

1920. 4920

2086.

Deutsche Seewarte.

**Aerologische und Hydrographische Beobachtungen
der Deutschen Marine-Stationen während der Kriegszeit 1914–1918.**

Heft 1.

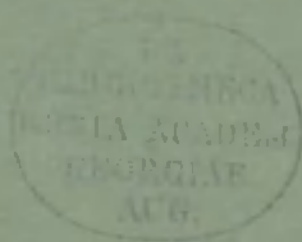
Hydrographische Untersuchungen.

**A. Die periodischen und unperiodischen Schwankungen
des Mittelwasserstandes an der flandrischen Küste
(Oktober 1915 — September 1918).**

Von

Dr. Bruno Schulz.

Mit 3 Textfiguren und 2 Tafeln.



Hamburg 1920.

Druck von Hammerich & Lesser, Altona.

Vorwort.

Während des Krieges ist in Mitteleuropa eine große Zahl meteorologischer, namentlich aerologischer Stationen des Heeres und der Marine in Tätigkeit gewesen, wie sie in gleicher Dichte mit Rücksicht auf die Kosten wohl in absehbarer Zeit nicht wieder zu erwarten sind. Die im Kriege gewonnenen Beobachtungen bilden daher ein Material, welches voraussichtlich noch auf lange Zeit hinaus an Reichhaltigkeit unübertroffen bleiben wird. Es durch Bearbeitung und Veröffentlichung für die wissenschaftliche Forschung zu erschließen, ist daher eine unabweisbare kulturelle Forderung.

Die Deutsche Seewarte hat mit den ihr vom Reich für diese Zwecke überwiesenen Mitteln die Bearbeitung der Beobachtungen der deutschen Marinestationen übernommen, deren Organisation auch in den Händen von Beamten der Deutschen Seewarte lag. Die Zweigstelle der Deutschen Seewarte in Brügge, später umgewandelt in das Observatorium des Marinekorps in Ostende, wurde 1914 eingerichtet von Dr. Perlewitz, 1915 übernahm Prof. Dr. Herrmann die Leitung des Wetternachrichtendienstes beim Marinekorps in Flandern; die Einrichtung und Organisation der Stationen an der deutschen Küste wurde von Prof. Dr. Steffens geleitet. Die Deutsche Seewarte beabsichtigt die Drucklegung der Ergebnisse dieser Stationen in einer Reihe von Heften, die zusammen als eine Sonderveröffentlichung der Deutschen Seewarte gedacht sind.

Von einer Bearbeitung der gewöhnlichen meteorologischen Beobachtung am Boden wurde abgesehen, da diese mit Rücksicht auf die schon vorliegenden langjährigen Beobachtungsreihen von Zivilstationen nicht genügend Interesse zu bieten scheinen, um den heute so kostspieligen Druck zu rechtfertigen. Dagegen schien eine möglichst ausführliche Bearbeitung der aerologischen Beobachtungen wünschenswert. Die wichtigsten hiervon, nämlich die Drachenaufstiege, sollen in extenso, wenn auch in möglichst gedrängter Form, veröffentlicht werden, weil nur hierdurch das Ziel erreicht werden kann, künftige synoptische Untersuchungen einzelner Fälle unter Hinzuziehung aller zu der betreffenden Zeit verfügbaren Drachenaufstiege zu ermöglichen. Von Pilotaufstiegen dagegen sollen nur Bearbeitungen aufgenommen werden.

Die ersten beiden Hefte werden hydrographische Untersuchungen enthalten, die an der flandrischen Küste vom Observatorium des Marinekorps ausgeführt wurden, in Heft 3 und 4 werden sämtliche Drachenaufstiege an der deutschen und flandrischen Küste veröffentlicht werden; Heft 5—7 werden eine Bearbeitung der aerologischen Beobachtungen in Flandern nach Wind, Temperatur und Feuchtigkeit, Heft 8 und 9 eine Bearbeitung der Drachenaufstiege und Pilotaufstiege an den deutschen Küsten, enthalten. Änderungen der Anordnung bleiben vorbehalten. Die Hefte werden außer der Reihe je nach ihrer Fertigstellung gedruckt und versandt werden und dem zuletzt zur Versendung gelangenden Heft wird ein ausführliches Inhaltsverzeichnis des ganzen Bandes beigelegt werden. Der Abschluß der Arbeit wird voraussichtlich 1922 erfolgen können.

Juni 1920.

DEUTSCHE SEEWARTE.

Deutsche Seewarte.

**Aerologische und Hydrographische Beobachtungen
der Deutschen Marine-Stationen während der Kriegszeit 1914–1918.**

Heft 1.

Hydrographische Untersuchungen.

**A. Die periodischen und unperiodischen Schwankungen
des Mittelwasserstandes an der flandrischen Küste
(Oktober 1915 — September 1918).**

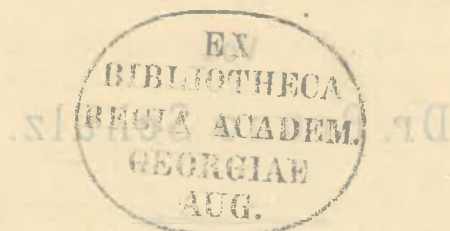
Von

Dr. Bruno Schulz.

Mit 3 Textfiguren und 2 Tafeln.

Hamburg 1920.

Druck von Hammerich & Lesser, Altona.



20.12882.

Einleitung.

Die an das Observatorium des Marinekorps in Flandern von praktischer Seite herantretenden Anfragen nach Wasserstands- und Strömungsverhältnissen an der flandrischen Küste bildeten für den Verfasser, der zunächst als Assistent, dann als Vorstand des Observatoriums von Oktober 1914 bis Oktober 1918 in Flandern weilte, den ersten Anstoß, sich mit den genannten Fragen zu beschäftigen. Die Unmöglichkeit, auf Grund des vorhandenen in der Literatur verstreuten spärlichen Beobachtungsmaterials zu einer klaren Auffassung von den Gezeiten und den Strömungen sowie von der Abhängigkeit des Wasserstandes von Wind und Luftdruck zu kommen, führten dazu, neue Beobachtungen anzustellen. Da hierfür von der vorgesetzten Behörde, dem Generalkommando des Marinekorps, die erforderlichen Mittel bewilligt wurden, und auch unter dem Personal des Observatoriums sich geeignete Hilfskräfte fanden, konnte trotz der durch die Kriegsverhältnisse ungünstigen Umstände ein umfangreiches Beobachtungsmaterial gesammelt werden. Dessen Bearbeitung durch den Verfasser erfolgt in zwei Teilen.

I. Die periodischen und unperiodischen Schwankungen des mittleren Wasserstandes an der flandrischen Küste im Zeitraum Oktober 1915 bis September 1918.

Die behandelten Hauptfragen sind:

1. Wie verhalten sich die von der holländischen, deutschen und dänischen Nordseeküste sowie der Ostseeküste bereits bekannten periodischen Schwankungen des mittleren Wasserstandes an der flandrischen Küste, worüber bisher noch nichts bekannt ist?
2. Wie hängt die Höhe des Wasserstandes an der flandrischen Küste
 - a) vom Winde am Ort ohne Berücksichtigung der Wirkung des Luftdrucks,
 - b) vom Luftdruck allein,
 - c) allein vom Winde am Ort nach Ausschaltung der Luftdruckwirkung ab?

II. Die Gezeitenerscheinungen an der flandrischen Küste und die Tidenströmungen auf der unteren Schelde.

Der erste Teil bildet den Gegenstand der folgenden Arbeit, der zweite Teil wird im Laufe dieses Jahres beendet werden.

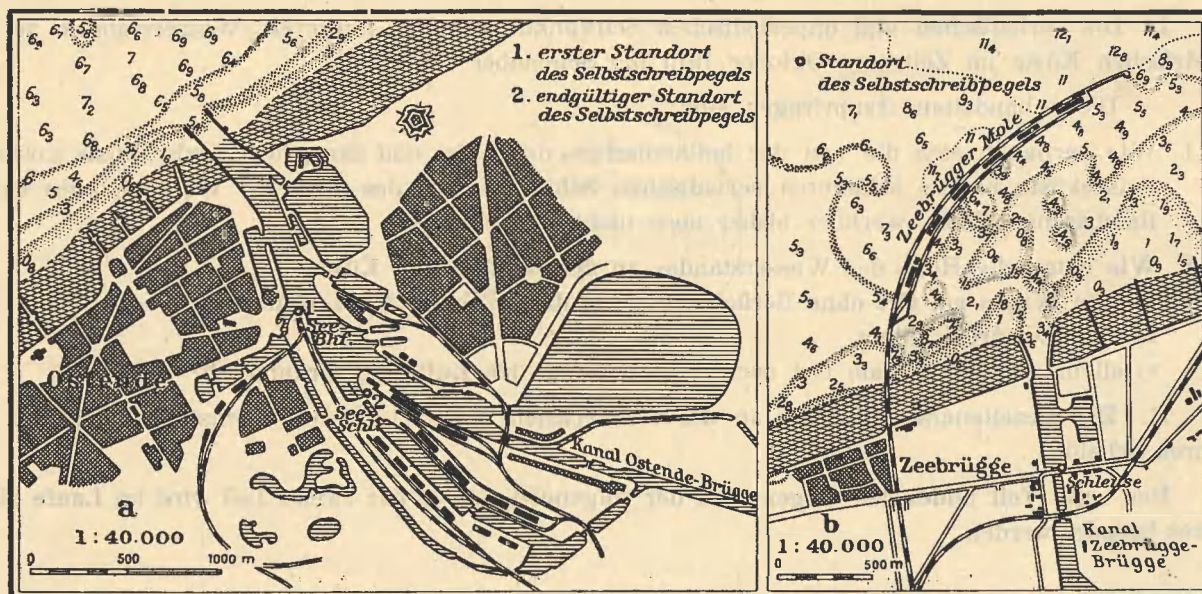
1. Das Beobachtungsmaterial.

Vom 1. Mai 1915 ab wurden sowohl in Ostende wie in Zeebrügge Lattenpegelablesungen durchgeführt zunächst nur tagsüber, später fortlaufend und zwar in Ostende vom 1. Juli 1915 ab, in Zeebrügge vom 1. Oktober 1915 ab. Später wurden in beiden Häfen Selbstschreibschwimmerpegel, System Ott, eingerichtet. Beide Pegel, der Ostender beginnend mit dem 1. November 1915, der Zeebrügger mit dem 1. April 1916, waren bis zum 2. Oktober 1918 vormittags im Betrieb. Während kürzerer, durch Verschlammen der Schwimmerschächte oder durch die Folgen von Beschießungen bedingte Unterbrechungen wurden am neben dem Selbstschreibpegel angebrachten Lattenpegel Ablesungen vorgenommen, so daß lückenlose Aufzeichnungen vorliegen, für Ostende demnach vom 1. Juli 1915 bis zum 1. Oktober 1918, für Zeebrügge vom 1. Oktober 1915 bis zum 1. Oktober 1918.

Für die Lattenpegelablesungen kamen, um möglichst genaue Ablesungen zu erhalten, nur Orte in Frage, die vor zu starkem Seegange geschützt waren. Es wurde der Lattenpegel in Ostende an der Seeseite der sog. Seeschleuse angebracht; hier wurde auch der Selbstschreibpegel eingerichtet, nachdem sich seine Aufstellung auf dem Hoek des Seebahnhofs wegen häufigen Verschlammens des Schachtes als ungeeignet erwiesen hatte (s. Figur 1 a). In Zeebrügge wurde sowohl der Lattenpegel wie auch der Selbstschreibpegel an der Seeseite der den nach Brügge führenden Kanal abschließenden Schleuse aufgestellt (s. Figur 1 b).

Fig. 1.

Plan des Hafens von Ostende und Zeebrügge.



Die vorgefundenen belgischen Pegel waren an der Küste auf das Null des schon vor 1853 ausgeführten Nivellement du département des ponts et chaussées bezogen. Dies Null war die Höhe des Mittelspringniedrigwassers zu Ostende, wie es auf Grund einiger Beobachtungsjahre von 1820 bestimmt worden war. Es lag 1.48 m über dem Blankseicht der Schleuse des Handelshafens von Ostende¹⁾. Für das 1853 begonnene und 1877 beendete Nivellement du dépôt de la guerre wurde ebenfalls das Mittelspringniedrigwasser als Null festgesetzt, aber aus Wasserstandsbeobachtungen aus den Jahren 1834 bis 1853 neu berechnet. Es wurde als 0.1665 m über dem ersteren Null befindlich gefunden.

¹⁾ M. Bovie. Etude sur le régime de la marée au port d'Ostende. Annales des Travaux Publics. Tome XIV. Brüssel 1887.

Das Null der 1915 in Ostende und Zeebrügge neu eingerichteten Lattenpegel wie auch der Selbstschreibpegel wurde mit dem Null der nächsten vorgefundenen älteren Pegel in Übereinstimmung gebracht, also mit dem Null des Nivellement du département des ponts et chaussées. Nachdem aber 1916 bei einer von der Vermessungsabteilung des Marinekorps neu durchgeführten Vermessung der Küste allen Höhenangaben das Null des Nivellement du dépôt de la guerre zugrunde gelegt war, wurden die beiden Pegel ebenfalls auf dieses als „Armeenull“ bezeichnete Null gebracht. Dazu mußte der Ostender Pegel 12 cm, der Zeebrügger 15 cm höher gesetzt werden. Nachprüfungen im Mai 1917 und im September 1918 ergaben, daß die Lage der Nullpunkte unverändert geblieben war.

Alle Angaben über Wasserstandshöhen in dieser Arbeit beziehen sich auf das Null des Nivellement du dépôt de la guerre.

Nach Bovie liegt das Mittelwasser von Ostende 2.012 m über der Nullfläche des Nivellement du dépôt de la guerre und nach Börsch²⁾ 0.224 m unter Mittelwasser in Amsterdam. Da sich dieses 0.165 m unter dem preußischen Normalnull befindet³⁾, ist das Null des Nivellement du dépôt de la guerre 2.401 m unter N. N.

Als Zeit wurde während des ganzen Beobachtungszeitraumes die mitteleuropäische Zeit gewählt.

Erwähnt sei, daß der Stand der Uhren und die Höheneinstellung der Selbstschreibpegel durch tägliche Nachprüfung sorgfältig überwacht wurden.

An Windangaben konnten für die erste Zeit über den ganzen Tag in 3- bis 4stündigem Abstände verteilte Beobachtungen der Windrichtung und -stärke des Ostender Observatoriums benutzt werden. Für die Zeit vom 1. August 1916 ab liegen die Aufzeichnungen eines Fueß'schen Anemographen vor, dessen Schalenkreuz bis zum 30. Oktober 1917 in Ostende neben dem Turm der dortigen Navigationschule in freier Lage angebracht war, von da ab in Blankenberghe in freier Lage über der Häuserreihe am Strande, 14½ km in ostnordöstlicher Richtung von dem Aufstellungsort in Ostende entfernt. Aus den Aufzeichnungen des Anemographen wurden auf dem Observatorium fortlaufend die stündlichen Windmittel abgeleitet. Diese sind für die folgenden Betrachtungen benutzt worden.

2. Methode der Bearbeitung.

Zur Lösung der Frage der Abhängigkeit des Wasserstandes von Wind und Luftdruck ist bisher im Nordseegebiet meist die Abhängigkeit der Differenz zwischen den beobachteten und den vorausberechneten Hochwasserhöhen (B.-R.) von Windrichtung und -stärke untersucht worden⁴⁾. Dies setzt voraus, daß die vorhandenen Vorausberechnungen so genau sind, daß den Differenzen zwischen beobachteten und vorausberechneten Hochwasserhöhen kosmische Ursachen nicht mehr zugrunde liegen, sondern sie allein vom Einfluß des Windes und Luftdrucks herrühren. Dies ist z. B. für Wilhelmshaven nach den Untersuchungen Leverkincks der Fall. Für diesen Ort stehen sehr sorgfältig durchgearbeitete Grundlagen zur Verfügung, indem für die seit 1895 nach der Lubbockschen Methode durchgeführten Vorausberechnungen neuerdings aus einer siebenjährigen Beobachtungsreihe (1903--1909) hergeleitete Konstanten benutzt werden⁵⁾. Leverkinck konnte feststellen, daß, wenn von den unperiodischen Einflüssen des Luftdrucks und Windes abgesehen wird, die Genauigkeit der Vorausberechnung kaum zu erhöhen und der Unterschied zwischen der beobachteten und der vorausberechneten Hochwasserhöhe als tatsächlich frei von irgendwelchen astronomischen und aus der lokalen Gestaltung der Gezeitenwelle herrührenden Einflüssen zu betrachten ist.

²⁾ A. Börsch, Vergleichung der Mittelwasser und der Nullpunkte für die Höhe. Verhandlungen der X. allgem. Konferenz der intern. Erdmessung in Brüssel 1892. Berlin 1893.

³⁾ Nach Mitteilung des Geodätischen Instituts vom 5. 8. 1916.

⁴⁾ Leverkinck, Über den Einfluß des Windes auf die Gezeiten unter besonderer Berücksichtigung Wilhelmshavens und der Deutschen Bucht. Veröff. d. Observatoriums in Wilhelmshaven. Berlin 1915. S. 9 ff. und die daselbst angegebene Literatur.

⁵⁾ Gezeitentafeln 1918. Berlin 1917. S. IX.

Für die Orte an der flandrischen Küste liegen die Verhältnisse weit weniger günstig. Die Vorausberechnungen haben den für die Lösung der genannten Aufgabe wesentlichen Nachteil, daß sie für die einzelnen Jahre nach verschiedenen Methoden ungleicher Genauigkeit durchgeführt sind. Für die Jahre 1915 und 1916 wurde die Lubbocksche Methode angewandt, für die aber nur dreimonatige Reihen von Lattenpegelablesungen zu Ostende und Zeebrügge (Mai bis Juli 1915) zur Verfügung standen. Die Genauigkeit ist naturgemäß nicht groß genug, daß auftretende Differenzen allein der Wirkung von Luftdruck und Wind zugeschrieben werden können. Die folgende Tabelle 1 läßt dies an einem Beispiel erkennen.

