend schwächer ausgebildet sind. Die räumliche Verteilung (Abb. 50 und 51) ist durch die Aufspaltung in zwei Streifen gekennzeichnet, von denen der eine von der Nordsee über Dänemark und die südliche Ostsee nach Osten führt, während der andere das südliche Mitteleuropa quert. Der zwischen beiden liegende Raum bleibt frei. Dieses Verhalten resultiert ähnlich wie bei der W-Bahn der Bodenzyklogen aus der Lage der Britischen Inseln. Im Frühjahr und Sommer wirkt sich die Landmasse Großbritanniens ungünstig auf die Entstehung und den Erhalt von Kaltlufttropfen aus. Im Winter fehlt die KW-Bahn fast völlig. Sie hat wie die KNW-Bahn ihr Häufigkeitsmaximum im Sommer. Allerdings weist sie keine deutlich ausgeprägten Spitzen auf. Die Wetterwirksamkeit entspricht bei den VI1b-Tropfen Kaltfrontdurchgängen. Bei den VI1a-Tropfen, deren Anteil im Frühjahr am größten ist, besteht sie aus wenig ergiebigen Konvektionsschauern.

Ist die KW-Bahn der Gegenpol zur KO-Bahn, so gilt das nicht mehr für die wirre Bahn. Denn deren Verteilung der Tropfentypen stimmt mit der der KO-Bahn weitgehend überein, wie Tabelle 18 zeigt.

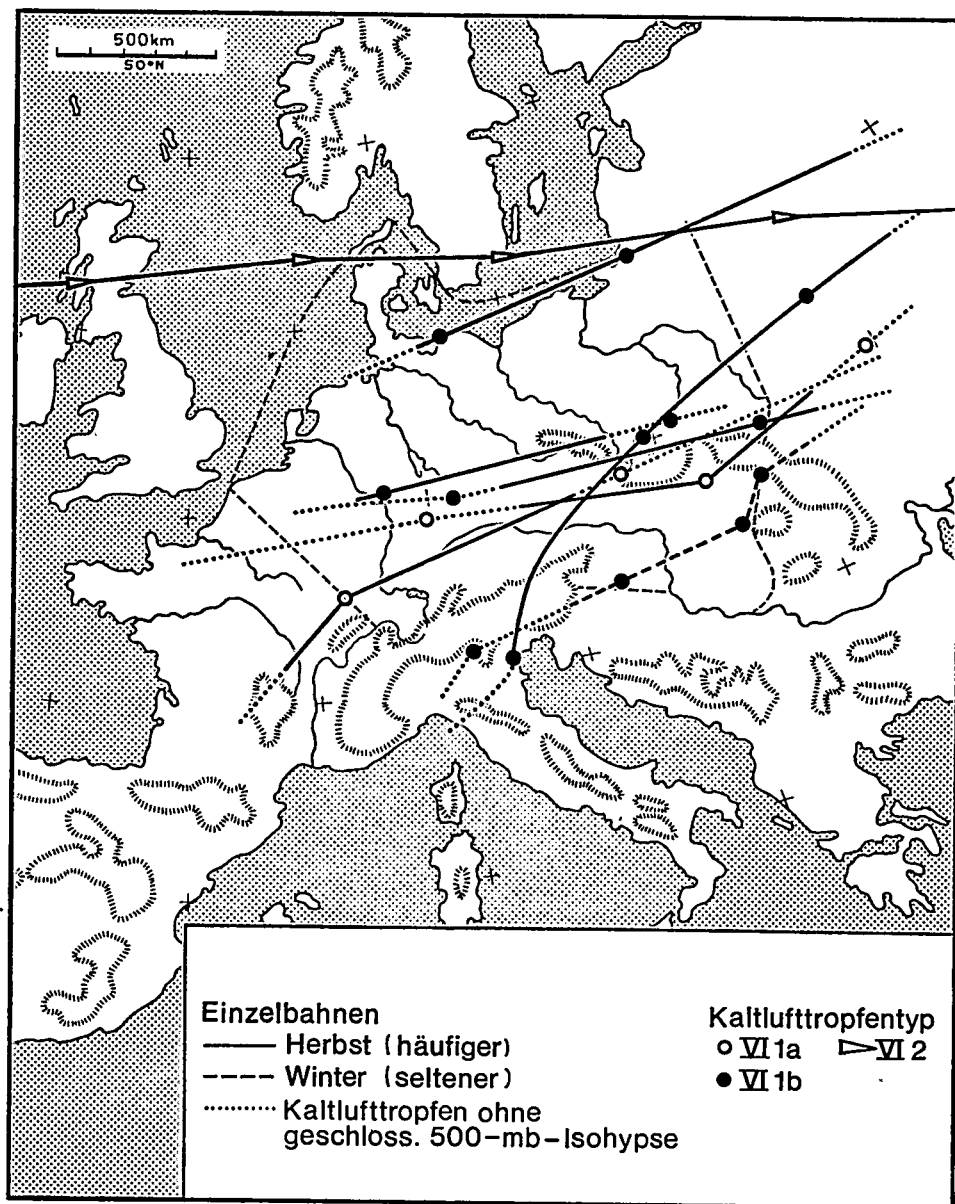


Abb. 50: Die KW-Bahn im Herbst und Winter (1957—66)

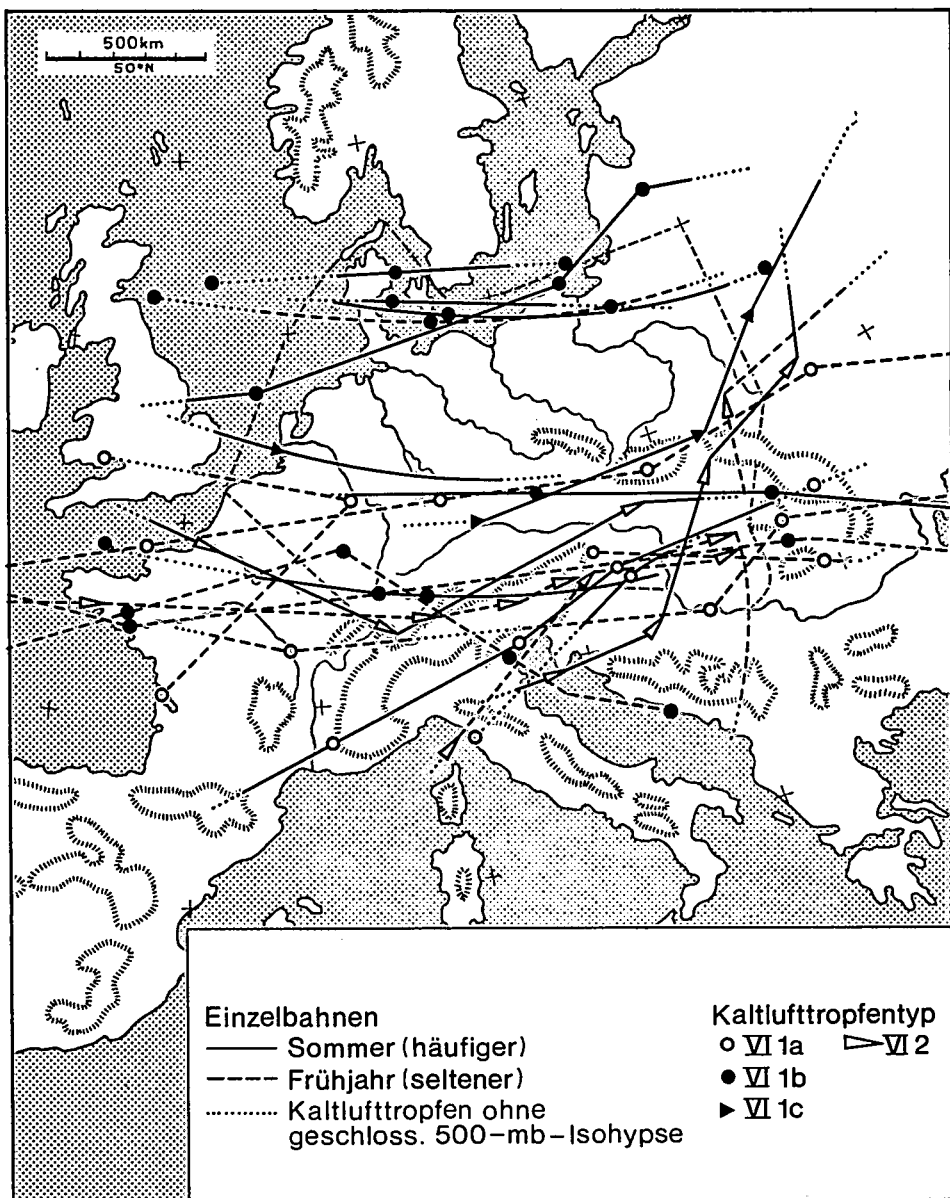


Abb. 51: Die KW-Bahn im Frühjahr und Sommer (1957—66)

Tabelle 18 Verteilung der Bahn K-Wirr nach Kaltlufttropfentypen und Jahreszeiten (1957—66)

Tropfentyp	Winter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Jahr
VI1a	1	4	4	2	11
VI1b	1	2	1	1	5
VI1c	—	—	—	—	—
VI2	—	4	2	2	8
VI3	2	2	5	2	11
Gesamt	4	12	12	7	35

Bildet man die Klassen 1) VI1a + VI1b + VI1c, 2) VI2 und 3) VI3 und vergleicht ihre Anteile an der KO- und der wirren Bahn, ergibt sich das $\chi^2 = 1,13$, das weit unter der Grenze für ein Signifikanzniveau von 5 % liegt. Bei beiden Bahnen ist der Anteil der VI3- bzw. VI1a-Tropfen am größten, während die VI1b- und VI1c-Tropfen kaum vertreten sind. Diese Verteilungsstruktur resultiert bei der wirren Bahn daraus, daß nur die Kaltlufttropfen langsam und wirr wandern können, die entweder gegenüber ihrer Umgebung möglichst abgeschlossen sind (VI3- und in geringerem Maß auch die VI2-Tropfen) oder bei ganz flacher Druckverteilung am Boden und in der Höhe (VI1a-Tropfen) ohne Bevorzugung einer bestimmten Strömungsrichtung auftreten.

Die Wetterwirksamkeit der VI1a-Tropfen wurde schon bei der KO-Bahn besprochen. Im Sommer erhöht sich die Ergiebigkeit der Schauer aber infolge der stärkeren Erhitzung des Bodens. Der Einflußbereich bleibt jedoch eng begrenzt. Im Gegensatz dazu ist er bei den VI2- und VI3-Tropfen ausgedehnter. Die räumliche Verteilung der Witterung innerhalb der quasistationären, intensiven Kaltlufttropfen ist komplizierter als bei denen der KO-Bahn.

Bei letzteren war es noch sinnvoll, hinsichtlich der Witterungsgestaltung von Vorder- und Rückseite zu sprechen. Das ist nicht mehr möglich, wenn die Kaltlufttropfen quasistationär werden. Dann kreisen nämlich Gebiete mit aufsteigender bzw. absinkender Luftbewegung im Kaltlufttropfen, und das Wetter eines Raumes hängt von seiner Lage in dem kreisenden System ab. Aufsteigende bzw. Absinkvorgänge werden noch durch das Relief verstärkt oder abgeschwächt, so daß die Wettervorhersage für den Meteorologen äußerst schwierig wird, da eine genaue Kenntnis der Orographie des betrachteten Raumes erforderlich ist.

In den Randgebieten sind zudem die Verlagerungen des Kaltlufttropfens zu beachten, denn mit der Lage zum Kaltluftzentrum ändern sich die Eigenschaften der herangeführten Luft und damit auch die Witterung.

Insgesamt zeichnet sich die Witterung in den intensiven, wirren Kaltlufttropfen durch niedrige Temperaturen und häufige Niederschläge (im Winter als Schnee) aus, die sowohl als Aufgleitniederschläge als auch als Schauer mit dazwischenliegenden Aufheiterungen fallen und mehrere Tage anhalten können.

Die jahreszeitlichen Schwerpunkte ihres Auftretens liegen im Frühjahr und Sommer; jedoch ist die Verteilung gleichmäßiger als bei den übrigen Tropfenbahnen.

