

GIS-gestützte Analysen und dynamische 3D-Visualisierungen
der morphologischen Entwicklung schleswig-holsteinischer Tidebecken

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität
zu Kiel

vorgelegt von

Petra Witez

Kiel

2002



Referent/in:.....
Korreferent/in:
Tag der mündlichen Prüfung:
Zum Druck genehmigt: Kiel,

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG	1
2. CHARAKTERISIERUNG DES SCHLESWIG-HOLSTEINISCHEN WATTENMEERES	4
2.1 GENESE	6
2.2 SYSTEMARE GLIEDERUNG	10
2.3 MORPHODYNAMISCHE EINHEITEN	12
2.4 HYDRODYNAMIK IM WATTENMEER	18
3. KÜSTENSCHUTZ IN SCHLESWIG-HOLSTEIN	24
3.1 MAßNAHMEN DES KÜSTENSCHUTZES	26
3.1.1 <i>Vorland</i>	26
3.1.2 <i>Lahnungen, Grüppen</i>	36
3.1.3 <i>Buhnen und Deckwerke</i>	39
3.1.4 <i>Sandaufspülungen und Baggerungen</i>	42
3.1.5 <i>Ästuarsperrwerk</i>	44
3.1.6 <i>Rückdeichungen</i>	46
3.1.7 <i>Vordeichungen</i>	50
3.1.8 <i>Verbindungsdam</i>	53
4. DATENGRUNDLAGE UND DATENQUALITÄT	55
4.1 VERMESSUNGSMETHODEN	55
4.2 KARTENWERKE	57
4.3 DIGITALE GELÄNDEMDELLE	59
4.4 DATENQUALITÄT	63
4.5 METADATEN	66
5. METHODIK.....	69
5.1 BECKENPARAMETER	69
5.2 HAUPTKOMPONENTENANALYSE.....	71
5.3 HIERARCHISCHE CLUSTERANALYSE.....	75
6. EMPIRISCHE AUSWERTUNGEN	77
6.1 PIEP	77
6.1.1 <i>Wöhrdener Loch</i>	81
6.1.2 <i>Kronenloch</i>	85
6.1.3 <i>Sommerkoog-Steertloch</i>	88
6.2 NORDERHEVER-HEVERSTROM	93
6.2.1 <i>Seegattbereich des Norderhever-Heverstrom</i>	97
6.2.2 <i>Seegattbereich des Norderheverstroms</i>	100
6.2.3 <i>Westlicher Heverstrom</i>	102
6.2.4 <i>Östlicher Heverstrom</i>	105
6.2.5 <i>Holmer Fähre</i>	107
6.2.6 <i>Strandley</i>	110
6.3 HOOGELOCH.....	113
6.4 FAZIT	116

7. RELATIONEN UND SZENARIEN EINES MEERESSPIEGELANSTIEGS	118
7.1 RELATIONEN	118
7.2 SZENARIEN AUF BASIS DER <i>AC</i> - ZU <i>P</i> -BEZIEHUNG	126
7.2.1 <i>Norderhever-Heverstrom</i>	126
7.2.2 <i>Hoogeloch</i>	128
7.2.3 <i>Piep</i>	130
7.3 ZUSAMMENFASSENDE BETRACHTUNG	132
8. SZENARIOBERECHNUNG MIT ANPASSUNG DER MORPHOLOGIE	134
8.1 HOCHRECHNUNG FÜR DIE PIEP	136
8.2 HOCHRECHNUNG FÜR DEN NORDERHEVER-HEVERSTROM	139
8.3 HOCHRECHNUNG FÜR DAS HOOGELOCH	142
8.4 FAZIT	144
9. 3D-VISUALISIERUNG UND ANIMATION DER ZEITLICHEN ENTWICKLUNG AUSGEWÄHLTER TIDEBECKEN.....	145
9.1 VISUALISIERUNG	147
9.2 ANIMATION	148
9.3 ANIMATIONSPROZESS UND -ERSTELLUNG	150
9.4 VRML	156
9.5 INTERPRETATION DER ANIMATIONSERGEBNISSE.....	158
9.5.1 <i>Animation der Piep</i>	158
9.5.2 <i>Animation des Norderhever-Heverstroms</i>	163
9.5.3 <i>Animation des Hoogelochs</i>	169
10. FAZIT	173
11. LITERATUR.....	177
ANHANG A: KORRELATIONSKOEFFIZIENTEN	193
ANHANG B: MAPLE-SCRIPT FÜR DIE HOCHRECHNUNG.....	197

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Lage des Wattenmeeres.....	4
Abb. 2.2:	Landsat TM-Szene des Nordfriesischen Wattenmeeres vom 27.06.1995 (Kanalkombination: 3, 2, 1).	7
Abb. 2.3:	Landsat TM-Szene des Dithmarscher Wattenmeeres vom 27.06.1995 (Kanalkombination: 3, 2, 1).	9
Abb. 2.4:	Einige wichtige Bezeichnungen für den Tideverlauf und Tidewasserstände (nach DIN 4039-3).	11
Abb. 2.5:	Morphologische Variationen sandiger Gezeitenküsten in Abhängigkeit vom Tidenhub.....	11
Abb. 2.6:	Elemente eines Wattenmeer-Tidesystems.....	13
Abb. 2.7:	Einfluss von Seegang, Strömung und Wetter auf die Höhenveränderungen im Watt (schematisch).	15
Abb. 2.8:	Die Abgrenzung der 14 schleswig-holsteinischen Tidebecken auf Basis eines Digitalen Geländemodells (Auflösung von 50 m x 50 m).....	17
Abb. 2.9:	Lage der Wathöhenscheide (WHS) und der Wattwasserscheide (WWS) bei Ebbe und bei Flut.....	18
Abb. 2.10:	Klassifizierung der Wellen auf Basis ihrer Frequenz.....	19
Abb. 2.11:	Schematische Darstellung einiger Wellenparameter und -bewegung.....	20
Abb. 2.12:	Rotierende Tidewelle um die vier Amphidromieknoten in der Nordsee.	22
Abb. 3.1:	Zonierung des Vorlandes.....	27
Abb. 3.2:	Vorland in Schleswig-Holstein mit Lahnungen und Gruppen.	28
Abb. 3.3:	Flächengröße der Salzwiesen in Schleswig-Holstein.....	29
Abb. 3.4:	Lage der von DIECKMANN (1988) untersuchten Küstenabschnitte.....	31
Abb. 3.5:	Mögliche Entwicklungsstadien einer Salzwiese.	34
Abb. 3.6:	Gruppen und Lahnungen im Vorland.....	36
Abb. 3.7:	Aufbau einer im nördlichen Teil Schleswig-Holsteins typischen Buschlahnung.	37
Abb. 3.8:	(a) Vorhandenes und (b) im Aufbau befindliches Vorland (schematisch).....	38
Abb. 3.9:	Schutzmauer als Beispiel für ein typisches Deckwerk am westlichen Ende von Wangerooge (1977).	40
Abb. 3.10:	Beschädigte Buhne auf Wangerooge (1979).....	40
Abb. 3.11:	Querschnitte von schweren Seebuhnen.....	41
Abb. 3.12:	Rinnenentwicklung und regulierende Eingriffe im Sperrwerksbereich und in der Außeneider.	44
Abb. 3.13:	Luftbild der Außeneider im Jahr 1986 mit dem Sanddamm und dem Eidersperrwerk.	45
Abb. 3.14:	Digitales Geländemodell des Tidebecken Norderhever-Heverstrom mit dem Beltringharder Koog und dem Teilbecken der Holmer Fähre (DGM: 50 m x 50 m).	50
Abb. 3.15:	Lebensräume im neu bedeckten Beltringharder Koog.	52
Abb. 4.1:	Beispiel für ein TIN-Datenmodell.....	60
Abb. 4.2:	Beispiel für ein Raster-Datenmodell (Gitterzellen 25 x 25 m ²).	60
Abb. 4.3:	Beispiel für den Aufbau einer Metadatenbank.....	67
Abb. 4.4:	Aufbau der Metadaten zu Grids in der WattIs-Datenbank (Screenshot).....	68
Abb. 5.1:	Screenshot der PROWATT-Extension.....	70
Abb. 5.2:	Geometrisches Prinzip einer Hauptkomponentenanalyse.	73
Abb. 5.3:	Clusteranalyse auf Basis der Hauptkomponentenwerte der Tidebecken des schleswig-holsteinischen Wattenmeeres.	75
Abb. 6.1:	Das Tidebecken der Piep mit Teilbecken.....	78
Abb. 6.2:	Seegattprofile des Wöhrdener Loch.	83

Abb. 6.3:	Seegattprofile des Kronenlochs.....	86
Abb. 6.5:	Vorlandentwicklung im Tidebecken der Piep auf Basis der Teilbecken.	92
Abb. 6.6:	Tidebecken Hoogeloch und Norderhever-Heverstrom mit Teilbecken.	93
Abb. 6.7:	Seegattprofile des Norderhever-Heverstrom.....	98
Abb. 6.8:	Seegattprofile des Norderheverstroms.	101
Abb. 6.9:	Seegattprofile des Heverstroms.....	104
Abb. 6.10:	Seegattprofile der Holmer Fähre.....	108
Abb. 6.11:	Seegattprofile des Hoogelochs.....	113
Abb. 7.1:	Schematische Darstellung eines Seegattquerschnitts (Ac) und des Tideprismas (P) in einem Tidebecken.	120
Abb. 7.2:	Verhältnis des Seegattquerschnitts zum Tideprisma für die schleswig- holsteinische Tidebecken ($n=151$).	121
Abb. 7.3:	Fall B: Schematische Darstellung TV zu Ac , wobei $\Delta TV < \Delta Ac$	123
Abb. 7.4:	Fall C: Schematische Darstellung TV zu Ac , wobei $\Delta TV > \Delta Ac$	123
Abb. 7.5:	Verhältnis von Seegattquerschnitt zu Tideprisma bei verschiedenen Untersuchungen.....	124
Abb. 7.6:	Veränderungen des Verhältnisses des Seegattquerschnitts zum Tideprisma für die vier schleswig-holsteinischen Tidebecken HL, PI, und NH im Laufe der Zeit ($n=18$).....	125
Abb. 7.7:	Veränderungen des Verhältnisses des Seegattquerschnitts zum Tideprisma für das schleswig-holsteinische Tidebecken Norderhever-Heverstrom (NH) zwischen 1936 und 1990 und für vier Szenarien eines zukünftigen Meeresspiegelanstiegs.	127
Abb. 7.8:	Veränderungen des Verhältnisses des Seegattquerschnitts zum Tideprisma für das schleswig-holsteinische Tidebecken Hoogeloch (HL) zwischen 1936 und 1992. und für vier Szenarien eines zukünftigen Meeresspiegelanstiegs.	129
Abb. 7.9:	Veränderungen des Verhältnisses des Seegattquerschnitts zum Tideprisma für das schleswig-holsteinische Tidebecken Piep (PI) zwischen 1937 und 1991 und für vier Szenarien eines zukünftigen Meeresspiegelanstiegs.....	131
Abb. 9.1:	Darstellung der Wohnorte von Opfern eines Cholera-Ausbruchs in einem Londoner Stadtviertel (schwarze Balken) und der vorhandenen Wasserbrunnen ("pumps" - nachträglich eingefärbt).	145
Abb. 9.2:	Modell des wissenschaftlichen Forschungsprozesses.	146
Abb. 9.3:	Der Animationsprozess.	150
Abb. 9.4:	Die Konzeptionsphase beim Animationsprozess.	152
Abb. 9.5:	Die Erzeugungsphase beim Animationsprozess.....	154
Abb. 9.6:	Eine um vier Einheiten nach links verschobene rote Kugel in VRML.	157
Abb. 9.7:	Screenshot aus der Animation des Tidebeckens der Piep im Jahr 1937.	159
Abb. 9.8:	Screenshot aus der Animation des Tidebeckens der Piep im Jahr 1975.	160
Abb. 9.9:	Screenshot aus der Animation des Tidebeckens der Piep im Jahr 1991.	161
Abb. 9.10:	Screenshot aus der Animation der Teilbecken in der Meldorfer Bucht im Jahr 1975.....	162
Abb. 9.11:	Screenshot aus der Animation der Teilbecken in der Meldorfer Bucht im Jahr 1980.....	163
Abb. 9.12:	Screenshot aus der Animation des Tidebeckens des Norderhever-Heverstroms im Jahr 1975.	164
Abb. 9.13:	Screenshot aus der Animation des Tidebeckens des Norderhever-Heverstroms im Jahr 1990.	165
Abb. 9.14:	Screenshot aus dem VRML-File des Teilbereichs des Heverstroms im Jahr 1936.	166
Abb. 9.15:	Screenshot aus dem VRML-File des Teilbereichs des Heverstroms im Jahr 1990.	

.....	166
Abb. 9.16: Screenshot aus der Animation des Teilbereichs des Norderheverstroms im Jahr 1975.....	168
Abb. 9.17: Screenshot aus der Animation des Teilbereichs des Norderheverstroms im Jahr 1990.....	169
Abb. 9.18: Screenshot aus der Animation des Tidebeckens des Hoogelochs im Jahr 1936.	170
Abb. 9.19: Screenshot aus der Animation des Tidebeckens des Hoogelochs im Jahr 1990.	171
Abb. 9.20: Screenshot aus der Animation des Tidebeckens des Hoogelochs im Jahr 2045.	172

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1:	Mittlere jährliche Verschiebung der Vorlandgrenze in Richtung See in den untersuchten 16 Küstenabschnitten.	32
Tab. 5.1:	Bedeutung der Variablenabkürzungen	72
Tab. 5.2:	Anteil der durch die ersten drei Hauptkomponenten erklärten Varianz des Ausgangsdatensatzes.	73
Tab. 5.3:	Statistiken und Ladungsmatrix der Hauptkomponentenanalyse mit SPSS.	74
Tab. 6.1:	Flächen-, Tiefen- und Volumenverteilung im Tidebecken der Piep zwischen 1937 bis 1991.	79
Tab. 6.2:	Perzentile der Tiefenwerte [in cm] in den Prielen des Gesamtbeckens der Piep im Laufe der Zeit.	80
Tab. 6.3:	Perzentile der Hangneigung [in Grad] in den Prielen des Gesamtbeckens der Piep im Laufe der Zeit.	81
Tab. 6.4:	Perzentile der Höhenwerte [in cm] auf den hohen Wattbereichen des Gesamtbeckens der Piep im Laufe der Zeit.	81
Tab. 6.5:	Flächen-, Tiefen- und Volumenverteilung im Teilbecken des Wöhrdener Lochs zwischen 1937 bis 1991.	82
Tab. 6.6:	Flächen- und Tiefenverteilung der Seegatts des Wöhrdener Loch.	83
Tab. 6.7:	Perzentile der Tiefenwerte [in cm] in den Prielen des Teilbeckens Wöhrdener Loch im Laufe der Zeit.	84
Tab. 6.8:	Perzentile der Hangneigung [in Grad] in den Prielen des Teilbeckens Wöhrdener Loch im Laufe der Zeit.	84
Tab. 6.9:	Perzentile der Höhenwerte [in cm] auf den hohen Wattbereichen des Teilbeckens Wöhrdener Loch im Laufe der Zeit.	85
Tab. 6.10:	Flächen-, Tiefen- und Volumenverteilung im Teilbecken des Kronenlochs zwischen 1937 bis 1991.	86
Tab. 6.11:	Flächen- und Tiefenverteilung der Seegatts des Kronenlochs.	87
Tab. 6.12:	Perzentile der Tiefenwerte [in cm] in den Prielen des Teilbeckens Kronenloch im Laufe der Zeit.	87
Tab. 6.13:	Perzentile der Hangneigung [in Grad] in den Prielen des Teilbeckens Kronenloch im Laufe der Zeit.	87
Tab. 6.14:	Perzentile der Höhenwerte [in cm] auf den hohen Wattbereichen des Teilbeckens Kronenloch im Laufe der Zeit.	87
Tab. 6.15:	Flächen-, Tiefen- und Volumenverteilung im Teilbecken des Sommerkoog-Steertloch zwischen 1937 bis 1991.	89
Tab. 6.16:	Flächen- und Tiefenverteilung der Seegatts des Sommerkoog-Steertloch.	90
Tab. 6.17:	Perzentile der Tiefenwerte [in cm] in den Prielen des Teilbeckens Sommerkoog-Steertloch im Laufe der Zeit.	90
Tab. 6.18:	Perzentile der Hangneigung [in Grad] in den Prielen des Teilbeckens Sommerkoog-Steertloch im Laufe der Zeit.	91
Tab. 6.19:	Perzentile der Höhenwerte [in cm] auf den hohen Wattbereichen des Teilbeckens Sommerkoog-Steertloch im Laufe der Zeit.	91
Tab. 6.20:	Flächen-, Tiefen- und Volumenverteilung im Tidebecken Norderhever-Heverstrom zwischen 1936 bis 1990.	95
Tab. 6.21:	Perzentile der Tiefenwerte [in cm] in den Prielen des Tidebeckens Norderhever-Heverstrom Loch im Laufe der Zeit.	95
Tab. 6.22:	Perzentile der Hangneigung [in Grad] in den Prielen des Tidebeckens Norderhever-Heverstrom im Laufe der Zeit.	95
Tab. 6.23:	Perzentile der Höhenwerte [in cm] auf den hohen Wattbereichen des Tidebeckens Norderhever-Heverstrom im Laufe der Zeit.	96

Tab. 6.24:	Flächen-, Tiefen- und Volumenverteilung im Teilbecken des Seegattbereichs des Norderhever-Heverstrom zwischen 1936 bis 1990.	97
Tab. 6.25:	Flächen- und Tiefenverteilung der Seegatts des Norderhever-Heverstrom.	98
Tab. 6.26:	Perzentile der Tiefenwerte [in cm] in den Prielen des Teilbeckens am Seegatt des Norderhever-Heverstrom im Laufe der Zeit.	98
Tab. 6.27:	Perzentile der Hangneigung [in Grad] in den Prielen des Teilbeckens am Seegatt des Norderhever-Heverstrom im Laufe der Zeit.	99
Tab. 6.28:	Perzentile der Höhenwerte [in cm] auf den hohen Wattbereichen des Teilbeckens am Seegatt des Norderhever-Heverstrom im Laufe der Zeit.	99
Tab. 6.29:	Flächen-, Tiefen- und Volumenverteilung im Teilbecken des Seegattbereichs des Norderheverstrom zwischen 1936 bis 1990.	100
Tab. 6.30:	Flächen- und Tiefenverteilung der Seegatts des Norderheverstroms.	101
Tab. 6.31:	Perzentile der Tiefenwerte [in cm] in den Prielen des Teilbeckens am Seegatt des Norderheverstroms im Laufe der Zeit.	101
Tab. 6.32:	Perzentile der Hangneigung [in Grad] in den Prielen des Teilbeckens am Seegatt des Norderheverstroms im Laufe der Zeit.	102
Tab. 6.33:	Perzentile der Höhenwerte [in cm] auf den hohen Wattbereichen des Teilbeckens am Seegatt des Norderheverstrom im Laufe der Zeit.	102
Tab. 6.34:	Flächen-, Tiefen- und Volumenverteilung im Teilbecken des westlichen Heverstroms zwischen 1936 bis 1990.	103
Tab. 6.35:	Flächen- und Tiefenverteilung der Seegatts des Heverstroms.	104
Tab. 6.36:	Perzentile der Tiefenwerte [in cm] in den Prielen des Teilbeckens westlicher Heverstrom im Laufe der Zeit.	104
Tab. 6.37:	Perzentile der Hangneigung [in Grad] in den Prielen des Teilbeckens westlicher Heverstrom im Laufe der Zeit.	105
Tab. 6.38:	Perzentile der Höhenwerte [in cm] auf den hohen Wattbereichen des Teilbeckens westlicher Heverstrom im Laufe der Zeit.	105
Tab. 6.39:	Flächen-, Tiefen- und Volumenverteilung im Teilbecken des östlichen Heverstrom zwischen 1936 bis 1990.	106
Tab. 6.40:	Perzentile der Tiefenwerte [in cm] in den Prielen des Teilbeckens östlicher Heverstrom im Laufe der Zeit.	106
Tab. 6.41:	Perzentile der Hangneigung [in Grad] in den Prielen des Teilbeckens östlicher Heverstrom im Laufe der Zeit.	106
Tab. 6.42:	Perzentile der Höhenwerte [in cm] auf den hohen Wattbereichen des Teilbeckens östlicher Heverstrom im Laufe der Zeit.	107
Tab. 6.43:	Flächen-, Tiefen- und Volumenverteilung im Teilbecken der Holmer Fähre zwischen 1936 bis 1990.	108
Tab. 6.44:	Flächen- und Tiefenverteilung der Seegatts der Holmer Fähre.	109
Tab. 6.45:	Perzentile der Tiefenwerte [in cm] in den Prielen des Teilbeckens Holmer Fähre im Laufe der Zeit.	109
Tab. 6.46:	Perzentile der Hangneigung [in Grad] in den Prielen des Teilbeckens Holmer Fähre im Laufe der Zeit.	110
Tab. 6.47:	Flächen-, Tiefen- und Volumenverteilung im Teilbecken des Strandleys zwischen 1936 bis 1990.	111
Tab. 6.48:	Perzentile der Tiefenwerte [in cm] in den Prielen des Teilbeckens Strandley im Laufe der Zeit.	111
Tab. 6.49:	Perzentile der Hangneigung [in Grad] in den Prielen des Teilbeckens Strandley im Laufe der Zeit.	112
Tab. 6.50:	Perzentile der Höhenwerte [in cm] auf den hohen Wattbereichen des Teilbeckens Strandley im Laufe der Zeit.	112
Tab. 6.51:	Flächen- und Tiefenverteilung des Seegatts des Hoogelochs.	114

Tab. 6.52: Flächen-, Tiefen- und Volumenverteilung im Tidebecken des Hoogelochs zwischen 1936 bis 1992.	115
Tab. 6.53: Perzentile der Tiefenwerte [in cm] in den Prielen des Tidebeckens Hoogeloch im Laufe der Zeit.	115
Tab. 6.54: Perzentile der Hangneigung [in Grad] in den Prielen des Tidebeckens Hoogeloch im Laufe der Zeit.	115
Tab. 6.55: Perzentile der Höhenwerte [in cm] auf den hohen Wattbereichen des Tidebeckens Hoogeloch im Laufe der Zeit.	116
Tab. 7.1: Erwartete Effekte eines Meeresspiegelanstiegs von +0.44 m bis +2.0 m auf das Tideprisma (P) und den Seegattquerschnitt (Ac_{MThw}) des Norderhever-Heverstrom in Bezug auf die Situation von 1990.	128
Tab. 7.2: Erwartete Effekte eines Meeresspiegelanstiegs von +0.44 m bis +2.0 m auf das Tideprisma (P) und den Seegattquerschnitt (Ac_{MThw}) des Hoogeloch in Bezug auf die Situation von 1992.	130
Tab. 7.3: Erwartete Effekte eines Meeresspiegelanstiegs von +0.44 m bis +2.0 m auf das Tideprisma (P) und den Seegattquerschnitt (Ac_{MThw}) der Piep in Bezug auf die Situation von 1991.	131
Tab. 8.1: Vergleich der hochgerechneten Werte für 1991 mit dem gemessenen Werten. .	136
Tab. 8.2: Flächen-, Tiefen- und Volumenverteilung im Tidebecken Piep für das Szenario bis 2050.	137
Tab. 8.3: Vergleich der hochgerechneten Werte für 1990 mit den gemessenen Werten. ..	139
Tab. 8.4: Flächen-, Tiefen- und Volumenverteilung im Tidebecken Norderhever-Heverstrom für das Szenario bis 2050.	140
Tab. 8.5: Vergleich der hochgerechneten Werte für 1992 mit dem gemessenen Werten. .	142
Tab. 8.6: Flächen-, Tiefen- und Volumenverteilung im Tidebecken Hoogeloch für das Szenario bis 2050.	143

1. Einleitung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des im Zeitraum von 1998 bis 2001 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projektes „Programme zur langfristigen Erhaltung des Wattenmeeres (PROWATT)“. Übergeordnetes Ziel dieses Projektes war es, wissenschaftliche Grundlagen für die Bewertung und Planung von Programmen zur Bewahrung des Wattenmeeres in seiner heutigen Form und Ausdehnung zu liefern.

Der Beweggrund zur Initiierung dieses Projektes ist im Zusammenhang mit der aktuellen Diskussion zum Thema Klimaänderungen, dem damit verbundenen – möglicherweise beschleunigten – Meeresspiegelanstieg sowie dessen Auswirkungen auf die Küstenlandschaft zu sehen (vgl. z.B. SCHELLNHUBER & STERR 1993, STERR & SCHMIDT 1995).

Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) hat als wissenschaftliches Forum der UNO zum Thema Klimaänderungen im Jahr 2001 die neuesten Vorhersagen zu den zukünftigen Entwicklungen vorgelegt (IPCC 2001). Dabei wird davon ausgegangen, dass die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre anthropogen bedingt um ca. $31 \pm 4\%$ von etwa 280 ppm in der Periode von 1000 bis 1750 n. Chr. auf 358 ppm im Jahre 2000 zugenommen hat. Der für die Periode von 1990 bis 2100 hochgerechnete Zustand führt dabei in verschiedenen Szenarien, die sich u.a. durch unterschiedliche Annahmen zur weiteren Entwicklung der CO₂-Emissionen unterscheiden, zu einem Temperaturanstieg von 1.4 bis 5.8 °C (einschließlich 95 %-Konfidenzintervall). Hieraus wiederum resultiert ein Anstieg des Meeresspiegels – durch thermische Ausdehnung und Schmelzen von Eismassen – zwischen 0.09 und 0.88 m für den entsprechenden Zeitraum.

Wenn auch bei den oben genannten Zahlen regionale Variabilitäten zu berücksichtigen sind, so kommt den prognostizierten Veränderungen gerade für Küstenzonen als besonders von diesen Entwicklungen gefährdeten Gebieten eine große Bedeutung zu (vgl. z.B. SCHELLNHUBER & STERR 1993). Auch für die Wattgebiete der Nordseeküste, deren Ökosystem von herausragender ökologischer wie auch ökonomischer Bedeutung ist, lassen die vorhergesagten Prozesse eine substantielle Bedrohung erwarten, da eine landseitige Ausdehnung des Wattenmeeres als Reaktion auf einen Meeresspiegelanstieg aufgrund der Deichlinie der Festlandsküste heute nicht mehr möglich ist (STERR & SCHMIDT 1995).

Im Kontext dieser nachhaltigen Bedrohung sowie des übergeordneten Projektzieles wurden folgende wissenschaftlichen und technischen Arbeitsschritte definiert:

- Charakterisierung einzelner Subsysteme des Wattenmeeres hinsichtlich ihrer morphologischen und hydrologischen Entwicklung und Dynamik sowie Erarbeitung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen der Subsysteme;
- Prognosen von Trends der künftigen morphologischen Entwicklung der einzelnen Subsysteme unter Zugrundelegung von vorgegebenen hydrographischen Szenarien;
- Definition und Beschreibung von bestehenden und alternativen Steuerungsmaßnahmen zur Verringerung oder Vermeidung von Entwicklungen, die den Erhalt des Geosystems Wattenmeer in seiner heutigen Form und Ausdehnung gefährden können;
- Anwendung der Szenarien auf ausgewählte repräsentative Teilabschnitte des Wattenmeeres und/oder auf modellhaft vereinfachte Gebiete sowie Beurteilung der Folgen mittels Prozess-Reaktionsanalysen;
- Bilanzierung der möglichen Änderungen nicht mittels hydrodynamisch-numerischer Modelle, sondern vielmehr auf Basis einer wissenschaftlich begründeten qualitativen Darlegung der morphologischen Auswirkungen.

Die definierten Projektziele spiegeln sich im Aufbau der Arbeit wider. Beginnend mit einer systemaren Gliederung des Wattenmeeres wird in Kapitel 2 zunächst die Morpho- und Hydrodynamik erläutert, um die Entwicklung der einzelnen Subsysteme des Wattenmeeres zu verstehen.

Da das Wattenmeer in weiten Teilen nicht nur einer natürlichen Entwicklung unterliegt, sondern durch menschliche Eingriffe in Form von (Bau-)Maßnahmen beeinflusst wird, erfolgt im Anschluss in Kapitel 3 die Vorstellung der Küstenschutzmaßnahmen in Schleswig-Holstein sowie eine Diskussion von deren Wirkung auf die Morphologie.

Bevor mit den empirischen Auswertungen begonnen werden kann, wird in Kapitel 4 auf die vorliegenden unterschiedlichen Ausgangsdaten, die einen Zeitraum von 1936 bis 1992 abdecken, eingegangen. Sie wurden im Folgenden einheitlich weiterverarbeitet, so dass sie vergleichend analysiert werden können.

Die Erörterung der Methodik zur Auswahl der Untersuchungsgebiete ist Gegenstand von Kapitel 5. Mit Hilfe einer Clusteranalyse wird gezeigt, dass die drei Tidebecken Norderhever-Heverstrom, Hoogeloch und Piep eine Stellvertreterfunktion für andere schleswig-holsteinische Tidebecken ausüben. Mit dieser Auswahl werden gleichzeitig einem von menschlichen Eingriffen unbeeinflussten Tidebecken (Hoogeloch) zwei von baulichen Eingriffen (Vordeichung) beeinflusste Tidebecken gegenübergestellt (Piep und Norderhever-

Heverstrom).

Nach der Analyse der bisherigen morphologischen Entwicklung dieser drei Tidebecken (Kapitel 6) werden in Kapitel 7 Prognosen zur zukünftigen Entwicklung abgeleitet. Dabei ist zu untersuchen, wie die Tidebecken morphologisch auf einen beschleunigten Meeresspiegelanstieg reagieren werden, d.h. inwieweit sich eine Veränderung der hydrographischen Rahmenbedingungen in den Beckenparametern dokumentiert (z.B. eine Erosion im Seegatt durch eine Zunahme der entsprechenden mittleren Tiefe). Auch wird der Frage nachgegangen, ob es divergierende Entwicklungen zwischen den in ihrer Genese unterschiedlichen Becken von Nordfriesland (Hoogeloch und Norderhever-Heverstrom) und Dithmarschen (Piep) gibt.

Da die in Kapitel 7 verwendete Methodik keine Anpassung der Morphologie auf einen Meeresspiegelanstieg berücksichtigt, wird in Kapitel 8 ein auf einer statistischen Hochrechnung der Watttopographie beruhendes Verfahren vorgestellt, bei dem eben diese morphologische Anpassung aus den bisherigen Veränderungen geschätzt wird. Anschließend ist zu prüfen, ob sich dadurch vorhergesagte Beckenentwicklungen (z.B. die Abnahme von Wattflächen) abschwächen oder möglicherweise sogar noch verstärken werden.

In Kapitel 9 kommen schließlich verschiedene 3D-Darstellungen und Animationen zum Einsatz, mit denen sich die komplexen morphologischen Veränderungen dynamisch bzw. interaktiv visualisieren und analysieren lassen.

2. Charakterisierung des schleswig-holsteinischen Wattenmeeres

Das Wattenmeer ist ein durch Gezeiten geformter Naturraum, der sich von Blåvandshuk in Dänemark über die Innere Deutsche Bucht bis nach Den Helder in den Niederlanden erstreckt (Abb. 2.1). Landwärts ist das Wattenmeer in der Regel durch den Deich begrenzt, wohingegen das Tiefenintervall zwischen der -10 m bis -13 m Tiefenlinie festgesetzt wird, um das Wattenmeer seewärts abzugrenzen. In diesen Tiefenbereichen befindet sich die so genannte Wellenbasis, die gerade die Grenze bezeichnet, bis zu der die wind- und tidebedingten Kräfte Materialumlagerungen auslösen können (OOST 1995). Ein wesentliches charakteristisches Merkmal von Gezeitenküsten sind die ausgedehnten Wattflächen, die zweimal täglich überflutet werden und wieder trocken fallen. Sie stellen eine Übergangszone zwischen dem Festland und der offenen Nordsee dar. Die Watten zählen infolge der sie durchschneidenden Gezeitenrinnen bzw. Prielen zu den äußerst dynamischen Küstenregionen der Welt, deren Gestalt sich mit jeder einlaufenden Tide verändert.

Aufgrund seiner engen Verflechtung von Hydrologie und Morphologie gehört das Wattenmeer zu den Gebieten mit höchster Sensibilität hinsichtlich eines weiteren Meeresspiegelanstiegs. Aber auch die prognostizierten Klimaänderungen, wie die Zunahme der Sturmfluthäufigkeit und -intensität sowie Änderungen des Seegangklimas im Nordseeraum, werden einen erheblichen Einfluss auf die langfristige morphologische Stabilität haben.

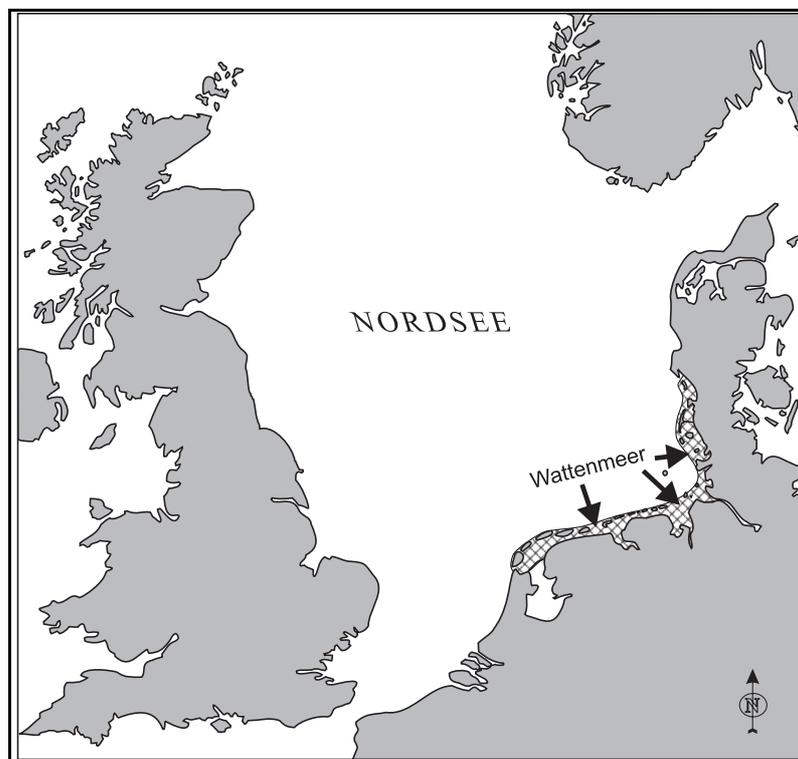


Abb. 2.1: Lage des Wattenmeeres.

Quelle: SPIEGEL 1997

Seit Mitte der achtziger Jahre wurde die Aufmerksamkeit der Öffentlichkeit mit der Einrichtung eines Nationalparks auf die große Bedeutung des Wattenmeeres als Ökosystem gelenkt. Das Wattenmeer ist weltweit ein einzigartiger Lebensraum. Es ist eines der letzten großräumig naturnahen Ökosysteme Mitteleuropas – es gilt als das vogelreichste Gebiet Europas – und genießt somit nicht nur national, sondern auch international einen hohen Stellenwert. Deutschland ist deshalb z.B. mit dem „Trilateralen Monitoring und Assessment Programm (kurz: TMAP)“ internationale umweltpolitische Verpflichtungen zur Erhaltung dieses Ökosystems eingegangen. Diese Verpflichtungen führten zur Gründung der drei deutschen Wattenmeer-Nationalparks, um einen höchstmöglichen gesetzlichen Schutz zu erzielen. Der Schleswig-Holsteinische Nationalpark wurde am 1.10.1985 ausgewiesen und umfasst allein eine Fläche von 273 000 Hektar.

Der ständige Wechsel von Ebbe und Flut stellt extreme Lebensbedingungen an die Tier- und Pflanzenwelt (z.B. durch starke Schwankungen des Salzgehaltes). Trotz dieser Bedingungen konnten sich viele Arten anpassen und sorgen für eine hohe Produktivität im Wattenmeer, das beispielsweise als „Kinderstube“ für viele Fischarten gilt. Diese gelten wiederum als willkommene Nahrungsgrundlage für die zahlreichen (Zug-)Vögel, von denen sich bis zu 12 Mio. pro Jahr im Wattenmeer aufhalten (SCHERER 1998, S. 12).

Das Wattenmeer ist jedoch nicht nur aus ökologischer Sicht ein schützenswerter Raum. Die wirtschaftliche Nutzung durch die Fischerei und dem Tourismus ist ebenso wie die Erdöl- und Gasförderung von Interesse. In neuester Zeit gibt es zudem erste Planungen für Offshore-Windparks zur Energiegewinnung im Küstenvorland.

Die aktuelle Gestalt des Wattenmeeres ist stark durch den Eingriff des Menschen geprägt. Deiche und andere wasserbauliche Maßnahmen wie z.B. das Eidersperrwerk oder die Speicherbecken dienen sowohl dem Schutz vor Sturmfluten als auch einer verbesserten Binnenentwässerung. Die letzten Vordeichungen sind seit Mitte des letzten Jahrhunderts nicht mehr mit dem Ziel der Landgewinnung in Angriff genommen worden, sondern entweder zur Deichverkürzung – um Unterhaltskosten sparen zu können – oder um zur besseren kontinuierlichen Entwässerung der Marschen durch große Speicherbecken beizutragen (Hauke-Haienkoog, Beltringharder Koog, Speicherbecken Dithmarschen).

Das schleswig-holsteinische Wattenmeer soll im Folgenden in seinen Grundlagen beschrieben und anhand seiner Subsysteme charakterisiert werden. Um die heutige Formenvielfalt des Wattenmeeres besser nachvollziehen zu können, ist es sinnvoll, die Genese des Wattenmeeres voranzustellen.

2.1 Genese

Die Entstehung des Wattenmeeres steht in engem Zusammenhang mit der nacheiszeitlichen Erwärmung und dem damit verbundenen Meeresspiegelanstieg. Paläobotanische Aufnahmen aus dem Gebiet der Niederlanden beweisen, dass das Nordseebecken und das dazugehörige Hinterland seit dem frühen Pleistozän mindestens drei Vereisungen ausgesetzt war, bei dem es ganz oder teilweise von Eis bedeckt war (Elster-, Saale- und Weichselglazial). Zwischen diesen Glazialen, d.h. den so genannten Interglazialen stieg die Temperatur wieder an und es entwickelten sich tidale marine Bedingungen, die den heutigen sehr ähnlich waren (CAMERON et al. 1993). Während des Hochglazials der Weichsel-Kaltzeit – dem letzten Glazial – lag der Meeresspiegel des Weltmeeres ca. 110 m tiefer als heute (JANSEN 1979). Das heutige Nordseebecken war bis zur Linie Nordschottland – Skagen eisfrei. Aolische und fluvioglaziale Sande lagerten sich in weiten Teilen des Beckens vor den Eisgrenzen ab. Aufgrund der nacheiszeitlichen Erwärmung und der damit abschmelzenden Eismassen gab es zunächst einen steilen Anstieg des Meeresspiegels. Vor 10 000 Jahren lag der Meeresspiegel 65 m unter dem heutigen und das Meer war bis zur Doggerbank vorgedrungen (JELGERSMA 1979). Die südliche Nordsee wurde mit dem Englischen Kanal über die Strasse von Dover vor ca. 8 300 Jahren verbunden und erlangte voll-marine Bedingungen. Der Meeresspiegelanstieg verlangsamte sich im Laufe der Zeit, so dass er vor 5 000 Jahren bei einem Niveau von etwa NN - 7 m in der Deutschen Bucht lag und in einigen Gebieten die Sedimentation überwog (BEHRE 1987). In diesen Zeitraum fällt die eigentliche Entstehung des Wattenmeeres. Im weiteren Verlauf konnte sich im Holozän ein bis zu 55 m mächtiges Sedimentpaket ablagern (STREIF 1990).

In Schleswig-Holstein haben sich aufgrund unterschiedlicher geologischer Voraussetzungen die Gebiete Nordfriesland und Dithmarschen ungleich entwickelt. Die daraus resultierende heutige Formenvielfalt mit einem Barriersystem, bestehend aus Geestinseln und ausgedehnten Außensänden in Nordfriesland, und dem Fehlen eines solchen in Dithmarschen unterstreicht diese Aussage (SCHMIDTKE 1995).

Das heutige Nordfriesland ist nur noch ein Rest einer ehemals vom östlichen Geestrand weit nach Westen reichenden Landschaft. Die Abschwächung des Meeresspiegelanstiegs führte hier zu einer verstärkten Sedimentation. Das Material zur Sedimentation lieferten vorwiegend die saale-zeitlichen Geestkerne westlich der heutigen Geestinseln Sylt, Amrum und Föhr. Durch einen nach Südwesten gerichteten küstenparallelen Transport dieser Sedimente kam es zur Bildung einer Nehrungslinie, die der Tide – bis auf einzelne kleinere Priele – den Weg in das nordfriesische Hinterland versperrte. Im Hinterland entstand eine Senke zwischen der Geest und der Nehrung, die durch Sümpfe, Moore und Bruchwälder bestimmt war (BANTELMANN 1967).

Um das Jahr 1000 wurde das Hinterland vom Menschen kultiviert. Er wohnte auf Wohnhügeln, den so genannten Warften, baute Entwässerungssysteme und stach Torf ab, was im Laufe der Zeit zu einer Landabsenkung führte. Bei der Marcellusflut – oder auch der „1. groten Manndränken“ – am 16.01.1362 durchbrach das Meer den Nehrungswall und überflutete in verheerendem Ausmaß weite Gebiete des nordfriesischen Hinterlandes. Am 11. Oktober des Jahres 1634 wurden bei einer weiteren großen Sturmflut – der „2. groten Manndränken“ – die Reste des mittelalterlichen Landes vernichtet, wobei der Untergang der Insel Strand mit dem Verlust von 6000 Menschenleben besonders folgenschwer war (SCHMIDTKE 1995, HIGELKE 1998). Nach dieser letzten großen Sturmflut blieb annähernd die heutige Gestalt des nordfriesischen Wattenmeeres mit seinen (Geest-)Inseln, den Halligen sowie den Vor- und Außensänden übrig (vgl. Abb. 2.2).

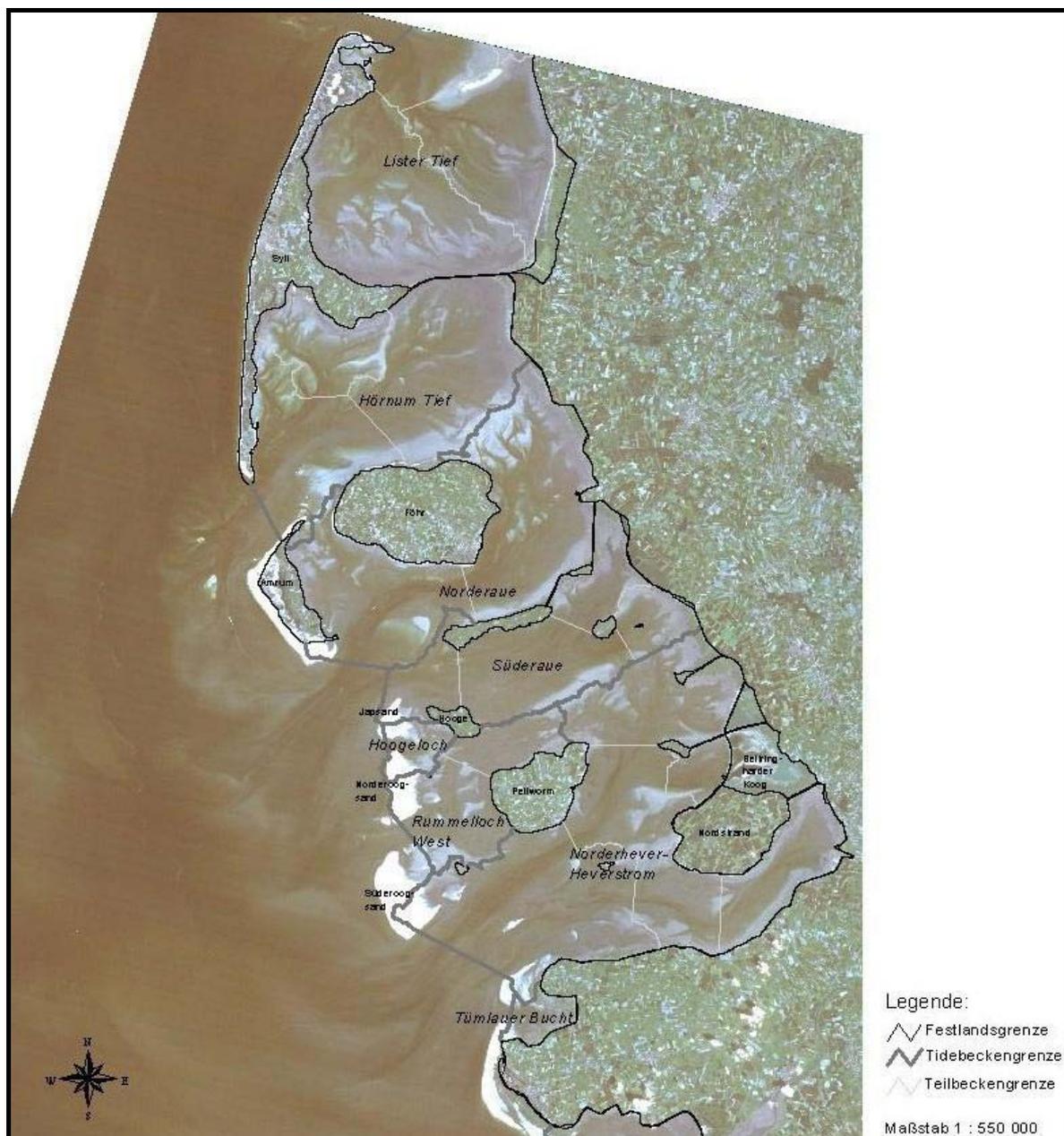


Abb. 2.2: Landsat TM-Szene des Nordfriesischen Wattenmeeres vom 27.06.1995 (Kanalkombination: 3, 2, 1).

Südlich anschließend zwischen Nordfriesland und Dithmarschen bildete sich die Halbinsel Eiderstedt aus. Sie trennt die beiden unterschiedlichen Wattgebiete und hat zudem über die verschiedenen Entwicklungsstadien von einer Sandbank über eine Marscheninsel bis hin zu einer Halbinsel eine eigenständige Entwicklung erfahren.

In Dithmarschen gab es seewärts keine vorgelagerten Geestkerne, die eine Barriere ausbilden konnten. Bei ungestörten Sedimentationsbedingungen konnte sich die Marsch kontinuierlich seewärts ausdehnen. Die Nordsee brandete an den Dithmarscher Geesthang und schuf Kliffe, was allmählich zu einer östlichen Verlagerung des Geestrandes führte. 1500 v. Chr. hatte die Rückverlagerung der Küstenlinie von gebietsweise 8 - 10 km dazu geführt, dass z.B. Meldorf zur Hafenstadt wurde. Auch in Dithmarschen entstanden durch küstenparallele Strömungen Nehrungen (z.B. Lundener Nehrung). Dahinter verlandeten die Buchten und bildeten Haffe und große Moore (DITTMER 1952, GRIPP 1964). Durch die weiter anhaltende Sedimentation der saale-zeitlichen Geest und Sinkstoffe des Meeres bildete sich vor den Nehrungen ein breiter Marschengürtel aus. Dort siedelten sich einige Menschen auf großen Gemeinschaftswarften (z.B. Wesselburen) an. Die mächtige Marscheninsel „Alt-Büsum“ wurde jedoch durch den weiter steigenden Meeresspiegel bis 1750 abgetragen, was vom einzigen nennenswerten Landverlust in Dithmarschen zeugt (SCHMIDTKE 1995). Die Landgewinnung wurde durch Eindeichung von aufgewachsenen Vorländern weiter betrieben, so dass sich das heutige Erscheinungsbild ergibt (Abb. 2.3).

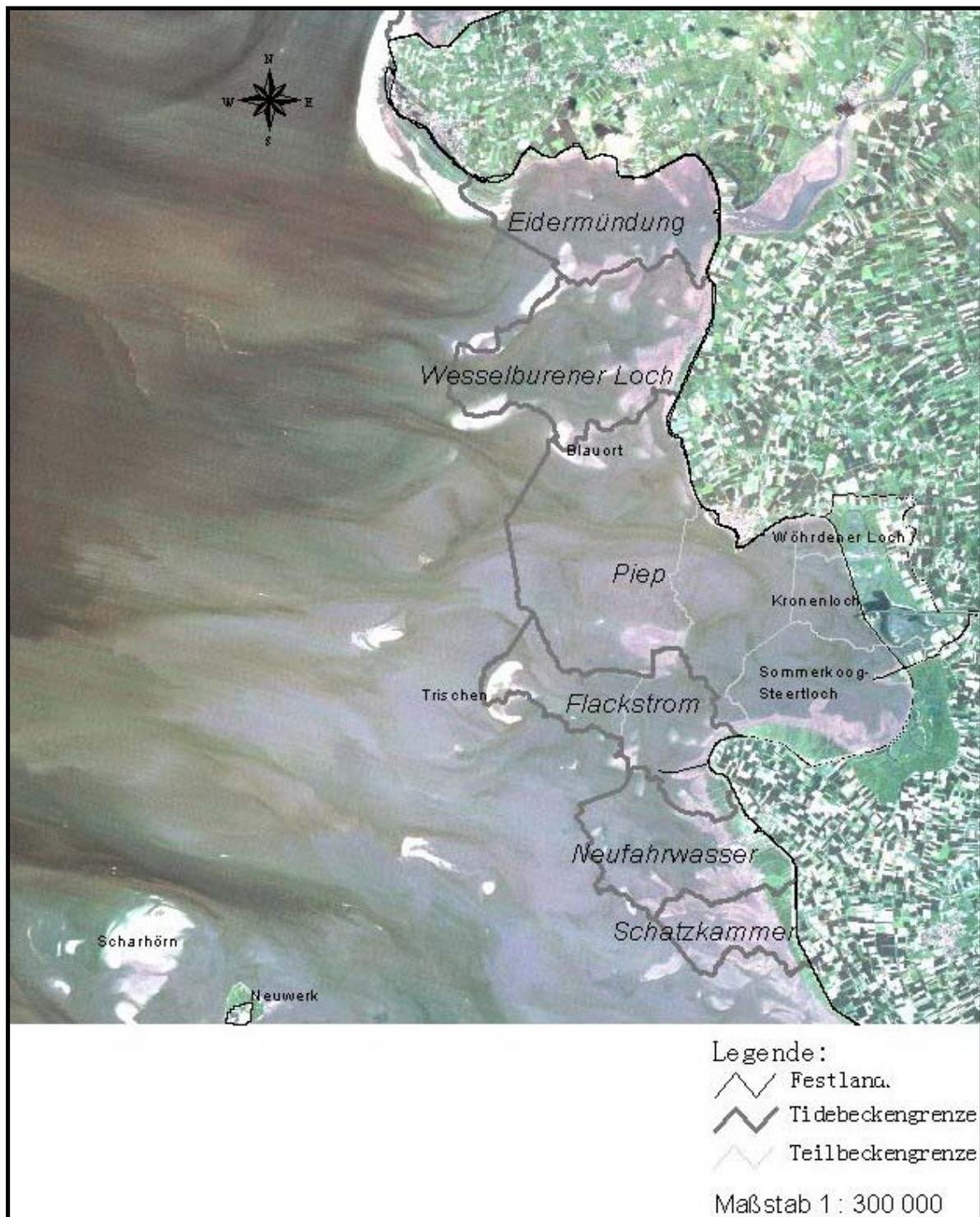


Abb. 2.3: Landsat TM-Szene des Dithmarscher Wattenmeeres vom 27.06.1995 (Kanalkombination: 3, 2, 1).

2.2 Systemare Gliederung

Die Abbildungen 2.2 und 2.3 zeigen die heutige Gestalt des schleswig-holsteinischen Wattenmeeres. Dort erkennt man schon die meisten Subsysteme des Wattenmeeres, die nun näher vorgestellt werden sollen. Insgesamt fallen zuerst die ausgedehnten Wattflächen ins Auge. Sie lassen sich nach REINECK (1978, 1982) in drei Typen gliedern. Der Typ der so genannten Rückseitenwatten bildet sich im Schutz vorgelagerter (Dünen-)Inseln (vor allem in West- und Ostfriesland und dem nördlichen Nordfriesland). Die offenen Watten befinden sich hinter niedrigen Strandwällen oder Sandplatten und kommen besonders im südlichen Schleswig-Holstein vor. Der dritte Typ der Buchten- oder Ästuarwatten ist hauptsächlich in Jade, Dollart, Ems, Weser und Elbe ausgebildet und spielt in Schleswig-Holstein nach dem Bau des Eidersperrwerks keine Rolle mehr.

