

Tiden und Sturmfluten in der Elbe und ihren Nebenflüssen

Die Entwicklung von 1950 bis 1997 und ihre Ursachen

Von WINFRIED SIEFERT

Zusammenfassung

Gegenstand der Betrachtungen ist der Tidebereich der Elbe von Geesthacht bis See einschl. ihrer Nebenflüsse (Kap. 2), wobei das Schwergewicht auf den Jahresmittelwerten der Wasserstände liegt. Die Arbeit ist in drei Hauptteile gegliedert:

- Die Schilderung der Entwicklung von Wasserständen, Windstau und Strömungen von 1950 bis 1997 liegt in zahlreichen Tabellen und Graphiken vor (Kap. 3 sowie Abb. 8 bis 42). Dabei sind Informationen über Strömungen deutlich spärlicher als über Wasserstände.
- Wie die Entwicklung in diesen Jahren mit den starken Veränderungen (Zunahme des Tidehubes, Erhöhung der Sturmfluten, Beschleunigung des Einlaufes usw.) zu beurteilen ist, wird in Kap. 4 und Abb. 43 bis 58 dargelegt. Dabei werden die Einflüsse aus den verschiedenen Maßnahmen belegt und zugleich überschlägige Berechnungsmethoden vorgestellt (und in Kap. 4.8 und 4.9 erläutert), die es erlauben, ohne großen Aufwand auch die Wirkung künftiger Eingriffe abzuschätzen.
- Die heutigen Verhältnisse (1991/97) werden in Tabelle und Graphiken skizziert (Kap. 5 und Abb. 59 bis 62). Dabei ist der Text bewußt sehr knapp gehalten, um Bildbeschreibungen zu vermeiden.

Als generelle Aussagen von besonderer Bedeutung wurden herausgearbeitet:

- Menschliche Eingriffe vornehmlich zwischen Stadersand und Brunsbüttel haben sich stark auf das Tideregime ausgewirkt, weniger dagegen diejenigen oberhalb von Stadersand.
- Künstliche und natürliche Veränderungen im Elbebereich bis Cuxhaven wirken ebenfalls, aber schwächer.
- Topographische Variationen unterhalb Cuxhavens sind für die Tide in der Elbe unbedeutend.
- Auf alle Veränderungen hat die Tide auf dem Weg von Glückstadt bis Blankenese am stärksten reagiert.
- Die größten Wasserstandsänderungen finden sich im Raum Hamburg.

Summary

The development of the tidal estuary of the Elbe in Germany with its tributaries is presented. The investigation concentrates on the annual average of tidal high water (MThw) and low water (MTnw) at various gauges. There are three main chapters:

- The variations of water levels, current velocities and storm surges from 1950 to 1997 are presented in several tables and graphs (No. 8 to 42 in chapter 3). Information about currents is distinctly more sparse than about other data.
- The remarkable variations within these 5 decades (i.e. increase of tidal range, higher storm tides, acceleration of the incoming tides etc.) are discussed and explained in chapter 4. The influences of various man-made and natural changes in topography can be identified and quantitatively defined (chapter 4.8 and 4.9).
- The actual conditions (1991/97) are presented in chapter 5 and fig. 59 to 62.

Some of the main results are:

- Anthropogenic changes between Stadersand and Brunsbüttel (see fig. 2) were most important for tidal regime variations.
- Artificial and natural changes downstream Brunsbüttel to Cuxhaven and upstream to Geesthacht were of minor influences.

- Topographical variations downstream Cuxhaven (the „entrance“ of the estuary) are negligible concerning tides in the Elbe.
- The strongest tidal reaction occurred between Glückstadt and Blankenese (Hamburg).
- The largest water level changes happened in the Hamburg area.

I n h a l t

1. Veranlassung.....	3
2. Übersicht	3
2.1 Tidegebiet der Elbe mit Meßstationen	3
2.2 Untersuchungsgebiete der Nebenflüsse und bisheriger Wissensstand	8
2.2.1 Einzugsgebiete und Abflüsse.....	8
2.2.2 Tidegrenzen.....	9
2.3 Hydrologische Parameter	11
2.4 Zum Unschärfbereich von Nachweis und Erfahrung	16
3. Änderungen mittlerer Tidewasserstände seit 1950.....	16
3.1 Rückblick bis 1900	16
3.2 Tidewasserstände Elbe	22
3.3 Tideströmungen Elbe	39
3.4 Sturmfluten, Windstau Elbe	42
3.5 Tidewasserstände Nebenflüsse	46
3.5.1 Ilmenau	46
3.5.2 Seeve.....	50
3.5.3 Este.....	53
3.5.4 Lühe.....	53
3.5.5 Schwinge	55
3.5.6 Pinnau	55
3.5.7 Krückau	59
3.5.8 Stör.....	60
3.5.9 Oste	64
4. Ursachen für die Veränderungen in der Elbe von 1950 bis 1997.....	68
4.1 Eingriffe in die Rinne der Elbe	68
4.1.1 Einflüsse aus Fahrrinnenbaggerungen und Hamburger Hafenflächen auf den Thb in Hamburg	70
4.1.2 Einflüsse aus Querschnittserweiterungen auf die Thw und HThw.....	71
4.1.3 Einflüsse der Fahrrinnen-Ausbauten auf die Jahres-MThw- und MTnw-Differenzen zu Cuxhaven.....	72
4.2 Randgebiete, Häfen	78
4.3 Hochwasserschutz	78
4.4 Oberwasserzufluß.....	83
4.5 Meeresspiegelvariationen	83
4.6 Hydrologisch-morphologischer Nachlauf.....	86
4.7 Auslösende Faktoren für die Niedrigwasserentwicklungen in der Unterelbe nach 1980.....	88
4.7.1 Veränderungen	88
4.7.2 Quantifizierung der MTnw-Absenkung in den Teilbereichen.....	99
4.8 Zusammenfassende Erläuterung der Veränderungen der Wasserstände in der Elbe ..	100
4.9 Wirkungen auf die Hydrologie der Nebenflüsse.....	103
5. Verhältnisse 1991/1997.....	108
6. Danksagung.....	108
7. Schriftenverzeichnis	114

1. Veranlassung

Im Rahmen der Umweltverträglichkeitsuntersuchung (UVU) für das Projekt „*Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe*“ wurden sehr umfangreiche und aufwendige Untersuchungen durchgeführt, um die Wirkungen des geplanten Fahrrinnenausbaus auf hydromechanische Kenngrößen, wie etwa Tidewasserstände und Strömungen, für den Tidebereich der Elbe zu ermitteln. Sie wurden von der Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste (BAW/AK), vorgenommen. Die Ergebnisse, die an dieser Stelle nicht diskutiert werden, liegen in Form mehrerer Gutachten vor, so auch zu den ausbaubedingten Änderungen in der Elbe und den Elbnebenflüssen (BAW/AK, 1996, 2 Berichte).

Das Prinzip einer Umweltverträglichkeitsuntersuchung besteht darin, auf Grundlage des sogenannten „Ist-Zustands“, das ist der Zustand der (belebten und unbelebten) Umwelt unmittelbar vor einer Baumaßnahme, die ausbaubedingten Veränderungen einzelner Systemparameter zu ermitteln und zu prognostizieren. So beschreiben die Gutachten der Bundesanstalt für Wasserbau dementsprechend den hydrologischen Zustand des Elbeästuars unmittelbar vor und unmittelbar nach dem geplanten Fahrrinnenausbau. Um prognostizierte Änderungsbeträge der Tidedynamik bewerten, interpretieren und „einordnen“ zu können, ist es von großer Wichtigkeit, vorab die hydrologische Entwicklung des Raumes über einen mehrere Jahrzehnte langen Zeitraum vor Beginn einer Maßnahme zu betrachten und aufzuzeigen. Insbesondere für die Tideelbe und ihre Nebenflüsse ist dies von großem Interesse, da vor allem nach dem zweiten Weltkrieg eine Vielzahl menschlicher Eingriffe, z. B. in Form von Fahrrinnenvertiefungen und Deichbauten, in das System „Elbe“ stattfanden, die das Bild dieses Raumes bis heute prägen.

Eine zusammenfassende Darstellung neuerer Datums über diese Entwicklung steht seit längerem aus. So boten die geschilderten Notwendigkeiten die Möglichkeit, die Entwicklung in der zweiten Hälfte des auslaufenden Jahrhunderts darzustellen und Lehren (und über-schlägige Berechnungsmethoden) daraus zu ziehen. Die vorliegende Arbeit wurde nach vier im Amt Strom- und Hafengebäude Hamburg – in Absprache mit dem Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg – erstellten Studien gefertigt. Es wird ein Versuch vorgelegt, eine Grundlage für weitere Überlegungen und Erkenntnisse der nächsten Jahre zu erstellen, entwickelt nach 35 Jahren Beschäftigung mit der Elbe auf der Basis der dabei gesammelten Erfahrungen.

2. Übersicht

2.1 Tidegebiet der Elbe mit Meßstationen

Das in diesem Kapitel vorgestellte Gebiet umfaßt den Tidebereich der Elbe selbst ohne ihre Nebenflüsse. Es reicht also von der oberen Grenze am Wehr Geesthacht mit der oberen Tideelbe bis zum Stromspaltungsgebiet in Hamburg, mit der Unterelbe bis Cuxhaven und der Außenelbe bis zur Nordsee. Hier wird üblicherweise Cuxhaven als Eingangspegel in das Ästuar verwendet. Für besondere Untersuchungen wird aber auch die Außenelbe bis zum Großen Vogelsand mit eingebunden, und es ist sogar ratsam, in gewissen Fällen Helgoland einzubeziehen.

Hinsichtlich der aus der Deutschen Bucht einlaufenden Tide wird immer wieder die Frage aufgeworfen, ob Cuxhaven der den Nordseeeinfluß repräsentierende Mündungspegel für die Elbe ist oder ob seine Daten durch Veränderungen in der Elbe beeinflusst sind. Dazu werden die folgenden Betrachtungen angestellt:

Wenn Ausbauten und Eindeichungen in Cuxhaven Einflüsse gehabt hätten, dann als höhere Thw und niedrigere Tnw, letztere mit größerem Betrag und folglich sinkendem Meeresspiegel (MSL). Nun sind aber die $MThw_{CUX}$ überproportional zum $MTnw_{CUX}$ -Abfall angestiegen, wenn man Helgoland als elbunabhängige Referenz nimmt. Meteorologische Einflüsse müssen dafür maßgebend gewesen sein. Der MSL hat sich von 1925 bis 1990 in Cuxhaven denn auch genauso geändert wie in Helgoland, Norderney, Roter Sand/Alte Weser, List und Wilhelmshaven, aber anders als in Bremerhaven und Büsum. Das spricht gegen Elbeeinfluß in Cuxhaven.

Dies alles verlangt keinen Verzicht auf Cuxhaven als Mündungspegel. Unterstützend ist eine Arbeit von NIEMEYER (1994) im Rahmen der Beweissicherung zum 13,5-m-Ausbau der Elbe interessant: Über Doppelsummenkurven mit Ausgangspegel Helgoland scheint sich für Cuxhaven zwar eine „elbspezifische Beeinflussung“ zu ergeben. Die klingt allerdings stromauf bis Otterndorf fast ganz ab, was widersinnig wäre, wenn es sich um eine solche Beeinflussung handelte. Dazu stellten schon FÜHRBÖTER/PARTENSKY 1982 fest:

„Weiterhin bewirkt die Erhöhung des mittleren jährlichen Tidehubes von 1972 bis 1980 um 9 % am Pegel Borkum, 7 % am Pegel Bremerhaven und 9 % am Pegel Cuxhaven nach dem Gesetz von O'BRIEN Ausräumungseffekte, die zufällig sich gerade in der Zeit einstellen, als vor allem an der Weser und Elbe die großen Ausbaumaßnahmen stattfanden. Daraus geht hervor, daß die Werte zum Teil auch als mittelbare Folge dieser anomalen Vergrößerung der Tidehübe an den Mündungspegeln anzusehen sind. Wie groß dieser Anteil ist, kann quantitativ nicht angegeben werden, auch kann nicht vorausgesagt werden, welche Entwicklung die Tidehübe an der Küste in der Zukunft nehmen werden.“

Seitlich reicht das Gebiet bis an die Hochwasserschutzanlagen bzw. die Steilufer. Unterhalb von Cuxhaven kann es anhand einer Synthese aus topographischen und hydrologischen Parametern abgegrenzt werden:

Deutliche Hinweise geben zunächst die *Wattwasserscheiden* des Neuwerk/Scharhörner Wattkomplexes im Westen sowie der Marner Plate und des Hakensandes im Norden. Diese Watten werden allerdings bei höheren Tidewasserständen überströmt. Also muß auch die Kommunizierung der Elbe mit benachbarten Rinnen beachtet werden. Dies kann auf zweierlei Art erfolgen. Zum einen sind die *Linien gleicher Wasserstände* der ein- und auslaufenden Tide von Bedeutung, da solche Wattwasserscheiden dann als Systemgrenzen anzusehen sind, wenn sie etwa orthogonal zum Wasserstandsgefälle und zugleich etwa parallel zur Elberinne verlaufen. Außerdem sollte der *Reststrom* über die Wattwasserscheide möglichst gering sein. (Daß die Triftstromverhältnisse bei Sturmfluten grundsätzlich anders sind, ist bei dieser Betrachtung unerheblich.) Auf der Basis der Reststromuntersuchungen von GÖHREN (1969) und der Tidedarstellungen bei LASSEN und SIEFERT (1991) sind folgende seitliche Begrenzungen der Außenelbe auszumachen:

Nach Westen ist es die *Wattwasserscheide des Neuwerk-Scharhörner Wattes* zwischen Außenelbe und Till; damit liegt der Pegel Neuwerk am Rand des Untersuchungsgebietes und liefert zugleich ein Maß für die Tideverhältnisse im Watt. Außenelbe und Außenweser trennen also die Till, der Knechtsand (Abb. 1), die Robinsbalje und der Eversand voneinander.

Nach Norden hin ist die Begrenzung weniger deutlich auszumachen. Wenn – wie allgemein üblich – das nördliche Elbufer bis zur Friedrichskoog-Spitze verstanden wird, ist die *Wattwasserscheide der Marner Plate* von dort bis zur Insel Trischen die Grenze. Dazu paßt, daß das südlich davon gelegene Neu-Fahrwasser mit der Norderelbe kommuniziert und daß die südlich anschließenden Wattwasserscheiden von Hakensand und



Abb. 1: Außenelbe mit skizzierten seitlichen Begrenzungen zur Till (SW) und zum Flackstrom (N)

Nordergründe etwa normal zum Hauptstrom der Elbe liegen. Der einzige in dieser Region betriebene Dauerpegel (Friedrichskoog) liegt so ungünstig, daß seine Daten nicht als repräsentativ für den nördlichen Außenelbebereich anzusehen sind.

Damit wird nach diesen Überlegungen das Außenelbegebiet von den beiden Inseln Neuwerk und Trischen und ihren zugehörigen Wattrücken begrenzt.

In dem so umrissenen Untersuchungsgebiet werden folgende Meßstationen bevorzugt herangezogen (Abb. 2):

Tab. 1: Pegel im Bereich der Tideelbe

Meßort	Elbe-km (bisher gültig)	in Betrieb seit
Geesthacht UW	585,9	1965
Drennhaus	591,4	1976
Zollenspieker	598,3	1875
Over	605,2	1872
Bunthaus	609,8	1880
Harburg	615,0 (S)	1872
Schöpfstelle	615,4 (N)	1910
St. Pauli	623,1	1784
Seemannshöft	628,9	1936
Blankenese	634,3	1959
Schulau	641,0	1898
Lühort	645,5	1865
Stadersand	654,8	1865
Grauerort	660,6	1929
Kollmar	666,8	1929
Glückstadt	674,3	1869
Brokdorf	684,2	1931
Brunsbüttel	695,7	1930
Osteriff	704,1	1952
Otterndorf	713,6	1936
Cuxhaven	724,0	1786
Neuwerk		1967
Großer Vogelsand	745,0	1966

Strömungen wurden bisher nur an wenigen festen Positionen längerfristig gemessen. Die Meßorte lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Tab. 2: Strömungsmeßorte in der Tideelbe

Meßort	Elbe-km (alt)	betrieben
Bunthaus	610 (S und N)	seit 1966
Nienstedten	631	seit 1968
Einzelmessungen	605 bis 640	seit 1966
Einzelmessungen	640 bis 700	1958 bis 1982
Dauermessungen an folgenden Positionen:	690 bis See	seit 1978
LZ 1	Krummendeich	
LZ 2	Neufeldreede West	
LZ 3	Kratzsand	
LZ 4	Spitzsand West	
LZ 4a	Steinriff 2	
LZ 5	Scharhörn	

Pegel im Bereich der Tideelbe

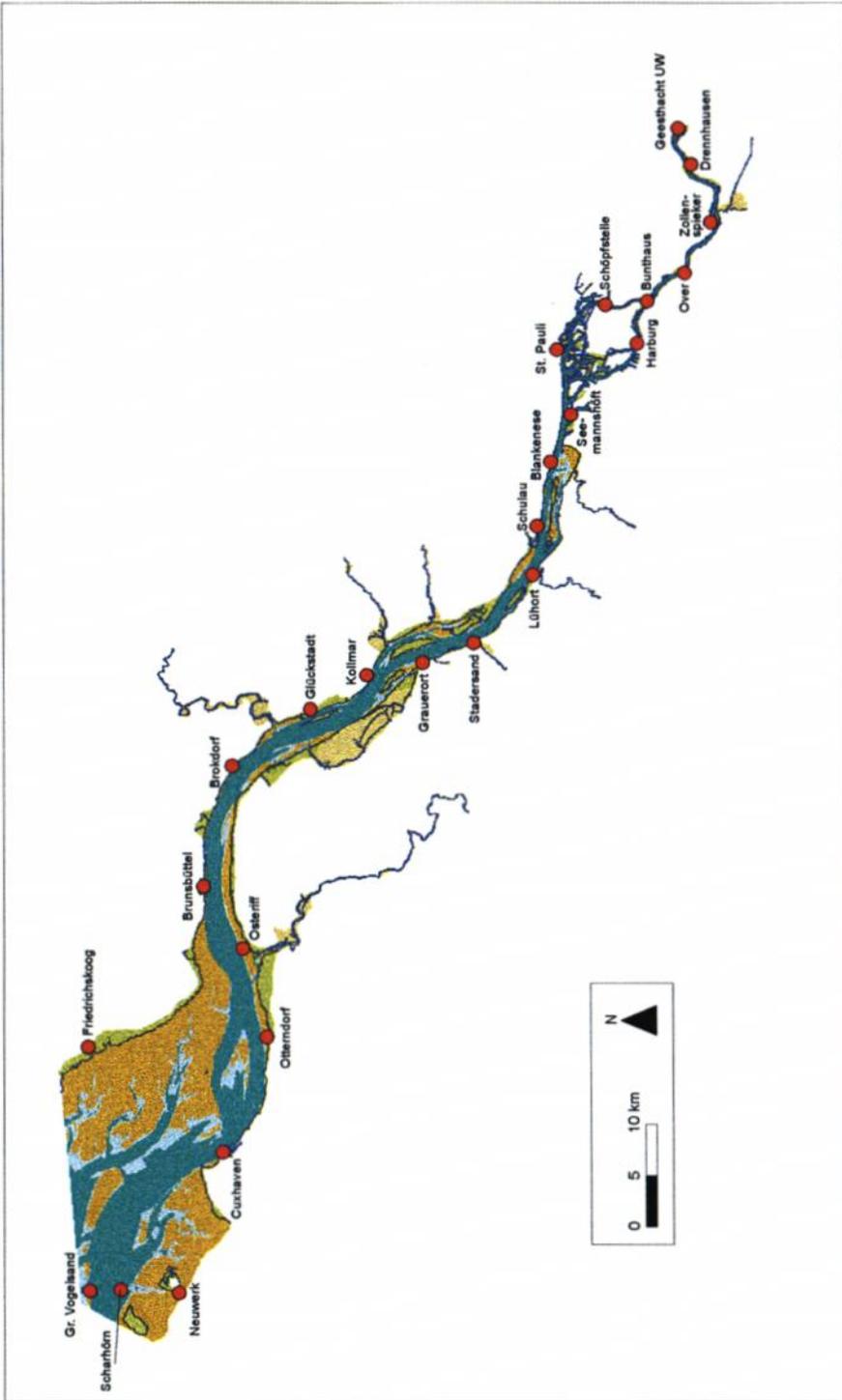


Abb. 2

Soweit von Interesse, kann für verschiedene Orte, Zeiten und Themen auf veröffentlichte Arbeiten zurückgegriffen werden, ergänzt durch unveröffentlichte Berichte und Studien sowie Unterlagen der beteiligten Dienststellen. Diese sind im wesentlichen die WSÄ Lauenburg, Hamburg und Cuxhaven sowie Strom- und Hafengebäude Hamburg. Siehe dazu das Schriftenverzeichnis.

Es ist nicht beabsichtigt, im Rahmen dieser Arbeit all die in den gen. Schriften hervorgebrachten Erkenntnisse darzustellen, abzuwägen oder nur zu kommentieren. Aktuell geht es um

- Darstellungen der Veränderungen (also Präsentation von Daten),
- Analyse der Entwicklung seit 1950 sowie
- Beschreibung des „Ist-Zustandes“ in der ersten Hälfte der 1990er Jahre.

2.2 Untersuchungsgebiete der Nebenflüsse und bisheriger Wissensstand

Die Arbeit berücksichtigt alle Nebenflüsse der Elbe unterhalb des Wehres Geesthacht, soweit sie durch Tide beeinflusst werden oder nach 1950 wurden, bis zur jeweiligen Tidegrenze (Abb. 2). Sofern diese nicht durch ein Bauwerk festgelegt ist, ist sie durch Messungen bisher allerdings nicht in allen Fällen exakt belegbar. Es handelt sich um die folgenden Flüsse:

Oberhalb des Hamburger Stromspaltungsgebietes:

– Ilmenau, Seeve

Unterhalb des Hamburger Stromspaltungsgebietes:

– Este, Wedeler Au/Hetlinger Binnenelbe, Lühe, Schwinge, Pinnau, Krückau, Stör, Oste

Ruthenstrom, Wischhafener Süderelbe, Bützflether Süderelbe, Freiburger Hafentriel und andere Nebengewässer werden hier nicht weiter behandelt.

Über die Tideverhältnisse in den Nebenflüssen gibt es zwar zahlreiche Messungen seitens der zuständigen Verwaltungen, aber kaum zusammenfassende Darstellungen oder Untersuchungen. Hydrologische Daten zu den Nebenflüssen wurden zuletzt von SIEFERT (1976) veröffentlicht. Dabei konzentrierte sich das Interesse auf die Mittelwerte 1961/70 sowie die HHTw und NNTnw bis 1976, nicht aber auf langzeitige Änderungen oder die Ermittlung von Wechselwirkungen mit topographischen oder hydrologischen Änderungen in der Elbe. Zusammenhänge zwischen ihrer hydrologischen Entwicklung und Veränderungen in der Elbe sind im Detail bisher nicht aufgezeigt worden. Einige allgemeine Aussagen zur Beeinflussung der Tideniedrigwasserstände in Nebenflüssen durch Änderungen in der Elbe finden sich allenfalls bei SIEFERT und JENSEN (1993).

2.2.1 Einzugsgebiete und Abflüsse

Größter Nebenfluß der Tideelbe ist die Ilmenau mit einem Einzugsgebiet von 2885 km² bei 107 km Länge. Die Oste weist zwar eine Länge von 145 km auf, hat allerdings nur ein 1825 km² großes Einzugsgebiet, während die Stör mit 1820 km² Einzugsgebietsgröße und 85 km Länge als drittgrößter Nebenfluß anzusprechen ist. Weitere, auch im folgenden kommentierte Informationen finden sich in Tab. 3 bis 5.

Informationen über flächendeckende Abflußspenden liegen nicht vor. Zudem gibt es nur aus Ilmenau, Luhe, Seeve, Bille, Alster, Este, Stör und Oste Abflußmessungen im tide-

freien Oberlauf, die allerdings wenig hilfreich bei der Feststellung des Gesamtabflusses sind. Daher mußte für diese Studie auf langjährige Erfahrungswerte zurückgegriffen werden, die auch schon für die bei SIEFERT (1976) veröffentlichten Berechnungen herangezogen wurden. Demnach erfolgt die Bestimmung der Q_o der Nebenflüsse nur näherungsweise über die Einzugsgebiete (FN) und die vorliegenden Abflußspenden (q) mit

$$Q_o = FN \cdot q$$

Die Größen FN sind dabei erheblich leichter zu bestimmen als q. Sofern aus einem Flußgebiet überhaupt Abflußspendenmessungen bekannt sind, ist nicht erkennbar, wie weit die an einer Stelle gemessenen Werte für das gesamte Niederschlagsgebiet repräsentativ sind. Um zu einem verwendbaren Anhaltswert zu gelangen, wurde bei SIEFERT (1976) folgendermaßen verfahren: Von jedem Nebenfluß wird der Mittelwert der Abflußspenden der elbnächsten Station berücksichtigt. Das Mittel dieser Mittelwerte wird für alle Nebenflüsse (auch diejenigen ohne Abflußmeßstellen) zur Berechnung des Q_o verwendet. Die so bestimmten Abflußspenden sind:

Sommer:	8,8 l/s · km ²
Winter:	14,2 l/s · km ²
Jahr:	11,5 l/s · km ²

Da sich in den letzten 20 Jahren an den Randbedingungen nichts Grundlegendes verändert hat, werden die damaligen Daten in Tab. 3 übernommen. Diese Notwendigkeit der Verwendung von langjährigen Mittelwerten hat natürlich zur unvermeidlichen Folge, daß Jahreswerte des Oberwassers nicht berechnet werden können. Bei Vergleichen zwischen Elbe und Nebenfluß können daher durch Q_o -Schwankungen in letzterem verursachte Streuungen nicht oder – worauf dann hingewiesen wird – nur indirekt identifiziert werden.

Tab. 3: Einzugsgebiete und Oberwassermengen im Elbegebiet nach SIEFERT (1976)

Nebenfluß	Meßstelle für Q_o	MQ_o an der Mündung			
		F_N km ²	W_i m ³ /s	S_o m ³ /s	J m ³ /s
Ilmenau	Bienenbüttel	2885	41,0	25,4	33,2
Seeve	Jehrden	475	6,7	4,2	5,5
Este	Emmen	361	5,1	3,2	4,2
Lühe		260	3,7	2,3	3,0
Schwinge		199	2,8	1,8	2,3
Pinnau		352	5,0	3,1	4,0
Krückau		245	3,5	2,2	2,8
Stör	Willenscharen	1820	25,8	16,0	20,9
Oste	Rockstedt	1825	25,9	16,1	21,0

2.2.2 Tidegrenzen

Analog zu den Daten der Elbe werden auch für ihre Nebenflüsse Jahresmittel der Tnw und Thw betrachtet. Die Analyse umfaßt dann jeweils den Vergleich der Wasserstandsdaten in der Elbe am mündungsnächsten Pegel mit den Daten im Nebenfluß. Dazu sind in Tab. 4 die entsprechenden Pegel aufgelistet.

Tab. 4: Pegelstandorte zur Ermittlung der Tideverhältnisse im Mündungsbereich der Nebenflüsse

Nebenfluß	Mündungspegel	
	(km ober- (+) bzw. unterhalb (-) der Nebenfluß-Mündung im Nebenfluß)	in der Elbe
Ilmenau	Ilmenau-Sperrwerk (+ 0,5)	Zollenspieker (+ 0,5)
Seeve	Siel (0,0)	Over (- 0,5)
Este	Cranz (0,0)	Cranz (0,0)/ Blankenese (0,0)
Lühe	Lühort (0,0)	Lühort (0,0)
Schwinge	Schwinge-Sperrwerk (+ 1,0)	Stadersand (0,0)
Pinnau	Pinnau-Sperrwerk (+ 1,0)	Grauerort (querab - 0,5)
Krückkau	Krückkau-Sperrwerk (+ 1,0)	Kollmar (- 4,0)
Stör	Stör-Sperrwerk (+ 1,0)	Brokdorf (- 6,5)
Oste	Belum (+ 3,5)	Osteriff (+ 2,5)

Die Lage der oberen Tidegrenze ist entweder durch Bauwerke fixiert oder aber fließend entsprechend den jeweiligen Oberwasser- und Tideverhältnissen. So unterscheidet sich auch die Länge der tidebeeinflussten Abschnitte der einzelnen Nebenflüsse ganz erheblich: Während z. B. die Ilmenau, Schwinge oder Este nur einen wenige Kilometer langen tidebeeinflussten Abschnitt aufweisen, reicht der Tideeinfluß in der Stör über 50 km stromauf. Der tidebeeinflusste Bereich der Oste ist sogar über 70 km lang, und er wäre noch weitaus größer, wenn nicht in Bremervörde das Stauwehr vorhanden wäre (Tab. 5):

Tab. 5: Lage der oberen Tidegrenze in den Elbenebenflüssen (*jeweiliger Fluß-km in Klammern*)

Nebenfluß	Max. Länge des derzeit tidebeeinflussten Flußabschnitts	Feste Tidegrenze (Bauwerk)	Oberster Tidepegel
Ilmenau/Luhe	11 km	Schleuse Fahrenholz (17,7)	Fahrenholz (17,7)
Seeve	(siehe Kap. 3.5.2)	(siehe Kap. 3.5.2)	(siehe Kap. 3.5.2)
Este	13 km	Stauwerke Buxtehude (0,0)	Buxtehude (0,7)
Lühe	16 km	Keine	Horneburg (0,2)
Schwinge	4,7 km	Salztorschleuse Stade (0,0)	Stade (0,2)
Pinnau	24 km	Keine	Pinneberg (0,0)
Krückkau	16 km	Keine	Elmshorn (0,0)
Stör	54 km	Keine	Rensing (0,0)
Oste	72 km	Stauwehr Bremervörde (0,0)	Bremervörde (0,0)

Alle Tidenebenflüsse der Elbe sind heute vor Sturmfluten durch Sperrwerke geschützt, während die übrigen Tiden praktisch ungehindert einlaufen können. Eine Übersicht gibt Tab. 6:

Tab. 6: Absperrungen der Tidenebenflüsse der Elbe

Nebenfluß	Bauwerk	Schließhöhe (m NN)	Baujahr
Ilmenau	Sperrwerk	3,3	1973
Seeve	Siel	–	1966
Dove Elbe	Schleuse	–	1951
Bille	Sperrwerk		1966
Este	Sperrwerk	2,8	1967
Wedeler Au	Sperrwerk	–	1978
Lühe	Sperrwerk	2,0 bis 2,2	1967
Schwinge	Sperrwerk	2,2	1971
Pinnau	Sperrwerk	2,5	1969
Krückkau	Sperrwerk	2,5	1969
Stör	Sperrwerk	2,5	1975
Oste	Sperrwerk	2,0	1968

Während es eine Reihe von Untersuchungen über die Wirkung der Absperrungen auf den Sturmflutablauf in der Elbe gibt (z. B. SIEFERT u. HAVNØ 1989), existieren keine detaillierten Kenntnisse über die Beeinflussung der allgemeinen Tideentwicklung in den Nebenflüssen durch die Absperrungen bei hohen Sturmfluten. Allgemein gilt, daß durch die Errichtung von Sperrwerken die mittleren Hochwasserhöhen an den stromauf gelegenen Pegeln im Nebenfluß gesenkt werden, da sich hohe Wasserstände bei Sturmfluten nicht mehr in den Daten niederschlagen. Das Ausmaß dieser Absenkung ist von einer Vielzahl von Einflußgrößen, insbesondere von der Schließhöhe und dem Schließmodus des Sperrwerks, abhängig und kann an dieser Stelle nicht für jeden einzelnen Nebenfluß bestimmt werden. Ein Beispiel für die Wirkungsweise eines Sperrwerks wird im Kapitel 4.9 anhand der Oste diskutiert. Die dort aufgetretene Entwicklung des Tidehochwassers ist aufgrund der baulichen Gestaltung des Ostesperrwerks und seiner exponierten Lage im Elbmündungstrichter als recht gut nachweisbar einzuschätzen; die Auswirkungen sollten in den anderen Elbenebenflüssen deutlich geringer sein.

2.3 Hydrologische Parameter

Die mittleren Tideverhältnisse werden präsentiert über die Parameter

MThw, MTnw, MThb als Jahresmittel der Wasserstände

T_F , T_E als Mittelwerte von Flut- und Ebbedauer übers Jahr

V_F , V_E als Mittelwerte der Strömungsgeschwindigkeiten über den Meßzeitraum

mittlere Eintrittszeitdifferenzen der Scheitelwasserstände („Laufzeiten“)

übers Jahr

MSL als Meeresspiegel

„Wirkungswechsellpunkt“ als Grenze der dominanten Elbewirkung in einem Nebenfluß (siehe Näheres in Kap. 3.5.1)

sowie spezielle Extremwerte. Die Sturmflutverhältnisse werden über

HThw, HHThw als Scheitelwerte über definierte Zeiträume

Eintrittszeitdifferenzen von Einzelereignissen sowie

„HThw“ als Synonym für „Sturmflut“

charakterisiert.

Für viele Betrachtungen ist nicht oder nicht allein die absolute Höhe eines Scheitelwasserstandes wichtig, sondern deren Häufigkeit. Auf Abb. 3 ist zur Erläuterung die Häufigkeit der Thw am Beispiel Stadersand dargestellt, und zwar nach den Originaldaten des Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuches in 20-cm-Säulen. Das Maximum liegt um den langjährigen Mittelwert (MThw), die gesamte Spanne der aufgetretenen Thw reicht aber von rd. 2 m unter bis gut 2 m über MThw. Die Abszisse zeigt die Anzahl an Tiden je Jahr, deren Thw jeweils in diesen Höhenstufen auftraten.

Man kann die Säulen in eine Kurve auflösen, die dann quasi stufenlos (oder, wie hier, als cm-Stufen betrachtet) die Verteilung ergeben. Dann gilt allerdings eine neue Skala auf der Abszisse.

Damit besteht die Möglichkeit, die Änderung von Häufigkeiten bestimmter Thw-Höhen durch bauliche oder natürliche Beeinflussung festzustellen. So sind z. B. für die Thw-Höhe 770 cm NN – 5 m oder 1,0 m über MThw folgende Aussagen möglich: Tritt das Thw statt auf 770 cm NN – 5 m in Zukunft 3 cm höher auf, so wird die Höhe MThw + 1,0 m dann nicht von 0,5 Tiden im Jahr, sondern von 0,56 Tiden im Jahr erreicht werden. (Bisher hat sich noch niemand versucht, aus einer solchen Erkenntnis Schlüsse zur Hydrologie zu ziehen!)

Nun kann man aus solchen Häufigkeiten Summen bilden, z. B. wieder in 20-cm-Stufen. Je nachdem, ob man die Summen an den unteren oder oberen Höhen der Säulen festmacht, ergeben sich Über- oder Unterschreitungshäufigkeiten. Als Beispiel zeigt Abb. 4 die Unterschreitungshäufigkeit der Tnw in Hamburg, noch verdeutlicht durch zwei vergrößerte Details (oben und unten). So sind zur Entscheidungsfindung über erwartete Auswirkungen irgendeiner Entwicklung neben einer Änderung der Tnw-Höhen auch deren Unterschreitungshäufigkeits-Änderungen geeignet. Damit lassen sich z. B. Änderungen der Wattgrenzen bestimmen („Watt“ ist alles über NNTnw).

Neben den Häufigkeiten verschieden hoher Scheitel können auch die Verweildauern bestimmter Wasserstandshöhen bei der Beurteilung von Wertänderungen eine Rolle spielen. Dazu müssen zunächst die Verweildauern ermittelt und deren Veränderungen bestimmt werden. Dies ist für ein Beispiel auf Abb. 5 und 6 geschehen. Abb. 5 zeigt den oberen Teil der Tidekurve mit einer Erhöhung, die sich etwa auf den oberen halben Meter beschränkt und nicht den gesamten Tideverlauf verändert, da die gesamte Tidedauer natürlich mit 12:25 h konstant bleibt. Links sind die Verweildauern des Wasserstandes in einzelnen dm-Höhenstufen angegeben, rechts die Summe dieser Verweildauern, die identisch mit der Überschreitungsdauer dieser Tide für diese Höhenstufen ist. Die Änderungen sind rot markiert. Daraus sind folgende Aussagen möglich:

- Heute hält der Wasserstand 1 dm unter Thw bis Thw, also im obersten dm der Tidekurve, gut 60' an. Nach einer Thw-Erhöhung um 4 cm verringert sich die Verweildauer auf dieser Höhenstufe auf knapp 40', hinzu kommt aber eine Dauer von gut 30' oberhalb des jetzigen Thw, so daß zusammenfassend

aus heute	gut 60' für 1,0 dm
dann	gut 70' für 1,4 dm

im Scheitelbereich werden.

- Die Verweildauern unterhalb des jetzigen Scheitels vermindern sich geringfügig.
- Die Summenkurve der Verweildauern im Scheitelbereich beginnt logischerweise 4 cm höher als heute. Die größten Veränderungen liegen nach der Skizze rechts auf Abb. 5 in Höhe des heutigen Thw. Die astronomisch bedingte Gesamtverweildauer über die Tide muß natürlich gleich bleiben.

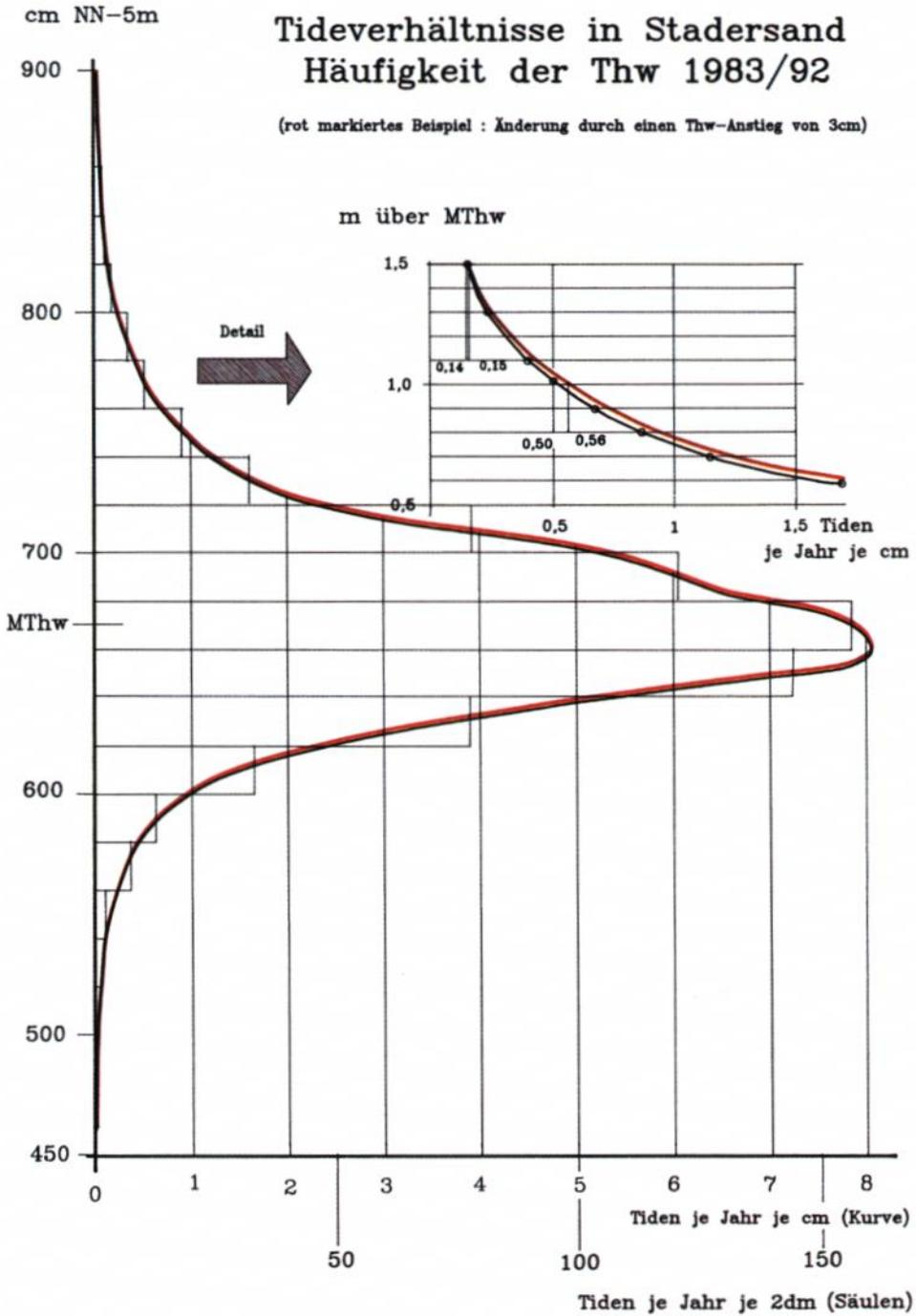


Abb. 3

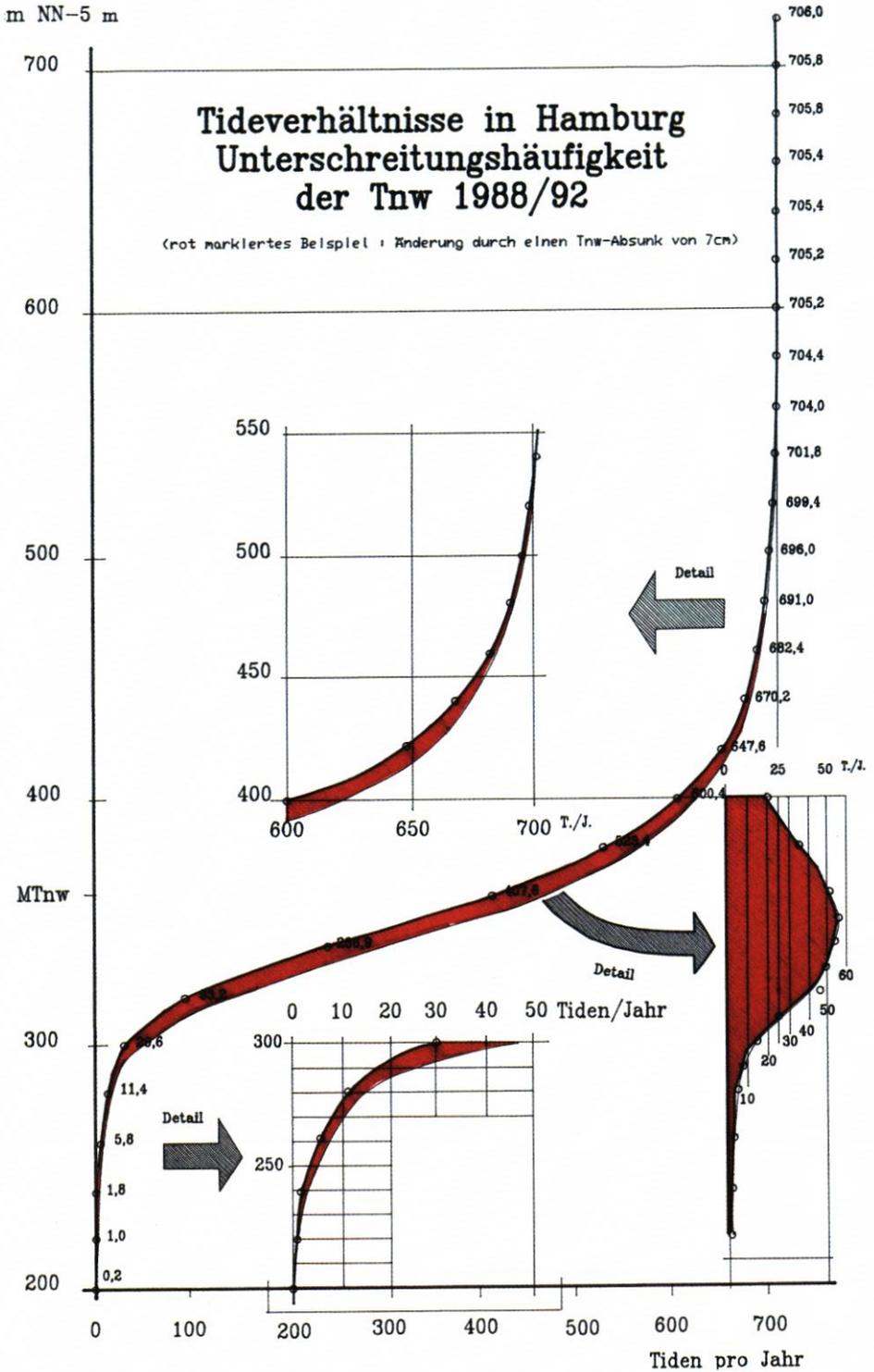
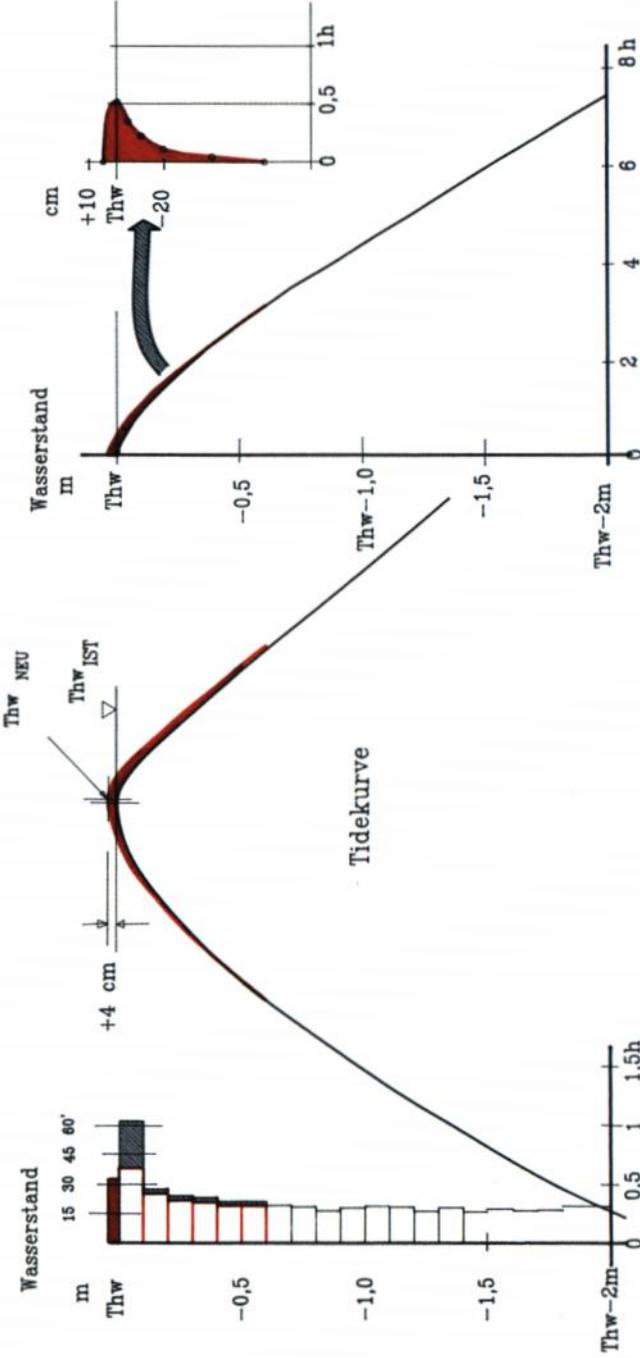


Abb. 4

Tidekurve, Verweil- und Überschreitungsdauern

(rot markiertes Beispiel : Änderung durch einen Thw-Anstieg)



Überschreitungsdauer in Stunden

Verweildauer in Stunden
(dm-Abschnitte)

Abb. 5

Abb. 6 für den unteren Tidebereich ist entsprechend aufgebaut und liefert als Veränderungen fast gleiche Werte wie Abb. 5.

Die Verweildauern, die auf Abb. 5 und 6 rechts für eine Tide als Beispiel aufsummiert sind, können etwa auch für alle Tiden eines Jahres addiert werden. Damit lassen sich wiederum Über- und Unterschreitungssummen bilden. Abb. 7 zeigt als weiteres Beispiel die so ermittelten Überschreitungssummen der Verweildauern für Hamburg. Es bleibt zukünftigen Untersuchungen vorbehalten, die Auswirkungen zu ermitteln, wenn – wodurch auch immer – ein Streifen Ästuarboden während einer niedrigen Tide zukünftig 5 oder 10 min länger als heute trockenfällt.