Bei der räumlichen Verteilung (Abb. 52 und 53) lassen sich Dichtezentren kaum finden. Die Dichte nimmt allmählich nach Süden ab (am auffälligsten bei den VI2- und VI3-Tropfen); die Alpen weisen wegen ihres erhöhten Strahlungsgenusses kaum Kerne auf, sondern wirken ablenkend auf die Kaltlufttropfen, woraus die relative Häufung in der Donautiefenebene abzuleiten ist.

Zum Schluß seien noch die nur kurzfristig sichtbaren, kleinen Kaltlufttropfen erwähnt. Es handelt sich fast ausschließlich um VIIa-Tropfen, die sich bei auch in der Höhe hohem Luftdruck und gradientschwacher Luftdruckverteilung einstellen und sich meistens an Ort und Stelle bilden und auflösen. Sie haben keinerlei Bedeutung für die Witterungsgestaltung und ähneln den VIIa-Tropfen der KO-Bahn. Ebenso wie bei dieser liegt ihr Häufigkeitsmaximum im Herbst (Tab. 19, Abb. 52 und 53).

Tabelle 19 **Verteilung des Lagetyps K-Kurz nach Kaltlufttropfentypen und Jahreszeiten (1957—66)**

Tropfentyp	Winter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Jahr
VIIa	1	—	1	6	8
VIIb	—	—	—	1	1
Gesamt	1	—	1	7	9

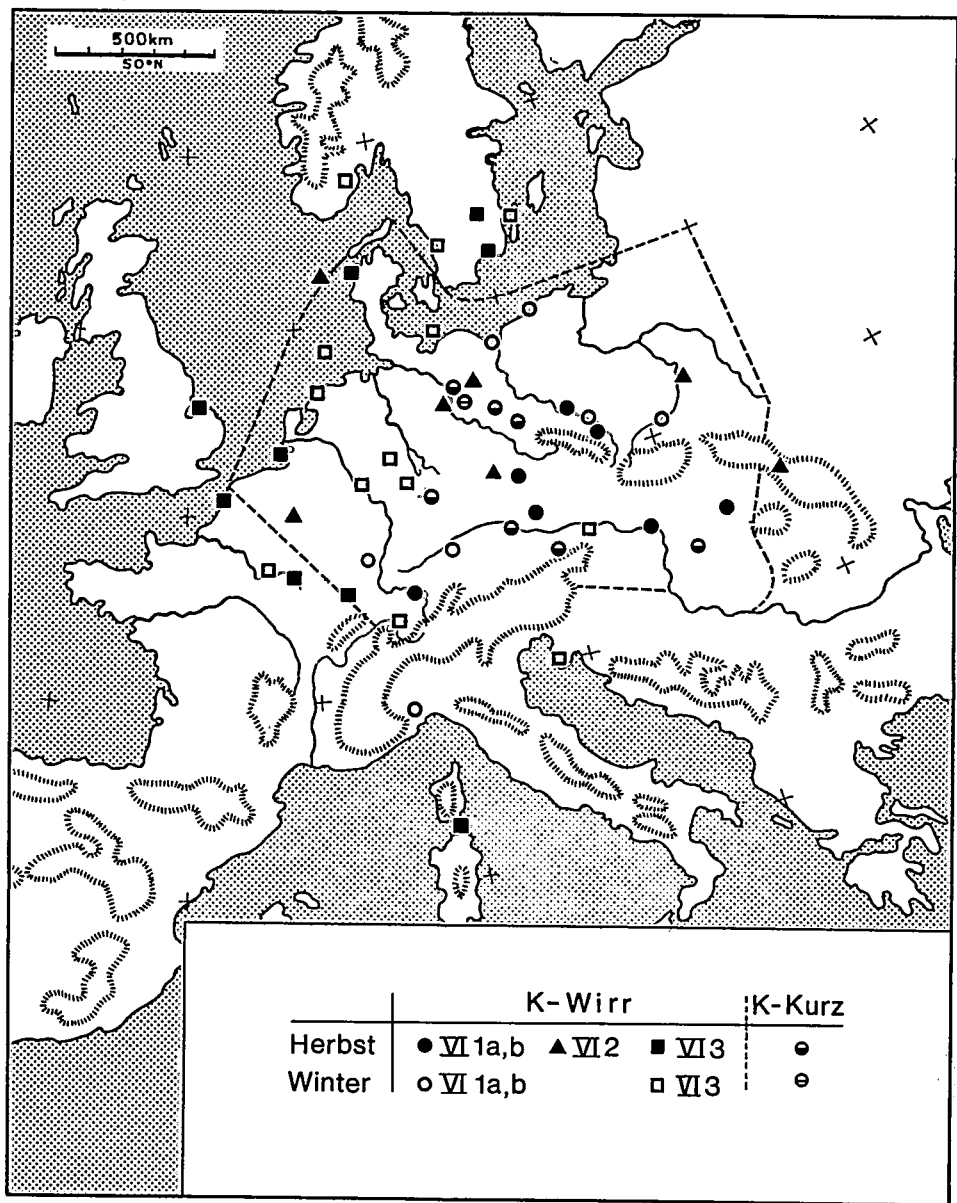


Abb. 52: Die Typen K-Wirr und K-Kurz im Herbst und Winter (1957—66)

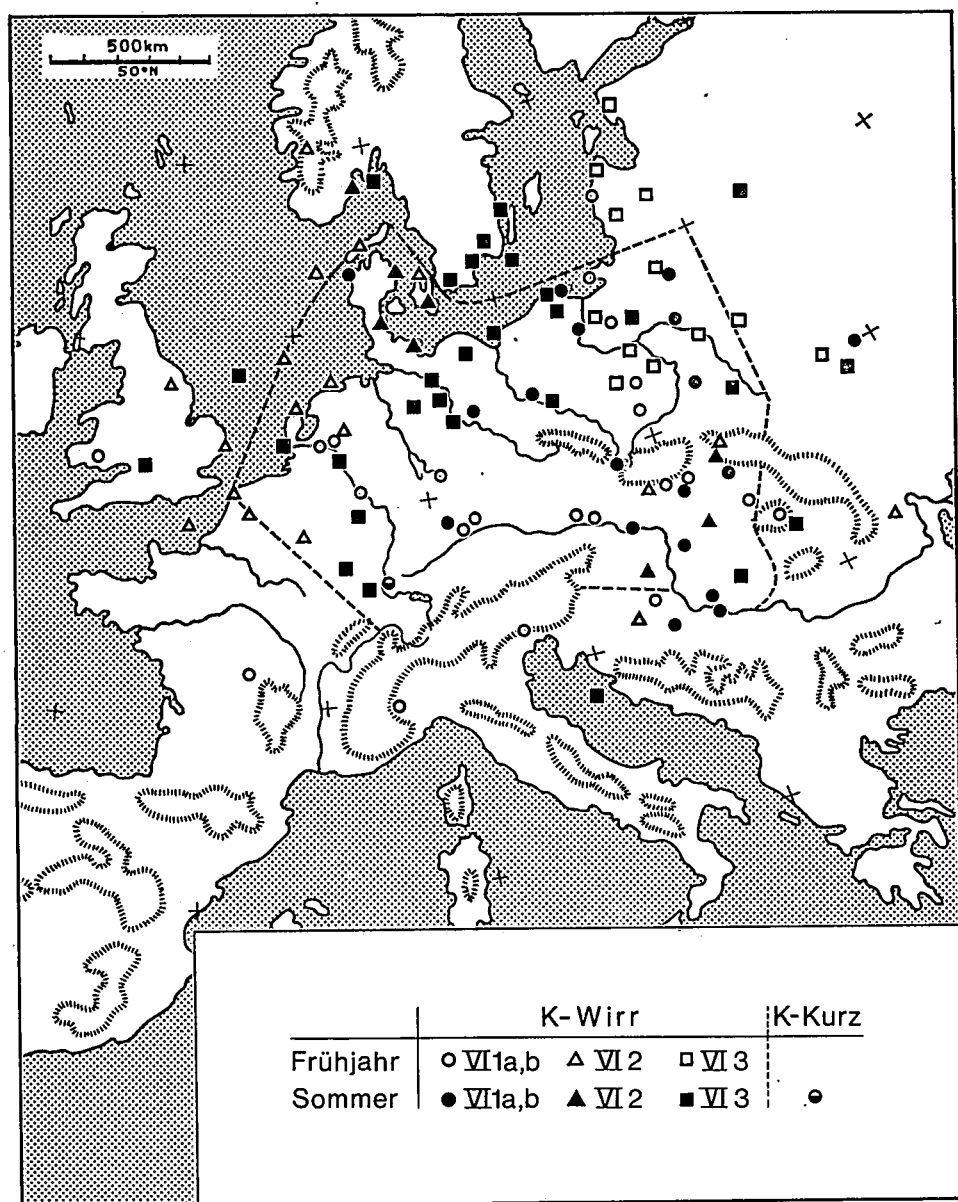


Abb. 53: Die Typen K-Wirr und K-Kurz im Frühjahr und Sommer (1957—66)

IV.

Das Jahreszeitenproblem

1. Der Jahresgang der Bahn- und Lagetypen

Zur Vorbereitung der zusammenfassenden Darstellung des Jahreszeitenrhythmus der mitteleuropäischen Tiefdruckbahn- und -lagetypen sollen im folgenden kurz die Jahresgänge der Typen auf Monatsbasis an Hand graphischer Darstellungen besprochen werden. Dabei verbietet sich ein Eingehen auf die Einzelheiten der Kurven schon deshalb, weil wegen des nur zehnjährigen Untersuchungszeitraumes eine statistische Sicherung der einzelnen „Zacken“ nur selten möglich ist.

Die zeitlichen Einheiten in den folgenden Abbildungen 54—62 umfassen jeweils den Zeitraum zwischen den Monatsmitten, sie dauern also vom 16. eines Monats bis zum 15. des folgenden. Die Abweichung von der „normalen“ Monateinteilung wurde gewählt, um die Verbindung zu den ebenfalls in der Monatsmitte beginnenden, weiter unten definierten Jahreszeiten zu erleichtern.

Beim Vergleich der Jahresgänge der korrespondierenden Äste der SW- und WSW-Bahnen ergeben sich einige Übereinstimmungen, die noch einmal die Ähnlichkeit zwischen beiden Bahnen deutlich werden lassen (vgl. Abb. 54 und 55). Der nordwestliche Ast der SW-Bahn (SWNW) weist zwei Maxima im Hochwinter und Sommer auf, die beim nördlichen Ast der WSW-Bahn (WSWN) zwar auch auftreten, jedoch 1. nicht so gut ausgeprägt sind und 2. etwas später liegen.

Die zentralen Äste dagegen haben nur ein Maximum im späten Frühjahr bzw. Frühsommer, dem ein Minimum im Winter gegenübersteht. Die Äste durch die Donautiefenebene haben einen ausgeglichenen Jahresgang, wenn auch eine schwache Tendenz zur Zweigipfligkeit mit größeren Häufigkeiten im Herbst und Spätwinter/Frühjahr zu erkennen ist, in der die nahe Verwandtschaft dieser Bahnen zum Witterungsregime des nördlichen Mittelmeeres zum Ausdruck kommt.

Der Jahresgang der W-, NW- und N-Bahn (Abb. 56) ist äußerst einfach. Dem schmalen Gipfel im Frühjahr- bis Hochwinter folgt ein abgestufter, vielfach unterbrochener, langsamer Abfall während des Frühjahrs, dem sich ein breites Sommerminimum anschließt, das am Ende des Herbstes von einem steilen Anstieg zum Wintergipfel abgelöst wird. Der Jahresgang der W-Bahn weicht von diesem einfachen Bild etwas ab, da sich in der zweiten Sommerhälfte ein sekundäres Maximum einstellt. Darin drückt sich die Mittelstellung der W-Bahn zwischen den nördlich anschließenden Bahnen mit streng eingipfligem und den nordwestlichen Ästen der südlich anschließenden Bahnen mit zweigipfligem Jahresgang aus.