Klassifiziert man das Wattenmeer in Bezug auf die Wasserbedeckung, so erhält man die drei Bereiche des Sublitorals, des Eulitorals und des Supralitorals, die sich auch morphologisch unterscheiden. Das Sublitoral ist der Bereich, der ständig mit Wasser bedeckt ist; er wird im Wesentlichen durch die tiefen Rinnen dargestellt. Die Wattflächen bilden das Eulitoral, die weitgehend eben sind und von der Hochwasserlinie zur Niedrigwasserlinie schwach geneigt sind. Priele zerschneiden diese Flächen und be- und entwässern sie. Das Supralitoral erstreckt sich von der Hochwasserlinie bis zum Deich und zeichnet sich durch Salzwiesen aus (REINECK 1978). Diese Unterteilung des Wattenmeeres nach der Wasserbedeckung kann auch zur Charakterisierung seiner Subsysteme – beispielsweise eines Tidebeckens (vgl. Kap. 2.3) – herangezogen werden. Diese Art der Charakterisierung erfolgt in Kapitel 5, wo besonders auf die zeitliche Entwicklung einzelner Subsysteme des Wattenmeeres eingegangen wird. Weitere Typisierungen des Wattenmeeres finden sich z.B. bei EHLERS (1988), OOST (1995) und RODLOFF (1970a, b).

HAYES (1979) hat sandige Gezeitenküsten, zu denen das Wattenmeer zählt, mit Hilfe des Tidenhubs klassifiziert. Der Tidenhub ist das arithmetische Mittel aus dem Betrag, um den das Wasser während der Flut steigt, plus den Betrag, um den das Wasser während der Ebbe fällt (vgl. Abb. 2.4).

3.7 m. Der Tidenhub nimmt sowohl von Westen nach Osten als auch von Norden nach Süden zur Inneren Deutschen Bucht zu und erreicht in den Ästuaren der Elbe und der Weser sogar mit 4 m noch höhere Werte (SIEFERT 1990). Im Wattenmeer befinden sich in den Randbereichen in Dänemark und den Niederlanden niedrige mesotidale, in Nordfriesland und den ostfriesischen Inseln hohe mesotidale und in Dithmarschen bis ungefähr zur Jadebucht niedrige makrotidale Verhältnisse.

Nach dieser Einteilung müssen in Schleswig-Holstein Nordfriesland und Dithmarschen getrennt betrachtet werden. Nordfriesland hat mesotidale Verhältnisse, für die Barriereinseln, Ebbdeltas, Seegatts, Watten und die Salzwiesen charakteristisch sind. Hingegen herrschen in Dithmarschen, dem Bereich mit dem höchsten Tidenhub im Wattenmeer, makrotidale Verhältnisse vor, für die vor allem ausgedehnte Wattflächen und Salzwiesen typisch sind. Nimmt der Tidenhub zu, so verschwinden die Barriereinseln und man findet stattdessen Sände wie Trischen, Tertius und Blauort.

2.3 Morphodynamische Einheiten

Bei einer detaillierten Betrachtung fällt die Vielfältigkeit der morphologischen Formen des Wattenmeeres auf. Zum besseren Verständnis dieses komplexen Systems sollen erst die einzelnen morphodynamischen Einheiten (Subsysteme) und danach die darauf einwirkende Hydrodynamik eingehender vorgestellt werden.

Zuvor sollen jedoch die von VEENSTRA definierten Randbedingungen aufgeführt werden, die für die Entstehung des Wattenmeeres erforderlich sind (1976 bei DIECKMANN 1985):

- die Zufuhr von Sedimenten aus dem Meer,
- ein Tidenhub in der Größenordnung von mehreren Metern,
- ein allmählich abfallender Meeresboden,
- ein relativer Wasserspiegelanstieg und
- Inseln zum Schutz gegen die Brandungswirkung der Wellen.

Aufgrund regionaler und lokaler Unterschiede in den genannten Randbedingungen kommt es im schleswig-holsteinischen Wattenmeer zur Ausprägung unterschiedlicher Subsysteme, die in Abbildung 2.6 schematisch in einer räumlichen Abfolge von der offenen Nordsee zur Deichlinie dargestellt sind. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass nicht alle der Elemente in jedem Bereich des Wattenmeeres in dieser Abfolge vorkommen müssen.

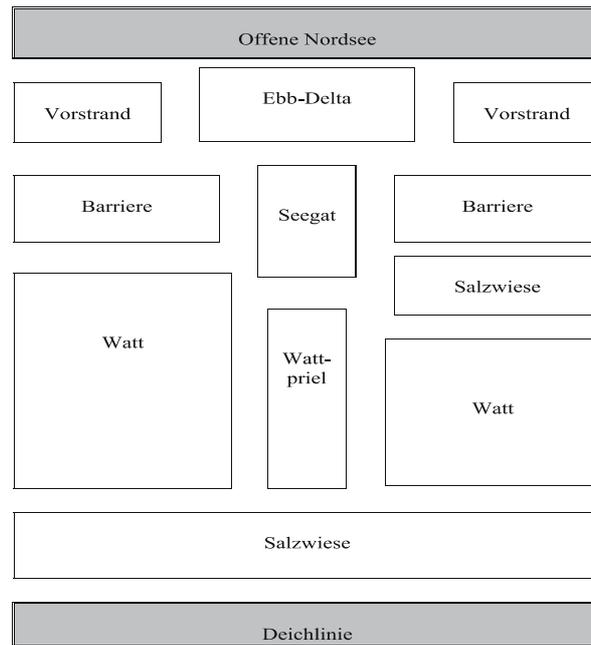


Abb. 2.6: Elemente eines Wattenmeer-Tidesystems.
Quelle: HOFSTEDÉ (1999c)

Die seewärtige Grenze des Wattenmeeres zur offenen Nordsee wird oftmals durch einen **Vorstrand** gebildet. Der Vorstrand erstreckt sich von der Wellenbasis (vgl. Kap. 2.4) bis zum mittleren Tidehochwasser-Niveau (kurz: *MThw*). In diesem Bereich findet vor allem die Umwandlung der von der offenen Nordsee anbrandenden Seegangsenergie statt.

Direkt an den Vorstrand schließt sich landwärts die **Barriere** an. Die Barriere ist seeseitig durch die *MThw*-Linie abgegrenzt und hat einen fließenden Übergang zum dahinter liegenden Watt oder zur Salzweise. Eine Barriere kann sowohl durch eine Insel als auch durch einen Außensand gebildet werden. Sie ist ein Akkumulationskörper, in dem das im Vorstrand durch Seegang aufgewirbelte und durch Seegangs-, Tide- und windinduzierte Strömung transportierte Material langfristig zur Ablagerung kommt (HOFSTEDÉ 1999c).

Zwischen den Barrieren findet man die **Seegatts**. Es handelt sich hierbei um meist tiefe Rinnen, durch welche die Tidewassermassen bei Flut in das hinter der jeweiligen Barriere liegende Einzugsgebiet einströmen und bei Ebbe wieder ausströmen. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Morphodynamik von Seegatts generell durch Tideströmungen dominiert wird (DEAN 1988, OOST 1995). Das große Wasservolumen, das sich in kurzer Zeit durch diesen schmalen Durchlass drängen muss, verursacht starke Strömungen, die wiederum große Erosionskraft besitzen. Deshalb kommt es insbesondere im Bereich des schmalen Durchlasses zu Vertiefungen relativ zum umgebenen Meeresboden. Die durch den Seegang und Tide hervorgerufenen küstenparallelen Strömungen begrenzen durch Sandablagerungen an den Spitzen der Barrieren das Seegatt, wohingegen die küstenquergerichteten Trift- und Tideströmungen

im Seegatt durch Erosion an den Inselenden das Seegatt offen halten.

Seewärts des Seegatts liegt als Akkumulationskörper das **Ebbdelta**. Mit der starken Ebbe-Strömung und – während Sturmfluten – der sekundären Triftströmung wird Sediment aus dem tidalen Einzugsgebiet zur offenen Nordsee transportiert. Nach dem Durchfluss durch das Seegatt verbreitert sich der Querschnitt für die austretenden Wassermassen, so dass sich die Strömungsgeschwindigkeit nachhaltig verringert und sich Sediment im Ebbdelta ablagert. Das Ausmaß, mit dem der Ebbstrom dem küstenparallelen Sedimenttransport entgegen treten kann, hängt sowohl vom Tidenhub als auch der Größe des zu entwässernden Tidebeckens ab. Dominiert der Ebbstrom gegenüber dem Küstenlängstransport, so kann sich ein großes, weit in die offene See ragendes Ebbdelta entwickeln (z.B. Ebbdelta des Hörnum Tief). Überwiegt der küstenparallele Sedimenttransport, so entwickelt sich nur ein kleines Ebbdelta (BOOTHROYD 1985). Das Ebbdelta mit seinen Sedimentationskörper kann als Zwischenspeicher für den Sediment austausch zwischen offener Nordsee und dem Wattenmeer dienen. Insbesondere bei einem weiter steigenden Meeresspiegel könnte dieser Sedimentkörper als Speicher- und Pufferzone den Wattflächen zur Verfügung stehen (WALTON & ADAMS 1976). Die Riffplatten des Ebbdeltas wirken zudem ähnlich wie der Vorstrand als Energieumwandlungszone für die von der offenen Nordsee anbrandenden Wellen (NIEMEYER & KAISER 1997). Für Schleswig-Holstein konnte für das Ebbdelta des Hörnum Tiefs die Aussage bestätigt werden, dass die Morphodynamik nicht nur tidedominiert, sondern auch vom Seegang beeinflusst wird (SPITTA 1998, HOFSTEDE & SPITTA 2000).

Im Schutz der Barriere bilden sich die Wattflächen aus. Das **Watt** ist der Bereich, der sich zwischen dem mittleren Tidehochwasser und dem mittleren Tideniedrigwasser befindet und in der Regel den größten Flächenanteil im Wattenmeer einnimmt. Die Wattflächen sind bei näherer Betrachtung stark zergliedert und von Wattprieln zerschnitten. Der Seegang und die Brandung erreichen ihre maximale Wirkung in der Nähe der Niedrigwasserlinie und verlieren mit ansteigendem Niveau der Wattflächen an Kraft. Deshalb kommt es zu einer küstenparallelen Sortierung der abgelagerten Sedimente nach ihrer Korngröße. Diese Sedimentationszonen werden als Schlick-, Misch- und Sandwatt bezeichnet (DÖRJES 1978). Die Wattflächen bestehen im Wesentlichen aus Sandwatten (Feinsand und Mittelsand), hingegen beschränkt sich Schlickwatt (Ton- und Siltanteil über 50 %) auf Prielränder und Bereiche direkt an den Festlandsküsten, wo die Seegangs- und Brandungsenergie am geringsten ist.

Das Watt zeichnet sich dadurch aus, dass es während der Flutphase überströmt wird und während der Ebbphase trocken fällt. Unter normalen Wetterbedingungen handelt es sich um einen tidebedingten Akkumulationsraum, wobei die maximale Geländehöhe von der Überflutungsdauer sowie von Trift- und seegangsbedingten Strömungen begrenzt wird (GÖHREN 1968). Bei Sturmfluten können innerhalb kürzester Zeit bedeutende Materialumlagerungen auftreten.

Kleinere Formen auf den Wattflächen wie Sandwellen (engl. *sand waves*) und Barren unterliegen zum Teil raschen Verlagerungen, die teilweise während einer Tidephase auftreten können. Größere Formen wie die Wattplatten oder größere Priele zeigen dagegen innerhalb des Wattenmeeres nur geringe Lageveränderungen. Große Veränderungen erfolgen meist nur durch Eingriffe des Menschen (z.B. Vordeichungen, Bau von Verbindungsdämmen) (EHLERS 1988).

GÖHREN (1968) hat die so genannte Grenzhöhe der Wattflächen definiert (vgl. Abb. 2.7), die sich aus dem Verhältnis zwischen tidebedingter Sedimentation während ruhigen Wetterlagen und Erosion durch (Sturm-)Seegang ergibt. Diese Grenzhöhe kann für verschiedene Watteinzugsgebiete berechnet und als Charakteristikum dieser Gebiete gesehen werden. Sie lässt sich räumlich und zeitlich vergleichen, um Änderungen im System festzustellen. Die Grenzhöhe wird in Kapitel 6 als so genannte „charakteristische Wathöhe“ analysiert.

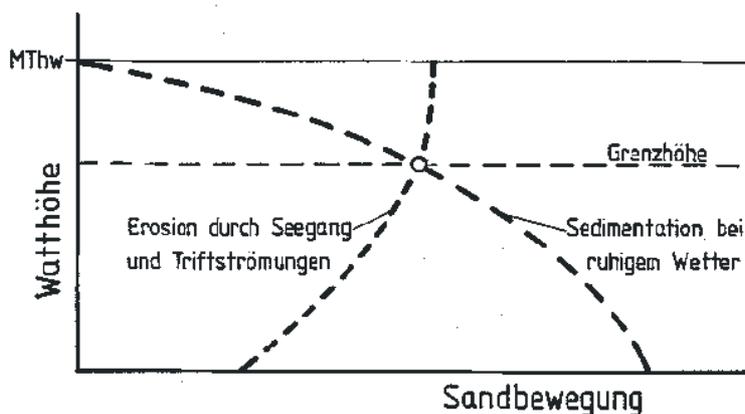


Abb. 2.7: Einfluss von Seegang, Strömung und Wetter auf die Höhenveränderungen im Watt (schematisch).
Quelle: DIECKMANN 1985 (nach GÖHREN 1968)

Die Be- und Entwässerung der Watten und der Salzwiesen erfolgt über die **Wattpriele**. Diese teilen sich von der Haupt- in mehrere Nebenrinnen auf und verästeln sich zu den hochgelegenen Wattflächen hin immer feiner. Die Hauptrinnen (Wattströme), die schließlich im Seegatt enden, sind auch bei Tideniedrigwasser ständig mit Wasser bedeckt.

Die Dichte der Priele differiert nach Sand- und Schlickwatt, wobei das Substrat im Wesentlichen die Anzahl der Verästelung und Ausbildung vor allem der kleinen Priele bestimmt. Die Priele im Sandwatt sind meist kurz und geradlinig, wohingegen die Priele im Schlickwatt stärker mäandrieren (EHLERS 1988).

Direkt vor dem Festland bzw. auf der Rückseite mancher Barrieren hat sich die **Salzwiese** angesiedelt, die einen tidebedingten Akkumulationskörper darstellt. Die Flächen der Salzwiese liegen über dem *MThw*-Niveau, so dass sie nur noch selten vom Meerwasser überflutet

werden und die Sedimente somit langfristig zur Ablagerung kommen.

Auf den über längere Zeiträume trocken fallenden, erhöhten Geländeoberflächen können sich salztolerante Pflanzen – die so genannten Halophyten – ansiedeln. Derartige natürliche Salzwiesen kommen heutzutage aber nur noch selten vor. In Hinblick auf den Küstenschutz wurden Lahnungsfelder gebaut, die eine erhöhte Sedimentation vor den Deichen fördern und somit die Grundlage zur Ansiedlung von Halophyten bilden.

Alle beschriebenen Subsysteme kommen in einem definierten Höhenbereich relativ zum Meeresspiegel vor. Deshalb sind sie auch alle von einem Meeresspiegelanstieg betroffen (HOFSTEDÉ 1999c). Untersuchungen an den schleswig-holsteinischen Außensänden (HOFSTEDÉ 1997, 1999b) haben deutlich gemacht, dass diese auf einen Anstieg des *MThw* mit einer landwärtigen Verlagerung (bis 1 600 m zwischen 1947 - 1991) reagiert haben. Durch die Fixierung der Küstenlinie durch den Deichbau ist ein Zurückweichen des gesamten Systems landwärts jedoch nicht mehr möglich, so dass es zwangsläufig zu einer Einengung kommt (engl. *coastal squeeze*).

Um dieses komplexe System mit seinen Subsystemen analysieren zu können, muss eine „Basiseinheit“ gefunden werden (DIECKMANN 1985, S. 196). Als derartige Basiseinheiten bieten sich das Tidebecken an. Die Analysen der morphologischen Gegebenheiten des Wattenmeeres erfolgen in dieser Arbeit auf der Grundlage von Digitalen Geländemodellen (vgl. Abb. 2.8). Diese werden mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems (kurz: GIS) erzeugt und im Weiteren analysiert.

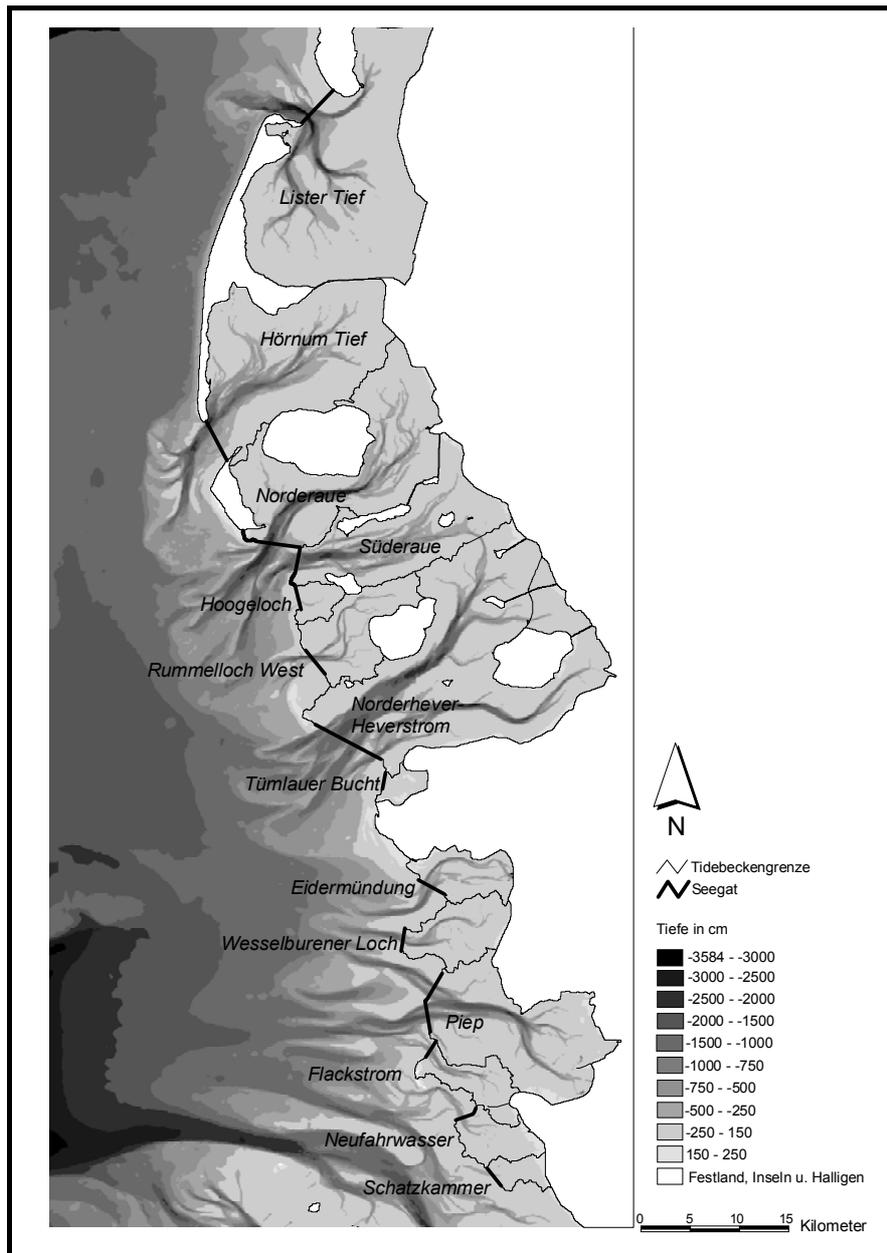


Abb. 2.8: Die Abgrenzung der 14 schleswig-holsteinischen Tidebecken auf Basis eines Digitalen Geländemodells (Auflösung von 50 m x 50 m).

Die Tidebecken lassen sich beschreiben als der Bereich des Wattenmeeres, der zur offenen See durch das Seegatt und die Barrieren und landwärts durch Deiche und/oder Dämme begrenzt wird (Abb. 2.8). Die Abgrenzung eines Tidebeckens zum benachbarten Becken erfolgt durch die aus der Topographie abzuleitenden Watthöhenscheiden, d.h. über die hoch liegenden Wattrücken, welche die beiden Be- und Entwässerungssysteme voneinander trennen. Diese Trennung erfolgt eigentlich über die Wattwasserscheiden und nicht über die Watthöhenscheiden (vgl. Abb. 2.9). Die Wattwasserscheiden verschieben sich ständig mit dem Tideablauf und den Windverhältnissen (z.B. Windstaueffekte) und sind nur durch intensive Strömungsmessungen erfassbar. Dahingegen sind die Watthöhenscheiden relativ einfach – mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems – aus den topographischen Informationen abzuleiten.

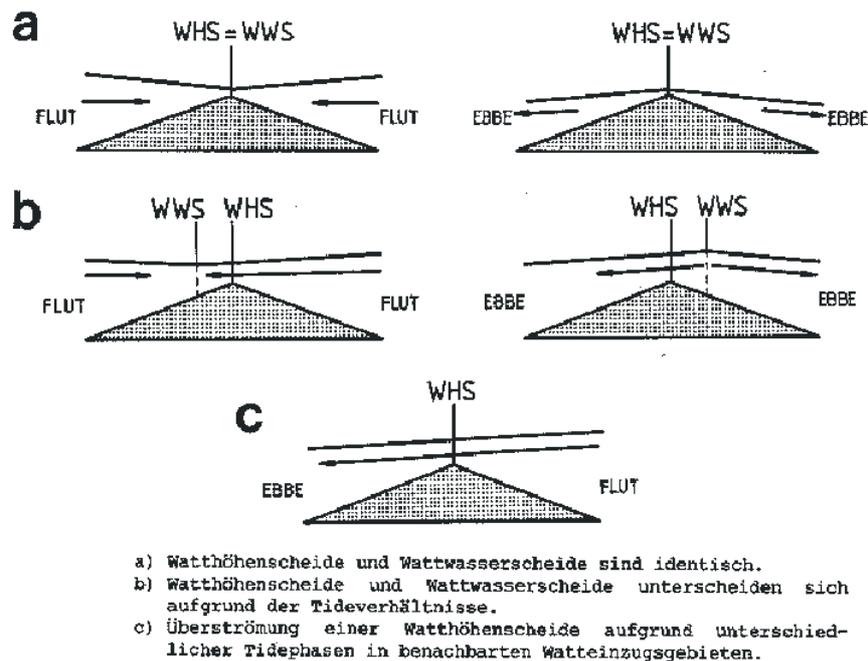


Abb. 2.9: Lage der Watthöhenscheide (WHS) und der Wattwasserscheide (WWS) bei Ebbe und bei Flut.
 Quelle: DIECKMANN 1985 (nach VERGER 1968)

2.4 Hydrodynamik im Wattenmeer

Nachdem die einzelnen Subsysteme vorgestellt wurden, soll nun näher auf die auf sie einwirkenden Kräfte eingegangen werden. Diese so genannten treibenden Kräfte werden unter dem Begriff der Hydrodynamik zusammengefasst.

Im Wattenmeer werden Materialumlagerungen im Wesentlichen durch strömendes Wasser ausgelöst. Bei einem ausreichend starken Energieeinfluss des strömenden Wassers auf die (Gewässer-)Sohle werden Partikel nach Überwindung der Scherfestigkeit aufgewirbelt und anschließend durch die Strömung transportiert. Der auf den Wattflächen vorherrschende feine und mittlere Sand mit einer Korngröße von 0.06 mm bis 0.2 mm kann nach HJULSTRÖM (1935) ab einer Strömungsgeschwindigkeit von 20 cm/s erodiert werden. Die Strömungsgeschwindigkeit auf den Wattflächen kann in seltenen Fällen über 50 cm/s ansteigen. In den Prielen kann die Strömungsgeschwindigkeit sogar 150 cm/s betragen (EHLERS 1988). Nimmt die Strömung ab, so lagern sich die Partikel je nach Korngröße und Gewicht wieder ab.

Die im Wattenmeer auftretenden Strömungen lassen sich in vier Hauptgruppen unterteilen (vgl. Abb. 2.10):

- Triftströmungen,
- Seegangsströmungen,
- Luftströmungen und
- Tidedrömungen.

Die ersten drei aufgelisteten Strömungen sind meteorologisch bedingte Strömungen, die durch den Wind angetrieben werden.

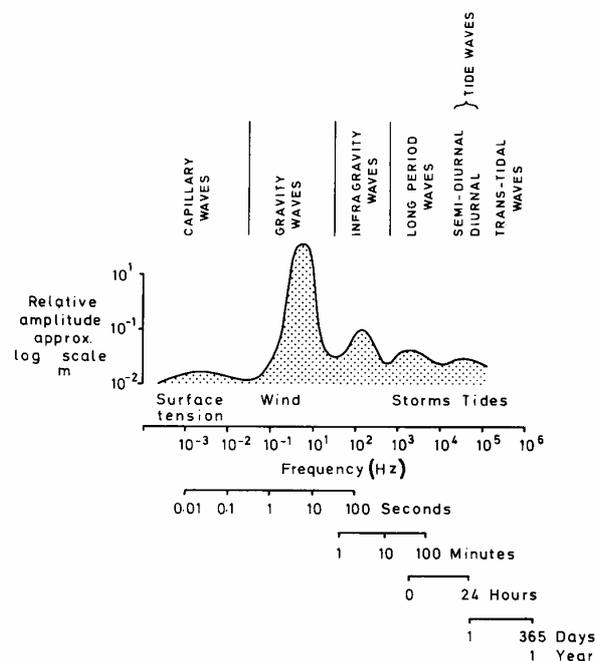


Abb. 2.10: Klassifizierung der Wellen auf Basis ihrer Frequenz.

Quelle: CARTER 1988 (nach MUNK 1951)

Durch den Wind induzierte Luftströmungen führen im Wattenmeer zu erheblichen Materialumlagerungen, besonders in den Bereichen, die längerfristig trocken fallen. Hierzu gehören z.B. die über *MThw*-Niveau herausragenden Außensände, die keinen Vegetationsbestand aufweisen. In einigen Bereichen der Außensände kann es sogar zur Bildung von Dünen kommen.

Wirkt Wind längerfristig auf eine Wasseroberfläche, so entsteht Seegang. Treten Wellen, die unter anderem durch ihre Höhe (H), Länge (L), Wassertiefe (d), Amplitude (A) und Periode (T) beschrieben werden, mit unterschiedlicher Höhe, Periode und Richtung nebeneinander an einer Stelle auf, so bilden diese unterschiedlichen Wellen das so genannte Seegangsspektrum. Die Wellenumgebung (engl. *wave environment*) hingegen wird durch das Verhältnis von der

Wassertiefe zur Wellenlänge definiert (vgl. Abb. 2.11). Beispielsweise ist im Flachwasser das Verhältnis $d/L < 0.1$. Die Form der Welle wird durch die Streichlänge (engl. *fetch*), Windgeschwindigkeit und Winddauer bestimmt.

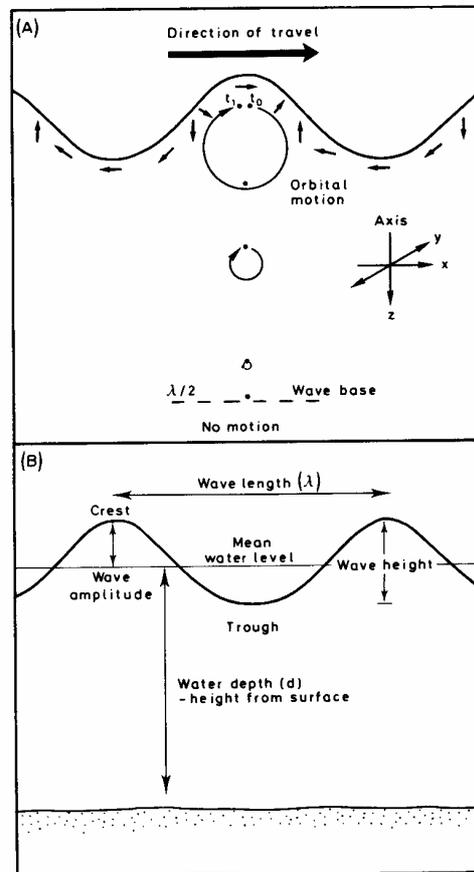


Abb. 2.11: Schematische Darstellung einiger Wellenparameter und -bewegung.
Quelle: CARTER (1988)

Die Energie bleibt solange in der Welle erhalten, bis diese auf die Küste trifft und in den flacheren Küstenbereichen Kontakt zur Sohle erhält. Ab einer Wassertiefe, die weniger als die halbe Wellenlänge beträgt, beginnen Interaktionen der Welle mit der Sohle. Dieser Bereich wird auch als Wellenbasis bezeichnet. Die Wellenbasis ist der Bereich, bei dem die Bewegungen der Oberflächenwellen den Boden erreichen und deformiert werden (vgl. Abb. 2.11). Beträgt die Wassertiefe nur noch ein Viertel der Wellenlänge, dann wird die Energieabgabe an die Sohle durch Bodenreibung so hoch, dass an sandigen Küsten Materialumlagerungen stattfinden können. Die vorher kreisförmige Bewegung der Wasserpartikel in der Welle (Orbitalbewegung) wird bei Kontakt mit der Sohle abgebremst und verformt, bis sie im Flachwasser horizontal fließt (Oszillation). Aus Untersuchungen von WOLF (1997) ist bekannt, dass mit abnehmender Wassertiefe die Dauer der landwärts gerichteten Komponente abnimmt, während die Geschwindigkeit zunimmt. Umgekehrt verhält es sich mit der seewärts gerichteten Komponente, so dass netto ein landwärts gerichteter Sedimenttransport vorherrscht. Der landwärts gerichtete Resttransport resultiert aus den höheren, dafür aber zeitlich

kürzeren, landwärtigen Strömungsgeschwindigkeiten. Aus Kontinuitätsgründen beim Massenerhalt hat man eine bodennahe seewärts gerichtete Strömung (engl. *undertow*), die bei energiereichen (Sturm-)Ereignissen einen erheblichen Materialtransport zur offenen See zur Folge haben kann (EHLERS 1988, CARTER 1988, DIETRICH et al. 1975, MASSEL 1989).

Treffen die Wellen nicht senkrecht, sondern in einem Winkel auf die Küste, so können küstenparallele Restströmungen (engl. *longshore currents*) entstehen, die einen küstenparallelen Resttransport von Sedimenten (engl. *longshore drift*) hervorrufen können. In der Inneren Deutschen Bucht treffen die von West nach Ost wandernden ostfriesischen und die von Nord nach Süd wandernden nordfriesischen Sedimente zusammen und kommen langfristig zur Ablagerung. Dies ist durch Untersuchungen niederländischer Arbeitsgruppen (z.B. CROMMERLIN 1940) bestätigt worden. Sie zeigen auf, dass von der Strasse von Calais an der belgischen, niederländischen und ostfriesischen Küste eine Sedimentverfrachtung in die Deutsche Bucht bis nach Dithmarschen besteht. Andererseits gabeln sich vor Westerland/Sylt die küstennahen Strömungen in einen nördlichen Zweig, der Material nach Dänemark verfrachtet, und in einen südlichen Zweig, der Material von Norden bis nach Dithmarschen transportiert. Die von beiden Seiten zugeführten Sedimente sorgen für die breiten Anlandungen der Marsch und des Watts vor der Küste Dithmarschens (GRIPP 1964, S. 287).

Die ebenfalls durch den Wind bedingten Triftströmungen entstehen durch die Übertragung eines Teils der Windenergie auf die Wasseroberfläche. Durch die molekulare Reibung werden die oberflächennahen Wasserpartikel in Richtung der Windschubkraft bewegt (MASSEL 1989, GÖHREN 1968). Die darunter liegenden Wasserschichten werden ihrerseits durch die an ihrer Grenzschicht entstehende Reibung bewegt. Dieser Prozess setzt sich mit zunehmender Wassertiefe fort. Auch bei dieser Art von Strömung gibt es in den tieferen Schichten aus Kontinuitätsgründen Ausgleichsströmung, die so genannte sekundäre Triftströmung. GÖHREN (1968) konnte nachweisen, dass bei starken Winden die Materialumlagerungen durch Triftströmungen sehr viel höher sein können als durch normale Tideströmungen.

Die Tide ist im Gegensatz zu den drei anderen genannten Strömungen nicht wind-, sondern astronomisch bedingt. Die so genannten Tidewellen lassen sich ebenfalls durch ihre Höhe (Tidenhub), Länge und Periode (Tidedauer) beschreiben (vgl. Abb. 2.3). Trifft die Tidewelle auf die Küste, so kann sie reflektiert oder dissipiert, d.h. umgewandelt werden.

Die Tideströmung wird bestimmt durch die Tidebewegung, die wiederum durch die Anziehungskräfte des Mondes und der Sonne auf die Erde verursacht wird. Stehen Sonne und Mond in einer Linie zu einem Punkt auf der Erde, so summieren sich dort die Anziehungskräfte und die Auslenkung der Wassermassen und verstärken sich zu einer so genannten Springtide. Bei einem Winkel von 90° zwischen Sonne und Mond kommt es dagegen zu einer

Nipptide. Bei der Drehung des Mondes um die Erde in 29 Tagen ergeben sich also zwei Spring- bzw. Nipptiden im Monat. Allerdings gibt es darüber hinaus viele Schwankungen im Tidenhub, die sich aus langperiodischen Schwankungen der Entfernung zwischen Erde, Mond und Sonne oder aus nicht-periodischen Schwankungen durch lokale meteorologische oder hydrologische Kräfte ergeben. Die langperiodischen Schwankungen sind berechenbar (z.B. die so genannte Nodaltide mit einer Periode von 18.61 Jahren; CARTER 1988, S. 155, MASSEL 1989).

Wie auf alle sich auf der Erde bewegenden Massen wirkt die Corioliskraft (ablenkende Kraft der Erdrotation) auch auf die Tidewelle. Die Kombination aus der Geometrie des Meeresbeckens und der Corioliskraft führt zur Ausbildung eines amphidromischen Systems. Im Zentrum dieses Systems befindet sich ein Amphidromieknoten, um den herum die Tidewelle läuft (Abb. 2.12). Bei abnehmender Wassertiefe nehmen die Fortschrittsgeschwindigkeit dieser Welle ab und die Höhe (Tidenhub) zu. Zusätzlich tritt der Effekt auf, dass der Tidenhub mit zunehmender Entfernung vom Amphidromiepunkt zunimmt. Der Tidenhub kann bei offenen Küsten einen Wert von bis zu 2.5 m erreichen, in Buchten oder Randmeeren durch verstärkte Mitschwingung jedoch bis zu 15 m (z.B. in der Bay of Fundy/Kanada; CARTER 1988, DIETRICH et al. 1975).

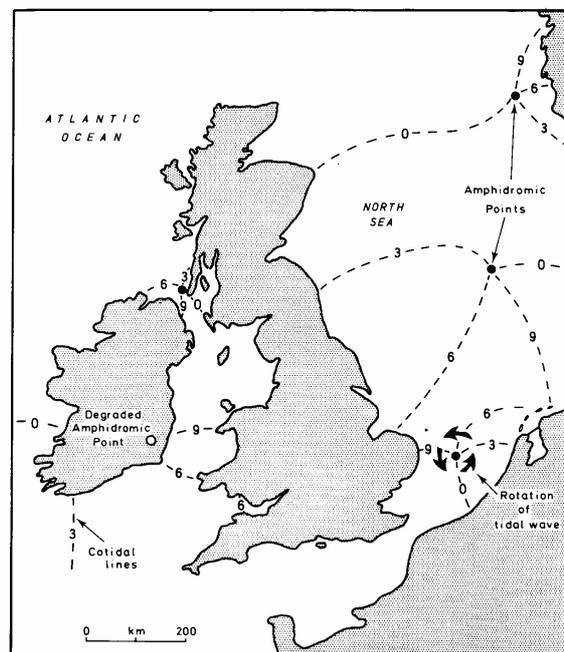


Abb. 2.12: Rotierende Tidewelle um die vier Amphidromieknoten in der Nordsee.
Quelle: CARTER 1988

LASSEN & SIEFERT (1985) haben die Tideverhältnisse in der Deutschen Bucht untersucht. Sie kamen zu dem Schluss, dass die besonderen Tideverhältnisse den Erhalt des Wattenmeeres fördern, weil die Flutdauer (T_F) fast überall kürzer ist als die Ebbdauer (T_E). Das Verhält-

nis T_F/T_E beträgt im Mittel 0.84. Das bedeutet, dass der Flutstrom stärker ist als Ebbstrom und somit das durch die Flut eingebrachte Sediment nicht wieder durch den Ebbstrom heraus transportiert wird. Anhand mehrerer Hauptpegel (z.B. Cuxhaven, Büsum und Wittdün) wurde in Langzeitanalysen die Flut- und Ebbdauer berechnet. So stellte man fest, dass in der Regel in Richtung Küste die Flutdauer zu- und die Ebbdauer abnimmt. Die Tidekurven sind an keiner Stelle symmetrisch (vgl. Abb. 2.3).

Die Dynamik des Wattenmeeres wird nicht nur durch natürliche Rahmenbedingungen bestimmt, auch anthropogene Eingriffe prägen in erheblichem Maße dessen Entwicklung. Im Folgenden werden daher verschiedene Steuerungsmaßnahmen des Küstenschutzes vorgestellt und in ihrer morphologischen Wirkung diskutiert.

3. Küstenschutz in Schleswig-Holstein

Aus historischen Erfahrungen verheerender Sturmfluten sieht die Bevölkerung das Meer als Bedrohung an, vor dem es sich durch massive Deiche schützen muss. Im Schutz dieser Deiche sowie in unbedeichten Niederungsgebieten liegen mit ca. 3 800 km² ein fünftel der Landfläche Schleswig-Holsteins. In diesen Gebieten, die bei extremen Sturmfluten von Überschwemmungen bedroht sind, leben und arbeiten fast 350 000 Menschen (PROBST 2000).

Die außerordentliche Dynamik der Gezeitenküste und der prognostizierte beschleunigte Meeresspiegelanstieg haben wichtige Auswirkungen auf den zukünftigen Küstenschutz. Denn auch im Hinblick auf den Küstenschutz erlangt das Wattenmeer zunehmend an Bedeutung. Beschränkte sich Küstenschutz früher auf die Verstärkung der Deiche oder die Verkürzung der Deichlinie, so änderte sich diese Strategie seit Mitte der achtziger Jahre. Es wurde erkannt, dass dem flächenhaften Küstenschutz bei einem Meeresspiegelanstieg mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden muss (z.B. DIECKMANN 1984, 1990). Hierbei kommt unter anderem der Erhaltung des Wattenmeeres als Energieumwandlungszone vor den Deichen und somit natürlichem Schutz für die von der offenen Nordsee anbrandenden Wellen eine besondere Bedeutung zu.

Zu Beginn des Jahres 2001 wurde vom Ministerium für ländliche Räume, Landesplanung, Landwirtschaft und Tourismus (kurz: MLR) ein neuer Generalplan Küstenschutz aufgestellt (Entwurf vom 05.02.2001). Bisher entstand jeweils eine Fortschreibung, die im Abstand von 10 bis 15 Jahren erfolgen muss, um Anpassungen an Kosten und Maßnahmen vornehmen zu können. Die Bemessungsgrundlagen des Generalplans galten jedoch nur bis zum Jahr 2000, so dass eine Neufassung erstellt werden musste. Der neue Generalplan Küstenschutz ist mit „Integriertes Küstenschutzmanagement in Schleswig-Holstein“ untertitelt. Schleswig-Holstein hat im Küstenschutz damit einen neuen Weg eingeschlagen. Das integrierte Küstenschutzmanagement leitet sich aus dem international praktizierten „Integrated Coastal Zone Management“ (kurz: ICZM) ab. Die Europäische Union (kurz: EU) definiert das ICZM als einen dynamischen, kontinuierlichen und iterativen Prozess, durch den das nachhaltige Küstenzonenmanagement gefördert werden soll¹. Die Ziele eines ICZM sind eine nachhaltige Entwicklung, die Sicherheit gegenüber natürlichen Gefährdungen und die natürliche Dynamik und Biodiversität, wobei es sehr wichtig ist, dass sowohl die privaten als auch die öffentlichen Belange berücksichtigt werden. Daran angelehnt wird im Generalplan Küstenschutz der Begriff des Integrierten Küstenschutzmanagements (kurz: IKM) benutzt, der den kontinuierlichen und

¹ weitere Aussagen zu diesem Thema findet man unter: „Eine europäische Strategie für das integrierte Küstenzonenmanagement (IKZM): Allgemeine Prinzipien und politische Optionen.“ 1999 (http://www.europa.eu.int/comm/environment/iczm/voll_de.pdf)

dynamischen Planungsprozess bezeichnet, durch welchen die generellen Entscheidungen zum Schutz der Menschen und seiner Wertigkeiten gegenüber den Angriffen des Meeres getroffen werden (PROBST 2000). PROBST (2000) zeigt die wesentlichen Schritte mit dem Leitbild und Ziel, der Partizipation, den Klimafolgen und dem Risikomanagement bei der Erstellung des schleswig-holsteinischen IKM-Konzeptes auf. An dieser Stelle soll auf die ersten beiden Schritte kurz eingegangen werden. Der Aspekt der Klimafolgen wird in dieser Arbeit bei der konkreten Analyse der einzelnen Untersuchungsgebiete anhand von Szenarien behandelt. Der Bereich des Risikomanagements ist ein umfassender spezieller Forschungsbereich, der in eigens dafür beantragten Forschungsprojekten und Studien untersucht wird².

Bei der Neufassung des Generalplans Küstenschutz wurde ein Zielsystem für die Konzeption und Planung von Küstenschutzmaßnahmen bestehend aus Leitbild, Entwicklungszielen, Handlungszielen und Maßnahmen definiert. Das Leitbild ist der maximal zu erreichende Zielzustand, der in Schleswig-Holstein folgendermaßen definiert ist:

„Geschützt vor lebensbedrohenden Überflutungen durch Sturmfluten und vor den zerstörenden Einwirkungen des Meeres leben, arbeiten, wirtschaften und erholen sich die Menschen heute und künftig in den Küstengebieten von Schleswig-Holstein.“ (MLR 2001, S. 3)

Allerdings können andere Interessen, z.B. des Naturschutzes, diesem Leitbild entgegenstehen. Deshalb hat man realisierbare Kompromisse definiert, die sich unter Berücksichtigung von gesellschaftlichen Vorgaben und äußeren Begrenzungen dem Leitbild möglichst weit nähern. Sie werden als Entwicklungsziele bezeichnet, haben einen qualitativ-beschreibenden Charakter und gelten langfristig. Für diese Arbeit von besonderem Interesse ist das Entwicklungsziel, welches die Erhaltung der langfristigen Stabilität des Wattenmeeres anstrebt. Bei den darunter anzusiedelnden Handlungszielen müssen klare, quantitative Zielwerte festgelegt werden. Handlungsziele sind die handlungsorientierte (operative) Konkretisierung von Entwicklungszielen (MLR 2001). Es handelt sich also um die konkreten Maßnahmen des Küstenschutzes (z.B. Bau- und Instandhaltungsmaßnahmen), die in diesem Kapitel als so genannte Steuerungsmaßnahmen zum Teil detaillierter vorgestellt und deren Wirkungen auf die morphologische Entwicklung anschließend beispielhaft untersucht werden.

Bei der Partizipation werden die bei der Planung und Ausführung von Küstenschutzmaßnahmen Betroffenen eingebunden. Neben den schon bekannten und seit Jahren praktizierten Beteiligungen wie der Deichschau, dem Planfeststellungsverfahren und der Umweltverträglichkeitsprüfung werden mit Beiräten (z.B. Fachbeirat Vorlandmanagement) und Sensitivitätsana-

² vgl. z.B. das Gutachten: „Wertermittlung für die potentiell sturmflutgefährdeten Gebiete an den Küsten Schleswig-Holsteins“ des MLR oder die MERK-Studie des Forschungs- und Technologiezentrums Westküste (kurz: FTZ) in Büsum in Zusammenarbeit mit dem MLR

lysen (z.B. Küstenniederung der Gemeinden Timmendorfer Strand und Scharbeutz) neue Wege zur Bürgerbeteiligung gegangen.

3.1 Maßnahmen des Küstenschutzes

Im Folgenden sollen einige der konkreten Maßnahmen des Küstenschutzes diskutiert werden. Man kann auch von Steuerungsmaßnahmen sprechen, die von den zuständigen Stellen zur Verringerung oder Vermeidung von Entwicklungen ergriffen werden können, die den Erhalt des Geosystems Wattenmeer in seiner heutigen Form und Ausdehnung gefährden.

Zunächst werden alle möglichen Steuerungsmaßnahmen, die im schleswig-holsteinischen Wattenmeer eingesetzt wurden bzw. werden, aufgelistet und anschließend einzeln näher beschrieben:

- Vorland,
- Lahnungen, Gräben,
- Bühnen und Deckwerke,
- Sandaufspülungen und Baggerungen,
- Ästuarsperrwerk,
- Rückdeichung,
- Vordeichung,
- Verbindungsdamm.

3.1.1 Vorland

Das Vorland stellt den bewachsenen Bereich dar, der seewärts der Deiche zwischen Küstenlinie und Uferlinie (*MThw*-Linie), also im Supralitoral liegt (Abb. 3.1). Vorländer können dort entstehen, wo in der Wassersäule suspendierte Feinsedimente in einem seegangs- und strömungsberuhigten Umfeld langfristig zur Ablagerung kommen. Im ökologischen Kontext werden diese Flächen als Salzwiesen bezeichnet. In der DIN 4047 wird das Vorland als das über dem Mittelwasser (kurz: *MW*) oder *MThw* liegende Gelände zwischen Gewässerbett und Deich, Düne oder Hochufer definiert. Der typische Bewuchs mit salzresistenten Pflanzen beginnt jedoch bereits bei *MThw* - 0.25 m (DÖRJES 1978, OSTERTHUN 1988).

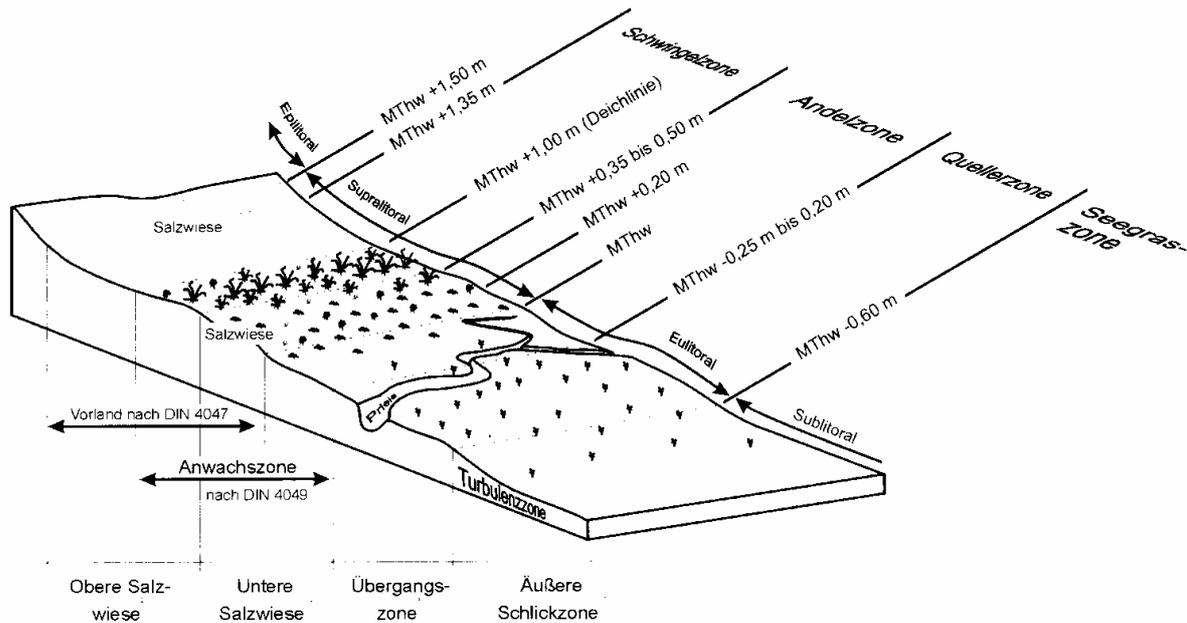


Abb. 3.1: Zonierung des Vorlandes.
Quelle: LIEBERMANN et al. 1998

Das Management von Salzwiesen im Wattenmeer bildet einen wichtigen Forschungs- und Diskussionsschwerpunkt. Seit Mitte der 80er Jahre des letzten Jahrhunderts sind aus Sicht der Naturschutzverbände Dialoge zum Thema Salzwiesen in Deutschland aufgekommen (KEMPF et al. 1987). Ende der 80er Jahre fand auf Rømø eine trilaterale Konferenz zum Thema Salzwiesen-Management statt, dessen Ergebnisse OVESEN (1990) zusammenfassend dargelegt hat.

Unter ökologischen Aspekten als Brut-, Nahrungs- und Rastgebiete sind die Salzwiesen aufgrund ihrer besonderen Struktur und Lage von überregionaler Bedeutung (STOCK et al. 1996). Es sind besonders schützenswerte Biotope, weil sie für viele Tier- und Pflanzenarten als einmaliger Lebensraum von großem ökologischem Wert sind. Dieses stellt jedoch nur eine Betrachtungsweise für das Vorland bzw. Salzwiese dar. Man kann insgesamt drei wichtige Aspekte unterscheiden, die im Laufe der Zeit unterschiedliche Gewichtungen erreicht haben (vgl. z.B. PROBST 1996):

- ökonomischer Aspekt,
- Aspekt des Küstenschutzes,
- ökologischer Aspekt.

Vor Beginn des Deichbaus bildeten ausgedehnte Salzwiesen den Übergangsbereich zwischen Land und Meer. Die Eindeichung dieser über *MThw* liegenden Gebiete diente bis zur Mitte des letzten Jahrhunderts vor allem der Gewinnung neuer landwirtschaftlicher Nutzflächen. Die natürlichen Salzwiesen verschwanden durch Eindeichungen fast vollkommen. Die heutigen

Vorländer entlang der Westküste von Schleswig-Holstein sind zum überwiegenden Teil durch Vorlandarbeiten entstanden (Abb. 3.2). Derzeit befinden sich etwa 10 000 ha Vorländer an der Westküste von Schleswig-Holstein (MLR 2001).



Abb. 3.2: Vorland in Schleswig-Holstein mit Lahnungen und Gruppen.

Nachdem die großen Eindeichungen abgeschlossen waren, trat die Funktion der Vorländer für einen natürlichen und sehr effektiven Schutz der Deiche stärker hervor. Insbesondere nach der schweren Sturmflut von 1962 wurden die Unterhaltungsmaßnahmen für deichferne Vorländer zugunsten von deichnahen Vorländern aufgegeben, um die Deichsicherheit zu erhöhen. Auch heute dienen die Vorlandflächen weiterhin dem Küstenschutz. Das Vorland dämpft die Wellen und verringert vor allem die hydrodynamische Beanspruchung der Deiche bei Sturmfluten (ERCHINGER 1971, ERCHINGER et al. 1996, HOFSTEDÉ & SCHIRMACHER 1996). Im Einzelnen bewirken bzw. wirken sie:

- eine Wellendämpfung,
- eine Verringerung des Wellenaufbaus,
- eine Reduzierung des Risikos des Wellenüberlaufs,
- eine Verhinderung von Strombrüchen bei Deichbrüchen,
- eine Verhinderung der Unterspülung von Deichen durch herandrängende Priele,
- die Ersetzung aufwendiger Steindeckwerke am Deichfuß,
- als Materiallieferant bei Deichreparaturen.

Aus dieser Auflistung wird schon ersichtlich, dass es ein wesentliches Interesse des Küstenschutzes sein muss, die Vorländer zu bewahren.

Aus Sicht des Küstenschutzes allein wäre ein möglichst breites und hohes Deichvorland optimal. Deshalb erfolgte vor allem in den 50er und 60er Jahren des letzten Jahrhunderts eine Intensivierung des Lahnungsbaus und der Begrüppung, so dass es zu einer Beschleunigung des Anwachsens des Vorlandes kam (Abb. 3.2; vgl. hierzu auch Kap. 3.1.2). DIECKMANN (1988) hat in einer Untersuchung aus Kartenvergleichen festgestellt, dass zwischen 1870-1980 allein für Nordfriesland 8 900 ha Vorland hinzugewonnen wurden.

Seit 1976 wurde zudem eine Intensivierung der Vorlandarbeiten auch aus ökologischen Erkenntnissen vorgenommen. Neue Vorländer wurden als Ausgleichsflächen für größere Vordeichungen (z.B. Nordstrander Bucht) angelegt. Mit der Ausweisung des Nationalparks Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer rückte immer stärker der ökologische Aspekt in den Vordergrund (vgl. Abb. 3.3). Die Vorlandflächen mit ihren ausgedehnten Salzwiesen dienen als Verbindungselement zwischen dem Meer und dem Land, auf dem sich einzigartige Lebensgemeinschaften entwickeln konnten.

