

Die Sturmflut-Wetterlagen im Januar 1976

Von Heinrich Kruhl

Zusammenfassung

Von Anfang Dezember 1975 bis zur letzten Dekade des Januars 1976 trat eine Serie von Sturmflutwetterlagen auf. Von den in dieser Zeit beobachteten 11 Sturmfluten waren 2 extrem hoch, nämlich die vom 3. und die vom 21./22. Januar 1976. Am 3. Januar ereignete sich die höchste Sturmflut in Hamburg seit Messungen vorliegen. Sie wurde durch ein über Jütland nach Südosten gezogenes Sturmtief verursacht. Die Flut vom 21./22. Januar war auf eine umfangreiche Zyklone über Skandinavien zurückzuführen.

Summary

From the beginning of December 1975 to the last decade of January 1976, a series of storm surge weather conditions prevailed. From the 11 storm surges which occurred in this time, two were extremely high; namely the floods of 3rd and 21st/22nd January, 1976. On 3rd January the highest surge ever measured in Hamburg took place. It was caused by a storm depression passing Jutland towards the southeast. The surge of 21st/22nd January was initiated by a large cyclone over Scandinavia.

Inhalt

1.	Einleitung	25
2.	Die Sturmflut-Wetterlage vom 2./3. Januar 1976	27
2.1	Zusammenfassung	27
2.2	Die Vorentwicklung	28
2.3	Der Ablauf	32
2.3.1	Die Orkantiefbildung (1. Phase)	32
2.3.2	Die Umsteuerung (2. Phase)	36
2.3.3	Die umgebogene Okklusion (3. Phase)	42
2.4	Das Sturmfeld	43
3.	Die Sturmflut-Wetterlage vom 20./21. Januar 1976	44
3.1	Zusammenfassung	44
3.2	Abbruch der Sturmflut-Wetterlagen	44
3.3	Ausgangssituation	45
3.4	Die Sturmtiefentwicklung	45
3.5	Luftmassen und Fronten	48
3.6	Das Sturmfeld	48
3.7	Die Trogentwicklung	50

1. Einleitung

Eine sehr schwere Sturmflut ist ein spektakuläres Ereignis. Daher besteht manchmal die Meinung, daß solch ein gewaltiges Naturgeschehen auch die Wirkung einer spektakulären Ursache sei. Das ist aber nicht der Fall. Vielmehr ist es das quasi-„zufällige“ Zusammentreffen von – das Ereignis begünstigenden – wohlbekanntem Einflußgrößen, die erst in ihrem Zusammenwirken eine extrem hohe Flut zur Folge haben.

Ein derartiges Zusammentreffen von vielen begünstigenden Größen ist, über längere Zeiträume betrachtet, natürlich selten. Wenn das dennoch innerhalb kurzer Zeit öfter geschieht und dann eine Häufung von Sturmfluten auftritt, so braucht das nicht unbedingt auf das erhöhte Auftreten einer der Einflußgrößen – wie Sturm – hinzudeuten. Sturm ist zwar eine notwendige, jedoch nicht hinreichende Voraussetzung für den Eintritt einer Sturmflut. Es kommt auf die Stärke, die Richtung und den zeitlichen Ablauf des Sturmfeldes über dem fraglichen Seegebiet neben anderen Faktoren an. Diese Größen werden von spezifischen Wetterlagen, den Sturmflut-Wetterlagen, bestimmt, die sich zu einem Typus zusammenfassen lassen. Auch Sturmflut-Wetterlagen bilden nur eine Voraussetzung für die Entstehung von Sturmfluten. Die Fluten folgen nicht zwangsläufig aus den Lagen.

Großwetterlagen neigen dazu, längere Zeit anzudauern oder sich nach kurzer Unterbrechung erneut wieder einzustellen. Das gilt auch für Sturmflut-Wetterlagen. Deswegen treten Sturmfluten zuweilen in Serien auf, wenn begünstigende Momente hinzukommen. Die schwerste Sturmflut erscheint dann als die dominierende und bleibt schon wegen ihres Zerstörungswerkes in Erinnerung.

Eine Serie von sechs schweren bis sehr schweren Sturmfluten ereignete sich vom 13. November bis 17. Dezember 1973. Die große Anzahl war ungewöhnlich und, seit Messungen angestellt werden, noch nicht beobachtet worden. Das gehäufte Auftreten hing mit einer typischen Großwetterlage zusammen, die sich in jener Zeit immer wieder herstellte. Aus der Häufung von Sturmfluten innerhalb weniger Wochen kann deshalb zunächst nur auf die Existenz von Sturmflut-Wetterlagen geschlossen werden. Die Anzahl von sechs Sturmfluten sollte daher in kausalen Betrachtungen nicht allzu hoch bewertet werden.

Vom 8. Dezember 1975 bis 22. Januar 1976 herrschten Sturmflut-Wetterlagen vor. In dieser Zeit traten in Cuxhaven 11 Sturmfluten auf, allerdings waren nur 4 als schwer bis sehr schwer einzustufen. Bemerkenswert war, daß während der 3 Wochen dauernden Sturmflut-Wetterlagen im Dezember 1975 in Cuxhaven nur eine einzige, dazu noch leichte Sturmflut zu verzeichnen war, die restlichen 10 ereigneten sich erst im Januar. Sturmflut-Wetterlagen haben – wie schon erwähnt – nicht zwangsläufig Sturmfluten zur Folge.

Es gibt zahlreiche Wetterlagen, die die Voraussetzungen für das Auftreten von Sturmfluten in der Nordsee abgeben. Sie unterscheiden sich in vielen Merkmalen voneinander, wie überhaupt keine zwei Sturmflut-Wetterlagen bekannt sind, die sich weitgehend ähneln. Manchmal werden allerdings spezielle Typen unterschieden, z. B. der Jütland-Typ, bei dem das Sturmtief von der Nordsee über Jütland nach Südosten zieht; oder der Skandinavien-Typ, der durch ein umfangreiches Tief über Skandinavien gekennzeichnet ist. Beide bringen den gefährlichen Nordwest-Sturm über der Nordsee. Derartige Typenunterscheidungen sind aber für kausale Betrachtungen nicht bedeutungsvoll.

Alle für die südliche Nordsee sturmlutträchtigen Wetterlagen können aus der im folgenden beschriebenen atmosphärischen Zirkulation hergeleitet werden (Abb. 1): Aus dem subtropischen Mittel- oder West-Atlantik strömt sehr warme und feuchte Luft in Richtung auf die Britischen Inseln oder Island. Anschließend dringen polare Kaltluftmassen aus dem isländisch-grönländischen Raum oder vom Nordwest-Atlantik der Warmluft in die Flanke und damit in die Rückseite eines entstehenden Tiefdruckwirbels. Vorher sind meist schon im Zusammenhang mit kräftigen Zyklonen Kaltluftausbrüche über Skandinavien nach Mitteleuropa erfolgt. Die Luftdruckverteilung ist durch ein kräftiges, in Richtung Irland oder Frankreich verschobenes „Azorenhoch“ gekennzeichnet, dem steuernde Tiefdruckgebiete über Skandinavien oder Island gegenüberstehen. Eine starke Frontalzone verläuft vom Nord-Atlantik nach Mitteleuropa. Damit sind die energetischen Voraussetzungen für die Entwicklung von Sturmwirbeln gegeben, die zu Sturmfluten in der

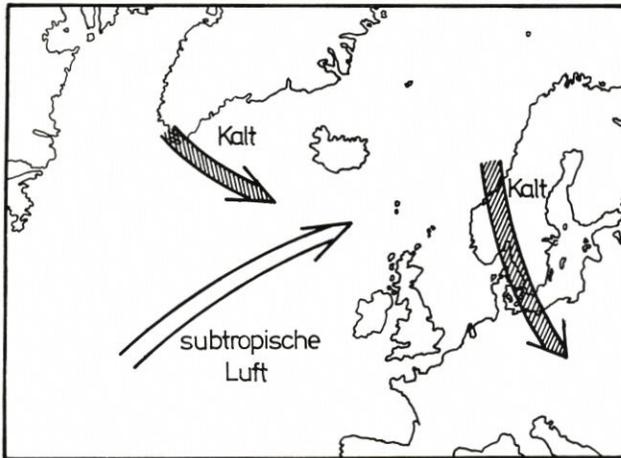


Abb. 1

Nordsee führen können. Die Zyklonenbildung im einzelnen hängt von den zahlreichen Randbedingungen ab, die unterschiedlich auftreten und durch die jede Sturmtiefentwicklung anders abläuft. So wird jedes Tief zu einem Individuum, was die Prognose häufig so schwierig macht.

2. Die Sturmflut-Wetterlage vom 2./3. Januar 1976

2.1 Zusammenfassung

Das Orkantief vom 3. Januar 1976 über der Nordsee entwickelte sich aus einer sehr energiereichen Warmsektorzyklone, die das letzte Glied einer Zyklonenserie war. Eine hochtroposphärische Welle, die durch Vorgänge über Nordamerika und dem westlichen Nordatlantik ausgelöst wurde, bedingte den Abschluß der Serie und die starke Entwicklung des letzten Tiefs. Diese Welle beeinflusste auch die Zugbahn des Tiefs und damit die Richtung und Dauer des schweren Sturmes über der Nordsee. Erneuter Luftdruckfall in der Rückseite des Tiefs über Schleswig-Holstein führte kurz vor Erreichen des astronomischen Hochwassers zu einem zweiten Windmaximum über der Deutschen Bucht.

Im deutschen Küstenbereich ereignete sich am 3. Januar eine sehr schwere Sturmflut, die in der Zeit nach dem Zweiten Weltkrieg nur mit der Flut des Holland-Orkans vom 31. Januar zum 1. Februar 1953 und der des Hamburger Katastrophentiefs vom 16./17. Februar 1962 zu vergleichen war. Allerdings gab es in der Deutschen Bucht in den letzten 30 Jahren gleich starke oder schwerere Stürme, wie z. B. beim *A d o l p h - B e r m p o h l*-Orkan vom 23. Februar 1967. Aber glücklicherweise bringen die meisten Stürme keine schweren Sturmfluten.

Der Sturmwirbel vom 2./3. Januar 1976 unterschied sich in seiner Entwicklung sehr von dem, der die Hamburger Sturmflut von 1962 verursachte. Das Orkantief vom 3. Januar 1976 war nach Aufbau und Entwicklung eher mit den Sturmtiefs vom 13. November 1972 oder 2. April 1973 über Norddeutschland bzw. der südlichen Nordsee zu vergleichen

und war nach den dynamischen Vorgängen mit dem Wirbel des Holland-Orkans von 1953 verwandt.

In der Darlegung der Randbedingungen, die – wie erwähnt – die unterschiedliche Entwicklung bestimmen, liegt der eigentliche Reiz der folgenden Untersuchung, weniger in der reinen Beschreibung einer Wetterlage. Die Wetterentwicklung ist meistens – wie auch hier – nicht ungewöhnlich. Der Ablauf der im folgenden beschriebenen Zyklogense kann als lehrbuchmäßig bezeichnet werden. Als Dokumentation zur Sturmflut verdient die Wetterlage jedoch festgehalten zu werden.

Das Orkantief vom 2./3. Januar war die Folge einer typischen, wenn auch sehr energiereichen Warmsektorzyklone. Die Abb. 1 veranschaulicht den Einschub subtropischer Luft zwischen der Kaltluft über Nordeuropa und der von Westen nachfolgenden Kaltluft. In der Regel entstehen derartige Orkanwirbel mehrmals im Winter über dem Nordwest-Atlantik. Über dem Golfstrom vor der nordamerikanischen Küste strömt die subtropische Luft nach Nordosten gegen polare Kaltluftmassen über dem Ostatlantik. Nachfolgend stößt arktische Kaltluft von Kanada nach Südosten vor. Die Abb. 1 kann man sich in diesen Fällen nach Westen verschoben denken. Orkanwirbel bilden sich dann östlich von Neufundland aus. Am 2./3. Januar war die geographische Verschiebung des Systems nach Osten bemerkenswert, weil sie nicht allzu häufig auftritt. Entsprechend der Verlagerung erfolgte die Orkanbildung über der Nordsee.

2.2 Die Vorentwicklung

Drei Luftmassen waren – entsprechend dem Schema in Abb. 1 – an der Ausgangssituation beteiligt, die am 2./3. Januar zur Orkantiefbildung führte:

1. die subtropische Luft aus dem Gebiet südwestlich der Azoren,
2. die nachfolgende Kaltluft vom Nordwest-Atlantik und von Island,
3. die Kaltluft über Nord- und Mitteleuropa.

Alle drei Luftmassen strömten in die sehr starke nordatlantische Frontalzone hinein, die sich schon längere Zeit etwa von Neufundland über die Britischen Inseln nach Osten streckte und die sich über Europa beim Vorüberzug von Zyklonen nordsüdwärts verlagerte.