Die Jahresgänge der in Abb. 57 dargestellten Bahntypen weisen große Unterschiede auf. Während sich die O-Bahn ähnlich wie die Gruppe der W- bis N-Bahnen verhält, zeigt die Vb-Bahn einen ausgeglichenen Verlauf bei schwacher Tendenz zur Zweigipfligkeit mit Maxima im Spätwinter und Spätsommer/Herbst, ähnlich den Jahresgängen der südlichen Äste der SW- und WSW-Bahnen. Die SO-Bahn ähnelt mit ihrem Sommermaximum dagegen mehr den zentralen Ästen der SW- und WSW-Bahnen. Einer der wenigen Typen mit ausgeprägtem Herbstmaximum ist die S-Bahn, deren Jahresgang aber ansonsten ausgeglichen ist.

Die zyklonal gekrümmten Bahnen sind insgesamt nur geringen Schwankungen unterworfen (Abb. 58). Doch können folgende grobe Zuordnungen erfolgen:

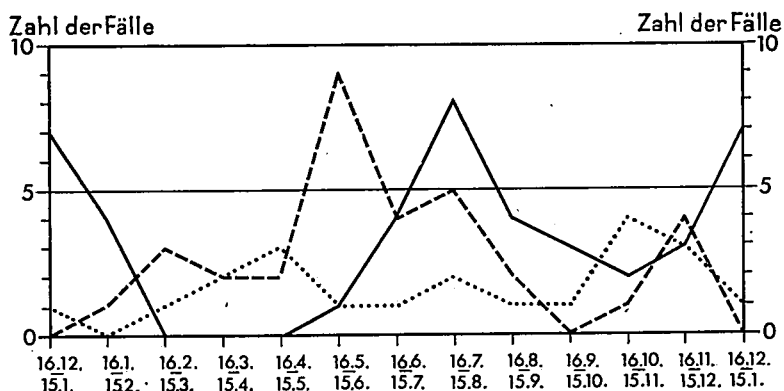


Abb. 54: Häufigkeit der Bahnen SWNW (—), SWK (- - -) und SWSO (....) im Jahresgang (1957—66)

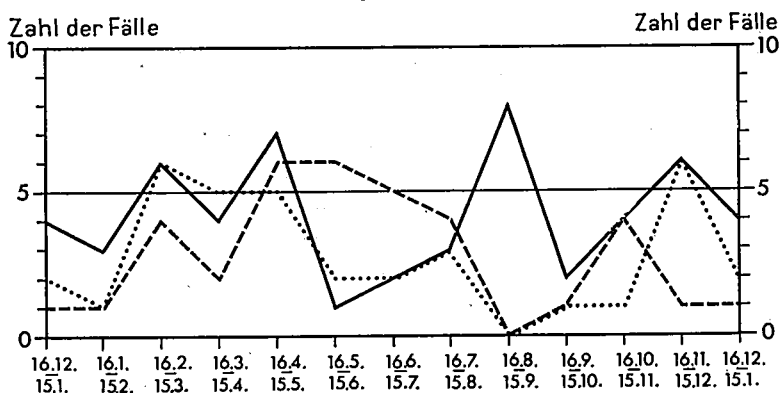


Abb. 55: Häufigkeit der Bahnen WSWN (—), WSWK (- - -) und WSWs (....) im Jahresgang (1957—66)

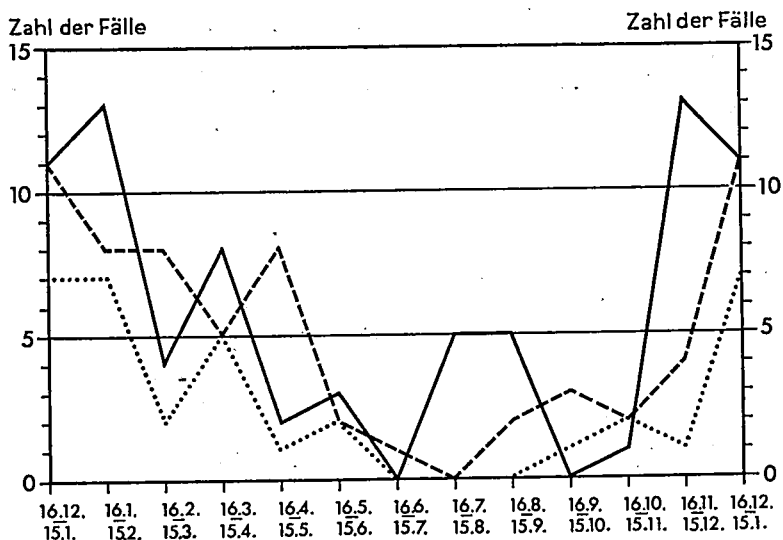


Abb. 56: Häufigkeit der Bahnen W (—), NW (- - -) und N (....) im Jahresgang (1957—66)

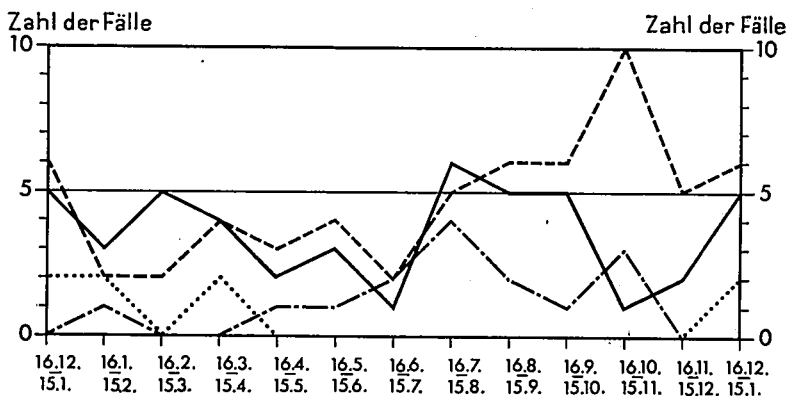


Abb. 57: Häufigkeit der Bahnen Vb (—), S (---), SO (-.-.) und O (...) im Jahresgang (1957—66)

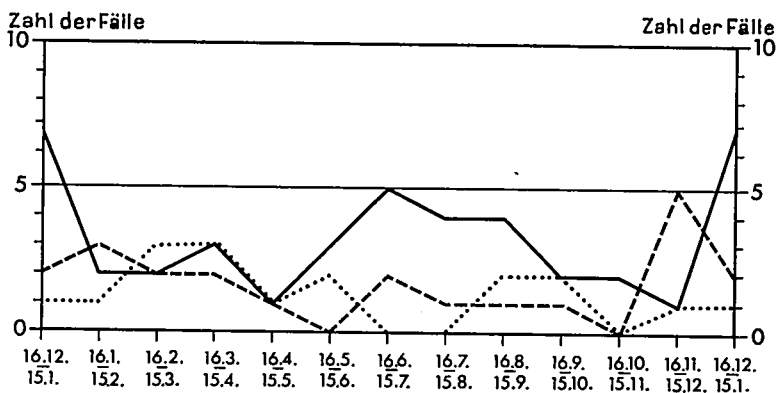


Abb. 58: Häufigkeit der Bahnen W-SW (—), Trog (---) und NW-W (...) im Jahresgang (1957—66)

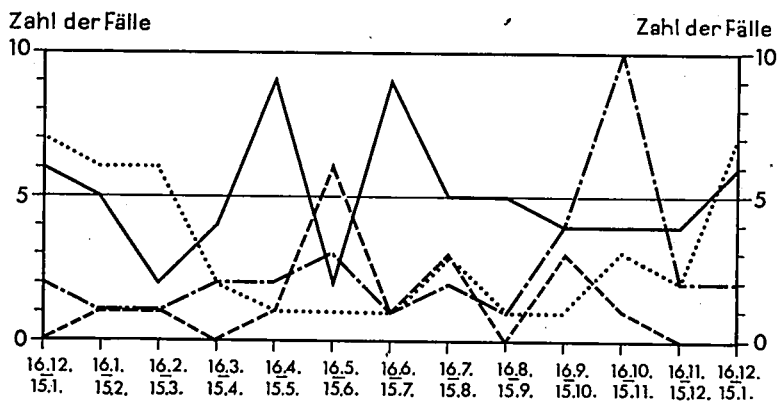


Abb. 59: Häufigkeit der Typen Wirr-Tief (—), Wirr-Flach (---), III (-.-.) und IV (...) im Jahresgang (1957—66)

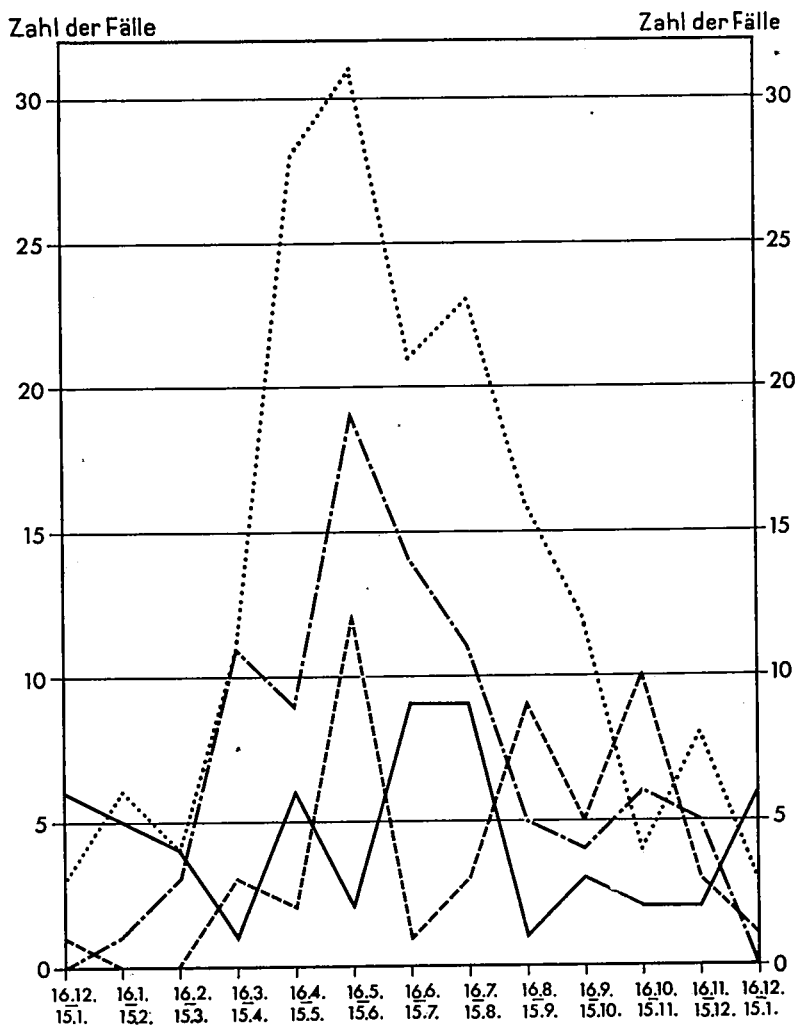


Abb. 60: Häufigkeit der Lagetypen V1a (—), V1a-S (- - -), V1b (- . - .) und V2 (....) im Jahresgang (1957—66)

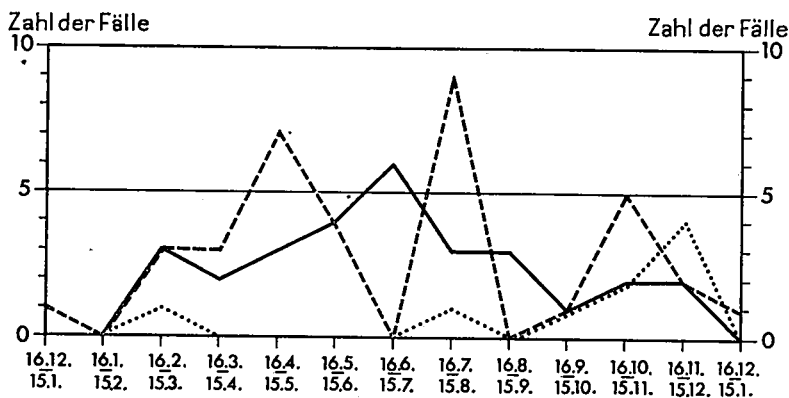


Abb. 61: Häufigkeit der Bahnen KO (—), KN (---) und KNW (....) im Jahresgang (1957—66)

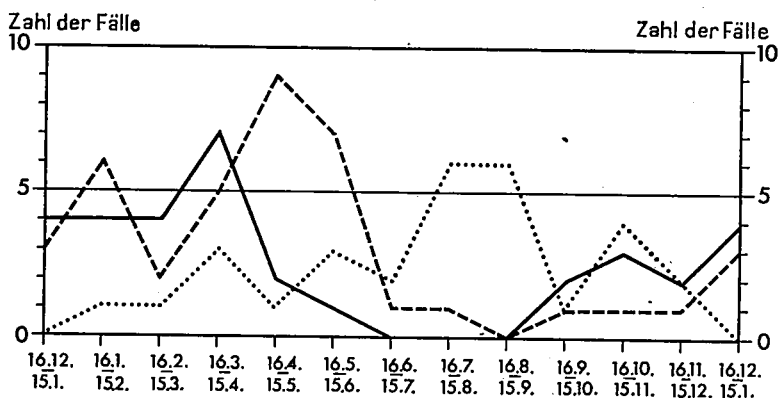


Abb. 62: Häufigkeit der KW-Bahn (—) und der Typen K-Wirr (---) und K-Kurz (....) im Jahresgang (1957—66)

Der Verlauf der W-SW-Bahn ähnelt mit den schwachen Winter- und Sommermaxima den zweigipfligen, der der Trog-Bahn entspricht den eingipfligen Typen mit Wintermaximum. Die NW-W-Bahn weist zwar zwei Maxima auf, jedoch liegen sie, analog den beiden Maxima des nördlichen Astes der WSW-Bahnen, etwas später als bei der W-SW-Bahn.