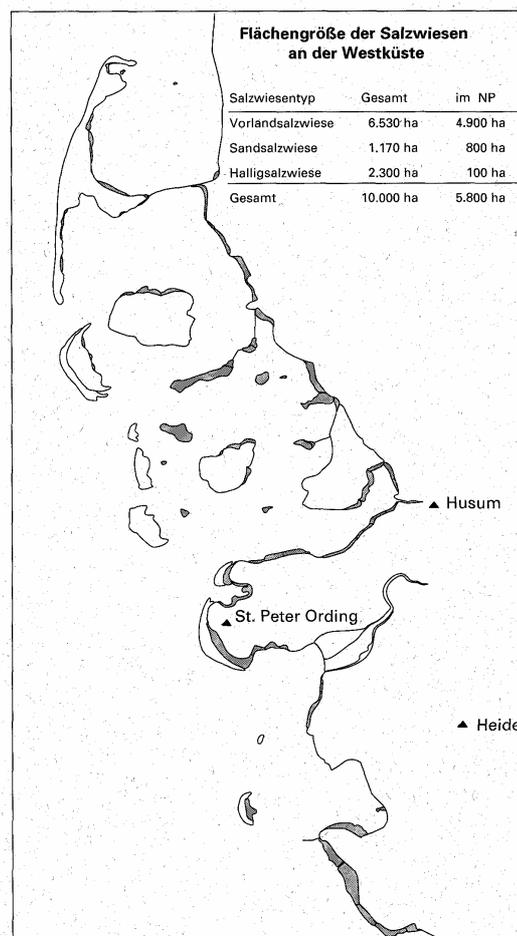


Abb. 3.3: Flächengröße der Salzwiesen in Schleswig-Holstein.

Quelle: STOCK et al. (1996)

Die Streitfrage, die sich zwischen dem Küstenschutz und der Ökologie entwickelt hat, bezieht sich nicht auf das Vorhandensein von Salzwiesen an sich, sondern auf deren Bewirtschaftung.

Bisher gingen die Küstenschützer davon aus, dass ein durch Beweidung mit Schafen kurz gehaltenes Vorland optimal sei. Die Naturschützer lehnen hingegen diese, aus ihrer Sicht durch Verbiss degradierte Salzwiesenvegetation ab. Der jetzt gefundene Kompromiss beinhaltet, dass der Deich selbst beweidet wird, jedoch die Salzwiesen nicht. Die oberste Maxime beim Vorlandmanagementkonzeptes in Schleswig-Holstein ist der ungestörte Ablauf natürlicher Prozesse und somit der gesamten natürlichen Entwicklung.

Der aus der Arbeitsgruppe Vorland hervorgegangene Fachbeirat Vorlandmanagement aus Vertretern der Küstenschutz- und Naturschutzbehörden des Landes Schleswig-Holstein (u.a. Ministerium für ländliche Räume, Landesplanung, Landwirtschaft und Tourismus (kurz: MLR) und Ministerium für Umwelt, Natur und Forsten (kurz: MUNF)) sowie der Marschenverbände hat ein gemeinsames Vorlandmanagementkonzept erstellt, wobei folgende Grundsätze für das künftige Management enthalten sind:

„Es ist gemeinsames Ziel von Küstenschutz und Naturschutz, vorhandenes Vorland zu erhalten und vor Schardeichen neu zu entwickeln. Die Maßnahmen zur Vorlandentwicklung sind, abhängig von den örtlichen Verhältnissen, möglichst naturverträglich auszuführen. Dort, wo es die örtlichen Verhältnisse zulassen, wird auf technische Maßnahmen verzichtet.“ (MLR 2001, S. 55)

Der Fachbeirat Vorlandmanagement begleitet die Umsetzung des Konzeptes und entwickelt dieses fort. Das Konzept hat vorerst eine zehnjährige Laufzeit, wobei die Vorlandflächen jedoch laufend einem Monitoring unterliegen. Zur technischen Konkretisierung der Grundsätze ist ein Fachplan Vorland erstellt worden (HOFSTEDÉ & SCHIRMACHER 1996).

Salzwiesen bilden sich unter natürlichen Bedingungen nur in bestimmten Bereichen, in denen besondere Voraussetzungen erfüllt sind:

- Vorhandensein von Feinsedimenten in der Tidewassersäule,
- Seegangs- und strömungsberuhigtes Umfeld, das als Ablagerungsraum für die Feinsedimente dienen kann.

Betrachtet man diese Voraussetzungen genauer, so lässt sich ableiten, dass natürliche Salzwiesen vor allem an geschützten, energiearmen Stellen zu finden sind (z.B. Buchten oder Leeseite der Inseln und Halligen). DIECKMANN (1988) konnte in seiner Untersuchung für Nordfriesland keinen „Buchteneffekt“ nachweisen, weil keine überdurchschnittlichen Vorlandgewinne in Buchten (z.B. Tümlauer Bucht) zu beobachten waren. Allerdings ist ein positiver Effekt bei Dammbauten zu den Inseln und Halligen (z.B. Hamburger Hallig: Dammbau

1874/75) durch die Beruhigung der Strömungsverhältnisse zu erkennen. DIJKEMA et al. (1990) unterscheiden zudem zwischen Bereichen mit Barriereinseln und ungeschützten Watten. Der Schwebstoffgehalt des Wassers ist auf der Rückseite der Inseln geringer als im Bereich ungeschützter Watten. Diese Aussage deutet wiederum auf Unterschiede in der Vorlandentwicklung in Schleswig-Holstein zwischen Dithmarschen und Nordfriesland hin. In Nordfriesland müsste die Sedimentversorgung aufgrund der vorgelagerten Barriereinseln und dem somit geringeren Schwebstoffgehalt des Wassers schlechter und deshalb die Vorlandgewinnung problematischer sein als in Dithmarschen. DIECKMANN (1988) hat aus Kartenvergleichen für das Gebiet Nordfriesland und Eiderstedt auf Basis der Köge eine Flächenentwicklung der Vorländer erarbeitet, die im Folgenden kurz erläutert werden soll (vgl. Abb. 3.4 und Tab. 3.1).

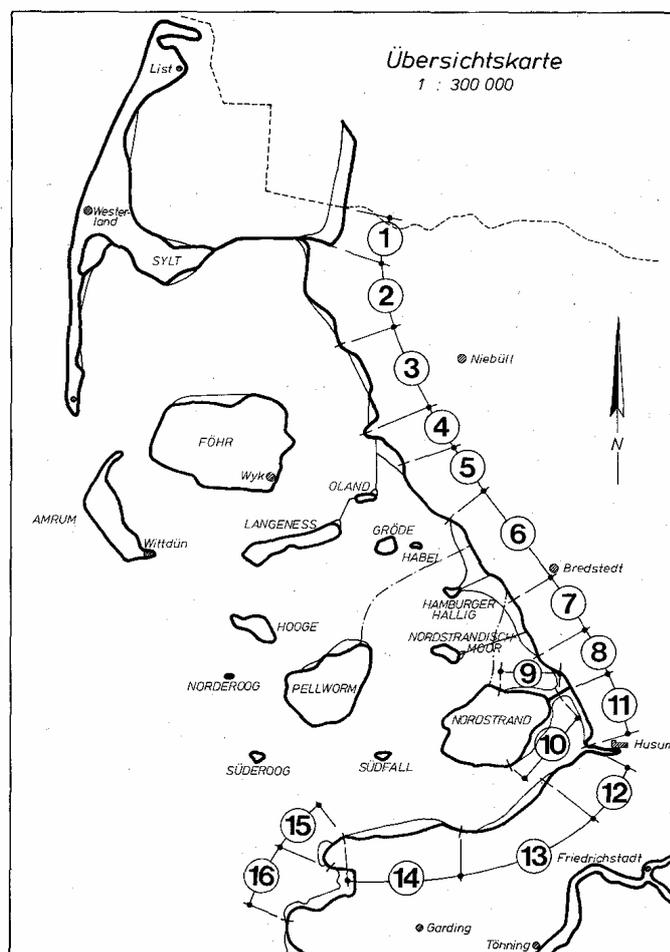


Abb. 3.4: Lage der von DIECKMANN (1988) untersuchten Küstenabschnitte.
Quelle: DIECKMANN (1988)

Die horizontale Ausdehnung des Vorlandes kann aus der seawärtigen Verschiebung der $MThw$ -Linie durch die so genannte Anwachsrate A_H (in m pro m Deichlänge und Jahr) quantifiziert werden:

$$A_H = \Delta F / L_K \cdot \Delta t$$

wobei ΔF die Flächenänderung des Vorlandabschnittes im betrachteten Zeitabschnitt, L_K die Länge des Küstenabschnitts und Δt der betrachtete Zeitabschnitt ist.

		1830	1840	1850	1860	1870	1880	1890	1900	1910	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980		
NORDFRIESLAND	1											5	48	5		3			
	2				-0,3	1	8		0		11		16	243	-57	12		14	
	3	-50		-1			7		0			0,3		1	-5		0,1		
	4	20		-2			10			2			18	0,3	24		-0,3		
	5	40		-4		1,0				1,1		16	3		-11				
	6		3		0,8			15			0	47	16	-0,1	9		-1		
	7			2			8		0		6		26	10		-0,8		13	
	8															5			
	9											9		-1	13	0		11	
	10						28		7		0		20	5	2	8	15	0	
	11				8		-3					0,2					11	0	-16
EIDERSTEDT	12					5				2			5,4		-4		10		
	13				0,9		6				0,9		0,9	8	0	-75	-0,5	30	-8
	14						12		0		4		18				-0,8		
	15								0			8				-2			
	16					-2			5				3	11	2			-2	

Tab. 3.1: Mittlere jährliche Verschiebung der Vorlandgrenze in Richtung See in den untersuchten 16 Küstenabschnitten.

Positive Werte bedeuten Zuwachs an Vorland, negative Werte bedeuten Abbruch von Vorland (Angaben in m pro m Deichlänge und Jahr).

Quelle: DIECKMANN (1988)

Berechnungen haben ergeben, dass seit 1948 auffällig viele Erosionsbereiche feststellbar sind, die jedoch im Wesentlichen dem durch den Kriegseinfluss nicht optimalen Unterhalt zugeschrieben werden können (vgl. hierzu auch PROBST 1996).

DIECKMANN (1988) berechnete mittlere Anwachsrate A_H von 7.1 bis 13.7 m pro m Deichlänge und Jahr, die sich in folgende Zeitabschnitte genauer unterteilen lassen:

- 1900 - 1930: mittlere Anwachsrate A_H von 3.5 m pro m Deichlänge und Jahr,
- 1930 - 1940: mittlere Anwachsrate A_H von 17.7 m pro m Deichlänge und Jahr,
- 1940 - 1979: mittlere Anwachsrate A_H von 4.7 m pro m Deichlänge und Jahr.

Auch in Niedersachsen konnte für das Gebiet Leybucht und Neßmerheller seit Mitte der 80er Jahre des letzten Jahrhunderts an vielen Stellen ein zunehmender Abbruch im Deichvorland

festgestellt werden. Der Vorlandabbruch erfolgte vor allem an den Kanten des Vorlandes zum Watt. Dies konnte als Folgeerscheinung häufigerer Sturmfluten und höherer Tidewasserstände erklärt werden (ERCHINGER et al. 1996).

Die Erosion von Vorlandkanten ist ein Problem, das sich für den gesamten Bereich des Wattenmeeres feststellen lässt. An der dänischen Festlandsküste südlich von Esbjerg wurde aus Vergleichen von Luftbildern (1946, 1964 und 1984) eine Erosionsrate von 25 cm pro Jahr errechnet. Aber auch die Halligen sind von der Erosion betroffen. Die Hallig Norderoog hat zwischen 1927 und 1980 im exponierten westlichen Ende 130 m Vorland verloren, was einer außerordentlich hohen Erosionsrate von 2.5 m pro Jahr entspricht (EHLERS 1988, S. 195).

Im Gegensatz zu der gerade besprochenen horizontalen Ausdehnung der Vorländer handelt es sich bei der vertikalen Ausdehnung um einen mehrstufigen Prozess, der einem negativen Regelkreislauf entspricht. Durch verstärkte Sedimentation kommt es zu einer Zunahme der Höhenlage der Vorländer und somit einer Abnahme der Überflutungsdauer. Deshalb nimmt die Sedimentation ab. Nur bei Sturmhochwassern kommt es zu weiteren Überflutungen und somit zu Sedimentationen. Das mittlere Sturmhochwasser (*MHT_{hw}*), welches den höchsten Wasserstand markiert, bildet somit den Grenzwert für das Wachstum des Vorlandes (DIECKMANN 1988).

Dieser Prozess gilt jedoch nur bei einer unbeeinflussten Vorlandentwicklung, die es so heute nicht mehr gibt. Somit wird weder der natürliche „Reifezustand“ eines Vorlandes, der nach etwa 200 Jahren erreicht wird, noch der theoretische Grenzwert des *MHT_{hw}* heutzutage mehr erreicht (DIECKMANN 1988).

Messungen der mittleren Sedimentationsraten vom ALR Husum ergaben Werte, die auf ein Höhenwachstum des Vorlandes zwischen 0.6 bis 2.5 cm pro Jahr schließen lassen. In Hinblick auf den Meeresspiegelanstieg kann gesagt werden, dass bei einer mittleren Sedimentationsrate, die gerade dem Meeresspiegelanstieg entspricht, das Vorland zwar erhalten bleibt, jedoch eine landwärtige Verschiebung des Vorlandbereichs stattfinden muss. Ist die mittlere Sedimentationsrate größer als der Meeresspiegelanstieg, so findet eine Ausbreitung des Vorlands seewärts statt. Ist jedoch die mittlere Sedimentationsrate kleiner als der Meeresspiegelanstieg, so würde das Vorland versinken (DIECKMANN 1988).

DIJKEMA et al. (1990) untersuchte die Vorlandentwicklung in den Niederlanden vor allem vor dem Hintergrund eines Meeresspiegelanstiegs. Die Beeinflussung der Vorländer durch einen Meeresspiegelanstieg äußert sich vor allem in einer Zunahme der Überflutungshäufigkeit und -dauer und der Zunahme der Wellenenergie auf den Salzwiesenflächen. Die Quellzone, die direkt an die Wattflächen angrenzt, wird dabei vor allem durch die Zunahme der

Wellenenergie beeinträchtigt, hingegen die höher liegende Andelzone eher durch die Zunahme der Überflutungen beeinflusst (vgl. Abb. 3.1). Die Untersuchung hat ergeben, dass vor allem in der Quellerzone Erosionen an der Vorlandkante zu beobachten sind. Deshalb ist es wichtig, beim Vorlandmanagement die größte Aufmerksamkeit der Quellerzone zu widmen, an der die Vorlandentwicklung beginnt.

Ähnlich argumentiert auch HOFSTEDÉ (1996). Er unterteilt die Salzwiese in drei Entwicklungsstadien (Abb. 3.5).

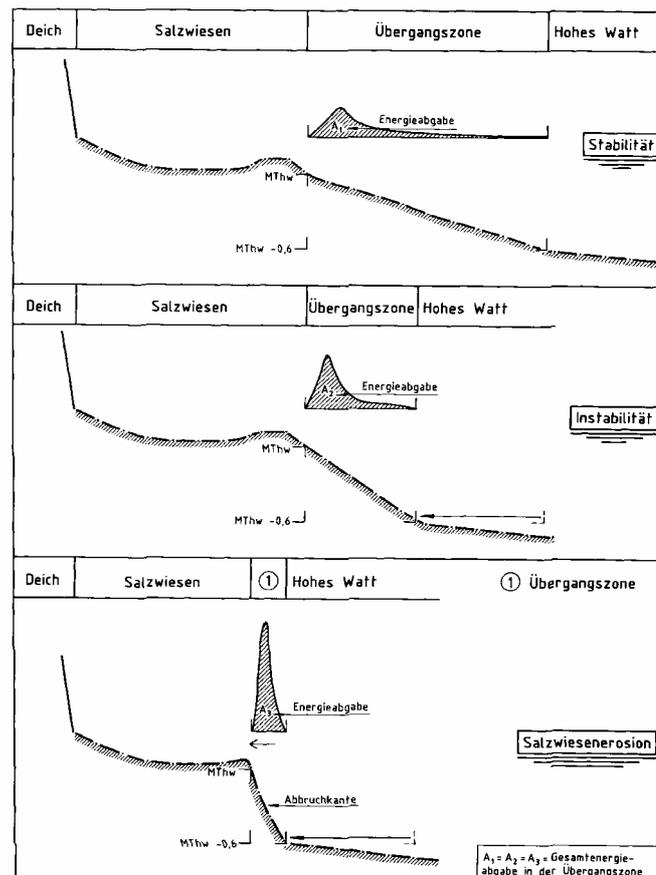


Abb. 3.5: Mögliche Entwicklungsstadien einer Salzwiese.

Quelle: HOFSTEDÉ (1996)

Im Stadium der Stabilität kann die Wellenenergie über die breite Übergangszone (Quellerzone) abgegeben werden. Ein instabiles Stadium wird erreicht, wenn die Übergangszone zwischen dem hohen Watt und der Salzwiese (Andelzone) schmaler wird und somit der (Neigungs-)Gradient zunimmt. Dies kann entweder durch ein überproportionales Höhenwachstum der Salzwiesen auftreten oder durch flächenhafte Erosion im Watt erfolgen. Die Energieabgabe konzentriert sich hierbei sehr stark auf den Bereich um $MThw$. Beim Stadium der Salzwiesenerosion fehlt der Übergangsbereich fast gänzlich und die gesamte Energie trifft gebündelt auf die Kante zur eigentlichen Salzwiese. Es findet ein massiver Kantenabbruch statt. Geht man nun von einer weiteren Zunahme der hydrodynamischen Belastungen aus Seegang und Strömung in Folge des vorhergesagten Klimawandels aus, so

würde die Gefahr von Kantenabbrüchen weiter zunehmen. In der Konsequenz könnten die bestehenden Vorländer „von der Kante her“ erodiert werden. Um dies zu verhindern, richten sich die zukünftigen Vorlandarbeiten in Schleswig-Holstein vermehrt auf die Sicherung der Anwachszone. Dies kann z.B. durch die Einrichtung einer vorgelagerten Turbulenzzone, in der die Energien umgewandelt werden, erreicht werden (vgl. Kap. 3.2.1 zu Lahnungen).

HOFSTEDDE (1996a) nennt weitere anthropogene Maßnahmen zur Förderung und Beschleunigung der Entstehung von Salzwiesen, die im Wesentlichen auf die Verfügbarkeit von feinen Schwebstoffen in der Wassersäule und ein seegangs- und strömungsberuhigtes Umfeld zielt:

- kontrollierte Rückdeichungen mit Drainagen und Aussaat von salztoleranten Pflanzen
- direkte Vorspülung von feinen Sedimenten (z.B. Hafenschlick) in oder vor der Salzwiese (in England praktizierte Maßnahme),
- Reduktion der Energie, die durch Strömungen und Turbulenzen entsteht, durch Einbau von linienhaften porösen Hindernissen (z.B. Lahnungen),
- Förderung einer Vegetationsdecke durch die Anlage einer Drainage, Aussaat oder Bepflanzung,
- Verlängerung der Stauwasserzeit und/ oder der Überflutungsdauer,
- Anlage einer künstlichen Entwässerung zur Förderung der Konsolidierung und zur besseren Ansiedlung einer Vegetationsdecke (z.B. Begrüpfung).

Insgesamt lässt sich feststellen, dass sich die Voraussetzungen zur Bildung von Vorländern gegenüber früher in weiten Bereichen des Wattenmeeres verschlechtert haben, weil einerseits das Angebot an Schwebstoffen abgenommen hat (v.a. in Nordfriesland), und andererseits die Vorländer mittlerweile durch die Deichbegradigungen an hydrodynamisch exponierten Stellen zu finden sind. Man muss deshalb zu dem Schluss kommen, dass die Vorländer für die Deichsicherheit auch in Zukunft notwendig sind, jedoch der Aufwand für die Instandhaltung der Lahnungen und Begrüpfung zunehmen wird. Denn unter dem Aspekt des Meeresspiegelanstiegs und einer eventuellen Zunahme der Sturmfluthäufigkeit muss von einer stärkeren hydrodynamischen Beanspruchung der Vorländer durch Seegang und Strömung in der Zukunft ausgegangen werden.

Derzeit sind im Bereich des Vorlandes insgesamt 3 400 km Entwässerungsgruppen, 112 km Erdlahnungen (Dämme), 523 km Lahnungen und 71 km Buhnen vorhanden. Für den Aufbau und die Instandhaltung dieser Anlagen muss mit einem Ausgabenaufwand von etwa 20 Mio. DM bzw. 10,2 Mio. € pro Jahr gerechnet werden. Dabei ist die Gewährleistung der Schutzfunktion der Deiche nach dem derzeitigen Kenntnisstand erreicht, sobald sich vor dem Deich ein etwa 200 m breiter Streifen mit einer mehrjährigen Vegetationsdecke eingestellt hat. Dieser soll dann gegen Abbrüche gesichert werden (MLR 2001).

3.1.2 Lahnungen, Grüppen

Mit der Tidewelle, die von seegangserzeugten Strömungen überlagert wird, werden Sinkstoffe in das Küstenvorfeld transportiert. Die Sedimente kommen zur Ablagerung, wenn die Turbulenz der Strömung reduziert und somit die Transportkräfte des Wassers nachlassen. Dieser Vorgang findet unter natürlichen Bedingungen jedoch nur in geschützten Bereichen wie Buchten, den Leeseiten von Inseln, Halligen oder Dämmen statt. Fast alle heutigen Vorländer sind aus diesem Grund durch den Einfluss des Menschen entstanden (vgl. Kap. 3.1.1).

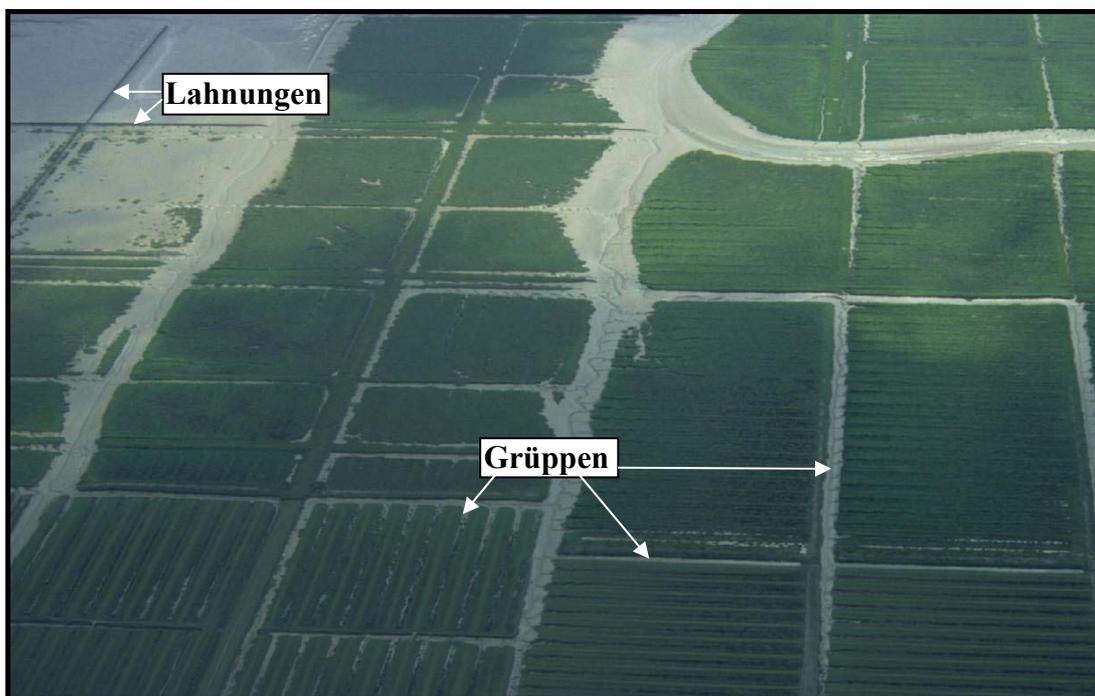


Abb. 3.6: Grüppen und Lahnungen im Vorland.

Durch den Eingriff in die Strömungsabläufe kann die Ablagerung von Sedimenten künstlich gefördert werden. Die Übergänge der Vorland- und Halligsalzwiesen zum Watt sind heutzutage mit Lahnungen ausgestattet, verbunden mit einer künstlichen Entwässerung über Grüppensysteme (Abb. 3.6). Diese schachbrettartigen Felder schaffen im Inneren einen strömungsberuhigten Bereich, wodurch die turbulente Brandung und Strömung von den Lahnungen fern gehalten wird (LIEBERMANN et al. 1998). Durch eine Öffnung in der Querlahnung an der Seeseite wird das Feld bei steigendem Tidewasser überflutet und bei Ebbe wieder entwässert.³

³ Bei LIEBERMANN et al. (1998) findet man einen Überblick über die regionalen Unterschiede im Lahnungsbau und der Begrüppung des gesamten Wattenmeeres.

Lahnungen kann man sich als Zäune aus Pfählen und Buschwerk vorstellen, die den Wattbereich in quadratische Felder einteilen. Hauptbaustoffe für Lahnungen können z.B. Buschwerk und Holz sein. Die in Schleswig-Holstein zum Einsatz kommenden Buschlahnungen werden aus zwei Pfahlreihen mit fest dazwischen gepacktem Busch gebaut und oben mit einem Draht verschnürt (Abb. 3.7). Ein seitlicher Anwurf mit Boden soll insbesondere zum Schutz gegen Eisgang dienen. Soll neues Vorland vor Schardeichen⁴ gebildet werden, so wird zuerst ein Lahnungsfeld mit dem Ziel angelegt, die Turbulenz zu reduzieren und die Sedimentation zu fördern.

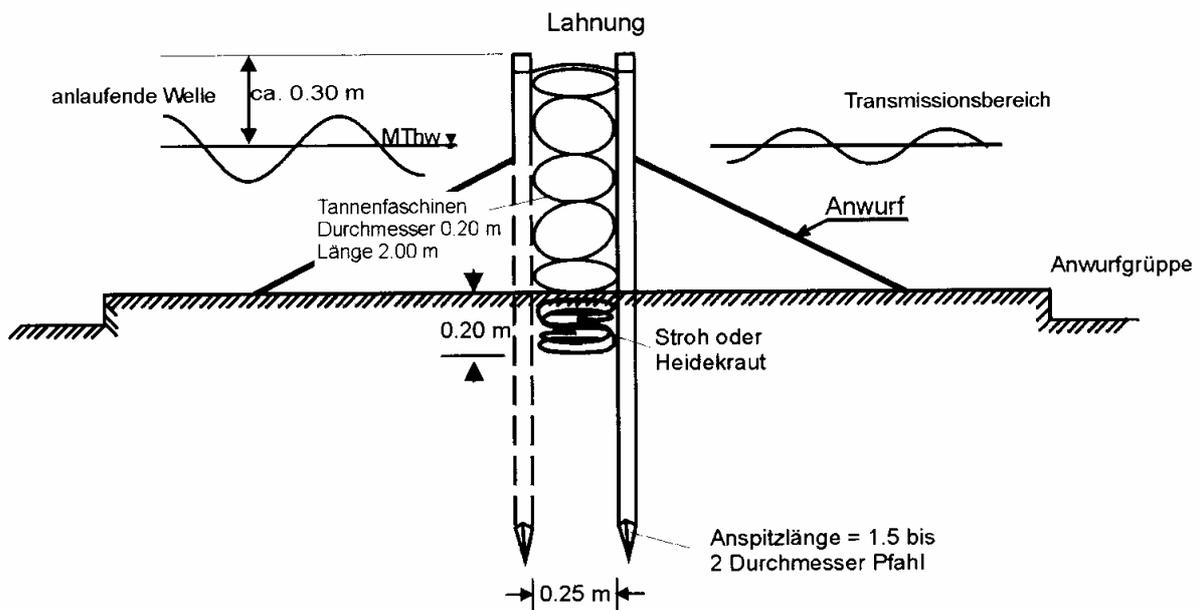


Abb. 3.7: Aufbau einer im nördlichen Teil Schleswig-Holsteins typischen Buschlahnung.
Quelle: LIEBERMANN et al. 1998

Hat sich das Watt in diesem Bereich durch Sedimentation erhöht, so wird in einer zweiten Phase ein zweites Lahnungsfeld vor das erste gebaut. In Abbildung 3.8 wird ersichtlich, dass die Funktion des ersten Lahnungsfeldes wechselt. Es dient von nun an als Anwachszone, in der die Akkumulation durch weitere Strömungsberuhigung gefördert wird. In der letzten Phase wird ein weiteres Lahnungsfeld vorgebaut, so dass das erste Feld zur Vorlandzone wird. Dabei wechselt gleichzeitig das zweite zur Anwachszone und das dritte zur Turbulenzzone. Man geht in der Regel davon aus, dass man ein 200 m breites Vorland aufbauen will, vor dem sich ein 200 m breites Lahnungsfeld befindet. Das 200 m breite Vorland wird als für die Wellendämpfung ausreichend angesehen, während das Lahnungsfeld zum Schutz der Vorlandkante dient (vgl. Kap. 3.1.1).

⁴ Ein Schardeich ist ein Deich ohne Vorland, dessen Außenböschung direkt in die Uferböschung bzw. bei Seedeichen in das Watt übergeht.

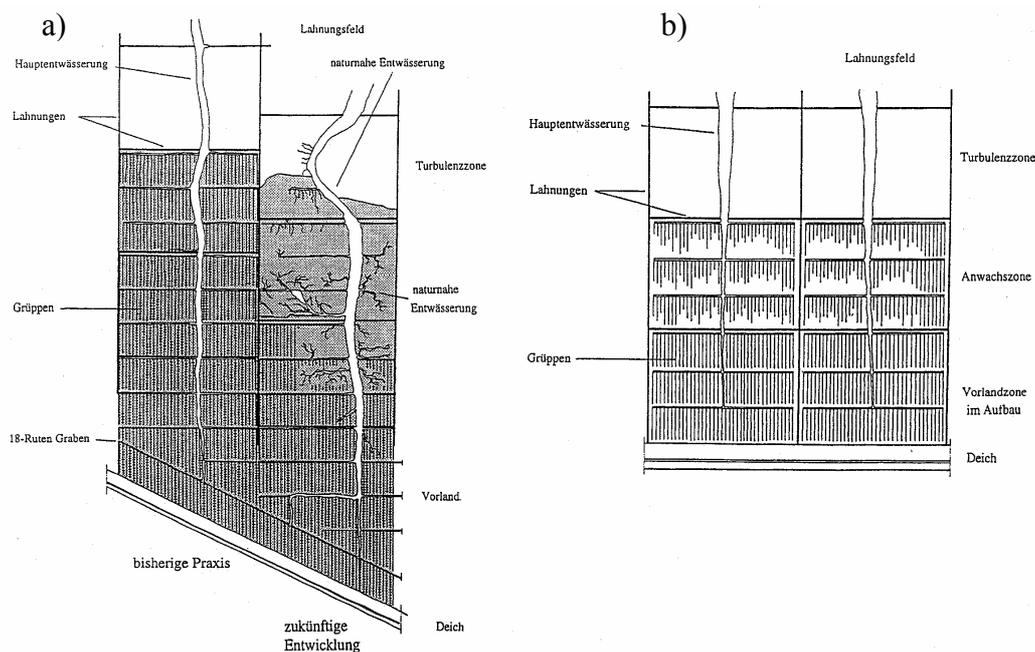


Abb. 3: a) Vorhandenes Vorland (schematisch); b) Vorland im Aufbau (schematisch)

Abb. 3.8: (a) Vorhandenes und (b) im Aufbau befindliches Vorland (schematisch).
Quelle: HOFSTEDE & SCHIRMACHER 1996

Oft werden alle paar Jahre innerhalb der Felder tiefe Gräben (Grüppen) ausgehoben, die zur besseren Entwässerung des Systems führen (vgl. Abb. 3.6). Die „Vorlandreife“, die sich unter natürlichen Bedingungen ohne Lahnungsfelder erst nach etwa 200 Jahren einstellt, wird hier schon nach etwa 20-40 Jahren erreicht. Verschiedene Untersuchungen haben unterschiedliche Empfehlungen über die ausreichende Breite eines Lahnungsfeldes und das Vorland ergeben, die im Wesentlichen aus den regionalen Unterschieden resultieren (z.B. ERCHINGER et al. 1996, LIEBERMANN et al. 1998).

Lahnungen haben v.a. eine seegangsdämpfende Wirkung. Untersuchungen von HOFSTEDE (1998b, S. 14) haben ergeben, dass eine seegangsdämpfende Wirkung bis zu einem Grenzwasserstand von 0.6 m über Lahnungsoberkante besteht. Hinter den Lahnungen haben die Wellenhöhen im Schnitt 70 % ihrer ursprünglichen Höhe verloren. Eine Optimierung der Wellendämpfung kann durch breitere Lahnungen erreicht werden. Zudem dämpfen gedichtete Lahnungen den Seegang bis zu einem Grenzwasserstand von etwa 0.4 m über der Lahnungsoberkante besser als eine nicht gedichtete Lahnung. Daneben haben Lahnungen eine strömungsdämpfende Wirkung. Messungen haben gezeigt, dass die maximalen und mittleren Strömungsgeschwindigkeiten außerhalb der Lahnung um ein Vielfaches höher sind als innerhalb des Lahnungsfeldes. Diese Verlangsamung der Tideströmungsgeschwindigkeit innerhalb der Lahnungen bietet somit ein ruhigeres Ablagerungsmilieu für die in der Tidewassersäule enthaltenen Sedimente.

Die Gruppen sollen das frühzeitige Einlaufen des Wassers in das Lahnungsfeld erleichtern und die Bildung von Strömungswalzen innerhalb der Lahnung verhindern (vgl. Abb. 3.6). Aufgrund der örtlichen Variationen müssen bei jedem Lahnungsbau individuelle Entscheidungen getroffen werden. Es kann aber generell gesagt werden, dass die Strömungsgeschwindigkeiten in Dithmarschen um ein Mehrfaches höher sind als in Nordfriesland.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Lahnungen sowohl eine seegangs- als auch strömungsdämpfende Wirkung haben. Durch diese Eigenschaften sind sie hervorragend geeignet, an hydrodynamisch exponierten Stellen die Sedimentation zu fördern. Letztendlich sollen sie ein ideales Milieu zur Ansiedlung von Salzwiesenpflanzen hervorbringen. Sie sind also ein wesentlicher Bestandteil für die Vorlandentwicklung und somit der Deichsicherheit (HOFSTEDE 1998b).

3.1.3 Buhnen und Deckwerke

Buhnen und Deckwerke wurden zuerst auf den Inseln gebaut. In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts haben viele Inseln durch Sturmfluten ihre schützenden Dünen verloren. Deshalb errichtete man auf kurzen Uferstrecken vor den gefährdeten Siedlungen Buhnen und Deckwerke (Abb. 3.9 und Abb. 3.10). Zunächst baute man auf ausgewählten Inseln einige hundert Meter Dünendeckwerk und mehrere Buhnen, aus denen dann bis zur Gegenwart nach weiteren Strand- und Dünenabbrüchen lang gestreckte Deckwerke mit vielen, aneinander gereihten Buhnen entstanden (EHLERS 1988). Die Deckwerke wurden nach den ersten negativen Erfahrungen (z.B. Auskolkungen) sowohl im Profil verändert als auch in der Konstruktion immer schwerer, um die Standfestigkeit gegenüber den Brandungskräften zu erhöhen.

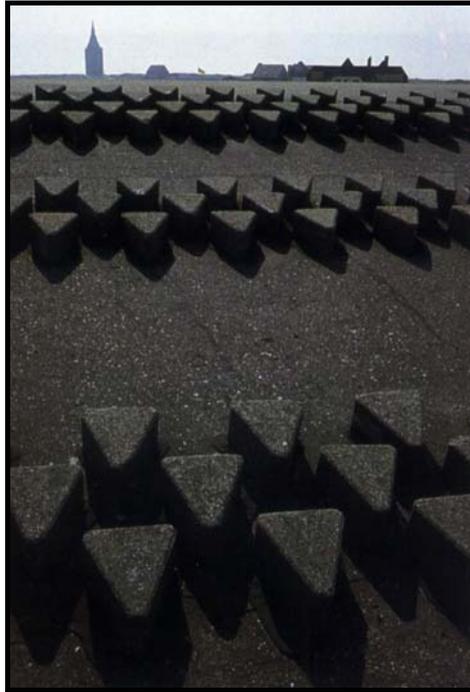


Abb. 3.9: Schutzmauer als Beispiel für ein typisches Deckwerk am westlichen Ende von Wangerooge (1977).
Quelle: EHLERS 1988



Abb. 3.10: Beschädigte Buhne auf Wangerooge (1979).
Quelle: EHLERS 1988

Da die Deckwerke allein meist nicht den gewünschten Effekt zur Strand- und Dünensicherung erreichten, folgte ihnen bald der Bau von Buhnen. Die Buhnen sollen den uferparallelen Brandungsstrom hemmen und somit verhindern, dass das Sediment aus diesen Uferbereichen abtransportiert wird. KRAMER (1978) gibt einen Überblick über die verschiedenen Typen von Seebuhnen (vgl. Abb. 3.11).

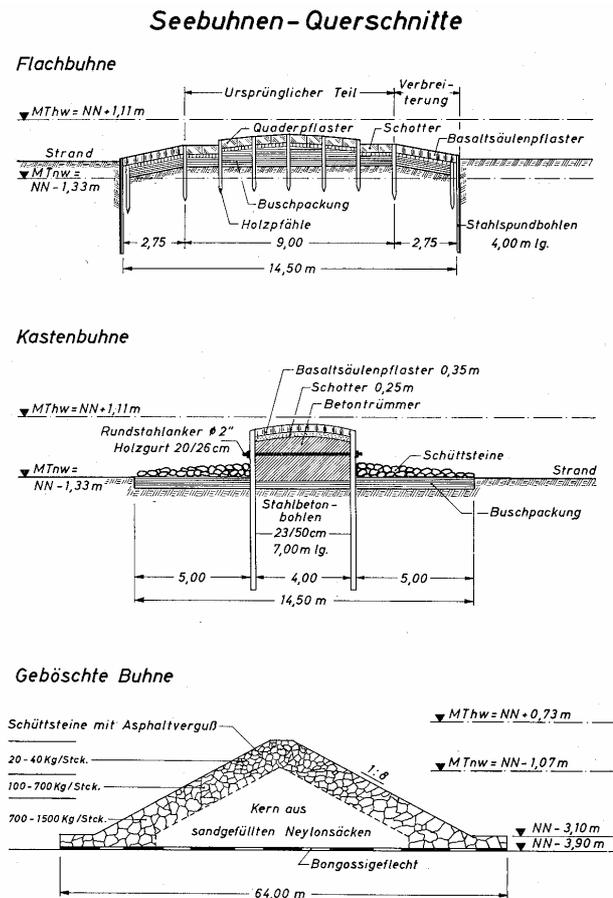


Abb. 3.11: Querschnitte von schweren Seebuhnen.

Quelle: KRAMER (1978)

Ein wesentlicher Nachteil dieser massiven Bauwerke sind lokal auftretenden Lee-Erosionen und der Strandabtrag, der durch Wellenreflexion entstehen kann. Es hat sich gezeigt, dass diese Bauwerke die natürliche Strandentwicklung nicht wesentlich ändern können. Die Erosion auf den Inseln ist als eine Folge der veränderten Strömungsbedingungen und dem Meeresspiegelanstieg zu sehen. Entlang der exponierten Bereiche der Inseln fehlen permanent Sedimente. Durch Deckwerke und Buhnen wird dieser Mangel nicht eliminiert, sondern die Prozesse, die zum Abtrag führen, verlangsamen und verlagern sich. Feste Bauwerke, wie Quer- und Längswerke haben in der Regel die Morphodynamik des Strandes nachhaltig gestört, und werden in Zukunft nur dort angebracht, wo ein Küstenrückgang (z.B. bei Bebauung) nicht zugelassen werden kann (MLR 2001). Alternativ ist man in der letzten Zeit zu künstlichen Sandaufspülungen übergegangen, die wesentlich naturverträglicher sind und das Fehlen von Sedimenten ausgleichen sollen (EHLERS 1988). Die Kosten, die unter dem Begriff der Küstensicherung getätigt werden, sind mit ca. 10 Mio. DM bzw. 5,1 Mio. € im Generalplan Küste (MLR 2001) angesetzt. Hierunter verstehen sich jedoch alle Maßnahmen, die das Festlegen der Uferlinie als Schutz vor Uferrückgang und Erosion beinhalten. So sind neben Deckwerken und Ufermauern und Buhnen auch die Kosten für den Lahnungsbau mit berücksichtigt.

3.1.4 Sandaufspülungen und Baggerungen

Sandaufspülungen werden v.a. in den Strandbereichen eingesetzt, wo eine negative Sedimentbilanz über einen längeren Zeitraum festzustellen ist. Nachdem die ersten Schutzmaßnahmen für Strände und Dünen in Form von Deckwerken und Bühnen nicht gegriffen haben wurde erstmals 1951/52 am westlichen Ende von Norderney Sand aufgefüllt (KRAMER 1978).

Die ersten Sandvorspülungen in Schleswig-Holstein fanden 1963 an der Südküste von Föhr statt, wohingegen auf der Insel Sylt erst 1972 vor Westerland das erste Mal vorgespült wurde. Seit 1983 gibt es regelmäßige Vorspülungen auf Sylt, deren Umfang und Kosten in der Fortschreibung des Fachplans „Küstenschutz Sylt“ (Amt für ländliche Räume Husum 1997, kurz: ALR) bzw. für die Insel Föhr im Fachplan „Küstenschutz Föhr“ (ALR Husum 1999) detailliert aufgeführt sind. Aus dem neuen Generalplan (MLR 2001) ist zu entnehmen, dass vor Sylt bisher 30.17 Mio. m³ Sand mit Gesamtkosten von etwa 224 Mio. DM bzw. 114.5 Mio. € aufgespült wurden, wobei die Schwerpunkte an den Inselenden sowie vor Westerland liegen. Hingegen ist auf Föhr insgesamt bisher nur 3.33 Mio. m³ Sand für etwa 23 Mio. DM bzw. 11.8 Mio. € aufgespült worden.

Die beobachtete Zunahme der Verweilzeiten erhöhter Wasserstände seit etwa 1960 und die Seegangsbelastung an der Westküste von Sylt haben dazu geführt, dass ohne regelmäßige Sandvorspülungen ein Küstenrückgang des Strandes, der Dünen und des Kliffs durchschnittlich um 1.0 bis 1.5 m pro Jahr festzustellen wäre. Das entspricht einem mittleren Substanzverlust von ca. 1.0 Mio. m³ pro Jahr. Für die Strandvorspülungen als fortdauernde Maßnahme entstehen somit mittlere jährliche Ausgaben in Höhe von 13 Mio. DM bzw. 6.6 Mio. €.

Eine Optimierung der Sandmengen ist nur bedingt zu erreichen, weil der Sandeintrag extrem von Sturmflutereignissen (im Vorstrand) abhängig ist. Es wurden Versuche mit verschiedenen Formen der Spülkörper – d.h. vor allem in verschiedenen Tiefenbereichen – gemacht.

Es gibt drei Varianten für Sandaufspülungen:

- (a) Wiederherstellung von Dünen und Strand nach Sturmfluten,
- (b) Wiederherstellung eines breiten, trockenen Strandes mit darauf liegendem, geneigtem Aufspülkörper und
- (c) Kombination von Strand und Vorstrandaufspülung.

Bei der Variante (a) geht man von einer Schadensbehebung aus. Die Endkosten für diese Maßnahme sind sehr hoch, da es bei Sturmfluten oft zu hohen Sandverlusten kommt. Zudem entstehen Folgekosten für den Aufbau der Vordünen. Bei der Variante (b) hat man i.d.R. nur

noch geringe Sandverluste auszugleichen, obwohl zu Beginn eine hohe Sandmenge erforderlich ist, um den Aufspülkörper zu formieren. Bei der letzten Variante (c) hat man den geringsten Volumenverlust festgestellt.

Die Bewertung dieser Konzepte führt für die Insel Sylt zu folgenden Aussagen (ALR 1997):

- Bei Strandvorspülungen sind immer Sicherheitszuschläge für Sturmfluten notwendig.
- Aufspülungen im Vorstrandbereich sind wichtig, weil nur die Hälfte bis ein Drittel der auftretenden Erosionen im Strandbereich stattfinden.
- Die Kosten für die Aufspülung im Vorstrandbereich sind geringer als im Strandbereich.
- Es ist effektiver, den Sand im Mittelteil der Insel aufzuspülen als an den Inselenden.
- Für die Inselenden könnte eine Endbefestigung ggf. sinnvoller sein.
- Für den Sturmflutschutz sind geotextile Schwellen im Spülkörper im Bereich der Abbruchkanten oder zur Kliffsicherung sinnvoll.

Bei der Untersuchung des ALR Husum (1997) zur Optimierung der Strandvorspülungstechniken wurde festgestellt, dass das Vorspülprofil die Dauerhaftigkeit der Maßnahme abhängig von der $MThw$ -Linie beeinflusst, wobei unterhalb $MThw$ eine Girlandenform und oberhalb des $MThw$ eine Neigungsebene mit ca. 5 % Gefälle angestrebt werden sollte. Zusätzlich kann eine geotextile Barriere den Verschleiß- und Reserveteil für den Fall von Sturmfluten effektiv trennen. Relativ kurze Vorspülintervalle mit geringen Sandmengen ermöglichen eine Minimierung des langfristigen Massenbedarfes.

Es hat sich gezeigt, dass die Korngröße nur geringfügig optimierbar ist. Somit sollte sie der natürlich vorhandenen Korngröße eines Gebietes entsprechen oder nur geringfügig größer sein, da sonst der Ferntransport des Materials über den Küstenparalleltransport überwiegt. Als letzte Empfehlung wurde vorgeschlagen, dass die Länge der Vorspülstrecke 1 km nicht unterschreiten sollte, da seitliche Verluste sonst zu hoch sind (ALR Husum 1997).

Es wurde dargestellt, dass die meisten Erfahrungen mit Sandvorspülungen an der Außenküste von Inseln (z.B. Sylt und Norderney) vorliegen. Es gibt jedoch auch Versuche, die Sandvorspülungen in gefährdeten Bereichen im Wattenmeer anzuwenden. Eine bekannte Sand(vor)-spülung im Wattenmeer hat es 1979 im Bereich der Außeneider gegeben. Der Bau des Eidersperrwerks hatte u.a. zur Folge, dass der alte Lauf des Priels in der Dammachse verbaut wurde. Der Ebbstrom stieß nun seewärts auf den Wattsockel der Vollerwiek-Plate. Von dort nahm er den Weg durch die Nordrinne, die sich dadurch weiter nordwärts drängte und im Sommer 1979 nur noch ca. 60 m vom Vollerwieker Deichfuß entfernt war. Um die Gefährdung für den Seedeich abzuwenden, entschied man sich, die Nordrinne zu durchdämmen und

parallel dazu einen Durchstich von der Nord- zur Südrinne zu baggern (vgl. in Abb. 3.12 die Topographie von 1972 zu 1983). Das Material, dass bei dem Durchstich gefördert wurde, wurde teilweise für die Durchdämmung der Nordrinne eingesetzt (vgl. WIELAND 1999, 2000a). So entstand in der Nordrinne ein Sanddamm von 1.7 km Länge mit einer Kronenhöhe von NN + 3.0 m am Deichfuß und NN + 1.75 m am Kopf (Abb. 3.13).

Der Sanddamm flachte sich ab und übernahm die Funktion einer natürlichen Watthöhenscheide, wobei sich die beiderseitigen Totarme der Nordrinne zu Nebenrielen zurückgebildet haben. Infolge des neuen Verlaufs des Hauptstromes wurde die Südrinne ausgeräumt.

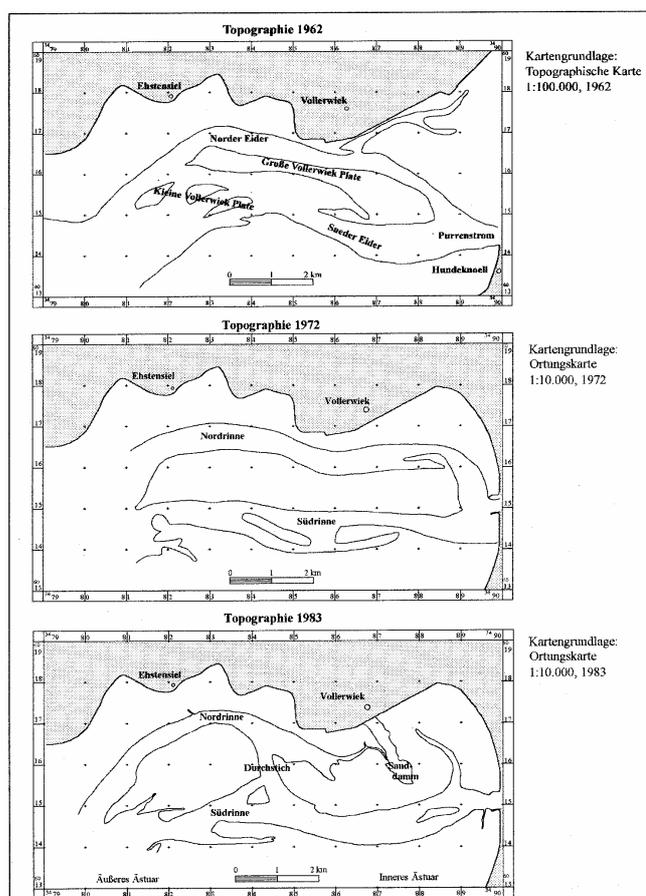


Abb. 3.12: Rinnenentwicklung und regulierende Eingriffe im Sperrwerksbereich und in der Außeneider.
Quelle : GÖNNERT (1996)

3.1.5 Ästuar-sperrwerk

Die Eider ist mit einer Länge von ca. 190 km und einem Einzugsgebiet von 3 275 km² der bedeutendste Fluss Schleswig-Holsteins (WIELAND 1999, 2000a). Er mündet südlich der Halbinsel Eiderstedt in die Nordsee und ist somit im Unterlauf tidebeeinflusst. Jedoch führten mehrere bauliche Eingriffe – vor allem die 1973 beendete Abdämmung im Mündungsbereich – zu starken Veränderungen des Ästuars (vgl. hierzu ausführlich WIELAND 1999, 2000a).

Der Bau des Eidersperrwerks verfolgte im Wesentlichen die Ziele,

- das Eidgebiet gegen Sturmfluten zu sichern,
- eine optimale Vorflut für das Eidgebiet zu schaffen und
- den Schiffsverkehr aufrecht zu erhalten.



Abb. 3.13: Luftbild der Außeneider im Jahr 1986 mit dem Sanddamm und dem Eidersperrwerk.

Das Sperrwerk besteht aus einem 4.8 km langen und 8.5 m hohen Deich und einem 256 m langen Sperrbauwerk mit fünf Sielöffnungen, sowie einer Schiffsschleuse. Es wurde so konzipiert, dass

- die Tiden weitgehend ungehindert ein- und ausschwingen können,
- die Tideeider (Sperrwerk bis Nordfeld) bei Bedarf zugunsten der Vorflut als Zwischenspeicher vorgehalten werden kann,
- der höchstzulässige Wasserstand in der Tideeider von 700 cm PN (Pegelnul) zum Schutz des binnendeichs anschließenden Katinger Watts nicht überschritten wird,
- dem Schiffsverkehr genügend Wassertiefe zur Verfügung gestellt wird,

-
- die Möglichkeit der Rinnenspülungen mit den Sielen in Nordfeld und Hundeknöll-Vollerwiek gegeben ist und
 - das ökologische Gleichgewicht nicht gestört wird.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die wesentlichen Folgen des Sperrwerks in der Einschnürung des Durchflussquerschnitts der Eiderrinne um rund 12 %, einer Umlenkung und Fixierung der Eiderrinne sowie der Bedeichung des Katinger Watts liegen. Die hydrologischen Folgen sind die zeitweise Unterbrechung oder Beeinflussung der Tideschwingung bei den notwendigen Sperrwerkseinsätzen wie z.B. Tideaussperrung bei T_{nw} zugunsten des Binnenwasser-Speicherraums, der Sturmtidenkappung und der Flutstromdrosselung zur Versandungsabwehr, aber auch der Sperrwerksschließung wegen anfallender Bauarbeiten.

Die Wirkung des Sperrwerks auf die Sturmhochwasser ist binnenwärts des Sperrwerks positiv in dem Sinne, dass die Sturmtiden durch das Schließen des Sperrwerks gekappt werden können. Seewärts des Sperrwerks laufen die Sturmhochwasser nach dem Sperrwerksbau nicht höher auf, so dass es in der Außeneider zu keinen negativen Effekten kommt. Die Umlenkung und Fixierung der Eiderrinne, die vor dem Bau des Sperrwerks stark mäandrierte, hat insbesondere durch die Abnahme des Prielquerschnitts morphologische Auswirkungen. Die normalen Tiden sollen weitgehend ungehindert ein- und ausschlagen können, so dass sich hier der reduzierte Querschnitt im Sperrwerksbereich durch eine Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten bemerkbar macht. Allerdings hat durch die Bedeichung des Katinger Watts der Flutraum binnenwärts des Sperrwerks abgenommen.

