



Master-Thesis im Masterstudiengang „Wasserwirtschaft im globalen Wandel“ M.Sc.

Strömungs- und Durchflussmessungen im Bereich der Tideelbe
seit Anfang der 1960er Jahre
– Ergebnisse aus Untersuchungen der Wasser- und
Schifffahrtsverwaltung im Bereich Elbe-km 638,9 und 689,1 –

eingereicht von:

B.Eng. Michel Gérard, Matrikel-Nummer: 70225563

Erstprüfer: Dr. rer.nat. Gerd Neemann

Zweitprüfer: Dr.-Ing. Ingo Entelmann

Drittprüfer: Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	13
Tabellenverzeichnis.....	19
1 Einleitung	21
2 Grundlagen.....	22
2.1. Strömungsverhältnisse in Tideflüssen	22
2.2 Hydro- und Morphologie der Tideelbe	24
2.3 Tidekennwerte	29
3 Messtechniken und Auswerteprogramme	32
4 Derzeitige Strömungsverhältnisse in der Tideelbe	38
4.1 Messergebnisse	38
4.1.1 Auswertung zu den Dauermessstationen D1-D4 im Zeitraum 1999-2011	40
4.1.1.1 Dauermessstation D1	42
4.1.1.2 Dauermessstation D2	58
4.1.1.3 Dauermessstation D3	71
4.1.1.4 Dauermessstation D4	84
4.1.1.5 Vergleich Ausgewählter Tidekennwerte D1 bis D4	97
4.1.2 Ergebnisse der ADCP-Querprofilmessungen von 2006 bis 2011	104
4.1.2.1 Messquerschnitt Q1	105
4.1.2.2 Messquerschnitt Q2	108
4.1.2.3 Messquerschnitt Q3	111
4.1.2.4 Messquerschnitt Q4	114
4.1.2.5 Vergleich ausgewählter Tidekennwerte Q1 bis Q4	116

4.2 Modellergebnisse	118
5 Messprogramme der WSV in der Tideelbe seit den 1960er Jahren	124
5.1 Hanskalbsand (Elbe-Km 643,0)	127
5.2 Lühesand-Ost (Elbe-km 651,1)	132
5.3 Pagensand-Nord (Elbe-km 664,7)	137
5.4 Rhinplate-Nord (Elbe-km 676,5)	142
6 Signifikante Veränderungen seit 1960	146
6.1 Morphologische Entwicklungen und ihr Einfluss auf Strömungsverhältnisse seit 1960	157
6.2 Darstellung und Auswertung zu den ausgewählten Messquerschnitten	160
6.2.1 Messquerschnitt Q1 im Bereich Wedel	161
6.2.2 Messquerschnitt Q2 im Bereich Jülssand	164
6.2.3 Messquerschnitt Q3 im Bereich Pagensand	166
6.2.4 Messquerschnitt Q4 im Bereich Rhinplate	169
7 Auswirkungen des globalen Wandels - Prognosen zur zukünftigen Entwicklung der Strömungsverhältnisse	171
8 Zusammenfassung und Ausblick	174
9 Literaturverzeichnis	178
10 Anhang	182

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Räumliche Veränderung der Tidekurve entlang der Elbe, nach Boehlich (2003).....	25
Abbildung 2: Tidekennwerte des Wasserstandes [2]	30
Abbildung 3: Tidekennwerte der Strömung [2].....	31
Abbildung 4: Hydrometrische Messflügel der Firma Ott, links Schwimmflügel „Delphin“, rechts Stangenflügel	34
Abbildung 5: Aanderaa-Messgeräte, links RCM-4 mit impellergesteuerter, rechts Seaguard-RCM mit akustischer Messeinheit.....	35
Abbildung 6: Beispiel Messlogbuch aus dem Jahr 1970.....	37
Abbildung 7: Darstellung von Messergebnissen mittels Spezialsoftware TIDE, 2012	37
Abbildung 8: Lage der Dauermessstationen (rot) und der Querprofilmessungen (blau) der Beweissicherung	38
Abbildung 9: Messpositionen im Querprofil bei D1	42
Abbildung 10: Strömungsverteilung an der Oberfläche von Station D1 (2001)	43
Abbildung 11: Strömungsverteilung an der Oberfläche von Station D1 (2011)	43
Abbildung 12 Strömungsverteilung Sohlenmessung D1 2001	44
Abbildung 13 Strömungsverteilung Sohlenmessung D1 2011	44
Abbildung 14 : MTSK der Oberflächenmessungen zwischen 2001 und 2011 an Station D1	46
Abbildung 15 : MTSK der Sohlenmessungen zwischen 2001 und 2011 an Station D1	46
Abbildung 16: Messpositionen im Querprofil bei Station D2	58
Abbildung 17: Strömungsverteilung an der Oberfläche von Station D2 (2001)	59
Abbildung 18: Strömungsverteilung an <i>der Oberfläche von Station D2 (2011)</i>	59
Abbildung 19: Strömungsverteilung an der Sohle von Station D2 (2001)	60
Abbildung 20: Strömungsverteilung an der Sohle von Station D2 (2011)	60
Abbildung 21: MTSK der Oberflächenmessungen an Station D2	61
Abbildung 22: MTSK der Sohlenmessungen an Station D2.....	62
Abbildung 23: Messpositionen im Querprofil bei Station D3	71
Abbildung 24: Strömungsverteilung an der Oberfläche von Station D3 (2001)	72

Abbildung 25: Strömungsverteilung an der Oberfläche an Station D3 (2011)	72
Abbildung 26: Strömungsverteilung an der Sohle von Station D3 (2001)	73
Abbildung 27: Strömungsverteilung an der Sohle von Station D3 (2011)	73
Abbildung 28: MTSK der Oberflächenmessung an Station D3	74
Abbildung 29: MTSK der Sohlenmessung an Station D3.....	74
Abbildung 30: Messpositionen im Querprofil bei Station D4	84
Abbildung 31: Strömungsverteilung an der Oberfläche von Station D4 (2001)	85
Abbildung 32: Strömungsverteilung an der Oberfläche von Station D4 (2011)	85
Abbildung 33: Strömungsverteilung an der Sohle von Station D4 (2001)	86
Abbildung 34: Strömungsverteilung an der Sohle von Station D4 (2011)	86
Abbildung 35: MTSK der Oberflächenmessungen zwischen 200 und 2011 an Station D4	87
Abbildung 36: MTSK der Sohlenmessungen zwischen 2001 und 2011 an Station D4	87
Abbildung 37 Verlauf der mittleren Tideströmungskurve (MSTK) Station D1-D4 2001- 2011	98
Abbildung 38: Mittlere Flutstromgeschwindigkeiten [V_{fm}] an den Stationen D1- D4 zwischen 2001 und 2011	100
Abbildung 39 Verlauf mittlerer maximaler Flutstromgeschwindigkeit [V_{fmax}] D1- D4 zwischen 2001 und 2011.....	101
Abbildung 40: Mittlere Ebbestromgeschwindigkeit [V_{em}] an den Stationen D1- D4 zwischen 2001 und 2011.....	103
Abbildung 41: Jahresmittelwerte der Oberwasserzuflüsse am Wehr Neudarchau, Zeitraum: 1999 bis 2011.....	103
Abbildung 42: Strömungsgeschwindigkeiten am 21.03.07; Vergleich der Ergebnisse der Messungen an der Station D1 mit den ADCP-Messungen (Auswertung mittels Software TIDE).....	107
Abbildung 43: Strömungsgeschwindigkeiten am 25.8.09; Vergleich der Ergebnisse der Messungen an der Station D2 mit den ADCP-Messungen (Auswertung mittels Software TIDE).....	109
Abbildung 44: Strömungsgeschwindigkeiten am 3.9.08; Vergleich der Ergebnisse der Dauermessungen an der Station D3 mit den ADCP-Messungen (Auswertung mittels Software TIDE)	112

Abbildung 45 : Strömungsgeschwindigkeiten am 27.9.06; Vergleich der Ergebnisse der Dauermessungen an der StationD3 und den ADCP-Messungen (Auswertung mittels Software TIDE)	115
Abbildung 46: Geschwindigkeiten des Flut- und Ebbestroms an den Querprofilen Q1-Q4 (arithmetische Mittel aus den ADCP-Messungen der Jahre 2006 – 2010)	118
Abbildung 47: Modelltopographie und Strömungsgeschwindigkeiten am Beispiel der Tideelbe bei Schulau (Ebbesituation am 14.7.2010)	119
Abbildung 48: ArcGis-Screenshot: Luftbild mit Flutströmungsdaten, Peildaten, Analysedaten	120
Abbildung 49: Modellrechnungen der BAW: mittlere Ebbeströmung in Fahrrinnenmitte 1970, 1997 und 2002.....	122
Abbildung 50: Modellrechnungen der BAW: mittlere Flutströmung in Fahrrinnenmitte 1970, 1997 und 2002	122
Abbildung 51: Relative Strömungsdominanzen entlang der Unterelbe bei unterschiedlichem Oberwasserzufluss (Q= 180 (oben) / 720 (mitte) / 1260 (unten) in m ³ /s); farblich dargestellt sind die relativen mittleren Verhältnisse zwischen Flut- : Ebbedominanz (Flutdominanz:blau/Ebbedominanz:rot)	123
Abbildung 52: Lage der Strömungsmessstellen aus der Zeit von 1958-1968/1968..	125
Abbildung 53: Lage der Messstrecke Hanskalbsand, Basis: Elbemorphologie im Jahr 1950.....	127
Abbildung 54: Entwicklung der mittleren (V_fm) und der maximalen (V_fmax) Flutstromgeschwindigkeit an der Messstrecke Hanskalbsand (Elbe-km 643,0) von 1966 bis 1984.....	128
Abbildung 55: Entwicklung der mittleren (V_em) und der maximalen (V_emax) Ebbestromgeschwindigkeit an der Messstrecke Hanskalbsand (Elbe-km 643,0) von 1966 bis 1984.....	129
Abbildung 56: Entwicklung der mittleren Ebbe- (V_em) und Flutstromgeschwindigkeit (V_fm) an der Messstrecke Hanskalbsand 1966 bis 2011, direkter Vergleich	129
Abbildung 57 : Entwicklung der mittleren Ebbe- (V_em) und Flutstromgeschwindigkeiten (V_fm) an der Messstrecke Hanskalbsand, von 1966 bis 2011, nach Neukalkulation gemäß <i>Grellus 2012</i>	130

Abbildung 58: Entwicklung der mittleren maximalen Ebbe- (V_{emax} m) und Flutstromgeschwindigkeiten (V_{fmax} m) an der Messstrecke Hanskalbsand von 1965 bis 2011, nach Neukalkulation gemäß <i>Grellus 2012</i>	131
Abbildung 59: Entwicklung der Ebbestrom- (T_e) und Flutstromdauern (T_f) an der Messstrecke Hanskalbsand (Elbe-km 643) von 1966 bis 2011	131
Abbildung 60: Lage der Messstrecke Lühesand-Ost, Basis: Elbemorphologie im Jahr 1950	132
Abbildung 61: Entwicklung der mittleren (V_{fm}) und maximalen (V_{fmax}) Flutstromgeschwindigkeit an der Messstrecke Lühesand-Ost 1961 bis 1986	133
Abbildung 62: Entwicklung der mittleren (V_{em}) und maximalen (V_{emax}) Ebbestromgeschwindigkeit an der Messstrecke Lühesand-Ost 1961 bis 1986	133
Abbildung 63: Entwicklung der mittleren Ebbe- (V_{em}) und Flutstromgeschwindigkeit (V_{fm}) an der Messstrecke Lühesand-Ost von 1961 bis 2011, direkter Vergleich .	134
Abbildung 64: Entwicklung der mittleren Ebbe- (V_{em}) und Flutstromgeschwindigkeit (V_{fm}) an der Messstrecke Lühesand-Ost von 1961 bis 2011 , nach Neukalkulation gemäß <i>Grellus 2012</i>	135
Abbildung 65: Entwicklung der mittleren maximalen Ebbe- (V_{emax} m) und Flutstromgeschwindigkeit (V_{fmax} m) an der Messstrecke Lühesand-Ost von 1961 bis 2011, nach Neukalkulation gemäß <i>Grellus 2012</i>	135
Abbildung 66 : Entwicklung der Ebbestrom- und Flutstromdauer an der Messstrecke Lühesand-Ost von 1961 bis 2011 Ost	136
Abbildung 67: Lage der Messstrecke Pagensand-Nord, Basis: Elbemorphologie aus dem Jahr 1950	137
Abbildung 68: Entwicklung der mittleren (V_{fm}) und maximalen (V_{fmax}) Flutstromgeschwindigkeit an der Messstrecke Pagensand-Nord (Elbe-km 664,7) von 1966 bis 1978	138
Abbildung 69: Entwicklung der mittleren (V_{em}) und maximalen (V_{emax}) Ebbestromgeschwindigkeit an der Messstrecke Pagensand-Nord (Elbe-km 664,7) von 1966 bis 1978	139
Abbildung 70: Entwicklung der mittleren Ebbe- (V_{em}) und Flutstromgeschwindigkeit (V_{fm}) an der Messstrecke Pagensand-Nord von 1966 bis 2011, direkter Vergleich	139

Abbildung 71: Entwicklung der mittleren maximalen Ebbe- (V_{emax} m) und Flutstromgeschwindigkeit (V_{fmax} m) an der Messstrecke Pagensand-Nord 1966 bis 2011, direkter Vergleich	140
Abbildung 72: Entwicklung der Ebbestrom- und Flutstromdauer an der Messstrecke Pagensand-Nord (Elbe-km 664,7) zwischen 1966 und 2011	141
Abbildung 73: Lage der Messstrecke Rhinplate-Nord (in rot), Elbemorphologie im Jahr 1950	142
Abbildung 74: Entwicklung der mittleren (V_{fm}) und maximalen (V_{fmax}) Flutstromgeschwindigkeit an der Messstrecke Rhinplate-Nord (Elbe-km 676,5) von 1960 bis 1989.....	143
Abbildung 75: Entwicklung der mittleren (V_{em}) und maximalen (V_{emax}) Ebbestromgeschwindigkeit an der Messstrecke Rhinplate-Nord (Elbe-km 676,5) von 1960 bis 1989.....	143
Abbildung 76: Entwicklung der mittleren Ebbe- (V_{em}) und Flutstromgeschwindigkeit (V_{fm}) an der Messstrecke Rhinplate-Nord von 1960 bis 2011, direkter Vergleich	144
Abbildung 77: Entwicklung der mittleren Ebbe- (V_{em}) und der Flutstromgeschwindigkeit (V_{fm}) an der Messstrecke Rhinplate-Nord von 1960 bis 2011, nach Korrektur gemäß <i>Grellus 2012</i>	145
Abbildung 78: Entwicklung der mittleren maximalen Ebbe- (V_{emax} m) und der Flutstromgeschwindigkeit (V_{fmax} m) an der Messstrecke Rhinplate-Nord von 1960 bis 2011, nach Korrektur gemäß <i>Grellus 2012</i>	145
Abbildung 79: Entwicklung von Ebbestrom- und Flutstromdauern an der Messstrecke Rhinplate-Nord (Elbe-km 676,5) zwischen 1960 und 2011	146
Abbildung 80: Entwicklung der Wasserstände am Pegel St. Pauli von 1870 bis 2006	147
Abbildung 81: Veränderungen des mittleren Tidehubes (MThb) an ausgewählten Pegeln; Vergleich der 10-Jahreswerte zwischen 1958 bis 1968 und 2001 bis 2011	151
Abbildung 82: Mittlere Tidewasserstände und mittlerer Tidehub am Pegel Glückstadt in den Jahren 1958-2011	152
Abbildung 83: Mittlere Tidewasserstände und mittlerer Tidehub am Pegel Stadersand in den Jahren 1958-2011	152

Abbildung 84: Mittlere Tidewasserstände und mittlerer Tidehub am Pegel Schulau in den Jahren 1958-2011	153
Abbildung 85: Mittlere Tidewasserstände und mittlerer Tidehub am Pegel Hamburg St. Pauli in den Jahren 1958-2011	153
Abbildung 86: Mittlere Tidewasserstände und mittlerer Tidehub am Pegel Cuxhaven in den Jahren 1958-2011	154
Abbildung 87: Vergleich der Entwicklung des mittleren Tidehochwassers (MThw) an ausgewählten Pegeln während der 10-Jahresperioden von 1958 bis 1968 von 2001 bis 2011	155
Abbildung 88: Vergleich der Entwicklungen des mittleren Tideniedrigwassers (MTnw) an ausgewählten Pegeln während der 10-Jahresperioden von 1958 bis 1968 und von 2001 bis 2011.....	155
Abbildung 89: Verlauf der Tidewellenlinie entlang des Elbeästuars im einstündigen Abstand bei Springtide (Abbildung dient der Demonstration).....	156
Abbildung 90: Morphologie der Elbe im Bereich Hanksalbsand im Jahr 1950	161
Abbildung 91: Morphologie der Elbe im Bereich Hanksalbsand im Jahr 2005	162
Abbildung 92: Morphologie der Elbe im Bereich Jülssand im Jahr 1950.....	165
Abbildung 93: Morphologie der Elbe im Bereich Jülssand im Jahr 2005.....	166
Abbildung 94: Morphologie der Elbe im Bereich Pagensand im Jahr 1950.....	167
Abbildung 95: Morphologie der Elbe im Bereich Pagensand im Jahr 2005.....	167
Abbildung 96: Morphologie der Elbe im Bereich Rhinplate im Jahr 1950.....	170
Abbildung 97: Morphologie der Elbe im Bereich Rhinplate im Jahr 2005.....	171
Abbildung 98: Vorhersagen zum Meeresspiegelanstieg (Zeitraum: 1990 bis 2100) 172	
Abbildung 99: Einfluss verschiedener Meeresspiegelanstiegsszenarien auf den Wasserstand am Pegel Schulau	173
Abbildung 100: Auswirkungen eines Meeresspiegelanstiegs um +80cm auf den Pegel Glückstadt	174

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Baumaßnahmen an der Tideelbe seit 1965, von denen ein Einfluss auf die Strömungsverhältnisse nicht auszuschließen ist	29
Tabelle 2: Verfahren der Strömungsmessung	33
Tabelle 3: Beschreibung der Dauermessstationen D1-D4	40
Tabelle 4: Tidekennwerte	41
Tabelle 5: Vergleich mittlerer und maximaler Strömungsgeschwindigkeiten D1 (1999-2011).....	52
Tabelle 6: Relative Dauern von Flut- und Ebbestrom (Tidedauern) an Station D1	54
Tabelle 7: Stauwasserdauern an der Messstation D1 zwischen 1999 und 2011	56
Tabelle 8: Vergleich mittlerer und maximaler Strömungsgeschwindigkeiten an Station D2 (1999-2011)	66
Tabelle 9: Relative Dauern von Flut- und Ebbestrom (Tidedauern) an Station D2...	68
Tabelle 10: Vergleich mittlerer und maximaler Strömungsgeschwindigkeiten an Station D3 (1999-2011)	79
Tabelle 11: Relative Dauern von Flut- und Ebbestrom (Tidedauern) an Station D3...	81
Tabelle 12: Vergleich mittlerer und maximaler Strömungsgeschwindigkeiten an Station D4 (1999-2011)	92
Tabelle 13: Relative Dauern von Flut- und Ebbestrom (Tidedauern) an Station D4.	94
Tabelle 14: Vergleich der Tidekennwerte aus der Studie der <i>BAW (2006)</i> mit den Mittelwerten der Messdaten der Stationen D1 – D4 (aus dem Zeitraum 1999 bis 2011).....	99
Tabelle 15: Auftreten von Sturmfluten zwischen den Jahren 2000 und 2011	101
Tabelle 16: Messquerschnitt Q1: Tidekennwerte, Strömungsgeschwindigkeiten, sowie Flut- und Ebbestromdauer aus ADCP-Messungen 2006 bis 2010.....	106
Tabelle 17: Stauwasserdauern am Messquerschnitt Q1 (Daten aus ADCP-Messungen)	107
Tabelle 18: Kenterpunktabstände am Messquerschnitt Q1 (Daten aus ADCP-Messungen)	108
Tabelle 19: Tidekennwerte, Strömungsgeschwindigkeiten, sowie Flut- und Ebbestromdauer am Messquerschnitt Q2 (Daten aus ADCP-Messungen).....	108

Tabelle 20: Stauwasserdauern am Messquerschnitt Q2 (Daten aus ADCP-Messungen)	110
Tabelle 21: Kenterpunktabstände am Messquerschnitt Q2	111
Tabelle 22: Tidekennwerte, Strömungsgeschwindigkeiten, sowie Flut- und Ebbestromdauer am Messquerschnitt Q3	112
Tabelle 23: Stauwasserdauern am Messquerschnitt Q3 (Daten aus ADCP-Messungen)	113
Tabelle 24: Kenterpunktabstände am Messquerschnitt Q3 (Daten aus ADCP-Messungen)	113
Tabelle 25: Messquerschnitt Q4: Tidekennwerte, Strömungsgeschwindigkeiten, sowie Flut- und Ebbestromdauer am Messquerschnitt Q4	114
Tabelle 26 : Stauwasserdauern am Messquerschnitt Q4 (Daten aus ADCP-Messungen)	116
Tabelle 27 : Kenterpunktabstände am Messquerschnitt Q4 (Daten aus ADCP-Messungen)	116
Tabelle 28: Tidekennwerte von den Querprofilen Q1-Q4 (arithmetische Mittel aus ADCP-Messungen der Jahre 2006 – 2010).....	117
Tabelle 29: Veränderungen des Tidehubes von 1958-2011	150
Tabelle 30: Differenzen der Tidehöhe der Pegel zueinander anhand des 10-Jahresmittels 1958/1968	150
Tabelle 31: Differenzen der Tidehöhe der Pegel zueinander anhand des 10-Jahresmittels 2001/2011	151
Tabelle 32: Baumaßnahmen in der Unterelbe und ihre Auswirkungen ab 1962	158
Tabelle 33: Veränderungen der Strömungsgeschwindigkeiten, abgeschätzt aus Modellrechnung der BAW (Abb. 49 + 50)	160
Tabelle 34: Entwicklung der Tidekennwerte am Querprofil Q1; direkter Vergleich der Jahre 1966 und 20'11	163
Tabelle 35: Entwicklung der Tidekennwerte am Querprofil Q2; direkter Vergleich der Jahre 1961 und 20'11	164
Tabelle 36: Entwicklung der Tidekennwerte am Querprofil Q3; direkter Vergleich der Jahre 1965 und 20'11	168
Tabelle 37: Entwicklung der Tidekennwerte am Querprofil Q4; direkter Vergleich der Jahre 1960 und 20'11	170

1 Einleitung

Die Tideelbe ist einer der wichtigsten Wasserstraßen Europas und bildet die direkte Zuwegung von der südlichen Nordsee zum Hamburger Hafen. Durch die Weiterentwicklung der Schifffahrt und zum Schutz der Anwohner vor den wiederkehrenden Fluten waren im Verlauf der letzten Jahrzehnte diverse Maßnahmen zum Hochwasserschutz und mehrere Fahrrinnenanpassungen nötig. Aufgrund der damit verbundenen mannigfaltigen Eingriffe in die Morphologie und die Hydrodynamik des Elbeästuars kam es zu Änderungen der Tidewasserstände und der Strömungsgeschwindigkeiten. Schon zu Beginn des 19. Jahrhunderts wurden Aufzeichnungen über die Veränderungen in der Tideelbe begonnen, welche bis heute von den Wasser- und Schifffahrtsämtern (WSÄ) betrieben werden. Zusammen mit den aktuellen Aufzeichnungen bilden sie eine wichtige Quelle für die Ermittlung von Änderungen im Tidegeschehen sowie für die Suche nach deren Ursachen.

In der vorliegenden Arbeit wird die Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeiten seit Beginn der 1960er Jahre bis heute im Bereich Wedel (Elbe-km 643,0) bis Rhinplate-Nord (Elbe-km 676,5) anhand von Messergebnissen des Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg (WSA Hamburg) untersucht. Dafür werden aktuelle Daten sowie Daten aus Aktenarchiven dieser Ämter zugrunde gelegt.

Das übergeordnete Ziel der Arbeit besteht in der Erkennung und dem eventuellen Nachweis von Zusammenhängen zwischen den anthropogenen Eingriffen in die Unterelbe seit den sechziger Jahren des letzten Jahrhunderts und anhand der Messungen nachgewiesenen Änderungen der Tide- und Strömungsverhältnisse in dem ausgewählte Gewässerabschnitt.

Dazu werden zunächst die komplexen Wirkungsweisen der Tide in einem Ästuar erläutert und die in den letzten fünf Jahrzehnten angewandten Methoden zur Datengewinnung kurz vorgestellt (Kapitel 2 und 3).

Die Grundlage für die Untersuchungen bilden die kontinuierlich an festgelegten Stellen erhobenen Messdatenbestände des WSA Hamburg aus dem Zeitraum 1998/99 bis 2011 (Kapitel 4). Sie dienen als Bezugsbasis für die Aufarbeitung weiter zurückreichender Datenbestände, die in dieser Arbeit erstmalig aus

Handaktenarchiven zusammengetragen werden. Diese Daten decken den Zeitraum 1960 bis 1990 ab (Kapitel 5). Sie werden so aufgearbeitet, dass sie als Basis für Aussagen zu langfristigen Entwicklungen herangezogen werden können.

Das so erstmalig angewendete Verfahren der Datenaufbereitung wird ausführlich beschrieben. Stärken und Schwächen werden aufgezeigt und diskutiert und ein Weg zur Nutzung dieser Daten trotz der vor 1998 stark von den heutigen abweichenden Messtechniken aufgezeigt. Letztlich werden die so aufbereiteten Daten eingesetzt, um die Wirkung anthropogener Eingriffe in die Unterelbe der letzten 50 Jahre (insbesondere Hochwasserschutz- und Strombaumaßnahmen) auf die Veränderungen im Strömungsverhalten aufzuzeigen. Ein Vergleich der Strömungsdaten aus den sechziger Jahren des letzten Jahrhunderts mit den Daten aus dem Zeitraum 2001 bis 2011 ist geeignet, Trends im Strömungsverhalten über fünf Jahrzehnte zu erkennen und ihre möglichen Ursachen zu verdeutlichen.

2 Grundlagen

2.1. Strömungsverhältnisse in Tideflüssen

Strömungen und Wasserstände in Ästuaren sind zunächst grundsätzlich „durch die von See her einschwingende Tidewelle und dem von Binnenland kommenden Oberwassereinfluss“ bestimmt (BfG, 2008). Gleiches gilt für den tidebeeinflussten Teil der Nebenflüsse. Neben der in das System einschwingenden Tidewelle und dem zufließenden Oberwasser sind zudem meteorologische Einflüsse, lokal vorrangig die dort vorherrschenden Windverhältnisse, von hoher Bedeutung. Schließlich werden die Strömungsverhältnisse auch maßgeblich durch die Salzgehaltsverteilung im Ästuar selbst beeinflusst (Dichteströmungen aufgrund von Potenzialunterschieden).

Eine Bestimmung der Strömungsverhältnisse in Tideflüssen ist punktuell mittels verankerten Messgeräten oder profilbezogenen Messungen möglich; entsprechende Messtechniken werden in Kapitel 3 beschrieben. Fernerkundungsverfahren (z. B. Radartechnik), die eine flächendeckende Erfassung von Strömungen ermöglichen,

sind im Tidefluss bisher nur unzureichend bzw. nur in Teilgebieten einsetzbar. Da für die Tideelbe keine entsprechenden Daten bzw. auch keine aktuellen Messkonzepte vorliegen, werden Sie im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet.

Parallel zu punktuellen und profilbezogenen Messungen ist es möglich, einen großen Teil der eingangs genannten Einflussfaktoren in hydrodynamischen Gleichungen zu erfassen und Wasserstände wie Strömungen in hydrodynamischen Modellen zu simulieren. Für die deutschen Tideästuare werden derartige „HN-Modelle“ unter anderem bei der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) vorgehalten [1]. Eine kurze Diskussion hierzu für den Bereich der Tideelbe erfolgt in Kapitel 4.2.

Durch die genannten natürlichen Einflussfaktoren unterliegen die Strömungen in Tideflüssen hohen kurzfristigen und saisonalen Schwankungen, sowie erheblichen lokalen Variationen. Hinzu kommt hierbei noch die wechselseitige Beeinflussung von Hydrodynamik und Gewässermorphologie, die in der „BfG-Systemstudie Tideelbe“ (BfG, 2008) wie folgt beschrieben wird: „Änderungen in der Morphologie [...] wirken sich direkt auf das Strömungsregime und möglicherweise (insbesondere bei Vertiefungen) auf die Tidewasserstände und deren abgeleitete Größen wie Tidehub, Flut- und Ebbedauer aus. Einhergehend mit den Änderungen der Flut- und Ebbedauern treten Veränderungen sowohl im Flut- und Ebbestrom, als auch in den mittleren und maximalen Flut- und Ebbestromungsgeschwindigkeiten auf, einschließlich der Verschiebung der Kenterpunkte und der Änderung der Restströmungen, die in der Summe wiederum auf die Morphologie des Gewässers wirken. Umgekehrt wird die Morphologie eines Gewässers zu einem großen Teil geprägt durch die hydraulischen Verhältnisse. Die hydrodynamischen Parameter beeinflussen Sedimentations- und Erosionsprozesse, das anstehende Sohlsubstrat, den Feststoffhaushalt sowie Form und Struktur der Gewässersohle. Kommt es zu Änderungen der Gewässermorphologie wie z. B. einer Mündungsaufweitung durch natürlichen Materialaustrag oder durch anthropogene Eingriffe, hat das eine Änderung der hydraulischen Parameter zur Folge. Dies führt zu erneuten morphologischen Änderungen (dieser Prozess wird als morphologischer Nachlauf bezeichnet), bis sich ein neues morphologisches Gleichgewicht eingestellt hat“.

Vor dem Hintergrund dieser Komplexität von Hydro- und Morphodynamik im Tidefluss konzentriert sich die Beschreibung der „derzeitigen Strömungs- und Durchflussverhältnisse in der Tideelbe“ im Kern dieser Arbeit (Kapitel 4 und 5) auf einzelne Messpunkte bzw. Messquerschnitte. Der Fokus liegt dabei auf dem WSV-Amtsbereich Hamburg, in dem über Jahrzehnte auf gleichen Profilen mit „relativer morphologischer Stabilität“ gemessen wurde. Hier herrschen annähernde „Gleichgewichtszustände“ im Nachlauf zu großräumigen morphologischen Veränderungen wie z. B. Fahrrinnenanpassungen, sowie eine wesentlich geringere Dynamik als im Außenelbebereich, der vom WSV-Amtsbereich Cuxhaven betreut wird. Grundlegende hydrologische Betrachtungen erfolgen am Rande in Form von „Schlaglichtern“ (vgl. zunächst nachfolgendes Kapitel 2.2) sowie in Form eines kurzen Einblicks in Modelldaten der BAW, die flächendeckende Strömungsbetrachtungen erlauben (Kapitel 4.2).

2.2 Hydro- und Morphologie der Tideelbe

Die Tideelbe reicht von ihrer Mündung bis zum Sperrwerk Geesthacht, welches den Tidebereich künstlich begrenzt. Innerhalb dieses Bereiches unterliegt die Tideelbe den im vorherigen Abschnitt angeführten Einflussfaktoren. Durch die hydrologischen Vorgänge, insbesondere den Tideneinfluss, aber auch den Oberwasserzufluss, sowie meteorologischen Einflüssen kommt es zu variierenden hydrodynamischen Verhältnissen unter wechselseitiger Beeinflussung von Hydrodynamik und Gewässermorphologie. Dabei wird „die einschwingende Tide durch Reibung und Reflexion [im Flussverlauf] in ihrer Form verändert“ (BfG, 2008).

„Nachlaufprozesse sind Reaktionen des Systems auf Eingriffe [wie z. B. Fahrrinnenanpassungen]. Das Gewässerbett schwingt sich neu ein, bis dahin wird viel Material umgelagert. Durch die Wechselwirkungen bleibt es nicht bei einer unmittelbaren Rückkopplung, etwa indem eine Baggerung durch Sedimentation ausgeglichen wird und dann Ruhe eintritt. Auf Entnahmen reagiert der Fluss mit verstärkter Strömung, die ein noch weiteres Gewässerbett als Gleichgewicht

anstrebt. Dies führt zu zusätzlichem Materialaustrag in die Nordsee. Die Bündelung der Strömung auf die Haupttrinne wird ebenfalls gefördert; die Randbereiche erfahren Sedimentationen“ (WSD, 2005).

Anders als bei einer ungestörten Tidewelle auf hoher See, bei der die Kenterpunkte der Strömung in Nulllage der Welle auftreten, verschiebt sich das Kenterereignis in Flüssen je mehr die Tidewelle durch die umgebenden Landmassen und die fehlende Wassertiefe am Grund reflektiert wird. Die Flutdauer verkürzt sich und führt zu einer Verformung der Tidekurve. „Weiterhin tragen zur Deformation der Tidewelle die wasserstandabhängige Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit und das Trockenfallen von Wattflächen bei. Vor allem aber ist für die Asymmetrie zwischen Ebbe und Flut die wasserstandabhängige Sohlreibung verantwortlich“ (BfG, 2008). Das Eintreffen des Scheitelpunktes der Tide verschiebt sich „[...] Auch wird durch die Reflektion der Tidewelle [...] und Einengung des Gewässerquerschnittes die Amplitude der Tidewelle grösser“ (Boehlich, 2003 vgl. Abb.1).

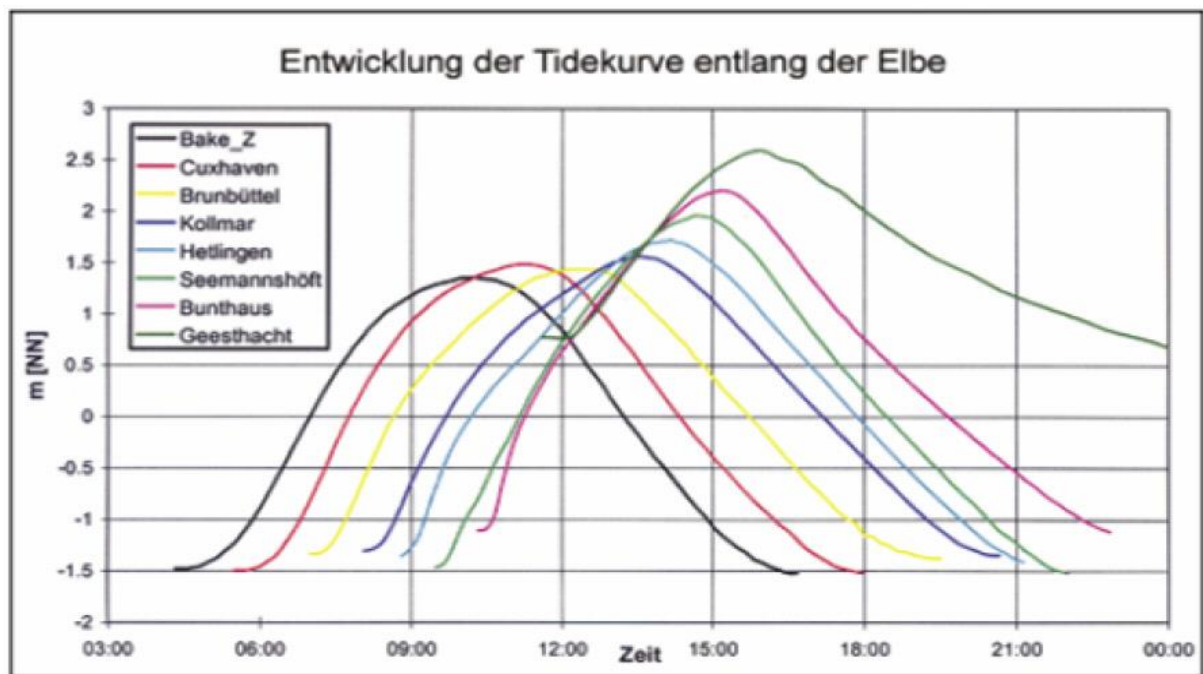


Abbildung 1: Räumliche Veränderung der Tidekurve entlang der Elbe, nach Boehlich (2003)

Umfassende Beschreibungen zu den Tide- und Strömungsverhältnissen im Elbeästuar finden sich u. a. in Boehlich (2003) und in BfG (2008). Nachfolgend seien unter Hinweis auf diese Veröffentlichungen wesentliche derzeitig geltende Charakteristika der Tideelbe zusammengefasst (nahezu unveränderte Übernahme

aus WSA (2006)). Die hierbei verwendeten sowie weitere Tidekennwerte sind in Kapitel 2.3 grundlegend beschrieben.

„Tidewasserstände

- Das ausgeprägte Maximum im Tidehub [Thb] liegt ca. 5 Elbe-km oberhalb von Hamburg St. Pauli. [bei Elbe-km 623,1. Der mittlere Tidehub (MThb) beträgt an dieser Stelle 365 cm (Stand 2011)]
- Das Minimum des Tidehubes [mit 297 cm in Cuxhaven und 309 cm am Pegel Stadersand] liegt zwischen Cuxhaven und Stadersand ca. 8 Elbe-km oberhalb von Brunsbüttel bei St. Margarethen [Elbe-km 690].
- Das Thw [Tidehochwasser] ist im Gebiet der Außenelbe bis ca. 10 Elbe-km oberhalb Brunsbüttel fast konstant, von dort bis Geesthacht steigt es nahezu linear an. Der Anstieg von Glückstadt bis St. Pauli beträgt ca. 60 cm.
- Das Minimum des Tnw [Tideniedrigwassers] liegt ebenfalls ca. 5 Elbe-km oberhalb [von] Hamburg St. Pauli. Von dort steigt es nahezu linear bis zum Wehr Geesthacht an. Die Differenz ist von der Oberwassermenge abhängig. Das Maximum des Tnw liegt im Bereich unterhalb Hamburg bei Glückstadt.
- Das Tnw ist in der Glückstädter Nebanelbe dem Betrage nach größer als das Thw. Der Thb liegt dort unter 3 m. Eine vergleichbare Situation findet sich in der Nebanelbe hinter Schwarztonnensand (Thb ca. 3 m) und ebenso verhält sich die Situation in der Pagensander Nebanelbe (Thb 3 m). In der Lühesander Süderelbe ist der Thb größer als 3 m und steigt stromauf leicht an. In der Hahnöfer Nebanelbe ist der Thb im oberstromigen Bereich größer 3,5 m.
- In der Süderelbe liegt das Thb-Maximum am Reiherstieg. Der Thb fällt weiter stromauf durch Anstieg des Tnw stärker ab.

Flutdauer

- Sie beträgt stromab von Cuxhaven nicht ganz 6 Stunden und stromauf bei Zollenspieker nur noch 4 Stunden. Bei Brunsbüttel ist sie geringer als in Cuxhaven und Glückstadt.
- In der Glückstädter Nebanelbe ist die Flutdauer etwa 70 min kürzer als die Ebbedauer.
- In der Nebanelbe hinter Schwarztonnensand ist die Flutdauer im oberen Abschnitt etwa 105 min kürzer als die Ebbedauer.

- In der Pagensander Nebelbe ist die Flutdauer im oberen Abschnitt ebenfalls etwa 105 min kürzer als die Ebbedauer.
- In der Lühesander Süderelbe ist die Flutdauer im oberen Abschnitt ebenfalls etwa 105 min kürzer als die Ebbedauer.
- In der Hahnöfer Nebelbe ist die Flutdauer im oberen Bereich mehr als 120 min kürzer als die Ebbedauer.
- Am Reiherstieg in der Süderelbe ist die Flutdauer mehr als 140 min kürzer als die Ebbedauer.

Diese Differenz nimmt stromauf durch die zunehmende Dominanz des Oberwassers gegenüber den Tideströmungen weiter zu.

Flutstromdauer

- Sie beträgt zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel etwa 6 Stunden. Von Brunsbüttel bis St. Pauli nimmt sie auf unter 5 Stunden linear ab.
- Von St. Pauli bis Zollenspieker nimmt sie schließlich auf 2 Stunden ab.
- In der Glückstädter Nebelbe liegt die Flutstromdauer geringfügig unter 6 Stunden.
- In den Nebelben hinter Schwarztonnensand (im oberen Bereich) und [...] Pagensand liegt die Flutstromdauer nur noch bei ca. 5 1/2 Stunden, in der Lühesander Süderelbe liegt sie im Mittel nur noch bei 5 Stunden und ebenso in der Hahnöfer Nebelbe.
- In der Süderelbe nimmt die Flutstromdauer von 5 Stunden im Mündungsbereich auf unter 4 Stunden bei Bunthaus ab“ (WSA, 2006).

Ebbestrom und Ebbedauer verhalten sich analog zu den gerade erwähnten Flut(strom)bedingungen.

Morphologische Veränderungen

Durch die sich dauernd verändernden Strömungslagen der Tideelbe verändert sich auch die Morphologie der Gewässersohle ständig. Durch die Schleppwirkung der Strömungen kommt es zu Erosionen und Sedimentationen. Auch können Starkregenereignisse, Schneeschmelze und Sturmfluten zu erhöhten Strömungslagen und damit zu einer Veränderung der Morphologie führen (vgl. Malcherek, ohne Datum). Größere, rein geogene, z. T. zyklische Veränderungen der

Morphologie im Außenelbebereich (bzw. „Mündungstrichter“ der Tideelbe) können die Hydrodynamik im inneren Ästuar signifikant beeinflussen; dies war zuletzt im Jahr 2008 bei einem Durchbruch im Bereich Medemrinne – Klotzenloch sichtbar [5].

Weiterhin führen anthropogene Eingriffe in die Gewässermorphologie zu (beabsichtigten wie auch unbeabsichtigten) Veränderungen der Hydrodynamik. Für die Tideelbe seien beispielhaft die folgenden Arten von Baumaßnahmen genannt (modifiziert zitiert nach *BfG, 2008*):

- Bauwerke im und am Fluss, mit denen regulierend in die Wasserführung eingegriffen wird (z.B. Wehr Geesthacht, Buhnen und Leitwerke).
- wiederholte Ausbauten der Fahrrinne in der Unter- und Außenelbe (Verringerung der Energiedissipation infolge Bodenreibung und in der Vergangenheit Schaffung zweier dominanter Reflexionsstellen im Stromspaltungsgebiet Hamburgs)
- Absperrung von Nebeneiben bzw. Reduzierung des Tidevolumens durch Abdämmungen/Verfüllungen/etc., so geschehen z.B. im Raum Hamburg durch die Absperrung der Nebeneiben „Alte Süderelbe“ und „Doveelbe“ sowie Verfüllung von Hafenbecken seit den 1980er Jahren zur Herstellung von neuen Hafenumflächen.

„Die dargestellten Eingriffe sind im Zusammenhang mit der morphologischen Entwicklung der Tideelbe zu sehen. Prinzipiell ist davon auszugehen, dass folgender Wirkungskreislauf besteht: Je mehr Bereiche im Tiderraum verlanden oder z. B. durch Eindeichungen verloren gehen, umso mehr werden Verlandungstendenzen in den oberen Abschnitten der Tideelbe verstärkt. In der Summe kommt es zu einer deutlich messbaren Veränderung der Hydrologie des Systems in den vergangenen 50 Jahren“ (*BfG, 2008*). In Tabelle 1 sind die wichtigsten Baumaßnahmen in der Tideelbe seit 1962 zusammengefasst. Ihr Einfluss auf die Strömungsverhältnisse und damit der „anthropogene Anteil“ von Veränderungen seit den 1960er Jahren wird in Kapitel 6 vertieft diskutiert.

Tabelle 1: Baumaßnahmen an der Tideelbe seit 1965, von denen ein Einfluss auf die Strömungsverhältnisse nicht auszuschließen ist

Maßnahme	Zeitraum
Absperrung Alte Süderelbe, neue Deichlinie Harburg bis Este	1962 - 1967
Absperrung Billwerder Bucht mit Kanälen	1963 - 1969
Vordeichungen Geesthacht bis Billwerder Bucht	1963 - 1973
Fahrwasservertiefung auf 12 mKN	1964 - 1969
Absperrung der Lühe	1967
Absperrung d. Oste	1968
Absperrung Pinnau und Krückau, Eindeichung des Vorlandes	1969
Eindeichung Hahnhöfer Sand und vor Schwinge-, Pinnau-, Krückaumündungen	1969 - 1974
Absperrung Schwinge, Eindeichung Bützflether Sand	1971
Eindeichung Nordkehdingen	1971 - 1976
Eindeichung Hahnöfer Sand, Absperrung Borstler Binnenelbe	1973 - 1974
Fahrwasservertiefung auf 13,5 mKN	1974 - 1978
Absperrung der Stör	1975
Eindeichung Haseldorfer Marsch	1975 - 1977
Eindeichung Krautsand	1977
Fahrwasservertiefung auf 14,5 mKN	1998 - 2000
Maßnahmen im Hamburger Hafen, wie Teilverfüllung Mühlenberger Loch, Aufweitung Süderelbe, Hafenumstrukturierung	2001 - 2002

[Quelle: BfG,2008]

2.3 Tidekennwerte

In Abbildung 2 und Abbildung 3 sind wesentliche Tidekennwerte des Wasserstandes und der Strömung zusammengefasst, auf die in den nachfolgenden Kapiteln bei der Beschreibung der Strömungs- und Durchflussverhältnisse der Tideelbe zurückgegriffen wird. Im Methodenwiki der BAW [2] findet sich in Ergänzung zu den Grafiken eine ausführliche schriftliche Dokumentation zu den dargestellten sowie weiteren Tidekennwerten.

Eine Tide dauert im Mittel 745 Minuten (12h 25min), dieser Zeitraum wird als Tidedauer (T_T) bezeichnet und verläuft wie folgt (vgl. Abbildung 2): Ausgehend von Tideniedrigwasser (T_{nw}) läuft das Wasser in das System ein bis an einem Punkt das Tidehochwasser (T_{hw}) erreicht ist. Diese Zeit wird als Flutdauer (T_F) bezeichnet. Die Differenz des Wasserspiegels zwischen T_{nw} und T_{hw} nennt man Tidehub (T_{hb}). Dieser ist aufgeteilt in Tidenstieg und Tidenfall, je nachdem ob Wasser auf- oder abläuft.

Das arithmetische Mittel wird als Tidehalbwasser, das Integralmittel als Tidemittelwasser (T_{mw}) bezeichnet. Nach dem Tidehochwasser (T_{hw}) verläuft die Tide umgekehrt und der Wasserstand nimmt ab bis Tideniedrigwasser (T_{nw}) erreicht ist. Dieser Zeitraum wird Ebbedauer (T_E) genannt. Das Gefälle zwischen T_{nw} und T_{hw} führt zu Strömungen des Wassers, um den entstehenden Unterschied auszugleichen. Die Zeiträume der entstehenden Strömungen sind nicht mit Flut- und Ebbedauer identisch, vielmehr ist hier, wie aus Abbildung 2 ersichtlich, zwischen Flutstromdauer (T_f) und Ebbestromdauer (T_e) zu unterscheiden, die nicht durch die Tidescheitel (T_{nw} und T_{hw}), sondern durch die Kenterpunkte K_f und K_e begrenzt werden. Flut- und Ebbestromkenterpunkt treten im Tidefluss zeitlich nach den gemessenen Tidehoch- bzw. Tideniedrigwasserständen (Scheitelpunkten) auf. Der Zeitraum zwischen Kenter- und Scheitelpunkt wird Kenterpunktabstand genannt und nach dem jeweiligen Tideereignis bezeichnet (Kenterpunktabstand k_f für Flut bzw. Kenterpunktabstand k_e für Ebbe).

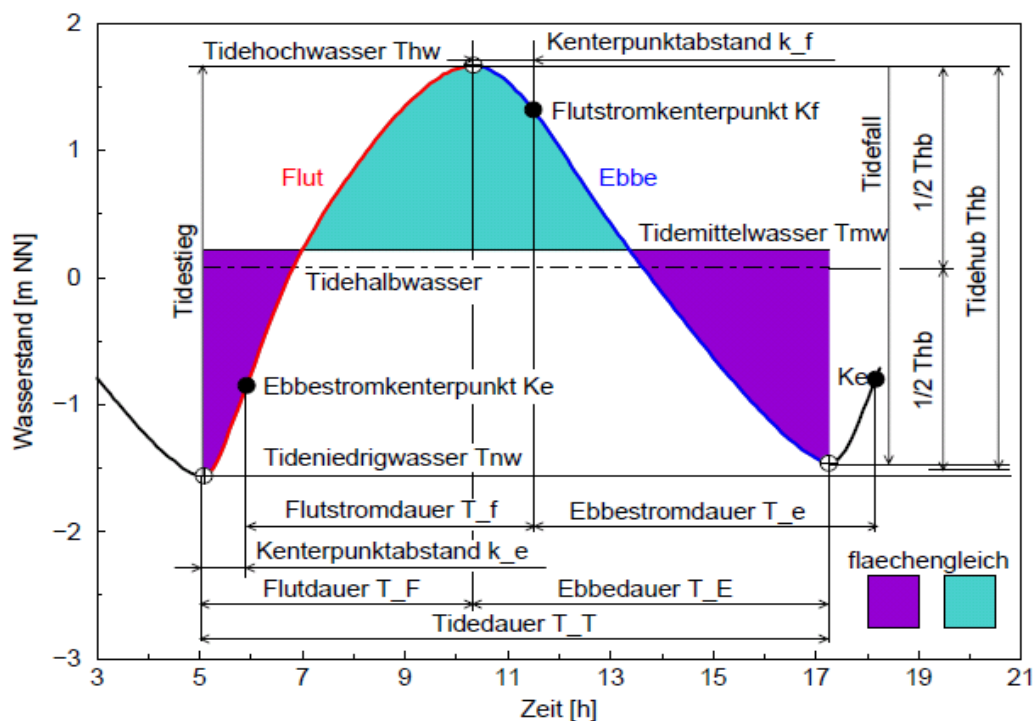


Abbildung 2: Tidekennwerte des Wasserstandes [2]

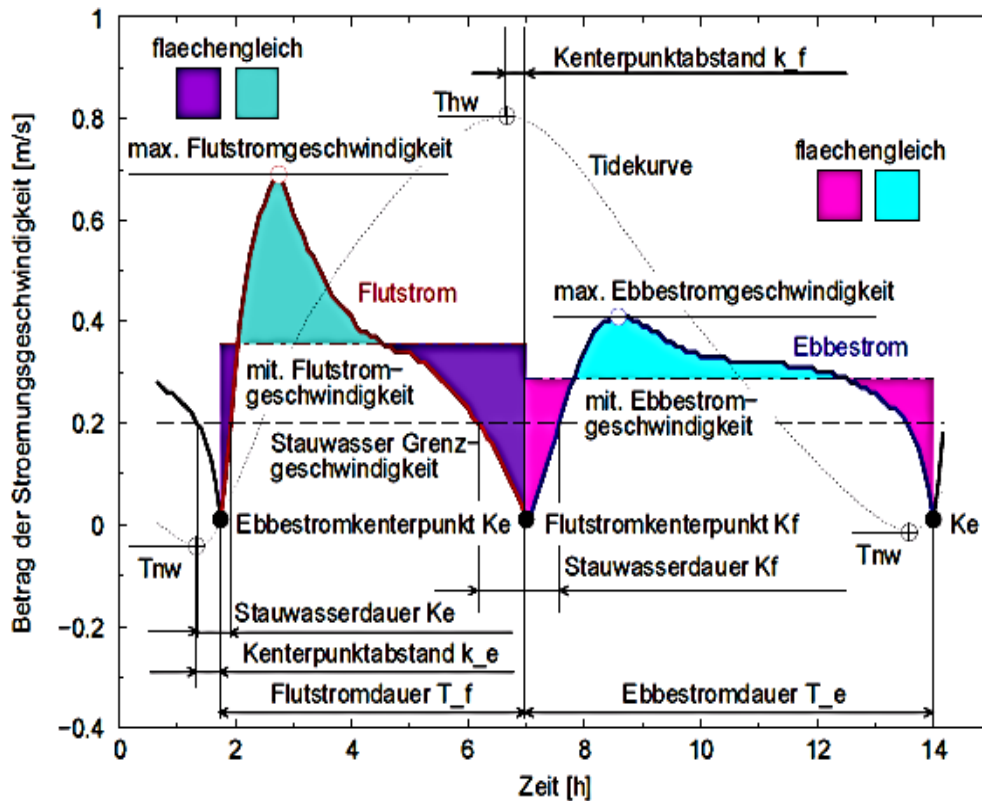


Abbildung 3: Tidekennwerte der Strömung [2]

Während der Stromdauern verändern sich die Geschwindigkeiten der Strömungen. Der Zeitraum, in dem sich das Wasser unterhalb von 0,2 m/s bewegt, wird als Stauwasserdauer des jeweiligen Flut- bzw. Ebbstromes bezeichnet (Stauwasserdauer K_e bzw. K_f).

In Abbildung 3 ist, beginnend beim Niedrigwasserereignis T_{nw} , eine typische (beispielhafte) Strömungskurve abgebildet, wie sie im Tidefluss bzw. im Bereich der deutschen Bucht bzw. in den Ästuaren von Elbe, Ems und Weser auftritt: Nach dem Kenterpunktabstand (k_e) setzt ab dem Ebbestromkenterpunkt (K_e) die Strömung ein und steigt im obigen Beispiel bis zu einer maximalen Flutstromgeschwindigkeit von etwa 0,7 m/s an. Anschließend fällt sie ab und wechselt schließlich nach dem Flutstromkenterpunkt ihre Richtung (einsetzender Ebbestrom). Die Ebbestromgeschwindigkeit steigt bis zu einer maximalen Ebbestromgeschwindigkeit von etwa 0,4 m/s an, die unterhalb der maximalen Flutstromgeschwindigkeit liegt. Nach Erreichen des Maximums verringert sich die Strömungsgeschwindigkeit wiederum bis hin zum nächsten Ebbestromkenterpunkt.

Die Flutstromdauer T_f ist kürzer als die Ebbestromdauer T_e . Im Kontext sei hier mit Hinweis auf Kapitel 2.2 nochmals Boehlich (2003) zitiert, der die Flutdauer am Pegel Helgoland mit 341 Minuten und die Ebbedauer mit 404 Minuten, am Pegel St. Pauli mit 303 Minuten (Flutdauer) und 442 Minuten (Ebbedauer) angibt; Flut- und Ebbestromdauern ergeben sich analog zueinander.

3 Messtechniken und Auswerteprogramme

In dieser Arbeit werden für einen ausgewählten Abschnitt der Tideelbe erstmals aktuelle WSV-Messdaten mit Altdaten verglichen, die auf vergleichbaren Positionen über einen Zeitraum von 50 bis 60 Jahren erfasst wurden. Bei den Altdatenbeständen wird auf einen Datenpool zurückgegriffen, der über die Zeit verschiedenen Veränderungen, sowohl in der Messtechnik als auch der Art und Qualität der Auswertung unterworfen war. Zu Beginn der Strömungsmessung wurde noch mittels Schwimmkörpern gearbeitet, heute beruhen die Messungen auf dem akustischen Dopplereffekt (ADCP). In der Zwischenzeit wurden über die Jahre noch andere Methoden verwendet. Parallel entwickelte sich auch die Sensitivität der Messtechniken weiter, was zu genaueren Ergebnissen führte. In der nachfolgenden Tabelle 2 (abgewandelt nach Rhode (1971)) werden die verschiedenen Messtechniken, aufgeteilt nach ihren physikalischen Prinzipien, aufgeführt. Die Tabelle enthält auch Angaben über die Anwendungsfelder der einzelnen Verfahren, sie hat aber keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Die Bezeichnungen hinter den Messverfahren weisen auf die Anwendbarkeit in bestimmten Gebieten hin. Ein M weist auf eine überwiegende Anwendung im Modellversuch, N auf Anwendung in der Natur hin. B steht für Binnengewässer und T für Tidegewässer. Eine Einklammerung mit runden Klammern () weist auf eine eingeschränkte Nutzung in diesem Bereich hin, ein Einklammern in eckigen Klammern [] bezeichnet die Hauptanwendungsgebiete. Die in der rechten Spalte aufgezeigten Verfahren finden, bis auf die den Dopplereffekt nutzenden Verfahren, kaum Anwendung.

Tabelle 2: Verfahren der Strömungsmessung

Verfahren zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten		
Unmittelbare Messungen	Mittelbare Messungen	
	Strömungswiderstand/Staudruck	andere physikalische Wirkungen
<u>Schwimmer</u>	<u>Unmittelbare Druckmessung</u>	<u>Wärme</u>
Oberflächenschwimmer [N] [M] [B] [T]	Pitotrohr (N) M B (T)	(Hitzedraht)
Tiefenschwimmer [N] (M) [B] (T)	Prantrohr (N) M B (T)	<u>Elektr. Wirkung</u>
Logmessungen N - (B) T	<u>Pendelausschlag</u>	(Feldänderung)
<u>Stoffliche Indikatoren oder physikalische Verfahren:</u>	Wasserrad (~1770) N - B T	
Luftblasen N (M) B (T)	Tauchstab N - B -	<u>Doppler Effekt</u>
Farbstoffe N M B (T)	Pendelstrommesser - [M] [B] [T]	Ultraschall
Salz N (M) B -	<u>Zugkraftmessung</u>	Laser
Isotopen N (M) B -	Seilzug N - B -	<u>Elektrolyse</u>
<u>Ultraschall</u> N - B T	<u>Umdrehungsmessung</u>	
<u>Radar</u> N - B T	Hydrometrische. Flügel (~1790) (Schraube) [N] [M] [B] [T]	
	(Schalenkreuz) N - B T	
	Wasserrad [N] (M) (B) [T]	
	Schaufelrad [N] - - [T]	

[abgewandelt nach Rhode (1971)]

Die in dieser Arbeit verwendeten Daten des WSA Hamburg wurden bis einschließlich 1979, ebenso wie die parallel laufenden Messungen im WSV-Amtsbereich Cuxhaven, mittels Ott-Schwimmflügeln gemessen. „Alle Messungen wurden als Punktmessungen mit Schwimmflügeln (Ott V Arkansas) vorgenommen. In jeder Lotrechten wurde mindestens in 4 Meßpunkten gemessen, meistens in 5 und 6 Meßpunkten. Der zeitliche Abstand der Messungen einer Lotrechte beträgt in der Regel nicht mehr als 15 Minuten, die Meßdauer in jedem Meßpunkt betrug 100 Sek“ (Rhode, 1967). Hierzu wurden bis zu 5 Schiffe über das jeweilige Querprofil verteilt, verankert und die Position mittels Sextanten eingemessen.

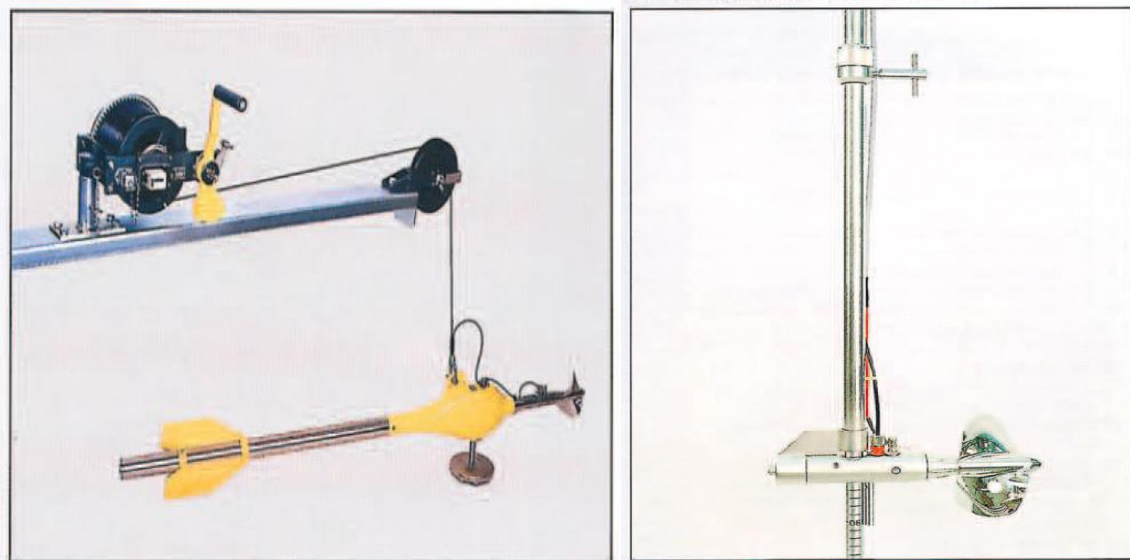


Abbildung 4: Hydrometrische Messflügel der Firma Ott, links Schwimmflügel „Delphin“, rechts Stangenflügel

[Quelle: Fa. Ott]

„Ab 1980 wurde nur noch mit Aanderaa-Dauerstrommeßgeräten RCM4 und Nachfolgemodellen gemessen. Während die Ottflügelschaukeln im turbulenten Fließgewässer „Elbe“ sowohl horizontal als auch vertikal oder winklig angeströmt werden können, reagiert der Rotor des Aanderaa-Meßgerätes nur auf horizontale Anströmung. Abweichungen in den Meßergebnissen im Feldeinsatz sind somit vorprogrammiert“ (Vagts, 1992).

Weitergehende Betrachtungen darüber und ein Vergleich der Messgeräte finden sich bei Vagts (1992) sowie Dammschneider/Düber (1994) wo „... zusammenfassend festgestellt werden [kann], daß die im deutschen Küstenbereich eingesetzten Strömungsmeßgeräte des Typs „Aanderaa RCM4“ bei Parallelversuchen im Normalbetrieb des Natureinsatzes (Tidegebiet der Unterelbe) nur relativ geringfügige Abweichungen zu Meßflügeln (Fa. Ott) [...] zeigen. Die Größenordnungen der maximalen Gerätedifferenz [...] betragen [...] nicht mehr als 10%, was unter Berücksichtigung der kleinräumig-turbulenten Prozesse der Naturmeßgebiete als natürliche Schwankungsbreite akzeptiert werden muss“ (vgl. Dammschneider/Düber, 1994).

Weiterhin „ist festzustellen, daß der Sprung in der Entwicklung der Fließgeschwindigkeit in den Jahren 1977 bis 1979/1980, dem Übergang des

Meßverfahrens von Ott-Schwimmflügeln zu Aanderaa-Dauerstrommeßgeräten und der entsprechenden Meßwerterfassung und –auswertung, nicht eindeutig auf [nur] einen Unsicherheitspunkt zurückzuführen ist [...]. Ein für alle Fälle gültiger Korrekturfaktor für die Messungen vor 1977/78 oder die Messungen ab 1979/80 ist somit nicht anwendbar“ (Vagts, 1992).



Abbildung 5: Aanderaa-Messgeräte, links RCM-4 mit impellergesteuerter, rechts Seaguard-RCM mit akustischer Messeinheit

Die nächste Umstellung der WSV-Messungen an der Tideelbe erfolgte mit dem Wechsel von impellergesteuerten Strömungsmessern der RCM-Reihe mit Rotorkopf (bis Aanderaa Typ RCM7) hin zu hydroakustischen Strömungsmessmethoden nach dem Doppler-Prinzip (ab Aanderaa-Gerätetyp RCM 9; Nutzung im WSV-Amtsbereich Hamburg ab Ende der 1990er Jahre). Auch das Einführen von automatisch angewandten Logarithmen zur Neigungskompensation des Gerätes hat die Ergebnisse der Messungen verfeinert. Mit den heute gebräuchlichen, seitens der WSV ab 2010 eingesetzten Seaguard-RCM-Geräten ist eine Aufzeichnung in 2-Sekunden-Abständen möglich, Die Auswertung und Bedienung erfolgt mittels Touchscreen und SD-Speicherkarten. Derzeit befindet sich an den WSV-Dauermessstationen zudem eine Funkübertragung im Aufbau, so dass die Strömungsdaten zukünftig sofort online verfügbar sein werden (vergleiche mit der

Datenerfassung im Jahr 1970 in Abb. 6). In einem „erweiterten [WSV-]Dauermessnetz werden in der Hauptelbe zukünftig an insgesamt 15 Stationen 5-minütige Mittelwerte von Strömung, Trübung, Salinität und Sauerstoff aufgezeichnet. An ausgewählten Stationen wird zudem der Sauerstoffgehalt erfasst. Die Messung erfolgt auf zwei Ebenen je Station (oberflächennah und sohnah). [...] [In 2010 wurde] nicht nur eine neue Generation von Messgeräten beschafft, sondern auch die zukünftige Anbindung der 15 Messstationen an ein Fernübertragungsnetz beauftragt. [...] Im Zuständigkeitsbereich des WSA Hamburg kommen 6 bojengebundene Messstationen zum Einsatz“ (*Entelmann und Grellus, 2010*).

Ebenso wie die Messtechniken haben sich auch die Auswerteverfahren deutlich in Qualität und Darstellung verändert, von den handschriftlichen Messlogbüchern über die ersten Versuche der EDV-Bearbeitung bis zu der Aufbereitung mittels aktuell im WSA Hamburg eingesetzter Spezialsoftware („SISKü“, „TIDE“, u. a.). So können die gewonnenen Daten immer schneller und immer genauer aufgearbeitet und ausgewertet werden.

Grundlegende Veränderungen haben sich in jüngerer Zeit im WSV-Amtsbereich Hamburg bei den Querprofilmessungen ergeben. Während die im Kapitel 4 betrachteten alten Profilmessungen mittels einer Vielzahl der vorgenannten Messgeräte durchgeführt wurden, kommt ab 2006 die ADCP-Messtechnik (moving boat) zum Einsatz. Hier erfolgt die Ermittlung des Strömungsprofils zu diversen Zeitpunkten einer Tide auf Grundlage der Messergebnisse eines am Schiffsboden installierten ADCP-Messgerätes, das während Querprofilfahrten des Schiffes Messdaten aufzeichnet. Die ADCP-Messtechnik ist wesentlich günstiger, weniger fehleranfällig sowie genauer als die alte „Vielzahlmessung“.