Sieht man von den wirren Tiefs ab, zeichnen sich die Lagetypen der Bodenzykklonen durch ausgeprägte Maxima und Minima aus (Abb. 59 und 60).

Die tiefen wirren Zyklonen verteilen sich ziemlich gleichmäßig auf alle Monate und besitzen nur zum Frühjahrseende und Sommeranfang eine Periode größerer Häufigkeit, die aber nicht zusammenhängt, sondern von einer Zeit minimalen Auftretens getrennt wird. In dieser (16. 5. bis 15. 6.) sind dafür die flachen wirren Tiefs — bei im übrigen ausgeglichenem Jahresgang — besonders häufig.

Der Jahresgang der flachen Kaltlufttiefs entspricht mit dem Wintermaximum und dem breiten Sommerminimum dem der W- bis N-Bahnen, während die Leetiefs wie die S-Bahn im Herbst ihre größte Häufigkeit erreichen und sonst nur selten auftreten.

Von den übrigen Lagetypen haben die V1b- und V2-Tiefs einen eingipfligen Jahresgang mit einem Maximum Ende Frühjahr/Anfang Sommer und beidseitigem raschen Abfall zum Winterminimum.

Die beiden schleifenden, kurzfristigen Zyklontypen weisen jeweils zwei Maxima auf. Die Kurve der V1a-Tiefs ähnelt der der SWNW-Bahn, ohne im Frühjahr soweit abzusinken wie letztere. Die V1a-S-Tiefs zeigen neben dem Herbstmaximum noch ein zweites zum Frühjahrseende, das zwar nur kurzfristig, aber umso deutlicher entwickelt ist. Ihr Jahresgang entspricht am ehesten dem bei der S- und Vb-Bahn erwarteten.

Bei den in Abb. 61 dargestellten Kaltlufttropfenbahnen handelt es sich jeweils um eingipflige Jahresgänge, wobei sich aus der Lage der Maxima die Richtung, aus der in der betreffenden Zeit die Hauptkaltluftzufuhr nach Mitteleuropa erfolgt, ablesen läßt.

Die KO-Bahn ist im Winter am häufigsten, das Maximum der KN-Bahn ist auf das Frühjahr verschoben. Im Sommer tritt die KNW-Bahn am meisten auf. Ihr Maximum ist jedoch schwächer ausgeprägt.

Ähnliches gilt für die KW-Bahn, deren Sommermaximum noch breiter angelegt ist (Abb. 62).

Eingipflig ist auch der Jahresgang der kurzfristig sichtbaren Kaltlufttropfen mit dem spätherbstlichen Maximum (Abb. 62).

Die wirren Kaltlufttropfen sind zwar während des Frühjahrs und Sommers sehr häufig, doch fehlen sie in der Zeit vom 16. 6. bis 15. 7., so daß ihr Jahresgang den Eindruck der Zweigipfligkeit erweckt. Dafür liegen die beiden Gipfel aber zu eng beisammen, so daß besser von einem, aber geteilten Maximum gesprochen werden sollte.

2. Definition und Charakterisierung der Jahreszeiten

Die Ausführungen über den Jahresgang der Bahn- und Lagetypen zeigten schon die scheinbar unübersichtliche Vielfalt der Möglichkeiten: die Maxima und Minima ändern nicht nur ihre Lage von Bahn zu Bahn, sie sind auch verschieden stark ausgeprägt, wie überhaupt die Abweichungen der monatlichen Verteilung von einer angenommenen Gleichverteilung unterschiedlich groß sind.

Es soll nun versucht werden, eine Jahreszeitengliederung vorzunehmen, die dem Verhalten der Bahnen und ihren Beziehungen untereinander in optimaler Weise gerecht wird. Damit kann nur ein Teilbetrag zu dem viel umfassenderen Problem der Jahreszeiten geliefert werden, da wir uns auf das Verhalten der Tiefdruckgebiete als Kriterium beschränken müssen. Wegen der Kürze des untersuchten Zeitraumes verbietet sich zudem eine Festlegung von Regelfällen. Diese können darum nicht zur Abgrenzung der Jahreszeiten dienen. Vielmehr kann die Jahreszeitengliederung nur auf den zeitlichen Einheiten aufbauen, die der Untersuchung zugrunde lagen, also jeweils halben Monaten; d. h. die zu definierenden Jahreszeiten müssen sich aus Halbmonatszeiträumen zusammensetzen.

Weiterhin sollen, um das Bild nicht zu kompliziert zu gestalten, alle Jahreszeiten die gleiche Dauer haben. Es wird also eine „schematische“ Jahreszeiteinteilung angestrebt — ähnlich der von Baur (1958 und 1963) vorgeschlagenen.

Es erhebt sich nun die Frage, wie lang die Jahreszeiten sein bzw. wie viele aufgestellt werden sollen. Für eine möglichst optimale Bestimmung der Dauer der Jahreszeiten waren folgende Gesichtspunkte maßgebend:

- a) Zwölf Jahreszeiten sind zuviel, um einen schnellen Überblick zu gestatten und, vor allem, die Ergebnisse bei dem nur zehnjährigen Untersuchungszeitraum statistisch zu sichern.
- b) Bei nur vier Jahreszeiten von jeweils drei Monaten (z. B. meteorologische Jahreszeiten) ist die Dauer der Jahreszeiten zu lang, um der Gefahr zu entgehen, daß wichtige Sprünge im Gang der Witterung verwischt werden. Es war daher am sinnvollsten, den Zeitraum von zwei Monaten als Länge der nun sechs Jahreszeiten zu wählen. Für die endgültige Festlegung der Jahreszeiten gab es nun vier Möglichkeiten, und zwar: 16. 11. — 15. 1., 16. 1. — 15. 3. usw., oder: 1. 12. — 31. 1., 1. 2. — 31. 3. usw., oder 16. 12. — 15. 2., 16. 2. — 15. 4. usw., oder 1. 1. — 29. 2., 1. 3. — 30. 4. usw.

Für die Wahl der geeignetsten dieser vier potentiellen Einteilungen waren folgende Überlegungen ausschlaggebend. Die scheinbare Wanderung der Sonne zwischen den Wendekreisen bedingt entsprechende Änderungen der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre, die sich wiederum auf das Verhalten der Bahnen im Jahresgang und dabei insbesondere auf die Häufigkeit ihres Auftretens auswirken. Letztere konnte also weiterhin als entscheidendes Kriterium für die Wahl der geeignetsten Einteilung dienen.

Zwar vollziehen sich die der „Sonnenwanderung“ entsprechenden Änderungen im Verhalten der atmosphärischen Zustände nur allmählich; jedoch sollte bei einer Jahreszeiteinteilung darauf Wert gelegt werden, daß die Verteilung der untersuchten Elemente auf die Jahreszeiten möglichst stark von der Gleichverteilung abweicht, da andernfalls die Unterschiede für eine Trennung in Jahreszeiten zu gering würden.

In unserem Fall mußte also die Einteilung gewählt werden, bei der die Häufigkeitsverteilungen der Bahn- und Lagetypen möglichst große Abweichungen von der Gleichverteilung — bei der auf alle Jahreszeiten gleich viele Vorkommen entfallen würden — aufwiesen.

Als Maß dieser Abweichungen wurde für jede der potentiellen Einteilungen und jede der Bahn- und Lagetypen der χ^2 -Koeffizient

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^6 \frac{(a_i - \bar{a})^2}{\bar{a}} \quad \text{berechnet.}$$

a_i gibt die Häufigkeit eines Typs in der i -ten Jahreszeit, $\bar{a}$ die mittlere Häufigkeit des Typs in einer Jahreszeit, also die bei einer Gleichverteilung in den Jahreszeiten zu erwartenden Häufigkeiten an.

Es muß betont werden, daß der χ^2 -Koeffizient hier in erster Linie als Maß für die Abweichung der tatsächlichen von der theoretischen Verteilung dient. Die Prüfung auf Signifikanz der Abweichung ist nur bei den Bahn- und Lagetypen mit einer absoluten Häufigkeit von mindestens 28 problemlos. Bei den übrigen Typen sind die Erwartungshäufigkeiten so gering, daß von signifikanten Abweichungen nur mit größter Vorsicht gesprochen werden kann.

Als günstigste Einteilungsmöglichkeit ergab sich die dritte. Denn bei ihrer Zugrundelegung waren

1. die Zahl der mindestens auf dem 5%-Niveau signifikanten χ^2 -Koeffizienten (bei Betrachtung nur der Bahn- und Lagetypen mit der Mindesthäufigkeit von 28),
2. der Durchschnittswert der χ^2 -Koeffizienten, gemittelt über alle Bahnen, am größten.

Es wurden außerdem für jede Bahn die χ^2 -Werte bei den vier Einteilungsmöglichkeiten nach der Größe geordnet und damit die Einteilungen in eine Rangreihe gebracht. Dabei ergab sich, daß die dritte Einteilung

3. am häufigsten die erste Stelle,
4. am seltensten die vierte Stelle einnahm und
5. den besten durchschnittlichen Stellenwert hatte.

Folgende Einteilung des Jahres in sechs Jahreszeiten gleicher Dauer kann also als die optimale gelten:

I. 16. 12. — 15. 2.

III. 16. 4. — 15. 6.

V. 16. 8. — 15. 10.

II. 16. 2. — 15. 4.

IV. 16. 6. — 15. 8.

VI. 16. 10. — 15. 12.

Da bei dieser Einteilung die Jahreszeiten jeweils in der Monatsmitte beginnen, müssen genau zwei in die Mitte von zwei der üblichen drei Monate umfassenden meteorologischen Jahreszeiten zu liegen kommen.

Auffallend ist, daß es die meteorologischen Jahreszeiten Winter und Sommer sind, in die zwei der neu definierten eingebettet werden, und zwar die Jahreszeiten I und IV. Da die allgemeine Zirkulation mit einer gewissen Verzögerung auf die Veränderungen der Einstrahlungsverhältnisse reagiert, können die beiden Jahreszeiten I und IV als Winter und Sommer bezeichnet werden. Daß gerade sie in den entsprechenden meteorologischen Jahreszeiten liegen, bedeutet, daß die vorliegende Jahreszeiteinteilung entscheidend auf dem Gegensatz Winter — Sommer gründet. Darum war es sinnvoll, die übrigen Jahreszeiten wie folgt zu benennen:

II = Vorfrühling, III = Spätfrühling, V = Frühherbst, VI = Spätherbst.

Um einerseits die Wertigkeit der Jahreszeiten, andererseits die Stellung eines Bahn- bzw. Lagetyps im Jahr und in der Beziehung zu den übrigen Typen zusammenfassend darzustellen, wurde ein Diagramm der Tiefdruckbahn- und -lagetypen konstruiert, auf dessen Abszisse die Jahreszeiten eingetragen sind (Abb. 63).