3.1.6 Rückdeichungen

Es wurde bereits angesprochen, dass das Vorland zum Schutz von Deichen eine wichtige Rolle einnehmen kann. Es kann vor allem als Pufferzone zwischen Land und Meer betrachtet werden. Die seewärtige Grenze des Vorlandes ist im stetigen Fluss. Während ruhiger Perioden kann eine langsame seewärtige Ausdehnung erfolgen, wohingegen bei Stürmen die anbrandende Wellenenergie an der Grenze zum Vorland durch lokale (Kanten-)Erosion umgesetzt wird (vgl. Kap. 3.1.1). In England wurde an einigen Stellen beobachtet, dass dieses System jedoch nicht mehr über einen längeren Zeitraum „stabil“ ist. Man stellte z.B. in Essex starke Verluste der Salzwiesenflächen von bis zu 2 % pro Jahr fest und unternahm den Versuch, neues Vorland durch eine Rückverlegung der Deiche zu erschaffen (BOORMAN & HAZELDEN 1995, S. 176 ff.). Geht man in Zukunft von einem weiteren Meeresspiegelanstieg aufgrund einer globalen Erwärmung aus, so wird sich der aktuelle Trend der Erosion des Vorlandes verschärfen und eine Rückdeichung könnte auch hierzulande notwendig werden. Unter natürlichen Bedingungen würde mit dem Vorlauf des Meeresspiegelanstiegs das Vorland landwärts zurückweichen und die gleiche Position relativ zum Gezeitenniveau einneh-

men. Infolge der heute festgelegten Deichlinie wird diese Rückverlagerung jedoch unterbunden. Somit nimmt die Wassertiefe zu und die höheren Salzwiesengesellschaften (Andelzone) werden instabil in dem Maße wie die Häufigkeit und Dauer der Überflutungen zunimmt. Sie verschwinden allmählich und das Vorland wird zunehmend von niederen Salzwiesengesellschaften (Quellerzone) eingenommen bis schließlich nur noch Wattflächen übrig bleiben (vgl. hierzu Abb. 3.1). Die Verluste an Salzwiesen bedeuten, dass bei einem weiteren Meeresspiegelanstieg und einer Abnahme (v.a. der Breite) des Vorlandes eine kostenintensive Erhöhung und Verstärkung der Deiche notwendig wird, um den heutigen Sicherheitsstandard beizubehalten. Eine mögliche Alternative zur Deichverstärkung kann deshalb eine Rückverlegung der Deiche sein.

Mit der Rückdeichung wird der Prozess der v.a. bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts forcierten Eindeichung der ehemals ausgedehnten Salzwiesen im Übergangsbereich zwischen Land und Meer regelrecht umgekehrt. Die landwirtschaftlichen Nutzflächen werden aufgegeben und durch gezielten Rückbau von Deichen der normalen Überflutung wieder zugeführt, so dass wieder Salzwiesen entstehen können.

Dies klingt zwar widersprüchlich, kann sich aber lokal – vor allem vor dem Hintergrund der zu erwartenden Kosten bei notwendigen Deicherhöhungen – zu einer sinnvollen Alternative entwickeln (vgl. hierzu z.B. BOORMAN & HAZELDEN 1995, S. 176).

Es gibt jedoch eine Reihe technischer, botanischer und geomorphologischer Probleme bei der Rückdeichung, die nicht außer Acht gelassen werden dürfen.

In England konnten schon seit mehreren Jahrzehnten Erfahrungen mit Rückdeichungen gemacht werden, weil dort v.a. zu Beginn des 20. Jahrhunderts Deiche gebrochen sind (BOORMAN & HAZELDEN 1995). In diesen untersuchten Gebieten bildeten sich nach „natürlichen“ Deichbrüchen, die sich im Zuge einer Sturmflut ereignet haben, anschließend wieder Salzwiesen. Jedoch ist das Ergebnis der Besiedlung mit Salzwiesen weit entfernt von dem erhofften Ausmaß, besonders da diese Deichbrüche gleich mehrere Gefahren implizieren. Zuerst einmal besteht Gefahr für Menschenleben, Vieh und Gebäude, wenn ein unkontrolliertes, nicht vorhergesagtes, katastrophales Überflutungsereignis stattfindet. Zweitens ist keine Kontrolle des Überflutungsausmaßes gegeben und drittens können extensive lokale Erosionen sowohl innerhalb der vormals kultivierten Flächen als auch außerhalb in den Salzwiesenbereichen auftreten. Obendrein können die erodierten Sedimente in unerwünschten Bereichen zur Ablagerung kommen.

Ein generelles Problem bei Deichrückverlegungen liegt in der aktuellen Höhenlage des zu überflutenden Hinterlandes. Bei Deichbrüchen hat sich gezeigt, dass eine natürliche Regeneration von Salzwiesen in den Bereichen erfolgreich ist, in denen das Hinterland relativ hoch

gelegen ist und zwar im Bereich der oberen Ebene der lokalen Salzwiesenvorkommen. Oft ist es jedoch so, dass das Land hinter den Deichen durch Entwässerung und Kompaktion des Bodens tiefer liegt als das vor dem Deich liegende Vorland im Niveau der Pionierzone (Quellerzone). Öffnet man in diesen Fällen einfach nur den Deich, so entstehen lediglich neue Wattflächen, die keinen wesentlichen Nutzen für den Küstenschutz bringen.

Zudem hat sich der Boden chemisch und physikalisch seit seiner Eindeichung verändert. Er ist ausgetrocknet durch die Absenkung des Grundwasserspiegels, die Dichte hat zugenommen und die Porosität abgenommen. Das Salz wurde durch die Niederschläge ausgewaschen und Dünger hinzugefügt. Gerade die Dichte und Porosität von Böden sind wichtige Parameter für die Wasserverfügbarkeit für Pflanzen.

In Gebieten mit natürlichen Deichbrüchen hat man festgestellt, dass die Priele oft dem ehemaligen Entwässerungssystem der landwirtschaftlichen Flächen folgen. Somit könnte ein neues Prielsystem durch Ausheben relativ schmaler und flacher Priele so gesteuert werden, wie man es zur optimalen Wachstumsbedingungen für Salzwiesen benötigt.

Generell ist es möglich, die zu erwartende Vegetation auf Basis einer topographischen Karte und lokaler Daten zur Artenverteilung vorherzusagen (vgl. BOORMAN & HAZELDEN 1995, S. 182). Mit Hilfe der Höhenaufnahme ist es denkbar, das Wasservolumen, das bei Tidehochwasser einläuft, zu berechnen. Daraus lässt sich wiederum der Querschnitt des aufzulassenden Deiches bestimmen. Diese Vorberechnungen zur Hydrodynamik sind erforderlich, um die Stabilität des Systems zu erhalten.

Aufbauend auf den Erfahrungen der Engländer in Essex kann man eine Rückdeichung in drei Phasen einteilen (BOORMAN & HAZELDEN 1995). In der ersten Phase wird das Hinterland bis zu einem Punkt überflutet, der zum einen durch die Geländehöhe oder eine künstliche Barriere (z.B. Sommerdeich) und andererseits durch das Gezeitenniveau bestimmt wird. Dabei verändert sich die Vegetation hin zu salztolerierenden Arten. In der zweiten Phase bildet sich ein neues Prielsystem aus und in der letzten Phase nehmen die Salzwiesenbereiche aufgrund des sich ausweitenden Prielsystems ab.

Handelt es sich bei dem untersuchten Gebiet um Salzwiesen eines Ästuars, so sollte der Erfolg einer Rückdeichung nicht nur an der Ausdehnung der neuen Salzwiesen im überfluteten Hinterland festgemacht, sondern auch der Effekt auf benachbarte Vorländer bzw. auf das Ästuar als Ganzes betrachten werden. Zum einen können die neuen Salzwiesen im Ästuar als natürliche Flutzone dienen, welche die Tide- und Wellenenergie absorbieren und somit auch wenige Unterhaltskosten verursachen. Zum anderen können gerade große rückgedeichte Flächen signifikante Auswirkungen auf das Ästuar haben, indem sie z.B. als eine Art Sicher-

heitsventil im Verlauf einer Sturmflut dienen. Aber durch die zusätzliche Fläche wird auch ein vergrößertes Wasservolumen im Ästuar mit jeder Tide ein- und auslaufen und das kann im unteren Bereich des Ästuars zu erhöhter Erosion führen. Das Fazit einer Rückdeichung lässt sich nicht innerhalb weniger Jahre feststellen; das System (z.B. Salzwiesenvegetation) benötigt Zeit, um eine gewisse Stabilität zu erreichen.

In einer weiteren Untersuchung in England (FRENCH 1999) haben Vergleiche zwischen Salzwiesen, die sich in rückgedeichten Bereichen entwickelt haben, und „offenen“ Salzwiesen ergeben, dass die Verluste an Vorland im offenen System in der gleichen Zeitspanne größer sind als in rückgedeichten Bereichen. Zudem hat das rückgedeichte System signifikant zum Küstenschutz für das Hinterland beigetragen.

Eine andere Alternative können Lahnungen oder andere Bauwerke sein, welche die Wellenenergie reduzieren und somit zur Wattflächenbildung beitragen (vgl. Kap. 3.1.2). Diese Maßnahmen werden jedoch durch die z.T. hohen Kosten und die Topographie stark eingeschränkt. Zudem lehnen die meisten Naturschützer diese Maßnahmen als unnötigen Eingriff in die natürliche Entwicklung ab.

Es lässt sich feststellen, dass die Rückdeichung eine Möglichkeit bietet, Salzwiesenverluste auszugleichen. Da sie aufgrund der gegebenen Landnutzung jedoch nur lokal begrenzt in Frage kommt, ist ein positiver Einfluss auf den Bestand des Wattenmeeres insgesamt bisher nicht nachgewiesen. Sie unterscheidet sich insofern von den in Kapitel 3.1.2 beschriebenen Lahnungen, die verbreitet vor der Uferlinie eingesetzt werden können.

Nimmt man den heutigen Sicherheitsstandard als Maßstab, so sind die Kosten für eine Rückdeichung meist höher als die für eine Erhöhung der Deiche, wenn auch der ökologische Wert für die Salzwiesen mit eingerechnet werden muss.

Im gegenwärtigen Generalplan Küstenschutz für Schleswig-Holstein wird eine Rückdeichung für die Nordseeküste nahezu ausgeschlossen. Unter Punkt 3 der Entwicklungsziele heißt es hierzu: „**Rückverlegungen oder Aufgabe von Deichen sind nur in Ausnahmefällen möglich**“ (MLR 2001). Die weitere Entwicklung mit einem evtl. beschleunigten Meeresspiegelanstieg könnte jedoch im Hinblick auf zunehmende Kosten Rückdeichungen in der Zukunft als sinnvoll erscheinen lassen.

3.1.7 Vordeichungen

Im schleswig-holsteinischen Wattenmeer gab es in den letzten Jahrzehnten sowohl in Nordfriesland als auch in Dithmarschen in größerem Ausmaß Vordeichungen. Sie sollten im Wesentlichen zu einer verbesserten und kontinuierlichen Entwässerung der Marschen beitragen. Es entstanden hinter den Deichen große Speicherbecken (z.B. Hauke-Haien-Koog, Beltringharder Koog, Speicherkoog Dithmarschen). Die Planungen zur Vordeichung des Beltringharder Kooges in der Nordstrander Bucht sind beispielsweise schon seit 1963 Bestandteil des damaligen Generalplans Küstenschutz. Seit 1969 ist sie ausdrückliches Planungsziel des Landes im Landesraumordnungsplan. Die Deichschließung des Beltringharder Kooges erfolgte im Jahr 1987. Im Folgenden soll die Wirkungsweise einer Vordeichung stellvertretend an dem Beispiel des Beltringharder Kooges vorgestellt werden (Abb. 3.14). Es gibt zwar lokale Unterschiede, jedoch sind die Folgen und Auswirkungen bei allen Vordeichungen vergleichbar (z.B. Flutraumreduzierung, Verringerung der Strömungsgeschwindigkeiten, Verkleinerung des Prielquerschnitts).

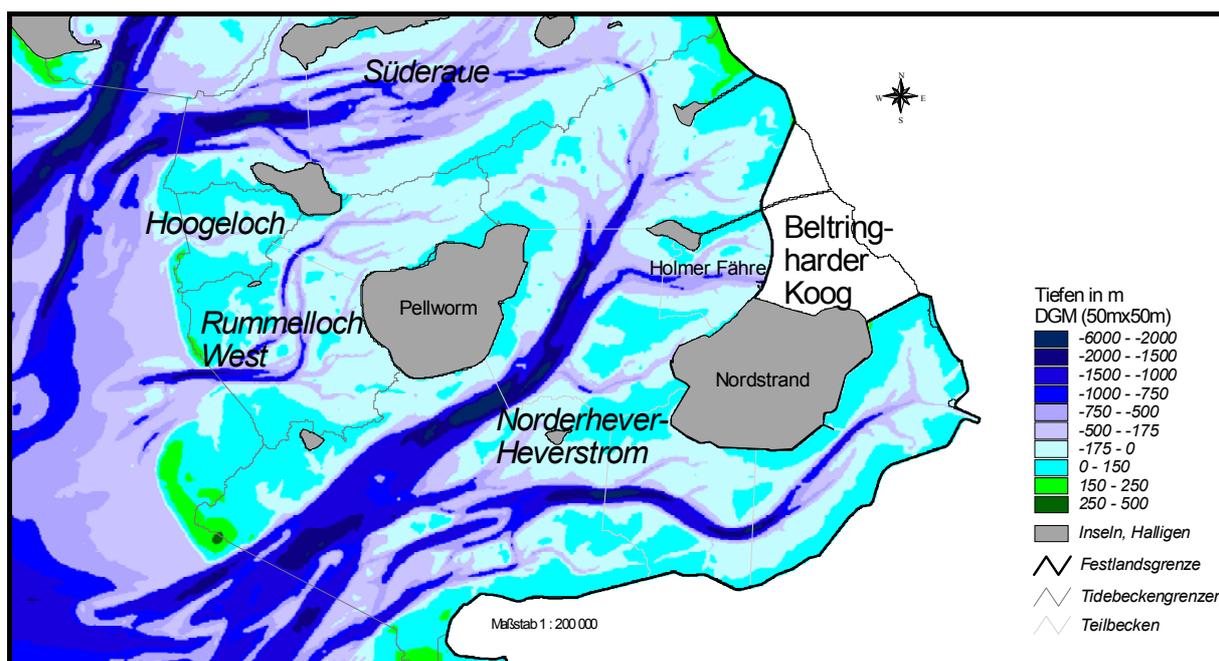


Abb. 3.14: Digitales Geländemodell des Tidebeckens Norderhever-Heverstrom mit dem Beltringharder Koog und dem Teilbecken der Holmer Fähre (DGM: 50 m x 50 m).

Bei der Eindeichung des Beltringharder Kooges ist neben der Binnenentwässerung ein essentielles Ziel das Aufhalten der Erosion des festlandsnahen Wattsockels durch den mächtigen Priel der Norderhever gewesen (Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten des Landes Schleswig-Holstein (kurz: MELFF) 1981). Es wurde eine verstärkte Umströmung der Insel Pellworm festgestellt, so dass der Wattsockel von Pellworm und Hooge bedroht war. Die Verbindungsrinnen zwischen den Tidebecken der Hever und der nördlich anschließenden Süderaue vertieften und erweiterten sich und es kam zu Erosionen der umliegenden Wattbe-

reiche. Besonders das Rinnensystem der Norderhever, Strandley, Rummelloch und Süderau standen – und stehen auch heute noch – im Hinblick auf eine mögliche Gefährdung der Watt-, Insel- und Halligsockel um Pellworm unter sorgfältiger Beobachtung.

In dem Gutachten des MELFF (1981) wurde darauf aufmerksam gemacht, dass die Vordeichung der Nordstrander Bucht sowohl auf die mittlere Tide (Senkung des Tidehochwassers) als auch auf die Sturmfluten nur einen geringen Einfluss haben wird. Ausschlaggebend für die Änderungen der Hydrologie sollte nach Meinung der Gutachter die Abdämmung der Holmer Fährde und nicht weiterer hochgelegenen Wattflächen sein.

Bei einer Vordeichung wird der Flutraum des Tidebeckens verringert. Bei der Vordeichung des Beltringharder Kooges wurden die in die Norderhever mündenden Nebenpriele – das Butterloch und die Holmer Fährde – teilweise abgedämmt. Der weitaus stärker betroffene Nebenpriel der Holmer Fährde entwässert das Watt zwischen der Insel Nordstrand und Nordstrandischmoor (Abb. 3.14). Der Flutraum der Holmer Fährde und somit auch der Norderhever wurde bei einer mittleren Tide um rund 40 Mio. m³ verkleinert. Das führt in erster Linie zu geringeren Strömungsgeschwindigkeiten in den Prielen, weil die einströmende Wassermenge sich reduziert und gleichzeitig die Ebb- bzw. Flutdauer konstant bleibt. Der Prielquerschnitt ist demzufolge nach der Abdämmung zu groß. Eine mögliche Reaktion der Morphologie müsste eine verstärkte Sedimentation in den Prielen sein, bis der Querschnitt dem neuen Tidevolumen entspricht. Dies gilt in erster Linie natürlich für den Priel Holmer Fährde und konnte dort anhand von Profilvergleichen auch deutlich nachgewiesen werden (ALR Husum 1995). In der Konsequenz muss dies für die Norderhever, welche die verringerten Wassermassen der Holmer Fährde bei Ebbe aufnimmt, ebenso gelten.

Als Ergebnis der bisherigen Überwachung wurde festgestellt, dass das System sich derzeit insgesamt relativ stabil darstellt. Der im Generalplan Küstenschutz in der Fortschreibung von 1986 noch fest eingeplante Sicherungsdamm nach Pellworm ist daher – nach entsprechender Kabinettsentscheidung vom 01.08.1989 und erneuter Behandlung im Kabinett am 29.04.1997 – aus der Planung herausgenommen worden (MLR 2001).

SCHERENBERG & SAGGAU (1988) sehen als weitere Ziele der Vordeichung des Beltringharder Kooges u.a. die Verkürzung der Deichlinie um rund 47 %, was zu Einsparungen für die Unterhaltskosten des Deiches führt. Zudem wird eine zweite Deichlinie geschaffen, die das Risiko für die dahinter liegenden Gebiete hinsichtlich Sturmfluten vermindert. Für die Flüsse Arlau und Jelstrom und der Sönke-Nissen-Koog-Schleuse kommt es zudem durch das Speicherbecken des Beltringharder Kooges zu einer Hochwasserentlastung (Abb. 3.15).

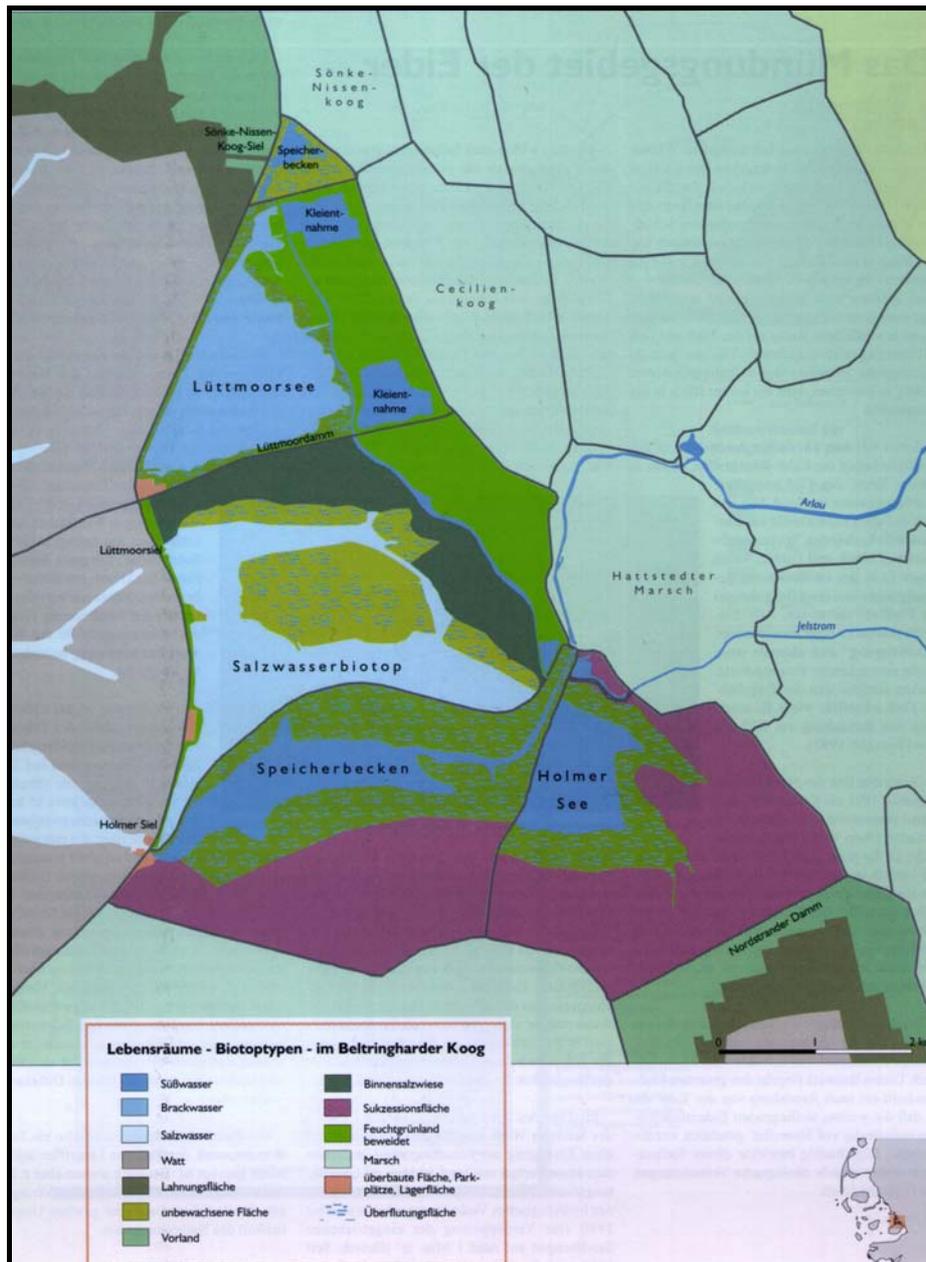


Abb. 3.15: Lebensräume im neu bedachten Beltringharder Koog.

Quelle: Umweltatlas Wattenmeer (1998)

Ähnliche Projekte wurden auch in den Niederlanden durchgeführt. So zeigt EHLERS (1988) die hydrologischen und morphologischen Konsequenzen der Abdämmung der Zuider Zee in den Niederlanden auf. Durch die Vordeichung bzw. Abdämmung hat sich der Tidenhub um bis zu 50 cm erhöht. Die morphologische Anpassung an die neuen Gegebenheiten hat 5 Jahre gedauert. Zudem haben sich die Tideströmungen geändert, was sich in einer Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit um 10 % - 26 % bemerkbar gemacht hat. Die Zunahme der Sturmfluthöhe um 40 cm bis 100 cm resultiert im Wesentlichen aus der Verengung des Tidebeckens. Die morphologischen Änderungen lassen sich vor allem in der Abnahme der Prielquerschnitte und einer verringerten Sedimentation durch die Zunahme des Tidenhubs und der Sturmflutwasserstände wahrnehmen.

3.1.8 Verbindungsdamm

Ein intensiv diskutierter, jedoch nicht umgesetzter Plan ist der Bau eines Verbindungsdammes vom Festland nach Pellworm (u.a. MELFF 1981, MLR 2001). Die geplante Trasse verläuft im Tidebecken Norderhever-Heverstrom und soll entlang der Watthöhenscheide vom Festland nach Pellworm verlaufen (vgl. Abb. 3.14).

Der Damm soll im Wesentlichen die Ausräumung der Wattrinnen und den Abtrag des Wattsockels bei Pellworm verhindern (vgl. vorheriges Kapitel). Vor allem die Vertiefung des Strandley von 2 m zu Beginn des letzten Jahrhunderts (1909) auf über 12 m bis 1992, der allein durch die Vordeichung der Nordstrander Bucht nicht effektiv entgegengewirkt werden kann, soll durch den Damm unterbunden werden. Durch die Vertiefung ist ein stärkerer Wasserübertritt (40 Mio. m³ pro Tide) von der Norderhever zur Süderau möglich. Würde der Damm gebaut werden, so käme es zu starken Sedimentationen in der Süderau, weil das Ebbvolumen stark reduziert und somit die Querschnitte zu groß wären. Zudem würde mit dem Damm so genannte „Stillwasserzonen“ mit erhöhter Ablagerung zur Bildung neuer Watt- und Vorlandflächen geschaffen werden. Die durch die Vordeichung entstandene „enge Bucht“ nördlich des Nordstrander Damms, die zusätzliche Staueffekte hervorruft, soll im Zuge des Baus des Verbindungsdammes beseitigt werden.

Ein Ergebnis des Gutachtens (MELFF 1981) ist, dass südlich des Damms in der Norderhever höhere Hochwasser und nördlich in der Süderau niedrigere Hochwasser eintreten werden. Dies ist mit der Unterbindung der Überströmung der Tidewelle in das nördliche Becken begründet, das durch den Damm keinen Reststrom mehr aus der Norderhever erhält. Demzufolge wird auch das *HThw* bei einer Sturmflut auf der Südseite des Damms (Norderhever-Heverstrom) erhöht.

Die Linienführung des Damms kann aus rein wirtschaftlichen Gesichtspunkten erfolgen, weil eine Variation in der Trassenführung kaum Unterschiede bei den Tidewasserstände oder Strömungen hervorruft. Allerdings wurde in dem Gutachten darauf hingewiesen, dass nur durch die Kombination der Vordeichung der Nordstrander Bucht und des Sicherungsdamm nach Pellworm die Wattströme in der Nordstrander Bucht stabilisiert werden könnten. Es wurde jedoch auch gesehen, dass aus ökologischen Gründen die Eindeichungsfläche so klein wie möglich gehalten werden sollte. In Folge dessen wurde gesagt, dass keine Vordeichung nördlich und südlich der Hamburger Hallig nötig ist, wenn die Flutraumverringering durch die Vorlandarbeiten beibehalten wird.

Bei Untersuchungen des ALR Husum (1996) ist man bisher zu dem Ergebnis gekommen, dass der Bau des Sicherungsdammes momentan nicht notwendig ist, weil die morphologische Entwicklung im Bereich des südlichen Nordfriesischen Wattenmeeres nicht so besorgniserre-

gend ist, wie sie zum Ende der 80 er Jahre gedeutet wurden. Insgesamt haben sich die Erosionen in den Rinnen abgeschwächt. Es treten momentan nur Erosionen in lokalen Bereichen auf, die gut durch kleinere, regionale Küstenschutzkonzepte (z.B. neue Lahnungen) in den Griff zu bekommen sind.

4. Datengrundlage und Datenqualität

Will man die Effekte von Küstenschutzmaßnahmen bzw. die Auswirkungen eines Meeresspiegelanstiegs auf die Watttopographie und die damit verbundenen morphologischen Veränderungen erfassen bzw. abschätzen, so ist es unumgänglich, hierfür eine geeignete Datenbasis zu schaffen. Da für diese Arbeit keine hydrodynamisch-numerischen Simulationsdaten zur Verfügung standen – dies war im Rahmen der Ziele des Projektes, in dem diese Arbeit entstand, nicht vorgesehen (vgl. Kap. 1) –, sollen für die weiteren Untersuchungen Digitale Geländemodelle der Wattgebiete generiert werden. Die diesen Modellen zugrunde liegenden Primärdaten werden im Folgenden im Hinblick auf die Erfassungsmethoden, deren digitale Weiterverarbeitung sowie den damit verbundenen Fehlern analysiert.

4.1 Vermessungsmethoden

Die Wasserwirtschaftsverwaltungen der Länder haben im Rahmen ihrer gewässerkundlichen Aufgaben u.a. zum frühzeitigen Erkennen nachteiliger Entwicklungen und als Grundlage für regulierende Planungen den aktuellen morphologischen Zustand des Küstenraumes zu erfassen, darzustellen und zu vergleichen. Deshalb wird das Wattengebiet an der Nordseeküste wiederholt topographisch vermessen. Die Ergebnisse mehrerer aufeinander folgender Messungen können dann Aufschluss über Art, Umfang und Richtung morphologischer Veränderungen geben (WIELAND 1985, DOLEZAL 1974).

Die ersten Vermessungen fanden bereits 1934 statt, beschränkten sich jedoch zu Beginn auf bestimmte, in sich geschlossene Wattstromgebiete. Die bei der Vermessung eingesetzten Methoden sind in erster Linie abhängig von den natürlichen Gegebenheiten. Man unterscheidet zwischen der Vermessung der Flächen unter Tideniedrigwasser, also Priele und Wattströme, die ständig von Wasser bedeckt sind und deshalb nautisch vom Schiff oder Boot aus vermessen werden, und den bei Ebbe trocken fallenden Watten, die hauptsächlich terrestrisch vermessen werden.

Bei der nautischen Vermessung wurden die Flächen unter T_{nw} anfangs durch einfache Profilotungen vom Schiff oder Boot aus mittels tachymetrisch eingemessener Markierungsstangen, Lotleine und Handlot topographisch vermessen (WIELAND 1985). Heute hat das für die Vermessung zuständige Amt für ländliche Räume in Husum (ALR Husum) eigene Vermessungsschiffe mit Echographen zur Tiefenlotung. Die Ermittlung der Schiffsposition erfolgt über ein elektronisches Ortungsverfahren. Die mittlere Messgenauigkeit beträgt bei dieser Methode in der Lage ± 5 m und in der Höhe ± 5 cm. Durch den Tiefgang der Schiffe war bis

zum Bau eines extrem flachen Watten-Messbootes im Jahre 1973 die Erfassung der Wattflächen nur bis zu einer Höhe von maximal Normal Null möglich, was einem Anteil von ca. 40 % des gesamten Gebietes entspricht (WIELAND & THIES 1975).

Die restlichen gut 60 % trocken fallenden Watten, Außensände und Vorländer wurden bis zur Tideniedrigwasserlinie von 1934 bis 1972 nivellitisch vermessen. Dafür stehen im Prinzip einerseits die tachymetrische Flächenaufnahme und andererseits das Profilverfahren, das ein Nivellement über ein festgelegtes Raster vorgibt, zur Verfügung. Die Wahl fiel auf das Profilverfahren, weil es das einfachere und effektivere Verfahren für die flachen Wattflächen ist. Bei diesem Verfahren wird eine bis zu 15 km lange, in Abständen von 200 m durch Pfähle markierte Standlinie eingemessen. Die Höhe der Pfähle wird durch Nivellement bestimmt und an das Landeshöhenetz zu Normal Null (NN) angeschlossen. Von diesen eingemessenen Pfählen werden nach beiden Seiten im rechten Winkel Profile markiert. Mit einem Punktabstand von mindestens 50 m können dann die Wathöhen nivellitisch aufgenommen werden. Die mittlere Messgenauigkeit hierbei beträgt in der Punktlage ± 2.5 m und in der Höhenlage ± 3 cm. Der Nachteil liegt in der geringen Messleistung von nur 0.8 bis 1.0 km² pro nutzbare Niedrigwassertide und dem relativ hohen Personalaufwand (4 Personen). Ab 1973 konnte für höher liegende Bereiche das Watten-Vermessungsboot „Alwalot“ – ein schraubengetriebener Trimaran – mit einem sehr geringen Tiefgang von 44 cm eingesetzt werden. Es löste die klassische Wattvermessung (Nivellement) bis zu einer Höhe von rd. +1.0 m NN ab, so dass die Vermessungsleistung um 100 % gesteigert werden konnte. Pro Tide können nun 2 bis 3 km² Wattfläche vermessen werden (WIELAND & THIES 1975).

Seit Beginn der Vermessungen bediente man sich der Unterstützung durch Luftbilder, die flächenhafte Veränderungen bei Niedrigwasser sehr anschaulich aufzeigen. Sie sind jedoch aufgrund ihres mittleren Höhenfehlers von ca. ± 20 cm, der durch die Passpunktbestimmung durch Aerotriangulation verursacht wird, nicht direkt für topographische Vermessungen geeignet. Deshalb ist zur Herstellung von Wathöhenkarten aus Luftbildern das Wasserlinienverfahren entwickelt worden. Es basiert auf der Auswertung von Serieneinzelbildaufnahmen, bei denen man aus der veränderten Lage der Wasserlinien im Verlauf einer Halbtide, beginnend bei Tideniedrigwasser, ein Formlinienbild des Watts erhält. Die Genauigkeit hängt zum einen ab von der Beschickung (auf möglichst in der Nähe liegende Pegel) des Wasserlinienbildes mit dem wahren, auf NN bezogenen Wasserstand an jedem Ort, zum anderen von der Deutlichkeit der sich auf dem Luftbild abzeichnenden Wasserlinie ab. Die Genauigkeit liegt im Bereich des bisher verwendeten Profilverfahrens, also von ± 2.5 m in der Lage und ± 3 cm in der Höhe (WIELAND & THIES 1975, SINDERN & KATHAGE 1966, DOLEZAL 1966).

4.2 Kartenwerke

Die aus den Vermessungen gewonnenen Daten sollten vielen Interessierten zugänglich gemacht werden, um einen möglichst großen Nutzen für Verwaltung und Forschung zu erzielen. Schleswig-Holstein war in diesem Bereich Vorreiter und gab bereits 1955 ein Kartenwerk im Maßstab 1 : 25 000 heraus, welche das gesamte schleswig-holsteinische Wattenmeer abdeckte. Es sollte eine Bestandsaufnahme des Wattenmeeres vorgenommen werden, um eine zuverlässige topographische Grundlage zu erhalten. Aus einem Vergleich mit späteren Aufnahmen erhoffte man sich, die „gestaltenden Kräfte der Gezeitenbewegung im Küstengebiet und ihre Wirkungen erkennen zu können“ (MÜLLER & FISCHER 1955, S. 311). Im Folgenden seien die in dieser Arbeit genutzten Kartenwerke kurz vorgestellt.

Die Basis für alle Kartenwerke bilden in der Regel die so genannten Wattgrundkarten, die seit Beginn der Vermessungen 1934 im Maßstab 1 : 10 000 regelmäßig erstellt werden. Basierend auf dem Gauß-Krüger-System decken sie den gesamten schleswig-holsteinischen Wattenraum mit insgesamt 198 einzelnen Kartenblättern im Format 40 x 80 cm ab. Die Höhe wird dabei auf Normal Null (NN) und nicht auf das in Seekarten übliche Seekartennull, das dem mittleren Springtideniedrigwasser (*MSpTnw*) entspricht, bezogen. Früher wurden die tiefen Bereiche vom Deutschen Hydrographischen Institut (DHI) in Hamburg und die flachen Bereiche von den Marschenbauämtern vermessen. Heute ist das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, der Nachfolger des DHI, für die schiffbaren, tieferen Bereiche der Nordsee, und das Amt für ländliche Räume in Husum für die Vermessung der Wattgebiete zuständig. In den Bereichen über NN - 1 m liegt die Äquidistanz der Niveaulinien (Isobathen bzw. Isohypsen) bei 10 cm, dann folgt die NN - 1.5 m-Tiefenlinie und unterhalb von NN - 2 m werden die Isobathen in 1 m-Schritten fortgeführt.

Die beiden im Folgenden beschriebenen Kartenwerke sind direkt aus den Wattgrundkarten abgeleitet. Die Grundkarten im Maßstab 1 : 10 000 wurden im Einvernehmen mit dem Landesvermessungsamt Schleswig-Holstein zu Topographischen Karten im Maßstab 1 : 25 000 weiterentwickelt (MÜLLER & FISCHER 1955). Zudem wurden die Äquidistanzen der Niveaulinien verändert.

Das erste Kartenwerk im Maßstab 1 : 25 000 wurde als Kartenmappe der Veröffentlichung „Das Wasserwesen an der schleswig-holsteinischen Nordseeküste“ von MÜLLER & FISCHER (1955) beigelegt. Dort sind die Wattvermessungen von 1934 bis 1955 in 41 topographischen Wattkarten dargestellt. MÜLLER & FISCHER (1955) geben für die Lagegenauigkeit einen Wert von weniger als einem Meter an. Bei wiederholt vermessenden Gebieten wurde jeweils die Erstaufnahme in die Kartenmappe eingearbeitet. Dies begründete man damit, dass man für spätere Kartenvergleiche des gesamten Küstenbereichs über einen möglichst

langen Zeitraum verfügen möchte (PETERSEN 1959). Das ist aus heutiger Sicht insofern ein Nachteil, als das man bei einem Vermessungszeitraum von 20 Jahren und der im Wattenmeer stattfindenden starken morphologischen Änderungen nicht mehr von einer zeitnahen, synoptischen Vermessung des gesamten Küstenbereiches sprechen kann. In den Bereichen zwischen NN + 1 m bis NN - 2 m liegt die Äquidistanz der Niveaulinien bei 0.50 m, dann folgt die NN - 5 m Tiefenlinie und unterhalb von NN - 5 m werden die Isobathen in 5 m-Schritten fortgeführt.

Eine neue Initiative für eine synoptische Vermessung des deutschen Küstengebietes aller Bundesländer startete 1974 vom Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI). Die Forschung sowie die staatlichen Organe des Küstenschutzes waren um eine einheitliche kartographische Erschließung des gesamten Wattgebietes bemüht, da sie für ihre großräumigen Untersuchungen, Planungen und für die Durchführung von Küstenschutzbauten die aktuelle Topographie kennen mussten. Die Meßkampagne erfolgte zwischen 1974 bis 1976 von der dänischen bis zur niederländischen Grenze, durch die Vermessungsdienststellen des Bundes und der Länder Hamburg, Niedersachsen und Schleswig-Holstein. Es entstanden 66 farbige Kartenblätter im Maßstab 1 : 25 000 ebenfalls im Gauß-Krüger-Koordinatensystem. Die Äquidistanzen der Niveaulinien liegen in den KFKI-Karten in den Bereichen oberhalb von NN - 2 m bei 0.25 m, zwischen NN - 2 m bis NN - 6 m von 1 m. Unterhalb NN - 6 m werden die Isobathen in 2 m-Schritten fortgeführt. Die Vermessung erfolgte mit herkömmlichen Messverfahren wie der Lotung mit Echographen und tachymetrischen Aufnahmeverfahren sowie teilweise, für die trockenfallenden Wattgebiete, mit dem Wasserlinienverfahren (s.o.). In Schleswig-Holstein war die Tiefwasservermessung bereits 1974 abgeschlossen, wohingegen kleinere hochliegende Flächen erst 1976 vermessen wurden. Die Bereiche bis 1.5 m über Seekartennull (SKN) wurden mit Schiffen und Booten ausgelotet. Zwischen Eider und Friedrichskoog lag diese Begrenzung sogar aufgrund des höheren Tidenhubes bei etwa 2.5 m über SKN. Die höherliegenden Wattflächen wurden in Schleswig-Holstein von Messtrupps nivelliert, wobei der Abstand der Nivellementslinien je nach Geländeform 100 m oder 200 m betrug. Das Wasserlinienverfahren wurde in Schleswig-Holstein nicht eingesetzt. In einigen Gebieten, in denen sich – nach den Erfahrungen der zuständigen Küstenbehörden – die Morphologie wenig ändert, konnte auf ältere Vermessungen zurückgegriffen werden (v.a. im äußersten westlichen Wattbereich aus dem Jahr 1970). Das Gebiet der Meldorfer Bucht wurde dagegen erst 1973 vermessen, so dass die Daten unmittelbar in die Küstenkarten übernommen wurden. Das KFKI strebt eine Aktualisierung der Karten alle 5 Jahre an, was zwischen 1979 bis 1981 erstmals realisiert wurde. Dabei wurden bei den Folgevermessungen nur noch hydrographische Verfahren eingesetzt (SCHLEIDER 1997), wobei die über NN liegenden Wattflächen nur alle 10 Jahre und dann auch nicht flächendeckend erfasst wurden. SCHLEIDER (2000) gibt hierzu eine umfassende Übersicht über die Vermessungen und bemerkt, dass die fünfte synoptische

Vermessung, die zwischen 1994 bis 1996 stattfand, nun abgeschlossen ist. Das bedeutet, dass die Tiefenpunktinformationen u.a. bei der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) in Karlsruhe archiviert sind und von dort abgerufen werden können.

Die oben erwähnten Wattgrundkarten wurden bis vor kurzem noch in aufwendiger Handarbeit gezeichnet. Heute geht man immer mehr dazu über, die bei der Vermessung erfassten Daten digital zu veröffentlichen. Das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) in Hamburg hat einen Küstenpeildatenkatalog (KÜDAT) herausgegeben, in dem alle Vermessungsbereiche eines Jahrgangs sowohl der Nordsee als auch der Ostsee dargestellt sind. Anhand von Koordinaten eines Auswahl Fensters können die Daten angefordert werden. Sie werden dann auf SKN oder NN korrigiert und als Datenfile mit für jeden Vermessungspunkt beigefügten Koordinatenpaaren geliefert. Der Vorteil ist, dass der Umweg über eine analoge Karte entfällt. Dies ist gerade für die Weiterverarbeitung in einem Geographischen Informationssystem von Vorteil, weil die Karte nicht erst aufwendig und fehlerbehaftet durch Scannen oder Digitalisieren in digitale Form umgewandelt werden muss (vgl. hierzu Kap. 4.4).

4.3 Digitale Geländemodelle

Die Daten, die nach dem Scannen bzw. der Digitalisierung nun vollständig digital vorliegen, wurden in dieser Arbeit zur weiteren Analyse in Digitale Geländemodelle umgewandelt (s. unten).

Digitale Geländemodelle werden in vielen Bereichen der Geowissenschaften immer stärker zur Beantwortung hydrologischer, geomorphologischer und ökologischer Fragestellungen eingesetzt, weil sie die zu analysierende Basis, namentlich die Erdoberfläche repräsentieren (z.B. DIKAU & SAURER 1999). In dieser Arbeit soll die Geländeoberfläche des Wattenmeeres als Fläche im dreidimensionalen Raum mit ihren charakteristischen Eigenschaften für die rechnergestützte Bearbeitung und Analyse zur Verfügung stehen. Dafür soll aus den diskreten Informationen der Wattgrundkarten oder der digitalen Vermessungspunkte ein kontinuierliches Modell der Wattenmeeroberfläche aufgebaut werden (vgl. BARTLETT 2000, LI 2000, RAPER 2000a,b).

Mit Hilfe von Digitalen Geländemodellen können Oberflächen jedoch nicht nur modelliert sondern v.a. auch analysiert und dargestellt werden. Sie können als digitale Repräsentation eines Teils der Erdoberfläche angesehen werden. Grundsätzlich muss bei den Datenmodellen zwischen Rastermodell und TIN (engl. *Triangular Irregular Network*) unterschieden werden (vgl. Abb. 4.1 und 4.2).

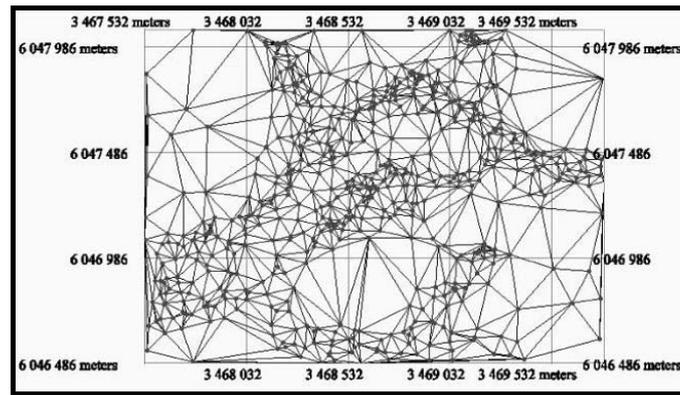


Abb. 4.1: Beispiel für ein TIN-Datenmodell.
Quelle: BULLINGER (2000)

Beim TIN bilden die bekannten Höhenpunkte (Stützstellen) die Knoten, die so verbunden werden, dass die Geländeoberfläche in viele Dreiecksflächen partitioniert wird. Die Genauigkeit, mit der das Höhenmodell aufgebaut wird, hängt dabei von der Anzahl der vorhandenen Stützstellen ab. Während bei der Erstellung eines TINs nur die Kriterien zur Auswahl der Stützstellen variabel sind, gibt es für die Erstellung der Rastermodelle die unterschiedlichsten Modellierungsansätze.

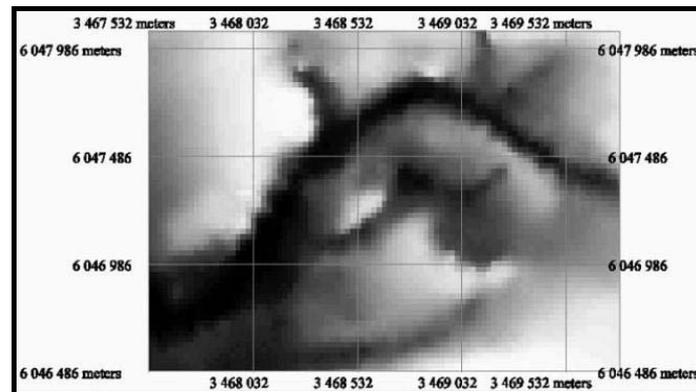


Abb. 4.2: Beispiel für ein Raster-Datenmodell (Gitterzellen 25 x 25 m²).
Quelle: BULLINGER (2000)

Die in dieser Arbeit eingesetzten Digitalen Geländemodelle basieren auf dem so genannten Grid- oder Rastermodell, bei dem auf der Basis eines regelmäßigen Gitters die Höhe für jeden Punkt abgeschätzt wird. Es stellt also eine Art Höhenmatrix dar, die auf einer gleichförmig verteilten Anordnung von Geländepunkten basiert (WISE 1998, THEOBALD 1989). In einem Rastermodell werden die Eigenschaften von Objekten derart abstrahiert, dass innerhalb von in der Regel rechteckigen und regelmäßig in Rasterform angeordneten Bereichen – den so genannten Zellen – diese als homogen aufgefasst werden (BARTELME 1995). Allgemein betrachtet, liegt der Vorteil eines Rastermodells in seiner kompakten Speicherstruktur und seiner Form, die mit hoher Geschwindigkeit Rechenoperationen zur Datenmanipulation und Bearbeitungsprozessen erlaubt. Zudem lassen sich Rastermodelle einfach mit rasterbasierten GIS und Fernerkundungsmethoden koppeln (THEOBALD 1989, RAPER 2000a).

Bei den auf dem Grid- oder Rastermodell basierenden Digitalen Geländemodellen kann wiederum zwischen zwei Modellierungsansätzen unterschieden werden. Das sogenannte Digitale Höhenmodell (*engl. Digital Elevation Model*) beschränkt sich lediglich auf die Speicherung von Höhenwerten. Dahingegen können in ein Digitales Geländemodell (*engl. Digital Terrain Model*) zusätzlich auch topologische und semantische Informationen (z.B. Bruchkanten) einfließen (WEIBEL & HELLER 1991). In dieser Arbeit werden keine topologischen und semantischen Informationen für die digitale Repräsentation der Geländeoberfläche herangezogen, so dass im Folgenden der Begriff des Digitalen Höhenmodells verwendet wird.

Bei der Überführung der einzelnen gemessenen Höhenwerte in eine kontinuierliche Geländeoberfläche müssen bestimmte (Interpolations-)Vorschriften angewendet werden. Es ist jedoch in der Regel nicht möglich eine einheitliche mathematische Beschreibung zu finden, welche die komplexen Geländeformen wiedergibt. Deshalb nutzt man das Bausteinprinzip, bei dem die mathematische Beschreibung stückweise für kleinere Bereiche festgesetzt wird. Auf diese Weise besteht das Geländemodell aus einzelnen wohl definierten Bausteinen, die dann nach bestimmten (Interpolations-)Vorschriften zusammengesetzt werden. Die angewendeten Interpolationsvorschriften sorgen dafür, dass die resultierende Gesamtfläche genügend glatt ist (BARTELME 1995).

Es gibt mittlerweile zahlreiche Interpolationsvorschriften bzw. -verfahren, die unterschiedliche methodische Ansätze verfolgen. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen globalen und lokalen Interpolationsmethoden. Bei den globalen Interpolationsmethoden werden alle verfügbaren Höheninformationen einbezogen, um die Geländeoberfläche des gesamten Gebietes zu berechnen. Hingegen werden bei den lokalen Methoden nur die Höhenwerte für die Berechnung eines Punktes (einer Gitterzelle) herangezogen, die aus der direkten Umgebung des zu berechnenden Punktes stammen. Bei dieser Vorgehensweise ist sichergestellt, dass die berechneten Gitterzellen nur aus Werten der direkten Nachbarschaft genähert werden und somit die Anpassung so gut wie möglich ist. Bei den lokalen Interpolationsmethoden müssen die Teilbereiche so zu einem Gesamthöhenmodell zusammengefügt werden, dass über die Grenzen der Teilbereiche Kontinuität gewährleistet ist. Dies wird durch eine Überlappung bei der Berechnung erreicht (BARTELME 1995, BULLINGER 2000).

Bei der Auswahl des einzusetzenden Interpolationsverfahrens muss man sich in der Regel entweder für ein globales oder ein lokales Interpolationsverfahren entscheiden. Die Entscheidung sollte dabei in Hinblick auf die spezielle Anwendung und deren Anforderungen getroffen werden. Von BULLINGER (2000) wurden verschiedene Interpolationsverfahren getestet, um das für morphologische Analysen im Wattenmeer optimal geeignete Verfahren herauszufinden. Basierend auf den in dieser Arbeit zugrunde liegenden Ausgangsdaten (z.B. digitalisierte Isolinien und digitale Vermessungspunkte) wird von BULLINGER (2000) u.a. das In-

terpolationsverfahren TOPOGRID als besonders geeignet eingestuft und kommt somit in dieser Arbeit zur Anwendung.

Bei TOPOGRID handelt es sich um ein Interpolationsverfahren, dessen Vorteil in der Erzeugung eines hydrologisch korrekten Höhenmodells (z.B. ohne Abflusssenken) liegt. TOPOGRID basiert auf dem von HUTCHINSON (1989) entwickelten ANUDEM-Verfahren und wird in dem verwendeten Geographischen Informationssystem ArcInfo angeboten.

Aus den vorhandenen Eingangsdaten und den ableitbaren Eigenschaften der Oberfläche werden bei TOPOGRID möglichst viele Informationen für die Generierung des Höhenmodells gewonnen. Grundlage des Interpolationsverfahrens ist die Methode der genäherten finiten Differenzen. Durch diese Vorgehensweise kann die Effektivität der lokalen Interpolationsmethoden mit dem Vorteil der zusammenhängenden Oberfläche der globalen Methoden vereint werden. Um das Abflusssystem richtig darzustellen, wird es global aufgebaut. Mit Hilfe des Abflusssystems werden hydrologisch und geomorphologisch unzutreffende Mulden und Senken entfernt (HUTCHINSON 1989, ESRI).

Nicht nur im Wattenmeer, sondern auch für die Landmassen erlangt das Wasser für die Form der meisten Geländeoberflächen durch seine erosive Wirkung eine besondere Bedeutung. Die durch Wassereinfluss geprägten Geländeoberflächen zeichnen sich durch zahlreiche Hügel (lokale Maxima) und einige Senken (lokale Minima) aus, die durch ein (Abfluss-)System miteinander verbunden sind. Speziell diese Eigenschaften verwendet TOPOGRID bei der Generierung der Geländeoberfläche, so dass korrekte Abflusssysteme aufgebaut werden. Durch die Berücksichtigung von Abflussbedingungen können mit vergleichsweise weniger Eingangsdaten genauere Geländemodelle erzeugt werden. In der Dokumentation des Programms ArcInfo wird darauf hingewiesen, dass bei einer Interpolation mit TOPOGRID bei der Verwendung von Höhenlinien gegenüber anderen Interpolationsverfahren eine um eine Größenordnung kleinere Eingangsdatenmenge ausreichen, um vergleichbar genaue Geländemodelle zu erzeugen (ESRI).

Der Interpolationsprozess ist bei TOPOGRID iterativ. Zu Beginn der Interpolation werden zunächst die Höhenlinien ausgewertet, um ein grobes Modell des Abflusssystems zu erzeugen. Dabei wird gezielt nach lokalen maximalen Krümmungen in jeder Höhenlinie gesucht, um Gebiete mit der größten Neigung zu identifizieren (HUTCHINSON 1988). Auf Basis dieser Informationen wird ein hydrologisches Netzwerk erzeugt. Nachdem die generelle Morphologie der Geländeoberfläche abgeleitet wurde, werden dann anschließend die Höhenlinien noch einmal herangezogen, um die konkreten Höhen der einzelnen Gitterzellen zu berechnen. Dabei werden zunächst alle Höhenlinien eingelesen und auf die vorgegebene Gitterauflösung generalisiert. Daten in Punktform werden konvertiert, indem vier Datenpunkte pro Rasterzelle

übernommen werden und der Rest unberücksichtigt bleibt. Die Höhenlinien werden generalisiert, indem ein Datenpunkt von der Höhenlinie pro Gitterzelle übernommen wird (ESRI).