4 Derzeitige Strömungsverhältnisse in der Tideelbe

4.1 Messergebnisse

In der Hauptelbe werden seit 1998 Dauerströmungsmessungen an den Stationen D1 bis D4 (WSA Hamburg), sowie seit 2000/2004 in Bunthaus und Nienstedten/Teufelsbrück (HPA) durchgeführt (Stand: Juli 2011, siehe Abb. 8). „Weiterhin wurden in der Vergangenheit beginnend [im Jahr] 1997 folgende Messstationen im Amtsbereich des WSA Cuxhaven betrieben: LZ5 (bis Mitte 2005); LZ2, LZ3 und LZ4b (bis Mitte 2006); LZ1 und LZ4 (bis Mitte 2009). Die Messungen mussten aufgrund zu geringer Wassertiefen (Versandung im Bereich der Messpfähle) bzw. an der Station LZ4b aufgrund zu großer Wassertiefe [und damit verbundener Standsicherheitsgefährdung des Messpfahls] eingestellt werden“ (WSA, 2012).

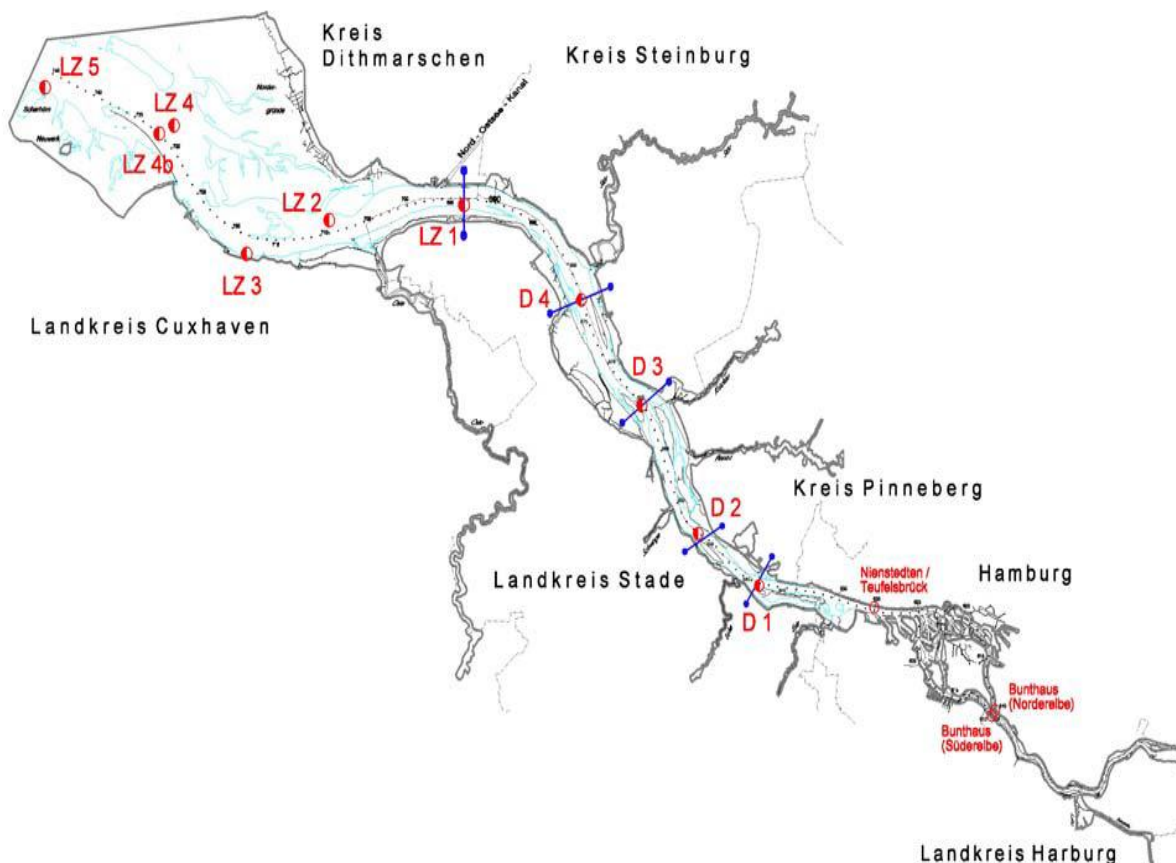


Abbildung 8: Lage der Dauermessstationen (rot) und der Querprofilmessungen (blau) der Beweissicherung

[Quelle: WSA, 2012]

Der überwiegende Teil der Stationen wurde im Rahmen der Beweissicherung zur letzten Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe eingerichtet und betrieben – im Planfeststellungsbeschluss von 1999 [3] sind entsprechende Auflagen für Strömungsmessungen festgeschrieben. An den Stationen LZ1 sowie D1 bis D4 waren hiernach zudem einmal jährlich über eine komplette Tide Querprofilmessungen durchzuführen, aus denen ein horizontales Strömungsprofil ermittelt werden kann. „Im Amtsbereich Cuxhaven (LZ1) erfolgt[e] dies seit 1998, im Amtsbereich Hamburg (D1 bis D4) seit 2006 mit einem ADCP-Gerät (moving boat - Methode). Vor 2006 wurden die jährlichen Querprofilmessungen an D1 bis D4 mit einer Vielzahl von (Punkt-)Messgeräten durchgeführt“ (WSA, 2012).

Nachfolgend werden Tidekennwerte aus den gewässerkundlichen Jahren 1999 – 2011 mit Fokus auf den Zehnjahres-Zeitraum 2001/2011 beschrieben, die im Rahmen dieser Arbeit im WSV-internen Datenbanksystem SISKü (Strömungs-InformationenSystemKüste), mittels der Spezialsoftware TIDE der BfG (Auswertung von ADCP-Messungen) sowie mit Hilfe von Excel ausgewertet wurden. In Kapitel 4.1.1 erfolgt zunächst eine Betrachtung zu den Dauermessstationen D1 bis D4, die den Schwerpunkt der entsprechenden Arbeiten bildet. Anschließend werden in Abschnitt 4.1.2 ergänzend Querprofilmessung seit 2006 behandelt. Bezüglich der Lage der zumeist am Rand der Hauptrinne liegenden Messstationen und der Querprofile sei auf Abbildung 8 sowie die Darstellungen in den folgenden Kapiteln verwiesen.

„Ziel der Querprofilmessungen ist die Gewinnung zusätzlicher Informationen bezüglich der Veränderungen der Strömung an der jeweiligen Dauermessstation. Unter anderem können die Repräsentativität der Dauermesswerte überprüft und Verlagerungen des Stromstrichs über mehrjährige Zeiträume festgestellt werden. Gleichzeitig werden aus den Messungen Durchflussmengen [...] ermittelt“ (WSA Hamburg, 2012).

4.1.1 Auswertung zu den Dauermessstationen D1-D4 im Zeitraum 1999-2011

Die im Rahmen der Beweissicherung zu den Auswirkungen der Fahrrinnenanpassung von 1997 eingerichteten Dauermessstationen D1-D4 messen mit je zwei lotrecht angeordneten Messgeräten in Sohl- sowie Oberflächennähe die Parameter Strömungsgeschwindigkeit und -richtung, Temperatur und Leitfähigkeit sowie (seit 2006) Trübung und z. T. (seit 2008) den Sauerstoffgehalt. Ausgewertet wurden an den vier Messstationen gesammelte Daten zur Strömung seit dem gewässerkundlichen Jahr 1999.

Tabelle 3: Beschreibung der Dauermessstationen D1-D4

Messortname	Ort Elbe-km	Lage	Bezugs-pegel	Betriebs-zeit	Art der Messung	Auswertung	Bemerkung
D1 Westspitze Hanskalbsand	643,0	N= 53°33'59" E= 9°40'24"	Pegel Schulau	Ab 24.11.1997	Dauer- messung (unter- brochen nur in Winter- monaten mit Eisgefahr)	5-Minuten- Mittelwerte: Ebbe- Mittelwerte, Ebbe- Maximalwerte , Flut- Mittelwerte, Flut- Maximalwerte , Tiden- Mittelwerte	Aanderaa- RCM7 u. 9 sowie Aanderaa- Seaguard-- Messgeräte
D2 Lühesand West	651,1	N= 53°36'31" E= 9°34'14"	Pegel Hetlingen	Ab 24.11.1997			
D3 Pagensand Nord	664,7	N= 53°42'45" E= 9°28'35"	Pegel Kollmar	Ab 24.11.1997			
D4 Rhinplate Nord	676,5	N= 53°47'50" E= 9°22'24"	Pegel Glückstadt	Ab 24.11.1997			

In den nachfolgenden Kapiteln 4.1.1.1 bis 4.1.1.4 werden jeweils Lage, Strömungsverteilung, die mittlere Tideströmungskurve (MTSK) sowie die relevanten Tidekennwerte der Dauermessstationen D1 bis D4 (s. Tab. 4) diskutiert. Dies geschieht im relativ umfangreichen Maße, da bisher im Zuge der seit 1997 laufenden Beweissicherung lediglich die mittleren und mittleren maximalen Strömungsgeschwindigkeiten der Gewässeroberfläche betrachtet wurden.

Betrachtungen der Sohlmessungen fehlen. Weiterhin werden erstmals die Ergebnisse älterer Vielpunkt-Flügelmessungen den „modernen“ Messungen mittels Aanderaa-Sonden sowie ADCP-Messungen gegenüber gestellt. Die über einen Gesamtzeitraum von 50 – 60 Jahren erstmalig aufbereiteten Tidekennwerte bilden hierbei die Grundlage für weitere vergleichende Arbeiten.

Wie später in Kapitel 5 deutlich wird, fehlt für die Vergangenheit („Altmessungen“ bzw. „Altdaten“) eine zufriedenstellende Dokumentation. Der Wert dieser Arbeit liegt u.a. in der, soweit möglichen, Aufarbeitung der Altdaten zu den Tidekennwerten und in der ausführlichen Dokumentation der aktuellen Messdaten, ebenfalls in Form von Tidekennwerten. Die Arbeit ergänzt hinsichtlich der aktuellen Messdaten die Archivierung im StrömungsInformationsSystemsKüste (SISKü) der WSV durch die Aufarbeitung der Altdaten. Tabelle 4 fasst die für die Arbeit ermittelten und im weiteren Verlauf diskutierten Tidekennwerte der Messstationen D1 bis D4, sowie verwendete Kürzel, zusammen. Wo möglich, wird im Folgenden auch ein Vergleich mit den im Bericht zur Beweissicherung zur letzten Fahrrinnenanpassung (*WSA Hamburg, 2012*) vermerkten Daten und Entwicklungen durchgeführt.

Tabelle 4: Tidekennwerte

Tidekennwert	Bezeichnung
Mittlere Flutstromgeschwindigkeit	V_fm
Maximale Flutstromgeschwindigkeit	V_fmax
Mittlere Ebbestromgeschwindigkeit	V_em
Maximale Ebbestromgeschwindigkeit	V_emax
Flutstromdauer	T_f
Ebbestromdauer	T_e
Stauwasserdauer	Stauwasserdauer Kf und Ke
Kenterpunktabstand	Kenterpunktabstand k_f und k_e

4.1.1.1 Dauermessstation D1

Lage der Station und grundlegende Charakteristik

Die Messstation D1 ist bei Elbkilometer 643,0 verankert. Sie befindet sich ca. 18 m entfernt von der in Abbildung 9 dargestellten Position 4 der Querprofilmessung (dort wurden vor 2006 Vielpunktmessungen anstatt von ADCP-Messungen durchgeführt) entfernt. Charakteristisch für die in einer Prallhangsituation gelegenen Messstation D1 ist, dass bei Flutstrom maximale Flutströmungsgeschwindigkeiten bezogen auf das Querprofil auftreten. Bei Ebbestrom verlegt sich der Stromstrich so, dass sich „über die nahezu gesamte Halbtide“ (WSA, 2012) maximale Ebbestromgeschwindigkeiten auf der anderen Uferseite ausbilden.

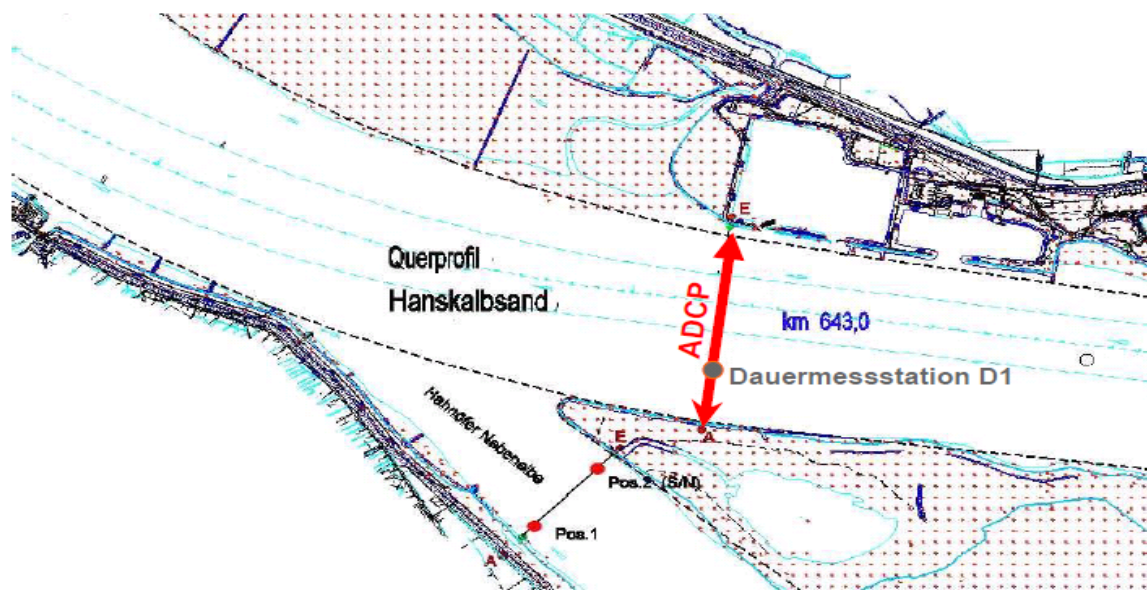


Abbildung 9: Messpositionen im Querprofil bei D1

(D1 liegt rund 18m vom ADCP-Profil entfernt)

[Quelle: WSA 2012]

Mittlere Strömungsverteilungen der Jahre 2001 bis 2011 an Station D1

In den nachfolgenden Darstellungen wird die Strömungsverteilung an der Oberfläche und der Sohle der Messstation D1 für die Jahre 2001 und 2011 stellvertretend für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2011 dargestellt (Abb. 10 – 13). Die Grafiken wurden mittels der Software SISKü erstellt. Eine detaillierte Abbildung aller Abbildungen zu den Strömungsverteilungen im Zeitraum von 1999 bis 2011 findet

sich in dem DVD-Anhang I. Erfasst sind in den Abbildungen jeweils alle Messwerte eines Jahres. Zum Vergleich wurden die Daten der Jahre 2001 und 2011 exemplarisch ausgewählt (siehe Abb. 10 und 11 (Oberflächenmessungen) sowie 12 und 13 (Sohlenmessungen)).

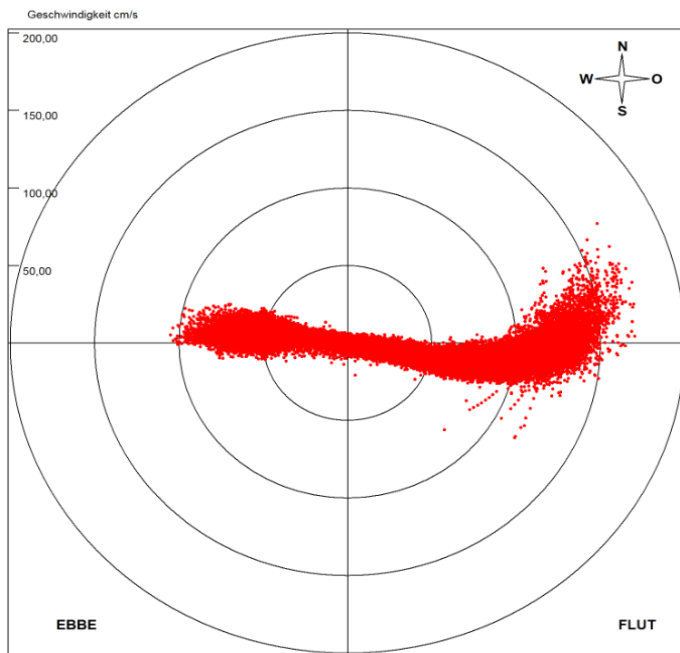


Abbildung 10: Strömungsverteilung an der Oberfläche von Station D1 (2001)

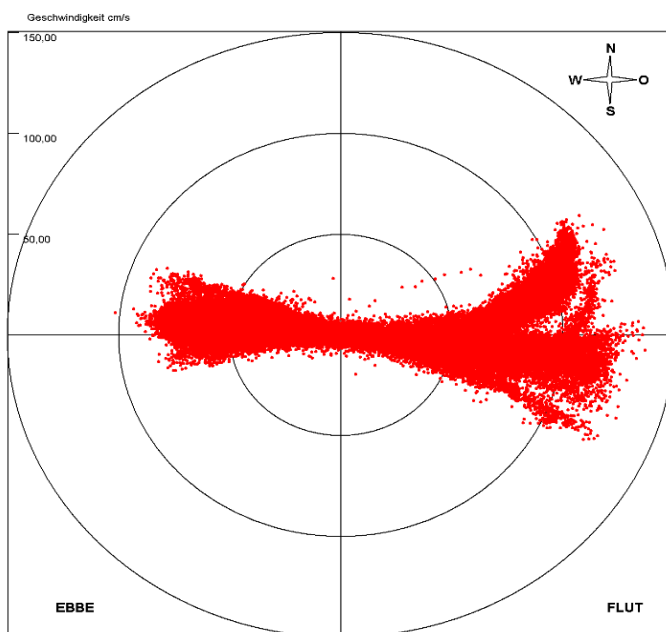


Abbildung 11: Strömungsverteilung an der Oberfläche von Station D1 (2011)

Nachfolgend wird die Entwicklung der Strömungsverteilung an der **Sohle** der Messstation D1 für die Jahre 2001 und 2011 exemplarisch dargestellt (Abb. 12 und 13). Eine detaillierte Abbildung aller Darstellungen von aus den Jahren 1999 bis 2011 findet sich im DVD-Anhang I wieder.

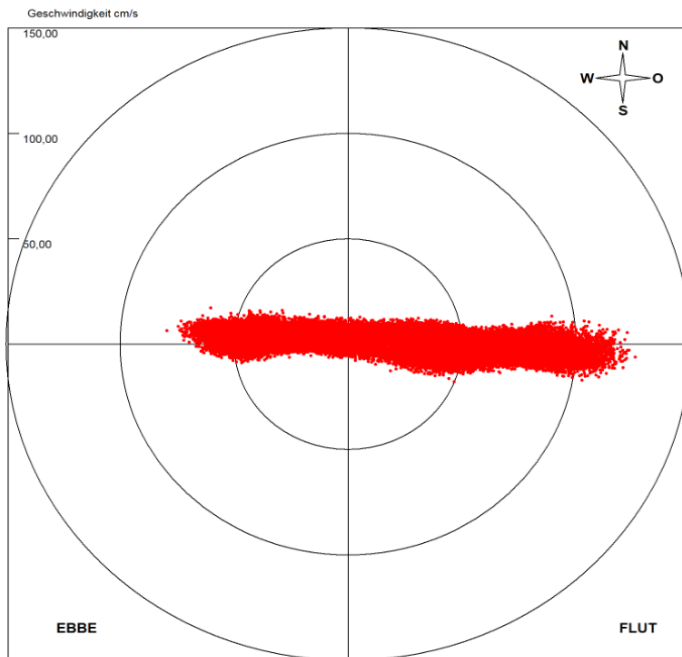


Abbildung 12 Strömungsverteilung Sohlenmessung D1 2001

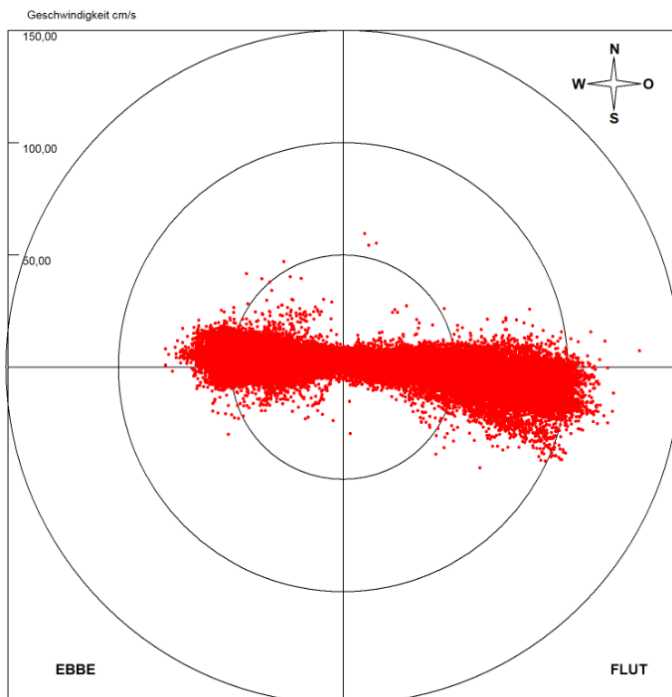


Abbildung 13 Strömungsverteilung Sohlenmessung D1 2011

Die Betrachtung der Ergebnisse aller Jahre (siehe: DVD-Anhang I) lassen auf einen Anstieg der Flutstromgeschwindigkeit sowie eine leichte Abnahme der Ebbestromgeschwindigkeit im Bereich der Oberflächenmessung zwischen den Jahren 2001 und 2011 schließen. Im Bereich der Sohlmessung lassen die Darstellungen eine leichte Abnahme der Flutstromgeschwindigkeit und der Ebbestromgeschwindigkeit über den Betrachtungszeitraum feststellen.

Mittlere Tidedrömungskurven (MTSK) der Jahre 2001-2011 an Station D1

Mit der Software SISKü ist die Ermittlung von mittleren Tidedrömungskurven (MTSK) für ausgewählte Zeiträume möglich. Mittlere Tidedrömungskurven zeigen auf der linken Seite die mittleren Höhen und Dauern der Flut-, auf der rechten Seite die mittleren Höhen und Dauern der Ebbströmungen an den installierten Dauermessstellen an. Die MTSK wurden für die gewässerkundlichen Jahre 1999 – 2011 erstellt, in Excel exportiert und sind in den Abb. 14 (Daten von der Wasseroberfläche) und 15 (Daten von den Messungen an der Gewässersohle) auszugsweise dargestellt. Darstellungen aller MTSK von 1999 bis 2011 sind im DVD-Anhang II zu finden. Beim exemplarischen Vergleich der MTSK der letzten 10 Jahre lassen sich Unterschiede von bis zu 25 cm/s ablesen. Allerdings scheinen die Unterschiede auf natürlichen Begebenheiten zu basieren, da kein eindeutiger Trend zwischen den Jahren zu erkennen ist.

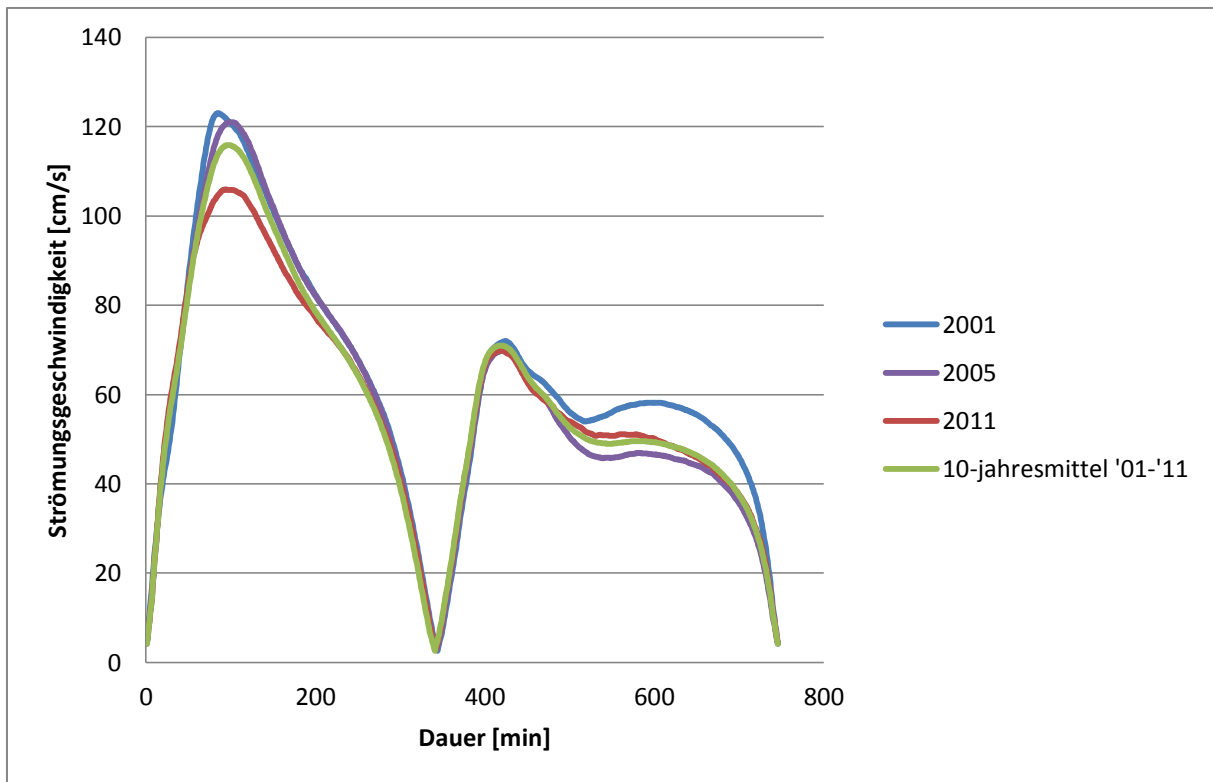


Abbildung 14 : MTSK der Oberflächenmessungen zwischen 2001 und 2011 an Station D1

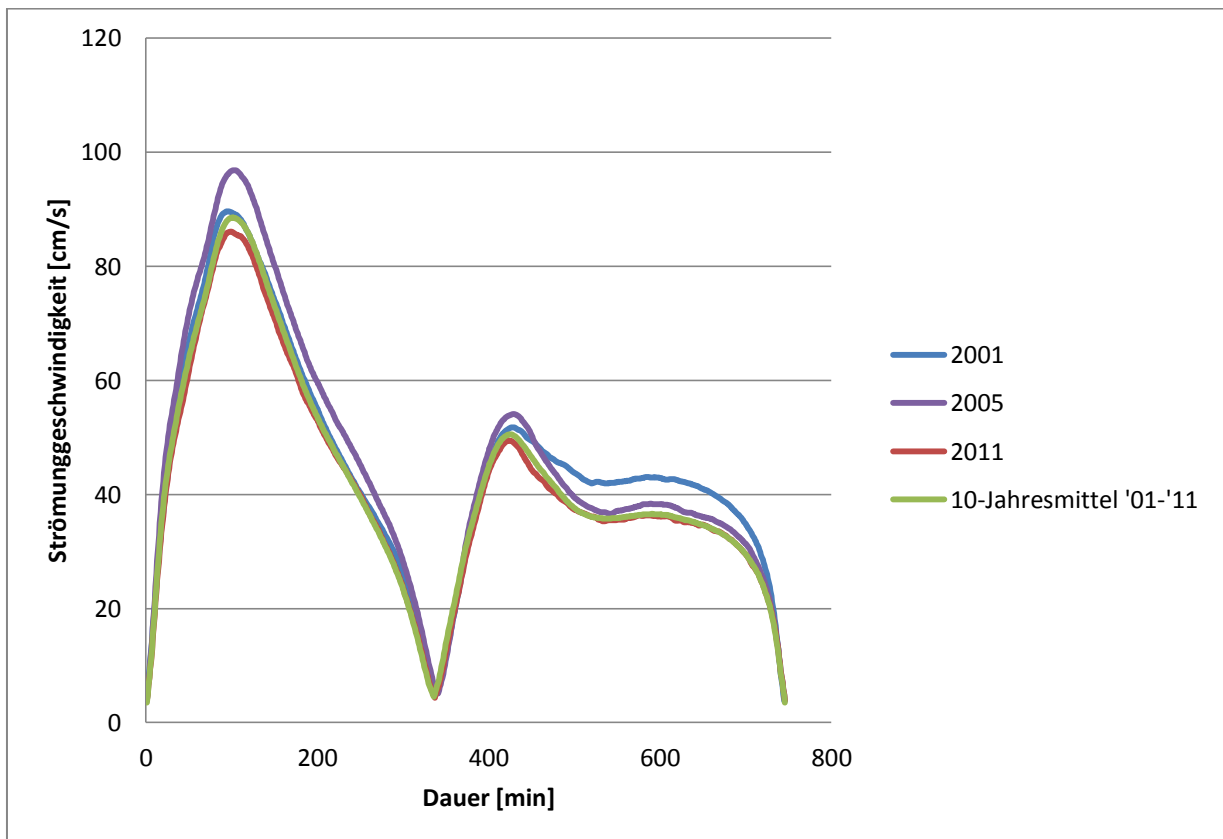


Abbildung 15 : MTSK der Sohlenmessungen zwischen 2001 und 2011 an Station D1

In beiden Grafiken der MTSK-Darstellung lässt sich eine Abnahme der Ebbestromes sowohl an der Oberfläche seit 2001 erkennen. Die Betrachtung der MTSK der Sohlmessung zeigt im Flutbereich, dass das Jahr 2005 und im Ebbebereich, dass das Jahr 2001 über dem 10-Jahresmittel liegen. Der Großteil der erhobenen Daten ist nahe am ermittelten 10-Jahreswert. Eine Darstellung aller mittleren Tidedrömungskurven liegt im DVD-Anhang II vor.

Die in den vorangegangenen Darstellungen der Strömungsverteilung identifizierten Veränderungen können anhand der Betrachtung, sowie Betrachtung aller MTSK (vgl. DVD-Anhang II) nicht bestätigt werden. Vielmehr lässt die Auswertung der mittleren Strömungskurven gegenteilige Aussagen zu. So wird an der Oberfläche der Messstation D1 eine Abnahme der Flutstrom- und Ebbestromgeschwindigkeit deutlich. Eine trendhafte Veränderung ist bei der Sohlmessung nicht festzustellen.

Vergleich der Veränderungen der Flutstromgeschwindigkeiten zwischen den Jahren 1999-2011 an Station D1 im Detail

Die bisherige Betrachtung wurde für den Zeitraum zwischen 2001 und 2011 durchgeführt, da dieser gut mit den vorliegenden Daten der WSA und der BAW zur Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeiten zu vergleichen war. Anhand der in dem DVD-Anhang II gesammelten Daten lassen sich jedoch zusätzlich über einen längeren Zeitraum folgende Aussagen über die Variation der Strömungsgeschwindigkeiten im Zeitraum 1999-2011 (Gewässerkundliche Jahre) treffen:

Mittlere Flutstromgeschwindigkeit:

- Die mittlere Flutstromgeschwindigkeit (V_{fm}) schwankt an der **Oberfläche** der Messstation D1 während des 12-Jahres-Zeitraums von 1999 bis 2011 zwischen 68,3 cm/s und 75,3 cm/s. Im Mittel beträgt die Geschwindigkeit 72,0 cm/s gegenüber 72,5 cm/s während des 10-Jahreszeitraums von 2001 bis 2010. Der Maximalwert beträgt im Jahr 2004 75,3 cm/s.

- Die mittlere Flutstromgeschwindigkeit (V_{fm}) lag an der **Sohle** der Messstation D1 im 12-Jahres-Zeitraum von 1999 bis 2011 zwischen 46,6 cm/s und 58 cm/s. Im Mittel beträgt die Geschwindigkeit 51,9 cm/s gegenüber 47,7 cm/s für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der Maximalwert beträgt im Jahr 2005 58 cm/s.

Die Abweichungen zu den in dem Abschlussbericht der WSA zur Fahrrinnenanpassung (WSA, 2012) aufgeführten Daten sind somit minimal. Die mittlere Flutstromgeschwindigkeit wird an der Oberfläche mit 71,9 cm/s angegeben. Auch wird im Abschlussbericht für diese Messstation kein Trend bei der Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeit angegeben.

Maximale Flutstromgeschwindigkeit:

- Die maximale Flutstromgeschwindigkeit (V_{fmax}), gemessen an der **Oberfläche** der Messstation D1, schwankt im 12-Jahres-Zeitraum von 1999 bis 2011 zwischen 109,5 cm/s und 129,2 cm/s. Im Mittel beträgt er 119,2 cm/s gegenüber 121,1 cm/s für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der Maximalwert beträgt im Jahr 2006 129,2 cm/s.
- Die maximale Flutstromgeschwindigkeit (V_{fmax}), gemessen an der **Sohle** der Messstation D1, lag im 12-Jahres-Zeitraum von 1999-2011 im Bereich von 82,7 cm/s und 102,5 cm/s. Im Mittel beträgt er 91,7 cm/s gegenüber 84,5 cm/s für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der Maximalwert beträgt im Jahr 2004 102,5 cm/s.

Die anhand der Abbildungen der Strömungsverteilung vermutete Tendenz zur Änderung der maximalen Flutstromgeschwindigkeit ist auch anhand der im DVD-Anhang II enthaltenen Daten nicht festzustellen. Die Schwankungen der Werte scheinen natürlichen Ursachen zu unterliegen. Gegenüber den im Abschlussbericht zur Beweissicherung für die Fahrrinnenanpassung veröffentlichten Daten sind geringfügige Abweichungen von 0,3 cm/s im Mittel der maximalen Flutstromgeschwindigkeit festzustellen.

Eine klare Tendenz zur Änderung der Flutstromgeschwindigkeit an der Oberfläche lässt sich anhand der Daten nicht feststellen. Die Schwankungen der Werte dürften auf natürlichen Ursachen beruhen. Die Messungen in Sohlhöhe zeigen zwar im Vergleich der Jahre 1999 und 2011 um 2,5 cm/s an; doch bewegen sie sich um den Mittelwert und dürften auf natürlichen oder messartbedingten Schwankungen beruhen. Damit ist bei zusammenführender Betrachtung von Strömungsverteilung, den MTSK-Daten und den Mittelwerten davon auszugehen, dass keine signifikanten Trends seit 1999 eingetreten sind. Die Daten aus der Beweissicherung (WSA 2012) lassen ebenfalls keinen Trend bei der Entwicklung der Flutstromgeschwindigkeit an der Oberfläche feststellen. Daten aus den Sohlmessungen wurden im Beweissicherungsbericht nicht diskutiert.

Ebbestromgeschwindigkeiten der Jahre 1999-2011 an Station D1 im Detail

Anhand der in dem DVD-Anhang II zusammengefassten Daten des aktuellen Messprogrammes der WSV können folgende Aussagen über die Veränderungen der Strömungsgeschwindigkeiten getroffen werden.

Mittlere Ebbestromgeschwindigkeiten:

- Die mittlere Ebbestromgeschwindigkeit (V_{em}) an der **Oberfläche** der Messstation D1 lag im 12-Jahres-Zeitraum von 1999 bis 2011 zwischen 40,6 cm/s und 60 cm/s. Im Mittel liegt er bei 49,1 cm/s gegenüber 47,7 cm/s für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der Maximalwert wurde mit 60 cm/s im Jahr 1999 gemessen.
- Die mittlere Ebbestromgeschwindigkeit (V_{em}) an der **Sohle** der Messstation D1 wurde im 12-Jahres-Zeitraum von 1999-2011 mit Werten von 28 cm/s bis 44,5 cm/s bestimmt. Im Mittel beträgt er 35,9 cm/s gegenüber 31,8 cm/s für den 10-Jahreszeitraum 2001/2010. Der Maximalwert wurde mit 44,5 cm/s im Jahr 1999 gemessen.

Anhand der vorliegenden Daten im zeigt sich tendenziell eine Verringerung der mittleren Ebbestromgeschwindigkeit. Mit Ausnahme der Messungen aus den Jahren 2010 und 2011, welche leicht gestiegene Werte sowohl an der Sohle sowie an der Oberfläche aufweisen, liegt die Ebbestromgeschwindigkeit bis zu diesem Messzeitraum stetig unter den Werten der Vorjahre. Dies deckt sich mit den Daten aus dem Abschlussbericht zur letzten Fahrrinnenanpassung (WSA, 2012). Dort wurde der Mittelwert der Oberflächenmessung mit 49,6 cm/s angegeben und ein Trend bei der Abnahme der Ebbeströmung festgestellt.

Maximale Ebbestromgeschwindigkeit:

- Die maximale Ebbestromgeschwindigkeit (V_{emax}) an der **Oberfläche** der Messstation D1 lag im 12-Jahres-Zeitraum 1999-2011 zwischen 72,2 cm/s und 82,2 cm/s. Im Mittel beträgt er 76,7 cm/s gegenüber 76,4 cm/s für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der Maximalwert liegt im Jahr 1999 bei 80,4 cm/s.
- Die maximale Ebbestromgeschwindigkeit (V_{emax}) an der **Sohle** der Messstation D1 lag im 12-Jahres-Zeitraum von 1999-2011 zwischen 51,2 cm/s und 62,7 cm/s. Im Mittel betrug er 55,6 cm/s gegenüber 50,1 cm/s für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der Maximalwert liegt 1999 bei 62,7 cm/s.

Anhand der vorliegenden Daten lässt sich tendenziell eine Verringerung der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit erkennen. Mit Ausnahme der Messungen von 2010 und 2011, welche leicht gestiegene Werte sowohl an der Sohle wie auch an der Oberfläche aufweisen, fällt die Ebbestromgeschwindigkeit bis zu diesem Messzeitraum stetig unter die Werte der jeweiligen Vorjahre.

Zwischen 1999 und 2011 sind Abnahmen der Ebbestromgeschwindigkeiten von 6,9 cm/s an der Oberfläche sowie von 7,5 cm/s an der Sohle festzustellen. Im direkten Vergleich der Jahre 1999 und 2011 nimmt die mittlere Ebbestromgeschwindigkeit an der Oberfläche um 12,6 cm/s ab. Verglichen mit

dem Mittelwert liegt die Strömungsgeschwindigkeit 2011 0,2 cm/s niedriger. Im gleichen Zeitraum nimmt die Ebbestromgeschwindigkeit an der Sohle um 10,4 cm/s ab. An der Messstation D1 ist eine Tendenz zur Abnahme der Ebbestromgeschwindigkeit über den Beobachtungszeitraum festzustellen. Damit ist bei zusammenführender Betrachtung von Strömungsverteilung, MTSKen und Mittelwerten davon auszugehen, dass seit 1999 eine Abnahme Ebbestromgeschwindigkeit stattfindet. Die Daten der Beweissicherung lassen ebenfalls einen Trend zur Abnahme der Ebbestromgeschwindigkeit erkennen.

Verhältnis Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeiten der Jahre 1999-2011 an Station D1 im Detail

Wie durch die Lage am Flutstromprallhang der Messstation D1 zu erwarten war, sind die Strömungsverhältnisse stark flutstromdominiert. Die größten Unterschiede zwischen Flutstromgeschwindigkeit und Ebbestromgeschwindigkeit sind im Jahre 2009 zu verzeichnen, die geringsten im Jahre 1999. Dies bestätigt den auch im WSA-Gutachten (2011) beobachteten Trend einer Abnahme der Ebbestromgeschwindigkeit an der Messstation D1.

Das Verhältnis zwischen mittlerer Flut- (V_{fm}) und mittlerer Ebbestromgeschwindigkeit (V_{em}), sowie maximaler Flut- (V_{fmax}) und maximaler Ebbestromgeschwindigkeit (V_{emax}) wird in der nachfolgenden Tabelle 5 dargestellt. **Im direkten Vergleich zwischen 1999 und 2011 kann eine Verstärkung der Flutstromdominanz an der Oberfläche sowie an der Sohle festgestellt werden.**

Tabelle 5: Vergleich mittlerer und maximaler Strömungsgeschwindigkeiten D1 (1999-2011)

GwkJ	V_fm :V_em Oberfläche	V_fm :V_em Sohle	V_fmax :V_emax Oberfläche	V_fmax :V_emax Sohle
1999	1,14	1,10	1,09	1,04
2000	1,36	1,32	1,44	1,22
2001	1,44	1,37	1,57	1,47
2002	1,36	1,35	1,36	1,29
2003	1,42	1,38	1,48	1,43
2004	1,69	1,58	1,51	1,66
2005	1,65	1,57	1,68	1,60
2006	1,51	1,46	1,52	1,58
2007	1,56	1,59	1,60	1,73
2008	1,54	1,59	1,59	1,54
2009	1,76	1,81	1,76	1,95
2010	1,37	1,40	1,24	1,28
2011	1,48	1,51	1,25	1,28

Ebbe- und Flutstromdauern der Jahre 1999-2011 an Station D1

Die Zeit, die zwischen den Kenterpunkten K_e und K_f liegt, wird dem sich jeweils ändernden Wasserstand zugeschrieben. So wird die Flutstromdauer (T_f) begrenzt durch die Phase zwischen Ebbestromkenterpunkt K_e und dem folgenden Flutstromkenterpunkt K_f . Diese wird für die Messstation D1 über den Beobachtungszeitraum 1999-2011 nachfolgend betrachtet.

- Die Flutstromdauern (T_f) an der **Oberfläche** der Messstation D1, variieren über den Beobachtungszeitraum zwischen 5 h 28 m und 5 h 51 m (Abb. 14). Der Mittelwert beträgt 5 h 39 m. Der Maximalwert wurde mit 5 h 51 m im Gewässerkundlichen Jahr (GwkJ) 2009 gemessen, der niedrigste Wert 2002.

- Die Flutstromdauern (T_f) an der **Sohle** der Messstation D1 variieren über den Beobachtungszeitraum zwischen 5 h 24 m und 5 h 44 m (Abb. 15). Der Mittelwert beträgt 5 h 34m. Der Maximalwert wurde mit 5 h 44 m im GwkJ 2009 gemessen, der niedrigste Wert 1999.

Es lässt sich erkennen, dass die Flutdauer an der Oberfläche im Durchschnitt etwa 5 Minuten länger dauert als an der Sohle. Dies lässt sich durch die Reibungskräfte an der Sohle erklären. Weiterhin ist festzustellen, dass die Maximalwerte im GwkJ 2009 auftraten, die Minimalwerte hingegen in verschiedenen Jahren.

Die Ebbestromdauer (T_e) liegt zwischen dem Flutstromkenterpunkt und dem folgenden Ebbestromkenterpunkt.

- Die Ebbestromdauern (T_e) an der **Oberfläche** der Messstation D1 variieren über den Beobachtungszeitraum zwischen 6 h 33 m und 6 h 55 m. Der Mittelwert beträgt 6 h 44 m (Abb. 14). Der Maximalwert wurde mit 6 h 55 m im GwkJ 2002 gemessen, der kleinste Wert 2009.
- Die Ebbestromdauern (T_e) an der **Sohle** der Messstation D1 variieren über den Beobachtungszeitraum zwischen 6 h 41 m und 7 h 00 m (Abb. 15). Der Mittelwert beträgt 6 h 49 m. Der Maximalwert wurde mit 7 h 00 m im GwkJ 2002 gemessen, der kleinste Wert 2009.

Es lässt sich eine Verschiebung der Ebbestromdauer um etwa 5 Minuten zur Sohle hin beobachten. Im Vergleich von Flutstrom- zu Ebbestromdauer ist zu erkennen, dass die Maximalwerte der Flutstromdauer im selben Jahr wie die Minimalwerte der Ebbestromdauer auftreten. Dies lässt sich durch die mittlere Tidedauer von 12h 25 m erklären.

Im direkten Vergleich von Flutstrom- (T_f) und Ebbestromdauer (T_e) lassen sich die in der nachfolgenden Tabelle 6 zusammengefassten Verhältniszahlen errechnen.

Tabelle 6: Relative Dauern von Flut- und Ebbestrom (Tidedauern) an Station D1

GwkJ	T _f :T _e Oberfläche	T _f :T _e Sohle
1999	0,79	0,77
2000	0,83	0,81
2001	0,86	0,83
2002	0,79	0,77
2003	0,82	0,81
2004	0,88	0,85
2005	0,85	0,83
2006	0,84	0,81
2007	0,85	0,82
2008	0,83	0,81
2009	0,89	0,86
2010	0,81	0,80
2011	0,85	0,82

Anhand Tabelle 6 ist ableitbar, dass die Werte nur geringen Schwankungen unterworfen sind. Wie erwartet fallen alle Ebbestromdauern länger aus als die Flutstromdauern. Ansonsten lassen sich keine Tendenzen aus den Werten ablesen, wie die nachfolgende Grafik belegt.

Stauwasserdauern zwischen 1999 und 2011 an Station D1

Als Stauwasserdauer wird die Zeit verstanden, in der die Strömungsgeschwindigkeit unter 20 cm/s fällt. Dies geschieht um den Zeitpunkt des Kenterns der Strömung von einer Tide zur nächsten.

- Die an der Messstation D1 über den Messzeitraum der Gewässerkundlichen Jahre von 1999 bis 2011 an der **Oberfläche** gemessenen Stauwasserdauern

bei **Flutstromkenterung (Kf)** variieren von 18 min bis 36 min. Der Mittelwert beträgt für den 10-Jahreszeitraum 2001/2010 21,9 min gegenüber 22,6 min. Der maximale Wert von 36 min wurde im GwkJ 2009 gemessen.

- Die an der Messstation D1 über den Messzeitraum der Gewässerkundlichen Jahre von 1999 bis 2011 an der **Sohle** gemessenen Stauwasserdauern bei **Flutstromkenterung (Kf)** variieren zwischen 21 min bis 47 min. Der Mittelwert beträgt 27,6 min. Während der 10-Jahresperiode von 2001 bis 2010 wurde demgegenüber ein Mittelwert von 28,3 min ermittelt. Der maximale Wert von 47 min wurde im GwkJ 2009 gemessen.
- Die an der Messstation D1 über den Zeitraum der 12 Gewässerkundlichen Jahre (GwkJ) von 1999 bis 2011 an der **Oberfläche** gemessenen Stauwasserdauern bei **Ebbstromkenterung (Ke)** variieren zwischen 34 min bis 39 min. Der Mittelwert beträgt 36,3 min. Während des 10-Jahreszeitraums von 2001 bis 2010 wurde demgegenüber ein Mittelwert von 36,2 min ermittelt. Der maximale Wert von 39 min wurde in den GwkJen 2003 und 2004 gemessen.
- Die an der Messstation D1 über den Zeitraum der 12 Gewässerkundlichen Jahre (GwkJ) von 1999 bis 2011 an der **Sohle** gemessenen Stauwasserdauern bei **Ebbstromkenterung (Ke)** variieren von 45 min bis 60 min. Der Mittelwert beträgt über den 12-Jahres-Zeitraum 52,1 min. Für die 10-Jahresphase zwischen 2001 und 2010 wurde demgegenüber ein Mittelwert von 51,9 min ermittelt. Der maximale Wert von 60 min wurde im GwkJ 2008 gemessen

In der nachfolgenden Tabelle 7 zeigt sich, dass die Werte der Stauwasserdauern nach einer Flut (Kf) zwar natürlichen Schwankungen ausgesetzt sind, aber diese nur gering ausfallen. Außer im GwkJ 2009 bewegen sich alle Werte nahe den Mittelwerten. Die erhöhten Ergebnisse von 2009 lassen sich aus der Datenlage nicht

erklären. Bei der Betrachtung der Ebbestaudauern lässt sich der erhöhte Wert der Stauwasserdauer bei Flut (Kf) im Jahr 2009 nicht wiederfinden.

Es lässt sich auch keine Tendenz absehen, welche auf eine tendenzielle Änderung der Stauwasserdauern schließen lässt.

Tabelle 7: Stauwasserdauern an der Messstation D1 zwischen 1999 und 2011

GWKJ	Stauwasserdauer Kf Oberfläche [min]	Stauwasserdauer Kf Sohle [min]	Stauwasserdauer Ke Oberfläche [min]	Stauwasserdauer Ke Sohle [min]
1999	18	21	38	52
2000	18	26	35	55
2001	19	23	36	48
2002	19	24	38	54
2003	21	25	39	51
2004	24	25	39	47
2005	24	25	35	45
2006	21	25	35	48
2007	21	29	34	51
2008	24	35	38	60
2009	36	47	36	56
2010	19	27	35	58
2011	21	27	34	53

Flut- und Ebbestromkenterung 1999-2011 an Station D1

Die Zeitspanne zwischen dem Eintreten des Scheitelpunktes der Flut und dem Zeitpunkt der Flutstromkenterung Kf wird als Kenterpunktabstand der Flut (k_f) bezeichnet. Gemessen wurden die Zeiten im Bezug zum zwei Kilometer entfernten Pegel Schulau.

- Die an der Messstation D1 über den Messzeitraum der Gewässerkundlichen Jahre zwischen 1999 und 2011 an der **Oberfläche** gemessenen

Kenterpunktabstände der Flut (k_f) variieren von 30 min bis 39 min. Der Mittelwert beträgt 35 min. Der maximale Wert von 39 min wurde in den GwkJen 2004 und 2009 gemessen.

- Die an der Messstation D1 über den Messzeitraum der Gewässerkundlichen Jahre 1999 bis 2011 an der **Sohle** gemessenen **Kenterpunktabstände der Flut (k_f)** variieren von 24 min bis 33 min. Der Mittelwert beträgt über den Zeitraum 28 min. Der maximale Wert von 33 min wurde im GwkJ 2004 gemessen.
- Die an der Messstation D1 über den Messzeitraum der Gewässerkundlichen Jahre von 1999 bis 2011 an der **Oberfläche** gemessenen **Kenterpunktabstände der Ebbe (k_e)** schwanken zwischen 13 min und 27 min. Der Mittelwert beträgt über den Zeitraum 18 min. Der maximale Wert von 27 min wurde im GwkJ 1999 gemessen.
- Die an der Messstation D1 über den Messzeitraum der Gewässerkundlichen Jahre von 1999 bis 2011 an der **Sohle** gemessenen **Kenterpunktabstände der Ebbe (k_e)** schwanken zwischen 11 min und 26 min. Der Mittelwert beträgt über den Zeitraum 16 min. Der maximale Wert von 26 min wurde im GwkJ 1999 gemessen.

Auf der Grundlage dieser Daten ist keine Tendenz zur Veränderung der Kenterpunktabstände in die eine oder andere Richtung feststellen.

4.1.1.2 Dauermessstation D2

Lage der Station und grundlegende Charakteristik

Die Messstation D2 ist bei Elbkilometer 651,1 verankert. Sie ist etwa 1,3 km von Position 4 der Querprofilmessung entfernt (vgl. Abbildung 16). Aufgrund der Lage der Messstation D2 sind hohe Flutstromgeschwindigkeiten zu erwarten, da „Beim Ebbestrom [...] der Stromstrich bei D2 nahezu über die gesamte Halbtide im Bereich der Messstation („Lage im Stromstrich“) [...]“ (WSA, 2012) und während der Flut der Stromstrich auf der anderen Fahrwasserseite liegt. Was zu einem deutlichen Anstieg der gemessenen Ebbestromgeschwindigkeit führt.

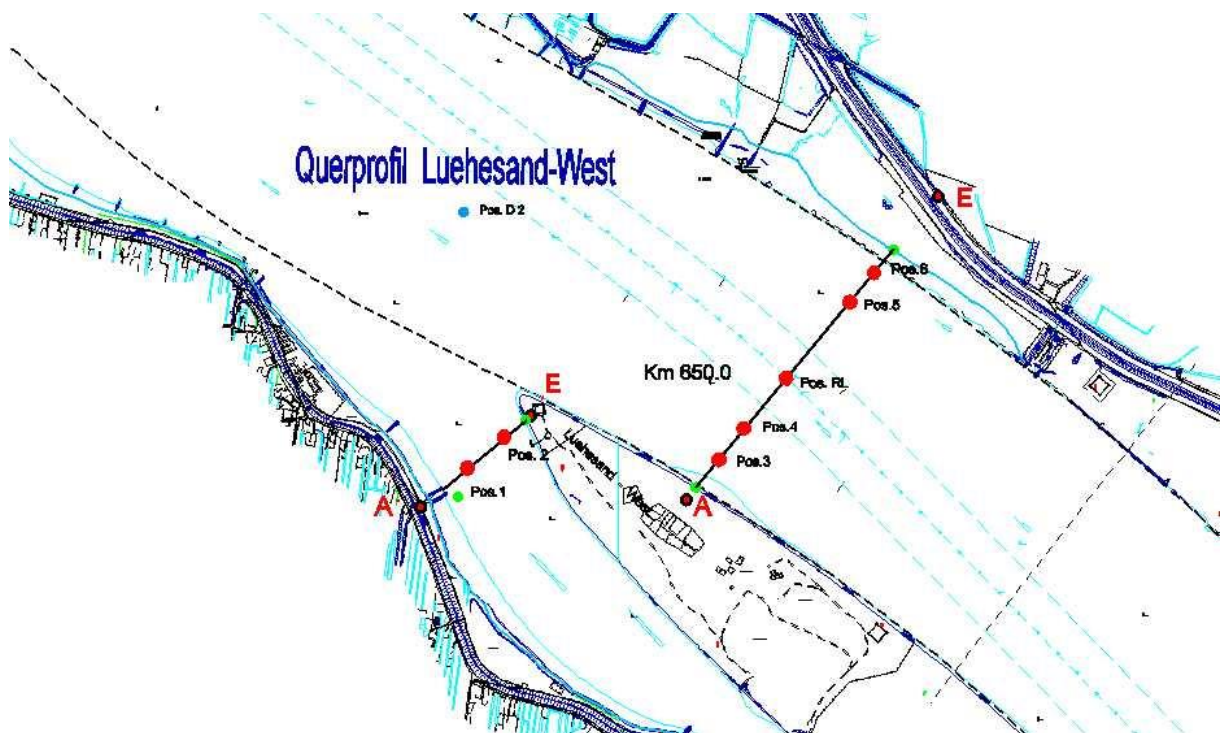


Abbildung 16: Messpositionen im Querprofil bei Station D2

(D2 liegt rund 1,3 km von stromabwärts Pos.4 entfernt)

[WSA 2012]

Mittlere Strömungsverteilungen in den Jahren 2001 bis 2011 an Station D2

In den nachfolgenden Darstellungen wird die Strömungsverteilung an der Oberfläche der Messstation D2 für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010 exemplarisch an

den Abbildungen der Strömungsverteilungen der Jahre 2001 und 2011 dargestellt (Abb. 17 bis 20). Die Grafiken wurden mittels der Software SISKü erstellt. Eine detaillierte Zusammenfassung aller Abbildungen zur Strömungsverteilung in den Untersuchungsjahren von 1999 bis 2011 findet sich in dem DVD-Anhang I. Erfasst sind in den Abbildungen jeweils alle Messwerte eines Jahres. Für den exemplarischen Vergleich wurden die Daten von 2001 und 2011 ausgewählt (siehe Abb. 17 und 18 sowie 19 und 20).

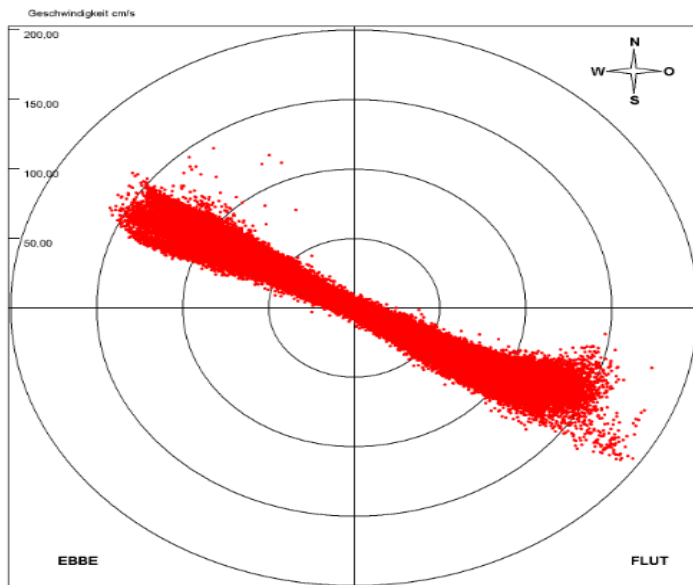


Abbildung 17: Strömungsverteilung an der Oberfläche von Station D2 (2001)

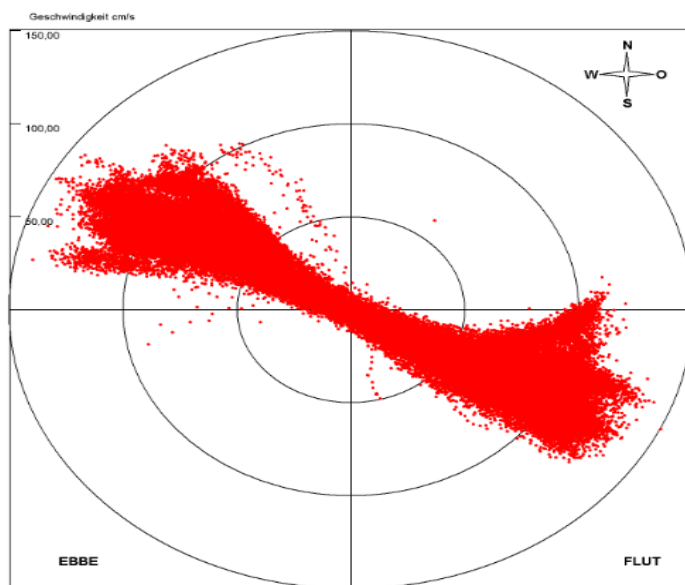


Abbildung 18: Strömungsverteilung an der Oberfläche von Station D2 (2011)

Nachfolgend wird die Entwicklung der Strömungsverteilung an der Sohle der Messstation D2 für den 10-Jahreszeitraum 2001 bis 2011 exemplarisch dargestellt. Eine detaillierte Abbildung aller Darstellungen von 1999 bis 2011 findet sich in dem DVD-Anhang I wieder. Erfasst sind in den Abbildungen jeweils alle Messwerte eines Jahres. Es wurden die Strömungsverteilungen von 2001 bis 2011 als beispielhafter Auszug gewählt.

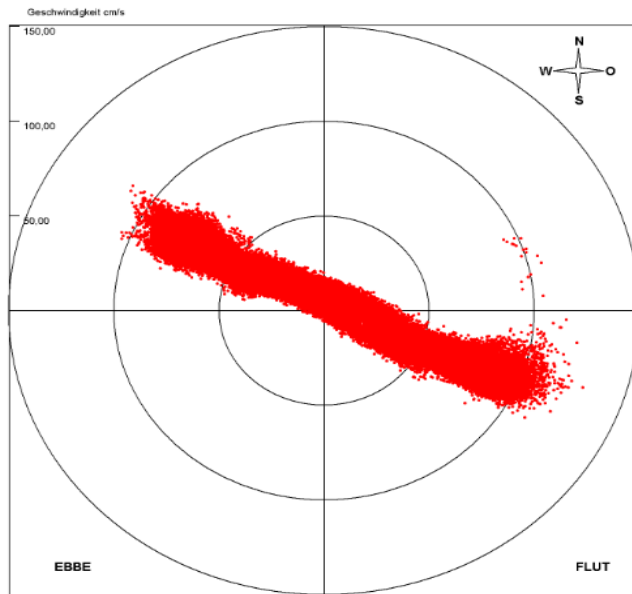


Abbildung 19: Strömungsverteilung an der Sohle von Station D2 (2001)

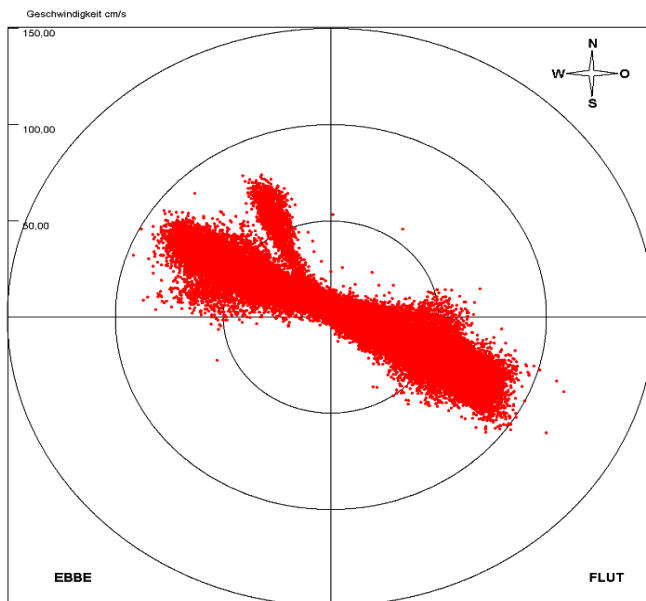


Abbildung 20: Strömungsverteilung an der Sohle von Station D2 (2011)

Die Ergebnisse der Abbildungen 17 und 19 lassen auf einen Anstieg der Flut- sowie der Ebbestromgeschwindigkeit im Bereich der Wasseroberfläche zwischen den Jahren 2001 und 2011 schließen. Im Bereich der Sohle zeigen die Abbildungen 18 und 20 eine deutliche Abnahme der Flut- und Ebbestromgeschwindigkeit über den Betrachtungszeitraum.

Mittlere Tideströmungskurven 2001-2011 an Station D2

Für die vorliegende Arbeit wurde MTSK für die gewässerkundlichen Jahre 1999 – 2011 in SISKü erstellt, in Excel exportiert und hier auszugsweise dargestellt. Eine Zusammenfassung der Darstellungen aller MTSK von 1999 bis 2011 ist im DVD-Anhang II zu finden. Beim exemplarischen Vergleich der MTSK der letzten 10 Jahre lassen sich aus den nachfolgenden Grafiken die vermutete Tendenz der Ebbeströmungsgeschwindigkeit wiederfinden.

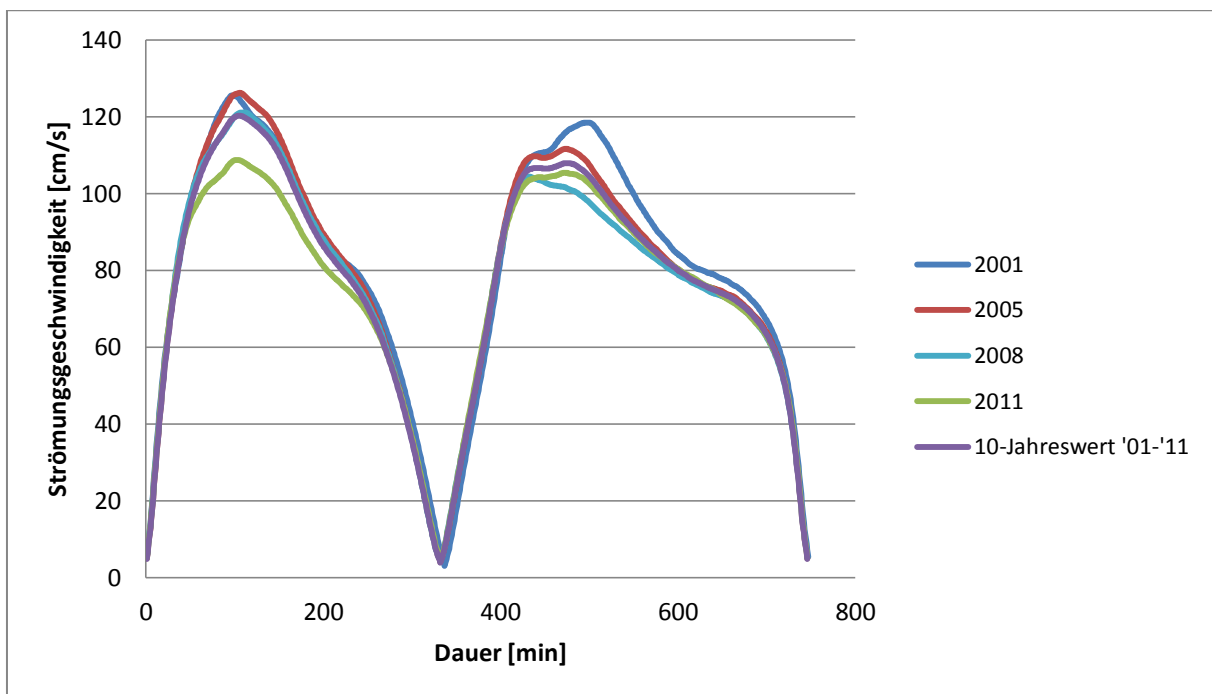


Abbildung 21: MTSK der Oberflächenmessungen an Station D2

Sowohl an der Oberfläche (Abb. 21) wie an der Sohle (Abb. 22) lassen sich Geschwindigkeitsabnahmen erkennen. Die an den Darstellungen zur Strömungsverteilung (siehe z.B. Abb. 17 und 19) ersichtlichen

Geschwindigkeitszunahmen an der Oberfläche lassen sich an dieser Betrachtung, sowie der Betrachtung aller MTSK (vgl. DVD-Anhang II) nicht bestätigen. Es lässt sich erkennen, dass die Werte der MTSK von 2011 jeweils unter denen von 2001 liegen, einen eindeutigen Trend zeigt die Entwicklung jedoch nicht. Die MTSKen der Sohlmessungen lassen eine abnehmende Tendenz der Strömungsgeschwindigkeiten feststellen. Dieses lässt sich auch an der Darstellung der Strömungsverteilung (Abbildung 19 und 20) der Sohlmessungen ablesen.

