

Querschwingungen in der Unterelbe – ein Beispiel für aktuelle Mäanderbildung in Tideflüssen?

Von H.-J. DAMMSCHNEIDER und Th. FELSHART

Zusammenfassung

Im Bereich von Tideflüssen mit Seeschifftiefe besitzt die Identifikation der natürlichen Mäanderfaktoren größte Bedeutung, denn ob eine gebaggerte Fahrwasserrinne sich der Hauptstromkomponente weitestgehend anpaßt oder vielleicht im Gegenteil eine solche schneidet, kann ebenso Einfluß auf die Wirtschaftlichkeit des Baggerbetriebes haben wie ein Verklappen von Baggergut im Verlauf einer „inneren“ Strömung.

In Annäherung an dieses Problem gelingt mit vorliegenden Ergebnissen einer quantitativen Kartenauswertung im Tidegebiet der Elbe zwischen Cuxhaven und Hamburg der eindeutige Nachweis zweier getrennt verlaufender Stromfäden. Beide mäandrieren gegenläufig mit einer stromauf abnehmenden Frequenz. Rezente Mäanderbildung scheint danach ein mehrdimensionaler Vorgang zu sein, der sich langfristig zwar in einem unmittelbar wahrnehmbaren „Stromstrich“ äußert, sich in der Betrachtung vor Ort jedoch in zwei getrennte „interne Schwingungen“ auflösen läßt.

Summary

A knowledge of the factors influencing the natural meandering of tidal rivers with deep shipping channels is of major importance in the context of maintenance dredging. Namely, the cost effectiveness of a dredging operation can vary significantly depending on whether the current flows along or cuts the shipping channel. This can have a similar effect to dumping the spoil material in an "internal current".

Two separate dominant path lines in the Elbe tidal region between Cuxhaven and Hamburg have been clearly detected based on a quantitative analysis of the associated charts. They meander in opposite directions with a frequency decreasing in the upstream direction. Recent meandering seems to be a multi-dimensional process resulting, in the long term, in one apparent flow path which can, however, locally be resolved into two separate internal oscillations.

Inhalt

1. Einleitung	102
2. Problemstellung	102
3. Mäanderformung	103
3.1 Der Stromstrich	103
3.2 Der Stromfaden	108
3.2.1 Ermittlungsmethode	108
3.2.2 Die interne Schwingung	108
3.3 Aktuelle Wirkung von „Stromstrich“ und „Stromfaden“	111
4. Fazit	112
5. Schriftenverzeichnis	114

1. Einleitung

Mäander als äußeres Abbild innerer Strömungsdifferenzierungen eines Fließwasserkörpers besitzen überragende Bedeutung für die Kennzeichnung der aktuellen Morphodynamik des Gerinnes, sei es, daß dadurch Zonen besonders ausgeprägter Erosionsvorgänge angezeigt werden (Prallhangbereiche), sei es, daß Gebiete mit potentiell Akkumulationstrend zu charakterisieren sind (Gleithangbereiche).

Über die interne Strömungsverteilung besteht dabei in Flußschwingen mit richtungskonstantem Abfluß überwiegend Klarheit. Für alternierende (Tide-)Gewässer jedoch ist die Differenzierung in morphologisch prägende Hauptströmungskomponenten so gut wie unbekannt: „Exakte Angaben für derartige Probleme lassen sich theoretisch kaum machen“ (GIESE, TEICHERT und VOLLMERS, 1972, S. 15).

Dabei wäre gerade im Bereich von Tideflüssen mit Seeschifftiefe die Beantwortung dieser Frage von immenser Bedeutung, denn ob eine gebaggerte Fahrwasserrinne sich der Hauptstromkomponente weitestgehend anpaßt oder vielleicht im Gegenteil eine solche schneidet, kann ebenso Einfluß auf die Wirtschaftlichkeit des Baggerbetriebes haben wie ein Verklappen von Baggergut im Verlauf einer „inneren“ Strömung; letzteres hätte im ungünstigsten Fall einen Rücktrieb des Materials in Fahrwasserbereiche zur Folge!

In diesem Sinne wurde von den Verfassern der Versuch unternommen, im Bereich der Unterelbe (km 640–724, Schulau bis Cuxhaven) mittels einer quantitativen Kartenauswertung der Lösung dieser Problematik näherzukommen.

2. Problemstellung

Die Mäanderbildung in Tieflandflüssen ist ein seit altersher bekanntes Phänomen (Mäander von „menderes“: Fluß in Kleinasien mit stark ausgeprägtem Schlingenlauf). Von geographischer Seite wurde dieser morphologischen Form große Beachtung geschenkt, so beispielsweise von EXNER (1925, 1931) oder KAUFMANN (1929). Dabei wurden auch die Ursachen solcher Formungsvorgänge näher beleuchtet, insbesondere von seiten des Wasserbaus (ZELLER, 1967). Für Tideflüsse nahm sich HENSEN (1939, 1942a) am Verlauf der Unterelbe dieser Problematik an. Seine Zielsetzung richtete sich vor allem auf die Konsequenzen für das wasserbauliche Versuchswesen, das zu jener Zeit bereits stark an Bedeutung gewann. Allerdings konnte keine Nachbildung der das Mäanderphänomen verursachenden Vorgänge (primär: Coriolis-Kraft = „Rechtsablenkung“ auf der Nordhalbkugel) in hydraulischen Modellen erreicht werden, auch wenn dazu BONNEFILLE und BRACONNOT (1966) später grundsätzliche Versuche an einem drehenden schematischen Modell ausführten.

„Die interessanten Ergebnisse dieser Versuche konnten jedoch nicht auf ein Großmodell übertragen werden. Im übrigen ist die Simulation des Corioliseffektes in nicht drehbaren Modellen mit beweglicher Sohle praktisch nicht möglich“ (GIESE, TEICHERT und VOLLMERS, 1972, S. 15).

Dies scheint aber auf den ersten Blick für kurz- bis mittelfristige Versuchszeitreihen auch nicht unbedingt notwendig zu sein, denn nach SCHULZ (1954) soll es sich beispielsweise bei den Elbmäandern ausschließlich um langfristig gebildete Formen handeln, die aktuell nur unwesentlich verändert werden.

Andererseits notiert HENSEN (1942b) in einer amtsinternen Mitteilung zu den seinerzeit anstehenden Versuchen im Modell mit fester Sohle (Preußische Versuchsanstalt für Wasser-, Erd- und Schiffbau Berlin, Prof. SEIFERT):

„Es ist . . . festzustellen, daß bei den für das Elbemodell vorliegenden Verhältnissen die Coriolis-Kraft sich zwar nicht auf die Tiefen auswirken kann, jedoch in hohem Maße auf die Strömungsrichtungen“ (HENSEN, 1942b, S. 3).

Dies hätte dann allerdings sehr wohl Konsequenzen für den Betrieb hydraulischer Modelle bzw. die Wirkung a k t u e l l e r Mäanderbildung. Darauf wird im folgenden einzugehen sein.

Zu einem weiteren, nicht unerheblichen Punkt wird die rezente Morphodynamik durch Baggerungen im Fahrwasserbereich sowie Verklappungen in den Flachwasser- bzw. Uferzonen verändert, so daß eine im strengen Sinne „natürliche“ Morphologie rezent gar nicht mehr existent ist. Es muß aber deutlich hervorgehoben werden, daß die wasserbaulich-anthropogene Einflußnahme keineswegs so tiefgreifend ist, wie verschiedentlich in der Öffentlichkeit behauptet wird. Sicher ist nämlich, daß trotz aller menschlichen Eingriffe keine „Kanalisierung“ der Unterelbe vorliegt – in der Zeit von 1972 bis 1979 steht im Bereich der WSA (Wasser- und Schiffsamt) Hamburg und Cuxhaven einer Gesamtbaggermenge von rd. 50 Mill. m³ ein natürlicher Materialumsatz von rd. 322 Mill. m³ gegenüber (Werte nach DAMMSCHNEIDER, 1983, Anhang 1–3, und FELSART, 1985, Anhang 2). Das heißt, daß nur 13,5 % des Materialumsatzes durch wasserbauliche Maßnahmen verursacht wurden.