2.4 Zum Unschärfbereich von Nachweis und Erfahrung

Wenn über Veränderungen diskutiert wird, sind logischerweise auch Grenzbetrachtungen nötig. Dabei ist zu bedenken, daß Änderungen hydrologischer Parameter an sich keine Wertänderungen sind, aber zu solchen bei Flora und Fauna u. a. führen können. Dazu gibt es zum einen theoretische Überlegungen, zum anderen Messungen bzw. Erfahrungen. Die Richtigkeit theoretischer Ansätze steht nicht aus sich selbst heraus fest, sondern muß selbstverständlich durch Belege aus der Natur bestätigt werden. Dies ist jedoch nur in der Schärfe möglich, die diese Daten (und die Grundlagen der „Erfahrungen“) zulassen:

- Terrestrische Feldaufnahmen können auf 1 bis 5 m genau kartiert werden;
- nivellitische Aufnahmen (einschl. Watt) erreichen je nach Fläche bis zu 2 cm Genauigkeit;
- aquatische Feldaufnahmen erreichen unter günstigen Umständen bis 10 m Lagegenauigkeit, bis 0,2 m Höhengenaugkeit und sind – wegen ständiger Veränderungen der Sohle – mit einer Unsicherheit des Zufalls versehen;
- Tiefenpeilungen im Küstenvorfeld erreichen Genauigkeiten zwischen 0,1 und 0,5 m, in der Elbe um 0,3 m;
- Wasserstände werden mit einer Genauigkeit von ± 2 cm und ± 2 min erfaßt;
- Strömungen werden ± 5 cm/s genau gemessen;

Damit kann der Unschärfbereich für Nachweise und Erfahrungen wie folgt eingegrenzt werden:

Lagegenauigkeit höchstens	$\pm 2,5$ m
Höhengenaugkeit (Vorland Watt)	
höchstens	± 2 cm
Tiefengenaugkeit (Elbe und Rinnen)	
höchstens	± 2 dm
Wasserstände nach Höhe	± 2 cm
Zeit	± 2 min
Strömungsgeschwindigkeiten höchstens	± 5 cm/s

3. Änderungen mittlerer Tidewasserstände seit 1950

3.1 Rückblick bis 1900

Die Wasserstandsverhältnisse in Tideflüssen wie der Unterelbe sind vielfältigen, sowohl natürlichen als auch durch den Menschen hervorgerufenen Einflüssen unterworfen. Zu den natürlichen Einflußgrößen sind vor allem astronomische Variationen, mittel- bis langfristige,

Tidekurve, Verweil- und Unterschreitungsdauern

(rot markiertes Beispiel : Änderung durch einen T_{nw} -Absenk)

Verweildauer in Stunden
(dm - Abschnitte)

Unterschreitungsdauer in Stunden

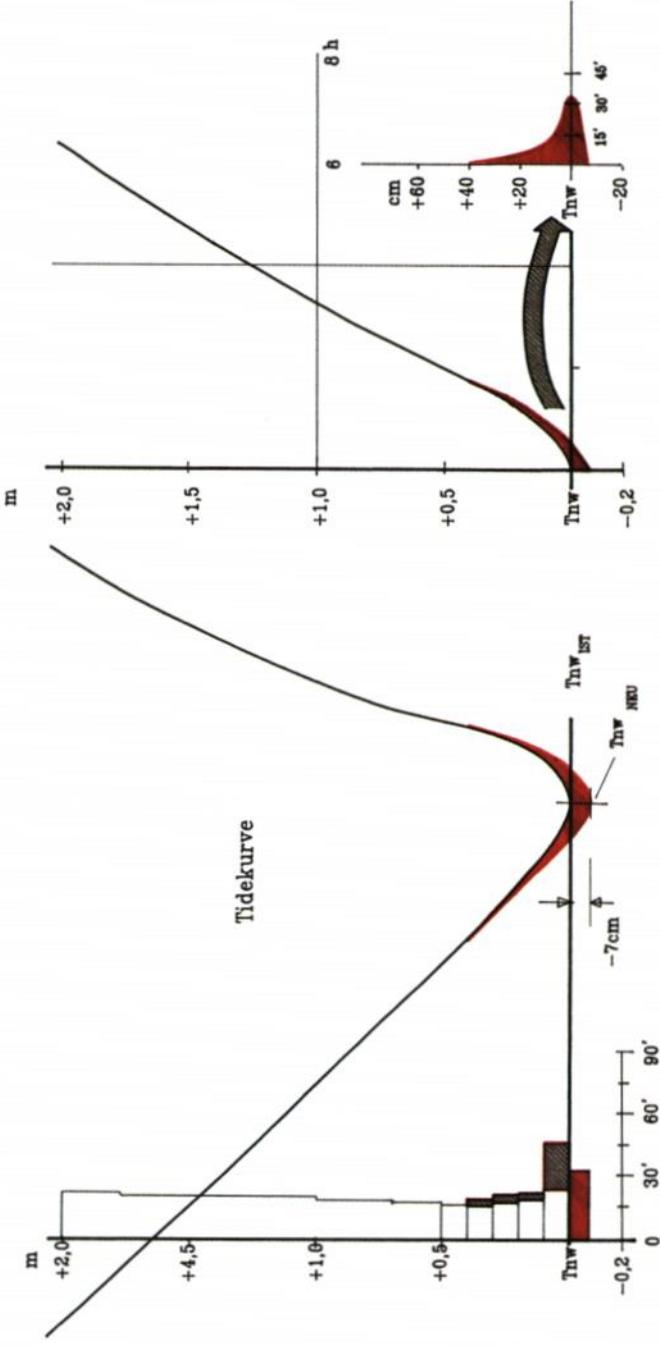


Abb. 6

Überschreitungssummen der Verweildauern

(rot markiertes Beispiel : Änderung durch Thw-Anstieg und Thw-Absenk wie auf Abb.5 und 6)

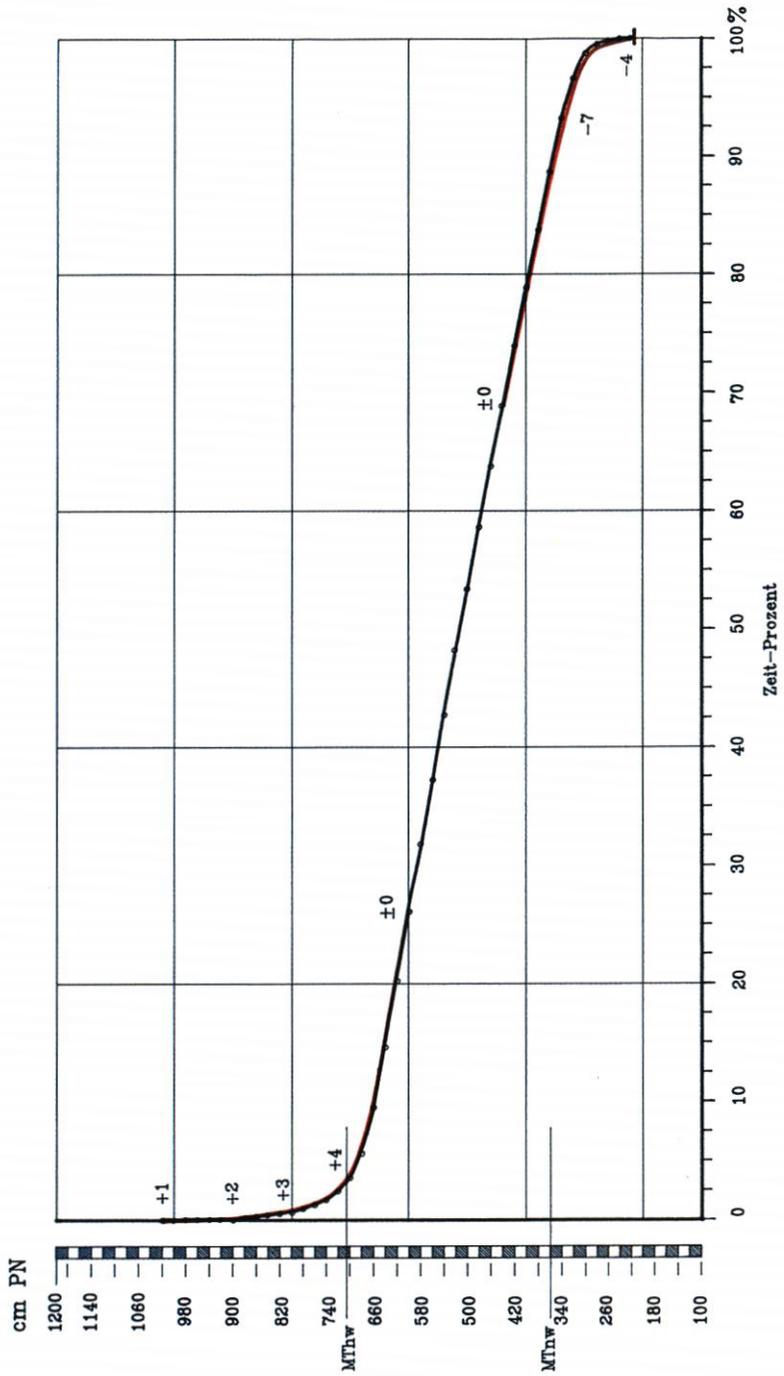


Abb. 7

großräumige Änderungen der Tideparameter in der Nordsee, Variationen des Oberwasserzuflusses, Schwankungen der Klimaverhältnisse und morphologische Veränderungen im Bereich des Tideästuars zu nennen. Aber auch anthropogene Eingriffe, wie z. B. Vordeichungen, Absperrungen von Nebenflüssen, Bau oder Verfüllung von Hafenbecken, Errichtung von Wehren, uferverändernde Bauwerke, Vertiefungen oder ähnliche Maßnahmen, die zu Veränderungen der Flußtopographie führen, wirken sich in charakteristischer Weise auf die Wasserstände in den Flüssen aus (vergl. HENSEN, 1955; SIEFERT, 1995). Zur Gewinnung eines Überblickes wird daher einleitend die Entwicklung seit 1900 dargestellt. Abb. 8 zeigt dazu die Hoch- und Niedrigwasser an den Pegeln Cuxhaven-Steubenhöft und Hamburg-St. Pauli seit 1900. Im Mündungsbereich der Elbe sind demnach nur vergleichsweise geringe Veränderungen der mittleren Wasserstände zu verzeichnen. Während das MThw in knapp 100 Jahren um gut 2 dm angestiegen ist, sind beim MTnw Erhöhungen in der Größenordnung von 1 dm zu verzeichnen. Demgegenüber sind die Entwicklungen des MThw und insbesondere des MTnw in Hamburg weitaus prägnanter: So lag zu Beginn dieses Jahrhunderts das mittlere Niedrigwasser in Hamburg noch rund 120 cm höher als in Cuxhaven, seit Anfang der 1990er Jahre liegen die Niedrigwasserhöhen der beiden Orte dagegen ungefähr auf einem Niveau.

Dieser Befund verdeutlicht sich, wenn man für das MThw und MTnw die zeitliche Entwicklung der Differenz zwischen diesen beiden Pegeln darstellt. Durch diese Differenzbildung zwischen den Daten eines Pegels in der Tideelbe (hier: Hamburg-St. Pauli) zu einem solchen im mündungsnahen Bereich (hier: Cuxhaven) wird der Einfluß der offenen Nordsee auf die Wasserstandsdaten in der Elbe weitgehend ausgeglichen. Das Ergebnis ist in Abb. 9 dargestellt. Bei der Betrachtung der beiden Ganglinien ist augenfällig, daß im Laufe der Jahrzehnte offenbar Zeitabschnitte, die sich durch eine Konstanz der Wasserstandsniveaus auszeichnen, mit Phasen, in denen die Tide deutlich absinkt (Δ MTnw) bzw. ansteigt (Δ MThw), wechseln. Dieses wird im folgenden genauer dargelegt.

Klammert man bei diesen Jahresmitteln untergeordnete Einflüsse wie Änderungen der Windverhältnisse über der Elbe oder Dichteänderungen des Wassers aus, müssen die verbleibenden Wasserstandsänderungen auf Veränderungen im Bereich des Tideästuars zurückgehen, die entweder natürlichen Ursprungs oder anthropogen sind. Vergleicht man die Entwicklung der Niedrigwasserstände mit den vorgenommenen wasserbaulichen Maßnahmen in der Tideelbe (NEEMANN, 1993), lassen sich vor allem die Absenkungsphasen des MTnw – bis auf die Zeit zwischen 1905 und 1910 – mit hoher zeitlicher Übereinstimmung den bisherigen Fahrrinnenvertiefungen (und den teilweise einhergehenden Fahrrinnenverbreiterungen) der Unterelbe zuordnen. Eine Übersicht über die Fahrrinnenvertiefungen dieses Jahrhunderts und die sich aus ihnen ergebenden MTnw-Absenkungen zeigt Tab. 7. Im übrigen wird dieses Thema weiter unten ausführlich behandelt.

Infolge des mit dem Zeitraum 1936 bis 1950 beschriebenen KN – 10-m-Ausbaus wird eine eindeutige Reaktion des Tnw nicht erkennbar, da hierfür keine besonderen Baggerungen ausgeführt wurden. Dafür zeichnet sich die Regulierung der Fahrrinne bei Pagensand-Nord durch die erste Abbaggerung des Schwarztonnensandes in der Zeit von 1928 bis 1938 deutlich ab. Dies trifft ebenfalls für die verringerte Fahrrinnenunterhaltung während des Krieges in der Zeit von 1940 bis 1945 zu. Besonders deutlich erscheint dann wieder der KN – 13,5-m-Ausbau der Elbe mit seiner Fahrrinnenverbreiterung, der im Hamburger Raum zu einer Absenkung des MTnw um gut 3 dm führte. Diese Werte stimmen sehr gut mit den in der Literatur veröffentlichten Ergebnissen überein (vergl. SIEFERT, 1992; SIEFERT u. JENSEN, 1993).

MThw und MTnw Cuxhaven und Hamburg-St. Pauli seit 1900

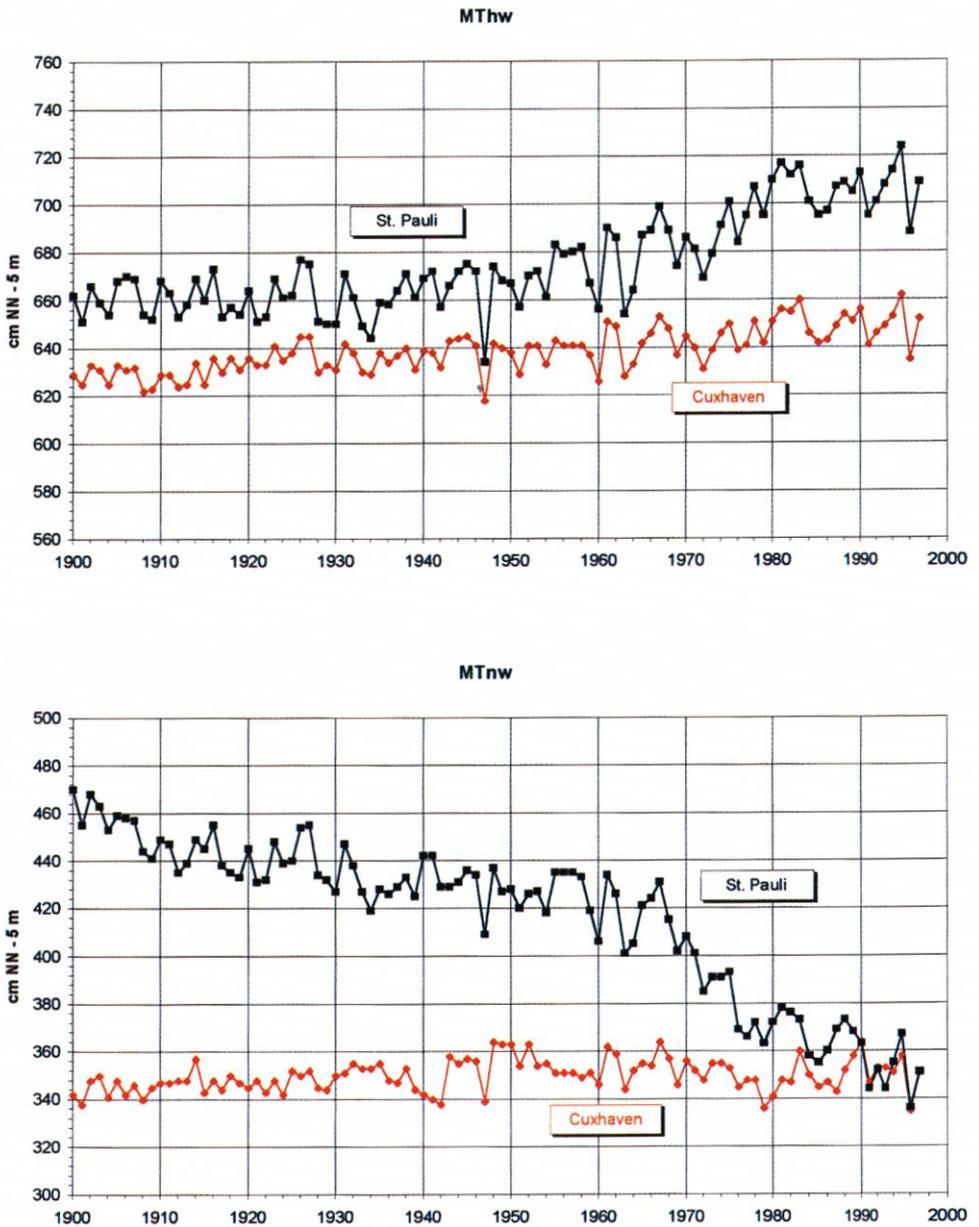


Abb. 8

MThw- und MTnw-Differenzen zwischen Hamburg-St. Pauli und Cuxhaven seit 1900

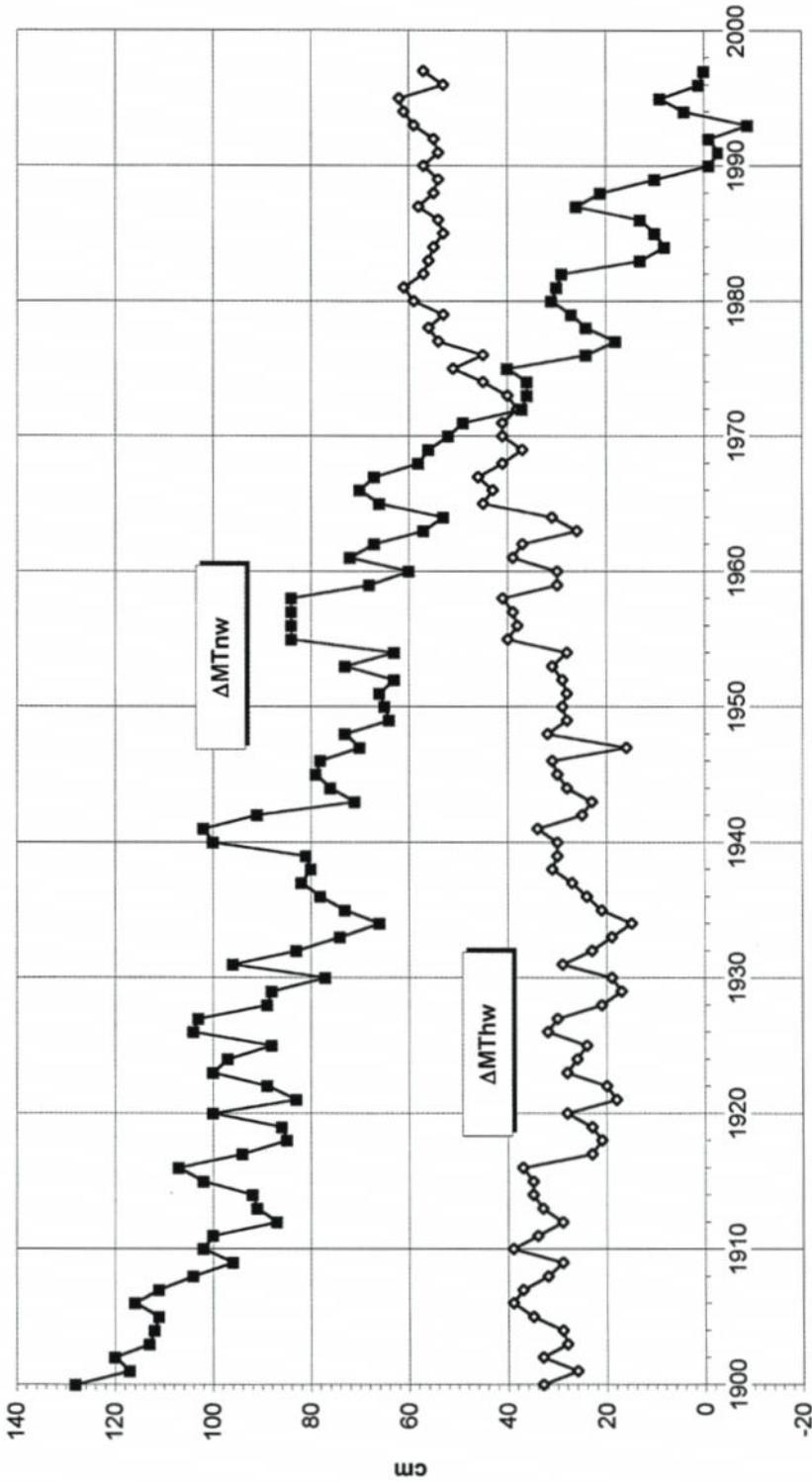


Abb. 9

Tab. 7: Fahrrinnenausbauten der Unterelbe und Folgen für die Niedrigwasserentwicklung in Hamburg (Pegel St. Pauli)

Maßnahme	Zeitraum (nach NEEMANN, 1993)	Resultierende Entwicklung des MTnw in St. Pauli (Bezugspegel: Cuxhaven)
Abaggerung Schwarztonnen- sand (11 Mio. m ³)	1928 bis 1938	zusammen
KN – 10-m-Ausbau	1936 bis 1950*	ca. – 2 dm
KN – 11-m-Ausbau	1957 bis 1962	zusammen
KN – 12-m-Ausbau	1964 bis 1969	ca. – 2,5 dm
KN – 13,5-m-Ausbau	1974 bis 1978	ca. – 3,5 dm

* Ausbau war in den Kriegsjahren unterbrochen

Die Entwicklungen ober- und unterhalb der Ausbaustrecke zeigen Abb. 10 und 11: In der oberen Tideelbe (Bunthaus) haben sich die MThw gegen St. Pauli etwas erhöht, während die (deutlich stärker Q_o -beeinflussten) MTnw zunächst bis 1950 um rd. 40 cm abgesunken und inzwischen wieder leicht gestiegen sind. Hier wirken offenbar auch örtliche Einflüsse. Zwischen Helgoland und Cuxhaven zeigt Abb. 11 dagegen einen leichten MThw-Anstieg aber keine Veränderungen im MTnw, die Indiz für Elbeeinfluß in Cuxhaven wären.

3.2 Tidewasserstände Elbe

Die Tidewasserstände werden als Jahresmittel dargestellt. Da eine Gesamtdokumentation in einer einzigen Graphik zu unübersichtlich wäre, wird folgende Unterteilung gewählt:

- Geesthacht bis Bunthaus auf Abb. 12 und 13
- Harburg/Schöpfstelle bis Hmb.-Seemannshöft auf Abb. 14 und 15
- Hmb.-Blankenese bis Glückstadt auf Abb. 16 und 17
- Brokdorf bis Gr. Vogelsand auf Abb. 18 und 19

Deutlich werden dabei die vor allem durch das Oberwasser, aber auch aus der Nordsee kommenden girlandenartigen Verläufe, im Tnw stärker als in Thw. Besonderes Augenmerk sollte Abb. 16 und 17 gelten. Auf der Strecke von Blankenese bis Glückstadt werden die Veränderungen besonders markant: Ein „Ausfächern“ der MThw von etwa 1,5 dm (1950) auf jetzt 4 dm und eine Umkehr der Höhenfolge der MTnw von vor 1975 bis nach 1985. Dies ist ein Hinweis darauf, daß diese Strecke sensibel auf Änderungen reagierte.

Zusätzlich werden für eine Gesamtübersicht die Entwicklungen an den „Stützpegeln“

Zollenspieker	Brunsbüttel
Hmb.-St. Pauli	Cuxhaven
Stadersand	

auf Abb. 20 und 21 dargestellt. Auch hier wird das „Ausfächern“ der MThw für die ganze Tideelbe deutlich: Von Cuxhaven/Brunsbüttel bis Zollenspieker von 0,5 (1950) auf rd. 1 m (1995) Differenz. Die $MTnw_{ZOL}$ fallen wegen ihrer Höhe und Q_o -Abhängigkeit aus dem Rahmen. Die MTnw oberhalb von Brunsbüttel haben sich nach 1960 mehr und mehr denen der Mündung angeglichen. Zwischen diesen Pegeln entwickelten sich die Eintrittszeitdifferenzen (aus Übersichtlichkeitsgründen über die Daten der fünf runden Jahre) wie folgt:

MThw- und MTnw-Differenzen zwischen Bunthaus und Hamburg-St. Pauli seit 1900

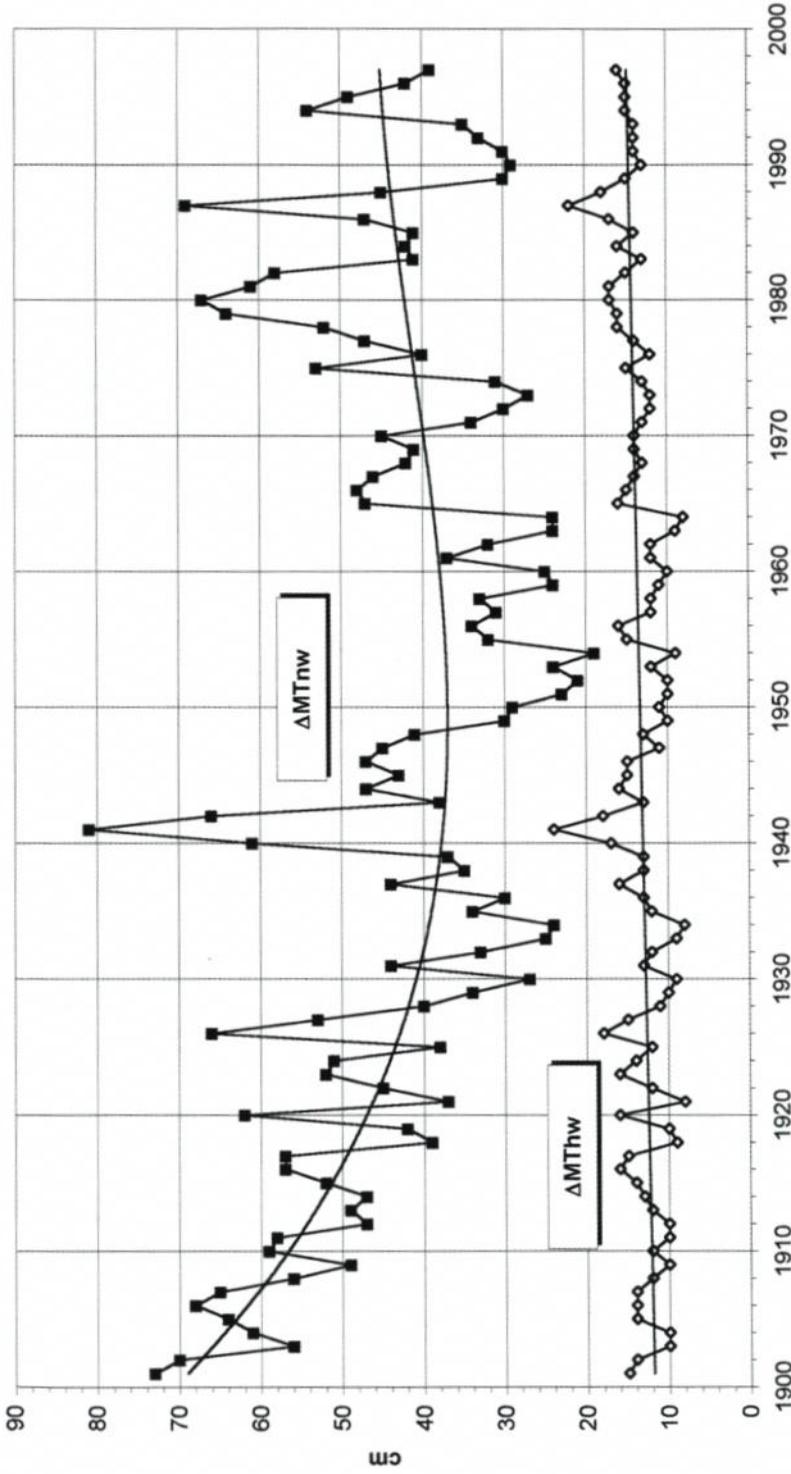


Abb. 10

MThw- und MTnw-Differenzen zwischen Cuxhaven und Helgoland seit 1911

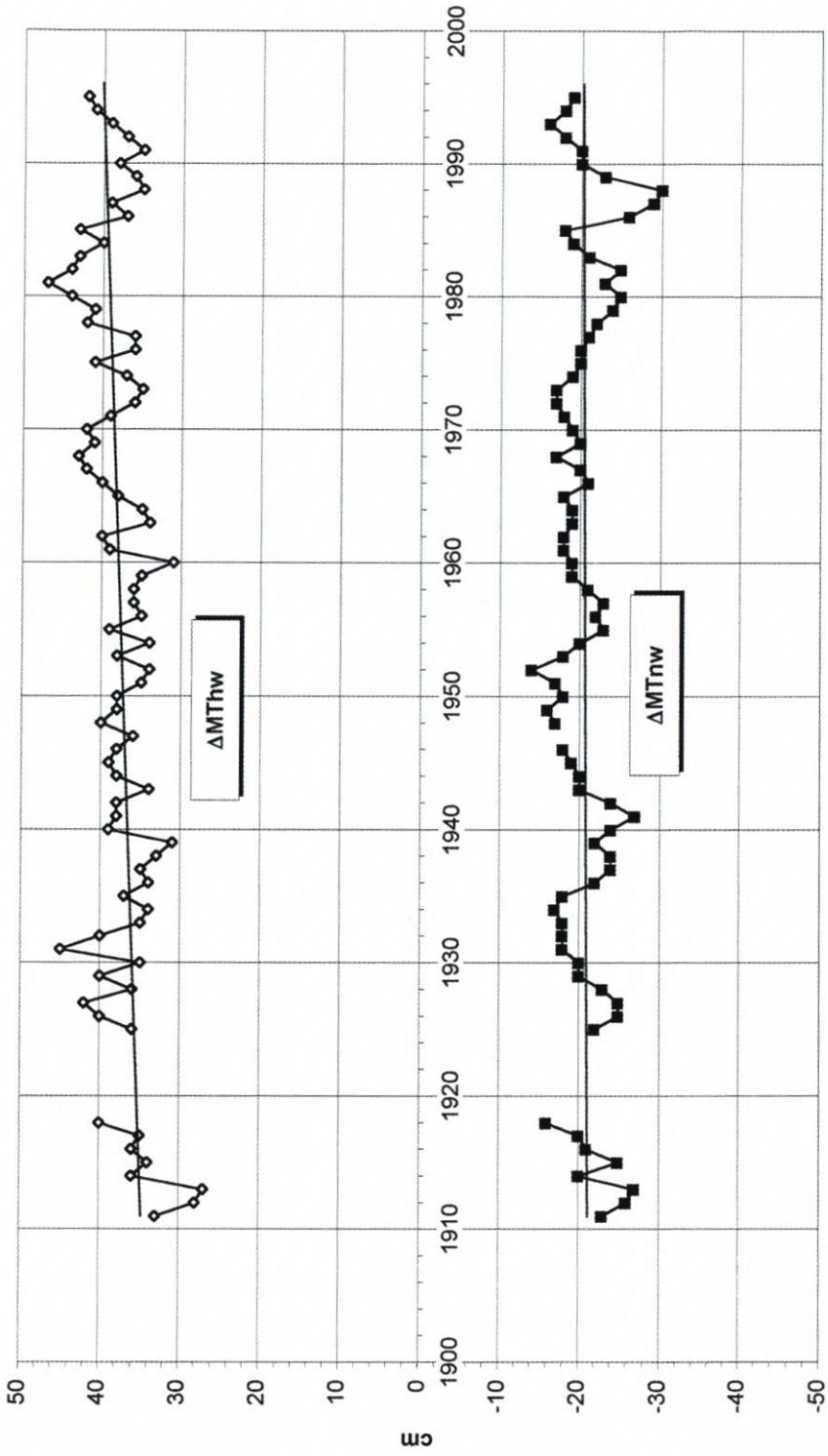


Abb. 11

MThw Geesthacht, Drennhausen, Zollenspieker, Over und Bunthaus seit 1950

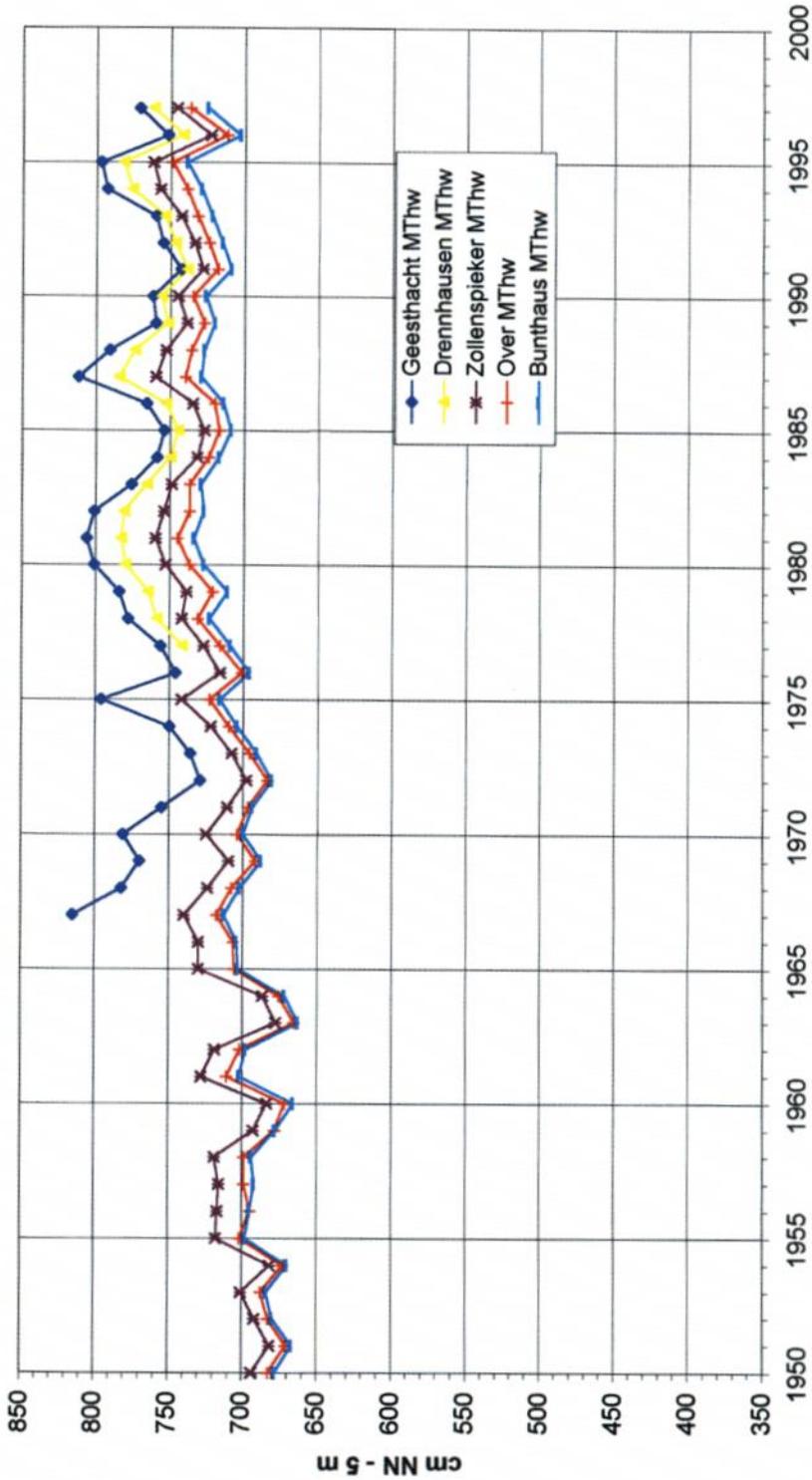


Abb. 12

MTnw Geesthacht, Drennhausen, Zollenspieker, Over und Bunthaus seit 1950

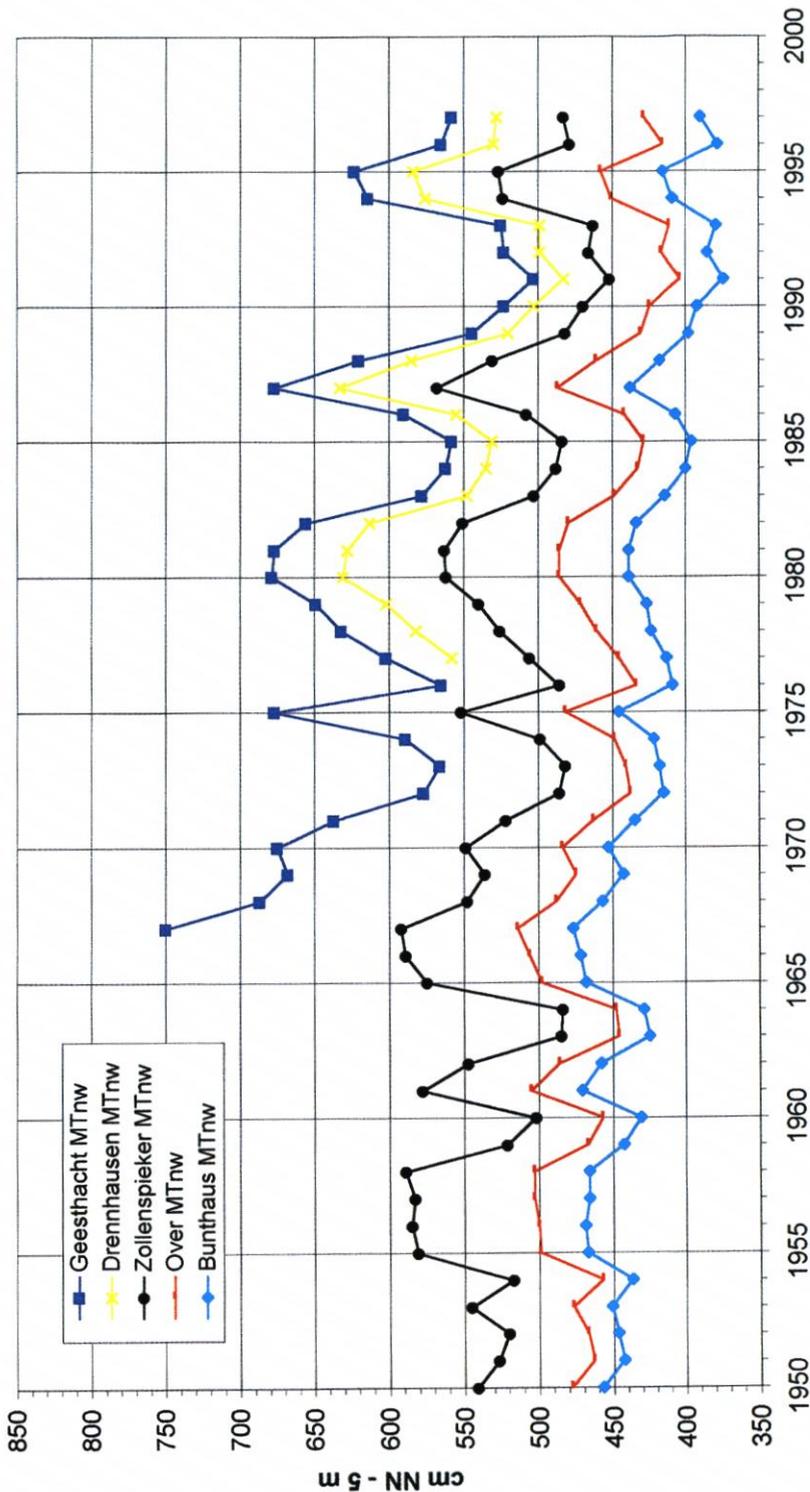


Abb. 13

MThw Harburg, Schöpfstelle, St. Pauli und Seemannshöft seit 1950

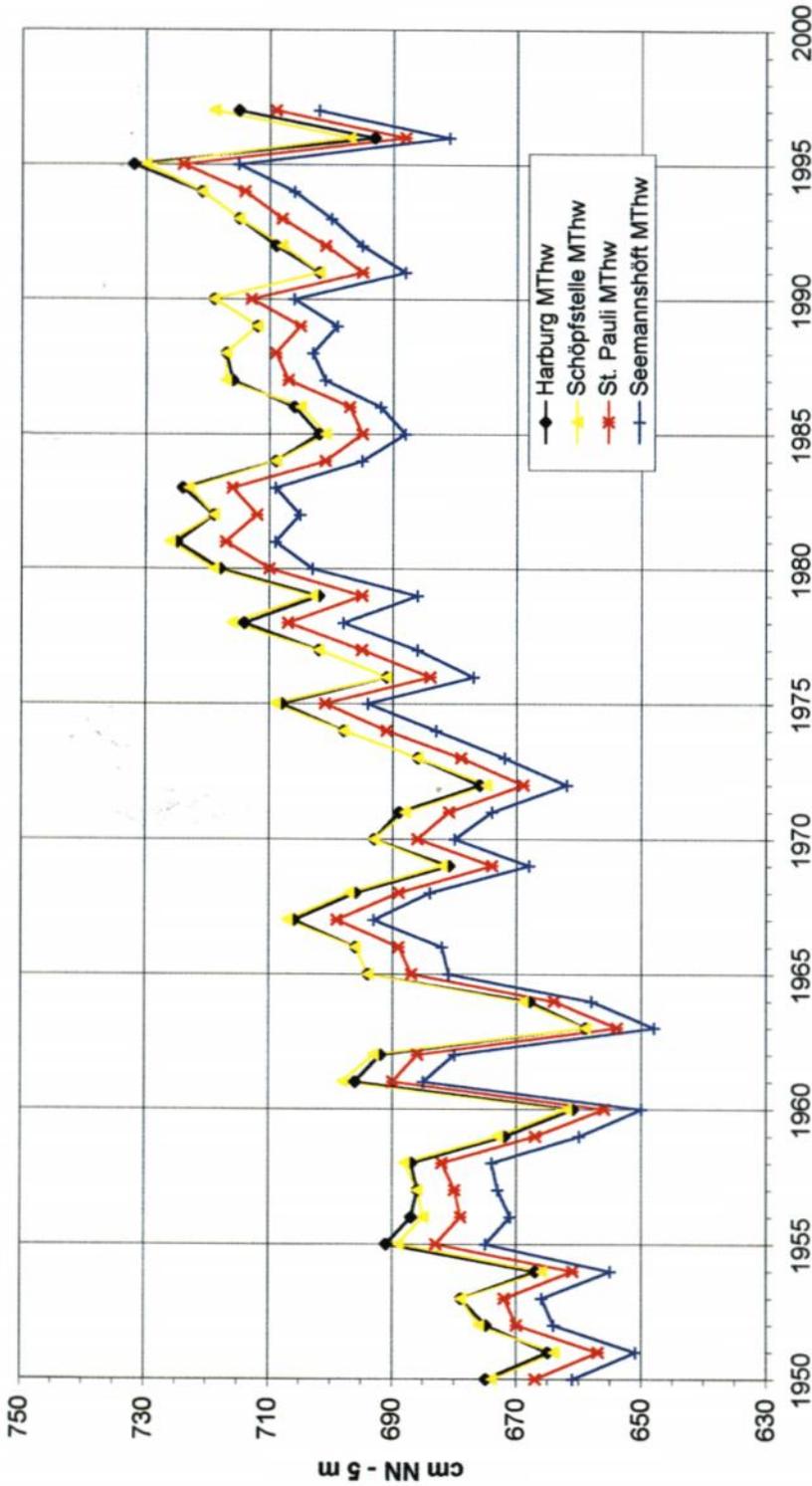


Abb. 14

MTnw Harburg, Schöpfstelle, St. Pauli und Seemannshöft seit 1950

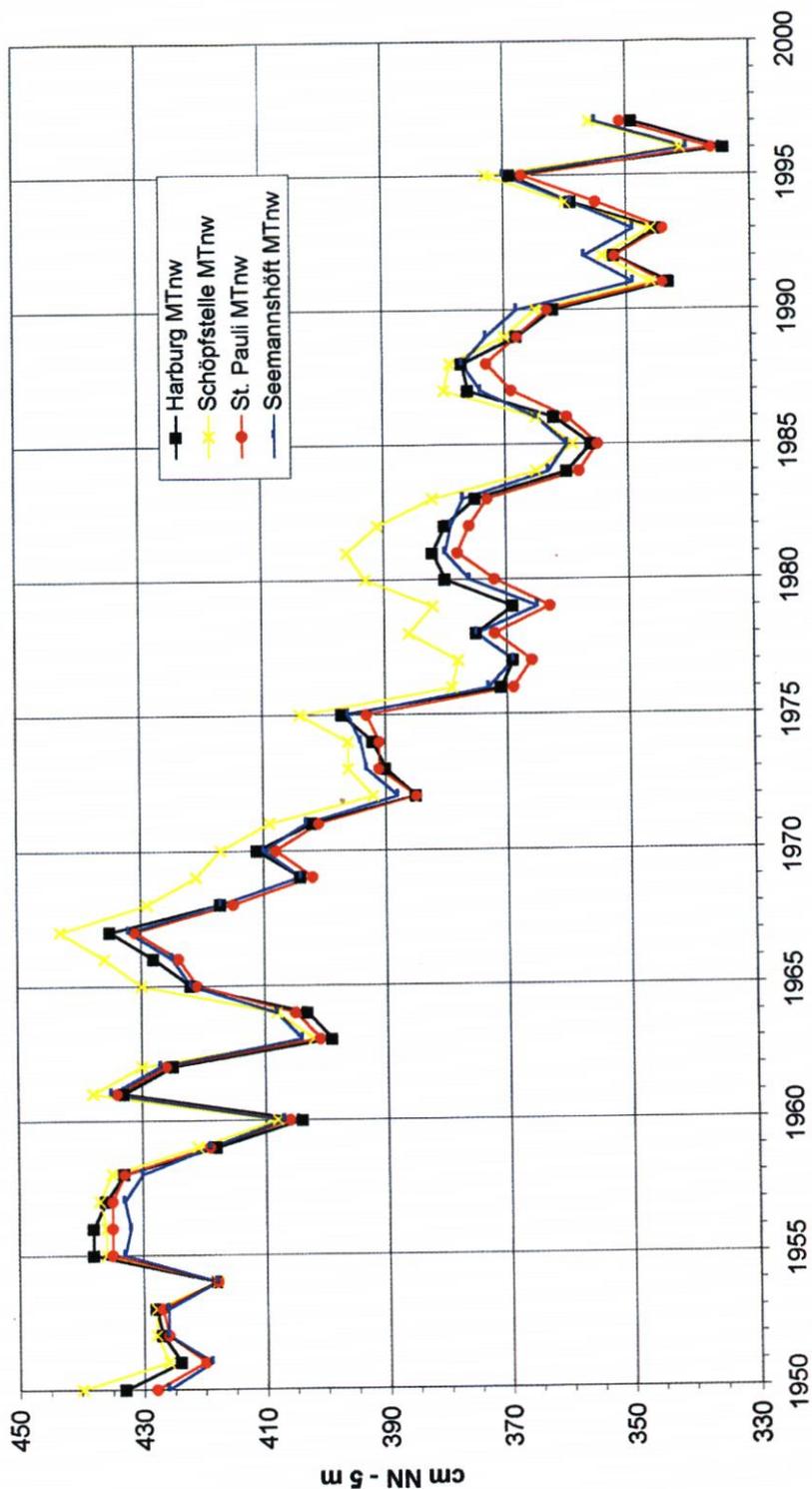


Abb. 15

**MThw Blankenese, Schulau, Lühort, Stadersand, Grauerort, Kollmar und Glückstadt
seit 1950**

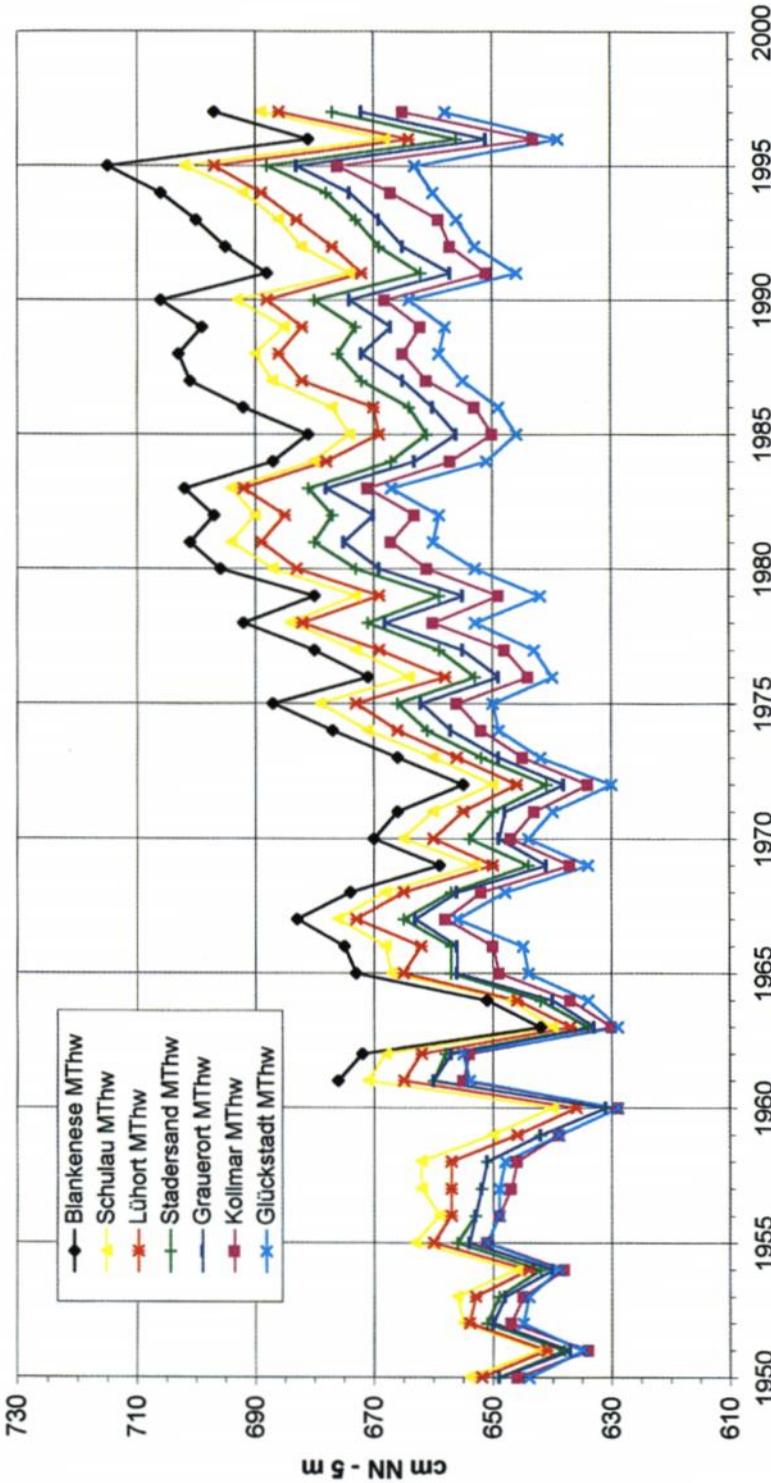


Abb. 16

**MTnw Blankenese, Schulau, Lühort, Stadersand, Grauerort, Kollmar und Glückstadt
seit 1950**

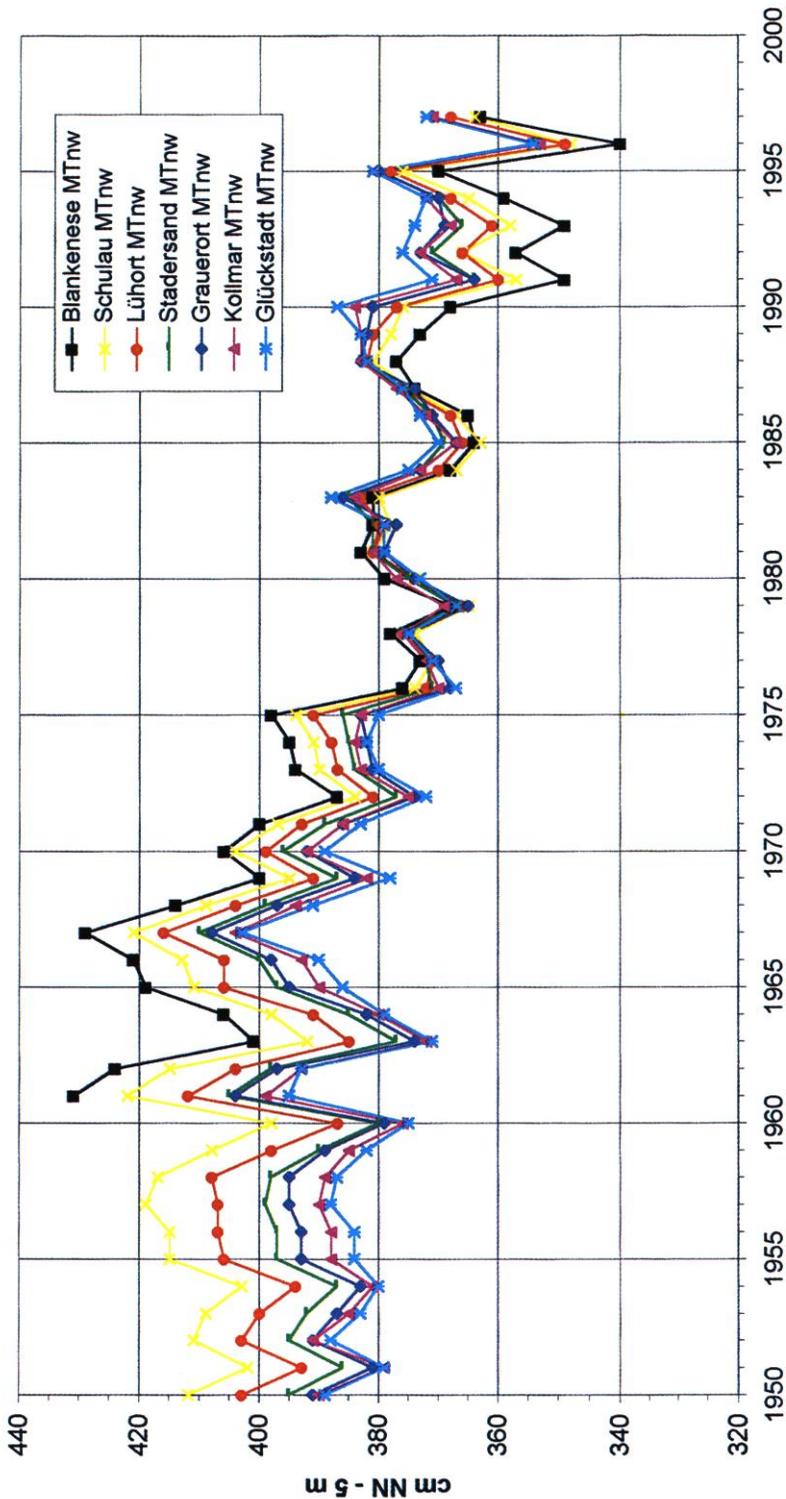


Abb. 17

MThw Brokdorf, Brunsbüttel, Osteriff, Otterndorf, Cuxhaven und Großer Vogelsand
seit 1950