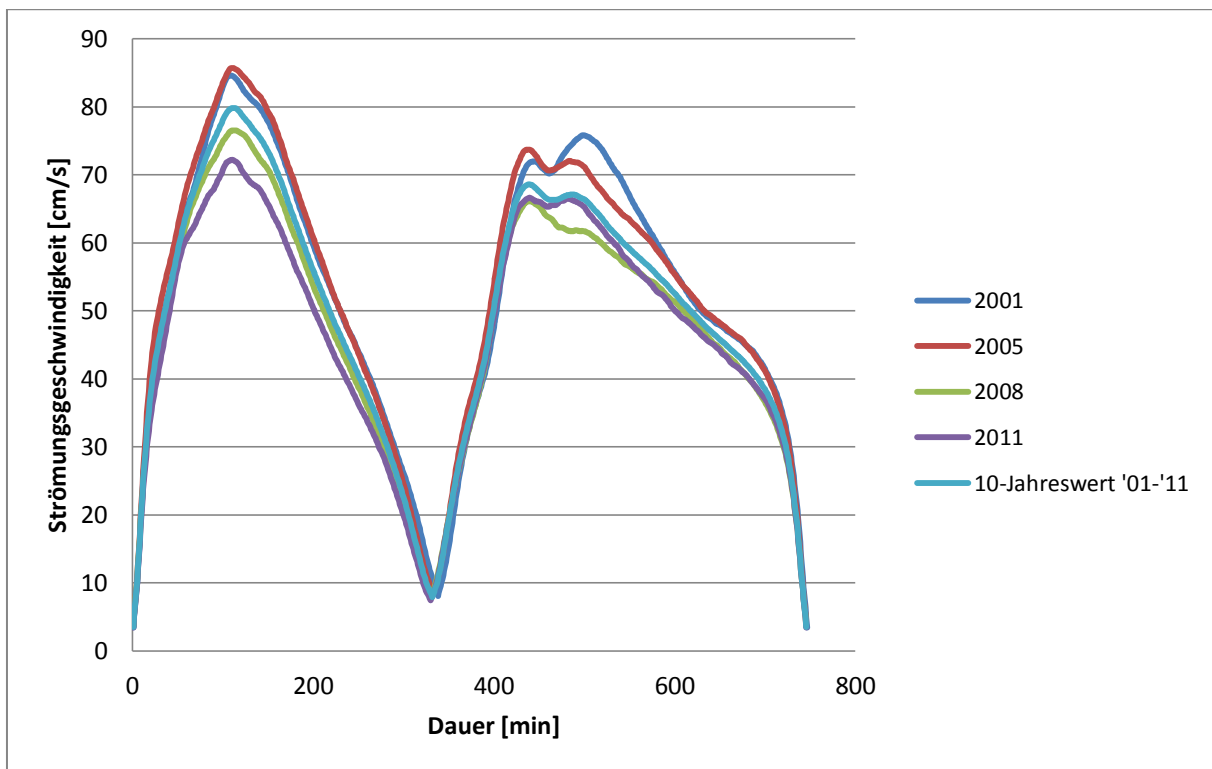


Abbildung 22: MTSK der Sohlenmessungen an Station D2

Flutstromgeschwindigkeiten der Jahre 1999-2011 an Station D2 im Detail

Anhand der in dem DVD-Anhang II befindlichen Daten können folgende Aussagen über die Variation der Strömungsgeschwindigkeiten im Zeitraum 1999-2011 (Gewässerkundliche Jahre) getroffen werden.

Mittlere Flutstromgeschwindigkeiten:

- Die mittlere Flutstromgeschwindigkeit (V_{fm}) an der **Oberfläche** von Messstation D2 schwankt in den 12 Jahren 1999 bis 2011 zwischen 48,9 cm/s und 83,3 cm/s. Der Mittelwert der Messungen beträgt 75,1 cm/s. In dem 10-Jahres-Zeitraum von 2001 bis 2010 liegt bei 80,4 cm/s. Der Maximalwert beträgt im Jahr 2007 83,3 cm/s.
- Die mittlere Flutstromgeschwindigkeit (V_{fm}) an der **Sohle** der Messstation D2 lag im 12-Jahres-Zeitraum 1999-2011 zwischen 46,8 cm/s und 55,1 cm/s. Der Mittelwert der Messungen beträgt 51,3 cm/s gegenüber 47,2 cm/s für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der Maximalwert tritt im Jahr 2005 mit 55,1 cm/s auf.

Die Abweichungen zu den in dem Abschlussbericht des WSA zur Fahrrinnenanpassung (WSA, 2012) aufgeführten Daten betragen im Mittel des 12-Jahres-Zeitraumes 5,4 cm/s, im 10-Jahresmittel (2001-2010) jedoch nur 0,4 cm/s. Im Abschlussbericht des WSA wird die mittlere Flutstromgeschwindigkeit an der Oberfläche mit 79,5 cm/s angegeben

Maximale Flutstromgeschwindigkeit:

- Die maximale Flutstromgeschwindigkeit (V_{fmax}) an der **Oberfläche** der Messstation D2 schwankt zwischen 1999 und 2011 zwischen 83 cm/s und 132,6 cm/s. Der Mittelwert des 12-jährigen Zeitraumes von 1999 bis 2011 beträgt 119,3 cm/s gegenüber 126,8 cm/s für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der Maximalwert von 132,6 cm/s tritt im Jahr 2004 auf.
- Die maximale Flutstromgeschwindigkeit (V_{fmax}) an der **Sohle** der Messstation D2 schwankt im Zeitraum von 1999-2011 zwischen 78,8 cm/s bis 91,2 cm/s. Der Mittelwert der Messungen beträgt 85,1 cm/s gegenüber 78,5 cm/s für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der Maximalwert von 91,2 cm/s tritt im Jahr 2004 auf.

Zwischen 1999 und 2011 nimmt die mittlere Flutstromgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche um 26,6 cm/s zu. An der Sohle ist jedoch eine Abnahme um 4,2 cm/s zu verzeichnen. Bei der mittleren maximalen Flutstromgeschwindigkeit ist eine Zunahme um 31 cm/s an der Oberfläche und eine Abnahme von 3,5 cm/s im gleichen Zeitraum an der Sohle zu beobachten. Zusammenfassend kann nach Betrachtung von Strömungsverteilung, MTSKen und mittleren Geschwindigkeiten festgehalten werden, dass an der Sohle kein deutlicher Trend vorherrscht, während an der Oberfläche von einer Geschwindigkeitszunahme in dem Betrachtungszeitraum auszugehen ist. Die Zunahme der maximalen und mittleren Flutstromgeschwindigkeiten an der Oberfläche findet sich auch im Beweissicherungsbericht des WSA wieder (WSA, 2012).

Ebbestromgeschwindigkeiten der Jahre 1999-2011 an Station D2 im Detail

Anhand der Daten im DVD-Anhang II können folgende Aussagen über die Veränderungen der Strömungsgeschwindigkeiten getroffen werden.

Mittlere Ebbestromgeschwindigkeit:

- Die mittlere Ebbestromgeschwindigkeit (V_{em}) an der **Oberfläche** der Messstation D2 betrug im 12-Jahres-Zeitraum von 1999-2011 zwischen 37,3 cm/s bis 81,5 cm/s. Der Mittelwert beträgt 71,4 cm/s gegenüber 77,1 cm/s für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der Maximalwert wird mit 81,5 cm/s im Jahr 2001 gemessen.
- Die mittlere Ebbestromgeschwindigkeit (V_{em}) an der **Sohle** der Messstation D2, wurde im Zeitverlauf von 1999-2011 mit 46,8 cm/s bis 52,5 cm/s gemessen. Der Mittelwert beträgt im 12-Jahres-Zeitraum 49,1 cm/s gegenüber 44,82 cm/s für den 10-Jahreszeitraum 2001/2010. Der im Jahr 2001 gemessene Maximalwert betrug 52,5 cm/s.

Die vorliegenden Daten lassen keine Verringerung der mittleren Ebbestromgeschwindigkeit an der Oberfläche erkennen. Dies deckt sich mit den Aussagen im Abschlussbericht der WSA zur Fahrrinnenanpassung (WSA, 2012).

Darin wird der Mittelwert der Messungen an der Oberfläche mit 76,5 m/s angegeben und ebenfalls kein klarer Trend zur Veränderung festgestellt. An der Sohle liegen alle Daten in Nähe des Mittelwertes und zeigen ebenfalls keinen Trend.

Maximale Ebbestromgeschwindigkeit:

- Die maximale Ebbestromgeschwindigkeit (V_{emax} an der **Oberfläche** der Messstation D2 lag im 12-jährigen Zeitraum von 1999-2011 zwischen 68,1 cm/s bis 125,6 cm/s. Der Mittelwert beträgt in dieser Phase 111,5 cm/s gegenüber einem Wert von 116,1 cm/s, der während des 10-Jahreszeitraums von 2001 bis 2010 gemessen wurde. Der Maximalwert wurde im Jahr 2001 mit 125,6 cm/s ermittelt.
- Die maximale Ebbestromgeschwindigkeit (V_{emax}) lag an der **Sohle** der Messstation D2 im 12-jährigen Zeitraum von 1999-2011 zwischen 71 cm/s und 82,5 cm/s. Der Mittelwert betrug 76 cm/s. Während des 10-jährigen Zeitraumes von 2001 bis 2010 wurden gegenüber 69,5 cm/s gemessen. Der Maximalwert wurde im Jahr 2001 mit 82,5 cm/s ermittelt.

Mit Ausnahme der Messungen von 2010 und 2011, welche leicht erhöhte Werte sowohl an der Sohle sowie an der Oberfläche zeigen, fällt die Ebbestromgeschwindigkeit bis zu diesem Messzeitraum stetig unter die Werte der Vorjahre. Dies deckt sich mit den Ergebnissen des Abschlussberichtes der (WSA, 2012). Die maximale Geschwindigkeit an der Oberfläche wird dort mit 115,7 m/s angegeben.

Anhand der vorliegenden Daten ist tendenziell eine Verringerung der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit an der Oberfläche zu erkennen. Allerdings ist keine Tendenz zur Abnahme der Ebbestromgeschwindigkeit an der Sohle festzustellen. Die dem Beweissicherungsbericht (WSA 2012) zugrundeliegenden Daten zeigen ebenfalls eine Abnahme der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit, allerdings keinen Trend zur Veränderung der mittleren Ebbestromgeschwindigkeit. Zusammenfassend kann nach

Betrachtung von Strömungsverteilung, MTSKen und mittleren Geschwindigkeiten festgehalten werden, dass an der Sohle kein deutlicher Trend auszumachen ist, während an der Oberfläche von einer Abnahme der maximalen, jedoch von keinem entsprechenden Trend bei der mittleren Ebbestromgeschwindigkeit auszugehen ist.

Verhältnis Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeiten in den Jahren 1999-2011 an Station D2 im Detail

Wie durch die Lage der Messstation D2 „im Stromstrich“ zu erwarten war, sind die Strömungsverhältnisse weniger flutstromdominiert als bei Station D1. Das Verhältnis zwischen mittlerer Flut- (V_{fm}) und mittlerer Ebbestromgeschwindigkeit (V_{em}) sowie maximaler Flut- und maximaler Ebbestromgeschwindigkeit wird in der nachfolgenden Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Vergleich mittlerer und maximaler Strömungsgeschwindigkeiten an Station D2 (1999-2011)

GwkJ	$V_{fm} : V_{em}$ Oberfläche	$V_{fm} : V_{em}$ Sohle	$V_{fmax} : V_{emax}$ Oberfläche	$V_{fmax} : V_{emax}$ Sohle
1999	1,10	1,03	1,04	0,98
2000	1,32	1,03	1,22	1,03
2001	1,01	1,02	1,23	1,16
2002	1,02	1,02	0,92	1,01
2003	1,02	1,05	1,06	0,97
2004	1,03	1,07	1,19	1,13
2005	1,06	1,06	1,12	1,15
2006	1,04	1,08	1,22	1,09
2007	1,06	1,08	1,11	1,17
2008	1,08	1,06	1,21	1,14
2009	1,12	1,10	1,21	1,10
2010	0,99	1,00	1,04	1,03
2011	0,99	0,99	1,05	1,05

Die Station D2 kann nach Tabelle 8 als flutstromdominant betrachtet werden. Ebbestromdominante Jahre treten selten auf.

Ebbe- und Flutstromdauern zwischen 1999 und 2011 an Station D2

- Die Flutstromdauer (T_f) an der **Oberfläche** der Messstation D2 variiert während des Beobachtungszeitraums zwischen 5 h 25 m und 5 h 35 m. Der Mittelwert beträgt 5 h 30 m. Der Maximalwert wurde mit 5 h 35 m in den GwkJen 2001 und 2009 gemessen. Der niedrigste Wert trat im Jahr 2002 auf.
- Die Flutstromdauer (T_f) an der **Sohle** der Messstation D2 schwankt zwischen 5 h 23 m und 5 h 37 m. Der Mittelwert beträgt 5 h 31m. Der Maximalwert wurde mit 5 h 37 m im GwkJ 2004 gemessen. Der niedrigste Wert trat im Jahr 2002 auf.

Es lässt sich erkennen, dass die Flutdauer an der Oberfläche im Mittelwert nur etwa 1 Minute kürzer ist als an der Sohle. Dies erklärt die fehlende bis geringe Flutstromdominanz.

- Die Ebbestromdauer (T_e) an der **Oberfläche** der Messstation D2 variiert zwischen 6 h 49 m und 6 h 59 m. Der Mittelwert beträgt 6 h 53 m. Der Maximalwert wurde mit 6 h 59 m im GwkJ 2002 gemessen. Der niedrigste Wert trat im Jahr 2001 auf.
- Die Ebbestromdauer (T_e) an der **Sohle** der Messstation D2schwankt zwischen 6 h 47 m und 7 h 01 m. Der Mittelwert beträgt 6 h 53 m. Der Maximalwert wurde mit 7 h 01 m im GwkJ 2002 gemessen. Der niedrigste Wert zeigte sich im Jahr 2004.

Die Daten zeigen eine Verschiebung der Ebbestromdauer um bis zu 25 Minuten an der Sohle der Elbe. Beim Vergleich von Flutstrom- zu Ebbestromdauer ist festzustellen, dass die Maximalwerte der Flutstromdauer im gleichen Jahr wie die Minimalwerte der Ebbestromdauer auftreten.

Aus dem direkten Vergleich von Flutstrom- (T_f) und Ebbestromdauer (T_e) lassen sich die in Tabelle 9 zusammengefassten Verhältniszahlen errechnen.

Tabelle 9: Relative Dauern von Flut- und Ebbestrom (Tidedauern) an Station D2

GwkJ	$T_f:T_e$ Oberfläche	$T_f:T_e$ Sohle
1999	0,79	0,79
2000	0,81	0,81
2001	0,82	0,82
2002	0,78	0,77
2003	0,80	0,8
2004	0,81	0,83
2005	0,80	0,80
2006	0,79	0,80
2007	0,80	0,81
2008	0,80	0,79
2009	0,82	0,82
2010	0,79	0,78
2011	0,8	0,79

Tabelle 9 zeigt, dass auch hier die Werte nur geringen Schwankungen unterworfen sind. Wie erwartet sind alle Ebbestromdauern größer als die Flutstromdauern. Ansonsten lassen sich keine Tendenzen aus den Werten ablesen.

Stauwasserdauern 1999-2011 an Station D2

- Die an der Messstation D2 über den Zeitraum der 12 GwkJen 1999 bis 2011 an der **Oberfläche** gemessenen Stauwasserdauern bei Flutstromkenterung (Kf) variieren von 14 min bis 17 min. Der Mittelwert beträgt über diesen 12-jährigen Zeitraum 15,3 min gegenüber 15,2 min für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der Maximalwert von 17 min wurde im GwkJ 2003 gemessen.
- Die an der Messstation D2 über den Zeitraum der 12 GwkJen 1999-2011 an der **Sohle** gemessenen Stauwasserdauern bei Flutstromkenterung (Kf) variieren von 19 min bis 22 min. Der Mittelwert beträgt über den Zeitraum 20,5 min gegenüber 20,4 min für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der maximale Wert von 22 min wurde im GwkJ 2000 gemessen.
- Die an der Messstation D2 über den Messzeitraum der 12 GwkJen 1999-2011 an der **Oberfläche** gemessenen Stauwasserdauern bei Ebbe (Ke) variieren von 31 min bis 35 min. Der Mittelwert beträgt über den Zeitraum 32,5 min gegenüber 32,2 min für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der maximale Wert von 35 min wurde im GwkJ 2003 gemessen.
- Die an der Messstation D2 über den Messzeitraum der 12 GwkJen 1999-2011 an der **Sohle** gemessenen Stauwasserdauern bei Ebbe (Ke) variieren von 41 min bis 52 min. Der Mittelwert beträgt über den Zeitraum 45,6 min gegenüber 45,5 min für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der maximale Wert von 52 min wurde im GwkJ 2011 gemessen

Die Stauwasserdauern unterliegen bei Ebbe an der Sohle stärkeren Schwankungen als an der Oberfläche. Trotzdem ist aus den Daten kein Trend abzulesen. Die Unterschiede sind vermutlich durch leichte Abweichungen beim Aussetzen der Messsonde sowie morphologischen Veränderungen der Sohle zwischen den Messungen zu erklären.

Die Stauwasserdauern bei Flut haben sich weder an der Sohle noch an der Oberfläche über die Jahre stark verändert. Gleiches lässt sich auch für die Stauwasserdauern bei Ebbe an der Oberfläche feststellen. Ein Trend zeichnet sich nicht ab.

Flut- und Ebbestromkenterung in den Jahren 1999-2011 an Station D2

Die Zeitspanne zwischen dem Eintreten des Flut-Scheitelpunktes und dem Zeitpunkt der Flutstromkenterung K_f wird als Kenterpunktabstand der Flut (k_f) bezeichnet. Gemessen wurden die Zeiten im Bezug zum 1,3 Kilometer entfernten Pegel Hetlingen.

- Die an Station D2 über den Zeitraum der Gewässerkundlichen Jahre 1999-2011 an der **Oberfläche** gemessenen Kenterpunktabstände der Flut (k_f) variieren von 38 min bis 50 min. Der Mittelwert beträgt über den 12-jährigen Zeitraum 41 min ebenso wie der über 10-Jahreszeitraum gemessene Mittelwert. Der maximale Wert von 50 min wurde im GwkJ 2001 gemessen.
- Die an Station D2 über den Zeitraum der Gewässerkundlichen Jahre 1999-2011 an der **Sohle** gemessenen Kenterpunktabstände der Flut (k_f) variieren von 31 min bis 54 min. Der Mittelwert beträgt über den 12-jährigen Zeitraum 36 min ebenso wie der über 10-Jahreszeitraum gemessene Mittelwert. Der maximale Wert von 54 min wurde im GwkJ 1999 gemessen.
- Die an Station D2 über den Zeitraum der Gewässerkundlichen Jahre 1999-2011 an der **Oberfläche** gemessenen Kenterpunktabstände der Ebbe (k_e) variieren von 31 min bis 50 min. Der Mittelwert beträgt über den Zeitraum 35 min. Der maximale Wert von 50 min wurde im GwkJ 1999.
- Die an Station D2 über den Zeitraum der Gewässerkundlichen Jahre 1999-2011 an der **Sohle** gemessenen Kenterpunktabstände der Ebbe (k_e)

variieren von 24 min bis 52 min. Der Mittelwert beträgt über den Zeitraum 29 min. Der maximale Wert von 52 min wurde im GwkJ 1999 gemessen.

Darüber hinaus lässt sich anhand der Daten keine Tendenz zur Veränderung in die eine oder andere Richtung feststellen.

4.1.1.3 Dauermessstation D3

Lage der Station und grundlegende Charakteristik

Die Messstation D3 ist auf Elbkilometer 664,7 verankert. Sie ist etwa 31 m von der Querprofilmessstelle entfernt (vgl. Abbildung 23). Aufgrund der Lage der Messstation D3 „im Nahfeld“ (nahe des Stromstriches) sind „maximale Ebbestromgeschwindigkeiten“ im Vergleich zu den anderen Messstationen zu erwarten (WSA, 2012.) So kommt es bei Ebbe zu einer Prallhang- bzw. bei Flutstrom zu einer Gleithangssituation.

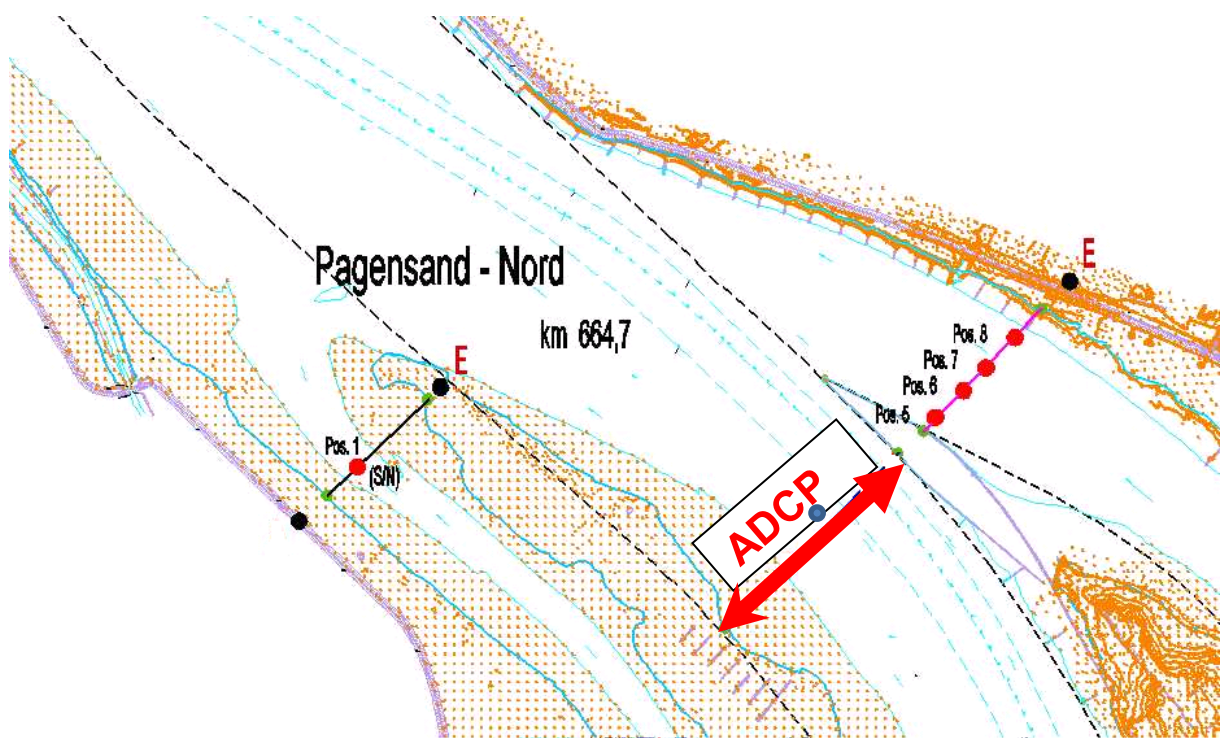


Abbildung 23: Messpositionen im Querprofil bei Station D3

(D3 liegt rund 31m entfernt vom Messprofil)

[WSA, 2012]

Mittlere Strömungsverteilungen in den Jahren 2001 bis 2011 an Station D3

In den folgenden Abbildungen 24 und 25 wird die Entwicklung der Strömungsverhältnisse an der **Oberfläche** der Messstation D3 für die Jahre 2001 und 2011 exemplarisch dargestellt. Umfassend sind sämtliche Abbildungen der Strömungsverhältnisse in dem Untersuchungszeitraum von 1999 bis 2011 in dem DVD-Anhang I zusammengestellt. Erfasst sind in den Abbildungen jeweils alle Messwerte eines Jahres.

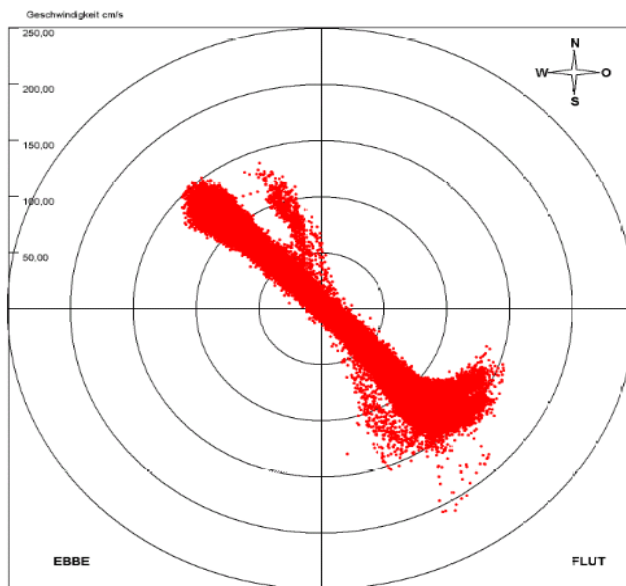


Abbildung 24: Strömungsverteilung an der Oberfläche von Station D3 (2001)

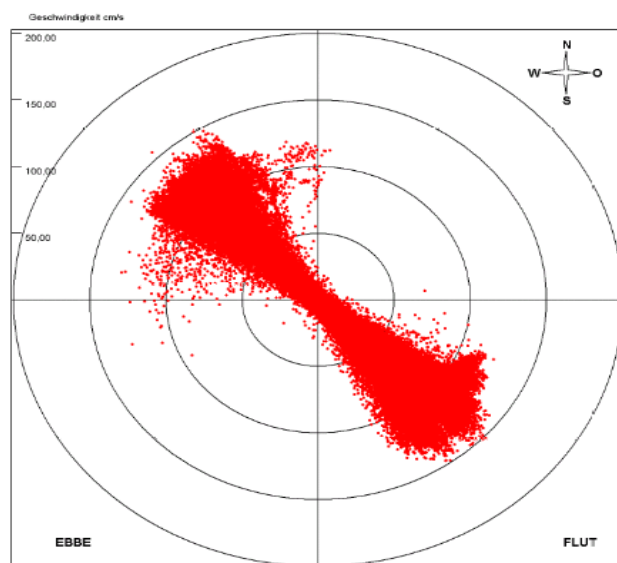


Abbildung 25: Strömungsverteilung an der Oberfläche an Station D3 (2011)

Nachfolgend wird die Entwicklung der Strömungsverhältnisse an der **Sohle** der Messstation D3 für den 10-Jahreszeitraum der gewässerkundlichen Jahre 2001 bis 2011 exemplarisch dargestellt (Abb. 26 und 27). Eine detaillierte Sammlung aller Darstellungen für den 12-Jahres-Zeitraum von 1999 bis 2011 findet sich in dem DVD-Anhang I wieder.

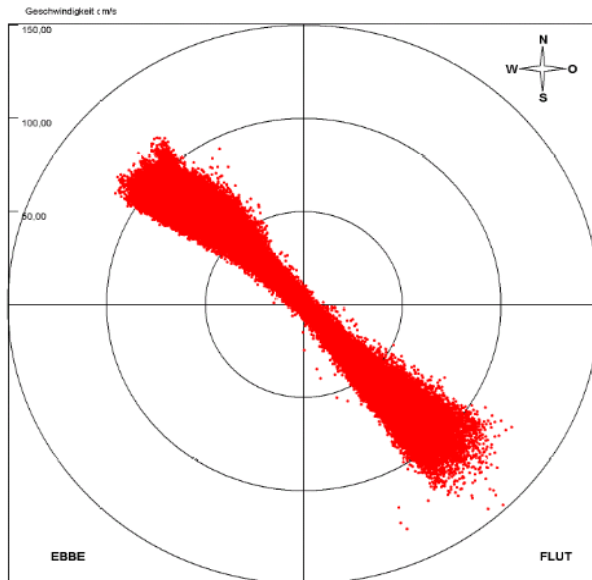


Abbildung 26: Strömungsverteilung an der Sohle von Station D3 (2001)

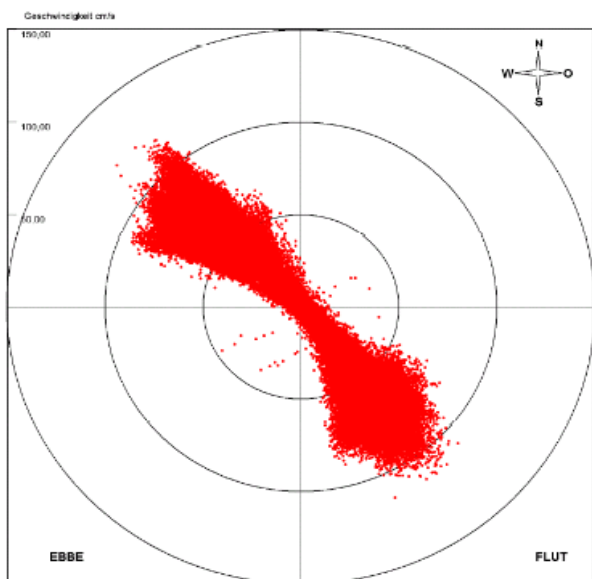


Abbildung 27: Strömungsverteilung an der Sohle von Station D3 (2011)

In den Abbildungen 21 bis 24 sind sowohl aus den der Oberflächen- als auch den Sohlenmessungen geringe Abnahmen der Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten zwischen den Jahren 2001 und 2011 festzustellen.

Mittlere Tideströmungskurven (MTSK) in den Jahren 2001-2011 an Station D3

Mit der Software SISKü ist die Ermittlung von mittleren Tideströmungskurven (MTSK) für ausgewählte Zeiträume möglich. Für die vorliegende Arbeit wurden die MTSK für die gewässerkundlichen Jahre 1999 – 2011 erstellt, in Excel exportiert und anschließend zusammenhängend dargestellt. Eine Zusammenfassung der Darstellungen aller MTSK von 1999 bis 2011 ist im DVD-Anhang II zu finden. Bei dem exemplarischen Vergleich der mittleren Tideströmungskurven (MTSK) der letzten 10 Aufzeichnungsjahre von 2001 bis 2011 in den nachfolgenden Grafiken lassen sich die vermuteten Tendenzen der Strömungsverteilungen wiederfinden.

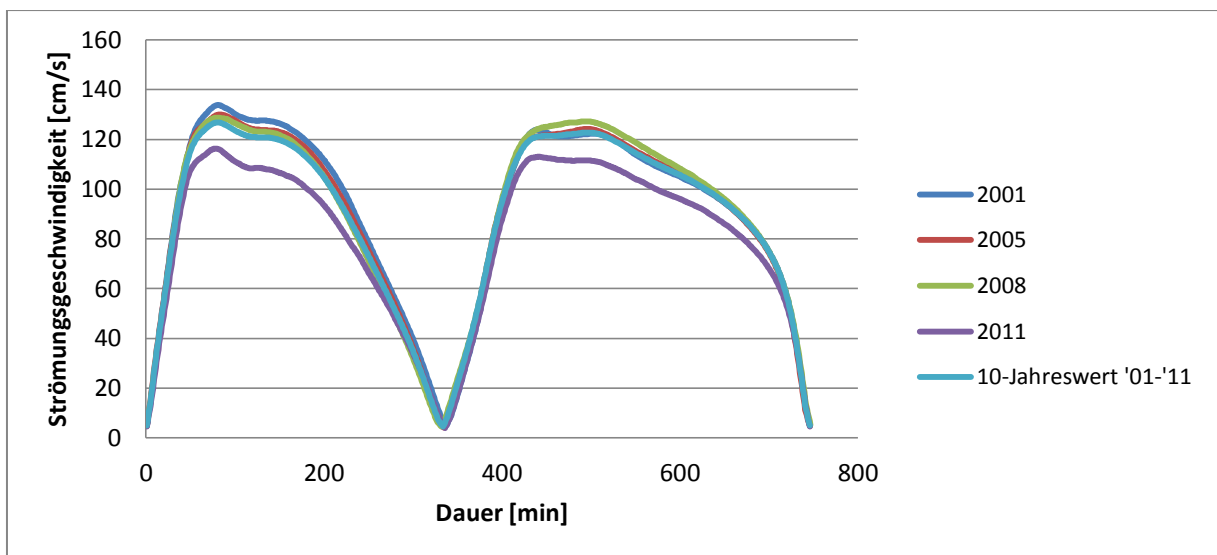


Abbildung 28: MTSK der Oberflächenmessung an Station D3

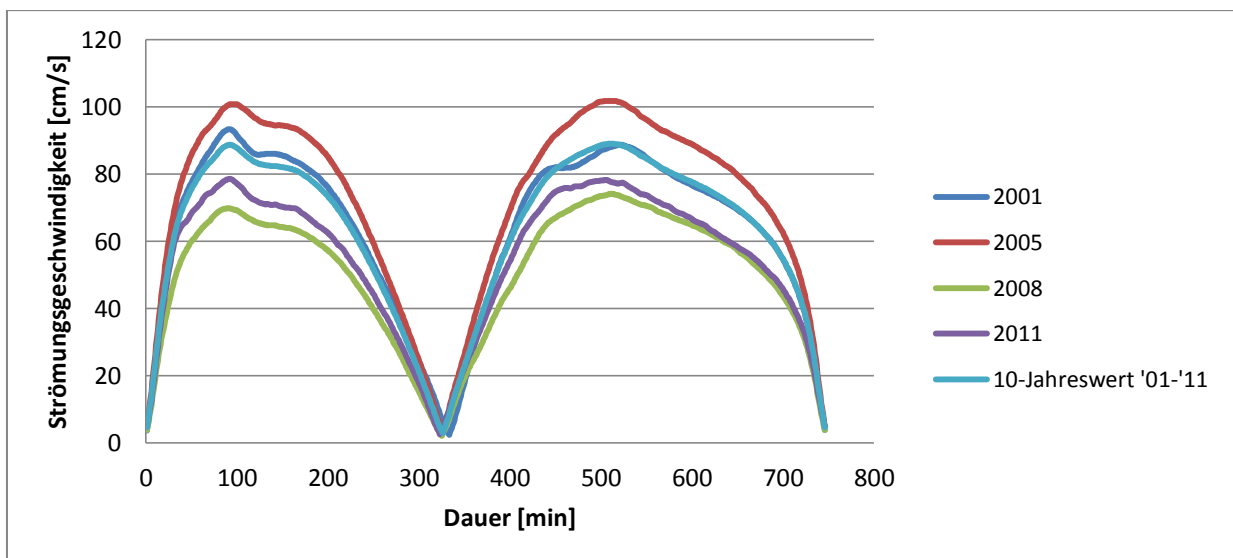


Abbildung 29: MTSK der Sohlenmessung an Station D3

Die Strömungskurven von der Gewässeroberfläche liegen, abgesehen vom Jahr 2011, nahe am Mittelwert und lassen somit keine Tendenz zur Änderung erkennen. An den oberflächennahen Messungen der Station D3 kann die in den Abbildungen der Strömungsverteilung gefundene Abnahme der Flut- sowie der Ebbestromgeschwindigkeit zwischen den Jahren 2001 und 2011 wiedergefunden werden, jedoch weist dies nicht auf einen Trend hin, da die MTSK von 2011 auf ein strömungsschwaches Jahr hinweisen (vgl. Abb. 28). Die Strömungskurven von den Sohlenmessungen (Abb. 29) weisen in den einzelnen Jahren Unterschiede von bis zu 30 cm/s auf. Die Unterschiede können allerdings nicht in Zusammenhang mit einer klaren Tendenz gebracht werden und scheinen natürliche Ursachen zu haben. Nur der bei der Flutstromgeschwindigkeit beobachtete Unterschied zwischen 2001 und 2011 ist erkennbar.

Flutstromgeschwindigkeiten in den Jahren 1999-2011 an Station D3 im Detail

Anhand der in dem DVD-Anhang II gesammelten Daten können folgende Aussagen über die Variation der Strömungsgeschwindigkeiten während der Gewässerkundlichen Jahre 1999-2011 getroffen werden.

Mittlere Flutstromgeschwindigkeit:

- Die mittlere Flutstromgeschwindigkeit (V_{fm} an der **Oberfläche** der Messstation D3 schwankt in den zwölf Jahren von 1999-2011 zwischen 78,8 cm/s und 92,2 cm/s. Der Mittelwert liegt bei 86,8 cm/s; gegenüber 88,2 cm/s für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der Maximalwert von 92,2 cm/s wurde im Jahr 2003 gemessen.
- Die mittlere Flutstromgeschwindigkeit (V_{fm}) an der **Sohle** der Messstation D3 lag im 12-Jahres-Zeitraum 1999-2011 zwischen 48,3 cm/s und 70,7 cm/s. Der Mittelwert liegt bei 61,1 cm/s; gegenüber 56,5 cm/s für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der Maximalwert von 70,7 cm/s wurde im Jahr 2005 gemessen.

Anhand der Werte lässt sich eine Abnahme der mittleren Flutstromgeschwindigkeit an der Oberfläche zwischen 1999 und 2011 um etwa 0,9 cm/s feststellen, zwar steigen die Werte zwischenzeitlich wieder an, aber die Regression zeigt, dass sich eine Tendenz der abnehmenden Flutstromgeschwindigkeit abzeichnet. Auch bei den sohnahen Messungen ist eine Abnahme der mittleren zu erkennen. Abweichungen zu den in dem Abschlussbericht der WSA zur Fahrrinnenanpassung (WSA 2012) aufgeführten Daten sind im 10-Jahresmittel (GwkJ 2001-2010) nicht zu erkennen. So wird dort die mittlere Flutstromgeschwindigkeit an der Oberfläche mit 87,3 cm/s angegeben.

Maximale Flutstromgeschwindigkeit:

- Die maximale Flutstromgeschwindigkeit (V_{fmax}) an der **Oberfläche** der Messstation D3, schwankt im Zeitverlauf 1999-2011 in den Bereichen von 117,4 cm/s bis 136,3 cm/s gemessen. Der Mittelwert beträgt 131,2 cm/s. Im 10-Jahreszeitraum zwischen 2001 und 2010 beträgt er 133,3 cm/s. Der Maximalwert von 136,3 cm/s wurde im Jahr 2007 festgestellt.
- Die maximale Flutstromgeschwindigkeit (V_{fmax}) an der **Sohle** der Messstation D3 liegt im 12-Jahres-Zeitraum von 1999-2011 zwischen 76,5 cm/s und 107,4 cm/s. Der Mittelwert beträgt 94,3 cm/s gegenüber 87,3 cm/s für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der Maximalwert von 107,4 cm/s wurde in den Jahren 2005 und 2006 gemessen.

Die Oberflächenmessungen zeigen eine Abnahme der mittleren und der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten an der Oberfläche und an der Sohle der Messstation. Die Werte der sohnahen Messungen zeigen und bei gleichzeitiger Betrachtung der vorab diskutierten Strömungsverteilungen und den mittleren Tideströmungskurven (MTSKs) einen gewissen Trend zur Abnahme. Allerdings unterliegen die Werte jedoch natürlichen Schwankungen. Die nun festgestellten Abnahmetendenzen entsprechen nicht den Feststellungen im Abschlussbericht zur Fahrrinnenanpassung. Dort wurde eine Zunahme der Flutstromgeschwindigkeiten festgestellt (WSA, 2012).

Ebbestromgeschwindigkeiten 1999-2011 an Station D3 im Detail

Anhand der in dem DVD-Anhang II gesammelten Daten können folgende Aussagen über die Veränderungen der Ebbestromungsgeschwindigkeiten getroffen werden.

Mittlere Ebbestromgeschwindigkeiten:

- Die mittlere Ebbestromgeschwindigkeit (V_{em}) an der **Oberfläche** der Messstation D3 betrug im 12-Jahres-Zeitraum von 1999 bis 2011 84 cm/s bis 96,2 cm/s. Der Mittelwert liegt bei 90,7 cm/s gegenüber 92,3 cm/s für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der Maximalwert wurde mit 96,2 cm/s im Jahr 2003 gemessen.
- Die mittlere Ebbestromgeschwindigkeit (V_{em}) an der **Sohle** der Messstation D3 wurde im 12-Jahres-Zeitraum von 1999 bis 2011 mit 51,9 cm/s bis 75,5 cm/s festgestellt. Der Mittelwert beträgt 64,3 cm/s gegenüber 59,4 cm/s für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der Maximalwert wurde mit 75,5 cm/s im Jahr 2006 gemessen.

Anhand der Daten im DVD-Anhang II ist keine Veränderung der mittleren Ebbestromgeschwindigkeit an der Oberfläche zu erkennen. Dies deckt sich nicht mit den Daten aus dem Abschlussbericht der WSA zur Fahrrinnenanpassung WSA (2012). In dem Bericht wurde der Mittelwert der Oberflächenmessungen mit 90,9 cm/s angegeben und eine Zunahme Ebbestromung erwartet. Die Daten der oberflächennahen Messungen zeigen jedoch keine Veränderung. Auch an der Sohlmessung lassen die Daten eher eine Abnahme als Zunahme der Ebbestromgeschwindigkeit feststellen. Die Werte steigen zwar von 1999 bis 2006 von 65,4 cm/s auf 75,5 cm/s an, fallen anschließend jedoch bis 2011 kontinuierlich auf 56,4 cm/s ab.

Maximale Ebbestromgeschwindigkeiten:

- Die maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten (V_{emax}) betragen an der **Oberfläche** der Messstation D3 in der 12-Jahresphase von 1999 bis 2011 113,4

cm/s bis 133,9 cm/s. Der Mittelwert des 12-Jahreszeitraumes beträgt 126,8 cm/s gegenüber 129,3 cm/s für den 10-Jahreszeitraum 2001 bis 2010. Der Maximalwert von 133,9 cm/s wurde im Jahr 2007 gemessen.

- Die maximale Ebbestromgeschwindigkeit (V_{emax}) an der **Sohle** der Messstation D3 betrug in der 12-Jahresphase von 1999 bis 2011 80,4 cm/s bis 110,5 cm/s. Der Mittelwert für den 12-Jahres-Zeitraum beträgt 94,7 cm/s gegenüber 87,6 cm/s für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der Maximalwert wurde im Jahr 2006 mit 110,5 cm/s gemessen.

Anhand der vorliegenden Daten lässt sich tendenziell keine Zunahme der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit an der Oberfläche erkennen. Dies deckt sich jedoch nicht mit den Ergebnissen des Abschlussberichtes der WSA (2012). Dort wurde eine Zunahme verzeichnet. Der Mittelwert der maximalen Geschwindigkeit an der Oberfläche wird dort mit 127,4 cm/s erwähnt hier wurde er mit 129,3 cm/s für den 10-Jahreswert gemessen.

Allerdings ist an der Messstation D3 ebenfalls keine Tendenz zur Abnahme der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit an der Sohle festzustellen. Zwar steigen die Werte von 1999 bis 2006 an, dann jedoch fallen sie wieder unter den Anfangswert von 1999.

Die Erhöhung der mittleren Ebbestromgeschwindigkeit zwischen den Jahren 1999 und 2011 beträgt im Mittel 0,3 cm/s, allerdings sind die Schwankungen zwischen den Jahren weitaus größer. Daraus kann geschlossen werden, dass die Schwankungen auch Ausdruck natürlicher Ursachen sein können. Im Abschlussbericht der Beweissicherung wird jedoch an Station D3 eine Zunahme der Ebbestromgeschwindigkeit postuliert. Der direkte Vergleich der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit aus dieser Arbeit zeigt eine Zunahme an der Oberfläche um 5,2cm/s; bei der Sohlgeschwindigkeit eine Abnahme um 3,9 cm/s. Diese Ergebnisse decken sich mit den Aussagen im Beweissicherungsbericht der WSA. So kann an dieser Station eine Zunahme der maximalen Ebbe geschwindigkeit an der Oberfläche und eine Abnahme an

der Sohle festgestellt werden. Bei der mittleren Ebbestromgeschwindigkeit ist jeweils ein abnehmender Trend zu verzeichnen.

Verhältnis Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeiten in den Jahren 1999-2011 an Station D3 im Detail

Wie durch die Lage der Messstation D3 nahe des Stromstriches zu erwarten war, sind die Strömungsverhältnisse ebbestromdominiert. Das Verhältnis zwischen mittlerer Flut- (V_{fm}) und mittlerer Ebbestromgeschwindigkeit (V_{em}) sowie maximaler Flut- (V_{fmax}) und maximaler Ebbestromgeschwindigkeit (V_{emax}) wird in der nachfolgenden Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Vergleich mittlerer und maximaler Strömungsgeschwindigkeiten an Station D3 (1999-2011)

GwkJ	$V_{fm} : V_{em}$ Oberfläche	$V_{fm} : V_{em}$ Sohle	$V_{fmax} : V_{emax}$ Oberfläche	$V_{fmax} : V_{emax}$ Sohle
1999	0,95	0,93	0,97	0,96
2000	1,00	0,95	1,05	0,96
2001	1,00	0,97	1,30	1,07
2002	0,96	0,92	1,02	0,95
2003	0,96	0,97	1,04	1,05
2004	0,97	0,98	1,18	1,03
2005	0,97	0,95	1,09	1,01
2006	0,96	0,93	1,11	1,03
2007	0,93	0,94	1,02	1,06
2008	0,94	0,91	0,96	0,89
2009	0,93	0,96	1,08	0,85
2010	0,93	0,97	0,97	0,95
2011	0,93	0,96	0,97	1,00

An der Station D3 ist eine leichte Flutstromdominanz zu erkennen. Gerichtete Veränderungen oder Tendenzen lassen sich nicht feststellen.

Ebbe- und Flutstromdauern zwischen 1999 und 2011 an Station D3

- Die Flutstromdauer (T_f) an der **Oberfläche** der Station D3 variiert über den Beobachtungszeitraum zwischen 5 h 25 m und 5 h 35 m. Der Mittelwert beträgt 5 h 30 m. Der Maximalwert wurde mit 5 h 35 m in den GwkJen 2001 und 2009 gemessen, der niedrigste Wert im Jahr 2002.
- Die Flutstromdauer (T_f) an der **Sohle** der Messstation D3 variiert über den Beobachtungszeitraum zwischen 5 h 03 m und 5 h 32 m. Der Mittelwert beträgt 5 h 24m. Der Maximalwert wurde mit 5 h 32 m in den GwkJen 2000 sowie 2001 gemessen, der niedrigste Wert im Jahr 1999.

Es lässt sich erkennen, dass die Flutdauer an der Oberfläche im Mittel etwa 6 Minuten länger andauert als an der Sohle.

- Die Ebbestromdauer (T_e) an der **Oberfläche** der Messstation D3 variiert über den Beobachtungszeitraum zwischen 6 h 49 m und 6 h 59 m. Der Mittelwert beträgt 6 h 53 m. Der Maximalwert wurde mit 6 h 59 m im GwkJ 2002 gemessen, der niedrigste Wert im Jahr 2001.
- Die Ebbestromdauer (T_e) an der **Sohle** der Messstation D3 variiert über den Beobachtungszeitraum zwischen 6 h 52 m und 7 h 03 m. Der Mittelwert beträgt 6 h 57 m. Der Maximalwert wurde mit 7 h 03 m in den GwkJen 2007, 2009 und 2010 gemessen; der niedrigste Wert in den Jahren 2000 und 2001.

Zur Sohle hin ist eine Verschiebung der Ebbestromdauer um bis zu 9 Minuten zu beobachten. Im direkten Vergleich von Flutstrom- (T_f) und Ebbestromdauer (T_e) lassen sich die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Verhältniszahlen errechnen.

Tabelle 11: Relative Dauern von Flut- und Ebbestrom (Tidedauern) an Station D3

GwkJ	T _f :T _e Oberfläche	T _f :T _e Sohle
1999	0,79	0,73
2000	0,81	0,81
2001	0,82	0,81
2002	0,78	0,77
2003	0,80	0,80
2004	0,81	0,80
2005	0,80	0,77
2006	0,79	0,78
2007	0,80	0,76
2008	0,80	0,77
2009	0,82	0,78
2010	0,79	0,76
2011	0,80	0,76

Die Werte in Tab. 11 zeigen nur geringe Schwankungen. Wie erwartet, sind alle Ebbestromdauern länger als die Flutstromdauern. Ansonsten lassen sich keine Tendenzen ablesen.

Stauwasserdauern im Zeitraum von 1999-2011 an Station D3

- Die an der Messstation D3 über den Messzeitraum der zwölf Gewässerkundlichen Jahre von 1999 bis 2011 an der **Oberfläche** gemessenen Stauwasserdauern bei Flutstromkenterung (Kf) variieren zwischen 14 min bis 16 min. Der Mittelwert beträgt 14,6 min gegenüber 14,4

min für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der maximale Wert von 16 min wurde in den GwkJen 1999 und 2000 gemessen.

- Die an der Messstation D3 über den Messzeitraum der zwölf Gewässerkundlichen Jahre von 1999 bis 2011 an der **Sohle** gemessenen Stauwasserdauern bei Flutstromkenterung (Kf) variieren zwischen 14 min und 22 min. Der Mittelwert beträgt 17,7 min gegenüber 17,8 min für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der maximale Wert von 22 min wurde im GwkJ 2008 gemessen.
- Die an der Messstation D3 über den Messzeitraum der zwölf Gewässerkundlichen Jahre von 1999 bis 2011 an der **Oberfläche** gemessenen Stauwasserdauern bei Ebbe (Ke) variieren zwischen 30 min und 36 min. Der Mittelwert beträgt 32,9 min gegenüber 32,6 min für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der maximale Wert von 36 min wurde im GwkJ 2011 gemessen.
- Die an der Messstation D3 über den Messzeitraum der zwölf Gewässerkundlichen Jahre von 1999 bis 2011 an der **Sohle** gemessenen Stauwasserdauern bei Ebbe (Ke) variieren zwischen 38 min und 60 min. Der Mittelwert beträgt 46 min gegenüber 46,3 min für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der maximale Wert von 60 min wurde im GwkJ 2008 gemessen.

Die Stauwasserdauern bei Flut und bei Ebbe haben sich an der Wasseroberfläche über die Jahre kaum verändert. An der sohnahen Messstation ist sich ein Anstieg zwischen den Jahren 2007 und 2008 bei beiden Stauwasserdauern zu erkennen, der jedoch nach 2008 wieder absinkt. Die Unterschiede können durch die Abweichungen beim Aussetzen der Messsonde sowie durch morphologische Veränderungen der Sohle über das Jahr bedingt sein.

Flut- und Ebbestromkenterung im Zeitraum von 1999 bis 2011 an Station D3

Die Zeitspanne zwischen dem Eintreten des Scheitelpunktes der Flut und dem Zeitpunkt der Flutstromkenterung k_f wird als Kenterpunktabstand der Flut (k_f) bezeichnet. Gemessen wurden die Zeiten in Bezug zum 2,1 Kilometer entfernten Pegel Kollmar.

- Die an der Messstation D3 über den Zeitraum der zwölf Gewässerkundlichen Jahre von 1999 bis 2011 an der **Oberfläche** gemessenen Kenterpunktabstände bei Flut (k_f) variieren zwischen 41 min und 52 min. Der Mittelwert beträgt über den Zeitraum 44 min gegenüber dem 10-Jahres-Mittelwert von 45 min. Der maximale Wert von 52 min wurde im GwkJ 2007 gemessen.
- Die an der Messstation D3 über den Zeitraum der zwölf Gewässerkundlichen Jahre von 1999 bis 2011 an der **Sohle** gemessenen Kenterpunktabstände bei Flut (k_f) variieren zwischen 26 min und 39 min. Der Mittelwert beträgt 32 min, der des 10-Jahresmittels 31 min. Der maximale Wert von 39 min wurde im GwkJ 1999 gemessen.
- Die an der Messstation D3 über den Zeitraum der zwölf Gewässerkundlichen Jahre von 1999 bis 2011 an der **Oberfläche** gemessenen Kenterpunktabstände bei Ebbe (k_e) variieren zwischen 39 min und 45 min. Der Mittelwert beträgt über den langen Zeitraum sowie über die 10-jährige Untersuchungsphase zwischen 2001 und 2010 42 min. Der maximale Wert von 45 min wurde in den GwkJen 2006 und 2007 gemessen.
- Die an der Messstation D3 über den Zeitraum der zwölf Gewässerkundlichen Jahre von 1999 bis 2011 an der **Sohle** gemessenen Kenterpunktabstände bei Ebbe (k_e) variieren zwischen 33 min und 40 min. Der Mittelwert beträgt 36 min und ist damit identisch mit dem Mittelwert des 10-Jahresmittels. Der maximale Wert von 40 min wurde im GwkJ 2007 gemessen.

Darüber hinaus lässt sich anhand der Daten keine Tendenz zur Veränderung der Kenterpunktabstände in die eine oder andere Richtung feststellen.

4.1.1.4 Dauermessstation D4

Lage der Station und grundlegende Charakteristik

Die Messstation D4 ist bei Elbkilometer 676,5 verankert. Sie ist etwa 94 m von der Querprofilmessung entfernt. (vgl. Abbildung 30) Waren bei den Messstationen D1 bis D3 bisher „geringe morphologische Veränderungen“ zu erwarten stellt die Messstation D4 eine Ausnahme dar, „wo aufgrund der Errichtung der Baggergutablagerungsflächen Krautsand Nord und Süd sowie Veränderungen im Bereich Brammer Bank / vorgelagerter Gewässerabschnitt Richtung Fahrrinne / Wischhafener Fahrwasser von Stromstrichverlagerungen für Ebbe und Flut auszugehen ist.“ (WSA, 2012) Dies kann zu größeren Schwankungen der Messwerte führen.

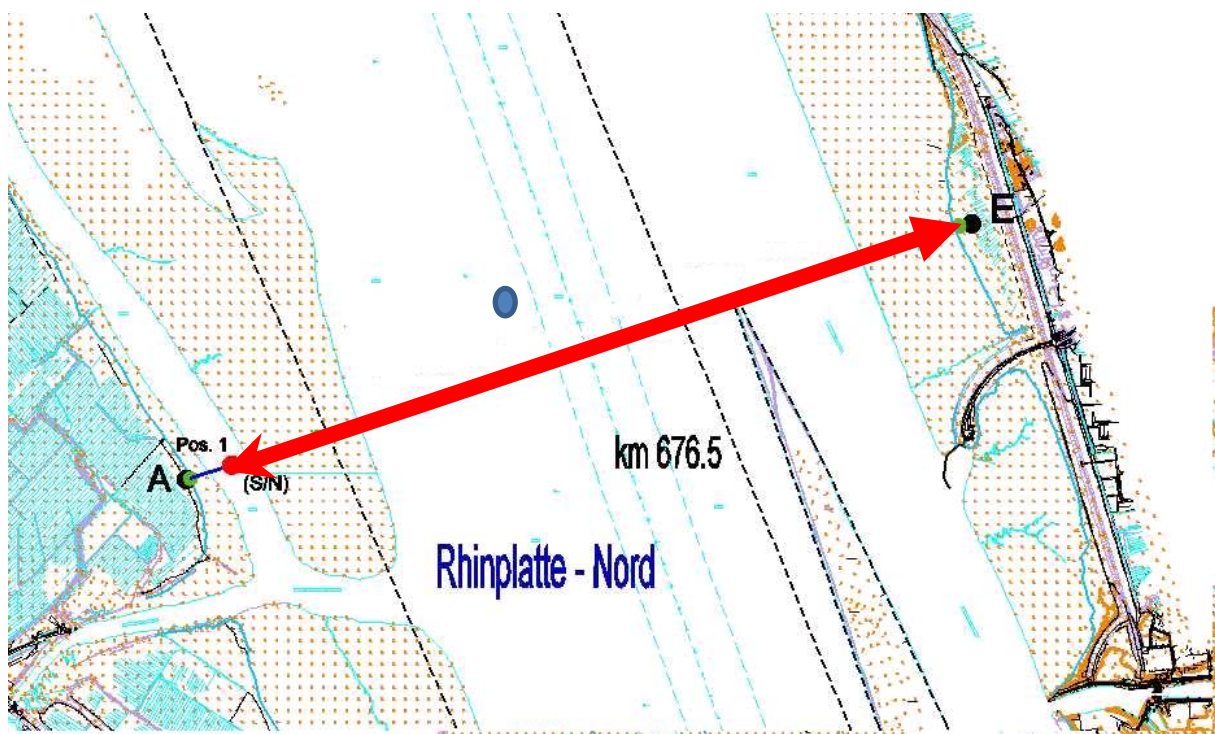


Abbildung 30: Messpositionen im Querprofil bei Station D4

(D4 liegt rund 94m entfernt vom Messprofil)

[WSA 2012]

Mittlere Strömungsverteilungen in den Jahren 2001 bis 2011 an Station D4

In den nachfolgenden Abbildungen 31 und 32 wird die Strömungsverteilung an der **Oberfläche** der Messstation D4 für den 10-Jahreszeitraum zwischen 2001 und 2011 exemplarisch am Beispiel der Jahre 2001 und 2011 dargestellt. Die Grafiken wurden mittels der Software SISKü erstellt. Eine Zusammenfassung aller Abbildungen aus den Jahren 1999 bis 2011 findet sich in dem DVD-Anhang I. Erfasst sind in den Abbildungen jeweils alle Messwerte eines Jahres.

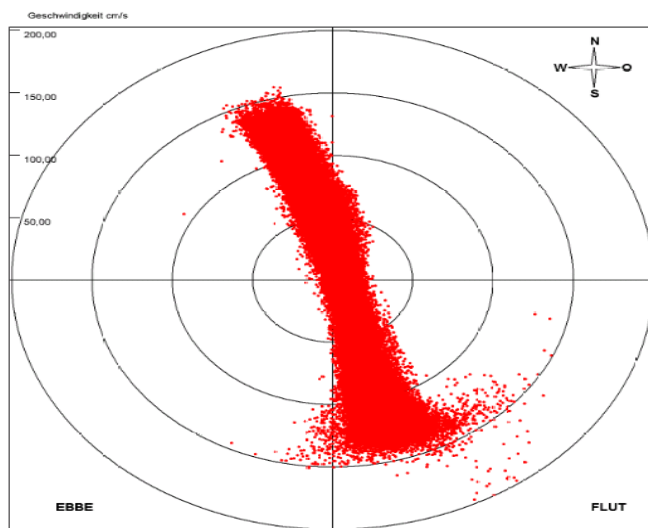


Abbildung 31: Strömungsverteilung an der Oberfläche von Station D4 (2001)

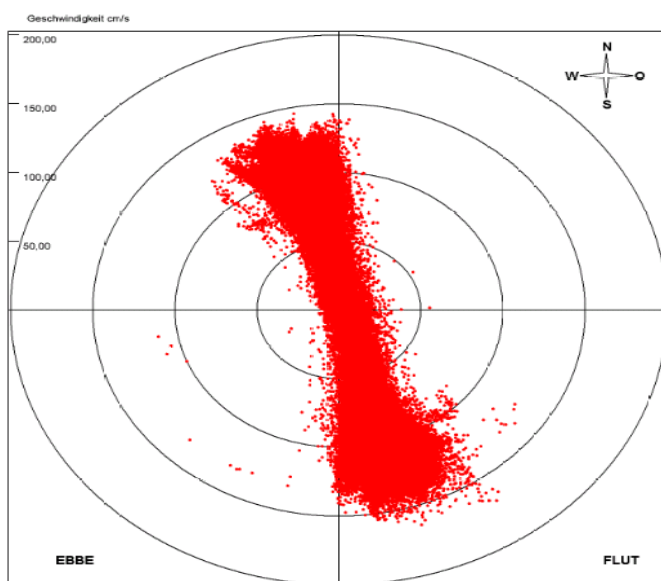


Abbildung 32: Strömungsverteilung an der Oberfläche von Station D4 (2011)

Nachfolgend wird in den Abb. 33 und 34 die Entwicklung der Strömungsverhältnisse an der **Sohle** der Messstation D4 exemplarisch an den Abbildungen für die Jahre 2001 und 2011 exemplarisch dargestellt. Eine Zusammenfassung aller Abbildungen aus den Jahren 1999 bis 2011 findet sich in dem DVD-Anhang I.

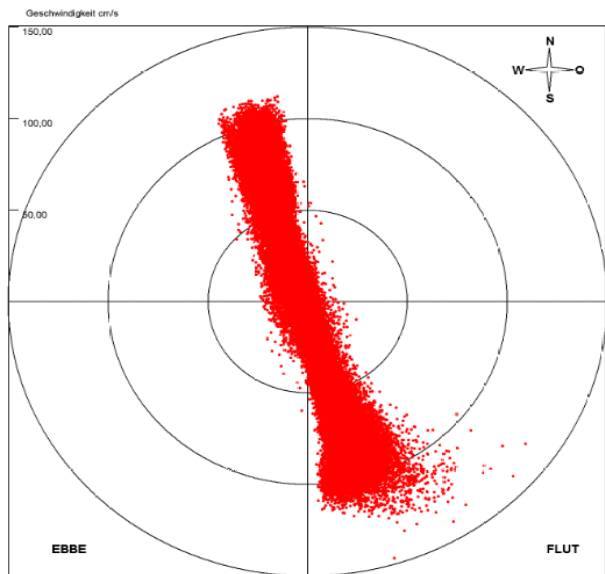


Abbildung 33: Strömungsverteilung an der Sohle von Station D4 (2001)

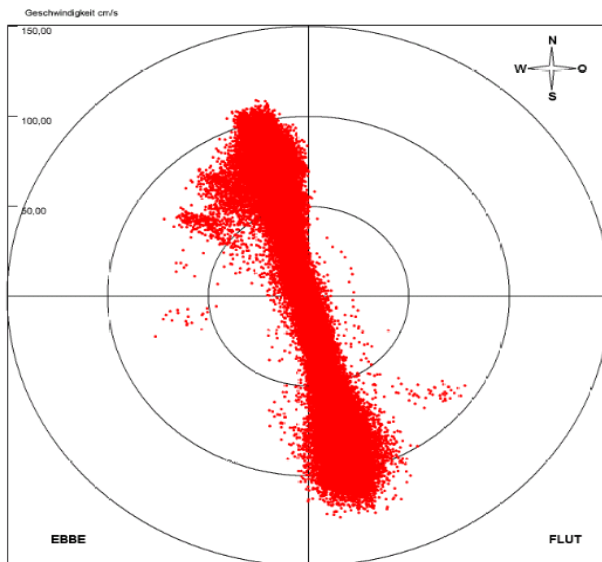


Abbildung 34: Strömungsverteilung an der Sohle von Station D4 (2011)

Anhand der Abbildungen lassen sich bei den Messungen an der Gewässeroberfläche eine leichte Zunahme der Flutgeschwindigkeit sowie eine Abnahme der Ebbestromgeschwindigkeit im Vergleich der Jahre 2001 und 2011 feststellen. Die Betrachtung der Strömungsgeschwindigkeiten an der

Sohle aus dem Jahr 2001 und dem Jahr 2011 lassen keine Veränderung erkennen.

Mittlere Tideströmungskurven 2001-2011 an Station D4

Mit der Software SISKü ist die Ermittlung von mittleren Tideströmungskurven (MTSK) für ausgewählte Zeiträume möglich. Für die vorliegende Arbeit wurde MTSK für die gewässerkundlichen Jahre 1999 – 2011 erstellt, in Excel exportiert und hier auszugsweise dargestellt. Eine Zusammenfassung der Darstellungen aller MTSK von 1999 bis 2011 ist im DVD-Anhang II zu finden. Eine genauere Betrachtung wird nachfolgend in der Detailbetrachtung der Strömungsgeschwindigkeiten geschehen.

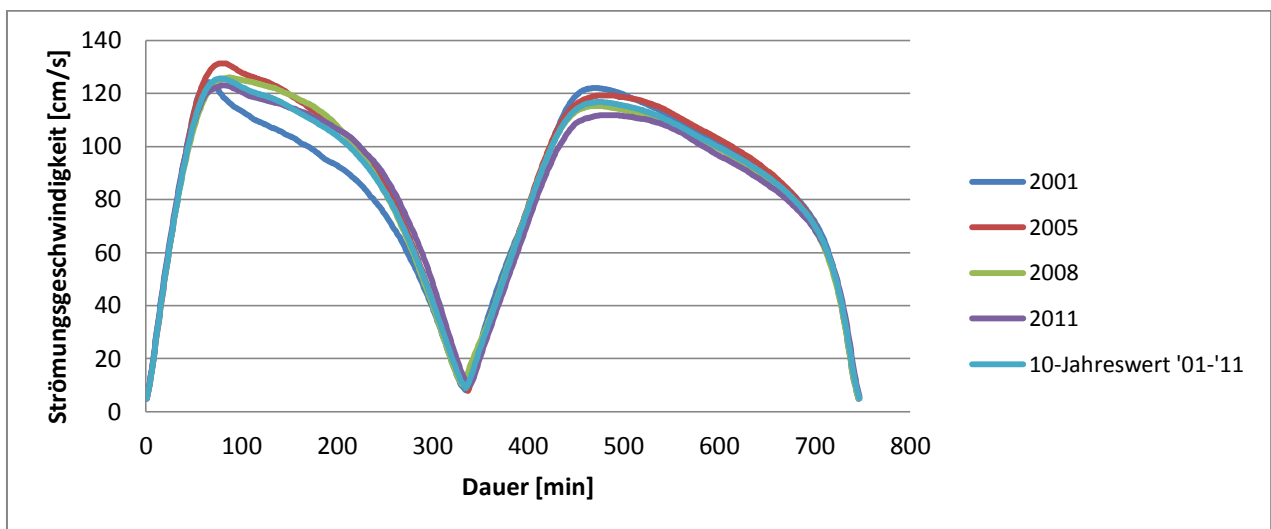


Abbildung 35: MTSK der Oberflächenmessungen zwischen 200 und 2011 an Station D4

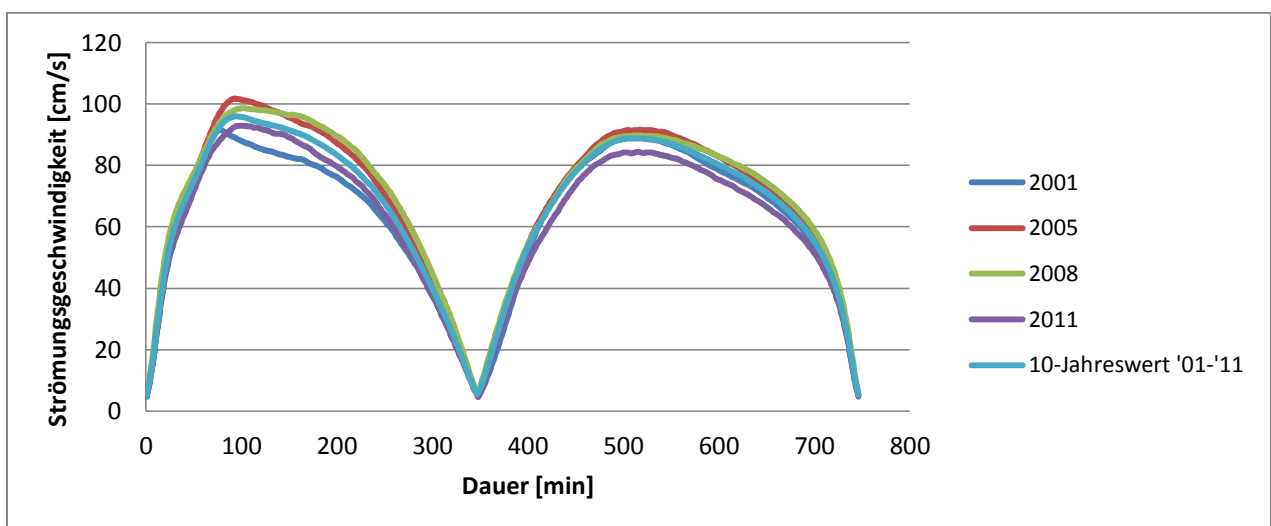


Abbildung 36: MTSK der Sohlenmessungen zwischen 2001 und 2011 an Station D4

Beim Vergleich der mittleren Tideströmungskurven (MTSK) der letzten 10 Jahre (Zeitraum zw. 2001-2011) lassen sich die bei der Strömungsverteilung beobachteten Tendenzen wiederfinden. Es zeigt sich eine leichte Zunahme der Flutgeschwindigkeit sowie eine Abnahme der Ebbestromgeschwindigkeit sowohl bei der Oberflächen-, als auch bei der Sohlmessung zwischen den Jahren 2001 und 2011.