Über dem Nordmeer, Island und Grönland entwickelte sich Ende 1975 ein nordhemisphärischer Kältepol mit Temperaturen unter -45°C im 500-mbar-Niveau. Westeuropa befand sich dagegen überwiegend im Bereich einer warmen Hochdruckzelle. Zwischen diesen Massen zogen bereits seit Tagen mehr oder minder kräftige Tiefdruckgebiete ostwärts. Das Problem, das hier zu erörtern ist, besteht also in der Frage, warum sich in der schon vorhandenen starken Frontalzone erst am 2. Januar eine besonders energiereiche Warmsektorzyklone bildete; d. h., wie kamen die in Abb. 1 dargestellten Einbrüche verschiedener temperierter Luftmassen in die Frontalzone zustande?

a) Es ist nicht genau festzulegen, wo eine Vorentwicklung beginnt, die zur Ausgangssituation führt, denn auch sie hat wiederum Vorentwicklungen. Da in diesem Abschnitt nur der Vorstoß subtropischer Luft aus dem Seegebiet westlich der Azoren nach Nordosten begründet werden soll, genügt es, das auslösende Moment zu betrachten. Das ist in den Zyklonenbildungen vor der nordamerikanischen Küste zu sehen. Ihre Dynamik hat in der Folge das Geschehen weiter ostwärts beeinflußt. Und zwar müssen zwei Zyklonenserien an der Frontalzone zwischen der kontinentalen Kaltluft über Nordamerika und der wärmeren Luft über dem Golfstrom beachtet werden.

Auf der Rückseite der am 28. 12. 75 (Abb. 2) vor der Ostküste Nordamerikas nach

Nordosten ziehenden Tiefdruckserie stieß Kaltluft in das Seegebiet westlich der Azoren vor. Gleichzeitig wurde warme Meeresluft nach Nordosten in Bewegung gesetzt. Am 31. 12. verlief die Kaltfront mit Frontalwellen bereits von Skandinavien über die Britischen Inseln in das Gebiet westlich der Azoren. Der größte Teil der Warmluft hatte zur Bildung eines Orkantiefs über Nordskandinavien mit einem Kerndruck von unter 955 mbar geführt. Im südlichen Nordmeer war ein Orkanfeld entstanden, wie es sich 3 Tage später über der Nordsee wiederholen sollte. An der zurückschleifenden Kaltfront bildeten sich zwei Wellenzyklonen aus, die rasch ostwärts liefen. Die erste, die am 31. 12. 75, 00 GMT südwestlich von Irland erschien, war 24 Stunden später schon über der südlichen Ostsee auszumachen. Sie lief in die Rückseitenkaltluft des Sturmwirbels über Skandinavien und vertiefte sich darum nur wenig. Die zweite löste sich am 1. 1. 76 aus dem Tiefdrucksystem westlich der Azoren ab und zog auch sehr rasch in der kräftigen Frontalzone nach Osten, ebenfalls ohne

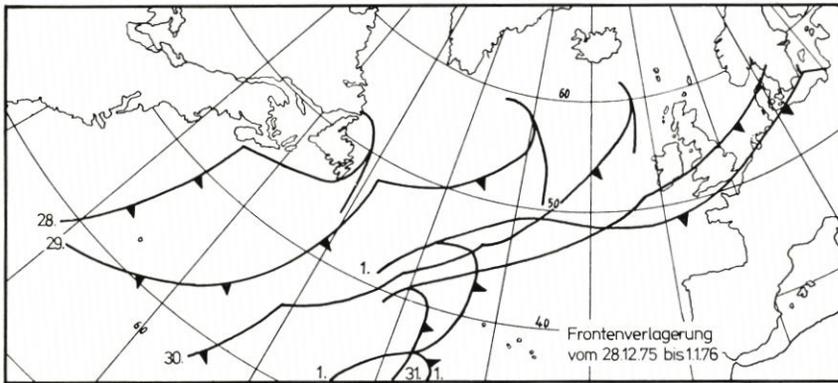


Abb. 2

sich stark zu vertiefen. Die Bahn des Tiefs verlief aber entsprechend der südwärts gerückten Frontalzone südlicher als die des Vorgängers. Eine stärkere Vertiefung blieb aus, weil sich am 2. 1. aus dem Tiefdrucksystem westlich der Azoren eine dritte Wellenzyklone formierte und rasch in die Frontalzone einmündete. Diese Welle hätte genau wie ihre Vorläufer ohne allzu kräftige Entwicklung nach Osten ziehen müssen, wenn es zu dieser Zeit nicht zu einem Abschluß der Serie gekommen wäre. Die Ursachen, die die Beendigung der Folge herbeiführten, waren auch an der Entwicklung der dritten Welle zum Katastrophentief beteiligt.

b) Der Abschluß der Serie wurde durch den Einbruch polarer Kaltluft vom Nordwestatlantik und Island herbeigeführt (Abb. 1). Die Gründe für den Vorstoß der Kaltluft waren in der Entwicklung der unter a) genannten *z w e i t e n* Zyklonenserie vor der Ostküste Nordamerikas zu sehen. Die erste Serie im Golfstromgebiet formierte sich – wie erwähnt – um den 28. 12. 75 und führte zu einem Kaltluftausbruch vom nordamerikanischen Kontinent in das Seegebiet westlich der Azoren. Dieser Vorgang wiederholte sich einige Tage später. So zog am 1. Januar 76 eine zweite Serie von der Ostküste Nordamerikas nach Nordosten. Während aber einige Zyklonen der ersten Serie rasch in Richtung Skandinavien wanderten und sich im Osten vertieften, entwickelte sich aus der zweiten Serie ein umfangreiches Sturmtief im Seegebiet südöstlich von Neufundland. Die Entstehung des umfangreichen Tiefdrucksystems, das seine Wanderungsgeschwindigkeit infolge des Vertiefungsprozesses zunächst wesentlich herabsetzte, stand im Zusammenhang mit einer sehr

starken Mäanderung der Strömung in der oberen Troposphäre im Raum von Neufundland. Sie resultierte in einer starken Trogbildung, verbunden mit einem hochreichenden Ausbruch kanadischer Kaltluft nach Südosten. Vom 1. zum 2. Januar gingen die Temperaturen der unteren Troposphäre um etwa 6°C zurück. Auf Sable-Island fiel die Temperatur in etwa 5000 m Höhe vom 1. bis 2. Januar, 12 GMT, von -16° auf -33°C . Gleichzeitig strömte mit dem Vertiefungsprozeß die Warmluft auf der Vorderseite der Zyklone nach Nordosten und gelangte in der Hochtroposphäre in die nordatlantische Frontalzone. Dieser Vorgang war mit einer Massenkonvergenz in der Troposphäre über dem Seegebiet südöstlich von Grönland verbunden, wodurch beim Wetterschiff „C“ ($52,7^{\circ}\text{N}$, $35,5^{\circ}\text{W}$) der Luftdruck am 2. Januar in der Zeit von 00 GMT bis 12 GMT um 7,5 mbar anstieg. Gleichzeitig erhöhte sich die Temperatur im 500-mbar-Niveau um 3°C , in den folgenden 24 Stunden (bis zum 3. Januar, 12 GMT) sogar noch einmal um 6°C (auf -17°C). Diese Konvergenz mit Luftdruckanstieg führte dazu, daß – wie erwähnt – nach der dritten Welle jede weitere aus dem Azorenraum unterdrückt wurde. Das hatte nun wieder zur Folge, daß – entsprechend Abb. 1 – die Kaltluft vom Nordwest-Atlantik nach Süden strömen konnte.

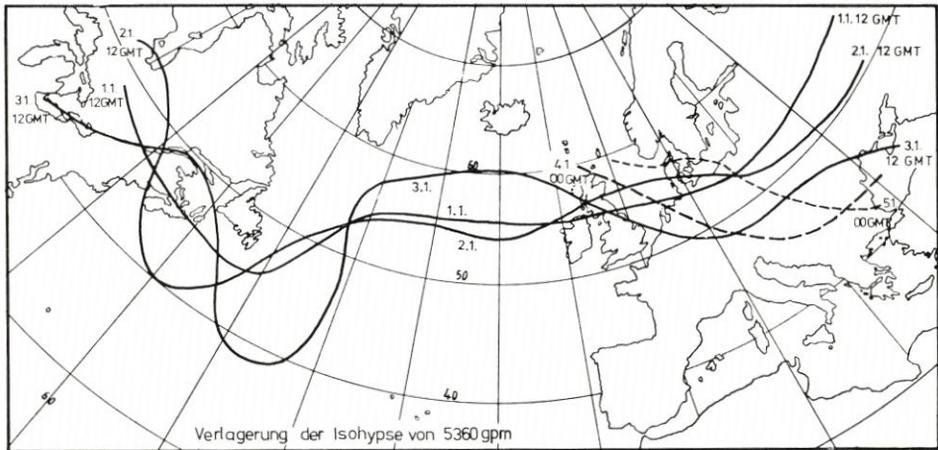


Abb. 3

Ohne weitere Einflüsse wäre das Tief entsprechend der Höhenströmung (Abb. 3, Isohypse vom 2. 1., 12 GMT) nach Südsandinavien gezogen oder noch nördlicher eingedreht. Denn Warmsektorzyklonen, die okkludieren, pflegen nach links von der ursprünglichen Zugbahn abzuweichen, weil durch den Vertiefungsprozeß meist eine entsprechende Drehung der Höhenströmung erfolgt. In diesem Falle hätte sich kein so ausgedehntes Sturmfeld aus Nordwest über der Nordsee entwickelt; die Windstärken wären wahrscheinlich auch etwas geringer geblieben. Das hätte natürlich reduzierende Wirkungen auf die Fluthöhen gehabt. Die Bahn des Orkantiefs vom 2./3. Januar wich aber „entgegen der Regel“ von der ursprünglichen Höhenströmung etwas rechts ab. Die Welle aus dem Azorenraum war allerdings zunächst mit der ursprünglichen Höhenströmung in Richtung auf Schottland gezogen. Zugleich mit der Vertiefung über der Nordsee bog sie aber nach Südosten ein und wanderte über Polen nach Südrußland (Abb. 4). Dementsprechend hatte sich auch die Höhenströmung geändert (Abb. 3). Die Frontalzone, die sich zu Beginn der Vertiefung am

2. Januar, 12 GMT von Schottland zur westlichen Ostsee erstreckte, hatte bereits 24 Stunden später auf eine Richtung von Nordwest nach Südost gedreht und verlief von Schottland bis nach Süddeutschland (Abb. 3, Isohypse vom 3. 1., 12 GMT). Gleichzeitig war ein Ausbruch hochreichender troposphärischer Kaltluft von Island und Grönland bis nach Süddeutschland erfolgt. Dieser Kaltluftausbruch stand im Zusammenhang mit der Drehung der Höhenströmung.

Der hochreichende Kaltluftausbruch zur Nordsee hing mit den Vorgängen über dem Nordwest-Atlantik zusammen. Mit der Entwicklung des umfangreichen Tiefdrucksystems südöstlich von Neufundland begann – wie erwähnt – eine weiträumige Wellenbildung des hochtroposphärischen Strahlstromes. Letzterer deckt sich in Abb. 3 etwa mit der dort dargestellten Isohypse von 5360 gpm. Vom 1. bis zum 2. Januar begann über Südostkanada die Verlagerung des Strahlstromes nach Süden. Vom 2. zum 3. Januar verstärkte sich diese

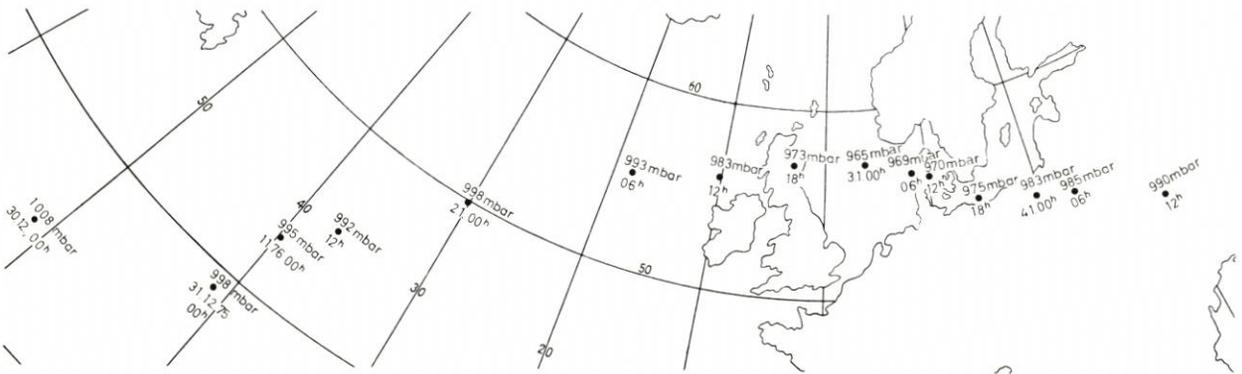


Abb. 4

Verlagerung noch. Die Wellenbildung setzte sich aber nach Osten mit einer Verlagerung des Strahlstromes nach Norden in Richtung Island und einem Ausweiten nach Süden in Richtung Süddeutschland fort (Abb. 3, Isohypse vom 3. 1., 12 GMT). Mit der Drehung des Strahlstromes über den Britischen Inseln von Nordwest nach Südost wich nun die Bahn des Orkantiefs nach Südosten ab. Dadurch entwickelte sich in der unteren Troposphäre der lang andauernde schwere Nordwest-Sturm über der Nordsee.