Tabelle 1.

Differenzen zwischen den beobachteten und vorausberechneten Hochwasserhöhen zu Ostende.
Oktober—November 1915.

Tag	Mondalter	Hochwasserhöhe in m		B.-R. cm	Wind zu Ostende			Tag	Mondalter	Hochwasserhöhe in m		B.-R. cm	Wind zu Ostende		
		beob- achtet	be- rechnet		9 ^h V	3 ^h N	9 ^h N			beob- achtet	be- rechnet		9 ^h V	3 ^h N	9 ^h N
Okt. 8 V	0	4.4	4.3	+10	Still	OSO 1	NO 1	Okt. 23 V	0	4.2	4.4	-20	O 2	OSO 2	OSO 2
N		4.3	4.6	-30				N		4.3	4.6	-30			
9 V	1	4.3	4.6	-30	Still	O 2	ONO 2	24 V	1	4.3	4.4	-10	OSO 2	OSO 2	OSO 2
N		4.6	4.8	-20				N		4.2	4.6	-40			
10 V	2	4.5	4.7	-20	O 2	ONO 3	O 3	25 V	2	4.2	4.4	-20	ONO 6	NO 5	NO 6
N		4.5	4.9	-40				N		4.1	4.5	-40			
11 V	3	4.6	4.8	-20	SO 2	SO 2	O 1	26 V	3	4.0	4.3	-30	ONO 2	N 3	N 3
N		4.6	4.9	-30				N		4.2	4.3	-10			
12 V	4	4.5	4.7	-20	SSW 2	SW 3	SW 2	27 V	4	4.2	4.2	0	N 3	W 2	Still
N		4.5	4.8	-30				N		4.2	4.2	0			
13 V	5	4.5	4.6	-10	SSW 1	SSW 2	SSW 2	28 V	5	4.0	4.0	0	SSW 3	S 3	SSO 3
N		4.5	4.5	0				N		3.5	3.9	-40			
14 V	6	4.2	4.3	-10	Still	Still	Still	29 V	6	3.5	3.8	-30	S 3	S 2	SO 2
N		4.3	4.1	+20				N		3.6	3.6	0			
15 V	7	4.1	3.9	+20	NO 1	NNO 1	NO 1	30 V	7	3.4	3.5	-10	Still	S 1	SO 1
N		4.0	3.9	+30				N		3.5	3.3	+20			
16 V	8	3.6	3.5	+10	N 1	NNO 2	NO 1	31 V	8	3.3	3.3	0	SSO 2	S 4	S 3
N		3.8	3.4	+40				N		3.4	3.1	+30			
17 V	9	3.4	3.4	0	NO 1	NNO 2	NNO 2	Nov. 1 V	9	3.3	3.2	+10	O 3	ONO 4	NO 5
N		3.8	3.4	+40				N		3.5	3.1	+40			
18 V	10	3.5	3.6	-10	NNO 3	NNO 3	O 1	2 V	10	3.3	3.3	0	NO 6	NO 5	NO 5
N		3.8	3.7	+10				N		3.9	3.3	+60			
19 V	11	3.7	3.9	-20	Still	ONO 4	ONO 2	3 V	10	3.9	3.6	+30	N 5	NNW 4	NNW 4
N		4.0	4.0	0				N		4.2	3.7	+50			
20 V	12	3.9	4.2	-30	NO 2	OSO 2	OSO 2	4 V	11	4.0	4.0	0	O 2	NO 1	NNO 1
N		4.0	4.2	-20				N		4.3	4.1	+20			
21 V	12	4.1	4.4	-30	OSO 2	SSO 2	SO 2	5 V	12	4.3	4.4	-10	NNO 1	NNO 2	NNO 2
N		—	—	—				N		4.3	4.4	-10			
22 V	13	4.2	4.4	-20	SO 2	SO 2	SO 2	6 V	13	4.2	4.6	-40	ONO 2	ONO 3	O 2
N		4.3	4.6	-30				N		—	—	—			

Während der ganzen Zeit herrschten meist schwache Winde. Die B.-R. zeigen eine deutliche Abhängigkeit vom Mondalter, sie sind beim Mondalter 12 bis 3 negativ, beim Mondalter 6 bis 10 positiv. Offenbar ist dieser Gang der B.-R. nicht durch Luftdruck und Wind verursacht, sondern eine Folge der Ungenauigkeit der Berechnung. In Monaten mit unruhiger Wetterlage tritt die Abhängigkeit der B.-R. vom Mondalter nicht so deutlich hervor, da der überwiegende Einfluß des Windes sich hinzugesellt. Dort lassen die B.-R. wohl qualitativ den Einfluß von Luftdruck und Wind erkennen, seine Größe ist aber nicht aus ihnen zu ermitteln.

Für den Jahrgang 1917 und 1918 der Gezeitentafeln wurden für die Vorausberechnungen für Ostende und Zeebrügge mit der harmonischen Analyse abgeleitete Konstanten benutzt, für deren Ableitung für 1917 stündliche Wasserstände der Jahre 1883, 1884, 1885 und 1912, für 1918 stündliche Wasserstandswerte von August 1915 bis September 1916 verwandt wurden. Auch bei Benutzung dieser Vorausberechnungen stellen die B.-R. noch nicht genügend rein den Einfluß von Luftdruck und Wind dar. Z. B. vom 17. Mai bis 15. Juni 1917, während welcher Zeit meist schwache bis mäßige Winde herrschten, zeigen die B.-R. eine deutliche Abhängigkeit vom Mondalter (s. Tabelle 2).

Tabelle 2.

Differenzen zwischen den beobachteten und vorausberechneten Hochwasserhöhen zu Ostende.
Mai—Juni 1917.

T a g	Mondalter	Hochwasser- höhe in m		B.-R. cm	Mittel	Wind zu Ostende			T a g	Mondalter	Hochwasser- höhe in m		B.-R. cm	Mittel	Wind zu Ostende		
		beob- achtet	berech- net			8 ^h V	2 ^h N	7 ^h N			beob- achtet	berech- net			8 ^h V	2 ^h N	7 ^h N
Mai 17 V	10	4.1	4.4	-30		N 4	O 2	S 2	Juni 1 V	10	3.7	4.2	-50		S 3	SSO 2	N 2
N		4.1	4.4	-30					N		3.7	4.3	-60				
18 V	11	—	—	—		ONO 2	SSO 2	O 4	2 V	11	—	—	—		WSW 2	W 3	W 4
N		4.2	4.6	-40					N		3.9	4.4	-50				
19 V	12	4.3	4.7	-40		SO 1	OSO 2	O 2	3 V	12	3.9	4.5	-60		SSW 2	W 2	W 3
N		4.3	4.8	-50					N		4.0	4.6	-60				
20 V	13	4.4	4.8	-40	-42	ONO 2	N 3	NNO 3	4 V	13	3.9	4.7	-80	-57	S 2	N 2	S 3
N		4.4	4.9	-50					N		4.0	4.7	-70				
21 V	0	4.5	4.9	-40		O 4	SO 3	Still	5 V	0	4.2	4.8	-60		W 1	N 2	N 3
N		4.3	4.8	-50					N		4.3	4.8	-50				
22 V	1	4.3	4.9	-60		WNW 1	W 2	Still	6 V	1	4.3	4.9	-60		ONO 3	O 4	O 5
N		4.3	4.8	-50					N		4.3	4.8	-50				
23 V	2	4.4	4.8	-40		Still	N 1	SO 3	7 V	2	4.4	4.9	-50		SSO 3	W 3	WNW 2
N		4.4	4.6	-20					N		4.3	4.7	-40				
24 V	3	4.4	4.6	-20		SW 2	WSW 4	W 5	8 V	3	4.5	4.8	-30		WSW 1	WNW 1	W 3
N		4.2	4.4	-20					N		4.4	4.6	-20				
25 V	4	4.2	4.4	-20		SW 2	WNW 1	N 1	9 V	4	4.4	4.6	-20		N 1	N 2	N 3
N		4.0	4.2	-20					N		4.3	4.5	-20				
26 V	5	4.0	4.2	-20		O 3	NNO 3	NNO 2	10 V	5	4.4	4.5	-10		N 3	N 2	N 3
N		3.9	4.0	-10					N		4.3	4.4	-10				
27 V	6	3.8	4.0	-20		O 3	OSO 2	O 5	11 V	6	4.3	4.4	-10		N 2	N 2	O 5
N		3.7	3.9	-20					N		4.1	4.2	-10				
28 V	7	3.8	3.9	-10	-26	O 2	NNO 4	NNO 4	12 V	7	4.2	4.2	0	-14	NNO 2	N 2	SO 3
N		3.7	3.9	-20					N		4.0	4.1	-10				
29 V	8	3.7	3.9	-20		WSW 3	W 2	S 3	13 V	8	4.0	4.1	-10		S 1	W 2	W 3
N		3.5	3.9	-40					N		4.0	4.1	-10				
30 V	9	3.6	3.9	-30		S 2	WSW 2	W 2	14 V	9	3.9	4.1	-20		W 3	W 2	W 2
N		3.6	4.0	-40					N		3.9	4.1	-20				
31 V	9	3.6	4.0	-40		SW 1	W 2	W 4									
N		3.5	4.1	-60													

Beim Mondalter 10 bis 2 betragen die B.-R. im Mittel —42 cm bzw. —57 cm, dagegen beim Mondalter 3 bis 9 nur —26 cm bzw. —14 cm.

Für die noch in Betracht kommende Zeit von Januar bis September 1918 sind die Vorausberechnungen zwar besser, und die Abhängigkeit der B.-R. vom Mondalter ist geringer, doch erschienen sie ebenfalls noch nicht genügend genau für eine quantitative Herausarbeitung des Windstaus.

Es mußte deshalb ganz davon abgesehen werden, die Abhängigkeit der B.-R. von Windrichtung und -stärke zu untersuchen, zumal sich in dem mittleren Wasserstande eines Tidetages eine auf Luft-

druck- und Windänderung sehr fein reagierende Größe bietet, bei dessen Verwendung die Vorausberechnungen nicht herangezogen zu werden brauchen. Soll die Wirkung von Luftdruck und Wind im mittleren Wasserstand rein zur Darstellung kommen, so muß ein von astronomischen Einflüssen freier Mittelwasserstand der Bearbeitung zu Grunde liegen. Wird als Zeit, für die der mittlere Wasserstand berechnet wird, der Zeitraum von 24 Stunden gewählt und die Rechnung fortlaufend durchgeführt,⁶⁾ so daß für jede Sonnenstunde ein Mittelwasserwert vorhanden ist, so entsteht eine Mittelwasserkurve von der auf Tafel 1, Nr. 1 bezeichneten Form. An der Kurve fällt zunächst das starke Ansteigen bis zum Mittelwasserwert 2.64 m am 17./18. Juli auf, eine Folge der frischen bis steifen W- bis NW-Winde zur annähernd gleichen Zeit. Außerdem aber zeigt die Kurve besonders an den ruhigeren Tagen eine halbtägige Periode mit einer Amplitude von etwa 16 cm, die auch am 17. und 18. Juli trotz des Windstaus noch erkennbar ist. Diese halbtägigen Schwankungen sind auf die Berechnungsmethode zurückzuführen, denn bei einer Zeitabgrenzung von 24 Stunden wird von Zeitraum zu Zeitraum ein anderer Teil einer vollen Tide zur Mittelwasserberechnung benutzt, die tägliche Ungleichheit also nicht ausgeschaltet.

Wenn ein Zeitraum von 25 Stunden zur Mittelwasserberechnung benutzt wird, erhält diese halbtägige Periode zwar eine kleinere Amplitude, verschwindet aber nicht, da die Dauer der vollen Tide, deren Mittel von 24 h 50 m dem Zeitraum von 25 h recht nahe kommt, mit dem Mondalter stark schwankt und zwar in Ostende im dreijährigen Mittel von 24 h 36 m bis 25 h 14 m (vergl. Kurve 2). Die störende halbtägige Periode schwindet völlig, wenn der Tidetag als Zeitabgrenzung gewählt wird und das Mittel aus 24 Werten berechnet wird, die sich zu je sechs gleichmäßig über je eine der vier Teiltiden verteilen⁷⁾. Da sich nun aber die zur Mittelbildung benutzten Wasserstandshöhen nur über die einzelnen Teiltiden, d. h. von NW bis HW, bzw. von HW bis NW, gleichmäßig verteilen, wegen der untereinander verschiedenen Steig- und Falldauer aber ungleichmäßig über die Doppeltide, d. h. von NW über HW, NW, HW bis NW, so entsteht die Frage, ob dieses von kurzperiodischen astronomischen Ursachen unbeeinflusste Mittel auch genügend genau den wahren mittleren Wasserstand der vollen Tide darstellt. Würde die Gezeitenkurve durch eine reine Sinuskurve dargestellt, so würde das aus bei Tidestunden abgelesenen Wasserstandswerten errechnete Mittel genau sein. An Flachküsten und in Flußmündungen aber weicht die Tidekurve von der Sinuskurve erheblich ab, indem sie sich beim Steigen des Wassers wesentlich über die Sinuskurve erhebt und die Steigdauer abnimmt, die Falldauer aber wächst. Es ist daher von vornherein anzunehmen, daß in solchen Fällen das aus tidestündlichen Werten errechnete Mittel einen zu hohen Wert liefert. Dies ist auch bei folgendem Beispiel der Fall.

	N. W.	H. W.	Steigdauer Std. Min.	Falldauer Std. Min.	Wasserstandsmittel eines Tidetages:
Brunshausen					
18. Juli 1916	1 ⁰⁰ V	6 ⁰⁵ V	5 05		1. aus tidestündlichen Wasserständen
	1 ²⁰ N	6 ¹⁰ N	4 50	7 15	errechnet: 2.01 m*)
19. Juli 1916	1 ⁴⁰ V			7 30	2. durch planimetr. Ausmessung gewonnen: 1.91 m

$$*) \text{ nach der Formel } h_m = \frac{1}{24} (h_0 + h_1 + h_2 + \dots + h_{23})$$

Hier ist das aus tidestündlichen Wasserstandswerten errechnete Mittel volle 10 cm zu hoch. Da infolge des Schwankens der Steig- und Falldauer diese Differenz nicht konstant ist, sind in diesem Falle die auf die genannte Weise errechneten Wasserstandswerte für Betrachtung des Windstaus ungeeignet.

Bei Ostende und Zeebrügge ist ebenfalls die Steigdauer kürzer als die Falldauer, der Unterschied ist aber bei diesen an einer Flachküste gelegenen Orten erheblich geringer als bei Brunshausen, das an

⁶⁾ Wegen der in Betracht kommenden Formeln vergl. K. Hessen, Über die einheitliche Bearbeitung der Gezeitenerscheinungen in der Deutschen Bucht. Annalen der Hydrographie usw. 1913. S. 456.

⁷⁾ K. Hessen, Der Gezeitenkurvenauswerter. Annalen der Hydrographie usw. 1913.

einem Flusse gelegen ist. Die aus tidestündlichen Werten abgeleiteten Wasserstandsmittel weichen bei ihnen von den durch planimetrische Messung gewonnenen nur unerheblich ab und zwar durchaus nicht immer im gleichen Sinne, vergl. die folgenden Beispiele.

	N. W.	H. W.	Steigdauer Std. Min.	Falldauer Std. Min.	Wasserstandsmittel eines Tidetages:
Ostende					
16. Oktober 1916	0 ²⁰ V	6 ²⁰ V	6 00	6 40	1. aus tidestündlichen Wasserständen errechnet: 2.160 m*)
	1 ⁰⁰ N	7 ¹⁵ N	6 15	6 40	2. durch planimetrische Messung gewonnen: 2.172 m
17. Oktober 1916	1 ⁵⁵ V				
31. Dezember 1915	2 ⁴⁵ N	8 ²⁰ N	5 35	7 05	1. aus tidestündlichen Wasserständen errechnet: 2.152 m*)
1. Januar 1916	3 ²⁵ V	8 ³⁵ V	5 10	7 00	2. durch planimetrische Messung gewonnen: 2.143 m
	3 ³⁵ N				

*) nach der Formel $h_m = \frac{1}{24} (h_0 + h_1 + h_2 + \dots + h_{23})$

Es bestehen demnach keine Bedenken, für Ostende und Zeebrügge das nach der Formel

$$h_m = \frac{1}{24} (h_0 + h_1 + h_2 + \dots + h_{23})$$

aus tidestündlichen Wasserstandswerten errechnete Wasserstandsmittel als den wahren mittleren Wasserstand der betreffenden Doppeltide anzusehen.

3. Die periodischen Schwankungen des Wasserstandes im Laufe des Jahres.

Um die periodischen Schwankungen des mittleren Wasserstandes im Laufe des Jahres untersuchen zu können, wurden für Ostende und Zeebrügge die mittleren Wasserstände der fortlaufenden Doppeltiden gebildet nach der am Schlusse von Abschnitt 2 genannten Methode. Z. B. umfaßt die erste Doppeltide in Ostende den Zeitraum vom 30. September 1915 11.20 N (Niedr. W.) bis zum 2. Oktober 1915 0.15 V (übernächstes Niedr. W.), die folgende reicht vom 2. Oktober 1915 0.15 V bis zum 3. Oktober 2.00 V und so fort bis zur letzten Doppeltide vom 30. September 1918 4.20 V (Niedr. W.) bis zum 1. Oktober 1918 5.20 V (Niedr. W.), für Zeebrügge reicht der untersuchte Zeitraum vom 30. September 1915 11.55 N bis zum 1. Oktober 1918 5.30 V. Bei der Ordnung der erhaltenen Mittelwasserwerte nach Monaten konnte bei dieser Methode der Mittelbildung ein Übergreifen um einige Stunden auf den vorangehenden oder folgenden Monat nicht vermieden werden, dies ist aber für die Größe der erhaltenen Monatsmittel des Wasserstandes ohne Bedeutung. Die abgeleiteten Werte für Ostende und Zeebrügge sind in Tabelle 3 enthalten. Um einen Anschluß an die Untersuchungen von van der Stock über die Schwankungen des Mittelwasserstandes an der holländischen Küste¹⁾ zu erhalten, wurden noch die dreijährigen Monatsmittel von Vlissingen, Ijmuiden und Helder herangezogen, die aus monatlichen Mittelwassern des gleichen Zeitraumes von Oktober 1915 bis September 1918 abgeleitet wurden. Die letzteren Werte wurden mir von der holländischen Behörde „Rijkswaterstaat“ in s'Gravenhage dankenswerterweise zur Verfügung gestellt.