Vorgreifend muß deshalb gesagt werden, daß der Formenschatz des Sohlenregimes der Unterelbe anders als durch „freie Morphodynamik“ nicht erklärt werden kann.

3. Mäanderformung

3.1 Der Stromstrich

Der Begriff „Stromstrich“ ist hier als Synonym für „Mäander“ zu verstehen. Eine Begriffstrennung wird notwendig, da eine über das bisher Bekannte hinausgehende Betrachtung der Schwingungsdynamik bzw. ihrer morphologischen Auswirkung erfolgen soll und der „Mäander“ damit in definierte Betrachtungseinheiten zerlegt werden muß.

Der sich über längere Zeiträume hin ausprägende „Stromstrich“ eines (Tide-)Flusses ist letztendlich das Ergebnis der Genese dieses Gerinnes. Für die heutige Form des Unterelberaumes beginnt die Entwicklungsgeschichte mit dem Rückzug des Weichseises bzw. dem Übergang vom Urstromtal zur perennierenden Laufbildung des Holozäns.

Die Formbildung unter wechselnden Einflüssen (Morphodynamik) ist in prähistorischer Zeit, d. h. vor Beginn des Deichbaus, besonders intensiv (vgl. JANETZKO, 1982 oder SIMON, 1965), setzt sich jedoch bis in die Jetztzeit aktiv fort. Genannt seien nur der säkulare Wasserspiegelanstieg und die in Abständen eintretenden schweren Sturmfluten, welche vor Beginn wasserbaulicher Stromregelungsmaßnahmen zu mehr oder weniger ausgeprägten Laufverschiebungen Anlaß gegeben haben.

Mit anderen Worten: Der „Langzeit“-Stromstrich (der „Mäander“) ist die Summe aller Formungsprozesse, die historisch und rezent wirksam wurden und werden. Wir stehen heute allerdings vor dem Problem, daß zwar diese Form beschrieben werden kann, ihre innere Dynamik jedoch, die die Genese ausmacht, nur unzureichend zu erklären ist.

Dabei weist bereits HENSEN (1939) auf die Wirkung der Coriolis-Kraft als Formungsfaktor der Elbmäander hin. Er kommt zu dem Ergebnis, daß aufgrund der Rechtsablenkung die Hauptstromkomponente stets dem jeweils rechten Ufer anliegt (Flut = südliches Elbufer; Ebbe = nördliches Elbufer). Daraus ergibt sich in der Strommitte eine Zone, in der die Strömungsgeschwindigkeiten geringer sind. Je nach Strombreite wird in dieser Zone die

Bildung von Sandbänken ermöglicht, die dann wiederum eine weitere Trennung des Stromverlaufes zur Folge haben können.

Die oben angeführte tendenzielle Trennung von Ebbe- und Flutstrom nach nördlichem bzw. südlichem Ufer gilt nach HENSEN (1939) so lange, bis die auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten im Verhältnis zum Krümmungsradius der Flußbögen relativ „zu groß“ werden. In diesem Fall kann dann die Rechtsablenkung nicht mehr im erforderlichen Maße wirksam werden, um die jeweilige Strömung am entsprechenden Ufer zu halten: Als Folge ist ein Ausschwenken der Strömung gegen das in der jeweiligen Strömungsrichtung links liegende Ufer zu beobachten.

Im Untersuchungsgebiet tritt dies bei km 730 (Mittelgrund) in Erscheinung, wo der Flutstrom vom rechten Ufer abweicht und hinter den Kratzsand (km 723) geführt wird (siehe Karte).

Durch wasserbauliche Maßnahmen im Bereich von km 706 bis km 690 (Buhnenbau) wurde der hier normalerweise am südlichen Elbufer verlaufende Flutstrom in Richtung Strommitte abgedrängt – ein erwünschter Beitrag zur Erhöhung der natürlichen Räumkraft im Fahrwasserbereich. Der Verlauf der Neufelder Rinne ist entsprechend durch die erodierende Tätigkeit des Ebbstroms zu erklären.

Als weitere Bereiche, in denen der Flut- bzw. der Ebbstrom durch die Coriolis-Kraft vom (idealisierten) Stromstrich der Elbe abgelenkt wird, sind zu nennen:

1. Flutstrom
 - Bereich des Kugelbaken-Fahrwassers
 - Bereich oberhalb des Böschrückens
 - Bereich der Brammerbank
 - Bereich oberhalb des Schwarztonnensandes.
2. Ebbstrom
 - Bereich zwischen Kollmar und Glückstadt
 - Bereich des Luechter Loches

Andere Autoren widmen ihre Aufmerksamkeit den morphologischen Erscheinungen innerhalb des Flußlaufes (Sandbänke etc.). SCHULZ (1954) kommt dabei zu dem bereits von HENSEN (1939) vorgezeichneten Ergebnis, daß durch die Rechtsablenkung infolge der Coriolis-Kraft Flut- und Ebbstrom getrennt werden und jeweils nur an einem Ufer erodierend tätig werden. Als Folge dieser jeweils einseitigen Erosion ist in der Strommitte eine Zone relativer Ruhe mit niedrigeren Strömungsgeschwindigkeiten zu beobachten, in der die Akkumulation von Material ermöglicht wird. Dies kann nach SCHULZ aktuell u. a. an der Entstehung und Verlagerung des Kratzsandes, des Medemgrundes und des Neufelder Sandes erkannt werden. Historisch lassen sich diese Vorgänge auch an den von GIESE (1971) angegebenen Entwicklungen im Bereich der Ostemündung nachvollziehen.

Die Versandung der stromaufwärtigen Mündung des Klotzenloches zwischen Medemsand und Neufelder Watt ist ebenfalls eine Folge der von SCHULZ (1954, S. 62 f.) definierten Prinzipien der Bettbildung in Tidegewässern, die im wesentlichen in Abhängigkeit vom unterschiedlichen Verlauf des primären Flut- und Ebbstroms zu sehen ist.

Im Sinne einer Erklärung der Elbmäanderformung bietet SIMON (1965) keine Hilfestellung. Er deutet die Genese des Unterelberaumes, ohne jedoch die rezente Form des Elberlaufes zu interpretieren. Im einzelnen treten in seiner Arbeit die gleichen Erkenntnisse zutage, wie sie von bereits genannten Autoren beschrieben wurden.

JANETZKO (1982, S. 94) erklärt die Mäanderbildung als „... in der Regel dann (wirkend), wenn bei einem bestimmten Zusammenspiel von Gefälle, Wassermenge und Sinkstoffbelastung im wesentlichen nur noch die Seitenerosion wirksam ist“. Er trennt den aktuellen

Verlauf des Fahrwassers in zwei Bereiche, und zwar zum einen in den sich an den weiten Uferbögen orientierenden Teil zwischen Cuxhaven und Freiburg/E., in dem die Mäanderbögen einen Radius von etwa 10 km aufweisen, und zum anderen in den stromaufwärts folgenden Bereich bis Hamburg, in dem die Mäander nur noch an den bogenförmigen Uferlinien zu erkennen sind und einen kürzeren Radius besitzen. Die Ursachen dafür sieht JANETZKO überwiegend in Strombegradigungsmaßnahmen (Fahrwasserausbau), welche dazu führten, daß die Fahrrinne nur noch selten in Ufernähe verläuft.