Die Entwicklung hätte noch extremer verlaufen können. Unter bestimmten Voraussetzungen wäre es möglich gewesen, daß der nördliche Teil der hochtroposphärischen Welle bis nach Südost-Grönland vorgestoßen und dabei quasistationär geworden wäre. Der Sturm hätte dann über der Nordsee noch länger angehalten und wäre noch etwas stärker geworden. Diese Situation trat beim Holland-Orkan vom 31. Januar zum 1. Februar 1953 in der westlichen Nordsee auf. Am 2. Januar 1976 war sie nur angedeutet, insoweit besteht die eingangs erwähnte „Verwandtschaft“ der Entwicklung mit dem Orkan vor 23 Jahren.

c) Die erste Zyklonenserie vor der Ostküste Nordamerikas war nach Nordosten gezogen und hatte über Skandinavien zu einem umfangreichen Sturmtief geführt, wie oben angemerkt. Auf der Rückseite des Tiefs war polare Kaltluft nach Südsandinavien eingedrungen. Die ersten beiden Wellen an der zurückschleifenden Kaltfront hatten die Kaltluft bis nach Norddeutschland gebracht. Der in Abb. 1 schematisch über Europa angedeutete Kaltluftausbruch hatte damit die Frontalzone bis nach Norddeutschland und in die süd-

liche Nordsee verlagert und noch verschärft. Auch dieser Vorgang war notwendig, um eine entsprechende Vertiefung der Zyklone im Raume der Nordsee zu begünstigen.

2.3 Der Ablauf

2.3.1 Die Orkantiefbildung (1. Phase)

Die von Westen rasch herangezogene dritte Frontalwelle erreichte am 2. Januar, 06 GMT das Seegebiet westlich von Irland (Abb. 5). Sie hatte sich zu diesem Zeitpunkt bereits zu einer Frontalzyklone mit sehr offenem Warmsektor formiert, der aus Subtropik-

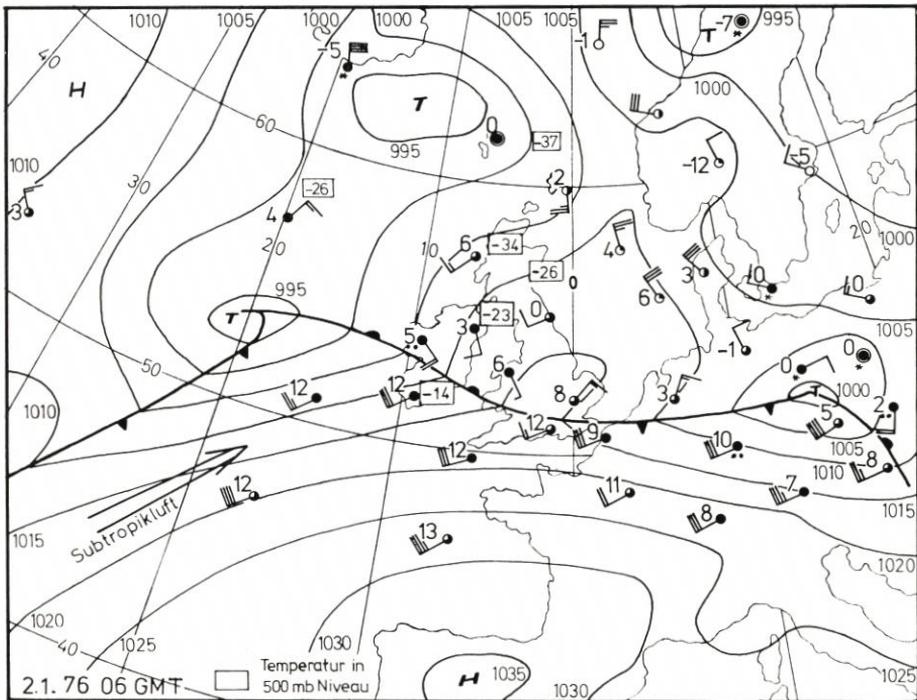


Abb. 5

luft bestand. Die Warmfront hatte Südwest-Irland überquert, und die Temperaturen waren dort im 500-mbar-Niveau vom 1., 12 GMT zum 2. Januar, 00 GMT um 6°C angestiegen. Zwischen Aberdeen und den Hebriden trat ebenfalls im 500-mbar-Niveau eine Temperaturdifferenz von 8°C auf. Hier lag die Grenze zum nordhemisphärischen Kältepol. So waren drei Luftmassen unterschiedlicher Herkunft an der kommenden Entwicklung beteiligt: neben der subtropischen Luft und der arktischen Kaltluft im Kältepol noch eine polare Übergangsluftmasse über den Britischen Inseln. Die Luftmassen näherten sich in der Frontalzone auf engem Raum, so daß im 500-mbar-Niveau zwischen Südirland und den Hebriden die sehr große Temperaturdifferenz von 20°C bestand (Abb. 5).

Das über Mitteldeutschland angelangte Tief (Abb. 5) und die westlich von Irland nachfolgende Depression können als Schulbeispiel für Wellenzyklonen an einer Frontalzone angesehen werden. Alles in allem waren die Voraussetzungen für eine sehr starke Zyklone nunmehr gegeben.

Die Zyklone hatte sich bereits um 12 GMT zu einem umfangreichen Sturmtief entwickelt. Der Tiefkern war entsprechend der Höhenströmung in das Seegebiet nordwestlich von Irland gezogen und hatte sich von unter 995 mbar auf weniger als 985 mbar vertieft (Abb. 6). Für die Weiterentwicklung des Tiefs war die Tatsache von Bedeutung, daß bei

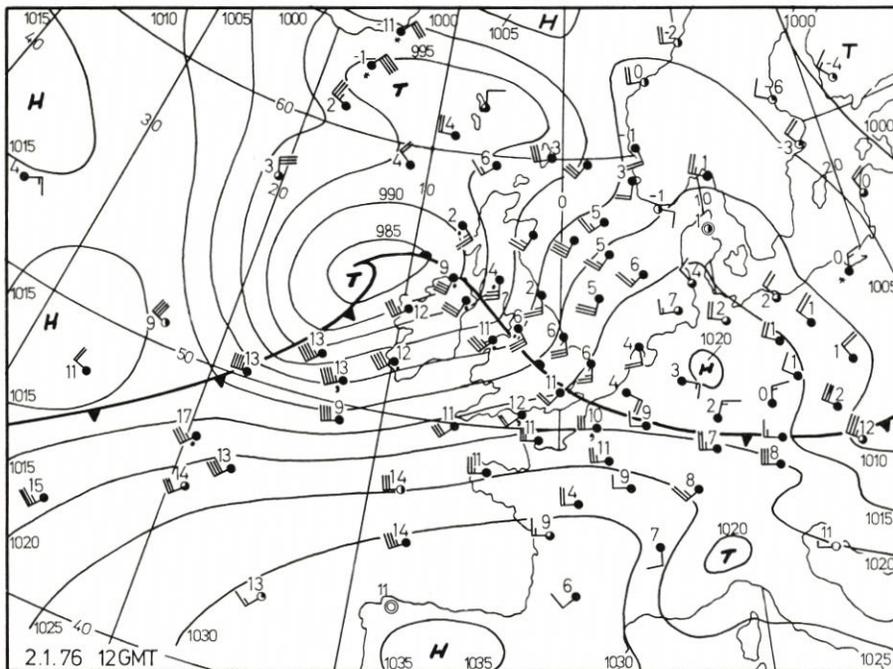


Abb. 6

etwa 50° Nord, 30° West, also dort, wo vor 12 Stunden noch die Welle mit 1000 mbar Kerndruck gelegen hatte, eine Hochdruckzelle von über 1015 mbar entstanden war. Dieser Druckanstieg war nicht statisch zu erklären, sondern stand im Zusammenhang mit der eingangs erwähnten Mäanderung des hochtroposphärischen Strahlstromes und der troposphärischen Massenkongruenz. Durch den Druckanstieg erhöhte sich aber der Druckgradient in der Rückseite der Zyklone, und dieser beschleunigte zusätzlich zur thermodynamischen Umsetzung den Einbruch der Kaltluft in den Warmsektor. Dieser Vorgang wurde deutlich sichtbar durch die Isobarendrängung an der Kaltfront bei etwa 50° Nord, 20° West. Bei unbeeinflusst nachströmender Kaltluft in eine Warmsektorzyklone wären der Luftdruckgradient in diesem Raum weniger stark und die Isobarenform nicht derart zyklonal gewesen. Das umfangreiche kräftige Sturmtief könnte zur Vermutung Anlaß geben, daß die Zyklone in Wirklichkeit schon mit einem hochreichenden troposphärischen Wirbel zu identifizieren wäre – wie meist in solchen Fällen – und daß sie daher keine nennenswerten Vertiefungsmöglichkeiten mehr gehabt hätten. Abgesehen von den Beob-

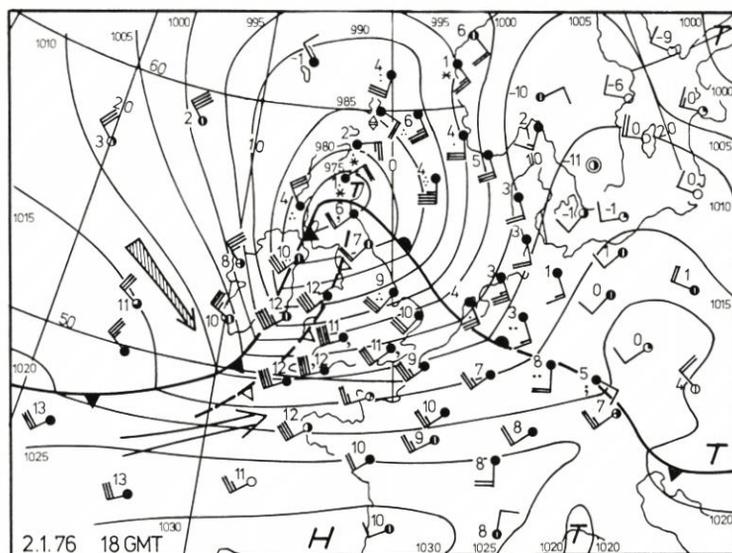


Abb. 7

achtungen im Warmsektor, die gegen eine solche Annahme sprachen, fehlte aber im Bereich der Zyklone auch das troposphärische Tief mit nahezu isohypsenparallelen Isothermen. Im Gegenteil, im 500-mbar-Niveau zeigten die Isothermen eine ausgesprochene Warmluftzunge. Noch deutlicher trat diese im 850-mbar- und 700-mbar-Niveau in Erscheinung. So bestätigten nunmehr die Messungen die starke Baroklinität des Feldes.

Daher setzte sich die etwa ab 09 GMT begonnene sehr starke Zyklonogenese fort. Das Tief zog entsprechend der Isobarenrichtung im Warmsektor oder auch der Höhenströmung weiter nach Ostnordost. Es erreichte um 18 GMT einen Kerndruck von 975 mbar (Abb. 7) und am 3. Januar, 00 GMT seinen tiefsten Wert im Nordteil der mittleren Nordsee mit 965 mbar (Abb. 8). Vom 2. Januar, 09 GMT bis 3. Januar, 06 GMT betrug die 3stündigen Druckfallgebiete der Zyklone zwischen 12 und 14 mbar (Abb. 11 und 12). Diese hohen Werte, vor allem auch die lange Andauer, sind für die Nordsee sehr ungewöhnlich. Vom 2., 06 GMT bis 3. Januar, 00 GMT fiel der Luftdruck beim Nordsee-Wetterschiff „Famita“ ($57,5^\circ$ Nord, $03,0^\circ$ Ost), in dessen Nähe der Kern des Wirbels vorbeizog, um etwa 44 mbar. Ähnlich hohe Werte wurden über Schleswig-Holstein gemessen.

Als der Kern am 2. Januar um 18 GMT Schottland passierte, ließ das Tief noch keine beginnende Okklusion erkennen. Der Warmsektor zeigte eine für die Intensität der Zyklone so starke Ausprägung, wie sie über den westeuropäischen Seegebieten nur sehr selten vorkommt (Abb. 7). Diese verzögerte Okklusion wurde durch die auf der Rückseite weit nach Süden vorgestoßene Kaltluft begünstigt, die zum 12-GMT-Termin – wie erwähnt – bei 50° Nord, 20° West begonnen hatte. Der Vorstoß pflanzte sich durch die von Westen heranrückende Hochdruckzelle ostwärts fort und wurde über Irland in einem starken Luftdruckgradienten sichtbar. Auch hier könnte man auf die Vermutung kommen, daß die eingezeichnete Kaltfront mit einem kräftigen Höhentrog zusammenfiel und daß bereits eine Höhenkaltfront das Tief weit umrundet hätte. Die Höhenkarten vom 3. Januar, 00 GMT bestätigten jedoch nicht diese Annahme; auch sprachen die Bodenbeobachtungen über England immer noch für ausgedehnte Warmsektorluft.