Die jährliche Schwankung der Monatsmittel des mittleren Wasserstandes war an der flandrischen Küste am größten im Jahre 1917/18 mit rund 30 cm. Im dreijährigen Mittel betrug sie 16 cm, im gleichen Zeitraum bei Vlissingen 17 cm, bei Ijmuiden 22 cm und bei Helder 26 cm. Wie aus folgender Übersicht (Tabelle 4) hervorgeht, nimmt die jährliche Schwankung sowohl in den Einzeljahren wie im Gesamtmittel von der flandrischen nach der holländischen Küste zu und an dieser selbst von Süden nach Norden.

Tabelle 3.

Monatlicher und jährlicher mittlerer Wasserstand sowie nach der Ausgleichung übrigbleibende Fehler

		Oktober 1915 — September 1916						Oktober 1916 — September 1917					
		mittlerer Wasser- stand m	V cm	V1 cm	V2 cm	V3 cm	V4 cm	mittlerer Wasser- stand m	V cm	V1 cm	V2 cm	V3 cm	V4 cm
Ostende	Oktober	2.013	-14.3	-17.0	-13.5	-10.1	-5.5	2.177	+6.6	-1.0	-1.1	+3.5	+3.9
	November ...	2.274	+11.8	+7.1	+7.7	+8.7	+7.2	2.153	+4.2	-2.5	-4.7	-6.0	-3.8
	Dezember ...	2.229	+7.3	+1.9	-1.1	-4.5	-7.6	2.276	+16.5	+12.5	+10.4	+5.8	+3.2
	Januar	2.264	+10.8	+6.1	+2.6	+1.6	+6.2	2.075	-3.6	-3.9	-3.8	-2.5	-2.1
	Februar	2.132	-2.4	-5.1	-5.7	-2.3	-3.8	1.993	-11.8	-8.2	-6.0	-1.4	+0.8
	März	2.157	+0.1	+0.1	+3.1	+4.1	+1.0	2.067	-4.4	+0.2	+4.1	+2.8	+0.2
	April	2.099	-5.7	-3.0	+0.5	-2.9	+1.7	2.070	-4.1	+3.5	+3.4	-1.2	-0.8
	Mai	2.094	-6.2	-1.5	-0.9	-1.9	-3.4	2.035	-7.6	-0.9	-3.1	-1.8	+0.4
	Juni	2.165	+0.9	+6.3	+3.3	+6.7	+3.6	2.075	-3.6	+0.4	-1.7	+2.9	+0.3
	Juli	2.064	-9.2	-4.5	-8.0	-7.0	-2.4	2.103	-0.8	-0.5	-0.4	-1.7	-1.3
	August	2.183	+2.7	+5.4	+4.8	+1.4	-0.1	2.175	+6.4	+2.8	+5.8	+0.4	+2.6
	September ..	2.196	+4.0	+4.0	+7.0	+6.0	+2.9	2.132	+2.1	-4.3	-2.2	-0.9	-3.5
	Jahr	2.156	—	—	—	—	—	2.111	—	—	—	—	—
mittl. Fehler .	—	±7.6	±6.6	±6.1	±5.5	±4.4	—	±7.3	±4.9	±4.6	±3.1	±2.4	
jährliche Schwankung	0.261						0.283						
Zeebrügge	Oktober	2.091	-10.7	-13.6	-9.5	-8.0	-4.8	2.213	+7.2	+0.9	-0.3	+2.6	+3.3
	November ...	2.296	+9.8	+4.9	+6.0	+7.2	+6.6	2.157	+1.6	-4.0	-5.3	-6.3	-4.1
	Dezember ...	2.259	+6.1	+0.5	-2.5	-4.0	-6.8	2.276	+13.5	+10.2	+10.1	+7.2	+4.3
	Januar	2.323	+12.5	+7.7	+3.6	+2.4	+5.6	2.077	-6.4	-6.6	-5.4	-4.4	-3.7
	Februar	2.192	-0.6	-3.3	-4.4	-2.9	-3.5	2.071	-7.0	-4.0	-2.7	+0.2	+2.4
	März	2.193	-0.5	-0.4	+2.6	+3.8	+1.0	2.116	-2.5	+2.8	+2.3	+1.9	-1.0
	April	2.129	-6.9	-4.0	+0.1	-1.4	+1.8	2.109	-3.2	+3.1	+1.9	-1.0	-0.3
	Mai	2.118	-8.0	-3.1	-2.0	-3.2	-3.8	2.081	-6.0	-0.4	-1.7	-0.7	+1.5
	Juni	2.229	+3.1	+8.7	+5.7	+7.2	+4.4	2.095	-4.6	-1.3	-1.4	+1.5	-1.4
	Juli	2.111	-8.7	-3.9	-8.0	-6.8	-3.6	2.136	-0.5	-0.3	+0.9	-0.1	+0.6
	August	2.213	+1.5	+4.1	+3.0	+1.5	+0.9	2.170	+2.9	-0.1	+1.2	-1.7	+0.5
	September ...	2.228	+3.0	+2.9	+5.9	+4.7	+1.9	2.192	+5.1	-0.2	-0.1	+0.9	-2.0
	Jahr	2.198	—	—	—	—	—	2.141	—	—	—	—	—
mittl. Fehler .	—	±7.1	±5.9	±5.1	±5.0	±4.2	—	±6.0	±4.1	±3.9	±3.3	±2.5	
jährliche Schwankung	0.232						0.205						
Vlissingen													
Oktober 1915 — September 1918													
Oktober	-0.112	+4.5	-3.3	-2.7	-1.0	-1.5	-0.041	+6.4	-3.4	-2.2	-1.4	-3.0	
November ...	-0.091	+6.6	-0.8	-1.0	+0.7	+1.9	-0.015	+9.0	-0.7	-1.2	+0.4	+2.0	
Dezember ...	-0.087	+7.0	+1.4	+0.6	-1.1	-1.8	-0.026	+7.9	+0.9	+2.6	+1.8	+1.8	
Januar	-0.099	+5.8	+3.9	+3.3	+1.6	+1.1	-0.024	+8.1	+5.7	+4.5	+2.9	+1.3	
Februar	-0.211	-5.4	-3.3	-3.1	-1.4	-0.2	-0.154	-4.9	-2.1	-1.6	-0.8	+0.8	
März	-0.242	-8.5	-2.7	-1.9	-0.2	-0.9	-0.233	-12.8	-5.5	-3.8	-2.2	-2.2	
April	-0.202	-4.5	+3.3	+3.9	+2.2	+1.7	-1.161	-5.6	+4.2	+5.4	+4.6	+3.0	
Mai	-0.248	-9.1	-1.7	-1.9	-3.6	-2.4	-0.224	-11.9	-2.2	-2.7	-4.3	-2.7	
Juni	-0.194	-3.7	+1.9	+1.1	+2.8	+2.1	-0.129	-2.4	+4.6	+2.9	+3.7	+3.7	
Juli	-0.196	-3.9	-2.0	-2.6	-0.9	-1.4	-0.133	-2.8	-0.4	-1.6	0.0	-1.6	
August	-0.128	+2.9	+0.8	+1.0	-0.7	+0.5	-0.091	+1.4	-1.4	-0.9	-1.7	-0.1	
September ..	-0.077	+8.0	+2.2	+3.0	+1.3	+0.6	-0.033	+7.2	-0.1	+1.6	0.0	0.0	
Jahr	-0.157	—	—	—	—	—	-0.105	—	—	—	—	—	
mittl. Fehler..	—	±6.1	±2.5	±2.4	±1.7	±1.5	—	±7.5	±3.2	±2.9	±2.5	±2.2	
jährliche Schwankung	0.171						0.218						
Jjmuiden													
Oktober 1915 — September 1918													
Oktober	-0.112	+4.5	-3.3	-2.7	-1.0	-1.5	-0.041	+6.4	-3.4	-2.2	-1.4	-3.0	
November ...	-0.091	+6.6	-0.8	-1.0	+0.7	+1.9	-0.015	+9.0	-0.7	-1.2	+0.4	+2.0	
Dezember ...	-0.087	+7.0	+1.4	+0.6	-1.1	-1.8	-0.026	+7.9	+0.9	+2.6	+1.8	+1.8	
Januar	-0.099	+5.8	+3.9	+3.3	+1.6	+1.1	-0.024	+8.1	+5.7	+4.5	+2.9	+1.3	
Februar	-0.211	-5.4	-3.3	-3.1	-1.4	-0.2	-0.154	-4.9	-2.1	-1.6	-0.8	+0.8	
März	-0.242	-8.5	-2.7	-1.9	-0.2	-0.9	-0.233	-12.8	-5.5	-3.8	-2.2	-2.2	
April	-0.202	-4.5	+3.3	+3.9	+2.2	+1.7	-1.161	-5.6	+4.2	+5.4	+4.6	+3.0	
Mai	-0.248	-9.1	-1.7	-1.9	-3.6	-2.4	-0.224	-11.9	-2.2	-2.7	-4.3	-2.7	
Juni	-0.194	-3.7	+1.9	+1.1	+2.8	+2.1	-0.129	-2.4	+4.6	+2.9	+3.7	+3.7	
Juli	-0.196	-3.9	-2.0	-2.6	-0.9	-1.4	-0.133	-2.8	-0.4	-1.6	0.0	-1.6	
August	-0.128	+2.9	+0.8	+1.0	-0.7	+0.5	-0.091	+1.4	-1.4	-0.9	-1.7	-0.1	
September ..	-0.077	+8.0	+2.2	+3.0	+1.3	+0.6	-0.033	+7.2	-0.1	+1.6	0.0	0.0	
Jahr	-0.157	—	—	—	—	—	-0.105	—	—	—	—	—	
mittl. Fehler..	—	±6.1	±2.5	±2.4	±1.7	±1.5	—	±7.5	±3.2	±2.9	±2.5	±2.2	
jährliche Schwankung	0.171						0.218						

an der flandrischen und holländischen Küste

im Sinne Beobachtung minus Rechnung.

Oktober 1917 — September 1918						Oktober 1915 — September 1918					
mittlerer Wasser- stand m	V cm	V ₁ cm	V ₂ cm	V ₃ cm	V ₄ cm	mittlerer Wasser- stand m	V cm	V ₁ cm	V ₂ cm	V ₃ cm	V ₄ cm
2.222	+10.9	+1.4	-0.3	-2.7	-6.2	2.137	+1.1	-5.3	-4.7	-2.1	-1.6
2.189	+7.6	-0.6	-2.8	+0.9	+3.1	2.205	+7.9	+1.6	+0.4	+1.7	+2.7
2.120	+0.7	-4.1	-4.6	-2.2	-0.9	2.208	+8.2	+3.6	+1.8	-0.8	-2.3
2.188	+7.5	+7.5	+9.2	+5.5	+2.0	2.176	+5.0	+3.4	+2.8	+1.5	+2.0
2.025	-8.8	-4.0	-1.8	-4.2	-2.0	2.050	-7.6	-5.8	-4.6	-2.0	-1.0
1.957	-15.6	-7.4	-6.9	-3.2	-1.9	2.060	-6.6	-1.9	-0.1	+1.2	-0.3
2.085	-2.8	+6.7	+5.0	+7.4	+3.9	2.085	-4.1	+2.3	+2.9	+0.3	+0.8
2.058	-5.5	+2.7	+0.5	-3.2	-1.0	2.062	-6.4	-0.1	-1.3	-2.6	-1.6
2.067	-4.6	+0.2	-0.3	-2.7	-1.4	2.102	-2.4	+2.2	+0.4	+3.0	+1.5
2.094	-1.9	-1.9	-0.2	+3.5	0.0	2.087	-3.9	-2.3	-2.9	-1.6	-1.1
2.092	-2.1	-6.9	-4.7	-2.3	-0.1	2.150	+2.4	+0.6	+1.8	-0.8	+0.2
2.255	+14.2	+6.0	+6.5	+2.8	+4.1	2.194	+6.8	+2.1	+3.9	+2.6	+1.1
2.113	—	—	—	—	—	2.126	—	—	—	—	—
—	±8.3	±4.9	±4.6	±3.8	±2.8	—	±5.7	±3.1	±2.8	±1.9	±1.5
0.298						0.158					
2.260	+8.9	-1.7	-2.3	-1.7	-4.2	2.188	+1.8	-4.8	-4.1	-2.5	-1.9
2.258	+8.7	+0.4	-0.9	+2.4	+4.9	2.237	+6.7	+0.4	-0.1	+1.0	+2.4
2.183	+1.2	-2.6	-3.3	-3.9	-3.9	2.239	+6.9	+2.6	+1.4	-0.2	-2.1
2.231	+6.0	+7.7	+8.3	+5.0	+2.5	2.210	+4.0	+2.8	+2.1	+1.0	+1.6
2.057	-11.4	-4.7	-3.4	-2.8	-0.3	2.107	-6.3	-4.0	-3.5	-1.9	-0.5
2.012	-15.9	-5.9	-5.2	-1.9	-1.9	2.107	-6.3	-1.2	-0.0	+1.1	-0.8
2.137	-3.4	+7.2	+6.6	+6.0	+3.5	2.125	-4.5	+2.1	+2.8	+1.2	+1.8
2.070	-10.1	-1.8	-3.1	-6.4	-3.9	2.090	-8.0	-1.7	-2.2	-3.3	-1.9
2.163	-0.8	+3.0	+2.3	+2.9	+2.9	2.162	-0.8	+3.5	+2.3	+3.9	+2.0
2.159	-1.2	-2.9	-2.3	+1.0	-1.5	2.135	-3.5	-2.3	-3.0	-1.9	-1.3
2.199	+2.8	-3.9	-2.6	-3.2	-0.7	2.194	+2.4	+0.1	+0.6	-1.0	+0.4
2.326	+15.5	+5.5	+6.2	+2.9	+2.9	2.249	+7.9	+2.8	+4.0	+2.9	+1.0
2.171	—	—	—	—	—	2.170	—	—	—	—	—
—	±8.8	±4.5	±4.4	±3.7	±3.1	—	±5.5	±2.7	±2.6	±2.1	±1.6
0.314						0.159					

Helder

Oktober 1915 — September 1918

-0.050	+6.6	-4.2	-2.7	-1.9	-2.6
+0.004	+12.0	+1.2	+0.7	+2.1	+3.0
-0.032	+8.4	+0.5	-1.5	-2.3	-2.5
-0.039	+7.7	+4.8	+3.3	+1.9	+1.2
-0.160	-4.4	-1.5	-1.0	-0.2	+0.7
-0.251	-13.5	-5.6	-3.6	-2.2	-2.4
-0.186	-7.0	+3.8	+5.3	+4.5	+3.8
-0.254	-13.8	-3.0	-3.5	-4.9	-4.0
-0.146	-3.0	+4.9	+2.9	+3.7	+3.5
-0.160	-4.4	-1.5	-3.0	-1.6	-2.3
-0.090	+2.6	-0.3	+0.2	-0.6	+0.3
-0.028	+8.8	+0.9	+2.9	+1.5	+1.3
-0.116	—	—	—	—	—
—	±8.5	±3.2	±2.9	±2.7	±2.6
0.258					

Tabelle 4. Jährliche Schwankung der Monatsmittel des Mittelwassers.

	Ostende	Zeebrügge	Vlissingen	Jjmuiden	Helder
1915 — 1916....	26.1 cm	23.2 cm	28.7 cm	42.1 cm	42.5 cm
1916 — 1917....	28.3 "	20.5 "	26.0 "	27.6 "	30.8 "
1917 — 1918....	29.8 "	31.4 "	36.7 "	46.4 "	43.2 "
1915 — 1918....	15.8 "	15.9 "	17.1 "	21.8 "	25.8 "

Bei einer Betrachtung der Monatsmittel des Wasserstandes in Tabelle 3 fällt selbst bei den Werten der Einzeljahre die Jahresperiode auf, mehr noch bei Bildung der Abweichungen der Monatsmittel vom betreffenden Jahresmittel (vergl. die Werte v in Tabelle 3).

Um Amplitude und Anfangsphase der jährlichen, halb-, drittel-, vierteljährlichen Periode zu erhalten, wurden die einzelnen Jahresreihen und auch die dreijährigen Mittel einer Ausgleichung der folgenden Form unterzogen:

$$h_t - v = h_m$$

$$h_t - v_1 = h_m + A_1 \cdot \cos(30^\circ t - \varphi_1)$$

$$h_t - v_2 = h_m + A_1 \cdot \cos(30^\circ t - \varphi_1) + A_2 \cdot \cos(60^\circ t - \varphi_2)$$

$$h_t - v_3 = h_m + A_1 \cdot \cos(30^\circ t - \varphi_1) + A_2 \cdot \cos(60^\circ t - \varphi_2) + A_3 \cdot \cos(90^\circ t - \varphi_3)$$

$$h_t - v_4 = h_m + A_1 \cdot \cos(30^\circ t - \varphi_1) + A_2 \cdot \cos(60^\circ t - \varphi_2) + A_3 \cdot \cos(90^\circ t - \varphi_3) + A_4 \cdot \cos(120^\circ t - \varphi_4)$$

h_t bedeutet den aus Beobachtungen abgeleiteten mittleren Wasserstand des Monats t .

h_m " " " " " " " " Jahres,

A_1 ist die Amplitude, φ_1 die Anfangsphase der jährlichen Periode, wenn die Monate von Januar mit $t = 0$ gezählt werden,

$A_2, A_3, A_4; \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ haben die entsprechende Bedeutung für die halb-, drittel- und vierteljährliche Periode.

v, v_1, v_2, v_3, v_4 sind die bei der Ausgleichung übrigbleibenden Fehler im Sinne Beobachtung minus Rechnung.