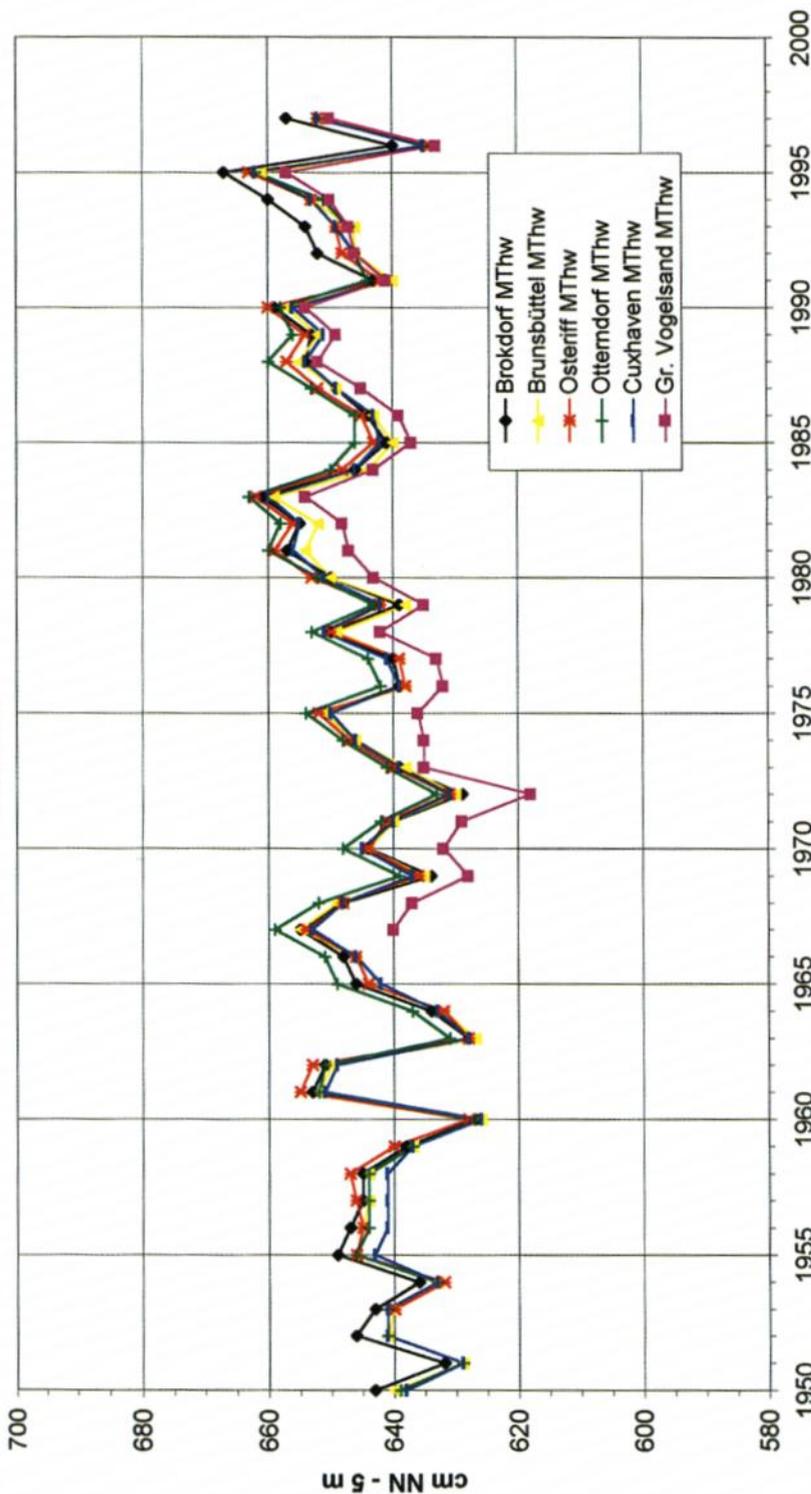


Abb. 18

**MTnw Brokdorf, Brunsbüttel, Osteriff, Otterndorf, Cuxhaven und Großer Vogelsand
seit 1950**

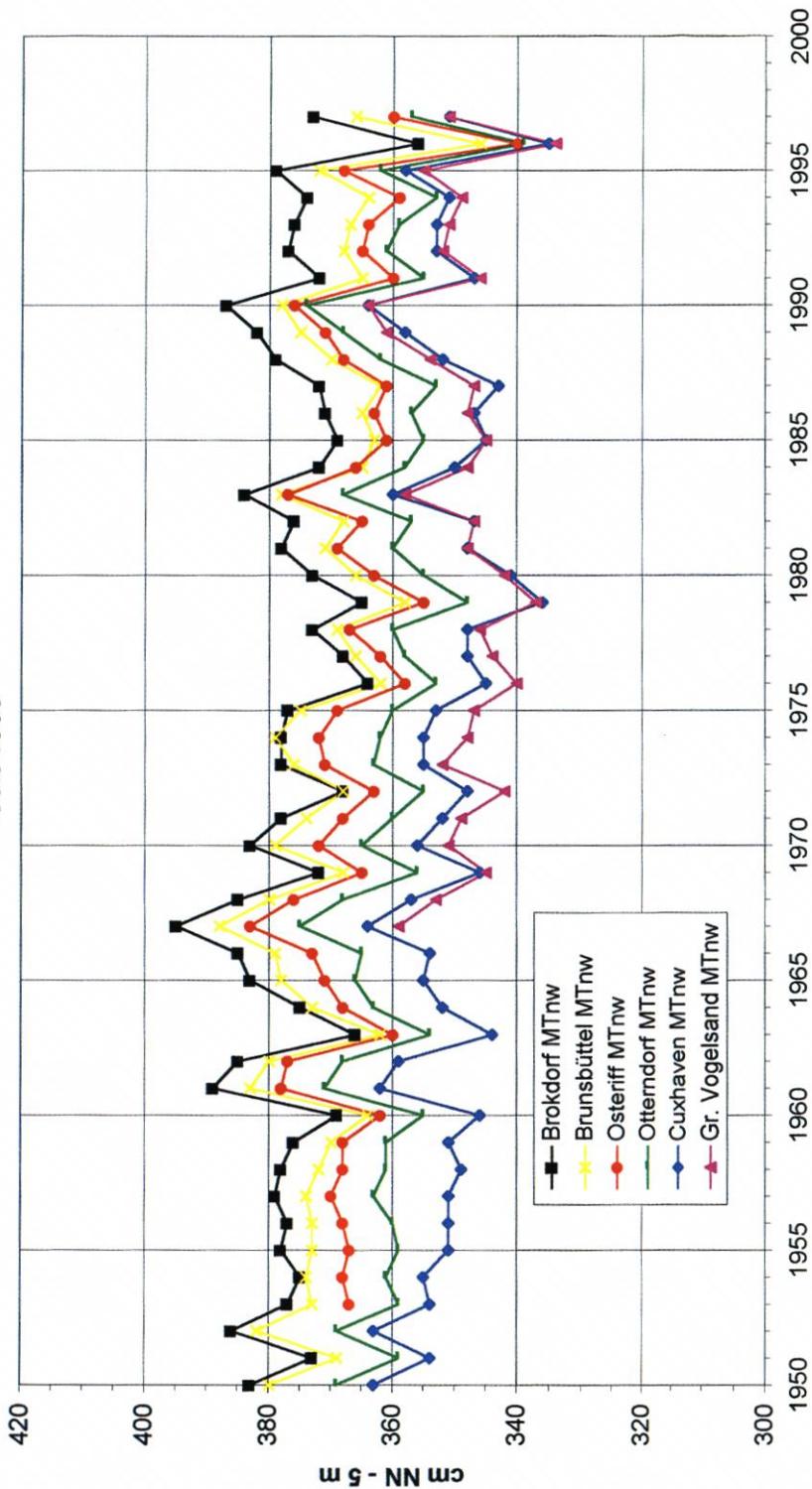


Abb. 19

MThw Zollenspieker, St. Pauli, Stadersand, Brunsbüttel und Cuxhaven seit 1950

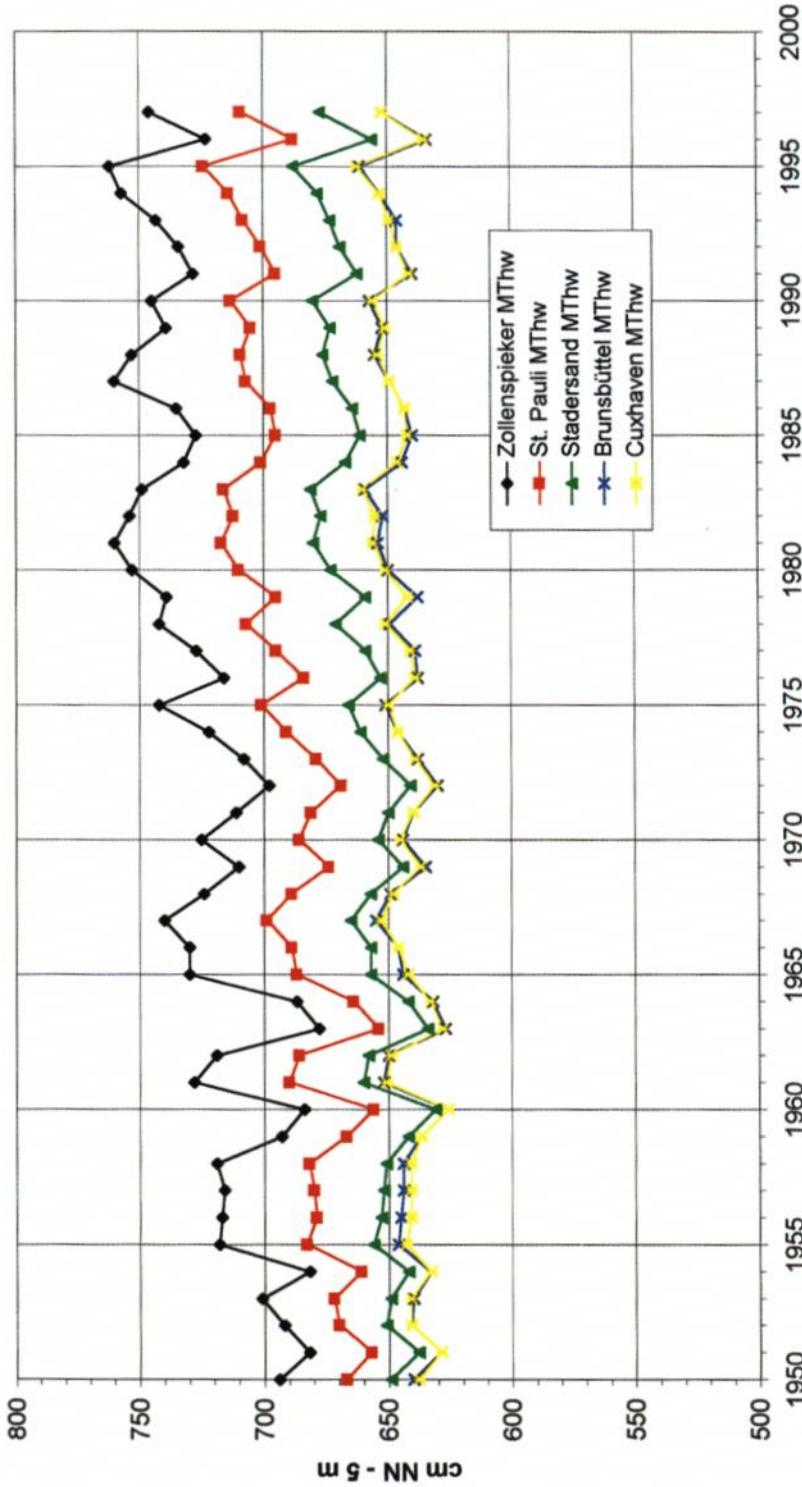


Abb. 20

MTnw Zollenspieker, St. Pauli, Stadersand, Brunsbüttel und Cuxhaven seit 1950

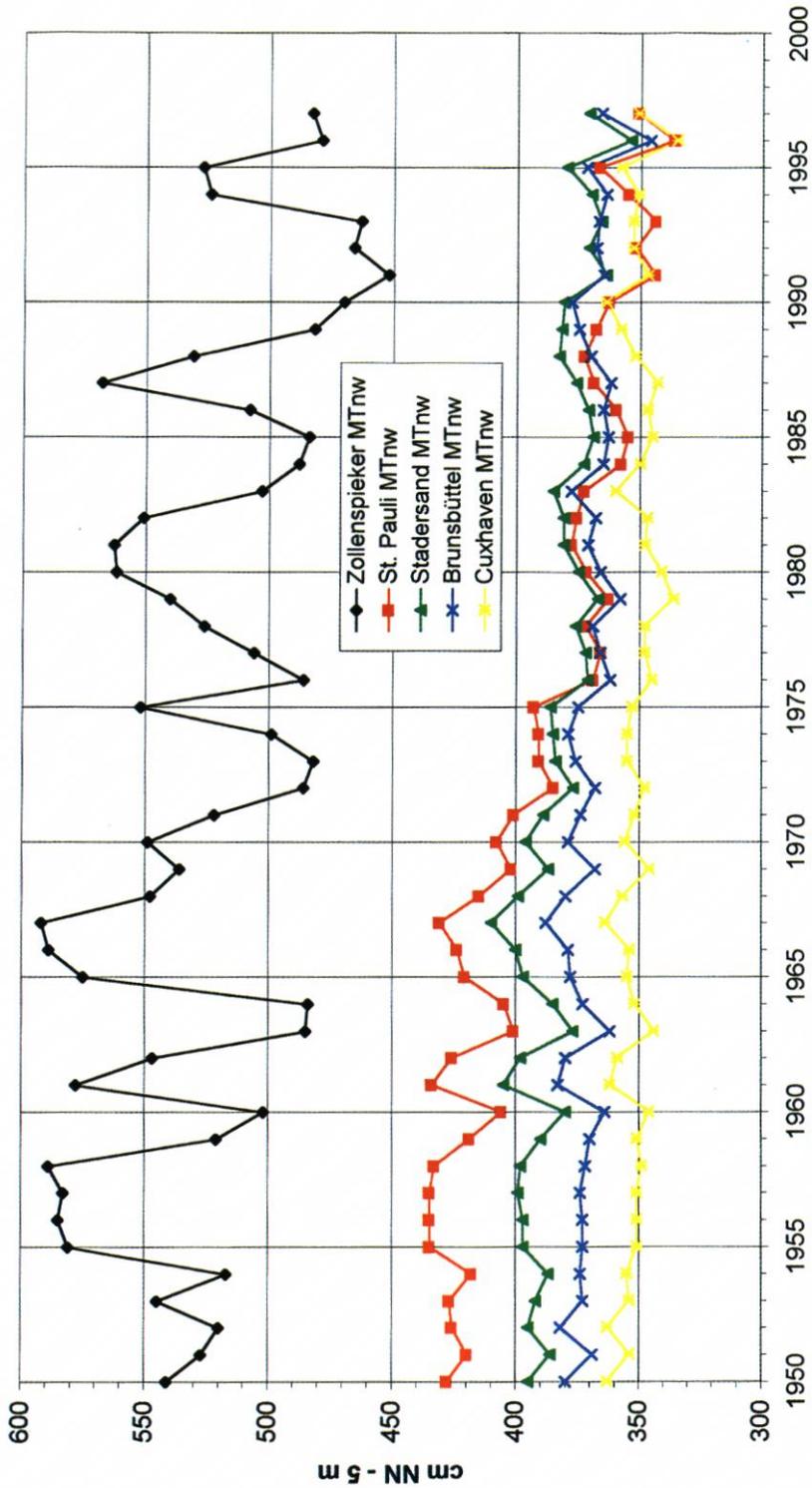


Abb. 21

Tab. 8: Entwicklung der Eintrittszeitdifferenzen von 1950 bis 1990

Strecke	km		Eintrittszeitdiff. in h				
			1950	1960	1970	1980	1990
Cuxhaven-Brunsbüttel	28	Thw	1:05	1:03	1:03	1:00	1:00
		Tnw	1:20	1:14	1:16	1:21	1:14
Brunsbüttel-Stadersand	41	Thw	1:38	1:39	1:45	1:43	1:41
		Tnw	1:51	1:53	1:46	1:42	1:41
Stadersand-Hmb.-St. Pauli	32	Thw	1:28	1:25	1:10	0:55	0:58
		Tnw	1:41	1:31	1:31	1:19	1:13
Hmb.-St. Pauli-Zollenspieker	25	Thw	1:11	0:59	0:54	0:54	0:47
		Tnw	1:37	1:38	1:32	1:34	1:29
Cuxhaven-Hmb.-St. Pauli	101	Thw	4:11	4:07	3:58	3:38	3:39
		Tnw	4:52	4:38	4:33	4:22	4:08

Es wird deutlich, daß sich die Eintrittszeitdifferenzen nur auf der Strecke oberhalb von Stadersand merklich verkürzt haben, und zwar bis Hamburg bei den Thw und Tnw rd. 30 min, oberhalb Hamburgs bei den Thw um rd. 20 min und bei den Tnw um rd. 5 min. Stadersand liegt 29 km oberhalb von Glückstadt. Damit fallen die Hauptänderungen der Eintrittszeiten mit den o. g. der Wasserstände zusammen.

Aus der Differenz der Differenzen von Thw und Tnw sind Veränderungen der Flut- und Ebbedauern ableitbar. Sie sind – wie ersichtlich – sehr klein. Die absoluten Werte lauten für die beiden wichtigsten Pegel:

Tab. 9: Entwicklung der Flut- und Ebbedauern von 1950 bis 1990

Ort		Dauer in h				
		1950	1960	1970	1980	1990
Cuxhaven	T _F	5:42	5:35	5:36	5:41	5:40
	T _E	6:43	6:49	6:49	6:44	6:45
Hmb.-St. Pauli	T _F	5:02	5:04	5:00	4:57	5:10
	T _E	7:23	7:20	7:25	7:28	7:14

Wie sich seit 1950 die mittleren Flut- und Ebbedauern in Hamburg im einzelnen entwickelt haben, zeigt – zusammen mit dem Q_0 – Abb. 22. Trenduntersuchungen für die Zeit ab 1900 erbrachten für Hamburg 18 min Flutdauer-Verlängerung für ein Jahrhundert. Außerdem besteht kurzfristig eine gewisse Korrelation zum Q_0 .

Schließlich zeigen Abb. 23 und 24 mittlere Tidekurven für Hamburg und Cuxhaven, um auch die Veränderungen im Ablauf zu dokumentieren. Dabei fällt insbesondere die in Hamburg sehr steil gewordene erste Flutphase auf. Hier steigt der Wasserstand unmittelbar nach Tnw und Ebbestromkenterung für eine gute halbe Stunde um rd. 0,7 m an, natürlich auch verbunden mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten.

Bei einer genaueren Betrachtung der Abb. 13, 15, 17 und 19 ist eine erneute Absenkung des MTnw seit Anfang der 1990er Jahre augenfällig. Einfache Erklärungen gibt es für diese Entwicklung in der Größenordnung von rund 1 dm auf Antrieb nicht, da es in dieser Zeit keine außergewöhnlichen wasserbaulichen Aktivitäten seitens der Wasser- und Schifffahrts-

Ebbe- und Flutdauer am Pegel St. Pauli

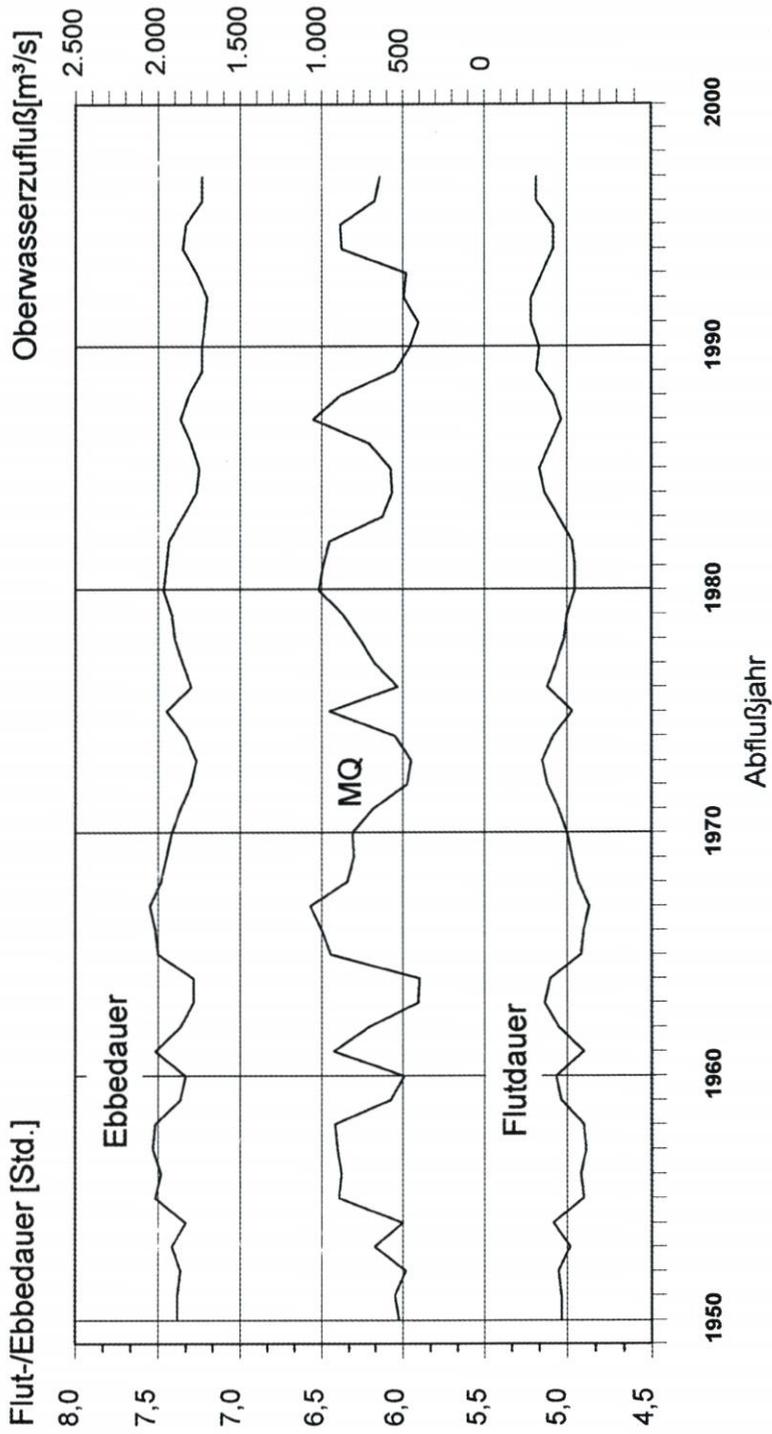


Abb. 22

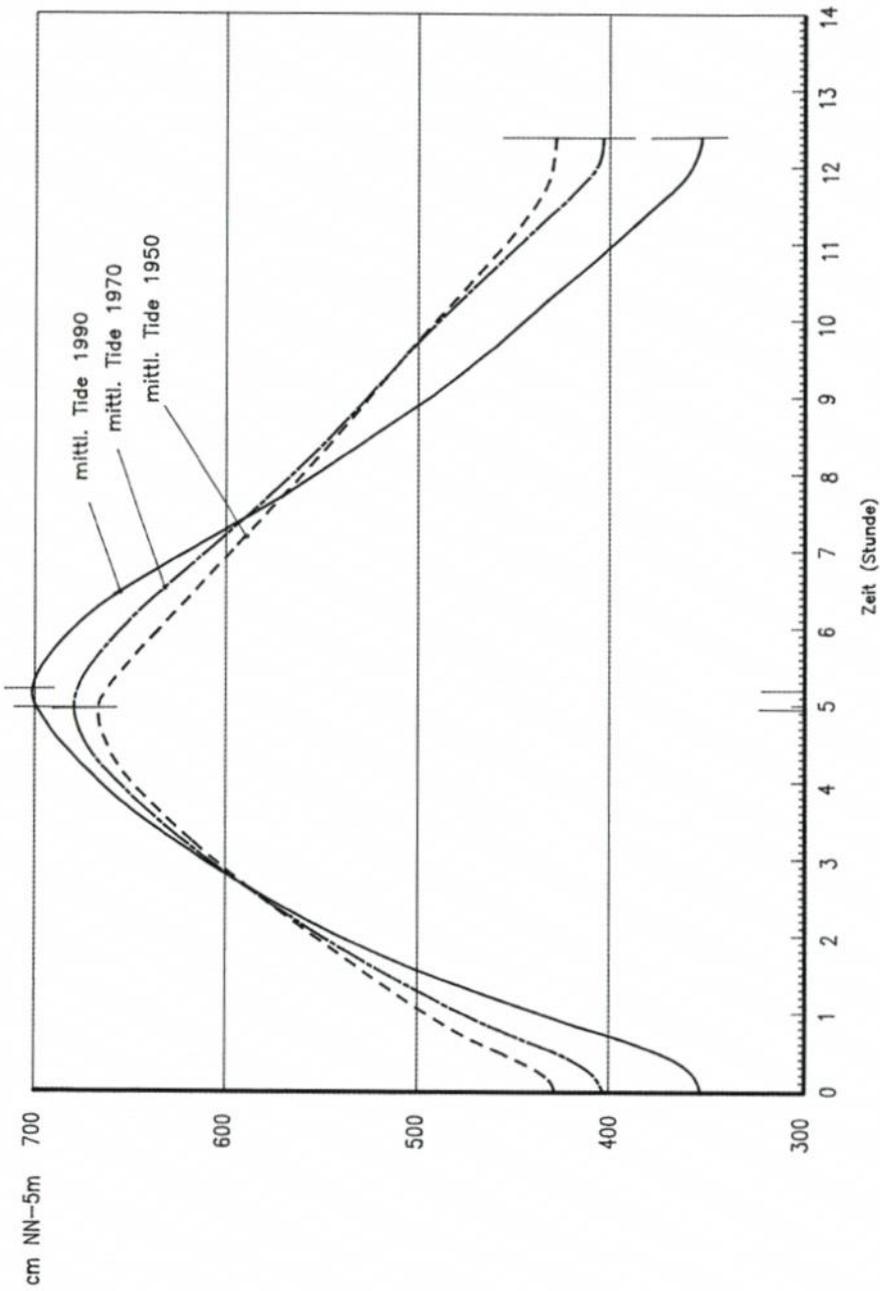


Abb. 23: Mittlere Tidekurven Hamburg-St. Pauli

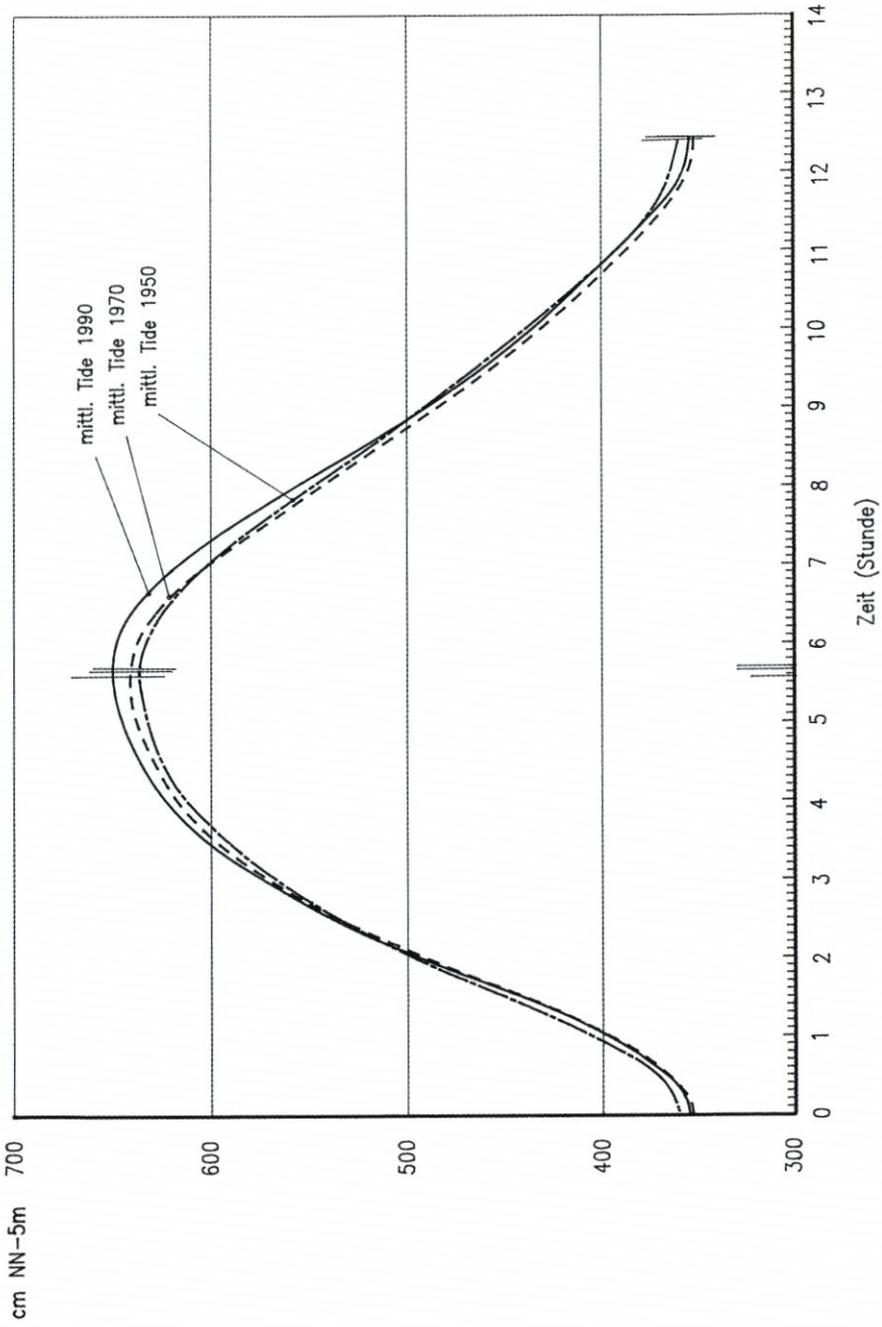


Abb. 24: Mittlere Tidekurven Cuxhaven

verwaltung des Bundes bzw. des Amtes Strom- und Hafenausbau gegeben hat. Gleichwohl war insbesondere vor dem Hintergrund der geplanten Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt eine plausible Erklärung dieser Entwicklung geboten. Siehe dazu Kap. 4.7.

3.3 Tideströmungen Elbe

Leider existieren keine durchgehenden Strömungsmessungen an festen Orten über die letzten Jahrzehnte, die den Wasserstandsmessungen vergleichbar wären. Die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung hat 1978 an einigen Stationen (Tab. 2) mit kontinuierlichen Messungen begonnen, diese aber bisher nicht aufbereitet und veröffentlicht (die Rohdaten liegen auf CD-ROM vor). In der Delegationsstrecke gab es zwei feste Meßpunkte (Bunthaus und Teufelsbrück, km 610 und 631). Die Ergebnisse der ersten Station blieben lückenhaft, die der anderen unbrauchbar. So verbleibt die vergleichende Analyse von Einzelwerten. Ergänzt werden diese Ergebnisse durch Einzelmessungen, meist über ganze Tiden, in verschiedenen Querschnitten bei unterschiedlichen Randbedingungen. Einzelheiten zu den Messungen zwischen km 607,8 und 636,9 und die zusammengefaßten Ergebnisse können bei SIEFERT (1995) entnommen werden. Allgemein läßt sich für das Stromspaltungsgebiet keine signifikante Veränderung in den mittleren Geschwindigkeiten über die letzten drei Jahrzehnte erkennen. Die Werte liegen für V_f bei 0,4 m/s (Norder- und Süderelbe) und 0,6 m/s (Untere Elbe), für V_e bei 0,6 bis 0,8 m/s.

Aus der beispielhaften Darstellung des Strömungsverlaufes auf Abb. 25 geht allerdings hervor, daß allein die Tidemittelwerte nicht sehr aussagekräftig sind. Deshalb folgt an dieser Stelle eine Bewertung, deren Grundlage der Bericht zu Ergebnissen einer numerischen Simulation ist, durchgeführt vom DANISH HYDRAULIC INSTITUTE (1988). In dieser Berechnung wurden die Strömungsverhältnisse von 1950 bis 1986 ermittelt. Dieser Zeitraum umfaßt alle Fahrrinnenvertiefungen einschließlich der Vorlandeindeichungen, Nebelbeabdämmungen und sonstigen Maßnahmen.

Von 1950 bis 1986 haben sich die Strömungsverhältnisse in der Elbe danach wie folgt geändert:

– Obere Tideelbe

- Verschiebung der Flutstromgrenze bei mittleren Tideverhältnissen von Over bis etwa Zollenspieker (8 km stromauf)
- Verstärkung des Flutstroms, Abnahme des Ebbstroms

– Süderelbe (Bunthaus bis Elbbrücken)

- Starke Zunahme von Flut- und Ebbstrom

– Süderelbe (Elbbrücken bis Köhlbrand)

- Kaum Veränderungen der V und \bar{V}_{\max}
- leichte Erhöhung der V_{\max} bei Flut

– Norderelbe (Bunthaus bis Elbbrücken)

- Zunahme des Flutstroms, kaum Veränderungen des Ebbstroms

– Norderelbe (Elbbrücken bis Einmündung Köhlbrand)

- Mittelwerte der Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten kaum verändert
- Zunahme der V_{\max} und \bar{V}_{\max} bei Flut gegenüber den Werten bei Ebbe

* Beurteilungen von Dr.-Ing. H. CHRISTIANSEN, Strom- und Hafenausbau

Beispiel für normalen Tideablauf im Bereich Seemannshöft (Hamburg) 1950 und 1988

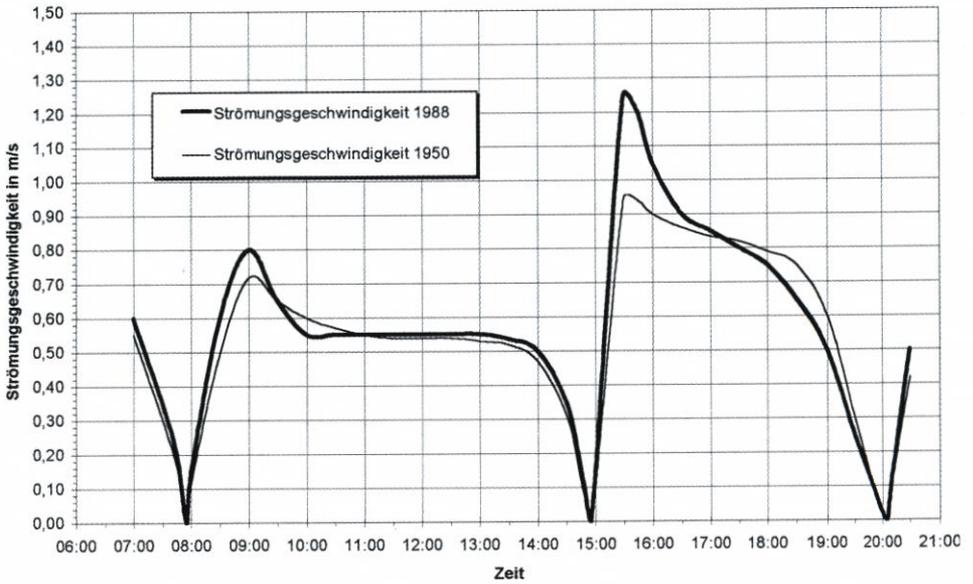
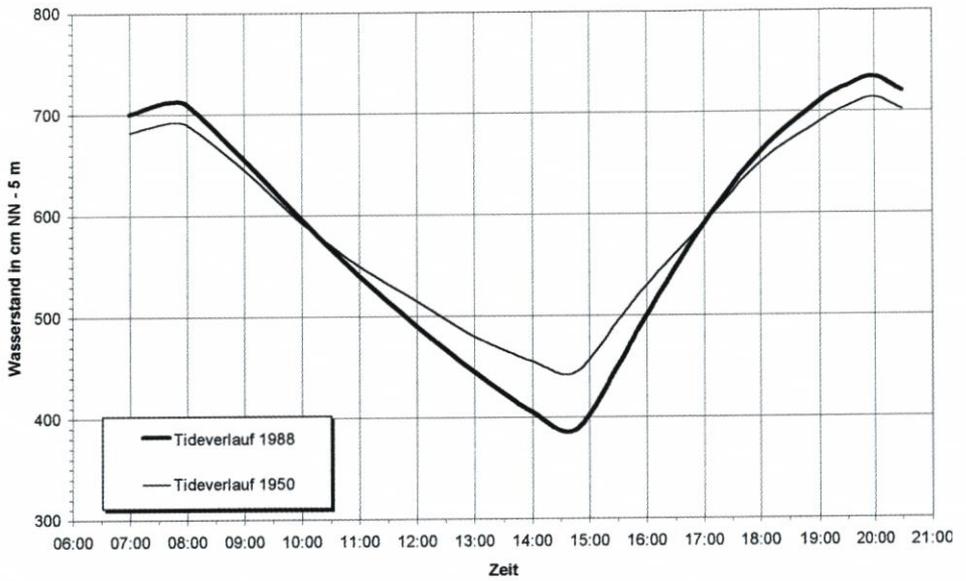


Abb. 25

- Unterelbe (Köhlbrandeinmündung bis Neß)

- Mittelwerte der Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten kaum verändert
- Deutliche Zunahme der V_{\max} und \bar{V}_{\max} bei Flut gegenüber den Werten bei Ebbe

Erläuterung: \bar{V} = Mittelwert bei mittl. Tide und mittl. Oberwasser
 \bar{V}_{\max} = Maximum bei mittl. Tide und mittl. Oberwasser
 V_{\max} = Maximum bei extremen Tide- und Oberwasserverhältnissen

Aus den dargestellten und beschriebenen Strömungsveränderungen muß auf einen verstärkten Feststofftransport mit der Flut in Richtung Hamburg und entsprechend erhöhte Sedimentationsablagerungen im Hamburger Hafen geschlossen werden. Da vor 1977 keine Sedimentationsberechnungen durchgeführt wurden, liegen allerdings keine Daten vor, die diese Schlußfolgerung verlässlich absichern.

Wenn die mittleren Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten über einen Zeitraum von 30 Jahren weitgehend konstant geblieben sind und sich gleichzeitig der Tidehub von 2,5 m auf 3,5 m erhöhte, so wird zwar der damit verbundene größere Durchfluß durch den größer gewordenen Querschnitt ermöglicht, hat zugleich aber auch zu höheren Ebbe-, aber vor allem Flutstromspitzen geführt (Abb. 25), analog zur steileren Tidekurve (Abb 23).

Über die Ergebnisse von ausgewerteten Querschnittsmessungen unterhalb Elbe-km 639 heißt es beim WASSER- UND SCHIFFAHRTSAMT HAMBURG (1992) einleitend, daß über die Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeiten keine genaue Aussage getroffen werden kann. Seit 1974 wurden in der Hauptelbe nur noch wenige Messungen, ab 1983 keine mehr durchgeführt. Die wenigen Messungen zwischen 1974 und 1982 erfolgten nicht immer in den gleichen Meßquerschnitten. Die Streuung bei den einzelnen Messungen war sehr groß, da die Strömungsgeschwindigkeiten stark mit den Scheitelwasserständen und der unterschiedlichen Folge verschieden hoher Wasserstände wechseln. Entwicklungstrends der Strömung lassen sich daraus nicht sicher interpretieren. Wegen der ungünstigen Datenlage wurden deshalb gemittelte Strömungswerte aus Kubizierungen herangezogen. Danach ist von einem Anstieg der mittleren Strömungsgeschwindigkeit für den Zeitraum von 1975 bis 1980 um rund 2 cm/s je Jahr für die Ebbe und 1 cm/s je Jahr für die Flut auszugehen. 1980 wurden bei Ebbe ein Mittel von rd. 0,95 m/s und bei Flut von rd. 0,80 m/s erreicht. Da die Hauptelbe bereichsweise ausgeräumt wurde und die Nebelelben sich zum Teil stark verkleinert haben, zeigt sich, daß die Verstärkung der Strömung in der Hauptelbe auftritt, und daß in den Nebelelben demgegenüber Schwächungen der Strömung eingetreten sein müssen.

Über Strömungsmessungen in den Nebelelben (Abb. 26) berichtet die BUND-LÄNDER-ARBEITSGRUPPE BEWEISSICHERUNG (1995). Sie geht für 1958/73 von folgenden mittleren Strömungsgeschwindigkeiten aus:

Tab. 10: Meßquerschnitte in Nebenrinnen der Elbe mit Mittelwerten

Nebenrinne	Elbe-km	V_f m/s	V_e m/s
Lühesander Nebelbe	647,7	0,55	0,35
Lühesander Nebenrinne	647,7	0,40	0,30
Lühesander Süderelbe	650,0	0,50	0,45
Pagensander Nebelbe	664,7	0,50	0,45
Glückstädter Fahrwasser	676,5	0,45	0,45

Des Weiteren führt die Arbeitsgruppe u. a. aus, daß die Strömungsgeschwindigkeiten für Flut (Abb. 27) und Ebbe (Abb. 28) vorher und während des Ausbaus der Fahrrinne auf 13,5 m unter KN eine unterschiedliche Reihung der Nebelben nach Intensität der Strömungen zeigt als direkt nach der Ausbauphase. Ab Mitte der 80er Jahre stellt sich jedoch die frühere Reihenfolge wieder ein. Während die Ebbströmungen der Lühesander und der Pagensander Nebelbe sowie die des Glückstädter Fahrwassers fast gleich groß sind, ist die Differenz bei der Flutströmung größer.

Die relativ hohen Geschwindigkeiten bei allen Elbe-Profilen in den Jahren 1976/77 sind nach Ansicht der Arbeitsgruppe vermutlich durch die schon durchgeführten Ausbaumaßnahmen mit Fahrrinnenbreiten bis zu 500 m (unterhalb der hier betrachteten Nebenrinnen) zu erklären. Die Mittelwerte des Zeitraums 1958/1973 (siehe vorstehende Tab.) entsprechen etwa den mittleren Verhältnissen vor dem 13,5-m-Ausbau. Später haben sich die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten des Zeitraums ab ca. 1983/84 gegenüber denen aus der Zeit vor der Ausbaumaßnahme nicht nachweislich verändert. Verstärkte Tidebewegungen finden also in vergrößerten Querschnitten statt.

3.4 Sturmfluten, Windstau Elbe

Die Entwicklung der Sturmfluten in der Elbe ist in einer ganzen Reihe von Veröffentlichungen dargelegt. Einige neuere sind: SIEFERT u. LASSEN (1986); SIEFERT u. HAVNØ (1989); SIEFERT (1994).

Sturmfluten entstehen in der südlichen Nordsee durch Wirkung oder Überlagerung von Windstau u. a. Einflüssen mit der astronomischen Tide. Hohe Sturmflutwasserstände an der deutschen Nordseeküste sind Folge von Stürmen aus südwestlichen bis nördlichen Richtungen, während Ostwindlagen die Wasserstände absenken. Die für die Elbe besonders kritische Windrichtung ist 290°.

Die sich ergebende rechnerische Windstaukurve ist die Differenzkurve zwischen der eingetretenen und der vorausgerechneten astronomischen oder der für dieselbe Zeit gebildeten mittleren Tide. Neben dem eigentlichen Windstau enthalten die Windstaukurven noch Anteile aus Böigkeit des Windes, Wirkung des Luftdrucks, Luftdruckschwankungen, Wasser- und Lufttemperaturen, Eigenschwingung des Meeres, Fernwellen („external surges“), Trogschwallhöhen sowie „return surges“ durch plötzliches Abflauen des Windes. Auch der Brandungstau ist darin eingeschlossen. Windstau und Brandungstau werden auch als „Gesamtstau“ bezeichnet.

Die Windstaukurve an der Küste ist also das Produkt von Vorgängen, die sich in der Nordsee - und dann in für uns entscheidendem Maße in der Deutschen Bucht - abspielen. Jede einzelne Sturmflut stellt ein individuelles Ereignis dar. Sie läuft je nach Wind- und anderen Einflüssen unterschiedlich ab. Keine Sturmflut wird einen identischen Nachfolger finden. Deswegen macht es wenig Sinn, im Rahmen dieser Arbeit einzelne Ereignisse zu kommentieren.