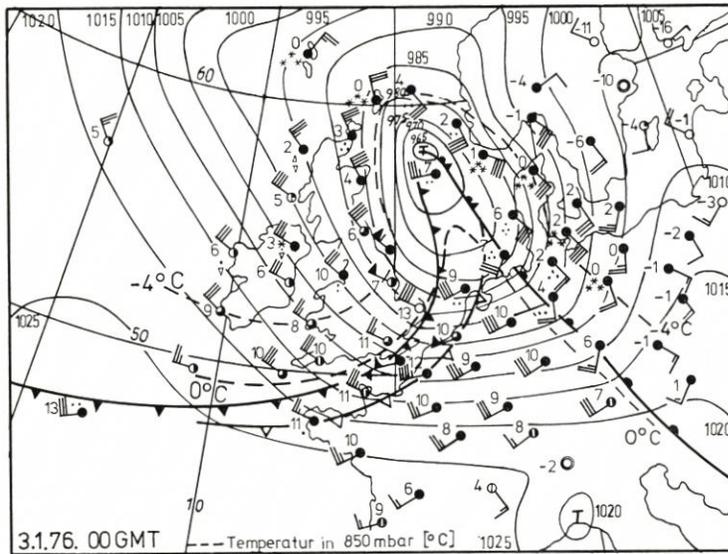


Abb. 8

Als am 3. Januar, 00 GMT der Kern des Tiefs das Seegebiet hart nördlich von MS „Famita“ erreichte, hatte über der Nordsee die Okklusion begonnen (Abb. 8). Die Warmfront war nur langsam vorangekommen und ungewöhnlich stark ausgeprägt. Die Kaltluft war rasch nachgestoßen und überquerte im 850-mbar-Niveau mit 50 bis 90 kn Geschwindigkeit aus Nordwest den Englischen Kanal (Abb. 13). In diesem Niveau war der Okklusionsprozeß deutlich zu sehen. Die Isothermen zeigten gegenüber dem Termin vom 2. Januar, 12 GMT über der Nordsee eine ausgeprägte Warmluftzunge. Bemerkenswert war, daß der innere Teil der Zyklone von Warmluft erfüllt war; die Kaltluft wurde außen über die Britischen Inseln herumgeführt. Eine Okklusion in dem Sinne, daß die Kaltluft den Kern des Tiefs erfüllte, existierte also nicht. In 850 mbar waren noch ähnliche Verhältnisse anzutreffen wie in 700 mbar (Abb. 14). Auch dort befand sich im Bereich des Höhentiefs noch Warmluft.

Im 500- und 400-mbar-Niveau traten keine geschlossenen Isohypsen auf wie in tieferen Niveaus, lediglich ein nach Westen verschobener Höhentrog deutete das Bodentief an. Das Sturmtief hatte sich also auf dem Höhepunkt seiner Entwicklung noch nicht zu einem hochreichenden, kalten, troposphärischen Wirbel umgewandelt, wie es meist bei derartigen rasanten Entwicklungen geschieht. Es trug vielmehr noch die Züge einer okkludierenden Frontalwelle. Im 500-mbar-Niveau wurde der Okklusionsvorgang noch angezeigt: Die ostwärts zum Bodentief verschobene Warmluftmenge deutete auf die aufquellende Warmsektorluft, die starke Abkühlung über Schottland wies auf nachdringende Kaltluft aus dem nordhemisphärischen Kältepol, die eine Höhenkaltfront verursachte.

Bemerkenswert war, daß sich die Frontalzone über dem Süden der Britischen Inseln infolge des Kaltluftenschubes in der oberen Troposphäre außerordentlich verschärfte, aber nicht südwärts ausgedehnt hatte. Im Gegenteil, die Frontalzone drang in den folgenden Tagen rasch ostwärts vor. Dieser Vorgang konnte nur die Folge der eingangs beschriebenen, ostwärts vorrückenden hochtroposphärischen Welle sein (Abb. 3).

Eine weitere Folge dieses Verhaltens der Frontalzone war der äußerst starke Luft-

druckanstieg vom 2. 1., 21 GMT bis 3. 1., 00 GMT über den Britischen Inseln (maximal über 14 mbar, siehe Abb. 11c). Die oben erwähnte, nach Süden ausschließende Kaltluft mußte sich nämlich unter die Frontalzone schichten und gewann eine deutlich erkennbare Keilform. Der dadurch einsetzende vertikale Schrumpfungs- und horizontale Dehnungsprozeß führte zur Vermehrung antizyklonaler Vorticity in der Kaltluft und damit zur Zunahme des Druckanstieges. Dagegen war vor der ostenglischen Küste und über der Nordsee der Luftdruck noch bis zum 3. 1., 00 GMT gefallen (Abb. 11). Das war sicherlich die Folge des im Innern des Tiefs zyklonal rotierenden restlichen Warmluftkörpers, während die Kaltluft außen herumgeführt wurde. So entstand ein außerordentlich starker Luftdruckgradient und ein Nordwest Bft 10 bis 11 vor der ostenglischen Küste. Dieses Feld von schwerem Nordwest-Sturm bis Orkan, das sich von den Seegebieten östlich von Schottland bis zur südwestlichen Nordsee erstreckte, verlagerte sich im Laufe des 3. Januar nach Osten und erreichte zur Flutzeit die östliche Nordsee (Abb. 10).

Es lag zunächst die Vermutung nahe, daß der Vertiefungsprozeß der Sturmzyklone wesentlich durch die Einbeziehung arktischer Kaltluft aus dem Raum von Island in die Rückseite des Tiefs bestimmt worden wäre. Diese Meinung wurde dadurch gestützt, daß sich am 1. Januar ein kaltes Tief südlich von Island von 1005 mbar auf 990 mbar vertiefte, als die dem Orkantief vorlaufende Welle die Britischen Inseln überquerte. Das Tief bei Island zog tatsächlich am 2. Januar in Richtung der Färöer und schwächte sich ab. Es gelangte aber nicht in die Rückseite des Orkantiefs, sondern auf die Vorderseite und konnte daher zur Zyklonogenese nicht beitragen. Der vorangegangene Vertiefungsprozeß des Tiefs bei Island war wahrscheinlich auf einem Impulsaustausch zwischen der über England voranlaufenden Welle und dem kalten Tief bei Island zurückzuführen. Im übrigen zeigten schon der zyklonale Warmluftkörper im Tief als auch das Fehlen eines kalten Höhenwirbels am 3. 1., 00 GMT, daß bisher nur eine reine Warmsektorzyklonogenese abgelaufen war. Auch in der Folgezeit fehlte die Umwandlung der Zyklone zu einem hochreichenden kalten Tief, die in einer kräftigen Tiefdruckentwicklung in der Rückseitenkaltluft sichtbar wird.

2.3.2 Die Umsteuerung (2. Phase)

Bisher war die Zyklone entsprechend der Warmsektorströmung nach Ostnordost gezogen. Als aber am 3. Januar, bald nach 00 GMT (Abb. 8) der tiefste Druckwert der Zyklone erreicht worden war und das Tief im Nordseebereich okkludierte, drehte es ziemlich unvermittelt nach Südosten ab (Abb. 4). Es wanderte dann – wie erwähnt – rasch über Jütland und die Swinemünder Bucht nach Südrußland weiter. Diese 2. Phase, ebenso wie eine noch zu erörternde dritte, waren an der Entwicklung des Sturmfeldes über der Nordsee entscheidend beteiligt.

Die Ursache für den Richtungswechsel in der Bahn der Bodenzyklone lag – wie bemerkt – in der Mäanderung des hochtroposphärischen Strahlstromes; jedoch können die Vorgänge, die eine Umsteuerung bewirken, sehr verschieden sein. In der Regel entwickelt sich in der Rückseitenströmung ein kalter Höhenwirbel, der sich zum Boden durchsetzt. Während sich nun das warme Bodentief abschwächt, bildet sich in der Kaltluft ein neuer Bodenwirbel, der dann mit der Kaltluftströmung weiterwandert. Das war offenbar hier nicht der Fall, denn ein hochreichendes kaltes Tief entstand ja nicht. Vielmehr zeigte sich, daß das dreistündige Druckfallgebiet an die vorrückende Warmfront gebunden blieb und bei der Okklusion des Warmsektors südostwärts rückte (Abb. 12a). Die Verlagerung des Okklusionsprozesses nach Südosten verursachte also den Bahnwechsel des Tiefs. Dieser

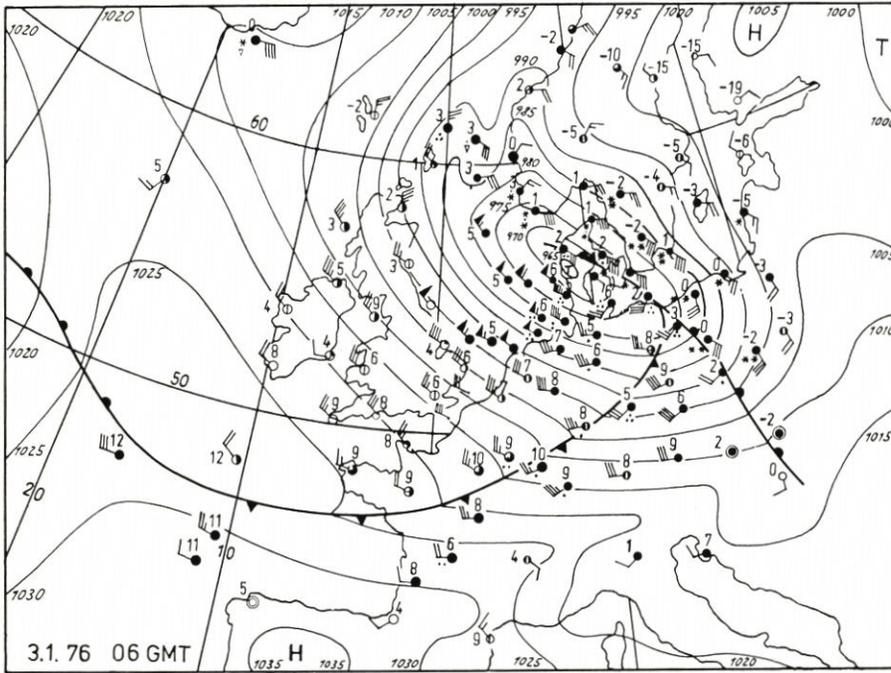


Abb. 9

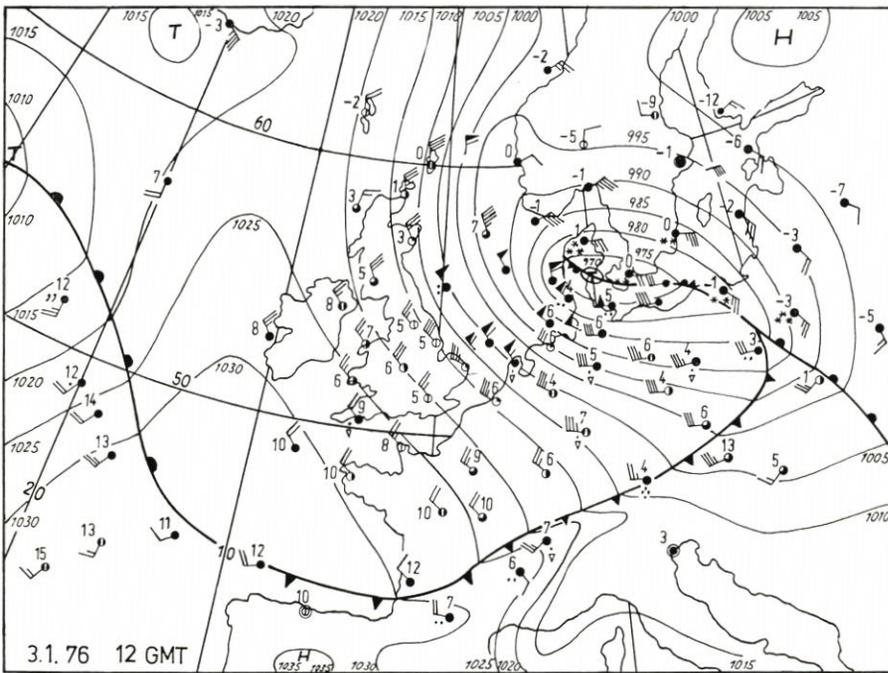


Abb. 10

Vorgang war bereits an der Ausweitung des Bodentiefs nach Südosten am 3. Januar, 00 GMT (Abb. 8) zu erkennen.