Flutstromgeschwindigkeiten in den Jahren 1999-2011 an Station D4 im Detail

Anhand der in dem DVD-Anhang II befindlichen Daten können folgende Aussagen über die Variation der Strömungsgeschwindigkeiten im Zeitraum 1999-2011 (Gewässerkundliche Jahre) getroffen werden.

Mittlere Flutstromgeschwindigkeiten:

- Die mittlere Flutstromgeschwindigkeit (V_{fm}) an der **Oberfläche** der Station D4 schwankt im 12-Jahreszeitraum von 1999-2011 zwischen 77,5 cm/s und 90,5 cm/s. Der Mittelwert beträgt 86,1 cm/s gegenüber 87,1 cm/s für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der Maximalwert von 90,5 cm/s wurde im Jahr 2005 erfasst.
- Die mittlere Flutstromgeschwindigkeit (V_{fm}) an der **Sohle** der Messstation D4 lag im 12-Jahres-Zeitraum von 1999 bis 2011 zwischen 59,9 cm/s und 72,3 cm/s. Der Mittelwert beträgt 66,6 cm/s gegenüber 61,7 cm/s für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der Maximalwert von 72,3 cm/s wurde im Jahr 2009 ermittelt.

Die Werte zeigen eine Zunahme der mittleren Flutstromgeschwindigkeiten. Im Vergleich der Jahre 2001 und 2010 wird ein Anstieg der Flutstromgeschwindigkeit von 11,3 cm/s an der Oberfläche und 5,1 cm/s an der Sohle erkennbar. Die Mittelwerte der Oberflächenmessung liegen leicht über den Werten des Abschlussberichtes der WSA zur Fahrrinnenanpassung (WSA, 2012). Darin wird der Mittelwert mit 85,2 cm/s angegeben.

Maximale Flutstromgeschwindigkeiten:

- Die maximale Flutstromgeschwindigkeiten (V_{fmax}) an der **Oberfläche** der Messstation D4 schwanken im 12-Jahreszeitraum von 1999-2011 zwischen 120,7 cm/s und 137,7 cm/s. Der Mittelwert des Zeitraumes beträgt 130,8 cm/s gegenüber 132,1 cm/s für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der Maximalwert von 137,7 cm/s wird im Jahr 2005 ermittelt.
- Die maximale Flutstromgeschwindigkeiten (V_{fmax}) an der **Sohle** der Messstation D4 schwanken im 12-Jahreszeitraum von 1999-2011 zwischen 91,3 cm/s und 107,9 cm/s. Der Mittelwert beträgt 101,7 cm/s gegenüber 93,7 cm/s für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der Maximalwert von 107,9 cm/s wurde im Jahr 2007 gemessen.

Im Abschlussbericht der WSA ist für die maximale Flutstromgeschwindigkeit an der Oberfläche ein Mittelwert von 130,7 cm/s verzeichnet. Die 2011 gemessene maximale Flutstromgeschwindigkeit an der Station D4 ist um 8,5 cm/s höher als 2001.

Zwischen den Jahren 2001 bis 2011 zeigt sich eine Tendenz zum Anstieg der Fließgeschwindigkeiten. Auch an der Sohle zeigt der direkte Vergleich der Jahre 2001 und 2011 einen Anstieg der Flutstromgeschwindigkeiten um 10 cm/s. Zusammenfassend kann nach Betrachtung von Strömungsverteilung, MTSKen und mittleren Geschwindigkeiten festgehalten werden, dass an der Oberfläche ein Trend zur Zunahme der Flutstromgeschwindigkeit vorherrscht. An der Sohle kann ebenfalls von einer Geschwindigkeitszunahme ausgegangen werden. Eine Zunahme der maximalen und mittleren Flutstromgeschwindigkeiten wird auch im Beweissicherungsbericht beschrieben.

Ebbestromgeschwindigkeiten in den Jahren 1999-2011 an Station D4 im Detail

Anhand der in dem DVD-Anhang II gesammelten Daten können folgende Aussagen über die Veränderungen der Strömungsgeschwindigkeiten getroffen werden.

Mittlere Ebbestromgeschwindigkeiten:

- Die mittleren Ebbestromgeschwindigkeiten (V_{em}) an der **Oberfläche** der Station D4 lagen im 12-Jahreszeitraum von 1999-2011 zwischen 82,9 cm/s und 90,4 cm/s. Der Mittelwert beträgt 86,1 cm/s gegenüber 85,6 cm/s für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der Maximalwert von 90,4 cm/s wurde im Jahr 2000 gemessen.
- Die mittleren Ebbestromgeschwindigkeiten (V_{em}) an der **Sohle** der Station D4 lagen im 12-Jahreszeitraum von 1999-2011 zwischen 58,4 cm/s und 71,3 cm/s. Der Mittelwert beträgt 65,9 cm/s gegenüber 60,6 cm/s für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der Maximalwert von 71,3 cm/s wurde im Jahr 2010 ermittelt.

Die Oberflächenmessungen zeigen eine Tendenz zur Abnahme der Ebbestromgeschwindigkeit. Die Strömungsgeschwindigkeit vermindert sich zwischen den Jahren 2001 und 2011 um 6,9 cm/s. Auch in den Jahren dazwischen fallen die Werte stetig. Dies ist auch in den Aussagen des Jahresabschlussberichtes der WSA zu finden. Dort wird ebenfalls eine mittlere Ebbestromgeschwindigkeit von 86,1 cm/s angegeben und eine Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit gefunden.

An den Sohlmessungen sind keine Tendenzen zu erkennen. Es wird zwar eine Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit um 0,7 cm/s zwischen den Jahren 2001 und 2011 festgestellt, in den anderen Jahren treten jedoch große Schwankungen auf, die sowohl über, als auch unter dem Mittelwert liegen.

Maximale Ebbestromgeschwindigkeiten:

- Die maximale Ebbestromgeschwindigkeit (V_{emax}) an der **Oberfläche** der Station D4 lag im 12-Jahreszeitraum von 1999-2011 zwischen 118 cm/s und

129,7 cm/s. Im Mittel beträgt der Maximalwert des 12-Jahreszeitraumes 123,6 cm/s gegenüber 123,3 cm/s für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010: Der maximale Wert wird mit 129,7 cm/s im Jahr 2000 ermittelt.

- Die maximale Ebbestromgeschwindigkeit (V_{emax}) an der **Sohle** der Station D4 lag im 12-Jahreszeitraum von 1999 bis 2011 zwischen 82,8 cm/s und 100,5 cm/s. Der Mittelwert des beträgt 93,9 cm/s gegenüber 86,0 cm/s für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010: Der maximale Wert wird mit 100,5 cm/s im Jahr 2002 ermittelt.

Die an der Oberfläche gemessenen Werteweisen auf eine Abnahme der mittleren und maximalen Ebbestromgeschwindigkeit zwischen den Jahren 2001 und 2011 hin. Im direkten Vergleich der beiden Jahre nimmt die Ebbestromgeschwindigkeit in diesem Zeitraum um 10,4 cm/s ab. An der Messstation D4 ist während der Messperiode eine Tendenz zur Abnahme der Ebbestromgeschwindigkeit an der Sohle jedoch nicht zu erkennen.

Gleichzeitig ist an der Messstation D4 eine Tendenz zur Abnahme der Ebbestromgeschwindigkeit über den Beobachtungszeitraum festzustellen. Damit ist bei gemeinsamer Betrachtung von Strömungsverteilung, MTSK-Werten und den Mittelwerten davon auszugehen, dass eine Abnahme der Ebbestromgeschwindigkeit seit 1999 vorliegt. Die Daten zur Beweissicherung weisen ebenfalls auf einen Trend zu Abnahme der Ebbestromgeschwindigkeit hin.

Verhältnis von Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeiten in den Jahren 1999-2011 an Station D4 im Detail

Wie durch die Lage der Messstation D4 zu erwarten war, sind die Strömungsverhältnisse deutlich flutstromdominiert. Das Verhältnis zwischen mittlerer Flut- (V_{fm}) und mittlerer Ebbestromgeschwindigkeit (V_{em}) sowie maximaler Flut-

(V_{fmax}) und maximaler Ebbestromgeschwindigkeit (V_{emax}) wird in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 12: Vergleich mittlerer und maximaler Strömungsgeschwindigkeiten an Station D4 (1999-2011)

GwkJ	$V_{fm} : V_{em}$ Oberfläche	$V_{fm} : V_{em}$ Sohle	$V_{fmax} : V_{emax}$ Oberfläche	$V_{fmax} : V_{emax}$ Sohle
1999	0,95	1,11	0,94	1,00
2000	1,08	1,06	1,00	1,06
2001	1,22	1,05	1,03	1,03
2002	1,09	1,03	1,03	1,05
2003	1,01	1,03	1,05	1,13
2004	1,19	1,07	1,06	1,10
2005	1,08	1,23	1,10	1,12
2006	1,04	1,11	1,08	1,07
2007	1,14	1,27	1,11	1,13
2008	1,21	1,15	1,09	1,11
2009	1,36	1,08	1,11	1,10
2010	1,14	0,98	1,08	1,08
2011	1,13	1,07	1,10	1,11

Eine Verstärkung der Flutstromdominanz ist festzustellen. Dies deckt sich mit den beobachteten Entwicklungen der Strömungsgeschwindigkeiten an der Station D4.

Flut- und Ebbestromdauern zwischen 1999 und 2011 an Station D4

- Die Flutstromdauer (T_f) an der **Oberfläche** der Station D4 variiert während des Beobachtungszeitraums zwischen 5 h 30 m und 5 h 37 m. Der Mittelwert beträgt 5 h 33 m. Der Maximalwert wurde mit 5 h 37 m im GwkJ 2011 gemessen; der niedrigste Wert wurde in den Jahren 2000 und 2008 festgestellt.
- Die Flutstromdauer (T_f) an der **Sohle** der Station D4 variiert während des Beobachtungszeitraums zwischen 5 h 37 m und 5 h 50 m. Der Mittelwert beträgt 5 h 45 m. Der Maximalwert wurde mit 5 h 50 m im GwkJ 2004 gemessen. Der niedrigste Wert wurde im Jahr 2002 ermittelt.

Es lässt sich erkennen, dass die Flutdauer an der Oberfläche im Mittelwert etwa 12 Minuten kürzer andauert als an der Sohle.

- Die Ebbestromdauer (T_e) an der **Oberfläche** der Messstation D4 variiert während des Beobachtungszeitraums zwischen 6 h 47 m und 6 h 55 m. Der Mittelwert beträgt 6 h 51 m. Der Maximalwert wurde mit 6 h 55 m im GwkJ 2008 gemessen. Der niedrigste Wert wurde im Jahr 2011 ermittelt.
- Die Ebbestromdauer (T_e) an der **Sohle** der Messstation D4 variiert während des Beobachtungszeitraums zwischen 6 h 34 m und 6 h 47 m. Der Mittelwert beträgt 6 h 38 m. Der Maximalwert wurde mit 6 h 47 m im GwkJ 2002 gemessen. Der niedrigste Wert wurde im Jahr 2008 ermittelt.

Es lässt sich feststellen, dass die Ebbestromdauer an der Oberfläche um durchschnittlich 12 Minuten länger als an der Sohle andauert.

Den direkten Vergleich von Flutstrom- (T_f) und Ebbestromdauer (T_e) ermöglichen die in der nachfolgenden Tabelle 13 errechneten Verhältniszahlen.

Tabelle 13: Relative Dauern von Flut- und Ebbestrom (Tidedauern) an Station D4

GwkJ	T _f :T _e Oberfläche	T _f :T _e Sohle
1999	0,81	0,84
2000	0,80	0,87
2001	0,81	0,88
2002	0,81	0,83
2003	0,81	0,86
2004	0,81	0,89
2005	0,82	0,87
2006	0,81	0,87
2007	0,81	0,88
2008	0,80	0,87
2009	0,80	0,88
2010	0,82	0,86
2011	0,83	0,87

Anhand der Werte in Tabelle 13 lässt sich erkennen, dass die relativen Tidedauern nur geringen Schwankungen unterworfen sind. Wie erwartet sind alle Ebbestromdauern größer als die Flutstromdauern. Ansonsten lassen sich keine Tendenzen aus den Werten ablesen.

Stauwasserdauern in den Jahren 1999-2011 an Station D4

- Die an der Station D4 über den Zeitraum der 12 Gewässerkundlichen Jahre von 1999 bis 2011 an der **Oberfläche** gemessenen Stauwasserdauern bei Flutstromkenterung (Kf) variieren zwischen 14 min bis 19 min. Der Mittelwert beträgt 16,3 min gegenüber 16 min für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der maximale Wert von 19 min wurde im GwkJ 1999 gemessen.

- Die an der Station D4 über den Zeitraum der 12 Gewässerkundlichen Jahre von 1999 bis 2011 an der **Sohle** gemessenen Stauwasserdauern bei Flutstromkenterung (Kf) variieren zwischen 14 min bis 20 min. Der Mittelwert beträgt 17,2 min gegenüber 17 min für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der maximale Wert von 20 min wurde im GwkJ 2007 gemessen.
- Die an der Station D4 über den Zeitraum der 12 Gewässerkundlichen Jahre von 1999 bis 2011 an der **Oberfläche** gemessenen Stauwasserdauern bei Ebbe (Ke) variieren zwischen 21 min bis 33 min. Der Mittelwert beträgt 25,7 min gegenüber 25,5 min für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der maximale Wert von 33 min wurde im GwkJ 2002 gemessen.
- Die an der Station D4 über den Zeitraum der 12 Gewässerkundlichen Jahre von 1999 bis 2011 an der **Sohle** gemessenen Stauwasserdauern bei Ebbe (Ke) variieren zwischen 28 min bis 44 min. Der Mittelwert beträgt 36,6 min gegenüber 35,6 min für den 10-Jahreszeitraum von 2001 bis 2010. Der maximale Wert von 44 min wurde im GwkJ 1999 gemessen

Die Stauwasserdauern der Flut und der Ebbe haben sich an der Gewässeroberfläche zwischen den Jahren 2001 und 2011 jeweils um 5 Minuten verringert. Allerdings lässt die Streuung der Werte während der Aufzeichnungen keine klare Tendenz erkennen.

Die Werte der Sohlenmessungen zeigen jedoch für die Stauwasserdauern der Ebbe eine abnehmende Tendenz. In diesen Fällen fielen die Stauwasserdauern der Ebbe mit deutlichem Trend um 5 min im Vergleich der Jahre 2001 und 2011. Die Stauwasserdauern der Flut zeigen an der Sohle der Elbe an diesem Messpunkt keine eindeutigen Veränderungen.

Flut- und Ebbestromkenterung in den Jahren 1999-2011 an Station D4

Die Zeitspanne zwischen dem Eintreten des Scheitelpunktes der Flut und dem Zeitpunkt der Flutstromkenterung k_f wird als Kenterpunktabstand der Flut (k_f) bezeichnet. Gemessen wurden die Zeiten im Bezug zum 2,2 Kilometer entfernten Pegel Glückstadt.

- Die an der Station D4 über den Zeitraum der 12 Gewässerkundlichen Jahre von 1999 bis 2011 gemessenen Kenterpunktabstände der Flut (k_f) variieren an der **Oberfläche** zwischen 28 min bis 36 min. Der Mittelwert beträgt über den 12-Jahreszeitraum 32 min; der während der 10-Jahresperiode festgestellte Mittelwert betrug ebenfalls 32 min. Der maximale Wert von 36 min wurde im GwkJ 1999 gemessen.
- Die an der Station D4 über den Zeitraum der 12 Gewässerkundlichen Jahre von 1999 bis 2011 an der **Sohle** gemessenen Kenterpunktabstände der Flut (k_f) variieren zwischen 33 min bis 40 min. Der Mittelwert beträgt über den 12-Jahreszeitraum 37 min, der Mittelwert der 10-Jahresperiode beträgt ebenfalls 37 min. Der maximale Wert von 40 min wurde in den GwkJen 1999, 2001 und 2008 gemessen.
- Die an der Station D4 über den Zeitraum der 12 Gewässerkundlichen Jahre von 1999 bis 2011 an der **Oberfläche** gemessenen Kenterpunktabstände der Ebbe (k_e) variieren zwischen 32 min bis 38 min. Der Mittelwert beträgt über den 12-Jahreszeitraum 35 min, der Mittelwert der 10-Jahresperiode von 2001 bis 2010 liegt ebenfalls bei 35 min. Der maximale Wert von 38 min wurde in den GwkJen 1999 sowie 2002 und 2003 gemessen.
- Die an der Station D4 über den Zeitraum der Gewässerkundlichen Jahre von 1999 bis 2011 an der **Sohle** gemessenen Kenterpunktabstände der Ebbe (k_e) variieren zwischen 25 min und 33 min. Der Mittelwert der 12-jährigen Periode beträgt 28 min, der Mittelwert der 10-Jahresperiode liegt bei nur 27 min. Der maximale Wert von 33 min wurde im GwkJ 2007 gemessen.

An der Messstation D4 ist eine Abnahme der Kenterpunktverschiebung sowohl der Ebbe als auch der Flut festzustellen.

Über den Beobachtungszeitraum zeigt sich an der Oberfläche eine Abnahme von 2 Minuten bei der Kenterpunktverschiebung der Flut und eine Abnahme von 6 Minuten bei der Ebbe. An der Sohle ist eine Abnahme von 4 Minuten für den Kenterpunktabstand der Flut und von 8 Minuten für den Kenterpunktabstand der Ebbe festzustellen.

4.1.1.5 Vergleich Ausgewählter Tidekennwerte D1 bis D4

Zum Vergleich der Tidekennwerte der Messstationen D1 bis D4 werden die in den Kapiteln 4.1.1.1 bis 4.1.1.4 diskutierten Daten der Oberflächenmessungen herangezogen, da sich hierfür mehr vergleichende Daten in der Literatur finden lassen und zudem eine Verfälschung aufgrund „kleinräumiger morphologischer Effekte“ unwahrscheinlicher als an der Sohle ist, wo Kolkbildungen oder Dünen-/Riffelstrukturen erheblichen Einfluss nehmen können. Alle erarbeiteten Daten finden sich im DVD- Anhang II in Gänze wieder.

Vergleich der Mittleren Tideströmungskurven (MTSK)

Betrachtet man das Zehnjahresmittel der mittleren Tideströmungskurven der Stationen D1 (Elbe-Km 643,0) bis D4 (Elbe-Km 676,5) der Jahre von 2001 bis 2011, so fällt grundsätzlich eine Abnahme der Strömungsgeschwindigkeiten von D1 nach D4 (Richtung stromabwärts) auf. Gründe hierfür sind - zunächst bei vereinfachter Annahme annähernd vergleichbarer Fließquerschnitte - im Betrachtungsbereich bzw. an den vier Stationen die Verluste der Geschwindigkeitsenergie durch Sohl- und Randraibungseffekte, als Folge eine Abnahme der einschwingenden Wassermassen und die (Teil-) Reflektionen der Tidewelle. Schließlich führt auch die Abflusszunahme (Einmündung von Nebenflüssen und Direktabfluss) stromabwärts zu einer Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit. Wenn solche „[...] Gezeitenwellen in ein Ästuar eindringen, werden sie verformt und verursachen dadurch einen land- und

seewärtigen Transport [...]. [Es unterscheiden sich] [...]drei Hauptprozesse, die die Tidewelle im Ästuar beeinflussen:

1. Dissipative Dämpfung durch Bodenreibung,
2. Konvergenz durch Landseitige Verengung des Ästuarquerschnittes,
3. Reflektion an Untiefen und am Ende des Ästuars (Wehr).

Die Bodenreibung führt zur Dissipation der Energie der Tidewelle, so dass ihre Amplitude stromauf exponentiell abnimmt“ (Kappenberg & Fangert, 2007).

Festzuhalten ist auch, dass es sich bei den verwendeten Werten um Werte gemessen am Fahrrinnenrand handelt und diese Abweichungen zu den Strömungswerten in der Fahrrinnenmitte aufweisen. Auch die Lage im Stromstrich und das dadurch bedingte Anströmen der Dauermessstationen sind beeinflussende Faktoren.

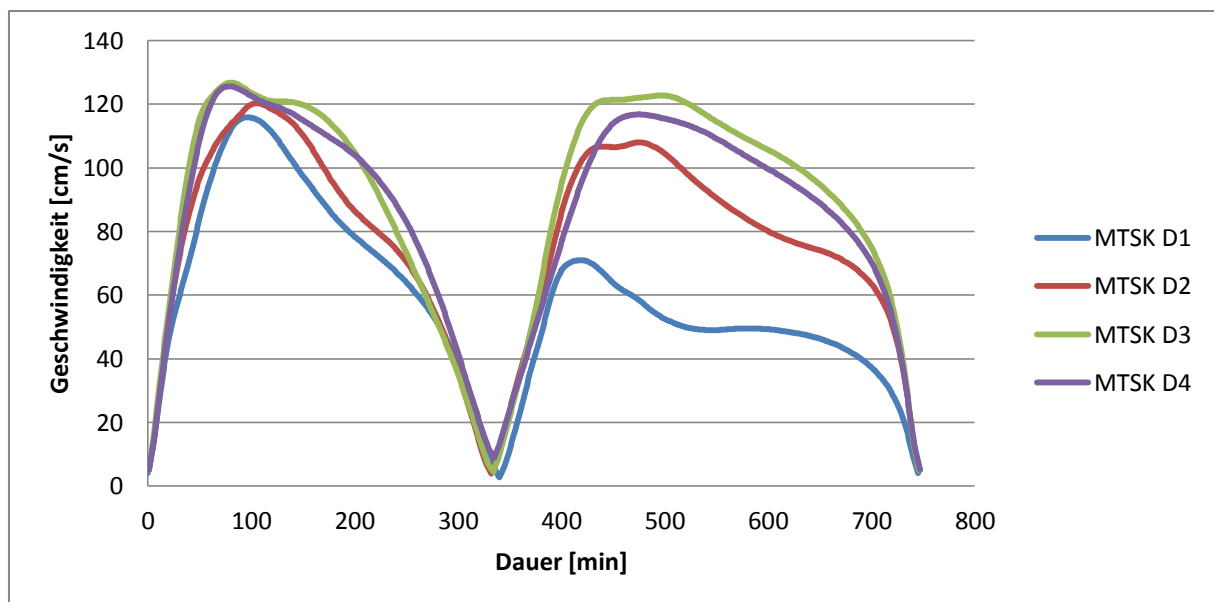


Abbildung 37 Verlauf der mittleren Tideströmungskurve (MSTK) Station D1-D4 2001-2011

Bei Betrachtung der Abbildung 37 ist zu erkennen, dass die Ebbestromgeschwindigkeit an der Dauermessstation D3 am höchsten ausfällt. Dies ist mit der bereits in Kapitel 4.1.1.3 Dauermessstation D3 4.1.1.3 erwähnten Lage im Nahfeld des Stromstriches und den damit zu erwartenden, maximalen, in Bezug auf die übrigen Messstationen zu sehenden Ebbestromgeschwindigkeiten zu erklären.

Vergleich mit BAW-Modelldaten für den Fahrrinnenbereich

Die in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Messwerte liegen innerhalb des im Gutachten der Bundesanstalt für Wasserbau zur Anpassung der Unter- und Außenelbe von 2006 angegebenen Wertespektrums aus Modellrechnungen (BAW, 2006). Ausnahmen bilden die Werte der Dauermessstation D1, bei der die Werte der maximalen Flutstromgeschwindigkeit (V_{fmax}) über und die Werte der maximalen (V_{emax}) und der mittleren Ebbestromgeschwindigkeit (V_{em}) unter den Modellwerten liegen. Diese Unterschiede sind jedoch schlüssig, da die in dem Gutachten angegebenen und in Tabelle 14 zusammengefassten Werte, sich auf den Bereich der Fahrrinne beziehen, während die in dieser Studie gemessenen Werte aus dem Randbereich der Fahrrinne stammen. Die Dauermessstation D1 liegt wie in Kapitel 4.1.1.1 beschrieben bei Flutstrom im Prallhang.

Tabelle 14: Vergleich der Tidekennwerte aus der Studie der BAW (2006) mit den Mittelwerten der Messdaten der Stationen D1 – D4 (aus dem Zeitraum 1999 bis 2011)

Elbe-km (Station)	V_{fm} m [cm/s]	V_{fmax} m [cm/s]	V_{em} m [cm/s]	V_{emax} m [cm/s]	Ebbstrom- dauer [min]	Flutstrom- dauer [min]
650 – 640 (D1)						
Modellergebnisse	67 – 98	107– 152	64 – 90	86 – 121	390-448	310-349
Messdaten (1999- 2011)	72	165	47	76	404	340
660 – 650 (D2)						
Modellergebnisse	68 – 96	103– 144	66 – 91	90 – 120	385-447	312-357
Messdaten(1999- 2011)	80	126	77	116	413	330
670 – 660 (D3)						
Modellergebnisse	72– 100	102– 139	74– 101	104 –134	370-426	325-361
Messdaten(1999- 2011)	88	133	92	129	413	330
680 – 670 (D4)						
Modellergebnisse	71– 104	101– 143	73– 103	98 – 142	366-421	331-369
Messdaten(1999- 2011)	87	132	85	123	411	333

Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeiten im Zeitraum 2001-2011 und Beobachtung abnehmender Flutstromgeschwindigkeiten ab 2007/08

Aus den Verläufen in den nachfolgenden Abbildungen zu den mittleren und maximalen Flutstromgeschwindigkeiten wird erkennbar, dass die mittleren Geschwindigkeiten an den Stationen D1 bis D3 ab 2007/08 deutlich abfallen. Gleichzeitig tritt ein Rückgang der mittleren maximalen Geschwindigkeiten an allen Dauermessstationen (Rückgang bei D4 jedoch geringer als bei D1 bis D3) auf.

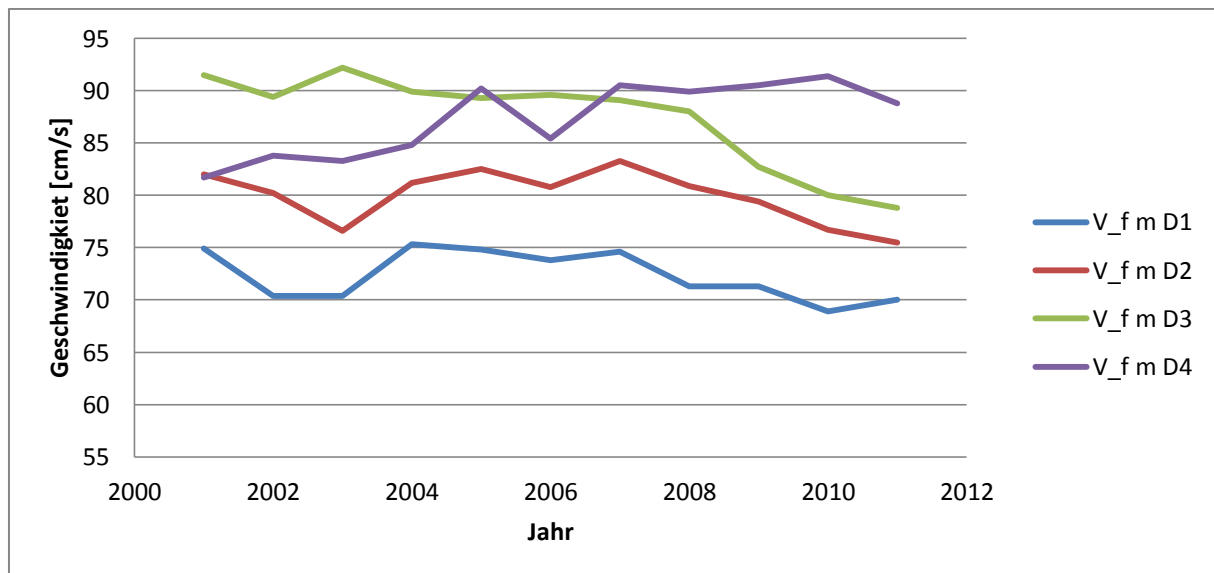


Abbildung 38: Mittlere Flutstromgeschwindigkeiten [V_fm] an den Stationen D1- D4 zwischen 2001 und 2011

Gründe für die Abnahme der Geschwindigkeiten an den Stationen D1-D3 ab 2007 könnten:

- vermehrte Ostwindlagen,
- Eiswinter in den Jahren 2010 und 2011,
- eine verminderte Anzahl an Sturmfluten seit 2008 im Vergleich zu den Vorjahren,
- höhere Oberwasserabflüsse gegenüber den Vorjahren und/oder
- morphologische Veränderungen außerhalb der Messstrecke (Durchbruch Klotzloch – Medemrinne im Außenelbereich in Jahr 2008)

sein [5].

Eine weitere Klärung ist nur mittels zusätzlicher Recherchen und Auswertungen möglich und war im Rahmen dieser Arbeit, deren Hauptfokus auf einer

Langzeitbetrachtung für den Zeitraum von 1960 - 2010 liegt, aus Zeitgründen nicht möglich. Es sei nur darauf hingewiesen, dass die im WSA Hamburg verfügbare Sturmfluttabelle (vgl. Tabelle 15 sowie Anhang II) zwischen 2003 und 2008 eine Häufung von Sturmfluten aufzeigt, während im Zeitraum ab 2008/2009 deutlich weniger Sturmfluten auftraten (WSA, 2012). Damit sind ab 2008/2009 weniger Extremereignisse mit höheren Flutstromgeschwindigkeiten und voraussichtlich auch insgesamt weniger Westwindlagen (vor/um Sturmflutereignissen) aufgetreten.

Tabelle 15: Auftreten von Sturmfluten zwischen den Jahren 2000 und 2011

Jahr	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Anzahl	7	4	9	3	9	11	7	15	11	3	2	7

[Quelle: WSA-Hamburg]

Diese Phänomene könnten den diskutierten Abfall der mittleren sowie maximalen Flutstromgeschwindigkeiten mindestens zum Teil erklären (Abbildung 39).

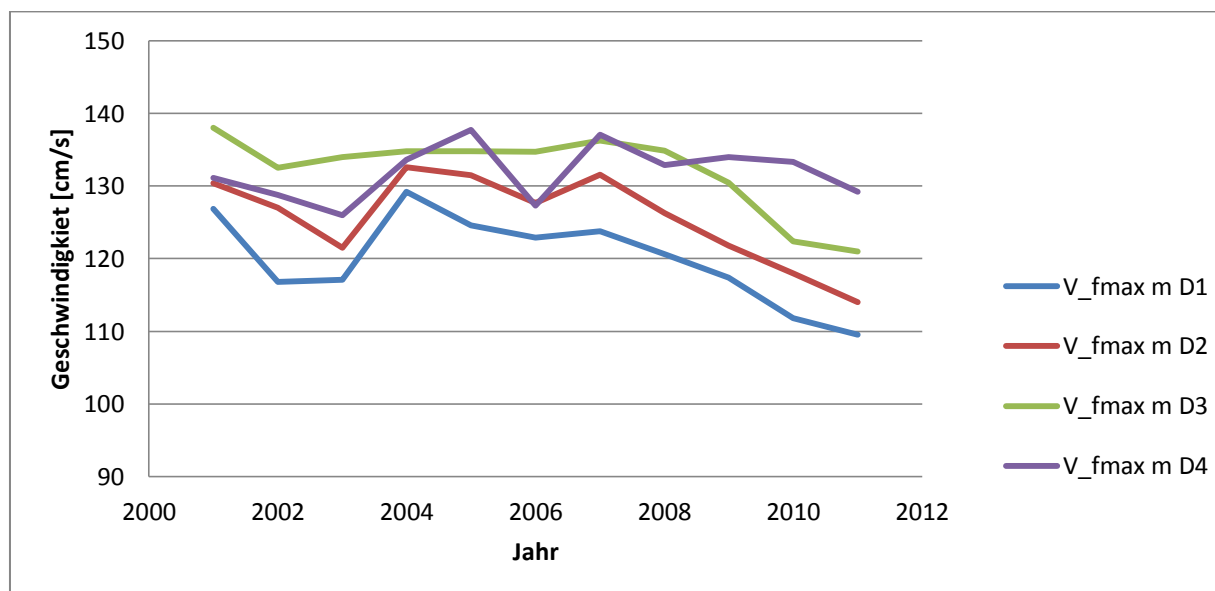


Abbildung 39 Verlauf mittlerer maximaler Flutstromgeschwindigkeit [V_fmax] D1- D4 zwischen 2001 und 2011

Für diese (Teil-)Ursachen spricht auch, dass bei den Ebbestromgeschwindigkeiten keine vergleichsweise deutlichen Trends erkennbar sind (vgl. hierzu die nachfolgenden Abbildung 40 und 41). Lediglich bei den mittleren Ebbestromgeschwindigkeiten ist ein Anstieg in den Jahren 2010 und 2011 gegenüber 2009 zu beobachten, der auf hohe Oberwassermengen in diesen beiden Jahren zurückgeführt werden kann. Für Station D1 ist anzumerken, dass an dieser

Stelle bereits langjährig eine Abnahme der Ebbestromgeschwindigkeiten beobachtet wird (vgl. Kapitel 4.1.1.1). An dieser Stelle sind vermutlich kleinräumige morphologische Ursachen verantwortlich. Zudem wurde an dieser Stelle im Jahr 2008 ein Sedimentfang eingerichtet, wodurch ein größerer Fließquerschnitt im Fahrrinnenbereich unmittelbar stromauf der Dauermessstelle entstanden ist [5].

Unterschiedliche Oberwasserzuflüsse in den Messjahren könnten die Unterschiede in den Ebbestromgeschwindigkeiten u.U. auch zum Teil mit verantworten. Dazu werden in Abbildung 41 die Oberwasserzuflüsse zwischen 1999 und 2011 am Wehr Neu-Darchau stellvertretend für die Unterelbe dargestellt.

In Abbildung 40 wird für die Station D1 ein Einfluss der Oberwasserzuflüsse teilweise erkennbar, z.B. beim Vergleich der Jahre 2009 (geringerer Abfluss) mit den Jahren 2010 und 2011 (hohe Abflüsse) oder bei Betrachtung der Jahre 2002 und 2003 gegenüber 2004. Auf Höhe der Station D4 zeigt der Effekt des Oberwasserzuflusses kaum noch eine Auswirkung, bei D2 und D3 ist er zunehmend geringer als bei D1 ausgeprägt.

Die Abnahme der mittleren Ebbestromgeschwindigkeit an der Station D3 im Vergleich von 2008 zu 2010 ist gegebenenfalls auf kleinräumige morphologische Veränderungen im Nahbereich zurückzuführen (Querschnittsaufweitung). Die Veränderungen sind in einer neuen Strategie bei der Verbringung von Unterhaltungsbaggertgut begründet. Bis „zum Jahr 2006 [...] [wurden] im Bereich Pagensand jährlich mehr als 1 Mio. m³ Baggertgut verbracht [...]. Im Jahr 2005 waren es 2,8 Mio. m³, in den Jahren 2006 und 2007 nur noch ca. 0,6 Mio. m³. In den letzten Jahren ist kaum noch (max. 180.000 m³) bzw. gar kein Sediment mehr bei Pagensand verbracht worden. Es ist anzunehmen, dass der in den Jahren 2006/2007 einsetzende Trend [...] [einer] verstärkten Querschnittsaufweitung [...] mit der veränderten Unterhaltungsstrategie im Zusammenhang steht“ (WSA, 2012).

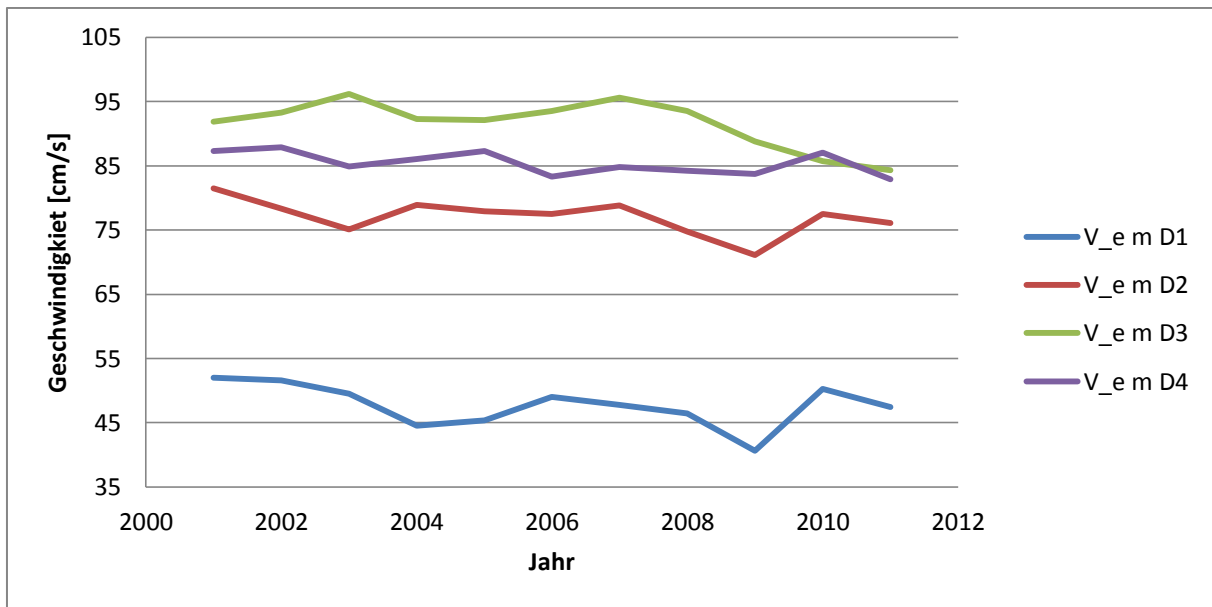


Abbildung 40: Mittlere Ebbestromgeschwindigkeit [V_{em}] an den Stationen D1- D4 zwischen 2001 und 2011

Neben der Querschnittsaufweitung, die mit einer Kolkbildung auf Höhe der Nordspitze der Elbinsel Pagensand einhergeht, als indirekte Ursache ist aber eventuell auch eine (im Zuge eben dieser Kolkbildung) notwendige Versetzung der Messstation D3 im Jahre 2009 um 100 m und als direkte Ursache der Geschwindigkeitsabnahme zu nennen [5]. Eine abschließende Begründung für die besonderen Veränderungen der Ebbestromgeschwindigkeit V_{em} an der Station D3 liegt derzeit nicht vor.

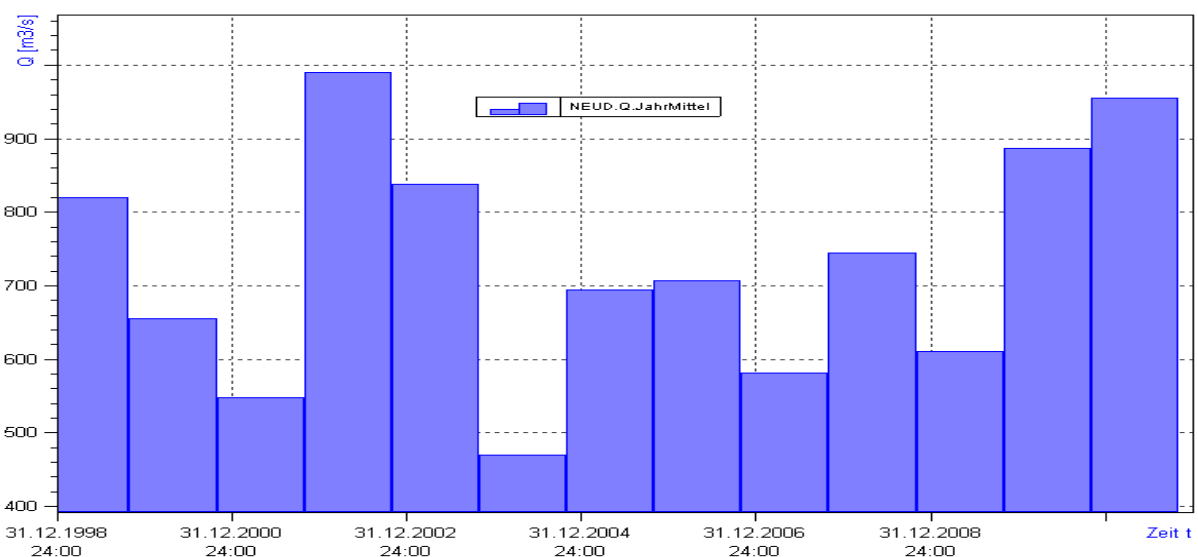


Abbildung 41: Jahresmittelwerte der Oberwasserzuflüsse am Wehr Neudarchau, Zeitraum: 1999 bis 2011

Trendentwicklung bei den Flut- und Ebbestromdauern in den Jahren 2001 bis 2011

Eine eindeutige trendartige Veränderung der Flut- (T_f) und Ebbestromdauern (T_e) lässt sich während der Jahre 2001 bis 2010 an allen vier Stationen über den Beobachtungszeitraum nicht feststellen. Auch bei der Betrachtung der Kenterpunktabstände sowie der Stauwasserdauern lassen sich keine klaren Veränderungen feststellen. (vgl. Daten im DVD-Anhang III).

4.1.2 Ergebnisse der ADCP-Querprofilmessungen von 2006 bis 2011

Ergänzend zu den Dauermessungen werden seit 2006 an allen Dauermessstationen einmal jährlich Querprofilmessungen mit Hilfe des ADCP-Verfahren („moving boat“-Methode) durchgeführt (vgl. Ausführungen in Kapitel 4.1 sowie Abbildung 8).

„Das Messboot überquert den Tidefluss auf dem ausgewählten Profil und ermittelt dabei

- das Tiefenprofil
- das Strömungsprofil und
- den Durchfluss

Eine Eintidenmessung beginnt i. A. vor Einsetzen des Flutstroms und dauert mehr als 13 Stunden. Während dieser Zeit fährt das ADCP-Boot das Profil kontinuierlich ab und misst so die Änderungen der Strömungsverhältnisse im Verlauf der Tide. Für jede Messfahrt wird mit TRAN-SECT, dem ADCP-Erfassungs- und Auswerteprogramm des [ADCP-]Geräteherstellers oder mit dem Nachfolger WinRiver eine eigene Datei (P-Files) angelegt, in der die Strömungsverhältnisse, das Tiefenprofil, der Durchfluss und Navigationsdaten gespeichert sind“ (Adler/Nicodemus, 2008).

Die weitere Auswertung erfolgt im WSA Hamburg mittels der Spezialsoftware TIDE der BfG. Über den gesamten Querschnitt werden die Strömungsverhältnisse einzelner Zellen (örtlich) und über eine gesamte Tide (zeitlich) ermittelt. In Ergänzung zu den Daten der Dauermessstationen können mit diesem Verfahren Aussagen zur Übertragbarkeit der Daten der Dauermessstationen D1 bis D4 auf den jeweiligen gesamten Gewässerquerschnitt getroffen werden. Unter anderem können so Vergleiche zwischen den Strömungsverhältnissen an den Dauermessstationen mit den Strömungsverhältnissen im Fahrrinnenbereich angestellt werden, wo aufgrund der Verkehrsverhältnisse keine dauerhaften Messungen möglich sind. Durchgeführt wurden diese Messfahrten in den strömungsärmeren Sommermonaten.

Nachfolgend werden die Ergebnisse einzelner Messfahrten dargestellt und mit den oberflächennah ermittelten Tidekennwerten der Dauermessstationen verglichen. Als Vergleichswerte eignen sich die Werte der Oberflächenmessung besser als die der Sohlenmessungen, da aus den ADCP-Messungen für den Bereich 1-2 m oberhalb der Gewässersohle aus messtechnischen Gründen keine, bzw. nur unzureichende Daten vorliegen. Entsprechend ist eine zellenbezogene Auswertung von ADCP-Messdaten mit der Spezialsoftware TIDE für den Bereich der Gewässeroberfläche genauer [4].

Die vorgestellten Ergebnisse stammen überwiegend aus bereits erfolgten Auswertungen des WSA Hamburg, z. T. wurden Sie aber auch im Rahmen dieser Arbeit in TIDE ermittelt.

4.1.2.1 Messquerschnitt Q1

Der Messquerschnitt Q1 ist auf Elbe-km 643,0 gelegen. Der Verlauf der Messstrecke ist auf Abbildung 9 in Kapitel 4.1.1.1 dargestellt.

Strömungsgeschwindigkeiten, Flut- und Ebbestromdauern

Im Unterschied zu den Ergebnissen der Dauermessung an der Station D1 zeigen die Daten der Querprofilmessungen Q1 in Tabelle 16 (vgl. auch DVD-Anhang III) eine leichte bis keine Dominanz des Ebbestroms bei mittleren Stromgeschwindigkeiten,

aber eine deutliche Ebbestromdominanz bei maximalen Stromgeschwindigkeiten. Aufgrund der schon erwähnten Prallhanglage der Dauermessstation (vgl. Kap. 4.1.1.1 Abb. 9) bei Flutstrom und einer Konzentration des Ebbestrom auf den Fahrrinnenbereich zeigt sich beim Vergleich der Werte aus den Querprofilmessungen mit den D1-Werten der Oberflächenmessungen für die Flutströmung (V_{fm} und V_{fmax}) nur eine geringe Differenz, während ein deutlicher Unterschied für die maximalen (V_{emax}) und mittleren Ebbestromgeschwindigkeiten (V_{em}) festgestellt werden (siehe Abbildung 42) kann (DVD-Anhang II).

Tabelle 16: Messquerschnitt Q1: Tidekennwerte, Strömungsgeschwindigkeiten, sowie Flut- und Ebbestromdauer aus ADCP-Messungen 2006 bis 2010

Tidekennwerte aus ADCP-Messungen im Messquerschnitt Q1 Elbe-km 643,0									
Datum	V_{fm} [m/s]	V_{em} [m/s]	V_{fm}: V_{em}	V_f max [m/s]	V_e max [m/s]	V_f max: V_e max	T_f [h]	T_e [h]	T_f: T_e
22.03.06	0.59	0.61	0.97	0.87	1,00	0.87	05:14	06:56	0.75
21.03.07	0.71	0.72	0.99	1,00	1.18	0.85	04:54	07:39	0.64
26.03.08	0.63	0.67	0.94	0.89	1.08	0.82	04:51	06:52	0.71
08.07.09	0.59	0.56	1.05	0.79	0.92	0.86	05:24	06:55	0.78
30.03.10	0.66	0.72	0.92	0.94	1.15	0.82	05:04	07:40	0.66
Mittelw.	0.63	0.65	0.97	0.90	1.07	0.84	05:05	07:14	0.70

Zudem zeigt die Querprofilmessung im Vergleich zur D1-Messung Unterschiede in der Dauer der Halbtiden. So ist die Ebbestromdauer (T_e) etwas länger und die Flutstromdauer (T_f) entsprechend kürzer.

In der Abbildung 42 werden die Stromgeschwindigkeiten aus den D1-Messungen zusammen mit den Ergebnissen aus einer ADCP-Messung exemplarisch dargestellt. Der Abbildung liegen die Daten der ADCP-Messung vom 21.03.07 zugrunde. Weitere Darstellungen finden sich in einer Studie des WSA Hamburg (Grellus, 2012), welche für diese Arbeit zur Verfügung gestellt wurde (vgl. auch DVD-Anhang IV).

Die Grafik macht deutlich, dass sich die Daten der Dauermessstation D1 zur Bestimmung der Flutcharakteristik in der Fahrrinne gut eignen. Bei der Bestimmung der Ebbestromung zeigen sich jedoch große Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Station D1 und den Ergebnissen aus der Fahrrinnenmitte.

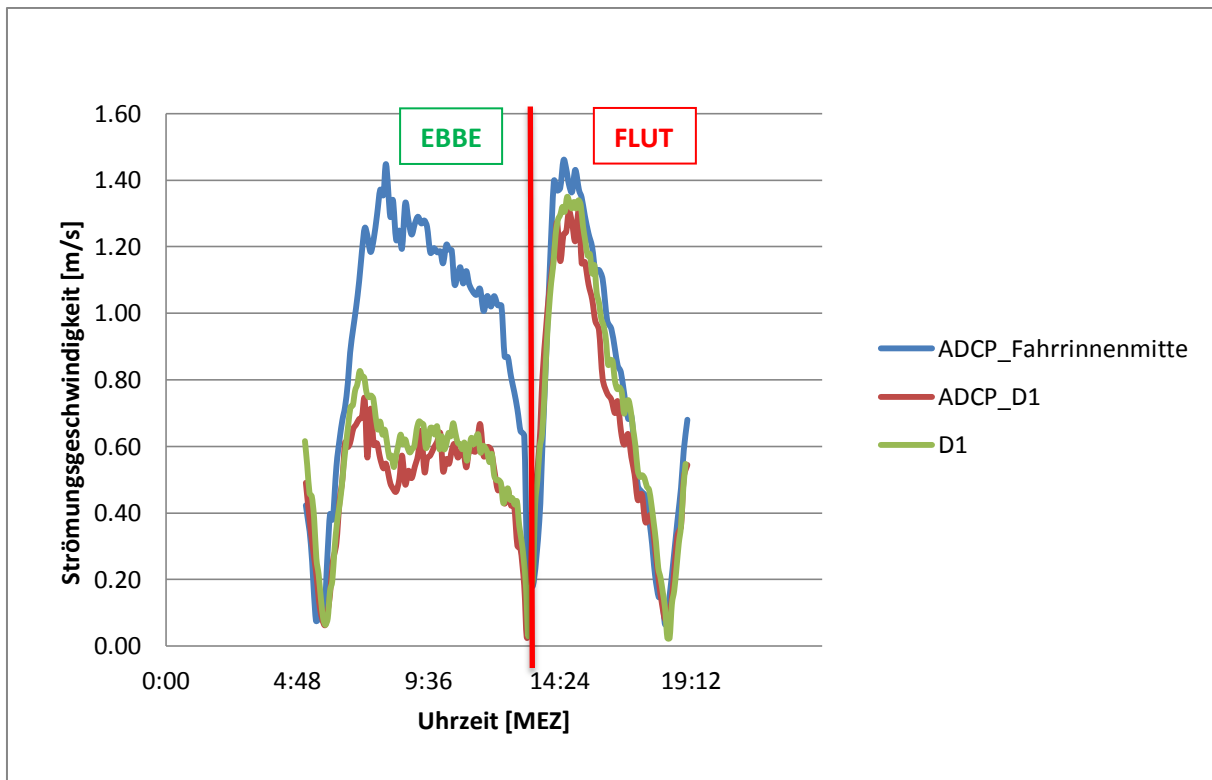


Abbildung 42: Strömungsgeschwindigkeiten am 21.03.07; Vergleich der Ergebnisse der Messungen an der Station D1 mit den ADCP-Messungen (Auswertung mittels Software TIDE)

[Abgewandelt nach Grellus, 2012]

Stauwasserdauern und Kenterpunktabstände

Nachfolgend sind in Tabelle 17 und Tabelle 18 aus den durchgeführten ADCP-Messungen ermittelte Stauwasserdauern sowie die Kenterpunktabstände zum Bezugspegel dargestellt. Die zeitliche Begrenzung der Messfahrten erklärt das teilweise Fehlen der Ergebnisse von Beginn und Ende der Messungen. Dargestellt sind jeweils die Werte einer Messfahrt.

Tabelle 17: Stauwasserdauern am Messquerschnitt Q1 (Daten aus ADCP-Messungen)

Stauwasserdauern Q1			
Datum	Stauwasserdauer Ebbe [min]	Stauwasserdauer Flut [min]	Stauwasserdauer Ebbe [min]
22.03.2006	44	19	45
21.03.2007	33	16	39
26.03.2008	k.a.	10	44
08.07.2009	k.a.	18	39
30.03.2010	39	11	42

k.a.= Daten unvollständig

Tabelle 18: Kenterpunktabstände am Messquerschnitt Q1 (Daten aus ADCP-Messungen)

Kenterpunktabstand Q1 Pegel Schulau			
Datum	Kenterpunktabstand Flut [min]	Kenterpunktabstand Ebbe [min]	Kenterpunktabstand Flut [min]
22.03.2006	24	25	18
21.03.2007	23	24	18
26.03.2008	k.a.	26	12
08.07.2009	20	21	19
30.03.2010	14	17	17

k.a.= Daten unvollständig

Sowohl Stauwasserdauern als auch Kenterpunktabstände variieren leicht zwischen den Jahren. Eine trendhafte Entwicklung kann aufgrund der geringen Datenlage nicht festgestellt werden. Die Schwankungen können natürliche Ursachen haben.

4.1.2.2 Messquerschnitt Q2

Zum Querprofil Q2 ist zunächst anzumerken, dass die ADCP-Messungen rd. 1,3km von der Dauermessstation D2 entfernt erfolgen (vgl. Abbildung 16 in Kapitel 4.1.1.2). An dieser Stelle wird ergänzend zur Strömungs- und Durchflussmessung in der Hauptelbe auch der Durchfluss in der Lühesander Süderelbe gemessen. Dieses Verfahren geht zurück auf entsprechende Auflagen aus der Beweissicherung zur letzten Fahrrinnenanpassung.

Tabelle 19: Tidekennwerte, Strömungsgeschwindigkeiten, sowie Flut- und Ebbestromdauer am Messquerschnitt Q2 (Daten aus ADCP-Messungen)

Tidekennwerte aus ADCP-Messungen im Messquerschnitt Q2 Elbe-km 651,1									
Datum	V_fm [m/s]	V_em [m/s]	V_fm: V_em	V_f max [m/s]	V_e max [m/s]	V_f max: V_e max	T_f [h]	T_e [h]	T_f: T_e
19.04.06	0.64	0.71	0.90	0.93	1.03	0.90	04:54	07:27	0.66
04.04.07	0.76	0.72	1.06	1.03	1.14	0.90	05:15	07:01	0.75
22.05.08	0.79	0.75	1.05	1.08	1.21	0.89	05:26	06:48	0.80
25.08.09	0.77	0.70	1.10	1.01	1.13	0.89	05:31	06:35	0.84
06.05.10	0.64	0.63	1.02	0.92	1.01	0.91	05:19	06:39	0.80
Mittelw.	0.72	0.70	1.03	0.99	1.10	0.90	05:17	06:54	0.76

Die in Kapitel 4.1.1.2 beobachtete leichte Flutstromdominanz an der Station D2 ist

auch bei den Q2-Querprofilmessungen am Parameter ‚mittlere Strömungsgeschwindigkeit‘ feststellbar wenn auch mit leichten Veränderungen (Tab. 19 und Abb. 43). Bei der maximalen Strömungsgeschwindigkeit zeigt sich in der Querprofilmessung hingegen ein Umschwung zur Ebbestromdominanz, d.h. der Querschnitt Q2 ist in voller Breite als ebbstromdominant anzusehen.

Die Tidekennwerte in Tab. 19 zeigen zudem, dass die ADCP-Messungen im Vergleich zur D2-Messung zumeist leicht geringere mittlere Flutstromgeschwindigkeiten (V_{fm}), sowie z.T. höhere, z.T. niedrigere mittlere Ebbestromgeschwindigkeiten (V_{em}) anzeigen. Allgemein lässt sich festhalten, dass die Strömungsgeschwindigkeiten der ADCP-Messung zum überwiegenden Teil höher ausfallen als die Vergleichswerte an der Dauermessstation D2. Dies wird auch aus Abbildung 43 (nach Grellus, 2012) deutlich. Einschränkend ist jedoch zu berücksichtigen, dass mit „ADCP D2 Ref“ ein virtueller Messpunkt (Zellenauswertung aus ADCP-Messung) im Profil Q2 auf Höhe der 1,3km entfernten Station D2 beschrieben wird [4]. Der ADCP-Messquerschnitt im Bereich der Elbinsel Lühesand ist etwas schmaler als an der Dauermessstelle D2, was die etwas höheren Geschwindigkeiten erklärt.

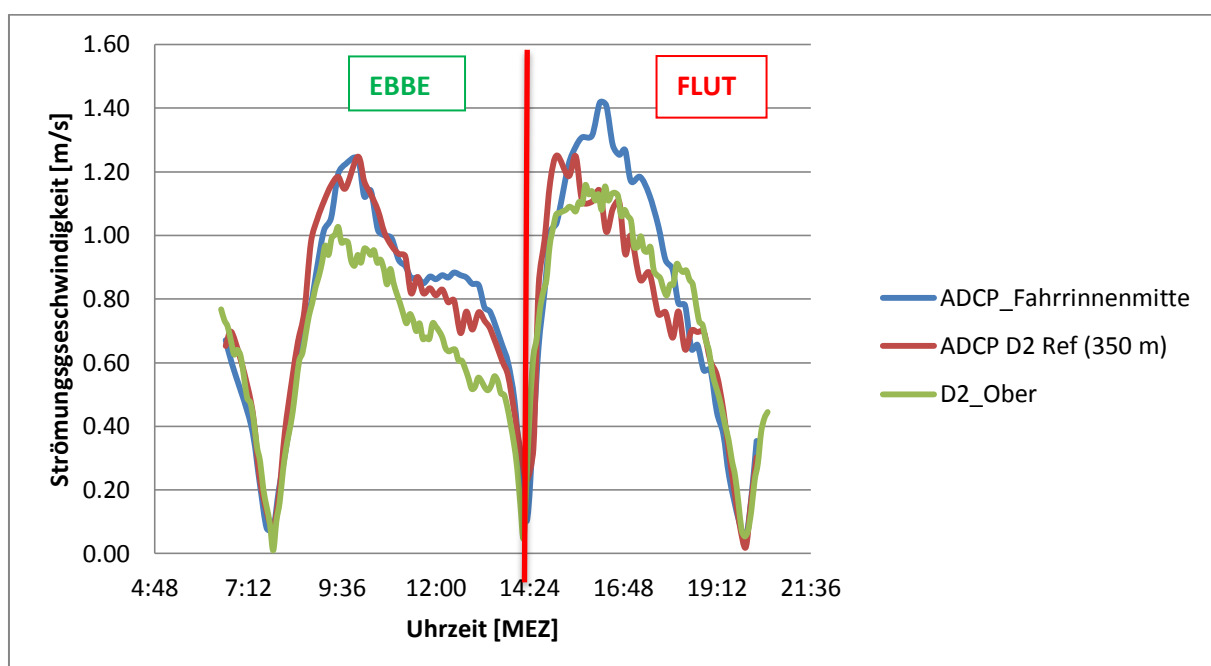


Abbildung 43: Strömungsgeschwindigkeiten am 25.8.09; Vergleich der Ergebnisse der Messungen an der Station D2 mit den ADCP-Messungen (Auswertung mittels Software TIDE)

[Abgewandelt nach Grellus, 2012]

Die mittlere Flutstromdauer T_f fällt bei der ADCP-Messung im Vergleich zur Dauermessstation D2 zwischen 36 Minuten (2006) und 4 Minuten (2009) kürzer aus. Trotz teilweise unveränderter Ebbestromdauern zeigen die Verhältniszahlen ($T_f:T_e$, letzte Spalte in Tab. 19) eine geringe Veränderung gegenüber den D2-Daten (vgl. Kapitel 4.1.1.2 Dauermessstation D2 und/oder DVD-Anhang II) was in der Durchführung der ADCP-Messungen in den Sommermonaten begründet sein wird.

Stauwasserdauern und Kenterpunktabstände

Die Werte der in Tabelle 20 dargestellten Stauwasserdauern sind, verglichen mit den Werten der Messstation D2, mit wenigen Ausnahmen identisch.

Tabelle 20: Stauwasserdauern am Messquerschnitt Q2 (Daten aus ADCP-Messungen)

Stauwasserdauern Q2				
Datum	Stauwasserdauer Ebbe [min]	Stauwasserdauer Flut [min]	Stauwasserdauer Ebbe [min]	Stauwasserdauer Ebbe [min]
19.04.2006	46	16	49	k.a
04.04.2007	34	15	31	k.a
22.05.2008	36	13	33	k.a
25.08.2009	32	12	31	k.a
06.05.2010	k.a	17	45	22

k.a.= Daten unvollständig

Unterschiede bei den für Q2 ermittelten Kenterpunktabständen im Verhältnis zum Pegel Hetlingen zeigen sich im Vergleich zu den entsprechenden (mittleren) Werten der Dauermessstation D2 vor allem für die Kenterpunktabstände der Flut (Tab. 21). Bezogen auf diesen Parameter ergeben sich Unterschiede von maximal 27 Minuten. Die Ursachen für die Unterschiede sind in den speziellen Bedingungen der jeweiligen Tide und/oder unterschiedlichen Kenterzeiten zwischen Fahrinne und Randbereichen zu suchen.

Tabelle 21: Kenterpunktabstände am Messquerschnitt Q2

Kenterpunktabstand Q2 Pegel Hetlingen				
Datum	Kenterpunktabstand Flut [min]	Kenterpunktabstand Ebbe [min]	Kenterpunktabstand Flut [min]	Kenterpunktabstand Flut [min]
19.04.2006	12	39	13	k.a
04.04.2007	26	27	39	k.a
22.05.2008	39	30	48	k.a
25.08.2009	38	25	40	k.a
06.05.2010	k.a	32	33	31

k.a.= Daten unvollständig

4.1.2.3 Messquerschnitt Q3

Strömungsgeschwindigkeiten, Flut- und Ebbestromdauern

Am Messquerschnitt Q3 (vgl. Abbildung 23 in Kapitel 4.1.1.3) sind kaum Unterschiede zwischen den Werten der Querprofilmessung und denen der Dauermessstation D3 feststellbar. Das gilt sowohl für den „virtuellen ADCP-Referenzmesspunkt“ als auch für die Daten aus der Fahrrinnenmitte (vgl. die exemplarische Abbildung 44). Allerdings fallen die an den jeweiligen „spezifischen“ Messtagen in Tabelle 22 erfassten gemessenen Geschwindigkeiten der mittleren Ebbe- (V_{em}) und Flutströmungen (V_{fm}) zumeist geringer aus als die Jahresmittelwerte an den Dauermessstationen, was auf die Durchführung der Messung im Sommerhalbjahr zurückgeführt werden kann. Die dargestellten Werte weisen Abweichungen von 4 bis 31 cm/s bei der mittleren Flutstromgeschwindigkeit (V_{fm}), sowie von 5,7 bis 32,6 cm/s bei der mittleren Ebbestromgeschwindigkeit (V_{em}) gegenüber den Jahresmittelwerten zwischen 2006 und 2010 auf (vgl. Kapitel 4.1.1.3 bzw. DVD-Anhang II).

Tabelle 22: Tidekennwerte, Strömungsgeschwindigkeiten, sowie Flut- und Ebbestromdauer am Messquerschnitt Q3

Tidekennwerte aus ADCP-Messungen im Messquerschnitt Q3 Elbe-km 664,7									
Datum	V_fm [m/s]	V_em [m/s]	V_fm: V_em	V_f max [m/s]	V_e max [m/s]	V_f max: V_e max	T_f [h]	T_e [h]	T_f: T_e
30.08.06	0.71	0.72	0.99	1.02	1.03	0.99	05:45	06:34	0.88
22.08.07	0.58	0.62	0.94	0.90	0.87	1.03	05:50	06:21	0.92
03.09.08	0.77	0.77	1.00	1.08	1.10	0.98	05:47	06:15	0.93
18.06.09	0.71	0.70	1.01	0.99	1.07	0.93	06:37	06:14	1.06
24.06.10	0.76	0.80	0.95	1.13	1.10	1.03	05:37	06:55	0.81
Mittelw.	0.71	0.72	0.99	1.02	1.03	1.02	05:55	06:27	0.79

Die in Tabelle 22 zusammengefassten maximalen Strömungsgeschwindigkeiten aus den ADCP-Messungen liegen ebenfalls unter den im Jahresmittel der Dauermessstation ermittelten Werten. Grundsätzlich bleibt aber festzuhalten, dass die aus der ADCP-Messung ermittelten Strömungsverhältnisse und -verläufe mit denen an der Dauermessstation D3 gut übereinstimmen; die Verläufe der an der Messstation D3 erhobenen Strömungsdaten und denen der ADCP-Messungen sind sehr gleichförmig (siehe Abbildung 44). Die Daten der Dauermessstation sind an dieser Stelle somit gut geeignet, Ebbe- und Flutstromgeschwindigkeiten über einen langen Zeitraum zu beobachten.