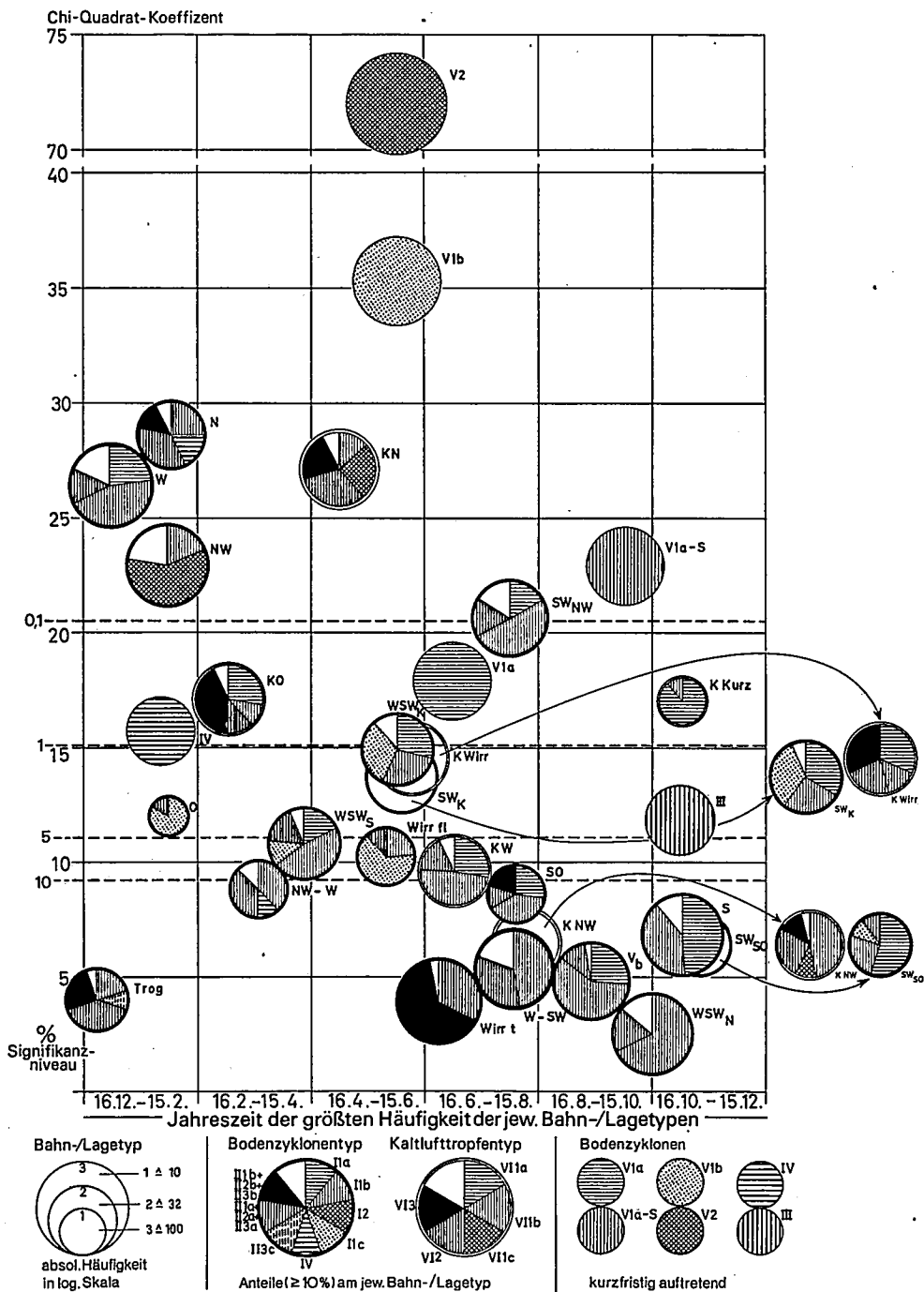


Abb. 63: Die Tiefdruckbahn- und Tiefdrucklagetypen (1957-66)

Jeder Typ wurde der Jahreszeit zugeordnet, in der er am häufigsten auftritt. Die Zuordnung erfolgte derart, daß der Typ näher an die der benachbarten Jahreszeiten gerückt wurde, in der er häufiger ist.

Wies ein Typ zwei gleiche Häufigkeitsmaxima auf, wurde er, falls die beiden entsprechenden Jahreszeiten nebeneinander lagen, auf die Grenze zwischen beiden platziert. Ansonsten wurde er der Jahreszeit zugeordnet, in deren benachbarten Jahreszeiten er zahlreicher vorkam.

Auf der Ordinate wurden die χ^2 -Koeffizienten für die Abweichung von der Gleichverteilung eingetragen. Dadurch kann die „Ansprechbarkeit“ eines Typs auf die gewählte Jahreseinteilung aufgezeigt werden: Je weiter „oben“ ein Typ in dem Diagramm liegt, desto größer ist die Abweichung seiner auf die Jahreszeiten bezogenen Häufigkeitsverteilung von der gleichmäßigen Verteilung, d. h. umso stärker weicht sein Jahresgang vom gleichmäßigen ab. Außerdem wurden noch die wichtigsten Signifikanzniveaus bei fünf Freiheitsgraden (sechs Jahreszeiten) eingetragen. Dadurch kann bei den Typen mit mindestens 28 Einzelfällen abgelesen werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Abweichung der Häufigkeitsverteilung von der Gleichverteilung überzufällig ist. So weichen z. B. die Häufigkeitsverteilungen der Typen, die oberhalb der 1%-Niveaulinie liegen, mit mindestens 99%iger Wahrscheinlichkeit überzufällig von der Gleichverteilung ab. Normalerweise wird als „statistische Sicherheitsgrenze“ das 5%-Niveau gewählt. Das bedeutet, daß bei 15 der 23 Bahn- und Lagetypen mit einer absoluten Häufigkeit größer/gleich 28 die Jahreszeitenverteilung nicht zufällig von der Gleichverteilung abweicht. Den Abweichungen müssen also Gesetzmäßigkeiten zugrunde liegen (eben der unterschiedliche Strahlungshaushalt in den einzelnen Jahreszeiten).

Gemäß der Definition des χ^2 -Koeffizienten tragen besonders die extremen Abweichungen vom Durchschnittswert zu seiner Vergrößerung bei (Quadrate im Zähler). Folglich sind bei großem χ^2 -Koeffizienten im allgemeinen auch die Häufigkeitsmaxima (und Minima) entsprechend gut ausgeprägt. Man kann also von der Lage eines Typs im Diagramm auf die Stärke seines Jahreszeitenmaximums schließen.

Um die Stellung der Typen untereinander und die Bedeutung der Typen für das zyklonale Witterungsgeschehen zu erfassen, müssen im Diagramm die absolute Häufigkeit und die Eigenschaften der auf den Bahnen wandernden Tiefdruckgebiete berücksichtigt werden. Für erstere wurde als Maß der Radius der die Typen beschreibenden Kreise in logarithmischer Skala gewählt. Letztere schlagen sich, wie oben schon erläutert wurde, in den Anteilen der auf die Bahnen entfallenden Tiefdrucktypen nieder.

Darum wurden die Anteile der Tiefdrucktypen, die mindestens 10% erreichten, in Kreissektoren entsprechender Größe dargestellt. Erreichten sie zusammen nicht 100%, wurde der restliche Kreissektor freigelassen.

Auf die Schilderung der Beziehungen zwischen den Bahn- bzw. Lagetypen soll verzichtet werden, da darauf schon weitgehend bei der Beschreibung der Typen eingegangen wurde und das Diagramm darüber hinreichend Auskunft gibt. Stattdessen soll an Hand des Diagramms kurz der ideale Jahresgang besprochen werden, wie er sich aus dem Bild der zyklonalen Entwicklungen in Mitteleuropa ergibt.

Auf den Winter entfallen die — meist gut ausgeprägten — Maxima von sechs Typen. Diese Bahnen weisen fast alle einen von der Gleichverteilung stark abweichenden Jahresgang auf. Insofern wird der Winter durch sie gut charakterisiert. Er wird in erster Linie von der W-, NW- und N-Bahn bestimmt, von denen die W-Bahn mit ihren milden Luftmassen mehr den Winteranfang beherrscht. Mit fortschreitendem

Strahlungsverlust und Auskühlung der nordpolaren Luftmassen werden die nördlichen Bahnen stärker bevorzugt, dafür sorgend, daß die zweite Winterhälfte kälter ist als die erste. Das wirkt sich für die Schneesicherheit der mitteleuropäischen Mittelgebirge zu dieser Zeit günstig aus. Entsprechend der N-Bahn verhalten sich die flachen Kaltlufttiefs. Die O-Bahn ist zwar selten, aber besonders für strenge Winter charakteristisch. Die Trogbahn hat wegen ihres ausgeglichenen Jahresganges nur geringe Bedeutung, hat aber mit ihrer Sturmhäufigkeit einen wichtigen Anteil an der Gestaltung des mitteleuropäischen Winters.

Der Vorfrühling weist nur wenige Maxima auf. Die zyklonale Aktivität des Winters flaut allmählich ab, und kontinentale Hochdruckgebiete gewinnen stärkeren Einfluß auf die Witterung. Die von ihnen gesteuerten Kaltlufttropfen östlicher Herkunft erreichen jetzt ihre größte Häufigkeit. Der Südosten wird von Störungen aus dem Mittelmeerraum heimgesucht (WSWS-Bahn). Das schwache Maximum der NW-W-Bahn deutet auf die gesteigerte Tendenz zu osteuropäischen Höhenträgen hin. Insgesamt ist der Vorfrühling im Gegensatz zum maritim-zyklonal geprägten Winter stärker kontinental-antizyklonal beeinflusst.

Im Spätfrühling wird gleichsam der Kampf zwischen Winter und Sommer ausgetragen. Einerseits sorgen die nördliche Kaltlufttropfenbahn und die langdauernden, wirren Kaltlufttropfen für kräftige Kälterückfälle. Ihnen stehen die Perioden mit flacher Luftdruckverteilung gegenüber, in denen zwar heitere Witterung vorherrscht, die aber auch, besonders in der Übergangszeit zum Sommer, von zahlreichen flachen Tiefs gekennzeichnet sind. Die flachen Bodentiefs kommen sowohl nur kurzfristig (V2) als auch länger anhaltend (Wirr-Flach) vor und sorgen für einen wechselhaften Witterungsablauf. Die Launenhaftigkeit des Wetters wird noch gesteigert durch die aus west- bis südwestlicher Richtung heranziehenden Schübe gemäßigter, maritimer Polarluft, die durch die sich an den Kaltfronten bildenden schwachen Kaltfronttiefs (V1b) gekennzeichnet sind. Gleiche Wirkung haben die besser entwickelten Gewittertiefs der SWK- und WSWK-Bahn. Die Entstehung aller flachen Zyklonen wird schon durch die verstärkte Sonneneinstrahlung begünstigt.

Im Sommer haben zwar ebenso viele Typen wie im Spätfrühjahr und Winter ihr Maximum, doch weisen diese Typen meistens einen ausgeglichenen Jahresgang auf, und die Maxima sind nicht sehr ausgeprägt, so daß die Einstrahlung entscheidend zur Ausbildung der Maxima im Sommer beitragen dürfte. Die Bahntypen sind charakteristische Glieder der sogenannten Monsunwellen. Das gilt für die SWNW-Bahn, die sommerliche Schönwetterperioden beendet, ebenso wie für die W-SW-Bahn, hinter der ein kräftigerer Kaltlufteinbruch erfolgt. Zu ihnen gesellen sich als Vertreter der Kaltlufttropfen die KNW- und KW-Bahn. Dazu treten als Lagetypen die kurzfristigen, bei Südwest- bis Nordwestlagen vorkommenden schleifenden Tiefs (V1a) und die umfangreichen, stark verwirbelten wirren Tiefs, die wegen der mit ihnen einhergehenden langanhaltenden Schlechtwetterperioden gefürchtet sind. Das häufige Auftreten der SO-Bahn (im Gegensatz zur S-Bahn) weist ebenfalls auf das gesteigerte Vorkommen von Höhentiefs im Sommer hin.

Wie der Vorfrühling ist auch der Fr ü h h e r b s t eine Zeit verminderter zyklonaler Aktivität. Häufige mitteleuropäische Hochdruckgebiete unterbinden die Ausbildung langanhaltender zyklonaler Perioden. Hinter einer abwandernden, in Osteuropa stationär werdenden Antizyklone stellt sich nicht selten eine Südlage mit einer stabilen Luftmassengrenze ein, an der es zu ergiebigen Aufgleitniederschlägen kommt (V1a-S-Tiefs). Die Vb-Bahn ist, bei allerdings ausgeglichenem Jahresgang, ebenfalls ein Glied dieser Großwetterlagen.