Bei der Betrachtung der Sturmflutentwicklung in den deutschen Tideflüssen darf nicht vernachlässigt werden, daß ein Großteil der Entwicklung an den oberen Tidepegeln - etwa der deutliche Anstieg in den letzten drei Jahrzehnten - schon an den Mündungspegeln, allerdings in schwächerer Form, aufgetreten ist und entsprechend nach oberstrom wirkt. Wie sich die fünfjährigen Mittel der Höhen von Sturmfluten, deren Windstau in Cuxhaven im Verlaufe der Sturmtide (also nicht unbedingt um Thw!) 2 m überschritt, in der Elbe entwickelten, zeigt Tab. 11. Dabei wird zum einen deutlich, daß die Anzahl von Ereignissen dieser Art

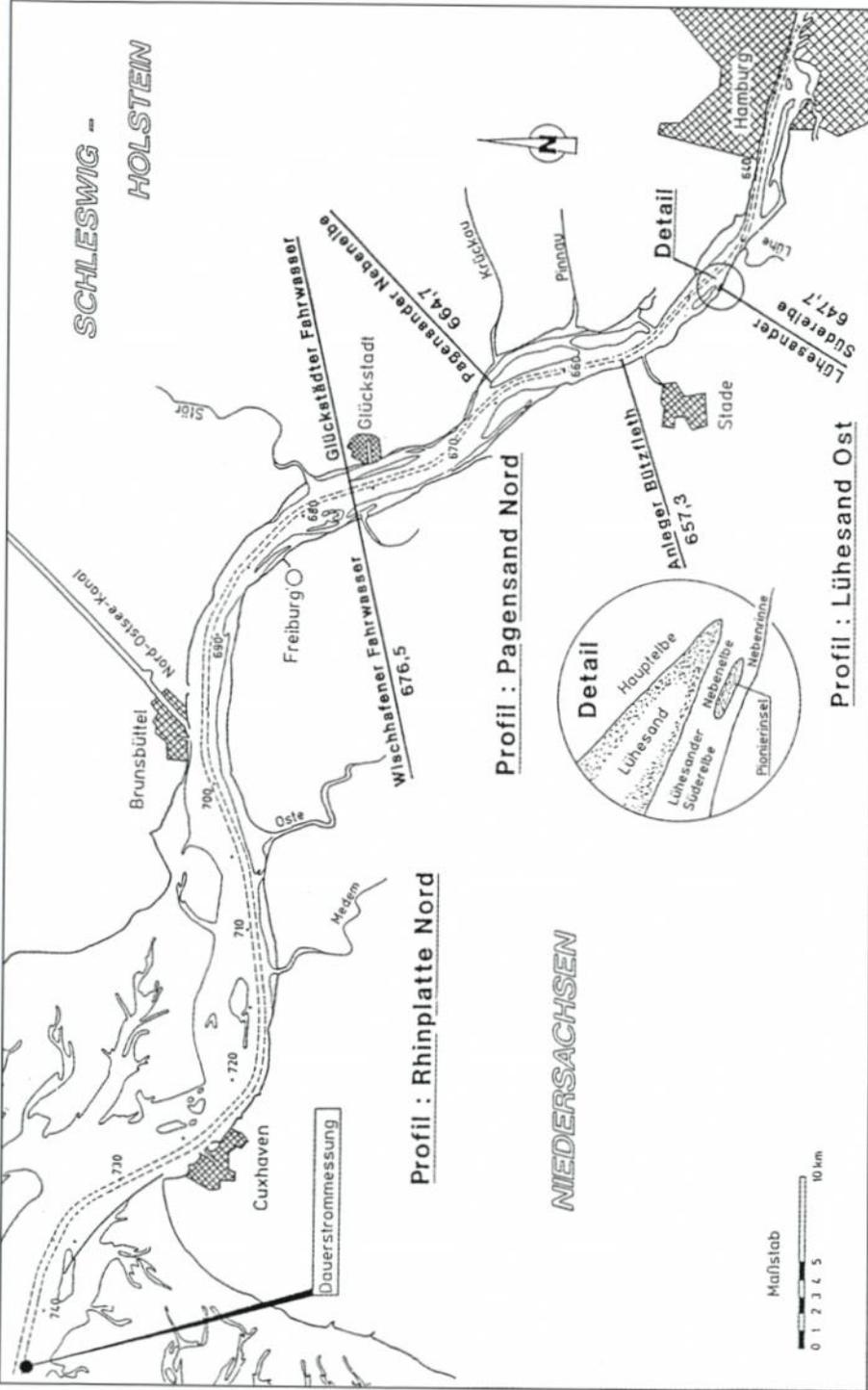


Abb. 26: Lage der Strömungsmeßprofile in den Nebenrinnen (nach BUND-LÄNDER-AG)

Mittlerer Flutstrom in Nebeneiben (nach Bund-Länder-AG)

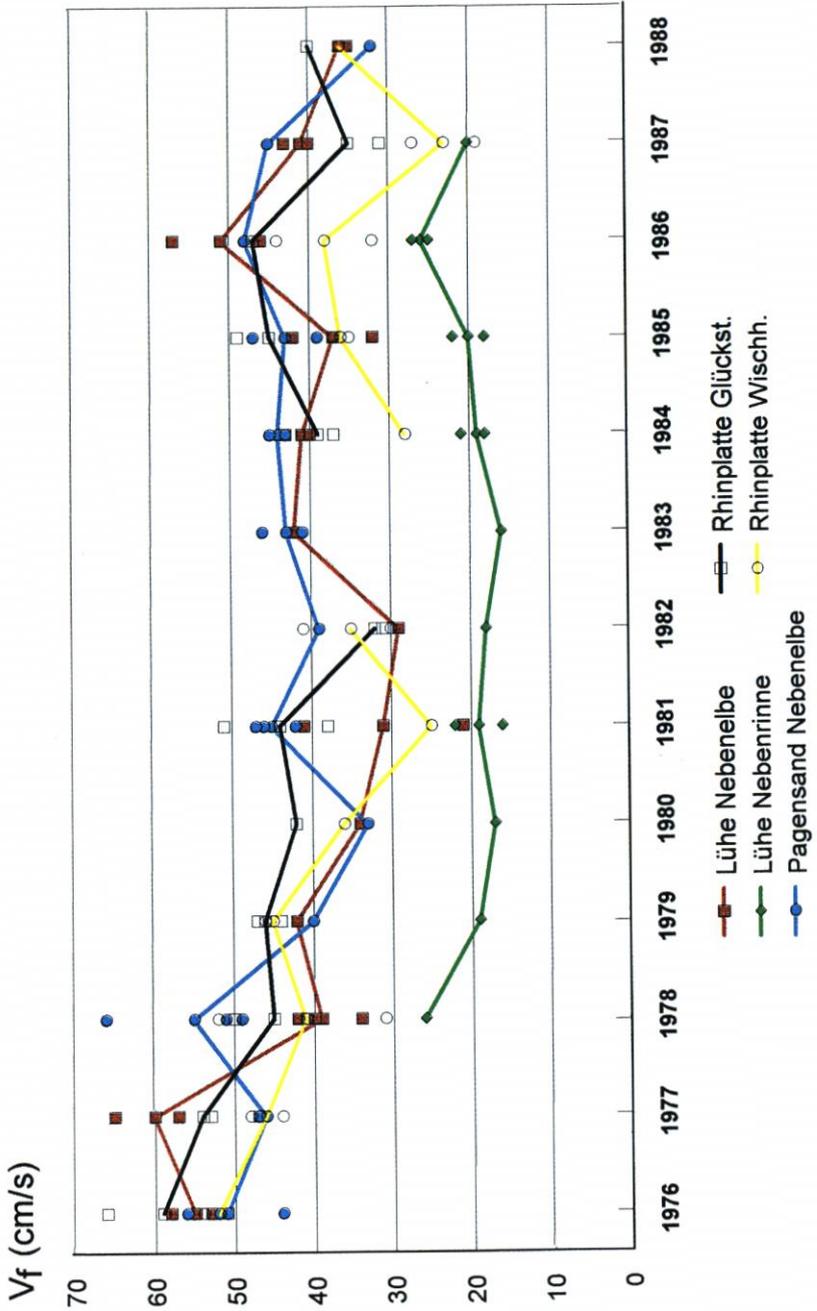


Abb. 27

Mittlerer Ebbestrom in Nebeneiben (nach Bund-Länder-AG)

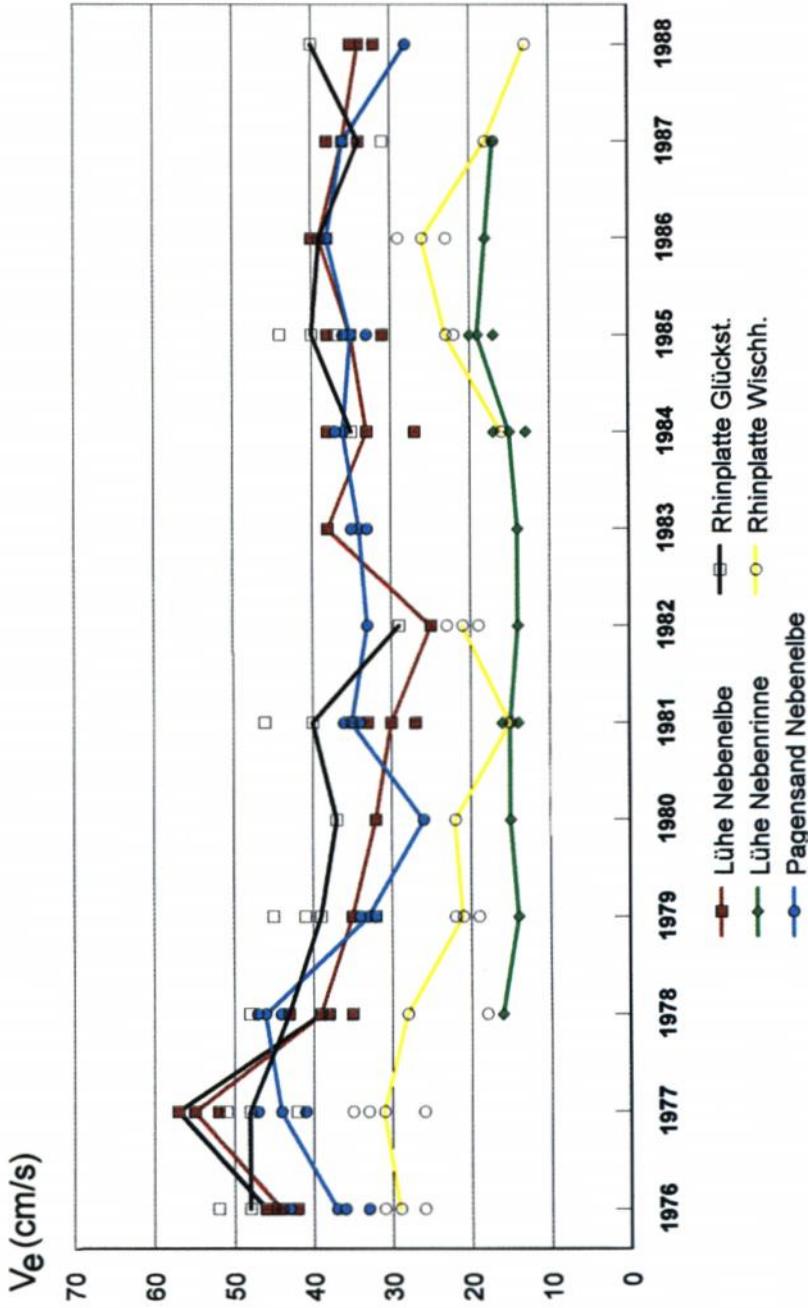


Abb. 28

innerhalb von fünf Jahren schon an der Mündung der Elbe zweimal sprunghaft zugenommen hat: Anfang der 60er und Anfang der 80er Jahre. Die Grafik auf Abb. 29 scheint zum anderen anzudeuten, daß zwischen 1951 und 1980 ein Anstieg der mittleren Höhen in Cuxhaven vorhanden war. Die gesamte dargestellte Reihe zeigt dann allerdings keinen Trend mehr für Cuxhaven. Auch die Hamburger Mittel sind seit über 20 Jahren etwa konstant. Das Mittel 1976–80 zeigt für alle betrachteten Pegel das Maximum.

Tab. 11: Anzahl und mittlere Höhen von Sturmfluten mit Windstau in Cuxhaven über 2 m

Zeitraum	Anzahl	Mittel der Höhen in cm NN – 5 m				
		Cuxhaven	Brunsbüttel	Stadersand	Hamburg	Zollenspieker
1951–55	10	828	836	852	875	886
1956–60	8	794	803	808	834	853
1961–65	18	805	818	832	858	879
1966–70	19	785	796	805	837	863
1971–75	19	834	836	860	898	920
1976–80	15	849	861	899	938	965
1981–85	31	807	822	858	900	928
1986–90	24	811	832	873	911	937
1991–95	30	817	825	872	915	942

Die Höhen- und Zeitdifferenzen für die rd. 100 km auseinanderliegenden Orte Hamburg und Cuxhaven auf der folgenden Tabelle bestätigen, daß neben der Zunahme der Sturmflutereignisse in den letzten Jahrzehnten zugleich eine Höhendifferenz-Zunahme und eine Änderung der HThw-Eintrittszeitdifferenzen zu verzeichnen sind. Ab Mitte der 1960er Jahre treten vornehmlich solche Sturmfluten auf, deren „Laufzeiten“ absolut und gegen die Jahresmittel wesentlich kürzer sind. Dabei geht allerdings die große Streuung der Einzelwerte (Abb. 30 und 31) unter.

Tab. 12: Fünfjährige Mittel von Sturmfluten, deren Windstau in Cuxhaven 2 m überschritt; Höhen- und Zeitdifferenzen in der Elbe

Zeitraum	Anzahl	Hmb. St.Pauli-Cuxhaven	
		ΔH (cm)	ΔT (h)
1951/55	10	47	4:25
1956/60	8	40	4:25
1961/65	18	54	4:13
1966/70	19	53	3:59
1971/75	19	64	3:53
1976/80	15	89	3:22
1981/85	31	92	3:26
1986/90	24	100	3:21
1991/95	30	98	3:29

3.5 Tidewasserstände Nebenflüsse

3.5.1 Ilmenau

Die das Geschehen in diesem Nebenfluß anregende Tide der Elbe entwickelte am Pegel Zollenspieker über die letzten 45 Jahre einen MThw-Anstieg sowie einen MTnw-Abfall, wobei Schwankungen des Oberwasserzuflusses der Elbe sehr deutlich werden (Abb. 12 und 13).

**Fünffährige Mittel der Sturmfluthöhen in Cuxhaven und Hamburg - St. Pauli
(Alle Ereignisse mit einem Windstau über 2 m in Cuxhaven)**

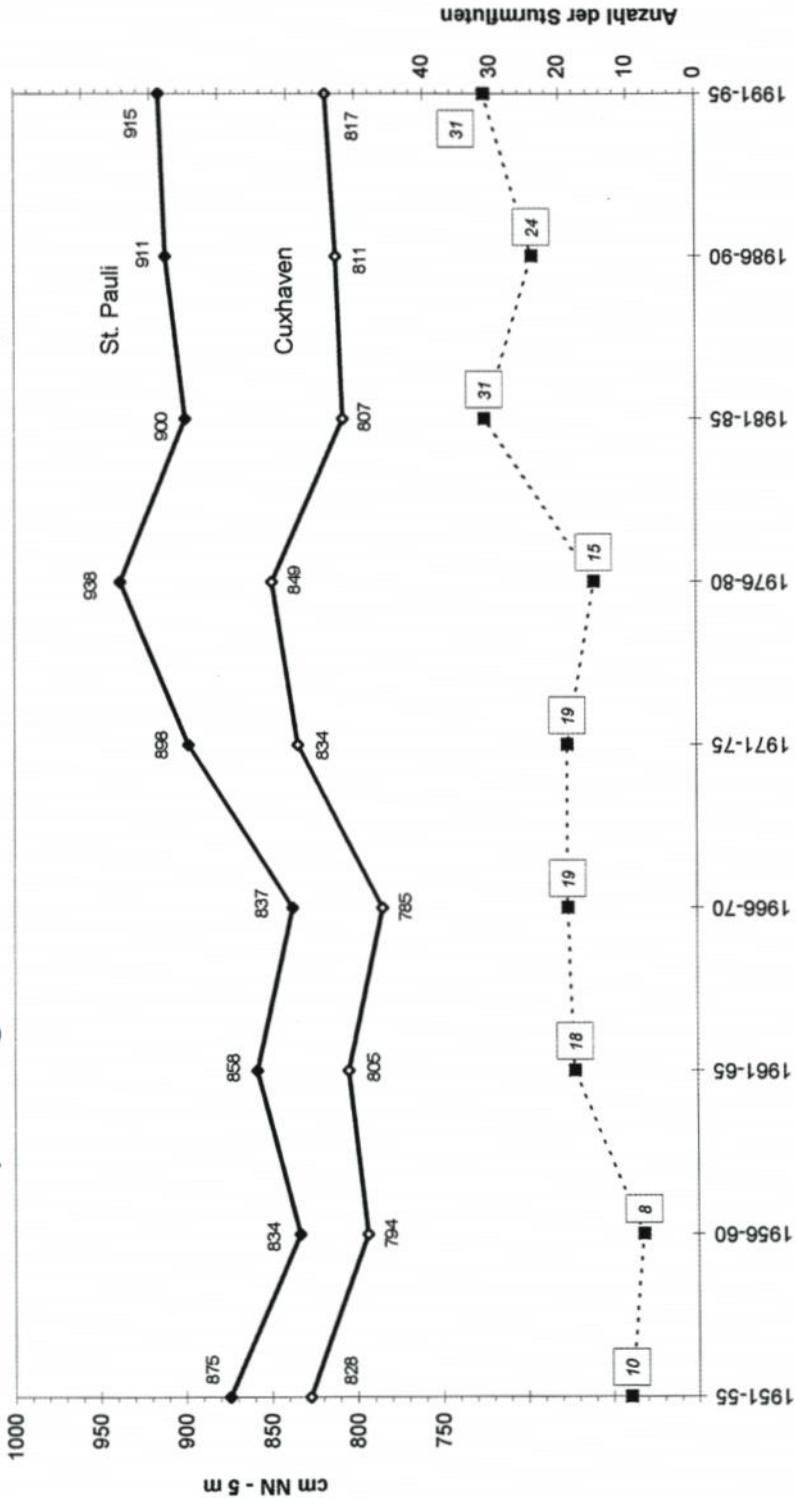


Abb. 29

HThw - Höhendifferenzen zwischen Hamburg-St. Pauli und Cuxhaven seit 1900

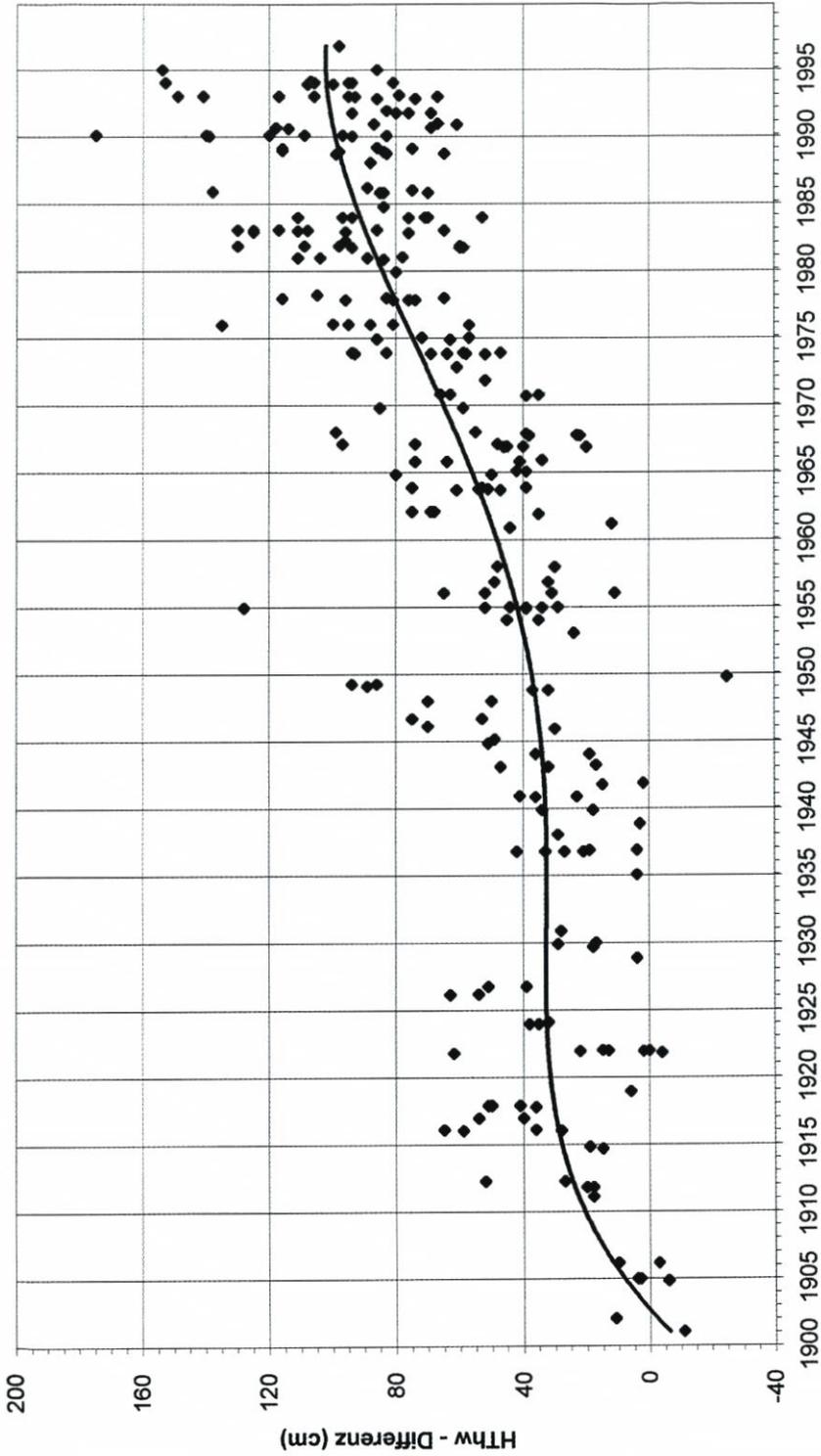


Abb. 30

HThw - Zeitdifferenzen zwischen Hamburg-St. Pauli und Cuxhaven seit 1900

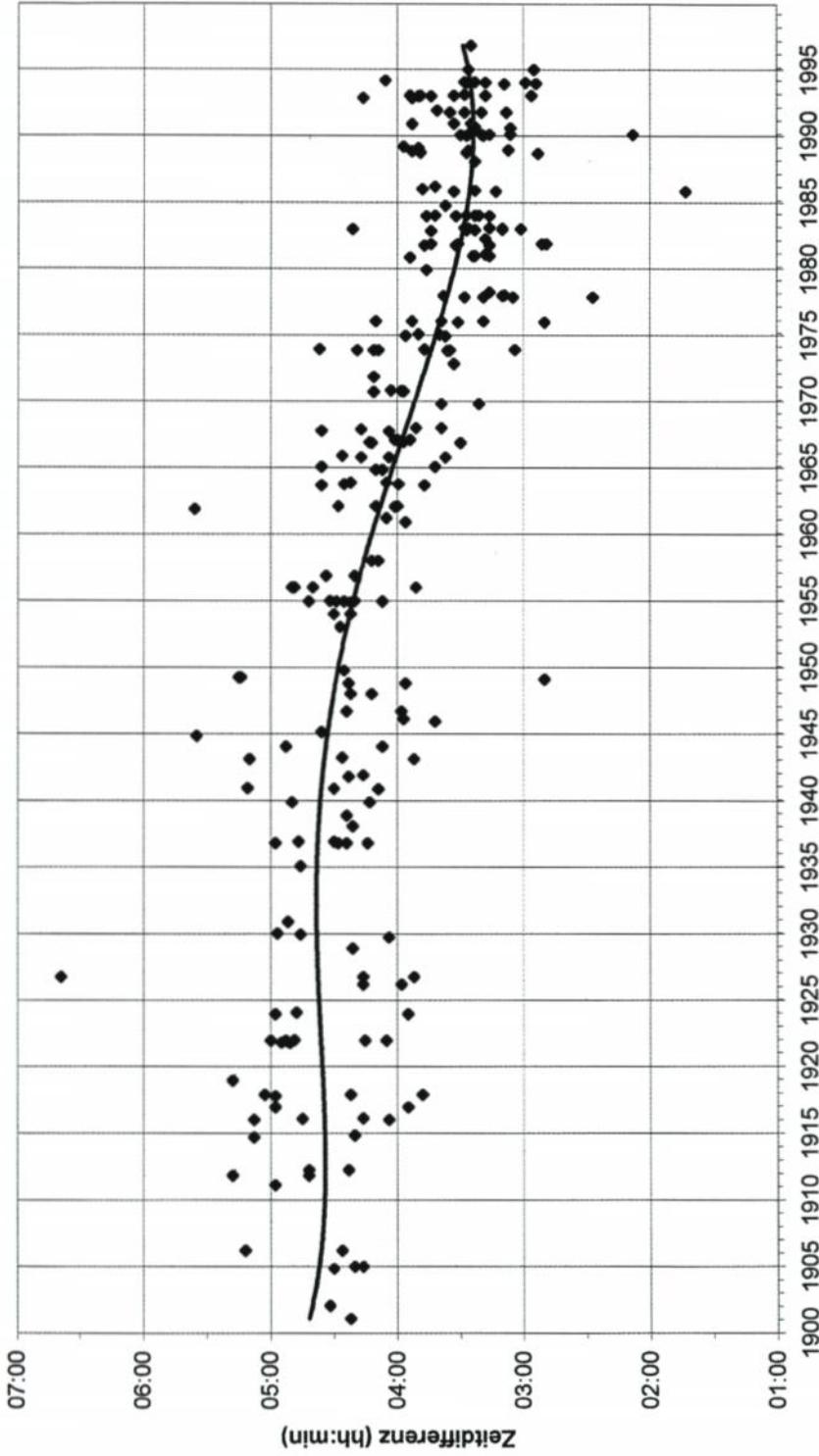


Abb. 31

Es zeigt sich, daß eine Wertung vor allem des Tnw-Trends nicht ohne Diskussion der Q_0 -Entwicklung möglich ist. Die regionalen Eingriffe haben ihre Spuren hinterlassen, wobei die Wirkung der Errichtung des Ilmenau-Sperrwerkes untergeht. Bemerkenswert ist eine Verharrung der MThw in der Elbe auf etwa 740 cm NN – 5 m nach der letzten Vertiefung.

Die Jahreswerte am Sperrwerkspegel sind praktisch identisch mit denen am 0,5 km entfernten Pegel Zollenspieker. Interessant ist nunmehr, wie sich die Tide und ihre Variationen in die Ilmenau fortpflanzen (Abb. 32 und 33). Die Aussagen der drei unvollständigen Ilmenau-Meßreihen lassen für die allgemeine Entwicklung seit 1950 folgende Schlüsse zu:

- Das MThw ist in der Elbe von etwa 700 auf etwa 740 cm NN – 5 m angestiegen. Diese Entwicklung ist – allerdings in abgeschwächter Form – bis nach Fahrenholz zu beobachten; als Ergebnis zeigen sich seit etwa 1975 im gesamten Nebenfluß gleich hohe MThw wie in der Elbe;
- Das MTnw in der Elbe schwankte bis 1970 um etwa 540 cm NN – 5 m, in Stöckte um 580 und in Fahrenholz um 630 cm NN – 5 m. Seit 1980 traten Höhen zwischen 450 und 550 cm NN – 5 m in der Elbe wie am Sperrwerk auf, bei Fahrenholz rd. 1 m höher und weniger schwankend. Die starke Reibung in dem schmalen und flachen Nebenfluß verhindert hier offensichtlich einen Tnw-Abfall wie in der Elbe.
- Der MThb (als Maß für den Energieeintrag) hat sich wie folgt entwickelt: In der Elbe ist eine Erhöhung von 1,5 m (1950) auf 1,8 m (um 1970) und dann weiter auf 2,5 m (um 1990) zu verzeichnen. Ungefähr der gleiche letztere Wert war um 1990 auch am Sperrwerk festzustellen. Am Pegel Stöckte betrug der Tidehub um 1950 etwa 1,3 m und blieb bis um 1970 weitgehend auf diesem Niveau. In Fahrenholz ist ein Anstieg von 0,8 m (um 1950) auf rd. 1,0 m (um 1970) zu verzeichnen, was wegen unveränderter Werte im unterstromigen Stöckte nebenflußspezifisch sein muß. Um 1990 beträgt der Tidehub hier etwa 1,5 m.

Die Ergebnisse lassen sich hinsichtlich der geschätzten Dämpfung der Variationen der elbseitigen Randwerte wie auf Tab. 13 zusammenfassen. Die gegenüber den MThw stärkere Dämpfung der MTnw-Variationen geht auf die dann sehr geringen Wassertiefen zurück; hier ist die Topographie dominant. Flußspezifische Entwicklungen zeigt oben auch der MThb-Vergleich zwischen Stöckte und Fahrenholz. Folglich liegt zwischen diesen beiden Orten der „Wirkungswechselpunkt“, d. h. die Grenze zwischen der Dominanz von Elbe und Ilmenau. Auf diese Punkte wird deswegen in den weiteren Betrachtungen hingewiesen, weil sie ein wichtiges nebenflußspezifisches Charakteristikum darstellen.

Tab. 13: Dämpfung der Variationen der MThw und MTnw der Elbe in der Ilmenau

Pegel	km oberhalb der Mündung	Dämpfung der Variationen der Randwerte in % (geschätzt)			
		Jahresmittel		langfristiger Trend	
		MThw	MTnw	MThw	MTnw
Sperrwerk	0,5	0	0	0	0
Stöckte	2,0	0	20	0	20
Fahrenholz	9,7	10	30	20	50

3.5.2 Seeve

Die Seeve ist seit 1966 durch ein Siel dem Tideeinfluß entzogen. Gleichwohl wirkt sich das Tidegeschehen der Elbe zu bestimmten Tidephasen in einem kleinen Umfang auf den untersten Teil der Seeve aus. Mehrfache Beobachtungen der Wasserstandsverhältnisse in der

Ilmenau: MThw seit 1950

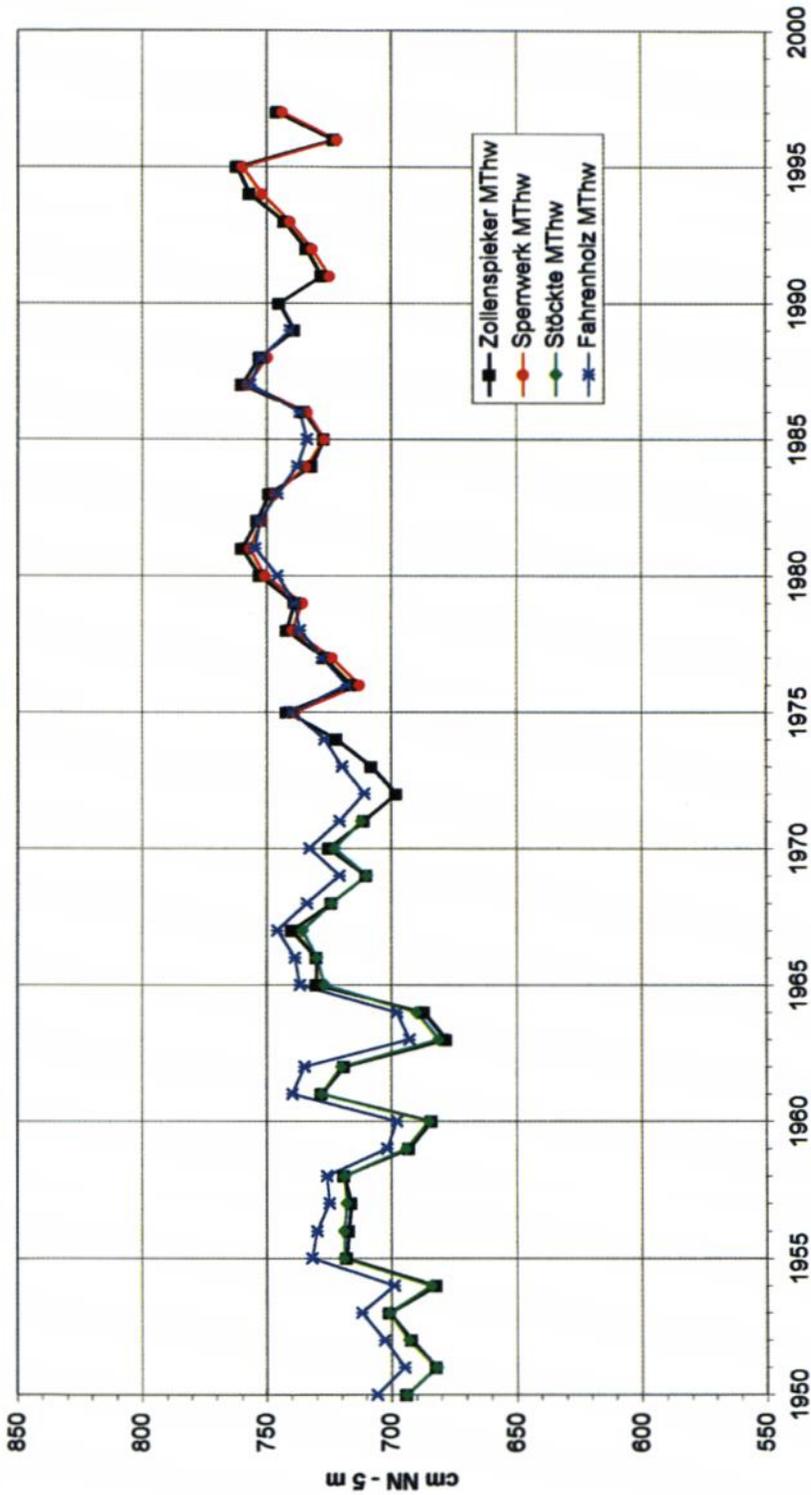


Abb. 32

Ilmenau: MTnw seit 1950

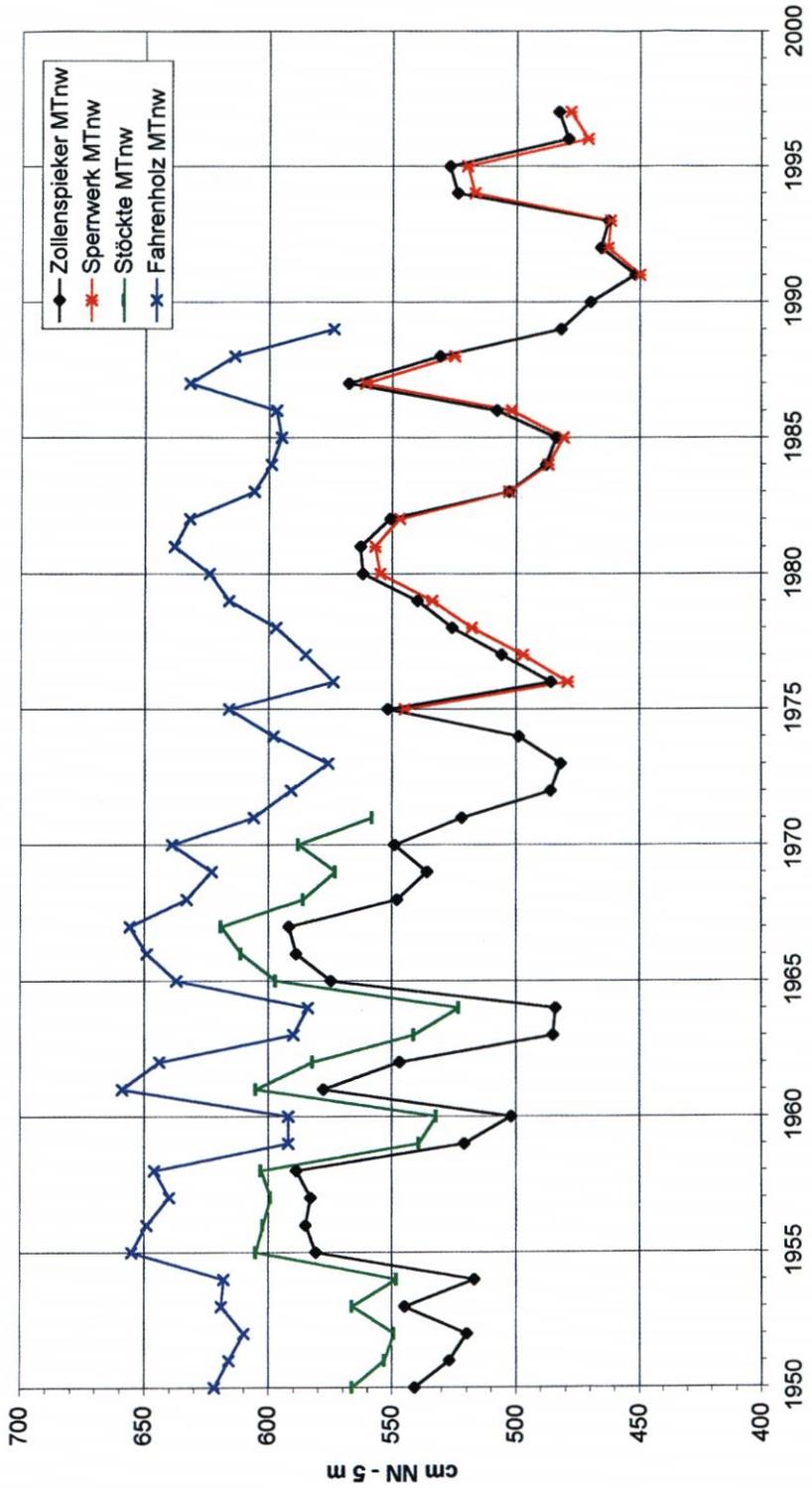


Abb. 33

unteren Seeve, die im Laufe des gewässerkundlichen Jahres 1996 vorgenommen wurden, ergeben folgendes Bild: Nach dem Eintritt des Niedrigwassers in der Elbe (also vor dem Siel) läuft etwa 30 Minuten lang Wasser durch die dann noch nicht vollständig geschlossenen Sieltore in die untere Seeve ein. Die dadurch bedingte Wasserspiegelauslenkung kann dort maximal rd. 0,5 m erreichen. Während dieser Zeit strömt das Wasser mit etwa 0,1 m/s seeveaufwärts. An der Straßenbrücke rd. 2 km oberhalb des Sieles sind – bei einer Breite des Flusses von 5 m und einer Tiefe von 0,5 m – keinerlei Wasserstandsschwankungen mehr feststellbar. Durch den Rückstau am Siel wird zeitweise Seeve-Oberwasser in den Mühlenbach, rund 1 km oberhalb des Sieles, geleitet.

Der Wirkungswechsellpunkt zwischen dominierendem Elbe- bzw. Seeve-Einfluß muß somit unmittelbar oberhalb des Sieles liegen.

3.5.3 Este

Die Tiderandwerte am Pegel Blankenese (Abb. 16 u. 17) sind praktisch identisch mit denen am Pegel Cranz und haben sich markant in dem Zeitraum von Mitte der 1960er bis Ende der 1970er Jahre verändert, danach sind sie – berücksichtigt man die Einflüsse des schwankenden Oberwasserzuflusses – stabil geblieben. Die MThw erhöhten sich um rd. 3 dm, während die MTnw um etwa 5 dm absanken. Die Absperrung der Alten Süderelbe und die Fertigstellung des Sperrwerkes als singuläre Ereignisse werden an den Jahresmitteln nicht deutlich. Die Wasserstände im Nebenfluß reagierten wie folgt (Abb. 34):

- Das MThw ist in der Elbe seit 1950 von etwa 660 auf etwa 690 cm NN – 5 m angestiegen, bei Buxtehude allerdings lediglich von 660 auf etwa 680 cm NN – 5 m.
- Das MTnw fiel in der Elbe in dieser Zeit von ca. 420 auf rd. 370 cm NN – 5 m, aber nur von etwa 480 auf etwa 470 cm NN – 5 m in Buxtehude, somit also stark durch die geringen Wassertiefen in der Este gedämpft.
- Der MThb entwickelte sich bei Cranz von 2,4 m (um 1950) auf 2,7 m (um 1970), um dann bis 1990 auf 3,2 m anzusteigen. In Buxtehude war dagegen von 1950 bis 1970 keine nennenswerte Änderung des MThb von 1,8 m zu beobachten. Bis 1990 stieg er hier dann auf 2,1 m an.

Am Pegel Buxtehude (12 km oberhalb der Mündung) treten sowohl die Variationen als auch die generellen Trends durch die Topographie dieses kleinen Nebenflusses deutlich gedämpft auf: Während erstere bei den Jahresmitteln sowohl der MThw als auch der MTnw um etwa 40 % gedämpft werden, sind es in bezug auf den langfristigen Trend beim MThw 50 % und beim MTnw etwa 70 %.

Das Thw tritt in Buxtehude 55 bis 60 min. später als in Cranz ein, das Tnw 1:20 h bis 1:30 h später, und zwar seit 1950 praktisch unverändert. Damit sind also auch Flut- und Ebbedauer gleich lang geblieben.

Der Wirkungswechsellpunkt, der die Grenze zwischen dem Elbe- und dem Estebeeinflußten Flußabschnitt markiert, kann in seiner Lage nur grob geschätzt werden. Vermutlich liegt er 6 bis 8 km oberhalb der Mündung.

3.5.4 Lüh e

Die Tiderandwerte bei Lühort (Abb. 16 u. 17) sind außer von den Fahrrinnenvertiefungen durch Sandentnahmen, insbesondere für die Deichbaumaßnahmen auf der gegen-

Este: MThw und MTnw seit 1950

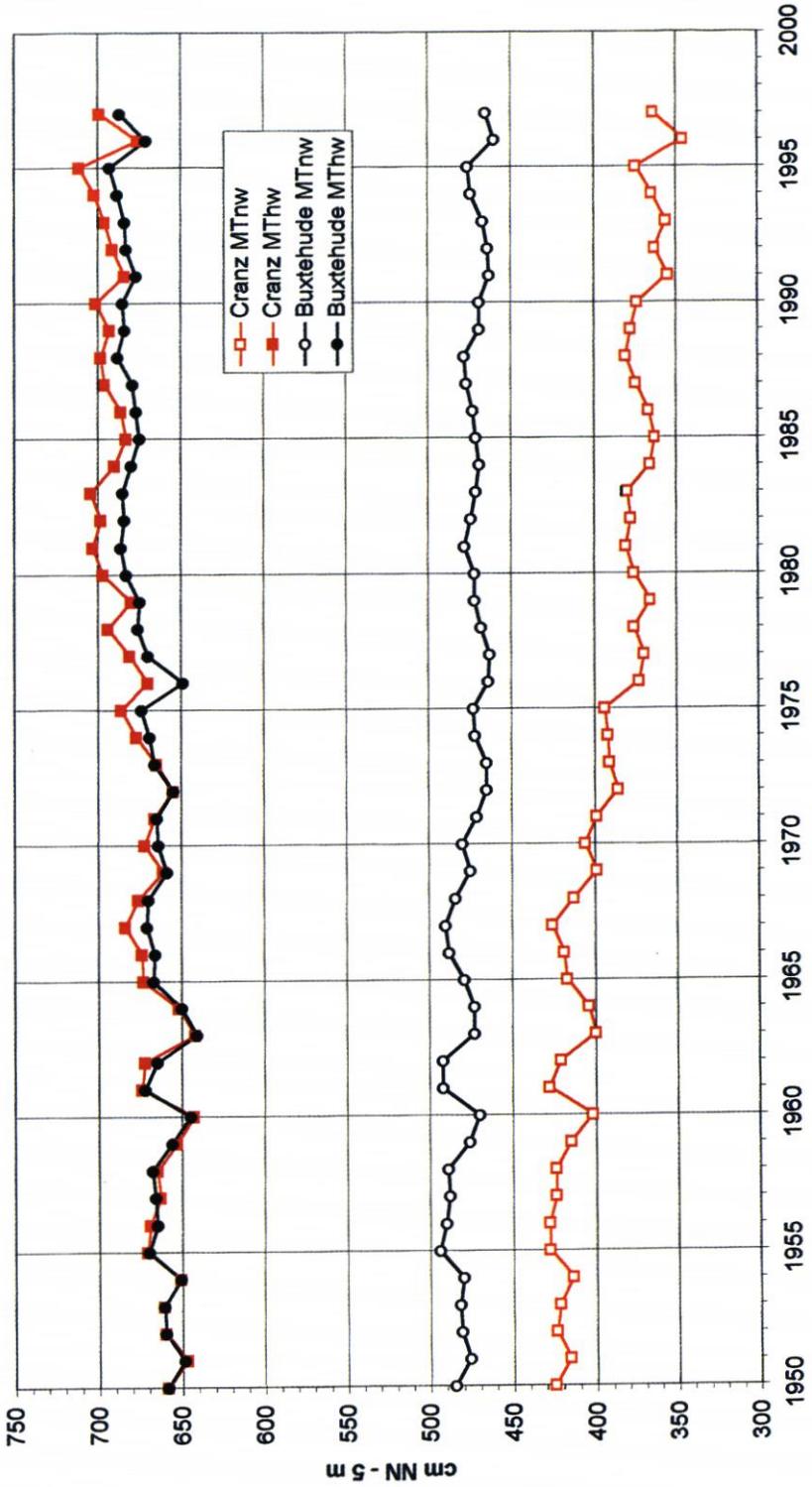


Abb. 34

überliegenden Seite der Elbe in den 1970er Jahren, geprägt. So blieben die MThw und MTnw von 1950 bis etwa 1970 und seit etwa 1980 auf konstanten mittleren Höhen. Der Bau des heutigen Lühesperrwerkes hatte auf die mittleren Wasserstände in der Elbe ohnehin keinen Einfluß, aber auch nicht auf die der Lühe, da der Fluß bereits vorher kurz oberhalb der Mündung abgesperrt war. So sind folgende Veränderungen zu verzeichnen (Abb. 35):

- Die MThw haben sich in den letzten knapp 50 Jahren in der Elbe von etwa 650 auf etwa 680 cm NN - 5 m verändert, in der oberen Lühe von etwa 635 auf etwa 660 cm NN - 5 m, also durch die Topographie leicht gedämpft.
- Die MTnw fielen in der Elbe von etwa 400 auf etwa 370, in der oberen Lühe verharren sie auf etwa 530 cm NN - 5 m;
- Entsprechend änderte sich der MThb in der Elbe von etwa 2,5 m (1950) über etwa 2,6 m (1970) auf etwa 3,1 m (1990). In Horneburg dagegen nahm der MThb der Lühe nur von rd. 1,0 m (1950 bis 1970) auf rd. 1,3 m (1990) zu.

Die Variationen am einzigen Tidepegel Horneburg (12,5 km oberhalb der Mündung) zeigen folgende Dämpfungen (geschätzt):

Jahresmittel:	MThw: 40 %	MTnw: 40 %
langfristiger Trend:	MThw: 40 %	MTnw: 100 %

Der scheinbare Widerspruch bei der MTnw-Dämpfung ist wie folgt zu erklären: Da die Lühe in Horneburg nur noch rd. 1,3 m tief ist, kann sie schon aus hydraulischen Gründen die MTnw-Absenkung an der Mündung (45 cm in 45 Jahren) nicht „mitmachen“. Dominierend sind hier Topographie und Rauheit der Gewässersohle. Die Variationen der Jahresmittel dagegen sind kleiner und werden auch durch eigene Abflüsse hervorgerufen. Dies ist damit belegbar, daß die MTnw-Ganglinien bei Lühort und Horneburg nicht immer gleichsinnig verlaufen. Der Wirkungswechsellpunkt muß hier also unterhalb von Horneburg angenommen werden, wahrscheinlich liegt er - ähnlich wie in der Este - 6 bis 8 km oberhalb der Mündung.

Allerdings haben sich die Eintrittszeiten in diesem Fluß verändert: Die Thw traten um 1950 in Horneburg rd. 1:15 h nach Lühort ein, heute dagegen rd. 10 min später. Bei den Tnw haben sich die Differenzen von rd. 2:15 h auf 2:30 h verlängert. Hier hat also die Tnw-Absenkung im Unterlauf zu einer Zunahme der Rauheit geführt. T_F und T_E haben sich dabei kaum verändert.

3.5.5 Schwin ge

Da der einzige Fluß-Tidepegel in Stade (4 km stromauf gelegen) 1977 aufgegeben wurde, sind aktuelle Veränderungen der hydrologischen Verhältnisse für die Schwin ge nicht im ausreichenden Maße feststellbar. Der Vergleich bis 1976 mit den Daten des Mündungspegels Stadersand (Abb. 16 u. 17) zeigt im MThw praktisch keine Dämpfung, im MTnw 10 bis 20 % bei den Jahreswerten, etwas weniger beim langfristigen Trend.

3.5.6 Pinna u

Es ist für die hier vorgenommenen Betrachtungen etwas unglücklich, daß der Elbe-Referenzpegel Grauerort (Abb. 16 u. 17) auf der gegenüberliegenden Flußseite liegt. Der Vergleich mit der kurzen Zeitreihe am Sperrwerk (Abb. 36 u. 37) zeigt aber doch schon eine gewisse Dämpfung durch die enge Flußmündung an, allerdings ist die dortige Meßreihe zu kurz für genauere Aussagen.