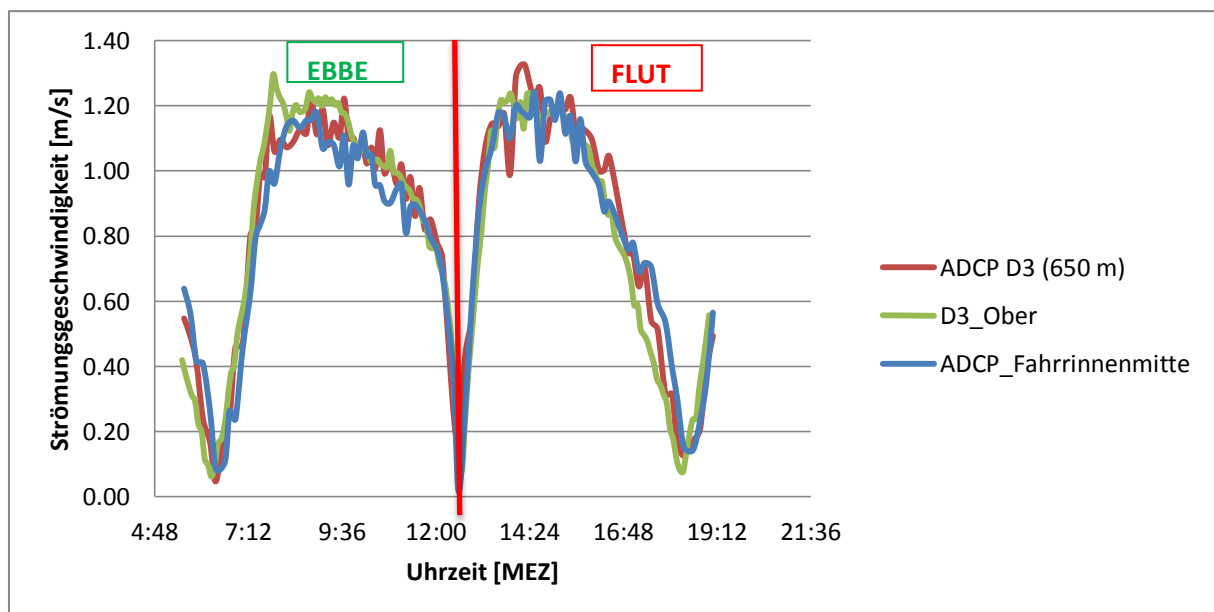


Abbildung 44: Strömungsgeschwindigkeiten am 3.9.08; Vergleich der Ergebnisse der Dauermessungen an der Station D3 mit den ADCP-Messungen (Auswertung mittels Software TIDE)

[Abgewandelt nach Grellus, 2012]

Zwischen den Dauern der Halbtiden T_e und T_f lassen sich im Vergleich mit den Jahresmittelwerten der Dauermessstation D3 Unterschiede feststellen, die jedoch keine Systematik zeigen. Die rechnerisch ermittelten Verhältniszahlen zwischen den beiden Tidedauern schwanken bei den ADCP-Messungen zwischen 0,81 und 1,06 gegenüber 0,93 und 0,96 bei den der Jahresmittelwerten der Dauermessung D3. Die Ursachen für die Unterschiede sind in den speziellen Bedingungen der jeweiligen Tide zwischen Fahrrinne und Randbereichen zu suchen

Stauwasserdauern und Kenterpunktabstände

Die in Tabelle 23 zusammengefassten Stauwasserdauern aus den ADCP-Messungen weichen wenig bis gar nicht von denen in Kapitel 4.1.1.3 Dauermessstation D3 vorgestellten Jahresmittelwerten ab. Auch die Dauern der in Tabelle 24 dargestellten Kenterpunktabstände bewegen sich nahe am ermittelten Jahresmittelwert der Messstation D3 (vgl. Kapitel 4.1.1.3 und DVD-Anhang II)

Tabelle 23: Stauwasserdauern am Messquerschnitt Q3 (Daten aus ADCP-Messungen)

Stauwasserdauern Q3				
Datum	Stauwasserdauer Ebbe [min]	Stauwasserdauer Flut [min]	Stauwasserdauer Ebbe [min]	Stauwasserdauer Ebbe [min]
30.08.2006	38	17	k.a.	k.a.
22.08.2007	48	29	47	k.a.
03.09.2008	34	13	34	k.a.
18.06.2009	k.a.	16	43	19
24.06.2010	k.a.	15	34	14

k.a.= Daten unvollständig

Tabelle 24: Kenterpunktabstände am Messquerschnitt Q3 (Daten aus ADCP-Messungen)

Kenterpunktabstand Q3 Pegel Glückstadt				
Datum	Kenterpunktabstand Flut [min]	Kenterpunktabstand Ebbe [min]	Kenterpunktabstand Flut [min]	Kenterpunktabstand Flut [min]
30.08.2006	46	36	46	k.a.
22.08.2007	45	48	49	k.a.
03.09.2008	49	36	52	k.a.
18.06.2009	k.a.	42	48	43
24.06.2010	k.a.	38	46	37

k.a.= Daten unvollständig

4.1.2.4 Messquerschnitt Q4

Der Messquerschnitt Q4 ist auf Elbe-km 676,5 gelegen. Der Verlauf der Messstrecke ist auf Abbildung 30 in Kapitel 4.1.1.4 dargestellt.

Strömungsgeschwindigkeiten, Flut- und Ebbestromdauern

Die während der ADCP-Messfahrten gemessenen mittleren (V_{fm} und V_{em}) und maximalen Flutstromgeschwindigkeiten (V_{fmax} und V_{emax}) fallen deutlich geringer aus als die an der Dauermessstation D4 (vgl. Kapitel 4.1.1.4 ermittelten mittleren Werte. Unterschiede von bis zu 30 cm/s gegenüber dem Jahresmittel treten auf. Ebenso verhält es sich bei der Ebbestromgeschwindigkeit. Die Werte dieses Parameters liegen bei der ADCP-Messung bis zu 28 cm/s unter den an der Station D4 gemessenen Jahresdurchschnittsgeschwindigkeiten (s. Tab. 25).

Tabelle 25: Messquerschnitt Q4: Tidekennwerte, Strömungsgeschwindigkeiten, sowie Flut- und Ebbestromdauer am Messquerschnitt Q4

Tidekennwerte aus ADCP-Messungen im Messquerschnitt Q4 Elbe-km 676,5									
Datum	V_{fm} [m/s]	V_{em} [m/s]	V_{fm} : V_{em}	V_f max [m/s]	V_e max [m/s]	V_f max: V_e max	T_f [h]	T_e [h]	T_f : T_e
27.09.06	0.74	0.79	0.94	1.09	1.04	1.05	05:42	06:30	0.88
19.09.07	0.71	0.76	0.93	1.06	1.05	1.01	05:57	06:25	0.93
10.09.08	0.61	0.66	0.92	0.95	0.91	1.04	06:38	06:51	0.97
01.09.09	0.68	0.69	0.99	1.00	1.02	0.98	06:10	06:34	0.94
20.06.10	0.75	0.84	0.89	1.18	1.09	1.08	05:33	06:37	0.84
Mittelw.	0.70	0.75	0.93	1.06	1.02	1.04	06:00	06:35	0.91

Der Vergleich der ADCP-Messung mit den Werten der Dauermessstation D4 in Abbildung 45 bestätigt die Unterschiede für den Flutstrom. Deutlich ist zu erkennen, dass die Werte der ADCP-Messung unter denen der Dauermessstation liegen; für den Ebbestrom zeigt sich ein wesentlich geringerer Unterschied, der zudem ein anderes Vorzeichen aufweist. Es ist wahrscheinlich, dass die geschilderten Abweichungen maßgeblich darin begründet sind, dass die ADCP-Messungen nur in den Sommermonaten durchgeführt werden. Vermutlich werden bei den ADCP-Messungen vorrangig „strömungsärmere Tiden“ erfasst. Grundsätzlich kann auf der Grundlage entsprechender Vergleichsbetrachtungen des WSA Hamburg (Grellus, 2012) davon ausgegangen werden, dass die Messungen der Station D4 die

Ebbestromgeschwindigkeiten in der Fahrrinne gut wiedergegeben, die der Flutstromgeschwindigkeit allerdings lagebedingt eine recht große Diskrepanz zu den Ergebnissen der Fahrrinnenmitte aufweisen (vgl. Abb. 45).

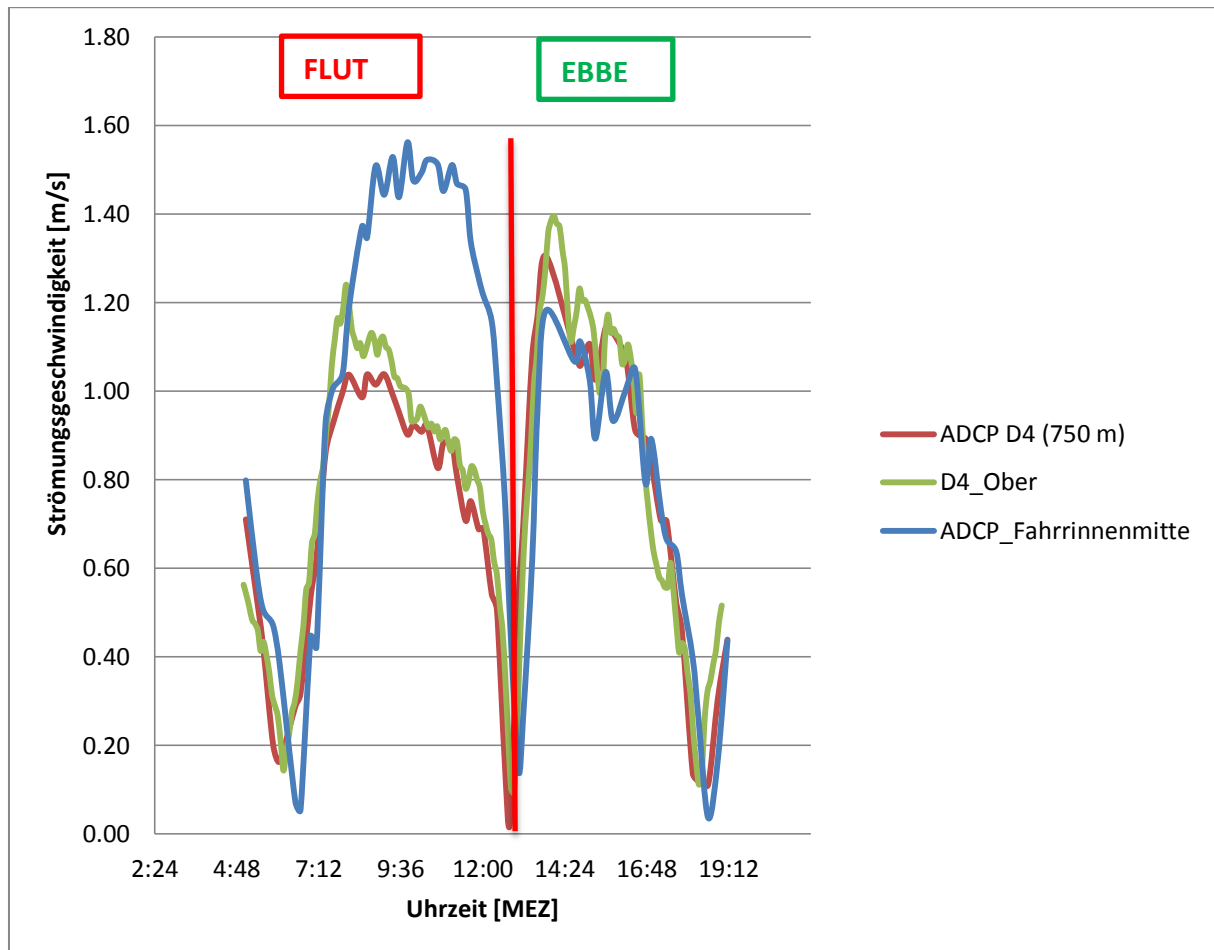


Abbildung 45 : Strömungsgeschwindigkeiten am 27.9.06; Vergleich der Ergebnisse der Dauermessungen an der Station D3 und den ADCP-Messungen (Auswertung mittels Software TIDE)

[Abgewandelt nach Grellus, 2012]

Stauwasserdauern und Kenterpunktabstände

Die mit Hilfe der ADCP-Messungen festgestellten Stauwasserdauern K_e und K_f weichen zum großen Teil um mehr als das Doppelte von denen der Dauermessstation D4 ab und bestätigen die Annahme, dass überwiegend „strömungsarme Tiden“ erfasst wurden.

Tabelle 26 : Stauwasserdauern am Messquerschnitt Q4 (Daten aus ADCP-Messungen)

Stauwasserdauern Q4				
Datum	Stauwasserdauer Ebbe [min]	Stauwasserdauer Flut [min]	Stauwasserdauer Ebbe [min]	Stauwasserdauer Ebbe [min]
27.09.2006	36	15	35	k.a
19.09.2007	37	22	41	k.a
10.09.2008	k.a	29	21	34
01.09.2009	k.a	23	43	26
20.06.2010	k.a	18	32	19

k.a.= Daten unvollständig

Die Zeiten der Kenterpunktabstände (Tab. 27) aus den ADCP-Messungen sind zumeist ebenfalls erhöht im Vergleich zu den Ergebnissen der Dauermessungen. Der maximale Unterschied schwankt zwischen 1 Minute und bis zu 20 Minuten. Bei einem Vergleich einer Einzeltide mit einem Jahresmittelwert sind derartige Abweichungen in der Regel mit den hydrologischen, meteorologischen und klimatischen Besonderheiten des Messtages zu erklären.

Tabelle 27 : Kenterpunktabstände am Messquerschnitt Q4 (Daten aus ADCP-Messungen)

Kenterpunktabstand Q4 Pegel Kollmar				
Datum	Kenterpunktabstand Flut [min]	Kenterpunktabstand Ebbe [min]	Kenterpunktabstand Flut [min]	Kenterpunktabstand Flut [min]
27.09.2006	44	32	46	k.a
19.09.2007	32	31	37	k.a
10.09.2008	k.a	40	50	41
01.09.2009	k.a	36	41	40
20.06.2010	39	37	35	k.a

k.a.= Daten unvollständig

4.1.2.5 Vergleich ausgewählter Tidekennwerte Q1 bis Q4

Ein Vergleich der Querprofilmessungen Q1 bis Q4 kann in dieser Arbeit nur vereinfacht als Vergleich der Jahresmittel der Tideparameter erfolgen, die seit 2006 auf dem jeweiligen Profilmessungen worden sind. In diese Mittelwertbildung aus Tidekennwerten gehen jedoch nur einzelne spezielle Tiden ein, da die Messungen

nicht kontinuierlich erfolgten. Es werden also keine mittleren Verhältnisse für bestimmte Zeiträume wiedergegeben. Hierfür wäre es notwendig, die erhaltenen Messdaten auf die mittleren Tideverhältnisse eines Zeitraumes (z.B. des jeweiligen gewässerkundlichen Jahres oder des Zeitraumes 2006-2010) zu beziehen. Eine entsprechende Auswertung ist jedoch nicht trivial und war im Rahmen dieser Arbeit nicht realisierbar. Stattdessen wird eine vereinfachte Betrachtung der in Tabelle 28 zusammengestellten und somit etwas kritisch zu betrachtenden gemittelten Tidekennwerten vorgenommen (einfache arithmetische Mittel aus den in den Kapiteln 4.1.2.1 Messquerschnitt Q1 bis 4.1.2.4 Messquerschnitt Q4 vorgestellten Kennwerten der seit 2006 durchgeführten Querprofilmessungen). Die vorgestellten Ergebnisse werden in der späteren Betrachtung und Diskussion zur Strömungsentwicklung seit den 1960er Jahren (vgl. insb. Kapitel 6.1) aufgegriffen. Wo notwendig, wird auf die detaillierten „nicht aggregierten“ Ergebnisse der einzelnen Messung zurückgegriffen.

Tabelle 28: Tidekennwerte von den Querprofilen Q1-Q4 (arithmetische Mittel aus ADCP-Messungen der Jahre 2006 – 2010)

Profil	Elbe- km	V_fm [m/s]	V_em [m/s]	V_fm: V_em	V_f max [m/s]	V_e max [m/s]	V_f max: V_e max	T_f [h]	T_e [h]	T_f: T_e
Q1	643,0	0.63	0.65	0.97	0.90	1.07	0.84	05:05	07:14	0.70
Q2	651,1	0.72	0.70	1.03	0.99	1.10	0.90	05:17	06:54	0.76
Q3	664,7	0.71	0.72	0.99	1.02	1.03	1.02	05:55	06:27	0.79
Q4	676,5	0.70	0.75	0.93	1.06	1.02	1.04	06:00	06:35	0.91

Werden die 5-Jahresmittel der Daten der Messprofile Q1 bis Q4 miteinander verglichen (Tab. 28), zeigt sich, dass in den betrachteten Querschnitten die mittleren Flut- (V_fm) und Ebbestromgeschwindigkeiten (V_em) zur Flussmündung hin leicht zunehmen. Die Unterschiede zwischen den Messquerschnitten Q1 bis Q4 6 cm/s bei der Flutströmung und von 10 cm/s bei der Ebbeströmung festzustellen. Die Tidedauer der Flut T_f unterscheidet sich in an diesem Abschnitt um 55 Minuten. Analog dazu verkürzt sich die Tidedauer der Ebbe T_e zwischen Q1 und Q4 um 39 Minuten.

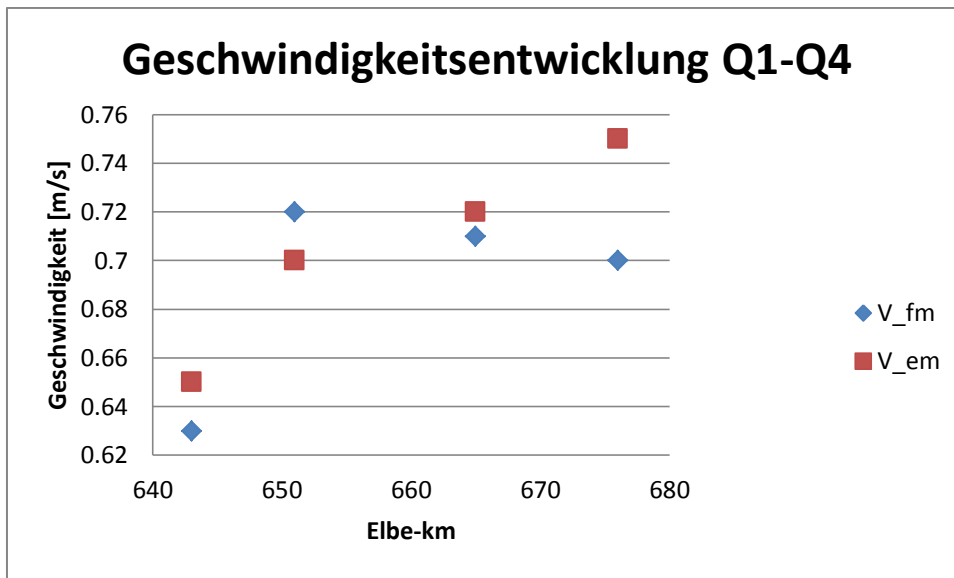


Abbildung 46: Geschwindigkeiten des Flut- und Ebbestroms an den Querprofilen Q1-Q4 (arithmetische Mittel aus den ADCP-Messungen der Jahre 2006 – 2010)

In Abbildung 46 sind die mittleren Geschwindigkeiten des Flut- und des Ebbestroms an den Messquerschnitten Q1 bis Q4 bezogen auf ihre Lage an der Elbe (Elbe-km) grafisch dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Flutstromgeschwindigkeit (V_{fm}) zwischen Q1 (Elbe-Km 643) und Q2 (Elbe-Km 651,1) um 9 cm/s ansteigt, danach allerdings zwischen Q3 (Elbe-km 664,7) und Q4 (Elbe-Km 676,5) wieder auf 70 cm/s absinkt. Die Ebbeströmung (V_{em}) nimmt hingegen von Q1 bis Q4 von 65 cm/s auf 75 cm/s deutlich zu. Bei Q4 ist eine starke Ebbestromdominanz erkennbar.

4.2 Ergebnisse aus Modellrechnungen

Wie bereits mehrfach erwähnt, stehen für flächenhafte (tiefengemittelte) und dreidimensionale Betrachtungen der Strömungsverhältnisse hydrodynamische Modelle zur Verfügung. Diese finden Einsatz im Rahmen von Unterhaltungs- und Ausbaumaßnahmen, wobei in der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung „HN-Modelle“ der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) zum Einsatz kommen. Aktuell sind die mittels des Elbe-Modells der BAW ermittelten derzeitigen Strömungsverhältnisse sowie die zugehörigen Modellgrundlagen u. a. im für die Antragsunterlagen zur weiteren Fahrrinnenanpassung erstellten „Gutachten zur ausbaubedingten Änderung von Hydrodynamik und Salztransport“ (Boehlich et al., 2006) dokumentiert.

Weiterhin stehen derzeit über das BAW-Methoden-Wiki [2] flächenhafte tiefengemittelte Darstellungen der Strömungen der Tideelbe auf Grundlage einer Modelltopographie aus dem Jahr 2010 als PDF-Dokument zur Verfügung [9]. „Die Darstellung erstreckt sich über 24 Stunden in einem Abstand von jeweils 30 Minuten und ist für eine Nippzeit und eine Springzeit erhältlich.“ Die entsprechenden PDF-Dokumente sind dieser Arbeit als DVD-Anhang VII und VIII beigefügt. Abbildung 47 zeigt ein Beispiel für die Tideelbe bei Schulau während des am 14.07.2010 um 8:00 Uhr simulierten Ebbestroms.

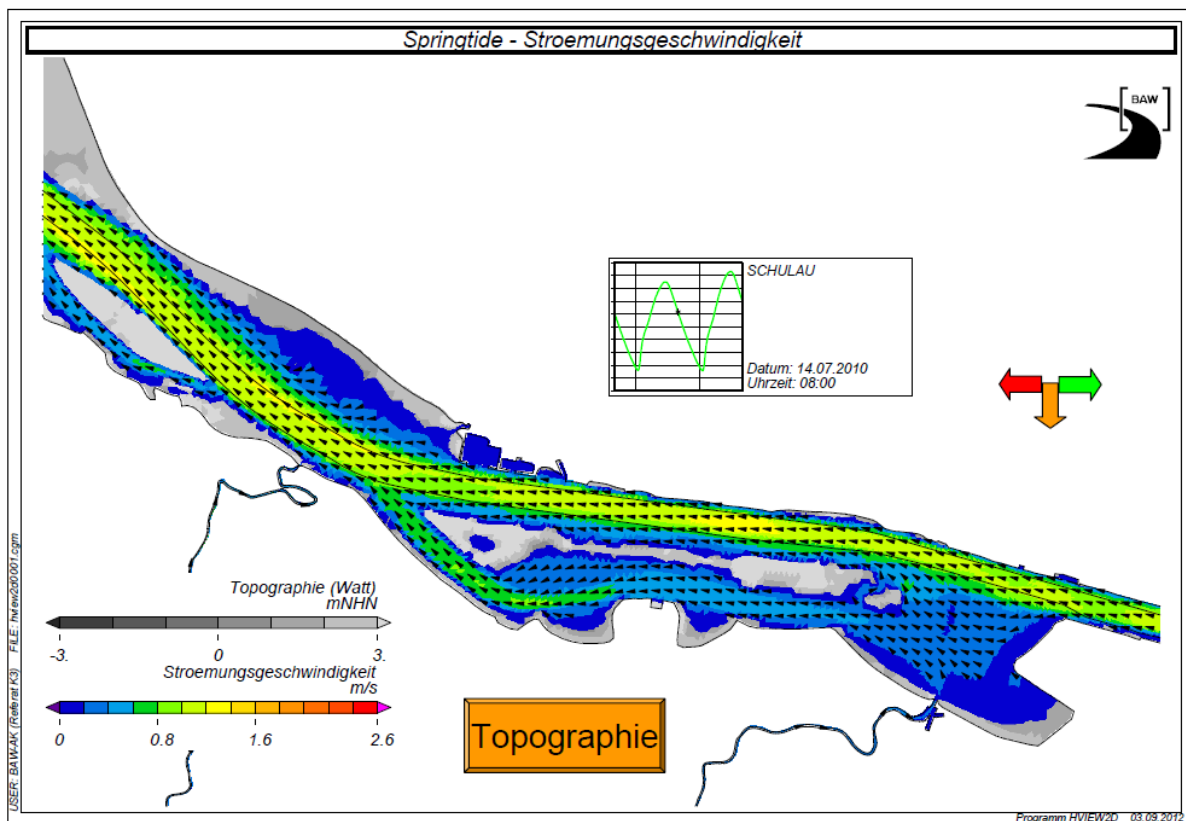


Abbildung 47: Modelltopographie und Strömungsgeschwindigkeiten am Beispiel der Tideelbe bei Schulau (Ebbesituation am 14.7.2010)

Die seitens der WSÄ Hamburg und Cuxhaven (sowie der Hamburg Port Authority (HPA)) erhobenen Strömungsdaten bilden die Grundlage der vorliegenden Arbeit und dienen zugleich zur Validierung des Modells. Den WSÄ und der HPA stehen zudem die Modelldaten der BAW zu diversen hydrologischen Kenngrößen, wie z.B. Wasserstände, Strömung, Schwebstoffgehalt, für „Postprocessing-Anwendungen“ zur Verfügung. Das WSA Hamburg verfügt bereits seit Längerem über Software-Tools für eine Integration von Modelldaten in ArcGIS. Abbildung 48 zeigt hierzu ein

Beispiel (Screenshot ArcGIS). In die Beispielkarte sind tiefengemittelte mittlere Flutströmungsdaten, ein aus Peildaten entwickelter Schummerungsplan der Gewässersohle, Analysendaten aus Greiferbeprobungen sowie ein Luftbild eingeflossen und integrierend dargestellt (Qrefa-Sander, M.; Entelmann, I. 2011).

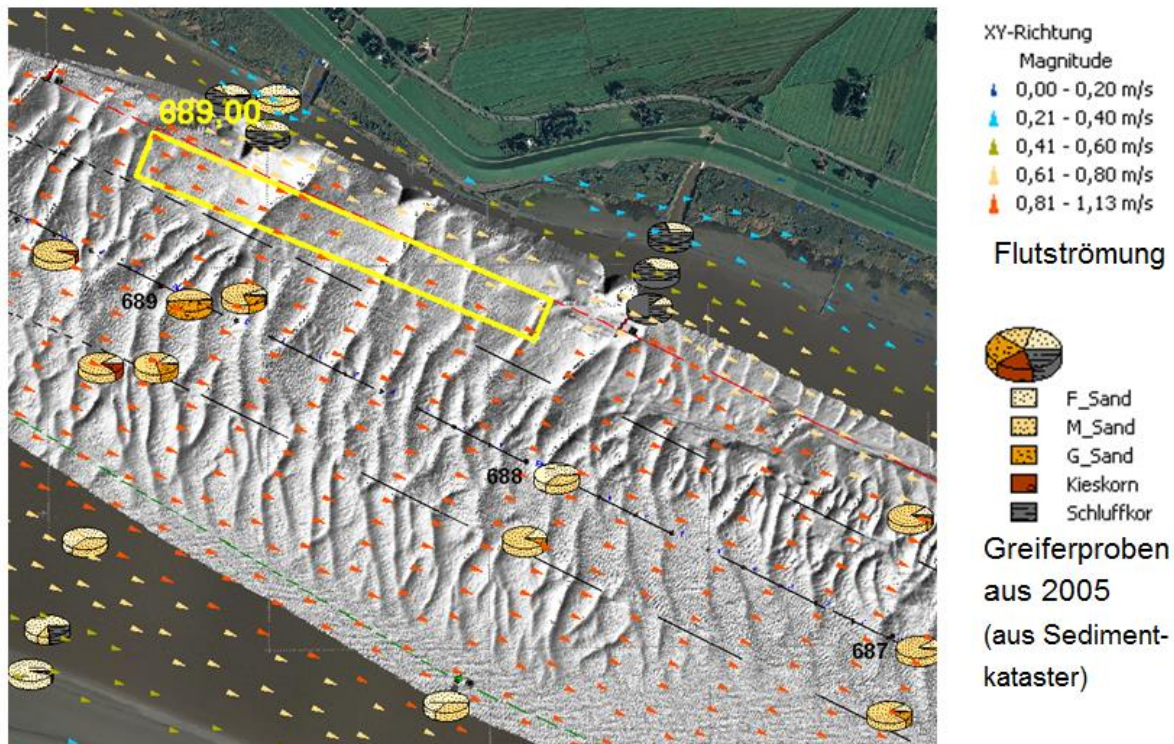


Abbildung 48: ArcGis-Screenshot: Luftbild mit Flutströmungsdaten, Peildaten, Analysedaten

[Quelle: Qrefa-Sander/Entelmann, 2011]

Weiterhin steht den WSÄ seit kurzem die Software Davit der Fa. smile consult GmbH zur Verfügung, die bisher vorrangig in der BAW im Rahmen des Postprocessings eingesetzt wurde. Auf der Homepage der smile consult GmbH wird die Software wie folgt beschrieben: „Der Postprozessor Davit erlaubt die Analyse von Berechnungsergebnissen aus hydrodynamisch numerischen Simulationsmodellen sowohl für tiefenintegrierte 2D- als auch für 3D-Modelle. Der Funktionsumfang der Software unterstützt die effiziente Exploration der Ergebnisdaten durch einen intuitiven Zugriff auf einzelne Datensätze einer Simulationsrechnung. Die vielfältigen Auswerte- und Visualisierungsmethoden ermöglichen die detaillierte Analyse der Ergebnisdaten und unterstützen die Präsentation von Berechnungsergebnissen.“ [10]

Wie bereits eingangs in Kapitel 2.1 diskutiert, soll im Rahmen dieser Arbeit keine weitergehende Betrachtung von Modellergebnissen verfolgt werden. Der Fokus liegt auf der Auswertung neuer und älterer Messdaten, die in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellten Profilen Q1 – Q4 (mit zugehörigen Punktmessungen bei D1 bis D4) erfasst wurden. Für die weitere Diskussion (insb. Kapitel 6) sind jedoch modellhafte Berechnungen von Interesse, in die Daten der BAW aus Hintergrundstudien zu historischen Zuständen der Tideelbe eingeflossen sind. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen im Rahmen dieser Simulationen erstellte Längsschnitte zu mittleren Flut- und Ebbeströmungsgeschwindigkeiten in Fahrrinnenmitte in den Jahren 1970, 1997 und 2002 (*Sohrmann und Weilbeer, 2006; Weilbeer und Paesler, 2008*). Aus diesen Abbildungen (Abb. 49 und 50) werden erwartete Entwicklungswerte für einen späteren Vergleich an den jeweiligen Stationen abgelesen.

Anzumerken ist, dass für die früheren Modellrechnungen (insb. 1970) topographische Daten wesentlich geringfügigerer Qualität als heute zur Verfügung standen und damit die Modellergebnisse als wesentlich unsicherer als aktuelle Rechnungen anzusehen sind. Eine Validierung mit Hilfe historischer Messdaten wurde bisher nicht durchgeführt, da entsprechende Daten bisher nicht aufbereitet zur Verfügung standen [5].

Eine entsprechende Aufbereitung ist jedoch im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt worden. Im folgenden Kapitel 5 werden die neuen Auswertungen unter dem Begriff: „historische Messergebnisse“ im Bereich Elbe-km 643 bis 676,5 eingehend gewürdigt.

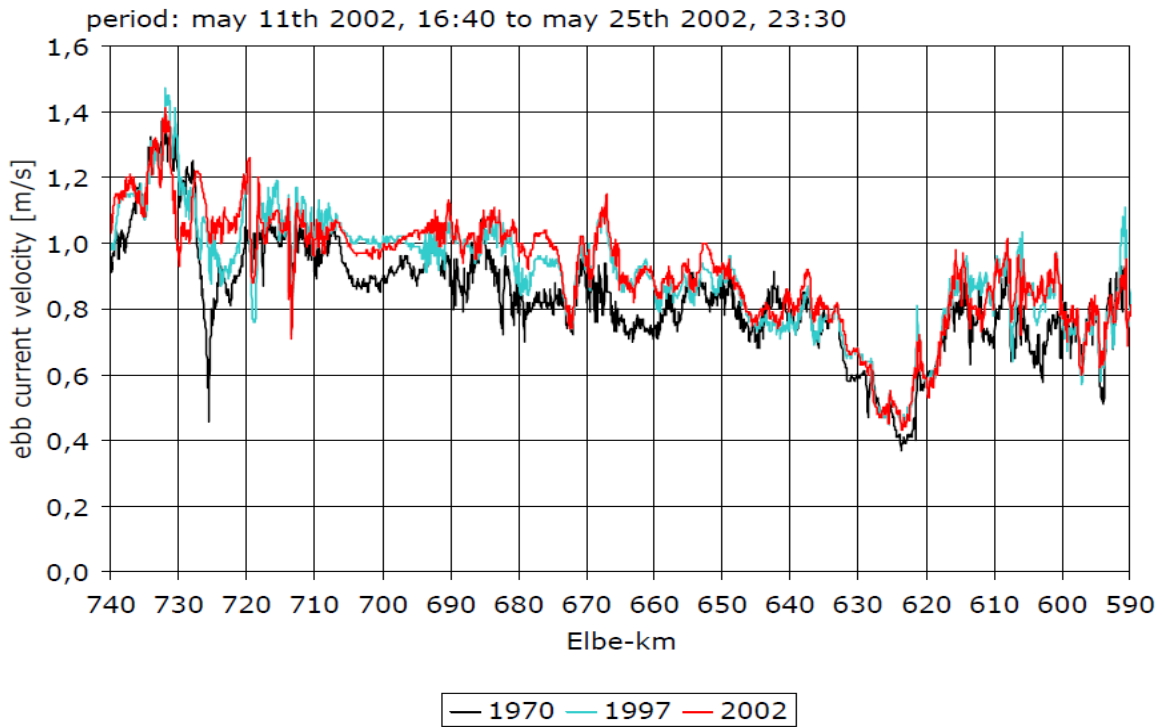


Abbildung 49: Modellrechnungen der BAW: mittlere Ebbeströmung in Fahrrinnenmitte 1970, 1997 und 2002

[Quelle: Weilbeer und Paesler, 2008]

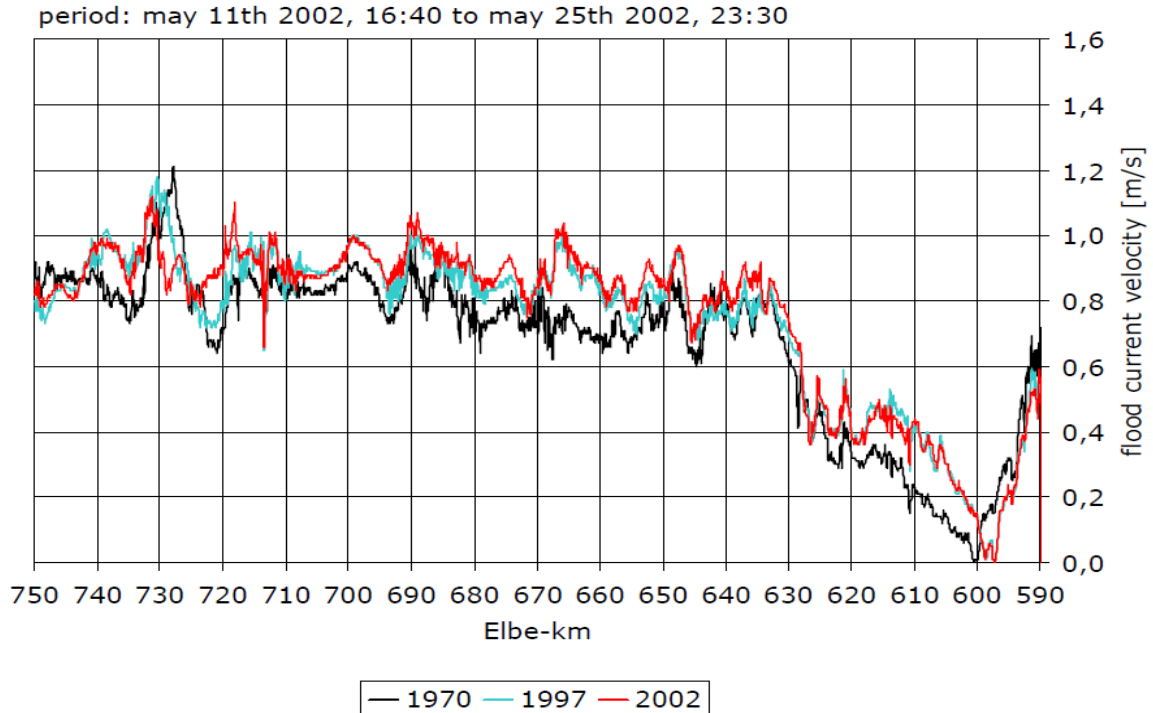


Abbildung 50: Modellrechnungen der BAW: mittlere Flutströmung in Fahrrinnenmitte 1970, 1997 und 2002

[Quelle: Weilbeer und Paesler, 2008]

Aus einer Arbeit von Weilbeer (2012) stammt Abbildung 51, die Aussagen macht zur Änderung der Strömungsdominanz im Verlauf der Unterelbe bei unterschiedlichen Oberwassereinflüssen. In den einzelnen Grafiken sind Längsschnitte in der Fahrrinnenmitte. Im Uferbereich werden die Werte stark von den dargestellten Ergebnissen abweichen.

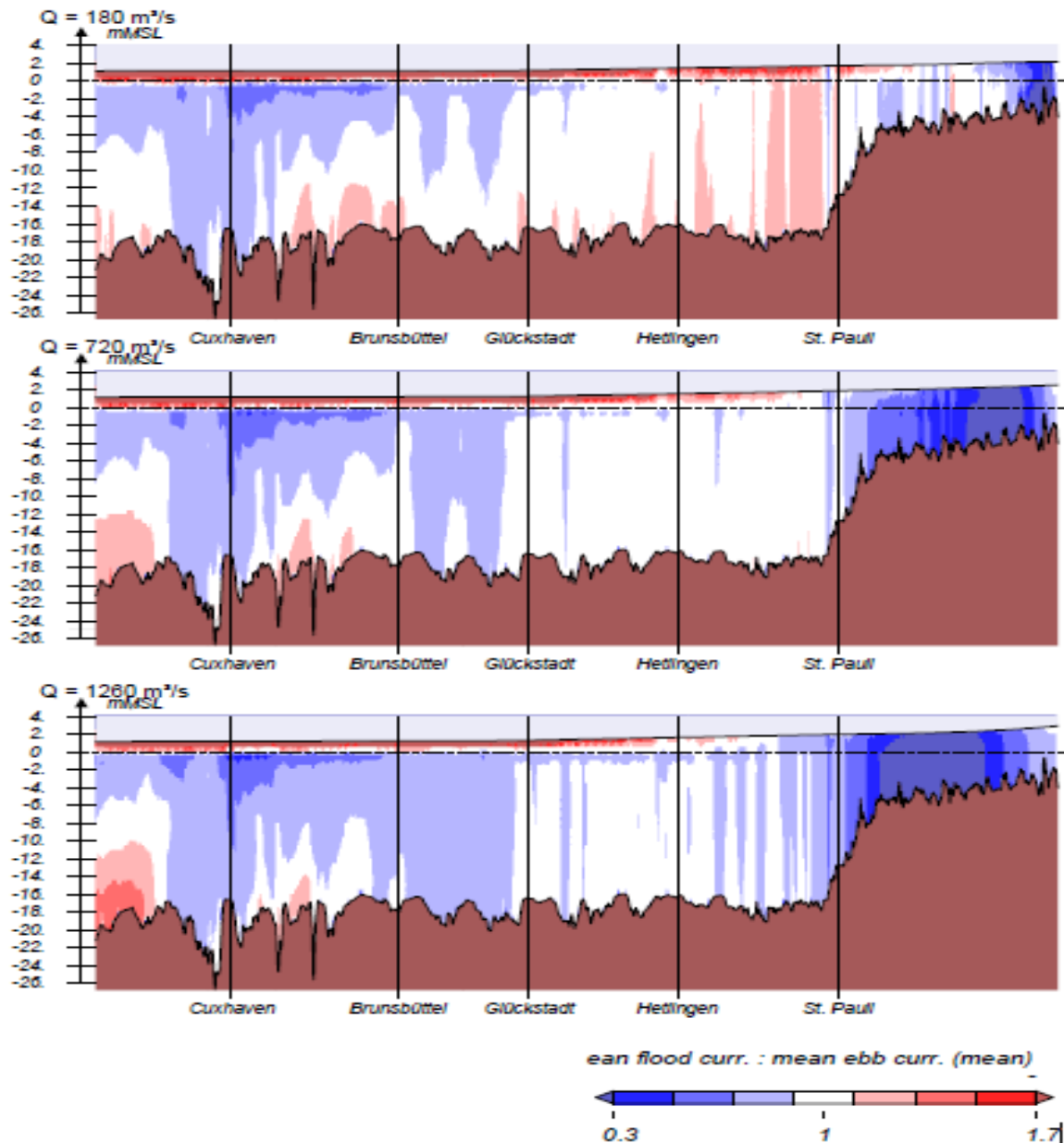


Abbildung 51: Relative Strömungsdominanzen entlang der Unterelbe bei unterschiedlichem Oberwasserzufluss ($Q= 180$ (oben) / 720 (mitte) / 1260 (unten) in m^3/s); farblich dargestellt sind die relativen mittleren Verhältnisse zwischen Flut- : Ebbedominanz (Flutdominanz:blau/Ebbedominanz:rot)

[Quelle: Weilbeer et al., 2012]

5 Messprogramme der WSV in der Tideelbe seit den 1960er Jahren

Ein Aufgabenschwerpunkt der vorliegenden Arbeit bestand darin, Altdaten zu Strömungsmessungen aus Aktenbeständen des WSA Hamburg zusammenzutragen und erstmalig im Hinblick auf die Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeiten in den letzten 50 Jahren auszuwerten. Die wichtigsten Daten bildeten die Messungen aus den 1960er Jahren. In geringerem Umfang wurden auch Daten aus den Folgejahrzehnten bis Mitte/Ende der 1980er Jahre ausgewertet.

„Umfangreiche Messungen der Strömungsgeschwindigkeit sind in der Tideelbe [vor allem] ab 1958 vorgenommen worden. Von 1958 bis 1966 wurden insgesamt 45 Messungen in ganzen Meßquerschnitten ausgeführt, um den Durchfluß bei Ebbe und Flut zu ermitteln, die Verteilung der Wassermengen in den Haupt- und Nebenfahwassern zu erkennen und Grundlagen für die Weiterentwicklung der Tidewellenberechnung zu gewinnen. [...] In den Meßquerschnitten wurden jeweils mehrere Meßlotrechte über eine ganze Tide gemessen. Je nach der Breite des Querschnitts waren in jedem Querschnitt 2 bis 8 Meßlotrechte angeordnet“ (*Rhode*, 1971).

Ausgewertet wurden Daten, welche in den früheren Jahren auf oder nahe bei den heute eingerichteten Dauer- und Querprofilmessabschnitten D1 bis D4 bzw. Q1 bis Q4 erfasst wurden. Ziel war hierbei einen Vergleich der alten Ergebnisse mit den in Kapitel 4 zusammengestellten Tidekennwerten aus den aktuellen Messungen zu ermöglichen. Daten aus noch früheren Zeiträumen waren in den Aktenarchiven nur in sehr geringem Umfang und oft in nur unzureichender Qualität verfügbar und wurden daher im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet. Daten, die an anderen Stellen des WSV-Amtsbereichs Hamburg als den genannten vier Querprofilen erhoben worden waren, wurden nicht ausgewertet, da belastbare Messwerte zu den derzeitigen Strömungsverhältnissen fehlen.

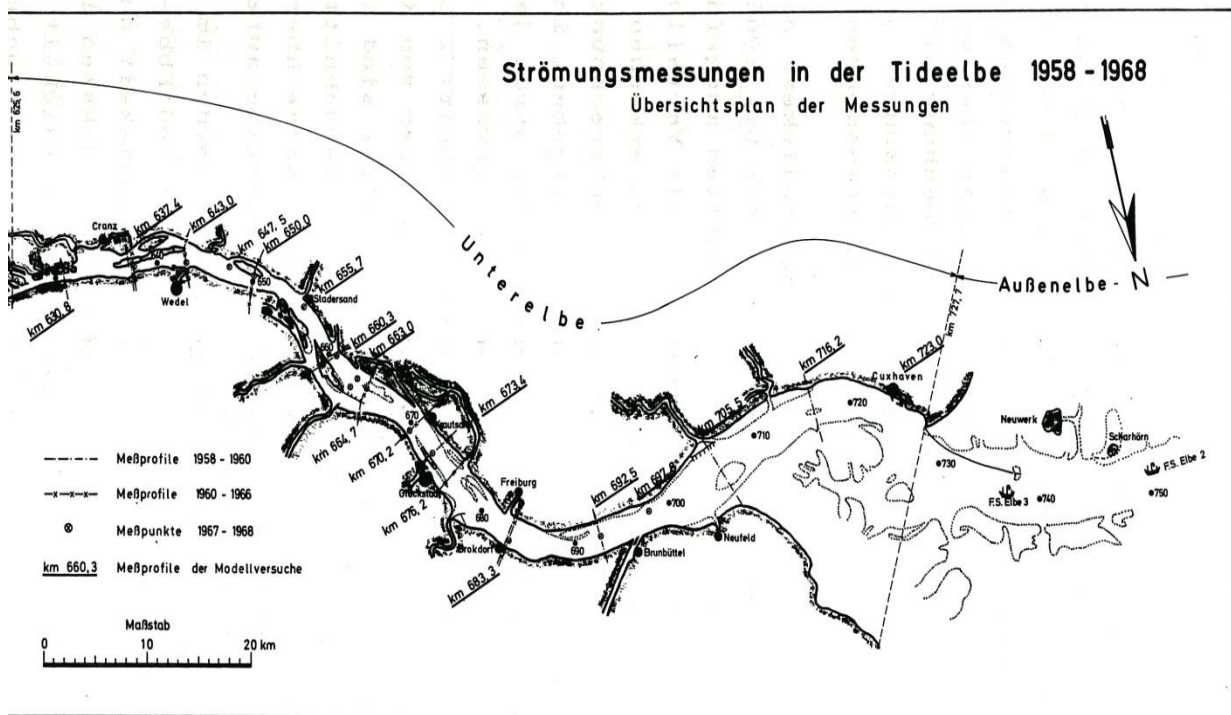


Abbildung 52: Lage der Strömungsmessstellen aus der Zeit von 1958-1968

[abgeändert nach Rhode, 1972]

In Abbildung 52 sind die Messprofile und Messpunkte aus den Jahren 1958 bis 1968 aufgetragen, wobei die Außenelbe auf der rechten Bildseite dargestellt ist. Rhode (1971) schreibt zu den Randbedingungen: „Da die 45 Messungen in insgesamt 16 Querschnitten ausgeführt wurden, und die Messungen wegen der Witterung und der Helligkeit vorwiegend nur in den Sommermonaten stattfinden konnten, sind in den einzelnen Meßquerschnitten nur wenige unter stärker unterschiedlichen hydrologischen Bedingungen ausgeführte Messungen vorhanden. Um ohne zu großen Aufwand zu einer größeren Zahl von Messungen zu kommen und dabei in größerem Umfang unterschiedliche hydrologische Verhältnisse zu erfassen, wurden in den Jahren 1967 und 1968 eine Vielzahl von Messungen in den einzelnen Meßlotrechten ausgeführt.“

Dieses leider wenig kontinuierliche Vorgehen erschwerte die in dieser Arbeit vorzunehmenden Vergleiche, da die alten Messungen eine sehr unterschiedliche Aussagequalität besitzen. Erschwerend kommt hinzu, dass die Aussagequalität der Daten aufgrund unzureichender Dokumentation zum Vorgehen im Einzelfall nicht hinreichend beurteilt werden kann. Neben der Tatsache, dass es sich überwiegend

um Einzelmessungen aus den Sommermonaten handelt (bei denen im Mittel von durchschnittlich geringeren Geschwindigkeiten auszugehen ist) ist zu berücksichtigen, dass zumeist keine bis wenige Informationen zum genauen Standort der Messpositionen, der Messtiefen und anderer beeinflussender Faktoren verfügbar sind. Weiterhin ist zu beachten, dass in den nachfolgenden Auswertungen sowohl (Halb-)Tidenmessungen, bei denen in nur einer (teils unbekannt)en Tiefe gemessen wurde, als auch Messreihen enthalten sind, bei denen in verschiedenen Tiefen Daten gesammelt und anschließend gemittelt wurden. Gemessen wurden stets auf mehreren Messlotrechten.

Zur Trendermittlung werden die Altdaten nachfolgend mit den Ergebnissen aktueller oberflächennaher Strömungsmessungen (Messungen an den Dauermessstationen ergänzt um Ergebnisse aus ADCP-Messungen) verglichen. Unabhängig von eventuellen neuen Trends (also bei theoretisch konstanten Strömungsverhältnissen) ist aus grundsätzlichen Erwägungen davon auszugehen, dass die aktuellen Messdaten höhere Geschwindigkeiten anzeigen sollten. Zurückzuführen ist diese Vermutung darauf, dass es sich bei den „historischen“ Ergebnissen um (gemittelte) Messungen aus mehreren Tiefen handelt, wodurch sich die realen Geschwindigkeiten an den Gewässeroberflächen vermindern (über das Tiefenprofil nehmen die Strömungsgeschwindigkeiten ab). Zudem wurden die Messungen parallel an mehreren Messlotrechten durchgeführt, Darüber hinaus wurden die Altdaten erfahrungsgemäß überwiegend in den geschwindigkeitsärmeren Sommermonaten erfasst. Die aktuellen Ergebnisse stammen ausschließlich von der Wasseroberfläche, wo die höchsten Geschwindigkeiten im Tiefenprofil auftreten. Zudem sind in die Mittelwertbildung Messdaten aus dem gesamten Gewässerkundlichen Jahr eingegangen.

Analog zu den Darstellungen der BAW (siehe Kapitel 4.2 (vgl. Abbildung 49 und Abbildung 50)) werden die D1- bis D4-Werte zur Verdeutlichung der aktuellen Verhältnisse für Vergleichszwecke auf die Fahrrinnenmitte bezogen (vgl. Abbildung 57). Darin verbirgt sich jedoch eine zusätzliche Fehlerquelle, da dadurch ein Bezug zwischen der Geschwindigkeit in der Fahrrinnenmitte (aktuelle Messdaten) und älteren Messungen über weitgehend unbekannte Profildreiten hergestellt wird. In Kapitel 6, erfolgt eine intensive Diskussion der möglichen Ursachen für die in den

Kap. 5.1 bis 5.4 aufgezeigten Veränderungen. Zusätzlich wird ergänzend auf die in Kapitel 4.1.2.5 Vergleich ausgewählter Tidekennwerte Q1 bis Q4 errechneten „mittleren“ Tidekennwerte aus den ADCP-Messungen Q1 - Q4 von 2006 bis 2011 zurückgegriffen (vgl. Tabelle 28).

Abschließend sei vor dem Einstieg in die Beschreibung der Veränderungen darauf hingewiesen, dass die gesammelten Altdaten sich in Gänze im DVD-Anhang V finden und in den Kapiteln 5.1 bis 5.4 nur exemplarisch grafisch dargestellt sind.

5.1 Hanskalbsand (Elbe-Km 643,0)

Die Messungen im Bereich der Insel Hanskalbsand wurden auf Elbe-Kilometer 643,0 durchgeführt. An dieser Stelle wurden über die Jahre ein Vielzahl von Einzel- aber auch Vielpunktmessungen ausgeführt und auch die heute eingerichtete Dauermessstation D1 liegt in diesem Bereich (vgl. Abbildung 9). Dadurch lässt sich die Entwicklung der Strömungsdaten an diesem Punkt gut bis heute ablesen. Abbildung 53 zeigt die Lage der Positionen der Messstrecke sowie die Lage von zusätzlichen Messpositionen bis 1984 eingesetzt waren, auf einer GIS-Karte, die auf einer Seekarte aus dem Jahr 1950 basiert (Qrefa-Sander, 2012).

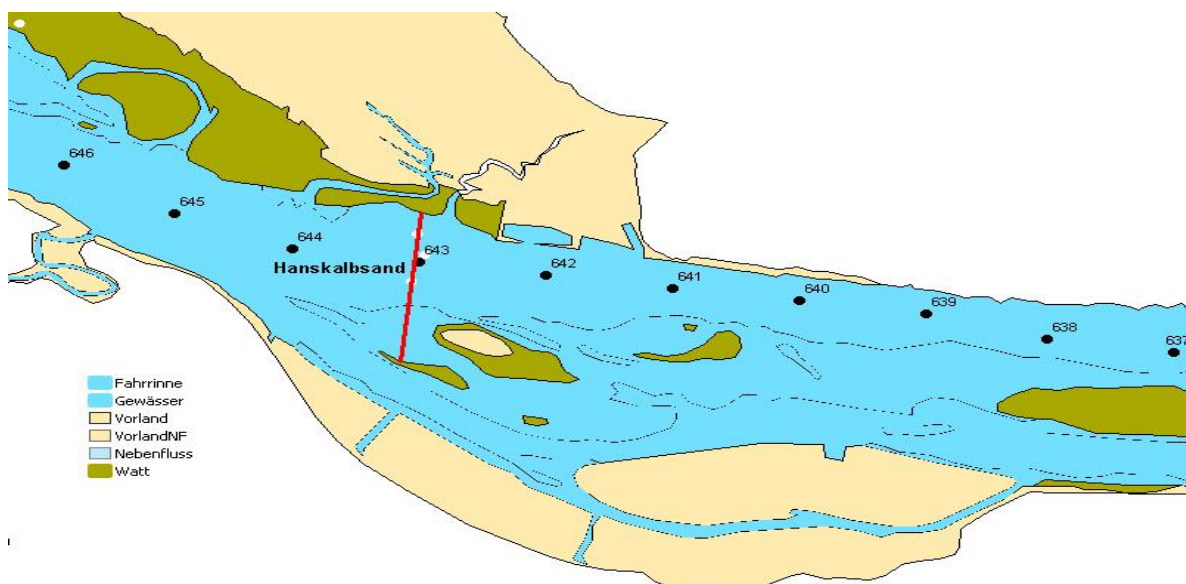


Abbildung 53: Lage der Messstrecke Hanskalbsand, Basis: Elbemorphologie im Jahr 1950

[Quelle: Qrefa-Sander, 2012]

Diese Darstellung wurde gewählt, um die Diskussion in Kapitel 6 Deutliche Veränderungen seit 1960 im Hinblick auf morphologische Ursachen zu vereinfachen. Zwar weichen die Positionen der Messungen über die Jahre ein wenig voneinander ab, letztlich konzentrieren sie sich aber auf das dargestellte Profil. Die Messpositionen sind entlang des Profils als schwache weiße Punkte abgebildet, die rote Lotrechte stellt die idealisierte Messstrecke dar.

Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeiten

Die Entwicklung der Flutstromgeschwindigkeiten beruht auf Daten aus Messprotokollen, die aus Altakten des WSA Hamburg und der WSD Nord stammen und die Jahre 1966 bis 1984 umfassen (Abb. 54). Es gibt Jahre, in denen eine Mehrzahl von Messungen durchgeführt wurde (bzw. entsprechende Ergebnisse vorliegen), teilweise wurde aber auch über mehrere Jahre nicht gemessen oder es liegen Datenlücken vor.

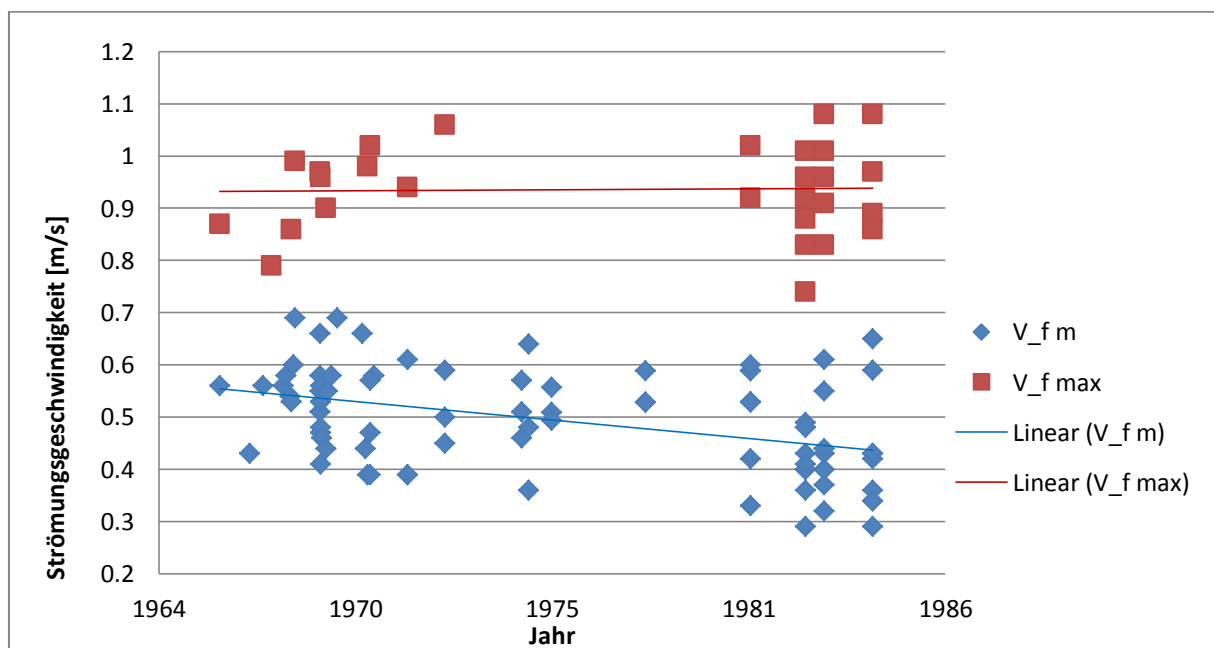


Abbildung 54: Entwicklung der mittleren (V_{fm}) und der maximalen (V_{fmax}) Flutstromgeschwindigkeit an der Messstrecke Hanskalbsand (Elbe-km 643,0) von 1966 bis 1984

Im Beobachtungszeitraum zwischen 1966 und 1984 sinkt die mittlere Flutstromgeschwindigkeit geringfügig ab. Die maximale Flutstromgeschwindigkeit verändert sich im Durchschnitt jedoch kaum. Die Betrachtung der Ebbestromgeschwindigkeit in Abb. 55 zeigt zwischen 65 und 1984 eine deutliche Abnahme sowohl der maximalen als auch der mittleren Ebbestromgeschwindigkeit.

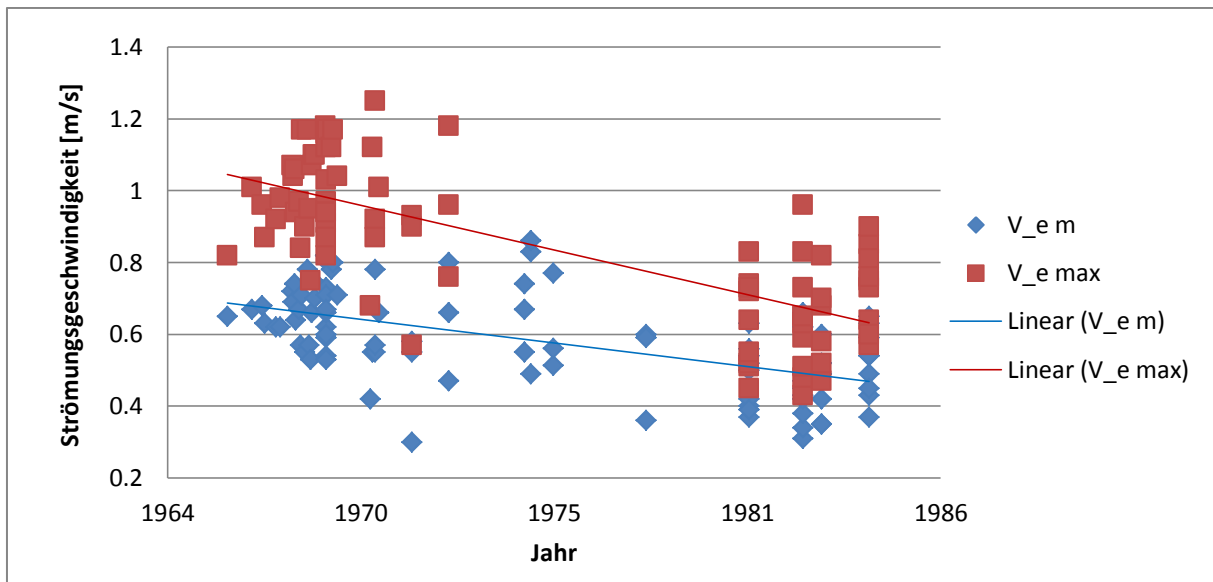


Abbildung 55: Entwicklung der mittleren (V_{em}) und der maximalen (V_{emax}) Ebbestromgeschwindigkeit an der Messstrecke Hanskalsand (Elbe-km 643,0) von 1966 bis 1984

Berücksichtigt man die diskutierten Unsicherheiten, so ist an dieser Stelle eine geringfügige bis keine Veränderung der Flutstromgeschwindigkeiten und eine Verringerung der Ebbestromgeschwindigkeiten zwischen 1964 – 1984 recht wahrscheinlich. Bezieht man die Daten der Dauermessstation D1 in die Betrachtung ein (Berücksichtigung des gesamten Beobachtungszeitraums von 1966 bis 2011, Abbildung 56) zeigt sich im Bereich des Messprofils offenbar in den neunziger Jahren ein Umschwung von einer Ebbstromdominanz zu einer Flutstromdominanz.

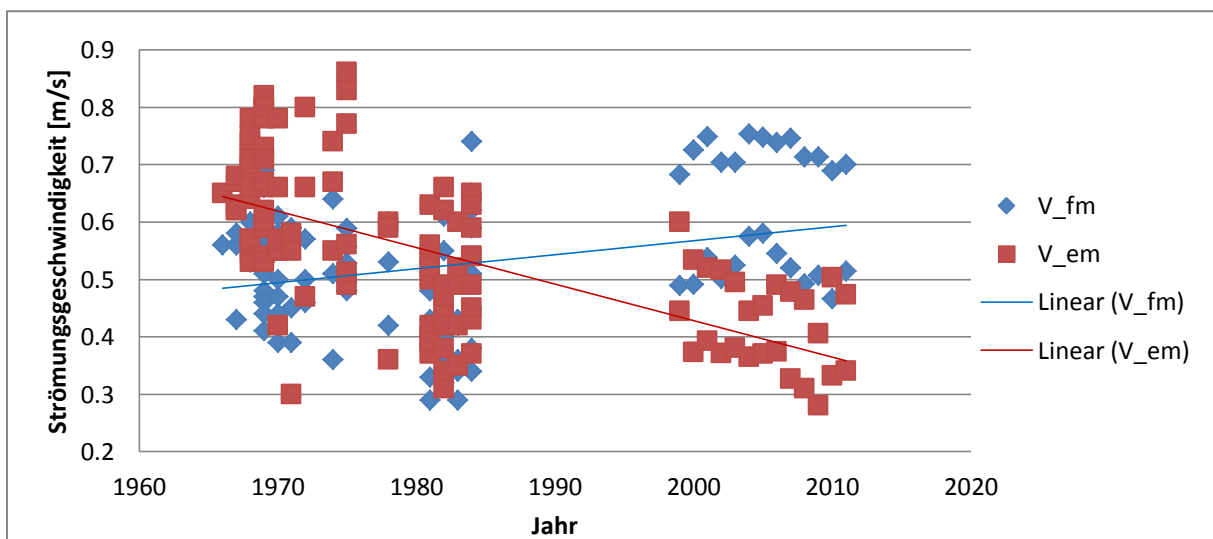


Abbildung 56: Entwicklung der mittleren Ebbe- (V_{em}) und Flutstromgeschwindigkeit (V_{fm}) an der Messstrecke Hanskalsand 1966 bis 2011, direkter Vergleich

Diese Aussage ist allerdings zu hinterfragen, da die Dauermessstation D1 bei Flutstrom in Prallhanglage und bei Ebbestrom in Gleithanglage liegt. Aus den Ergebnissen des Vergleichs von ADCP-Messungen mit den Werten der Dauermessstation D1 geht hervor, dass auf Grund der Lage der Messstation die gemessenen Werte der Ebbeströmung ab 1999 um etwa 70 bis 80 % unter den Werten der Fahrrinnenmitte liegen. Darauf weist z.B. Abbildung 42 in Kapitel 4.1.2.1 Messquerschnitt Q1 hin. Und auch in der Arbeit von *Grellus* (2012) wird darauf verwiesen(vgl. DVD-Anhang IV).

Für die Korrektur werden basierend auf den Arbeiten von *Grellus* (2012) (DVD-Anhang V) für die Umrechnung der Ebbeströmung seit 1999 auf Fahrrinnenmitte Korrekturfaktoren von 1,8 (vgl. *Grellus*, 2012) multipliziert. In Abbildung 57 ist das Ergebnis dieser Umrechnung für die Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeiten dargestellt.

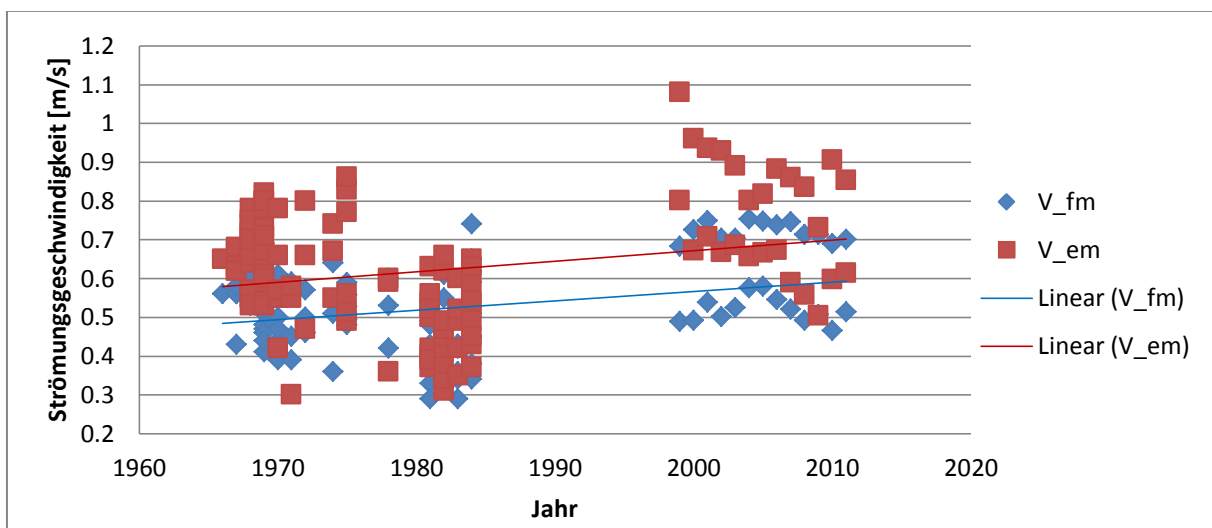


Abbildung 57 : Entwicklung der mittleren Ebbe- (V_{em}) und Flutstromgeschwindigkeiten (V_{fm}) an der Messstrecke Hanskalbsand, von 1966 bis 2011, nach Neukalkulation gemäß *Grellus* 2012

In der plausibilisierten Grafik ist die Ebbestromdominanz, welche sich auch bei den ADCP-Messungen am Querschnitt Q1 erkennbar ist, deutlich abzulesen. Die Gründe für den Anstieg der Strömungsgeschwindigkeit über den Beobachtungszeitraum insgesamt werden im Kapitel 6 diskutiert. Die Entwicklung der mittleren maximalen Ebbe- und Flutstromgeschwindigkeiten in Abbildung 58 bestätigen den Anstieg der Geschwindigkeiten sowie eine deutliche Ebbestromdominanz. Der Anstieg der

Strömungsgeschwindigkeiten würde jedoch flacher ausfallen, wenn die Messwerte aus den 1980er Jahren nicht mit einfließen würden.