Das Maximum der WSWN-Bahn in den beiden herbstlichen Jahreszeiten deutet auf das gelegentliche Auftreten von Herbststürmen hin und lenkt den Blick auf den Spätherbst, der kaum unruhiger als der Frühherbst verläuft, wenn auch bei einem nur flüchtigen Überblick ein gegenteiliger Eindruck entsteht, da im Spätherbst mehr Maxima als im Frühherbst zu finden sind. Jedoch haben die Leetiefs kaum Einfluß auf das Witterungsgeschehen. Gleiches gilt für die kurzfristig sichtbaren Kaltlufttropfen. Beide treten bei flacher Luftdruckverteilung auf und sind eher Kennzeichen für antizyklonale Wetterlagen. Hinsichtlich der Bedeutung der S-Bahn im Spätherbst gilt das gleiche wie für den Typ VIa-S im Frühherbst. Das schwache Maximum der SWSO-Bahn unterstreicht noch einmal die im Herbst auflebende zyklonale Tätigkeit im nördlichen Mittelmeer. Kennzeichnend für alle spätherbstlichen Maxima ist ihre „Orientierung“ zum Frühherbst. Allmählich erfolgt nämlich die Umstellung auf die winterlichen Zirkulationsverhältnisse, die sich besonders in dem Ansteigen der Häufigkeit der W- und Trogbahn im zweiten Teil des Spätherbstes bemerkbar macht.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde versucht, die in den van Bebberschen und nachfolgenden Tiefdruckbahnkarten in Mitteleuropa auftretende „Lücke“ unter Berücksichtigung dynamischer Gesichtspunkte zu schließen.

Diese Lücke erwies sich dabei als eine relative. Betrachtet man nämlich die absolute Häufigkeit, so zeigt sich, daß Mitteleuropa durchaus kein zyklonenarmes Gebiet ist. Denn in den 10 Jahren 1957—1966 wurden immerhin 1196 verschiedene Tiefdruckgebiete (einschließlich Kaltlufttropfen) gezählt, d. h. in Mitteleuropa tritt durchschnittlich in drei Tagen ein neues Tiefdruckgebiet auf. Die Vielfalt der zyklonalen Entwicklungen in Mitteleuropa resultiert dabei aus der Lage im Gradfeld (Lage in der ektrischen Westwinddrift), der Verteilung von Land und Meer und den Reliefverhältnissen.

Die Lage in der ektrischen Westwinddrift bewirkt die überwiegend westliche Herkunft und Verlagerungsrichtung der Zyklonen. Da sich an Mitteleuropa im Westen die ausgedehnten Wasserflächen des Atlantischen Ozeans anschließen, bringen die Tiefdruckgebiete aus westlicher Richtung im Winter Erwärmung und im Sommer Abkühlung, deren Grad davon abhängt, ob nördliche oder südliche Bewegungskomponenten überwiegen.

Hat die Land-Meer-Verteilung schon Einfluß auf die Begleitwitterung der Zyklonen, so wirkt sie auch direkt auf die Zyklogenese und das Verhalten der Tiefdruckgebiete ein. Erinneert sei nur an die Kaltlufttropfenbahnen. Ihre Herkunft in den verschiedenen Jahreszeiten ist eine direkte Folge der Land-Meer-Verteilung. Die räumliche Anordnung der W-, W-SW- und KW-Bahnen läßt sich auf die Lage der Britischen Inseln zurückführen.

Die Land-Meer-Verteilung hat nicht nur wegen der unterschiedlichen Reibung über dem Festland und der Wasserfläche Einfluß, sondern auch wegen deren entgegengesetztem thermischen Verhalten. Das macht sich in der jahreszeitlichen Verteilung der Bahn- und Lagetypen bemerkbar.

Die sommerliche Einstrahlung fördert nicht nur die Entstehung von flachen Tiefdruckgebieten auf dem Festland, wie der Jahresgang der V1b- und V2-Tiefs zeigt; sie begründet auch das Sommermaximum einiger Bahnen, wie z. B. der SWK-, WSWK- und SE-Bahn. Die winterliche Auskühlung verhindert dagegen die Bildung von Bodenzyklonen auf dem Kontinent und trägt zu deren schneller Auffüllung bei; sie fördert aber die Entwicklung von Kaltlufttropfen. Als vielleicht wirksamste Folge der Land-Meer-Verteilung müssen die für das mitteleuropäische Witterungsgeschehen besonders charakteristischen Tiefdruckgebiete der S- und Vb-Bahn angesehen werden. Sie sind an ein blockierendes osteuropäisches Hoch gebunden, dessen Aufbau durch die eurasiatische Festlandmasse und die Lage der Alpen zwischen Mitteleuropa und dem Mittelmeer stark begünstigt wird. Zudem tragen die Alpen direkt zur Entstehung dieser Zyklonen entscheidend bei (Lee-Effekt auf der Alpennordseite, Zyklogenese im Golf von Genua).

Wie die Alpen haben auch die Skanden großen Einfluß auf die zyklonalen Entwicklungen in Mitteleuropa. Erwähnt seien die flachen Kaltlufttiefs in der Nordsee, die zum Teil als Reste hochreichender, sich vor den Skanden auffüllender Zyklonen anzusehen sind, oder an die Konzentration der KN-Bahn in einem Streifen von der skandinavischen Halbinsel nach Süden, die auf den „Kontinentalisierungseffekt“ der Skanden zurückzuführen ist.

Wenn auch die Schließung der mitteleuropäischen Lücke hinsichtlich der Tiefdruckgebiete im Mittelpunkt der Arbeit stand, sollte doch auch ein grundsätzlicher methodischer Beitrag zu einer heute unumgänglichen Beachtung der dreidimensionalen Struktur der Zyklonen bei der Aufstellung von Bahnen der Tiefdruckgebiete geliefert werden. Dies äußerte sich darin, daß jedem Bahntyp eine bestimmte Verteilung von — nach ihrer dreidimensionalen Struktur definierten — Zyklontypen eindeutig zugeordnet wurde. Desweiteren sollte ein möglicher Weg aufgezeigt werden, um mit objektiven Kriterien eine optimale Einteilung des Jahres in Jahreszeiten zu finden. Dabei konnte als Kriterium nur das Verhalten der Tiefdruckgebiete gewählt werden. Somit konnte nur ein Teilbetrag zu dem noch ungelösten Jahreszeitenproblem geleistet werden. Jedoch läßt sich das gewählte Verfahren ohne Einschränkung auf andere klimatisch wichtige Eigenschaften eines Raumes wie Kaltlufteinbrüche, Wärmewellen, Wetterlagen, Hochdruckbahnen, Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse usw. übertragen.

Mit Hilfe der mitteleuropäischen Tiefdruckbahn- und -lagetypen läßt sich natürlich nicht das gesamte zyklonale Witterungsgeschehen in Mitteleuropa erfassen. Dazu wäre eine Ausweitung des Untersuchungsraumes auf Europa notwendig gewesen. Eine entsprechende Untersuchung unter Berücksichtigung der vertikalen Struktur der Zyklonen steht aber noch aus.

Doch wie aus der Beschreibung der Jahreszeiten ersichtlich ist, kann das Verhalten der untersuchten Bahn- und Lagetypen als „repräsentativer Querschnitt“ für das gesamte mitteleuropäische zyklonale Witterungsgeschehen gewertet werden.

Summary

The tracks of cyclones and the spatial distribution of not moving (quasi-stationary) cyclones play a dominant role in the climate and weather of Central Europe.

A more detailed study seemed to be the more necessary as Central Europe is almost omitted on the well-known map of van Bebber's tracks of cyclones.

The term cyclones includes as well depressions in sea-level as those in upper levels, the so called high-level-cyclones resp. cold drops (Kaltlufttropfen). Both are responsible for cyclonic weather although the latter are bound to high sea-level-pressure.

The tracks of cyclones were classified by the origin and the moving direction of the cyclones. Moreover all cyclones were grouped after their vertical structure and their accompanying weather. By using the chi-square test it was proved that each track can be characterized by a specific distribution of the previously defined types of cyclones and consequently by a specific kind of weather. These relations are mainly influenced by the position of Central Europe within the ectropical westerlies, the land-sea-distribution, and the position of the Alpes and the Scandinavian mountains.

Finally six climatological seasons were defined on the basis of the frequency distributions during the year of the tracks of cyclones and the quasi-stationary cyclones. These seasons were used to illustrate the variations of weather and atmospheric circulation in Central Europe in the course of the year.

L I T E R A T U R

- Band, G.:** Ist der Main eine Wetterscheide? Zeitschr. f. Meteor. 9, 1955.
- Baur, F.:** Musterbeispiele europäischer Großwetterlagen. Wiesbaden 1947.
- Baur, F.:** Einführung in die Großwetterkunde. Wiesbaden 1948.
- Baur, F.:** Die meteorologischen Jahreszeiten. Wetterkarte des Inst. f. Meteor. Berlin 1958. Beilage Nr. 143.
- Baur, F.:** Das Großwetter Mitteleuropas im Jahrsablauf. Fischer Weltalmanach 1963.
- Bebber, B. J. van:** Die geographische Vertheilung und Bewegung, das Entstehen und Verschwinden der barometrischen Minima in den Jahren 1876 bis 1880. Monatliche Übersicht der Witterung der Deutschen Seewarte 5, 1880.
- Bebber, W. J. van:** Die geographische Vertheilung und Bewegung, das Entstehen und Verschwinden der barometrischen Minima in den Jahren 1876 bis 1880. Zeitschr. d. Österr. Gesellsch. f. Meteor. 16, 1881.
- Bebber, W. J. van:** Die Zugstraßen der barometrischen Minima nach den Bahnkarten der Deutschen Seewarte für den Zeitraum 1875—1890. Meteor. Zeitschr. 8, 1891.
- Bebber, W. J. van:** Häufigkeit und Tiefe der barometrischen Minima sowie Bahnen der Maxima und stationäre Maxima in dem Zeitraum vom Winter 1883/84 bis Ende Herbst 1887. Ann. d. Hydr. u. mar. Meteor. 22, 1894.
- Bebber, W. J. van und W. Köppen:** Die Isobarentypen des Nordatlantischen Ozeans und Westeuropas, ihre Beziehungen zur Lage und Bewegung der barometrischen Maxima und Minima. Aus d. Archiv d. Dt. Seewarte 18, Nr. 4, 1895.
- Berry, F. A., G. V. Owens und H. P. Wilson:** Arctic weather maps. U. S. Navy, Bur. f. Aeronautics, 1952.
- Blüthgen, J.:** Geographie der winterlichen Kaltlufteinbrüche in Europa. Aus d. Archiv d. Dt. Seewarte 60, Nr. 6/7, 1940.
- Blüthgen, J.:** Kaltlufteinbrüche und Wärmewellen als Grundlage von Klimauntersuchungen. Zeitschr. f. angew. Meteor. / Das Wetter 53, 1941.
- Blüthgen, J.:** Allgemeine Klimageographie. Berlin 1966².
- Blüthgen, J.:** Synoptische Klimageographie. Geographische Zeitschrift 63, 1965.
- Bürger, K.:** Zur Klimatologie der Großwetterlagen. Ein witterungsklimatologischer Beitrag. Ber. d. Dt. Wetterd. Nr. 45, 1958.
- Buschner, W.:** Untersuchungen über Verlagerung, Aufbau und Dynamik zweier winterlicher Kaltlufttropfen. Ber. d. Wetterd. US-Zone Nr. 22, 1951.
- Chromow, S. P., N. Koncek und G. Swoboda:** Einführung in die synoptische Wetteranalyse. Wien 1940.
- Dammann, W.:** Klimatologie der Tiefdruckgebiete und Fronten. Ann. d. Meteor. 5, 1952
- Dammann, W.:** Klimatologie der atmosphär. Störungen über Europa. Erdkunde 14, 1960.
- Dunwoody, H. H. C.:** Summary of international meteorological observations. U. S. Weath. Bur., Bull. A, Washington D. C., 1894.
- Evjen, S.:** Über die Vertiefung von Zyklonen. Meteor. Zeitschr. 53, 1936.
- Evjen, S.:** Number and directions of cyclones passing Norway and the Norwegian Sea. Meteor. Annaler 3, 1953.
- Evjen, S.:** Number of cyclones and anticyclones in Northwest and Middle Europe. Meteor. Annaler 3, 1954.
- Faust, H.:** Zur Dynamik der Hoch- und Tiefdruckgebiete. Ber. d. Dt. Wetterd. US-Zone Nr. 35, 1952.
- Ficker, H. von:** Der Einfluß der Alpen auf Fallgebiete des Luftdrucks und die Entstehung von Depressionen über dem Mittelmeer. Meteor. Zeitschr. 37, 1920.
- Fiegl, H.:** Schneefall und winterliche Straßenglätte in Nordbayern als witterungsklimatologisches und verkehrsgeographisches Problem. Mitt. Fränk. Geogr. Ges. 9, Erlangen 1963.
- Flohn, H. und J. Huttary:** Über die Bedeutung der Vb-Lagen für das Niederschlagsregime Mitteleuropas. Meteor. Rundsch. 3, 1950.
- Flohn, H.:** Divergenztheorie — Zyklonogenese — Antizyklonogenese. Meteor. Rundsch. 5, 1952.
- Flohn, H.:** Witterung und Klima in Mitteleuropa. Forsch. z. dt. Landeskunde 78, 1954².
- Hann, J. von:** Handbuch der Klimatologie. Wien 1883.
- Hann, J. van und R. Süring:** Lehrbuch der Meteorologie. 2 Bände, Leipzig 1939—1951².
- Hess, P. und H. Brezowsky:** Katalog der Großwetterlagen Europas. Ber. d. Dt. Wetterd. US-Zone Nr. 33, 1952.