In diesem Bereich ist nach JANETZKO die Rekonstruktion von zusammenhängenden Elbmäandern nur noch aufgrund der zahlreichen Altarme möglich, wie z. B. die Wischhafener Süderelbe, die Krautsander Binnenelbe, die Pagensander Nebanelbe sowie die Haseldorfer Binnenelbe und die Lühesander Süderelbe. Weiter stromauf sind die Finkenwerder Süderelbe (Alte Süderelbe) sowie der Bogen der Süderelbe zwischen Harburg und Wilhelmsburg zu nennen. Unter Einbeziehung der Quartärgeologie schließt JANETZKO auf ein starkes Mäandrieren der Elbe während des Jungholozäns, das im heutigen Verlauf des Flusses nur noch vereinzelt erkennbar ist.

HALLIK (1962, S. 244) kommt aufgrund glazialgeologischer Befunde im Hamburger Raum (nördlicher Geesthang, Wittenbergener Ufer, km 640) zu der Vermutung, daß es „denkbar wäre . . ., daß erst die Strombauten der Mäanderentwicklung ein Ende gesetzt haben“. Er bezieht sich dabei auf eine Erosion bzw. Zurückverlegung des Geesthanges in postglazialer Zeit, die durch mesolithische Artefakte zu belegen ist.

Allerdings scheint den Verfassern die Schlußfolgerung HALLIKS nicht zwingend ein Ende der rezenten Mäanderbildung zu belegen, auch wenn natürlich durch Uferverbau (Steinpackungen etc.) die aktuelle Erosion des nördlichen Elbufers bei Schulau-Wittenberge im Bereich des mittleren Tidenhubs wesentlich reduziert ist. Sturmfluten jedoch erreichen nach wie vor den Fuß des Kliffs aus saalezeitlichem Geschiebemergel (nach GRUBE, 1962, S. 9) und bewirken eine Rückverlegung des Steilufers.

Bis auf HENSEN (1942a) beschränken sich alle genannten Autoren mehr oder weniger auf das äußere Bild des Unterelbelaufes. Eine schlüssige Antwort auf die geographische Grundfrage des „*Warum hier gerade so?*“ wird deshalb nicht erreicht.

Es erscheint den Verfassern wenig glaubhaft, daß das Phänomen der „Mäanderbildung“ rezent nicht mehr ablaufen soll. Zwar ist JANETZKO (1982) bzw. HALLIK (1962) zuzustimmen, wenn sie feststellen, daß eine sichtbare Stromverlegung (eine Verlegung des „Stromstrichs“) nicht mehr beobachtet werden kann, da Uferverbau (Buhnen, Steinpackungen etc.) dies verhindert. Andererseits ist sicher, daß es uns bisher nur unvollständig gelungen ist, die Prozesse aktueller Mäanderformung zu erkennen. Und diese Prozeßfaktoren sollten im Sinne der Regelkreisvorstellung (Kybernetik) heute ebenso oder zumindest ähnlich zusammenreten und sich in Wechselwirkung befinden wie vor Beginn der menschlich-wasserbaulichen Einflußnahme.