Das Sturmtief wandelte sich in seinem Kernbereich mit fortschreitendem Okklusionsprozeß – wie erwähnt – nicht zu einem kalten, sondern zu einem w a r m e n Wirbel um. Das zeigte die Entwicklung bis zum 3. Januar, 12 GMT (Abb. 10). Die Kaltfront war bereits bis 20° Ost vorgedrungen und verlief am Nordrand der Alpen; ein offener Warmsektor bestand noch über Südpolen und Ungarn. Die Okklusion erstreckte sich über die südliche Ostsee bis zum Tiefkern über den Dänischen Inseln. Diese Ergebnisse aus der Bodenwetterkarte werden durch den Isothermenverlauf im 850-mbar-Niveau bestätigt.

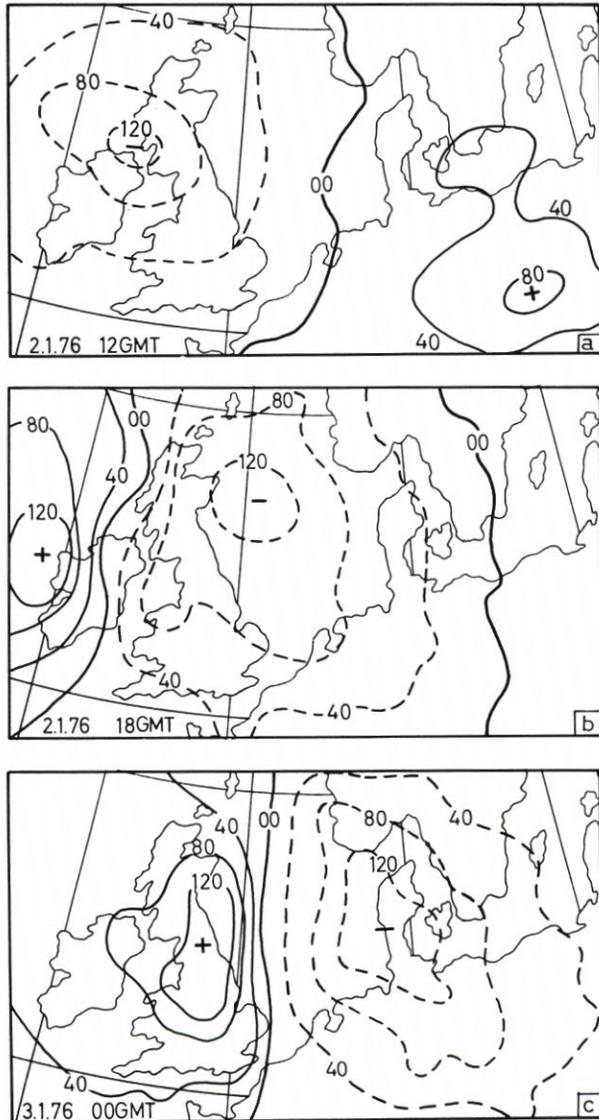


Abb. 11

Während auf der Rückseite der Zyklone kalte Luft, die zum Vorterrain (3. 1., 00 GMT, 850- und 700-mbar, Abb. 13, 14) die Britischen Inseln überflutet hatte, um 12 GMT bereits Mitteleuropa überströmte, erstreckte sich eine ausgeprägte Warmluftzunge von Polen nicht nur zum Tief über den Dänischen Inseln, sondern darüber hinaus bis zur südlichen Nordsee (Abb. 15). Noch klarer war der thermische Aufbau der Zyklone im 700-mbar-Niveau zu sehen. Die Okklusionsfront über Polen und der Warmsektor südlich davon waren deutlich ausgeprägt (Abb. 16). Im Kernbereich des Tiefs zeigte sich aber ein abgeschlossener Warmluftkörper, der sich entsprechend dem Wind- und Druckfeld in starker zyklonaler Rotation befand. Dieser warme Körper der Zyklone war reell und

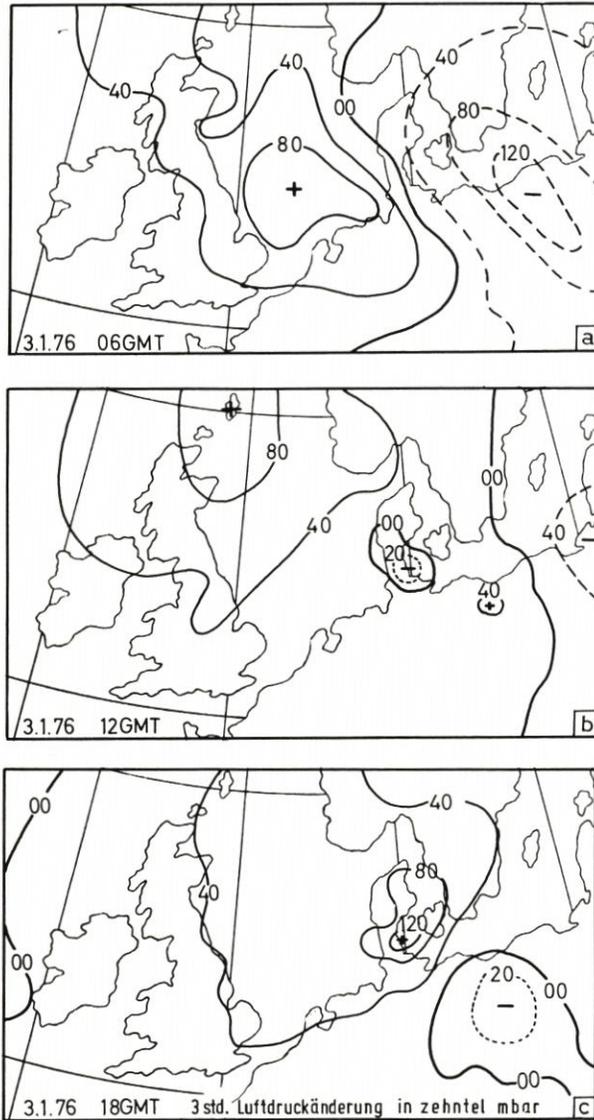


Abb. 12

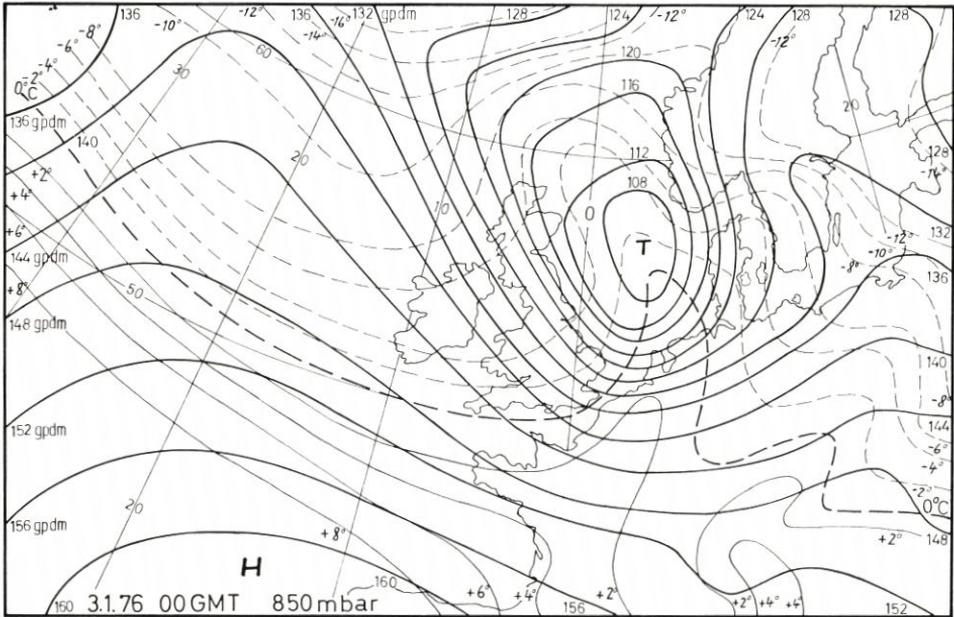


Abb. 13

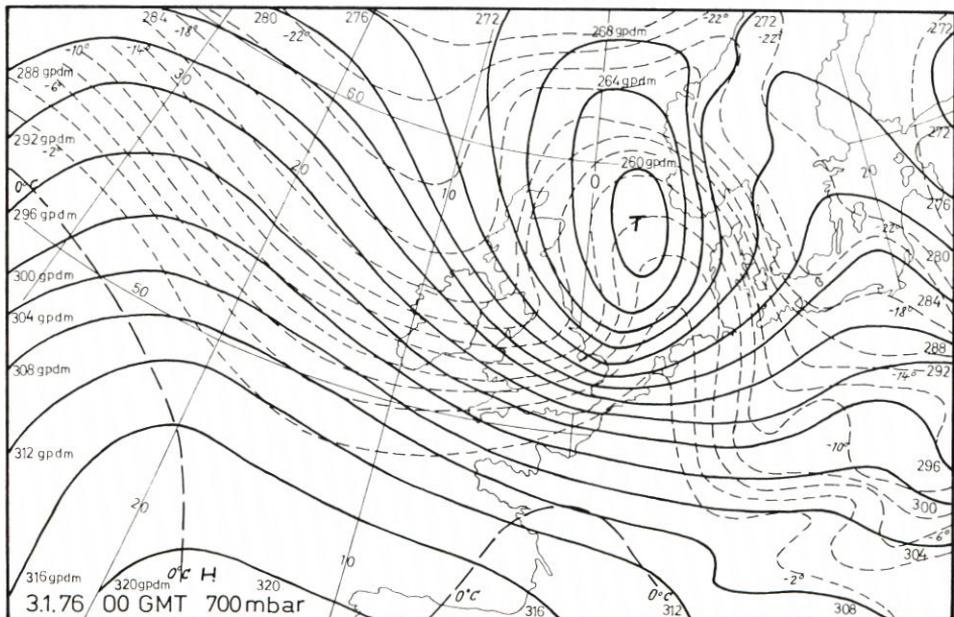


Abb. 14

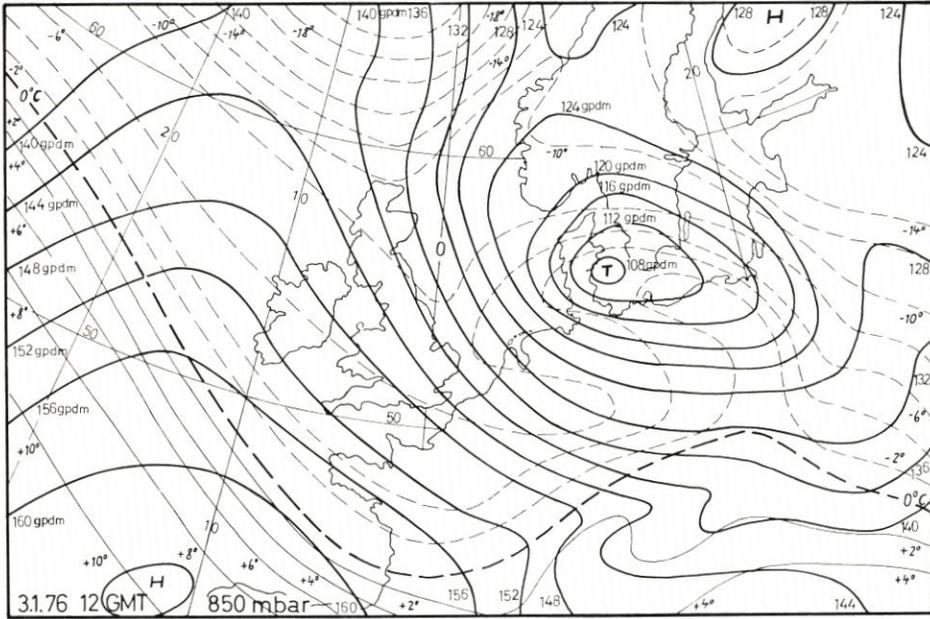


Abb. 15

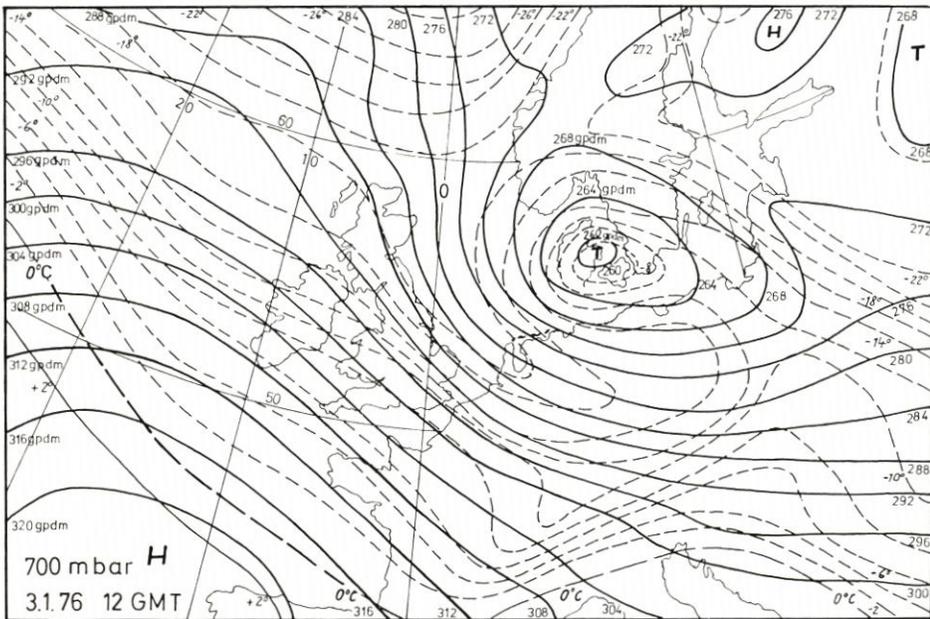


Abb. 16

nicht durch die hohen Temperaturen gegenüber der Umgebung belegt, sondern auch durch die thermischen Winde. Über Schleswig herrschte im 700-mbar-Niveau nach dem 12-GMT-Aufstieg ein thermischer Ostwind von 35 kn, in Göteborg ein thermischer Westwind von 50 kn; im 500-mbar-Niveau lagen die Werte um 20 kn. Auch in diesem Niveau waren noch über der südlichen Ostsee um 5° wärmere Schichten gegenüber der Umgebung zu erkennen. Dementsprechend nahm auch die Intensität der Zyklone vom Meeresniveau bis in höhere Schichten ab. Im 500-mbar-Niveau war kaum noch eine geschlossene Isohypse zu erkennen.