- John, H.:** Über den Aufbau und die Entwicklung von Kaltlufttropfen. Veröff. d. Geophys. Inst. d. Univers. Leipzig 16, 2. Serie, 1953.
- Kassner, C.:** Über die Zugstraße Vb. Meteor. Zeitschr. 14, 1897.
- Kendrew, W. G.:** The climates of the continents. Oxford 1961⁵.
- Klein, W. H.:** Principal tracks and mean frequencies of cyclones and anticyclones in the Northern Hemisphere. U. S. Weather Bur. Res. Pap. 40, 1957.
- Kleinschmidt, E.:** Über Aufbau und Entstehung von Zyklonen. Meteor. Rundsch. 3, 1950.
- Knoch, K.:** Zur Methodik klimatologischer Forschung. Tätigkeitsber. d. Preuß. Meteor. Inst. für 1924.
- Knothe, H.:** Das schlesische Sommerhochwasser 1938. Veröff. d. Schles. Ges. f. Erdk. u. d. Geogr. Inst. d. Univers. Breslau 28, 1939.
- Knothe, H., und O. Moese:** Meteorologische Ursachen des schlesischen Maihochwassers 1939. Schl. Ges. f. vaterl. Cultur 112. Jahresbericht, Naturw.-mediz. Reihe Nr. 7, Breslau 1939.
- Kohlbach, W.:** Ungewöhnlich große Temperaturunterschiede in Niedersachsen. Wetterkarte des Seewetteramtes Hamburg, Jahrgang 14, Nr. 86 u. 97, 1966.
- Kohnke, D.:** Die starken Niederschläge am 27. Sept. 1965 in Nordwestdeutschland. Wetterkarte des Seewetteramtes Hamburg, Jahrgang 13, Nr. 276, 1965.
- König, W.:** Über Kalt- und Warmluftinseln. Zeitschr. f. Meteor. 1, 1947.
- König, W.:** Über die Niederschläge der Kaltluftinseln. Zeitschr. f. Meteor. 3, 1949.
- Köppen, W.:** Erläuterungen zur Karte der Häufigkeit und der mittleren Zugstraßen barometrischer Minima zwischen Felsengebirge und Ural. Zeitschr. d. Österr. Gesellschaft f. Meteor. 47, 1882.
- Kreyszig, E.:** Statistische Methoden und ihre Anwendungen. Göttingen 1965.
- Kruhl, H.:** Beitrag zur Bildung von Kaltlufttropfen. Zeitschr. f. Meteor. 2, 1948.
- Kruhl, H.:** Induzierte Zyklogenese. Ann. d. Meteor. 3, 1950.
- Kruhl, H.:** Über Warmfrontwellen und zur Dynamik warmer Hochdruckgebiete. Ann. d. Meteor. 5, 1952.
- Lienert, G. A.:** Verteilungsfreie Methoden in der Biostatistik. Meisenheim 1962.
- Linder, A.:** Statistische Methoden für Naturwissenschaftler, Mediziner und Ingenieure. Basel 1964⁴.
- Loomis, E.:** Results derived from an examination of the United States Weather Maps for 1872 and 1873. Amer. Journ. of Science and Arts, 3. ser. 8, Nr. 43, 1874.
- Macht, H. G.:** Skagerrak-Zyklonen. Veröff. d. Geophys. Inst. d. Univers. Leipzig 9, 2. Serie, 1937.
- Macht, H. G., und H. Markgraf:** Zyklonenetische Gebiete auf dem nordatlantischen Ozean. Ann. d. Meteor. 7, 1955/56.
- Maede, H.:** Zur Frage der Abgrenzung des Wirkungsbereiches einer Wetterlage. Zeitschr. f. Meteor. 5, 1951.
- Maede, H.:** Klimatologische Untersuchungen über das Verhalten der Westwetterlagen im Raum der südlichen Ostsee und im norddeutschen Flachland. Zeitschr. f. Meteor. 6, 1952.
- Maede, H.:** Das Verhalten der Nordwest- und Nordlagen im Raum der südlichen Ostsee und des angrenzenden Flachlandes klimatologisch betrachtet. Zeitschr. f. Meteor. 7, 1953a.
- Maede, H.:** Tiefkern-, Vb-, zyklonale Ost- und Südostlagen im Raum der südlichen Ostsee und des angrenzenden Flachlandes in klimatologischer Betrachtung. Zeitschr. f. Meteor. 7, 1953b.
- Maede, H.:** Die Hochdruckwetterlagen im Raum der südlichen Ostsee und des angrenzenden Flachlandes in klimatologischer Betrachtung. Zeitschr. f. Meteor. 7, 1953c.
- Maede, H.:** Der Einfluß der Land-See-Verteilung in Mitteleuropa auf das Verhalten von Tiefdruckgebieten verschiedener Typen. Zeitschr. f. Meteor. 8, 1954.
- Mertins, H. O.:** Sturm- und Hochdruckwetterlagen bei Island 1950—1954. Einzelveröff. 12, Seewetteramt Hamburg, 1957.
- Meyer, H. K.:** Aufbau und Bewegung eines Kaltlufttropfens in Nordrußland. Meteor. Rundsch. 2, 1949.
- Meyer, H. K.:** Flug durch einen Kaltlufttropfen über See. Meteor. Rundsch. 3, 1950a.
- Meyer, H. K.:** Flug durch ein kaltes Tief über See. Meteor. Rundsch. 3, 1950b.
- Meyer, H. K.:** Der Einfluß des vertikalen Impulsaustausches auf synoptische Druck- und Temperaturgebilde. Ber. d. Dt. Wetterd. Nr. 2, 1953.

- Mildner, P.:** Über den Zusammenhang zwischen Polarfront in den höheren Schichten der Troposphäre und der Entwicklung und Bewegung der Bodendruckgebilde. Inst. f. Meteor. u. Geoph. d. Fr. Univers. Berlin, Meteor. Abhandl. II, 3, 1954.
- Mügge, R.:** Über das Wesen der Steuerung. Meteor. Zeitschr. 55, 1938.
- Müller-Annen, H.:** Zur Prognose der Zugbahnen von Tiefdruckgebieten. 1. Teil: Zugbahnen und Geschwindigkeit der Tiefdruckgebiete. Ann. d. Meteor. 3, 1950.
- Palmen, E.:** Origin and structure of high-level cyclones south of the maximum Westerlies. Tellus 1, 1949.
- Pédélaborde, P.:** Le climat du Bassin Parisien. Essai d'une méthode rationnelle de la climatologie physique. Paris 1957.
- Raethjen, P.:** Hydrodynamische Betrachtungen zu Scherhags Höhenzyklonen. Ann. d. Hydrogr. u. mar. Meteor. 65, 1937a.
- Raethjen, P.:** 50 Jahre Zyklonentheorie und die gegenwärtige Entwicklung. Meteor. Zeitschr. 54, 1937b.
- Reinel, H.:** Die Zugbahnen der Hochdruckgebiete über Europa als klimatologisches Problem. Mitt. Fränk. Geogr. Ges. 6, Erlangen 1960.
- Richter, G.:** Singularitäten der Zyklonenfrequenz in einzelnen $5^{\circ}/10^{\circ}$ -Feldern. Veröff. d. Geophys. Inst. d. Univers. Leipzig 9, 2. Serie, 1938.
- Roediger, G.:** Irrfahrten eines kleinen Tiefs in einem großen Hoch. Wetterkarte des Seewetteramtes Hamburg, Jahrgang 12, Nr. 23 u. 24, 1964.
- Roediger, G.:** Stark ausgeprägte Wettergrenze zwischen Nord- und Süddeutschland. Wetterkarte des Seewetteramtes Hamburg, Jahrgang 14, Nr. 48, 1966.
- Rykatschew, M. A.:** Typen der Zyklonenbahnen in Europa nach Beobachtungen 1872—1887. Mém. Acad. imp. Sci. St. Pétersbourg, Ser. VIII Cl. phys. math. Bd. 3, 1896 (russ.).
- Schedler, A.:** Die Zirkulation im Nordatlantischen Ozean und den anliegenden Teilen der Kontinente, dargestellt durch Häufigkeitswerte der Zyklonen. Ann. d. Hydrogr. u. mar. Meteor. 52, 1924.
- Scherhag, R.:** Über die atmosphärischen Zustände bei Gewittern. Meteor. Zeitschr. 48, 1931a.
- Scherhag, R.:** Die Entstehung der Ostgewitter. Meteor. Zeitschr. 48, 1931b.
- Scherhag, R.:** Zur Theorie der Hoch- und Tiefdruckgebiete. Meteor. Zeitschr. 51, 1934.
- Scherhag, R.:** Die Entstehung der Vb-Depressionen. Ann. d. Hydrogr. u. mar. Meteor. 64, 1936 (Zweites Köppen-Heft).
- Scherhag, R.:** Ein Grenzfall atmosphärischer Steuerung: Die Bodenisobaren steuern ein Höhentief. Ann. d. Hydrogr. u. mar. Meteor. 65, 1937.
- Scherhag, R.:** Neue Methoden der Wetteranalyse und Wetterprognose. Berlin 1948.
- Scherhag, R.:** Frontenlose Zyklonen der gemäßigten Breiten. In: Linke, F. und F. Baur (Hrsg.): Meteorologisches Taschenbuch. I. Band, 1962².
- Schmidt, G.:** Zyklonen auf ungewöhnlichen Zugbahnen. Ann. d. Hydrogr. u. Meteor. 67, 1939.
- Schoenwälder, H.:** Die Zyklonen der nördlichen Halbkugel. Dissertation FU Berlin (ungedruckt), 1953.
- Schwerdtfeger, W.:** Untersuchungen über den Aufbau von Fronten und Kaltlufttropfen. Ber. Dt. Wetterd. US-Zone Nr. 3, 1948.
- Weber, E.:** Grundriß der biologischen Statistik. Stuttgart 1967⁶.
- Weickmann, L.:** Luftdruck und Winde im östlichen Mittelmeer. (Aus: „Zum Klima der Türkei“) München 1922.
- Weickmann, L.:** Häufigkeitsverteilung und Zugbahnen von Depressionen im mittleren Osten. Meteor. Rundsch. 13, 1960.
- Weightmann, R. H.:** Average monthly tracks by types of lows in the United States. U. S. Weather Bur., Washington, 1945.
- Weimann, W. U.:** Die Kaltlufttropfen zwischen Felsengebirge und Ural. Klimatologische und synoptische Untersuchungen für den fünfjährigen Zeitraum März 1951 bis Februar 1956. Inst. f. Meteor. u. Geoph. d. Fr. Univers. Berlin, Meteor. Abhandl. VI, 3, 1958.
- Zistler, P.:** Alpenüberquerende Depressionen. Ber. d. Dt. Wetterd. US-Zone Nr. 38, 1952.