Theoretisch sollte es deshalb möglich sein, Formen aufzuzeigen, die zwischen

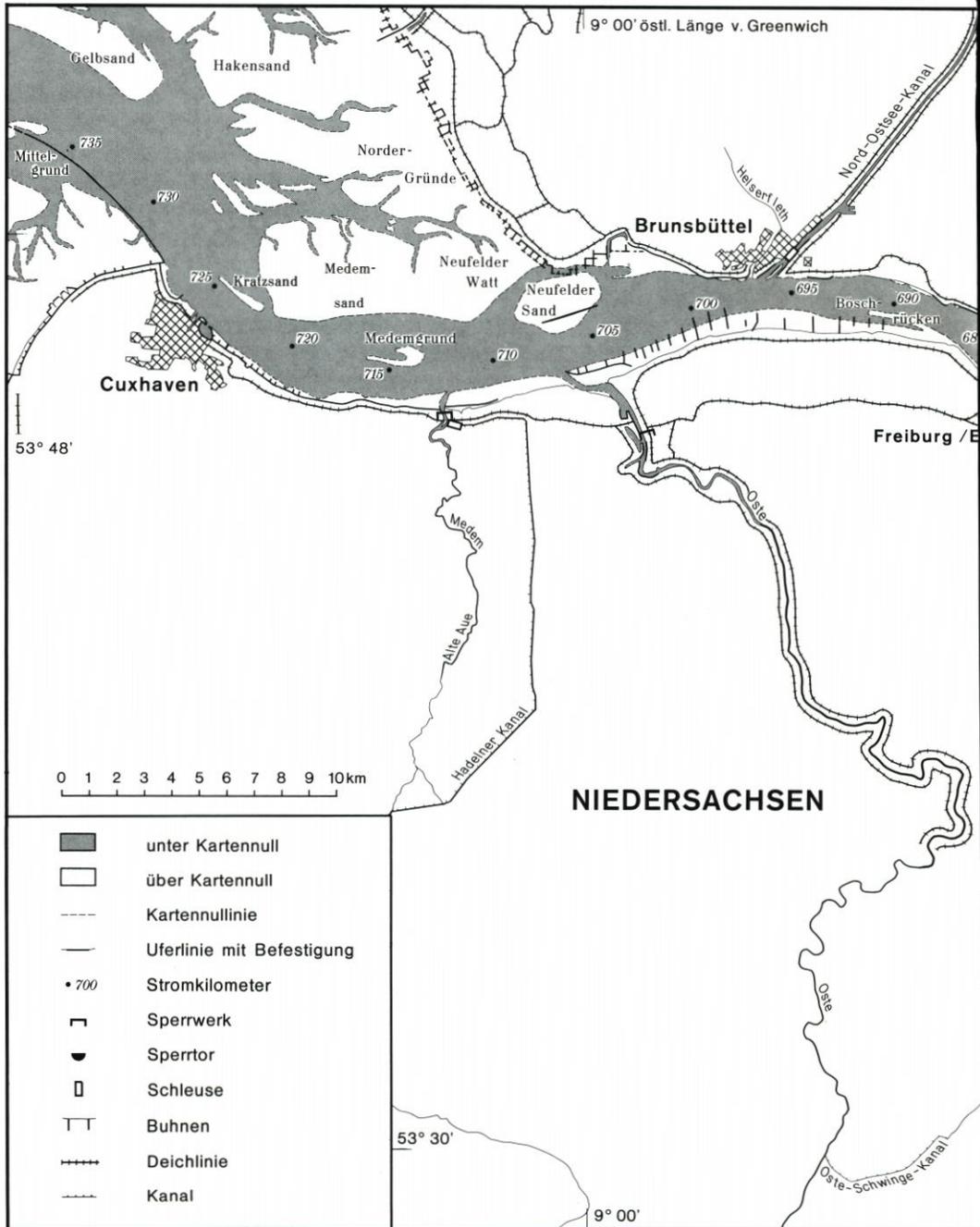
– „Langzeit“-Stromstrich bzw. „Mäander“

und

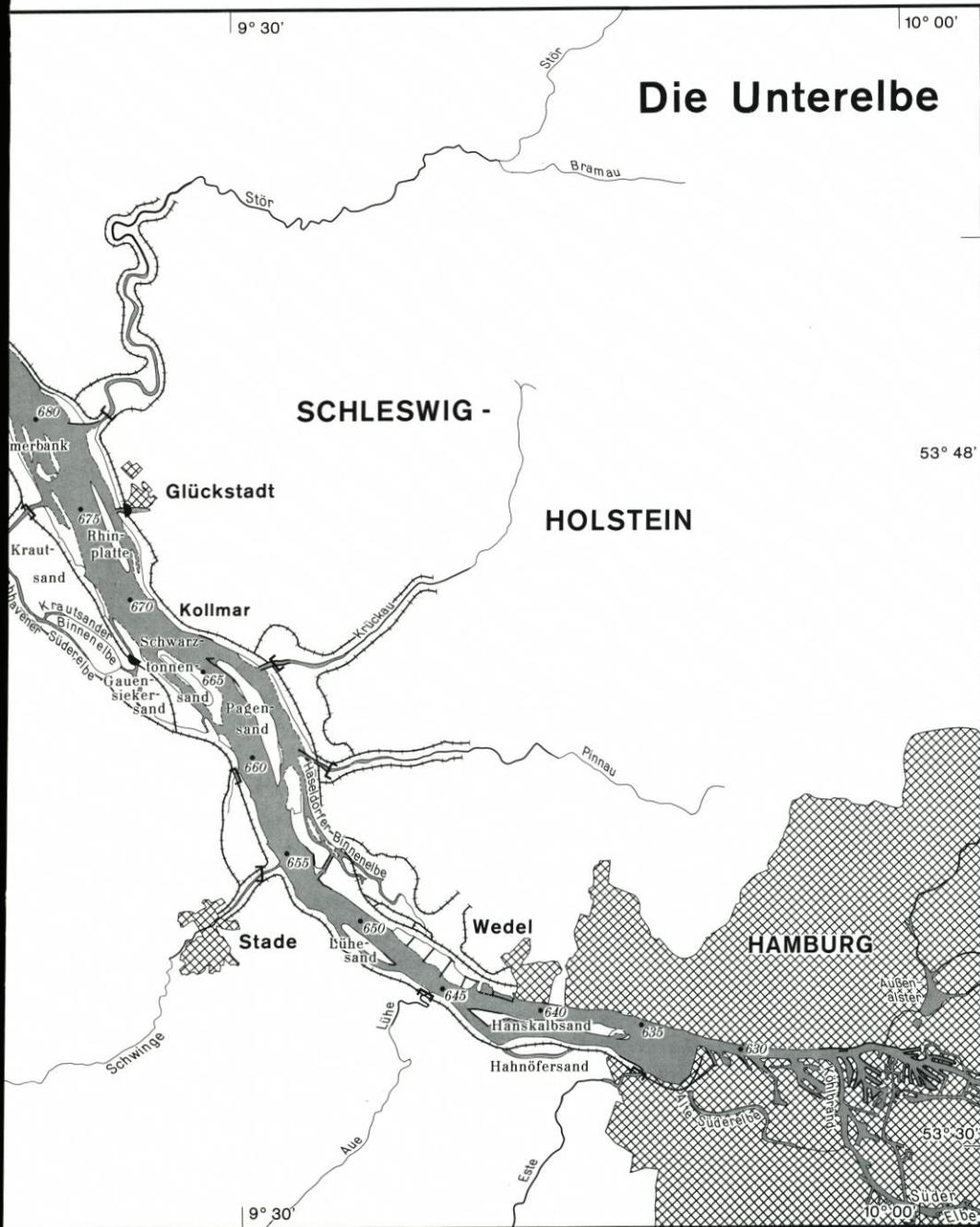
– rezenten, bisher nicht registrierbaren, kurzzeitig-periodisch wechselnden Formungsvorgängen (Strömungsdauer und -richtung der Tiden)

zu finden sein müßten und damit interne Schwingungsbilder darstellen.

Es ist deshalb als ein wesentlicher Fortschritt anzusehen, daß es hier gelungen ist, mittels quantitativer Kartenauswertung eine innere Differenzierung des Unterelbelaufes und damit des allgemeinen „Stromstrichs“ abzuleiten. Es könnte sich dabei um ein morphologisch nachweisbares Phänomen handeln, das die Großformen der Elbmäander prägt.



Kartengrundlage: Übersichtskarte 1: 250 000. Herausgeber: Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord, Kiel 1979



Entwurf: H.-J. Dammschneider. Kartographie: G. Braun

An dieser Stelle sei noch einmal daran erinnert, daß HENSEN (1942a) zwar die Formungskraft der Coriolis-Beschleunigung im Unterelberaum aufzeigte, jedoch der wechselnde Einfluß der Tiden über die Zeit ein nicht greif- und sichtbares Problem bleibt. Demgegenüber kann eine morphologisch nachweisbare und erfassbare innere Form nur das Produkt längerfristig wirksamer Kräfte, also die Summe aller im einzelnen immer wieder wechselnden Einflußgrößen sein!

3.2 Der Stromfaden

3.2.1 Ermittlungsmethode

Zur Erhebung der Daten wurden die Peilkartenjahrgänge der Jahre 1972, 1974, 1977 und 1979, herausgegeben vom WSA Hamburg im Maßstab 1 : 10 000 und vom WSA Cuxhaven im Maßstab 1 : 20 000, quantitativ analysiert. Dies bedeutet, daß mittels elektronischer Planimetrierung bzw. digitaler Bildverarbeitung über Rasterfelder das Raumvolumen zwischen sämtlichen Isobathenflächen und der Bezugsebene KN (Kartennull) ermittelt wurde. Daraus ergeben sich Massenangaben für regional differenzierte Elbabschnitte, deren kleinste Größe 400×1000 m beträgt (s. DAMMSCHNEIDER, 1983, S. 9). Die Genauigkeit des Verfahrens liegt im Rahmen einer Fehlermarge von $\pm 1\%$.

Ergänzend wurde versucht, Strömungsmessungen aus dem Untersuchungsgebiet zur Interpretation der inneren Morphodynamik hinzuzuziehen. Es muß jedoch gesagt werden, daß letztere Auswertungen sehr unbefriedigend verliefen. Obwohl sich natürlich Hinweise für die Praxis des Wasserbaus, so die Verteilung der Wassermengen in Haupt- und Nebelben oder die allgemeine Strömungsverteilung innerhalb eines Meßquerschnitts (s. auch KLEIN, 1960), ergaben, handelt es sich dabei aber immer nur um Momentaufnahmen. Diese können trotz großer Anzahl nicht repräsentativ für die Bewertung einer über Jahrzehnte bzw. Jahrhunderte sich einstellenden Großform „Mäander“ sein.

Man muß berücksichtigen, daß es sich zwar um die Aufzeichnungen vieler Jahre aus verschiedenen Querschnitten handelt, gleichzeitig jedoch nur um begrenzt verwendbare Daten. Dies ist so zu verstehen, daß alle Strömungsaufzeichnungen nur für einen Zeitpunkt und einen Ort gelten. Aus diesem Grund sind sie in dem sogenannten „offenen System“ der Unterelbe zwangsläufig nur unzureichend aussagefähig, insbesondere für ein so komplexes Wirkungsgefüge, wie es die „inneren Schwingungen“ doch sein müssen.

Selbstkritisch betrachtet ist es aber vielleicht auch nur so, daß es uns aus dem jetzigen Kenntnisstand heraus noch nicht gelingt, die feinen Differenzierungen im Strömungsmuster wahrzunehmen. Dieses Problem gilt ganz gewiß für alle küstenmorphologischen Fragestellungen. Man sollte aber nicht aufgeben, mit Einzelinformationen, wie sie die Strömungsmessungen nun einmal sind, zu arbeiten, um letztendlich, und sei es nur für zukünftige Forschungen, aus einem Indiziengeflecht heraus vielleicht zu neuen Erkenntnissen im „Coastal Engineering“ zu gelangen.

In der vorliegenden Untersuchung jedoch bringen die Strömungsdaten derzeit leider keinen Erkenntnisfortschritt, so daß auf eine weitere Darstellung zunächst verzichtet werden muß.