TOPOGRID stützt sich auf eine so genannte Multi-Resolution-Interpolation, die bei einer groben Auflösung startet, und schrittweise weiter verfeinert wird, bis die vorgegebene Gittergröße erreicht wird. Bei jedem Interpolationsschritt werden die vorhandenen Datenpunkte eingelesen und gleichzeitig die Abflussbedingungen überprüft, um Senken zu entfernen.

Aus den erzeugten Digitalen Geländemodellen sollen auf Basis des Tidebeckens bzw. dessen Teilbecken hauptsächlich oberflächenbeschreibende Parameter abgeleitet werden. Es handelt sich um vor allem um Wasservolumina, Gebietsgrößen unter verschiedenen Wasserstandshöhen (z.B. Subtidal), (Seegatt-)Profile und mittlere Tiefen bei unterschiedlichen Wasserständen (vgl. Kapitel 5 und 6).

4.4 Datenqualität

Neben der bereits in Kapitel 4.1 angesprochenen Vermessungsgenauigkeit müssen in Hinblick auf die zu analysierenden Daten weitere Fehlerquellen, welche die Datenqualität beeinflussen, berücksichtigt werden. In diesem Kapitel sollen Anhaltspunkte über die Qualität der Daten und deren Aussagemöglichkeiten und -grenzen aufgezeigt werden. Neben den Vermessungsfehlern (vgl. hierzu Kapitel 4.1) stehen hierbei Aussagen über Fehler der analogen Kartenvorlage, der Digitalisierung und der Interpolation des Digitalen Geländemodells im Mittelpunkt.

Ein wesentliches Qualitätsmerkmal der zu analysierenden Daten liegt bereits in den analogen Ausgangsdaten, den topographischen Karten. Bei der Vorstellung der verschiedenen Kartenwerke wurde bereits darauf aufmerksam gemacht, dass aufgrund der großen Ausdehnung des abzubildenden Gebietes die Karten die morphologische Situation nicht zu einem bestimmten Zeitpunkt, sondern über einen längeren Vermessungszeitraum darstellen. Dieser Faktor spielt eine Rolle einerseits bei großen Tidebecken, die sich über viele einzelne Kartenblätter erstrecken und andererseits speziell beim Kartenwerk von MÜLLER & FISCHER (1955), das einen Vermessungszeitraum zwischen 1935 und 1953 widerspiegelt.⁵

⁵ WITEZ et al. (1998) geben für jedes Wateinzugsgebiet (einschließlich der Teileinzugsgebiete) eine Übersicht über den Zeitraum der Vermessung für die jeweiligen Gebiete, um die zeitliche Heterogenität der Datenaufnahme zum Ausdruck zu bringen.

Ein anderer zu berücksichtigender Umstand ist die auf der Karte vorhandene Informationsdichte, die sich im Wesentlichen durch die vertikale Staffelung der Niveaulinien und eventuell berücksichtigter Extrempunkte in Senken oder auf Höhenrücken bemerkbar macht. Vergleicht man die in Kapitel 4.1 aufgeführten Kartenwerke, so wird ersichtlich, dass z.B. deutliche Unterschiede bei den Äquidistanzen der Niveaulinien zu erkennen sind. Man kann davon ausgehen, dass je dichter die Niveaulinien liegen, desto genauer sollte das resultierende Geländemodell die natürlichen Verhältnisse wiedergeben können, da bei der Interpolation mehr Stützstellen zur Verfügung stehen. Einige Karten enthalten zudem weitere Höheninformationen in Form von Punkten. Diese geben oft zusätzliche Informationen in den extremen Bereichen wie den höchsten gemessenen Punkt auf einem Hügel oder den tiefsten gemessenen Punkt in einem Priel an. Diese Extrempunkte auf schwach geneigten Höhenrücken oder die tiefsten Punkte in Senken helfen eine Überschätzung dieser Bereiche zu verhindern. Auch unter diesem Aspekt weisen die älteren Karten – v.a. das Küstenkartenwerk von MÜLLER & FISCHER (1955) – gewisse Nachteile auf, die z.B. auf das Fehlen von zusätzlichen Höhen- und Tiefenpunkten zurückzuführen sind.

Stehen die Ausgangsdaten nur in analoger Form als Papierkarten zur Verfügung, so muss zudem beachtet werden, dass es im Laufe der Zeit zu Papierverzerrungen kommt.

Liegen die Daten nicht bereits in digitaler Form vor – wie bei den digitalen Vermessungsdaten des BSH –, so müssen sie zunächst weiter verarbeitet werden. Hierzu können je nach Ausgangslage der Daten zwei Wege beschritten werden.

Bei der KFKI-Küstenkarte standen die Originalfolien der Karten zur Verfügung, die lediglich die Niveaulinien enthalten. In diesem Fall kann man die Karten scannen und anschließend vektorisieren (vgl. ausführlich SPIEGEL 1997a). Diese müssen anschließend noch mittels Passpunkten in ein Koordinatensystem georeferenziert werden. Dabei werden in den Ausgangskarten Passpunkte gesucht, die in der digitalen Abbildung eindeutig identifiziert werden können und denen somit deren Koordinaten beigelegt werden.⁶ Sowohl beim Scannen als auch bei der Digitalisierung treten Fehler auf (vgl. hierzu ausführlich z.B. BURROUGH & McDONNELL 1998).

Vorlagen, welche nicht die Voraussetzungen zum Scannen erfüllen – z.B. aufgrund von Beschriftungen – müssen digitalisiert werden, weil der Aufwand der manuellen Nachbearbeitung vektorisierter Linien zu hoch wäre. Dabei entsteht durch die nicht exakt abzufahrende Linie zwangsläufig ein Fehler. Ein gängiger Richtwert ist eine Abtastgenauigkeit von 0.5 mm

⁶ Die Qualität der Georeferenzierung ist hauptsächlich von der Anzahl der Passpunkte und deren exakten lokalen Übereinstimmung in Ausgangskarte und digitaler Abbildung abhängig.

(GOODCHILD & KEMP 1990), was z.B. bei einem Maßstab 1 : 25 000 zu einer Toleranz bzw. Abweichung von ca. ± 12.5 m führen kann. Wie anhand dieses Beispiels deutlich wird, ist auch der Maßstab der Karten daher bei einer anschließenden Betrachtung des Gesamtfehlers zu berücksichtigen.

Bei der Umwandlung der digitalen Niveaulinien zu einem flächendeckenden Geländemodell treten ebenfalls Fehler auf. Diese basieren auf der Berechnung der zwischen den Stützstellen (Niveaulinien oder -punkte) nicht vorhandenen Tiefen- oder Höheninformation. Wenngleich eine Reihe von Verfahren zur Erzeugung von Digitalen Geländemodellen (vgl. Kap. 4.3) existiert, so gibt es bisher nur wenige Untersuchungen zu Fehlern in Digitalen Geländemodellen und deren Effekte auf die analysierten Ergebnisse (WISE 1998, MCCULLAGH 1998).

Eine Abschätzung der Abweichungen zwischen den ursprünglichen Höhenlinien und den an ausgewählten Stichprobenpunkten aus dem Höhenmodell abgeleiteten wurde für das Geländemodell exemplarisch ermittelt, das aus der MÜLLER & FISCHER-Kartenmappe (1955) erzeugt wurde. Dort konnte ein Lagefehler von ca. 0.5 m ermittelt werden. Unterstellt man die Unabhängigkeit der einzelnen Fehlerquellen, so lässt sich für dieses Geländemodell ein Lagefehler LF (Vermessungs-, Digitalisier- und Interpolationsfehler) abschätzen durch:

$$LF \geq \sqrt{5^2 + 12,5^2 + 0,5^2} = 13.5\text{m}$$

BULLINGER (2000) zeigte zudem, dass schon die Auswahl der Ausgangsdaten bei ansonsten gleichen Rahmenbedingungen (z.B. gleiches Interpolationsverfahren) Höhenmodelle unterschiedlicher Genauigkeiten hervorbringen kann. Dies gilt nicht nur für die Höhenmodelle, sondern auch für die aus den Höhenmodellen abgeleiteten Parametern, die für die Beschreibung der Tidebecken in dieser Arbeit herangezogen werden (vgl. Kap. 6). BULLINGER (2000) stellt fest, dass Parameter wie z.B. die mittlere Beckentiefe bei $MThw$, die wasserbedeckte Fläche bei $MThw$, die Wattfläche und das Wasservolumen überwiegend robust gegenüber der Wahl des Interpolationsverfahrens sind. Hingegen zeigen die Ergebnisse der Seegattparameter eine sehr starke Abhängigkeit vom verwendeten Interpolationsverfahren. Auch die Ergebnisse der Prielvolumenberechnung werden, insbesondere bei den kleineren Becken, vom gewählten Interpolationsverfahren beeinflusst. Diese Aussagen müssen bei der Interpretation der aus den Digitalen Geländemodellen abgeleiteten Parameter berücksichtigt werden.

4.5 Metadaten

Metadaten sind einfach ausgedrückt „Daten über Daten“. Sie beschreiben den Inhalt, die Qualität, die (Nutzungs-)Bedingungen und andere Charakteristiken von Daten (Abb. 4.3). Da man dies in vielfältiger Weise machen kann, gab es schon früh Bestrebungen einer Vereinheitlichung. In den USA ist das „Federal Geographic Data Committee“ ins Leben gerufen worden, die mit dem so genannten „Content Standard for Digital Geospatial Metadata“ (FGDC-STD-001-1998) im Juni 1998 ein Standardisierungspapier aufgelegt hat (Content Standard for Digital Geospatial Metadata (CSDGM)). Ebenfalls in den USA wurde am 25.09.1994 bei einem Treffen von acht Mitgliedern das Open GIS Consortium⁷ (OGC) gegründet. Die Gründungsmitglieder setzten sich aus Universitäts-, Firmen- und Militärvertretern zusammen. Mittlerweile ist es ein internationales Industriekonsortium mit mehr als 220 Firmen, Behörden und Universitäten. Alle Beteiligten haben sich zum Ziel gesetzt Empfehlungen, Standards und Spezifikationen (z.B. Interfaces und Protokolle) zu entwickeln. Im Open GIS Guide steht hierzu: „the objective is technology that will enable an application developer to use any geodata and any geoprocessing function or process available on ”the net” within a single environment and a single work flow.“ Es sollen kompatible Anwendungsumgebungen (engl. *interoperable application environment*), gemeinsam genutzter Datenraum (engl. *shared data space*) und heterogene Browser (engl. *heterogeneous resource browser*) entwickelt werden, um den Zugriff und Austausch von Daten zu ermöglichen.

Fast jedes Land verfügt über eigene Bestrebungen für ein Standardisierungskonzept. In Deutschland gibt es z.B. im Bereich der Umwelt den so genannten Umweltdatenkatalog (UDK). Dabei handelt es sich um ein Informationssystem zum Auffinden von umweltrelevanten Datenquellen, die in den öffentlichen Verwaltungen vorhanden sind. Der UDK wird in Deutschland vom Bund und in 15 Ländern eingesetzt. Er soll z.B. Auskunft über die Eigentumsrechte, Ursprung und Art der umweltrelevanten Daten geben.

Aufgrund des rapide wachsenden Umfangs digitaler Daten ist es zwingend notwendig, allen neu erhobenen Daten Metadaten hinzuzufügen. Vor allem vor dem Hintergrund wachsender Kosten für neu zu erhebende Daten sollte – wenn möglich – auf bereits vorhandene Daten zurückgegriffen werden. Dies ist jedoch nur praktikabel, wenn der Nutzer ausreichende Informationen zur Datenaktualität, -qualität usw. hat, um entscheiden zu können, ob er die Daten für seine Zwecke einsetzen kann. Abbildung 4.3 gibt ein Beispiel für die zu berücksichtigten Informationen in einer Metadatenbank. Hierzu gehören u.a. Informationen zur Identifikation, zur Datenqualität und –organisation.

⁷ Vgl. hierzu: <http://www.opengis.org>

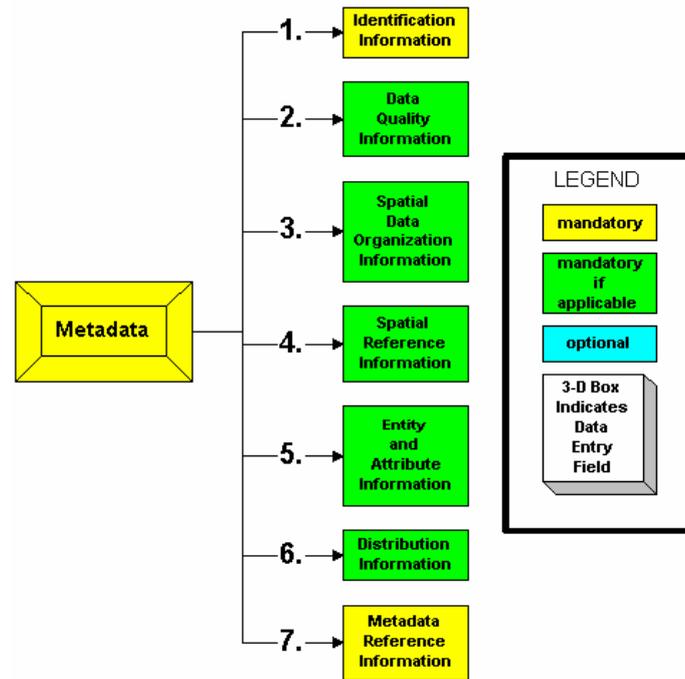


Abb. 4.3: Beispiel für den Aufbau einer Metadatenbank.

Quelle: <http://www.ci.anchorage.ak.us/gis/gisinternet/htmls/Metadata%20Management%20in%20GIS.htm>

Um auch anderen Interessenten die in diesem Projekt erhobenen Daten zur Verfügung zu stellen, wurde eine Metadatenbank entwickelt, in der alle digitalen Daten des Projektes mit Informationen zu ihrer eindeutigen Identifikation, dem Daten- und Objekttyp, der Quelle, einem Bearbeitungsstatus, der Auflösung, dem Interpolationsverfahren und dazu gehörigen Parametern, dem Datum der letzten Änderung und dem Verzeichnispfad versehen sind. Die Beschreibung wurde in einer ACCESS-Datenbank umgesetzt. Sie trägt den Namen WattIs und besteht aus drei Tabellen, so dass TIN`s, Grids und Ausgangsdaten getrennt betrachtet werden können (Abb. 4.4). Die Tabelle mit den Ausgangsdaten enthält z.B. alle Geometrien wie Punkt- und Liniencoverages, abgeleitete Beckengrenzen und die Seegatts.

Kennung	Becken	Teilb	Zeit	Objekttyp	Quelle	Status	Auflösung	Interpolationsve	Interpolationsparameter
em01955g50m	em	0	1955	DEM	prowatt	9	50	ArclInfo Topogrid	datatype:contour, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
em01974g50m	em	0	1974	DEM	prowatt	9	50	ArclInfo Topogrid	datatype:contour, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
em01986g50m	em	0	1986	DEM	prowatt	9	50	ArclInfo Topogrid	datatype:contour, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
em11955g50m	em	1	1955	DEM	prowatt	9	50	ArclInfo Topogrid	datatype:contour, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
em21955g50m	em	2	1955	DEM	prowatt	9	50	ArclInfo Topogrid	datatype:contour, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
fi01955g50m	fi	0	1955	DEM	prowatt	9	50	ArclInfo Topogrid	datatype:contour, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
fi01974g50m	fi	0	1974	DEM	prowatt	9	50	ArclInfo Topogrid	datatype:contour, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
fi01989g50m	fi	0	1989	DEM	prowatt	9	50	ArclInfo Topogrid	datatype:contour, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
fi11955g50m	fi	1	1955	DEM	prowatt	9	50	ArclInfo Topogrid	datatype:contour, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
fi11974g50m	fi	1	1974	DEM	prowatt	9	50	ArclInfo Topogrid	datatype:contour, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
fi11989g50m	fi	1	1989	DEM	prowatt	9	50	ArclInfo Topogrid	datatype:contour, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
fi21955g50m	fi	2	1955	DEM	prowatt	9	50	ArclInfo Topogrid	datatype:contour, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
fi21974g50m	fi	2	1974	DEM	prowatt	9	50	ArclInfo Topogrid	datatype:contour, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
fi21989g50m	fi	2	1989	DEM	prowatt	9	50	ArclInfo Topogrid	datatype:contour, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
hi01947g50m	hl	0	1947	DEM	prowatt	1	50	ArclInfo Topogrid	datatype:spot, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
hi01955g50m	hl	0	1955	DEM	prowatt	9	50	ArclInfo Topogrid	datatype:contour, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
hi01968g50m	hl	0	1968	DEM	prowatt	9	50	ArclInfo Topogrid	datatype:spot, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
hi01974g50m	hl	0	1974	DEM	prowatt	9	50	ArclInfo Topogrid	datatype:contour, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
hi01992g50m	hl	0	1992	DEM	prowatt	1	50	ArclInfo Topogrid	datatype:spot, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
ht01955g50m	ht	0	1955	DEM	prowatt	9	50	ArclInfo Topogrid	datatype:contour, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
ht01974g50m	ht	0	1974	DEM	prowatt	9	50	ArclInfo Topogrid	datatype:contour, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
ht01997g50m	ht	0	1997	DEM	prowatt	9	50	ArclInfo Topogrid	datatype:spot, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
ht11955g50m	ht	1	1955	DEM	prowatt	9	50	ArclInfo Topogrid	datatype:contour, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
ht11974g50m	ht	1	1974	DEM	prowatt	9	50	ArclInfo Topogrid	datatype:contour, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
ht11997g50m	ht	1	1997	DEM	prowatt	9	50	ArclInfo Topogrid	datatype:spot, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
ht21955g50m	ht	2	1955	DEM	prowatt	9	50	ArclInfo Topogrid	datatype:contour, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
ht21974g50m	ht	2	1974	DEM	prowatt	9	50	ArclInfo Topogrid	datatype:contour, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
ht21997g50m	ht	2	1997	DEM	prowatt	9	50	ArclInfo Topogrid	datatype:spot, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
ht31955g50m	ht	3	1955	DEM	prowatt	9	50	ArclInfo Topogrid	datatype:contour, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
ht31974g50m	ht	3	1974	DEM	prowatt	9	50	ArclInfo Topogrid	datatype:contour, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
ht31997g50m	ht	3	1997	DEM	prowatt	9	50	ArclInfo Topogrid	datatype:spot, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
lt01955g50m	lt	0	1955	DEM	prowatt	1	50	ArclInfo Topogrid	datatype:contour, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
lt01974g50m	lt	0	1974	DEM	prowatt	9	50	ArclInfo Topogrid	datatype:contour, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0
lt01994g50m	lt	0	1994	DEM	prowatt	1	50	ArclInfo Topogrid	datatype:contour, enforce:on, iterations:40, tolerances: 0.2 1.0 0.0

Abb. 4.4: Aufbau der Metadaten zu Grids in der WattIs-Datenbank (Screenshot).

5. Methodik

Für eine weitergehende Operationalisierung der im vorigen Kapitel abgeleiteten Höhenmodelle werden aus diesen Modellen für jedes Tidebecken verschiedene geometrische Kenngrößen berechnet. Anhand dieser Parameter soll dann geklärt werden, wie sich das jeweilige Tidebecken über die Zeit entwickelt hat. Auch die Auswirkung von Baumaßnahmen auf die Parameter und somit die Becken selber können auf diese Weise dokumentiert werden.

5.1 Beckenparameter

Die im Folgenden beschriebenen Analysen wurden für jedes schleswig-holsteinische Tidebecken und zu jedem zur Verfügung stehenden Vermessungszeitpunkt durchgeführt (insgesamt 158 Teilbecken einschließlich der Gesamtbecken). Stellvertretend sollen an dieser Stelle drei Tidebecken mit ihren jeweiligen Teilbecken genauer ausgewählt werden. Da für diese Tidebecken eine besonders dichte Datengrundlage vorliegt, werden insgesamt dennoch 75 (Teil-)Becken vorgestellt. Es handelt sich einerseits um die in Nordfriesland liegenden Tidebecken Norderhever-Heverstrom und Hoogeloch und andererseits um das Dithmarscher Tidebecken Piep. Es stehen jeweils zwischen vier und zehn Vermessungsaufnahmen pro Tidebecken zur Verfügung, die einen zeitlichen Rahmen von 1936 bis 1992 abdecken. Zudem soll anhand der Tidebecken der Piep und des Norderhever-Heverstroms der Einfluss des anthropogenen Eingriffs einer Vordeichung auf die veränderte Entwicklung des Tidebeckens verdeutlicht werden.

Durch die Einbeziehung mehrerer Zeitschritte soll die zeitliche Entwicklung einzelner Tidebecken untersucht werden, insbesondere vor dem Hintergrund von Auswirkungen von Küstenschutzmaßnahmen und des Meeresspiegelanstiegs.

Einerseits wurden für jedes Tidebecken die absoluten Tiefenwerte und die aus den Digitalen Höhenmodellen abgeleiteten Hangneigungswerte statistisch untersucht. Durch die Betrachtung der Tiefenwerte des Tidebeckens soll vor allem geklärt werden, ob es eine charakteristische Tiefenverteilung in den Tidebecken Schleswig-Holsteins gibt. Wenn dies der Fall wäre, könnte man „das“ charakteristische Tidebecken ableiten, um an diesem modellhaft Untersuchungen anzustellen und somit die Datenmenge drastisch zu reduzieren.

Andererseits können auf der Basis der digitalen Höhenmodelle eine Vielzahl von Parametern berechnet werden, die sich zur Charakterisierung der morphologischen Struktur eines Tidebeckens heranziehen lassen (vgl. auch SPIEGEL 1997a,b). Sie werden in der Literatur oft

zueinander in Beziehung gesetzt, um Aussagen über den Entwicklungszustand eines Tidebeckens treffen zu können (vgl. z.B. Kapitel 7). Derartige Parameter lassen sich in vier Kategorien einteilen:

- Parameter, die eindimensionale geometrische Größen beschreiben, z. B. verschiedene mittlere und maximale Tiefen unter gegebenen Bezugshorizonten,
- Parameter, die flächenhafte Eigenschaften beschreiben, z. B. die Angabe einer Flächengröße unter einem gegebenen Bezugshorizont (Sub-, Eu- und Supralitoral),
- Volumenparameter wie z.B. das Tideprisma und
- Größen, die abgeleitet werden, wie z.B. die charakteristische Watthöhe, die sich aus dem Quotienten des Tideprismas zum intertidalem Sedimentvolumen ergibt.

In Abbildung 5.1 ist ein Screenshot einer ArcView Extension zu sehen⁸. Sie dient u.a. der Berechnung der oben aufgeführten Parameter wie mittlere Tiefen, Flächen- und Volumenparameter sowie der Querschnittsfläche des Seegatts. Die Parameter können nach der Berechnung anhand einer Tabelle (dBASE) protokolliert werden.

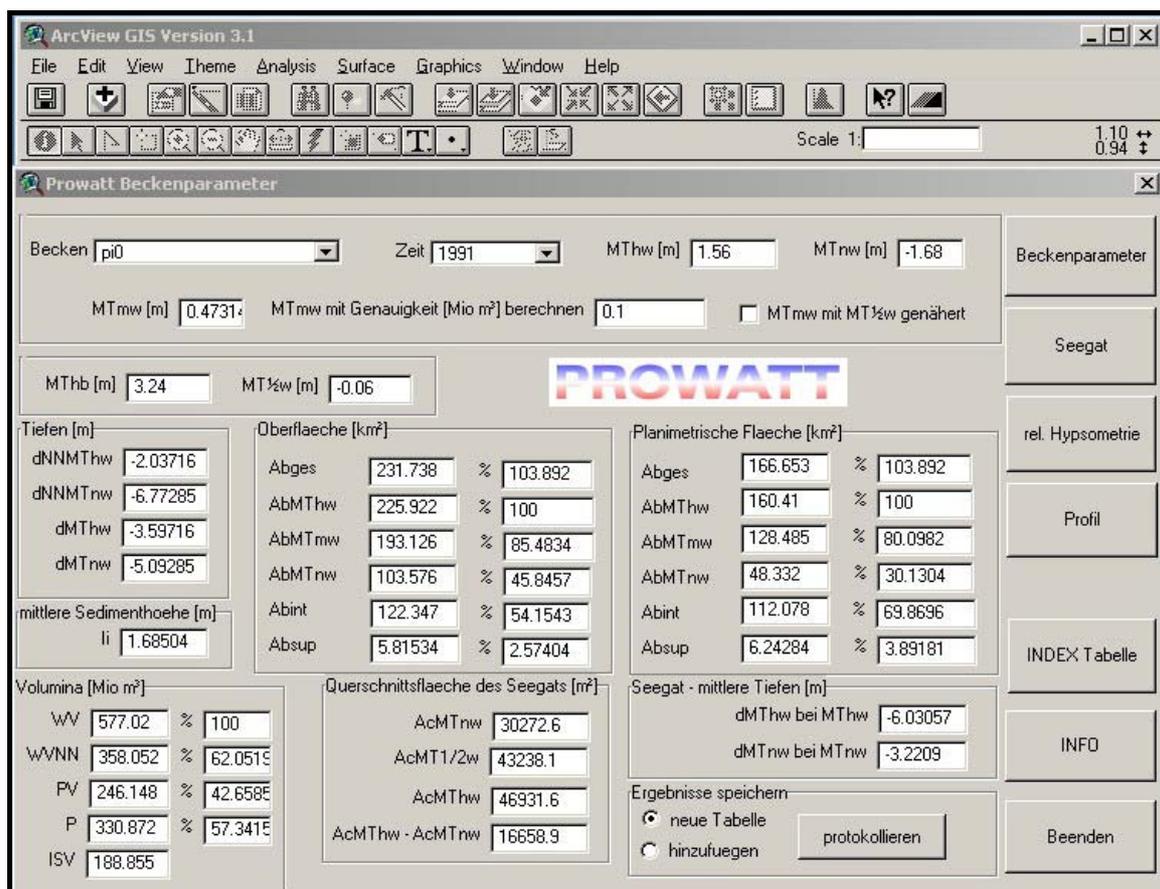


Abb. 5.1: Screenshot der PROWATT-Extension.

⁸ Die Programmierung der Oberfläche erfolgte durch Herrn Andreas Bullinger mit AVENUE im Rahmen des BMBF-Projektes PROWATT.

Bei der Berechnung der verschiedenen Parameter auf Basis der Digitalen Höhenmodelle wurde bei den Flächenparametern unterschieden zwischen der planimetrischen Fläche und der Oberfläche eines Tidebeckens. Die planimetrische Fläche ist die Projektion auf die Ebene, wohingegen die so genannte Oberfläche die Fläche angibt, die direkt den Kontakt zwischen Wasser und Sediment bildet, und deshalb immer etwas größer ist als die entsprechende planimetrische Fläche.

Zudem werden die Seegatts der einzelnen Tidebeckens näher untersucht. Neben den mittleren Tiefen im Bereich des Seegatts sind hierbei vor allem die Seegattquerschnitte bei unterschiedlichen Bezugswasserständen von Interesse.

Für die statistische Analyse der Tiefenverteilung in einem Tidebecken wurden die Tiefenwerte der Größe nach geordnet und dann ausgewählte Perzentile berechnet.⁹ Denn greift man stattdessen auf die absoluten Tiefenwerte zurück und teilt diese in Klassen ein, so ist bei einer Analyse der zeitlichen Entwicklung eines Tidebeckens, die sich auch in ihrer Größe (Verlagerung der Watthöhenscheide) verändern können, keine direkte Vergleichbarkeit gegeben. Für den Vergleich der Tidebeckens zu unterschiedlichen Vermessungszeitpunkten bietet sich daher die Vorgehensweise einer relativen Betrachtung über die Perzentile an, weil die tendenziellen Entwicklungen im Becken bei sich ändernden Beckengeometrien – z.B. durch die Verlagerung der Watthöhenscheide – über die Zeit vergleichend analysiert werden können. Es wurden sowohl für die absoluten Tiefenwerte als auch für die berechneten Hangneigungen folgende Perzentile berechnet: 1, 3, 5, 10, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 75, 80, 90, 95, 97 und 99. Dabei sind gerade die Extreme von besonderem Interesse, weil sich dort die flachen Wattflächen bzw. die tiefen Prielbereiche wieder finden. Es soll einerseits für die Wattflächen festgestellt werden, ob diese bei einem ansteigenden Meeresspiegel mitwachsen können und andererseits stellt sich die Frage, ob aufgrund des erhöhten Tidenhubes eine Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten eine Ausräumung bzw. Erosion in den tiefen Prielbereichen verursacht.

5.2 Hauptkomponentenanalyse

Zunächst soll anhand eines statistischen Verfahrens geprüft werden, ob die in Kapitel 5.1 aus inhaltlichen Aspekten ausgewählten Tidebeckens Piep, Hoogeloch und Norderhever-Heverstrom charakteristische Vertreter für alle Tidebeckens des schleswig-holsteinischen Wat-

⁹ Das p %-Perzentil ist derjenige Wert in einer der Größe nach geordneten Datenreihe, unterhalb dessen p% und oberhalb dessen (100-p)% der Variablenwerte liegen. Beispielsweise teilt das 50 % Perzentil, das auch als Median bezeichnet wird, die Variablenwerte in eine „untere“ und eine „obere“ Hälfte (BAHRENBERG et al. 1999, S. 41).

tenmeeres darstellen. Für diese Analyse wurden nur die Zustände der Tidebecken – ohne deren Teilbecken – des Jahres 1974 herangezogen, weil bei diesem Vermessungsjahrgang alle Tidebecken vollständig und auf einer homogenen Datengrundlage – des KFKI-Küstenkartenwerks – vorliegen (vgl. hierzu Kapitel 4.2).

Analysiert man die Beziehungsstruktur zwischen den Parametern (Variablen; Tab. 5.1) lässt sich feststellen, dass viele von ihnen paarweise hoch korreliert sind (vgl. Anhang A). Zur effizienten, d.h. weitgehend redundanzfreien Beschreibung des morphologischen Zustandes ist es daher notwendig, mit Hilfe einer Hauptkomponentenanalyse aus den Ausgangsvariablen abstrakte, deren Korrelationsstruktur repräsentierende Größen abzuleiten. Diese sollen dann als Eingangsgrößen für eine Clusteranalyse verwendet werden.

MTHW	Mittleres Tidehochwasser
MTNW	Mittleres Tideniedrigwasser
MTMW	Mittleres Tidemittelwasser
ABGES_A	Gesamtfläche des Beckens inkl. Supratidal
ABMTHW_A	Fläche < <i>MThw</i>
ABMTMW_A	Fläche < <i>MTmw</i>
ABMTNW_A	Fläche < <i>MTnw</i> /Sublitoralflächen
ABINT_A	Eulitoral/Watt- oder Intertidalflächen
ABSUP_A	Supralitoral/Vorlandflächen
DNNMTHW	Mittlere Beckentiefe unter <i>NN</i> bei <i>MThw</i>
DNNMTNW	Mittlere Beckentiefe unter <i>NN</i> bei <i>MTnw</i>
DMTHW	Mittlere Beckentiefe unter <i>MThw</i> bei <i>MThw</i>
DMTNW	Mittlere Beckentiefe unter <i>MTnw</i> bei <i>MTnw</i>
ISV	Intertidales Sedimentvolumen
WV	gesamtes Wasservolumen
WVNN	Fassungsvolumen bei <i>NN</i>
P	Tideprisma
PV	Prielvolumen
ACMTHW	Querschnittsfläche des Seegatts unter <i>MThw</i>
ACMTNW	Querschnittsfläche des Seegatts unter <i>MTnw</i>
ACMT1_2W	Querschnittsfläche des Seegatts unter <i>MT1/2w</i>
SG_DMTHW	Mittlere Seegatttiefe unter <i>MThw</i> bei <i>MThw</i>
SG_DMTNW	Mittlere Seegatttiefe unter <i>MTnw</i> bei <i>MTnw</i>

Tab. 5.1: Bedeutung der Variablenabkürzungen

Die Generierung der Hauptkomponenten entspricht graphisch der Erzeugung von neuen Koordinatenachsen, welche gegenüber dem ursprünglichen, durch die Beckenparameter aufgespannten Koordinatensystem verdreht und/oder verschoben sind (Abb. 5.2).

Und zwar so, daß die neuen Achsen entlang der Hauptachsen des durch die Parameterwerte gebildeten (Hyper-) Ellipsoides verlaufen.

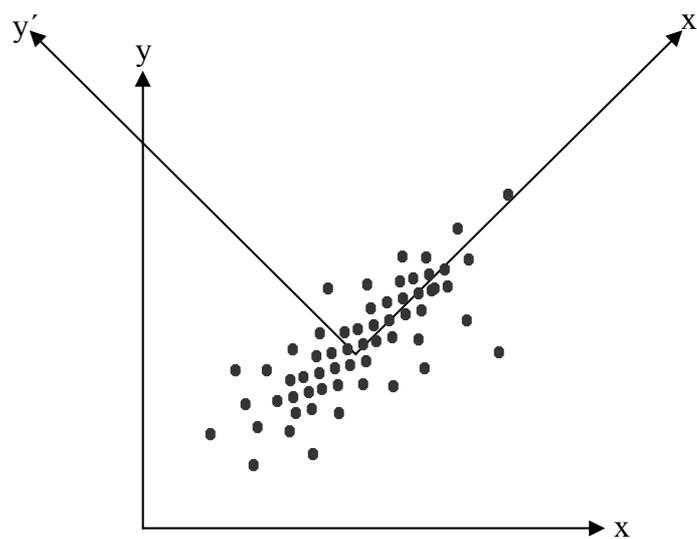


Abb. 5.2: Geometrisches Prinzip einer Hauptkomponentenanalyse.

Sind zumindest einige der Ausgangsvariablen miteinander korreliert, dann lässt sich die Zahl der zur Erklärung der im Datensatz vorhandenen Varianz benötigten neuen Hauptkomponenten ohne wesentlichen Informationsverlust reduzieren.

Tabelle 5.2 zeigt das Ergebnis der mit der Statistiksoftware SPSS über alle 158 Becken durchgeführten Hauptkomponentenanalyse. Es lassen sich – nach dem Kriterium eines minimalen Eigenwertes von 1 – drei Hauptkomponenten oder Faktoren extrahieren, die zusammen 91.96 % der im Ausgangsdatsatz enthaltenen Varianz erklären.

Total Variance Explained

Rotation Sums of Squared Loadings

Component	Total	% of Variance	Cumulative %
1	12.308	53.51	53.51
2	5.791	25.18	78.69
3	3.053	13.27	91.96

Tab. 5.2: Anteil der durch die ersten drei Hauptkomponenten erklärten Varianz des Ausgangsdatsatzes.

Rotated Component Matrix^a

	Component		
	1	2	3
MTHW	-.189	-.142	-.897
MTNW	7.157E-02	9.509E-02	.934
MTMW	-.405	-.650	-.493
ABMTNW_A	.862	.403	.261
ABINT_A	.904	.385	-.118
ABSUP_A	.670	.166	.220
WV	.913	.383	5.149E-02
WVNN	.916	.367	.102
PV	.929	.336	6.710E-02
P	.893	.428	3.552E-02
ISV	.834	.286	-.410
DNNMTHW	-.617	-.745	1.445E-02
DNNMTNW	-.558	-.562	.581
DMTHW	-.590	-.732	.218
DMTNW	-.595	-.603	.493
SG_DMTHW	-.378	-.793	-.160
SG_DMTNW	-.414	-.766	-.335
ACMTNW	.810	.525	.109
ACMT1_2W	.804	.539	9.408E-03
ACMTHW	.789	.539	2.207E-03
ABGES_A	.906	.403	.101
ABMTHW_A	.904	.406	9.627E-02
ABMTMW_A	.892	.413	.131

Extraction Method: Principal Component Analysis.
 Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.

a. Rotation converged in 5 iterations.

Tab. 5.3: Statistiken und Ladungsmatrix der Hauptkomponentenanalyse mit SPSS.

Aus der Matrix der sog. „Ladungen“ lässt sich ablesen, dass die erste Hauptkomponente sehr hohe positive Korrelationen aufweist mit Variablen zu Flächen- und Volumengrößen (Tab. 5.3).

Die erste Hauptkomponente lässt sich somit ansprechen als „Beckengröße“, die ihrerseits mit den verschiedenen Querschnittsflächen des Seegatts in einem positiven Zusammenhang steht. Je größer ein Becken ist, desto größer sind auch die entsprechenden Flächen.

Die zweite Hauptkomponente steht in Beziehung mit den mittleren Tiefen im Tidebecken und im Seegatt. Vor dem Hintergrund der später in Kapitel 6 dargelegten Entwicklung eines Tidebeckens kann diese Komponente als „Vertiefung“ aufgefasst werden. Je stärker sich ein Becken vertieft, desto kleiner sind dessen mittlere Tiefenwerte, desto größer also dessen mittlere Tiefen.

Die dritte Hauptkomponente steht dagegen stark mit den hydrographischen Größen $MThw$ und $MTnw$ in Beziehung, die wiederum den Tidenhub eines Becken bestimmen. Man könnte sie als hydrographischen „Hub“ eines Tidebeckens ausdrücken.

Auf eine weitere Interpretation der Hauptkomponenten soll hier verzichtet werden, da in Kapitel 6 die Becken auf Basis ihrer topographisch-morphologischen Parameter noch eingehend analysiert werden.

5.3 Hierarchische Clusteranalyse

Bei einer Clusteranalyse werden die Raumeinheiten (in diesem Fall die Tidebecken) schrittweise in so genannte Cluster zusammengefasst, welche auf Basis der Hauptkomponenten (vgl. Kapitel 5.2) die größte Ähnlichkeit in ihren Werten aufweisen. Mit jedem Schritt wächst dabei die Generalisierung. Bei dem letzten Schritt werden alle Cluster zu einer einzigen Klasse vereint, so dass sie nicht mehr zu unterscheiden sind (BAHRENBERG et al. 1992).

* * * * * H I E R A R C H I C A L C L U S T E R A N A L Y S I S * * * * *

Dendrogram using Ward Method

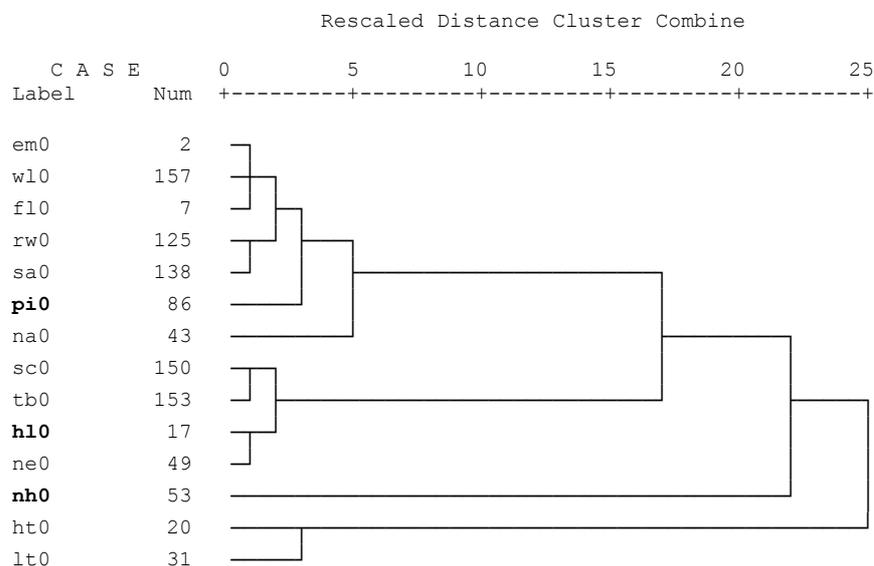


Abb. 5.3: Clusteranalyse auf Basis der Hauptkomponentenwerte der Tidebecken des schleswig-holsteinischen Wattenmeeres.

Die Abbildung 5.3 zeigt die graphische Darstellung der Clusteranalyse in Form eines Dendrogramms bzw. Stammbaums. Um bei der Auswahl der Becken die typischen Vertreter auszuwählen, müssen die gewählten Becken jeweils einen (Haupt-)Ast in dem Dendrogramm abdecken (vgl. hierzu Abb. 2.8).

Beim Tidebecken Norderhever-Heverstrom (nh0) erkennt man, dass es sich bis zum letzten Schritt nicht mit einem anderen Zweig vereinigt. Das bedeutet, dass dieses Becken durch kein anderes Becken in seinen Eigenschaften repräsentiert wird und somit als eigener Vertreter der schleswig-holsteinischen Tidebecken berücksichtigt werden muss.

Bei den ausgewählten Tidebecken Piep (pi0), und Hoogeloch (hl0) ist das Dendrogramm entsprechend zu interpretieren. Das Tidebecken Piep kann als typischer Vertreter für sieben der 14 Tidebecken in Schleswig-Holstein angesehen werden, weil es den oberen Hauptast im Dendrogramm abdeckt (vgl. Abb. 2.8). Es vertritt die Dithmarscher Tidebecken Eidermündung (em0), Wesselburener Loch (wl0) und Flackstrom (fl0) sowie die mittelgroßen Tidebecken Nordfrieslands Rummelloch West (rw0), Süderau (sa0) und Norderaue (na0).

Das Tidebecken Hoogeloch (hl0) kann als Stellvertreter für die „kleinen“ schleswig-holsteinischen Tidebecken Neufahrwasser (ne0), Schatzkammer (sc0) und Tümlauer Bucht (tb0) angesehen werden (vgl. Abb. 2.8).

Die Tidebecken Hörnum Tief (ht0) und Lister Tief (lt0) bilden im Dendrogramm (Abb. 6.5) einen eigenen Zweig. Zumindest eines dieser beiden Tidebecken müsste somit zusätzlich zu den bereits ausgewählten drei Tidebecken berücksichtigt werden. Diese Tidebecken wurden jedoch aufgrund der geringen Anzahl an Vermessungszeitpunkten – für das Hörnum Tief lagen lediglich drei Datensätze vor, für das Lister Tief sogar nur zwei – nicht explizit in die Analyse einbezogen. Insbesondere bei der anschließenden Hochrechnung wären zwei bzw. drei Datensätze unzureichend. Gleichwohl ist bei Verfügbarkeit weiterer Vermessungszeitpunkte die Berücksichtigung zumindest eines der beiden Becken für nachfolgende Untersuchungen sinnvoll.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass mit Ausnahme von Lister Tief und Hörnum Tief alle Tidebecken Schleswig-Holsteins durch die Analyse der drei „typischen“ Tidebecken Hoogeloch, Piep und Norderhever-Heverstrom in ihren charakteristischen Eigenschaften abgedeckt werden. Somit wird die Auswahl dieser Becken, wie sie in Kapitel 5.1 erfolgt ist, durch dieses statistische Verfahren explizit unterstützt.

6. Empirische Auswertungen

Die einzelnen Tidebecken werden vor der Interpretation aller Ergebnisse noch einmal kurz anhand ihrer Charakteristiken vorgestellt, um die Ergebnisse und deren Abweichungen in den einzelnen Becken besser nachvollziehen zu können.

6.1 Piep

Aufgrund des hohen Tidenhubes von über 3.2 m ist das Dithmarscher Wattenmeer durch offene Watten gekennzeichnet (vgl. in Kap. 2 die Einteilung nach HAYES 1979). Das bedeutet, dass keine Barriereinseln oder eine Kette aneinander gereihter Außensände wie in Nordfriesland (Japsand, Norderoog- und Süderoogsand) zum Schutz gegen die offene Nordsee vorge lagert sind (vgl. Abb. 2.2). Dieses Gebiet zwischen Eiderstedt und dem Elbeästuar zeichnet sich insgesamt durch starke Sedimentumlagerungen aus, die vor allem in starken Verlagerungen von Prielen und Sandbarren bzw. -platen zum Ausdruck kommen (vgl. z.B. WIELAND 2000b, ZYBALA 1992, PARTENSCKY 1984, GAST et al. 1984, HOFFMANN 1986, LANG 1975, WIELAND 1984). Ein Beispiel für diese extremen Verlagerungen sind die Sände Blauort und Tertius. Beispielsweise hat sich der Blauortsand zwischen 1938 und 1969 im Durchschnitt um 32 m pro Jahr ostwärts in Richtung Festland verlagert (WIELAND 1972, EHLERS 1988). Obwohl einige Sände bereits erodiert worden sind bzw. momentan einer starken Erosion unterliegen, bauen sich andererseits neue Sände auf (z.B. D-Steert). Im Gegensatz zu der relativ „stabilen“ Barriereküste Nordfrieslands hat sich in Dithmarschen eine „wandernde“ Barriere entwickelt, bei der sich ständig neue Sände an der seewärtigen Grenze formieren (EHLERS 1988).

Die Piep ist das dominierende Prielsystem in Dithmarschen. Der Tertius sand teilt das Wattstromsystem seewärts in eine südliche und eine nördliche Rinne (Abb. 6.1). Der Flutstrom fließt überwiegend durch die Südrinne, hingegen der Ebbstrom durch beide Rinnen strömt (vgl. SIEFERT et al. 1980).

Auf die Untersuchung des Seegatts wird bei dem Gesamtbecken der Piep verzichtet, weil das Seegatt der Piep durch den Tertius sand in zwei separate Bereiche getrennt ist und ein zeitlicher Vergleich zwischen den sich zudem ständig ändernden Seegattprofilen sehr problematisch ist (vgl. hierzu auch SPIEGEL 1997a, WITEZ et al. 1998).

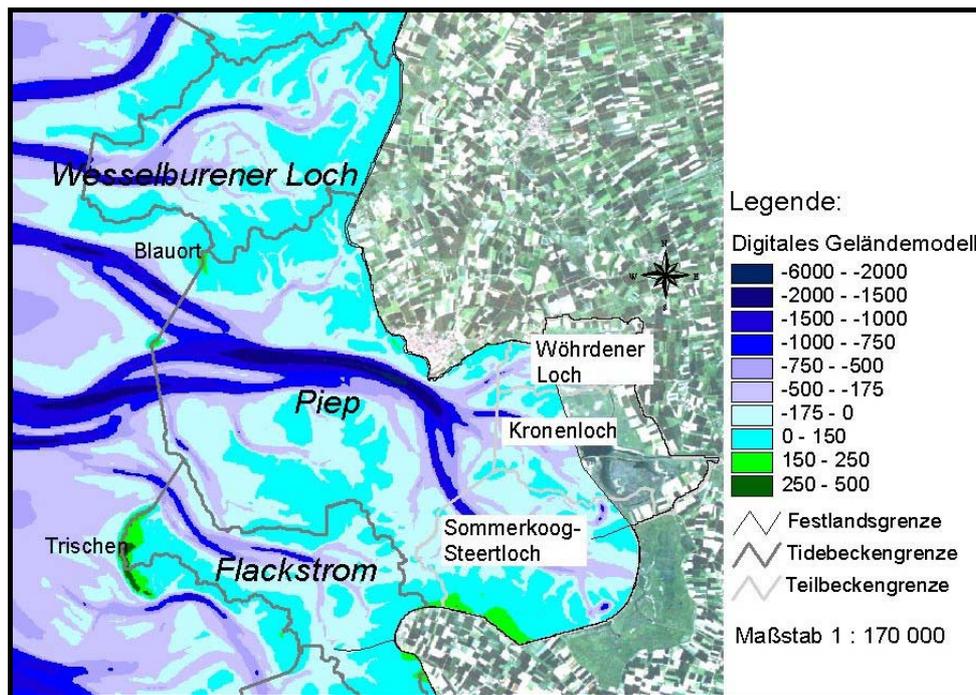


Abb. 6.1: Das Tidebecken der Piep mit Teilbecken.

Die morphologische Unterteilung dieses Einzugsgebiets in mehrere Subsysteme erfolgt je nach Autor und Fragestellung anders (z.B. GOLDENBOGEN 1994, KUNZ et al. 1998). Generell kann das Becken in zwei größere Teilbecken untergliedert werden (z.B. SPIEGEL 1997a). Die Grenze lässt sich in Höhe der Hafenstadt Büsum ziehen. Der seewärtige Bereich ist durch die Sände Blauort und Tertius begrenzt und wird durch den breiten und tiefen Wattstrom der Piep dominiert. Hingegen wird der landwärtige Bereich durch die Meldorfer Bucht eingenommen und ist somit fast vollständig von Festlandsdeichen eingefasst. Dieser Bereich gestaltet sich aus morphologischer Sicht komplizierter, da sich bei Büsum die Piep in drei Prieläste aufspaltet (vgl. NIEMEYER 2000, KUNZ et al. 1998). Der nördliche Priel der Meldorfer Bucht wird als Wöhrdener Loch, der mittlere als Kronenloch und der südliche als Sommerkoog-Steertloch bezeichnet (Abb. 6.1). Durch die Eindeichung des Speicherkoog Dithmarschen, der in zwei Bauetappen im Jahr 1972 und 1978 vollzogen wurde, sind diese drei Priele wesentlich beeinflusst worden. Sie bilden in der folgenden Analyse jeweils ein eigenes Teilbecken. Für die Untersuchung standen insgesamt zehn Vermessungen zwischen 1937 und 1991 zur Verfügung, so dass bei einem Gesamtbecken und drei Teilbecken insgesamt 40 (Teil-)Becken untersucht wurden. Das $MThw$ hat sich in dem Untersuchungszeitraum von 1937 (NN +1.47m) bis 1991 (NN +1.56m) lediglich um 9 cm erhöht und das $MTnw$ von 1937 (NN -1.74m) bis 1991 (NN -1.68m) um 6 cm abgenommen, so dass der Tidenhub sich praktisch nicht verändert hat. Man kann also im Tidebecken der Piep nicht von einer wesentlichen Erhöhung der Tidenströmungsgeschwindigkeiten ausgehen (vgl. Tab. 6.1).

	1937	1942	1955	1969	1973	1976	1979	1982	1985	1991
Tidekennwerte [m zu NN]										
MThw	1.47	1.41	1.51	1.43	1.51	1.49	1.51	1.65	1.51	1.56
MTmw	0.43	0.35	0.42	0.37	0.41	0.40	0.36	0.52	0.41	0.47
MTnw	-1.74	-1.81	-1.73	-1.80	-1.71	-1.77	-1.80	-1.67	-1.72	-1.68
MThb	3.21	3.22	3.24	3.23	3.22	3.26	3.31	3.32	3.23	3.24
Flächen [km²]										
Gesamtfläche inkl. Supralitoral	273.8 100%	287.4 105%	288.9 107%	278.4 106%	265.1 106%	258.2 106%	228.7 102%	230.9 103%	227.4 104%	231.7 104%
Fläche unter MTnw: Sublitoral	101.9 37%	114.7 41%	115.9 42%	105.5 39%	109.5 43%	103.0 41%	103.8 46%	101.7 45%	100.4 45%	103.6 46%
Wattflächen: Eulitoral	171.8 63%	162.6 59%	160.0 58%	162.4 61%	145.2 57%	145.5 59%	121.9 54%	125.4 55%	121.9 55%	122.4 54%
Mittl. Sedi- menthöhen [m]										
Char. Watthöhe	1.74	1.75	1.72	1.78	1.71	1.73	1.67	1.66	1.68	1.69
Tiefen [m]										
Tiefe zu NN bei MThw	-1.74	-1.87	-1.98	-1.78	-1.95	-1.90	-2.21	-2.04	-2.07	-2.03
Tiefe zu NN bei MTnw	-6.81	-6.69	-6.97	-6.73	-6.67	-6.68	-6.81	-6.92	-6.82	-6.77
Maximale Tiefe	-20.94	-23.85	-23.97	-23.69	-25.13	-25.79	-24.94	-27.04	-25.72	-26.05
Volumina [Mio. m³]										
Fassungsvolu- men bei MThw	684.9 100%	660.0 100%	699.1 100%	637.4 100%	632.1 100%	615.4 100%	589.0 100%	595.7 100%	565.8 100%	577.0 100%
Fassungsvolu- men bei NN	416.9 61%	412.2 62%	435.7 62%	395.8 62%	395.0 62%	380.4 62%	375.2 64%	361.9 61%	356.1 63%	358.1 62%
Prielvolumen: PV	277.2 40%	267.7 41%	297.0 42%	257.3 40%	265.3 42%	250.0 41%	247.4 42%	249.6 42%	241.3 43%	246.2 43%
Tideprisma: P	407.8 60%	392.3 59%	402.1 58%	380.0 60%	366.9 58%	365.3 59%	341.7 58%	346.1 58%	324.4 57%	330.9 57%

Tab. 6.1: Flächen-, Tiefen- und Volumenverteilung im Tidebecken der Piep zwischen 1937 bis 1991.