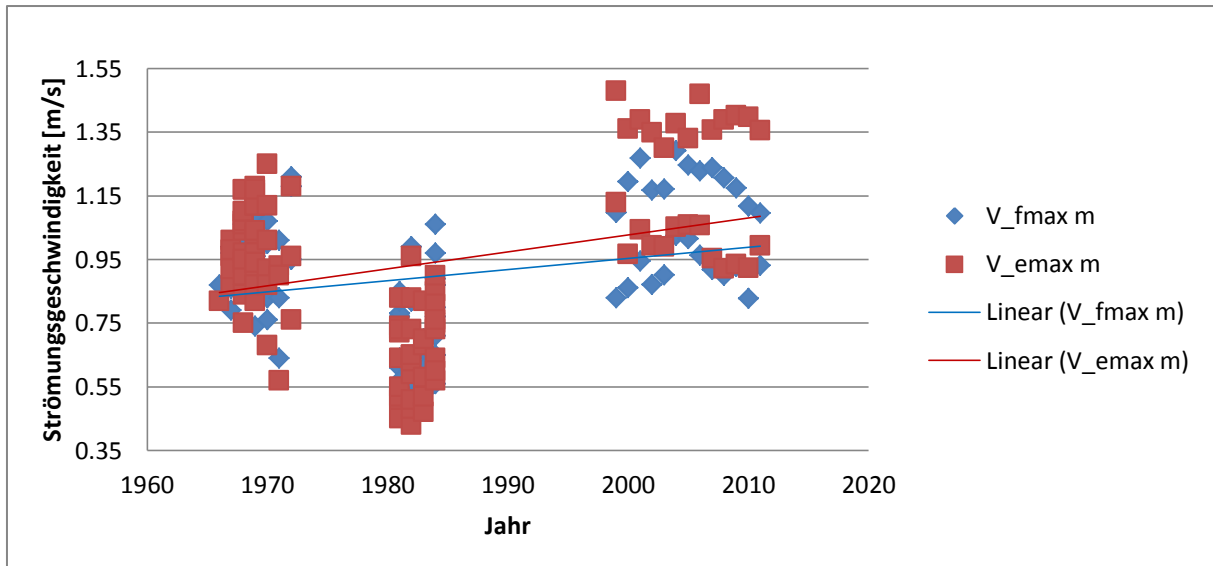


Abbildung 58: Entwicklung der mittleren maximalen Ebbe- ($V_{emax\ m}$) und Flutstromgeschwindigkeiten ($V_{fmax\ m}$) an der Messstrecke Hanskalbsand von 1965 bis 2011, nach Neukalkulation gemäß *Grellus 2012*

Entwicklung der Flut- und Ebbestromdauern

Die Entwicklung der Flut- und Ebbestromdauern am Messquerschnitt Hanskalbsand in der nachfolgenden Abbildung zeigt eine Abnahme der Ebbestromdauer und eine Zunahme der Flutstromdauer über den zwischen 1966 und 2011.

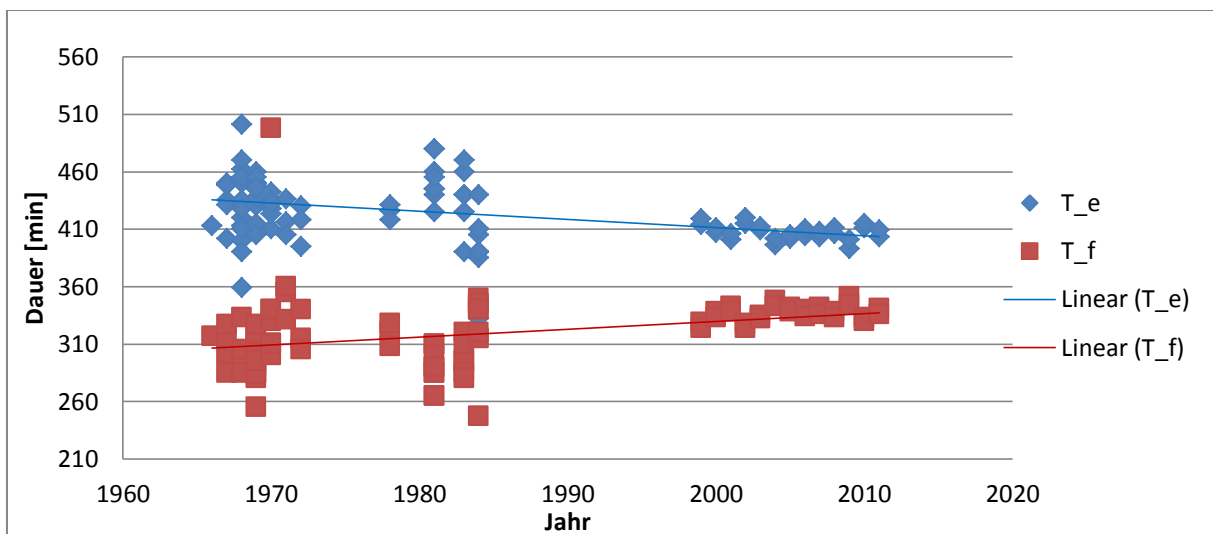


Abbildung 59: Entwicklung der Ebbestrom- (T_e) und Flutstromdauern (T_f) an der Messstrecke Hanskalbsand (Elbe-km 643) von 1966 bis 2011

5.2 Lühesand-Ost (Elbe-km 651,1)

Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeiten

Der „historische“ Messquerschnitt Lühesand-Ost liegt auf Elbe-Km 647,7 und damit etwa 3,4 km entfernt von der Dauermessstation D2 auf Elbe-Km 651,1. Da sich keinen anderen vergleichbaren Daten einer Querprofilmessung finden ließen, kann ein Vergleich der Daten aus der Zeit vor 1986 und nach 1999 in diesem Fall leider nicht unbedingt verlässliche Ergebnisse liefern. Die Morphologie der beiden Stellen ist leider nicht sehr ähnlich. Der Vollständigkeit halber wird der Vergleich dennoch dargestellt, um etwaige Entwicklungen an diesem Flussabschnitt zumindest näherungsweise abzubilden. In Abbildung 60 ist die „historische“ Messstrecke (Elbe-km 647,7) in Rot dargestellt, die schwarze Linie ist ein grafischer Fehler des GIS-Programmes durch Überlappung zweier Kartenabschnitte und keine Messstrecke.

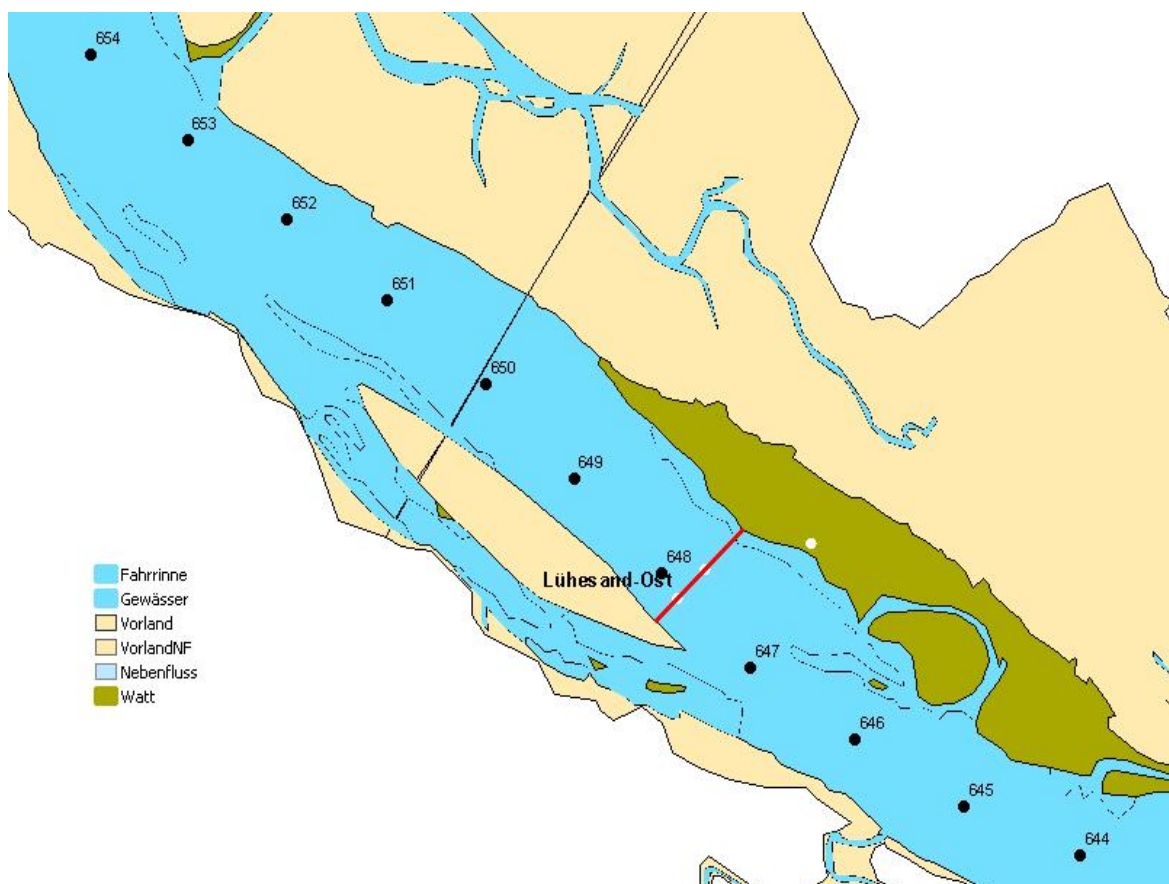


Abbildung 60: Lage der Messstrecke Lühesand-Ost, Basis: Elbemorphologie im Jahr 1950

[Quelle: Qrefa-Sander, 2012]

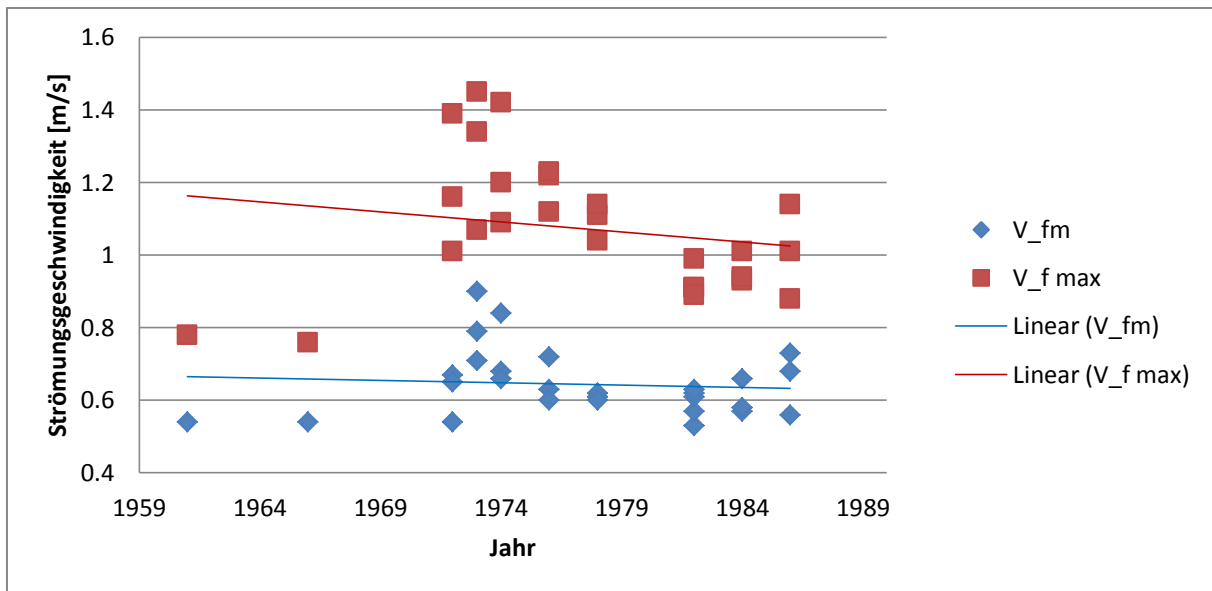


Abbildung 61: Entwicklung der mittleren (V_{fm}) und maximalen (V_{fmax}) Flutstromgeschwindigkeit an der Messstrecke Lühesand-Ost 1961 bis 1986

Die Daten der Jahre von 1961 bis 1985 in Abbildung 61 und Abbildung 62 zeigen leichte Abnahmen der Flut- und der Ebbeströmungen, wobei die Ebbestromung deutlich stärker abnimmt. Über den überwiegenden Teil des Zeitraums ist eine Ebbestromdominanz festzustellen. Gegen Ende der Periode deutet sich aber ein möglicher Wechsel zur Flutstromdominanz an.

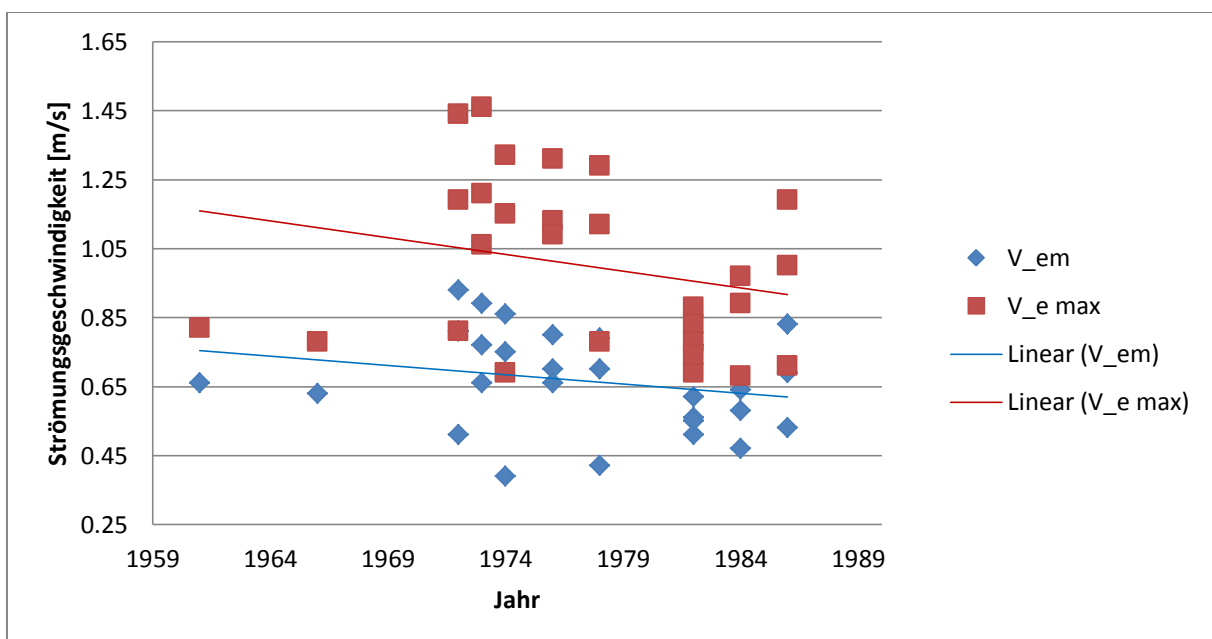


Abbildung 62: Entwicklung der mittleren (V_{em}) und maximalen (V_{emax}) Ebbestromgeschwindigkeit an der Messstrecke Lühesand-Ost 1961 bis 1986

Die Daten der profilbezogenen Messungen bis 1986 sind jedoch mit Unsicherheiten behaftet. Beim Betrachten der Messpositionen auf **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** fällt eine Position auf einer Wattfläche weitab von der „historischen“ Messstrecke auf. Gründe für die wiederholte Verwendung dieser Position sind nicht bekannt.

Bei Einbeziehung der Daten der Dauermessstation D2 und bei Erweiterung des Zeitraumes zeigt sich im Vergleich mit den gemittelten Jahreswerten der Dauermessstation D2 eine klare Umkehr von ebbe- zu flutstromdominierten Strömungsverhältnissen (Abb. 63).

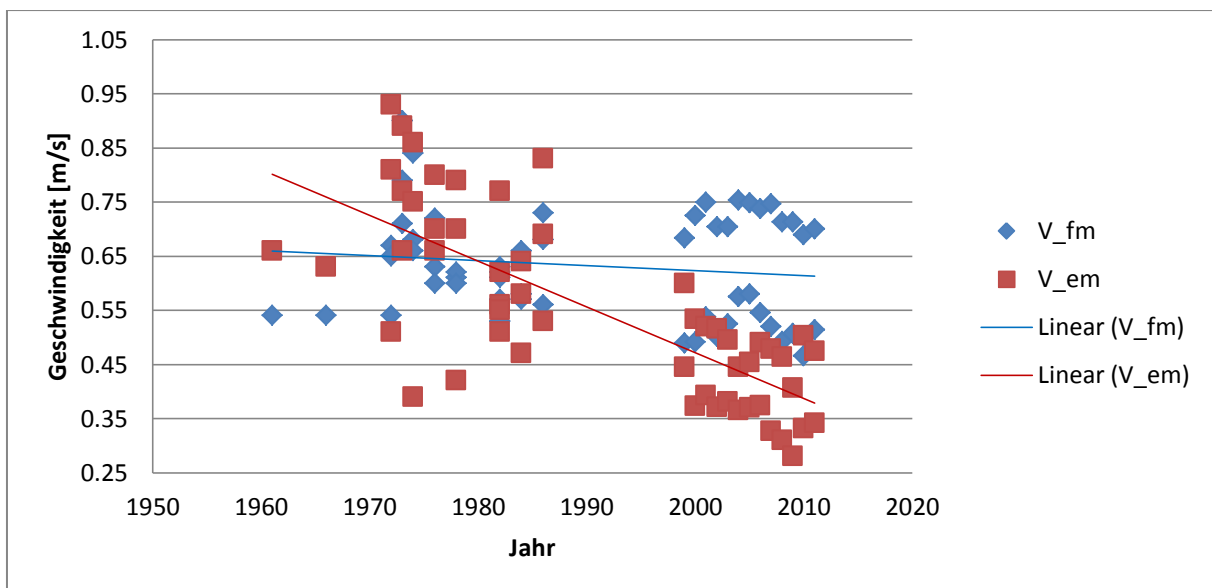


Abbildung 63: Entwicklung der mittleren Ebbe- (V_{em}) und Flutstromgeschwindigkeit (V_{fm}) an der Messstrecke Lühesand-Ost von 1961 bis 2011, direkter Vergleich

Analog zu Kapitel 5.1 ist es vermutlich ebenfalls zielführend, die in Kapitel 4.1.2.3 festgestellten Abweichungen der ADCP-Messung im Messquerschnitt Q2 zu den Daten der Messstation D2 (Kapitel 4.1.1.2 Dauermessstation D2) rechnerisch zu kompensieren. Für die Korrektur werden basierend auf den Arbeiten von Grellus (2012) (DVD-Anhang V) für die Umrechnung auf Fahrrinnenmitte Korrekturfaktoren von 1,14 für die Flut- und 1,12 für die Ebbeströmungen angesetzt. Das Ergebnis zeigt Abbildung 64.

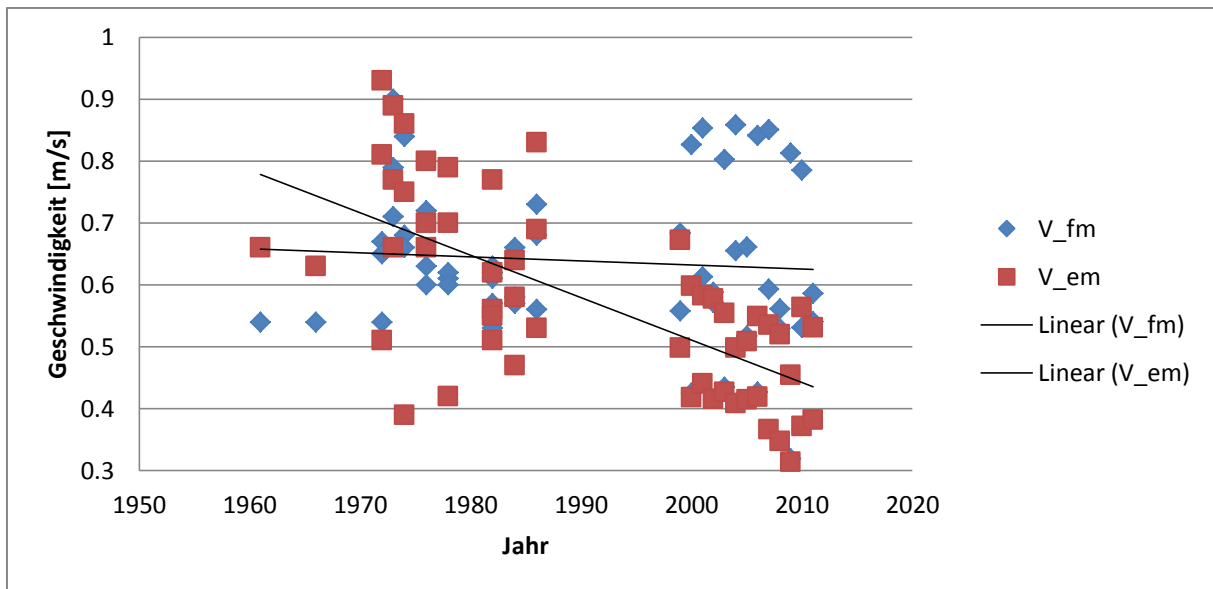


Abbildung 64: Entwicklung der mittleren Ebbe- (V_{em}) und Flutstromgeschwindigkeit (V_{fm}) an der Messstrecke Lühesand-Ost von 1961 bis 2011, nach Neukalkulation gemäß Grellus 2012

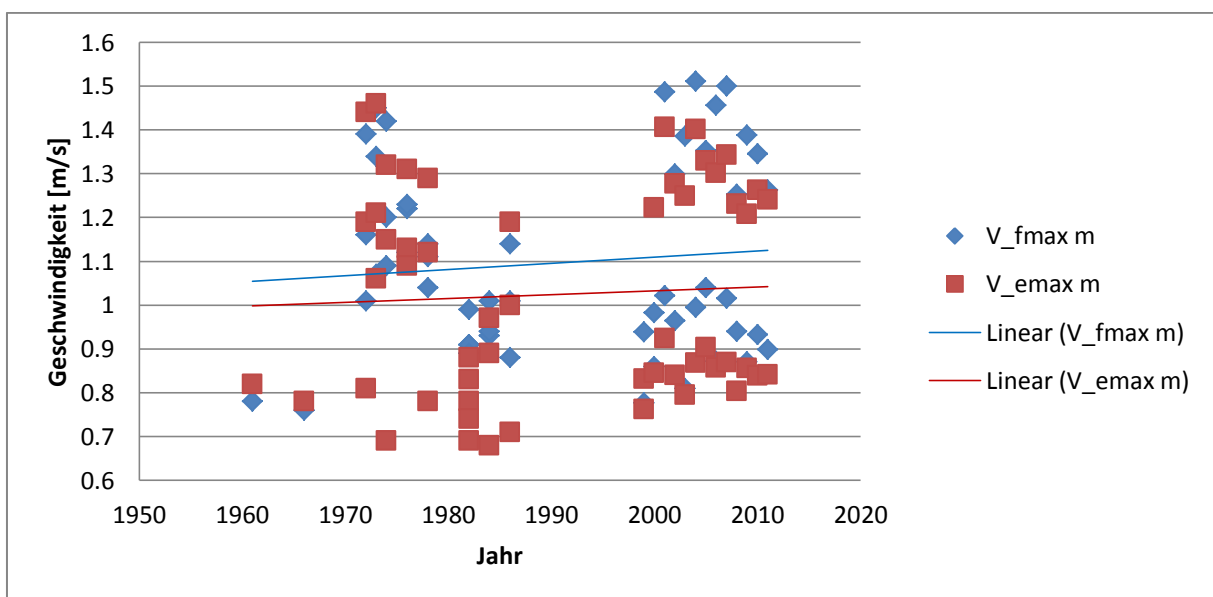


Abbildung 65: Entwicklung der mittleren maximalen Ebbe- ($V_{emax\ m}$) und Flutstromgeschwindigkeit ($V_{fmax\ m}$) an der Messstrecke Lühesand-Ost von 1961 bis 2011, nach Neukalkulation gemäß Grellus 2012

Ob die immer noch erkennbare Umkehr der Strömungsdominanz mit Veränderungen der Morphologie über den Beobachtungszeitraum zusammenhängt, soll in Kapitel 6 näher diskutiert werden. Für die mittleren maximalen Geschwindigkeiten zeigt sich bereits seit den 1960er Jahren eine leichte Flutstromdominanz (Abbildung 65). Es sei noch einmal darauf verwiesen, dass an diesem Messquerschnitt auf Grund der Datenlage ein Vergleich nur näherungsweise möglich ist.

Entwicklung der Flut- und Ebbestromdauern

Zur Entwicklung der Flut- und Ebbestromdauern (Abbildung 66) kann festgestellt werden, dass wie bei D1 eine Abnahme der Ebbestromdauer und eine Zunahme der Flutstromdauer zu beobachten ist. Die Trendentwicklung ist allerdings nicht so signifikant wie bei D1, was in der größeren Streuung der vor 1986 gesammelten Daten gegenüber den jahresgemittelten Daten der Dauermessstationen begründet liegen kann. Auch sei nochmals auf die unterschiedlichen Messprofile und mögliche Nebeneinflüsse auf die Stromdauern hingewiesen.

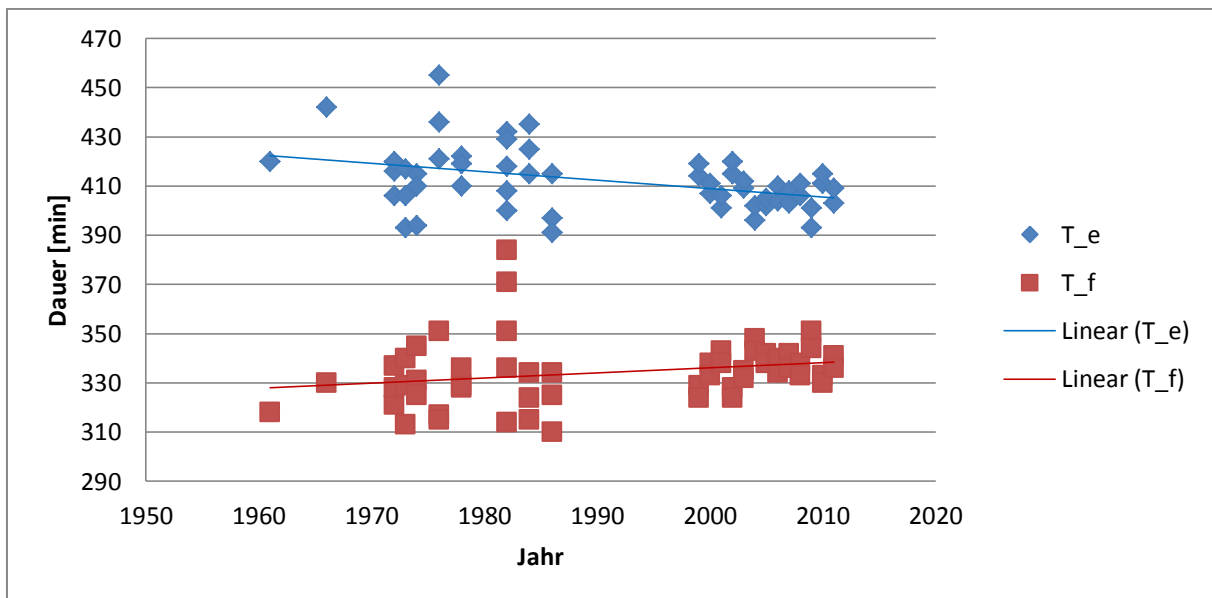


Abbildung 66 : Entwicklung der Ebbestrom- und Flutstromdauer an der Messstrecke Lühesand-Ost von 1961 bis 2011 Ost

5.3 Pagensand-Nord (Elbe-km 664,7)

Die Messergebnisse der aufgearbeiteten Altdaten der Messstrecke Pagensand-Nord stammen von Profilmessungen am Elbe-km 664,7. An derselben Stelle befindet sich auch die Dauermessstation D3 sowie die Messstrecke der jährlich seit 2006 durchgeführten ADCP-Messungen. Ein Vergleich der vorhandenen Altdaten mit den aktuellen Messungen ist somit sinnvoll und durchführbar. Wie in den Vorkapiteln ist die Messstrecke mit der Elbemorphologie aus dem Jahr 1950 dargestellt (Abb. 67). Anzumerken hierzu ist, dass die Messungen über das gesamte Profil von 1950 (vgl. Abbildung 67) vor Errichten der Elbinsel Pagensand und deren Leitdamm gemessen wurden (spätere Inselform ist schon an den eingetragenen Untiefen zu erkennen). Die Werte der ADCP-Messungen und die fahrrinnengemittelten Werte der Dauermessstation beziehen sich auf die nach Durchführung der Baumaßnahmen verbliebene Hauptelbe (vgl. dazu auch Kapitel 6.2.3).

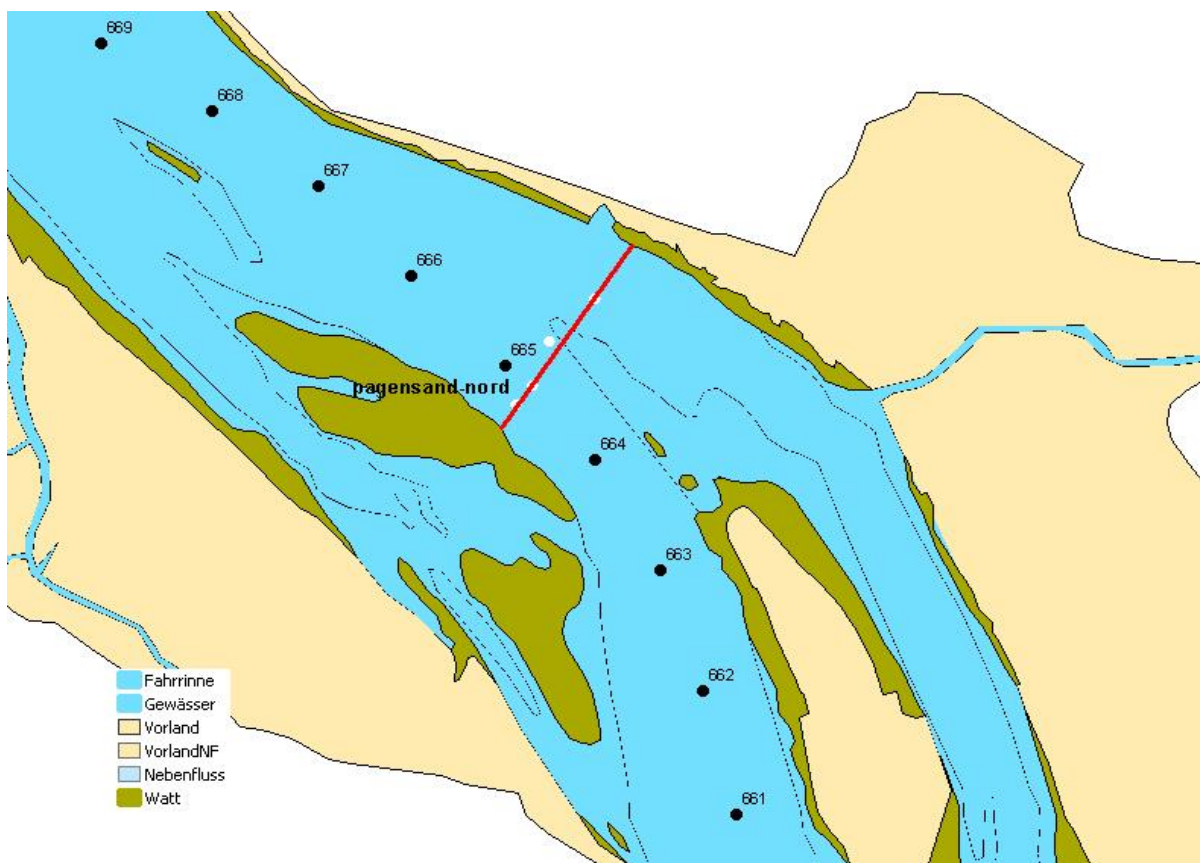


Abbildung 67: Lage der Messstrecke Pagensand-Nord, Basis: Elbemorphologie aus dem Jahr 1950

[Quelle: Qrefa-Sander, 2012]

Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeiten

Der in Abbildung 68 dargestellten Entwicklung der Flutstromgeschwindigkeiten liegen Daten aus Messprotokollen des WSA Hamburg und der WSD Nord bis in das Jahr 1978 zugrunde. Für spätere Jahre bis zum Beginn der aktuellen Dauermessungen konnten leider keine für diese Arbeit verwertbaren Messprotokolle gefunden werden. In manchen Jahren, wurden mehrmals Messungen durchgeführt, in anderen kommen auch Datenlücken (= Jahre ohne Messungen) vor.

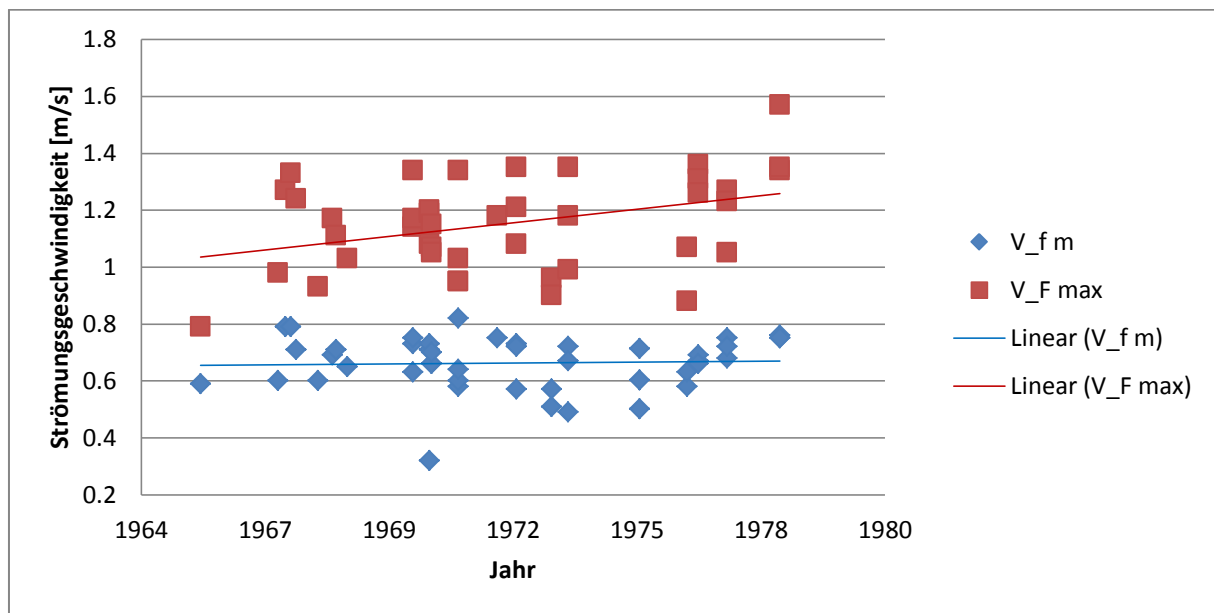


Abbildung 68: Entwicklung der mittleren (V_{fm}) und maximalen (V_{fmax}) Flutstromgeschwindigkeit an der Messstrecke Pagensand-Nord (Elbe-km 664,7) von 1966 bis 1978

Aus der grafischen Aufbereitung der Daten der Flutstromgeschwindigkeiten bis 1978 (Abb. 68) geht hervor, dass die maximale Flutstromgeschwindigkeit im Beobachtungszeitraum ansteigt, die mittlere Flutstromgeschwindigkeit hingegen unverändert bleibt. Die gleiche Aussage lässt sich für die Entwicklung der Ebbestromgeschwindigkeit treffen (Abb. 69). Allerdings ist bei Einbeziehung der späteren Messphasen zu beachten, dass die dazwischen durchgeführten Baumaßnahmen die Ursache sein können für die vergleichsweise stark gegenteilige Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeiten in ab dem Jahr 1999.

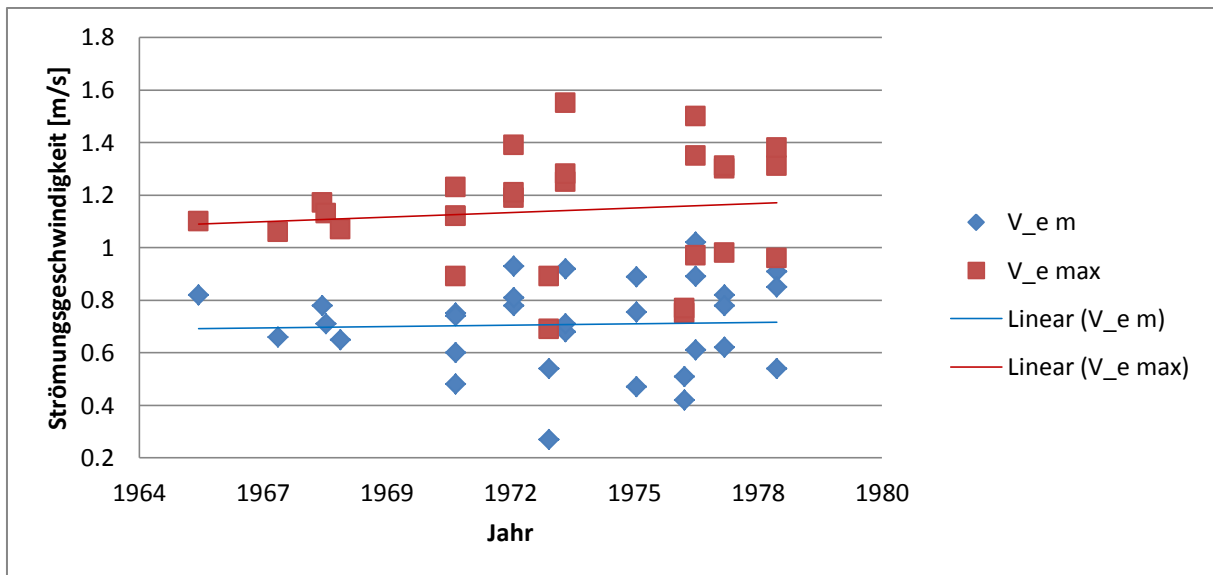


Abbildung 69: Entwicklung der mittleren (V_{em}) und maximalen (V_{emax}) Ebbestromgeschwindigkeit an der Messstrecke Pagensand-Nord (Elbe-km 664,7) von 1966 bis 1978

In Abbildung 70 sind Altdaten und aktuelle Messdaten wieder zusammen dargestellt. Die bereits erwähnte Datenlücke wird dadurch sehr auffällig. Durch die in Kapitel 4.1.2.3 festgestellte sehr gute Korrelation der Daten der Dauermessstation D3 mit den Daten der ADCP-Messung am Messquerschnitt Q3 macht eine rechnerischen Anpassung der Daten unnötig. Die Werte besitzen somit einen unmittelbaren Bezug zur Fahrrinnenmitte.

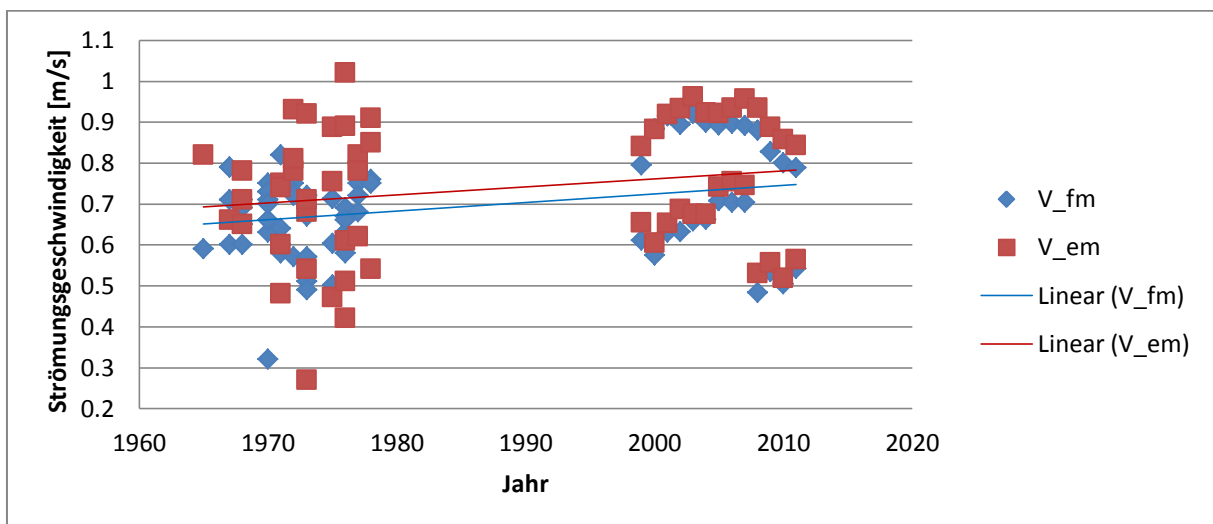


Abbildung 70: Entwicklung der mittleren Ebbe- (V_{em}) und Flutstromgeschwindigkeit (V_{fm}) an der Messstrecke Pagensand-Nord von 1966 bis 2011, direkter Vergleich

Bei der Betrachtung fällt auf, dass der Anstieg der Strömungsgeschwindigkeit bei den mittleren Geschwindigkeiten über den Beobachtungszeitraum etwa das gleiche Steigungsmaß aufweist wie beim Anstieg der Strömungsgeschwindigkeiten am Messprofil Hanskalbsand in Kapitel 5.1 . Auch findet sich die leichte Ebbestromdominanz, welche zuvor schon in Kapitel 4.1.1.3 und 4.1.2.3 festgestellt wurde, in den Darstellungen wieder. Für die mittleren maximalen Geschwindigkeiten ist in der gewählten Darstellung kein bzw. nur ein leicht abnehmender Trend erkennbar. Auch ist eine leichte Flutstromdominanz bei Betrachtung der mittleren maximalen Strömungsgeschwindigkeiten in Abbildung 71 festzustellen.

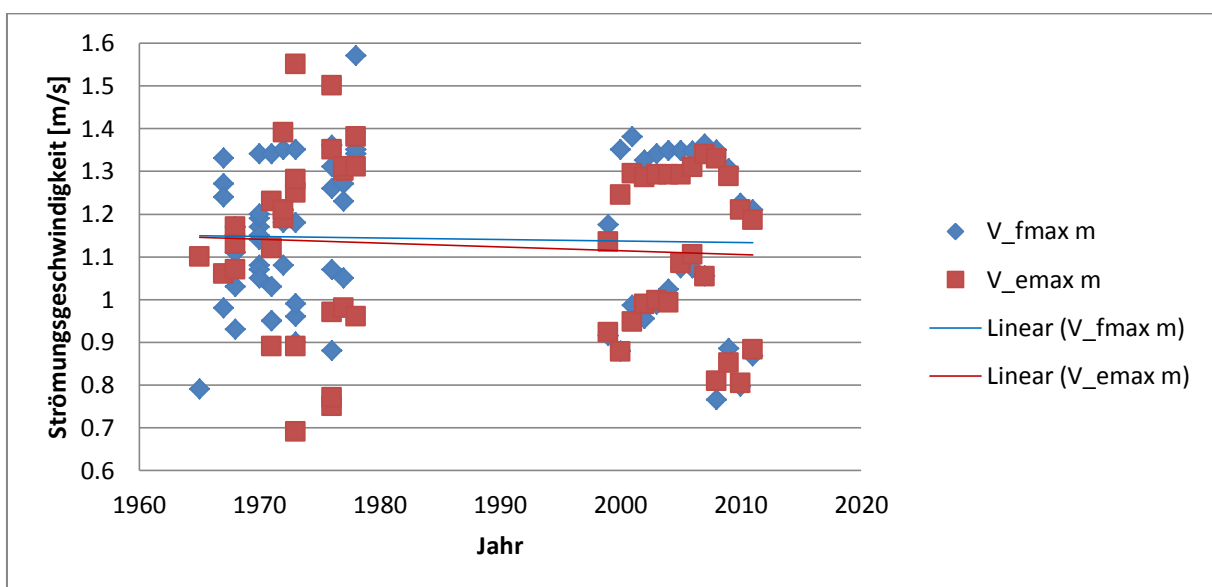


Abbildung 71: Entwicklung der mittleren maximalen Ebbe- ($V_{emax\ m}$) und Flutstromgeschwindigkeit ($V_{fmax\ m}$) an der Messstrecke Pagensand-Nord 1966 bis 2011, direkter Vergleich

Entwicklung der Flut-und Ebbestromdauern

Die Entwicklung der Tidedauern über den Beobachtungszeitraum zeigt im Gegensatz zu den vorherigen Profilen einen Anstieg der Ebbestromdauer und eine Abnahme der Flutstromdauer (Abb. 72). Mögliche Gründe können sowohl Auswirkungen der Fahrrinnenanpassung, das Verringern des überschwemmbaren Vorlandes sowie das Schließen der Nebeneiben sein. Auch darf nicht außer Betracht bleiben, dass die Interpretationsmöglichkeiten durch die nicht unerhebliche Datenlücke zwischen 1978 und 2011 nachteilig beeinflusst werden.

Auch die Verlagerung der Messprofile nach Errichtung der Elbinsel und des dazugehörigen Leitdammes können Ursachen für Unsicherheiten sein. . Die Punkte der Messungen bis 1978 bilden ein weiter gefasstes Profil ab als dies mit den ADCP-Messungen möglich ist.

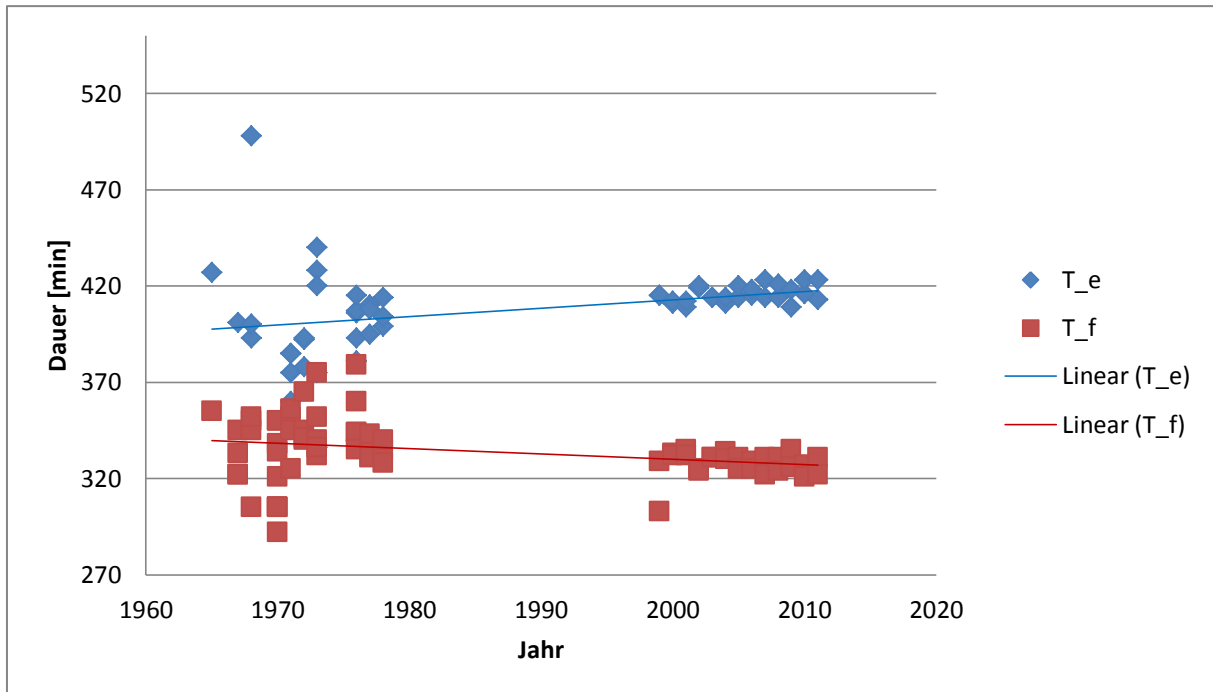


Abbildung 72: Entwicklung der Ebbestrom- und Flutstromdauer an der Messstrecke Pagensand-Nord (Elbe-km 664,7) zwischen 1966 und 2011

5.4 Rhinplate-Nord (Elbe-km 676,5)

Die Altdaten der Messstrecke Rhinplate-Nord wurden an Elbe-km 676,5 erhoben. In den Unterlagen konnten Strömungsmessdaten bis einschließlich 1989 gefunden werden. Die Dauermessstation D4 befindet sich ebenso wie das jährliche ADCP-Messprofil direkt auf der „historischen“ Messstrecke. Somit sind beide Profile annähernd deckungsgleich.

Ein Vergleich der alten und neuen Daten ist sinnvoll und durchführbar. Nachfolgend ist die Messstrecke wiederum bezogen auf die Elbe-Morphologie von 1950 dargestellt.

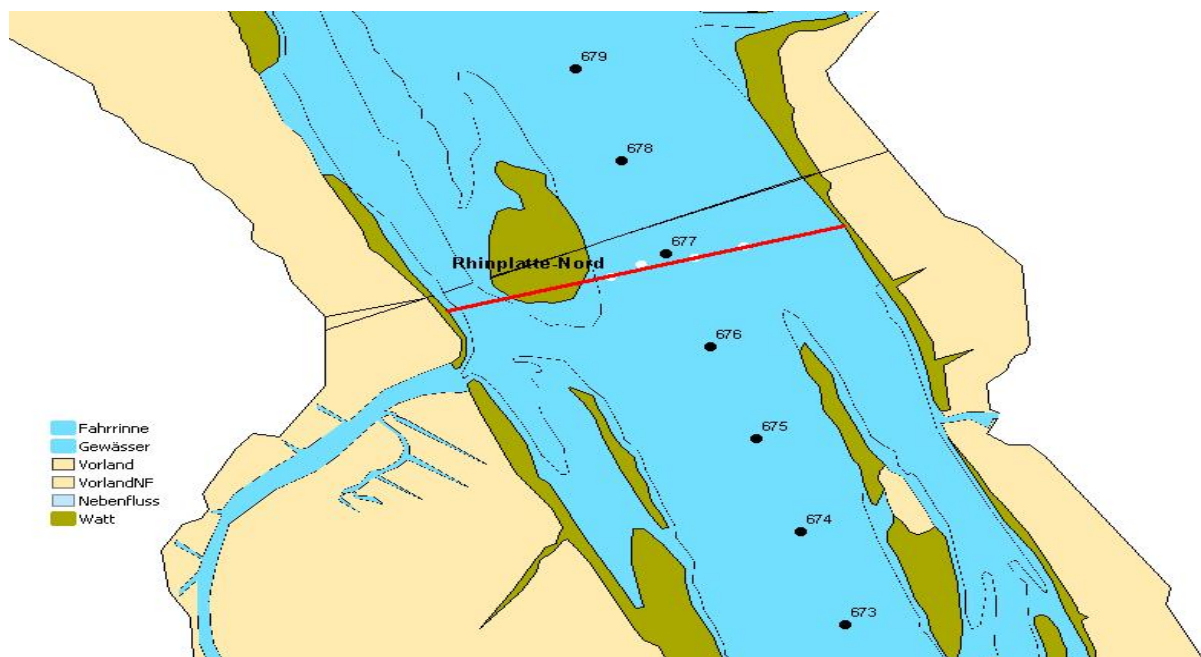


Abbildung 73: Lage der Messstrecke Rhinplate-Nord (in rot), Elbemorphologie im Jahr 1950

[Quelle: Qrefa-Sander, 2012]

Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeiten

Die in der nachfolgenden Grafik dargestellte Entwicklung der Flutstromgeschwindigkeit beruht auf Daten von Messprotokollen bis in das Jahr 1989. Für die späteren Jahre konnten keine für diese Arbeit verwertbaren Daten gefunden werden. Es gibt Jahre, in denen mehrmals Messungen durchgeführt wurden, aber auch Jahre, in denen keine Messungen erfolgten.

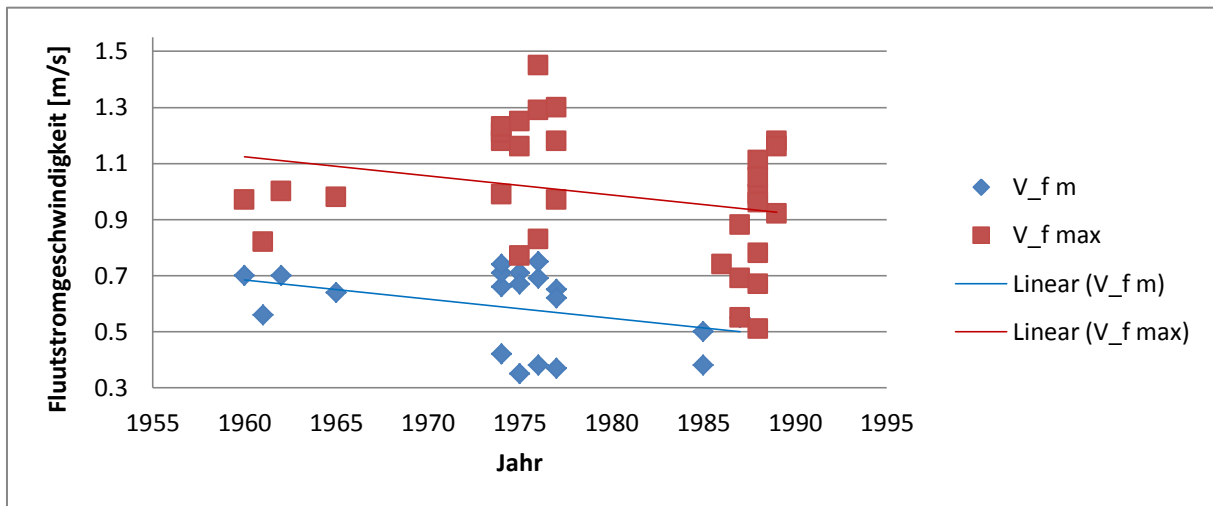


Abbildung 74: Entwicklung der mittleren (V_{fm}) und maximalen (V_{fmax}) Flutstromgeschwindigkeit an der Messstrecke Rhinplate-Nord (Elbe-km 676,5) von 1960 bis 1989

Aus Abb. 74 lässt sich bis 1989 eine Abnahme der Flutstromgeschwindigkeiten ablesen. Auch bei der Betrachtung der Ebbestromgeschwindigkeiten bis 1989 ist eine abnehmende Tendenz erkennbar (Abb. 75).

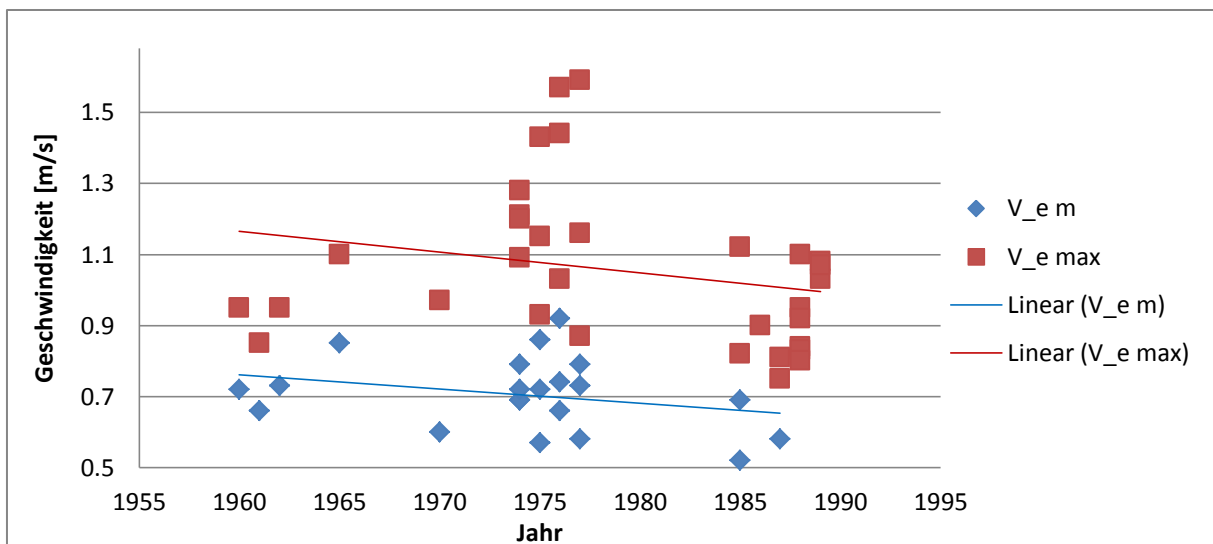


Abbildung 75: Entwicklung der mittleren (V_{em}) und maximalen (V_{emax}) Ebbestromgeschwindigkeit an der Messstrecke Rhinplate-Nord (Elbe-km 676,5) von 1960 bis 1989

Der direkte Vergleich der Werte über den gesamten Beobachtungszeitraum bis 2011 (Abb. 76) zeigt einen Anstieg der Ebbe- und Flutstromgeschwindigkeiten.

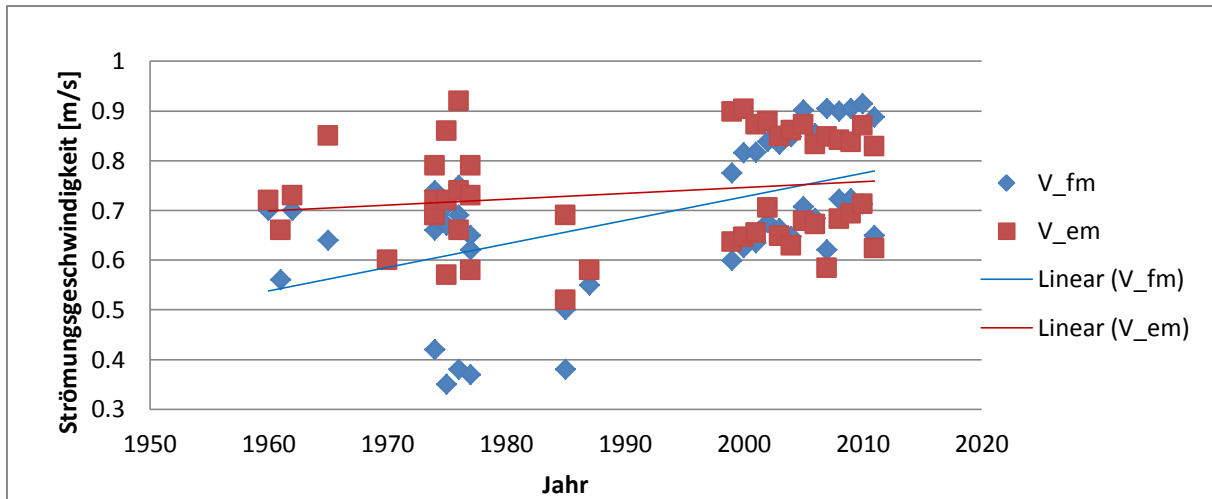


Abbildung 76: Entwicklung der mittleren Ebbe- (V_{em}) und Flutstromgeschwindigkeit (V_{fm}) an der Messstrecke Rhinplate-Nord von 1960 bis 2011, direkter Vergleich

Auch in diesem Fall wechselt das ebbestromdominierte Strömungsbild ab 2006 zu einem flutstromdominierten. Dieser Trend konnte in den Untersuchungen zu den Strömungsgeschwindigkeiten in Kapitel 4.1.1.4 Dauermessstation D4 die nur auf neueren Daten beruhten, nicht festgestellt werden. Vermutlich nehmen in diesem Fall die ab 1970 bis Mitte der achtziger Jahre fehlenden Werte Einfluss auf das Bild.

In Kapitel 4.1.2.4 wurde bereits darauf aufmerksam gemacht, dass aufgrund der Lage der Station D4 am Fahrrinnenrand eine Korrektur der Daten zum Vergleich mit der Fahrrinnenmitte erforderlich ist. Das gilt besonders für die Ebbestromgeschwindigkeiten (siehe *Grellus 2012*).

Nach der Korrektur der Ebbestromgeschwindigkeit mit dem Faktor 1,46 ergibt sich ein deutlich verändertes Bild (Abbildung 77).

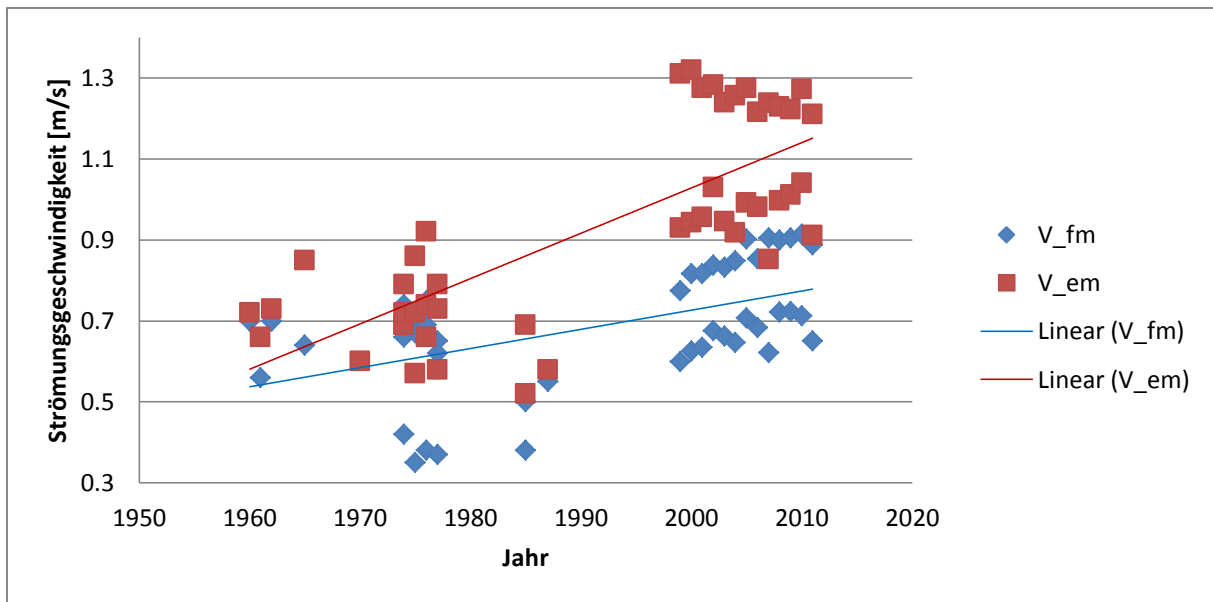


Abbildung 77: Entwicklung der mittleren Ebbe- (V_{em}) und der Flutstromgeschwindigkeit (V_{fm}) an der Messstrecke Rhinplate-Nord von 1960 bis 2011, nach Korrektur gemäß Grellus 2012

Ebbe- sowie Flutstromgeschwindigkeit steigen im Beobachtungszeitraum an, wobei der Anstieg der Ebbestromgeschwindigkeit stärker ausfällt als der Anstieg der Flutstromgeschwindigkeit. Die mittleren maximalen Geschwindigkeiten zeigen einen ähnlichen Trend (Abb. 78).

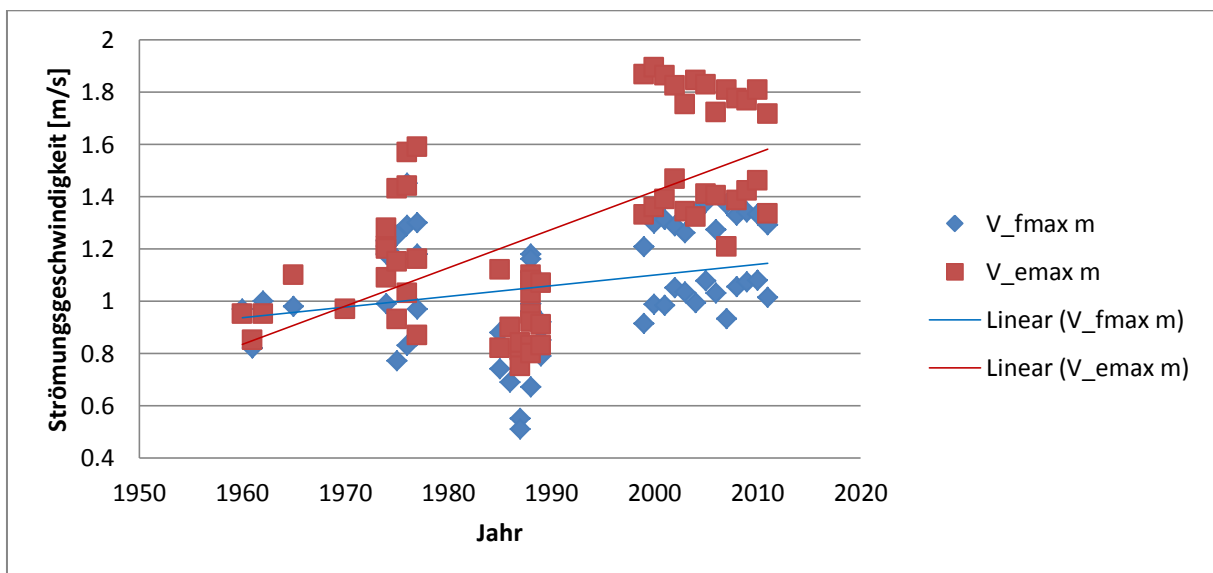


Abbildung 78: Entwicklung der mittleren maximalen Ebbe- ($V_{emax\ m}$) und der Flutstromgeschwindigkeit ($V_{fmax\ m}$) an der Messstrecke Rhinplate-Nord von 1960 bis 2011, nach Korrektur gemäß Grellus 2012

Entwicklung der Flut- und Ebbestromdauern

Abbildung 79 zeigt die Entwicklung der Ebbe- und Flutstromdauern an der Messstrecke Rhinplate-Nord. Ähnlich den Profilen Q1 und Q2 sind eine leichte Abnahme der Ebbestromdauern und ein geringfügiger Anstieg der Flutstromdauern erkennbar.