Die sich ergebenden Amplituden und Anfangsphasen sind in Tabelle 5 zusammengestellt und die nach der Ausgleichung übrigbleibenden Fehler sowie die mittleren Fehler in Tabelle 3 angegeben.

Tabelle 5. Amplitude und Anfangsphase der jährlichen, halb-, drittel- und vierteljährlichen Periode der Monatsmittel des mittleren Wasserstandes. Januar $t = 0$.

		1915 — 1916		1916 — 1917		1917 — 1918		1915 — 1918	
		A	φ	A	φ	A	φ	A	φ
Ostende.....	1 jährliche Periode....	5.4 cm	330°	7.6 cm	272°	9.5 cm	270°	6.6 cm	284°
	1/2 " "	3.8	339	2.5	269	2.3	222	1.8	288
	1/3 " "	3.5	286	4.8	254	4.4	33	2.9	297
	1/4 " "	4.7	191	2.8	261	3.5	352	1.5	250
Zeebrügge..	1 jährliche Periode....	5.6	329	6.3	272	10.7	261	6.7	280
	1/2 " "	4.2	345	1.5	214	1.3	241	1.2	304
	1/3 " "	1.9	308	3.1	251	3.4	349	2.0	305
	1/4 " "	3.7	200	3.0	256	2.9	330	2.0	253
		Vlissingen 1915-1918		Jjmuiden 1915-1918		Helder 1915-1918			
	1 jährliche Periode....	8.0 cm	284°	10.1 cm	284°	11.2 cm	285°		
	1/2 " "	0.8	315	1.7	314	2.1	315		
	1/3 " "	2.4	316	1.8	355	1.6	331		
	1/4 " "	1.2	294	1.8	330	1.0	319		

Wie in der übrigen Nordsee und der westlichen Ostsee hat die jährliche Schwankung den wesentlichsten Anteil an der Veränderung des mittleren Wasserstandes von Monat zu Monat an der flandrischen und holländischen Küste. Dies zeigt sich sowohl an der Größe der Amplituden wie in den nach erfolgter Ausgleichung verbleibenden mittleren Fehlern v und zwar nicht nur im dreijährigen Mittel, sondern auch in den Einzeljahren. — Trotz der Kürze des untersuchten Zeitraumes passen die für die Jahresperiode gefundenen Werte gut zu den für andere Zeiträume und andere Orte der Nordsee abgeleiteten Werte. Man vergleiche die in Tabelle 6 unter A_1 und q_1 angegebenen Werte.

Tabelle 6.

	Untersuchter Zeitraum	jährliche Periode		halbjährliche Periode		dritteljährl. Periode		vierteljährl. Periode	
		A_1	q_1	A_2	q_2	A_3	q_3	A_4	q_4
Katwyk ⁸⁾	1884—1901	8.7 cm	280°	0.3 cm	294°	0.3 cm	327°	1.9 cm	352°
Harlingen ⁸⁾	desgl.	8.9	290	1.0	49	0.4	38	1.9	338
Urk ⁸⁾	desgl.	7.5	268	1.2	56	0.7	352	2.1	336
Wilhelmshaven ⁹⁾	1854—1919	7.8	275						
Bremerhaven ¹⁰⁾	1898—1910	5.5	278						
Cuxhaven ⁹⁾	1843—1909	8.7	260						
Esbjerg ¹⁰⁾	1898—1910	10.5	291						

Der von Witting¹¹⁾ für die Ostsee und von Kühnen¹²⁾ auch für die östliche Nordsee festgestellten Tatsache, daß die Amplitude der Jahresperiode von Süden nach Norden wächst, gehorchen auch die für die flandrische und holländische Küste abgeleiteten Werte (vergl. Tab. 5 u. 6).

Die halbjährliche Periode ist an der flandrischen Küste bedeutungslos und die Verkleinerung des mittleren Fehlers durch diese Welle ist geringfügig. Die halbjährliche Periode, die in der östlichen Ostsee die Jahresperiode weit überragt,¹¹⁾ tritt in der westlichen Ostsee und in der Nordsee von Osten nach Westen immer mehr zurück und verschwindet, wie sich nun ergeben hat, in der südlichen Nordsee, an der flandrischen Küste, fast völlig.

Eine wesentlichere Verkleinerung des mittleren Fehlers tritt durch die drittel- und vierteljährliche Periode ein. Bei beiden scheint eine Verspätung des Eintritts des Maximums von Ostende bis Helder vorhanden zu sein. Weitergehende Schlüsse werden sich nur nach Untersuchung längerer Zeiträume ziehen lassen. Nach Brehmer¹³⁾ sind die drittel- und vierteljährliche Welle in den Jahren 1900—1909 an der holländischen, deutschen und dänischen Küste mit Ausnahme von Esbjerg nicht vorhanden. Van der Stock¹⁴⁾ aber weist die vierteljährliche Periode an der holländischen Küste aus Beobachtungen von 1884—1901 nach, während eine dritteljährliche Periode keine Bedeutung hat (vergl. die betr. Zahlen für die drittel- und vierteljährliche Periode in Tabelle 5 und 6).

⁸⁾ van der Stok, a. a. O. S. 19.

⁹⁾ E. Przybyllok, Über die sogenannte Polflut in der Nord- und Ostsee. Veröffentl. d. Preuß. Geodät. Instituts. N. F. Nr. 80. Berlin 1919. S. 12.

¹⁰⁾ Kühnen, Das Mittelwasser der Ostsee usw. Veröffentl. d. Preuß. Geodät. Instituts. N. F. Nr. 70. Berlin 1916. S. 201.

¹¹⁾ Rolf Witting, Untersuchungen zur Kenntnis der Wasserbewegungen und der Wasserumsetzung in den Finnland umgebenden Meeren I. Helsingfors 1908. S. 192 f.

¹²⁾ a. a. O. S. 204.

¹³⁾ Brehmer, Über die Jahresschwankung im mittleren Wasserstande der Nordsee und Ostsee. Annalen der Hydrographie usw. 1913. S. 238.

¹⁴⁾ a. a. O. S. 19.

4. Beziehung zwischen mittlerem Wasserstand und gleichzeitigem Wind am Ort.

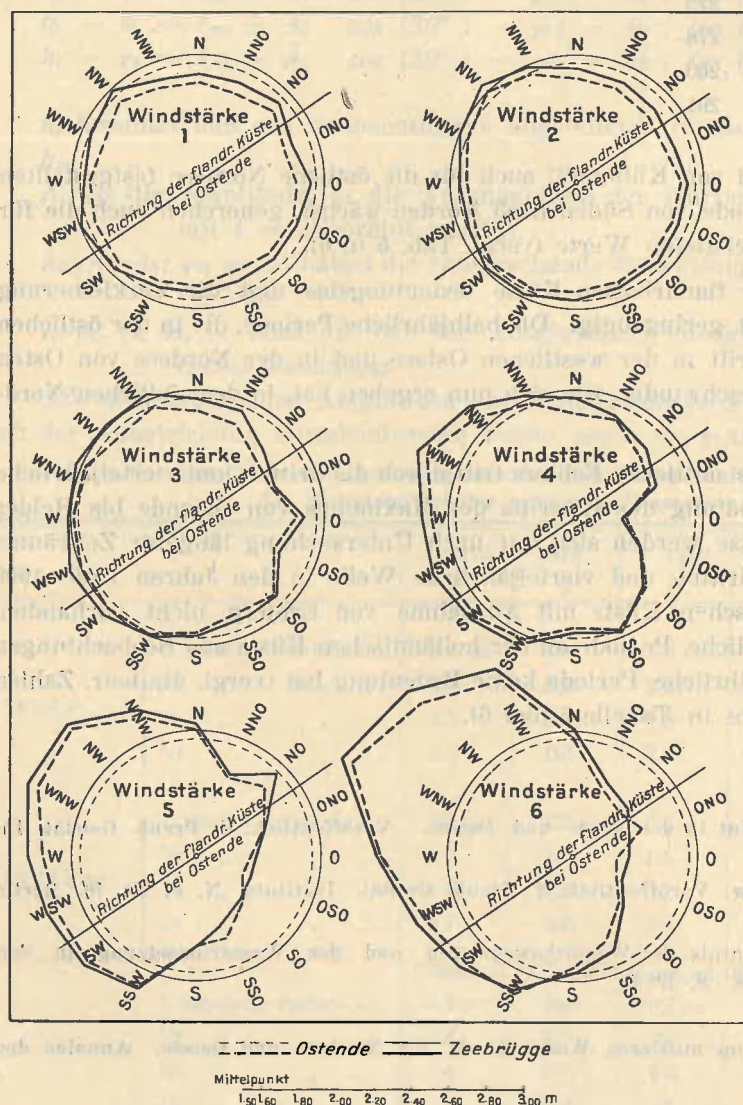
Außer den erwähnten periodischen Schwankungen, die eine verhältnismäßig kleine Amplitude besitzen und dem Auge ganz verborgen bleiben, zeigt die Höhe des mittleren Wasserstandes unperiodische Veränderungen, die so groß sind, daß sie jedem, der längere Zeit an der Küste der Nordsee weilt, auffallen und die zu Zeiten der Sturmfluten schwerste Schäden für den Menschen nach sich ziehen. In dem betrachteten dreijährigen Zeitraum trat der höchste mittlere Wasserstand während einer Doppeltide zu Ostende (Zeebrügge) am 2. Dezember 1917 mit 3.53 m (3.67 m) auf, der niedrigste am 30. Oktober 1916 mit 1.52 m (1.60 m). Die Schwankung des mittleren Wasserstandes im Laufe dieser

Fig. 2.

Darstellung der Abhängigkeit des Mittelwasserstandes vom gleichzeitigen mittleren Winde am Ort.

(Mittel aus der Zeit vom 1. Oktober 1915 — 30. September 1918.)

Die Kreise stellen den mittleren Wasserstand während des gesamten untersuchten Zeitraumes dar.



Zur Darstellung des Mittelwasserstandes benutzten Maßstab.

drei Jahre betrug also 2.01 m (2.07 m)! Diese von dem Zustand der Atmosphäre abhängige unperiodische Wasserstandsschwankung ist die bei weitem überwiegende und soll nun näher betrachtet werden.

Um einen von theoretischen Voraussetzungen möglichst freien Überblick über die Erscheinungen zu gewinnen, wurde zunächst die Abhängigkeit der Schwankungen des mittleren Wasserstandes vom gleichzeitigen Wind untersucht. Hierzu wurden die gleichen Wasserstandsmittel benutzt, die zur Bildung der Monatsmittel gedient hatten. Für den gleichen Zeitraum, für den das jeweilige Mittelwasser berechnet war, wurde die mittlere Windrichtung und -stärke aus allen zur Verfügung stehenden gleichmäßig über die Doppeltide verteilten Windangaben in Ostende bzw. Blankenberghe ermittelt, darauf wurden die Mittelwasserstände nach Windrichtung und -stärke geordnet, wobei 16 Windrichtungen und 6 Windstärkegruppen (1, 2, 3, 4, 5, 6 Beaufort) unterschieden wurden. Bei Windstillen und Windstärken größer als 6 Beaufort auftretende Werte des mittleren Wasserstandes wurden wegen ihrer Seltenheit aus der Betrachtung ausgeschieden. Die aus dem gesamten Beobachtungsmaterial Oktober 1915 bis September 1918 einschl. zusammengebrachten Werte wurden in jeder der 96 Tabellen gemittelt und so für jede Windrichtung und -stärke ein Mittelwasserwert gefunden sowohl für Ostende

Tabelle 7. a) Abhängigkeit des Mittelwasserstandes vom gleichzeitigen mittleren Winde am Ort.
(Mittel aus der Zeit vom 1. Oktober 1915 — 30. September 1918.)

1. Ostende 1915—1918.

Windstärke Beaufort Windrichtung	Mittlerer Wasserstand in m						nach Ausgleichung übrigbleibende Fehler ν (B.-R.) in cm					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
N	2.02	2.05	2.06	2.05	2.17	2.13	-2	-2	+1	-4	0	-11
NNO	2.00	2.04	2.03	2.08	1.95	1.90	-3	-1	+2	+7	-11	-16
NO	2.05	2.01	1.93	1.97	2.03	1.83	+3	-3	-5	+3	+8	-8
ONO	1.99	1.99	1.92	1.92	(1.90)	1.88	-3	-4	-5	+2	+3	+9
O	2.03	2.05	2.03	1.76	(1.81)	(1.72)	+1	+2	+6	-13	-1	-1
OSO	2.04	2.05	1.94	1.86	(1.78)	(1.74)	+1	+1	-5	-5	-4	+1
SO	2.03	2.07	2.08	2.03	(1.86)	(1.83)	-1	+2	+6	+7	0	+3
SSO	2.01	2.07	2.05	2.14	1.97	(1.98)	-4	0	-2	+13	+3	+6
S	2.05	2.08	2.11	2.08	2.00	2.10	-1	-1	0	-3	-5	+2
SSW	2.06	2.10	2.17	2.19	2.25	2.29	-1	-1	+2	0	+9	+3
SW	2.10	2.12	2.18	2.23	2.31	2.30	+2	0	0	-3	+4	-11
WSW	2.09	2.08	2.17	2.26	2.29	2.35	+1	-5	-2	-4	-6	-16
W	2.07	2.08	2.15	2.26	2.32	2.53	-1	-5	-4	-5	-8	-6
WNW	2.04	2.13	2.15	2.35	2.41	2.77	-3	+1	-2	+6	+1	+18
NW	2.10	2.17	2.09	2.25	2.44	2.64	+4	+6	+4	+1	+8	+12
NNW	2.04	2.12	2.12	2.15	2.28	2.51	-1	+3	+3	-2	0	+11
Mittel	2.05	2.08	2.08	2.10	2.11	2.16	—	—	—	—	—	—
mittl. Fehler der Abweichungen vom Mittel bezw. der B.-R. in cm	±3.2	±4.5	±8.8	±15.7	±21.5	±32.7	±2.3	±2.9	±3.8	±6.1	±5.6	±9.9

2. Zeebrügge 1915—1918.

N	2.07	2.10	2.13	2.13	2.20	2.18	-1	-2	0	0	-3	-12
NNO	2.06	2.08	2.11	2.09	1.97	1.94	-1	-2	+5	+4	-13	-17
NO	2.09	2.06	1.99	2.02	2.12	1.88	+3	-2	-4	+5	+14	-7
ONO	2.03	2.04	1.93	1.95	(1.90)	1.82	-2	-3	-8	+3	+1	-1
O	2.10	2.09	2.07	1.74	(1.83)	(1.79)	+5	+2	+7	-16	0	+2
OSO	2.07	2.08	1.97	1.86	(1.82)	(1.79)	+1	+1	-4	-6	0	+2
SO	2.07	2.10	2.09	2.01	(1.83)	(1.88)	0	+1	+5	+5	-3	+4
SSO	2.07	2.10	2.08	2.15	1.88	(2.04)	-3	0	0	+11	-6	+8
S	2.08	2.12	2.13	2.11	2.00	2.12	-3	0	0	-2	-5	0
SSW	2.09	2.15	2.18	2.23	2.27	2.28	-3	+1	0	+2	+9	-1
SW	2.14	2.16	2.22	2.27	2.34	2.34	+1	0	+1	-2	+4	-11
WSW	2.16	2.12	2.24	2.31	2.35	2.41	+3	-5	+1	-3	-4	-16
W	2.11	2.12	2.19	2.31	2.39	2.54	-2	-5	-5	-5	-6	-9
WNW	2.12	2.17	2.20	2.40	2.47	2.83	0	0	-3	+6	+1	+20
NW	2.15	2.22	2.18	2.32	2.47	2.73	+4	+7	-2	+2	+5	+17
NNW	2.07	2.16	2.20	2.19	2.33	2.57	-3	+2	+4	-3	-1	+13
Mittel	2.09	2.12	2.12	2.13	2.14	2.20	—	—	—	—	—	—
mittl. Fehler der Abweichungen vom Mittel bezw. der B.-R. in cm	±3.4	±4.5	±9.0	±17.5	±23.6	±33.4	±2.6	±2.9	±4.0	±6.0	±6.2	±10.8

b) Anzahl der für jeden Mittelwert von Ostende bezw. Zeebrügge zur Verfügung stehenden Doppeltidenmittel.