Die Bildung eines warmen Wirbelkörpers im zentralen Bereich der Tiefs ist in manchen Frontalzyklonen zu erkennen, jedoch sehr selten so stark entwickelt wie im vorliegenden Fall. Die Entstehung ist etwa folgendermaßen zu denken: Die aufsteigenden bzw. aufgleitenden Warmluftmassen in einem okkludierenden Warmsektor entweichen aus ihm in der oberen Troposphäre. Die unten zurückbleibenden Warmluftmassen dehnen sich vertikal und schrumpfen dementsprechend horizontal. Dadurch gewinnen sie zyklonale Rotation. Der entstehende Wirbel schafft sich sein Druckfeld, nämlich ein Tiefdruckgebiet, dessen Träger der warme Wirbelkörper ist.

Durch das Druckfeld werden Kaltluftmassen in die Rückseite einbezogen und umrunden außen das Tief. Erst durch die Reibung gelangen die kalten Luftmassen allmählich in das Innere. Da die Kaltluft in der Regel keine zyklonale Rotation besitzt, sondern sie erst durch das Druckfeld erhält, schwächt sich beim Einfließen das Tief ab und verursacht starken Luftdruckanstieg. Dieser Vorgang spielte sich offenbar bei der Okklusion des Orkantiefs vom 3. Januar 1976 ab. Auch die in der Rückseite absinkende und sich in untere Schichten ausbreitende Kaltluft führt zu Luftdruckanstieg. Dieser Vorgang ist am 3. 1. 1976, 12 GMT (Abb. 10) deutlich zu sehen. Während sich im 850-mbar-Niveau die Kaltluft (Abb. 15) über ganz Westeuropa ausbreitet, ist im 700-mbar-Niveau (Abb. 16) ebenso wie im 500-mbar-Niveau nur noch eine schmale Kaltluftzunge über der westlichen Nordsee und Mitteleuropa erkennbar. Sie wird eingengt durch den warmen Wirbelkörper über Dänemark und den – wie eingangs erwähnt – westostwärts heranrückenden Strahlstrom.

2.3.3 Die umgebogene Okklusion (3. Phase)

Nach der Orkantiefbildung (1. Phase) und der Umsteuerung (2. Phase) war noch eine 3. Phase zu beobachten, die im allgemeinen zur Entwicklung kräftiger Zyklonen gehört und die zum Höhepunkt des Sturmes führte. Als in den Vormittagsstunden des 3. Januar die Kaltfront bereits die Oder erreicht hatte und der Kern des Tiefs Jütland überquerte, begann der Luftdruck in der Rückseitenkaltluft der Zyklone erneut zu fallen (Abb. 12b). Dieser Vorgang wird als Trogbildung bezeichnet und führt vielfach zu den gefürchteten Trogstürmen. Allerdings verbergen sich hinter der Bezeichnung „Trogbildung“ zwei verschiedene Vorgänge, die auch zusammen auftreten können und dann besonders starke Auswirkungen besitzen. Einmal kann sich ein kalter Höhenwirbel bis zum Meeresniveau durchsetzen. Das konnte hier nicht der Fall sein, weil sich – wie mehrfach erwähnt – kein Höhenwirbel ausbildete. Zum anderen können Teile des warmen Wirbels im Zyklonenkern von der Rückseitenströmung erfaßt werden und sich in Bewegung setzen. Dieser Vorgang wird eher mit dem Begriff „umgebogene Okklusion“ beschrieben. Er war hier zu beobachten.

Schon in der Zeit zwischen 06 und 09 GMT begann der Luftdruck bei dem dänischen Feuerschiff „Horns Rev“ westlich von Jütland innerhalb der Kaltluft erneut zu fallen.

Das Druckfallgebiet erreichte mit ca. 2 mbar um 12 GMT Schleswig-Holstein und um 18 GMT das Odergebiet (Abb. 12c). Die Luftdruckkurve von List/Sylt – nahe dem Kerngebiet des Falles – zeigte den erneuten Druckfall zwischen etwa 08 und 12 GMT (ca. 2 mbar). In Norderney trat kein Druckfall mehr auf, es verminderte sich nur der Druckanstieg, und zwar zwischen 09 und 13 GMT. In Hamburg blieb der Luftdruck zwischen 13 und 17 GMT annähernd konstant. Die Bahn des Druckfallgebietes war an die Wanderung des nach Südosten abziehenden warmen Wirbelkörpers gebunden, so daß ein Zusammenhang mit ihm augenscheinlich ist.

2.4 Das Sturmfeld

Die Orkantiefbildung, die Umsteuerung und die Trogbildung waren die drei Vorgänge, die die Entwicklung des Sturmfeldes nach Stärke, Richtung und zeitlichem Ablauf bestimmten, und zwar derart, daß günstige Voraussetzungen für die Entstehung einer extrem hohen Flut in der Deutschen Bucht entstanden. Die gewaltige Vertiefung der Zyklone auf dem Weg nördlich von Irland (2.1., 12 GMT, Abb. 6) zur mittleren bis nördlichen Nordsee (3.1., 00 GMT, Abb. 8) führte zum Orkantief. Ein länger anhaltender schwerer Sturm in der Deutschen Bucht wäre – wie erwähnt – durch diese Entwicklung allein noch nicht entstanden. Die Umsteuerung des Tiefs nach Südosten aber vergrößerte die Dauer des Nordwest-Orkans in der südlichen Nordsee. Die abschließende Trogbildung über Schleswig-Holstein führte noch einmal zu einem Sturmmaximum. Und das geschah kurz vor Erreichen des astronomischen Hochwassers.

Der Sturm im Warmsektorbereich verursachte in den Nachtstunden zum 3. Januar über Land bereits verbreitet Schäden, die hier in diesem Zusammenhang nicht interessieren sollen. Orkanböen traten auf, als in den Morgen- und Vormittagstunden mit Winddrehung von Süd und Südwest auf West die Kaltfront Deutschland überquerte. Für den Stau der Wassermassen in der südlichen Nordsee war jedoch der schwere Nordwest-Sturm bis -Orkan maßgebend, der sich am 3. Januar, 00 GMT (Abb. 8) in der Rückseite der Zyklone über der ganzen westlichen Nordsee entwickelte. Er hatte bereits 6 Stunden später die östliche Nordsee und die Deutsche Bucht erreicht (3. Januar, 06 GMT, Abb. 9).

Das Nordwest-Sturmfeld entstand im Bereich des stärksten isalobarischen Druckgradienten über der westlichen Nordsee. Während in den 3 Stunden vom 2. Januar, 21 GMT bis 3. Januar, 00 GMT der Luftdruck über der östlichen Nordsee um mehr als 14 mbar gefallen war, stieg er im gleichen Zeitraum über Ostengland um mehr als 14 mbar an (Abb. 11c). Dieser Anstieg war an den Einbruch kalter Luft gebunden. Als 6 Stunden später die Kaltluft Mitteleuropa bis fast zur Oder überflutete, war das Druckanstiegsgebiet bereits bis nach Norddeutschland vorgedrungen (Abb. 12a) und hatte sich das Orkanfeld bis in die östliche Nordsee und die Deutsche Bucht verlagert (Abb. 9).

Dementsprechend erreichte der schwere Nordwest-Sturm bis -Orkan seinen Höhepunkt in der westlichen Deutschen Bucht in den frühen Morgenstunden, in der östlichen Deutschen Bucht und der Elbmündung etwa 3 bis 5 Stunden später (siehe Windangaben von Schiffs- und Küstenstationen im Beitrag von G. DUENSING in diesem Heft).

Anschließend zeigten die Windmessungen in den Vormittagsstunden eine leichte Abnahmetendenz. Während aber die Kaltfront und das Druckanstiegsgebiet über Deutschland nach Osten zogen, bildete sich – wie schon erwähnt – westlich von Jütland zwischen 06 und 09 GMT ein engbegrenztes Druckfallgebiet aus, das nach Südosten wanderte. Bis 12 GMT war der Druck in Schleswig-Holstein um ca. 2 mbar gefallen. Dementsprechend

trat in den frühen Nachmittagsstunden, etwa vor Erreichen des astronomischen Hochwassers, ein zweites Sturmmaximum auf. Diese Zunahme war am Seewetteramt zwischen 11 und 14 GMT ebenfalls festzustellen.

Wie in solchen Fällen meist beobachtet wird, folgte dem Fallgebiet von Norden her ein kräftiges Druckanstiegsgebiet nach (Abb. 12c). Es war an die dem Tiefkern von Skandinavien nachfolgende Kaltluft gebunden und verstärkte sich über Schleswig-Holstein. Mehr als 10 mbar stieg der Druck zwischen 12 und 15 GMT über Jütland und zwischen 15 und 18 GMT über dem nördlichen Schleswig-Holstein an. So nahm der Luftdruckgradient zwischen der ostfriesischen und nordfriesischen Küste in dieser Zeit allmählich ab, und der Wind ließ kurz vor Erreichen des Hochwassers in der Deutschen Bucht langsam nach.

3. Die Sturmflut-Wetterlage vom 20./21. Januar 1976

3.1 Zusammenfassung

Ähnlich wie im Februar 1962 entstand über dem nördlichen Nordatlantik, auf der Nordseite eines nordwärts verschobenen Azorenhochs ein gewaltiger Warmsektor aus subtropischer Luft. Der Okklusionsprozeß führte zu einem umfangreichen Sturmtief, das nach Nordskandinavien eindrehte. Auf der Rückseite des Tiefs entwickelte sich ein Sturmfeld von Grönland bis zur Nordsee. Eingelagerte Tröge verursachten Windmaxima mit Sturmfluten in der Deutschen Bucht.

3.2 Abbruch der Sturmflut-Wetterlagen

Die Anfang Dezember 1975 begonnene Serie der Sturmflut-Wetterlagen endete – wie eingangs besprochen – im letzten Drittel des Januars 1976. Nach dem 23. Januar ging die stürmische Westwetterlage zu Ende. Hochreichende Kaltluft strömte nach Nord- und Mitteleuropa ein. Das bisher steuernde atlantische Hoch zog sich nach Westen zurück, während über Nordeuropa der Luftdruck stetig anstieg. Als Folge davon erschien am 28. Januar erstmalig seit Mitte November ein Hoch über Skandinavien, das sich in den nächsten Wochen häufig wieder herstellte und die Witterung zum Ausgang des Winters bestimmte. Bei überwiegend ablandigen Winden konnten dann in der Deutschen Bucht keine Sturmfluten mehr auftreten.

Es ist bemerkenswert, daß auch im Februar 1962 die übersteigerte Westwindzirkulation ziemlich plötzlich abbrach und sich anschließend Hochdruckgebiete über Skandinavien einstellten. Diese hatten dann die Witterung beherrscht und zu einem kalten Spätwinter geführt.

Die Umstellung der Großwetterlage erfolgte 1962 nach der Katastrophenflut vom 16./17. Februar. Auch 1976 wurde die Sturmflut nach der sehr schweren Sturmflut vom 21. Januar abgebrochen. Es folgten zwar bis zum 22. Januar noch 3 schwächere Sturmfluten nach, die aber zur selben Wetterlage gehörten und als Ausklang zu deuten waren.