Die morphologischen Folgen der beiden Vordeichungen in den Jahren 1972 und 1978 machen sich in fast allen in Tab. 6.1 aufgeführten Zustandsvariablen bemerkbar. Schon bei der Betrachtung der Parameter für das gesamte Tidebecken fällt neben der Abnahme der Gesamtfläche insbesondere auf, dass der Anteil des Sublitorals nach der Eindeichung zugenommen, und zugleich der des Eulitorals zumindest kurzfristig deutlich abgenommen hat. Die Abnahme der zwischen dem *MThw* und *MTnw* liegenden Wattflächen (Eulitoral) nach den jeweiligen Eindeichungen ist vor allem dadurch zu begründen, dass diese hochgelegenen Bereiche eingedeicht wurden. Dies führt dazu, dass die so genannte charakteristische Watthöhe, die sich aus dem Quotienten zwischen intertidalem Sedimentvolumen und Eulitoral definiert, nach der Vordeichung um 6 bis 7 cm abgenommen hat. Es kann insgesamt festgehalten werden, dass sich bei allen Parametern, die flächenhafte Eigenschaften beschreiben, Küstenschutzmaßnahmen wie Vordeichungen in ihren morphologischen Auswirkungen deutlich bemerkbar machen (vgl. hierzu auch NIEMEYER 2000, KUNZ et al. 1998).

Betrachtet man die Veränderungen in den Volumenparametern, so zeigt sich, dass z.B. das Prielvolumen direkt nach einer Eindeichung zugenommen und im Gegenzug das Tideprisma

abgenommen hat. Das resultiert aus der Tatsache, dass durch die Vordeichung der Flutraum verringert wird, jedoch in Relation der Anteil an Wasser, der sich in den Prielen befindet, erhöht. Die im Anschluss an das Gesamtbecken analysierten Teilbecken verstärken diese Aussagen (Tab. 6.5, 5.10 und 5.15).

Es soll nun eine andere Möglichkeit vorgestellt werden, die morphologischen Änderungen eines Tidebeckens statistisch zu analysieren. Dabei werden zum einen die absoluten Tiefenwerte und zum anderen die aus den Digitalen Höhenmodellen abgeleiteten Hangneigungswerte untersucht. Man konzentriert sich also auf die Ausgangsgeometrie eines Tidebeckens und vergleicht anhand einer Zeitreihe dessen Entwicklung.

Wie bereits einführend vorgestellt, werden zuerst Perzentile abgeleitet. Dabei stellen die Perzentile 3, 5 und 10 – in einer der Größe nach geordneten Datenreihe – die tiefsten Bereiche des Tidebeckens dar und sollen stellvertretend für die Prielbereiche analysiert werden. Hingegen spiegeln die Perzentile 90, 95 und 97 die hohen Wattflächen wider. Bei den Perzentilen für die Hangneigung verhält es sich umgekehrt. Hier stehen die Perzentile 90, 95 und 97 für die steilen, tiefen Prielbereiche. Die geringen Hangneigungen auf den Wattflächen lassen keine eindeutigen Trendaussagen zu, so dass sie nicht näher analysiert werden. Es soll nun einerseits anhand des Gesamtbeckens und andererseits anhand der jeweiligen Teilbecken die Veränderung der Perzentilwerte über die Zeit betrachtet werden.

Tabelle 5.2 zeigt die Veränderung des jeweils betrachteten Perzentils im Laufe der Zeit für das Gesamtbecken der Piep. In der letzten Spalte der Tabelle ist zudem der zugehörige Korrelationskoeffizient r dargestellt, der ein Maß für die Stärke des linearen Zusammenhanges zwischen zwei Variablen – hier der Zeit und dem jeweiligen Perzentilwert – ist. Dabei ist ein linearer Zusammenhang umso wahrscheinlicher, je näher der Korrelationskoeffizient bei 1 oder -1 liegt.

	1937	1942	1955	1969	1973	1976	1979	1982	1985	1991	r
3%	-1164	-1271	-1264	-1247	-1310	-1343	-1432	-1456	-1430	-1379	-0.84
5%	-1046	-1009	-1064	-1006	-1062	-1064	-1174	-1195	-1191	-1161	-0.73
10%	-787	-713	-784	-707	-756	-707	-798	-789	-770	-768	-0.13

Tab. 6.2: Perzentile der Tiefenwerte [in cm] in den Prielen des Gesamtbeckens der Piep im Laufe der Zeit.

Für die tiefen Priele des Tidebeckens der Piep lässt sich im Trend eine Vertiefung feststellen. Diese macht sich durch eine Verschiebung der Tiefenwerte des jeweils betrachteten Perzentils zu größeren Tiefen bemerkbar. Dieser Trend ist deutlicher in den tiefsten Bereichen der Priele ausgeprägt ($r = -0.84$) als in den flacheren Gebieten ($r = -0.13$). Unterstützt wird diese Aussage durch die in Tabelle 5.1 aufgeführten mittleren und maximalen Tiefen, die im Laufe der Zeit ebenfalls eine Zunahme der jeweiligen Tiefenwerte darlegen.

	1937	1942	1955	1969	1973	1976	1979	1982	1985	1991	<i>r</i>
90%	55.73	61.04	60.35	58.61	62.17	59.81	63.63	62.29	62.67	62.37	0.70
95%	67.76	69.73	69.23	67.50	69.40	68.20	70.89	70.07	70.32	70.20	0.48
97%	71.54	73.46	73.06	71.84	72.72	71.88	74.25	73.19	74.08	74.00	0.47

Tab. 6.3: Perzentile der Hangneigung [in Grad] in den Prielen des Gesamtbeckens der Piep im Laufe der Zeit.

Sieht man sich nun parallel dazu die aus dem DEM abgeleiteten Hangneigungen im Tidebecken an, so fällt auf, dass im Laufe der Zeit eine leichte Zunahme des Perzentilwertes in den tieferen Prielbereichen festzustellen ist (Tab. 6.3). Das bedeutet, dass im Priel die Bereiche mit einer stärkeren Hangneigung zugenommen haben.

	1937	1942	1955	1969	1973	1976	1979	1982	1985	1991	<i>r</i>
90%	87	95	111	104	106	101	68	82	82	81	-0.36
95%	108	139	164	145	158	151	102	111	118	114	-0.21
97%	118	171	184	167	187	177	122	151	156	173	0.16

Tab. 6.4: Perzentile der Höhenwerte [in cm] auf den hohen Wattbereichen des Gesamtbeckens der Piep im Laufe der Zeit.

Die Wattflächen liegen für die hier betrachtete Zeitreihe zwischen einem *MThw*-Wert von maximal 165 cm und einem minimalen *MTnw*-Wert von -181 cm. Bei den in der Tab. 6.4 ausgewählten Perzentilen werden nur die hohen Wattbereiche im Tidebecken berücksichtigt. Dies ist vor dem Hintergrund der Fragestellung zu sehen, ob die Wattflächen mit dem Meeresspiegelanstieg mitwachsen können. Bei der Betrachtung der Werte fällt auf, dass in Bezug auf den gesamten Untersuchungszeitraum kein eindeutiger Trend zum Aufwachsen der hohen Wattbereiche gegeben ist. Allerdings kam es nach der Eindeichung des nördlichen Bereiches des Speicherbeckens im Jahre 1978 zu einer merklichen Abnahme der Höhenwerte. Dies ist damit zu erklären, dass gerade die hochgelegenen Wattbereiche eingedeicht und somit dem Tidebecken verloren gegangen sind. Im Anschluss an die Deichschließung hat sich ein neues Gleichgewicht eingestellt, wobei in den höchsten Wattbereichen eine stärkere Sedimentation zu erkennen ist.

Die Auswirkungen der beiden Vordeichungen in diesem Tidebecken von 1972 und 1978 sind bei der Analyse des gesamten Tidebeckens bisher kaum in Erscheinung getreten. Um speziell die Frage zu klären, welchen Einfluss die Vordeichungen auf die weitere Entwicklung eines Teilbeckens haben, sollen hier die drei unmittelbar von der Eindeichung betroffenen Teilbecken näher untersucht werden.

6.1.1 Wöhrdener Loch

Das nördliche Teilbecken wird durch das Prielsystem des Wöhrdener Lochs be- und entwässert. Es weist das kleinste Einzugsgebiet der drei Teilbecken auf (Abb. 6.1). Das Becken zeichnet sich insbesondere dadurch aus, dass es sich durch die Eindeichung des nördlichen

Bereiches des Dithmarscher Speicherkooges im Jahre 1978 von 17.4 km² auf 3.7 km² und damit auf nur noch ein Fünftel seiner ursprünglichen Gesamtfläche (inklusive des Supratidals) reduziert hat (Tab. 6.5).

	1937	1942	1955	1969	1973	1976	1979	1982	1985	1991
Tidekennwerte [m zu NN]										
MThw	1.47	1.41	1.51	1.43	1.51	1.49	1.51	1.65	1.51	1.56
MTmw	0.74	0.64	0.70	0.60	0.69	0.68	0.42	0.61	0.60	0.70
MTnw	-1.74	-1.81	-1.73	-1.80	-1.71	-1.77	-1.80	-1.67	-1.72	-1.68
MThb	3.21	3.22	3.24	3.23	3.22	3.26	3.31	3.32	3.23	3.24
Flächen [km²]										
Fläche inkl. Supralitoral	17.4 100%	18.4 118%	19.4 120%	18.0 115%	16.0 118%	16.5 123%	5.6 104%	4.1 103%	3.7 106%	3.8 100%
Fläche unter MTnw: Sublitoral	1.6 9%	2.0 12%	2.2 13%	2.5 16%	1.9 14%	1.6 12%	2.2 40%	0.8 19%	0.5 15%	0.6 16%
Wattflächen: Eulitoral	15.8 91%	14.0 88%	14.4 87%	13.7 84%	12.1 86%	12.3 88%	3.3 60%	3.3 81%	3.1 85%	3.2 84%
Mittl. Sedi- menthöhen [m]										
Char. Watthöhe	2.06	1.99	2.03	1.99	2.01	2.05	1.65	1.59	1.70	1.69
Tiefen [m]										
Tiefe zu NN bei MThw	0.12	-0.05	0.03	-0.14	0.02	0.03	-1.06	-0.45	-0.30	-0.25
Tiefe zu NN bei MTnw	-2.75	-3.23	-3.11	-3.12	-2.93	-2.52	-4.19	-2.72	-2.59	-2.91
Maximale Tiefe	-5.13	-7.99	-7.63	-7.94	-5.99	-6.91	-16.33	-4.98	-3.85	-4.94
Volumina [Mio. m³]										
Fassungsvolumen bei MThw	21.1 100%	19.9 100%	20.7 100%	21.1 100%	17.0 100%	16.9 100%	8.7 100%	6.8 100%	5.3 100%	5.5 100%
Fassungsvolumen bei NN	5.1 24%	5.6 28%	5.7 28%	6.7 32%	4.8 28%	4.7 28%	4.2 49%	2.2 32%	1.6 30%	1.4 26%
Prielvolumen: PV	1.0 5%	1.4 7%	1.5 7%	1.8 8%	1.2 7%	0.8 4%	1.8 21%	0.5 7%	0.3 5%	0.3 6%
Tideprisma: P	20.1 95%	18.6 93%	19.2 93%	19.3 92%	15.8 93%	16.2 96%	6.8 79%	6.3 93%	5.0 95%	5.2 94%

Tab. 6.5: Flächen-, Tiefen- und Volumenverteilung im Teilbecken des Wöhrdener Lochs zwischen 1937 bis 1991.

Die vorher extrem hohe charakteristische Watthöhe von 2.05 m nahm auf 1.65 m ab und hat bis zum letzten verfügbaren Datensatz von 1991 diese Höhe nicht wieder erreicht. Das bedeutet, dass nach den Eindeichungen der hochgelegenen Gebiete sich die mittlere Sedimenthöhe nicht wieder in dem vorherigen Maße ausbilden konnte. Dies kann einerseits ein Hinweis für ein Sedimentdefizit im Vergleich zur Situation vor der Vordeichung in diesem Becken sein, oder andererseits aber auch darauf hinweisen, dass sich in diesem Bereich nach der Vordeichung aufgrund eines erhöhten Seegangs weniger Sediment ablagern kann.

Die sprunghafte Zunahme der maximalen Tiefe zwischen 1976 und 1979 um 10 m ist auf eine Sandentnahme zurückzuführen. Im Zuge der Vordeichung wurde Sediment für den Deichbau

im Tidebecken entnommen, was sich aufgrund seiner Ausmaße in der Vermessung von 1979 niedergeschlagen hat.

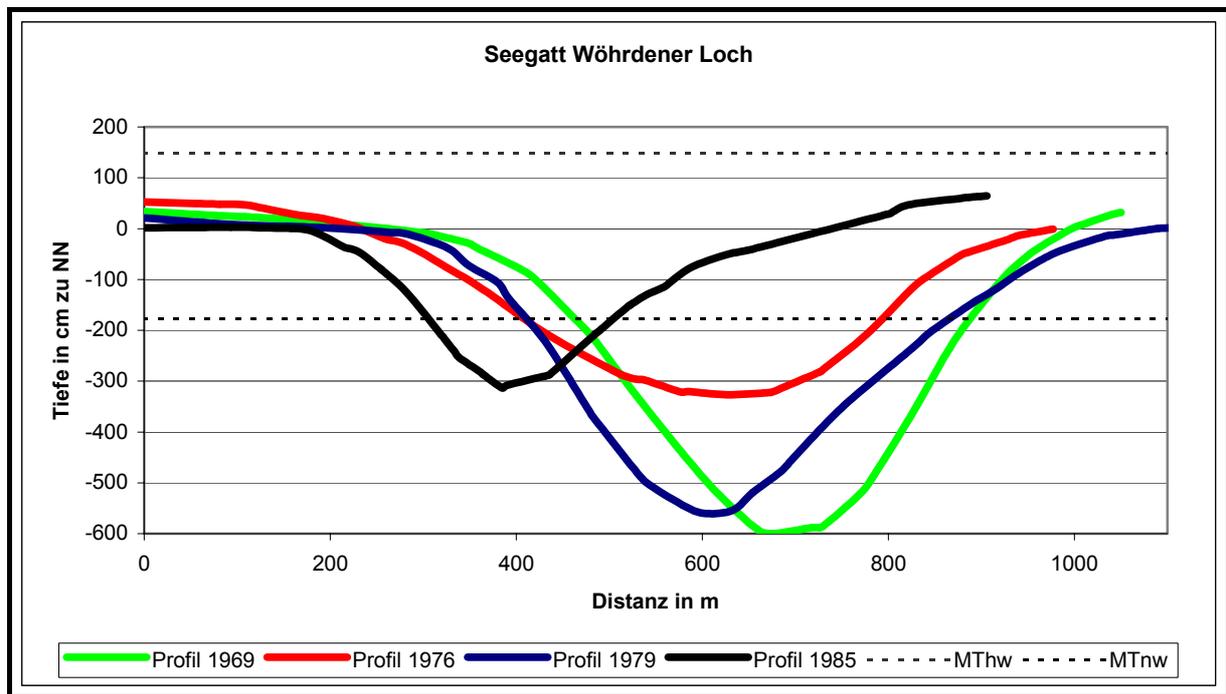


Abb. 6.2: Seegattprofile des Wöhrdener Loch.

Das Seegatt des Wöhrdener Loch ist insgesamt flacher geworden. Vor der Eindeichung zwischen 1969 und 1976 hat die maximale Tiefe von -6 m auf -3.2 m abgenommen. Die Vordeichung von 1978 verursachte in dem Seegattprofil von 1979 eine Vertiefung auf -5.5 m, so dass fast das Niveau von 1969 erreicht wurde. Das Profil von 1985 zeigt mit einer maximalen Tiefe von -3.07 m jedoch bereits, dass der Trend einer Abnahme der Seegatttiefe, der durch die Vordeichung unterbrochen worden ist, sich weiter fortsetzt. Der Seegattquerschnitt des Priels war insbesondere nach der Eindeichung für das sehr stark verkleinerte Einzugsgebiet viel zu groß, weil auch das Wasservolumen, das mit jeder Tide ein- und ausläuft, durch die Vordeichung abgenommen hat. Der Prielquerschnitt hat sich dementsprechend dem neuen Wasservolumen angepasst und unterlag nach der Eindeichung einer sehr starken Sedimentation (Tab. 6.6).

	1969	1976	1979	1985
MThw	1.43	1.49	1.51	1.51
MTnw	-1.80	-1.77	-1.80	-1.72
Mittl. Tiefe bei MThw [m]	-3.47	-2.78	-3.27	-2.35
Mittl. Tiefe bei MTnw [m]	-1.14	-0.41	-0.86	-0.23
Seegattquerschnitt [m²]				
Querschnittsfläche < MThw	2049	1371	2788	1492
Querschnittsfläche < MTnw	1067	391	974	178
Querschnittsfläche im Intertidal	982	980	1814	1314

Tab. 6.6: Flächen- und Tiefenverteilung der Seegatts des Wöhrdener Loch.

	1937	1942	1955	1969	1973	1976	1979	1982	1985	1991	<i>r</i>
3%	-232	-278	-293	-314	-288	-249	-649	-310	-292	-331	-0.34
5%	-196	-198	-207	-230	-220	-203	-519	-290	-270	-273	-0.46
10%	-111	-110	-111	-163	-129	-136	-355	-226	-175	-146	-0.49

Tab. 6.7: Perzentile der Tiefenwerte [in cm] in den Prielen des Teilbeckens Wöhrdener Loch im Laufe der Zeit.

Bei der Betrachtung der Veränderung der Perzentile der Tiefenwerte in den Prielen fällt auf, dass sich diese bis zum Jahr 1969 kontinuierlich verringert haben (Tab. 6.7). Dieser Trend zur Vertiefung wurde durch die Deichschließung des südlichen Bereiches des Speicherkooges umgekehrt, obwohl das Becken des Wöhrdener Lochs nicht direkt durch die Vordeichung betroffen war. Die weitaus stärkere morphologische Reaktion erfolgte erwartungsgemäß bei der Eindeichung des nördlichen Bereiches des Dithmarscher Speicherkooges im Jahr 1978, von dem das Becken in seiner Geometrie direkt beeinflusst wurde. Die Gesamtfläche des Teilbeckens (inklusive des Supratidals) des Wöhrdener Lochs reduzierte sich durch die Eindeichung um fast vier Fünftel der ursprünglichen Fläche. Zwischen 1976 und 1979 hat sich der Priel um mehr als das Doppelte vertieft. Das lässt sich darauf zurückführen, dass das Prielsystem des Wöhrdener Lochs praktisch gekappt worden ist. So sind nur noch die seewärtigen, sehr tiefen Bereiche des Priels in die Analyse eingegangen. Bereits 1982 hat sich die Tiefe des Priels fast um die Hälfte wieder reduziert. Es hat also innerhalb von drei Jahren eine enorme Sedimentation in diesem Bereich stattgefunden, weil der Querschnitt des Priels für das sehr stark verkleinerte Einzugsgebiet viel zu groß war (vgl. Abb. 6.2). Die Sedimentation ist auch noch bei der Vermessung von 1985 – also 7 Jahre nach der Vordeichung – zu erkennen. Erst bei der letzten zur Verfügung stehenden Vermessung von 1991 ist wieder eine leichte Vertiefung im Priel nachzuweisen. Neue zukünftige Vermessungen müssen zeigen, ob sich der vor den Eindeichungen gezeigte Trend zu einer langsamen, kontinuierlichen Vertiefung in den Prielen fortsetzt.

	1937	1942	1955	1969	1973	1976	1979	1982	1985	1991	<i>r</i>
90%	35.26	41.14	43.99	45.39	47.96	44.46	66.59	51.79	52.64	50.98	0.72
95%	46.42	50.42	54.42	54.23	56.97	51.13	74.75	57.12	57.09	61.18	0.61
97%	52.18	58.26	60.25	60.84	60.92	54.51	78.10	59.83	59.50	63.55	0.44

Tab. 6.8: Perzentile der Hangneigung [in Grad] in den Prielen des Teilbeckens Wöhrdener Loch im Laufe der Zeit.

Die auf Basis der Tabelle 6.7 gemachten Aussagen lassen sich durch die Veränderung der Perzentile für die Hangneigung bestätigen. Die Vordeichungen haben einen kurzzeitigen, starken Anstieg der Hangneigung zur Folge, der im Laufe der Zeit jedoch wieder annähernd ausgeglichen wird (Tab. 6.8). Allerdings ist das Niveau für die Hangneigung insgesamt etwas erhöht, d.h., dass es eine leichte Versteilung im Prielbereich gegeben hat.

	1937	1942	1955	1969	1973	1976	1979	1982	1985	1991	<i>r</i>
90%	109	174	180	155	174	186	93	93	100	63	-0.44
95%	119	199	196	182	195	199	121	120	144	95	-0.34
97%	124	201	199	192	199	201	151	152	165	100	-0.23

Tab. 6.9: Perzentile der Höhenwerte [in cm] auf den hohen Wattbereichen des Teilbeckens Wöhrdener Loch im Laufe der Zeit.

Bei den hochgelegenen Wattflächen lässt sich anhand der in Tabelle 6.9 aufgeführten Werte feststellen, dass es eine äquivalente Entwicklung zu den Prielen gibt. Sieht man von der Abnahme der Höhenwerte um 1969 ab, so wachsen die hohen Wattbereiche bis zur Vordeichung des nördlichen Speicherbeckens fast kontinuierlich an. Erst als Teile dieser Wattbereiche eingedeicht werden, sinken die Tiefenwerte erwartungsgemäß 1979 stark ab. Dann folgt eine Phase der Konsolidierung, bei der wieder ein leichtes Aufwachsen der hohen Wattbereiche festzustellen ist. Allerdings nehmen die Werte 1991 wieder extrem ab, obwohl zu diesem Zeitpunkt keine weiteren anthropogenen Eingriffe stattgefunden haben, so dass man von einer natürlichen Entwicklung ausgehen muss. Dies kann ein Hinweis für ein Sedimentdefizit im Vergleich zur Situation vor der Vordeichung sein. Andererseits kann sich in diesem Bereich nach der Vordeichung aufgrund eines erhöhten Seegangs weniger Sediment ablagern.

6.1.2 Kronenloch

Das mittlere Teilbecken wird durch das Prielsystem des Kronenlochs eingenommen (Abb. 6.1). Auch dieses Becken war unmittelbar durch die Vordeichung des nördlichen Speicherbeckens 1978 betroffen, so dass sich die Gesamtfläche (inklusive des Supratidals) annähernd halbiert hat (Tab. 6.10).

	1937	1942	1955	1969	1973	1976	1979	1982	1985	1991
Tidekennwerte [m zu NN]										
MThw	1.47	1.41	1.51	1.43	1.51	1.49	1.51	1.65	1.51	1.56
MTmw	0.55	0.46	0.55	0.52	0.59	0.58	0.36	0.53	0.48	0.56
MTnw	-1.74	-1.81	-1.73	-1.80	-1.71	-1.77	-1.80	-1.67	-1.72	-1.68
MThb	3.21	3.22	3.24	3.23	3.22	3.26	3.31	3.32	3.23	3.24
Flächen [km²]										
Gesamtfläche inkl. Supralitoral	44.1	46.1	41.0	35.6	35.9	35.4	20.5	15.7	17.2	20.4
Fläche unter MTnw: Sublitoral	100%	107%	106%	109%	111%	111%	103%	103%	105%	102%
Wattflächen: Eulitoral	8.1	10.5	10.4	7.1	7.1	6.9	8.5	4.7	5.6	7.9
	18%	24%	26%	21%	22%	21%	42%	31%	33%	39%
	36.0	33.2	28.9	26.2	25.8	25.8	11.6	10.7	11.2	12.4
	82%	76%	74%	79%	78%	79%	58%	69%	67%	61%
Mittl. Sedi-menthöhen [m]										
Char. Watthöhe	1.74	1.84	1.81	1.92	1.88	1.93	1.49	1.51	1.58	1.59
Tiefen [m]										
Tiefe zu NN bei MThw	-0.44	-0.55	-0.52	-0.36	-0.33	-0.36	-1.35	-0.82	-0.86	-0.81
Tiefe zu NN	-3.20	-3.29	-3.48	-3.38	-3.24	-3.31	-4.06	-3.10	-3.53	-3.66

bei MTnw											
Maximale Tiefe	-9.99	-9.14	-9.81	-11.02	-11.67	-7.79	-14.49	-6.07	-11.15	-11.48	
Volumina [Mio. m³]											
Fassungsvolumen bei MThw	72.5	70.5	62.1	48.3	49.0	49.5	38.2	29.0	28.7	29.9	
	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
Fassungsvolumen bei NN	25.8	29.2	24.4	18.7	18.3	18.7	19.4	11.4	12.2	12.2	
	36%	41%	39%	39%	37%	38%	51%	39%	43%	41%	
Prielvolumen: PV	7.7	9.4	9.0	5.9	5.9	6.2	8.4	3.8	4.7	5.1	
	11%	13%	14%	12%	12%	12%	22%	13%	16%	17%	
Tideprisma: P	64.9	61.2	53.1	42.5	43.1	43.3	29.8	25.2	24.0	24.8	
	89%	87%	86%	88%	88%	88%	78%	87%	84%	83%	

Tab. 6.10: Flächen-, Tiefen- und Volumenverteilung im Teilbecken des Kronenlochs zwischen 1937 bis 1991.

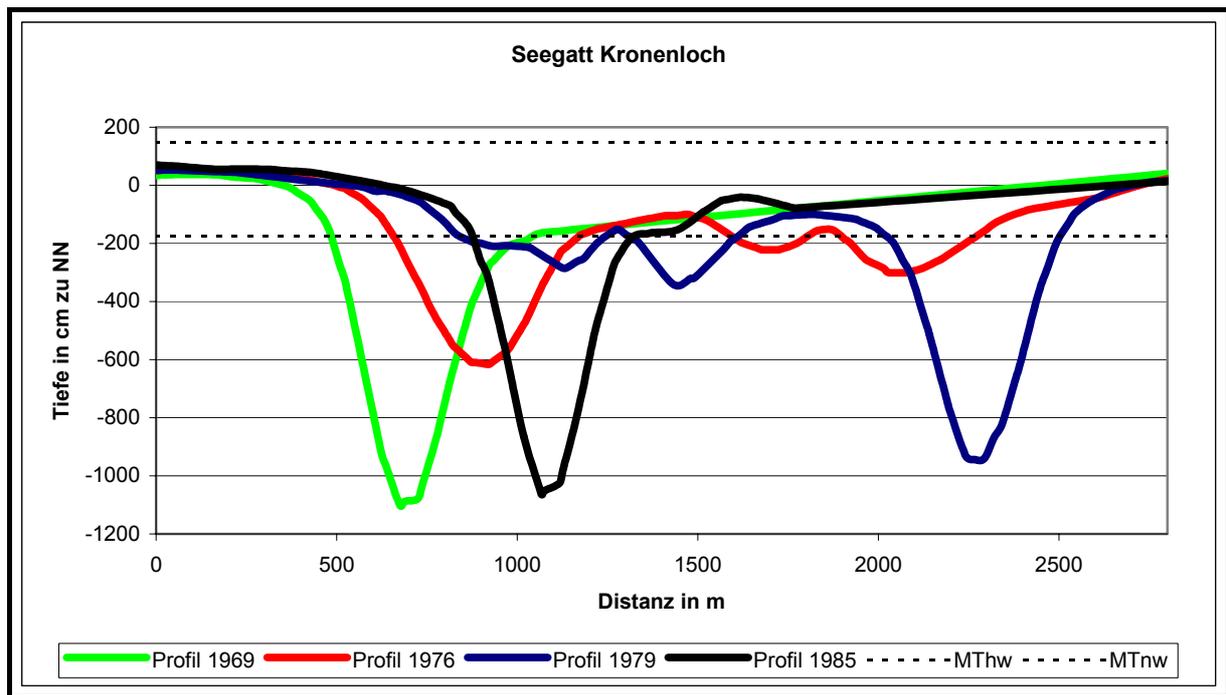


Abb. 6.3: Seegattprofile des Kronenlochs.

Das Seegatt des Kronenlochs erreicht maximale Tiefen von -11 m und ist fast doppelt so tief wie das des Wöhrdener Lochs. Das Seegattprofil hat zwischen 1969 und 1976 seine maximale Tiefe fast halbiert, obwohl dieses Teilbecken erst durch die Vordeichung von 1978 direkt betroffen war. Nach der Eindeichung nimmt 1979 die Tiefe des Seegatts wieder extrem zu und bleibt mit fast -10 m knapp über der maximalen Tiefe von 1969 (vgl. auch Tab. 6.11). Das Seegattprofil hat – abgesehen von 1976 – seine Form nach der Vordeichung nicht wesentlich geändert, zumal das Profil von 1985 dem des Jahres 1969 in Breite und Tiefe annähernd entspricht (Abb. 6.3).

	1969	1976	1979	1985
MThw	1.43	1.49	1.51	1.51
MTnw	-1.80	-1.77	-1.80	-1.72
Mittl. Tiefe bei MThw [m]	-4.62	-3.34	-3.81	-3.79
Mittl. Tiefe bei MTnw [m]	-2.21	-0.79	-1.07	-1.51
Seegattquerschnitt [m²]				
Querschnittsfläche < MThw	7365	6198	5520	6069
Querschnittsfläche < MTnw	2325	1651	2370	2002
Querschnittsfläche im Intertidal	5040	4547	3150	4067

Tab. 6.11: Flächen- und Tiefenverteilung der Seegatts des Kronenlochs.

	1937	1942	1955	1969	1973	1976	1979	1982	1985	1991	<i>r</i>
3%	-465	-466	-472	-415	-400	-428	-759	-475	-538	-526	-0.29
5%	-344	-381	-381	-311	-298	-340	-580	-407	-409	-442	-0.34
10%	-204	-255	-266	-204	-201	-230	-394	-292	-306	-312	-0.49

Tab. 6.12: Perzentile der Tiefenwerte [in cm] in den Prielen des Teilbeckens Kronenloch im Laufe der Zeit.

Betrachtet man die Veränderung der Tiefenwerte in den Prielen des Kronenlochs, so werden die für das Wöhrdener Loch getroffenen Aussagen bestätigt. Sowohl bei der Veränderung der Perzentile für die Tiefenwerte als auch den Hangneigung im Prielbereich ist die gleiche Entwicklung wie im nördlich angrenzenden Teilbecken nachzuweisen (Tab. 12 und Tab. 13). Unmittelbar durch die Eindeichung hat sich der Anteil des Sublitorals von 21 % auf 42 % verdoppelt und der des Eulitorals von 79 % auf 58 % abgenommen. Folglich hat sich auch das Wasservolumen, das ständig in den Prielen verbleibt, von 12 % auf 22 % erhöht und das Tideprisma von 88 % auf 78 % abgenommen. Bereits drei Jahre nach der Vermessung von 1979 sind die Werte für die Wasservolumina auf dem Niveau vor der Eindeichung. Es findet in diesem Fall eine sehr schnelle Konsolidierung in Bezug auf den Eingriff durch die Vordeichung statt.

	1937	1942	1955	1969	1973	1976	1979	1982	1985	1991	<i>r</i>
90%	43.13	49.71	54.06	48.63	47.77	49.43	63.66	56.35	60.43	60.52	0.70
95%	53.26	59.25	62.87	59.26	57.45	57.99	72.11	63.61	67.75	67.38	0.66
97%	59.84	63.42	67.45	64.00	62.39	63.28	75.82	66.46	72.18	70.90	0.63

Tab. 6.13: Perzentile der Hangneigung [in Grad] in den Prielen des Teilbeckens Kronenloch im Laufe der Zeit.

Die Perzentilwerte der Hangneigung haben in den Prielen zwischen 1937 und 1991 zugenommen (Tab. 6.13). Das bedeutet, dass größere Bereiche des Teilbeckens eine höhere Hangneigung aufweisen. Einen deutlichen Sprung in den Werten hat es erwartungsgemäß nach der Vordeichung von 1978 gegeben.

	1937	1942	1955	1969	1973	1976	1979	1982	1985	1991	<i>r</i>
90%	88	111	118	131	150	146	49	63	61	54	-0.34
95%	103	150	157	160	189	177	88	128	132	65	-0.18
97%	113	180	181	178	199	190	136	161	164	80	-0.12

Tab. 6.14: Perzentile der Höhenwerte [in cm] auf den hohen Wattbereichen des Teilbeckens Kronenloch im Laufe der Zeit.

Auch im Teilbecken Kronenloch wachsen die Wattflächen kontinuierlich bis zum Zeitpunkt der Vordeichung 1978 an (Tab. 6.14). Dies spiegelt sich auch in der Zunahme der charakteristischen Watthöhe bis 1976 auf 1.93 m wider. Weite Bereiche werden durch die Eindeichung dem Teilbecken entzogen, so dass die Höhenwerte zwischen 1976 und 1979 stark abnehmen. Danach kommt es wieder zu einer leichten Zunahme, die vergleichbar mit der im Wöhrdener Loch ist. Auch die charakteristische Watthöhe nimmt wieder zu, bleibt jedoch um 15 cm unter dem Anfangsniveau von 1937.

6.1.3 Sommerkoog-Steertloch

Der südliche Prielast wird als Sommerkoog-Steertloch bezeichnet (Abb. 6.1). Er be- und entwässert das südliche Teilbecken der Piep, das zudem das größte Einzugsgebiet der drei Teilbecken aufweist. Das Becken zeichnet sich besonders durch größere Vorlandbereiche im südlichen Bereich zum Friedrichskoog hin aus (Abb. 6.5). Zudem umfasst es die ehemalige Hal lig Helmsand, die heute durch einen Damm mit dem Festland verbunden ist. Bereits im Jahr 1972 wurden die hohen Bereiche dieses Teilbeckens im Zuge des Baus des Dithmarscher Speicherbeckens eingedeicht.

In der Zeitreihe erkennt man sowohl die Auswirkungen der Vordeichung von 1972 als auch der von 1978, obwohl das Teilbecken 1978 nicht direkt betroffen war (Tab. 6.15). Die Abnahme des Anteils des Eulitorals von 50 km² (1969) auf 35.1 km² (1973) kann direkt auf die Vordeichung von 1972 zurückgeführt werden. Nach der zweiten Vordeichung im Jahr 1978 hat eine weitere Abnahme der Wattflächen auf 24.6 km² (1991) stattgefunden. Obwohl das Teilbecken 1978 nicht flächenhaft von der Vordeichung betroffen war, haben die Wattflächen trotzdem weiter abgenommen. Dies bringt zum Ausdruck, dass sich die Auswirkungen einer Vordeichung auch auf unmittelbar benachbarte Gebiete bemerkbar machen. Die charakteristische Watthöhe hat im Zuge der Vordeichung von 1972 von 1.86 m (1969) auf 1.66 m (1973) abgenommen. Nach der zweiten Vordeichung in den nördlich angrenzenden Teilbecken hat die charakteristische Watthöhe zwischen 1979 und 1991 wieder auf 1.78 m zugenommen, jedoch erreichen die Wattflächen nicht mehr das Ausgangsniveau von 1937 mit 1.88 m. Die verstärkte Sedimentation nach der Vordeichung in der nördlichen Meldorfer Bucht scheint auf eine Beruhigung der Strömungsverhältnisse und einer Verfügbarkeit an Suspensionsfracht in der Wassersäule hinzudeuten. Diese These wird zudem durch die Entwicklung des Prielvolumens gestützt. Von 1969 auf 1973 nahm das Prielvolumen von 18.4 Mio. m³ auf 21 Mio. m³ leicht zu, seit der zweiten Vordeichung jedoch nimmt es drastisch ab bis auf einen Wert von 4.9 Mio. m³ im Jahr 1991.

	1937	1942	1955	1969	1973	1976	1979	1982	1985	1991
Tidekennwerte [m zu NN]										
MThw	1.47	1.41	1.51	1.43	1.51	1.49	1.51	1.65	1.51	1.56
MTmw	0.55	0.48	0.53	0.50	0.46	0.45	0.45	0.70	0.59	0.65
MTnw	-1.74	-1.81	-1.73	-1.80	-1.71	-1.77	-1.80	-1.67	-1.72	-1.68
MThb	3.21	3.22	3.24	3.23	3.22	3.26	3.31	3.32	3.23	3.24
Flächen [km²]										
Gesamtfläche	59.0	60.0	69.2	69.1	56.6	50.1	49.3	40.0	35.5	34.3
inkl. Supralitoral	100%	110%	114%	111%	111%	109%	105%	107%	111%	119%
Fläche unter MTnw: Sublitoral	15.0	16.4	16.4	13.8	17.2	13.2	13.5	7.5	5.9	5.2
	25%	29%	26%	22%	33%	28%	28%	20%	18%	17%
Wattflächen: Eulitoral	44.0	39.5	46.3	50.0	35.1	33.8	34.1	30.4	26.7	24.6
	75%	71%	74%	78%	67%	72%	72%	80%	82%	83%
Mittl. Sediment- höhen [m]										
Char. Watthöhe	1.88	1.82	1.70	1.86	1.66	1.65	1.71	1.80	1.76	1.78
Tiefen [m]										
Tiefe zu NN bei MThw	-0.62	-0.89	-0.76	-0.56	-0.94	-0.85	-0.82	-0.37	-0.39	-0.30
Tiefe zu NN bei MTnw	-5.13	-5.42	-4.89	-4.24	-4.19	-4.06	-4.03	-3.63	-3.35	-3.42
Maximale Tiefe	-11.61	-12.25	-13.90	-13.97	-13.78	-13.80	-13.65	-10.07	-9.49	-8.82
Volumina [Mio. m³]										
Fassungsvolu- men bei MThw	98.3	96.9	111.9	104.1	96.4	86.8	86.8	64.0	53.6	46.4
	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Fassungsvolu- men bei NN	44.7	47.8	49.4	44.9	46.2	39.1	39.4	22.4	19.1	15.8
	45%	49%	44%	43%	48%	45%	45%	35%	36%	34%
Prielvolumen: PV	23.0	25.3	23.6	18.4	21.0	15.8	15.4	8.2	5.9	4.9
	24%	26%	21%	18%	22%	18%	18%	13%	11%	11%
Tideprisma: P	75.3	71.6	88.3	85.7	75.6	70.9	71.4	55.8	47.6	41.6
	76%	74%	79%	82%	78%	82%	82%	87%	89%	89%

Tab. 6.15: Flächen-, Tiefen- und Volumenverteilung im Teilbecken des Sommerkoog-Steertloch zwischen 1937 bis 1991.

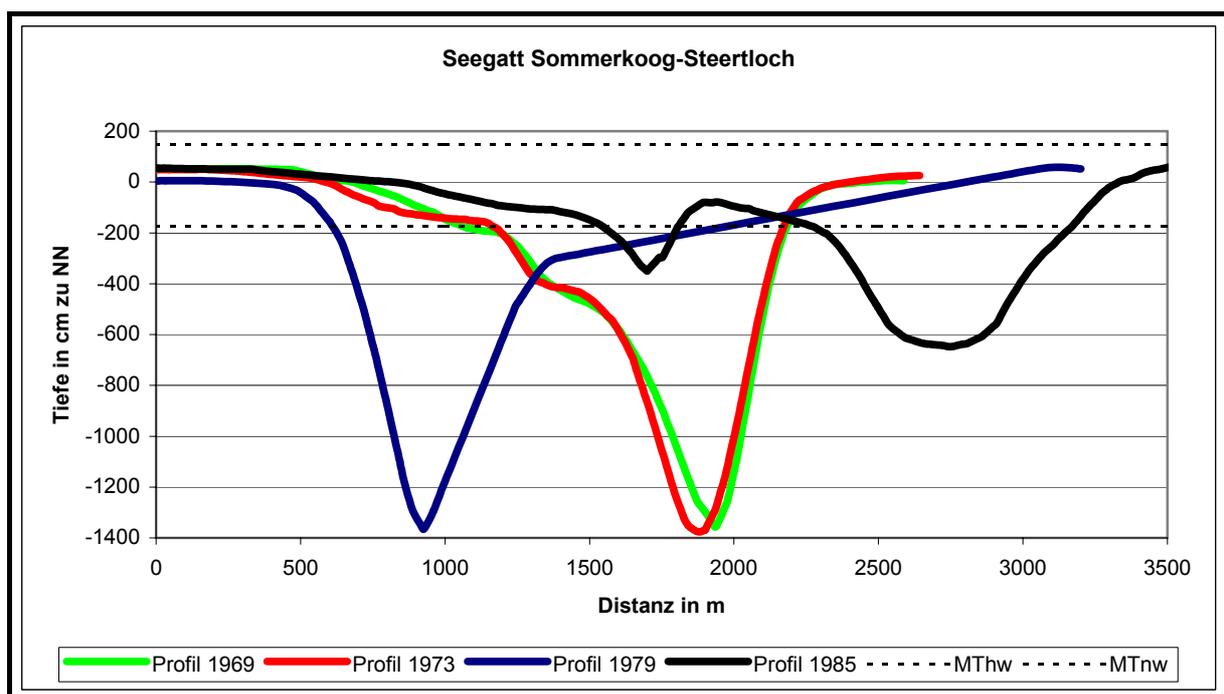


Abb. 6.4: Seegattprofile des Sommerkoog-Steertloch.

Das Seegattprofil des Sommerkoog-Steertloch hat sich zwischen 1969 und 1979 weder in seiner Form noch in der maximalen Tiefe von -13.5 m geändert. Das Teilbecken war 1972 direkt von der Eindeichung des südlichen Dithmarscher Speicherbeckens betroffen. Weder bei dem Seegattprofil von 1973 noch bei dem von 1979, die auf den Vermessungen ein bzw. sechs Jahre nach der Vordeichung basieren, ist eine morphologische Reaktion zu erkennen. Erst das Seegattprofil von 1985 zeigt deutliche Veränderungen. Das Profil ist mit nur noch maximal -6.5 m viel flacher und weist eine kleine Nebenrinne auf. Eine eindeutige Reaktion im Bereich des Seegatts erfolgt also erst nach der 2. Phase der Eindeichung des nördlich angrenzenden Bereiches. Dafür ist die Reaktion darauf jedoch umso stärker, weil der Seegattquerschnitt sich nahezu halbiert und die Rinne des Sommerkoog-Steertloch stark verlandet (Tab. 6.16). Die starke Sedimentation im Priel deutet auf veränderte Strömungsgeschwindigkeiten vor allen nach der 2. Vordeichung im gesamten Bereich der Meldorfer Bucht hin. Der Flutraum der Meldorfer Bucht hat sich aufgrund der Vordeichung stark verringert, so dass das Wasservolumen abgenommen hat. Daraus resultieren auch die geringeren Strömungsgeschwindigkeiten in den Prielen, so dass es zur Sedimentation kommt.

	1969	1973	1979	1985
MThw	1.43	1.51	1.51	1.51
MTnw	-1.80	-1.71	-1.80	-1.72
Mittl. Tiefe bei MThw [m]	-4.88	-5.49	-6.11	-3.59
Mittl. Tiefe bei MTnw [m]	-2.35	-2.86	-3.44	-1.05
Seegattquerschnitt [m²]				
Querschnittsfläche < MThw	6748	7089	10799	5415
Querschnittsfläche < MTnw	5002	5246	5501	2777
Querschnittsfläche im Intertidal	1746	1843	5298	2638

Tab. 6.16: Flächen- und Tiefenverteilung der Seegatts des Sommerkoog-Steertloch.

	1937	1942	1955	1969	1973	1976	1979	1982	1985	1991	<i>r</i>
3%	-882	-915	-780	-647	-731	-648	-654	-472	-398	-406	0.91
5%	-615	-685	-499	-406	-550	-469	-461	-328	-297	-268	0.86
10%	-233	-294	-226	-208	-306	-283	-283	-198	-195	-160	0.35

Tab. 6.17: Perzentile der Tiefenwerte [in cm] in den Prielen des Teilbeckens Sommerkoog-Steertloch im Laufe der Zeit.

Die Perzentile der Tiefenwerte verändern sich in den Prielen bis zur Eindeichung im Jahr 1972 dahingehend, dass die Priele im Gegensatz zu den nördlichen Teilbecken flacher werden (Tab. 6.17). Das deutet darauf hin, dass in den nördlichen Teilbecken die Strömungsgeschwindigkeiten in den Prielen höher gewesen sind als in diesem Teilbecken. Nur bei erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten, die z.B. infolge einer Zunahme des Tidenhubs entstehen können, finden in den Prielen Erosionen statt. Dieser Trend wird erst durch die Vordeichung und somit der Kappung der landnahen, flacheren Prielbereiche umgekehrt. Die Perzentile zeigen daher zwischen 1969 und 1973 eine Vertiefung der Priele an. Im Anschluss wird der vor der Vordeichung stattfindende Trend einer Abnahme der Prieltiefe weitergeführt, so dass im Jahr 1991 die Priele des Sommerkoog-Steertloch nur noch fast halb so tief sind wie zu Beginn

der Vermessungen im Jahr 1937. Dieser Trend ist jedoch nicht alleine auf die Vordeichungen im Tidebecken zurückzuführen, da die Abnahme in den Prielen bereits vor der Eindeichung statt gefunden haben und nach einer kurzen Unterbrechung, die mit der Kappung der flachen Prielbereiche begründet werden kann, fortgesetzt wird. In Relation zu den nördlichen Teilbecken scheint im Teilbecken des Sommerkoog-Steertloch ein Sedimentüberschuss vorhanden zu sein. Diese Aussage wird dadurch unterstützt, dass nur in diesem Teilbecken nach den Vordeichungen eine weitere Zunahme in den Vorlandbereichen zu verzeichnen ist (vgl. Abb. 6.5). Sowohl die Abnahme der Prieltiefe als auch das Wachstum auf den Vorländern muss mit einer relativ niedrigen Energiezufuhr in Form von Tideströmungsgeschwindigkeiten oder Seegang zusammenhängen.

	1937	1942	1955	1969	1973	1976	1979	1982	1985	1991	<i>r</i>
90%	52.79	57.02	51.35	47.93	57.76	54.09	54.17	45.79	40.87	41.42	-0.57
95%	66.23	67.95	64.71	58.68	66.98	64.02	64.16	56.46	53.42	52.80	-0.72
97%	71.00	72.35	69.90	64.80	70.54	68.00	69.19	63.68	59.82	60.29	-0.76

Tab. 6.18: Perzentile der Hangneigung [in Grad] in den Prielen des Teilbeckens Sommerkoog-Steertloch im Laufe der Zeit.

Die Veränderung in den Perzentilen der Hangneigung unterstützt die für die Tiefenwerte gemachten Aussagen insofern, als dass bei einer Abnahme der Tiefe in den Prielen auch die Hangneigung in diesen Bereichen abnimmt (Tab. 6.18).

	1937	1942	1955	1969	1973	1976	1979	1982	1985	1991	<i>r</i>
90%	114	133	162	140	149	131	107	124	149	188	0.32
95%	121	174	188	173	191	174	146	180	181	204	0.53
97%	125	189	195	191	198	188	174	197	191	210	0.63

Tab. 6.19: Perzentile der Höhenwerte [in cm] auf den hohen Wattbereichen des Teilbeckens Sommerkoog-Steertloch im Laufe der Zeit.

Die hohen Wattbereiche im Teilbecken des Sommerkoog-Steertloch wurden von beiden Vordeichungen beeinträchtigt. Nach einer Zunahme der Höhenwerte in den Perzentilen zeigt sich erst nach der ersten Vordeichung im Jahr 1972 eine Abnahme der Höhen in den oberen Watten (Tab. 6.19). Eine weitere Abnahme erfolgt unter dem Einfluss der Vordeichung in den nördlich angrenzenden Gebieten, so dass im Jahr 1979 die hohen Wattflächen ihre geringste Höhe aufweisen. Danach wachsen sie wieder stetig auf, was auf eine gute Sedimentzufuhr hindeutet.

Zuletzt soll für die Piep die Entwicklung der Vorlandflächen vorgestellt werden. Auch die Entwicklung des Vorlandes, d. h. der über *MThw* liegenden Flächen, zeigt deutlich den Einfluss der Vordeichungen. In der Abb. 6.5 ist diese Entwicklung graphisch für die drei Teilbecken der Piep aufgetragen. Das Wöhrdener Loch besaß nach der Vordeichung 1978 kaum noch Vorlandflächen. Beim Kronenloch ist ebenfalls der starke Einschnitt durch die Vordeichung zu erkennen. Lediglich im südlichen Sommerkoog-Steertloch haben sich die

Vorlandflächen zumindest nach der zweiten Vordeichung wieder ausgeweitet. Dieses passt zu der Entwicklung der Watthöhe in diesem Teilbecken und weist ebenfalls auf vorhandene Suspensionsfracht in der Wassersäule hin.

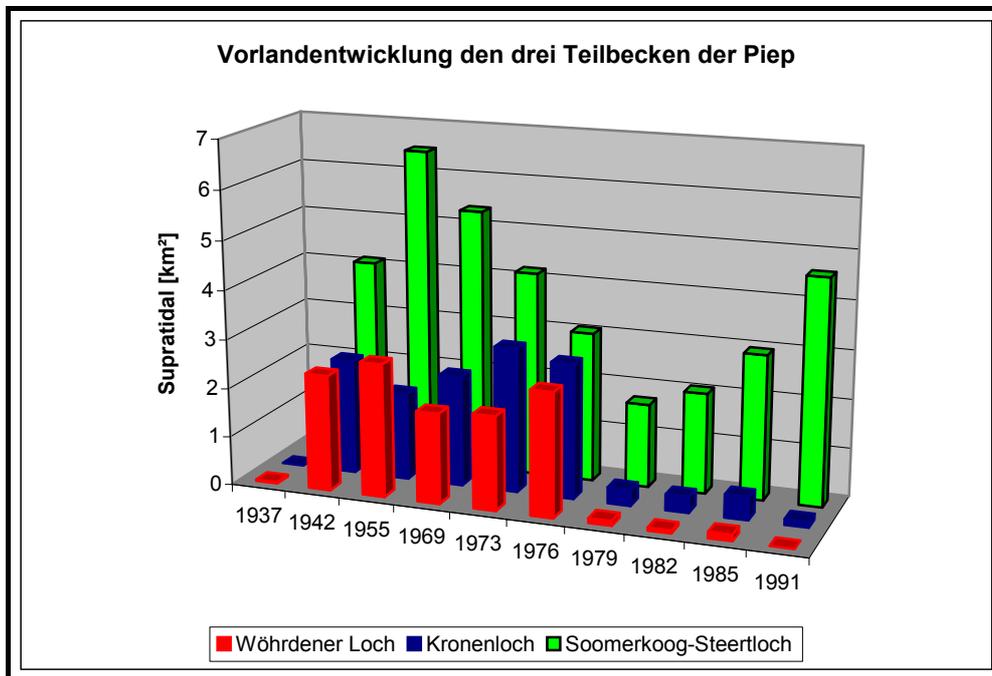


Abb. 6.5: Vorlandentwicklung im Tidebecken der Piep auf Basis der Teilbecken.

6.2 Norderhever-Heverstrom

Nördlich von Eiderstedt erstreckt sich der Bereich des Nordfriesischen Wattenmeeres, der durch Barriereinseln, Marschinseln, ausgeprägte Außensände und Verbindungsdämme charakterisiert ist (vgl. Abb. 2.1). Die Norderhever bildet zusammen mit dem Heverstrom das dominierende Prielstromsystem von Nordfriesland. Nachdem die Wassermassen des mächtigen Wattstroms das Seegatt passieren, teilen sie sich südwestlich der Hallig Südfall auf dem Heversteert in den nördlichen Norderheverstrom und den Heverstrom, der südlich von Nordstrand zum Festland verläuft (Abb. 6.6). Die ehemalige Umspülung der Insel Nordstrand durch dieses Wattstromsystem wurde durch den Bau eines Dammes von Nordstrand zum Festland schon seit 1905/06 unterbunden. Zudem wurde die Vordeichung des Beltringharder Kooges in der Nordstrander Bucht im Frühjahr 1987 abgeschlossen, so dass die ehemalige Insel Nordstrand nun mit einem breiten Gürtel mit dem Festland verbunden ist.