Lühe: MThw und MTnw seit 1950

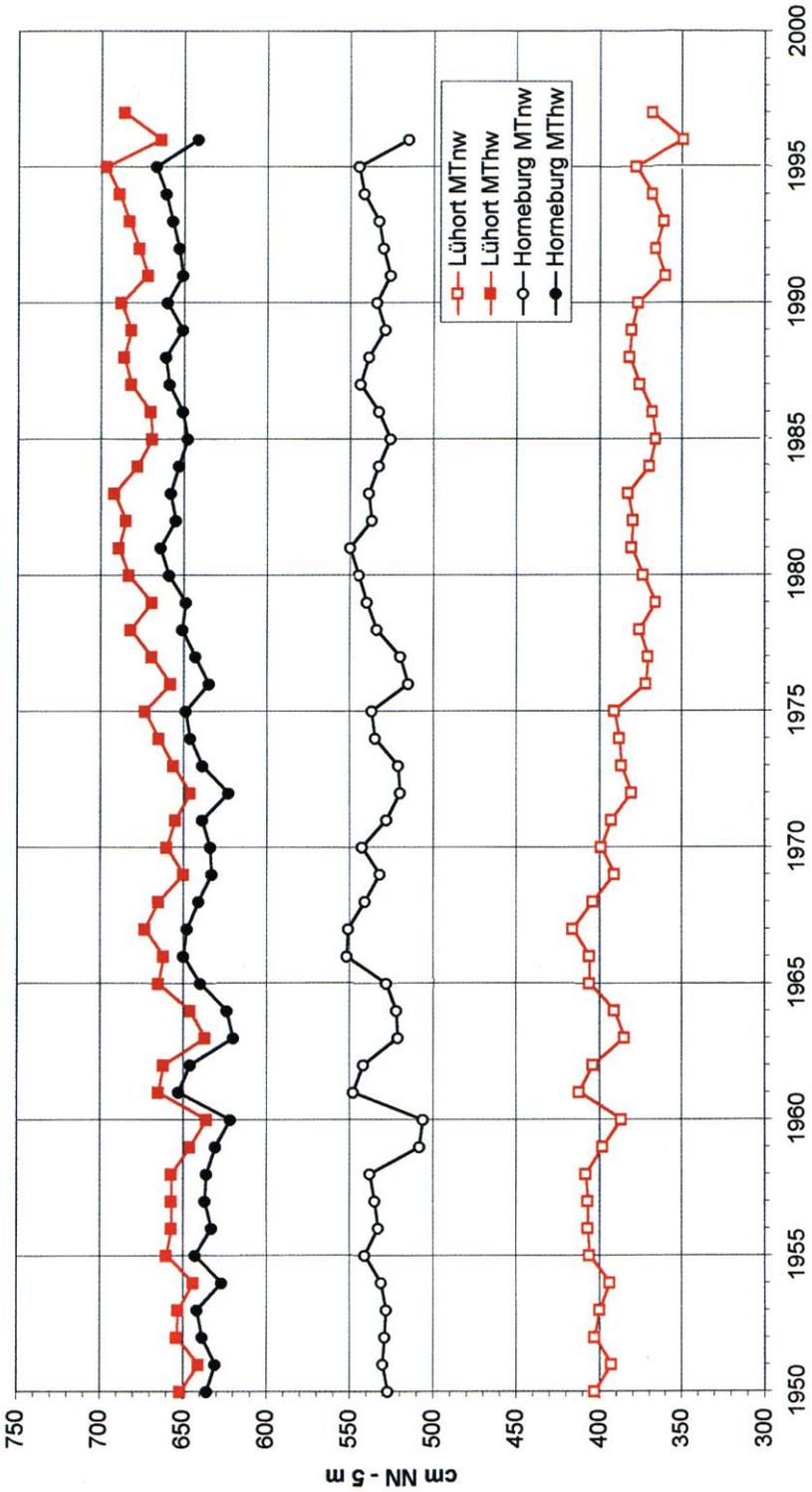


Abb. 35

Pinnau: MThw seit 1950

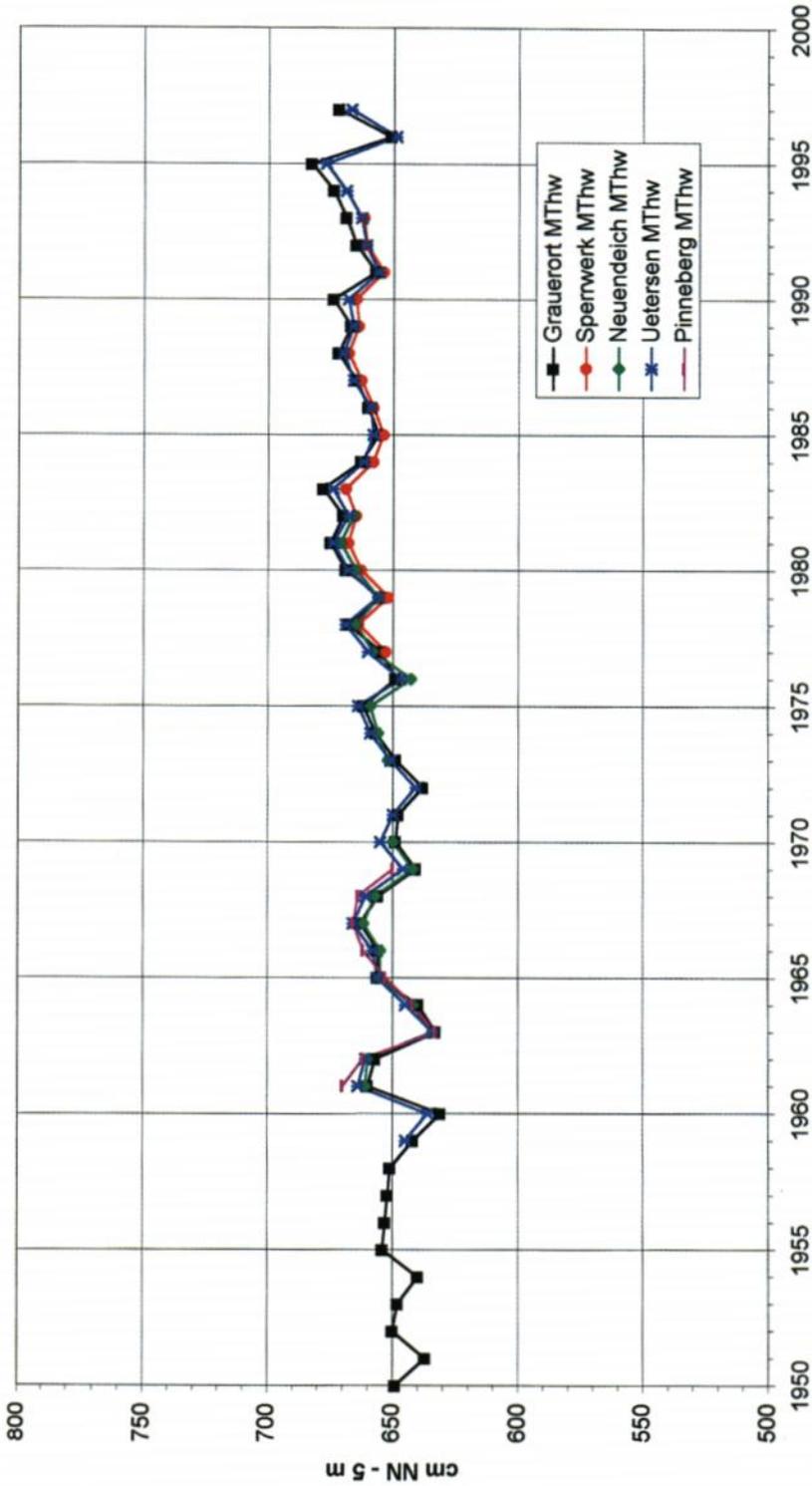


Abb. 36

Pinnau: MTnw seit 1950

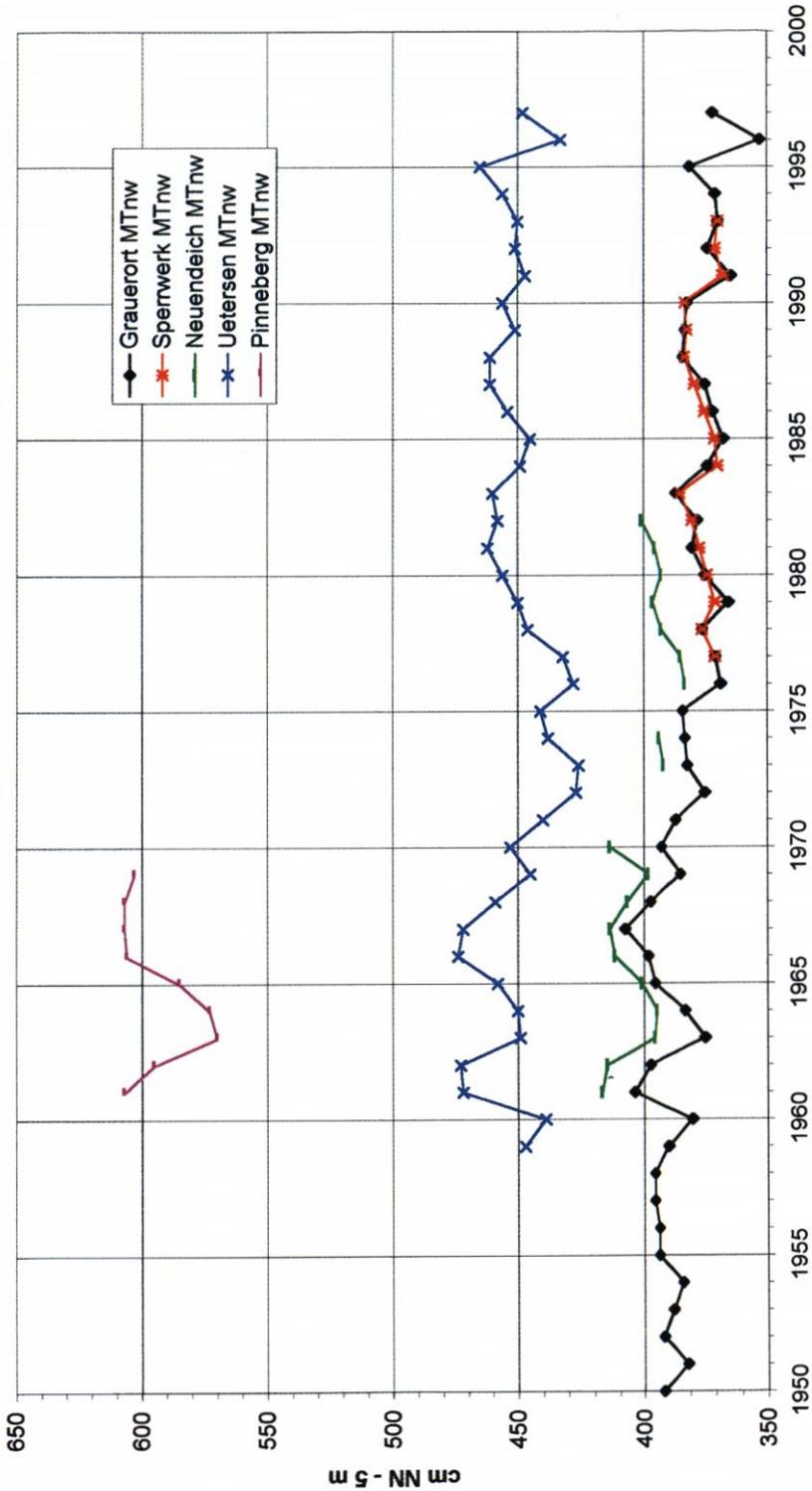


Abb. 37

Beeinflusst sind die Randwerte durch die Fahrrinnenvertiefungen, durch Sandentnahmen für Aufspülungen bei Stade und für Deichbaumaßnahmen an beiden Ufern (Bützflether Sand, Krautsand, Seestermüher Marsch), dagegen praktisch nicht durch die (kleinen) Sperrwerke vor Pinnau, Krückau und Schwinge. Zusammengefaßt läßt sich die Wasserstandsentwicklung folgendermaßen skizzieren:

- Das MThw (Abb. 36) hielt sich in der Elbe von 1950 bis um 1970 etwa auf 645, nach 1980 etwa auf 665 cm NN – 5 m. Die teilweise leider unvollständigen Datenreihen der Pinnaupegel lassen erkennen, daß die MThw am Sperrwerk ab den 1970er Jahren um einen recht konstanten Wert 660 cm NN-5 m schwankten, während in Neuendeich und Uetersen ein Anstieg in den 1970er Jahren zu verzeichnen war. Die Dämpfung im Nebenfluß wird dadurch deutlich, daß dessen Wasserstände früher über denen der Elbe lagen und heute darunter bleiben;
- Das MTnw (Abb. 37) fiel in der Elbe von etwa 390 (bis 1970) auf etwa 375 cm NN – 5 m (nach 1980) ab. Das langjährige MTnw-Niveau von 375 cm NN – 5 m zeigt sich auch am Sperrwerk. In Uetersen hielt sich das MTnw dagegen im gesamten Aufzeichnungszeitraum auf etwa 450 cm NN – 5 m, machte also die Absenkung des Wasserstandes der Elbe nicht mit. Die sehr lückenhaften Daten des Pegels Neuendeich deuten an, daß dies hier wohl auch nur abgeschwächt geschah.
- Der MThb entwickelte sich demnach wie folgt: In der Elbe (und am Sperrwerk) betrug er bis 1970 rund 2,6 m, um dann bis zu Beginn der 90er Jahre auf etwa 2,9 m anzusteigen. In Uetersen ist von den 70er bis zu den 90er Jahren ein Anstieg von etwa 2,0 m auf 2,15 m zu registrieren.

Die Dämpfungen der Variationen der Jahresmittel der Scheitelwasserstände stellt sich wie folgt dar (Schätzwerte):

Tab. 14: Dämpfung der Variationen der MThw und MTnw der Elbe in der Pinnau

Pegel	km oberhalb der Mündung	Dämpfung der Variationen der Randwerte in % (geschätzt)			
		Jahresmittel		langfristiger Trend	
		MThw	MTnw	MThw	MTnw
Sperrwerk	1	10	20	0	0
Neuendeich	3,7	(10)	(20)	(0)	(0)
Uetersen	9,7	20	30	0	100
Pinneberg	19,2		Meßreihe zu kurz		

Die Eintrittszeiten der Thw und Tnw haben sich in der Pinnau seit 1950 nicht verändert: Die Thw brauchen vom Sperrwerk bis Neuendeich rd. 10 min, bis Uetersen 30 bis 40 min und bis Pinneberg eine weitere Stunde. Die Tnw erreichen Neuendeich nach etwa 25 min, Uetersen nach etwa 1:10 h und Pinneberg nach weiteren 2:20 h.

Der Wirkungswechsellpunkt ist in der Gegend von Uetersen zu suchen. Wasserstände und Abflüsse oberhalb der Tidegrenze liegen – allerdings nur für einen recht kurzen Zeitraum – für den Pegel Renzel, den untersten tidefreien Pegel der Pinnau, vor.

3.5.7 Krückau

Die einleitenden Bemerkungen für die Pinnau in Kapitel 3.5.6 gelten gleichermaßen für die Krückau. Der Referenzpegel Kollmar (Abb. 16 u. 17) allerdings liegt auf der rechten Elb-

seite wie der Nebenfluß. Die Datenlage für die Krückau ist insgesamt noch schlechter als für die Pinnau (Abb. 38), zumal für den Pegel Elmshorn keine Niedrigwasserdaten vorliegen.

- Kennzeichnend für das MThw (Abb. 38) ist ein Anstieg in der Elbe um knapp 1,5 dm von Mitte bis Ende der 70er Jahre. Vorher schwankten die Werte um 645 cm NN – 5 m, während das mittlere Niveau danach bei 660 cm NN – 5 m lag. Diese Entwicklung wurde am Pegel Elmshorn fast vollständig mitvollzogen.
- In bezug auf das MTnw ist bei der Krückau lediglich ein Absink am Referenzpegel Kollmar um 1 bis 1,5 dm festzustellen, der in den 70er Jahren auftrat. Inwiefern sich diese Entwicklung im Nebenfluß ausgewirkt hat, läßt sich wegen fehlender Daten nicht sagen. Nach den Erkenntnissen bei den anderen Nebenflüssen ist aber anzunehmen, daß eine Wirkung auf die MTnw etwa 5 bis 10 km oberhalb der Mündung endet.

Die aufgrund der ungünstigen Datenlage nur grob geschätzten Dämpfungen der Wasserstände in der Krückau stellen sich wie folgt dar:

Tab. 15: Dämpfung der Variationen der MThw und MTnw der Elbe in der Krückau

Pegel	km oberhalb der Mündung	Dämpfung der Variationen der Randwerte in % (geschätzt)			
		Jahresmittel		langfristiger Trend	
		MThw	MTnw	MThw	MTnw
Sperrwerk	1	30	30	0	0
Elmshorn	11,5	30	–	50	–

Die Eintrittszeiten der Scheitel sind auch hier unverändert geblieben: Die Thw treten in Elmshorn rd. 25 min später als beim Sperrwerk ein, die Tnw rd. 2 h später.

3.5.8 Stör

Die Randwerte dieses Nebenflusses, gemessen in Brokdorf (Abb. 18 u. 19), werden bzw. wurden außer durch astronomische und meteorologische Einflüsse durch die Fahrrinnenvertiefungen und die Baumaßnahmen, insbesondere auf Nordkehdingen und Krautsand, beeinflusst. Das Störsperrwerk selbst hat nur lokalen Einfluß. Die Einflüsse von Baumaßnahmen nach 1950 sind am Pegel Brokdorf ohnehin nur noch sehr klein: Die MThw schwanken in den ersten beiden Jahrzehnten um 640, ab 1980 um 650 cm NN – 5 m, die MTnw um 380 bzw. 375 cm NN – 5 m. Weiter stromauf, am Pegel Kasenort (Abb. 39 u. 40), zeigt sich eine ähnliche Entwicklung, nur im MThw in 1 dm höherer und im MTnw in 4 dm höherer Lage. Diese Veränderungen im Laufe der 1970er Jahre sind am Pegel Itzehoe bereits nicht mehr nachzuvollziehen. Weitere Einzelheiten:

- Das MThw (Abb. 39) liegt heute in der Elbe und die Stör bis Itzehoe hoch bei 650 cm NN – 5 m, von Breitenburg (660 cm NN – 5 m) über Grönhude (670 cm NN – 5 m) bis Rensing auf 700 cm NN – 5 m steigend.
- Das MTnw (Abb. 40) von rd. 375 cm NN – 5 m in der Elbe steigt flußauf ab Sperrwerk über Kasenort (415 cm NN – 5 m), Itzehoe (440 cm NN – 5 m) und Breitenburg (etwa 485 cm NN – 5 m) auf rd. 550 cm NN – 5 m bei Rensing an.
- Der MThb kann, wie das Beispiel Stör zeigt, in einigen Nebenflüssen nur streckenweise als Maß für den Energieeintrag verwendet werden. Die Entwicklung stellt sich wie folgt dar:

Krückkau: MThw seit 1950

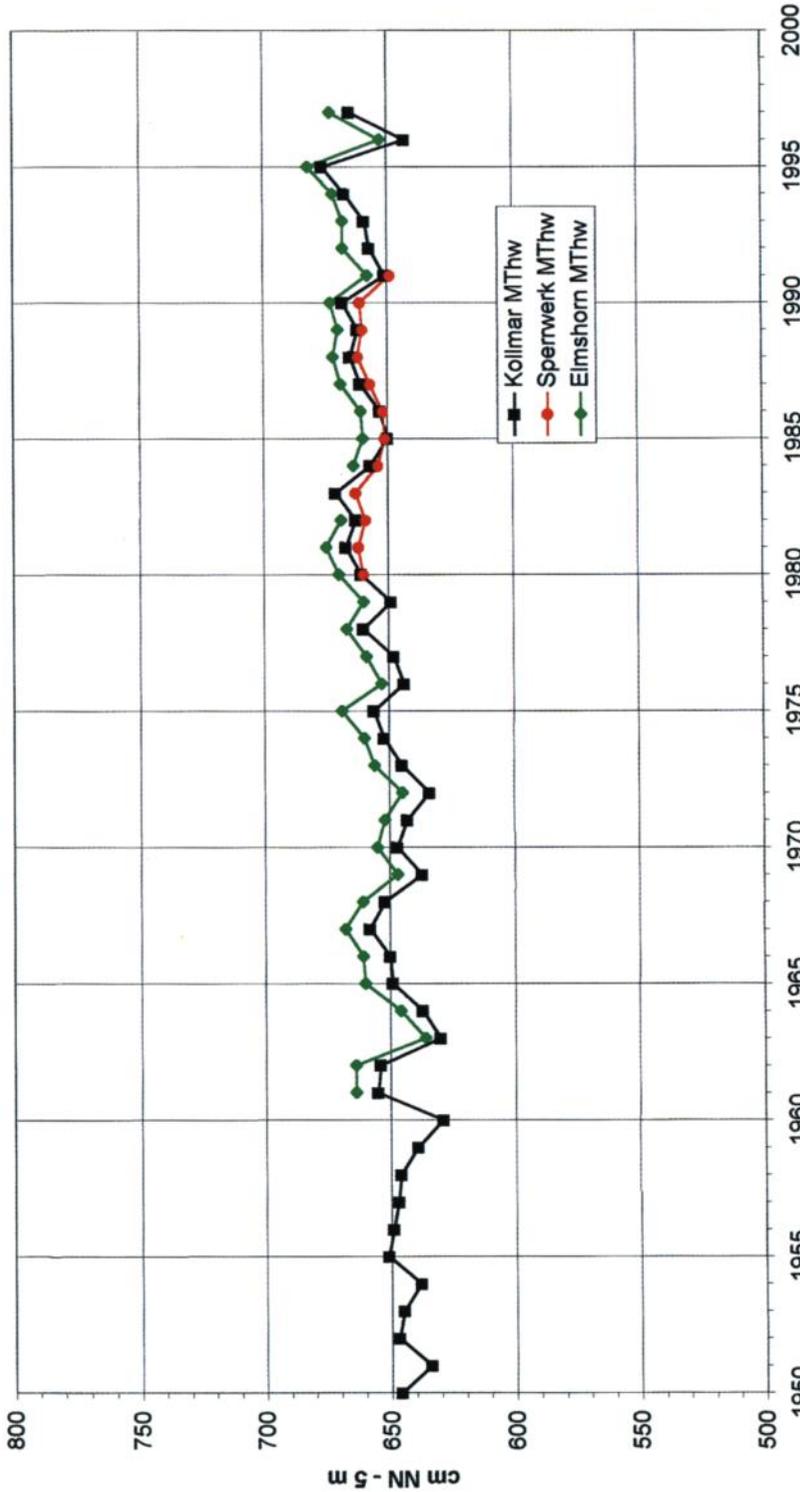


Abb. 38

Stör: MThw seit 1950

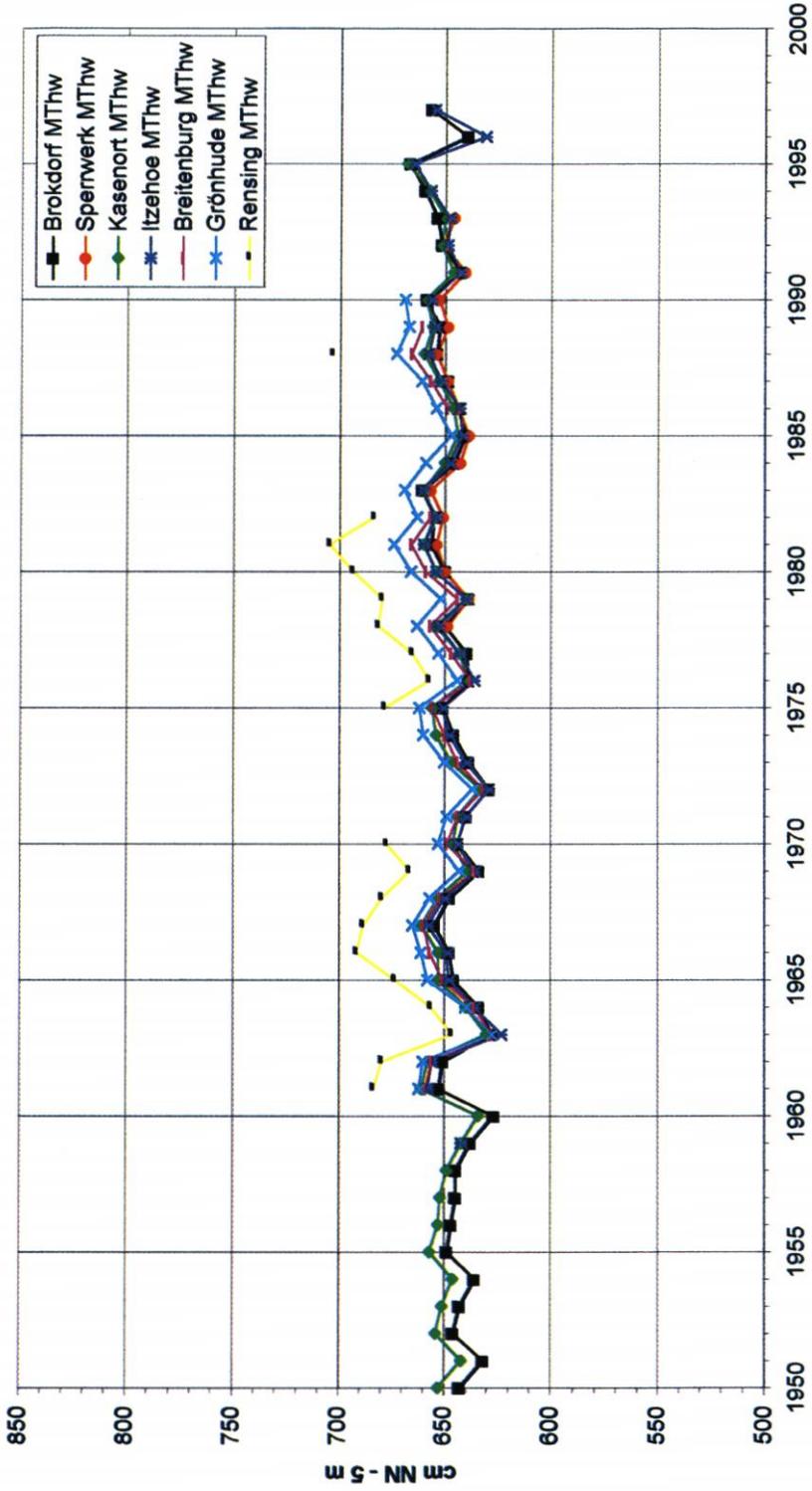


Abb. 39

Stör: MTnw seit 1950

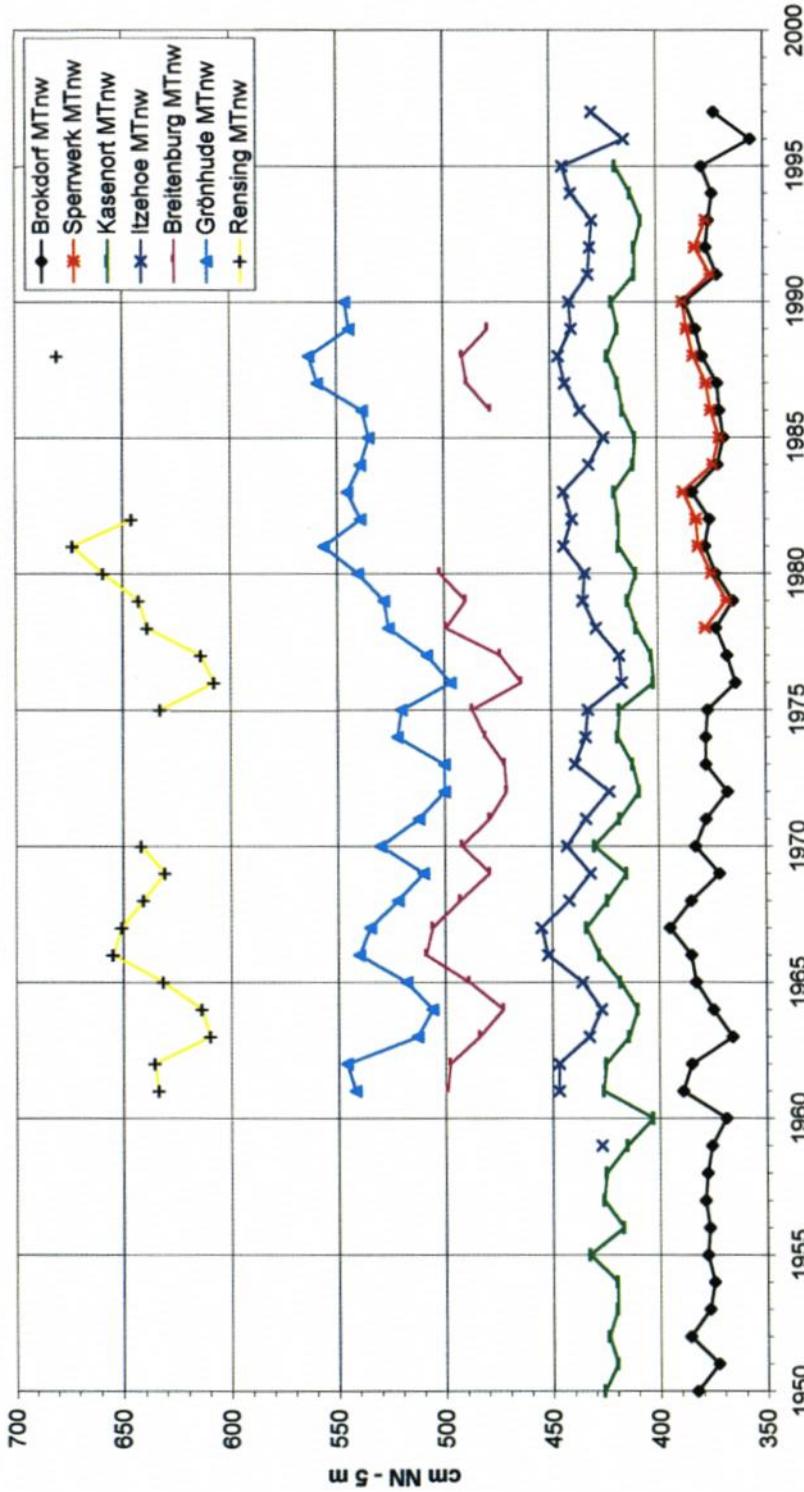


Abb. 40

Brokdorf: Von 2,6 m (um 1950) über 2,6 m (um 1970) auf rd. 2,75 m (um 1990) ansteigend.

Kasenort: Von 2,3 m (um 1950) über 2,35 m (um 1970) auf rd. 2,45 m (um 1990) ansteigend.

Itzehoe: Von rd. 2,0 m (um 1970) auf rd. 2,1 m (um 1990) ansteigend.

Weiter stromauf zeigt sich dann jedoch folgendes Bild:

Breitenburg: Von rd. 1,6 m (um 1970) auf rd. 1,8 m (um 1990) zunehmend.

Grönhude: Von rd. 1,3 m (um 1970) auf rd. 1,2 m (um 1990) abnehmend.

Die Dämpfung der Variationen ist aufgrund der Pegeldichte in der Stör recht gut flußaufwärts zu verfolgen:

Tab. 16: Dämpfung der Variationen der MThw und MTnw der Elbe in der Stör

Pegel	km oberhalb der Mündung	Dämpfung der Variationen der Randwerte in % (geschätzt)			
		Jahresmittel		langfristiger Trend	
		MThw	MTnw	MThw	MTnw
Sperrwerk	1	20	0	0	0
Kasenort	17,9	20	30	30	0
Itzehoe	26,8	20	1)	0	0
Breitenburg	39,5	2)	2)	0	100
Grönhude	46,3	2)	2)	0	100
Rensing	51,4	Datenlage zu unsicher			

1) Größere Variation als an der Mündung, z. T. durch lokale und Q_o-Effekte

2) Meßreihe unvollständig; sonst wie 1)

Die Differenzen der Scheiteleintrittszeiten stellen sich wie folgt dar:

Tab. 17: Eintrittszeit-Differenzen in der Stör seit 1950

Pegel	Differenzen in Stunden					
	Thw		Tnw			
	1950	1970	1990	1950	1970	1990
Sperrwerk	0	0	0	0	0	0
Itzehoe	0:50	1:25	1:05	1:35	2:05	1:45
Breitenburg	1:45	2:15	2:00	2:40	3:00	2:45
Grönhude	2:30	2:45	2:15	3:30	3:45	3:25

Die um 1970 gegenüber den Zeiten davor und danach längeren Laufzeiten können ohne Detailuntersuchungen nicht erklärt werden. Es zeigt sich allerdings, daß nach dem Vergleich mit den tidefreien Ganglinien in Willenscharen (unterster tidefreier Pegel) die Störspezifischen Einflüsse oberhalb von Itzehoe bestimmend sind und damit dort der Wirkungswechselfpunkt festzulegen ist.

3.5.9 O s t e

Die Tiderandwerte der Oste, gemessen am Pegel Osteriff (Abb. 18 u. 19), könnten außer von den astronomischen und meteorologischen Wirkungen durch Fahrrinnenvertiefungen

und Sandentnahmen für Eindeichungen (vor allem Nordkehdingen) und Aufspülung von Hafentflächen in Cuxhaven beeinflußt werden. Wie die Jahresmittel für die Randwerte am Pegel Osteriff zeigen, sind allerdings weder durch diese Baumaßnahmen noch durch den Bau des Sperrwerkes oder durch die starken morphologischen Veränderungen in der Ostemündung, die beide als lokale Ereignisse anzusehen sind, wesentliche Veränderungen in der Elbe aufgetreten. Abb. 41 u. 42 zeigen für die Oste:

- Das MThw ist in der Elbe und vor dem Sperrwerk von etwa 640 auf 655 cm NN – 5 m angestiegen; bereits in Oberndorf verharrt das MThw auf 640, ebenso in Osten, weiter stromauf zwischen 630 und 640 cm NN – 5 m.
- Das MTnw lag seit 1950 etwa konstant bei 370 in der Elbe und bei 380 cm NN – 5 m vor dem Sperrwerk; weiter stromauf herrschen ähnlich konstante Verhältnisse, wobei die MTnw-Höhenlage stromauf erwartungsgemäß steigt.
- Der MThb hat sich entsprechend kaum verändert und nimmt heute von der Elbe (2,85 m) über Belum (2,75 m) bis zum obersten Tidepegel Bremervörde auf etwa 1,2 m ab.

Hinsichtlich der Variationen der Jahreswerte in der Elbe und ihrer Entwicklung in die Oste hinein können folgende Schätzwerte angegeben werden:

Tab. 18: Dämpfung der Variationen der MThw und MTnw der Elbe in der Oste

Pegel	km oberhalb der Mündung	Dämpfung der Variationen der Randwerte in % (geschätzt)			
		Jahresmittel		langfristiger Trend	
		MThw	MTnw	MThw	MTnw
Belum	3,5	0	30	0	100
Oberndorf	17,7	20	40	100	100
Osten	25,8	1)	50	100	100
Hechthausen und weiter stromauf	42,3	1)	2)	100	100

1) Variationen größer als bei Oberndorf, also Oste-spezifisch dominiert

2) Variationen größer als bei Osten, also Oste-spezifisch dominiert

Die Wasserstands-Eintrittszeiten in der Oste haben sich wie folgt entwickelt:

Tab. 19: Eintrittszeit-Differenzen in der Oste seit 1950

Pegel	Differenzen in Stunden					
	Thw		Tnw			
	1950	1970	1990	1950	1970	1990
Belum	0	0	0	0	0	0
Osten	1:05	1:00	1:05	1:40	1:30	1:35
Hechthausen	1:50	1:55	2:00	2:30	2:40	2:45
Niederochtenhausen	3:15	3:15	3:20	4:00	4:10	4:10
Bremervörde	4:00	3:55	3:55	4:55	5:00	5:05

Damit ist die zeitliche Tideentwicklung in der Oste praktisch gleich geblieben.

Der Vergleich mit den Abflüssen bei Rockstedt, dem untersten tidefreien Pegel der Oste, deutet auf einen Wirkungswechsellpunkt zwischen Oberndorf und Belum hin (siehe hierzu auch Kap. 4.9 u. Abb. 57).

Oste: MThw seit 1950

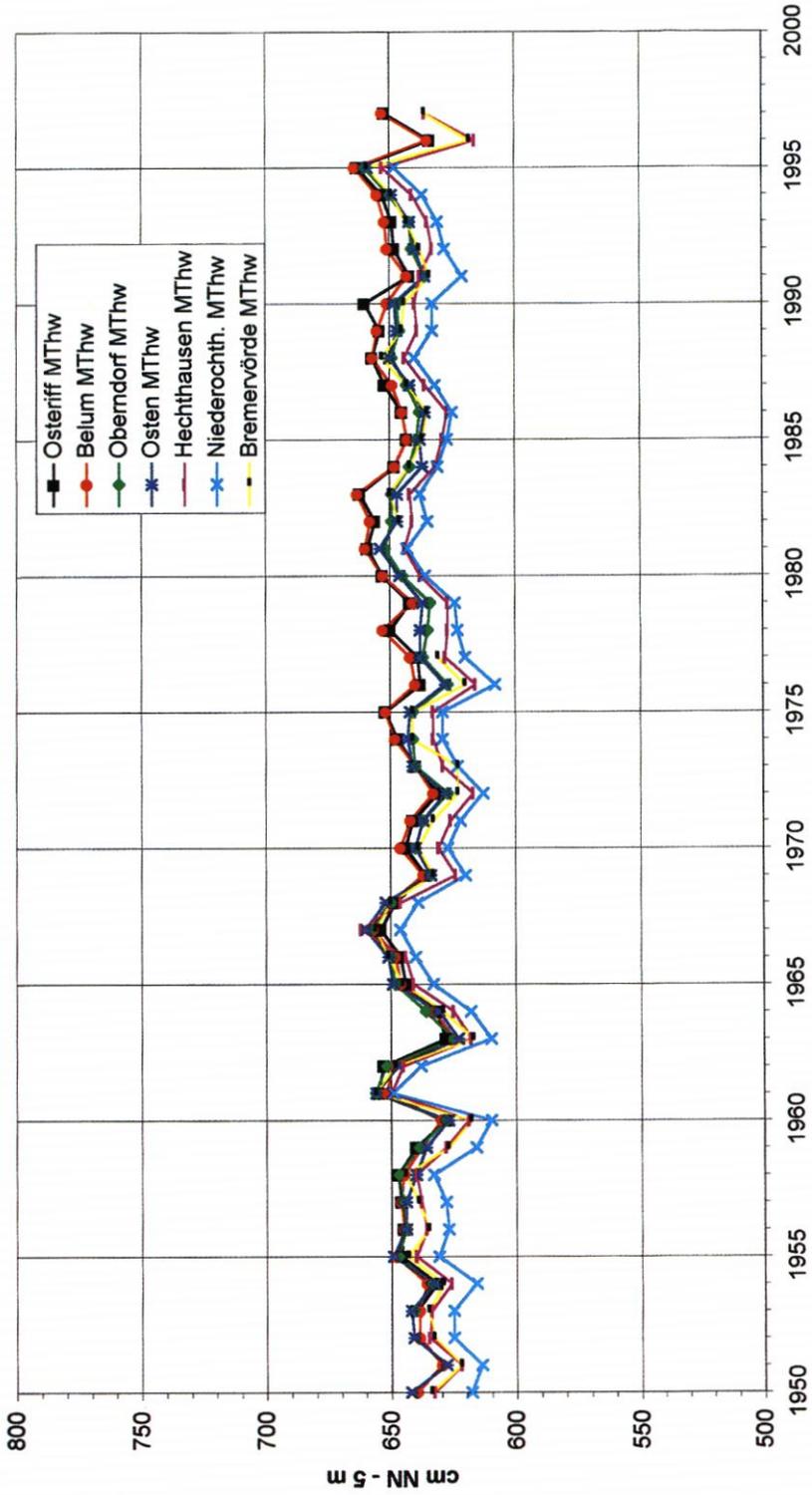


Abb. 41

Oste: MTnw seit 1950

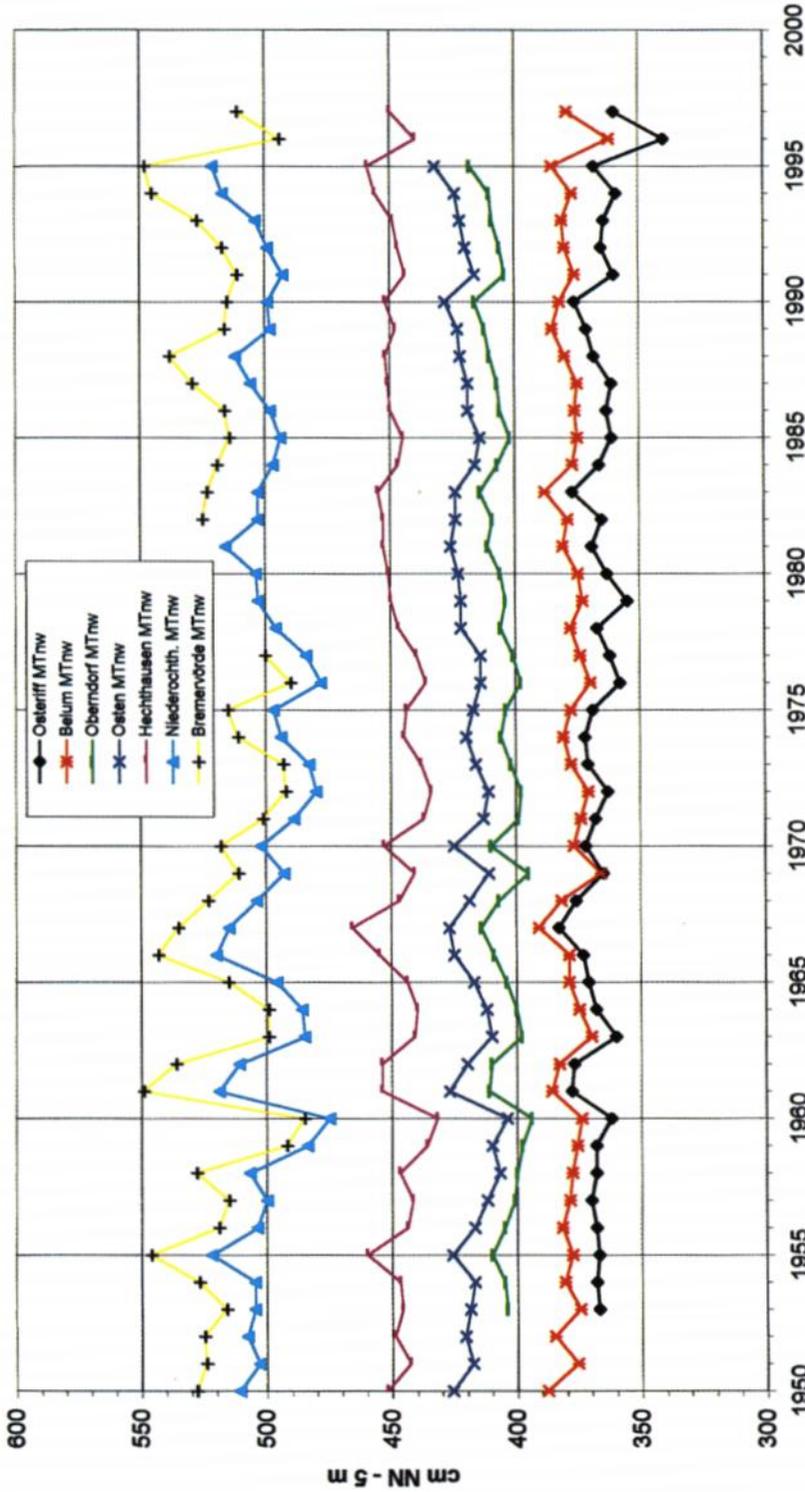


Abb. 42

4. Ursachen für die Veränderungen in der Elbe von 1950 bis 1997

4.1 Eingriffe in die Rinne der Elbe

Die in diesem Zusammenhang behandelten *regionalen* Eingriffe betreffen große Streckenabschnitte der Elbe, teilweise (wie bei Fahrrinnenvertiefungen) sogar den gesamten Bereich der Unterelbe, und wirken daher großräumig. Eingriffe in dem hier verwendeten Sinne sind (Tab. 20):

- die Fahrrinnenvertiefungen der Unterelbe einschl. damit verbundener Aufspülmaßnahmen seit 1950 sowie
- die Sandentnahmen für die großen Vordeichungen und Aufspülungen (Vorländer, Hafentflächen), die in Etappen jeweils über Jahre längere Strecken der Elbe betrafen und zu Querschnittserweiterungen führten.

Tab. 20: Übersicht über Fahrrinnenvertiefungen der Unterelbe sowie größere Sandentnahmen aus der Unterelbe nach 1950

Maßnahme	Zeitraum
Fahrrinnenvertiefung von KN – 10 m auf KN – 11 m	1957 bis 1962
Fahrrinnenvertiefung von KN – 11 m auf KN – 12 m	1964 bis 1969
Fahrrinnenvertiefung von KN – 12 m auf KN – 13,5 m KN	1974 bis 1978
Sandentnahmen für folgende Eindeichungen	
Geesthacht bis Billwerder Bucht	1966 bis 1973
Harburg bis zur Este	1962 bis 1967
Hahnöfer Sand, Seestermüher Marsch, Bützflether Sand	1962 bis 1976
Haseldorfer Marsch	1975/76
Krautsand	1975 bis 1978
Nordkehdingen	1967 bis 1976

Als *lokale* Eingriffe werden hier dagegen die Absperrungen der Nebenflüsse sowie kleinere Deichbaumaßnahmen definiert, da sie nur eine räumlich eng begrenzte Wirkung haben. Lokale Eingriffe werden in Kap. 3.5 bei der Vorstellung der Nebenflüsse jeweils separat angegeben.

Um den Einfluß allein der Veränderungen in der Rinne auf das Tidegeschehen festzustellen, müssen andere mögliche bzw. wahrscheinliche Einflüsse eliminiert oder aber berücksichtigt werden. So hat es verschiedene Ansätze gegeben, von denen drei im folgenden herangezogen werden sollen, und zwar

- die überschlägige Berechnung nach Unterlagen von HENSEN (1955),
- die Modelluntersuchungen, die bei SIEFERT u. HAVNØ (1989) zusammengestellt wurden, und
- die Analysen beim Strom- und Hafentbau unter Berücksichtigung des Q_0 -Einflusses (SIEFERT, 1992).

Jeder dieser Ansätze geht von einer anderen Datenbasis aus und führt dann auch zu etwas anderen Aussagen, die sich aber untereinander in keinem Falle widersprechen.

Zuvor jedoch ist über Tab. 20 hinaus zu dokumentieren, was seit 1950 im Bereich der tiefen Elberinne an künstlichen, aber auch an natürlichen Veränderungen stattfand: In den

hier beleuchteten Jahrzehnten ist zur Gewährleistung von Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt auf der Elbe deren Fahrrinne mehrfach ausgebaut worden. Dabei wurden

- die garantierten (Mindest-)Tiefen vergrößert,
- die Rinnen verbreitert,
- Kurven abgeflacht und begradigt,
- durch Strombauwerke der Strom auf die Haupttrinne konzentriert,
- Reeden angelegt,
- Stromliegeplätze neben der Fahrrinne geschaffen,
- Sände aufgespült.

Die Entwicklung wird dennoch meist nur stark vereinfacht als Veränderung der Fahrrinntiefen dargestellt. Unter Berücksichtigung der Verschiebungen des Kartennull zum Normalnull (KN – NN) erreichten zudem die Vertiefungen der Fahrrinne nach 1950, ausgehend von 10 m unter KN, auf der Hamburger Delegationsstrecke tatsächlich größere Beiträge:

Vertiefung auf m unter KN (offizielle Bezeichnung)	Veränderung zur alten Sollsohle	
	relativ (KN)	absolut (NN)
11,0	1,0	1,0
12,0	1,0	1,1
13,5*	2,0	2,2

* planfestgestellt für die Delegationsstrecke: 14,0 m KN

Statt scheinbarer 3,5 m waren es hier also 4,3 m. Auf der Bundesstrecke bis nach See wurde die Fahrrinne nominell vertieft, wie auf Tab. 20 angeführt. Allerdings wurde der 13,5-m-Ausbau – wie planfestgestellt – bis 1984 durch den sog. Feinausbau um weitere 1 bis 2 dm vertieft. Zwischenzeitliche KN-Verschiebungen führten letztlich dazu, daß dieser Elbeabschnitt seit 1950 um 4,3 m (unterhalb Hamburgs) bis 3,5 m (nach See) vertieft, außerdem verbreitert und durch Entnahme für Deichbau- und Aufspülungsmaßnahmen aufgeweitet wurde. Der Abschnitt von Hamburg bis Geesthacht wurde ebenfalls tiefer: Von etwa 4 m auf etwa 5 bis 6 m unter KN, ohne daß sich dies irgendwo deutlich dokumentiert findet.

Nach den Zusammenstellungen von FÜHRBÖTER/PARTENSKY (1982), KEIL (1985) und BERNHARD et al. (1995) sowie Unterlagen des Strom- und Hafenbau kann die von 1950 bis 1995 dem Regime entzogene Bodenmenge wie folgt abgeschätzt werden:

– Entnahme bis 1973	rd. 25 Mio. m ³
– Entnahme Bundesstrecke 1974 bis 1995	rd. 65 Mio. m ³
– Entnahme Delegationsstrecke bis 1995	<u>rd. 30 Mio. m³</u>
– Insgesamt:	rd. 120 Mio. m ³

Hinzu kommt die Steigerung der jährlichen Unterhaltungsbaggermenge um rd. 12 Mio. m³, die ebenfalls hydraulisch wirkt, weil das Material ständig „aus dem Wege geräumt wird“. Damit mußte die Tide reagieren auf künstliche Veränderungen von rd. 130 Mio. m³.

In dieser Zeit wurden die Deichlinien vorverlegt und im Hamburger Hafen Umstrukturierungen vorgenommen (Abnahme der wasserseitigen Hafensflächen um rd. 85 ha). Im inneren Ästuarbereich, insbesondere zwischen Brokdorf und Krautsand, erhöhten

sich die Watten, und zwischen Brunsbüttel und Cuxhaven lagerten sich der Medemsand, die Medemrinne und der Medemgrund um. Letzteres Thema wird in Kap. 4.7 gesondert behandelt.

4.1.1 Einflüsse aus Fahrrinnenbaggerungen und Hamburger Hafенflächen auf den Thb in Hamburg

Zur Berechnung wird auf Darstellungen von HENSEN (1955) zurückgegriffen, die u. a. ROHDE (1971) zitiert. Danach läßt sich die Wirkung von Veränderungen von Hafенflächen und Baggermengen auf den Tidehub in Hamburg über die Entwicklung von 1880 bis 1915 sehr einfach berechnen. Dabei seien die Funktionen

x [cm/V] = Wirkung von Baggermengen auf den Thb St. Pauli

y [cm/F] = Wirkung von Hafenerweiterungen in Hamburg auf den Thb St. Pauli

Beide Wirkungen sind hinsichtlich der Thb-Entwicklung gegeneinander gerichtet. So werden über die Zeiträume 1880–1900 (27 Mio. m³ gebaggert, Hafенwasserflächen + 250 ha, Thb + 5 cm) und 1900–15 (80 Mio. m³ gebaggert, Hafенwasserflächen + 540 ha, Thb + 20 cm) x und y bestimmt zu:

$x = 4,5$ cm Thb-Erhöhung je 10 Mio. m³ Baggerung*

$y = 3$ cm Thb-Abnahme je 100 ha wassers. Hafенflächenzunahme

In derselben zitierten Arbeit schätzt HENSEN die Thb-Zunahme in Hamburg durch eine Vertiefung von 10 auf 11,5 m unter KN auf 5 cm, ermittelt über die Querschnittserweiterung. Geht man von obigem Zusammenhang aus, so hätten gut 10 Mio. m³ gebaggert werden müssen. Das ist durchaus realistisch.

Daß die Ansätze nach Daten um 1900 auch heute noch anwendbar sind, haben die Untersuchungen des DANISH HYDRAULIC INSTITUTE und der BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU zum Projekt „Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe“ gezeigt: Bei einer geplanten Baggermenge um 25 Mio. m³ wurde eine Thb-Vergrößerung von 11 cm für St. Pauli ermittelt.

Überschlägt man die Wirkung der für Deiche und Hafенflächen entnommenen Sandmengen zu rd. 50 Mio. m³, so erhält man eine Thb-Erhöhung von gut 20 cm durch diese Maßnahmen, ein Wert, der bisher nie ermittelt oder abgeschätzt wurde und immer unter dem Titel „Wirkung der Fahrrinnen-Vertiefung“ subsumiert wurde.

Erfahrungsgemäß wie auch nach den o.g. Modellrechnungen kann eine Thb-Veränderung so aufgeteilt werden, daß

$$\Delta Thw = + \frac{1}{3} \Delta Thb$$

$$\Delta Tnw = - \frac{2}{3} \Delta Thb$$

werden.

* Hierunter können nur die Mengen verstanden werden, die dem Flußregime dauerhaft oder langfristig entzogen werden, also nicht die jährlichen Unterhaltungsmengen. Nur wenn sich diese ausbaubedingt erhöhen, ist die Differenz als zusätzliche Entnahme anzusehen.

4.1.2 Einflüsse aus Querschnittserweiterungen auf die Thw und HThw

Durch Vergleichsrechnungen des Danish Hydraulic Institute mit Elbmodellen in den topographischen Zuständen von 1950 und 1980 wurden die folgenden Thw-Erhö- hungen ermittelt (SIEFERT u. HAVNØ, 1989). Da den Modellen Querschnitte als Parameter zu- grunde lagen, kann bei diesem Ansatz nicht zwischen Fahrrinnen-Vertiefungen und Sand- entnahmen für andere Zwecke unterschieden werden.

Tab. 21: MThw-Erhöhungen 1950 bis 1980 durch Querschnittserweiterungen

Ort	Δ MThw dm
Zollenspieker	+ 1,5 bis 2
Bunthaus	+ 1,5
Altenwerder	+ 2
Hmb.-St. Pauli	+ 2
Schulau	+ 1,5
Stadersand	+ 1
Kollmar	0
Brokdorf	- 0,5
Brunsbüttel	0

Da eigentlich nur Sturmfluten in den Modellen untersucht wurden, liegen Angaben zum Tnw nicht vor, können aber abgeschätzt werden:

Tnw - Absenkung etwa das doppelte Maß der Thw-Erhöhung (s.o.)

Zur Untersuchung des Einflusses von Fahrrinnen-Ausbauten in der Elbe auf die Höhe von Sturmflutschwellewasserständen fanden eine Reihe von Modellversuchen statt, allerdings alle mit unterschiedlichen Randbedingungen, so daß sie nur bedingt vergleichbar sind. Es gibt vor allem die Untersuchungen des DANISH HYDRAULIC INSTITUTE bei SIEFERT u. HAVNØ (1989) für diese Vertiefungen einschließlich des 13,5-m-Ausbaues, also den Einfluß der topographischen Veränderungen unterhalb MTnw von 1950 bis 1980. Generell ergeben sich für mittelhohe bzw. hohe Sturmfluten folgende Entwicklungen durch die Vertiefungen um rd. 4 m und die zeitgleichen Verbreiterungen und Sandentnahmen als Durchschnittswert für unterschiedliche Sturmfluten:

Tab. 22: HThw-Veränderungen 1950 bis 1980 durch Querschnittserweiterungen

Pegel	Erhöhung in dm für	
	mittelhohe Sturmfluten	hohe Sturmfluten
Geesthacht UW		0,5 bis 1
Zollenspieker	1 bis 2	0,5 bis 1,5
Bunthaus	1 bis 2	0,5 bis 1,5
St. Pauli bis Schulau	1 bis 2	1 bis 1,5
Stadersand	0 bis 1,5	1 bis 1,5
Brokdorf	-1 bis +0,5	0 bis 1

Die Streuung der Ergebnisse ist bei den einzelnen Sturmflutabläufen recht groß. Die Veränderungen in der Fahrrinne wirken sich dergestalt aus, daß von Brunsbüttel bis Kollmar viele Sturmfluten niedriger auflaufen, da sich die Strömungsverhältnisse geändert haben. Etwa ab Stadersand werden die Sturmfluten generell erhöht, und zwar in stärkerem Maße im Raum Hamburg, aber auch noch deutlich in der oberen Tideelbe. Bei hohen Sturmfluten wird dennoch eine

Erhöhung von 3 bis 4 cm je Meter Vertiefung
(einschl. der zeitgleichen Verbreiterungen und Sandentnahmen)

nirgends überschritten (Abb. 43). Das würde bei einer – nach verschiedenen Modelluntersuchungen durchaus zulässigen – linearen Interpolation bedeuten, daß die o.g. Vertiefungen von 1950 bis 1974 gut 2 m hohe Sturmfluten um 0,5 bis 1 dm erhöht haben, und zwar auf der gesamten hier betrachteten Strecke oberhalb von Stadersand. Zieht man zum Vergleich den gleichzeitigen MThw-Anstieg von rd. 1 dm heran, so paßt die Größe sehr gut.