	1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6
N	4	22	13	17	16	5	S	8	17	18	14	7	5
NNO	8	16	7	7	4	1	SSW	3	27	32	24	13	2
NO	10	29	20	16	5	3	SW	7	26	23	31	13	11
ONO	13	23	23	5	—	1	WSW	7	28	34	32	18	12
O	14	10	5	2	—	—	W	5	18	14	13	7	6
OSO	9	22	5	3	—	—	WNW	4	7	21	6	12	7
SO	9	14	4	2	—	—	NW	10	18	6	2	4	5
SSO	4	20	11	8	4	—	NNW	9	11	9	3	4	3
							Summe	124	308	245	185	107	60

wie auch für Zeebrügge (vergl. Tabelle 7a). Über die Zahl der Einzelwerte, aus denen die Mittelwerte gebildet sind, gibt Tabelle 7b Auskunft; sie gilt für Ostende und Zeebrügge gemeinsam, da für beide Orte der gleiche in Ostende bzw. Blankenberghe beobachtete Wind als maßgebend angesehen wurde. Die einzelnen Windrichtungen und -stärken treten so unregelmäßig auf, daß für einzelne Gruppen keine Wasserstandsmittel vorliegen (ONO, O, OSO, SO Stärke 5 und 6, SSO Stärke 6), für andere nur sehr wenige. Für die Lücken wurden durch Interpolation Werte gefunden. Den Überblick über die erhaltenen Ergebnisse erleichtert die graphische Darstellung durch „Wasserstandswindrosen“ (s. Figur 2). Die starke aufstauende Wirkung, insbesondere der WNW- und NW-Winde, fällt sofort in die Augen, sowie auch die den Wasserstand erniedrigende Wirkung vor allem der O- bis SO-Winde. Da die den größten Aufstau bzw. die größte Abtrift bewirkenden Winde um etwa 180° auseinanderliegen, wurde versucht, die Abhängigkeit der für die einzelnen Windstärken erhaltenen Mittelwasserwerte von der Windrichtung durch Sinuskurven darzustellen. Das Ergebnis sind die folgenden Gleichungen:

1. Ostende.

- 1 Beaufort $h_{\alpha}^1 - v_1 = 2,05 + 0,033 \cdot \sin(\alpha - 156^\circ)$
 2 „ $h_{\alpha}^2 - v_2 = 2,08 + 0,047 \cdot \sin(\alpha - 172^\circ)$
 3 „ $h_{\alpha}^3 - v_3 = 2,08 + 0,113 \cdot \sin(\alpha - 165^\circ)$
 4 „ $h_{\alpha}^4 - v_4 = 2,10 + 0,207 \cdot \sin(\alpha - 177^\circ)$
 5 „ $h_{\alpha}^5 - v_5 = 2,11 + 0,296 \cdot \sin(\alpha - 192^\circ)$
 6 „ $h_{\alpha}^6 - v_6 = 2,16 + 0,441 \cdot \sin(\alpha - 190^\circ)$

2. Zeebrügge.

- 1 Beaufort $h_{\alpha}^1 - v_1 = 2,09 + 0,035 \cdot \sin(\alpha - 170^\circ)$
 2 „ $h_{\alpha}^2 - v_2 = 2,12 + 0,049 \cdot \sin(\alpha - 178^\circ)$
 3 „ $h_{\alpha}^3 - v_3 = 2,12 + 0,115 \cdot \sin(\alpha - 175^\circ)$
 4 „ $h_{\alpha}^4 - v_4 = 2,13 + 0,233 \cdot \sin(\alpha - 181^\circ)$
 5 „ $h_{\alpha}^5 - v_5 = 2,14 + 0,321 \cdot \sin(\alpha - 196^\circ)$
 6 „ $h_{\alpha}^6 - v_6 = 2,20 + 0,445 \cdot \sin(\alpha - 191^\circ)$

Hierbei ist α von Nord = O über Ost = 90° gezählt. Die übrigbleibenden Fehler im Sinne Beobachtung minus Rechnung (B.-R.) sind verhältnismäßig gering (s. Tabelle 7a). Insbesondere die mittleren Fehler lassen erkennen, daß die bei den einzelnen Windrichtungen und -stärken auftretenden Mittelwasserwerte sich für jede Stärkegruppe sehr gut durch die genannten Sinuskurven darstellen lassen. Wird außerdem die mittlere Abweichung vom Mittel berechnet oder mit anderen Worten der mittlere Fehler der B.-R. unter Annahme, daß die Wasserstandswerte aller Windrichtungen in den einzelnen Windstärkegruppen durch das arithmetische Mittel der für die einzelnen Windrichtungen gefundenen Mittelwasserwerte dargestellt werden (s. Tabelle 7a), so beträgt die Verkleinerung des mittleren Fehlers bei den Windstärkegruppen von 1, 2, 3, 4, 5, 6 Beaufort für Ostende bzw. 28, 36, 57, 61, 74, 70 %, für Zeebrügge 23, 36, 56, 66, 74, 68 %. Dies spricht ebenfalls für die Güte der Darstellung durch die obigen Sinuskurven.

Bei den geringen Windstärken 1 bis 3 Beaufort stimmen die errechneten α -Zahlen offensichtlich schlecht, denn es ist nicht anzunehmen, daß in der Stärkegruppe 1 WSW-Winde, die annähernd der Küste parallel laufen, den größten Aufstau bewirken. Am besten stimmen die für die Windstärken 5 und 6 gefundenen Phasen; bei diesen Gruppen ist die erwähnte Verkleinerung des mittleren Fehlers ja auch am bedeutendsten.

5. Zusammenhang zwischen Wind und mittlerem Wasserstand bei ausgewählten Wetterlagen.

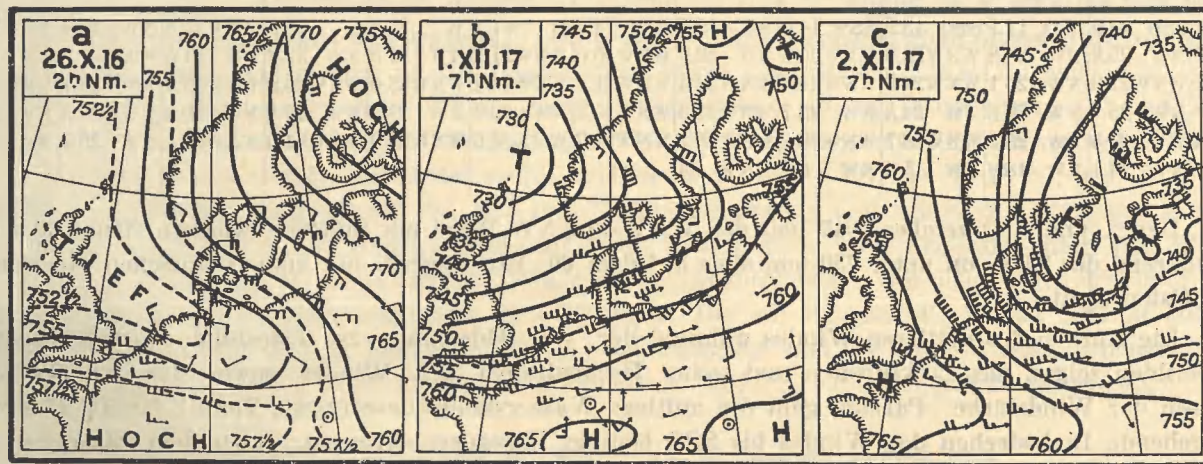
Im Folgenden sei betrachtet, wie im einzelnen der mittlere Wasserstand bei einigen ausgewählten typischen Wetterlagen vom Winde abhängt. Um Wind und Wasserstand mit einander in Beziehung setzen zu können, wurde für die gleichen Zeiträume, für die der mittlere Wasserstand ermittelt wurde, also für im Abstand von Tidestunden fortschreitende Doppeltidenzeiträume auch die mittlere Windrichtung ermittelt aus den in Abschnitt 1 angegebenen Windbeobachtungen.

a) Beispiel für eine Verspätung der Windwirkung von 3 Stunden.

Tiefausläufer lagert über der mittleren Nordsee.

Während des 25. Oktobers 1916 herrschten über der flandrischen Küste OSO- bis SSO-Winde, da sie sich an der Vorderseite eines Tiefs befand. Von diesem aus streckte sich bis zum 25. Oktober morgens nördlich der flandrischen Küste ein Tiefausläufer bis nach Mitteldeutschland vor, wodurch an der flandrischen Küste der Wind rechts drehte, ohne die Stärke der vorherigen SO-Winde ganz zu erreichen. Diese Wetterlage blieb bis zum Abend unverändert (vergl. Figur 3 a). Bis zum Morgen des 27. Oktober war der Tiefausläufer nach Norden bis Jütland vorgedrungen und der Wind hatte an der flandrischen Küste wieder bis SO zurückgedreht.

Fig. 3.



Der Wasserstand ist zunächst unter Einfluß der SO-Winde sehr niedrig und bleibt auch beim Drehen nach S und SSW noch unverändert (vgl. Taf. 1 Nr. 2). Etwa $2\frac{1}{2}$ Stunden nach Einsetzen der WSW- und W-Winde beginnt der mittlere Wasserstand zu steigen und erreicht etwa 3 Stunden nach dem Zeitpunkt, in dem die aufstauenden W-Winde im Windmittel beginnen zurückzutreten, seinen höchsten Stand. Je mehr weiterhin die SSO- und SO-Winde während der Doppeltidenzeiträume hervortreten, desto niedriger wird der Wasserstand. Etwa $2\frac{1}{2}$ Stunden, nachdem die W-Winde aus dem Doppeltidenzeitraum ganz verschwunden sind, zeigt die Mittelwasserkurve ein deutlich erkennbares stärkeres Fallen so daß jedenfalls während dieser Wetterlage der Einfluß des Windes auf den Wasserstand etwa nach $2\frac{1}{2}$ bis 3 Stunden bemerkbar ist. Der aus diesem Beispiel gewonnene Wert verdient besondere Beachtung, weil ganz überwiegend nur der Wind vor der flandrischen Küste für den Wasserstand in Betracht kommen, da im Nordseegebiet nördlich der Hoofden, in der Zone geringsten Luftdrucks, nur schwache Luftbewegung geherrscht haben wird, worauf am Vormittag des 26. Oktobers die in Helder beobachtete Windstille deutet und am Nachmittag und Abend die schwachen Winde in der Deutschen Bucht. Auch in der nördlichen Nordsee haben, wie die Küstenbeobachtungen erkennen lassen und nach der Größe der Luftdruckgradienten auch zu vermuten ist, höchstens mäßige Winde geherrscht. Die Fernwirkung aus der übrigen Nordsee wird somit auf den Wasserstand keinen nennenswerten Einfluß gehabt haben und man wird als Phasenverschiebung der Wasserstandsänderung gegenüber dem lokalen Winde einen Zeitraum von etwa 3 Stunden annehmen können.

b) Ebenfalls Verzögerung der Windwirkung von etwa 3 Stunden;

auf Zugstraße II vorüberziehendes Tief.

Das am 1. und 2. Dezember 1917 nördlich England in Richtung nach Stockholm vorüberziehende Tief ruft bei von Süd nach Nordwest drehenden Winden die höchsten in dem betrachteten Zeitraum überhaupt auftretenden Wasserstände hervor. Diese Wetterlage verdient deshalb besonderes Interesse.

Auf der Nordseite eines über Frankreich und die Alpen ausgebreiteten Hochs befindlich und unter dem Einfluß auf dem Atlantischen Ozean lagernden niederen Drucks stehend, hat die flandrische Küste am 30. November 1917 südwestliche Winde, die aber bei Annäherung des atlantischen Tiefs am Abend des 30. November bereits nach SSW und am Morgen des 1. Dezember 1917 bei gleichzeitigem Auffrischen nach S und mittags nach SSO drehen. Bis zum Abend hat der Wind rechts gedreht bis NW und Stärken bis über 30 m/sec erreicht (s. folgende Tabelle und Figur 3 b).

Stündliche Windwerte zu Blankenberghe vom 1. bis 4. Dezember 1917.

	12—1	1—2	2—3	3—4	4—5	5—6	6—7	7—8	8—9	9—10	10—11	11—12
	m/sec.	m/sec.	m/sec.	m/sec.	m/sec.	m/sec.	m/sec.	m/sec.	m/sec.	m/sec.	m/sec.	m/sec.
1. 12. N	SSO 14.0	SSO 11.7	SSO 13.5	SSW 14.6	W 13.7	W 12.2	W 17.1	W 21.1	W 25.3	WNW 22.8	NW 31.4	NW 29.6
2. 12. V	NW 25.8	NW 24.8	WNW 23.0	WNW 25.8	NW 29.9	WNW 30.0	WNW 31.2	NW 31.9	NW 32.2	NW 31.5	NW 31.7	NW 28.7
N	WNW 27.6	NW 26.1	WNW 22.2	WNW 21.4	WNW 23.4	WNW 21.8	WNW 26.2	WNW 23.6	WNW 26.0	WNW 29.2	NW 25.1	NW 26.2
3. 12. V	NW 25.7	NW 25.8	NW 24.3	NW 25.7	WNW 32.5	WNW 30.3	NW 29.3	NW 33.5	NW 29.3	NW 29.6	NW 29.3	NW 27.2
N	NW 27.4	NW 25.8	WNW 26.7	WNW 26.5	WNW 25.1	WNW 24.0	WNW 24.6	WNW 25.0	WNW 24.0	WNW 22.1	NW 25.4	NW 30.7
4. 12. V	NW 24.1	NW 18.3	NW 5.3	NW 9.2	WNW 4.4							

Den 2. und 3. Dezember 1917 hält der WNW- und NW-Wind mit Stärken zwischen 20 und 30 m/sec an, während das Tief von unter 730 mm etwa auf dem 60. Breitengrad bis zum Finnischen Meerbusen nach Osten zieht.

Die Kurven des mittleren Windes während der von Tidestunde zu Tidestunde fortschreitenden Doppeltiden zeigen das Linksdrehen und später Rechtsdrehen des Windes sowie das schnelle Anwachsen der Windstärke. Parallel geht die mittlere Wasserstandskurve (vergl. Tafel 2 Nr. 1). Das vorübergehende Linksdrehen des Windes bis SSO bedingt Niveauerniedrigung. Nach dem Einsetzen der Rechtsdrehung und ersten Auftreten der W-Winde aber steigt der Meeresspiegel, und zwar folgt er dem Einfluß des Windes mit einer Verspätung von 2½ bis 3 Stunden. Dieser Fall verdient wiederum besondere Beachtung, weil vor dem Umspringen des Windes an der flandrischen Küste nach West nach der Wetterlage über der ganzen Nordsee südliche bis südwestliche, also das Niveau des Wassers an der flandrischen Küste nicht erhöhende Winde anzunehmen sind und die Phasenverschiebung der Wind- und Wasserstandskurve ziemlich rein die Verspätung der Niveauschwankung des Meeres gegenüber dem lokalen Winde darstellen dürfte.

Unter dem Einfluß der sich allmählich über die ganze Nordsee ausdehnenden NW- und N-Winde (vergl. Figur 3 b) wird das Wasser an der flandrischen Küste bis zur größten überhaupt in dem zur Verfügung stehenden Zeitraum beobachteten Höhe des mittleren Wasserstandes von 3.53 m in Ostende und 3.67 m in Zeebrügge emporgetrieben. Am 3. Dezember, vormittags, wo an der flandrischen Küste der NW-Wind zwar noch mit unverminderter Stärke herrscht, für die westliche Nordsee nach der Wetterlage aber bereits Linksdrehen des Windes und Abflauen anzunehmen ist, bewirkt nur noch der über den Hoofden wehende Wind Aufstau, infolgedessen senkt sich trotz des an der flandrischen Küste unveränderten Windes der Wasserspiegel wieder, so daß die für Doppeltidendauer berechneten Mittelwerte des Wasserstandes am 2. Dezember von 4^h N an abnehmen.

c) Beispiel für eine Verspätung der Bewegung des Wasserspiegels von 5—7 Stunden.

Gelegentlich kann die Phasenverspätung erheblich größer werden. Hierfür bildet die Wetterlage am 30./31. Oktober 1916 ein Beispiel. Ein ozeanisches, westlich Großbritannien gelegenes und in seinen Ausläufern sich bis in die Biscaya-See erstreckendes Tief bedingt am 30. Oktober 1916 über der flandrischen Küste mäßige bis frische SSW-bis SSO-Winde. Infolge Vordringens dieses Tiefs nach Osten dreht am 31. Oktober, morgens, der Wind an der flandrischen Küste nach SW. Die aufstauende Wirkung dieses Windes beginnt sich erst 5 Stunden nach Einsetzen des SW bemerkbar zu machen. Diese unge-

wöhnlich große Verspätung ist wohl als Folge der den Küstenbeobachtungen und dem Isobarenverlauf über der ganzen Nordsee zunächst noch anzunehmenden steifen bis stürmischen Südwinde anzusehen. Andererseits beginnt das Rückdrehen des Windes im Nordseegebiet im Süden an der flandrischen Küste. Dem Einsetzen der Südwinde folgt das Fallen des Wasserstandes erst mit siebenstündiger Verspätung, offenbar weil die über der übrigen Nordsee zunächst noch herrschenden stürmischen W-Winde einen schnellen Abfluß verhindern (verg. Tafel 2, Nr. 2).

d) Aufstau, bevor am Orte der aufstauende Wind einsetzt.

Vom 29. August 1916 vorm. bis 30. August nachm. zog ein Minimum von etwa 742½ mm von der Biscaya-See über Nordwestfrankreich nach der flandrischen Küste, von wo aus es unter Auffüllung an der Südseite einer über Dänemark gelegenen Zyklone bis zum 31. August 8^h V etwa bis zum Gebiet zwischen Weichsel und Memel vorrückte (s. Tafel 2, Nr. 3). Beim Vorüberziehen dieses Minimums traten schnelle Wasserstandsänderungen an der flandrischen Küste von beträchtlichem Ausmaße ein. — Zunächst wurden in Ostende schwache Winde aus Süd aufgezeichnet, die mit Annäherung des Tiefs etwas auffrischten und links nach Ost und Nordost (29. VIII. 2^h, 7^h N), dann mit Verlagerung des Kerns des Tiefs nach der Straße von Dover wieder rechts drehten nach S (30. VIII. 8^h V, 2^h N), weiterhin nach Vorübergang des Tiefs schnell nach W, NW und NNW umsprangen und während 4 Stunden zu Sturm auffrischten. Im Laufe des 31. August drehte der Wind wieder nach West und Süd unter dem Einfluß eines nördlich von England vorrückenden Tiefs, das das vorübergehend von Frankreich bis über ganz England ausgedehnte Luftdruckmaximum zurückdrängte. Die am 29. und 30. August 1916 in Ostende aufgezeichneten Winde sind in folgender Tabelle wiedergegeben und die für die Doppeltidenzeiträume errechneten Mittelwerte der Windrichtung und -stärke auf Tafel 2, Nr. 4 graphisch dargestellt.

Stündliche Windwerte zu Ostende am 29. und 30. August 1916.