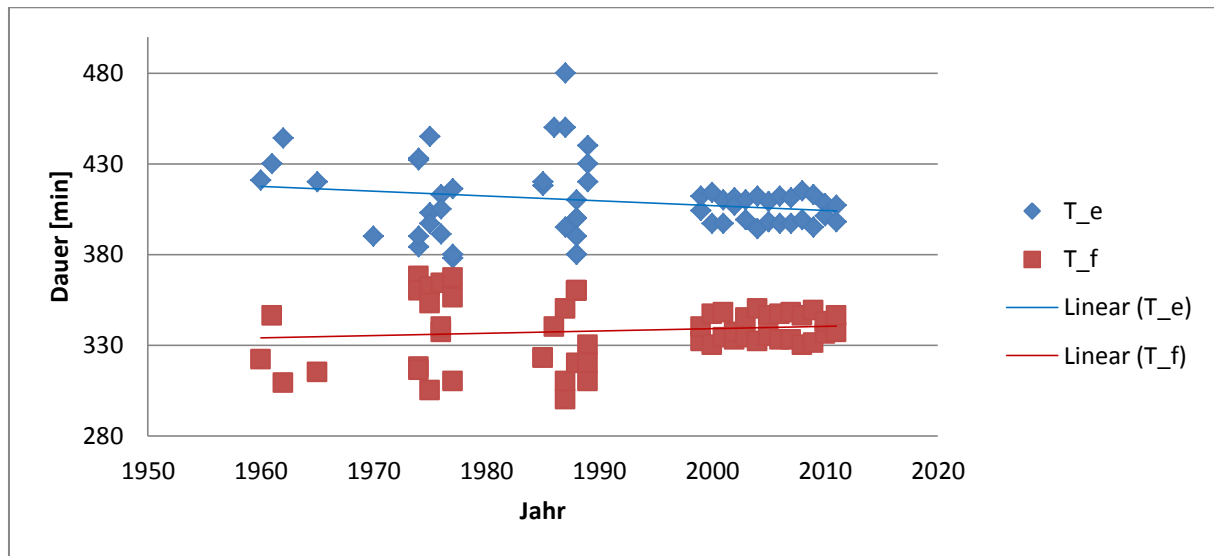


Abbildung 79: Entwicklung von Ebbestrom- und Flutstromdauern an der Messstrecke Rhinplate-Nord (Elbe-km 676,5) zwischen 1960 und 2011

6 Deutliche Veränderungen seit 1960

Anthropogene Eingriffe in den Verlauf und die Sohlbeschaffenheit der Tideelbe haben diese seit alters her erheblich beeinflusst. Verstärkt wurden Baumaßnahmen nach der Sturmflutkatastrophe von 1962 durchgeführt. Vor allem das Errichten von Sturmflutschutzanlagen, wie dem Wehr Geesthacht und das Vorverlegen der Deichlinie, haben den Überflutungsraum der Tideelbe und deren Durchflussquerschnitt stark eingeengt. Beides hat zu einem Anstieg der Strömungsgeschwindigkeiten und des mittleren Tidehubes geführt (vgl. *Fickert & Strotmann, 2007*). Auch die später durchgeführten Anpassungen der Fahrrinntiefe führten zu Veränderungen des Strömungsregimes. Einen kurzen Überblick über die

ausgeführten Baumaßnahmen findet sich in Tabelle 1 (Kap. 2.2). Eine nähere Betrachtung der Baumaßnahmen an den in dieser Arbeit untersuchten Flussabschnitten wird später in Kapitel 6.1 Morphologische Entwicklungen und ihr Einfluss auf die Strömungsverhältnisse in der Unterelbe seit 1960 geschehen.

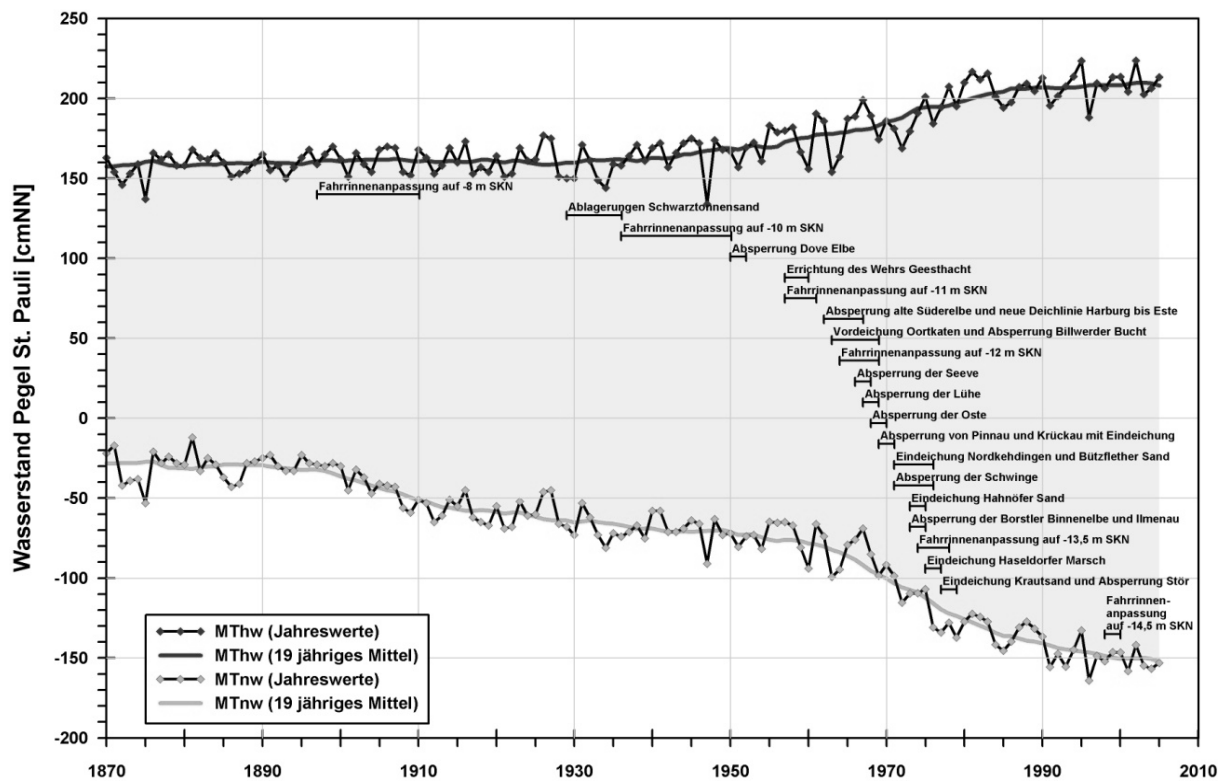


Abbildung 80: Entwicklung der Wasserstände am Pegel St. Pauli von 1870 bis 2006

[Quelle: Fickert&Strotmann,2007]

Auf dem in Abbildung 80 dargestellten Verlauf der Tidewasserstände ist sich der Zusammenhang von Baumaßnahmen und Tidewasserständen zu erkennen. In der Literatur wird häufig der Pegel St. Pauli angeführt, da sich „im Stromspaltungsgebiet [...] die Überlagerung der externen natürlichen Einflüsse wie die Entwicklung der Wasserstände in der Nordsee und die Variabilität des Oberwasserabflusses mit den anthropogenen Eingriffen unterschiedlichster Art in das natürliche Gleichgewichtssystem der Tideelbe unterhalb und oberhalb Hamburgs sowie im Hafen selbst besonders deutlich“ (Fickert & Strotmann, 2007) widerspiegelt.

Und weiter führen die Autoren zu den Auswirkungen der Baumaßnahmen aus: „[...] Die Fahrinnenanpassungen bis zur Anpassung auf -11 m SKN betrafen hauptsächlich den Bereich oberhalb Glückstadts [...]. Am Ende dieser Periode steht

schließlich die Errichtung einer Tidebarriere durch das 1960 in Betrieb genommene Wehr in Geesthacht. Die Beurteilung der in den '60er und '70er Jahren folgenden Maßnahmen sind daher zwingend auch im Zusammenwirken mit dieser das Schwingungsverhalten der Gezeitenwelle im gesamten Ästuars nachhaltig verändernden Tidebarriere zu betrachten. Überlagert wird dieser nachhaltige Eingriff insbesondere auch durch die unzähligen Hochwasserschutzmaßnahmen nach der '62er-Sturmflutkatastrophe. Die damit verbundene drastische Verringerung von Fluträumen durch Eindeichung großer Marschenflächen und Abriegelung der Nebenflüsse durch Sperrwerke hat [...] ohne Zweifel zu der kontinuierlichen Veränderung des Tideregimes der Elbe beigetragen. Die Schaffung von Landflächen im Hamburger Hafen (ca. 190 ha) durch die seit Mitte der '80er Jahre wiederholt vorgenommene Verfüllung verschiedener Hafenbecken hat sicherlich zur weiteren Entwicklung der Wasserstände im Stromspaltungsgebiet beigetragen [...]“(*Fickert & Strotmann, 2007*).

Dazu sei gesagt, dass es seit den 1950er Jahren bis 2006 eine Abnahme der Wasserflächen im Hamburger Hafen in einer Größenordnung von ca. 625 Hektar gegeben hat. In der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts kam es hingegen durch die Zunahme der Wasserflächen zu einer Teilkompensation der Auswirkungen der Baumaßnahmen auf die Tidewasserstände. Die Verfüllung der Hafenflächen verstärkte jedoch die Auswirkungen der Baumaßnahmen zusätzlich durch die Veränderung des Tideprismas im gesamten Ästuarverlauf. „[...] Dabei bezeichnet man als Tideprisma das Wasservolumen, welches zwischen Tideniedrig- und Tidehochwasser oberhalb eines bestimmten Ästuarabschnitts aufgefüllt werden muss. Das Tideprisma ist also eine ästuar-spezifische Funktion, die von der Mündung zur Tidegrenze (z. B. dem Tidewehr) kontinuierlich bis auf null abfällt.

[Bei] [...] [einer] Verbreiterung im Oberlauf muss das zusätzliche Tidevolumen durch alle Querschnitte des Ästuars hindurchgeführt werden. Dies führt zu einem entsprechenden Anstieg der Strömungsgeschwindigkeiten [...]. [...] Verbreiterungen im Oberlauf können damit als Ausgleichsmaßnahme gegen vertiefungsbedingte Absenkung des Tideniedrigwassers in Betracht gezogen werden“ (*Malcherek, 2010*). Den Verlust von Wasserflächen im Hamburger Hafen ist hier gegensätzlich zu sehen, er hat zu einer weiteren Absenkung des Tidenniedrigwassers geführt und dem Anstieg von Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich des Hamburger Hafens und

nah stromab gelegenen Bereichen eher entgegengewirkt. Gleichzeitig wurden Tendenzen zur Zunahme von Flutstromdominanz gestärkt.

In Abbildung 80 wird verdeutlicht, dass die Baumaßnahmen im Bereich der Tideelbe in Gänze vor allem zwischen 1960 und 1980 verstärkte Auswirkungen auf die Wasserspiegellage in der Tideelbe hatten. Veränderungen der Wasserspiegellage und des damit verbundenen Energiegefälles sind maßgeblich für die Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeiten. Auf das hochkomplexe Zusammenspiel von wasserbaulichen Maßnahmen, meteorologischen Randbedingungen und Oberwasserzuflüssen wurde in Kapitel 2.1. Strömungsverhältnisse in Tideflüssen bereits eingegangen.

Im Hinblick auf die im Zeitraum erfolgten Vertiefungsmaßnahmen schreibt *Malcherek (2010)*: “[...] Die Veränderung der Strömungsgeschwindigkeit ist durch zwei gegenläufige Prozesse bestimmt:

- Zum einen wird der durchflossene Querschnitt durch die Vertiefung aufgeweitet. Dies hat eine Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit am Ort der Vertiefung zur Folge.
- Zum anderen bedingt die Zunahme des Tidehubs eine Erhöhung des Tidevolumens, welches durch den vertieften Querschnitt bei Ebbe ab- und bei Flut zufließen muss. Dies ist mit einer Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit verbunden.

[...] Durch die Vertiefung der Hauptrinne wird deren Bedeutung für die Wasserführung gestärkt, sie wird im Verhältnis [...] hydraulisch glatter, da die Wirkung der Sohlrauheit sich aufgrund der größeren Tiefe reduziert“ (*Malcherek, 2010*). Entsprechend ergeben sich höhere Geschwindigkeiten in der Fahrrinnenmitte und verringerte in den Randbereichen.

Im Hinblick auf die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Messprofile sei zunächst festgehalten, dass aufgrund der hier erfolgten anthropogenen Eingriffe – insbesondere im Fahrrinnenbereich - generell Strömungszunahmen stattgefunden haben müssten, wobei diese nahe Hamburg ggf. geringer ausgefallen sein könnten. Teilweise können die großräumigen Auswirkungen aber auch „lokal überprägt“ werden (Querschnittsveränderung bzw. morphologische Veränderung im Nahfeld).

Hierzu erfolgt später eine Detailbetrachtung. Vorher sollen zur weiteren Detaillierung aber noch die Entwicklungen der mittleren Tidewasserstände der Bezugspegel der Messprofile kurz zusammengefasst werden.

Da der Pegel Hetlingen (Bezugspegel für die Messungen bei Q2) erst seit 1978 in Betrieb ist, werden für die Station D2 bzw. das Profil Q2 die Daten der Pegel Stadersand verwendet (Tabelle 29).

Tabelle 29: Veränderungen des Tidehubes von 1958-2011

Veränderungen des Tidehubes an ausgesuchten Pegeln	
Pegel	Veränderungen 1958-2011 [cm]
Cuxhaven	5
Glückstadt	25
Kollmar	37
Stadersand	56
Schulau	86
St. Pauli	116

Deutlich lässt sich erkennen, dass im Verlauf des Ästuars zur Mündung hin der Tidehub weniger ausgeprägt ist als an den Pegeln elbaufwärts. Der mittlere Tidehub nahm im Beobachtungszeitraum am Pegel Glückstadt um 25 cm zu, am Pegel Schulau um 86 cm. Dies ist durch die Verformung der Tidewelle im Ästuar zu erklären (Boehlich, 2003). Beim Vergleich der Pegel untereinander sind unterschiedlich starke Tidehübe zwischen den Pegeln festzustellen. Die Tidenhübe und damit ihre Differenzen untereinander scheinen zudem periodischen Änderungen zu unterliegen (Tab. 30 und 31).

Tabelle 30: Differenzen der Tidehübe der Pegel zueinander anhand des 10-Jahresmittels 1958/1968

Differenz mittlerer Tidehub an ausgesuchten Pegeln						
10-Jahreswerte 1958 – 1968						
[cm]						
Unterschied von / nach	Cuxhaven	Glückstadt	Kollmar	Stadersand	Schulau	St. Pauli
Cuxhaven	X	-31.00	-35.00	-39.00	-47.00	-43.00
Glückstadt	31.00	X	-4.00	-8.00	-16.00	-12.00
Kollmar	35.00	4.00	X	-4.00	-12.00	-8.00
Stadersand	39.00	8.00	4.00	X	-8.00	-4.00
Schulau	47.00	16.00	12.00	8.00	X	4.00
St. Pauli	43.00	12.00	8.00	4.00	-4.00	X

Tabelle 31: Differenzen der Tidehübe der Pegel zueinander anhand des 10-Jahresmittels 2001/2011

Differenz mittlerer Tidehub an ausgesuchten Pegeln						
10-Jahreswerte 2001 - 2011						
[cm]						
Unterschied von / nach	Cuxhaven	Glückstadt	Kollmar	Stadersand	Schulau	St. Pauli
Cuxhaven	X	-14.18	-7.00	8.91	31.64	69.18
Glückstadt	14.18	X	7.18	23.09	45.82	83.36
Kollmar	7.00	-7.18	X	15.91	38.64	76.18
Stadersand	-8.91	-23.09	-15.91	X	22.73	60.27
Schulau	-31.64	-45.82	-38.64	-22.73	X	37.55
St. Pauli	-69.18	-83.36	-76.18	-60.27	-37.55	X

Die Tabellen zeigen, welche Unterschiede sich in Bezug auf die Wasserspiegellage und damit auch auf das Energiegefälle ergeben. So lag im 10-Jahresmittel '58/'68 der MThb in Cuxhaven 43 cm über und im 10-Jahresmittel '01/'11 etwa 69 cm unterhalb des MThb am Pegel St. Pauli. Eine ähnliche Entwicklung ist an allen Pegeln zu beobachten.

Abbildung 81 verdeutlicht die beschriebenen Entwicklungen des mittleren Tidehubes anhand des Vergleiches der gemittelten 10-Jahreswerten. Deutlich ist der zwischen den beiden Zeiträumen eingetretene Anstieg des mittleren Tidehubes im stromaufgerichteten Verlauf zu beobachten.

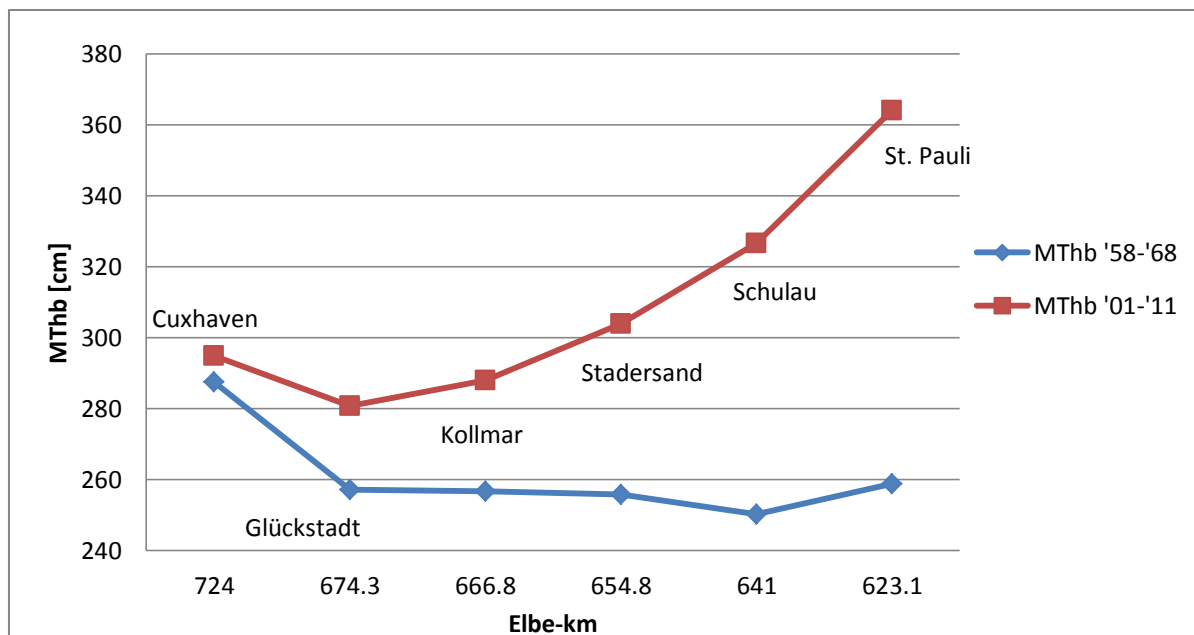


Abbildung 81: Veränderungen des mittleren Tidehubes (MThb) an ausgewählten Pegeln; Vergleich der 10-Jahreswerte zwischen 1958 bis 1968 und 2001 bis 2011

In den Abb. 82 bis 86 sind die Entwicklungen der Tidekennwerte an den Pegeln Glückstadt, Stadersand, Schulau, St. Pauli und Cuxhaven dargestellt. Alle Darstellungen finden sich im Anhang III wieder.

Aufgetragen sind jeweils die Entwicklung des mittleren Tidehochwassers MThw, des mittleren Tideniedrigwassers MTnw und die des mittleren Tidehubes MThb. Vergleichend dazu werden noch die Entwicklungen am Pegel Cuxhaven, welcher, wie in Kapitel 2.2 bereits erwähnt, sich auf Grund seiner Lage am geringsten veränderte. Demgegenüber zeigte der Pegel St. Pauli eine besonders ausgeprägte Veränderung des Tidehubes.

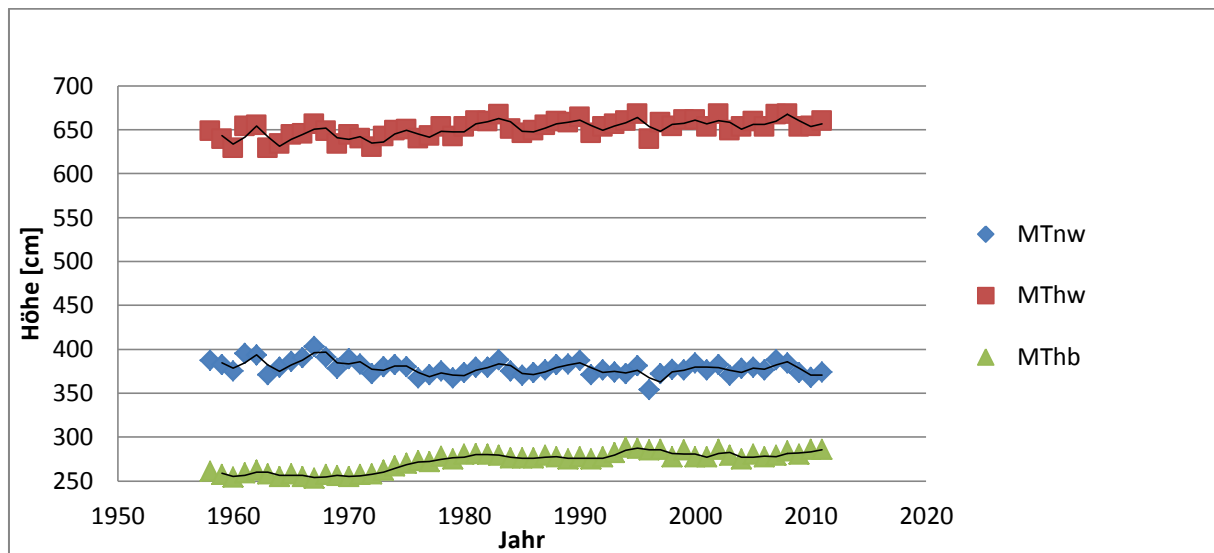


Abbildung 82: Mittlere Tidewasserstände und mittlerer Tidehub am Pegel Glückstadt in den Jahren 1958-2011

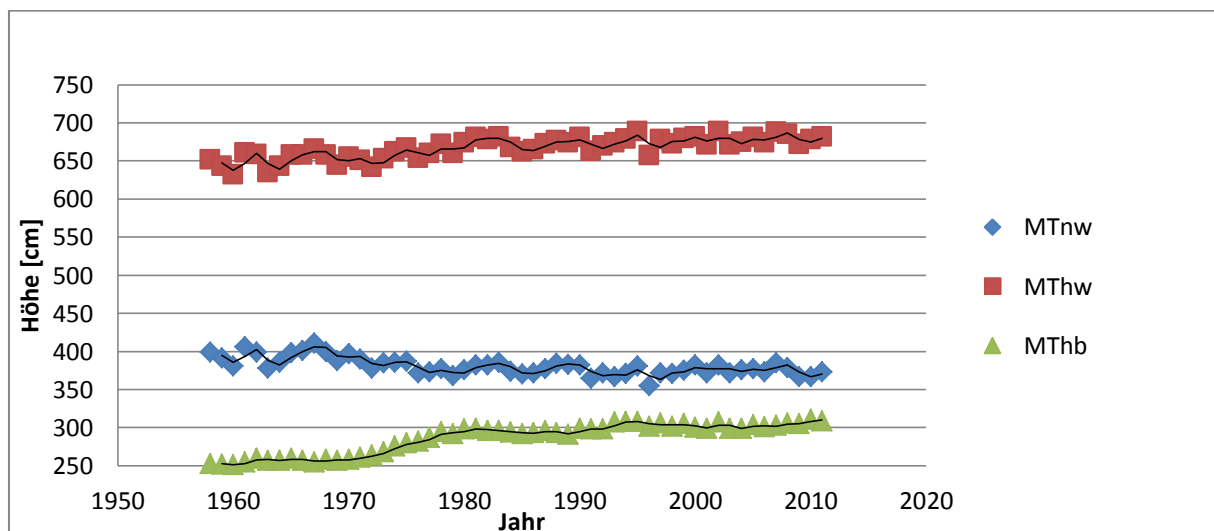


Abbildung 83: Mittlere Tidewasserstände und mittlerer Tidehub am Pegel Stadersand in den Jahren 1958-2011

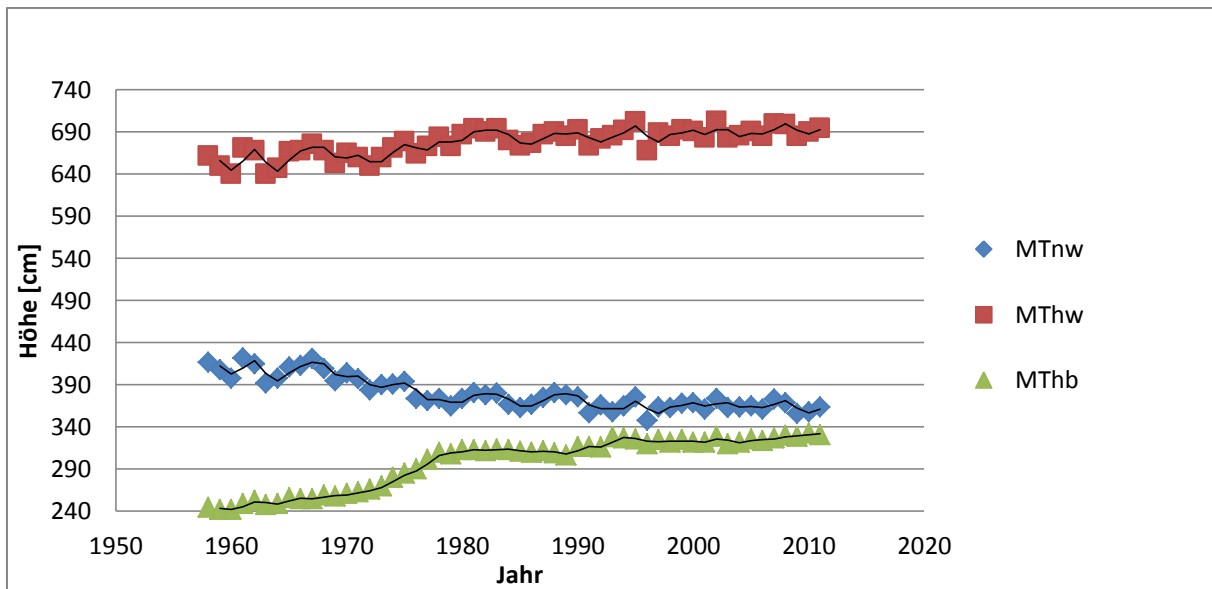


Abbildung 84: Mittlere Tidewasserstände und mittlerer Tidehub am Pegel Schulau in den Jahren 1958-2011

In den Jahren des Elbeausbaues zwischen 1960 und 1980 treten die gravierendsten Veränderungen des Tidehubes auf. Besonders die Entwicklungen am Pegel Schulau (Abb. 84) lassen dies gut erkennen. An dieser Stelle steigt in dem Zeitraum der MThb kontinuierlich und steil an. Erst etwa ab 1979 flacht das Steigungsmaß wieder ab. Besonders deutlich wird diese Entwicklung bei einem Vergleich der Situation am Pegel Cuxhaven (Abb.86) und am Pegel St. Pauli (Abb. 85).

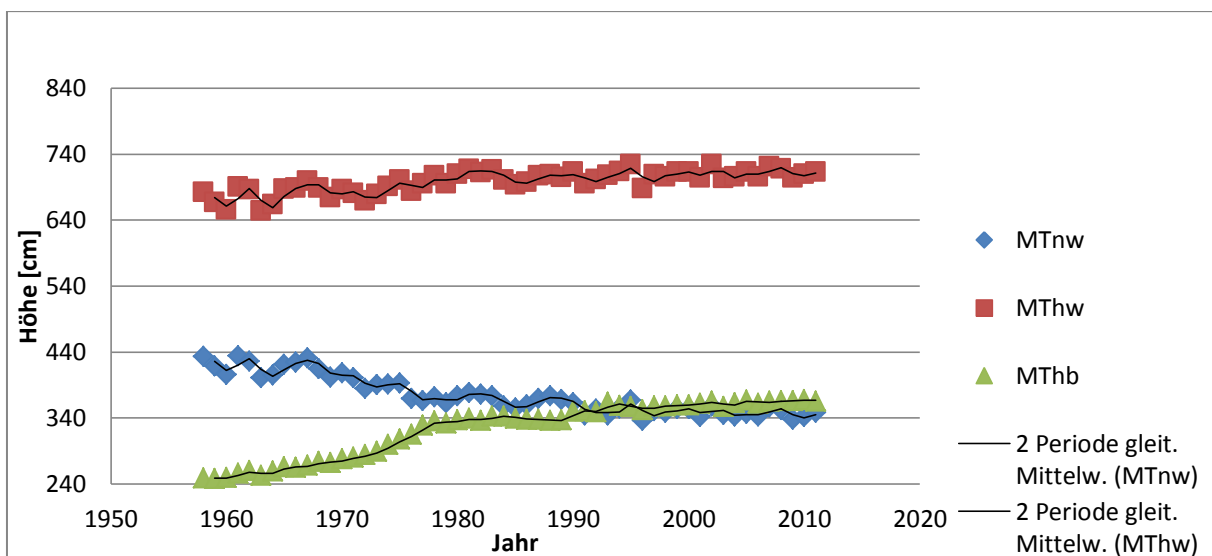


Abbildung 85: Mittlere Tidewasserstände und mittlerer Tidehub am Pegel Hamburg St. Pauli in den Jahren 1958-2011

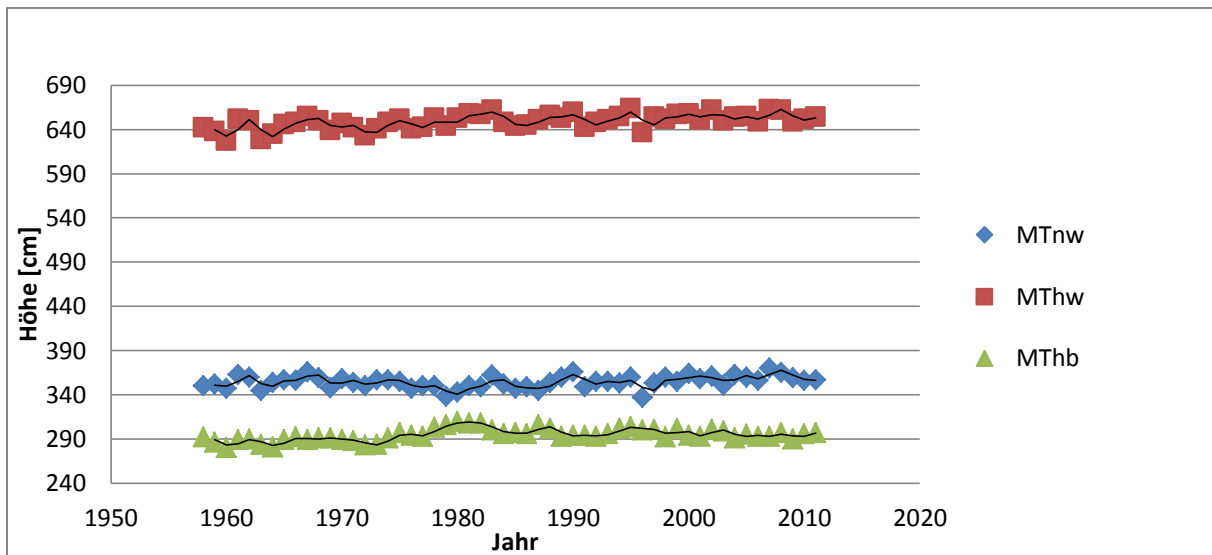


Abbildung 86: Mittlere Tidewasserstände und mittlerer Tidehub am Pegel Cuxhaven in den Jahren 1958-2011

Der Pegel Cuxhaven erfährt in dem Zeitraum fast keine Veränderungen, am Pegel St. Pauli hingegen sind die Veränderungen wie erwartet besonders ausgeprägt.

Die in den nachfolgenden Abbildungen dargestellten Unterschiede der mittleren Tidehochwasser zwischen den 10-Jahreswerten `58/68 und `01/11 an ausgewählten Pegeln lassen Rückschlüsse der Wirkungen auf die Strömungsgeschwindigkeiten in den Abschnitten zwischen den Pegeln sowie deren Entwicklungen zu. Ein steiler Verlauf der Linie zwischen zwei Pegeln lässt auf ein hohes Energiegefälle und somit auf entsprechend höhere Strömungsgeschwindigkeiten schließen. In der vereinfachten Darstellung in Abbildung 87 ist die Entwicklung der mittleren Tidehochwasser an den ausgewählten Pegeln dargestellt.

Deutlich zeigt sich ein Anstieg des mittleren Tidehochwassers. Die Form der Kurve verändert sich jedoch nur geringfügig. Für einen wirklichkeitsnahen Vergleich zur Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeit wäre das Erstellen eines Tidewellenlinienprofils angebracht, was aufgrund der aufwendigen Aufbereitung der notwendigen Daten in dieser Arbeit leider nichtmöglich ist. Beispielhafte ist in Abbildung 89 ein anderes Tidewellenprofil dargestellt.

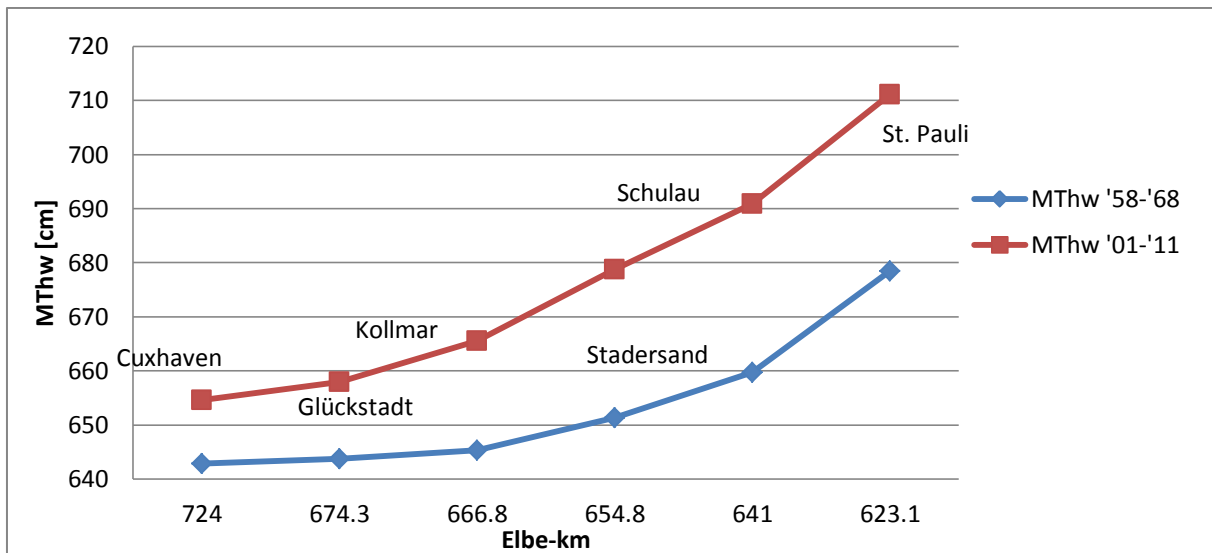


Abbildung 87: Vergleich der Entwicklung des mittleren Tidehochwassers (MThw) an ausgewählten Pegeln während der 10-Jahresperioden von 1958 bis 1968 von 2001 bis 2011

Im Unterschied zur Entwicklung der mittleren Tidehochwasser, wo es quasi zu einer parallelen Verschiebung der Kurve kommt, weist die Darstellung der Entwicklung der mittleren Tideniedrigwasser auf erheblich größere Veränderungen hin (Abb. 88). Beim 10-Jahreswert der Periode 2001/2011 treten flussaufwärts deutlich abnehmende mittlere Tideniedrigwasserstände auf. Beim Verlauf der 10-Jahreswerte im Zeitraum 1958/1968 steigen sie hingegen an. Ab dem Pegel Glückstadt tritt in dieser Phase eine Erhöhung der Ebbestromgeschwindigkeiten ein.

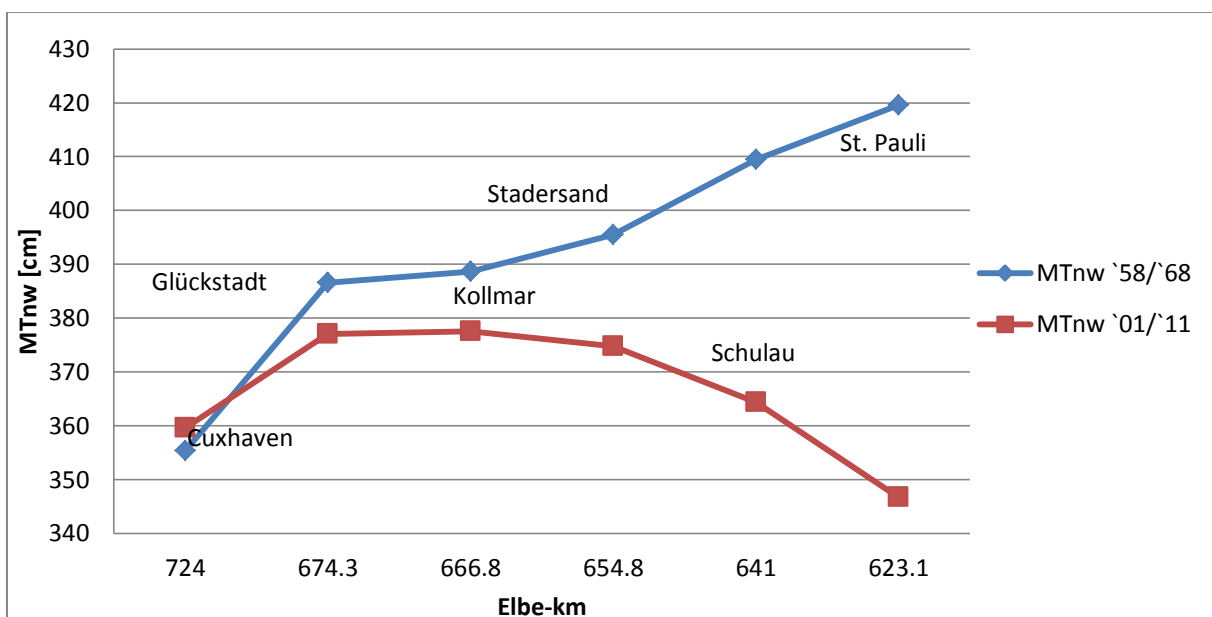


Abbildung 88: Vergleich der Entwicklungen des mittleren Tideniedrigwassers (MTnw) an ausgewählten Pegeln während der 10-Jahresperioden von 1958 bis 1968 und von 2001 bis 2011

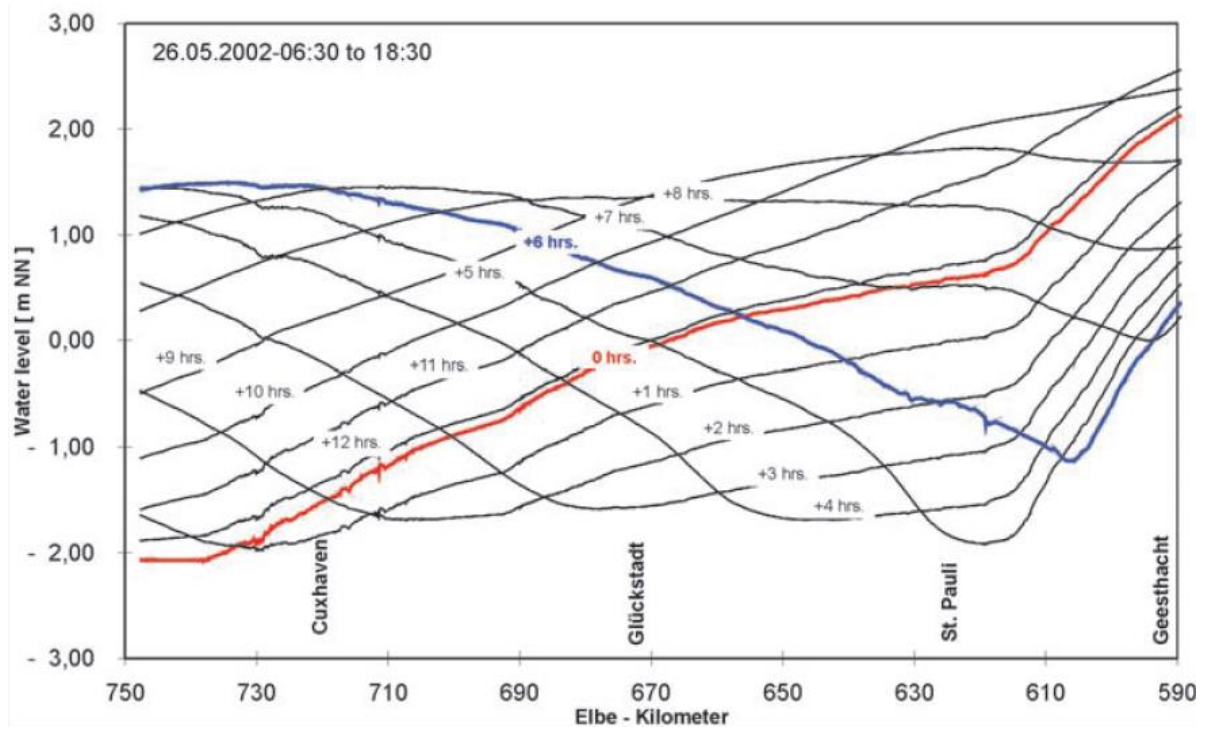


Abbildung 89: Verlauf der Tidewellenlinie entlang des Elbeästuars im einstündigen Abstand bei Springtide (Abbildung dient der Demonstration)

[Quelle: Boehlich, 2003]

6.1 Morphologische Entwicklungen und ihr Einfluss auf die Strömungsverhältnisse in der Unterelbe seit 1960

Baumaßnahmen an der Tideelbe im Beobachtungszeitraum und deren Auswirkungen auf die Morphologie, ihren morphologischen Nachlauf sowie die Einflüsse auf die Tidekennwertestehen in diesem Kapitel im Vordergrund. Neben Tabelle 1 aus Kapitel 2.2 dienen die Daten aus der Baumaßnahmendatenbank der WSV-Nord [6] als Quelle der Ausführungen.

Vor allem seit der Sturmflut im Februar 1962 wurden an der Tideelbe verstärkt Baumaßnahmen durchgeführt. So wurden „[...] an den Nebenflüssen Sperrwerke und die neuen höheren Deiche auf einer verkürzten und begradigten Deichlinie näher am Strom gebaut. Der Überflutungsraum wurde damit um mehr als die Hälfte reduziert. Er beträgt heute in der Größenordnung [nur] rund 2% des ursprünglichen, bis an die Geest reichenden Überflutungsraumes“ (HPA, 2007).

Bei der Fahrrinnenanpassung für den Schiffsverkehr wurden mit steigenden technischen Möglichkeiten in Baggerwesen und der zunehmenden Tiefe der die Elbe befahrenden Schiffe immer größere Eingriffe möglich und nötig. „Die Entwicklung der Dampfbagger im 19. Jahrhundert ermöglichte den Ausbau der Tideelbe als Wasserstraße. Es folgten Fahrrinnenausbauten der 30er [...] [und] 50er Jahren [...] in einzelnen Schritten bis zu 13,5 m im Jahre 1978. Der Strombau verfolgte dabei das Ziel der Stärkung und Bündelung der Tideströmung, um durch die Räumkraft eine Verringerung der notwendigen Baggerungen zu erreichen. Das Baggergut wurde vollständig entnommen und auf die Sandbänke aufgebracht. Diese wurden zu Inseln aufgespült und als Leitinseln gestaltet, um die Strömung zu bündeln. Bis 1986 wurde auch das Unterhaltungsbaggergut vollständig auf den Inseln aufgespült. [...] Durch Verfüllung ungenutzter Hafenbecken wurden neue Flächen geschaffen (Hafenerweiterung nach innen). Diese Reduzierung der Wasserflächen wirkte neben den anderen beschriebenen Maßnahmen erhöhend auf den Tidehub“ (HPA, 2007).

Die Verkleinerung des Vorlandes und damit des Flutraumes lassen die Tidewelle höher auflaufen. Auf Grund des gestiegenen Tidehubs werden im Verlauf einer Tide

mehr Wassermengen auf und ab bewegt. Durch die Vertiefung der Fahrrinne läuft die Tidewelle mit größerer Geschwindigkeit in das Ästuar.

Tabelle 32: Baumaßnahmen in der Unterelbe und ihre Auswirkungen ab 1962

Maßnahme	Zeitraum	Auswirkungen
Absperrung Alte Süderelbe, neue Deichlinie Harburg bis Este	1962 - 1967	1), 2),*
Absperrung Billwerder Bucht mit Kanälen	1963 - 1969	1), 2),
Bau des Wedeler Yachthafens	1962-1963	3)
Vordeichungen Geesthacht bis Billwerder Bucht	1963 - 1973	1), 2),
Deichbau Cranz	1964-1966	1), 2),
Fahrwasservertiefung auf 12 mKN	1964 - 1969	2), 4)
Aufspülung Leitdamm Elbinseln Hanskalbsand-Nesssand	1967-1968	1), 2),
Absperrung der Lühe	1967	1), 2)
Absperrung der Oste	1968	1), 2)
Vorlandaufspülung Hetlinger Schanze	1968	2)
Elbinseln Hanskalbsand-Nesssand, Schließung Durchgang Schlatermundsallee	1968	1), 2)
Absperrung Pinnau und Krückau, Eindeichung des Vorlandes	1969	1), 2)
Eindeichung Hahnhöfer Sand und vor Schwinge-, Pinnau-, Krückaumündungen	1969 - 1974	1), 2)
Bau des Pionierübungsplatzes „Pionierinsel“ Bau und Uferausbau	1970-1973	1), 2), 4)
Aufspülung Elbinsel Schwarztonnensand	1974-1977	1), 2), 4)
Absperrung Schwinge, Eindeichung Bützflether Sand	1971	1), 2)
Eindeichung Nordkehdingen	1971 - 1976	1), 2)
Eindeichung Hahnöfer Sand, Absperrung Borstler Binnenelbe	1973 - 1974	1), 2), 4)
Deichbau Twielenfleth	1974-1975	1), 2), 4)
Fahrwasservertiefung auf 13,5 mKN	1974 - 1978	2), 4)
Absperrung der Stör	1975	1), 2), 4)
Aufspülung Vorland Giesensand, Vorlandaufspülung	1976	1), 2), 4)
Verbreiterung der Fahrrinnenkurve vor der Lühe	1968,1976 und 1999	3)
Verbreiterung der Fahrrinnenkurve vor Stadersand	1969,1977 und 1999	3)
Eindeichung Haseldorfer Marsch	1975 - 1977	1), 2), 4)
Aufspülung Elbinsel Hanskalbsand-Nesssand	1976-1977	1), 2), 4)
Eindeichung Krautsand	1977	1), 4)

Maßnahme	Zeitraum	Auswirkungen
Aufspülung Elbinsel Pagensand	1978-1983	1), 2), 4)
Uferverspülung Siebenhöfen	1984	1), 2), 4)
Fahrwasservertiefung auf 14,5 mKN	1998 - 2000	2), 4)
Twielenfleth, Bau von Unterwasserdämmen zur Baggergutaufnahme	1998	4)
Krautsand, Bau von Unterwasserdämmen zur Baggergutaufnahme	1998	4)
Leitwerk Twielenfleth, Ausbau und Ablagerungsfläche	1999	1), 2), 4)
Leitwerk Krautsand, Aufspülung und Bau der Ablagerungsfläche	1999	1), 2), 4)
Maßnahmen im Hamburger Hafen, wie Teilverfüllung Mühlenberger Loch, Aufweitung Süderelbe, Hafenumstrukturierung	2001 - 2002	1), 2), 4)

[Quellen: BfG/WSV]

* Legende zu den Nummern in der Spalte zu den Auswirkungen

- 1) Verringerung des Retentionsraumes
 - a. Höhere Strömungsgeschwindigkeiten
 - b. Größerer Tidenhub

- 2) Erhöhte Reflektion der Tidewelle
 - a. Größerer Tidenhub
 - b. Veränderung der Tidedauer

- 3) Weitung des Querschnittes
 - a. Geringerer Tidenhub
 - b. Verringerung Strömungsgeschwindigkeit

- 4) Verengung des Querschnittes
 - a. Höhere Strömungsgeschwindigkeiten
 - b. Größerer Tidenhub

In der Liste der Baumaßnahmen ist zu erkennen, dass der Großteil der Eingriffe in den Jahren zwischen 1960 und 1980 erfolgte. All diese Maßnahmen sowie ihr morphologischer Nachlauf haben direkten Einfluss auf das Strömungsregime des Beobachtungsabschnittes.

6.2 Beschreibung und Auswertung der Maßnahmen an den ausgewählten Messquerschnitten

In den Abbildungen 90 bis 97 zeigen die morphologischen Veränderungen an den betrachteten Flussabschnitten zwischen 1950 und 2005. Zusammen mit den in der Tabelle 32 in Kapitel 6.1 aufgelisteten Baumaßnahmen sollen die folgenden Abbildungen zu einer abschließenden Betrachtung der Zusammenhänge zwischen Baumaßnahmen und der Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeiten an der Beobachtungsstrecke dienen. Besonderes Augenmerk liegt daher auf den morphologischen Entwicklungen im Umfeld der Quermessprofile Q1 bis Q4.

Zur Abschätzung der Eingriffstiefen an den vier Messprofilen dienen Modellrechnungen der BAW, die Schätzwerte für die Wirkungen der Baumaßnahmen auf die Tidenströme im Bereich der Messprofile beinhalten und sind zunächst in der nachfolgenden Tabelle 33 zusammengestellt. Diese weichen erwartungsgemäß von den ermittelten Werten aus den Messdaten ab, da (insbesondere ältere) Mess- und Rechenwerte, wie bereits weiter vorne in dieser Arbeit diskutiert, mit einigen Unsicherheiten behaftet sind. Auch konnten die genauen BAW-Modellpunkte bzw. -profile, die den Darstellungen zu Grunde liegen, für diese Arbeit aufgrund der Komplexität der Modellrechnung nicht mehr ermittelt werden, und das Ablesen aus der Darstellung der BAW-Modellrechnung sollte hier ebenfalls als Unsicherheitsfaktor genannt werden.

Tabelle 33: Veränderungen der Strömungsgeschwindigkeiten, abgeschätzt aus Modellrechnung der BAW (Abb. 49 + 50)

Station	Q1 (Km 643,0)	Q2 (Km 651,1)	Q3 (Km 664,7)	Q4 (Km 676,5)
Veränderung Flutstromgeschw. 1970 bis 2002 [m/s]	-0,04	0,14	0,18	0,11
Veränderung Ebbstromgeschw. 1970 bis 2002 [m/s]	-0,08	0,08	0,19	0,18

6.2.1 Messquerschnitt Q1 im Bereich Hanskalbsand

Auf den in Abbildung 90 und Abbildung 91 dargestellten Kartenausschnitten ist die Veränderung der Morphologie im Bereich Hanskalbsand (Elbe-km 634-650) zu erkennen. In Grün sind die Wattflächen, in Gelb das Vorland, in Blau sind die Wasserflächen markiert. Die durchgehende Nummerierung stellt die entsprechende Flusskilometrierung dar.

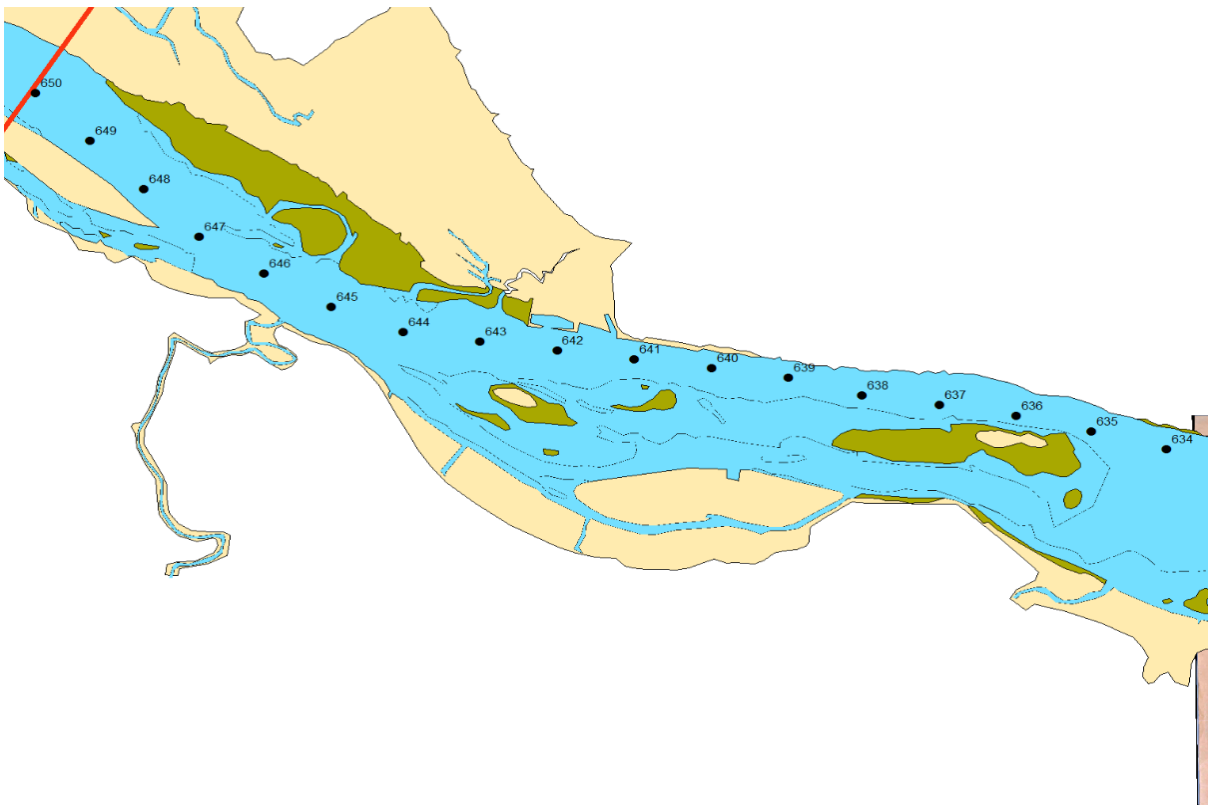


Abbildung 90: Morphologie der Elbe im Bereich Hanskalbsand im Jahr 1950

[Quelle: Qrefa-Sander, 2012]

Im Bereich Wedel ist der Messquerschnitt Q1 (Elbe-km 643) besonders stark morphologischen Veränderungen durch Baumaßnahmen unterworfen. Deutlich zu erkennen ist der Rückgang des Vorlandes durch die Deichvorverlegung am gesamten Flussabschnitt. Eine weitere große Veränderung geht auf die Aufspülung der Elbinseln Hanskalbsand und Nesssand zwischen Elbe-km 635 und 644 zurück. Die Elbinseln fungieren zudem als Leitbauwerk für die Ebbeströmung. Auch der Ausbau der Fahrrinne, der Bau des Yachthafens in Wedel und das Errichten des

Este-Sperrwerkes haben die Strömungsgeschwindigkeiten an diesem Flussabschnitt verstärkt.

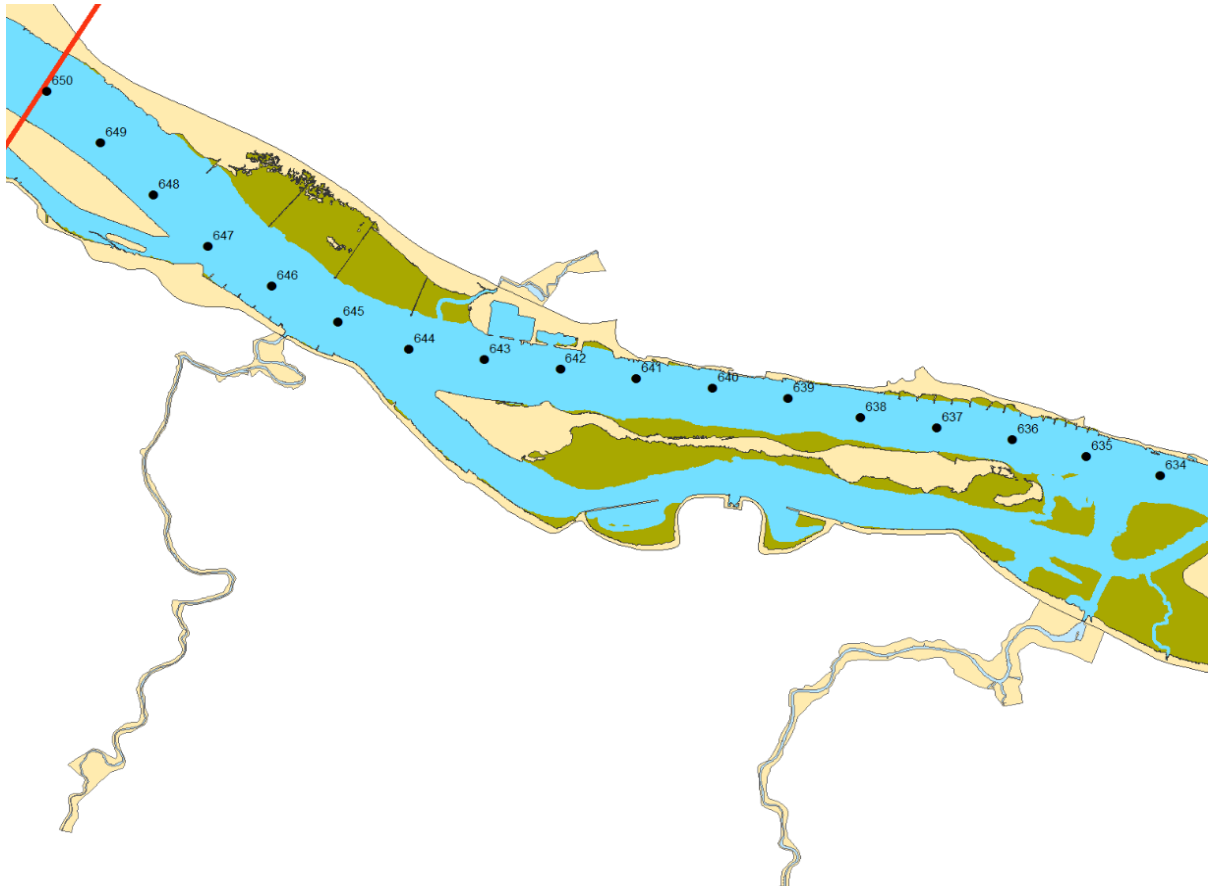


Abbildung 91: Morphologie der Elbe im Bereich Hanskalbsand im Jahr 2005

[Quelle: Qrefa-Sander, 2012]

Auf den Karten gut zu erkennen ist auch die Verbreiterung der Fahrrinne. Insgesamt zeigt die Baumaßnahmendatenbank 74 Einträge für diesen Abschnitt zwischen 1950 und 2005 [6].

Das Einengen der Elbe durch die Aufspülung der Elbinseln Hanskalbsand und Nesssand und Wegfall des Vorlandes sowie die Vertiefung der Fahrrinne lassen den in Kapitel 5.1 festgestellten Anstieg der Strömungsgeschwindigkeiten an diesem Flussabschnitt logisch erscheinen. Hinzu kommen die in diesem Kapitel diskutierten grundlegenden großräumigen Entwicklungen in ihrer Gesamtwirkung. In der nachfolgenden Tabelle 34 sind noch einmal alle Veränderungen der wichtigen Tidekennwerte aufgeführt. Tendenziell zeigen die ADCP-Messungen gegenüber den

Werten von 1966 eine leichte Stärkung des Flutstroms gegenüber dem Ebbestrom, die sich im Vergleich 1966 – 2011 (2011er-Werte bezogen auf Fahrrinnenmitte) nicht wiederfindet. Dies könnte darin begründet sein, dass sich der Ebbestrom, anders als der Flutstrom, nicht nur durch die Vertiefungen, sondern auch durch die Aufspülmaßnahmen, sehr viel stärker als in der Vergangenheit auf die Fahrrinne konzentriert.

Tabelle 34: Entwicklung der Tidekennwerte am Querprofil Q1; direkter Vergleich der Jahre 1966 und 20'11

	V_fm [m/s]	V_em [m/s]	T_e [min]	T_f [min]	MTnw [cm]	MThw [cm]	MThb [cm]
1966 ¹⁾	0.59	0.65	426.00	320.00	390	645	255
2011 ²⁾	0.70	0.85	409.00	337.00	374	660	286
ADCP 2006/2011 ³⁾	0,63	0,65	-	-	-	-	-
Entwicklung	0,04 - 0.11	0,00 - 0.20	-17	17	-16	15	31
BAW 1970/2002 ⁴⁾ auf Elbe-km 643,0	-0,08	-0,06	-	-	-	-	-
BAW 1970/2002 ⁴⁾ auf Abschnitt km 640 - 650	0,05	Indifferent: 0,00					

¹⁾ mittlere Geschwindigkeit über unbekanntes Gesamtprofil (vgl. Kapitel 5.1)

²⁾ mittlere Geschwindigkeit Dauermessstation, z. T. mit Korrekturfaktor auf Fahrrinnenmitte umgerechnet (vgl. Kapitel 5.1)

³⁾ mittlere Geschwindigkeit über alle ADCP-Messungen 2006 – 2011 über gesamtes Messprofil (vgl. Kapitel 4.1.2.1)

⁴⁾ Entwicklung in Fahrrinnenmitte aus BAW- Modellrechnung (abgeschätzt aus Abbildung 49 und Abbildung 50 in Kapitel 4.2)

Grundsätzlich ist zum 1966er-Wert zu bemerken, dass die älteren Messwerte profilbezogen ermittelt wurden, während der 2011er-Wert – dies gilt auch für die Betrachtung der weiteren Profile Q2 bis Q4 – auf Fahrrinnenmitte bezogen ist (vgl. Fußnoten Tabelle 34). Entsprechend liegen auch die „BAW-Entwicklungen“ hier näher an den Differenzen der Daten von 1966 zu denen der ADCP-Messungen 2006/2011.

6.2.2 Messquerschnitt Q2 im Bereich Lühesand

Die Veränderungen in der Morphologie am Flussabschnitt des Bereiches Lühesand (Elbe-km 641-567), auf Abbildung 92 und Abbildung 93, sind auf Grund der räumlichen Überlagerung der betrachteten Flussabschnitte zum Teil dieselben wie auf dem vorhergehenden Kartenausschnitt. Die Entwicklung der Daten am Messquerschnitt Q2 (Elbe-km 651,1) sind der allgemeinen Veränderung des Flussabschnittes unterworfen. Beim Vergleich der beiden Abbildungen fällt vor allem eine Verringerung des Vorlandes durch die Deichvorverlegung auf. Die im Kapitel 6.1 erwähnte Aufspülung der Elbinseln, aber auch das Eindeichen der Haseldorfer Nebeneibe (auf Höhe Elbe-km 653), der Bau des Lühe- (Elbe-km 645,5) und des Pinnau-Sperrwerkes (Elbe-km 656,3) wirken sich, neben der Vertiefung der Fahrrinne, besonders stark auf die Tidewelle aus. Auf den Abbildungen ebenfalls gut zu erkennen ist die Verlagerung und Verbreiterung der Fahrwasserkurve vor der Lühe (Elbe-km 646). Insgesamt sind für diesen Abschnitt 80 Baumaßnahmen über den Zeitraum von 1950 bis 2005 verzeichnet. [6]

Tabelle 35: Entwicklung der Tidekennwerte am Querprofil Q2; direkter Vergleich der Jahre 1961 und 20'11

	V_fm [m/s]	V_em [m/s]	T_e [min]	T_f [min]	MTnw [cm]	MThw [cm]	MThb [cm]
1961 ¹⁾	0,66	0,54	427,00	318,00	399	655	256
2011 ²⁾	0,78	0,56	415,00	330,00	375	669	294
ADCP 2006/2011 ³⁾	0,72	0,70	-	-	-	-	-
Entwicklung	0,06 - 0,12	0,02 - 0,16	-12	12	-24	14	38
BAW 1970/2002 ⁴⁾ auf Elbe-km 651,1	0,14	0,08	-	-	-	-	-
BAW 1970/2002 ⁴⁾ auf Abschnitt km 650 - 660	0,13	0,16					

¹⁾ mittlere Geschwindigkeit über unbekanntes Gesamtprofil (vgl. Kapitel 5.2)

²⁾ mittlere Geschwindigkeit Dauermessstation, mit Korrekturfaktor auf Fahrrinnenmitte umgerechnet (vgl. Kapitel 5.2 Lühesand-Ost (Elbe-km 651,1))

³⁾ mittlere Geschwindigkeit über alle ADCP-Messungen 2006 – 2011 über gesamtes Messprofil (vgl. Kapitel 4.1.2.2)

⁴⁾ Entwicklung in Fahrrinnenmitte aus BAW- Modellrechnung (abgeschätzt aus Abbildung 49 und Abbildung 50 in Kapitel 4.2)

Da die Elbe über den Beobachtungszeitraum auf Höhe des Messquerschnittes Q2 nicht wesentlich in ihrer Breite, sondern vor allem in der Tiefe des Fahrwassers verändert wurde, sind die im Kapitel 5.2 festgestellten Veränderungen plausibel.