Danach bleibt als Anteil aus den letzten Ausbauten um wiederum rd. 2 m (als Mittel über die Länge der Elbe) etwa ein gleicher Betrag, also

0,5 bis 1 dm HThw-Erhöhung durch 13,5-m-Ausbau einschließlich
Verbreiterungen und Sandentnahmen für Deichbauten.

Ergänzend sei erwähnt, daß Modellrechnungen des DANISH HYDRAULIC INSTITUTE (u. a. im Rahmen der Voruntersuchungen zur aktuellen Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe) zeigen, daß Vertiefungen der Fahrrinne in einzelnen Abschnitten unterschiedlich stark auf die Tide- und Sturmflutverhältnisse wirken: Der größte Einfluß auf die Wasserstände im Raume Hamburg geht von Vertiefungen im Bereich Stadersand – Glückstadt aus (km 650 bis 680). Weiter unter- und oberhalb vorgenommene Vertiefungen verändern das Tidegeschehen vergleichsweise wenig. Insoweit sind Vertiefungen auf der Hamburger Delegationsstrecke nicht maßgebend für das Sturmflutgeschehen auf der Unter- und Außenelbe.

4.1.3 Einflüsse der Fahrrinnen-Ausbauten auf die Jahres-MThw- und -MTnw-Differenzen zu Cuxhaven

Grundlage dieser Untersuchung zur Ermittlung bereinigter Differenzen ist eine Studie von 1992. Die Vorgehensweise wurde von SIEFERT u. JENSEN (1993) veröffentlicht, vom LEICHTWEISS-INSTITUT für die Ems erfolgreich angewendet und von FERK et al. (1996) genutzt.

Für eine genauere Analyse der Wasserstandsentwicklung in der Unterelbe selbst ist es dazu notwendig, nicht nur die „externen“ Einflüsse der Nordsee auf die Wasserstände in der Elbe zu eliminieren – was durch die Wahl des Mündungspegels geschieht –, sondern auch den Einfluß des Oberwasserzuflusses. Die mittleren jährlichen Oberwasserzuflusssmengen der Elbe schwanken bei einem Mittelwert von rund 700 m³/s erheblich zwischen etwa 400 und 1100 m³/s (Abb. 22). Der niedrigste Jahreswert wurde 1934 mit 357 m³/s erreicht, der bisher höchste Abfluß datiert aus dem Jahr 1941 und beträgt 1320 m³/s.

Über den Einfluß des Oberwassers auf die Tidewasserstände in der Unterelbe gibt es eine Reihe verschiedener Arbeiten, die aber nur bedingt miteinander vergleichbar sind, weil sie unterschiedliche Zielsetzungen haben und mit dementsprechenden Ansätzen vorgehen.

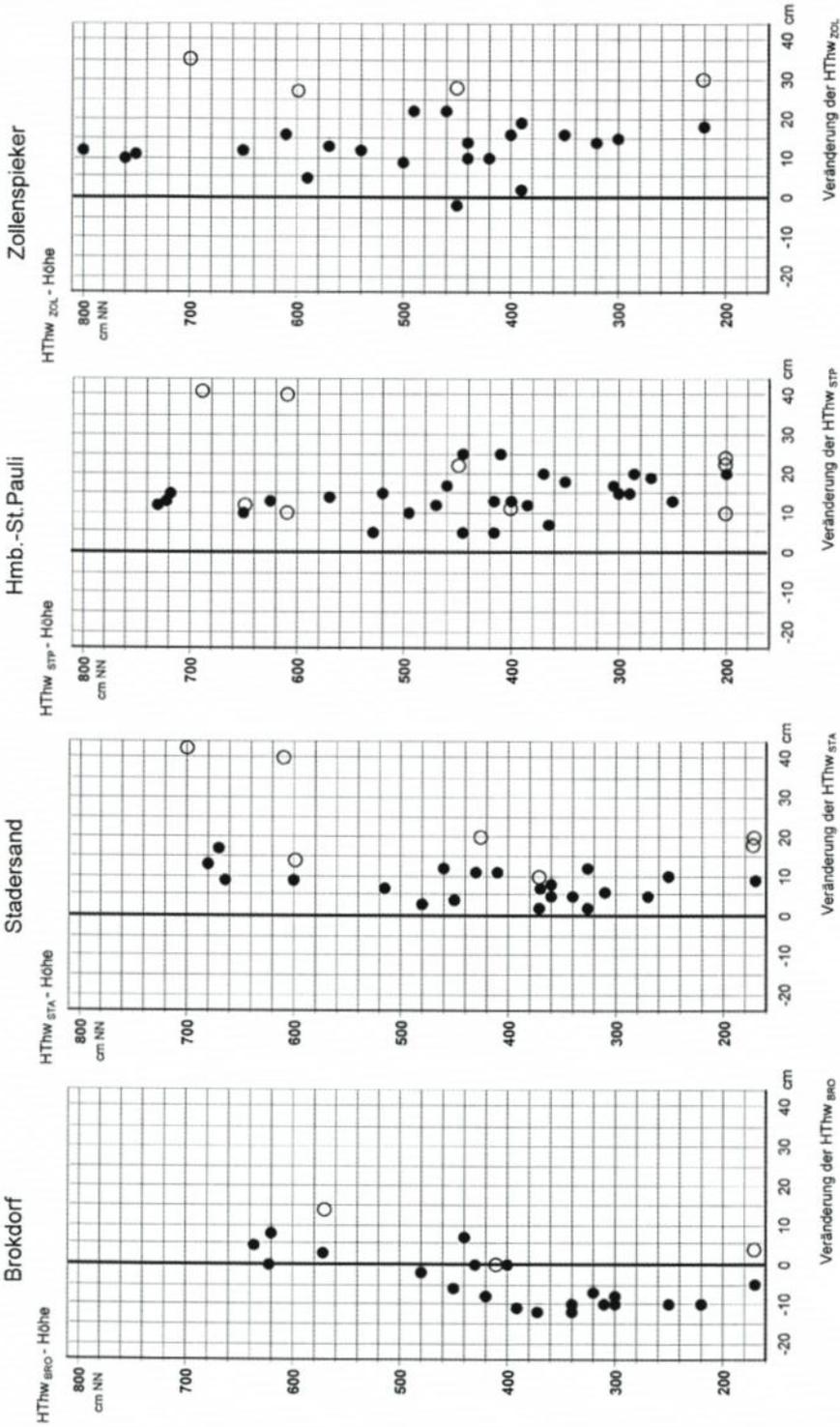


Abb. 43: Wirkung der Fahrrinnenvertiefungen und Sandentnahmen von 1950 bis 1977 auf die HThw-Höhen verschieden hoher Sturmfluten (nach SIEFERT u. HAVNØ, 1989); Punkte nach dhi, Kreise nach anderen Instituten

Die Korrektur der ΔMT_{nw} nach SIEFERT (1992) – bezogen auf die Pegel St. Pauli (STP) und Cuxhaven (CUX) – läßt sich wie folgt zusammenfassen:

$$\Delta \Delta MT_{nw} = MT_{nw_{STP}} - MT_{nw_{CUX}} - (c_1 + c_2) \cdot (Q_o - MQ_o)$$

mit $c_1 + c_2 = 0,05$

c_1 = Wirkung auf die Höhe des MT_{nw} ,
um die die ΔMT_{nw} variieren

c_2 = Variation der ΔMT_{nw} mit Q_o

Für detaillierte Betrachtungen (wie bei FERK et al. ab 1985) ist der unmittelbare Einfluß des Oberwasserzuflusses auf die MT_{nw} (nicht die ΔMT_{nw} !) von Interesse. Diese Unterteilung weist darauf hin, daß mit wechselnden Q_o bestimmte Schwankungen auftreten, die je nach Abfluß auf unterschiedlichem Höhenniveau ablaufen. In der Literatur findet sich eine Reihe von Angaben über diesen Oberwassereinfluß c_1 auf die Wasserstände der Unterelbe, wobei meist die Pegel im Hamburger Stromspaltungsgebiet herangezogen werden. Die aktuellste Arbeit zu dieser Thematik stammt von SIEFERT u. JENSEN (1993), die für die MT_{nw} am Pegel St. Pauli eine Erhöhung von 23 cm je 1000 m³/s Oberwasserzufluß ermittelten. Ein entsprechender Wert (24 cm/1000 m³/s) wurde auch mit Hilfe von Vergleichen über den Pegel Geesthacht bestimmt. Für die MT_{nw} der beiden Hamburger Pegel St. Pauli und Seemannshöft wird dementsprechend ein Korrekturfaktor (c_1) von 25 cm pro 1000 m³/s herangezogen*. Aus

$$\beta MT_{nw_{STP}} = MT_{nw_{STP}} - c_1 (Q_o - MQ_o)$$

mit $c_1 = 0,025$

folgt somit:

$$\Delta \Delta MT_{nw} = \beta MT_{nw_{STP}} - MT_{nw_{CUX}} - c_2 (Q_o - MQ_o)$$

Der in letzterer Gleichung verbleibende Korrekturanteil erklärt sich dabei als Differenz zwischen den beiden Q_o -Wirkungen auf das T_{nw} . Es läßt sich indirekt folgern, daß c_1 und c_2 etwa gleich groß sind, weil deren Summe sich aus Vergleichen zu 0,05 ergibt (nähere Untersuchungen dazu bei FERK et al. [1996]).

Stromab von Hamburg werden die Korrekturfaktoren durch verstärkten Nordseeinfluß schrittweise kleiner. Unterhalb von Brokdorf wird keine Normierung um den Oberwassereinfluß mehr vorgenommen; bereits in Glückstadt und Brokdorf wäre sie verzichtbar, da sie die „Rohdaten“ des MT_{nw} maximal noch um 1 bis 2 cm verändert. Tab. 23 gibt einen Überblick über die herangezogenen Pegel und die dafür angesetzten Oberwasser-Korrekturfaktoren. Für die langfristigen Wasserstands*i f f e r e n z e n* zwischen St. Pauli und Cuxhaven ermittelte SIEFERT (1992) den Einfluß der mittleren jährlichen Oberwasserzuflußmenge (Q_o) von

$$\begin{aligned} & 50 \text{ cm je } 1000 \text{ m}^3/\text{s } Q_o \text{ auf die } \Delta MT_{nw} \text{ (STP-CUX)} \\ & \text{sowie} \\ & 25 \text{ cm je } 1000 \text{ m}^3/\text{s } Q_o \text{ auf die } \Delta MThw \text{ (STP-CUX)}^{**} \end{aligned}$$

* Beispiel: Liegt die jährliche mittlere Oberwassermenge der Elbe um 500 m³/s über dem langjährigen Mittelwert von rund 700 m³/s, schlägt sich dies in Hamburg in einer Erhöhung des MT_{nw} um 12,5 cm nieder.

** Dieser Wert bezieht sich auf die $\Delta MThw$ bis ca. 1980. Aufgrund veränderter topographischer und hydromechanischer Randbedingungen wird seitdem ein Korrekturfaktor von 10 cm je 1000 m³/s Q_o angesetzt. Hinweise auf diese Änderung geben schon Abb. 15 u. 17: Etwa ab 1980 konsolidieren sich die MT_{nw} auf neuem (niedrigen) Niveau mit kleineren Q_o -bedingten Schwankungen als vorher.

Tab. 23: Korrekturfaktoren zur Normierung des Q_0 -Einflusses

Pegel	Einfluß des Q_0 in $\text{cm}^3/1000 \text{ m}^3/\text{s}$	
	auf die MTnw (c_1)	auf die ΔMTnw insgesamt ($c_1 + c_2$)
Brunsbüttel	0	0
Brokdorf	1	2
Glückstadt	3	5
Krautsand	5	10
Kollmar	7	15
Grauerort	10	20
Stadersand	12	25
Hetlingen	15	30
Lühort	18	35
Schulau	22	45
Seemannshöft	25	50
St. Pauli	25	50

Die um den Oberwassereinfluß korrigierten MTnw-Differenzen zwischen Hamburg-St. Pauli und Cuxhaven-Steubenhöft seit 1900 sind in Abb. 44 dargestellt. Die nun von den beiden maßgeblichen „externen“ Einflüssen befreiten Wasserstandswerte ($\Delta\Delta\text{MTnw}$) zeigen ein sehr klares Bild von der Wasserstandsentwicklung in der Unterelbe seit dem Beginn unseres Jahrhunderts. Mehrjährige Phasen mit einer auffallenden Stabilität der Niedrigwasser- verhältnisse (z. B. 1910 bis 1930, 1940 bis 1960, 1967 bis 1974 oder 1977 bis 1992) wechseln ab mit Perioden, die durch eine deutliche Absenkung der Niedrigwasserstände gekennzeichnet sind. Diese sind in der Graphik mit einem Pfeil markiert.

Zwei Aspekte sind in diesem Zusammenhang erwähnenswert:

- Zum einen wird anhand der Abb. 45 deutlich, daß es keine (oder nur äußerst geringe) langfristigen hydrologischen Nachwirkungen von Fahrrinnenvertiefungen gibt, die sich auf die (Niedrig-)wasserstände auswirken. Die Wasserstände reagieren unmittelbar und ohne zeitliche Verzögerung auf bauliche Veränderungen. Anschließend stabilisieren sie sich nach dem Abschluß der Ausbauten wieder sehr schnell auf einem bestimmten Niveau; die Existenz eines „hydrologischen Nachlaufs“ im Sinne einer langfristigen, allmählichen Wasserstandsabsenkung als Folge eines Eingriffs ist nicht nachvollziehbar*.
- Zum anderen scheint sich anzudeuten, daß die hydrologische Reaktion des Systems „Tide-elbe“ auf die baulichen Eingriffe mit zunehmendem Ausbauzustand der Elbe zugenommen und sich seewärts ausgedehnt hat. Allerdings muß man sich vergegenwärtigen, daß der letzte Ausbau der schwerste anthropogene Eingriff war, zumal er nicht nur eine deutliche Vertiefung, sondern auch eine Verbreiterung der Fahrrinne beinhaltete, die zudem durch Sandentnahmen begleitet wurde. So sind sowohl das Ausmaß der Niedrigwasserabsenkung als auch die enge zeitliche Zuordnung zwischen Eingriff und hydrologischer Reaktion bei diesem Ausbau bemerkenswert. Unter Hinweis auf die Erkenntnisse in Kap. 4.1.1 ist daraus allerdings nicht zu folgern, daß die Wasserspiegel der Unterelbe zunehmend sensibler und deutlicher auf Veränderungen der Flußtopographie reagieren, obwohl mit der Vergrößerung des Verhältnisses Tiefe/Breite zunehmend die Ausgleichsmöglichkeiten am flachen Rand fehlen.

* Dieser Befund steht nicht im völligen Einklang zu den Aussagen von SIEFERT u. JENSEN (1993), die eine „Langzeitwirkung“ der letzten Fahrrinnenvertiefung auf die MTnw in der Größenordnung von einigen Zentimetern ermittelten.

Um den Oberwassereinfluß normierte MTnw - Differenzen
zwischen Hamburg-St. Pauli und Cuxhaven seit 1900

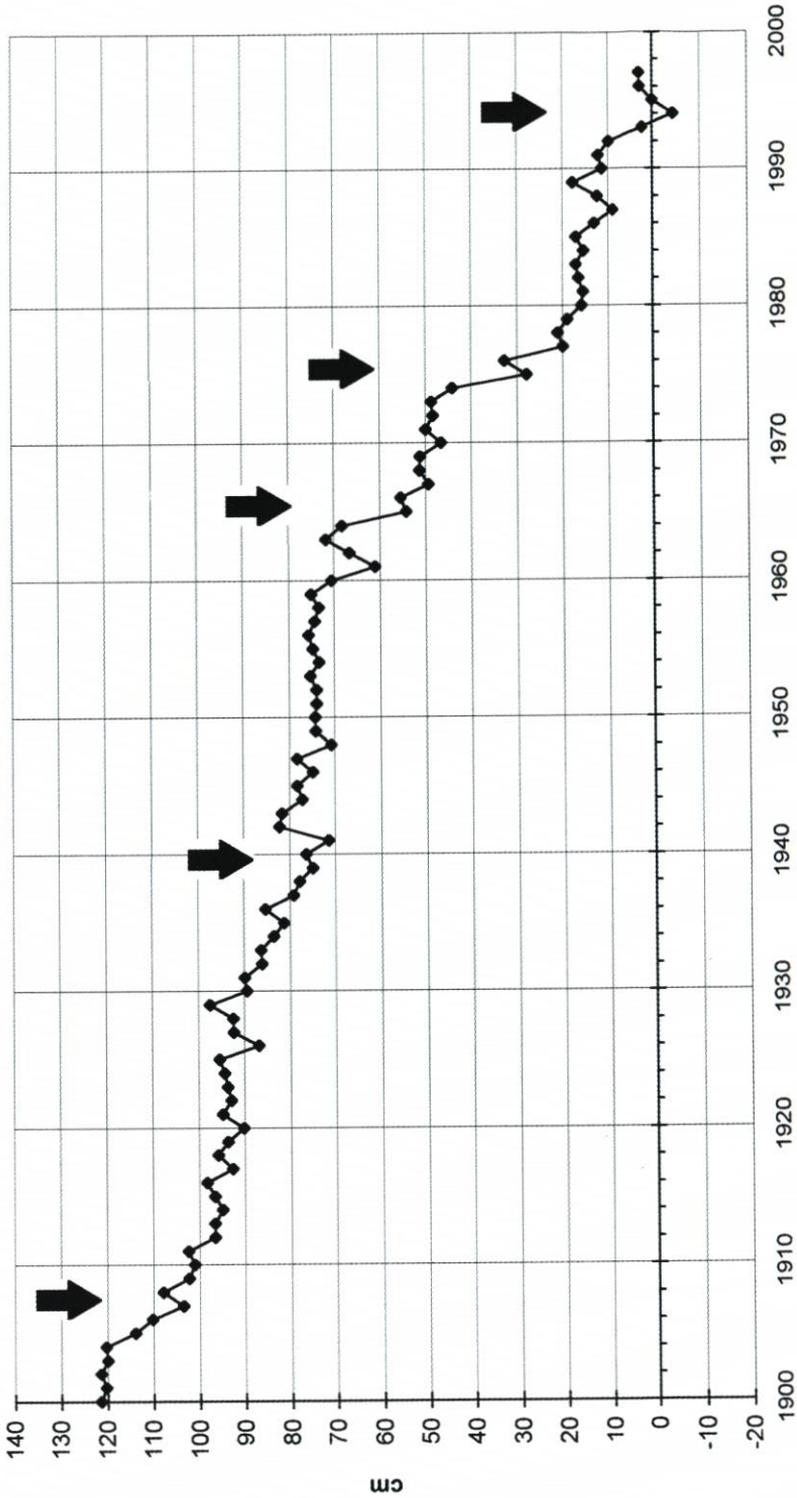


Abb. 44

Um den Oberwassereinfluß normierte MTnw - Differenzen zwischen Hamburg-St. Pauli und Cuxhaven seit 1950

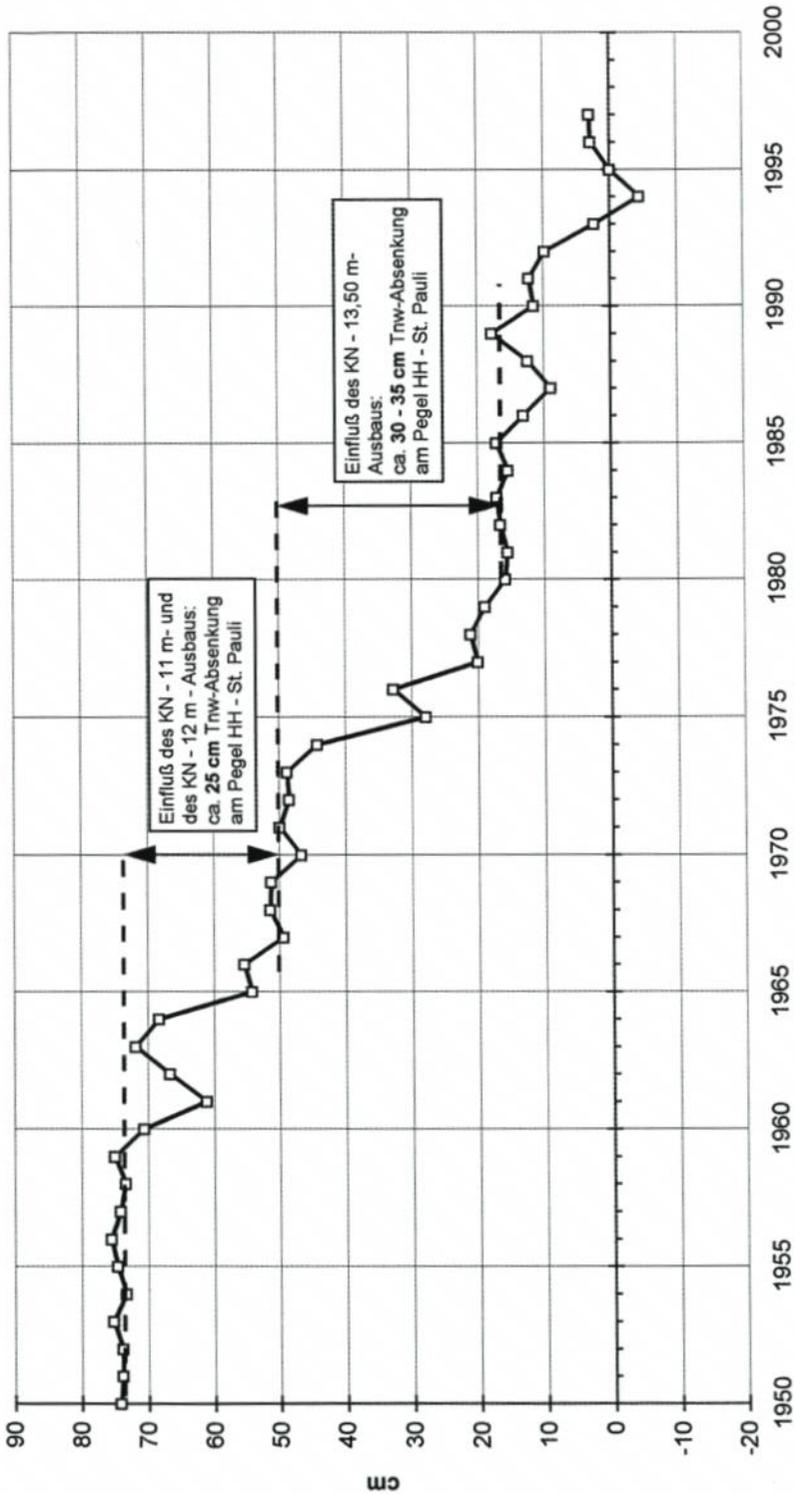


Abb. 45

Nach diesem Ansatz läßt sich also z. B. wie in Abb. 45 der Einfluß der Maßnahmen von 1974 bis 1978 auf die MTnw-Entwicklung ermitteln. Mit den Korrekturfaktoren von Tab. 23 ergeben sich die Absenkungen auf Abb. 46. Zu diesen passen die auf anderem Wege gewonnenen Resultate von NIEMEYER (1994) bis auf einzelne Zentimeter. Zur Erläuterung der Entwicklung der MTnw seit Beginn der 1980er Jahre siehe FERK et al. (1996) sowie das darauf aufbauende Kap. 4.7.

Dies alles gilt nicht im gleichen Maße für die Veränderungen des mittleren Tidehochwassers. Auf Abb. 47 werden die um den Oberwassereinfluß (mit 25 cm bzw. 10 cm/1000 m³/s) korrigierten MThw-Differenzen zwischen Hamburg und Cuxhaven gezeigt. Eine präzise Identifizierung der einzelnen Ausbaumaßnahmen ist hier nicht möglich. Erkennbar ist vielmehr eine MThw-Erhöhung von Ende der 60er Jahre bis Mitte/Ende der 70er Jahre. Die Auswirkungen des 12-m- und des 13,5-m-Ausbaus sind beim MThw somit nicht klar zu trennen. Beide Maßnahmen zusammen (sowie zusätzliche Sandentnahmen aus der Elbe für den Deichbau) haben das $\Delta\Delta$ MThw im Hamburger Raum um gut 2 dm erhöht. Seit dem Ende der 70er Jahre bis heute hat das $\Delta\Delta$ MThw wieder ein recht stabiles Niveau erreicht.

4.2 Randgebiete, Häfen

Die Randgebiete, d. h. die Nebenrinnen, Flachwassergebiete, Watten und Sände, sind durch Absperrungen von Rinnen, Aufhöhungen von Sänden und Querschnittsreduktionen als Folgen der Konzentration auf die tiefe Rinne betroffen. All diese Maßnahmen haben bzw. hatten allenfalls lokale Auswirkungen auf die Strömungen, jedoch auf die Tideentwicklung in der Elbe nur sehr geringe Einflüsse. Es kann davon ausgegangen werden, daß sie seit 1950 in Hamburg zu Tnw-Absenkungen bis zu 5 cm führten, nach ober- und unterstrom abklingend.

Hafenbaumaßnahmen unterhalb Hamburgs hatten ebenfalls nur lokale Wirkung. Diejenige aus Veränderungen der Hamburger Hafenkonfiguration kann über Kap. 4.1 berechnet werden: Seit 1950 hat die Wasserfläche um rd. 85 ha abgenommen (SIEFERT, 1995). Das ergibt in Hamburg

$$\begin{aligned} \text{Thb-Zunahme: } & 3 \cdot 0,85 = 3 \text{ cm} \\ \text{Thw-Anstieg: } & = 1 \text{ cm} \\ \text{Tnw-Abfall: } & = 2 \text{ cm} \end{aligned}$$

4.3 Hochwasserschutz

Die Hochwasserschutzmaßnahmen haben direkte und indirekte Folgen gezeigt:

- Wirkung auf die Tide- und Sturmflutabläufe durch Sandentnahmen,
- Wirkung auf die Sturmflutabläufe durch Vordeichungen und Absperrungen,
- Wirkung auf die Tnw durch Verarmung kleinerer Nebenrinnen.

Die wesentlichen Maßnahmen seit 1950 wurden bei SIEFERT u. HAVNØ (1989) zusammengestellt und nach vielen Modellversuchs-Ergebnissen hinsichtlich ihrer Wirkung bewertet. Im einzelnen handelt es sich um:

- Staustufe Geesthacht (1957 bis 1961); allerdings keine Hochwasserschutz-Maßnahme
- Absperrung aller Nebenflüsse (1966 bis 1975)
- Ein- und Vordeichungen von Geesthacht bis zur Ostemündung (1962 bis 1978)
- Polder im Hamburger Hafen (1976 bis 1978).

**Abschätzung der Absenkung des MTnw in der Untereibe durch den
Fahrrinnenneubau von 1974 bis 1978
(nach FERK, 1998)**

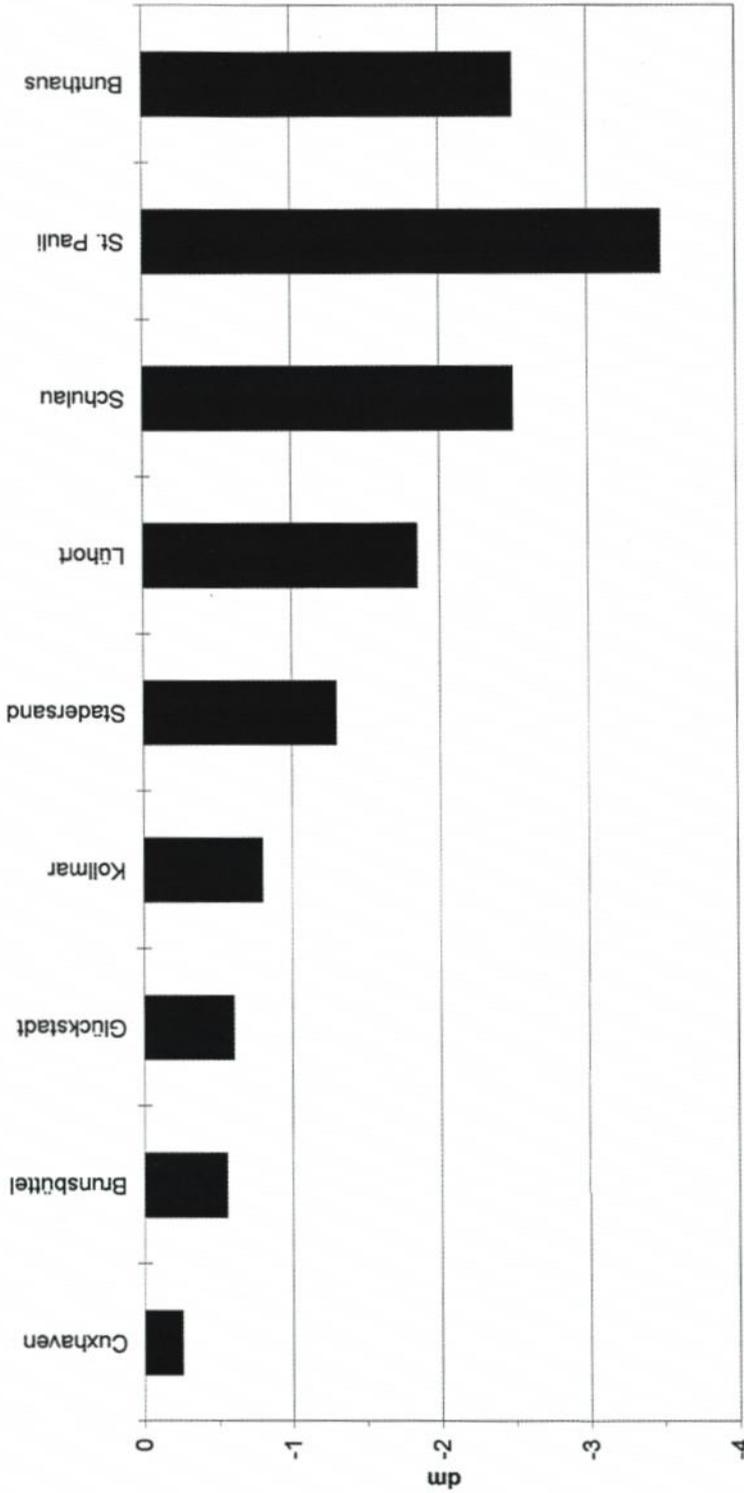


Abb. 46

**Um den Oberwassereinfluß normierte MThw-Differenzen
zwischen Hamburg-St. Pauli und Cuxhaven seit 1950**

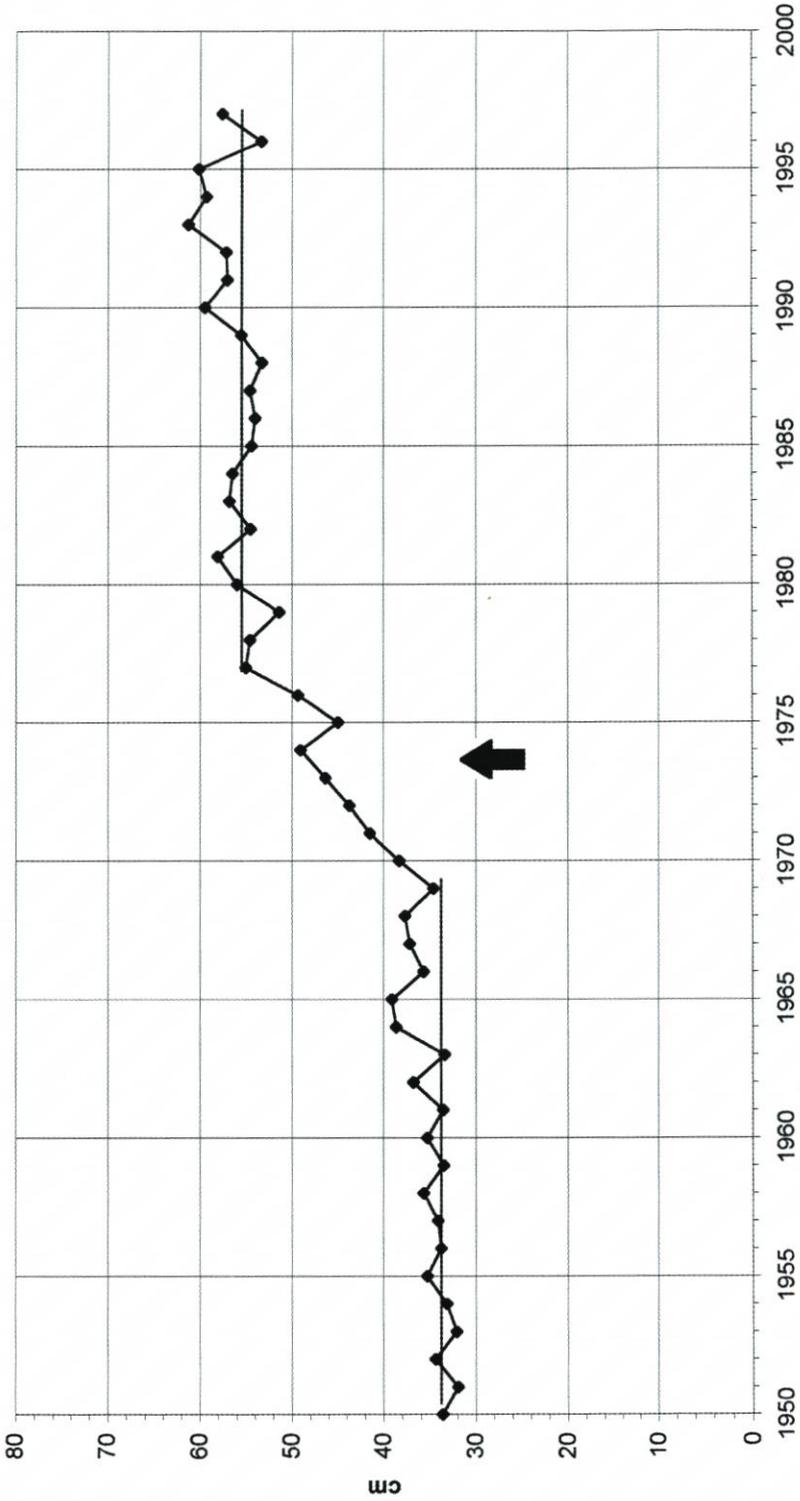


Abb. 47

Die Ergebnisse für hohe Sturmfluten sowie für die inzwischen maßgebende Bemessungssturmflut (LÄNDERARBEITSGRUPPE, 1988) lassen sich aus Tab. 24 u. 25 entnehmen (nach SIEFERT u. HAVNØ, 1988, überarbeitet). Danach gibt es Absenkungen (durch Nordkehdingen), im übrigen aber Erhöhungen der HTHw, jeweils in bescheidenem Ausmaße durch die einzelnen Vorhaben, in der Summe dennoch bedeutungsvoll. Ergänzend zu den Informationen der Tab. 24 sei auf eine Zusatzuntersuchung des dhi verwiesen: Würden alle Eindeichungsmaßnahmen zurückgenommen, so ermäßigte sich die Höhe sehr hoher Sturmfluten zwischen Blankenese und Zollenspieker um 3 dm. Wie sich die Höhen der Bemessungssturmflut über die Jahre verändert hätten, geht – zusammen mit einer aktuellen Simulation – aus Tab. 25 hervor. Der Vergleich zeigt, daß beide Modelle – das eindimensionale des dhi mit 300 Knoten und das zweidimensionale der BAW mit 400 000 Knoten – zu fast gleichen HHTw-Höhen kommen.

Tab. 24: Wirkung von Baumaßnahmen in und an der Tideelbe auf die Scheitelwasserstände hoher Sturmfluten in der Elbe

Maßnahme	HTHW-Erhöhung in dm bei			
	Brokdorf	Stadersand	Hbg.-St. Pauli	Zollenspieker
Staufstufe Geesthacht	0 bis 0,5	0 bis 0,5	0	0
Absperrung von Seeve, Ilmenau und Billwerder Bucht; Vordeichung Oortkaten	0	0	0,5 bis 1	2 bis 3
Neue Deichlinie Harburg bis Este; Absperrung Alte Süderelbe	0 bis 1	0,5 bis 2	0,5 bis 1,5	0,5 bis 2
Eindeichung Hahnöfer Sand; Absperrung Schwinge, Krückau und Pinnau	0,5 bis 1	1 bis 1,5	0,5 bis 1,5	1 bis 1,5
Absperrung von Lühe und Stör	0	0	0	0
Eindeichung Haseldorfer Marsch	0 bis 1	0,5 bis 1	0 bis 1	0,5 bis 1
Eindeichung Krautsand	rd. 1	rd. 0,5	0 bis 1	0,5 bis 1
Eindeichung Nordkehdingen	-0,5 bis 0	-0,5 bis 0	-1 bis 0	-1 bis 0
Hamburger Hafenspolder (nur für die Bemessungssturmflut 2085A untersucht)		(0,5 bis 1)	(0,5)	(0,5)

Tab. 25: Höhe der Bemessungssturmflut 2085A 1950 und Veränderungen in verschiedenen Ausbauständen in und an der Elbe nach Modellrechnungen im Dänischen Hydraulischen Inst. (bis 1980) sowie die Höhe nach Bundesanstalt für Wasserbau (1992)

Zustand	HTHW-Höhe 1950 und 1992 (in m NN) sowie Veränderungen gegen 1950 (in m) an den Pegeln									
	Geesthacht	Alten-gamme	Zollen-spieker	Har-burg	Hbg.-St. Pauli	Schu-lau	Stader-sand	Glück-stadt	Brok-dorf	Brunsbüttel
1950	7,45	7,16	6,94	6,78	6,73	6,47	6,29	6,05	5,96	5,83
1961	-0,05	0,01	0	0	0	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03
1963	-0,02	0,04	0,04	0,05	0,06	0,11	0,10	0,07	0,05	0,04
1970	0,02	0,09	0,09	0,11	0,12	0,17	0,16	0,14	0,11	0,08
1972	0,06	0,14	0,14	0,15	0,16	0,21	0,20	0,20	0,17	0,11
1974	0,34	0,45	0,44	0,34	0,28	0,25	0,22	0,21	0,17	0,11
1977	0,45	0,54	0,55	0,46	0,43	0,43	0,39	0,32	0,25	0,21
1978	0,47	0,57	0,63	0,53	0,51	0,54	0,53	0,39	0,30	0,24
1980	0,54	0,64	0,69	0,58	0,57	0,60	0,60	0,46	0,40	0,31
1992	7,9	7,8	7,65	7,3	7,3	7,0	6,8	6,4	6,25	6,0

Für Hamburg als dem Bereich mit den größten Auswirkungen ist es besonders interessant, die Wirkung der Maßnahmen unmittelbar in der Delegationsstrecke oder deren Nachbarschaft herauszufiltern. Dazu liefert die Studie zum Statusbericht (SIEFERT, 1995) folgende Zahlen:

Tab. 26: Wirkung von Baumaßnahmen auf die Höhen hoher Sturmfluten in der oberen Tideelbe

Maßnahme	Veränderung hoher HThw in dm *					
	Geesthacht	Alten- gamme	Zollen- spieker	Harburg	St. Pauli	Schulau
Änderungen der Wasserflächen im Hafen	(0)		(0)	(0)	(0)	
Staufstufe Geesthacht	-0,5	0	0	0	0	0
Tatenberger Schleuse	(0)		0		(0)	
Absp. Seeve, Ilmenau	0		(0)		(0)	
Eind. Geesthacht bis Billwerder Bucht	(2)	2	2-3	1-1,5	0,5-1	0-0,5
Sperwerke im Hafengebiet	(0)		(0)		(0)	
Eind. Harb. bis Cranz Absp. Este	(0,5-1)	(0,5-1)	0,5-2	0,5-1,5	0,5-1,5	0,5-1,5
Eind. Hahnöfer Sand	(0)	(0)	(0)	(0)	0	0-0,5
Summe (Richtwert)	2	2,5	3,5	2,5	2	1,5

* Die Klammerwerte sind geschätzte Zahlen

Die Summen der Effekte aus diesen Eingriffen zwischen Geesthacht und Tinsdal erreichen damit 40 bis 50 % der bei SIEFERT u. HAVNØ (1989) ermittelten Gesamtwirkungen aller Baumaßnahmen.

Im Elbeästuar heute noch vorhandene Sommerdeiche schützen Polder auf Neuwerk und Belumer Sand. Weitere Sommerdeiche sind in den 1970er Jahren eingedeicht und größtenteils abgetragen worden.

Detaillierte Untersuchungen über die Geschichte, die Wirkung, die Bemessung und die Brauchbarkeit von Sommerdeichen fehlen in der Literatur (SIEFERT, 1973). Sie wurden üblicherweise zur intensiven landwirtschaftlichen Nutzung der Vorländer gebaut und nach Bedarf und Erfahrung gestaltet. Die Höhen verschiedener Sommerdeiche sind z. B. weder absolut noch bezogen auf bestimmte Wasserstände gleich. Sie schwanken erheblich. Dies mag aus o. g. Studie für die Sommerdeiche an der Wurster Küste belegt werden. Hier schwanken deren Höhen zwischen 2,9 und 4,5 m NN. Danach sind Überschreitungshäufigkeiten zwischen (jährlich) 3,55 und 0,25 offenbar für Sommerpolder hinnehmbar. Dies erlaubt den Schluß, daß Veränderungen durch Scheitelerhöhungen um 1 bis 2 cm, die zu Häufigkeitszunahmen von etwa 0,1 bis 0,01 Tiden je Jahr führen, unwichtig sind, wenn also in 10 bzw. 100 Jahren eine Flut mehr über den Sommerdeich läuft.

Für eine Betrachtung der Wirkung einer Rinnenvertiefung auf Sommerdeiche selbst und deren Polder sind folgende Gesichtspunkte wichtig:

- Häufigkeit und Verweildauer von Wasserständen zwischen elbseitigem Deichfuß und etwa 0,5 m über Deichkrone bestimmen die Belastung durch Seegang. Bei höheren Wasserständen laufen die Wellen ohne Schaden über die Deiche. Da Untersuchungen über die Standfestigkeit von Sommerdeichen fehlen, können keine weiterführenden Aussagen gemacht werden.
- Zur Sicherheit gegen Beschädigung durch Überströmen sind Veränderungen bei der Steiggeschwindigkeit von Sturmfluten in Höhe der Sommerdeichkrone maßgebend. Da hierzu einzelne Ereignisse zu betrachten sind, spielt die Häufigkeit eine untergeordnete Rolle.
- Zur Änderung der Überflutungshäufigkeit von Sommerpoldern ist die Zunahme der Sturmfluthäufigkeit oberhalb der Deichkrone, also etwa $H_{Thw} > M_{Thw} + 2,0$ m, zu ermitteln.

4.4 Oberwasserzufluß

Die Wirkung des Oberwassers auf die Tide- und Sturmflutverhältnisse ist in den letzten Jahrzehnten von vielen Autoren auf unterschiedliche Weise untersucht worden. Aktuelle, gut abgesicherte Resultate für Jahresmittel werden in Kap. 4.1.3 vorgestellt. Übereinstimmend damit verwendet der Hamburger Sturmflutwarndienst schon seit etwa 15 Jahren die Beziehung

$$10 \text{ cm } H_{Thw}\text{-Anstieg in Hamburg je } 1000 \text{ m}^3/\text{s},$$

so daß die für Jahreswerte der M_{Thw} und Q_0 ermittelte Beziehung auch für Tageswerte bei Sturmfluten gilt. Das Q_0 wird dabei als Mittel der letzten fünf Tage verstanden.

4.5 Meeresspiegelvariationen

Der „Meeresspiegel“ (mean sea level, MSL) als mittlerer Tidewasserstand (M_{Tmw}) schwankt von Ort zu Ort und von Zeit zu Zeit beträchtlich und bedarf bei der weiteren Diskussion einer genauen Definition. Er wird im folgenden verstanden als

Jahresmittel aller Tidewasserstände in Cuxhaven.

Die Darstellung (Abb. 48) zeigt – allen Unkenrufen zum Trotz – für dieses Jahrhundert einen sich verlangsamenden Anstieg und dabei seit 1950 eine Anstiegsgeschwindigkeit von rd. 10 cm/100 Jahre ohne einen erkennbaren Trend zur Veränderung.

Im deutschen Küstenschutz werden seit langem MSL-Anstiege zwischen 20 und 30 cm/Jahrhundert veranschlagt, in den Niederlanden 30 cm/Jahrhundert. Der bisher am Pegel Cuxhaven zu beobachtende Meeresspiegelanstieg bleibt also sowohl deutlich unter diesen im Küstenschutz angesetzten Werten als auch unter der im Rahmen der Klimaforschung prognostizierten Anstiegsrate; aktuelle Untersuchungen lassen 24 cm/Jahrhundert erwarten.

Über die Wirkung eines Meeresspiegelanstieges auf die Tideverhältnisse im Nordseeküstengebiet und der Unterelbe hat STENGEL (1994), in Auszügen auch von STENGEL u. ZIELKE (1994) veröffentlicht, Untersuchungen vorgelegt. Dabei handelt es sich um Systemanalysen in einem numerischen Elbmodell.

Die von STENGEL berechneten Veränderungen der Tideparameter in der Unterelbe (relativ zu Cuxhaven) bei einem Anstieg des Meeresspiegels in der Nordsee um 50 cm zeigt folgende Tabelle:

MTmw ("MSL") am Pegel Cuxhaven seit 1900

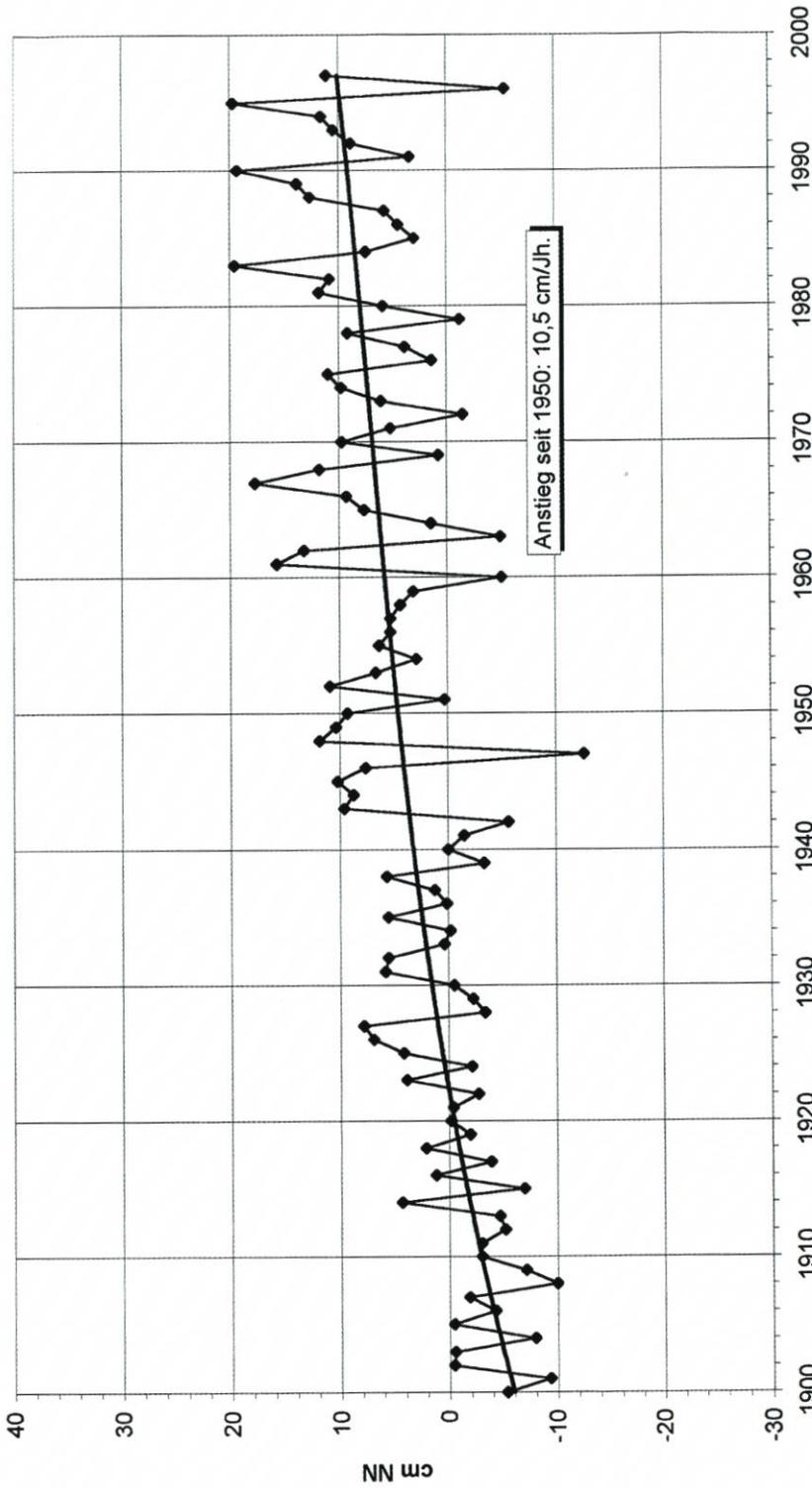


Abb. 48

Tab. 27: Relative Wasserstandsänderungen bei einem Szenario mit 50 cm erhöhtem MSL

Pegel	Thw cm	Tnw cm	Thb cm	MSL cm
Brunsbüttel	0	-3	+3	-1
Krautsand	+2	0	+2	+1
Steindeich	+2	-3	+5	-1
Stadersand	+4	-6	+10	-1
Hmb.-St. Pauli	+8	-7	+15	0
Bunthaus	+6	-6	+12	0
Zollenspieker	+1	-7	+8	-3

Dabei ist nicht entscheidend, ob diese Berechnungen „auf den Zentimeter“ genau sind. Dessen ungeachtet wird die Aussage zutreffen, daß die Werte für einen MSL-Anstieg von 25 cm etwa halb so groß sein werden bzw. bei dem Anstieg seit 1950 etwa ein Zehntel betragen haben.

Eine weitere Überlegung darf jedoch nicht fehlen: Wenn bei gleichem Schiffsverkehrsaufkommen der „Meeresspiegel“ in der Elbe deutlich steigt, wird man weniger baggern müssen. D.h., durch Erhöhung der Sohle der Fahrrinne werden die durch MSL-Anstieg und die durch Ausbau bedingten Veränderungen kleiner.

Die hier für die Tidewasserstände aufgezeigten bescheidenen Entwicklungen (z. B. größte Thb-Erhöhung 4 %, „MSL“-Anstieg in der gesamten Elbe wie an der Küste) gelten in entsprechend geringer Größenordnung für die Tideströmungen und den daraus resultierenden Materialtransport. Die Brackwasserzone in der Unterelbe hat sich durch den MSL-Anstieg geringfügig stromauf verschoben.