3.2.2 Die interne Schwingung

Abb. 1 gibt die Ergebnisse der Tiefenerrechnung mittels Flächenauswertung wieder. Es handelt sich dabei um eine tabellarische Wiedergabe des Streckenverlaufs der Unterelbe, unterteilt nach Längsprofilzonen und Kilometerabschnitten. Aufgetragen sind die gemittelten

km	Feldbereich															
	Los	Loa	Loz	Lo1	F	Ro1	Ro2	Ro3	Ro4	Ro5	Ro6	Ro7	Ro8	Ro9	Ro10	Ro11
724	-	-	-	-	200	206	188	70	36	10	10	16	24	11	10	-
723	-	-	-	44	189	224	153	63	40	10	12	20	10	-	-	-
722	-	-	-	42	224	226	125	71	62	33	10	10	-	-	-	-
721	-	-	-	23	200	210	145	85	70	65	44	26	-	-	-	-
720	-	-	-	22	144	170	100	95	85	70	75	46	-	-	-	-
719.1	-	-	-	-	63	158	104	56	88	-	-	-	-	-	-	-
719	-	-	-	10	73	145	108	67	80	73	61	86	60	10	-	-
718	-	-	-	12	88	130	106	58	47	65	55	80	84	10	-	-
717	-	-	-	11	71	136	110	56	39	43	60	55	06	62	-	-
716	-	-	-	10	64	135	123	55	28	25	53	68	82	68	-	-
715	-	-	-	-	66	136	116	49	18	20	44	72	85	69	-	-
714	-	-	-	-	78	135	103	34	15	18	51	88	94	24	-	-
713	-	-	-	10	116	132	96	27	10	24	78	95	74	19	-	-
712	-	-	-	18	100	131	94	30	23	36	59	88	35	-	-	-
711	-	-	-	23	98	131	98	43	31	39	100	80	10	-	-	-
710	-	-	-	10	80	154	93	50	40	41	66	76	33	13	-	-
709	-	-	-	-	92	150	95	66	51	53	46	34	40	38	24	-
708	-	-	-	-	28	144	95	71	62	62	26	10	12	26	50	45
707	-	-	-	-	78	151	94	86	84	32	10	-	-	-	21	53
706	-	-	-	-	86	171	96	93	90	28	-	-	-	-	10	30
705.1	-	-	-	-	112	164	114	90	82	50	-	-	-	-	40	51
705	-	-	-	-	126	153	94	92	76	36	34	-	-	-	10	41
704	-	-	-	-	123	135	97	96	41	11	43	23	10	15	33	42
703	-	-	-	13	109	130	104	94	38	16	30	25	24	32	61	42
702	-	-	-	24	110	129	107	94	39	30	34	40	16	21	13	-
701	-	-	-	33	105	109	115	83	45	43	46	22	10	-	-	-
700	-	-	-	30	128	131	119	69	71	50	35	-	-	-	-	-
699	-	-	-	10	42	154	133	105	75	69	36	10	-	-	-	-
698.1	-	-	-	10	62	150	130	101	95	61	10	-	-	-	-	-
698	-	-	-	-	37	114	141	122	119	30	-	-	-	-	-	-
697	-	-	-	-	42	109	140	131	113	-	-	-	-	-	-	-
696	-	-	-	-	44	109	131	134	136	-	-	-	-	-	-	-
695	-	-	-	-	41	106	130	131	126	-	-	-	-	-	-	-
694	-	-	-	14	38	107	128	138	109	-	-	-	-	-	-	-
693	-	-	-	24	37	110	130	145	113	10	-	-	-	-	-	-
692	-	-	-	26	24	104	130	144	88	10	-	-	-	-	-	-
691	-	-	-	10	24	32	100	145	156	80	-	-	-	-	-	-
690	-	-	-	18	40	105	161	170	45	-	-	-	-	-	-	-
689.1	-	-	-	10	37	112	182	148	25	-	-	-	-	-	-	-
689	-	-	-	10	47	132	203	140	-	-	-	-	-	-	-	-
688	-	-	-	-	57	127	173	130	10	-	-	-	-	-	-	-
687	-	-	-	14	61	114	150	124	16	-	-	-	-	-	-	-
686	-	-	-	31	58	108	147	123	21	-	-	-	-	-	-	-
685	-	-	-	-	41	115	150	113	49	10	-	-	-	-	-	-
684	-	-	-	-	28	18	101	133	101	63	10	-	-	-	-	-
683	-	-	-	-	23	17	112	144	100	80	11	-	-	-	-	-
682	-	-	-	10	18	48	129	147	90	46	-	-	-	-	-	-
681	-	-	-	28	32	70	109	147	83	20	-	-	-	-	-	-
680	10	-	-	44	34	42	98	150	90	14	-	-	-	-	-	-
679	41	40	-	25	22	88	151	108	23	-	-	-	-	-	-	-
678	57	41	16	12	79	155	76	44	14	-	-	-	-	-	-	-
677	66	59	15	13	78	131	83	59	24	-	-	-	-	-	-	-
676	-	-	40	25	40	85	126	76	49	37	-	-	-	-	-	-
675	-	-	16	11	57	97	119	86	31	41	13	-	-	-	-	-
674	-	-	10	10	76	110	122	74	19	46	10	-	-	-	-	-
673	-	-	-	-	74	105	125	58	10	43	21	-	-	-	-	-
672	-	-	-	-	69	102	126	54	47	39	15	-	-	-	-	-
671	-	-	-	-	66	91	126	60	58	41	10	-	-	-	-	-
670.1	-	-	-	-	48	93	141	75	69	-	-	-	-	-	-	-
670	-	-	-	-	39	86	140	86	53	18	-	-	-	-	-	-
669.1	-	-	-	-	12	33	67	134	100	50	-	-	-	-	-	-
669	-	-	-	10	27	33	70	134	83	29	-	-	-	-	-	-
668	-	-	-	17	22	36	93	152	68	10	-	-	-	-	-	-
667	10	18	13	50	106	126	56	-	-	-	-	-	-	-	-	-
666	15	26	10	43	110	146	65	49	-	-	-	-	-	-	-	-
665	10	19	-	21	102	141	36	45	36	-	-	-	-	-	-	-
664	10	10	10	13	84	162	31	25	49	32	-	-	-	-	-	-
663	13	10	10	10	89	153	68	11	28	37	10	-	-	-	-	-
662	10	10	10	14	86	131	64	-	10	48	26	-	-	-	-	-
661	-	-	-	10	19	77	127	59	10	34	51	10	-	-	-	-
660	-	-	-	-	27	33	128	54	-	25	29	10	-	-	-	-
659	-	-	-	-	11	76	125	68	19	28	26	27	15	-	-	-
658	-	-	-	-	-	70	130	67	34	27	23	32	17	-	-	-
657	-	-	-	-	90	138	82	33	10	-	21	10	-	-	-	-
656	-	-	-	-	64	142	53	24	-	-	-	-	-	-	-	-
655	-	-	-	-	93	139	57	14	-	-	-	-	-	-	-	-
654	-	-	-	-	43	86	130	58	14	-	-	-	-	-	-	-
653	-	-	-	10	49	87	131	45	18	-	-	-	-	-	-	-
652	-	-	-	-	50	66	137	73	-	-	-	-	-	-	-	-
651	-	-	-	18	36	45	132	85	-	-	-	-	-	-	-	-
650	-	-	-	29	17	54	127	82	21	-	-	-	-	-	-	-
649	-	-	-	35	26	59	131	83	24	-	-	-	-	-	-	-
648	-	-	-	20	29	49	136	66	13	-	-	-	-	-	-	-
647	-	-	-	-	24	40	137	62	20	-	-	-	-	-	-	-
646	-	-	-	-	59	140	51	12	-	-	-	-	-	-	-	-
645	-	-	-	-	61	135	54	10	-	-	-	-	-	-	-	-
644	-	-	-	22	40	60	129	42	10	-	-	-	-	-	-	-
643	10	41	29	32	52	124	31	10	-	-	-	-	-	-	-	-
642	24	37	10	10	43	130	33	-	-	-	-	-	-	-	-	-
641	37	52	13	10	31	120	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
640	-	-	43	32	11	25	120	36	-	-	-	-	-	-	-	-

\oint = im Längsprofil einer Feldreihe auftretende relative Tiefenmaxima, miteinander verkettet durch eine idealisierte Verbindungslinie
 Feldbezeichnung: L... = linke Ufersohle
 F... = Fahrwasserbereich
 R... = rechte Ufersohle
 (Angaben in dm unter KN, nach Auswertung der Tiefenkarten der Unterelbe)

Tiefen unter KN für den Kartenjahrgang 1972. Hervorgehoben werden jeweils die im Längsprofil maximalen Tiefenwerte. Dadurch ergibt sich ein Verteilungsbild, das zu einem gedanklichen Verbinden der relativen Maxima geradezu auffordert. Das Ergebnis dieser verbindenden Linienführung weist zwei „innere“ Stromfäden auf, die mäandrierend verlaufen.