Die plötzliche Beendigung einer eingefahrenen, überstarken West- bis Nordwestwetterlage und der Beginn einer Hochdruckwetterlage über Skandinavien sind sicher nicht zufällig. Der Vorgang kann aber nur im Rahmen der globalen Zirkulation gedeutet werden. Im Januar 1976 waren der Abbruch der Westwetterlage und die Entstehung eines Hochs über Skandinavien erwartet worden, wenn auch der Zeitpunkt kaum vorhersagbar schien.

Die Umstellung gewann an Wahrscheinlichkeit, als sich am 18. und 19. Januar über dem Nordwest-Atlantik eine Luftmassen- und Luftdruck-Konstellation einstellte, die sehr der Ausgangssituation vom Februar 1962 ähnelte.

Das folgende Sturmtief vom 21. Januar, das die letzte sehr schwere Sturmflut verursachte und die Umstellung der Wetterlage einleitete, gehörte – wie das Orkantief vom Februar 1962 – zum Skandinavien-Typ. Das Orkantief vom Januar 1976 war dagegen – wie erwähnt – dem Jütland-Typ zuzuordnen.

3.3 Ausgangssituation

Ähnlich wie 1962 entwickelte sich das Sturmflut-Tief aus einem riesigen Warmsektor weit nördlich im isländisch-grönländischen Raum (Abb. 17). Dementsprechend bildete sich am 21. Januar 1976 auch eine außerordentlich umfangreiche Zyklone über dem Nordost-Atlantik und Skandinavien, während das Orkantief vom 3. Januar verhältnismäßig eng begrenzt blieb.

Auf der Nordseite einer kräftigen, nördlich der Azoren gelegenen Hochdruckzelle (1035 bis 1040 mbar) wurde am 19. Januar in breitem Strom subtropische Warmluft vom West- zum Nordatlantik geführt. Gleichzeitig stieß auf der Ostseite eines entsprechenden Hochs über Nordamerika sehr kalte Luft von Labrador über Neufundland südwärts vor. Während die Kaltluft vor dem Warmsektor über Schottland und den Färöern im 500-mbar-Niveau zwischen -31°C und -40°C aufwies und die Rückseitenkaltluft über Neufundland und Ostlabrador -31°C bis -36°C besaß, betrug die Temperaturen im Raume des Nordatlantiks bis nach Südgrönland auf denselben Isohypsen wie im Westen und Osten -21°C bis -23°C . Eingebettet in eine starke troposphärische Westströmung waren die Temperaturen des Warmsektors also um ca. 10°C höher als in den einschließenden Kaltluftmassen. Das war ein außergewöhnlich hoher Betrag. Der ausgeprägte Warmsektor wurde durch die Lage der mittleren Isothermen der unteren Troposphäre (relative Topographie 500/1000 mbar) vom 19. Januar 1976, 00 GMT, die den Warmsektor umschlossen, bestätigt. Sie verliefen von den Britischen Inseln über den Süden Grönlands bis Neufundland. Die Wanderung dieser Massen hatte im Raume von 55° Nord, 30° West vom 18. zum 19. Januar, 00 GMT eine troposphärische Erwärmung von ca. 16°C und über dem St. Lorenz-Golf eine Abkühlung von etwa 14°C zur Folge.

Die Luftmassenverteilung über Skandinavien war diesmal anders als im Februar 1962. Während damals Nordeuropa von hochreichender polarer Kaltluft überflutet war, wanderte jetzt nur eine verhältnismäßig schmale Kaltluftzunge vom Atlantik über die Nordsee nach Nordeuropa vor dem Warmsektor her. Die Entwicklungsbedingungen der nordatlantischen Warmsektorzyklone waren daher diesmal nicht optimal. Außerdem wurde auch die Zugbahn des Tiefs durch das Fehlen polarer Kaltluft über Nordeuropa entsprechend beeinflusst. Es zog nicht – wie im Februar 1962 – nach Mittelschweden, sondern drehte nordwärts ab.

3.4 Die Sturmtiefentwicklung

Der Vertiefungsprozeß begann bereits, als die Zyklone, aus dem Golfstromgebiet kommend, am 18. Januar, 12 GMT Neufundland passierte. Sie schöpfte ihre Energie aus den Temperaturgegensätzen zwischen der warmen, subtropischen Luft auf ihrer Vorderseite

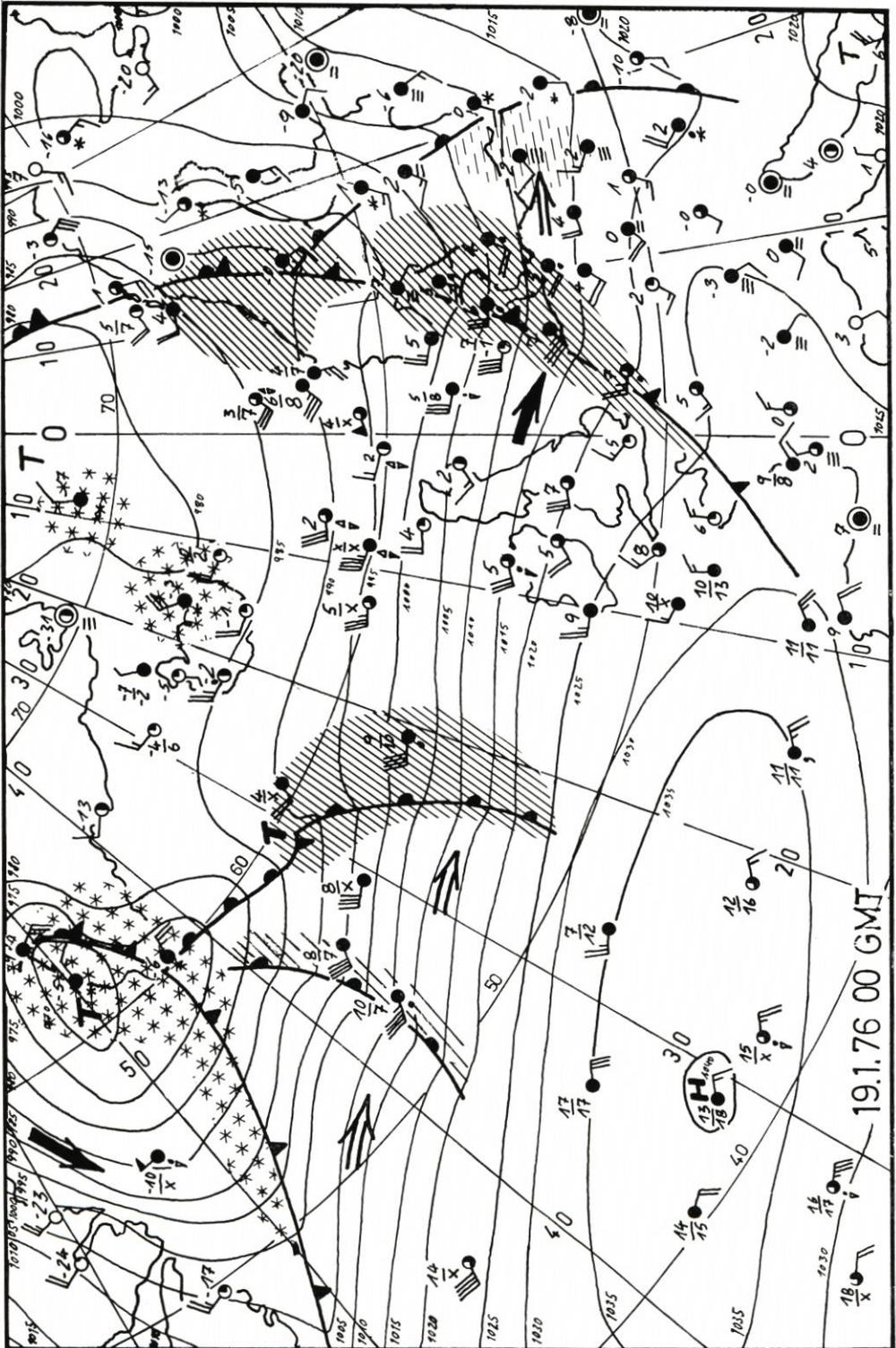


Abb. 17

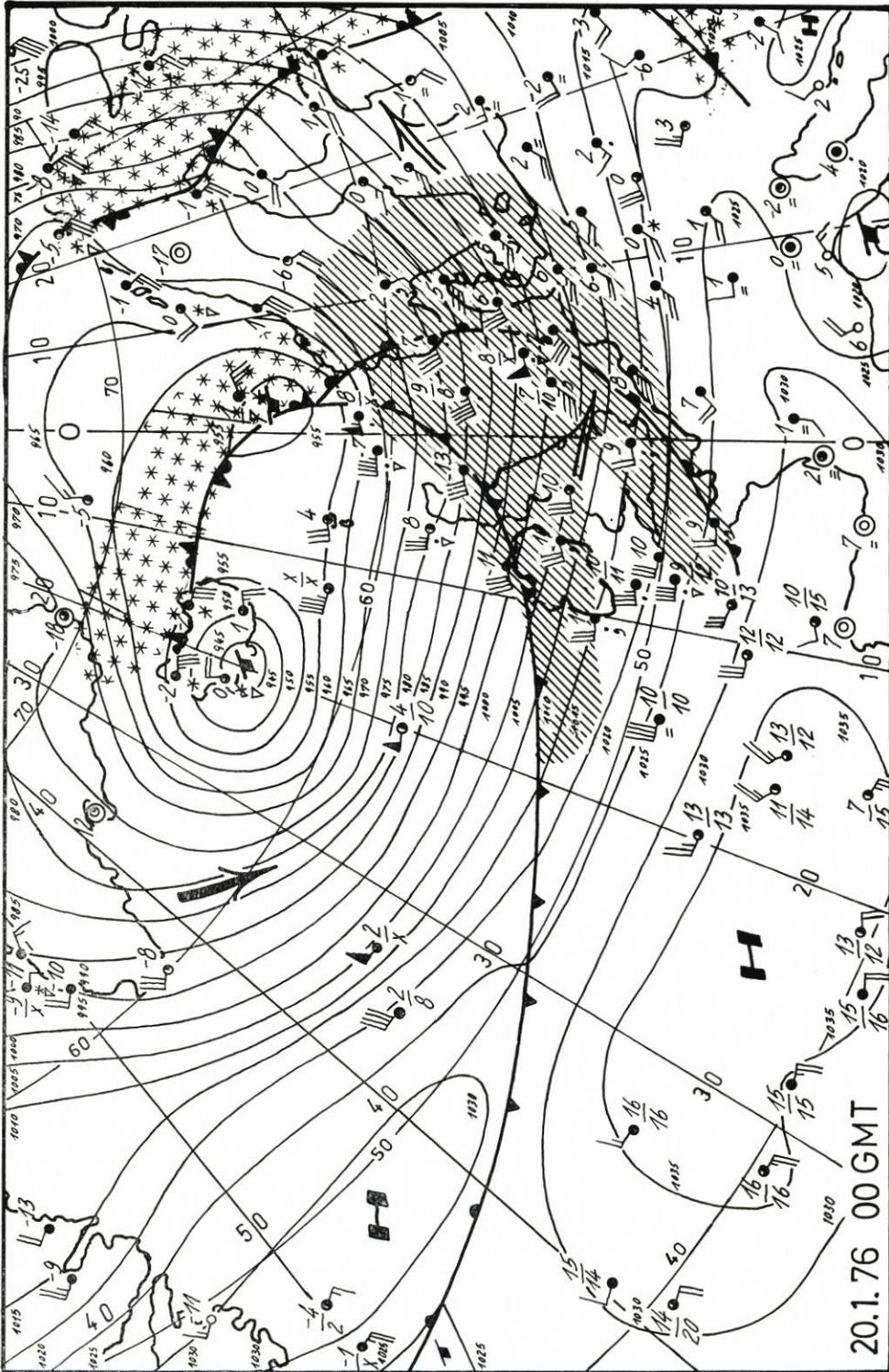


Abb. 18

und der nachfolgenden kanadischen Kaltluft. Bis zum 19. Januar, 00 GMT (Abb. 17) hatte sie Südgrönland erreicht und sich auf 970 mbar vertieft. Von diesem Zeitpunkt an setzte die Okklusion des nordatlantischen Warmsektors ein. Am 19. Januar gegen 12 GMT erreichte das Tief das Seegebiet westlich von Island mit einem Kerndruck von unter 955 mbar. Am 20. Januar, 00 GMT (Abb. 18) gelangte das Tief bei gleichbleibendem Kerndruck bereits bis zum südlichen Nordmeer. Ein kalter, hochreichender Restwirbel, der für die Sturmflut in der Deutschen Bucht noch von Bedeutung werden sollte, war mit unter 945 mbar Kerndruck an der Südküste Islands zurückgeblieben.