Im Vergleich mit den aus der Darstellung der BAW-Modellrechnung abgeschätzten Werten für den Elbe-km 651,1 unterscheiden sich die ermittelten Werte geringfügig. Die stark gestiegenen Werte für die Ebbestromgeschwindigkeit an diesem Messprofil sind in den abschnittsgemittelten Werten der BAW-Modellrechnung wiederzufinden.

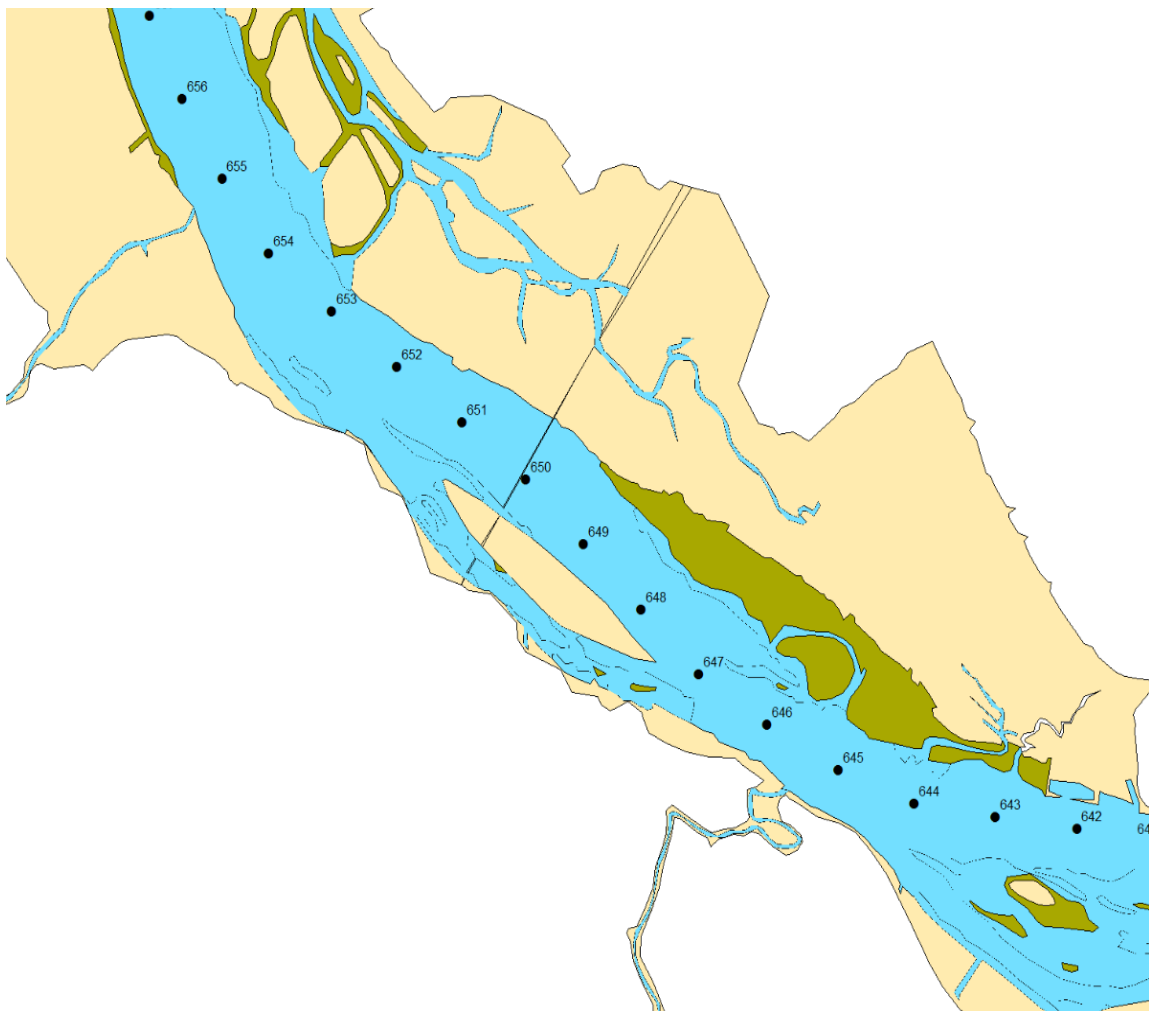


Abbildung 92: Morphologie der Elbe im Bereich Lühesand im Jahr 1950

[Quelle: Qrefa-Sander, 2012]

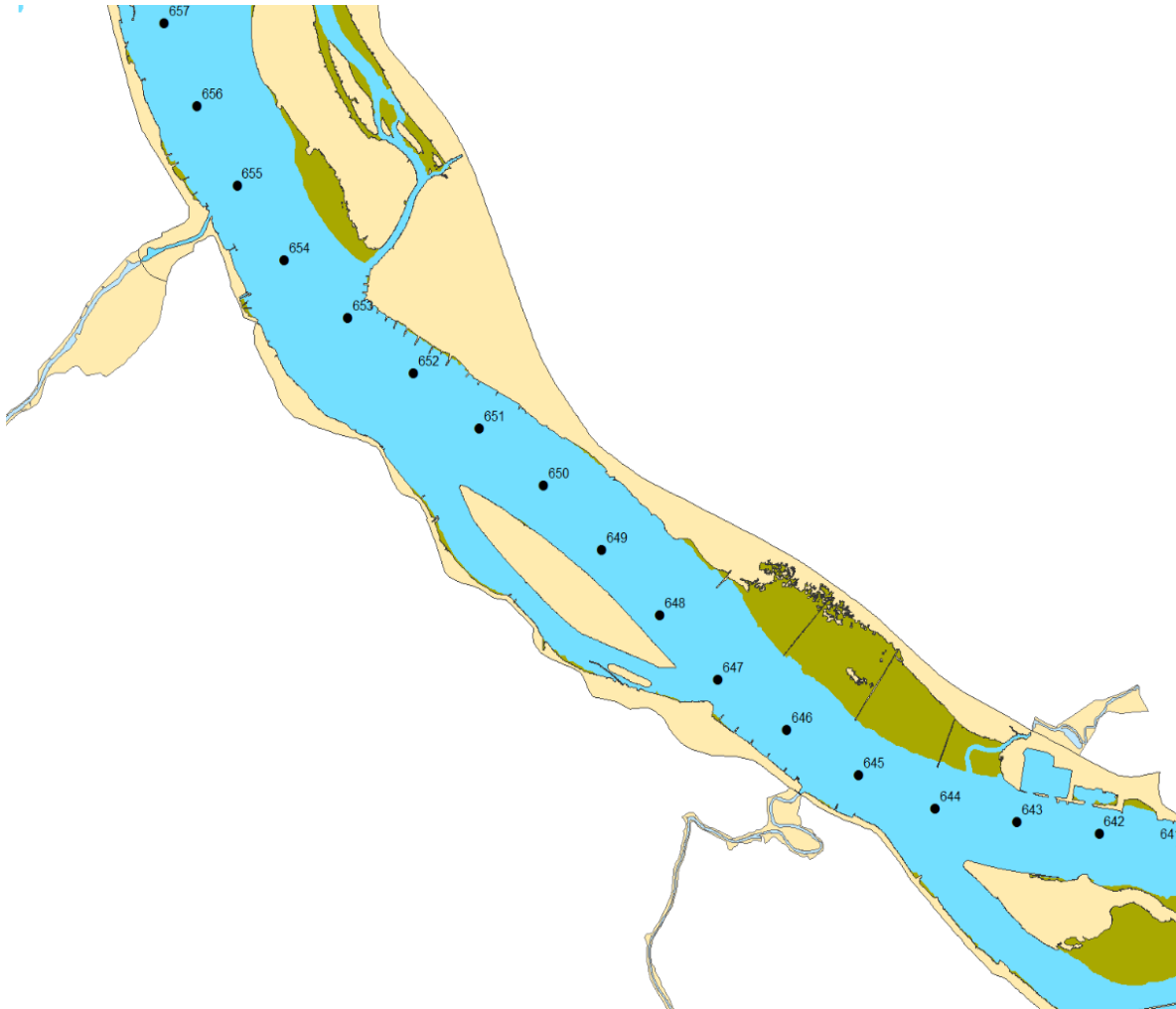


Abbildung 93: Morphologie der Elbe im Bereich Lühesand im Jahr 2005

[Quelle: Qrefa-Sander, 2012]

6.2.3 Messquerschnitt Q3 im Bereich Pagensand

Die Veränderungen der Morphologie im Bereich Pagensand (Elbe-km 655 bis 667) werden in den Abbildung 94 und Abbildung 95 deutlich. Das Messprofil Q3 liegt auf Höhe des Elbe-km 664,7. Dieser Bereich wurde vor allem durch die Aufspülungen der Elbinseln Pagensand (Elbe-km 659 bis 664) und Schwarztonnensand (Elbe-km 663 bis 667) geprägt. Auch die, durch die Eindämmung der Haseldorfer Nebelbe, vergrößerte Elbinsel Bishorster Sand (Elbe-km 655 bis 658) sowie die Verbreiterung und Vertiefung der Fahrinne haben Einfluss auf die Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeiten

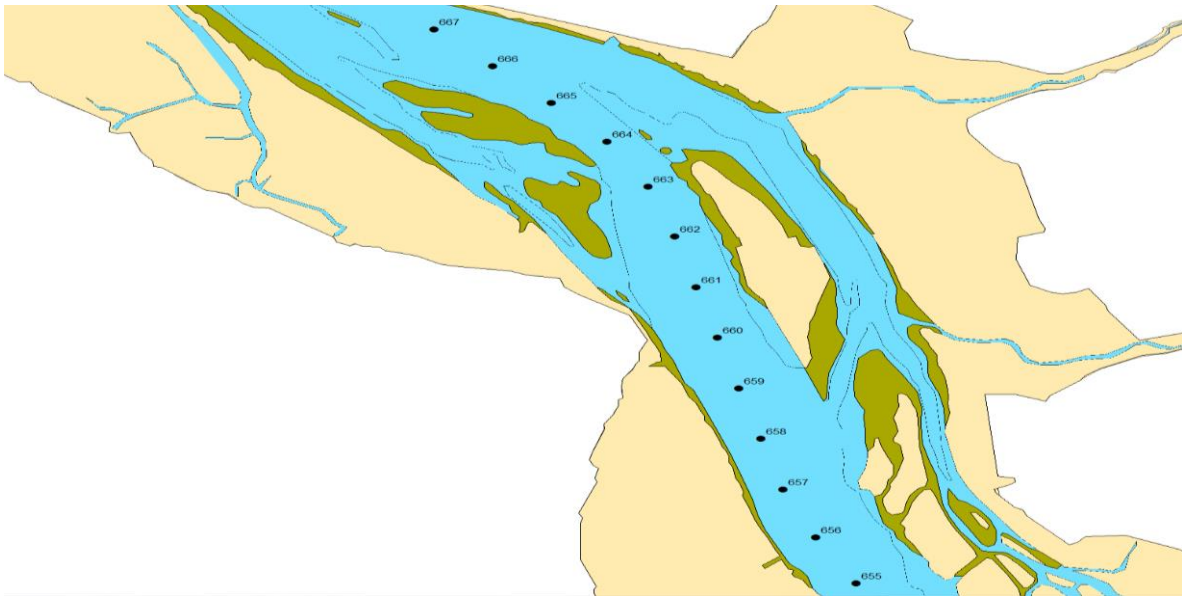


Abbildung 94: Morphologie der Elbe im Bereich Pagensand im Jahr 1950

[Quelle: Qrefa-Sander, 2012]

Die Fahrrinne wurde vor der Elbinsel Pagensand (um Elbe-km 658) nach links verlegt und hat zusammen mit dem Ausbau des Leitdammes der Elbinsel die bestehende Prallhangsituation um Elbe-km 665 verstärkt. Auch der, durch die Deichvorverlegung bedingte Rückgang des Vorlandes ist zu berücksichtigen. Insgesamt sind in der Baumaßnahmendatenbank der WSD Nord 53 Maßnahmen für die Zeit zwischen 1950 und 2005 für diesen Abschnitt verzeichnet. [6]

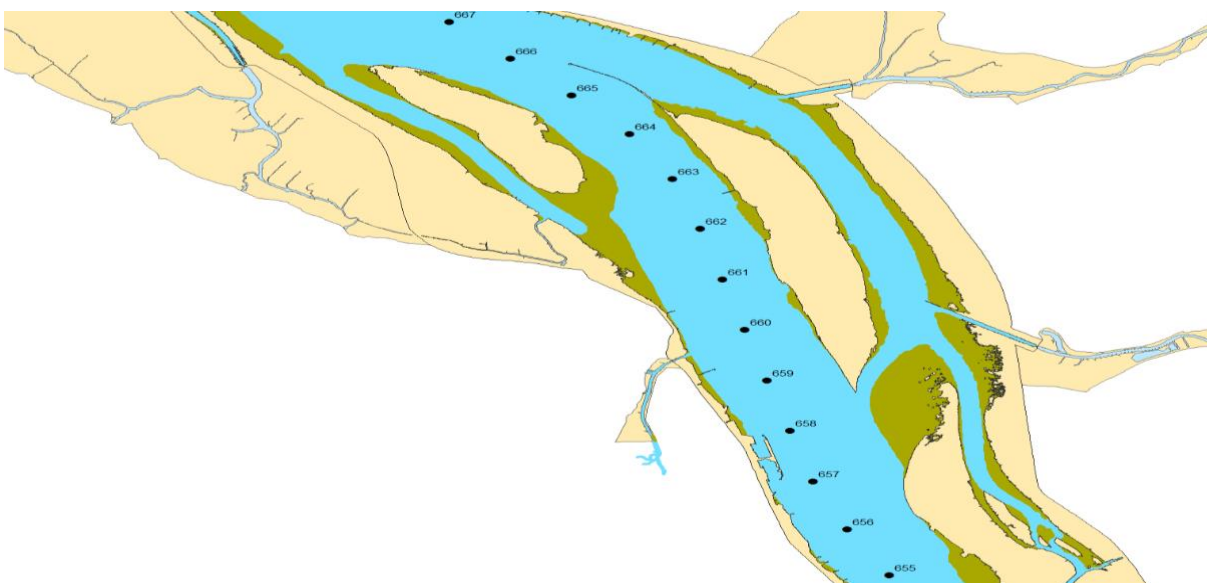


Abbildung 95: Morphologie der Elbe im Bereich Pagensand im Jahr 2005

[Quelle: Qrefa-Sander, 2012]

Die in Kapitel 5.3 ermittelten Veränderungen der Strömungsgeschwindigkeiten lassen sich durch die aufgeführten Maßnahmen erklären. Vor allem die Einengung des Abflussquerschnittes durch den Inselbau und die Eindeichungen des Haupt- und der Nebenströme sind, neben der Fahrrinnenanpassung, Ursache für die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten.

Die in Tabelle 36 zusammengefassten Entwicklungen der Tidekennwerte sind deutlich verschieden zu den aus den Darstellungen der BAW-Modellrechnung ermittelten „Entwicklungswerten“ der Flutstromgeschwindigkeit. Die gemessenen Werte zeigen einen Abfall der Flutstromgeschwindigkeit, wo hingegen in der Modellrechnung ein Anstieg an diesem Profil prognostiziert wird. Hier wird nochmals deutlich darauf hingewiesen (vgl. Fußnoten der Tabelle 36), dass der 1965er-Wert als profilbezogen zu betrachten ist. Es ist nicht genau bekannt, auf welchen Messpositionen im Profil hier in der Vergangenheit verstärkt gemessen wurde (vgl. auch entsprechende Diskussion in Kapitel 5.3). Die Verkürzung des Messprofils zwischen den historischen Daten und den Daten ab 1999 wird ebenfalls Einfluss auf die Ergebnisse dieses Vergleiches haben.

Tabelle 36: Entwicklung der Tidekennwerte am Querprofil Q3; direkter Vergleich der Jahre 1965 und 20'11

	V_fm [m/s]	V_em [m/s]	T_e [min]	T_f [min]	MTnw [cm]	MThw [cm]	MThb [cm]
1965 ¹⁾	0,82	0,59	427,00	318,00	398	658	260
2011 ²⁾	0,78	0,84	419,00	327,00	373	682	309
ADCP 2006/2011 ³⁾	0,71	0,72	-	-	-	-	-
Entwicklung	-0,04 - -0,11	0,13 - 0,25	-8	9	-25	24	49
BAW 1970/2002 ⁴⁾ auf Elbe-km 664,7	0,18	0,19	-	-	-	-	-
BAW 1970/2002 ⁴⁾ auf Abschnitt km 660 - 670	0,21	0,23					

¹⁾ mittlere Geschwindigkeit über unbekanntes Gesamtprofil (vgl. Kapitel 5.3)

²⁾ mittlere Geschwindigkeit Dauermessstation, z. T. mit Korrekturfaktor auf Fahrrinnenmitte umgerechnet (vgl. Kapitel 5.3)

³⁾ mittlere Geschwindigkeit über alle ADCP-Messungen 2006 – 2011 über gesamtes Messprofil (vgl. Kapitel 4.1.2.3)

⁴⁾ Entwicklung in Fahrrinnenmitte aus BAW- Modellrechnung (abgeschätzt aus Abbildung 49 und Abbildung 50 in Kapitel 4.2)

6.2.4 Messquerschnitt Q4 im Bereich Rhinplate

Die Veränderungen am Messquerschnitt Q4 (Elbe-km 676,5) im Bereich Rhinplate werden in den Abbildung 96 und Abbildung 97 deutlich. Entscheidend sind neben der Aufspülung der Elbinsel Rhinplate (Elbe-km 672 bis 677) und der Errichtung ihrer Leitdämme auch Uferaufspülungen im Bereich Glückstadt für die beobachteten Veränderungen verantwortlich. Die neugewonnene Wattfläche Wischhafener Watt (Elbe-km 664 bis 682) und die Verringerung des Vorlandes durch die Deichvorverlegung spielen eine weitere Rolle bei der Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeiten in diesem Bereich. Auch der Bau des Sperrwerkes an der Stör und die damit verbundenen Aufspülungen im Uferbereich (Elbe-km 679) sind als Einflussfaktoren zu erwähnen. Es wurden auch Strombaumaßnahmen an der Sohle der Fahrinne, z.B. durch Verbreiterung, Vertiefung und teilweise Verlegung zu Veränderungen geführt. Auch das Schaffen von Leitwerken zur Baggergutaufnahme und den dazugehörigen Unterwasserablagerungsflächen werden Einfluss auf das Tideverhalten haben.

Insgesamt sind 50 Maßnahmen in der Baumaßnahmendatenbank für diesen Abschnitt verzeichnet [6].

Die Entwicklung der Flutstromgeschwindigkeit am Messprofil fällt höher aus als die aus den Modelldaten ermittelten Differenzen es vermuten ließen. Sie bewegt sich jedoch innerhalb des für den Flussabschnitt km 670 – 680 prognostizierten Wertebereiches und es wird wiederum darauf hingewiesen, dass die 1960er-Werte profilbezogen und die 2011er-Werte auf die Fahrinnenmitte bezogen sind (vgl. Fußnoten Tabelle 37). Ein deutlich höherer Anstieg ist bei der Ebbestromgeschwindigkeit zu vermerken. Grundsätzlich sind jedoch alle Werte, wie auch bereits in den vorhergehenden Abschnitten plausibel.

Tabelle 37: Entwicklung der Tidekennwerte am Querprofil Q4; direkter Vergleich der Jahre 1960 und 20'11

	V_fm [m/s]	V_em [m/s]	T_e [min]	T_f [min]	MTnw [cm]	MThw [cm]	MThb [cm]
1960 ¹⁾	0,70	0,72	428.00	317.00	398	640	242
2011 ²⁾	0,88	1,21	425.00	320.00	364	695	331
ADCP 2006/2011 ³⁾	0,70	0,75	-	-	-	-	-
Entwicklung	0,00 – 0,18	0,03 – 0,49	-3	3	-34	55	89
BAW 1970/2002 ⁴⁾ auf Elbe-km 676,5	0,11	0,18	-	-	-	-	-
BAW 1970/2002 ⁴⁾ auf Abschnitt km 670 - 680	0,21	0,26					

- 1) mittlere Geschwindigkeit über unbekanntes Gesamtprofil (vgl. Kapitel 5.4)
- 2) mittlere Geschwindigkeit Dauermessstation, z. T. mit Korrekturfaktor auf Fahrrinnenmitte umgerechnet (vgl. Kapitel 5.4)
- 3) mittlere Geschwindigkeit über alle ADCP-Messungen 2006 – 2011 über gesamtes Messprofil (vgl. Kapitel 4.1.2.4)
- 4) Entwicklung in Fahrrinnenmitte aus BAW- Modellrechnung (abgeschätzt aus Abbildung 49 und Abbildung 50 in Kapitel 4.2)

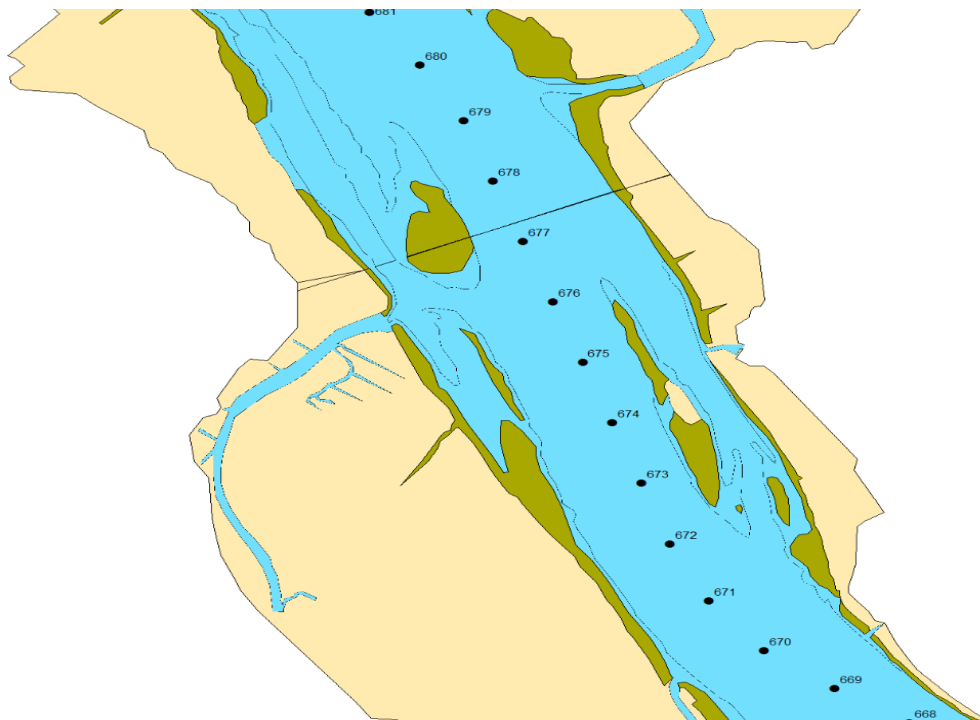


Abbildung 96: Morphologie der Elbe im Bereich Rhinplate im Jahr 1950

[Quelle: Qrefa-Sander, 2012]

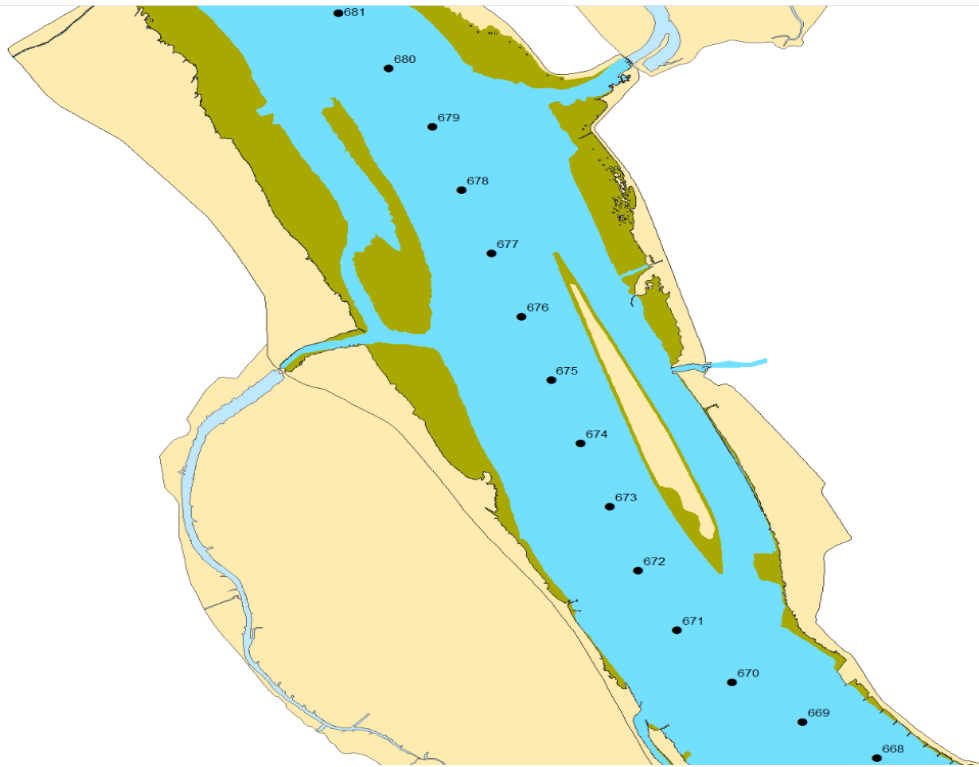


Abbildung 97: Morphologie der Elbe im Bereich Rhinplate im Jahr 2005

[Quelle: Qrefa-Sander, 2012]

7 Auswirkungen des globalen Wandels - Prognosen zur zukünftigen Entwicklung der Strömungsverhältnisse

Aus den vorherigen Kapiteln kann festgehalten werden, dass in den betrachteten Messprofilen der Tideelbe über die letzten 50 Jahre für den Fahrinnenbereich erhebliche Geschwindigkeitszunahmen gemessen wurden. Dies bestätigen auch BAW-Modellrechnungen - insbesondere für den Stromabschnitt zwischen Stör- und Lühebogen – und die zugrunde liegenden Ursachen wurden in Kapitel 6 umfassend diskutiert. Abschließend soll nun noch eine kurze Betrachtung dahingehend erfolgen, welche Auswirkungen sich aufgrund des globalen Klimawandels auf die Strömungsgeschwindigkeiten in der Tideelbe voraussichtlich ergeben werden.

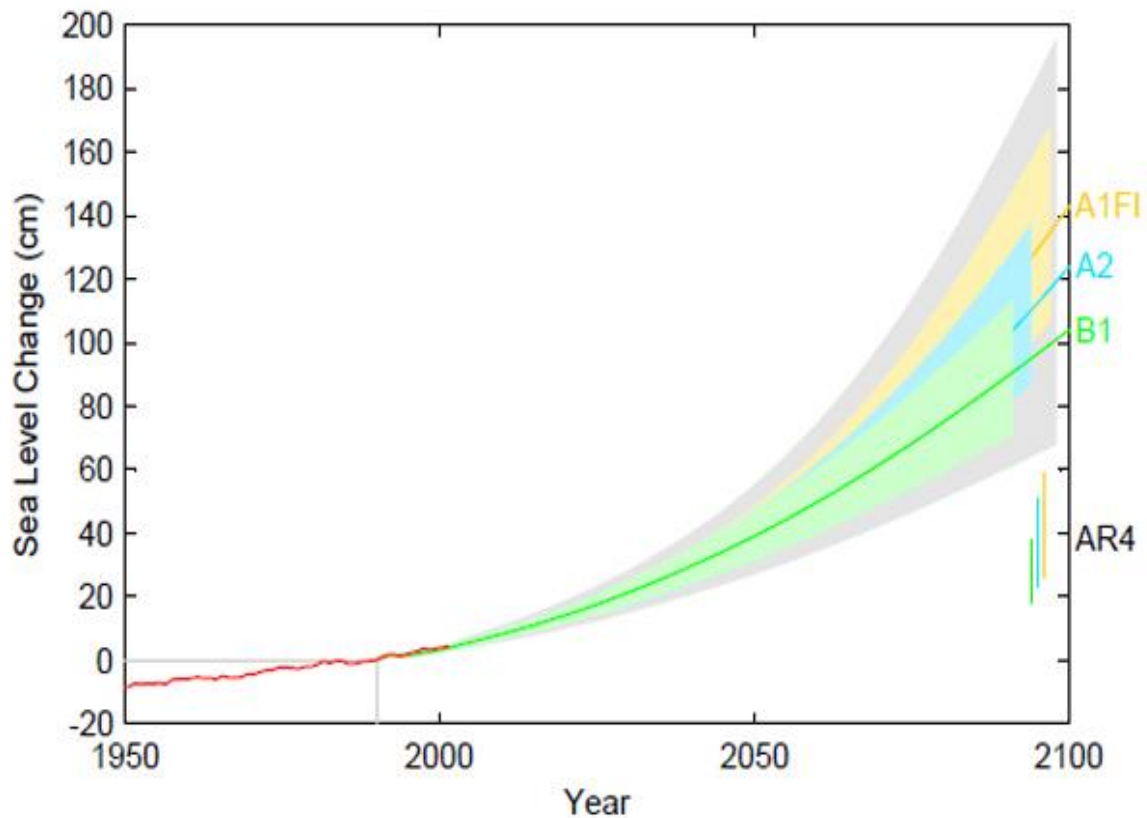


Abbildung 98: Vorhersagen zum Meeresspiegelanstieg (Zeitraum: 1990 bis 2100)

[Quelle: Rahmstorf, 2012]

Entscheidend ist hier der zu erwartende Meeresspiegelanstieg. Da aus bisherigen Forschungsergebnissen keine gesicherten Daten zum endgültig zu erwartenden Meeresspiegelanstieg vorliegen, können hier allerdings nur abschätzende Prognosen getroffen werden. Viele Faktoren werden den Wandel beeinflussen und sind abhängig von zukünftigem Emissionsverhalten. Abbildung 98 vermittelt einen Eindruck über die Spanne, die drei unterschiedliche Szenarien zur Entwicklung des Meeresspiegels möglich erscheinen lassen. Von Winkel (2011) werden in drei aus der Literatur bekannte Anstiegsszenarien beispielhaft für den Pegel Schulau betrachtet. In Abbildung 99 werden basierend auf der Sturmflut von 1976 folgende Anstiegsszenarien betrachtet:

- Mittlerer Meeresspiegel (mean sea level) + 25 cm
- Mittlerer Meeresspiegel (mean sea level) + 80 cm
- Mittlerer Meeresspiegel (mean sea level) +140 cm

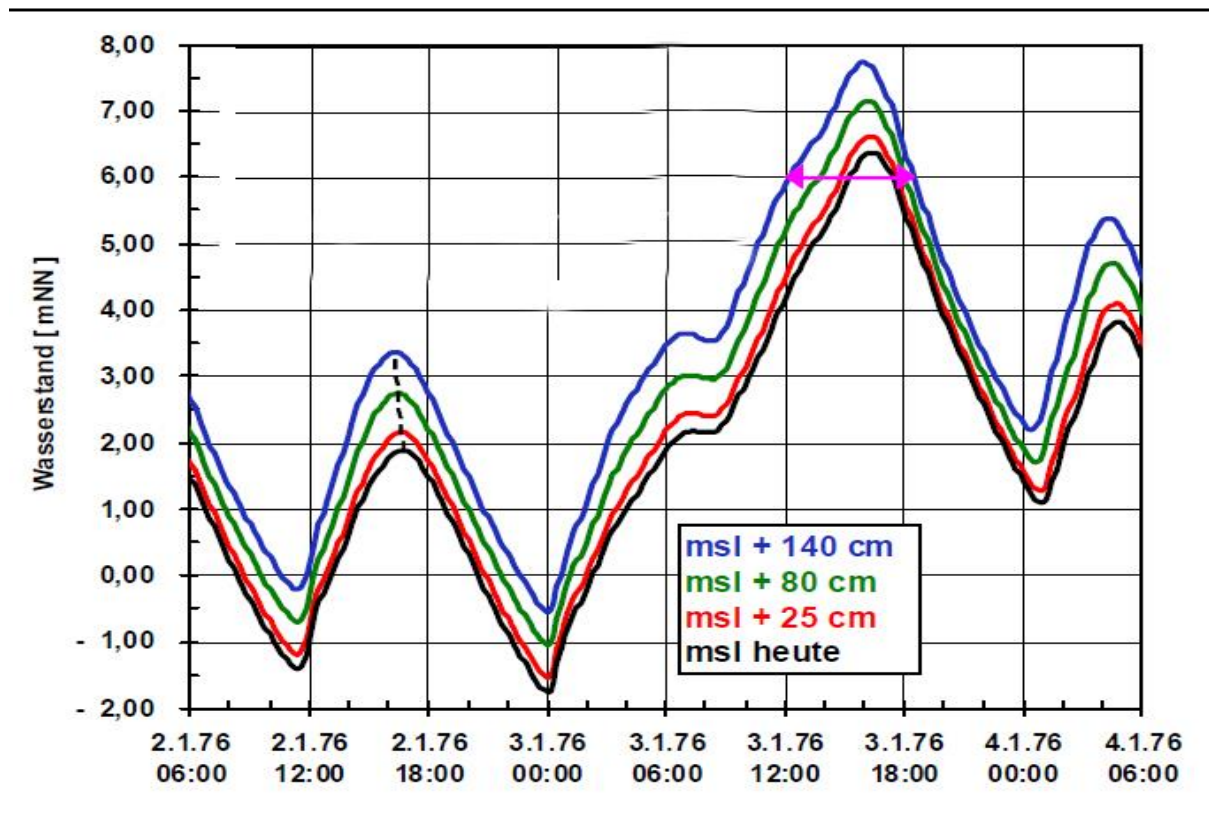


Abbildung 99: Einfluss verschiedener Meeresspiegelanstiegsszenarien auf den Wasserstand am Pegel Schulanau

[Quelle: Winkel et al., 2011]

Der Meeresspiegelanstieg hat neben Auswirkungen auf den Wasserstand auch Einfluss auf die Eintrittszeit des Tidehochwassers. So würde bei dem 25-Zentimeterszenario die Tidewelle um 3 Minuten, bei 80 cm ca. 10 Minuten und bei einem Anstieg um 140 cm etwa 15 Minuten früher in Hamburg. (vgl. Winkel et al., 2011)

Grundsätzlich werden bei einem Anstieg des Meeresspiegels mehr Wassermassen durch das Ästuar bewegt, was den „Kanaleffekt“ der heutigen Morphologie der Tidelbe mit vorverlegter Deichlinie und Fahrrinnenvertiefung weiter verstärken würde. Durch den erhöhten Wasserspiegel würde sich auch ein erhöhtes Energiegefälle einstellen, wodurch ein weiterer Anstieg der Tidestromgeschwindigkeiten eintreten würde. Beispielhaft werden in Abb. 100 die Auswirkungen des Meeresspiegelanstieges um 80 cm am Pegel Glückstadt demonstriert.

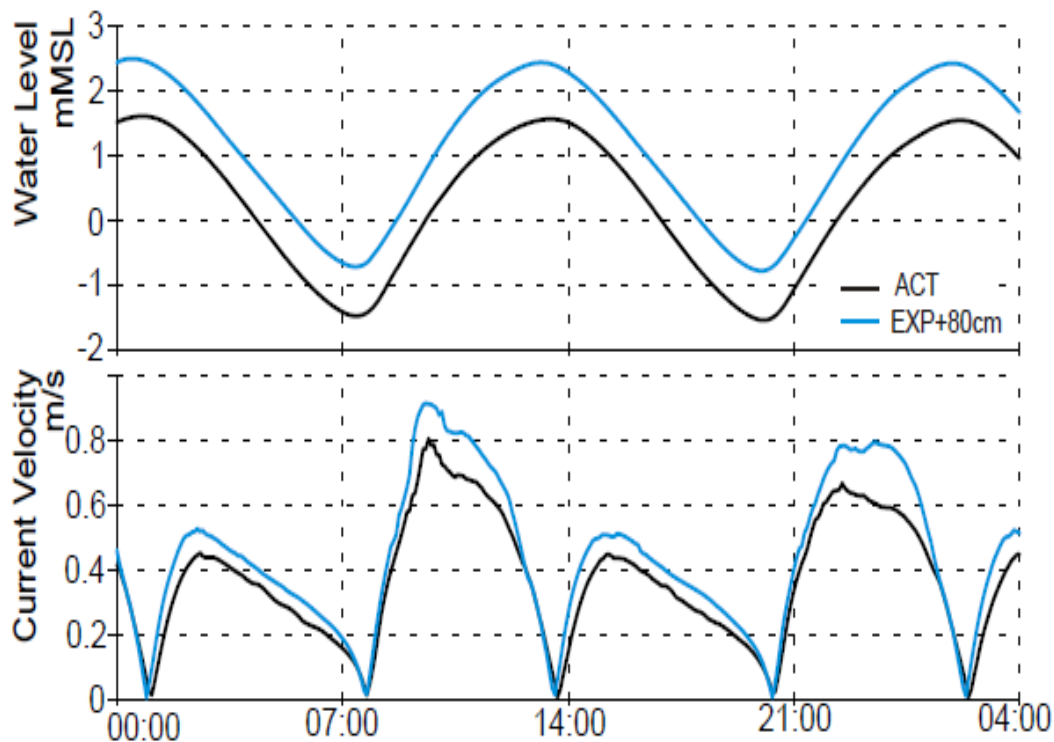


Abbildung 100: Auswirkungen eines Meeresspiegelanstiegs um +80cm auf den Pegel Glückstadt

[Quelle: Holzwarth et al., 2011]

8 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit werden, neben neueren, elektronisch verfügbaren Daten zum Strömungsverhalten in der Unterelbe, durch eine umfangreiche Altaktenrecherche erstmals „historische“ Strömungsmessdaten, die seitens des WSA Hamburg seit den 1960er Jahre auf vier annähernd gleichbleibenden Messprofilen in der Tideelbe zwischen Elbe-km 643,0 und 676,5 erfasst wurden, ausgewertet.. Ziel der Arbeit ist es, diese Altdaten mit den Ergebnissen aus Dauermessungen, die im Rahmen der Beweissicherung zur letzten Fahrrinnenanpassung der Tideelbe ab 1998/1999 auf den vier seit Jahrzehnten gemessenen Profilen erfolgen, zu kombinieren, um die „Altmessungen“ mit den neuen Messergebnissen zu vergleichen. Der Vergleich erlaubt exemplarisch die

Entwicklungen der Strömungsverhältnisse der Tideelbe seit Anfang der 1960er Jahre zu diskutieren.

Die festgestellten Veränderungen werden in Zusammenhang mit den kleinräumigen morphologischen Veränderungen an den betrachteten Messquerschnitten und den großräumigen morphologischen und hydrodynamischen, insbesondere durch Hochwasserschutzmaßnahmen und Fahrrinnenanpassungen geprägten, Entwicklungen betrachtet.

Im ersten Teil der Arbeit werden die bereits im Rahmen der Beweissicherung vom WSA Hamburg ausgewerteten Daten durch neuere Daten ergänzt sowie tiefer gehend als zuvor ausgewertet. Als Resultat können die im Abschlussbericht zur Beweissicherung (WSA, 2012) getroffene Aussagen bestätigt werden. Über den Zeitraum von 1998/99 bis 2011 bleiben die Strömungsbedingungen annähernd gleich. Eine Ausnahme bilden jedoch die seit 2007/2008 festzustellenden Abnahmen der mittleren und mittleren maximalen Flutstromgeschwindigkeiten an den vier Dauermessstationen. Als mögliche Ursachen für diese Beobachtungen kämen verstärkte Ostwindlagen, seltenere Sturmflutereignisse und höhere Oberwassermengen in Frage.

Im zweiten Teil der Arbeit liegt der Schwerpunkt auf einem Vergleich der wichtigsten Tidekennwerte in den sechziger Jahren mit den Ergebnissen der Jahre von 2001 bis 2011. Ein Vergleich ist möglich, da die Stellen, an denen die Daten während der 5 Jahrzehnte gemessen wurden, annähernd gleich geblieben sind. Allerdings waren die technischen Voraussetzungen vor etwa 50 Jahren wesentlich simpler und fehleranfälliger als heute.

Daher werden die für die Dauermessstationen und Querprofile zwischen 2001 und 2011 ermittelten Tidekennwerte für die Vergleiche mit den „historischen“ Altmessungen als aktueller „Ist-Zustand“ zugrunde gelegt. Die Altdaten müssen zur Herstellung der Vergleichbarkeit mithilfe eines Korrekturfaktors an „gleiche Verhältnisse“ angepasst werden. Ein Fehler, der ausgeglichen werden musste, betraf die häufig ungleichen Standorte im Gewässer, an denen gemessen wurde. Da die Fahrrinnenmitte den am besten vergleichbaren Standort darstellt, mussten die Strömungswerte, die nicht in Fahrrinnenmitte gemessen wurden korrigiert werden.

Die dazu notwendigen Korrekturfaktoren konnten aus der Arbeit von *Grellus* (2012) abgeleitet werden. Zusammen mit den mittleren Geschwindigkeit für die Querprofile wurden diese den Werten der Altdaten, bei denen überwiegend unzureichend dokumentiert war, wie viele Messgeräte pro Profil verwendet wurden und wie die Gesamtergebnisse ermittelt wurden, gegenübergestellt.

Aus den mit Hilfe dieses Verfahrens angepassten Altdaten hat ein Vergleich mit den neuen Daten als zulässig erwiesen. Werden die Strömungsdaten aus den sechziger Jahren des letzten Jahrhunderts mit den aktuellen verglichen, zeigt sich an allen vier Messprofilen (Q1 bis Q4) in den fünf Jahrzehnten ein Anstieg der Strömungsgeschwindigkeiten. An den Messprofilen Q3 und Q4 fällt der Anstieg der Strömungsgeschwindigkeiten mit mehr als 20 cm/s stärker aus als an den Profilen Q1 und Q2 (Anstieg knapp > 10 cm/s).

Generell zeigen die Messergebnisse breite Schwankungsbereiche. Grundsätzlich sind sie jedoch plausibel und zeigen bei sachgerechter Interpretation eine recht gute Übereinstimmung mit Ergebnissen aus existierenden Modellrechnungen der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) zu „historischen Systemzuständen“.

Als Gründe für den Anstieg der Strömungsgeschwindigkeiten spielen die massiven Eingriffe in den Tideraum der Elbe zwischen 1950 und 1980 die entscheidende Rolle. Hierzu zählen die umfangreichen Hochwasserschutzmaßnahmen als Folge der 1962er Sturmflut, die zu Verengungen des Gewässerquerschnitts führten, aber auch Fahrrinnenanpassungen und die Verfüllung von Hafenbecken im Hamburger Hafen.

Vor allem der massive Wegfall von Überflutungsflächen im Hamburger Raum hat voraussichtlich maßgeblich dazu beitragen, dass die Zunahmen der Strömungsgeschwindigkeiten nahe Hamburg (und damit in der Nähe der Querprofile Q1 und Q2) geringer waren als weiter stromab, an den Querprofilen Q3 und Q4. Aufgrund der Strombaupraxis konzentrieren sich die Strömungszunahmen jedoch vorrangig auf den (in dieser Arbeit betrachteten) Fahrrinnenbereich. In Randbereichen und Nebenelben sind in aller Regel keine Zunahmen oder sogar eher Abnahmen der Strömungsgeschwindigkeiten zu verzeichnen.

Der zukünftig zu erwartende Einfluss des globalen Wandels auf das Strömungsgeschehen in der Tideelbe wird ebenfalls diskutiert. Allerdings sind die zugrundeliegenden Wirkungsmechanismen zum Teil noch unzureichend erforscht. Vereinfachend ist jedoch festzuhalten, dass ein Anstieg des Meeresspiegels zu erhöhten Bewegungen von Wassermassen pro Tide im Ästuar und somit zu einer Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten führen wird.

Die Ergebnisse der Arbeit machen den Wert und die Notwendigkeit von Langfristmessungen sehr augenfällig deutlich. Nicht zuletzt vor dem Hintergrund des Klimawandels ist eine Weiterführung der Messungen an den bereits eingerichteten Profilen unabdingbar, um rechtzeitig auf bisher nicht sicher absehbare Entwicklungen der Strömungsgeschwindigkeiten reagieren zu können. Voraussetzung ist jedoch eine gründliche Dokumentation der Daten sowie die Angabe und Einhaltung der genauen Messpositionen wichtig. Aussagekräftige Vorhersagen über Veränderungen sind nur mit auf der Grundlage gut dokumentierter Datensätze möglich. Ergebnisauswertung und Prognosen können nur so an Qualität und Bedeutung gewinnen.

9 Literaturverzeichnis

Literatur

- Adler, M., Nicodemus, U.: TIDE-Software zum Auswerten und Visualisieren von ADCP-Querschnittsmessungen in Tideflüssen, Kurzbeschreibung, 2008, zum Download: http://bafg.de/nn_2225+60/M1/DE/03_Arbeitsbereiche/01_Hydrometrie/01_Durchflussmessung/agila_tide.html
- BAW (Hrsg.): Boehlich et al.: Bundesanstalt für Wasserbau, Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt Gutachten zur ausbaubedingten Änderung von Hydrodynamik und Salztransport, BAW-Nr.: A39550310062, 2006 Download: http://www.portal-tideelbe.de/Projekte/FRA20XX/Antragsunterlagen138356/Antrag/Unterlagen/Hydrodynamik_und_Salztransport.pdf
- BfG (Hrsg.): WSV-Sedimentmanagement Tideelbe – Strategien und Potenziale – eine Systemstudie. Ökologische Auswirkungen der Umlagerung von Wedeler Baggergut. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz 2008. BfG-1584. (Download: www.portal-tideelbe.de/Projekte → Strombau- und Sedimentmanagement Tideelbe)
- Boehlich, M.: Tidedynamik der Elbe. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 86 (2003)
- Dammschneider, H.-J./Düber, H.: Strömungs-Meßwertaufnahmen im Tidegebiet – Gerätevergleichende Naturuntersuchung, 1994
- Entelmann, I.; Grellus, Z.: Modernisierung des hydrologischen Messnetzes an der Tideelbe. In: Jahresbericht 2010 der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord. S. 62-63. Kiel, 2011. Im Internet verfügbar unter http://www.wsd-nord.wsv.de/Service/Broschueren_Flyer_etc/Anlagen/Jahresbericht_2010_WSD-N.pdf
- Fickert, M., Strotmann, T.: Hydrodynamische Entwicklung der Tideelbe, in G. Gönnert, B. Pflüger & J.-A. Bremer (Hrsg.) Von der Geoarchäologie über die

Küstendynamik zum Küstenzonenmanagement, Coastline Reports 9 (2007),
ISSN 0928-2734,

- Holzwarth, I., Hesser, F., et al.: Poster: Auswirkungen eines Meeresspiegelanstiegs in den deutschen Ästuaren, BMVBS-Forschungsprogramm KLIWAS, 2.Statuskonferenz, Oktober 2011, Berlin
- HPA (2007): Sedimentkonzept für die Tideelbe, 30.November 2007, unveröffentlicht ISBN 978-3-9811839-1-7, S.59-68
- Kappenberg, J., Fanger, H.-U.: Sedimenttransportgeschehen in der tidebeeinflussten Elbe, der Deutschen Bucht und in der Nordsee, 2007, ISSN 0344-9629, GKSS
- Malcherek, A.: Morphodynamik der Küstengewässer, Bundesanstalt für Wasserbau, Skript TU Hamburg Harburg, ohne Datum
- Malcherek, A.: Gezeiten und Wellen – Die Hydromechanik der Küstengewässer, Vieweg+Teuber, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2010, ISBN 978-3-8348-0787-8
- Qrefa-Sander, M.: Datendarstellung „Morphologie 1950“ mittels interner ArcGIS-Daten des WSA Hamburg. Datengrundlage (Digitalisierung alter Seekarten): HPA, 2012
- Qrefa-Sander, M.; Entelmann, I.: Erste Erfahrung der Gewässerkunde des WSA Hamburg mit dem ArcGIS-GEI-Datenlader. Vortragsunterlagen von der 2. Infoveranstaltung „Nutzung von Simulationsdaten der BAW in der Gewässerkunde“, Hamburg-Rissen April 2011
- Rahmstorf, S. (2012) Modeling sea level rise. Nature Education Knowledge 3(10):4
- Rhode, H.: Eine Studie über die Entwicklung der Elbe als Schifffahrtsstrasse (sic!), Mitteilungen des Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau der Technischen Universität Hannover, 1971, Eigenverlag
- Rhode, H.: Strömungsverhältnisse und Wassermengen der Tideelbe, Mitteilungen der Wasser- und Schifffahrtsdirektion (sic!)Hamburg Nr. 16, 1967, Eigenverlag
- Vagts, W. :Unsicherheiten bei der Durchführung und Auswertung von Strömungsmessungen mit Ott-Schwimmflügeln und Aanderaa-

Dauerstrommeßgeräten RCM4/RCM7, Mitteilung Wasser- und Schiffsamt (sic!) Hamburg, 24.04.1992,

- Weilbeer, H. et al.: Model validation and system studies for hydrodynamics, salt and sediment transport in the Elbe Estuary – Basic information for the River engineering and sediment management concept, BAW A39550310069, 2012
- Winkel et al. (2011) : Sturmflutuntersuchung der Tideelbe, Vortragsunterlagen, BAW, als Download verfügbar unter: http://www.schleswig-holstein.de/LLUR/DE/Service/Vortraege/Hydrologisches_Gespraech_2011/PDF/04_Winkel.html
- WSA Hamburg : Sturmfluttabelle ab 1901, Datenauswertung/-zusammenstellung WSA Hamburg, 2012
- WSA (Hrsg.): Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt - Bericht zur Beweissicherung- Abschlussbericht 2012. (Download: <http://www.portal-tideelbe.de/Projekte> --> Fahrrinnenanpassung 1999)
- WSA (Hrsg.): Jahresarbeitsprogramm Gewässerkunde 2009, Wasser- und Schiffsamt Hamburg, Az. 2-221.1/10
- WSD (2005): Eichweber, G. : Hydromorphologie des Elbeästuars, Wasser- und Schiffsamtsdirektion Nord, 2005

Internetadressen, mündliche Auskünfte:

- [1] http://www.baw.de/de/wasserbau/aestuar_kueste/index.html
- [2] http://www.baw.de/methoden/index.php5/Tidekennwerte_des_Wasserstandes
sowie
http://www.baw.de/methoden/index.php5/Tidekennwerte_der_Str%C3%B6mung
siehe auch grundlegend „Methodenwiki der Bundesanstalt für Wasserbau“
unter <http://www.baw.de/de/wasserbau/methoden/bawiki/index.html>
- [3] http://www.portal-tideelbe.de/Projekte/FRA1999/Beschl_Planfest_Behoerden/index.html
- [4] Grellus, Z.: mündliche Mitteilung 2012
- [5] Entelmann, I.: mündliche Mitteilung 2012
- [6] <http://www.portal-tideelbe.de/Funktionen/Karte/index.php.html?do=mapStart>
- [7] http://www.schleswig-holstein.de/LLUR/DE/Service/Vortraege/Hydrologisches_Gespraech_2011/PDF/04_Winkel.html
- [8] http://www.kliwas.de/cln_032/nn_595478/KLIWAS/DE/04_Publikationen/05_poster/poster_node.html
- [9] http://www.baw.de/methoden/index.php5/Tidedynamik_der_%C3%84stuar
- [10] www.smile-consult.de
- [11] http://ott.com/web/ott_de.nsf/id/pa_produkte_d.html

10 Anhang

Anhang I

Tabelle Ausfallzeiten D1 bis D4 1999 - 2011

D1 Ausfallzeiten					
GwkJ					
1999	25.11.98-2.3.99	29.3-13.4.99	21.10-3.11.99		
2000	29.4-2.5.00				
2001					
2002	5.11.-19.11.01	28.12.01-3.1.02	10.1.-14.1.02	5.3-11.3.02	
2003	13.12.02-22.1.03	28.7-12.8.03			
2004					
2005	13.11.-17.11.04	12.6.-21.6.05			
2006	30.1-27.2.06	19.4-24.4.06			
2007					
2008					
2009	7.1-12.2.09				
2010	6.1-4.3.10				
2011	3.12-17.2.11	16.3-1.4.11			
D2 Ausfallzeiten					
GwkJ					
1999	24.11.98-2.3.99	27.9-14.10.99			
2000					
2001	17.1-9.2.01	14.10-22.10.01			
2002	28.10.-31.10.01				
2003	1.11.-5.11.02	13.12.02-22.1.03			
2004					
2005	17.1-1.2.05				
2006	21.11-5.12.05	30.1-20.2.06			
2007	6.11-21.11.06	18.12.06-2.1.07			
2008					
2009	22.9-8.10.09				
2010	29.11-2.12.09				
2011	27.11.10-4.2.11	21.2-3.3.11			
D3 Ausfallzeiten					

GwkJ					
1999	24.11.98-3.3.99				
2000	3.4-17.4.00				
2001	24.9-8.10.01				
2002	21.5-3.6.02	9.9-23.9.02			
2003	13.12.02-22.1.03	25.2-3.3.03			
2004					
2005	30.11-6.12.04				
2006	31.1-20.2.06				
2007					
2008					
2009	6.1-12.2.09				
2010	24.11-3.12.09	22.12.09-3.3.10	31.3.-14.4.10	5.6.-16.6.10	10.7.-14.7.10
2011	2.12.10-3.2.11	22.2-3.3.11	3.3.-17.3.11		
D4 Ausfallzeiten					
GwkJ					
1999	1.11.-4.11.98	24.11.98-3.3.99	15.3.-29.3.99		
2000	24.1.-7.2.00	2.7.-14.7.00	16.7.-24.7.00		
2001	13.12.-22.12.00	28.2.-2.3.01	9.3.-12.3.01		
2002		.			
2003	13.12.02-22.1.03	31.10.2003			
2004	1.11.-11.11.03				
2005					
2006	31.1.-20.2.06				
2007	29.1.-26.2.07	30.8.-11.9.07			
2008					
2009	6.1.-12.2.09				
2010	6.1.-3.3.10				
2011	7.11.10-3.2.11	20.2.-3.3.11	26.10.-31.10.11		

Anhang II

Tabelle Sturmfluten Auszug

Sturmflutdaten an ausgewählten Pegeln des WSA Hamburg 2000 - 2011												
Auszug aus Sturmfluttable DVD-Anhang VI												
Jahr (KJ)	Tag	Monat	Mondphasen		Glückstadt Thw		Kollmar Thw		Hettingen Thw		Schulau Thw	
			0 = Neumond 1 = Erstes Viertel 2 = Vollmond	Datum	Uhr	cm	Uhr	cm	Uhr	cm	Uhr	cm
2000	30.	Januar	3 0	28.01.00 05.02.00	8:59	946	9:00	960	9:24	988	9:39	992
	09.	Februar	0 1	05.02.00 13.02.00	5:21	872	5:26	880	5:51	910	6:15	914
	09.		0 1	05.02.00 13.02.00	17:02	848	17:22	860	17:34	898	17:57	903
	13.	Dezember	2 3	11.12.00 18.12.00	15:40	863	15:59	871	16:25	892	16:45	901
	14.		2 3	11.12.00 18.12.00	4:35	801	4:50	809	5:18	827	5:39	834
	15.		2 3	11.12.00 18.12.00	17:56	808	18:15	816	18:41	838	19:06	844
	16.		2 3	11.12.00 18.12.00	6:12	831	6:30	841	6:49	861	7:18	868
2001	08.	September	2 3	02.09.01 10.09.01	18:12	799	18:29	806	18:54	831	19:07	836
	31.	Oktober	1 2	24.10.01 01.11.01	15:16	798	15:34	811	15:56	829	16:18	837
	01.	November	2	01.11.2001	2:51	821	3:10	837	3:31	856	3:47	863
	05.		2 3	01.11.01 08.11.01	5:02	782	5:21	796	5:45	815	5:57	824
2002	29.	Januar	2 3	28.01.02 04.02.02	2:55	946	3:01	954	3:18	987	3:36	997
	29.		2 3	28.01.02 04.02.02	15:27	809	15:39	818	15:58	849	16:07	857
	23.	Februar	1 2	20.02.02 27.02.02	9:44	877	9:55	883	10:21	913	10:32	920
	27.		2	27.02.2002	15:25	831	15:28	836	15:49	866	16:06	873
	07.	März	3 0	06.03.02 14.03.02	20:59	799	21:05	806	21:29	839	21:48	847
	23.	Oktober	2 3	21.10.02 29.10.02	16:18	789	16:32	799	17:01	816	17:20	830
	24.		2 3	21.10.02 29.10.02	4:07	776	4:28	785	4:57	804	5:13	814
	27.		2 3	21.10.02 29.10.02	18:41	786	19:04	795	19:38	812	19:55	826
28.	2 3		21.10.02 29.10.02	5:20	860	6:00	870	6:05	886	6:26	891	
2003	03.	April	0 1	01.04.03 10.04.03	3:46	784	4:06	791	4:30	813	4:51	822
	15.	Dezember	2 3	08.12.2003 16.12.2003	5:52	804	6:24	811	6:33	836	6:57	842
	21.		3 0	16.12.2003 23.12.2003	<u>22.12.03</u> 1:07	835	<u>22.12.03</u> 1:16	844	<u>22.12.03</u> 1:45	865	<u>22.12.03</u> 2:02	873

2004	14.	Januar	2 3	07.01.2004 15.01.2004	6:56	815	6:58	825	7:29	846	7:56	855
	09.	Februar	2 3	06.02.2004 13.02.2004	4:36	820	4:45	831	5:15	859	5:26	873
	21.	März	0 1	20.03.2004 29.03.2004	3:44	853	3:56	865	4:14	889	4:26	899
	21.	September	1	21.09.2004	7:46	800	8:09	803	8:25	820	8:32	825
					19:20	816	19:43	821	19:59	842	20:21	848
	13.	November	2 1	12.11.2004 19.11.2004	14:58	771	15:18	775	15:48	793	16:03	802
	18.		2 1	12.11.2004 19.11.2004	7:05	906	7:28	911	7:51	937	8:01	(947)
	18.	Dezember	1	18.12.2004	7:36	811	7:45	818	8:14	841	8:32	849
24.	1 2		18.12.2004 26.12.2004	13:26	810	13:44	815	14:10	835	14:34	843	
2005	2.	Januar	2 3	26.12.2004 03.01.2005	19:20	843	19:31	850	19:57	870	20:15	877
	3.		3	03.01.2005	7:25	794	7:34	804	8:01	824	8:17	831
	8.		3 0	03.01.2005 10.01.2005	22:04	839	22:34	843	23:01	864	23:11	871
	9.		3 0	03.01.2005 10.01.2005	13:21	803	13:37	809	13:58	829	14:19	837
	13.		0 1	10.01.2005 17.01.2005	4:52	812	5:07	819	5:28	841	5:52	848
	20.		1 2	17.01.2005 25.01.2005	23:13	881	23:28	888	23:56	914	<u>21.01.05</u> 0:13	924
	12.	Februar	0 1	08.02.2005 16.02.2005	19:46	849	20:00	856	20:33	883	20:47	895
	13.		0 1	08.02.2005 16.02.2005	5:43	799	6:17	808	6:28	834	6:47	840
	12.	März	0 1	10.03.2005 17.03.2005	4:38	814	4:33	823	5:06	846	5:26	855
	21.	Juli	2	21.07.2005	14:30	799	14:45	805	15:09	828	15:40	837
	17.	Dezember	2 3	15.12.2005 23.12.2005	3:52	807	4:03	822	4:29	843	4:50	852
	2006	8.	Februar	1 2	05.02.06 13.02.06	23:12	834	23:26	842	23:48	857	<u>09.02.06</u> 00:06
7.		Oktober	2 3	07.10.06 14.10.06	14:51	817	15:07	822	15:35	839	15:53	849
1.		November	1 2	29.10.06 05.11.06	8:11	904	8:21	912	8:57	933	9:18	950
9.			2 3	05.11.06 12.11.06	4:55	777	5:06	785	5:34	801	5:49	811
			17:44	789	17:58	798	18:24	816	18:40	825		
12.		3	12.11.06	7:19	809	7:27	819	7:53	835	8:14	843	
31.	Dezember	1 2	27.12.06 03.01.07	10:59	813	11:30	812	11:33	837	11:51	846	

2007	1.	Januar	1	27.12.06	<u>02.01.07</u>	802	<u>02.01.07</u>	812	<u>02.01.07</u>	828	<u>02.01.07</u>	836
			2	03.01.07	00:41		00:58		01:23		01:46	
	5.		2	03.01.07	3:51	805	3:53	814	4:22	832	4:43	841
			3	11.01.07								
	12.		3	11.01.07	7:06	922	7:16	934	7:40	954	7:57	964
		0	19.01.07									
	18.	3	11.01.07	22:58	801	23:06	807	23:55	826	<u>19.01.07</u>	836	
		0	19.01.07							00:15		
	21.	0	19.01.07	4:12	811	4:22	820	4:50	836	5:13	846	
		1	26.01.07	17:21	827	17:33	837	18:00	853	18:23	865	
	18.	3	März	12.03..07	<u>19.03.07</u>	880	<u>19.03.07</u>	892	<u>19.03.07</u>	914	<u>19.03.07</u>	922
		0		19.03.07	01:54		02:18		02:39		02:57	
	20.	0	19.03.07	3:06	769	3:25	777	4:01	798	4:24	810	
		1	28.03.07									
	26.	1	Juni	22.06.07	23:30	847	23:41	857	<u>27.06.07</u>	876	<u>27.06.07</u>	886
	2	30.06.07					00:16		00:32			
30.	2	Juli	30.07.07	15:11	793	15:23	801	15:57	822	16:15	831	
6.	3	November	01.11.07	13:04	801	13:11	809	13:42	834	14:07	843	
	0		10.11.07									
9.	3		01.11.07	14:23	973	14:35	987	15:00	1016	15:07	1032	
	0		10.11.07									
25.	2	24.11.07	15:16	834	15:16	843	15:48	867	16:04	878		
	3	01.12.07										
26.	2	24.11.07	3:12	818	3:20	827	3:48	851	4:00	862		
	3	01.12.07										
7.	3	Dezember	01.12.07	<u>08.12.07</u>	813	<u>08.12.07</u>	818	<u>08.12.07</u>	837	<u>08.12.07</u>	848	
	0		09.12.07	01:38		01:49		02:19		02:41		
2008	25.	Januar	2	22.01.08	4:14	786	4:23	793	4:49	813	5:04	818
			3	30.01.08								
	26.	2	22.01.08	5:13	778	5:25	786	5:55	808	5:58	813	
		3	30.01.08									
	1.	3	Februar	30.01.08	9:37	807	9:44	813	10:12	833	10:29	836
		0		07.02.08								
	23.	2		21.02.08	4:32	805	4:33	812	4:55	833	5:22	842
		3	29.02.08									
	27.	2	21.02.08	6:41	820	6:43	825	7:15	846	7:36	858	
		3	29.02.08									
	1.	3	März	29.02.08	19:15	923	19:02	932	19:25	953	19:35	963
		0		07.03.08								
	13.	0		07.03.08	6:31	837	6:35	845	7:04	867	7:28	879
		1	14.03.08									
	21.	2	Juli	18.07.08	4:40	771	4:48	766			5:43	795
	3	25.07.08										
2.	0	Oktober	29.09.08	4:17	778	4:31	783	5:00	792	5:19	803	
	1		07.10.08									
17.	2		14.10.08	4:04	795	4:14	801	4:47	815	5:06	826	
	3	21.10.08										
16.	2	November	13.11.08	17:17	786	17:32	797	17:59	808	18:17	819	
	3		19.11.08									
2009	4.	Oktober	2	04.10.2009	3:06	817	3:14	826	3:44	835	4:04	847
			14:22		853	(14:41)	(866)	15:07	878	15:25	892	
	16.	3	11.10.09	13:02	787	(13:20)	(797)	13:54	814	14:13	830	
	0	18.10.09										

2010	24.	Oktober	2	23.10.10	15:20	794	15:35	807	16:04	822	16:24	838
			3	30.10.10								
	12.	November	0	06.11.10	18:28	863	18:31	877	19:00	890	19:17	904
			1	13.11.10								
2011	5.	Februar	0	03.02.11	4:15	852	4:20	865	4:41	888	4:59	902
			1	11.02.11								
	26.	November	0	25.11.11								
	27.		1	02.12.11								
	28.											
	4.	Dezember	1	02.12.11								
	9.		2	10.12.11								
			0	24.12.11								
29.	1		01.01.12									

DVD-Anhang

Anhang I : Strömungsverteilungen D1 bis D4 → Abbildungen, *WSA Hamburg Gewässerkunde, 2012*

Anhang II : Auswertungen Strömungsmessstationen D1 bis D4 → Ergebnisse D1 bis D4
→ Exceltabellen

Anhang III : Durchflussauswertungen bis 2010 Stand 11.2011 → Exceltabellen, *Grellus, Z. WSA Hamburg 2012*

Anhang IV : Diagramme des 10Jahresmittels Q1- Q4 → Exceltabellen, *Grellus, Z. WSA Hamburg 2012*

Anhang V : „historische“ Strömungsmessdaten → Exceltabellen,

Anhang VI : Sturmfluttable → Exceltabellen, *Simon, K. WSA Hamburg 2012*

Anhang VII : Modelldarstellung Nippzeit [BAW] Download:

http://www.baw.de/downloads/wasserbau/tidedynamik_der_Aestuar/pdf/BAW-Modell_Elbe-Stroemung_IST2010_Nipptide.pdf ,2012

Anhang VIII: Modelldarstellung Springzeit [BAW] Download:

http://www.baw.de/downloads/wasserbau/tidedynamik_der_Aestuar/pdf/BAW-Modell_Elbe-Stroemung_IST2010_Springtide.pdf , 2012