Im übrigen ist selbst in Abb. 1 allein aus dem Aufbau der ausgewerteten Rasterfelder bereits ein Ausschwingen des Flußverlaufes erkennbar, das den in der Oberflächenstruktur sichtbaren Flußmäandern entspricht. Es muß erwähnt werden, daß die ebenfalls ausgewerteten Kartenjahrgänge 1974, 1977 und 1979 diese Schwingungsfolge bis auf geringfügige Abweichungen kongruent aufweisen.

Ausgehend von einem Schnittpunkt beider in Abb. 1 hervorgehobenen Stromfäden in Strommitte bei km 689 zieht dabei der eine Stromfaden „a“ seine Bahn stromab über einen „Prallhang“ zwischen km 693 und km 696 am rechten Ufer hinüber zum linken Ufer bei km 701, um weiter stromab dann wieder bei km 705/706 die Strommitte zu kreuzen und in den rechten Uferbereich überzuwechseln. Der zweite Stromfaden „b“ besitzt stromab km 689 nach seinem Eintritt in das linke Ufer bei km 690 einen nur undeutlich ausgeprägten „Prallhang“ zwischen km 692 und km 696. Ab km 699 jedoch ist sein Verlauf mit Querung des Fahrwassers und Eintritt in die Neufelder Rinne (rechte Uferzone) außerordentlich prägnant zu verfolgen.

Vor dem Neufelder Sand scheint sich bei km 700/701 eine Aufspaltung dieser Mäanderschlinge abzuzeichnen. Dieser zweite Arm verläuft unmittelbar vor dem Neufelder Sand mit einem der KN-Linie anliegenden Prallhang zwischen km 704 und 705. Es ergibt sich aus dieser Auftrennung des Stromfadens „b“ folgerichtig ein linksseitiger Prallhang bei km 711. Erstaunlicherweise lassen sich stromab km 689 nur sehr wenige „Ausreißer“ in der Verteilung der relativen Tiefenmaxima je Längsprofilreihe ausmachen. Und selbst wenn dies wie bei km 693 im Bereich „L01“ einmal scheinbar eintritt, so kann dieses Maximum dennoch in Verbindung zum dort linksseitig undeutlich verlaufenden Stromfaden „b“ gesehen werden.

Stromauf vom Schnittpunkt beider Stromfäden „a“ und „b“ bei km 689 verläuft „a“ über eine weite Schwingung aus dem linken Uferbereich bei km 685 (Freiburg) mit Querung des Fahrwassers bei km 679 (Störmündung) in die Glückstädter Nebelbe. Von dort tritt er bei km 669/670 (Eßflether Steindeich) in einem Bogen in den Nordteil des Schwarztonnensandes ein. Nach Erwartung des morphologischen Großbildes sollte dann eigentlich eine weite Kurve die Mäanderlinie auf der Landseite des Schwarztonnensandes vorbeiführen. Dies kann jedoch an den mittleren Tiefen unter KN nicht abgelesen werden.

Erkennbar ist dagegen eine bis km 664 v o r Schwarztonnensand auf der Fahrwasserseite vorbeiführende Stromlinie, deren Fortschreibung stromauf bis km 653 allerdings schwer zu interpretieren ist: Nach Anlehnung des Stromfadens bei km 663 an die Insel Pagensand ist zwischen km 662 und km 654 kein klarer Verlauf aus den gemittelten Tiefen zu entnehmen. Ab km 653 ist dann der Stromfaden „a“ wieder über einen Mäanderbogen durch die Lühesander Nebelbe bis km 645 (Fährmannsand) klar verfolgbar.

Der zweite Stromfaden „b“ zieht ab km 687 stromaufwärts genau entgegengesetzt zu „a“ in einem Bogen heraus aus dem rechten Ufer (km 687, Scheelenkuhlen), quert die Fahrinne bei km 684 (Brokdorf) und verläuft zu einem ausgeprägten Schwingungsbauch bei km 679/678 (Brammerbank). Von dort ergibt sich eine direkt dem Talweg folgende Linie zur Pagensander Nebelbe (km 665–657). Ab hier wird die Frequenz der Schwingung „b“ (wie übrigens auch bei „a“) wesentlich herabgesetzt, und zwar auf rd. 7 km, d. h., die Mäanderlinie verläßt die Pagensander Nebelbe durch Querung der Fahrinne bei km 656 (Höhe Bützflether Sand) und besitzt bei km 655/654 (Stadersand) einen Bogen im linken Ufer. Zurück schwingt der

Stromfaden „b“ über das rechte Ufer beim Hetlinger Schanzensand zum ausgeprägten Mäanderbogen in der Hahnöfer Süderelbe.

Wie bereits angedeutet, nimmt die Frequenz der Mäanderbögen von km 724 bis km 640 sukzessive ab (Abb. 1). Diese Frequenzabnahme wird sich stromauf wahrscheinlich beschleunigt fortsetzen, auch wenn aus dem aktuellen Kartenbild zwischen Hanskalbsand und dem Hamburger Hafen heute nicht einmal mehr unmittelbar wahrnehmbare Talwegbögen zu finden sind. Doch deutet die weite Stromlandschaft gerade dieses Streckenabschnitts an, daß vor Regelung der Unterelbe hier eine stromauf rasch zunehmende Verästelung in kleinere Elbarme angesiedelt war. Die Stromspaltung im Hamburger Raum in zahlreiche Nebenarme der Süder- und Norderelbe ist ein weiterer Hinweis auf ein stromauf stattfindendes „Ausschwingen“ des Tideflusses Elbe.

Es könnte vorläufig im Zusammenhang mit der ebenfalls „Ausschwingen“ genannten, sich stromauf verringernden Kolk-Bank-Frequenz (s. DAMMSCHNEIDER, 1985) von einer morphologischen Gesetzmäßigkeit gesprochen werden, die auf stromaufwärts abnehmenden Tideeinfluß bzw. abnehmende Tidewassermenge bei zunehmender Oberwasserwirksamkeit und damit den Übergang zwischen Tide- und Binnenfluß zurückzuführen wäre.

Zum anderen gehen die Verfasser davon aus, daß im Sinne von FÜHRBÖTER (1983) makroskopische Ordnungsstrukturen (hier: Mäander) aus sehr kleinen Zufallsstörungen (hier: interne Schwingungen) entstehen können. Denkbar wäre eine sinngemäß-prinzipielle Übertragung der von FÜHRBÖTER ermittelten „vertikalen“ Struktur auf „horizontale“ Bewegungsabläufe. Unter Umständen ist die Entdeckung der Stromfäden ein erster Hinweis auf solche Prozeßfelder, die jedoch erst ab einer gewissen Größe für den Betrachter makroskopisch wahrnehmbar werden. In der z. Z. kleinsten meßbaren Einheit, der „Strömung“, sollten sich in Abhängigkeit von physikalischen Randbedingungen (Coriolis-Kraft!) diese Zufallsstörungen ebenfalls finden, können jedoch offensichtlich mit den zur Verfügung stehenden Interpretationsmechanismen noch nicht dingfest gemacht werden. Eine sehr viel feinere Strukturanalyse wäre vonnöten.