Täglicher Wetterbericht des Deutschen Wetterdienstes, Frankfurt 1957—1966.

Wetterkarte des Seewetteramtes, Hamburg 1957—1966.

Monatlicher Witterungsbericht des Deutschen Wetterdienstes, Frankfurt 1957—1966.

Die Großwetterlagen Mitteleuropas, herausgegeben vom Deutschen Wetterdienst, 1957—1966.

VERÖFFENTLICHUNGEN

der Geographischen Kommission für Westfalen und des Instituts für Geographie und
Länderkunde der Universität, Münster, I—IV Selbstverlag

I. Arbeiten der Geographischen Kommission

1. Riepenhausen, H.: Die bäuerliche Siedlung des **Ravensburger Landes** bis 1770. Münster 1938. (vergriffen)
2. Krakhecken, M.: **Die Lippe**. Münster 1939. (vergriffen)
3. Ringleb, F.: **Klimaschwankungen** in Nordwestdeutschland (seit 1835). (vergriff.)
4. Lucas, O.: **Das Olper Land**. Münster 1941. (vergriffen)
5. Uekötter, H.: Die **Bevölkerungsbewegung in Westfalen und Lippe** 1918 bis 1933. Münster 1941. (vergriffen)
6. Heese, M.: Der Landschaftswandel im mittleren **Ruhr-Industriegebiet** seit 1820. Münster 1941. DM 6,00
7. Bertelsmeier, E.: **Bäuerliche Siedlung und Wirtschaft im Delbrücker Land**. Münster 1942. (vergriffen)

II. Westfälische Geographische Studien

1. Müller-Wille, W.: **Schriften und Karten zur Landeskunde Nordwestdeutschlands** 1939—1945. Münster 1949. (vergriffen)
2. Müller-Temme, E.: **Jahresgang der Niederschlagsmenge in Mitteleuropa**. Münster 1949. DM 2,00
3. Müller, H.: **Die Halterner Talung**. Münster 1950. DM 2,00
4. Herbolt, W.: Die ländlichen Siedlungslandschaften des Kreises **Wiedenbrück** um 1820. Münster 1950. (vergriffen)
5. Fraling, H.: Die Physiotope der **Lahntalung** bei Laasphe. Münster 1950. DM 2,50
6. Schuknecht, F.: **Ort und Flur in der Herrlichkeit Lembeck**. 1952. (vergriffen)
7. Niemeier, G.: Die Ortsnamen des **Münsterlandes**. Ein kulturgeographischer Beitrag zur Methodik der Ortsnamenforschung. Münster 1953. (vergriffen)
8. Eversberg, H.: Die Entstehung der **Schwerindustrie um Hattingen** 1847—1857. Ein Beitrag zur Grundlegung der schwerindustriellen Landschaft an der Ruhr. Münster 1955. (vergriffen)
9. Pape, H.: Die Kulturlandschaft des **Stadtkreises Münster** um 1828 auf Grund der Katasterunterlagen. Münster/Remagen 1956. (vergriffen)
10. Heßberger, H.: Die Industrielandschaft des **Beckumer Zementreviers**. DM 6,40
11. Pfaff, W.: Die **Gemarkung Ohrsen** in Lippe. Münster/Ohrsen 1957. (vergriffen)
12. Denecke, K.: Flüsse und Wasserwirtschaft, Wasserbiologie und Wasserkrankheiten in **Mesopotamien**. Münster 1958. DM 3,80
13. Timmermann, O., L. Hempel und H. Hambloch: Zur Kulturgeographie der **Öztaler Alpen**. Münster 1958. DM 5,60
14. Heising, P. Heldemar: Missionierung und Diözesanbildung in **Kalifornien**. Münster 1958. (vergriffen)
15. **Entwicklungshilfe und Entwicklungsland**, Begriff, Probleme und Möglichkeiten. A. Antweiler, W. Manshard, R. Mohr, G. Pfeifer, E. Sarkisjans, A. Sievers, O. Timmermann. Münster 1962. DM 14,80
16. Dege, W.: Zur Kulturgeographie des **Nördlichen Gudbrandsdals**. 1963. DM 14,80
17. Fröhling, M.: Die Bewässerungslandschaften an der **spanischen Mittelmeerküste**. Münster 1965. DM 12,40
18. Hambloch, H.: Der Höhengrenzsaum der **Ökumene**. Münster 1966. DM 19,20
19. Bronny, H. M.: Studien zur Entwicklung und Struktur der Wirtschaft in der Provinz **Finnisch-Lappland**. Münster 1966. DM 14,40

20. Giese, E.: Die untere **Haseniederung**, eine ländlich-bäuerliche Landschaft im nordwestdeutschen Tiefland. Münster 1968. DM 20,00
21. Beyer, L.: Der Siedlungsbereich von **Jerzens im Pitztal/Nordtirol**. 1969 DM 18,00
22. Mayhew, Alan: Zur strukturellen Reform der Landwirtschaft in der Bundesrepublik Deutschland, erläutert an der **Flurbereinigung in der Gemeinde Moorriem/Wesermarsch**. Münster 1970. DM 15,00
23. Stonjek, D.: Sozialökonomische Wandlung und Siedlungslandschaft eines **Alpentales (Defereggens)**. Münster 1971. DM 15,00
24. Döhrmann, W.: Bonitierung und Tragfähigkeit eines **Alpentales (Defereggens)**. Münster 1972. DM 17,50
25. **Oldenburg und der Nordwesten**. Deutscher Schulgeographentag 1970. Münster 1971. Vorträge, Exkursionen und Berichte. DM 30,00

III. Spieker

1. Landeskundlich-statistische **Kreisbeschreibung in Westfalen**. Anleitung für Kreisbeschreiber, bearbeitet von E. Bertelsmeier und W. Müller-Wille. 1950. DM 2,20
2. Die **Viehhaltung in Westfalen 1818—1948**. 1. Folge: **West- und Ostmünsterland**, R. Wehdeking. Der Viehstapel in Westfalen, W. Müller-Wille. 1950. DM 2,50
3. Natur und Besiedlung der **Senne** von P. Schneider. Münster 1952. (vergriffen)
4. Die **Viehhaltung in Westfalen 1818—1948**. 2. F.: **Kernmünsterland und Hellwegbörden**, R. Wehdeking. Die Schweinehaltung in Westfalen, W. Müller-Wille 1953. DM 4,20
5. Beiträge zur **Stadtgeographie**. Die Grundrisse der städtischen Siedlungen in **Westfalen** von H. F. Gorki. Grundriß und Altersschichten der Hansestadt **Soest** von O. Timmermann. Funktionales Gefüge der Großstadt **Gelsenkirchen** von G. Steiner. Der Untergrund von Münster von H. Müller. Münster 1954. (vergriffen)
6. Die **Böden des Südergebirges** von W. Taschenmacher. Münster 1955. DM 6,00
7. Verkehr und Industrie im **Sauerland**. Die **Sauerland-Höhenstraße** Hagen—Siegen—Gießen von O. Lucas. Die Industrie im mittleren **Lennetal** von R. Sommer. Münster 1956. DM 3,20
8. Beiträge zur **Stadtgeographie II**. Funktionale Bereichsbildung im Raume **Emsland-Südoldenburg** von G. Hoffmann. Erreichbarkeit und **Einkaufsmöglichkeit** von W. Müller-Wille. Münster 1957. DM 6,40
9. Beiträge zur **Physiogeographie**. Das Flußtal der **Hönne** von Therese Stork. Naturräume der **Emssandebene** von H. Hambloch. Das **phänologische Jahr** in Westfalen von F. Ringelb. Münster 1958. DM 9,60
10. Die **agrarographische Struktur Westfalens 1818—1950**, erläutert an der pflanzlichen Produktion von G. Böttcher. Münster 1959. DM 12,—
11. Beiträge zur **Physiogeographie II**. Talentwicklung und Verkarstung im Kreidegebiet der **Alme** von W. Feige. Die **Schledden** auf der **Haarfläche** von Hans Klein. Münster 1961. DM 11,60
12. Beiträge zur **Physiogeographie III**. Das Großrelief am **Südrand der Westfälischen Bucht** und im **Nordsauerland** von L. Hempel. Glaziale Halte im südlichen unteren **Weserbergländ** von E. Th. Seraphim. Regenwetterlagen in **Argentinien** v. K. Wölken. Münster 1962. (vergriffen)
13. Beiträge zur **Kulturgeographie**. Die wirtschaftsgeographische Struktur des **Sintfeldes** von P. Schäfer. Die **Hecke** im nordwestlichen **Südergebirge** von G. S. Engelhardt. Münster 1964. DM 13,20
14. Bodenplastik und **Naturräume Westfalens** von W. Müller-Wille. 1966. DM 28,00
15. Besiedlung und Siedlung des **Altkreises Norden** von Eberhard Rack. 1967. DM 9,60
16. Zum Problem der **zentralen Orte** und ihrer Bereiche — Wissenschaftsgeschichtliche Entwicklung in **Deutschland** und Forschungsstand in **Westfalen** von Georg Kluczka. Münster 1967. DM 9,60

17. **Alte Fernstraßen in der mittl. Westf. Bucht** von H.-Cl. Poeschel. 1968. DM 16,00
18. **Die Hellwegsiedlungen am Ostrande Dortmunds** von K.-H. Ludwig. DM 12,50
19. **Der Stemweder Berg** — eine forstgeographische Untersuchung von H. W. Windhorst. Münster 1971. DM 12,50
20. **Bewegung, Schichtung und Gefüge der Bevölkerung im Landkreis Minden** von G. Francke. Münster 1972. DM 15,00

IV. Landeskundliche Karten und Hefte Bodenplastik und Naturräume Westfalens 1:100 000 in Fünffarbindruck

1. Blatt Kreis **Paderborn** (1953), 2. Blatt Kreis **Münster** (1955), 3. Blatt Kreis **Brilon** (1957), 4. Blatt Kreis **Altena** (1962), 5. Blatt Kreis **Wiedenbrück** (1968).

Siedlung und Landschaft in Westfalen

1. Müller-Wille, W. und E. Bertelsmeier: **Der Stadtkreis Münster 1820 bis 1955**. Erl. zur Karte 1:10 000. Münster 1955. (vergriffen)
2. Wöhlke, W.: **Die Kulturlandschaft des Hardehausener und Dalheimer Waldes**. Münster 1957. DM 7,00
3. Platt, R. S.: **A Geographical Study of the Dutch-German Border**. Münster 1958. Deutsch von E. Bertelsmeier. DM 9,60
4. Ringleb, A. und Hambloch, H.: **Studien zur Genese agrarbäuerlicher Siedlungen**. Münster 1961. DM 11,60
5. Müller-Wille, Mich.: **Die eisenzeitlichen Fluren in den festländischen Nordseegebieten**. Münster 1965. DM 26,40
6. Brand, Fr.: **Zur Genese der ländlich-agraren Siedlungen im lippischen Osning-Vorland**. Münster 1967. DM 21,60
7. Sönnecken, A.: **Die mittelalterliche Rennfeuerverhüttung im märkischen Sauerland**. Münster 1971. DM 35,00

V. Die Landkreise in Westfalen Böhlau-Verlag, Köln

1. Der Landkreis **Paderborn**. Bearbeitet in der Geographischen Kommission von G. von Geldern-Crispendorf. Münster 1953. DM 15,00
2. Der Landkreis **Münster**, Bearb. in der Geogr. Kommission u. dem Geogr. Institut der Universität Münster von W. Müller-Wille, E. Bertelsmeier, H. F. Gorki, H. Müller, Münster 1955. DM 24,80
3. Der Landkreis **Brilon**. Bearbeitet in der Geographischen Kommission von A. Ringleb geb. Vogedes. Münster 1957. DM 22,00
4. Der Landkreis **Altena**. Bearbeitet in der Geographischen Kommission von E. Wagner. Münster 1962. DM 22,00
5. Der Landkreis **Wiedenbrück**. Bearbeitet in der Geographischen Kommission von W. Herbolt, W. Lenz, I. Heiland und G. Willner. Münster 1969. DM 28,00