Bei der Untersuchung der Wirkung eines MSL-Anstiegs von wiederum 50 cm in der Nordsee ergibt sich nach STENGEL bei vier untersuchten Sturmfluten folgendes Bild für die dadurch bedingten zusätzlichen Erhöhungen der Scheitelwasserstände und Verkürzung der Laufzeiten (wiederum relativ zu Cuxhaven):

Tab. 28: Relative Sturmflutscheitel-Änderungen bei einem Szenario mit 50 cm erhöhtem MSL

Sturmflut	Cuxhaven	Brokdorf		Hmb.-St. Pauli	
	Höhe cm NN	Höhe cm	Zeit Min.	Höhe cm	Zeit Min.
03. 01. 1976	510	+3	<5	+3	<10
21. 01. 1976	470	+1	<5	+8	<10
24. 11. 1981	451	+2	<5	+2	<10
26. 01. 1990	376	0	<5	+4	<10

Die durch den angenommenen Meeresspiegelanstieg hervorgerufenen zusätzlichen HThw-Erhöhungen sind somit im Mittel kleiner als die Thw-Erhöhungen auf der vorherigen Tabelle.

In diesem Zusammenhang sollte ergänzend zu den Untersuchungen von STENGEL nicht unerwähnt bleiben, daß auf Betreiben der bereits erwähnten Länderarbeitsgruppe (1988) die Bemessungssturmflut „2085A“ sowie die Sturmflut „1985A“, die im Gegensatz zur Nr. 2085A den MThw-Anstieg von 30 cm nicht berücksichtigt, in drei Modellen mit übereinstimmenden Ergebnissen gerechnet wurde. Als Differenz zwischen den Rechenläufen für

die beiden Sturmfluten ergaben sich folgende HThw-Erhöhungen in der Elbe, relativ zu Cuxhaven:

Tab. 29: Relative Änderung des Bemessungswasserstandes bei 30 cm MThw-Anstieg

Pegel	cm HThw-Erhöhung
Otterndorf	0
Brunsbüttel	0
Brokdorf	0 bis 5
Glückstadt	0
Stadersand	0
Hamburg-St. Pauli	0 bis 5
Bunthaus	0
Zollenspieker	-5 bis 5

Legt man die oben aufgeführten Ergebnisse einer Beurteilung zugrunde, so muß festgestellt werden, daß bei einer deutlichen MSL-Erhöhung an der Küste diese in der Elbe bei Sturmfluten nur im Zentimeterbereich vergrößert wird (rd. 10 % der MSL-Erhöhung bei sehr hohen Sturmfluten) und damit für den Hochwasserschutz der Anstieg an der Mündung maßgebend bleibt.

4.6 Hydrologisch-morphologischer Nachlauf

Sowohl auf der Delegationsstrecke als auch auf der Bundesstrecke existieren weite Abschnitte, in denen die Fahrrinne erheblich breiter und/oder tiefer ist als dem planfestgestellten Zustand entspricht. Somit stellt sich die Frage: Sind die festzustellenden topographischen Unterschiede zwischen dem genehmigten Soll-Zustand und dem gegenwärtigen Ist-Zustand der Unterelbe auf natürliche oder anthropogene Vorgänge zurückzuführen? Zur Klärung dieser Frage haben sowohl Strom- und Hafenanbau als auch die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes Statusberichte angefertigt, in denen u. a. die morphologischen Entwicklungen der jeweiligen Elbabschnitte seit dem letzten Ausbau und deren Ursachen dargelegt werden.

In diesem Zusammenhang werden in Diskussionen die Bezeichnungen „hydrologischer“ bzw. „morphologischer Nachlauf“ verwendet, ohne daß es bisher eine Klärung oder gar eine genaue Definition über die Bedeutung und den Inhalt dieser Begriffe gegeben hat.

Die BAW-AK als hydromechanischer Gutachter zur neuen Fahrrinnenanpassung definiert den „morphologischen Nachlauf“ im Rahmen ihrer Untersuchungen und Modellierungen als „die nach der Vertiefung mittelbar stattfindende Anpassung des morphologischen Regimes an die durch die Ausbaubaggerung veränderte Tidedynamik des Systems.“ Diese Definition kann noch präzisiert werden:

„Nachlauf“

- beschreibt die natürliche Entwicklung eines Systems nach Abschluß eines anthropogenen Eingriffs als dessen Folge. Dementsprechend sind, bezogen auf das Beispiel Unterelbe, etwa notwendige Baggerungen oder Verklappungen im Anschluß an eine Baumaßnahme nicht als „Nachlauf“ zu bezeichnen, sondern vielmehr als eigenständige Folgemaßnahme zu begreifen, wobei zu beachten ist, daß die gebaggerten Mengen nicht dem natürlichen Sedimentationsnachlauf entsprechen, sondern – mit großer Wahrscheinlichkeit – deutlich größer als dieser sind.

- Beim Gesamtsystem „Unter- und Außenelbe“ kann – strenggenommen – zwischen „topographischem Nachlauf“ und „hydrologischem Nachlauf“ unterschieden werden. Während sich ersterer in geometrischen Systemveränderungen niederschlägt und über den Vergleich von Peildaten erkennbar ist, zeigt sich der daraus resultierende hydrologische Nachlauf anhand von Wasserstands-, Strömungs- und Dichteveränderungen außerhalb der normalen (Tide)schwankungen.
- In diesem Zusammenhang ist die unterschiedliche Dauer des Nachlaufs in bezug auf die verschiedenen Parameter zu beachten. Aus zahlreichen Untersuchungen ist bekannt, daß Wasserstände unmittelbar auf anthropogene Eingriffe reagieren, nach Abschluß der Maßnahme aber kaum noch. Mittel- oder gar langfristige Nachlauf-Erscheinungen sind in bezug auf Wasserstandsveränderungen schwerlich festzustellen. Siehe dazu u. a. Abb. 45 und 47. Über die Dauer des Nachlaufs bei anderen hydrologischen oder morphologischen Parametern ist wenig bis gar nichts bekannt.
- Aufgrund der Vielzahl von Wechselwirkungen zwischen topographischen und hydrologischen Parametern ist es sinnvoll, nicht explizit zwischen hydrologischem und topographischem Nachlauf zu unterscheiden, sondern den Begriff „hydrologisch-morphologischer Nachlauf“ zu verwenden.
- Im Hinblick auf das Ziel einer durchgeführten Maßnahme kann der „Nachlauf“ für das Gesamtsystem „negativ“ (im Sinne einer natürlichen Entwicklung in Richtung auf eine Wiederherstellung des alten Zustandes) oder „positiv“ (im Sinne einer natürlichen Entwicklung in Richtung auf den angestrebten Zustand) ausgerichtet sein, wobei die Vorzeichen für (räumliche) Teilbereiche des Systems unterschiedlich sein können.
- Hier spielt auch die Stabilität des Gesamtsystems eine wichtige Rolle. Das hydrologisch-morphologische System der Elbe kann auf externe Einflüsse „stabil“ oder „labil“ und Teilabschnitte des Gesamtsystems unterschiedlich stark reagieren. Aus den bisherigen Erfahrungen und Untersuchungen ist bekannt, daß insbesondere Veränderungen im zentralen Bereich der Unterelbe, der ungefähr von Stadersand bis Brunsbüttel reicht, zu Wasserstandsveränderungen führen, wobei der stromauf anschließende Abschnitt sehr sensibel (labil) reagiert. Siehe dazu auch Abb. 16 und 17.
- Um hydrologisch-morphologischen Nachlauf kenntlich zu machen, müssen die natürlichen Abläufe, Gesetzmäßigkeiten und Entwicklungen eines Systems einschließlich ihrer Variabilität sowie die unmittelbaren Auswirkungen laufender Maßnahmen hinreichend genau bekannt und quantifizierbar sein, so daß sie für die Betrachtung des Nachlaufs eliminiert werden können. In bezug auf topographische Veränderungen ist z. B. zu berücksichtigen, daß – je nach energetischer Beanspruchung – topographische Variationen der Fahrrinnensohle um rund 1 m (außerhalb von Riffelgebieten!) natürlich sein können.

Eine zentrale Frage ist die nach der scheinbar vorhandenen Diskrepanz zwischen hydrologischem und topographischem Nachlauf: Wenn die festzustellenden Unterschiede zwischen dem jetzigen und dem für den KN – 13,5-m-Ausbau planfestgestellten Zustand der Unterelbe in erster Linie auf einen (natürlichen) hydrologisch-morphologischen Nachlauf zurückzuführen wären, müßte sich ein solcher *sowohl* anhand der Topographie (= Peilkarten) als auch anhand der hydrologischen Entwicklung (= Wasserstandswerte) erkennen lassen. Die Wasserstandsdaten zeigen allerdings an, daß es bei ihnen nach dem Ende des KN – 13,5-m-Ausbaus der Unterelbe zu einer deutlichen Stabilisierung gekommen ist. Lokale Eingriffe in das Unterelbe-System (1986/87 im Bereich Schwarztonnensand, 1993/94 zwischen Brokdorf und Glückstadt) schlagen sich *unmittelbar* in den Wasserstandsentwicklungen stromauf nieder. Es muß daher vermutet werden, daß die heutigen Tiefen und Breiten der

Rinne in der Zeit des KN – 13,5-m-Ausbaus oder, wenn später, in „stabilen“ Teilabschnitten hergestellt worden sind.

Ein weiterer Sachverhalt spricht ebenfalls gegen die Auffassung, wonach der gegenwärtige Zustand der Rinne auf natürliche Vertiefungseffekte zurückzuführen ist: Sollte sich die Rinne im Anschluß an den Ausbau eigendynamisch vertieft und verbreitert haben, hätte das auch an einer spürbaren Abnahme der Unterhaltungsbaggermengen deutlich werden müssen. Die bisherigen Erfahrungen zeigen allerdings, daß grundsätzlich das genaue Gegenteil der Fall ist: Nach dem Abschluß der Fahrinnenvertiefungen stiegen die Unterhaltungsbaggermengen durchweg merklich an und verblieben in den Folgejahren auf einem höheren Niveau als vor der Ausbaumaßnahme. Daraus kann mit einiger Vorsicht gefolgert werden, daß das Natursystem „Unterelbe“ auf Vertiefungsmaßnahmen insgesamt offenbar eher mit einem „negativen“ hydrologisch-morphologischen Nachlauf (s. o.) reagiert, d. h. die Elbe strebt tendenziell nach einer Entwicklung in Richtung auf eine Wiederherstellung des Ausgangszustandes.

Insoweit kommen SIEFERT u. JENSEN (1993) denn auch zu dem Ergebnis, daß durch den 13,5-m-Ausbau trotz späteren Feinausbaus um einige Dezimeter allenfalls als hydrologischer Nachlauf

< 0,5 dm MThw-Erhöhung
rd. 0,5 dm MTnw-Absenk

für Hamburg auszumachen sind. Für den gesamten Zeitraum ab 1950 wird es kaum mehr sein.

4.7 Auslösende Faktoren für die Niedrigwasserentwicklungen in der Unterelbe nach 1980

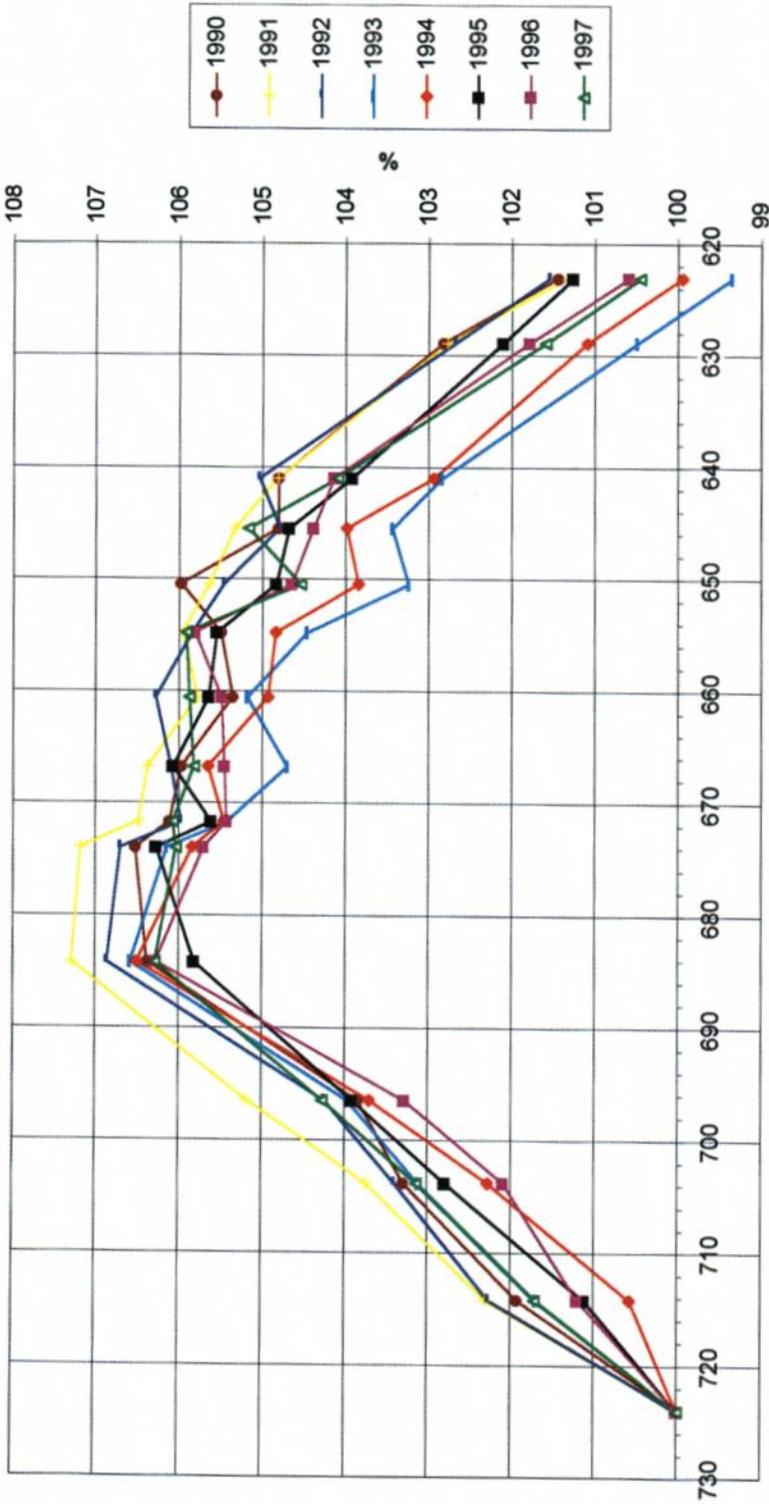
4.7.1 Veränderungen

Die Methodik ist im einzelnen bei FERK et al. (1996) erläutert. Dabei wurde vor allem das Problem gelöst, Pegeldata unterschiedlicher Orte (und dementsprechend unterschiedlicher Mittelwerte und Spannweiten) sowie verschiedener Jahre miteinander vergleichbar zu machen. Um dieses zu erreichen, werden die jeweiligen Jahresmittelwerte des MTnw eines zugrunde gelegten Bezugspegels im Mündungsbereich der Unterelbe = 100 (%) gesetzt. Da das langjährige MTnw im Elbmündungsbereich bei rund 350 cm PN liegt, entsprechen einem Prozent hier somit rund 3,5 cm. Die Niedrigwasserstände der stromauf gelegenen Pegel werden somit als *relatives* bzw. *prozentuales* Verhältnis zum Bezugspegel aufgefaßt und dargestellt.

In Abb. 49 sind die normierten MTnw in der Unterelbe als Längsprofil, bezogen auf den Pegel Cuxhaven, dargestellt. Zum Verlauf der MTnw-Ganglinien läßt sich generell sagen, daß die um den Oberwassereinfluß korrigierten Niedrigwasser stromauf von der Mündung zunächst deutlich steigen und im zentralen Abschnitt der Unterelbe, etwa zwischen den Stromkilometern 660 und 680 (ungefähr Stadersand bis Brokdorf) ihre Höchstwerte erreichen. Weiter stromauf beginnen die Werte dann wieder zu sinken, bleiben in der Regel aber meist deutlich über dem Niveau an der Mündung.

Ausnahmen bilden allerdings die MTnw-Ganglinien der Jahre 1993 und 1994, die – wie beschrieben – in St. Pauli genauso hoch bzw. sogar niedriger als am Pegel Cuxhaven waren. Überhaupt zeigt sich hinsichtlich des Verlaufs der einzelnen Jahresganglinien, daß die 1993er-

Normierte MTnw in der Unter- und Außenelbe seit 1990
Bezugspegel: Cuxhaven - Steubenhöft



km

Abb. 49

sowie die 1994er-Ganglinien fast im gesamten Verlauf der Elbe erheblich aus dem Rahmen fallen, und zwar überraschenderweise bereits gleich oberhalb von Cuxhaven. Es deutet sich somit an, daß bereits hier Veränderungen zu einem Absinken der Niedrigwasserstände geführt haben, die sich auch noch in die Unterelbe hinein auswirken. Da die Ganglinien nach 1994 wieder deutlich höher verlaufen, können die Ursachen nicht nur örtlich, sondern auch zeitlich eingegrenzt werden.

Auch bezogen auf den Pegel Großer Vogelsand kommt der außergewöhnliche Verlauf der 1993er- und der 1994er Niedrigwasser-Ganglinie sehr klar zum Ausdruck. Dies gilt allerdings nicht für den Bereich seewärts von Cuxhaven, wo ein undifferenziertes Bild vorherrscht. Somit zeigt sich, daß Umlagerungsvorgänge seewärts von Cuxhaven für die Niedrigwasserentwicklung in der Unterelbe nicht in Frage kommen. Vielmehr wird deutlich, daß für die im oberen Bereich der Unterelbe zu beobachtende Niedrigwasserentwicklung der Jahre 1993/94 zwei Bereiche ausschlaggebend sind:

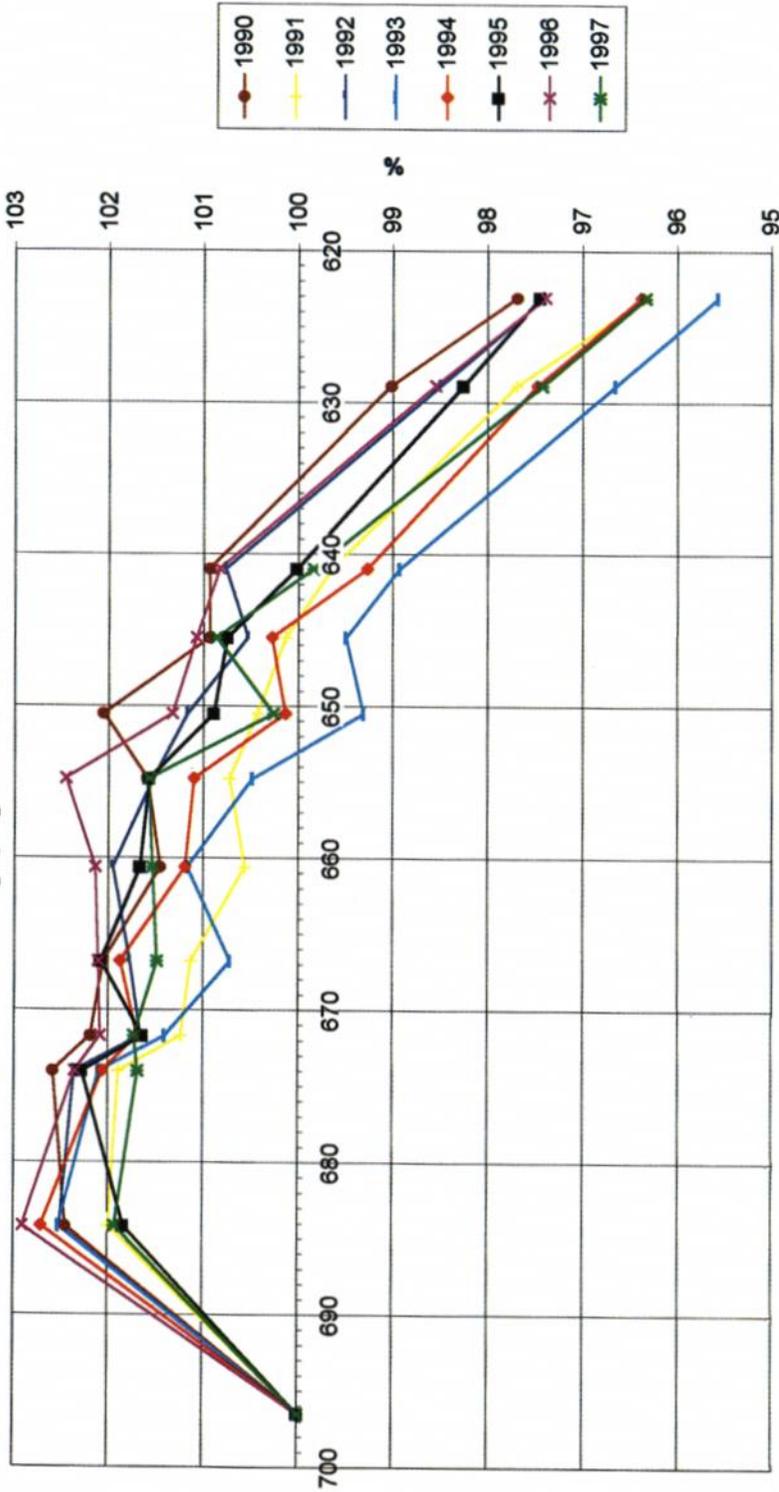
Dies sind zum einen der – bereits genannte – Bereich zwischen Cuxhaven (km 724) und Osteriff (km 703,8), zum anderen der Elbabschnitt oberhalb von Brokdorf (km 684,2). Abb. 50, in der die normierten Niedrigwasser der Unterelbe seit 1990 bezogen auf den Pegel Brunsbüttel dargestellt und damit unterstromige Einflüsse weitgehend ausgeschaltet sind, unterstreicht, daß in den letzten Jahren insbesondere zwischen den Pegeln Brokdorf und Glückstadt (km 674,0) die MTnw-Ganglinien einen völlig anderen Verlauf im Vergleich zu den vorangegangenen Jahren aufweisen. Während zwischen diesen Pegeln das MTnw stromauf normalerweise eine deutlich ansteigende Tendenz aufweist, so daß der Höchstwert zwischen den Stromkilometern 660 und 680 erreicht wird, weisen die Jahre 1993 und 1994 hier einen *abfallenden* Trend auf, so daß die MTnw-Maximalwerte dieser Jahre bereits am Pegel Brokdorf erreicht werden. Der Übergang zu dieser Entwicklung ist bereits an den Ganglinien von 1991 und 1992 erkennbar. Diese setzte sich bis 1997, wenn auch 1995 unterbrochen und sonst weniger ausgeprägt als 1993/94, fort.

Die Vorgänge in diesen beiden Abschnitten der Elbe sollen im folgenden noch etwas eingehender beschrieben werden, bevor detaillierter auf die Ursachen dieser Entwicklung eingegangen wird.

Im Medemgebiet sind die morphologischen Abläufe geprägt von einer Eintiefung und der Wanderung der Medemrinne nach Norden gegen den Medemsand (vgl. Abb. 51 u. 52). Dort hat sich eine steile Abbruchkante ausgebildet, von der offensichtlich bei Ebbe große Materialmengen seewärts abtransportiert werden. Dies wird bestätigt durch Sohlaufhöhungen im Kolk vor Cuxhaven, die ab 1984 deutlich werden (vgl. BERNHARD, 1996). Dem starken Abbau des Medemsandes steht an der Südseite der Medemrinne noch keine entsprechende Aufhöhung des Medemgrundes gegenüber. Bei BERNHARD, HANSEN u. NEEMANN (1995) werden für die Zeit von 1985 bis 1993 Querschnittsflächen unter MTnw angegeben, die für den Strom-km 722,2 eine Erweiterung von 81 %, für den Strom-km 720,3 von 24 % und für den Strom-km 716,5 noch von 7 % ausweisen. Diese Zahlen zeigen die starken dynamischen Vorgänge in diesem Stromgebiet, die die zeitweise größere Absenkung des Niedrigwassers erklären. Obwohl die Umlagerungsprozesse im Bereich des Medemsandes und der Medemrinne bereits seit mehreren Jahren andauerten, scheinen diese erst im Jahr 1994 im starken Maße hydraulisch wirksam zu werden. Warum die Entwicklung der Wasserstände danach wieder rückläufig ist, bleibt unklar.

Zur detaillierten Untersuchung des zweiten „kritischen“ Elbabschnitts werden die normierten MTnw seit 1989 zwischen Brokdorf und Krautsand, bezogen auf den Pegel Brokdorf, dargestellt. Das Ergebnis in Abb. 53 zeigt, daß die MTnw in diesem Flußabschnitt von

**Normierte MTnw in der Unterrelbe seit 1990
Bezugspegel: Brunsbüttel**



km

Abb. 50



Abb. 52: Tiefenplan von Medemsand, -rinne und -grund von 1994

**Normierte MTnw in der Untereibe seit 1989
 Bezugspegel: Brokdorf**

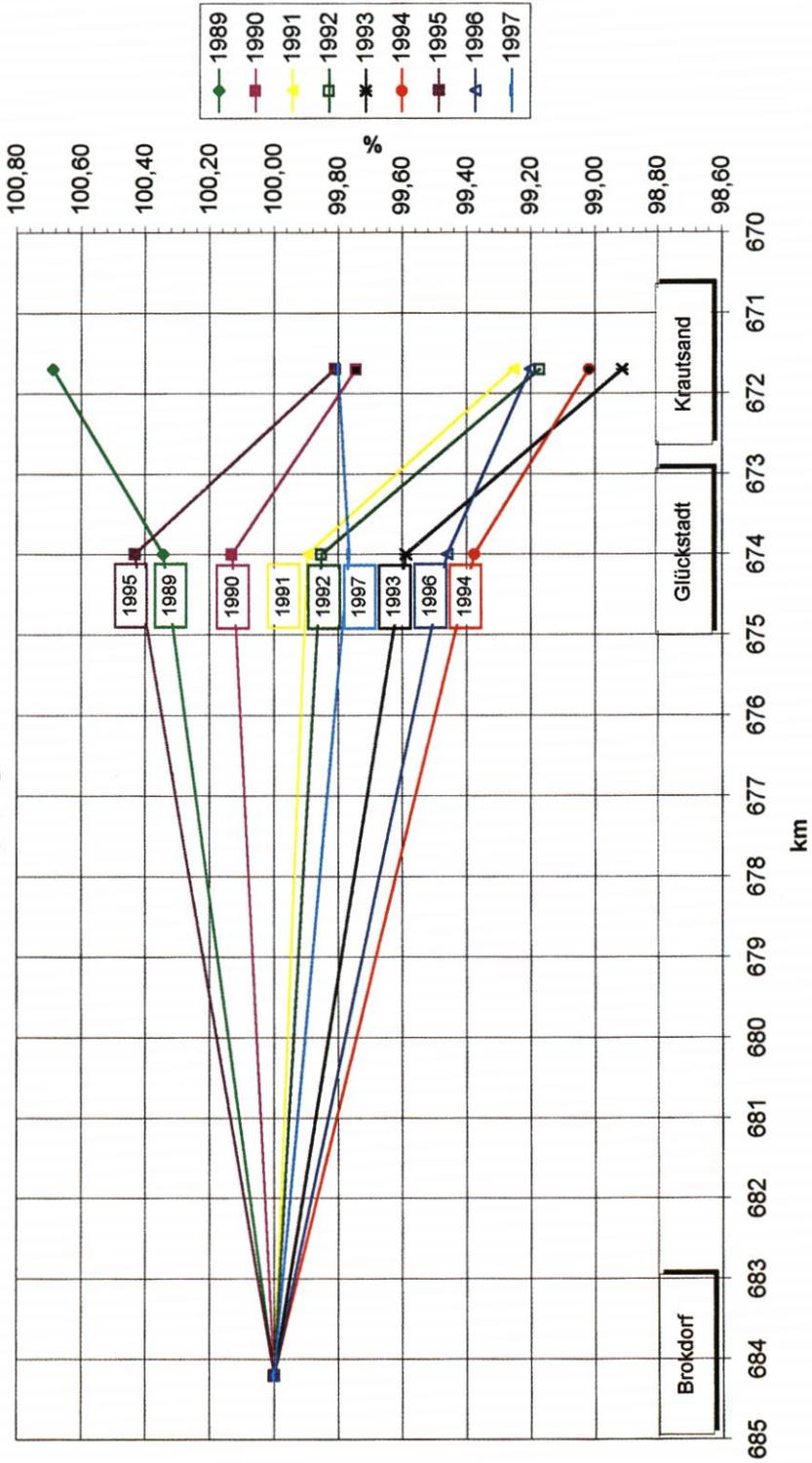


Abb. 53

1989 bis 1994 kontinuierlich und mit gleichbleibender Intensität gefallen sind. Im Gegensatz zu den Prozessen im Gebiet des Medemsandes deutet dieses Phänomen auf eine sukzessive, in eine Richtung gerichtete Entwicklung hin, für die es keine Hinweise auf eine Verlangsamung oder Beschleunigung gab. Nach 1994 änderte sich die MTnw-Reaktion deutlich und ohne festen Trend: 1995 hoch, 1996 tief, 1997 im mittleren Bereich.

Der betreffende Abschnitt der Unterelbe ist in starkem Maße gekennzeichnet durch großflächige Wattbereiche, das Krautsander Watt, das Freiburger Watt sowie die Brammer Bank. Ausschlaggebend für die beschriebene hydrologische Entwicklung sind offensichtlich die seit einigen Jahren zu verzeichnenden massiven und großflächigen Aufhöhungen dieser Wattbereiche und der dortigen Nebelbeben, auch durch Aufspülung der Brammer Bank von Baggermaterial aus dem Durchstich 1991. Stellenweise haben sich die Watten auf Höhen von bis zu 2 m über KN aufgehöhht, was zwangsläufig zu einer zunehmenden Konzentration der Tideströmung auf die tiefe Elbrinne geführt hat (Abb. 54 u. 55). Die daraus resultierende Abnahme der Rauheit des Profils schlägt sich unmittelbar in einer lokalen Absenkung des mittleren Tideniedrigwassers nieder, die sich entsprechend auch in den Wasserständen elbaufwärts bemerkbar macht.

In der Abfolge dieser Reaktionen zeigte sich, daß in diesem Strombereich nach dem KN - 13,5-m-Elbeausbau die Hauptelbe sich etwas weiter eintiefte, jedoch der Gesamtquerschnitt sich nicht weiter vergrößerte. Erst die Kubisierung von 1988 wies für diesen Bereich eine „späte“ Vergrößerung des Querschnitts aus. Danach hat sich für den Querschnitt-km 680 der tiefe Bereich in der Zeit von 1980 bis 1988 um rd. 12 % eingetieft und der Flachbereich um rd. 14 % erhöht, in der folgenden Zeit von 1988 bis 1992 hat sich der flache Teil des Querschnitts weiter um rd. 6 % erhöht.

Wie gering im Verhältnis zu den dynamischen natürlichen Vorgängen mit den daraus resultierenden Spiegelschwankungen des Niedrigwassers sich örtliche Eingriffe des Menschen durch bauliche Maßnahmen auswirken, kann am Beispiel des Stromgebietes bei Kollmar mit der Stromkurve im Bereich der beiden Elbinseln Pagensand und Schwarztonnensand gezeigt werden (siehe dazu die normierten, auf den Pegel Kollmar bezogenen MTnw der Jahre 1984 bis 1989 zwischen Kollmar und Stadersand, Abb. 56). Dieser Strombereich war schon frühzeitig ein Engpaß und ein nautisch schwierig zu befahrender Teil der Unterelbe. So wurden hier schon seit 1928 sporadisch die Abbaggerung des Schwarztonnensandes, die Befestigung des Nordteils des Pagensandes (Leitdamm Pagensand-Nord) und die Begradigung des Schiffahrtsweges durch Aufbaggern der Kurve am Innenrand betrieben. Insgesamt haben die vielen kleinen und auch großen Maßnahmen in diesem Gebiet sicher zu der langfristigen Absenkung des Niedrigwassers der Unterelbe oberstrom von Glückstadt erheblich beigetragen. In einer Betrachtung für den Zeitraum von 1976 bis 1994 konnte eine Zuordnung örtlich ausgeführter Maßnahmen zur Bewegung des Niedrigwassers an den Pegeln Kollmar und Grauerort nicht schlüssig vorgenommen werden. Die Bandbreite der natürlichen Bewegung in den Wasserstandsmittelwerten ist offensichtlich so groß, daß Ausschläge der Ganglinien der MTnw infolge von Sandentnahmen in der Größenordnung von 200 000 m³ am Pegel nicht deutlich werden.

Anhand der Abb. 56 wird ein anderer wesentlicher Aspekt der MTnw-Entwicklung klar. So zeigt sich, daß sich das Niedrigwasserniveau nach 1987 wieder zu einem gewissen Grad regeneriert hat. Nach dem „Einbruch“ des Jahres 1987 lagen die MTnw der Folgejahre in Grauerort und Stadersand bereits wieder auf einem recht hohen Niveau, ohne allerdings die Werte 1984/85 zu erreichen. Dieser Effekt wird auch für den Bereich der Medemrinne erwartet, da die dortigen Querschnittsvergrößerungen eine Verlangsamung der Strömung nach

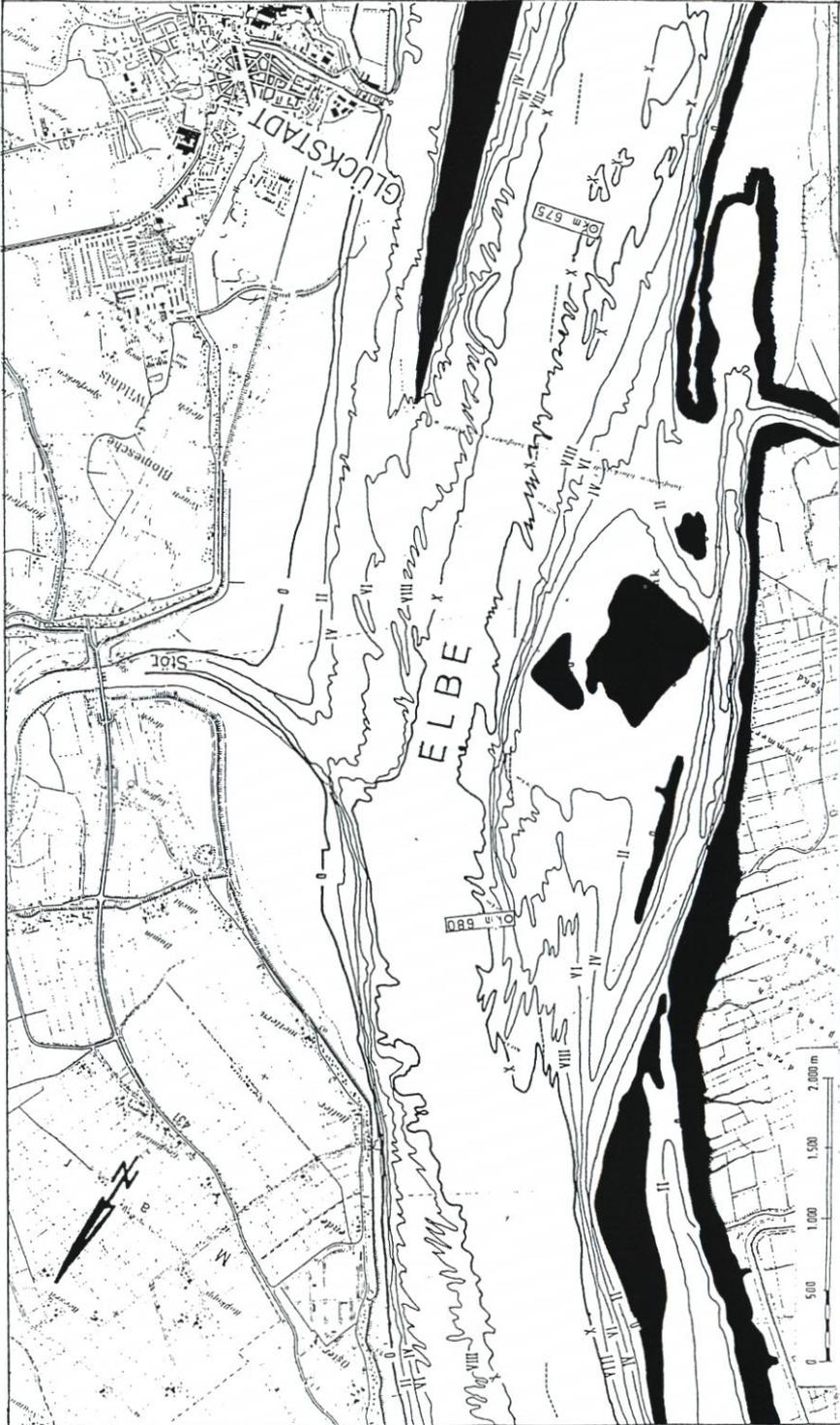


Abb. 54: Tiefenplan der Brammerbank von 1979



Abb. 55: Tiefenplan der Brammerbank von 1994

Normierte MTnw in der Untereibe 1984 bis 1989 Bezugspegel: Kollmar

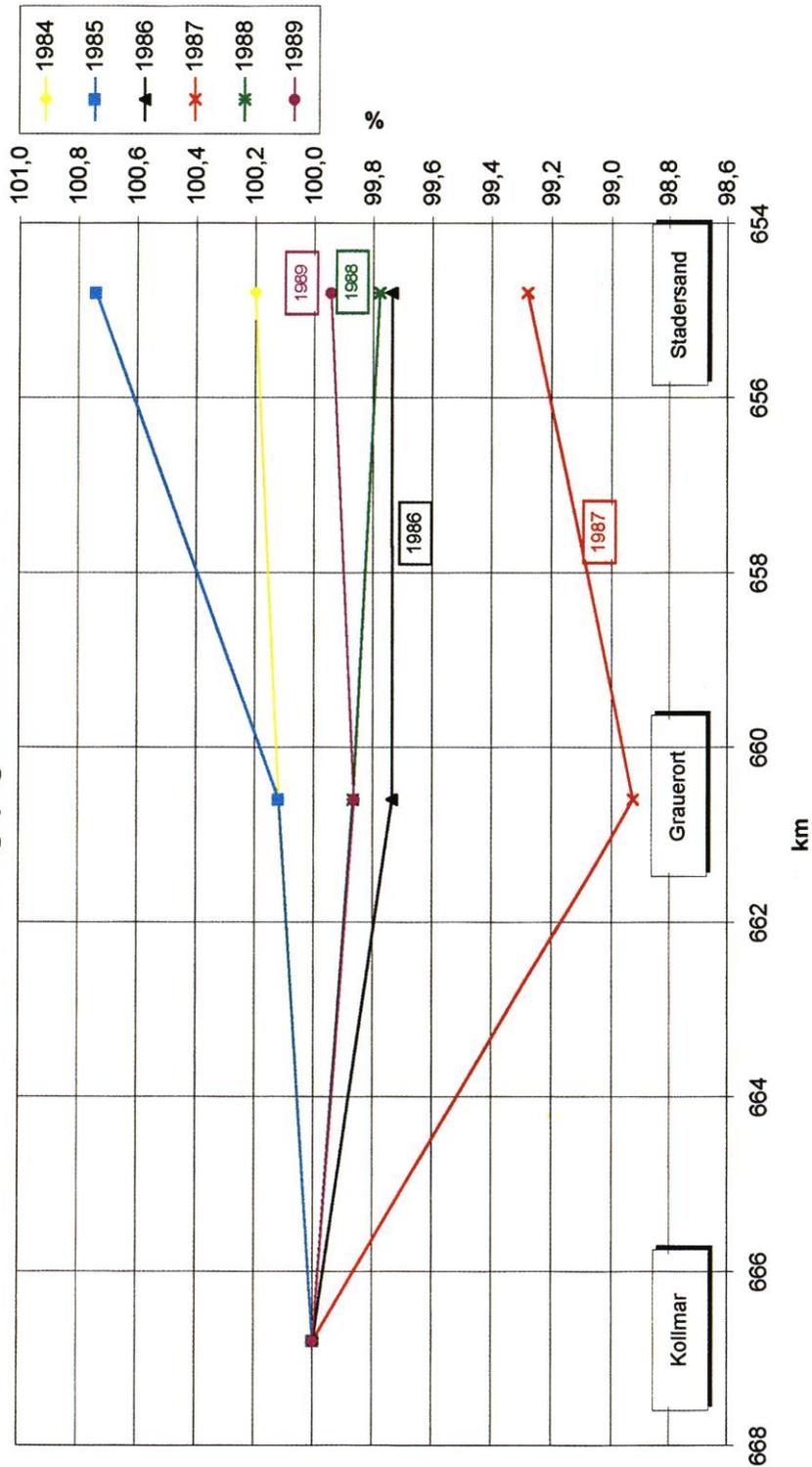


Abb. 56

sich ziehen muß, die über einen mehrjährigen Zeitraum örtlich zu verstärkter Sedimentation und Sohlaufhöhungen führen wird.

4.7.2 Quantifizierung der MTnw-Absenkung in den Teilbereichen

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß das außergewöhnlich starke Absinken der Niedrigwasserstände im Hamburger Raum in den letzten Jahren durch eine außergewöhnliche Überlagerung der Auswirkungen umfangreicher natürlicher morphologischer Umlagerungsvorgänge, die sich räumlich vornehmlich auf zwei Abschnitte der Unterelbe beschränken, bewirkt wurde. Während die Prozesse im Bereich Brokdorf – Krautsand bereits seit mehreren Jahren andauern und zu einer sukzessiven Erniedrigung des Niedrigwasserniveaus geführt haben, sind die hydrologischen Auswirkungen der Umlagerungsprozesse im Bereich Medemsand/Medemrinne erstmals 1993 und vor allem 1994 voll zum Tragen gekommen.

Mit einiger Vorsicht läßt sich auch das Ausmaß der durch die morphodynamischen Prozesse in den jeweiligen Regionen hervorgerufenen Niedrigwasserabsenkung bestimmen. FERK et al. (1996) gehen davon aus, daß sowohl die morphologischen Entwicklungen im Medembereich als auch die Prozesse im Gebiet zwischen Brokdorf und Krautsand zu einer MTnw-Erniedrigung – ausgehend vom Zustand Ende der 80er/Anfang der 90er Jahre – um jeweils 0,5 dm geführt haben. Setzt man voraus, daß sich die dort entstandenen Differenzen stromauf unverändert fortsetzen, entspricht der sich ergebende Wert von rund 1 dm tatsächlich recht gut dem eingangs erwähnten Wert für den Hamburger Raum.

In diesem Zusammenhang ist abschließend freilich zu berücksichtigen, daß die morphologischen Veränderungen im Gebiet Medemsand/Medemrinne absolut ein weitaus größeres Ausmaß haben als die Verlandungsprozesse im Bereich der Watten zwischen Brokdorf und Krautsand. Letztere finden allerdings in einem Elbabschnitt statt, von dem bekannt ist, daß er hydrologisch sehr „sensibel“ auf geometrische Systemveränderungen reagiert, während Vorgänge in der unteren Unterelbe dagegen eine vergleichsweise geringe Auswirkung auf die Wasserstände haben. Wenn – wie in diesem Falle – beide Abschnitte der Elbe je 50 % zur Niedrigwasserabsenkung beitragen, spricht das für ein außergewöhnlich großes Ausmaß der Umlagerungsvorgänge im Bereich des Medemsandes bzw. der Medemrinne. Mit anderen Worten: Die morphologischen Prozesse im inneren Ästuar sind zwar kleiner, aber hydrologisch wirksamer.

Das mittlere Tideniedrigwasser am Pegel St. Pauli für das Jahr 1996 hat mit NN – 1,64 m den niedrigsten Wert seit Beginn der Aufzeichnungen erreicht. Es lag somit – bei einem Oberwasserzufluß, der im wesentlichen dem langjährigen Mittel entspricht – etwa 2,5 dm unter dem derzeit gültigen Kartennull. Zu diesem Befund die folgenden Anmerkungen:

- Der sehr niedrige Tnw-Wert 1996 ist nicht elbe-spezifisch. Auch an der freien Nordsee (hier: Cuxhaven) wurde 1996 das niedrigste Tnw seit Beginn dieses Jahrhunderts registriert. Vergleiche dazu Abb. 19 und – zum ebenfalls sehr niedrigen MThw – Abb. 18.
- Die eigentlichen problematischen Jahre in bezug auf die elbe-spezifische Niedrigwasserentwicklung waren 1993 und (vor allem) 1994. Seitdem ist eine deutliche Beruhigung bzw. Erholung der um Nordsee- und Oberwasser-Einflüsse bereinigten Niedrigwasserwerte zu verzeichnen (Abb. 44).

4.8 Zusammenfassende Erläuterung der Veränderungen der Wasserstände in der Elbe

Die Veränderungen in vier Jahrzehnten sollen durch einen Vergleich der Fünfjahresmittel 1951/55 und 1991/95 dargestellt und durch die Erkenntnisse aus Kap. 4.1 bis 4.7 erläutert werden.

Hamburg

Am Pegel Hamburg St.-Pauli wurden gemessen:

Zeitraum	MThw cm NN – 5 m	MTnw cm NN – 5 m	MThb m	HThw cm NN – 5 m
1951/55	669	425	2,44	875
1991/95	708	353	3,55	915
Differenz	+4 dm	-7 dm	+11 dm	+4 dm

Die Differenzen sind deshalb in Dezimetern angegeben, weil auch die Erklärungen für Veränderungen nur in ganzen und halben Dezimetern möglich sind. Bei dem natürlichen Tidegeschehen sind Diskussionen über einzelne Zentimeter ohnehin müßig – nicht nur bei der Elbe! Zur Erinnerung sei auf Kap. 2.3 verwiesen. Entsprechend können diese Daten nunmehr wie folgt interpretiert werden:

Tab. 30: Wasserstandsänderungen in Hamburg und Erklärungen für die Ursachen

Komplex	Differenzen in dm von 51/55 auf 91/95			
	MThw	MTnw	MThb	HThw
- Meßwerte 91/95 minus 51/55	+ 4	- 7	+ 11	+ 4
- Hamburg relativ zu Cuxhaven	+ 3	- 7	+ 10	+ 5
- Um Nordsee- und Q _o - Einflüsse bereinigte Veränderungen (Kap. 4.1.3)	+ 2,5	- 7	+ 9,5	
Erklärungen:*				
- dem Flußregime entzogene Bagger- mengen (rd. 130 Mio. m ³)			+ 5	
- Abnahme wasserseitiger Hafenflächen in Hamburg (rd. 85 ha)			+ 0,5	
- Querschnittserweiterungen bis etwa 1980 (SIEFERT und HAVNØ, 1989)	+ 2	(- 4)	(+ 6)	+ 1,5
- Veränderungen der Randgebiete		- 0,5	(+ 0,5)	
- Wirkung aller Baumaßnahmen außerhalb der Fahrrinne einschl. Wehr Geesthacht				1 bis 6 i.M. + 4
- rel. Änderung durch MSL-Anstieg			< + 0,5	0
- hydrologischer Nachlauf	+ < 0,5	- 0,5	(+ 1)	
- natürl. Veränderungen in der unteren Unterelbe		- 1	(+ 1)	

* Zahlen in Klammern sind gut abgesicherte Schätzungen.

Bei der Wertung der Erklärungen ist natürlich zu berücksichtigen, daß ein Vergleich von Fünfjahresmitteln durch astronomische und meteorologische Gegebenheiten beeinflusst ist und keine Erklärung der Differenzen bis ins letzte Detail erwartet werden kann. Dennoch:

- Die Veränderungen relativ zu Cuxhaven stimmen in dem zu erwartenden Rahmen mit den normierten Daten nach Kap. 4.1.3 überein; sie sind damit als im Ästuar entstanden anzusprechen;
- gut 2 der 2,5 bis 3 dm MThw - Erhöhung in der Elbe gehen zu Lasten der Querschnittserweiterungen von 1950 bis 1980 und eines gewissen Nachlaufes;
- die MTnw - Absenkung von 7 dm geht zurück auf rd. 4 dm durch Querschnittserweiterungen bis etwa 1980, 1 dm auf die natürlichen Veränderungen seit 1992 und je 0,5 dm auf künstliche Eingriffe in den Randbereichen und hydrologischen Nachlauf, in der Summe 6 dm;
- entsprechend sind die 9,5 bis 10 dm MThb - Erhöhung zu etwa 8 bis 9 dm erklärbar; die verbleibenden Restbeträge gehen zurück auf
 - o die Vertiefung der oberen Tideelbe
 - o natürliche Veränderungen vor 1992
 - o Maßnahmen wie die Absperrung der Alten Süderelbe und Verlandungen wie im Mühlenberger Loch;

Hinweis:

- Δ MThb aus Baggermengen (+ 5 dm) und Hafensflächen (+ 0,5 dm) stimmt weitgehend überein mit dem ganz anders bestimmten Δ MThb aus Querschnittserweiterungen (+ 6 dm);
- die HThw - Erhöhungen sind erklärbar; daß die Summen nicht ganz gleich sind, liegt daran, daß die Sturmflutkollektive für die Fünfjahresmittel auch niedrigere Ereignisse enthalten, die bei den Modellrechnungen unberücksichtigt blieben.

Zollenspieker

Die Aussagen für Zollenspieker können aus den Erkenntnissen für Hamburg abgeleitet werden, soweit sie nicht direkt bestimmt wurden. Am Pegel stellen sich die Veränderungen wie folgt dar:

Zeitraum	MThw cm NN - 5 m	MTnw cm NN - 5 m	MThb m	HThw cm NN - 5 m
1951/55	696	539	157	886
1991/95	745	486	259	942
Differenz	+5 dm	-5,5 dm	+10,5 dm	+5,5 dm

Erfahrungen mit Entwicklungen in anderen Ästuaren und z. B. in den Nebenflüssen der Elbe (Kap. 3.5) lassen folgendes im Vergleich zu Hamburg erwarten:

- Δ MThw in Hamburg laufen ungedämpft bis oberhalb Zollenspieker
- Δ MTnw in Hamburg werden oberhalb gedämpft, aber abhängig von der (größer gewordenen) Flußtiefe
- Δ HThw in Hamburg im Prinzip wie Δ MThw, jedoch ggf. durch größer gewordene Flußtiefe leicht verstärkt.