Klar wird durch die quantitative Kartenauswertung belegt, daß Baggerarbeiten in der seeschifftiefen Fahrrinne oder Baggergutverklappungen in Flachwasserbereichen zu keinen feststellbaren Veränderungen der natürlichen Formbildungsvorgänge führen. Damit ist nicht gemeint, daß Baggerungen kein Faktor in der morphologischen Formänderungsarbeit wären, ganz im Gegenteil. Jedoch ist die Dominanz der natürlichen internen Schwingungsvorgänge offenbar so groß, daß sie wasserbaulich-anthropogene Einflüsse ohne Schwierigkeiten „verkräften“ bzw. puffern können und weiterhin die Morphologie eigendynamisch prägen.

In Verbindung mit bekannten morphodynamischen Entwicklungsabläufen kann man nunmehr versuchen, eine Deutung für beobachtbare, aber schwer zu erklärende morphodynamische Vorgänge durch die Anwendung regionaler Kenntnisse aus der „Stromfadentheorie“ zu formulieren.

3.3 Aktuelle Wirkung von „Stromstrich“ und „Stromfaden“

HENSEN (1942b, S. 3) beschreibt den Einfluß der Coriolis-Kraft (Rechtsablenkung), indem er ihren Einfluß im Gebiet des Mittelgrundes und des Kratzsandes darstellt, „... wo es ein wesentliches Ziel des Leitdammbaues unterhalb der Kugelbake ist, den Flutstrom mit Unterstützung durch die Rechtsablenkung an dem Leitdamm zu halten und an der Hinterströmung des Kratz-Sandes zu (ver-)hindern.“

Hier wird also seitens des Wasserbaus bereits sehr früh die potentielle Wirkung der Coriolis-Kraft bzw. der aktuellen Mäanderbildung beobachtet und nutzbringend in die Praxis umgesetzt.

Die deutlichste Ausprägung der Wirkung der Rechtsablenkung auf die Verlagerung des Stromstriches im Untersuchungsgebiet finden wir im Bereich südlich des Medemsandes. Allein aus dem Vergleich der Kartenblätter von 1972 und 1979 läßt sich hier eine Verlegung der KN-Linie um bis zu 700 m in nördlicher Richtung erkennen, die darauf zurückzuführen ist, daß an dieser Stelle der ebbstromorientierte, da am nördlichen Ufer verlaufende Stromfaden (vgl. HENSEN, 1939), nachdem er die enge Uferführung unterhalb von Brunsbüttel verloren hat, der Rechtsablenkung unterliegt und in den ausgedehnten Wattflächen des Medemsandes naturgemäß leicht Material erodieren kann. Mit dieser Erosion geht eine verstärkte Akkumulation in der Strommitte einher, die sich an der Anlage des Medemgrundes und an seinen Verlagerungstendenzen dokumentieren läßt (vgl. FELSCHART, 1985). Ein Blick in historische Karten wie z. B. bei GIESE (1971) zeigt, daß dieses Phänomen kein Einzelfall ist, sondern sich bereits häufiger in der beschriebenen Art und Weise abgespielt hat, wobei zu berücksichtigen ist, daß die anthropogenen Eingriffe hier als Hemmnis einer natürlichen Entwicklung in Erscheinung treten.

Eine ähnliche Entwicklung, nur in einem anderen Stadium, erscheint für die Neufelder Rinne und den Neufelder Sand zumindest denkbar. Auch hier lassen sich mittels der quantitativen Kartenauswertung Verlagerungstendenzen der Rinne bzw. Vergrößerungstendenzen des Sandes in nördlicher Richtung nachweisen (vgl. FELSCHART, 1985), die mit einem schwach erkennbaren, die Rinne durchlaufenden Stromfaden zusammenzuhängen scheinen. Inwieweit sich allerdings hier der Bau des Leitdammes auf dem Neufelder Sand ausgewirkt hat, konnte im Rahmen der Themenstellung nicht festgestellt werden.

Für den Strombereich der Elbkilometer 679 bis 676 gilt, daß ein besonders ausgeprägter Stromfaden die z. Z. noch relativ unscheinbare Materialakkumulationszone der „Brammerbank“ vom linken Hauptufer abtrennt. Dies wäre aus dem normalen Bild der Tiefenkarten so nicht zu erwarten gewesen und gibt deshalb zu der Spekulation Anlaß, ob es sich an dieser Stelle vielleicht um die Bildung einer neuen Nebeneibe handeln könnte. Makroskopisch ist davon sicher noch nicht sehr viel zu erkennen; die Stromfadenlage jedoch deutet die Spaltung des Stromes an. Dies müßte in Zukunft dann zu einer verstärkten Materialakkumulation im Kernbereich der Brammerbank führen (km 678).

Im Bereich Schwarztonnensand ist als morphologische Konsequenz aus der Streckenführung der Stromfäden „a“ und „b“ (nach Abb. 1) hervorzuheben, daß im Abschnitt km 665 bis km 660 des linken Uferbereichs eine sehr charakteristische „Ruhezone“ angesiedelt ist: Ein weiter Bereich der Sohle befindet sich hier außerhalb der Beeinflussung besonders hervortretender Stromfadenlagen und stellt nach Angaben des WSA Hamburg dann auch tatsächlich ein Areal bevorzugter Akkumulation dar. Dies ist ein nach dem morphologischen Großbild unerwartetes Ergebnis, würde man doch vermuten, daß bei Schwarztonnensand der Ansatz zur Ausbildung einer eigenen Nebeneibe besteht. Es ist deshalb zu fragen, ob der jetzige Zustand Ergebnis einer natürlichen Entwicklung ist oder ob er durch langjährige Aufspülungen dahingehend gesteuert wurde.

4. F a z i t

Nach den vorliegenden Ergebnissen einer quantitativen Kartenauswertung im Tidegebiet der Elbe zwischen Cuxhaven und Hamburg gelingt ein eindeutiger Nachweis zweier getrennt verlaufender Stromfäden. Beide mäandrieren gegenläufig mit einer stromauf abnehmenden

Frequenz. Diese innere morphologische Gliederung kann aus normalen Tiefenkarten nicht unmittelbar abgelesen werden.

Hypothetisch läßt sich sagen, daß danach Strominseln oder -sände Bildungen im Strombereich *zwischen* zwei Hauptströmungskomponenten sind, d. h., daß sie in einer Zone herabgesetzter Strömungsaktivitäten gebildet werden, deren Lage kurz- bis mittelfristig festgeschrieben ist, sich über lange Zeiträume jedoch stark verändert (vgl. auch SCHULZ, 1954).

Als Beispiel für eine in Zukunft sich aufbauende neue Strominsel kann die Brammerbank angesehen werden. Die Lage dieser relativ jungen Strombank, die noch nicht gefestigt ist, sollte als starkes Akkumulationsfeld angesehen werden, welches zukünftig weiter wachsen dürfte und dann eine eigene „Nebenebe“ bilden könnte (s. DAMMSCHNEIDER, 1983, S. 68).

Als Ergebnis dieses Wechselspiels *zweier*, vermutlich jeweils von Ebb- bzw. Flutströmung geprägten Stromfäden ergibt sich das heutige Bild eines *einzig*en sichtbaren Stromstrichs. Eine Übereinstimmung, wie sie ZELLER (1967) für die Lage von Dünen („Bänke“ i. S. von DAMMSCHNEIDER, 1983) und Strommäandern ermittelt, läßt sich jedoch in der Unterelbe nicht finden.