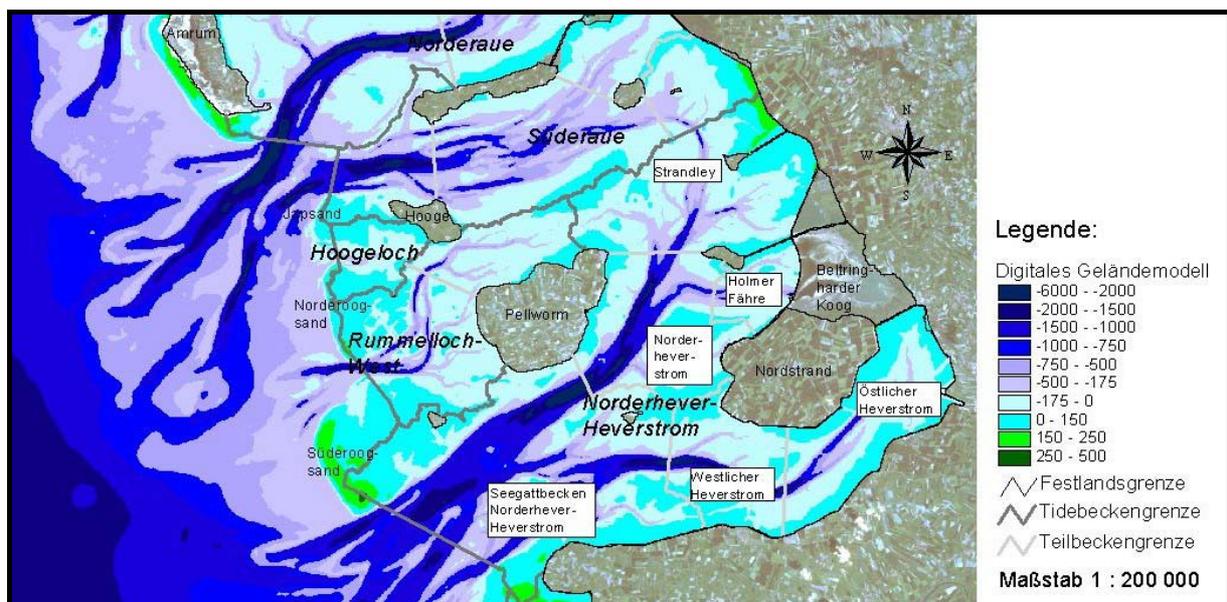


Abb. 6.6: Tidebecken Hoogeloch und Norderhever-Heverstrom mit Teilbecken.

Der nördliche Zweig des Norderheverstroms teilt sich nordwestlich von Nordstrand noch weiter in Holmer Fähre, Butterloch, Bensley und Rummelloch-Ost auf. Die Norderhever ist eine typische, vom Flutstrom dominierte Rinne (u.a. SIEFERT et al. 1980). Zwischen Pellworm und dem Festland findet über die Prielverbindung Strandley ein enormer Wasserübertritt in die nördlich angrenzende Süderaue statt. Berechnet wurde ein Übertritt von 81 Mio. m³ Wasser pro Tide von der Norderhever in die Süderaue, hingegen in die entgegen gesetzte Richtung nur 19 Mio. m³ Wasser pro Tide von der Süderaue in die Norderhever strömen (WINSKOWSKY 1998). Über die Verbindung der Priele Rummelloch-West und Rummelloch-Ost findet zudem noch ein Wasseraustausch zum Tidebecken des Rummellochs statt. Ein anderer Bereich, in dem ein Wasserübertritt vom Norderhever-Heverstrom zum Rummelloch-

West erfolgt, befindet sich zwischen Pellworm und dem Süderoogsand, wobei dessen Bedeutung für die Tideströmung nicht so groß ist (SIEFERT et al. 1980).

Von besonderem Interesse bei der Untersuchung dieses Tidebeckens sind einerseits das Gebiet der Holmer Fähre und andererseits die Gebiete Butterloch, Bensley und Rummelloch-Ost, die unmittelbar von der Vordeichung des Beltringharder Kooges betroffen waren. Dieses große Tidebecken wird für die folgende Analyse in insgesamt sechs Teilbecken unterteilt (vgl. Abb. 6.6).

Die Datenlage zur Analyse der Vordeichung in der Nordstrander Bucht ist wesentlich ungünstiger als bei der Meldorfer Bucht. Die Deichschließung in der Nordstrander Bucht erfolgte im Frühjahr 1987. Das bedeutet, dass die letzte Vermessung des Tidebeckens Norderhever-Heverstrom vor der Vordeichung bereits 13 Jahre zurückliegt. Hingegen hat die letzte Vermessung des Tidebeckens von 1990 nur 3 Jahre nach der Vordeichung stattgefunden. Dies erschwert umso mehr die Aufgabe, die Ursachen der morphologischen Entwicklung auf die Vordeichung zu extrahieren. Es standen insgesamt fünf Vermessungen zwischen 1936 und 1990 zur Verfügung, wobei die Vermessung von 1947 nur für die drei nördlichen Teilbecken flächendeckend vorlag und somit insgesamt 32 Becken (einschließlich des Gesamtbeckens) untersucht wurden. Bei der Vermessung von 1947 finden sich im Bereich des Seegatts und zum Teil in den tieferen Prielen erhebliche Datenlücken, weshalb dieser Vermessungszeitpunkt für diese Teilbecken nicht in die Analyse mit einbezogen werden konnte. Das *MThw* hat sich in dem Untersuchungszeitraum von 1936 (NN + 1.21 m) bis 1990 (NN + 1.64 m) um 43 cm erhöht, während das *MTnw* von 1936 (NN - 1.77 m) bis 1990 (NN - 1.76 m) annähernd konstant geblieben ist, so dass der Tidenhub insgesamt um 40 cm zugenommen hat (Tab. 6.20). Ein erhöhter Tidenhub hat in der Regel erhöhte Tideströmungsgeschwindigkeiten zur Folge, da mehr Wasser in der gleichen Zeit – der Tideperiode – in das Becken ein- und ausströmen muss.

	1936	1966	1974	1990
Tidekennwerte [m zu NN]				
MThw	1.21	1.42	1.40	1.64
MTmw	0.15	0.30	0.30	0.40
MTnw	-1.77	-1.64	-1.70	-1.76
MThb	2.98	3.06	3.10	3.40
Flächen [km²]				
Gesamtfläche	605.4	642.3	648.6	662.6
inkl. Supralitoral	102%	106%	103%	100%
Fläche unter MTnw:	272.2	313.0	309.4	358.5
Sublitoral	46%	51%	49%	54%
Wattflächen:	325.7	306.1	325.3	302.8
Eulitoral	54%	49%	51%	46%
Mittl. Sedimenthöhen [m]				
Charakteristische Watthöhe	1.59	1.52	1.65	1.49
Tiefen [m]				
Tiefe zu NN bei MThw	-2.55	-2.73	-2.62	-3.02

Tiefe zu NN bei <i>MTnw</i>	-7.72	-7.80	-7.96	-8.09
Maximale Tiefe	-26.63	-27.89	-29.01	-29.61
Volumina [Mio. m³]				
Fassungsvolumen bei <i>MThw</i>	1696.1 100%	1800.7 100%	1808.4 100%	2003.2 100%
Fassungsvolumen bei NN	1220.1 72%	1255.3 70%	1262.0 70%	1339.7 67%
Prielvolumen: PV	845.7 50%	908.8 50%	916.5 51%	958.6 48%
Tideprisma: P	850.3 50%	891.9 50%	891.9 49%	1044.6 52%

Tab. 6.20: Flächen-, Tiefen- und Volumenverteilung im Tidebecken Norderhever-Heverstrom zwischen 1936 bis 1990.

Der ständig von Wasser bedeckte Bereich des Sublitorals hat von 272 km² auf 358 km² stark zugenommen. War 1936 der Anteil des Sublitorals nur bei 45 % und der des Eulitorals bei 54 %, so kehrte sich dieses Verhältnis bis 1990 um. Das Verhältnis des Prielvolumens zum Tideprisma, also demjenigen Wasservolumen, das permanent im Priel verbleibt, zu dem, das mit jeder Tide ein- und ausströmt, hat sich leicht zum Tideprisma mit 52 % verschoben. Insgesamt hat das Fassungsvolumen des Tidebeckens aufgrund des gestiegenen Tidenhubs zugenommen. Das Becken kann 1990 in Bezug auf NN 100 Mio. m³ Wasser mehr aufnehmen als 1936, wobei es unter *MThw* sogar 300 Mio. m³ Wasser sind.

	1936	1966	1974	1990	<i>r</i>
3%	-1485	-1533	-1554	-1635	-0.94
5%	-1259	-1365	-1361	-1437	-0.98
10%	-1000	-1008	-1029	-1140	-0.79

Tab. 6.21: Perzentile der Tiefenwerte [in cm] in den Prieln des Tidebeckens Norderhever-Heverstrom Loch im Laufe der Zeit.

Das Gesamtbecken des Norderhever-Heverstroms weist eine kontinuierliche Vertiefung in den Prieln zwischen 1936 und 1990 auf, da alle betrachteten Perzentile ihre Werte zu größeren Tiefen hin verändern (Tab. 6.21). Diese Aussage steht im Einklang mit der Entwicklung der Tidewasserstände des *MThw* und *MTnw*. Der Tidenhub hat zugenommen, so dass man auch von höheren Tideströmungsgeschwindigkeiten ausgehen kann. Diese haben in den Prieln eine Ausräumung bzw. Vertiefung bewirkt.

	1936	1966	1974	1990	<i>r</i>
90%	59.66	64.10	63.65	66.72	0.97
95%	69.45	71.59	71.67	73.84	0.97
97%	72.91	74.86	74.97	76.53	0.98

Tab. 6.22: Perzentile der Hangneigung [in Grad] in den Prieln des Tidebeckens Norderhever-Heverstrom im Laufe der Zeit.

Mit der kontinuierlichen Vertiefung der Priele geht auch eine ebenso kontinuierliche Zunahme der Hangneigung in den Prieln einher, weil eine Vertiefung auch eine Zunahme in den Werten für die Hangneigung bedeutet, solange der Querschnitt des Priels sich nicht gleichzei-

tig verbreitert (Tab. 6.22).

Die im Frühjahr 1987 erfolgte Deichschließung des Beltringharder Kooges in der Nordstrander Bucht kommt in den Werten für die Priele des gesamten Tidebeckens des Norderhever-Heverstroms nicht zum Ausdruck. Die Vordeichung, die in der Regel eine Verringerung der Gesamtfläche und des Wasservolumens zur Folge hat, schlägt nicht – wie man es vermuten könnte – in Form einer Verringerung der Tiefe in den Prielen durch und dies, obwohl es – zumindest für den Norderheverstrom – explizit ein Ziel der Vordeichung war, der gerade in diesem Priel starken Vertiefung und damit einer instabilen Situation in diesen Wattbereichen entgegen zu wirken (MINISTER FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN 1981). Allerdings ist die Datendichte nicht so hoch wie für die Piep, so dass vielleicht bei einer engeren Vermessungszeitreihe – insbesondere mit einer zusätzlichen Vermessung kurz vor der Eindeichung – ein Trend heraus zu lesen wäre. Zumindest sollte bei der Detailstudie der von der Eindeichung direkt betroffenen Teilbecken eine klarere morphologische Auswirkungen zu erkennen sein.

	1936	1966	1974	1990	<i>r</i>
90%	74	94	91	41	-0.39
95%	104	142	124	57	-0.38
97%	114	160	140	71	0.31

Tab. 6.23: Perzentile der Höhenwerte [in cm] auf den hohen Wattbereichen des Tidebeckens Norderhever-Heverstrom im Laufe der Zeit.

Die Entwicklung der Höhenwerte auf den hohen Wattbereichen des Tidebeckens des Norderhever-Heverstroms weist zwischen 1936 und 1990 keinen eindeutigen Trend auf (Tab. 6.23). In den 30 Jahren zwischen 1936 und 1966 haben sich die hohen Wattbereiche um bis zu 40 cm stark erhöht. In den darauf folgenden acht Jahren bis zur nächsten zur Verfügung stehenden Vermessung von 1974 zeigt sich in den flacheren Wattbereichen trotz weiter steigendem *MThw* eine Phase der Konsolidierung. Bei den höher gelegenen Wattbereichen (95 % und 97 %) ist sogar eine flächenmäßige Abnahme der Watthöhen zu verzeichnen. Einen weiteren deutlichen Rückgang kann man in den anschließenden 16 Jahren bis zur letzten zur Verfügung stehenden Vermessung von 1990 erkennen. Dabei halbieren sich die Perzentilwerte der Höhenwerte auf den hohen Wattbereichen bei allen berücksichtigten Perzentilen. In diesem Zeitraum fällt die Vordeichung des Beltringharder Kooges, bei der gerade Teile dieser hochgelegenen Watten dem Tidebecken durch die Eindeichung entzogen worden sind. Zukünftige Vermessungen müssen zeigen, ob sich die hohen Watten nach der Eindeichung wieder erholen können und aufwachsen, wie es bei der Vordeichung des Speicherbeckens in Dithmarschen der Fall war. Allerdings kann man davon ausgehen, dass die Sedimentverfügbarkeit in Dithmarschen besser ist als in Nordfriesland (vgl. GRIPP 1964, EHLERS 1988, STREIF 1990).

6.2.1 Seegattbereich des Norderhever-Heverstrom

Das erste Teilbecken des Norderhever-Heverstrom, das nun näher betrachtet werden soll, nimmt im Wesentlichen den Seegattbereich ein, wo sich der Norderheverstrom und der Heverstrom vereinen (Abb. 6.6). Somit ist dieses Teilbecken charakterisiert durch seinen sehr großen Anteil an tiefen Prielbereichen (70 %) und nur sehr geringen Anteile an Wattflächen (30 %) (Tab. 6.24). Die Wattflächen finden sich v.a. an der Festlandsküste zur Halbinsel Eiderstedt, als Watthöhenscheide zum Tidebecken des Rummellochs um die Hallig Süderoog, und dem Heversteert vor der Hallig Südfall.

	1936	1966	1974	1990
Tidekennwerte [m zu NN]				
MThw	1.19	1.42	1.30	1.55
MTmw	-0.05	0.13	0.08	0.20
MTnw	-1.75	-1.64	-1.67	-1.76
MThb	2.94	3.06	2.97	3.31
Flächen [km²]				
Gesamtfläche	197.8	206.2	242.8	276.0
inkl. Supralitoral	101%	102%	106%	101%
Fläche unter MTnw:	133.7	142.8	155.9	190.7
Sublitoral	68%	70%	67%	70%
Wattflächen:	62.6	60.9	78.5	83.4
Eulitoral	32%	30%	33%	30%
Mittl. Sedimenthöhen [m]				
Charakteristische Watthöhe	1.57	1.59	1.64	1.58
Tiefen [m]				
Tiefe zu NN bei MThw	-4.89	-4.99	-4.69	-4.91
Tiefe zu NN bei MTnw	-8.65	-8.71	-8.89	-9.17
Maximale Tiefe	-26.63	-26.13	-26.04	-27.68
Volumina [Mio. m³]				
Fassungsvolumen bei MThw	790.8	824.4	903.8	995.4
	100%	100%	100%	100%
Fassungsvolumen bei NN	649.9	658.3	729.4	773.1
	82%	80%	81%	78%
Prielvolumen: PV	499.1	518.6	572.9	600.7
	63%	63%	63%	60%
Tideprisma: P	291.6	305.8	330.9	394.7
	37%	37%	37%	40%

Tab. 6.24: Flächen-, Tiefen- und Volumenverteilung im Teilbecken des Seegattbereichs des Norderhever-Heverstrom zwischen 1936 bis 1990.

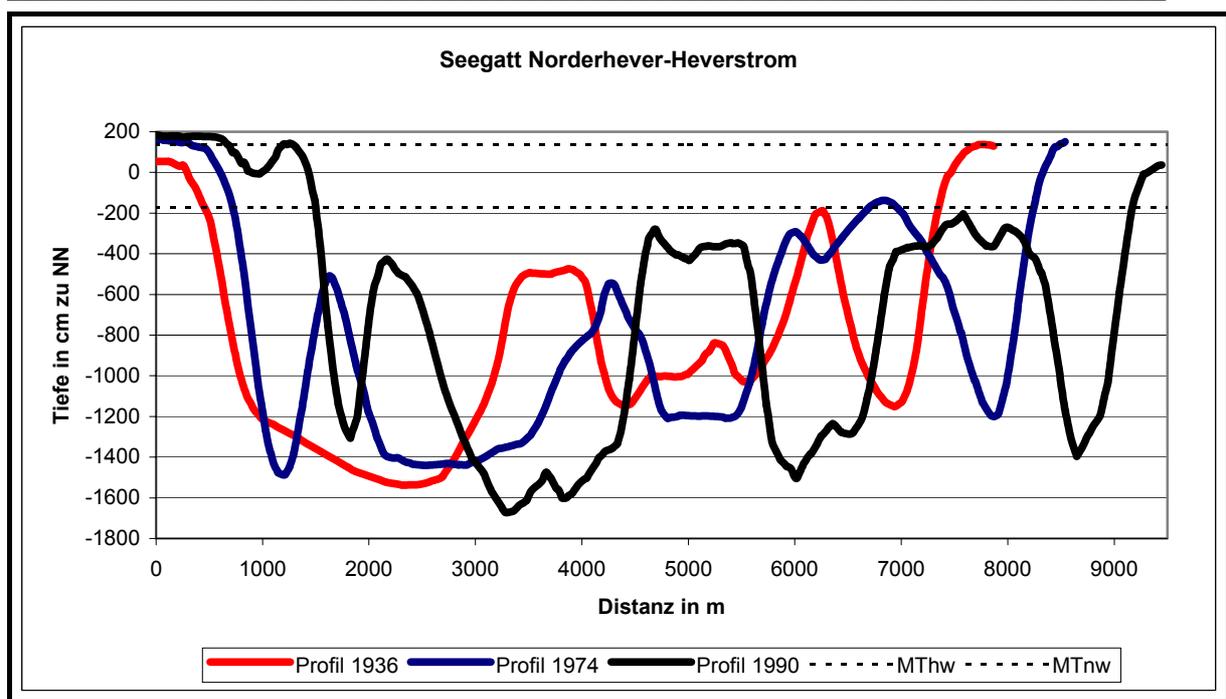


Abb. 6.7: Seegattprofile des Norderhever-Heverstrom.

Das Seegatt des Norderhever-Heverstrom ist fast 10 km breit und erreicht mit 67 900 m² die größte Querschnittsfläche eines Seegatts in Schleswig-Holstein (Tab. 6.25). Lediglich 20 % der Querschnittsfläche befindet sich im Intertidal. Das Seegatt besteht nicht nur aus einer einzigen dominierenden Rinne, sondern weist je nach Vermessungszeitpunkt drei bis vier Rinnen auf. Untersuchungen von z.B. HIGELKE (1978) haben ergeben, dass es sich bei den Sedimentkörpern zwischen den Rinnen um große tidale Barren handelt, die ihre Position kontinuierlich ändern. Sie verlagern sich mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 20 m pro Jahr südwärts und folgen somit der Richtung des küstenparallelen Sedimenttransports (vgl. auch EHLERS 1988).

	1936	1974	1990
MThw	1.19	1.30	1.55
MTnw	-1.75	-1.67	-1.76
Mittl. Tiefe bei MThw [m]	-8.82	-8.63	-8.77
Mittl. Tiefe bei MTnw [m]	-6.15	-5.99	-5.87
Seegattquerschnitt [m²]			
Querschnittsfläche < MThw	65315	66631	67908
Querschnittsfläche < MTnw	55251	54915	54142
Querschnittsfläche im Intertidal	10064	11716	13766

Tab. 6.25: Flächen- und Tiefenverteilung der Seegatts des Norderhever-Heverstrom.

	1936	1966	1974	1990	r
3%	-1594	-1721	-1678	-1789	-0.92
5%	-1496	-1537	-1558	-1630	-0.94
10%	-1230	-1366	-1305	-1393	-0.88

Tab. 6.26: Perzentile der Tiefenwerte [in cm] in den Prielen des Teilbeckens am Seegatt des Norderhever-Heverstrom im Laufe der Zeit.

Die Tiefenwerte in den Prieln des Teilbeckens am Seegatt des Norderhever-Heverstroms zeigen – ebenso wie das Gesamtbecken – einen eindeutigen Trend zu einer Vertiefung der Priele (Tab. 6.26). In diesem Teilbecken treten sehr große Tiefenwerte mit -17.89 m auf, die nur noch von dem Teilbecken, das den Seegattbereich der Norderhever darstellt, mit -18.53 m übertroffen wird.

	1936	1966	1974	1990	<i>r</i>
90%	66.52	68.30	67.98	70.45	0.92
95%	72.00	72.94	73.25	75.13	0.92
97%	74.34	75.37	75.58	76.91	0.96

Tab. 6.27: Perzentile der Hangneigung [in Grad] in den Prieln des Teilbeckens am Seegatt des Norderhever-Heverstrom im Laufe der Zeit.

Bei den Perzentilwerten der tiefen Prielbereiche lässt sich eine langsame, kontinuierliche Abnahme der Werte für die Hangneigung feststellen (Tab. 6.27). Diese lässt nicht vermuten, dass zwischen den beiden letzten Vermessungen 1987 eine Vordeichung in einem anderen Teilbecken erfolgt ist, die sich auch auf den Bereich des Seegatts auswirken müsste. Dies ist wohl damit zu erklären, dass – gemessen an der Größe des gesamten Tidebeckens – der eingedeichte Bereich sehr klein ist und sich morphologisch nicht bedeutend auf dieses Teilbecken auswirkt.

	1936	1966	1974	1990	<i>r</i>
90%	53	72	101	50	0.16
95%	86	107	131	85	0.16
97%	101	125	150	122	0.63

Tab. 6.28: Perzentile der Höhenwerte [in cm] auf den hohen Wattbereichen des Teilbeckens am Seegatt des Norderhever-Heverstrom im Laufe der Zeit.

Die Höhenwerte auf den hohen Wattbereichen wachsen kontinuierlich bis 1974. Zwischen 1974 und 1990 halbiert sich die Höhe auf den Wattflächen teilweise und erreicht annähernd den Ausgangswert von 1936 (Tab. 6.28).

6.2.2 Seegattbereich des Norderheverstroms

Zunächst soll an dieser Stelle das Teilbecken des Seegattbereiches des Norderheverstroms vorgestellt werden, weil es einen besseren direkten Vergleich zum Seegattbecken des Norderhever-Heverstroms (s. o.) ermöglicht. Das Teilbecken wird von den Inseln Pellworm und Nordstrand sowie den Halligen Südfall und Nordstrandischmoor eingerahmt (Abb. 6.6).

	1936	1947	1966	1974	1990
Tidekennwerte [m zu NN]					
MThw	1.24	1.55	1.42	1.38	1.55
MTmw	0.12	0.30	0.27	0.27	0.28
MTnw	-1.88	-1.78	-1.64	-1.70	-1.76
MThb	3.12	3.33	3.06	3.08	3.31
Flächen [km²]					
Gesamtfläche	87.3	101.8	99.2	106.7	105.8
inkl. Supralitoral	100%	100%	100%	100%	100%
Fläche unter MTnw:	44.8	58.3	56.6	63.7	64.4
Sublitoral	51%	57%	57%	60%	61%
Wattflächen:	42.5	43.6	42.4	43.0	41.4
Eulitoral	49%	43%	43%	40%	39%
Mittl. Sedimenthöhen [m]					
Charakteristische Watthöhe	1.55	1.48	1.40	1.61	1.43
Tiefen [m]					
Tiefe zu NN bei MThw	-3.58	-3.73	-3.63	-3.55	-3.82
Tiefe zu NN bei MTnw	-9.63	-9.21	-9.20	-8.81	-8.65
Maximale Tiefe	-24.98	-26.39	-24.79	-24.25	-24.06
Volumina [Mio. m³]					
Fassungsvolumen bei MThw	296.5	350.4	325.2	313.7	355.6
	100%	100%	100%	100%	100%
Fassungsvolumen bei NN	225.2	253.3	240.5	234.0	257.8
	76%	72%	74%	75%	73%
Prielvolumen: PV	166.5	189.7	184.1	179.4	191.2
	56%	54%	57%	57%	54%
Tideprisma: P	130.0	160.7	141.1	134.3	164.4
	44%	46%	43%	43%	46%

Tab. 6.29: Flächen-, Tiefen- und Volumenverteilung im Teilbecken des Seegattbereiches des Norderheverstrom zwischen 1936 bis 1990.

Das Becken hat als ein „Seegattbecken“ gegenüber dem Seegattbecken des Norderhever-Heverstroms relativ viele Wattflächen im Verhältnis zur Gesamtfläche (Norderheverstrom mit 39 % bis 49 % zu 30 % bis 33 % im Norderhever-Heverstrom, vgl. Tab. 6.29). Dabei entwickelt es sich allerdings von einem ehemals fast ausgeglichen Becken – in Bezug auf das Verhältnis der Anteile der Subtidal- und Eulitoralflächen im Jahr 1936 – zu einem Becken, bei dem der Anteil der Wattflächen zugunsten der subtidalen Flächen abnimmt. Zudem nimmt auch in diesem Becken das Fassungsvolumen aufgrund des steigenden Tidenhubs zu.

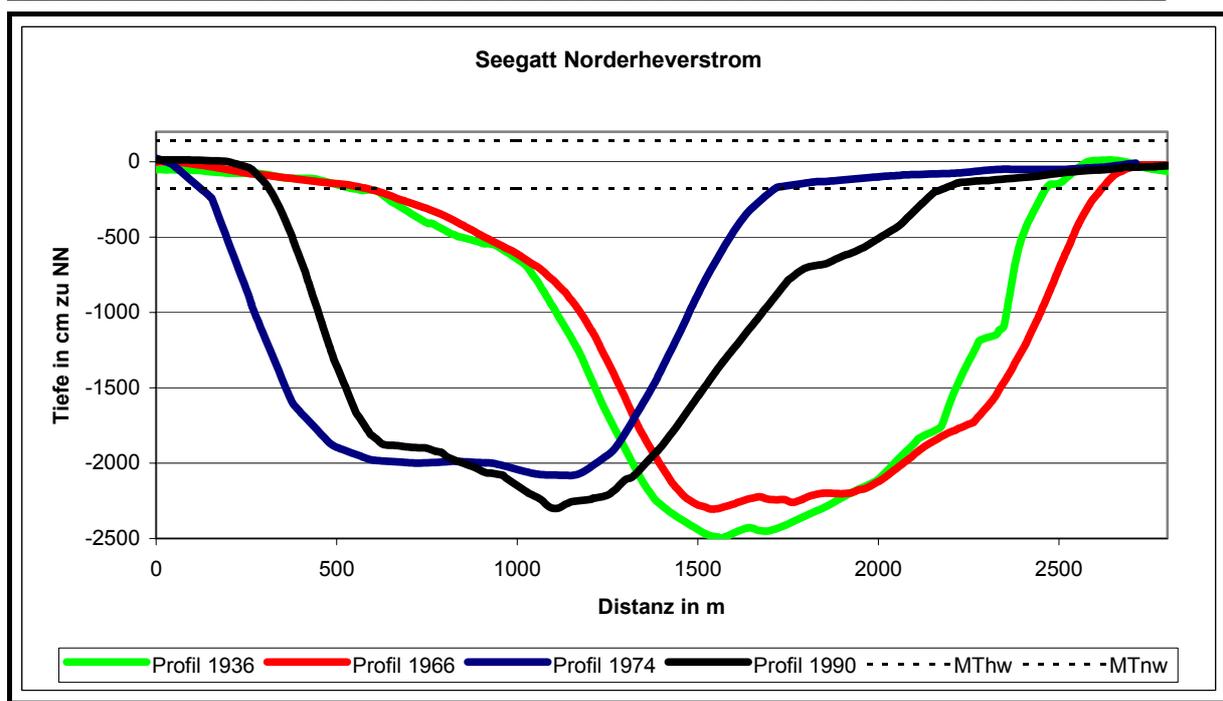


Abb. 6.8: Seegattprofile des Norderheverstroms.

Das Profil des Seegatts des Norderheverstroms ist im Vergleich zu dem des Norderhever-Heverstroms durch eine einzige, dominante Rinne geprägt. Die Norderhever ist im Seegattbereich mit einer maximalen Tiefe von -25 m um bis zu 8 m tiefer als der Norderhever-Heverstrom. Allerdings nimmt die maximale Tiefe im Seegatt von 1936 bis 1990 ab, wohingegen die mittleren Tiefen bei *MThw* und *MTnw* im Jahr 1990 am größten sind. Besonders die Querschnittsfläche im Intertidal hat stark von 2 939 m² auf 5 239 m² zugenommen (Tab. 6.30). Dies ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass sich das Seegatt zwischen 1936 und 1990 ständig verbreitert hat. 1936 wies das Seegatt insgesamt eine Breite von 8 km auf, im Jahr 1974 waren es bereits 8.6 km und schließlich im Jahr 1990 9.5 km.

	1936	1966	1974	1990
MThw	1.24	1.42	1.38	1.55
MTnw	-1.88	-1.64	-1.70	-1.76
Mittl. Tiefe bei MThw [m]	-11.25	-9.95	-10.96	-12.22
Mittl. Tiefe bei MTnw [m]	-8.52	-7.15	-8.25	-9.26
Seegattquerschnitt [m²]				
Querschnittsfläche < MThw	27305	29177	25538	28353
Querschnittsfläche < MTnw	24366	24923	21358	23114
Querschnittsfläche im Intertidal	2939	4254	4180	5239

Tab. 6.30: Flächen- und Tiefenverteilung der Seegatts des Norderheverstroms.

	1936	1947	1966	1974	1990	r
3%	-1676	-1858	-1882	-1829	-1853	-0.63
5%	-1580	-1676	-1715	-1631	-1672	-0.46
10%	-1411	-1334	-1342	-1343	-1330	0.70

Tab. 6.31: Perzentile der Tiefenwerte [in cm] in den Prielen des Teilbeckens am Seegatt des Norderheverstroms im Laufe der Zeit.

Die in den Perzentilen aufgetragenen Tiefenwerte erreichen in dem Teilbecken mit -18.53 m sogar noch größere Tiefen als in dem Teilbecken für das Seegatt, wo sich beide Prielsysteme der Norderhever und des Heverstroms vereinigen (Tab. 6.31). Dies wird unterstützt durch die Aussage von WINSKOWSY (1998, S. 48), dass in diesem Teilbecken die Strömungsgeschwindigkeiten mit 1 m/s bis 1.2 m/s beträchtlich sind, und auch im Seegattbereich des Gesamtbeckens mit maximal 1.2 m/s bis 1.4 m/s sehr hoch sind. Der Norderheverstrom ist in diesem Bereich eine ausgesprochene Flutrinne, die einen enormen Reststrom mit bis zu 6 km/Tide in das nördlich anschließende Tidebecken der Süderaue transportiert (WINSKOWSKY 1998). Insgesamt ist der Trend zu einer Vertiefung der tiefen Prielbereiche in diesem Teilbecken jedoch nicht so klar wie in den anderen Teilbecken des Norderhever-Heverstroms (10%-Perzentil sogar mit Abnahme der Tiefenwerte im Laufe der Zeit).

	1936	1947	1966	1974	1990	<i>r</i>
90%	65.26	68.59	68.99	68.79	69.40	0.79
95%	71.83	74.04	74.40	74.34	75.60	0.90
97%	75.71	76.32	76.88	76.93	78.06	0.97

Tab. 6.32: Perzentile der Hangneigung [in Grad] in den Prieln des Teilbeckens am Seegatt des Norderheverstroms im Laufe der Zeit.

Bei den in Tab. 6.32 aufgeführten Werten ist dagegen ein Trend zu einer Zunahme der Hangneigung in den Perzentilwerten festzustellen, wobei in den 27 Jahren zwischen 1947 und 1974 eine ruhige Phase mit praktisch keinen Änderungen zu verzeichnen ist.

	1936	1947	1966	1974	1990	<i>r</i>
90%	45	40	49	51	33	-0.25
95%	58	66	74	75	58	0.17
97%	64	76	87	86	69	0.31

Tab. 6.33: Perzentile der Höhenwerte [in cm] auf den hohen Wattbereichen des Teilbeckens am Seegatt des Norderheverstrom im Laufe der Zeit.

Die Wattflächen dieses Teilbeckens befinden sich in einem Höhenintervall zwischen NN + 1.55 m und NN - 1.88 m, die den Schwankungsbereich zwischen *MThw* und *MTnw* zwischen 1936 und 1990 widerspiegeln (vgl. Tab. 6.29). Die Perzentilwerte in Tabelle 6.33 zeigen demnach die Höhenwerte in den mittleren Wattbereichen. Sie nehmen bis 1974 langsam, aber kontinuierlich zu, um dann – wie bei allen anderen Teilbecken – zwischen 1974 und 1990 stark abzunehmen.

6.2.3 Westlicher Heverstrom

Das nächste Teilbecken umfasst den westlichen Bereich des Heverstroms, der das Wattgebiet zwischen Nordstrand und Eiderstedt be- und entwässert (Abb. 6.6). Es kann als „Seegattbecken“ für den Heverstrom angesehen werden und zeichnet sich deswegen durch relativ tiefe

Priel- und flächenmäßig geringe Wattbereiche aus (Tab. 6.34). Dieses Teilbecken ist während des zur Verfügung stehenden Vermessungszeitraums nicht durch eine Vordeichung oder andere größere flächenhafte Küstenschutzmaßnahmen betroffen worden, so dass man von einer natürlichen Entwicklung des Teilbeckens ausgehen kann.

	1936	1966	1974	1990
Tidekennwerte [m zu NN]				
MThw	1.21	1.42	1.44	1.55
MTmw	0.32	0.44	0.44	0.46
MTnw	-1.77	-1.64	-1.71	-1.76
MThb	2.98	3.06	3.15	3.31
Flächen [km²]				
Gesamtfläche	86.6	90.2	71.1	67.4
inkl. Supralitoral	100%	103%	100%	100%
Fläche unter MTnw:	34.8	38.9	32.6	32.5
Sublitoral	40%	44%	46%	48%
Wattflächen:	51.6	49.4	38.6	34.9
Eulitoral	60%	56%	54%	52%
Mittl. Sedimenthöhen [m]				
Charakteristische Watthöhe	1.68	1.53	1.59	1.48
Tiefen [m]				
Tiefe zu NN bei MThw	-1.75	-2.01	-2.02	-2.30
Tiefe zu NN bei MTnw	-8.94	-9.20	-9.16	-9.40
Maximale Tiefe	-24.48	-27.89	-29.01	-29.61
Volumina [Mio. m³]				
Fassungsvolumen bei MThw	178.6	202.4	150.3	160.6
	100%	100%	100%	100%
Fassungsvolumen bei NN	116.8	129.0	95.0	99.6
	65%	64%	63%	62%
Prielvolumen: PV	81.1	93.3	68.1	70.4
	45%	46%	45%	44%
Tideprisma: P	97.5	109.2	82.2	90.1
	55%	54%	55%	56%

Tab. 6.34: Flächen-, Tiefen- und Volumenverteilung im Teilbecken des westlichen Heverstroms zwischen 1936 bis 1990.

Das Seegattbecken des Heverstroms hat im Laufe der Zeit 10 % seiner Wattflächen verloren und zeigt 1990 ausgeglichene Flächenanteile zwischen dem Eu- und dem Sublitoral. Die Situation in den Seegattbecken des Heverstroms und der Norderhever verschlechtern sich also in Bezug auf die Wattanteile. Die Wattflächen können mit dem Anstieg des mittleren Tidehochwassers (*MThw*) nicht mithalten.

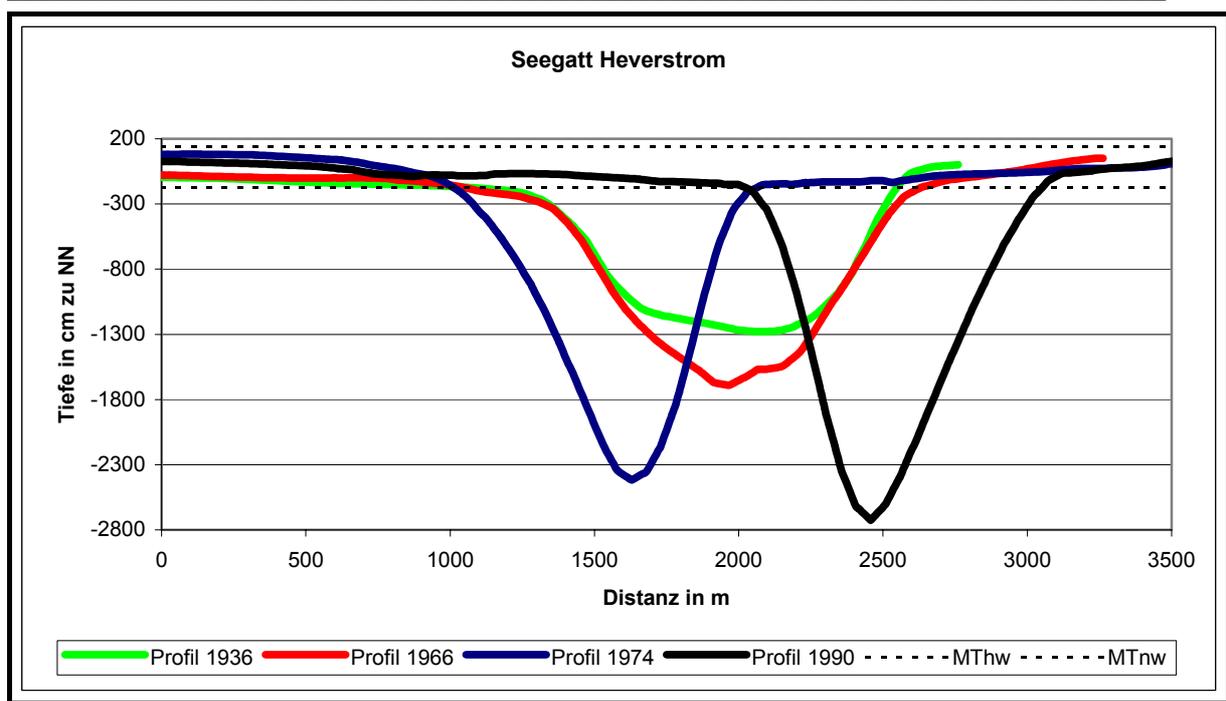


Abb. 6.9: Seegattprofile des Heverstroms.

Das Seegatt des Heverstroms zeigte in den 54 Jahren zwischen 1936 und 1990 eine erstaunliche Entwicklung. Von einem ehemals breiten und flachen Seegattprofil mit einer maximalen Tiefe von lediglich -13 m bildete es sich kontinuierlich im Laufe der Zeit zu dem tiefsten Seegattprofil Schleswig-Holsteins mit einer maximalen Tiefe von -28 m aus. 75 % der Querschnittsfläche des Seegatts liegt im Sublitoral und nur 25 % im Eulitoral, wobei dieses Verhältnis im Laufe der Zeit annähernd konstant geblieben ist (Tab. 6.35). Der Tidenhub hat im Teilbecken des Heverstroms von 2.98 m im Jahr 1936 auf 3.31 m im Jahr 1990 stark zugenommen, so dass zu vermuten ist, dass die Tideströmungsgeschwindigkeit ebenfalls zugenommen hat und somit die starke Erosion im Seegatt zu erklären ist.

	1936	1966	1974	1990
MThw	1.21	1.42	1.44	1.55
MTnw	-1.77	-1.64	-1.71	-1.76
Mittl. Tiefe bei MThw [m]	-7.15	-7.73	-6.39	-7.55
Mittl. Tiefe bei MTnw [m]	-4.49	-5.02	-4.13	-4.97
Seegattquerschnitt [m²]				
Querschnittsfläche < MThw	11337	15983	16423	16858
Querschnittsfläche < MTnw	9576	12048	11227	12557
Querschnittsfläche im Intertidal	1761	3935	5196	4301

Tab. 6.35: Flächen- und Tiefenverteilung der Seegatts des Heverstroms.

	1936	1966	1974	1990	r
3%	-1474	-1650	-1592	-1737	-0.93
5%	-1210	-1376	-1359	-1405	-0.94
10%	-802	-871	-921	-917	-0.94

Tab. 6.36: Perzentile der Tiefenwerte [in cm] in den Prielen des Teilbeckens westlicher Heverstrom im Laufe der Zeit.

Auch die Perzentilwerte belegen den Trend einer Vertiefung der Priele (Tab. 6.36). Die Regressionskoeffizienten sind in diesem Fall sehr hoch.

	1936	1966	1974	1990	<i>r</i>
90%	65.26	68.54	82.90	71.65	0.98
95%	75.08	76.44	76.51	77.57	0.98
97%	77.57	78.10	78.86	79.89	0.93

Tab. 6.37: Perzentile der Hangneigung [in Grad] in den Priele des Teilbeckens westlicher Heverstrom im Laufe der Zeit.

Der Anteil der Beckenfläche mit einer hohen Hangneigung zeigt den Trend einer leichten Zunahme, wobei die flächenmäßige Versteilung insbesondere in den tiefsten Bereichen der Priele sehr kontinuierlich ablief.

	1936	1966	1974	1990	<i>r</i>
90%	67	75	69	40	-0.58
95%	92	103	83	58	-0.67
97%	105	145	103	66	-0.43

Tab. 6.38: Perzentile der Höhenwerte [in cm] auf den hohen Wattbereichen des Teilbeckens westlicher Heverstrom im Laufe der Zeit.

Die hohen Wattflächen verhalten sich sehr ähnlich zu denen im Teilbecken des Seegatts des Norderhever-Heverstroms (Tab. 6.38).

6.2.4 Östlicher Heverstrom

Das vierte Teilbecken umfasst den östlichen Bereich des Heverstroms (Abb. 6.6). Dieses Teilbecken ist bis auf den westlichen Bereich vollständig von (Fest-)Land umgeben. Der Tidenhub ist hier aufgrund des Buchteneffekts mit bis zu 3.53 m um ca. 20 cm höher als im Seegattbereich des Norderhever-Heverstroms (Tab. 6.39).

	1936	1966	1974	1990
Tidekennwerte [m zu NN]				
MThw	1.15	1.42	1.50	1.77
MTmw	0.25	0.45	0.52	0.57
MTnw	-1.79	-1.64	-1.80	-1.76
MThb	2.94	3.06	3.30	3.53
Flächen [km²]				
Gesamtfläche	74.1	77.5	85.5	80.6
inkl. Supralitoral	104%	113%	100%	100%
Fläche unter MTnw:	20.8	25.1	30.4	28.8
Sublitoral	29%	35%	36%	36%
Wattflächen:	50.8	46.0	55.1	51.9
Eulitoral	71%	65%	64%	64%
Mittl. Sedimenthöhen [m]				
Charakteristische Wathöhe	1.77	1.68	1.82	1.40

Tiefen [m]				
Tiefe zu NN bei MThw	-0.87	-1.00	-0.92	-1.35
Tiefe zu NN bei MTnw	-5.23	-5.50	-5.63	-5.31
Maximale Tiefe	-15.89	-18.05	-24.07	-22.88
Volumina [Mio. m³]				
Fassungsvolumen bei MThw	117.1 100%	129.4 100%	144.2 100%	192.6 100%
Fassungsvolumen bei NN	66.0 56%	68.6 53%	71.1 49%	86.9 45%
Prielvolumen: PV	32.6 28%	38.9 30%	38.0 26%	43.9 23%
Tideprisma: P	84.6 72%	90.4 70%	106.2 74%	148.7 77%

Tab. 6.39: Flächen-, Tiefen- und Volumenverteilung im Teilbecken des östlichen Heverstrom zwischen 1936 bis 1990.

Die Wattflächen überwiegen in diesem Becken mit 64 % deutlich gegenüber dem Sublitoral und können ihren Anteil trotz stetig steigendem Tidenhub halten. Die charakteristische Watthöhe ist bis auf die Holmer Fähre besonders 1974 um insgesamt 20 cm höher als in den anderen nordfriesischen (Teil-)Becken.

	1936	1966	1974	1990	<i>r</i>
3%	-795	-885	-874	-908	-0.96
5%	-577	-721	-714	-741	-0.94
10%	-348	-353	-364	-400	-0.84

Tab. 6.40: Perzentile der Tiefenwerte [in cm] in den Prielen des Teilbeckens östlicher Heverstrom im Laufe der Zeit.

Die Perzentilwerte für die Priele erreichen nicht die großen Tiefen wie bei den Teilbecken, die im Seegattbereich liegen (Tab. 6.40). Aber auch hier ist ein eindeutiger Trend einer Zunahme der Flächen mit einer größeren Tiefe gegeben.

	1936	1966	1974	1990	<i>r</i>
90%	51.84	55.82	55.87	55.87	0.90
95%	66.27	70.37	69.66	70.68	0.92
97%	71.03	74.33	73.85	74.73	0.93

Tab. 6.41: Perzentile der Hangneigung [in Grad] in den Prielen des Teilbeckens östlicher Heverstrom im Laufe der Zeit.

Die Perzentile der Hangneigung in den Prielen erfährt in den 30 Jahren zwischen 1936 und 1966 eine Zunahme (Tab. 6.41). Danach kommt es trotz der weiteren, aber in der Intensität abnehmenden Vertiefung in den Prielen zu keiner Zunahme in den Hangneigungen mehr, so dass davon auszugehen ist, dass in dem Maße, wie sich die Priele geringfügig vertieft haben, sie sich auch leicht verbreitert haben müssen. Es gibt somit seit 1966 eine stabile Phase in den Prielen im Hinblick auf die Hangneigung.

	1936	1966	1974	1990	<i>r</i>
90%	103	145	100	24	-0.55
95%	113	166	116	34	-0.50
97%	118	184	126	40	-0.44

Tab. 6.42: Perzentile der Höhenwerte [in cm] auf den hohen Wattbereichen des Teilbeckens östlicher Heverstrom im Laufe der Zeit.

Die Höhenwerte auf den hohen Wattbereichen steigen zwischen 1936 und 1966 um ca. 40 cm bis 60 cm an, fallen dann jedoch in den anschließenden acht Jahren wieder auf das Ausgangsniveau von 1936 zurück (Tab. 6.42). In den folgenden 16 Jahren zwischen 1974 und 1990 reduzieren sich die Wathöhen dramatisch um zwei Drittel bis drei Viertel ihrer ursprünglichen Werte. Diese Aussage deckt sich mit allen bisher untersuchten Teilbecken des Norderhever-Heverstroms, erreicht jedoch in diesem überwiegend von Festlandsdeichen eingefassten Gebiet die größten Höhenabnahmen.

6.2.5 Holmer Fähre

Das Teilbecken der Holmer Fähre ist dasjenige Teilbecken des Norderhever-Heverstroms, welches am stärksten von der Vordeichung im Jahr 1987 betroffen wurde (Abb. 6.6). Es hat dabei mehr als die Hälfte seiner Gesamtfläche eingebüßt (Tab. 6.43). Zwischen 1974 und 1990 wurde durch die Vordeichung die Fläche unterhalb von *MThw* von 52 km² auf 22 km² um mehr als die Hälfte, die Intertidalflächen von 39 km² auf 13 km² um ein Drittel der vorherigen Fläche reduziert. Ein starker Einschnitt ist ebenfalls bei der charakteristischen Wathöhe festzustellen.

	1936	1947	1966	1974	1990
Tidekennwerte [m zu NN]					
MThw	1.15	1.55	1.42	1.50	1.77
MTmw	0.26	0.50	0.42	0.49	0.42
MTnw	-1.79	-1.78	-1.64	-1.90	-1.76
MThb	2.94	3.33	3.06	3.40	3.53
Flächen [km²]					
Gesamtfläche	59.3	60.0	58.2	53.4	22.2
inkl. Supralitoral	104%	104%	108%	103%	100%
Fläche unter MTnw:					
Sublitoral	13.4	14.9	16.1	12.5	8.4
Wattflächen:					
Eulitoral	43.8	43.4	38.5	39.6	13.8
Sublitoral	77%	74%	70%	76%	62%
Mittl. Sedimenthöhen [m]					
Charakteristische Wathöhe	1.59	1.59	1.53	1.85	1.19
Tiefen [m]					
Tiefe zu NN bei MThw	-0.83	-0.83	-0.87	-0.70	-1.48
Tiefe zu NN bei MTnw	-4.08	-4.21	-4.14	-4.43	-3.62
Maximale Tiefe	-10.58	-12.43	-11.12	-11.42	-8.47
Volumina [Mio. m³]					
Fassungsvolumen bei MThw	96.9	113.7	101.6	95.7	58.0
	100%	100%	100%	100%	100%

Fassungsvolumen bei NN	48.3 50%	48.1 42%	47.7 47%	41.6 43%	27.0 47%
Prielvolumen: PV	18.1 19%	18.5 16%	21.0 21%	16.3 17%	9.9 17%
Tideprisma: P	78.9 81%	95.2 84%	80.6 79%	79.4 83%	48.2 83%

Tab. 6.43: Flächen-, Tiefen- und Volumenverteilung im Teilbecken der Holmer Föhre zwischen 1936 bis 1990.

Vor der Eindeichung waren 76% der Fläche des Beckens Wattflächen. Nach der Eindeichung haben der Anteil der Wattflächen ab- und der Anteil der Subtidalflächen zugenommen. Diese Entwicklung zeigt sich jedoch erst drei Jahre nach der Küstenschutzmaßnahme und muss noch nicht die Reaktion der Morphologie auf die neue Situation sein. Sowohl das Prielvolumen als auch das Tideprisma bleiben trotz Vordeichung im Verhältnis zum gesamten Fassungsvermögen sehr konstant.

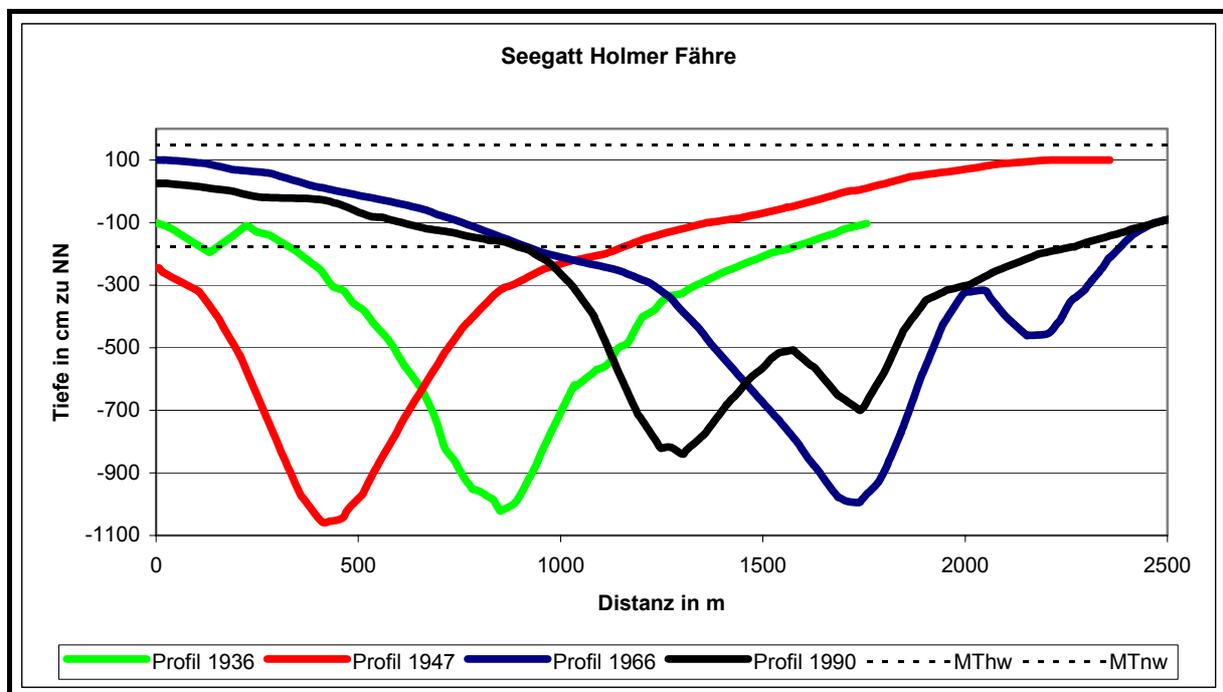


Abb. 6.10: Seegattprofile der Holmer Föhre.

Bei den Seegattprofilen der Holmer Föhre kann man feststellen, dass sich zwischen dem Profil von 1947 und dem von 1966 eine neue, kleine Nebenrinne im Tiefenbereich von -5 m gebildet hat. Diese vertieft sich zudem bis 1990 auf -7 m. Außerdem nimmt die maximale Tiefe, die bis 1974 annähernd konstant bei -10 m lag, auf -8 m im Jahr 1990 ab. Das ist damit zu erklären, dass sich durch die Vordeichung im Jahr 1987 in diesem Teilbecken das Wasservolumen auf ca. 60% seines ursprünglichen Volumens verringert hat, so dass der Querschnitt nach der Eindeichung für das ihn durchströmende Wasser zu groß war und teilweise sedimentiert ist (Tab. 6.44).

	1936	1947	1966	1990
MThw	1.15	1.55	1.42	1.77
MTnw	-1.79	-1.78	-1.64	-1.76
Mittl. Tiefe bei MThw [m]	-5.28	-8.14	-4.77	-4.64
Mittl. Tiefe bei MTnw [m]	-2.44	-5.03	-2.19	-1.75
Seegattquerschnitt [m²]				
Querschnittsfläche < MThw	6998	8785	7136	9297
Querschnittsfläche < MTnw	4165	4547	4792	4121
Querschnittsfläche im Intertidal	2833	4238	2344	5176

Tab. 6.44: Flächen- und Tiefenverteilung der Seegatts der Holmer Fähr.

	1936	1947	1966	1974	1990	<i>r</i>
3%	-545	-602	-638	-600	-608	-0.61
5%	-499	-500	-548	-535	-546	-0.88
10%	-299	-286	-309	-297	-425	-0.74

Tab. 6.45: Perzentile der Tiefenwerte [in cm] in den Prielen des Teilbeckens Holmer Fähr im Laufe der Zeit.