Die Tiden sind in Zollenspieker deutlich stärker Q_0 -beeinflusst als in Hamburg. Gleichzeitig hat sich der Tideeinfluß von See - einschl. elbespezifischer Veränderungen - verstärkt, so daß eine einfache Normierung der Differenzen zu Cuxhaven nicht möglich ist. In erster Näherung wird daher aus den Werten für Hamburg abgeleitet:

Tab. 31: Wasserstandsänderungen bei Zollenspieker und Erklärungen für die Ursachen

Komplex	Differenzen in dm von 51/55 auf 91/95			
	MThw	MTnw	MThb	HThw
- Meßwerte 91/95 minus 51/55	+ 5	- 5,5	+ 10,5	+ 5,5
- Zollenspieker relativ zu Cuxhaven	+ 3,5	- 5	+ 8,5	+ 6,5
- Um Nordsee- und Q_0 - Einflüsse bereinigte Veränderungen (Abschätzung über Hmb.)	+ 2,5	< - 7	< + 9,5	
Erklärungen:				
- dem Flußregime von See bis Hmb. entzogene Baggermengen			< + 5	
- Abnahme wasserseitiger Hafenflächen in Hamburg			< + 0,5	
- Querschnittserweiterungen von See bis Hamburg	+ 2	< - 4	< + 6	+ 1,5
- Veränderungen der Randgebiete		< - 0,5	< + 0,5	
- Wirkung aller Baumaßnahmen außerhalb der Fahrrinne einschl. Wehr Geesthacht				1 bis 9 i.M. + 6
- hydrologischer Nachlauf	< + 0,5	< - 0,5	+ 0,5	
- natürl. Veränderungen in der unteren Unterelbe ab 1992		< - 1	< + 1	

Das erlaubt folgende Schlußfolgerungen:

- Die im Regime erzeugte MThw-Erhöhung von 3,5 dm ist zu 2,5 dm belegt;
- die entsprechende MTnw-Erniedrigung von 5 dm ist mit den verfügbaren Analysen nur weich belegbar; das gilt auch für die MThb-Vergrößerung;
- mit Sicherheit hat die Vertiefung der oberen Tideelbe um 1 bis 1,5 m im Betrachtungszeitraum Einfluß in Form von Thw-Anstieg und Tnw-Abfall; dagegen treten andere, bei Hamburg relevante Entwicklungen zurück;
- die HThw-Anstiege sind erklärbar, mit dem unter Hamburg gen. Hinweis.

Stadersand

Wegen fehlender Daten können Wirkungen nach Kap. 4.1.1 nicht bestimmt werden (dies gilt auch für Brunsbüttel). Die Veränderungen am Pegel stellen sich wie folgt dar:

Zeitraum	MThw cm NN - 5 m	MTnw cm NN - 5 m	MThb cm	HThw cm NN - 5 m
1951/55	647	391	256	852
1991/95	675	371	304	872
Differenz	+ 3 dm	- 2 dm	+ 5 dm	+ 2 dm

Damit änderten sich MThb und HThw um halb so große Beträge wie in Hamburg. Interpretationsmöglichkeiten sind:

Tab. 32: Wasserstandsänderungen bei Stadersand und Erklärungen für die Ursachen

Komplex	Differenzen in dm von 51/55 auf 91/95			
	MThw	MTnw	MThb	HThw
- Meßwerte 91/95 minus 51/55	+ 3	- 2	+ 5	+ 2
- Stadersand relativ zu Cuxhaven	+ 1,5	- 2	+ 3	+ 3
- Um Nordsee- und Q_0 - Einflüsse bereinigte Veränderungen (SIEFERT, 1992)	+ 1,5	- 2	+ 3,5	
Erklärungen:*				
- Querschnittserweiterungen bis etwa 1980	+ 1	(- 2)	(+ 3)	+ 1
- Wirkung aller Baumaßnahmen außerhalb der Fahrrinne einschl. Wehr Geesthacht				0 bis 4 i. M. + 2,5
- hydrologischer Nachlauf			(< + 0,5)	
- natürl. Veränderungen in der unteren Unterelbe ab 1992		(- 0,5)	(- 0,5)	

* Zahlen in Klammern sind gut abgesicherte Schätzungen.

Damit ist die Entwicklung in Stadersand sehr gut belegt.

Brunsbüttel

Die Veränderungen am Pegel Brunsbüttel sind so klein, daß sie mit den Ansätzen aus Kap. 4.1 bis 4.7 entweder gar nicht erfaßt werden können oder aber zu Null ermittelt wurden (siehe dort).

4.9 Wirkungen auf die Hydrologie der Nebenflüsse

SIEFERT u. JENSEN (1993) geben grobe Werte für die Auswirkungen von Tnw-Absenkungen in der Elbe auf die Entwicklungen in den Nebenflüssen an:

Tab. 33: MTnw-Absenkung in den Nebenflüssen der Tideelbe von den 50er bis in die 80er Jahre (in dm)

Nebenfluß	Δ MTnw an der Mündung	Δ MTnw rd. 5 km oberhalb der Mündung	Δ MTnw rd. 10 km oberhalb der Mündung
Ilmenau	2	1,5	1
Este	5	2	1
Lühe	2	1	0
Pinnau	1,5	0,5	0
Stör	0,5	0	0
Oste	0,5	0	0

Zur weiteren Erläuterung der Zusammenhänge Elbe-Nebenfluß zeigt Abb. 57 die Auswirkungen von Hoch- und Niedrigwasseränderungen von der Elbe in die Oste hinein. Hier sind die Differenzen der mittleren Niedrigwasser und Hochwasser der Jahre 1950 bis 1973 sowie 1979 bis 1994 in der unteren Oste dargestellt. Diese Zeiträume repräsentieren ungefähr die Jahre vor und nach dem KN – 13,5-m-Fahrrinnenausbau der Elbe. Es ist ersichtlich, daß das MTnw an der Ostemündung (wie übrigens auch in Cuxhaven) zwischen den genannten Zeiträumen um 5 cm abgesunken ist, was allerdings nicht (allein) auf den Fahrrinnenausbau zurückzuführen ist. Weiter stromauf ist diese Niedrigwasserabsenkung bereits nach wenigen Kilometern nicht mehr zu verzeichnen. Bereits am Pegel Belum, d. h. rund 4 km oberhalb der Mündung und somit noch vor dem Sperrwerk und der Hauptdeichlinie, ist die MTnw-Differenz gleich Null. Weiter stromauf ist dann das erwähnte Ansteigen der Niedrigwasserhöhen zu beobachten, das rund 5 cm ausmacht und bis über den Pegel Osten hinaus anhält. Es geht möglicherweise auf natürliche Verlandungen zurück.

Beim MThw stellen sich die Verhältnisse anders dar. Der im Bereich der Unterelbe zu verzeichnende Anstieg des Hochwassers um etwa 10 cm ist auch im Bereich des Pegels Belum noch im vollen Ausmaß zu beobachten. Erst vergleichsweise langsam klingt die Hochwassererhöhung stromauf ab. Am Pegel Oberndorf macht die Erhöhung des MThw allerdings nur noch 20 % (= 2 cm) vom Wert an der Mündung aus und bleibt im weiteren Verlauf konstant auf diesem Niveau. Es zeigt sich also, daß die externen Änderungen des mittleren Hochwassers im Gegensatz zum MTnw weiter in die Oste hinaufreichen. Die Wasserstandsdaten der unteren Oste aus den letzten 45 Jahren zeigen somit, daß hier im Hinblick auf längerfristige externe Veränderungen von mittleren Hoch- und Niedrigwasserständen folgende Verhältnisse vorliegen:

- Der unmittelbare Mündungsbereich der Oste, der etwa 4,5 km stromauf bis zum Sperrwerk reicht („Zone I“ in Abb. 57), wird in bezug auf die mittel- bis langfristigen Veränderungen der Wasserstandsverhältnisse klar von der Elbe dominiert. Dies gilt insbesondere für das MThw, während Änderungen des MTnw aus der Elbe bereits wenige Kilometer stromauf von der Mündung kaum mehr erkennbar sind.
- „Zone II“, die sich vom Sperrwerk bis etwa 15 km stromauf erstreckt, kann hinsichtlich des Einflusses der Elbe als „Übergangszone“ bezeichnet werden. Während sich ein stromauf abschwächender Einfluß der Elbe auf das MThw verzeichnen läßt, wird das Niedrigwasser bereits in diesem Flußabschnitt im wesentlichen durch die topographischen und hydrologischen Bedingungen der Oste bestimmt.
- In „Zone III“, die sich stromauf an die Übergangszone anschließt und etwa 15 km stromauf beginnt, werden langfristige Wasserstandsveränderungen in erster Linie durch die Oste bestimmt. Ein externer Einfluß der Elbe ist in diesem Bereich nicht mehr meßbar, weshalb hier (also noch unterhalb von Oberndorf) der Wirkungswechsellpunkt definiert werden kann (siehe dazu auch Kap. 3.5.9).

Ein interessantes Detail ist in diesem Zusammenhang erwähnenswert. An den Pegeln Oberndorf und Osten ist ungefähr ab 1969 ein Absinken der mittleren Hochwasserhöhen im Vergleich zu den übrigen Pegeln zu beobachten. Diese Gegebenheit ist auf den Bau des Sturmflutsperrwerks im Jahr 1968 zurückzuführen. Durch die Schließung des Sperrwerks bei Sturmfluten werden die Hochwasserhöhen an den stromauf liegenden Pegeln „gekappt“, was sich in den niedrigeren Jahresmitteln des Hochwassers niederschlägt. Am Pegel Belum, der nur wenige hundert Meter vor dem Sperrwerk liegt, ist diese Tendenz dementsprechend nicht zu beobachten.

Als Ergänzung ist auf Abb. 58 die Änderung des Energieeintrags von 1950 bis 1990 anhand der Änderung des Tidehubes für alle Nebenflüsse dargestellt. Klammert man die un-

MThw- und MThw-Differenzen 1950/73 gegen 1979/94 in der unteren Oste

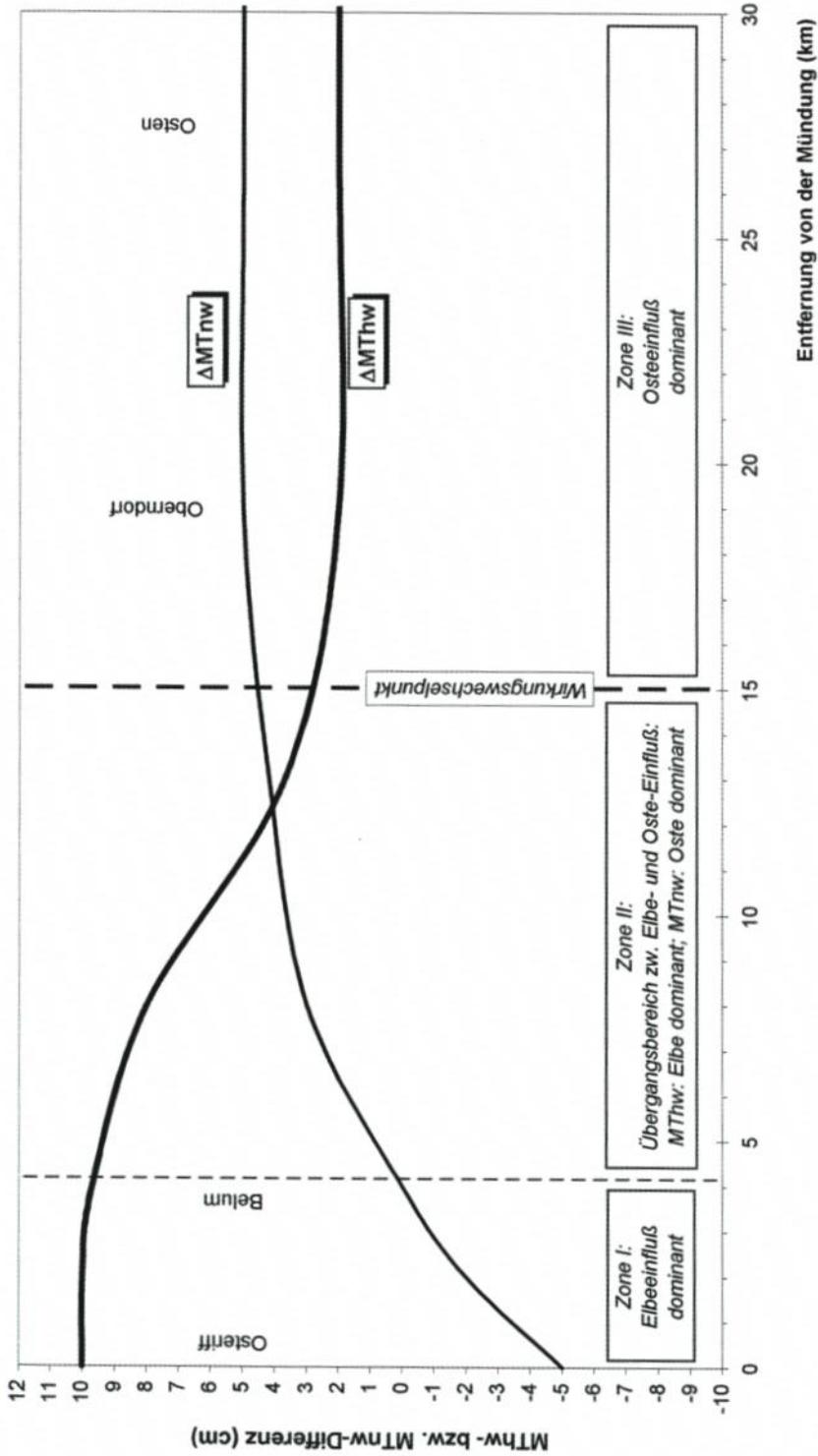


Abb. 57

MThb-Änderungen in den Nebenflüssen von etwa 1950 bis etwa 1990 mit Angabe der Wirkungswechsellpunkte (⊙)

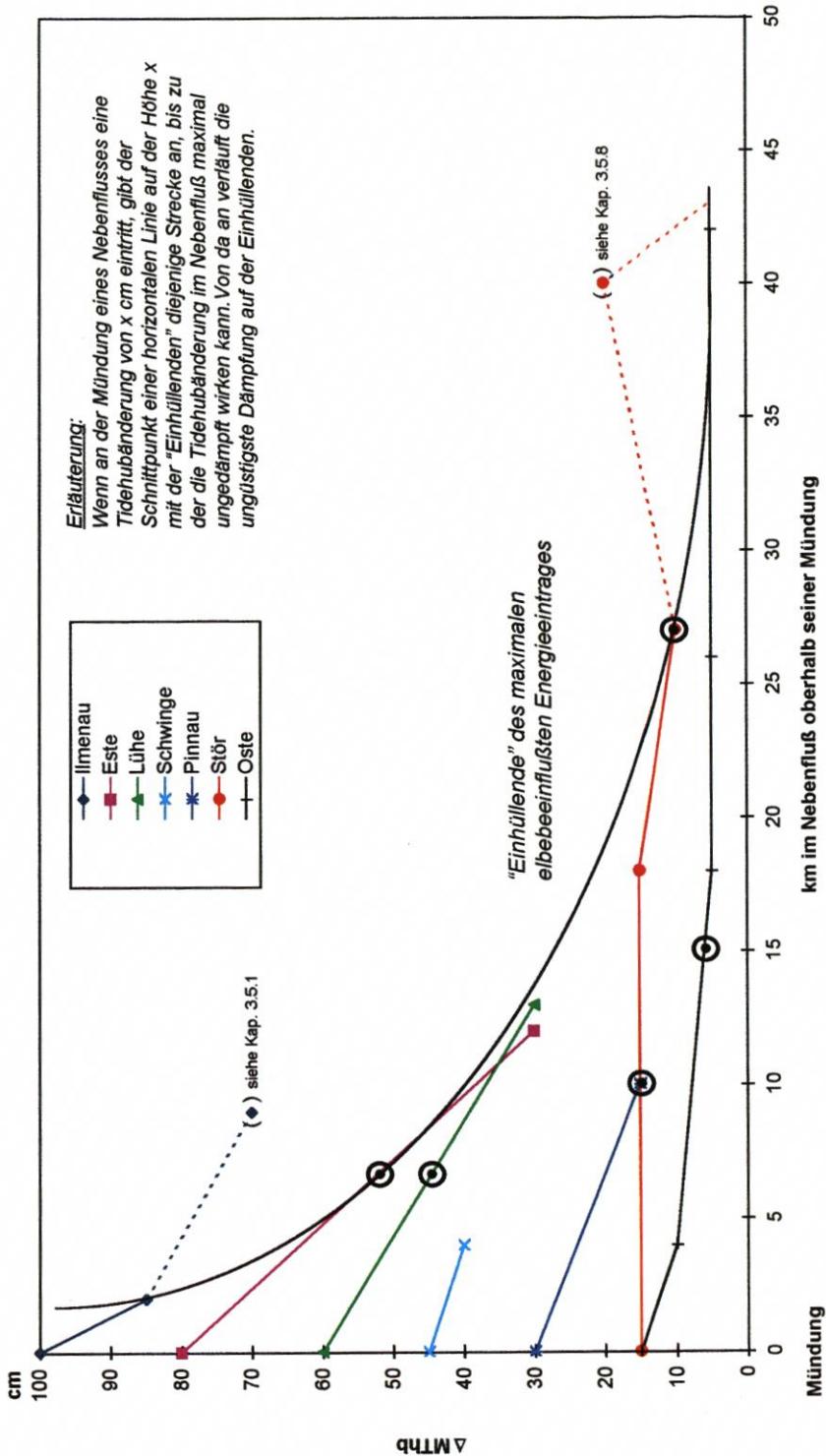


Abb. 58

terschiedlichen Oberwasser- und Gefälleverhältnisse der Nebenflüsse aus, geht daraus zum einen hervor, daß die Abnahme des Tidehubs besonders stark ist, wenn die Änderung an der Mündung sehr groß ist. Dies ist Folge der beschränkten Querschnitte in den Nebenflüssen, die sich nicht entsprechend dem neuen Energieangebot aufweiten, sondern den Energiefluß durch ihre Rauheit begrenzen. Besonders deutlich wird dies bei der Ilmenau, der Este sowie der Lühe. Andererseits können, was die Beispiele Stör und Oste zeigen, *kleine* Tidehubänderungen an der Mündung weit in die Nebenflüsse vordringen, wobei auf den ersten 30 km durchaus keine Dämpfung vorhanden sein muß. Es bietet sich zur Verdeutlichung der Verhältnisse daher an, auf Abb. 58 eine „Einhüllende“ zu skizzieren, die folgende Aussage erlaubt: Wenn eine Thb-Änderung „X“ an der Nebenflußmündung auftritt – durch anthropogene Maßnahmen oder natürliche Einflüsse –, markiert der Schnittpunkt der Horizontalen durch „x“ mit der Einhüllenden die Länge, auf der im Nebenfluß längstens keine Dämpfung auftritt. Von da an werden die Wasserstandsänderungen mindestens entsprechend dem Verlauf der Einhüllenden gemindert, und zwar zunächst diejenigen der Tideniedrigwasser.

Von besonderer Bedeutung, das hat die Diskussion der Wasserstandsentwicklungen in den einzelnen Nebenflüssen gezeigt, ist die hydrologische Entwicklung zwischen 1970 und 1980, weil in dieser Zeit die Unterelbe auf KN – 13,5 m ausgebaut wurde und darüber hinaus große Mengen Sand für den Bau neuer Deiche aus der Elbe entnommen wurden. Tab. 34 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die Entwicklung der Wasserstände in den 70er Jahren:

Tab. 34: Veränderungen von Thw und Tnw zwischen 1970 und 1980 in der Elbe und den Nebenflüssen

Fluß	Pegel	km oberhalb der Nebenflußmündung	Δ Thw (cm)	Δ Tnw (cm)
Elbe	Zollenspieker	–	+ 20	– 20
Ilmenau	Fahrenholz	9,7	+ 15	– 20
Elbe	Cranz	–	+ 25	– 40
Este	Buxtehude	12	+ 20	– 10
Elbe	Lühort	–	+ 25	– 25
Lühe	Horneburg	12,5	+ 20	0
Elbe	Grauerort	–	+ 20	– 15
Pinnau	Neuendeich	3,7	(+ 15)	– 10
	Uetersen	9,7	+ 10	0
Elbe	Kollmar	–	+ 15	– 10
Krückau	Elmshorn	11,5	+ 15	–
Elbe	Brokdorf	–	+ 10	– 10
Stör	Kasenort	17,9	+ 5	– 5
	Itzehoe	26,8	+ 5	0
	Breitenburg	39,5	+ 10	0
	Grönhude	46,3	+ 15	+ 20
	Rensing	51,4	(+ 20)	(+ 25)
Elbe	Osteriff	–	+ 5	– 5
Oste	Belum	3,5	+ 5	0
	Oberndorf	17,7	0	+ 5
	Osten	25,8	0	+ 5
	Hechthausen	42,3	0	+ 5
	Niederochtenhausen	62,6	+ 5	0
	Bremervörde	72,8	+ 5	0

Wegen mangelhafter Daten unsichere Werte sind eingeklammert.

Ein anderer Gesichtspunkt ist die binnenseitige Wirkung möglicher längerer Schließdauern bei in der Elbe höher und länger auflaufenden Sturmfluten. Dabei ist folgendes zu bedenken:

- Sturmfluten müssen als Einzelereignisse betrachtet werden;
- durch die Veränderungen in der Elbe wurden – wenn überhaupt – die Überschreitungsdauern nur im Scheitelbereich verlängert; dies ist nur dann wirksam, wenn die Höhe der Flut den Schließhorizont des Sperrwerkes um nicht mehr als 0,5 m überschreitet, wie auf Abb. 5 analog für eine mittlere Tide erläutert wurde;
Beispiel Estesperwerk: Schließhorizont: 2,8 m NN
Sturmfluthöhe: 3,3 m NN
Eintrittswahrscheinlichkeit analog zu Abb. 3: 0,5 T./J. für 2,8 m NN und
0,15 T./J. für 3,3 m NN
mittlere Überschreitungsdauern entspr. Abb. 5: Null für Scheitelhöhe 2,8 m und 2:40 h für Scheitelhöhe 3,3 m NN. Daraus geht hervor, daß nur die *k u r z e n* Schließdauern um einige Minuten verlängert werden.
- Wenn die Sturmfluten höher aufliefen (an der Este geschieht das bei gut 20 Tiden/Jahr), änderten sich die Schließdauern *n i c h t*!
- Einziger kritischer Fall könnte sein, wenn bei Kettensturmfluten, d. h. 2 bis 3 Fluten hintereinander, die Tore auch bei Niedrigwasser geschlossen bleiben müßten; dagegen spricht jedoch eindeutig der Trend, daß die *T_{nw}* (auch die hohen!) *n i e d r i g e r* geworden sind.

5. Verhältnisse 1991/97

Die wichtigsten Parameter für das aktuelle Fünfjahresmittel 1993/97 sind auf Tab. 35 zusammengestellt. Abb. 59 zeigt die *M_{Thw}* und *M_{Tnw}* im Längsschnitt. Wie es zu diesem Zustand mit steigenden *M_{Thw}* etwa ab km 680 und fast gleich hohen *M_{Tnw}* von See bis km 620 kam, lassen Abb. 60 und 61 erkennen. Abschließend sind die mittleren Tidekurven 1991/95 für die fünf ausgewählten Stützpegel auf Abb. 62 dargestellt. Daraus lassen sich leicht die Gefälleverhältnisse in der heutigen Tideelbe erkennen: Um *T_{nw,CUX}* herrscht Ebbe mit einem Wasserspiegelgefälle von rd. 3 m auf 125 km. Zu *T_{hw,CUX}* ist überall Flut mit halb so starkem entgegengesetzten Gefälle. Dazwischen variieren Flut und Ebbe phasenweise über die Flußlänge.

Zu einer umfassenden Darstellung gehört selbstverständlich mehr. Deswegen sei auf die Beispiele in Kap. 2.3 verwiesen. Sie zeigen die ganze natürliche Variationsbreite der Tiden und sind in Diskussionen um Tideänderungen und deren Auswirkungen auf Umgebungsparemeter sehr hilfreich.

Wegen der bereits unter 2.1 und 2.2 angesprochenen Datenlage und Probleme kann keine generelle Übersicht über die Strömungsverhältnisse gegeben werden. Vielmehr wird dazu auf die sehr detaillierten Ergebnisse des Elbmodells der BAW verwiesen (BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, 1996), die auch über Internet abrufbar sind.

6. Danksagung

In der hier zusammengetragenen Fülle sind hydrologische Daten aus dem Elbegebiet noch nicht veröffentlicht worden. Daß dies möglich wurde, verdanke ich der freundlichen und engagierten Mithilfe vor allem der Kollegen aus den Wasser- und Schifffahrtsämtern

Tab. 35: Wasserstandsverhältnisse in der Tideelbe 1993/1997

Pegel	1993/97		1993/97		1993/97		1993/97		Eintrittszeit-Differenzen		1992/96	
	MThw	MTnw	HThw	NTnw	HHThw	NNTnw	TF	TE	zum nächsten Pegel	zu Cuxhaven	zum nächsten Pegel	zu Cuxhaven
	cm NN	cm NN	cm NN	cm NN	(seit Meßbeginn)	cm NN	h:m	h:m	h:m	h:m	h:m	h:m
UP Geesthacht	+ 275	+ 77	+ 654	- 81	+ 701	- 96	4:03	8:24	0:02	4:53	0:08	6:18
Altengamme	+ 270	+ 60	+ 649	- 89	+ 725	- 110	4:07	8:18	0:05	4:51	0:07	6:10
Elbstorf	aufgelassen	1976	**	**	+ 721	- 59	**	**	**	**	**	**
Drennhaus	+ 263	+ 43	+ 640	- 92	+ 640	- 112	4:12	8:13	0:16	4:46	0:27	6:03
Zollenspieker	+ 246	- 5	+ 627	- 131	+ 635	- 135	4:24	8:01	0:21	4:30	0:35	5:36
Over	+ 234	- 67	+ 615	- 200	+ 640	- 207	4:40	7:45	0:09	4:09	0:17	5:01
Bunthaus	+ 224	- 106	+ 611	- 246	+ 643	- 254	4:50	7:35	0:13	4:00	0:29	4:44
Harburg ++	+ 215	- 149	+ 608	- 310	+ 643	- 331	5:05	7:20	- 0:01	3:47	- 0:09	4:15
Schöpfstelle	+ 216	- 145	+ 602	- 338	+ 645	- 310	4:58	7:27	0:09	3:48	0:20	4:24
St. Pauli	+ 208	- 149	+ 602	- 338	+ 645	- 348	5:08	7:17	0:11	3:39	0:16	4:04
Seemannshöft	+ 201	- 145	+ 595	- 333	+ 639	- 345	5:14	7:12	0:10	3:28	0:15	3:48
UF Blankenese	+ 196	- 138	+ 590	- 325	+ 633	- 339	5:19	7:06	0:10	3:18	0:11	3:33
Schulau	+ 187	- 138	+ 576	- 326	+ 625	- 339	5:19	7:07	0:11	3:08	0:13	3:22
Lüthort	+ 184	- 135	+ 569	- 321	+ 621	- 335	5:21	7:04	0:17	2:57	0:18	3:09
Stadersand	+ 174	- 132	+ 553	- 323	+ 606	- 346	5:23	7:03	0:09	2:40	0:11	2:51
Grauerort	+ 170	- 131	+ 546	- 321	+ 601	- 351	5:24	7:01	0:11	2:31	0:15	2:40
Kollmar	+ 162	- 131	+ 533	- 319	+ 589	- 357	5:28	6:57	0:11	2:20	0:14	2:25
Glückstadt	+ 156	- 129	+ 517	- 321	+ 583	- 372	5:31	6:55	0:31	2:09	0:27	2:11
Brokdorf	+ 156	- 128	+ 507	- 326	+ 566	- 373	5:27	6:59	0:38	1:38	0:33	1:44
Brunsbüttel	+ 149	- 137	+ 479	- 326	+ 542	- 364	5:22	7:03	0:11	1:00	0:14	1:11
Osteriff	+ 151	- 141	+ 472	- 329	+ 544	- 366	5:26	6:59	0:25	0:49	0:35	0:57
Otterdorf	+ 149	- 146	+ 467	- 341	+ 542	- 371	5:35	6:50	0:24	0:24	0:22	0:22
Cuxhaven	+ 150	- 150	+ 449	- 344	+ 510	- 402	5:33	6:53	**	**	**	**
Gr. Vogelsand	+ 147	- 152	+ 415	- 331	+ 453	- 353	5:51	6:34	**	**	**	**

Die Eintrittszeit-Differenzen sind aus der Jahresreihe 1992/96. Die Angaben für 1993/97 liegen nicht vor.
++ Süderelbe

Längsschnitt des MThw (1993/97) und des MTnw (1993/97) in der Tideelbe

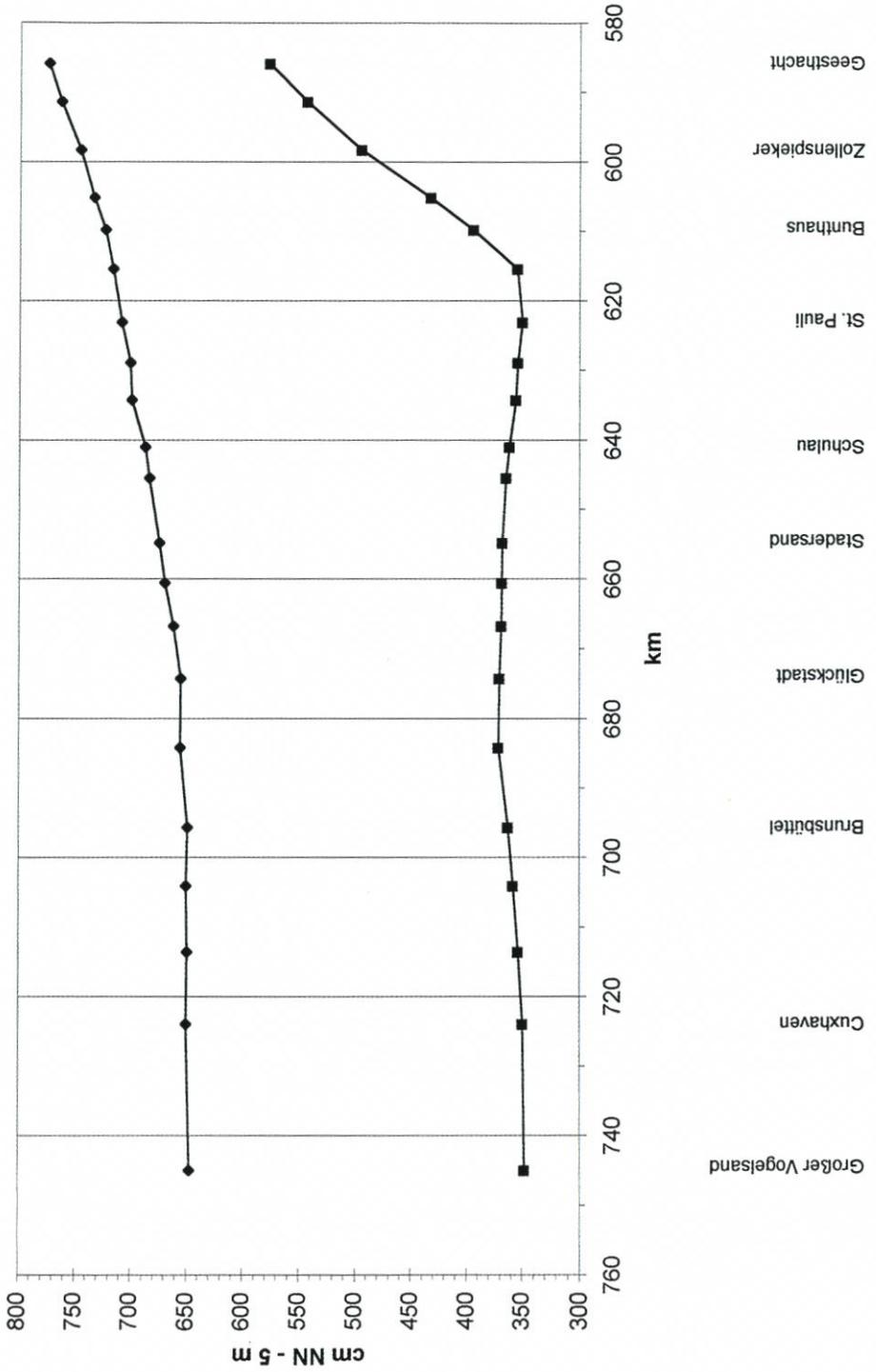


Abb. 59

Längsschnitt MThw Tideelbe

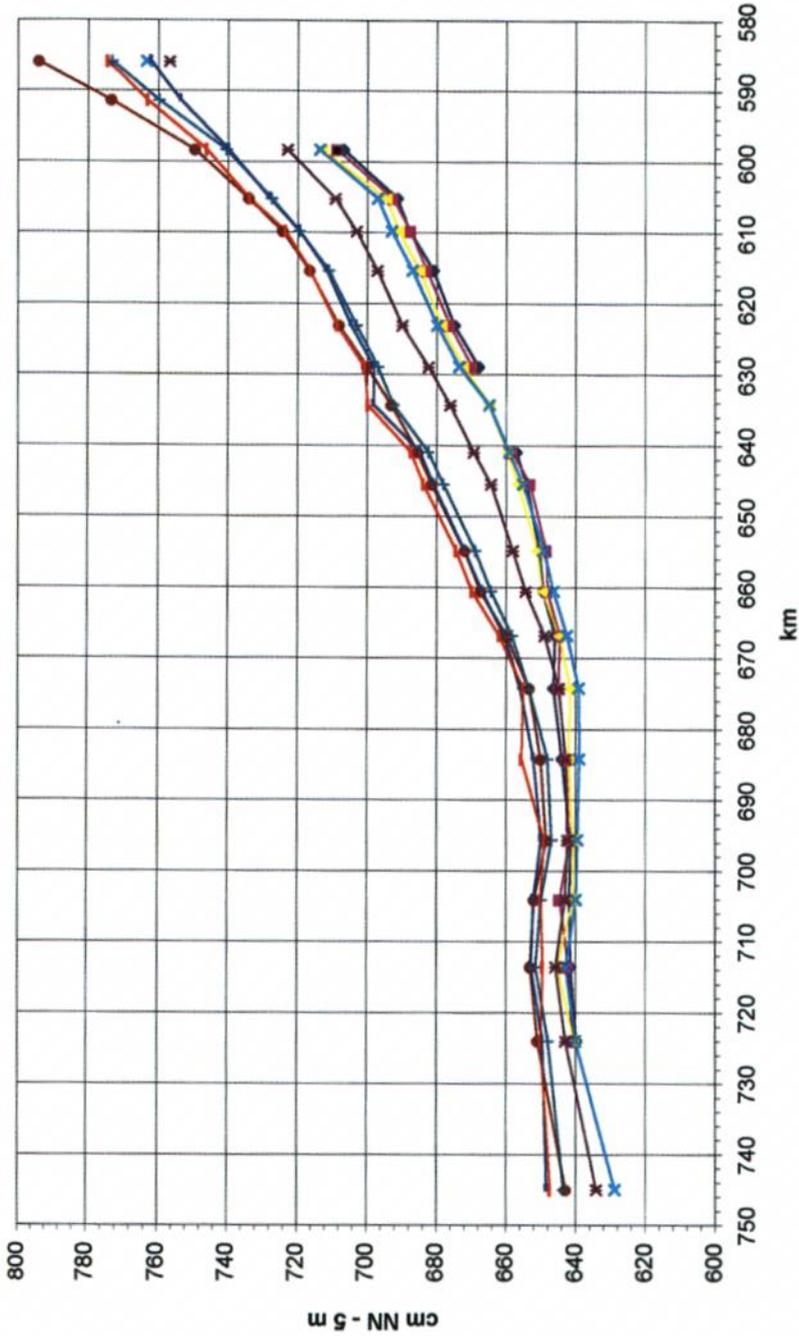


Abb. 60

Längsschnitt MTnw Tideelbe

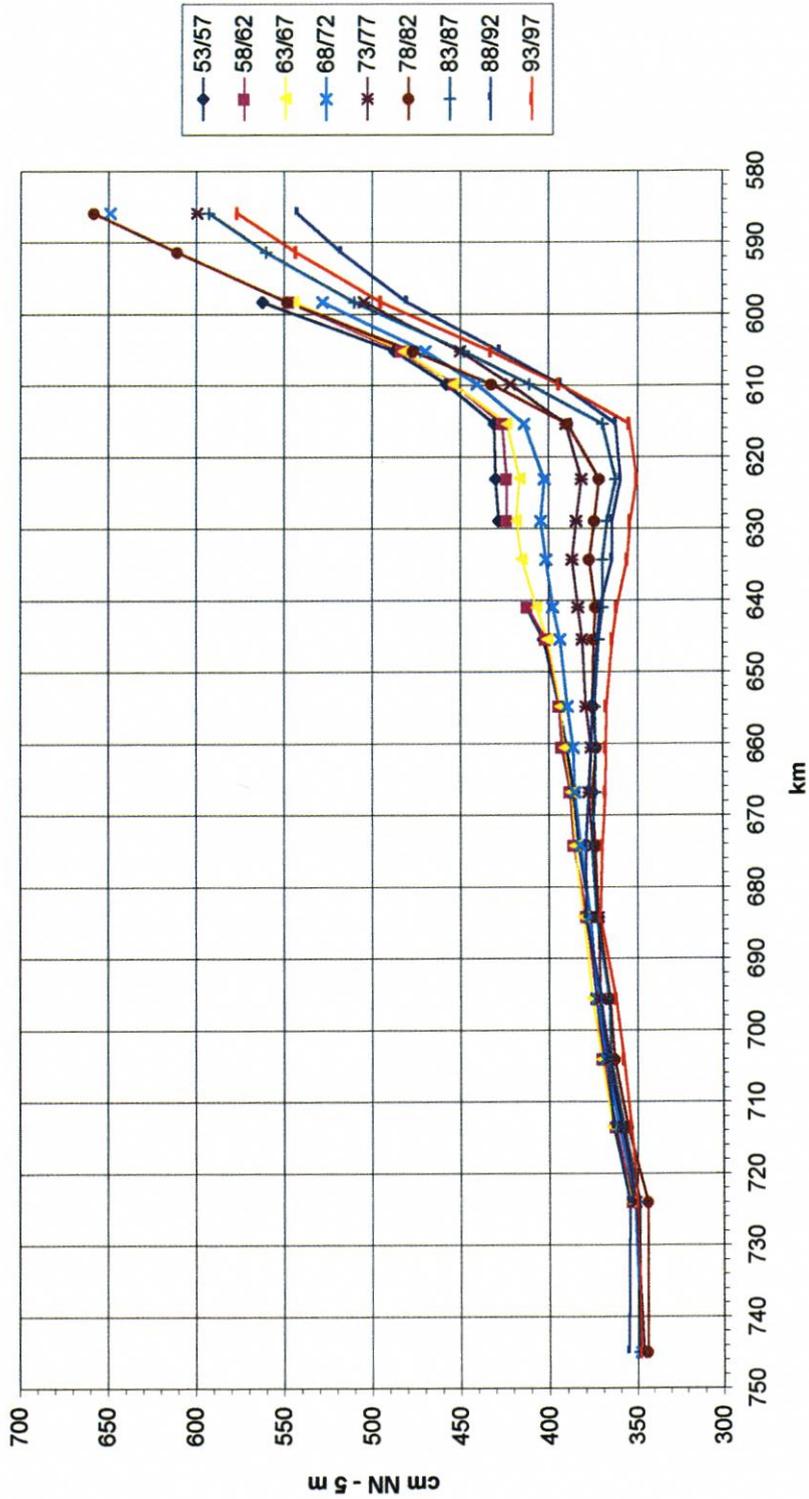


Abb. 61

Mittlere Tidekurven Elbe 1991/95

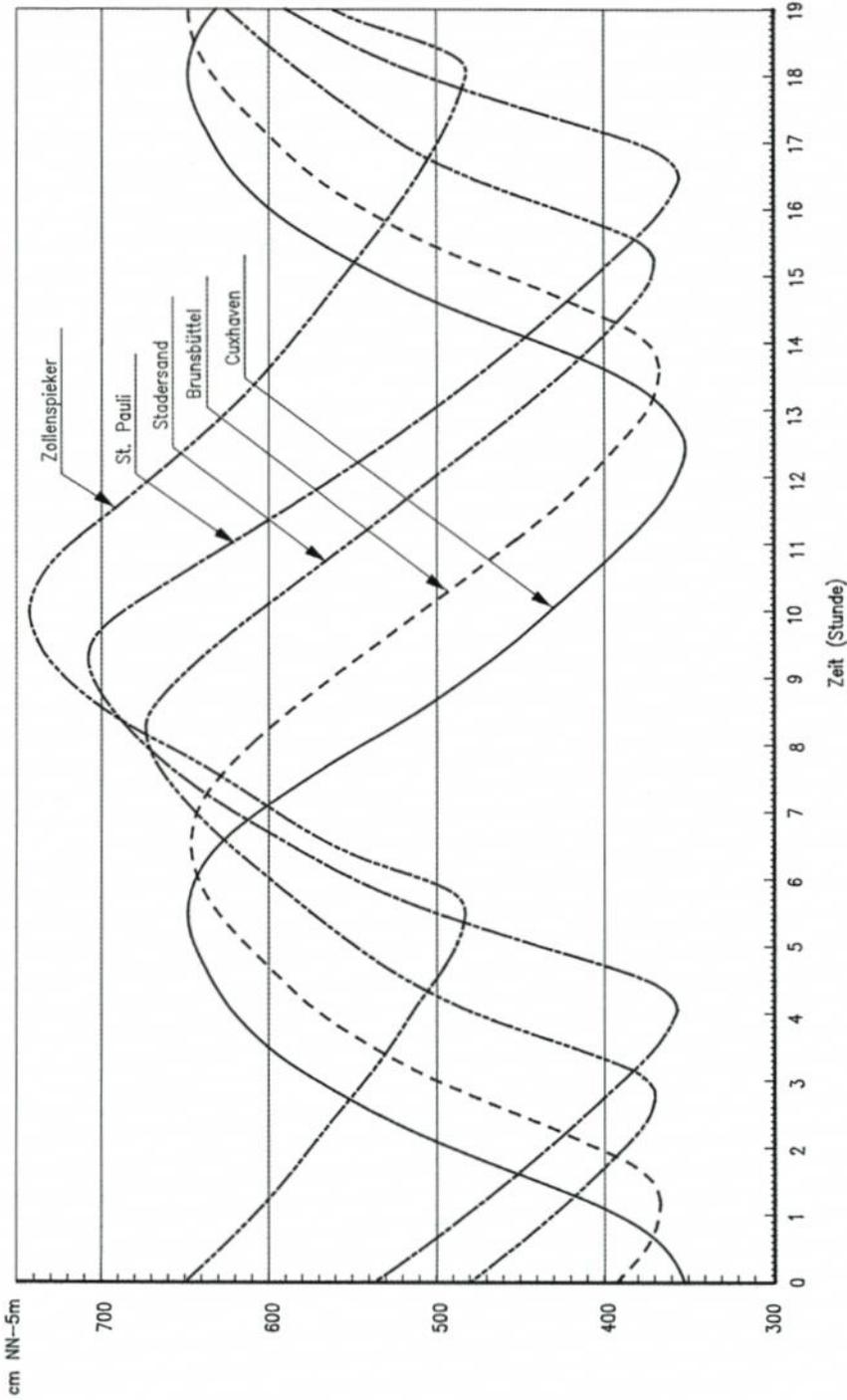


Abb. 62

Hamburg und Cuxhaven und natürlich meinen Mitarbeitern beim Strom- und Hafengebäudebau Hamburg. Insbesondere bedanke ich mich bei Dipl.-Geogr. ULRICH FERK, der mir viele Anregungen zur textlichen Gestaltung gegeben hat und für die meisten Abbildungen verantwortlich zeichnet.

7. Schriftenverzeichnis

- BAW/AK: Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe – Ausbaubedingte Änderung der Tidedynamik. Gutachten, 1996 (unveröffentlicht).
- BAW/AK: Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe – Ausbaubedingte Änderung in den Elbenebenflüssen. Gutachten, 1996 (unveröffentlicht).
- BAW/AK: Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe – Ermittlung und Bewertung ausbaubedingter Änderungen der Seegangsbelastung auf Ufer, Watten und Deiche. Gutachten, 1996 (unveröffentlicht).
- BERNHARD, M.: Die Entwicklung an der Fahrrinnensohle in Übertiefen der Unter- und Außenelbe anhand einiger ausgewählter Streckenabschnitte. Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg, Sachbereich Neubau, Studie Nr. 3. Hamburg, 1996 (unveröffentlicht).
- BERNHARD, M., HANSEN, R.-D. u. NEEMANN, V.: Die morphologische Entwicklung im Tide regime der Unter- und Außenelbe unter Berücksichtigung der Bodenentnahmen und -umlagerungen. WSA Hamburg, Studie Nr. 1, 1995 (unveröffentlicht).
- BUND-LÄNDER-AG BEWEISSICHERUNG: Strömungsmessungen in den Nebenelben. Arbeitsber., 1995? (unveröffentlicht).
- DÄN. HYDR. INST.: Hamburger Hafen. Tabellen der Hydrologie, Topographie und Sedimentbeförderung. Hørsholm, 1988 (unveröffentlicht).
- FERK, U.: Natürliche und anthropogen beeinflusste Entwicklung mittlerer Wasserstände in einem Tidefluß am Beispiel der Unterelbe. Vechtaer Studien zur Angewandten Geographie und Regionalwissenschaft (VSAG), Bd. 20, 1998, S. 71–81.
- FERK, U. et al.: Zur Entwicklung des Tideniedrigwassers 1993/94 in der Unterelbe. Strom- und Hafengebäudebau, Ref. Hydrologie, Studie Nr. 82 und WSA Hamburg, Studie Nr. 4, 1996 (unveröffentlicht).
- FÜHRBÖTER, A. u. PARTENSKY, H. W.: Untersuchungen über die Entwicklung der Tidewasserstände in der Elbe, Weser und Ems. Arbeitsber., 1982 (unveröffentlicht).
- GÖHREN, H.: Die Strömungsverhältnisse im Elbmündungsgebiet. Hamb. Küstenf., H. 6, 1969.
- HENSEN, W.: Stromregelungen, Hafengebäudebauten, Sturmfluten in der Elbe und ihr Einfluß auf den Tideablauf. Festschr. 30. Dt. Geographentag, Verl. F. Hirt, Kiel, 1955.
- HINRICHSSEN, A.: Der Einfluß des Oberwassers auf die Tideparameter der Elbe. Mitteilungen der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord. Kiel, 1991.
- KEIL, G.-W.: Die schrittweise Anpassung der Elbe an die Entwicklung des Seeschiffsverkehrs. Jb. der Hafengebäudebautechn. Ges., Bd. 40, 1985.
- LÄNDERARBEITSGR.: Bemessungswasserstände entlang der Elbe. Die Küste, H. 47, 1988.
- LASSEN, H. u. SIEFERT, W.: Mittlere Tidewasserstände in der südöstlichen Nordsee, säkularer Trend und Verhältnisse um 1980. Die Küste, H. 52, 1991.
- LASSEN, H., SIEFERT, W.: Zur Windstautentwicklung in der südöstlichen Nordsee. Die Küste, H. 53, 1992.
- NEEMANN, V.: Protokoll einer mittleren Tide der Elbe für das Jahr 1988. WSD Nord, Dez. für Gewässerkunde, Beitrag Nr. 4, 1992 (unveröffentlicht).
- NEEMANN, V.: Zusammenstellung bedeutender Baumaßnahmen in der Tideelbe. WSD Nord, Dez. für Gewässerkunde, Beitrag Nr. 9, 1993 (unveröffentlicht).
- NIEMEYER, H.: Ermittlung der Änderungen mittlerer Tidescheitel in der Tideelbe infolge des Ausbaus von Außen- und Unterelbe auf KN – 13,5 m. Forschungsstelle Küste, Beweissich. zum 13,5-m-Ausbau, Ber. Nr. 1, Kurzfass., 1994 (unveröffentlicht).
- ROHDE, H.: Eine Studie über die Entwicklung der Elbe als Schifffahrtsstraße. Mitt. des Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 36, 1971.
- SIEFERT, W.: Hydrologische Daten aus dem Tidegebiet der Elbe und ihrer Nebenflüsse. In: Hamburger Küstenforschung, H. 35/1976 (Gleichzeitig Mitt. Nr. 20 der WSD Nord, 1976).
- SIEFERT, W.: Über die Veränderung der Tidewasserstände in der Elbe als Folge der Fahrrinnen-

- vertiefungen. Strom- und Hafenanbau, Ref. Hydrologie, Studie Nr. 70, 1992 (unveröffentlicht).
- SIEFERT, W.: Das Sturmflutgeschehen in der Tideelbe und der Einfluß der Fahrrinnenvertiefung. Hansa, H. 9, 1994.
- SIEFERT, W.: Die Entwicklung des Hamburger Stromspaltungsgebietes der Elbe von 1950 bis 1994. Strom- und Hafenanbau, Ref. Hydrologie, Studie Nr. 76, 1995 (unveröffentlicht)*.
- SIEFERT, W.: Überlegungen zu den hydromechanischen Ergebnissen der BAW für eine Beurteilung von Wertänderungen. Strom- und Hafenanbau, Ref. Hydrologie, Studie Nr. 85, 1996 (unveröffentlicht).
- SIEFERT, W.: Wellenwirkung als Bestimmungsgröße für Bemessung. Sprechtag HTG, Hamburg, 1996.
- SIEFERT, W.: Die Tideverhältnisse in der Elbe von 1950 bis 1996, Strom- und Hafenanbau, Ref. Hydrologie, Studie Nr. 87, 1997 (unveröffentlicht).
- SIEFERT, W. u. FERK, U.: Der Tidebereich der Elbnebenflüsse – Entwicklung der Wasserstände von 1950 bis 1995. Strom- und Hafenanbau, Ref. Hydrologie, Studie Nr. 84, 1996 (unveröffentlicht).
- SIEFERT, W. u. HAVNØ, K.: Sturmflutuntersuchungen für die Elbe mit den mathematisch-hydraulischen Modellen des Dänischen Hydraulischen Instituts. Hamb. Küstenf., H. 46, 1989.
- SIEFERT, W. u. JENSEN, J.: Fahrrinnenvertiefung und Tidewasserstände in der Elbe. Hansa, H. 10, 1993.
- SIEFERT, W. u. LASSEN, H.: Entwicklung und Ablauf von Sturmfluten in Ems, Weser und Elbe. Die Küste, H. 44, 1986.
- STENGEL, T.: Änderungen der Tidedynamik in der Deutschen Bucht und Auswirkungen eines Meeresspiegelanstiegs. Ber. Inst. für Strömungsmech. der Univ. Hannover, Nr. 38, 1994.
- STENGEL, T. u. ZIELKE, W.: Der Einfluß eines Meeresspiegelanstiegs auf Gezeiten und Sturmfluten in der Deutschen Bucht. Die Küste, H. 56, 1994.
- STROM- UND HAFENBAU: Die Entwicklung des Hamburger Stromspaltungsgebietes der Elbe von 1950 bis 1994. Statusbericht, Dez. 1995.
- WASSER- UND SCHIFFFAHRTSAMT HAMBURG: 13,5-m-Elbeausbau. Erfahrungsbericht (Entwurf), 1992 (unveröffentlicht).

* Veröffentlicht als: Freie und Hansestadt Hamburg, Wirtschaftsbehörde, Strom- und Hafenanbau (Hrsg.) [1995]: Die Entwicklung des Hamburger Stromspaltungsgebietes der Elbe von 1950 bis 1994. Statusbericht. Hamburg, 1995.