Für die Ursachen der Mäanderbildung lassen sich z. Z. nur Teilbegründungen liefern, bei denen jedoch die Coriolis-Kraft einen wesentlichen Faktor darstellt. Die Verfasser stimmen ZANKE (1982, S. 306) zu, welcher vermutet, daß

„... die Ursachen für alle rhythmischen Verformungen eines Gerinnes in jedem seiner Freiheitsgrade durch ein und dasselbe Grundprinzip bestimmt (seien). Denkbar ist in dieser Hinsicht, daß das Prinzip vom Minimum der Formänderungsarbeit auch hier zutrifft“.

Es wird sich dabei primär um das Wechselspiel zwischen stromauf abnehmendem Tideeinfluß, jedoch ansteigender Oberwasserwirksamkeit handeln, welches diese Formänderungsrhythmik prägt.

Vor allem jedoch könnte der von FÜHRBÖTER (1983) für „vertikale“ Schwingungen (Strömungsriffel) aufgezeigte Mechanismus der Bildung von makroskopischen Ordnungsstrukturen aus sehr kleinen Zufallsstörungen in übertragener Bedeutung anwendbar sein. In diesem Sinne wäre dann auch die im Titel gestellte Frage zu beantworten: Aktuelle Mäanderbildung im Tidebereich der Unterelbe scheint nach Stand der Indizien ein mehrdimensionaler Vorgang zu sein, von dem z. Z. der Nachweis zweier Wirkungen auf unterschiedliche Art gelingt.

1. Makroskopisch wahrnehmbarer Effekt: In jedem Kartenwerk sichtbare Mäanderbögen, die von mehreren Autoren bereits beschrieben wurden.
2. Meßtechnisch zu ermittelnder Effekt: Mit Hilfe quantitativer Kartenauswertung erkennbare interne Schwingungen, die aus zwei unterschiedlich geführten „Stromfäden“ bestehen.

Beide Effekte sind morphologisch wirksam, allerdings ist die Schlußfolgerung für die Praxis noch offen. Denn ob Stromfäden einen Materialquertransport verursachen und somit bei Querung des Fahrwassers innerhalb dieser Zone zu einem Eintrieb und folglich einer Beeinflussung der Sollwassertiefe führen, wird das Ziel von Folgeuntersuchungen sein müssen.

Konsequenzen für das wasserbauliche Versuchswesen (hydraulische Modelle) ergeben sich insofern, als zu überdenken ist, inwieweit bestimmte Versuchsableitungen ohne Berücksichtigung des Coriolis-Effektes (als einer der wesentlichen „Mäanderfaktoren“) auf die Natur übertragbar sein können. Es handelt sich dabei primär um Modellversuche zur Abschätzung von langfristigen morphologischen Veränderungen. Die Verfasser sind sich der Schwierigkeiten bewußt, die diese Frage in der Praxis aufwirft. Es muß jedoch die Frage erlaubt sein, ob es

nicht eine unzulässige Vereinfachung der „Natur“ darstellt, interne Schwingungen zu ignorieren:

„Es ist . . . festzustellen, daß bei den für das Elbemodell vorliegenden Verhältnissen die Coriolis-Kraft sich zwar nicht auf die Tiefen auswirken kann, jedoch in hohem Maße auf die Strömungsrichtungen“ (HENSEN, 1942b, S. 3).

5. Schriftenverzeichnis

- BONNEFILLE, R. u. BRACONNOT, A.: Untersuchungen über den Einfluß der Corioliskraft auf die Entwicklung der Rinnen in Flußmündungen. Bericht HJI/R/051 T.484.DHM vom 20. 5. 1966 des LNH Chatou, 1966.
- DAMMSCHNEIDER, H.-J.: Morphodynamik, Materialbilanz und Tidewassermenge der Unterelbe. Berl. Geogr. Studien, Bd. 12, 1983.
- DAMMSCHNEIDER, H.-J.: Quantitative Morphodynamik im Sohlenregime der Unterelbe. Die Küste, H. 42, 1985.
- EXNER, F. M.: Über die Wechselwirkung zwischen Wasser und Geschiebe in Flüssen. Sitzungsbericht der Akademie der Wissenschaften in Wien, Abt. IIa, Bd. 134, S. 165–203, 1925.
- EXNER, F. M.: Zur Dynamik der Bewegungsformen auf der Erdoberfläche. Ergebnisse der Kosmischen Physik, Bd. 1, S. 373–445, 1931.
- FELSHART, TH.: Quantitative Untersuchungen zur Morphodynamik im Sohlenregime des Elbe-Ästuars zwischen St. Margarethen und Cuxhaven. Staatsexamen, TU Berlin, 1985, (unveröffentl.).
- FÜHRBÖTER, A.: Zur Bildung von makroskopischen Ordnungsstrukturen (Strömungsriffel und Dünen) aus sehr kleinen Zufallsstörungen. Mitt. d. Leichtweiß-Instituts für Wasserbau der TU Braunschweig, H. 79, 1983.
- GIESE, E.: Fahrwasserumbildungen in der Unter- und Außenelbe. Die Wasserwirtschaft, H. 3, 1971.
- GIESE, E., TEICHERT, J. u. VOLLMERS, H.: Das Tideregime der Elbe. Hydraulisches Modell mit beweglicher Sohle. Mitt. d. Bundesanstalt f. Wasserbau, Nr. 31, 1972.
- GRUBE, F.: Die Geologie des Schulauer Ufers an der Unterelbe. Mitt. a. d. Geolog. Landesamt Hamburg, Nr. 33, 1962.
- HALLIK, R.: Das Elbtal bei Hamburg seit dem Ende der Eiszeit. Abh. Verh. Naturwiss. Ver. Hamburg (N. F.), H. 6, 1962.
- HENSEN, W.: Der Einfluß der Erdumdrehung auf Tideflüsse in der Natur und im Modell. Die Bautechnik, H. 21, 1939.
- HENSEN, W.: Rechtsablenkung. Vergleich mit Erdbeschleunigung und Zentrifugalbeschleunigung. Kleine Studie der WSD Hamburg, Nr. 36, 1942a.
- HENSEN, W.: Interne Schriftnotiz über Rechtsablenkung. Vergleich mit Erdbeschleunigung und Zentrifugalbeschleunigung. Büro für Gewässerkunde, Wasserstraßendirektion Hamburg, 1942b.
- JANETZKO, P.: Jungnacheiszeitliche Mäanderbildungen im Bereich der Unterelbe. Verh. Naturwiss. Ver. Hamburg (N. F.), H. 25, 1982.
- KAUFMANN, H.: Rhythmische Phänomene der Erdoberfläche. Braunschweig, 1929.
- KLEIN, H. A.: Strömungsverhältnisse und Wassermengen der Tideelbe (Messungen 1958–1960). Mitt. d. Wasser- und Schifffahrtsdirektion Hamburg, Nr. 11, 1960.
- SCHULZ, H.: Sedimentation und Erosion im Elbe-Ästuar der Gegenwart. Mitt. Geol. Staatsinst. Hamburg, H. 23, 1954.
- SIMON, W. G.: Geschichte des Elbe-Ästuars von der Überflutung der Nordsee nach der letzten Vereisung bis zur Gegenwart, nach dem Stand der Kenntnisse von 1964. Abh. Verh. Naturwiss. Ver. Hamburg (N. F.), H. 9, 1965.
- WSA HAMBURG (Hrsg.): Strömungsverhältnisse und Wassermengen der Tide-Elbe (Messungen 1960–1966). Mitt. d. Wasser- und Schifffahrtsdirektion Hamburg, Nr. 16, 1967.
- WSD NORD (Hrsg.): Strömungsverhältnisse und Wassermengen der Tide-Elbe zwischen Wedel und Hollerwettern (nach Messungen 1971–1973). Mitt. d. Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord, Nr. 24, 1980.
- ZANKE, U.: Grundlagen der Sedimentbewegung. Berlin/Heidelberg/New York, 1982.
- ZELLER, J.: Flußmorphologische Studie zum Mäanderproblem. Mitt. aus der VAU Zürich, H. 74, 1967.