	12—1	1—2	2—3	3—4	4—5	5—6	6—7	7—8	8—9	9—10	10—11	11—12
	m/sec.	m/sec.	m/sec.	m/sec.	m/sec.	m/sec.	m/sec.	m/sec.	m/sec.	m/sec.	m/sec.	m/sec.
29. 8. V	S 4.1	S 4.0	S 4.7	S 2.4	S 1.4	S 1.2	S 1.1	S 1.4	OSO 1.7	O 1.5	O 2.2	ONO 2.5
N	ONO 3.3	ONO 4.4	NO 5.1	NO 7.9	NO 8.5	ONO 5.8	ONO 5.2	NO 2.8	O 2.9	O 5.3	O 5.3	O 4.6
30. 8. V	SSO 5.7	S 6.4	S 7.3	S 6.7	S 5.7	S 7.6	S 7.8	S 6.5	S 5.6	S 6.0	S 6.5	S 4.6
N	SSW 2.6	W 1.5	NW 8.6	NNW 19.0	NNW 20.4	NNW 21.1	NNW 16.1	NW 9.6	WNW 9.2	WNW 8.5	NW 7.3	WNW 7.3

Der Wasserstand schwankte infolge der schnellen Windänderung sehr stark. Das vorübergehende Drehen des Windes nach Ost und Nordost erniedrigte den Wasserspiegel zunächst etwas. Bereits etwa 2½ Stunden vor Einsetzen der lokal aufstauend wirkenden W- bis NNW-Winde steigt der Wasserspiegel schnell, offenbar, weil die von dem auf der Rückseite des mit seinem Kern über der flandrischen Küste lagernden Tiefs herrschenden N- und NW-Winde bewegten Wassermassen an der flandrischen Küste bereits stauen, während dort noch Südwinde herrschen. Hier ist also ein Fall vorhanden, wo die Kurve des mittleren Wasserstandes nicht eine Phasenverspätung gegen die Kurve der Windrichtung aufweist, sondern eine 2½stündige Verfrühung.

e. Wind springt von Süd nach Nord um, ohne daß der mittlere Wasserstand sich wesentlich verändert.

Unter dem Einfluß eines über dem Norden Englands lagernden Tiefs hat die flandrische Küste am 5. und 6. April 1917 bis 3^h N vorwiegend südliche, zunächst leichte, allmählich bis mäßig auffrischende Winde. Durch Ausdehnung des über Frankreich lagernden Hochdruckgebiets nach Norden über England springt der Wind schnell nach Nord um. Nordwind von 4 Beaufortgraden bleibt bis zum 8. April 9^h V, worauf ein das Hoch zurückdrängendes Tief wieder westliche Winde bedingt. Das Umspringen des Windes bleibt ohne größeren Einfluß auf den Wasserspiegel (vergl. Tafel 2, Nr. 5).

6. Beziehung zwischen mittlerem Wasserstand und drei Stunden vorher herrschendem Wind am Ort vor und nach Ausschaltung der Wirkung des Luftdrucks.

Da nach Vorgehendem die Schwankungen des Wasserspiegels durchaus nicht allein vom lokalen Wind abhängig sind, sondern von der Luftdruckverteilung und Luftbewegung über dem ganzen Nordseegebiet, liegt es nahe, die Abhängigkeit des Wasserspiegels von bestimmten Luftdruckgradienten zu untersuchen, wie es Kühn¹⁵⁾ für das Gebiet der mittleren und westlichen Ostsee sowie der östlichen Nordsee getan hat, sowie D. la Cour¹⁶⁾ für die dänischen Gewässer und Leverkink¹⁷⁾ für Wilhelmshaven. Dieser Weg war aber hier nicht gangbar, da es für den in Betracht kommenden Zeitraum an zuverlässig gezeichneten Wetterkarten für das Nordseegebiet fehlt, weil die meteorologischen Beobachtungen West- und Nordwesteuropas nicht zur Verfügung standen. Es wurde aber doch versucht, den tatsächlichen Verhältnissen gerechter zu werden, indem zunächst der Wasserstand mit dem drei Stunden vorher herrschenden Wind in Beziehung gebracht wurde.

Hierfür wurden die gleichen Wasserstandsmittel benutzt wie zur Errechnung der Monatsmittel in Abschnitt 3 und zur Feststellung der Beziehung zwischen Wasserstand und gleichzeitigem Wind. Die Windmittel wurden dagegen für einen drei Stunden früher gelegenen Zeitraum berechnet. Die gefundenen mittleren Wasserstände der einzelnen Windrichtungen und -stärken sind in Tabelle 8 angegeben. Die in den einzelnen Windstärkegruppen vorhandenen Werte wurden wiederum einer Ausgleichung von der Form

$$h_{\alpha} - v = c + A \cdot \sin(\alpha - \varphi)$$

unterzogen. Die gefundenen Gleichungen lauten:

1. Ostende.

1 Beaufort	$h_{\alpha} - v_1 = 2,05 + 0,018 \cdot \sin(\alpha - 147^{\circ})$
2 „	$h_{\alpha} - v_2 = 2,07 + 0,048 \cdot \sin(\alpha - 175^{\circ})$
3 „	$h_{\alpha} - v_3 = 2,08 + 0,092 \cdot \sin(\alpha - 166^{\circ})$
4 „	$h_{\alpha} - v_4 = 2,11 + 0,198 \cdot \sin(\alpha - 172^{\circ})$
5 „	$h_{\alpha} - v_5 = 2,13 + 0,270 \cdot \sin(\alpha - 197^{\circ})$
6 „	$h_{\alpha} - v_6 = 2,17 + 0,399 \cdot \sin(\alpha - 195^{\circ})$

2. Zeebrügge.

1 Beaufort	$h_{\alpha} - v_1 = 2,10 + 0,013 \cdot \sin(\alpha - 210^{\circ})$
2 „	$h_{\alpha} - v_2 = 2,11 + 0,053 \cdot \sin(\alpha - 184^{\circ})$
3 „	$h_{\alpha} - v_3 = 2,12 + 0,099 \cdot \sin(\alpha - 176^{\circ})$
4 „	$h_{\alpha} - v_4 = 2,15 + 0,214 \cdot \sin(\alpha - 179^{\circ})$
5 „	$h_{\alpha} - v_5 = 2,16 + 0,268 \cdot \sin(\alpha - 199^{\circ})$
6 „	$h_{\alpha} - v_6 = 2,20 + 0,412 \cdot \sin(\alpha - 197^{\circ})$

¹⁵⁾ a. a. O.

¹⁶⁾ D. la Cour, Quasinivellement. Publicationer fra det danske meteorologiske Institut. Meddelelser, Nr. 1. Kopenhagen 1913.

¹⁷⁾ a. a. O.

Tabelle 8.

Abhängigkeit des mittleren Wasserstandes vom 3 Stunden vorher herrschenden Winde.

1. Ostende.

Windstärke -richtung	mittlerer Wasserstand in m						nach Ausgleichung übrigbleibende Fehler in cm (B.-R.)					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
N	2.00	2.05	2.05	2.03	2.11	2.13	-4	-2	-1	-5	-10	-14
NNO	2.05	2.02	2.10	2.02	2.10	2.06	+1	-3	+7	+1	-1	-6
NO	2.05	2.01	1.96	1.91	1.99	2.09	+2	-2	-4	-4	-1	+12
ONO	2.05	1.97	1.94	1.94	(1.91)	1.88	+2	-5	-5	+2	-1	+3
O	2.05	2.12	1.90	1.97	(1.86)	(1.80)	+2	0	-9	-14	-1	+2
OSO	2.02	1.99	2.06	2.00	(1.87)	(1.75)	-2	-4	+5	+6	+1	-2
SO	2.02	2.06	2.10	2.09	(1.90)	(1.80)	-3	+2	+7	+10	+1	-2
SSO	2.01	2.06	2.03	2.04	2.04	(1.93)	-4	0	-4	-2	+8	0
S	2.08	2.04	2.13	2.18	2.02	2.12	+2	-3	+3	+4	-3	+5
SSW	2.03	2.10	2.14	2.17	2.12	2.19	-3	+1	+1	-4	-3	-3
SW	2.11	2.10	2.18	2.23	2.26	2.36	+4	-1	+2	-4	0	-1
WSW	2.07	2.08	2.16	2.30	2.29	2.46	0	-4	-1	0	-5	-3
W	2.01	2.11	2.09	2.24	2.35	2.51	-6	-1	-8	-7	-4	-5
WNW	2.04	2.14	2.16	2.27	2.41	2.59	-2	+3	+1	-1	+1	+2
NW	2.08	2.13	2.11	2.33	2.44	2.73	+3	+3	-2	+10	+7	+2
NNW	2.06	2.09	2.17	2.21	2.37	2.35	+1	+1	+8	+5	+7	-6
Mittel	2.05	2.07	2.08	2.11	2.13	2.17	—	—	—	—	—	—
mittl. Abweichung vom Mittel bzw. mittlerer Fehler in cm	±2.9	±4.9	±8.3	±15.3	±19.6	±29.1	±2.9	±2.6	±5.1	±6.1	±4.5	±7.7

2. Zeebrügge 1915 — 1918.

N	2.08	2.12	2.10	2.08	2.13	2.16	-2	+1	-1	-7	-12	-16
NNO	2.12	2.06	2.14	2.08	2.18	2.12	+2	-3	+6	+1	+5	-4
NO	2.08	2.05	2.01	1.97	2.03	2.17	-2	-3	-3	-3	-1	+16
ONO	2.12	2.02	2.00	2.00	(1.94)	1.82	+3	-5	-2	+5	-2	-6
O	2.12	2.16	1.96	1.76	(1.90)	(1.83)	+3	0	-6	-18	-1	+2
OSO	2.07	2.03	2.06	2.05	(1.91)	(1.79)	-2	-3	+3	+9	+2	0
SO	2.06	2.10	2.08	2.10	(1.94)	(1.84)	-3	+3	+3	+10	+2	0
SSO	2.02	2.08	2.08	2.02	2.04	(1.97)	-7	-1	-1	-5	+6	+3
S	2.13	2.08	2.15	2.20	2.07	2.12	+3	-3	+2	+5	0	+4
SSW	2.08	2.14	2.17	2.19	2.14	2.17	-2	+1	+1	-4	0	-7
SW	2.12	2.13	2.21	2.26	2.27	2.42	+2	-1	+1	-4	-1	+3
WSW	2.11	2.13	2.21	2.34	2.35	2.50	0	-2	-1	-1	-1	-2
W	2.11	2.17	2.15	2.31	2.38	2.53	0	+1	-7	-5	-3	-6
WNW	2.12	2.19	2.20	2.38	2.44	2.68	+1	+3	-1	+4	+1	+7
NW	2.12	2.18	2.18	2.39	2.48	2.77	+1	+3	-1	+9	+8	+21
NNW	2.08	2.13	2.21	2.24	2.40	2.39	-3	0	+6	+1	+6	-7
Mittel	2.10	2.11	2.12	2.15	2.16	2.20	—	—	—	—	—	—
mittl. Abweichung vom Mittel bzw. mittlerer Fehler in cm	±3.0	±5.1	±7.8	±16.6	±19.4	±30.4	±2.7	±2.5	±3.5	±6.6	±4.6	±8.8

Die nach der Ausgleichung übrigbleibenden Fehler sind in Tabelle 8 angegeben, ebenso die mittleren Fehler. Bei den Windstärken 1—4 sind die mittleren Fehler zum Teil verkleinert, zum Teil vergrößert (s. S. 17), insgesamt hat diese Ausgleichung bei diesen Windstärken etwa die gleiche Genauigkeit wie bei Benutzung des gleichzeitig wehenden Windes. Bei den Windstärken 5 und 6 aber ist eine bemerkenswerte Verbesserung eingetreten. Den mittleren Fehlern bei Benutzung des gleichzeitigen Windes von ± 5.6 cm und ± 9.9 cm bei Ostende und ± 6.2 cm und ± 10.8 cm bei Zeebrügge stehen hier die Werte ± 4.5 cm und ± 7.7 cm bei Ostende und ± 4.6 cm und ± 8.8 cm bei Zeebrügge gegenüber,

so daß hierdurch der aus Betrachtung von Einzelbeispielen gezogene Schluß der Verspätung der Windwirkung auf die Erhöhung des Wasserspiegels an der Küste von etwa 3 Stunden gestützt wird.

Die gefundenen Werte für die Amplitude und die Phase zeigen keine grundsätzliche Abweichung von den bei Benutzung des gleichzeitigen Windes gefundenen.

Bemerkenswert ist, daß die mittleren Wasserstände der einzelnen Windstärkegruppen mit wachsender Windstärke zunehmen, wie ja auch schon bei Benutzung des gleichzeitigen Windes hervortrat. Die Mittel wachsen bei Ostende von 2.05 über 2.07, 2.08, 2.11, 2.13 bis 2.17 m und entsprechend bei Zeebrügge (vergl. Tabelle 8). Da bei der Berechnung dieser Mittel die Aufstau und Abtrieb bewirkenden Winde nicht nach Häufigkeit ihres Auftretens, sondern in gleicher Weise herangezogen sind, sollte bei allen Windstärkegruppen das gleiche Mittel erwartet werden. Es lag nahe, die Ursache des Wachsens der Wasserstandsmittel in den bei den einzelnen Windstärkegruppen herrschenden verschiedenen Luftdrucken zu suchen. Zur Feststellung der Beziehung wurde für jede Doppeltide der drei Jahre der mittlere Luftdruck aus den zu den Beobachtungsterminen der Deutschen Seewarte 8 h V, 2 h N, 7 h N abgelesenen und reduzierten Luftdrucken von Ostende bzw. Blankenberghe bestimmt. Diese Luftdruckmittel wurden wie oben die Wasserstandsmittel nach dem während eines drei Stunden früher gelegenen Zeitraumes herrschenden Winde geordnet und für jede Windrichtung und -stärke ein mittlerer Luftdruck bestimmt. Die für jede Windrichtung innerhalb einer Windstärkegruppe gefundenen Werte werden gemittelt. Die Mittelwerte des Luftdrucks zusammen mit den Wasserstandsmitteln der einzelnen Windstärkegruppen sind in folgender Tabelle gegeben. Um die Betrachtung nur auf Beobachtungen zu gründen, wurden die Windstärkegruppen 5 und 6 ausgeschieden.

Mittlerer Luftdruck und mittlerer Wasserstand bei den Windstärken
1—4 Beaufort.

Windstärke	1	2	3	4
mittlerer Luftdruck*)	762.89 mm	762.58 mm	761.41 mm	758.91 mm
mittl. Wasserstand Ostende.	2.046 m	2.067 m	2.080 m	2.108 m
" " Zeebrügge	2.096 m	2.111 m	2.119 m	2.148 m

*) in Ostende bzw. Blankenberghe.

Einer Luftdruckabnahme von 762.89 auf 758.91 mm von Windstärke 1—4 steht eine Erhöhung des mittleren Wasserspiegels von 2.046 auf 2.108 m bei Ostende gegenüber. Einer Luftdruckabnahme von 1 mm entspricht also eine Erhöhung des Wasserspiegels von 15.6 mm. In folgender Tabelle sind die sich aus den möglichen Kombinationen der einzelnen Windstärkegruppen ergebenden Werte für die Wasserstandsänderung bei 1 mm Luftdruckänderung gegeben.

verglichen wurden die Windstärkegruppen	Ostende mm	Zeebrügge mm
1 und 2	68	48
1 " 3	22.9	15.5
1 " 4	15.6	13.1
2 " 3	11.1	6.8
2 " 4	11.2	10.1
3 " 4	11.1	11.5

Der theoretische Wert für den Bereich der flandrischen Küste ist $\frac{13.6}{S}$; wird für das mittlere spezifische Gewicht des dortigen Meerwassers 1.026 angenommen, so ergibt sich, daß nach der Theorie 1 mm Luftdruckänderung 13.4 mm Wasserstandsänderung entsprechen müßten. Von diesem Wert weichen die Zahlen der ersten Zeile der Tabelle am meisten ab. Dies ist auch nicht verwunderlich. Wie aus obigen Werten des mittleren Luftdruckes der einzelnen Windstärkegruppen hervorgeht, nimmt der Luftdruck von der Windstärkegruppe 1 zu 2 nur sehr wenig ab. Ein kleiner Fehler des mittleren Luftdruckes bei Gruppe 1 oder 2, wie er bei der Kürze des zur Untersuchung zur Verfügung stehenden Zeitraumes zu erwarten ist, beeinflußt das Ergebnis stark; hinzu kommt, daß auch das Wasserstands-

mittel bei der Windstärkegruppe 1 unsicherer ist als bei den übrigen Windstärken, wofür besonders die sich bei Ausgleichung der für die einzelnen Richtungen dieser Gruppe gefundenen Wasserstandsmittel ergebenden unwahrscheinlichen Phase zeigt. Werden aus diesem Grunde die Werte der Windstärkegruppe 1 ganz ausgeschieden, so bleiben in obiger Tabelle die Werte der drei letzten Reihen. Als Mittel dieser Werte ergibt sich, daß nach dieser Betrachtung einer Luftdruckänderung von 1 mm eine Wasserstandsänderung von 10.3 mm entspricht.

In der zuletzt gegebenen Beziehung zwischen Wind und Wasserstand sind der Einfluß des Windes und Luftdrucks noch miteinander verquickt. Um die Wirkung des Windes möglichst rein zu erhalten, wurde der Luftdruckeinfluß eliminiert unter Benutzung des genannten sich aus der Theorie ergebenden Verhältnisses 1 mm Luftdruckänderung entspricht 13.4 mm Änderung der Höhe des Wasserspiegels. Die sich für die einzelnen Windrichtungen und -stärken nach Elimination des Luftdruckeinflusses ergebenden Wasserstandsmittel sind in Tabelle 9 gegeben. Durch Ausgleichung wurden für die Beziehungen zwischen Wind und mittlerem Wasserstand die folgenden Gleichungen gefunden.