Das Bodentief über dem südlichen Nordmeer vertiefte sich bis zum 20. Januar, 06 GMT, also in den folgenden 6 Stunden, noch bis auf etwa 940 mbar und drehte dann entsprechend der Höhenströmung – wie oben erwähnt – nordwärts ab. Dieser Vertiefungsprozeß hing mit der Okklusion des Warmsektors zusammen. Dabei bildete sich – ähnlich wie am 3. Januar – ein warmer Wirbelkern. Er wurde über dem südlichen Nordmeer durch den Aufstieg des Wetterschiffes „M“ ($65,4^{\circ}$ Nord, $02,7^{\circ}$ Ost) am 20. Januar, 12 GMT bestätigt. Anders aber als am 3. Januar setzte auf der Rückseite des Bodentiefs innerhalb der einströmenden Kaltluft über der Nordsee kein kräftiger Druckanstieg ein. Im Gegenteil, der Luftdruck fiel – wie es bei den meisten kräftigen Frontalzyklongeneseen geschieht – in Kernnähe nach Kaltfrontdurchgang noch weiter. Dieser Vorgang hing damit zusammen, daß sich ein hochtroposphärischer Strahlstrom, der am 20. Januar, 00 GMT die nördliche Nordsee von West nach Ost überquerte, dem Zyklonenkern nicht näherte – wie am 3. Januar –, sondern nach Südosten entfernte.

3.5 Luftmassen und Fronten

In dem breiten Band der hochreichenden starken Westströmung über dem Nordatlantik verlagerten sich Luftmassen und Fronten ungewöhnlich schnell. Die Warmfront, die am 19. Januar, 00 GMT den mittleren Nordatlantik erreicht hatte (Abb. 17), überquerte 24 Stunden später bereits die östliche Nordsee. Gleichzeitig stiegen die Temperaturen im 500-mbar-Niveau über Südnorwegen von -34° C auf -21° C an. Weitere 24 Stunden später, am 21. Januar, 00 GMT war die Warmfront schon bis nach Westrußland gelangt (Abb. 19).

Noch rascher folgte die Kaltfront. Sie überquerte in 24 Stunden den Atlantik von der Labradorsee bis Schottland. Beim Wetterschiff „L“ ($57,1^{\circ}$ Nord, $21,5^{\circ}$ West) fiel die Temperatur im 500-mbar-Niveau vom 19. zum 20. Januar, 00 GMT von -21° C auf -31° C, während im Warmsektor über Schottland die Temperatur in derselben Zeit von -30° C auf -17° C anstieg.

Bis zum 21. Januar, 00 GMT hatten alle Fronten die Nordsee und Mitteleuropa überquert (Abb. 19). Die Temperatur ging im 500-mbar-Niveau über Schleswig vom 20. zum 21. Januar, 00 GMT von -19° C auf -34° C zurück.

3.6 Das Sturmfeld

Mit dem Warmsektor der Zyklone wanderte ein ausgedehntes Sturmfeld über den Nordatlantik zur Nordsee. Dabei verstärkte es sich noch durch den Vertiefungsprozeß des Wirbels. Im Warmsektor, der am 20. Januar von Mitternacht bis mittags die Nordsee überquerte, traten in der südlichen Nordsee im Mittel südwestliche Winde von Bft 8 bis

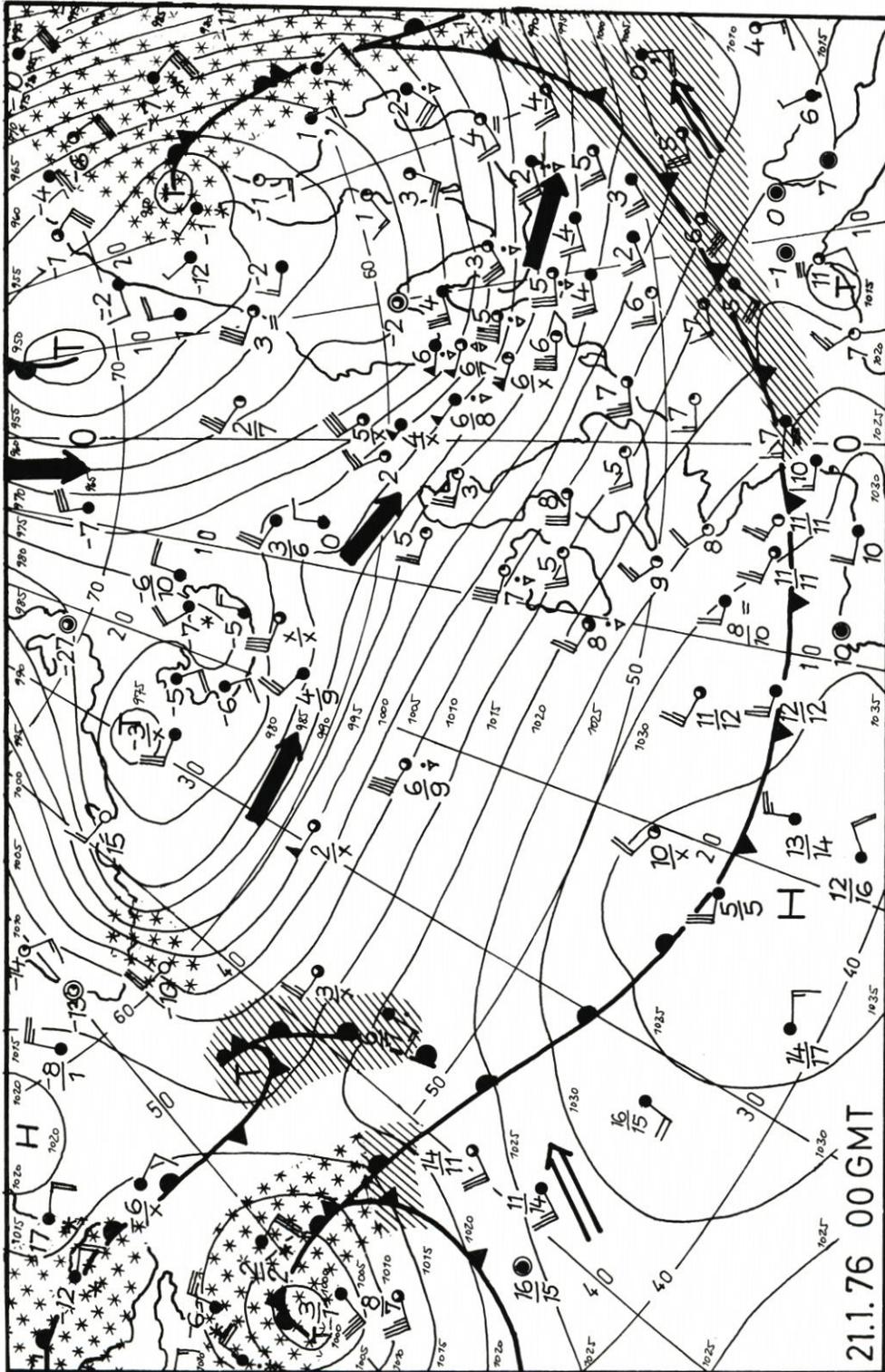


Abb. 19

9 auf. Als in den frühen Nachmittagsstunden des 20. Januar die Kaltfront die Deutsche Bucht passierte, drehte der Wind auf West bis Nordwest und frischte vielfach auf Bft 9 bis 10 auf. Für den Eintritt eines extremen Hochwassers kamen Winddrehung und Windzunahme zu spät. Eine sehr schwere Sturmflut wäre aber in diesem Falle durchaus denkbar gewesen, wenn die Kaltfront die Deutsche Bucht ein paar Stunden früher passiert hätte. Eine weitere Sturmflutgefahr bestand in den frühen Nachmittagsstunden des 21. Januar, jedoch ließ der Sturm bis dahin merklich nach.

3.7 Die Trogentwicklung

Der Sturm dauerte nach der Kaltfrontpassage am 20. Januar nachmittags nicht nur weiter an, er nahm in der Nacht zum 21. Januar als Folge einer Trogbildung in der Kaltluft noch etwas zu. Es handelte sich um einen Vorgang, der häufig in der Rückseite hochreichender kräftiger Zyklonen zu beobachten ist. Tröge stehen mit Wirbelbildungen in der Troposphäre in Zusammenhang. Sie setzen sich – besonders über verhältnismäßig warmem Wasser – von oben nach unten bis ins Meeresniveau durch und machen sich in mehr oder minder starkem Luftdruckfall bemerkbar. Hier sei an das Tief erinnert, das am 20. Januar, 00 GMT über Südisland entstand (Abb. 18). Es war mit einem kalten Höhenwirbel gekoppelt, der mit der Strömung südostwärts zog. Gegen 12 GMT passierte es mit unter 955 mbar Kerndruck die Färöern. Nachdem dort der Luftdruck etwa 5 mbar in 12 Stunden gefallen war, folgte ein Druckanstiegsgebiet von etwa 10 mbar in 3 Stunden nach, das über Island entstanden war. Dadurch bildete sich westlich der Färöern ein starker Luftdruckgradient mit schwerem Nordweststurm.

Dieser Trog mit Luftdruckfall und nachfolgendem Nordweststurm zog rasch mit der Höhenströmung nach Ostsüdost, dann schwächte er sich merklich ab. Um 18 GMT hatte der Trog die Westküste Südnorwegens, am 21. Januar um 00 GMT das Kattegat erreicht. Der Luftdruck war am 20. Januar zwischen 21 und 24 GMT nur noch um etwa 3 mbar gefallen (Abb. 20). Kräftiger Luftdruckanstieg folgte nach. Dadurch entwickelte sich am 20. Januar zwischen 21 und 24 GMT über großen Teilen der östlichen Nordsee ein Sturmfeld von Bft 10 aus West bis Nordwest. Bei starkem Luftdruckgradienten genügte der leichte Druckfall über dem Kattegat, um schweren Sturm zu verursachen. In der Deutschen Bucht wurden am 21. Januar, 00 GMT etwa knapp Bft 9 erreicht. Danach setzte auch hier Luftdruckanstieg ein, und zwar über Jütland etwa doppelt so stark wie über der ostfriesischen Küste. So begann der Luftdruckgradient über der Deutschen Bucht schwächer zu werden, und der Wind nahm etwa 3 Stunden vor Eintritt des astronomischen Hochwassers bei Rehtdrehung auf Nordwest etwas ab. Trotzdem wurden noch sehr hohe Wasserstände erreicht. Nur in Borkum blieb die Fluthöhe etwa 1 m unter der der anderen Stationen.

Auch in diesem Fall waren noch extremere Bedingungen denkbar. Einmal hätte das Windmaximum noch zeitgerechter zum astronomischen Hochwasser eintreten können, zum anderen wäre ein noch stärkeres Trog-Druckfallgebiet auf einer noch südlicheren Bahn möglich gewesen. Dazu hätte sich die nordatlantische Frontalzone durch Vorgänge über dem Nordwest-Atlantik verschärfen und in Richtung Island aufsteilen müssen, wie es am 2./3. Januar geschah. Der Sturm wäre stärker geworden, hätte noch nordwestlicher gedreht und länger angedauert.

Tatsächlich verschärfte sich die nordatlantische Frontalzone im Laufe des 21. Januar durch Annäherung von Tiefdruckgebieten vom Westatlantik. Dadurch entstand ein neuer

Höhentrog bei Island, der am 21. Januar, 12 GMT mit Luftdruckfall von 3 bis 4 mbar in 3 Stunden die Färöer passierte. Er zog ebenfalls über Südnorwegen nach Südosten. Dadurch frischten in der Deutschen Bucht die Winde in der Nacht zum 22. Januar wiederum

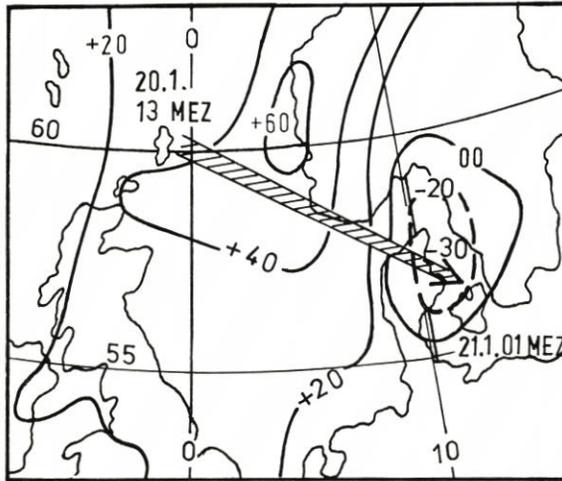


Abb. 20

aus Westnordwest auf Bft 8 bis 9 auf, und es wurde sogar noch eine schwere Sturmflut beobachtet (Cuxhaven). Doch fiel das Windmaximum nicht mit dem Eintritt des astronomischen Hochwassers zusammen; anderenfalls wären noch höhere Wasserstände zu erwarten gewesen. Erst nach diesem Hochwasser begann die Umstellung der Großwetterlage, wodurch die Serie der Sturmfluten beendet wurde.