Ostende.	Zeebrügge.
$h_\alpha - v_1 = 2,08 + 0,023 \cdot \sin(\alpha - 234^\circ)$	$h_\alpha - v_1 = 2,13 + 0,032 \cdot \sin(\alpha - 241^\circ)$
$h_\alpha - v_2 = 2,09 + 0,058 \cdot \sin(\alpha - 194^\circ)$	$h_\alpha - v_2 = 2,14 + 0,065 \cdot \sin(\alpha - 201^\circ)$
$h_\alpha - v_3 = 2,09 + 0,095 \cdot \sin(\alpha - 195^\circ)$	$h_\alpha - v_3 = 2,13 + 0,109 \cdot \sin(\alpha - 202^\circ)$
$h_\alpha - v_4 = 2,09 + 0,223 \cdot \sin(\alpha - 185^\circ)$	$h_\alpha - v_4 = 2,13 + 0,244 \cdot \sin(\alpha - 191^\circ)$
$h_\alpha - v_5 = 2,09 + 0,297 \cdot \sin(\alpha - 212^\circ)$	$h_\alpha - v_5 = 2,13 + 0,298 \cdot \sin(\alpha - 214^\circ)$
$h_\alpha - v_6 = 2,09 + 0,379 \cdot \sin(\alpha - 204^\circ)$	$h_\alpha - v_6 = 2,12 + 0,394 \cdot \sin(\alpha - 206^\circ)$

Die übrigbleibenden Fehler v und die mittleren Fehler finden sich ebenfalls in Tabelle 9.

Wichtig ist zunächst, daß die Mittel der Wasserstandswerte in den einzelnen Windstärkegruppen annähernd gleich sind. Die Annahme, daß die vor Berücksichtigung des Luftdruckeinflusses bestehenden Unterschiede vom Luftdruck herrühren, wird hierdurch gestützt und damit auch die auf diese Annahme gegründete Rechnung.

Amplituden und Phasen seien mit den durch die beiden ersten Ausgleichungen gefundenen verglichen. In Tabelle 10 sind die sämtlichen Werte zusammengestellt.

Die Amplituden von Zeebrügge sind mit Ausnahme eines Falles bei Windstärke 1 in allen Fällen größer als die von Ostende. Es bewirkt offenbar gleicher Wind in Zeebrügge entweder größeren Aufstau oder Abtrieb oder aber beides als in Ostende. Näher lassen sich die Verhältnisse überblicken, wenn die nach dem 3 Stunden vorher herrschenden Wind geordneten und vom Luftdruckeinfluß befreiten Werte des mittleren Wasserstandes von Ostende und Zeebrügge verglichen werden. Die Bildung der Differenzen Zeebrügge minus Ostende ergibt folgendes:

Im Mittel ist bei den Winden:	der Wasserstand in Zeebrügge höher als in Ostende um:
NNO bis O	4.4 cm
OSO bis S	2.4 cm
SSW bis W	3.4 cm
WNW bis N	5.0 cm

nach Norden um. Im Innern der so gebildeten flachen Bucht werden hineinwehende Winde einen größeren Aufstau bewirken als nach den Rändern der Bucht hin. Bei dem östlicher als Ostende gelegenen Zeebrügge ist dies auch der Fall.

Die Phasen von Zeebrügge sind in allen Fällen größer als in Ostende, im Mittel etwa 5° . Die Ursache dürfte sein, daß die Küste, die bei Ostende nach $N 55^\circ O$ verläuft, westlich Zeebrügge etwas nach Ost biegt und bei Zeebrügge nach $N 69^\circ O$ verläuft, infolgedessen wird der maximale Windstau

Die Ursache dafür, daß insbesondere die WNW- bis N-Winde den Wasserspiegel in Zeebrügge höher emportreiben als in Ostende, liegt im Verlaufe der flandrischen und holländischen Küste. Die in Flandern etwa nach $N 60^\circ O$ verlaufende Umrandung der südlichen Nordsee biegt in Holland scharf

Tabelle 9.

Abhängigkeit des mittleren Wasserstandes vom 3 Stunden vorher herrschenden Wind nach Ausschaltung des Luftdruckeinflusses (1 mm Luftdruckänderung entspricht 13.4 mm Wasserstandsänderung.)

1. Ostende 1915 — 1918.

Windstärke Beauf.	mittlerer Wasserstand in m						nach Ausgleichung übrigbleibende Fehler ν (B.-R.) in cm					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Windrichtung												
N	2.01	2.11	2.14	2.09	2.19	2.14	-9	+1	+2	-2	-6	-10
NNO	2.11	2.08	2.15	2.06	2.07	2.12	+2	0	+7	+4	-7	+3
NO	2.11	2.05	2.03	1.96	2.05	2.00	+3	-1	-1	+1	+3	+5
ONO	2.08	2.04	1.96	1.84	(1.91)	1.88	0	0	-5	-5	-1	+5
O	2.10	2.08	1.94	1.67	(1.86)	(1.77)	+3	+5	-5	-20	+2	+3
OSO	2.07	2.01	1.99	1.97	(1.81)	(1.72)	+1	-2	0	+9	+2	+1
SO	2.05	2.05	2.08	2.04	(1.80)	(1.71)	-1	+1	+8	+12	0	-2
SSO	1.99	2.06	2.00	2.00	1.84	(1.75)	-7	+1	-3	+1	-1	-6
S	2.06	2.08	2.11	2.10	1.88	1.94	0	0	+5	+3	-5	0
SSW	2.04	2.09	2.12	2.13	2.08	2.04	-3	-1	+2	-3	+4	-5
SW	2.11	2.12	2.13	2.18	2.21	2.37	+3	0	-1	-5	+5	+15
WSW	2.11	2.15	2.16	2.28	2.28	2.35	+3	+1	-1	-1	+2	0
W	2.09	2.15	2.13	2.25	2.22	2.37	0	0	-6	-6	-12	-7
WNW	2.13	2.16	2.19	2.26	2.35	2.44	+3	+1	0	-4	-4	-3
NW	2.08	2.13	2.14	2.40	2.48	2.60	-2	-1	-4	+14	+10	+15
NNW	2.10	2.13	2.19	2.22	2.41	2.28	0	0	+4	+3	+8	-9
Mittel	2.08	2.09	2.09	2.09	2.09	2.09	—	—	—	—	—	—
mittl. Abweichung vom Mittel bezw. mittlerer Fehler in cm	±3.8	±4.3	±7.9	±17.6	±21.7	±27.7	±3.5	±1.5	±4.1	±7.8	±5.6	±7.2

2. Zeebrügge.

N	2.09	2.18	2.19	2.14	2.21	2.17	-7	+2	+2	-4	-9	-12
NNO	2.18	2.12	2.19	2.12	2.16	2.18	+3	-2	+6	+4	-3	+4
NO	2.14	2.09	2.08	2.02	2.02	2.08	+0	-3	-1	+2	+2	+9
ONO	2.15	2.09	2.02	1.90	(1.94)	1.82	+2	-1	-3	-3	-3	-4
O	2.17	2.12	2.00	1.66	(1.90)	(1.80)	+5	+4	-3	-21	+2	+3
OSO	2.12	2.05	1.99	2.02	(1.85)	(1.76)	+1	-3	-3	+15	+1	+3
SO	2.09	2.09	2.06	2.05	(1.84)	(1.75)	-1	0	+3	+12	+1	0
SSO	2.00	2.08	2.05	1.98	1.84	(1.79)	-10	-2	0	-2	-4	-4
S	2.11	2.12	2.13	2.12	1.93	1.94	+1	0	+4	+4	-3	-1
SSW	2.09	2.13	2.15	2.15	2.10	2.02	-2	-1	+2	-3	+3	-8
SW	2.12	2.15	2.16	2.21	2.22	2.37	0	-1	-1	-5	+3	+12
WSW	2.15	2.20	2.21	2.32	2.34	2.43	+2	+2	0	-1	+5	+5
W	2.19	2.21	2.19	2.32	2.25	2.39	+3	+1	-4	-7	-13	-8
WNW	2.21	2.21	2.23	2.37	2.38	2.53	+6	+1	-1	-2	-4	+2
NW	2.12	2.18	2.21	2.46	2.52	2.64	-4	-1	-2	+13	+9	+15
WNW	2.12	2.18	2.23	2.25	2.44	2.32	-4	0	+2	-1	+6	-9
Mittel	2.13	2.14	2.13	2.13	2.13	2.12	—	—	—	—	—	—
mittl. Abweichung vom Mittel bezw. mittlerer Fehler in cm	±4.7	±4.9	±8.2	±19.2	±21.8	±28.8	±4.1	±1.9	±2.8	±8.4	±5.5	±7.5

Tabelle 10. Durch die drei Ausgleichungen gefundenen Amplituden und Phasen.

Beziehung zw. Wasserstand und:	Windstärke	Amplitude in cm						Phase						Mittel von 2—6
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	
Ostende	1. gleichzeitigem Wind	3.3	4.7	11.3	20.7	29.6	44.1	156°	172°	165°	177°	192°	190°	179°
	2. Wind 3 Stunden vorher..	1.8	4.8	9.2	19.8	27.0	39.9	147°	175°	166°	172°	197°	195°	181°
	3. desgl. nach Eliminierung des Luftdruckeinflusses ..	2.3	5.8	9.5	22.3	29.7	37.9	234°	194°	195°	185°	212°	204°	198°
Zeebrügge	1. gleichzeitigem Wind	3.5	4.9	11.5	23.3	32.1	44.5	170°	178°	175°	181°	196°	191°	184°
	2. Wind 3 Stunden vorher..	1.3	5.3	9.9	21.4	26.8	41.2	210°	184°	176°	179°	199°	197°	187°
	3. desgl. nach Eliminierung des Luftdruckeinflusses ..	3.2	6.5	10.9	24.4	29.8	39.4	241°	201°	202°	191°	214°	206°	203°

auch bei einem etwas nördlicherem Winde zu erwarten sein, wie es auch die gefundenen Phasen wenigstens dem Sinne nach andeuten. Statt der zu erwartenden 14° Phasendifferenz wurden allerdings nur 5° gefunden.

Bei dem genannten Verlauf der belgischen Küste sollte ohne Berücksichtigung der Ablenkung infolge der Erdrotation der maximale Aufstau in Ostende bzw. Zeebrügge bei dem Winde senkrecht auf die Küste also bei N 35°W bzw. N 21°W erwartet werden. Nach der durch zahlreiche Tatsachen erhärteten Ekmanschen Theorie¹⁸⁾ wird die durch den Wind verursachte Wasserbewegung auf der Nordhalbkugel gegen die Richtung des Windes um 45° nach rechts abgelenkt. Danach müßte der maximale Windstau durch die Winde aus N 80°W bzw. N 66°W verursacht werden und bei der Darstellung der Abhängigkeit des Wasserstandes vom Winde müßten Phasen von 190° bzw. 204° gefunden werden. Die nach Eliminierung des Luftdruckeinflusses auf den mittleren Wasserstand mit dem drei Stunden vorher wehenden Wind aufgestellte Beziehung stellt die Windwirkung am reinsten dar. Wird die für Windstärke 1 gefundene Phase aus den bereits angeführten Gründen ausgeschieden, so ergeben sich als Mittel der Phasen bei den Windstärken 2—6 bei Ostende 198°, bei Zeebrügge 203°. Die Übereinstimmung mit den aus der Überlegung folgenden Werten ist recht gut. Es würde sich aus den gefundenen Phasen eine Ablenkung durch die Erdrotation von 37° bzw. 46° ergeben. Allerdings hängt die Phase außer von der Ablenkung infolge der Erdrotation auch von der Gestaltung der Umrandung des ganzen Meeresgebietes ab, man wird also die Werte 37° und 46° nicht ohne weiteres mit dem theoretischen Wert von 45° vergleichen können. Wohl aber läßt sich unter Berücksichtigung der Tatsache, daß wir es hier mit einer auf weite Erstreckung hin in gleicher Richtung verlaufenden Küste zu tun haben, sagen, daß der bei der Ablenkung der durch den Wind erzeugten Wasserbewegungen auftretende Ablenkungswinkel in der Größenordnung mit dem theoretischen Wert übereinstimmt. —

Da die Wirkung des Windes mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zunimmt, müßten insbesondere nach Elimination des Luftdruckeinflusses die Amplituden der Wasserstandsschwankungen der Gleichung $v^2 = c \cdot A$ genügen. Eine Berechnung der Konstante c nach dieser Formel aus allen drei aufgestellten Gleichungssystemen ergibt die in folgender Tabelle angeführten Werte.

Berechnung der Konstante c aus der Gleichung $v^2 = c \cdot A$. v in m/sec. A in cm.

Windstärke	Ostende						Mittel von 2—6	Zeebrügge						Mittel von 2—6
	1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6	
1. gleichzeitiger Wind ..	0.9	2.0	2.0	2.2	2.6	2.6	2.3±0.3	0.8	2.0	2.0	1.9	2.4	2.6	2.2±0.3
2. Wind 3 Stunden vorher	1.6	2.0	2.5	2.3	2.9	2.9	2.5±0.3	2.2	1.8	2.3	2.1	2.9	2.8	2.4±0.4
3. desgl. nach Elimination des Luftdruckeinflusses	1.3	1.7	2.4	2.0	2.6	3.0	2.3±0.5	0.9	1.5	2.1	1.8	2.6	2.9	2.2±0.5

¹⁸⁾ vergl. Ekman, Beiträge zur Theorie der Meeresströmungen. Annalen der Hydrographie usw. 1906.

Werden die für die Windstärke 1 gewonnenen Werte aus den bereits oben genannten Gründen ausgeschieden, so ist die Übereinstimmung der übrigen Werte innerhalb jeder Ausgleichung hinreichend. Es lassen sich demnach angenähert die Amplituden jeder Ausgleichung durch die Formel $A = \frac{v^2}{c}$ darstellen, wenn für c das arithmetische Mittel der für die Windstärken 2—6 berechneten c -Werte genommen wird. Bei Benutzung der in Tabelle 10 angeführten Mittel der Phasen für die Windstärken 2—6 ergeben sich dann folgende Beziehungen:

1. Abhängigkeit des mittleren Wasserstandes einer Doppeltide vom gleichzeitig herrschenden Winde.

a) Ostende $h_\alpha = 213 + c_v + \frac{v^2}{2.3} \cdot \sin(\alpha - 179^\circ)$ in cm.

b) Zeebrügge $h_\alpha = 217 + c'_v + \frac{v^2}{2.2} \cdot \sin(\alpha - 184^\circ)$ in cm.

Windstärke	1	2	3	4	5	6	Beaufort
Ostende c_v	-8	-5	-5	-3	-2	+3	
Zeebrügge c'_v	-8	-5	-5	-4	-3	+3	

2. Abhängigkeit des mittleren Wasserstandes einer Doppeltide vom drei Stunden früher herrschenden Winde.

a) Ostende $h_\alpha = 213 + c_v + \frac{v^2}{2.5} \cdot \sin(\alpha - 181^\circ)$ in cm.

b) Zeebrügge $h_\alpha = 217 + c'_v + \frac{v^2}{2.4} \cdot \sin(\alpha - 187^\circ)$ in cm.

Windstärke	1	2	3	4	5	6	Beaufort
Ostende c_v	-8	-6	-5	-2	0	+4	
Zeebrügge c'_v	-7	-6	-5	-2	-1	+3	

3. Abhängigkeit des mittleren Wasserstandes einer Doppeltide vom drei Stunden früher herrschenden Winde nach Ausschaltung des Luftdruckeinflusses.

a) Ostende $h_\alpha = 209 + \frac{v^2}{2.3} \cdot \sin(\alpha - 198^\circ)$

b) Zeebrügge $h_\alpha = 213 + \frac{v^2}{2.2} \cdot \sin(\alpha - 203^\circ)$

α ist wie bisher von Nord = 0 über Ost gerechnet, v in m/sec.

Werden nach diesen Formeln die bei den einzelnen Windrichtungen und -stärken auftretenden Wasserstände berechnet und mit den in Tab. 7, 8, 9 angegebenen Beobachtungen verglichen, so ergeben sich für die einzelnen Windstärkegruppen folgende mittlere Fehler:

Berechnung durchgeführt nach Formel	1	2	3	4	5	6 Beaufort	mittl. Fehler von 1—6
1. a)	±2.7	±2.9	±4.8	±5.9	±8.0	±12.7	±7.1 cm
b)	±2.9	±2.9	±4.1	±6.5	±8.3	±12.5	±7.1 "
2. a)	±2.8	±3.6	±5.5	±6.6	±7.5	±11.7	±6.9 "
b)	±2.6	±3.7	±3.8	±7.4	±7.9	±11.1	±6.8 "
3. a)	±3.7	±1.9	±4.1	±8.7	±8.4	±11.5	±7.2 "
b)	±4.6	±2.5	±3.0	±9.5	±7.8	±11.6	±7.3 "

Alle drei Methoden haben somit annähernd gleiche Genauigkeit. Eine günstigere Darstellung des mittleren Wasserstandes ist zu erwarten, wenn außer der Abhängigkeit vom lokalen Wind und Luftdruck auch die Abhängigkeit von der Luftdruckverteilung im weiteren Bereiche herangezogen wird, was in diesem Falle aus dem auf S. 20 genannten Grunde ausgeschlossen war.

7. Zusammenstellung der Ergebnisse.

1. Die jährliche Schwankung des mittleren Wasserstandes nimmt sowohl in den Einzeljahren wie im Gesamtmittel 1915/18 von der flandrischen nach der holländischen Küste zu. (S. 13.)
2. Die halbjährliche Periode des mittleren Wasserstandes, die in der östlichen Ostsee die Jahresperiode weit überragt und in der westlichen Ostsee und der Nordsee von Osten nach Westen immer mehr zurücktritt, verschwindet an der flandrischen Küste fast völlig. (S. 13.)
3. Während des Zeitraumes 1915/18 haben auch eine drittel- und vierteljährliche Periode Bedeutung. (S. 13.)
4. Die Abhängigkeit des mittleren Wasserstandes von Ostende und Zeebrügge vom gleichzeitigen Wind wird durch Gleichungen dargestellt. (S. 16.)
5. Die Wirkung des Windes am Ort auf den Wasserstand zeigt eine von der Wetterlage abhängige wechselnde Verspätung; als Mittel läßt sich eine Verspätung von drei Stunden annehmen. (S. 16—19.)
6. Wird die Abhängigkeit des mittleren Wasserstandes von Ostende und Zeebrügge vom drei Stunden vorher herrschenden Wind durch Gleichungen dargestellt. (S. 20.)
7. Einer Luftdruckänderung von 1 mm entspricht eine Wasserstandsänderung von 10.3 mm. (S. 23.)
8. Wird die Abhängigkeit des mittleren Wasserstandes von Ostende und Zeebrügge vom 3 Stunden vorher herrschenden Wind nach Eliminierung des Luftdruckeinflusses auf den Wasserstand durch Gleichungen dargestellt. (S. 23.)
9. Zeebrügge hat bei aufstauenden Winden infolge des Küstenverlaufes größeren Aufstau als Ostende. (S. 23.)
10. Bei der Wirkung des Windes auf den Wasserstand zeigt sich eine Ablenkung nach rechts infolge der Erdrotation. (S. 25.)
11. Aus dem Beobachtungsmaterial geht hervor, daß die Windwirkung annähernd mit dem Quadrat der Windgeschwindigkeit zunimmt. (S. 26.)
12. Werden für Ostende und Zeebrügge Gleichungen aufgestellt, in denen der mittlere Wasserstand als Abhängige auftritt von Richtung und Stärke 1. des gleichzeitigen Windes, 2. des 3 Stunden vorher herrschenden Windes, 3. desgleichen, aber nach Ausschaltung der Wirkung des Luftdrucks auf den Wasserspiegel. (S. 26.)

Höhe des Mittelwassers in m

Nr. 1

Mittelwasser zu Ostende nach Lattenpegelablesungen 15.-20. Juli 1915

Die Werte d. mittl. Wasserstandes gelten

1 für einen Zeitraum v. 24 Std. berechn. aus 25 stündl. Werten
 2 " " " 25 " " 26 " "
 3 " " vollen Tidentag " " 24 tide stündl. "

$$h_m = \frac{1}{24} (h_0 + h_1 + h_2 + \dots + h_{23} + \frac{h_{24}}{2})$$

$$h_m = \frac{1}{25} (h_0 + h_1 + h_2 + \dots + h_{24} + \frac{h_{25}}{2})$$

$$h_m = \frac{1}{24} (h_0 + h_1 + h_2 + \dots + h_{23})$$

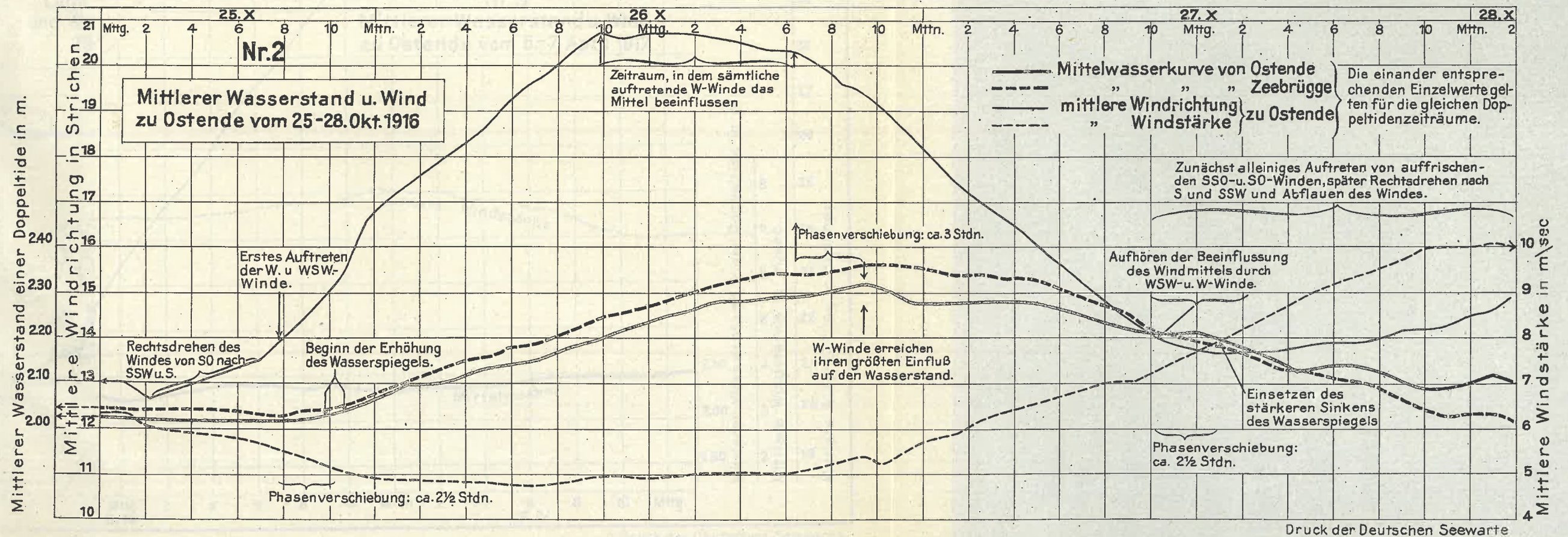
Windrichtung in Strichen

Windstärke

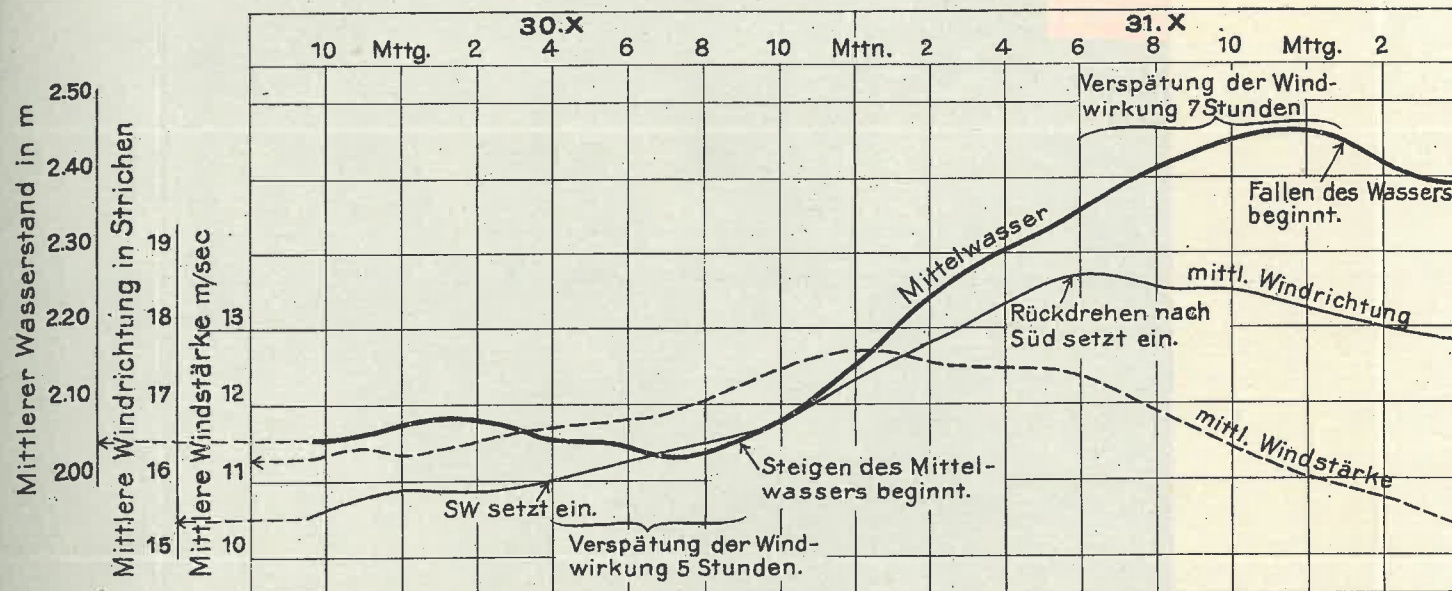
Die Windbeobachtungen sind im Abstände von 3 Stunden erfolgt.

Windrichtung zu Ostende 15.-20. Juli 1915

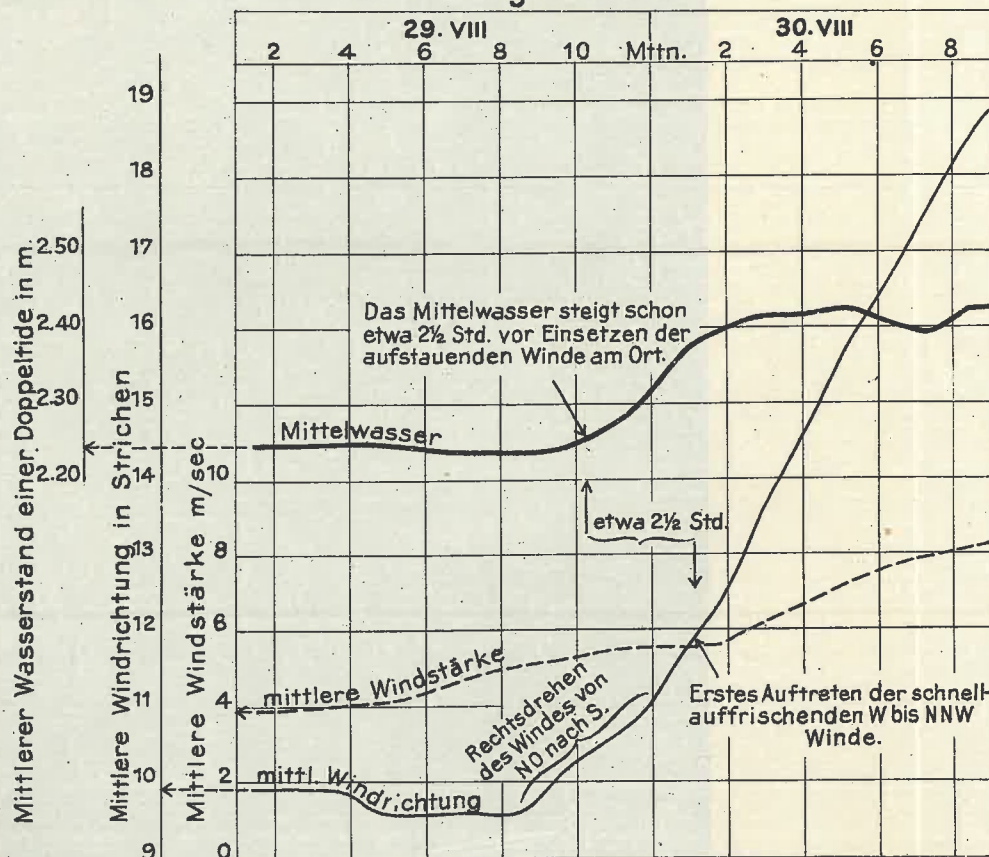
Windstärke in Beaufort



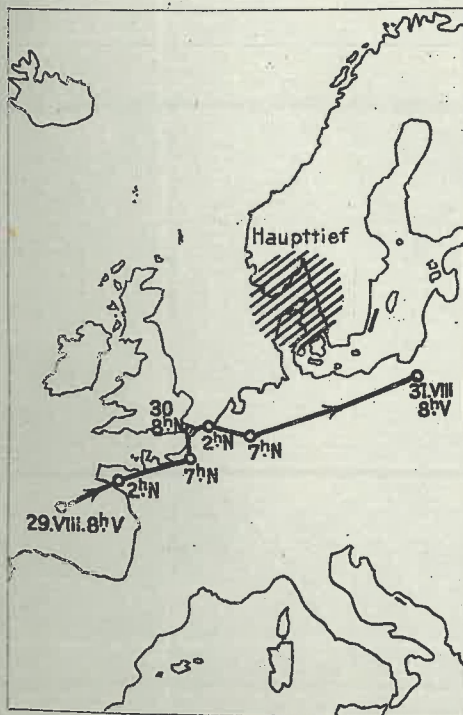
Nr. 2
Mittlerer Wasserstand u. Wind zu Ostende
am 30. u. 31. Okt. 1916.



Nr. 4
Mittlerer Wasserstand u. Wind zu Ostende
während des Vorüberganges eines Tiefs an der flandrischen Küste
29.-31. August 1916.

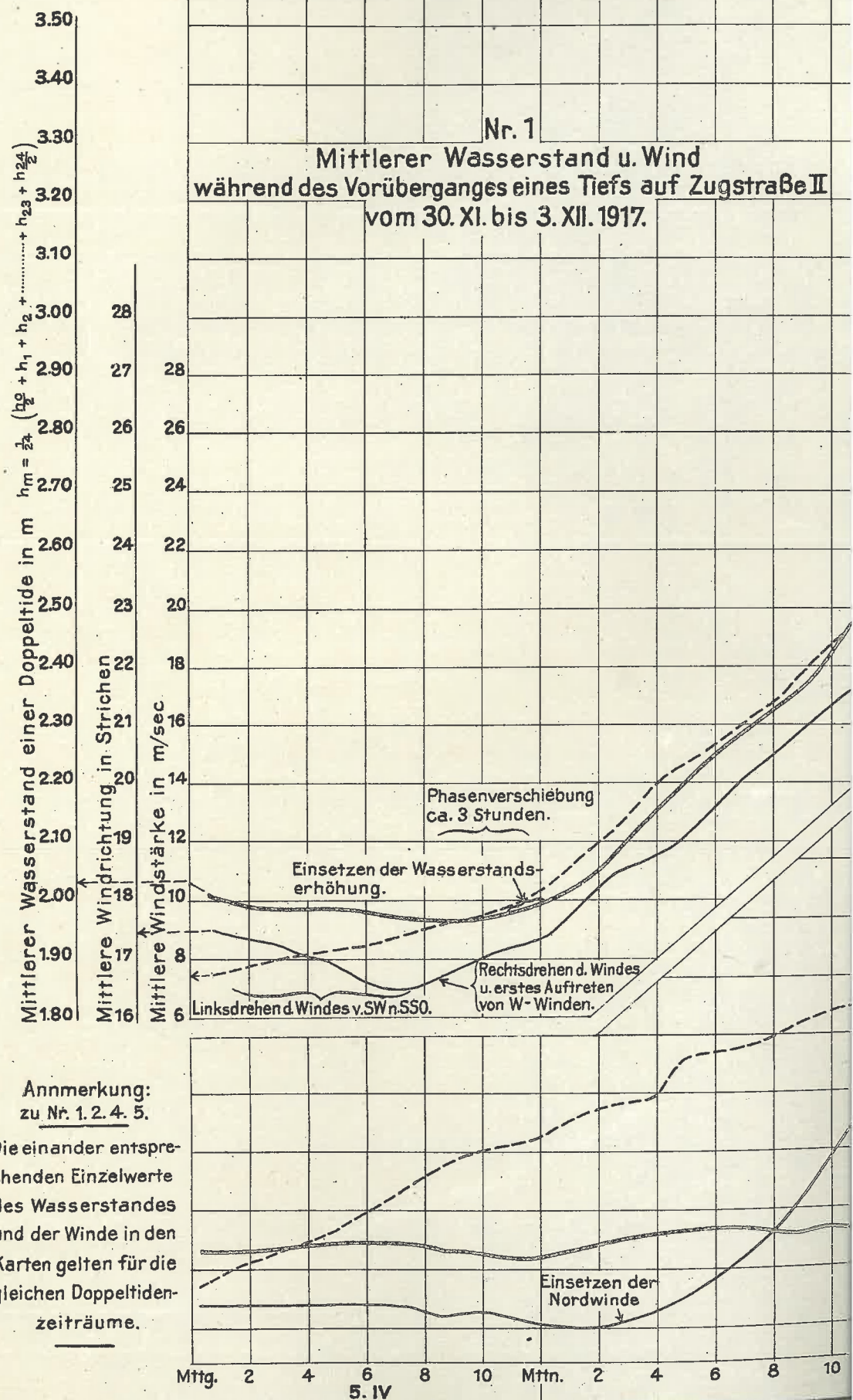


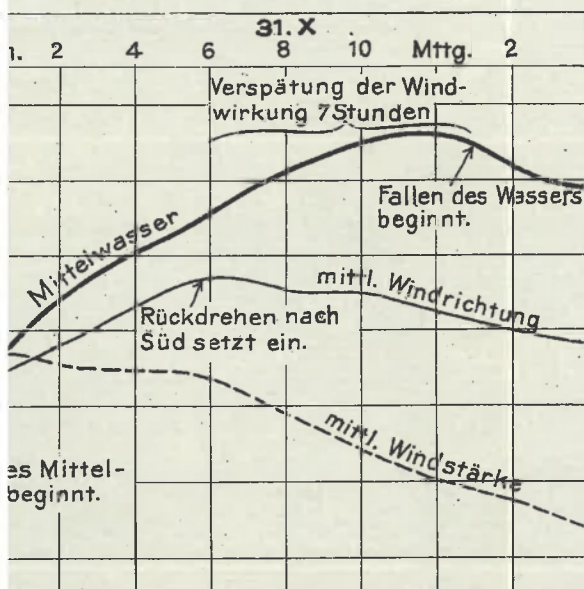
Nr. 3
Lage des Haupttiefs
und Weg des Teiltiefs am
29.-31. VIII. 1916.



30. XI 8 10 Mittg. 2 4 6 8 10 1. XII Mittg. 2 4 6

Nr. 1
Mittlerer Wasserstand u. Wind
während des Vorüberganges eines Tiefs auf Zugstraße II
vom 30. XI. bis 3. XII. 1917.





Nr. 4
erstand u. Wind zu Ostende
es eines Tiefs an der flandrischen Küste
31. August 1916.