Die Tiefen haben im Priel Holmer Fähr zwischen 1936 bis 1966 stetig zugenommen (Tab. 6.45). In den folgenden 8 Jahren bis 1974 nahmen die Tiefen wieder ab, um nach der Eindeichung von 1987 insbesondere im 10 %-Perzentil stark zuzunehmen. Auch in diesem Teilbecken ist ein eindeutiger Trend zur Vertiefung des Priels nachzuweisen, der auch nicht durch die Vordeichung im Jahr 1987 umgekehrt wird. Das ist insofern überraschend, als dass zum Vergleich bei den von der Vordeichung betroffenen Teilbecken der Piep auf längere Sicht nach der jeweiligen Vordeichung eine eindeutige Abnahme der Prieltiefen nachgewiesen werden konnte. Einerseits werden zwar unmittelbar bei einer Vordeichung die „flacheren“ Prielbereiche dem Teilbecken entzogen, was zu einer Zunahme der Prieltiefen im direkten Anschluss führt. Andererseits kann in das verkleinerte Becken weniger Wasser mit jeder Tide ein- und ausströmen, so dass der Querschnitt des Priels für die neue Situation zu groß ist und es längerfristig zu einer Sedimentation im Priel kommt und somit die Prieltiefen abnehmen. Beide Trends konnten aufgrund der sehr guten zeitlichen Auflösung der Vermessungsreihe (alle drei Jahre) in den Teilbecken der Piep gut identifiziert werden.

In dem Teilbecken der Holmer Fähr gibt es unmittelbar vor der Eindeichung keine zeitnahe Vermessung. Die letzte Vermessung vor der Eindeichung fand 1974, also 13 Jahre früher statt. Nach der Vordeichung im Jahr 1987 liegt relativ zeitnah die Vermessung von 1990 vor, die einen Abstand von lediglich 3 Jahren zur Baumaßnahme aufweist. Es sind bei der Vermessung von 1990 jedoch keine Sedimentationstendenzen im Priel zu erkennen. Das kann einerseits bedeuten, dass es zu keiner Sedimentation in den Prielen gekommen ist, was nicht sehr wahrscheinlich ist, da gerade dieses Teilbecken mehr als die Hälfte seiner Fläche durch die Vordeichung verloren hat und damit das ein- und ausströmende Wasservolumen um fast die Hälfte stark verringert wurde. Wahrscheinlicher ist, dass als morphologische Reaktion die Sedimentation im Priel bereits vor 1990 abgeschlossen war. Bei der Betrachtung der einzelnen Perzentile fällt auf, dass in den 3 %- und 5 %-Perzentilen, welche die tiefen Prielbereiche repräsentieren, zwischen 1974 und 1990 die Tiefenwerte in 16 Jahren lediglich um 8 cm bzw.

11 cm zugenommen haben, bei dem 10 %-Perzentil jedoch um 128 cm. Wie bereits erwähnt, werden bei der Eindeichung die „flacheren“ Prielbereiche abgedämmt, so dass die mittlere Prieltiefe kurzzeitig stark zunimmt, da nur die tieferen Prielbereiche dem Tidebecken erhalten bleiben. Kommt es dann im Anschluss zu einer Sedimentation im Priel aufgrund des zu großen Prielquerschnitts, so findet insbesondere in den tiefen Prielbereichen Sedimentation statt. Drei Jahre nach der Vordeichung erkennt man deshalb bei den Tiefenwerten der 3 %- und 5 %-Perzentile eine geringe Zunahme, da gerade in diesen Bereichen die beiden entgegengesetzten Prozesse sich stark ausgleichen. Hingegen ist in den flacheren Prielbereichen (10 %-Perzentil) eine weit stärkere Reaktion zu erkennen. Auch diese Bereiche werden teilweise durch die Vordeichung abgekappt, jedoch sind sie nicht durch die anschließende Sedimentation in den tiefen Prielbereichen betroffen, so dass insgesamt der Effekt einer stärkeren Vertiefung eintritt.

	1936	1947	1966	1974	1990	<i>r</i>
90%	42.95	49.79	49.54	47.17	53.64	0.76
95%	58.47	62.88	62.49	59.80	60.91	0.17
97%	64.52	67.56	67.79	65.18	64.58	-0.19

Tab. 6.46: Perzentile der Hangneigung [in Grad] in den Prielen des Teilbeckens Holmer Fährre im Laufe der Zeit.

Die Werte für die Hangneigung entwickeln sich parallel zu den Tiefenwerten (Tab. 6.46). Nach der Eindeichung von 1987 haben die Werte insbesondere in dem 90 %-Perzentil, das die oberen Prielbereiche abdeckt, stark zugenommen. In den tieferen Prielbereichen ist jedoch kein eindeutiger Trend nachzuweisen.

6.2.6 Strandley

Das letzte Teilbecken des Norderhever-Heverstroms wird durch die Priele Strandley, Butterloch, Bensley und Rummelloch be- und entwässert, wobei dem Strandley als Verbindungspriel zwischen Norderhever und Süderau eine besondere Bedeutung zukommt (Abb. 6.6). Zwischen Pellworm und dem Festland findet insbesondere über das Strandley ein enormer Wasserübertritt von 81 Mio. m³ Wasser pro Tide in die nördlich angrenzende Süderau statt (WINSKOWSKY 1998). Auch dieses Teilbecken war von der Vordeichung des Beltringhar-der Kooges im südöstlichen Bereich beeinflusst. Allerdings ist der Anteil an eingedeich-ter Fläche zur ehemaligen Gesamtfläche bei weitem nicht so hoch wie bei dem Teilbecken der Holmer Fährre, so dass auch nicht so große Auswirkungen zu erwarten sind.

	1936	1947	1966	1974	1990
Tidekennwerte [m zu NN]					
MThw	1.26	1.55	1.42	1.47	1.77
MTmw	0.22	0.42	0.37	0.48	0.65
MTnw	-1.89	-1.78	-1.64	-1.74	-1.67
MThb	3.15	3.33	3.06	3.21	3.44
Flächen [km²]					
Gesamtfläche	109.0	112.2	110.7	112.1	110.6
inkl. Supralitoral	102%	103%	110%	105%	100%
Fläche unter MTnw:	28.4	34.2	33.5	30.4	34.6
Sublitoral	26%	31%	33%	28%	31%
Wattflächen:	78.8	75.2	68.6	77.5	76.0
Eulitoral	74%	69%	67%	72%	69%
Mittl. Sedimenthöhen [m]					
Charakteristische Watthöhe	1.66	1.58	1.41	1.66	1.47
Tiefen [m]					
Tiefe zu NN bei MThw	-1.04	-1.05	-1.18	-0.82	-0.98
Tiefe zu NN bei MTnw	-4.41	-4.23	-4.43	-4.39	-4.38
Maximale Tiefe	-11.18	-15.03	-14.97	-15.98	-17.95
Volumina [Mio. m³]					
Fassungsvolumen bei MThw	214.5	233.4	217.3	199.3	239.2
	100%	100%	100%	100%	100%
Fassungsvolumen bei NN	114.8	111.0	111.2	89.2	95.4
	54%	48%	51%	45%	40%
Prielvolumen: PV	45.5	46.1	52.9	39.6	44.0
	21%	20%	24%	20%	18%
Tideprisma: P	169.0	187.3	164.4	159.7	195.2
	79%	80%	76%	80%	82%

Tab. 6.47: Flächen-, Tiefen- und Volumenverteilung im Teilbecken des Strandleys zwischen 1936 bis 1990.

Weder die Wattflächen noch die sublitoralen Bereiche zeigen einen klaren Trend in ihrer zeitlichen Entwicklung (Tab. 6.47). Auch die Eindeichung zwischen 1974 und 1990, bei der ein kleiner Bereich dieses Teilbeckens abgedämmt wurde, schlägt sich nicht in den Werten durch. Die zeitliche Auflösung scheint nicht auszureichen, um Veränderungen direkt auf die Küstenschutzmaßnahme der Eindeichung zurückzuführen. Auch die charakteristische Watthöhe, die zwischen 1974 und 1990 um 20 cm abnimmt, lässt sich nicht als eindeutige morphologische Reaktion auf die Vordeichung zurückführen, weil diese Entwicklung bei allen Teilbecken des Norderhever-Heverstroms auftritt. Das Verhältnis zwischen Prielvolumen und Tideprisma ist im Laufe der Zeit fast gleich geblieben. Lediglich ca. 20 % des Wasservolumens verbleibt ständig in den Priel, wohingegen der überwiegende Wasseranteil mit jeder Tide ein- und ausströmt.

	1936	1947	1966	1974	1990	r
3%	-668	-686	-772	-597	-640	0.27
5%	-517	-538	-551	-482	-500	0.44
10%	-358	-331	-350	-307	-339	0.58

Tab. 6.48: Perzentile der Tiefenwerte [in cm] in den Priel des Teilbeckens Strandley im Laufe der Zeit.

In den tiefen Bereichen der Priele sind die für die Norderhever typischen zeitlichen Schwankungen in den Tiefenwerten zu erkennen (Tab. 6.48). Allerdings nimmt die Tiefe in den Prie-

len insgesamt nicht zu, sondern ab. Die Priele werden im Ganzen flacher. Die Priele vertiefen sich bis 1966, um bis 1974 sehr stark zu verlanden und bis 1990 wiederum tiefer zu werden. Indes gilt dies nicht für die Tiefenwerte des 10 %-Perzentils. Dort ist zwar auch eine Tendenz zur Vertiefung gegeben, die jedoch mit einem ständigen Wechsel von Zu- bzw. Abnahme der Tiefenwerte von einer Vermessung zur Nächsten einhergeht, was sich auch in den relativ niedrigen Werten für den Korrelationskoeffizienten niederschlägt.

	1936	1947	1966	1974	1990	<i>r</i>
90%	37.91	46.83	48.05	47.42	52.64	0.88
95%	54.86	61.97	59.70	60.30	64.03	0.74
97%	63.48	67.23	65.92	66.75	69.94	0.81

Tab. 6.49: Perzentile der Hangneigung [in Grad] in den Priele des Teilbeckens Strandley im Laufe der Zeit.

Die Perzentilwerte für die Hangneigung in den Priele und damit der Flächenanteil von steilen Prielebereichen nehmen im Laufe des Untersuchungszeitraums zu (Tab. 6.49). Zuerst erhöhen sie sich drastisch um bis zu 9° zwischen 1936 und 1947, um dann bis 1974 annähernd unverändert zu bleiben. Durch die Eindeichung kommt es dann auch zu einer flächenmäßigen Zunahme der Hangneigung in den Priele.

	1936	1947	1966	1974	1990	<i>r</i>
90%	101	105	130	104	48	-0.53
95%	117	139	168	143	54	-0.43
97%	124	160	171	157	57	-0.46

Tab. 6.50: Perzentile der Höhenwerte [in cm] auf den hohen Wattbereichen des Teilbeckens Strandley im Laufe der Zeit.

Die Wattflächen erhöhen sich zunächst bis 1966, um dann bis 1990 auf lediglich die Hälfte ihrer ursprünglichen Werte zurückzufallen (Tab. 6.50). Dieser Trend der Abnahme der Wattflächen setzt 1974 ein und verstärkt sich durch die Eindeichung bis 1990.

Eine mögliche Erklärung bietet das Gutachten des MELFF (MINISTER FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN 1981) an. Dort wurde eine verstärkte Umströmung der Insel Pellworm festgestellt, weil die Verbindungsrippen (v.a. Strandley) zwischen den Tidebecken der Hever und der nördlich anschließenden Süderau sich vertieften und erweiterten, so dass es zu Erosionen der umliegenden Wattbereiche kam.

Ob eine Erholung der hohen Wattbereiche in Zukunft möglich ist, werden spätere Vermessungen zeigen müssen. Allerdings sind die Voraussetzungen für eine flächenhafte Sedimentation aufgrund der schlechteren Sedimentverhältnisse in Nordfriesland v.a. auch vor dem Hintergrund eines weiteren Meeresspiegelanstiegs nicht unbedingt positiv zu sehen.

6.3 Hoogeloch

Das Hoogeloch ist einerseits ein sehr kleines, flaches Tidebecken und andererseits weit vor der Festlandküste im Schutz der Außensände Japsand und Norderoogsand gelegen (vgl. Abb. 6.6). Da dieses Tidebecken bisher von baulichen Maßnahmen unbeeinflusst ist, soll es vergleichend zu den von Vordeichungen betroffenen Tidebecken Piep und Norderhever-Heverstrom herangezogen werden.

Die Außensände Japsand und Norderoogsand sind durch den Wattstrom Hoogeloch getrennt, der das Watteinzugsgebiet be- und entwässert. Im Norden – auf dem Knudshörn – und Süden liegt die Grenze des Tidebeckens auf Wattrücken. Über die südliche Begrenzung, die zwischen Norderoogsand und Hooge verläuft, findet ein Wasserübertritt aus dem Tidebecken Rummelloch in das Hoogeloch in Form eines ausgeprägten Reststroms statt. Somit fließt ein enormer Anteil der Wassermassen des Rummellochs durch das Seegatt des Hoogelochs ab (SIEFERT et al. 1980). Das spiegelt sich auch am Seegatt des Hoogelochs deutlich wider, dass bei *MThw* seinen Seegattquerschnitt fast verfünffacht, was bedeutet, dass rund 80 % des bei *MThw* durchflossenen Querschnitts im Intertidal liegt (Tab. 6.51).

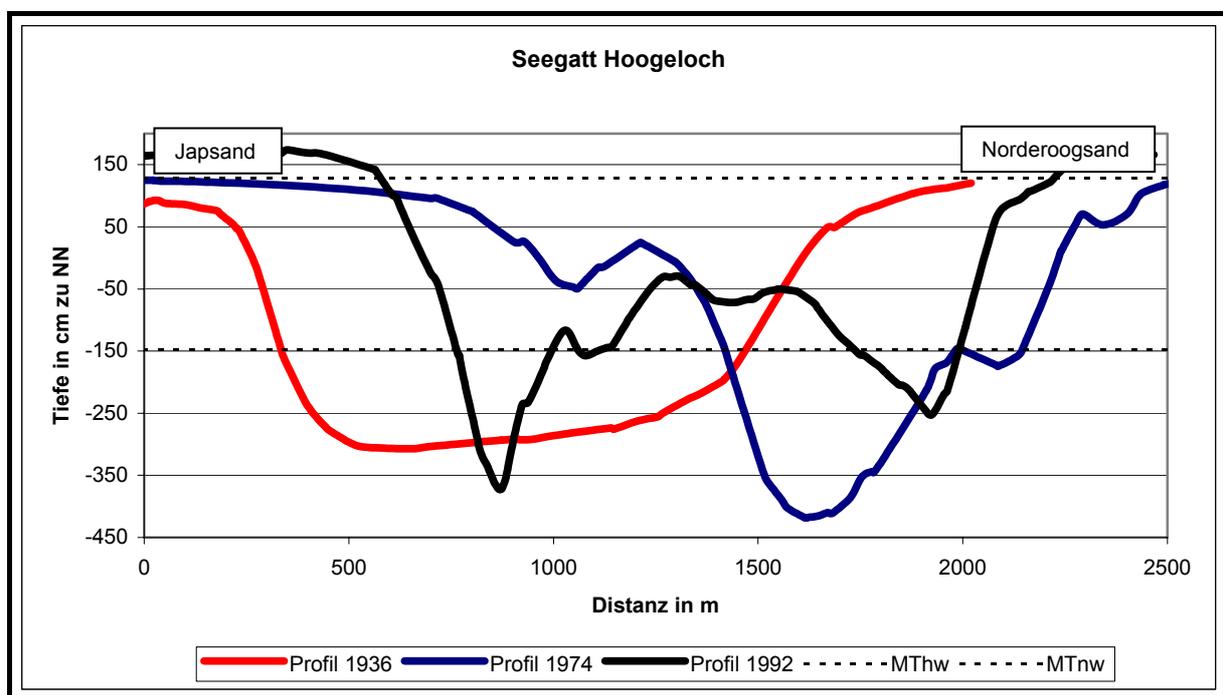


Abb. 6.11: Seegattprofile des Hoogelochs.

Das Profil des Seegatts hat sich in seiner Gestalt stark verändert. Aus einem ehemals runden und flachen Querschnitt hat sich ein aus mehreren Rinnen bestehendes, in Teilen steiles Seegattprofil entwickelt.

	1936	1974	1992
MThw	1.32	1.20	1.32
MTnw	-1.51	-1.42	-1.52
Mittl. Tiefe bei MThw [m]	-2.29	-1.90	-1.76
Mittl. Tiefe bei MTnw [m]	-0.52	-0.52	-0.18
Seegattquerschnitt [m²]			
Querschnittsfläche < MThw	4223	2512	1862
Querschnittsfläche < MTnw	1348	1003	387
Querschnittsfläche im Intertidal	2875	1509	1475

Tab. 6.51: Flächen- und Tiefenverteilung des Seegatts des Hoogelochs.

Die Außensände Nordfrieslands haben u.a. für den Küstenschutz eine besondere Bedeutung, weil sie durch ihre exponierte Lage einen großen Anteil der von der offenen Nordsee anbrachenden Wellenenergie dämpfen. Sie sind für die dahinter liegenden Watten eine Art natürlicher Wellenbrecher. HOFSTEDE (1996b, 1998a) weist darauf hin, dass der mittlere Tidenhub und somit die Energien aus den Tideströmungen und aus dem Seegang im Gebiet der Außensände zugenommen haben. Als Reaktion darauf haben sich die Sände zwischen 1947 und 1991 um bis zu 1 600 m ostwärts verlagert. Das hat dazu geführt, dass die planimetrische Fläche unterhalb von *MThw* von 18.51 km² im Jahr 1936 auf 15.42 km² im Jahr 1992 abgenommen hat und sich somit das Einzugsgebiet durch die Verlagerung der Außensände verringert hat. HOFSTEDE (1998a) geht davon aus, dass sich bei einem prognostizierten weiteren Meeresspiegelanstieg die Sände weiter nach Osten verlagern und infolgedessen das Tidevolumen des Seegatts Hoogeloch bis 2050 halbiert werden könnte. Zudem könnte sich bei einer Zunahme der Sturmintensität und dem damit verstärkten küstenparallelen Sandtransport das Hoogeloch schließen und Japsand und Norderoogsand zusammen wachsen.

Die Analyse des Tidebeckens des Hoogelochs basiert nur auf dem Gesamtbecken, da es sich um ein kleines, einzelnes Prielsystem handelt. Es standen insgesamt vier Vermessungen zwischen 1936 und 1992 zur Verfügung (Tab. 6.52).

	1936	1968	1974	1992
Tidekennwerte [m zu NN]				
MThw	1.32	1.40	1.20	1.32
MTnw	0.57	0.64	0.53	0.52
MTnw	-1.51	-1.52	-1.42	-1.52
MThb	2.83	2.92	2.62	2.84
Flächen [km²]				
Gesamtfläche	19.6	21.8	21.6	20.4
inkl. Supralitoral	101%	104%	111%	115%
Fläche unter MTnw:	2.0	2.5	2.2	3.0
Sublitoral	10%	12%	11%	16%
Wattflächen:	17.5	18.6	17.5	15.2
Eulitoral	90%	88%	89%	84%
Mittl. Sedimenthöhen [m]				
Charakteristische Watthöhe	1.52	1.71	1.53	1.61
Tiefen [m]				
Tiefe zu NN bei MThw	-0.20	-0.01	-0.07	-0.17
Tiefe zu NN bei MTnw	-2.26	-2.77	-2.64	-2.44

Maximale Tiefe	-3.11	-4.99	-5.07	-6.00
Volumina [Mio. m³]				
Fassungsvolumen bei MThw	28.2 100%	26.4 100%	22.6 100%	23.0 100%
Fassungsvolumen bei NN	7.2 25%	6.7 25%	6.0 27%	6.7 29%
Prielvolumen: PV	1.3 5%	1.6 6%	1.5 6%	1.5 6%
Tideprisma: P	26.9 95%	24.8 94%	21.1 94%	21.6 94%

Tab. 6.52: Flächen-, Tiefen- und Volumenverteilung im Tidebecken des Hoogelochs zwischen 1936 bis 1992.

Beim Hoogeloch fällt der hohe Anteil an Wattflächen mit 84 % bis 90 % an der Gesamtfläche auf. Das Becken ist relativ flach, was sich einerseits an dem geringen Flächenanteil unter *MThw* im Sublitoral mit nur 10 % bis 16 % und andererseits an den geringen mittleren Tiefen zeigt. Ein weiteres Indiz hierfür findet man bei der Gegenüberstellung des Prielvolumens mit dem Tideprisma. Der Anteil des Tideprismas am gesamten Wasservolumen des Tidebeckens ist mit 94 % bis 95 % deutlich höher als das des Prielvolumens mit nur 5 % bis 6 %.

	1936	1968	1974	1992	<i>r</i>
3%	-249	-263	-233	-253	-0.35
5%	-218	-186	-162	-212	0.25
10%	-134	-104	-97	-138	0.13

Tab. 6.53: Perzentile der Tiefenwerte [in cm] in den Prielen des Tidebeckens Hoogeloch im Laufe der Zeit.

Die Perzentilwerte in den Prielen zeigen für das Hoogeloch keinen eindeutigen Trend (Tab. 6.53). Die tiefsten Prielbereiche, die durch das 3 %-Perzentil repräsentiert werden, weisen insgesamt eine leichte Zunahme der Prieltiefe auf, die jedoch im zeitlichen Verlauf nicht kontinuierlich abläuft. Ein damit verbundener niedriger Korrelationskoeffizient *r* zeigt sich auch in den Werten für das 5 %- und 10 %-Perzentil. Die Entwicklung des Hoogelochs ist gerade im Prielbereich morphologisch sehr stark durch den Reststrom aus dem Rummelloch geprägt. Veränderungen in den Prielen werden so mit den Veränderungen der Entwicklung des benachbarten Tidebeckens Rummelloch und dessen Reststrom einhergehen.

	1936	1968	1974	1992	<i>r</i>
90%	27.61	36.69	31.08	39.32	0.86
95%	36.89	50.25	46.09	53.99	0.92
97%	41.99	56.58	55.20	59.90	0.93

Tab. 6.54: Perzentile der Hangneigung [in Grad] in den Prielen des Tidebeckens Hoogeloch im Laufe der Zeit.

Die Werte für die Hangneigung sind im Vergleich zum großen Tidebecken Norderhever-Heverstrom, das Werte zwischen 59° und bis zu 77° aufweist, relativ gering (Tab. 6.54). Das liegt vor allem daran, dass es sich beim Hoogeloch um ein sehr kleines, flaches Tidebecken handelt. Tabelle 6.54 zeigt, dass für jedes betrachtete Perzentil eine deutliche Zunahme der Perzentilwerte für die Hangneigung im Priel festzustellen ist.

	1936	1968	1974	1992	<i>r</i>
90%	64	121	118	137	0.97
95%	76	135	133	151	0.97
97%	90	140	141	157	0.98

Tab. 6.55: Perzentile der Höhenwerte [in cm] auf den hohen Wattbereichen des Tidebeckens Hoogeloch im Laufe der Zeit.

Die Höhen auf den hohen Wattbereichen haben zwischen 1936 und 1968 zugenommen, um zuerst bis 1974 annähernd gleich zu bleiben und dann bis 1992 nochmals stark anzusteigen (Tab. 6.55). Die hohen Wattbereiche des Tidebeckens Hoogeloch haben sich teilweise um das Doppelte erhöht, was auf eine sehr gute Sedimentverfügbarkeit in diesem Zeitraum hinweist. Als Sedimentquelle kommen gerade für dieses Tidebecken die Außensände in Betracht.

6.4 Fazit

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Priele in den Tidebecken in der Regel eine Zunahme der Tiefen aufweisen. Dies ist insofern nachzuvollziehen, weil der Tidenhub im Untersuchungszeitraum in allen Becken zugenommen hat. Eine Zunahme des Tidenhubes hat zur Folge, dass pro Tide mehr Wasser in das Tidebecken ein- und ausströmt. Da dieses in der gleichen Zeitspanne (Tidedauer bleibt konstant) geschehen muss, erhöhen sich die Tideströmungsgeschwindigkeiten in den Prielen, so dass verstärkt Sediment erodiert werden kann.

Diese Entwicklung wird nur dann in den Tidebecken unterbrochen, wenn ein flächenhafter baulicher Eingriff wie z.B. eine Vordeichung das Becken verkleinert. In diesem Fall reduzieren sich der Flutraum und somit auch das Flutvolumen (Tideprisma). Infolgedessen nehmen die Strömungsgeschwindigkeiten ab. Da der Querschnitt eines Prieles in direktem Zusammenhang mit der ihn durchfließenden Wassermenge steht, ist klar, dass bei einer Abnahme der in den Priel ein- und ausströmenden Wassermenge der Querschnitt des Prieles zu groß ist und Sedimentation einsetzt. In diesem Fall findet besonders in den betroffenen Teilbecken zumindest zeitweise eine Sedimentation in den Prielen statt (vgl. besonders Teilbecken der Piep). Die Sedimentation muss solange anhalten, bis der Querschnitt dem neuen Tideprisma entspricht (vgl. hierzu z.B. ALR Husum 1995).

Die Entwicklung der Wattflächen weist in allen untersuchten Tidebecken einen einheitlichen Trend auf. Bei dem von anthropogenen Eingriffen unbeeinflussten Tidebecken Hoogeloch ist eine Abnahme der Wattflächen gegeben. Da der Anteil der Wattfläche an der Gesamtfläche jedoch mit 84 % im Jahr 1992 immer noch sehr hoch ist, kann davon ausgegangen werden, dass dieses Tidebecken im Hinblick auf einen weiteren Meeresspiegelanstieg in naher Zukunft keine dramatischen Entwicklungen erwarten lässt.

Bei den großen Tidebecken Piep und Norderhever-Heverstrom nehmen die Wattflächen ebenfalls ab. Das Tidebecken der Piep (54 % im Jahr 1991) weist jedoch im Vergleich zum Norderhever-Heverstrom (46 % im Jahr 1990) einen höheren Anteil der Wattfläche an der Gesamtfläche auf. Zudem ist insgesamt das Höhenniveau der Wattflächen in der Piep mit 1.69 m (1991) im Hinblick auf einen Meeresspiegelanstieg bezüglich einer möglichen Pufferfunktion günstiger als im Norderhever-Heverstrom mit lediglich 1.49 m (1990). Betrachtet man die Entwicklung der Wattflächen in den Teilbecken, dann ist diese sehr stark an die Vordeichungen gekoppelt. Ist das Teilbecken direkt flächenhaft von der Vordeichung betroffen, so nimmt der Anteil der Wattflächen unmittelbar nach der Eindeichung stark ab, weil gerade diese hohen Bereiche eingedeicht werden. In den Teilbecken der Piep konnte festgestellt werden, dass der Anteil der Wattflächen nach den Eindeichungen und auch die charakteristische Wathöhe im Anschluss daran wieder zunahm. Dies weist auf eine ausreichende Sedimentverfügbarkeit im Dithmarscher Wattenmeer hin.

Im Gegensatz dazu wurde im Tidebecken Norderhever-Heverstrom eine dramatische Abnahme der Perzentilwerte der Wattflächen festgestellt, die sich nicht nur auf das von der Vordeichung des Beltringharder Kooges betroffenen Teilbeckens Holmer Fähre beschränkt. Durch die verstärkte Umströmung der Insel Pellworm kam es zu Erosionen der umliegenden Wattbereiche (MELFF 1981), so dass im Teilbecken des Strandleys eine Erklärung für die Abnahme gegeben ist.

Eine weitere Erklärung für die drastische Abnahme der Wathöhen zwischen 1974 und 1990 für die Teilbecken, die nicht von der Vordeichung direkt betroffen sind, kann darin gesehen werden, dass aufgrund des höheren Tidenhubes der Seegang und die Tideströmungsgeschwindigkeiten auf den Wattflächen zugenommen haben und somit eine flächenhafte Erosion stattgefunden hat. Diese Vermutung wird durch EHLERS (1988) unterstützt, der die hydrologischen und morphologischen Konsequenzen der Abdämmung der Zuider Zee in den Niederlanden aufzeigt. Durch die Vordeichung bzw. Abdämmung hat sich der Tidenhub dort um bis zu 50 cm erhöht und die Tideströmungen haben sich geändert, was sich v.a. in einer Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit um 10 %-26 % bemerkbar gemacht hat. Es haben sich demnach die Strömungsgeschwindigkeiten nicht nur in den Prielen erhöht, sondern auch auf den Wattflächen, so dass in beiden Bereichen infolgedessen Erosionen auftreten können.

7. Relationen und Szenarien eines Meeresspiegelanstiegs

7.1 Relationen

Die Parameter, die in Kapitel 6 zur Charakterisierung der Tidebecken herangezogen wurden, können z.T. zueinander in Beziehung gesetzt werden, um weitere Aussagen über den bisherigen und darüber hinaus zukünftigen Entwicklungszustand der Tidebecken machen zu können.

Bevor man jedoch diese Relationen aufstellt, muss man sich im Klaren darüber sein, dass die Hydrodynamik die Morphologie im Wattenmeer bestimmt. Bei so genannten Ursache-Wirkungs-Untersuchungen muss also beachtet werden, dass die Ursache immer die hydrodynamischen Vorgänge sind und der morphologische Zustand lediglich die (Aus-)Wirkung zeigt, wobei immer von einer Zeitverschiebung in der morphologischen Reaktion ausgegangen werden muss (SPIEGEL 1997a). Die morphologischen Veränderungen erfolgen auf verschiedenen Zeitskalen. Eine Sturmflut etwa kann die Morphologie im Tidebecken innerhalb von Stunden ändern, andere morphologische Veränderungen erfolgen hingegen in Jahren oder Jahrzehnten. GÖNNERT (1996) hat zum Beispiel die Anpassung der Morphologie der Eidermündung an den Bau des Sperrwerks mit rund 10 Jahren beziffert.

Als Voraussetzung für die Verknüpfung von Parametern mit Hilfe von empirischen Beziehungen geht man davon aus, dass sich das System in einem gleichgewichtsähnlichen Zustand befindet. Die Begrifflichkeiten zur Beschreibung dieses Zustandes variieren von Autor zu Autor (z.B. „morphologische Stabilität“, „dynamische Stabilität“ oder „dynamisches Gleichgewicht“). Die sich ständig verändernden hydrologischen Verhältnisse (z.B. Seegang und Tide) verhindern grundsätzlich die Ausbildung eines stabilen Zustandes. SPIEGEL, der hierzu eine ausführliche Diskussion führt, schlägt den Begriff des „Fließgleichgewichts“ vor. Er definiert ihn dergestalt, dass „die Morphologie eines Tidebeckens an die herrschende Gezeitenbewegung und an deren bisherige, säkulare Änderung“ angepasst ist (SPIEGEL 1997a, S. 94).

Bei morphologischen Untersuchungen im ostfriesischen Wattenmeer kam WALTHER schon 1934 zu der Erkenntnis, dass es bestimmte, empirisch ermittelbare Beziehungen zwischen den das Wattenmeer charakterisierenden Parametern bzw. Kenngrößen gibt, mit denen man dieses Fließgleichgewicht beschreiben kann.

Diverse Autoren haben mittlerweile eine Vielzahl von Gleichungen bzw. Relationen aufgestellt (z.B. O'BRIEN 1931, BRUUN 1962, BRUUN 1978, RENGER 1976b, HAYES 1979, GERRITSEN & DE JONG 1985, MISDORP et al. 1990, VAN KLEEF 1991, BIEGEL 1992,

SPIEGEL 1997a, KUNZ et al. 1998). Mit Hilfe der Relationen können Wattgebiete nicht nur aktuell morphologisch eingeordnet werden, sondern z.T. auch Abschätzungen für zukünftige morphologische Zustände aufgrund von sich verändernden hydrodynamischen Randbedingungen (z.B. Tidenhub) oder anthropogenen Eingriffen vorgenommen werden (vgl. z.B. MISDORP et al. 1990).

SPIEGEL (1997a) gibt eine detaillierte Übersicht und führt eine ausführliche Diskussion über die gebräuchlichsten Relationen. Die Gruppe der so genannten hydrologisch-morphologischen Beziehungen erlangte eine besondere Bedeutung, was sich u.a. schon in der Menge an aufgestellten Relationen dokumentiert. SPIEGEL (1997a) gibt allein für diese Gruppe 34 Relationen an (vgl. auch VAN KLEEF 1991). Hier wird die Kopplung der Hydrologie und der Morphologie hergestellt. Dies ist insofern sinnvoll, als dass die hydrodynamischen Vorgänge den morphologischen Zustand im Tidebecken bestimmen. Die wichtigsten Beziehungen hierbei betrachten den Seegattquerschnitt Ac zu der sie durchfließenden Wassermenge. Dabei können unterschiedliche Wassermengen berücksichtigt werden (z.B. Tideprisma P , Tidevolumen TV , oder nur das Ebb- bzw. Flutvolumen).

Als eine der wichtigsten, d.h. aussagekräftigsten und am häufigsten zitierten Beziehungen (nach O'BRIEN 1931) gilt der Zusammenhang, der das Verhältnis zwischen Seegattquerschnitt Ac zu Tidevolumen TV bzw. Tideprisma P beschreibt, wobei im Folgenden in Anlehnung an MISDORP et al. (1990) von $TV = 2 \times P$ ausgegangen wird.

An dieser Stelle soll beispielhaft nur diese Relation Ac zu P vorgestellt und auf die Daten dieser Arbeit angewendet werden. Dabei soll einerseits der aktuelle morphologische Zustand der untersuchten Tidebecken eingeordnet und andererseits die Ergebnisse mit anderen Arbeiten verglichen werden.

Auch von MISDORP et al. (1990) wird dieses Verhältnis als dasjenige angesehen, das die langfristige morphologische Entwicklung eines Tidebeckens bestimmt (MISDORP et al. 1990, S. 125).

Abbildung 7.1 zeigt eine schematische Darstellung des Seegattquerschnitts und des Tideprismas in einem Tidebecken. Die Fläche des Seegattquerschnitt Ac wird in m^2 angegeben und kann unter verschiedenen Bezugshorizonten (z.B. $MThw$ oder NN) berechnet werden. Hingegen wird das Tideprisma P in m^3 angegeben und bezeichnet diejenige Wassermenge, die während der Flut in das Tidebecken ein- und während der Ebbe wieder ausströmt. MISDORP et al. (1990) definieren das Tidevolumen TV dabei als $TV = 2 \times P$.

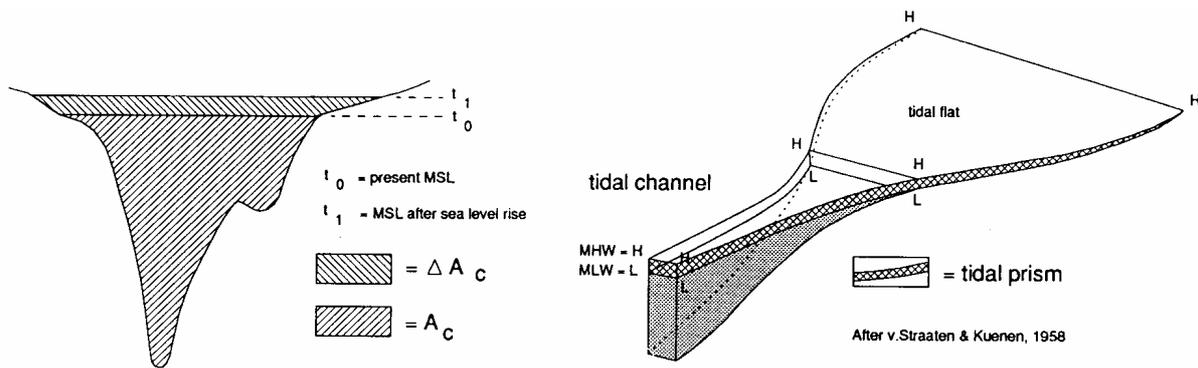


Abb. 7.1: Schematische Darstellung eines Seegattquerschnitts (A_c) und des Tideprismas (P) in einem Tidebecken.

Quelle: MISDORP et al. 1990 (nach STRAATEN & KUENEN 1958)

Sie haben anhand der Relation A_c zu TV die Auswirkungen eines beschleunigten Meeresspiegelanstiegs auf das niederländische Wattenmeer untersucht. Sie stellten eine Hypothese für die zukünftige morphologische Entwicklung auf, indem sie insbesondere den Anteil der Wattflächen an der Gesamtfläche eines Tidebeckens betrachtet haben. Eine mögliche Reduktion der Größe und/oder der Höhenlage der Intertidalflächen hat nicht nur wirtschaftliche Folgen (z.B. Fischerei), sondern vor allem weitreichende ökologische Konsequenzen. Deshalb stellt sich die zentrale Frage, ob die zukünftige Sedimentation der Wattflächen mit einem beschleunigt steigendem Meeresspiegel mithalten kann.

Die Tidebecken haben – wie bereits in Kapitel 6 dargestellt – unterschiedliche Wattflächenanteile in Relation zur Gesamtfläche. Der Anteil der Wattflächen im Tidebecken wird wichtig für die zukünftige morphologische Entwicklung sein. MISDORP et al. (1990) sehen in den Parametern Seegattquerschnitt A_c und Tidevolumen TV diejenigen Parameter, welche die langfristige morphologische Entwicklung in einem Tidebecken bestimmen.

In Abbildung 7.2 ist dieses Verhältnis des Seegattquerschnitts A_{cMThw} zum Tideprisma P für alle schleswig-holsteinischen Tidebecken graphisch dargestellt worden. Dabei sind die drei Tidebecken Piep, Hoogeloch und Norderhever-Heverstrom, die in dieser Arbeit beispielhaft analysiert worden sind, hervorgehoben. Es wurden alle zur Verfügung stehenden Vermessungszeitpunkte einbezogen, um auch die Veränderung dieses Verhältnisses im Laufe der Zeit zu dokumentieren.

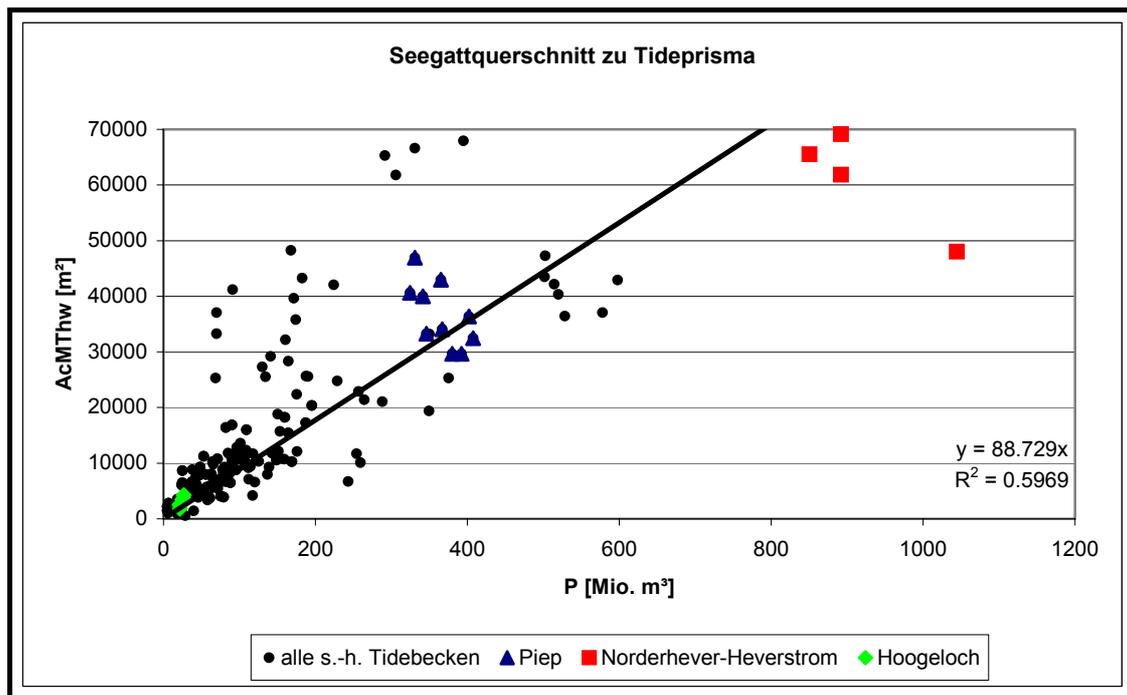


Abb. 7.2: Verhältnis des Seegattquerschnitts zum Tideprisma für die schleswig-holsteinische Tidebecken (n = 151).

Bei den drei hervorgehobenen Tidebecken ist klar zu erkennen, dass sich das kleinere Tidebecken Hoogeloch gut an die Regressionsgerade anlehnt, deren Berechnung auf den Werten aller Tidebecken basiert. Bei den größeren Tidebecken der Piep und insbesondere des Norderhever-Heverstroms gibt es hingegen z.T. deutliche Abweichungen der Wertepaare von der Regressionsgeraden. Es wird – wie bei allen Beziehungen – davon ausgegangen, dass es in jedem Tidebecken ein festes Verhältnis dieser beiden Kenngrößen (Ac zu P bzw. TV) zueinander gibt, welches ein Fließgleichgewicht definiert. Dieses Fließgleichgewicht wird eben durch die Regressionsgerade beschrieben. Tidebecken, die auf bzw. in der Nähe der Regressionsgeraden liegen, befinden sich in dem oben definierten Fließgleichgewicht. Je größer die Abweichung des Wertes eines Tidebeckens von der Linie ist, desto weniger befindet sich dieses im Fließgleichgewicht und wird sich in Zukunft in irgendeiner Weise verändern, um diesem Fließgleichgewicht wieder entgegenzustreben (vgl. Abb. 7.3 und 7.4). Ändert sich das Verhältnis dieser beiden Kenngrößen zueinander z.B. aufgrund baulicher Eingriffe (Vor- oder Rückdeichungen, Dammbauten) oder eines beschleunigten Meeresspiegelanstiegs, so finden im Becken Sedimentumlagerungen in Form von Erosion oder Sedimentation statt.

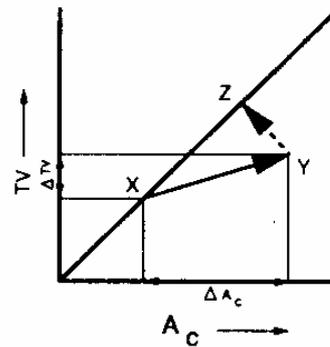
MISDORP et al. (1990) sind jedoch einen Schritt weiter gegangen und haben die Hypothese aufgestellt, dass der Anteil der Intertidalfläche für die zukünftige morphologische Entwicklung eines Tidebeckens entscheidend sein wird. Bei der Aufstellung ihrer Hypothese wurde die theoretische Annahme getroffen, dass zuerst die Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs (Zunahme von Ac und TV) stattfindet und darauf die Reaktion der Morphologie folgt. In der Natur muss jedoch davon ausgegangen werden, dass morphologische Veränderungen

schon während der Phase des Meeresspiegelanstiegs eintreten.

Prinzipiell unterscheiden MISDORP et al. (1990) zwischen den direkten Effekten eines Meeresspiegelanstiegs auf den Seegattquerschnitt (Ac) und das Tidevolumen (TV) und der anschließenden Reaktion der Morphologie während einer Anpassungsphase.

Steigt der Meeresspiegel, so nimmt der Seegattquerschnitt Ac zu (vgl. Abb. 7.1). Die Auswirkungen eines Meeresspiegelanstiegs auf das Tidevolumen TV hingegen sind abhängig von der Geometrie des Tidebeckens. Dabei können insgesamt drei Fälle unterschieden werden:

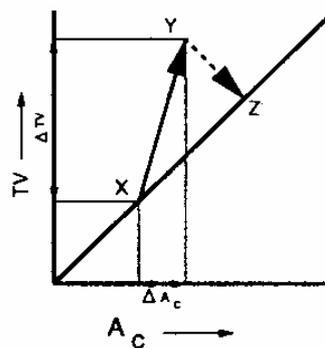
1. **Fall A:** Das Tidebecken hat keine Inter- und Supratidalflächen. Das Tidevolumen TV würde in diesem Fall nicht zunehmen. Diese Situation tritt im schleswig-holsteinischen Wattenmeer allerdings nicht auf.
2. **Fall B:** Das Tidebecken weist einen geringen Anteil an Inter- und Supratidalflächen an der Gesamtfläche auf (Abb. 7.3). In diesem Fall ist der Anstieg des TV proportional kleiner als die Zunahme des Seegattquerschnitts, d.h. $\Delta TV < \Delta Ac$. Der Seegattquerschnitt ist im Verhältnis zum Tidevolumen zu groß, was dazu führt, dass die Tideströmungsgeschwindigkeit abnimmt. Als morphologische Reaktion hierauf erfolgt eine Sedimentation im Seegatt und in den Prielen, wohingegen auf den Wattflächen Erosion vorherrscht. MISDORP et al. (1990) gehen davon aus, dass ein Teil des für die Sedimentation im Seegatt und den Prielen notwendigen Materials von der offenen Nordsee und ein anderer von der Erosion auf den Wattflächen stammen. Durch die Abnahme der Tideströmung und die Zunahme der Wellenenergie gibt es einen Netto-sandtransport von den Watten in die Rinnen (KOHSEK et al. 1986). Die Sedimentation im Seegatt und in den Prielen und die Erosion auf den Watten führen zu einer Beschleunigung in der Zunahme des TV , bis sich ein neues Gleichgewicht eingestellt hat. Der kombinierte Effekt der Zunahme des Seegattquerschnitts und des Tidevolumens nach einem Meeresspiegelanstieg wird in Abbildung 7.3 durch die Verschiebung von X aus der Gleichgewichtslinie zu Y demonstriert.



Case B: relatively small inter- + supratidal areas:
 $\Delta TV < \Delta A_C$, during the first period $X \rightarrow Y$

Abb. 7.3: Fall B: Schematische Darstellung TV zu A_C , wobei $\Delta TV < \Delta A_C$.
 Quelle: MISDORP et al. (1990)

3. **Fall C:** Das Tidebecken hat in Relation zur Gesamtfläche einen hohen Anteil an Inter- und Supratidalfläche (Abb. 7.4). Das Tidevolumen nimmt stark zu, in Relation zum Seegattquerschnitt überproportional, so dass gilt: $\Delta TV > \Delta A_C$. In diesem Fall ist der Seegattquerschnitt im Verhältnis zum Tidevolumen zu klein. Die Strömungsgeschwindigkeit nimmt zu, was zu einer Erosion im Seegatt und in den Prielen führt. Auf den Wattflächen ist dagegen Sedimentation möglich. Teilweise werden die erodierten Sedimente in das Ebbdelta und teilweise durch die höhere Tideströmung auf den Wattflächen abgelagert. Durch die Sedimentation im Intertidal nimmt das TV langsam ab und es stellt sich wiederum ein neues Gleichgewicht ein.



Case C: relatively large inter- + supratidal areas:
 $\Delta TV > \Delta A_C$, during the first period $X \rightarrow Y$

Abb. 7.4: Fall C: Schematische Darstellung TV zu A_C , wobei $\Delta TV > \Delta A_C$.
 Quelle: MISDORP et al. 1990

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Tidebecken mit relativ kleinen Inter- und Supratidalflächen eine starke Sedimentation im Seegatt und Priel aufweisen, was zu einer weiteren Abnahme bzw. Verschwinden der Inter- und Supratidalflächen führt. Wohingegen bei Tidebecken mit relativ ausgedehnten Inter- und Supratidalflächen zwar eine Erosion im Seegatt und Priel stattfindet, jedoch gleichzeitig eine Sedimentation auf den Watten zu beo-

bachten ist. Ob die Sedimentation mit dem Meeresspiegelanstieg mithalten kann, hängt einerseits vom Verhältnis zwischen Prielen und Intertidalfläche und andererseits vom Verhältnis der Sedimenttransportrate und den Intertidalflächen ab. Gleichzeitig muss die Höhe des Meeresspiegelanstiegs berücksichtigt werden.

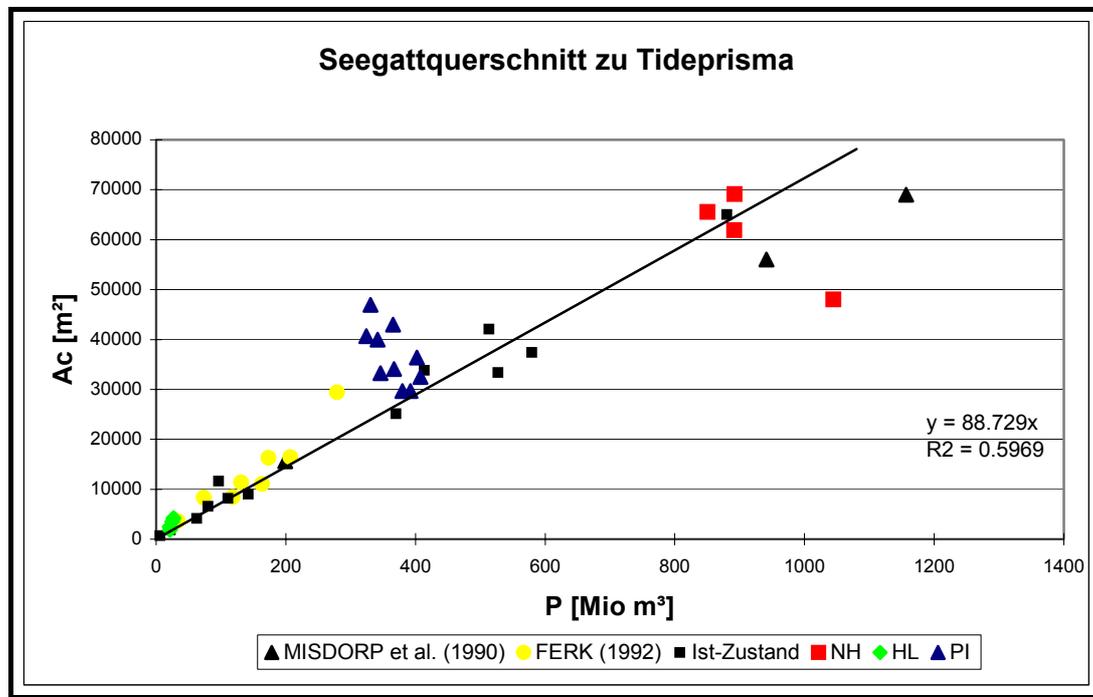


Abb. 7.5: Verhältnis von Seegattquerschnitt zu Tideprisma bei verschiedenen Untersuchungen.
Quelle: SPIEGEL (1997a), S. 103; erweitert.

In der Abbildung 7.5 ist das Verhältnis Ac zu P auf Basis verschiedener Untersuchungen eingetragen. Zur Einordnung der schleswig-holsteinischen Tidebecken wurden die Wertepaare für die drei Tidebecken Piep (PI), Hoogeloch (HL) und Norderhever-Heverstrom (NH) der Abbildung hinzugefügt.

Bei den von MISDORP et al. (1990) untersuchten Tidebecken handelt es sich um die niederländischen Tidebecken Texelstroom, Eierlandse Gat und Vlietstroom. Die Autoren weisen darauf hin, dass die in ihrer Untersuchung empirisch gewonnenen Beziehungen zwischen Ac und TV (wobei sie TV als $2 \times P$ definiert haben) verschiedener Tidebecken sich zudem sehr gut mit Werten von nordostamerikanischen Küstengebieten decken (BRUUN 1978).

Die Ergebnisse von FERK (1992) entstammen Analysen ostfriesischer Tidebecken und die als „Ist-Zustand“ bezeichneten der Untersuchung von SPIEGEL (1997a). Bei den Daten des Ist-Zustandes handelt es sich um die Wertepaare der 14 schleswig-holsteinischen Tidebecken (vgl. Abb. 2.8), die den aktuellen Zustand der KFKI-Vermessung von 1974 beschreiben.

Das kleinere Tidebecken Hoogeloch (HL) lehnt sich sehr gut an die Regressionsgerade an. Bei den größeren Tidebecken der Piep und des Norderhever-Heverstroms gibt es größere Abstände zwischen den Wertepaaren und der Regressionsgeraden.

Für die Tidebecken Piep (PI), Norderhever (NH) und Hoogeloch (HL) sind Wertepaare für verschiedene Vermessungszeitpunkte eingetragen. Es fällt auf, dass bei den Werten eines Tidebeckens Streuungen auftreten, die darauf hindeuten, dass sich das Verhältnis zwischen Seegattquerschnitt und Tideprisma im Laufe der Zeit verändert. MISDORP et al. (1990) weisen in diesem Zusammenhang darauf hin, dass Änderungen des Seegattquerschnitts im Laufe der Zeit Veränderungen des Tidevolumens und der Morphologie im Tidebecken zur Folge haben können.

Um dies zu verdeutlichen, sind in Abbildung 7.6 die drei Tidebecken PI, HL und NH selektiert und mit allen zur Verfügung stehenden Vermessungszeitpunkten aufgetragen. Für das Tidebecken Norderhever-Heverstrom sind stellvertretend die zu Grunde liegenden Vermessungen beigefügt. Die Streuung der Werte für jedes Tidebecken weist auf eine deutliche Variabilität in dem Verhältnis Ac zu P hin. Diese Variabilität soll nun noch einmal für jedes Tidebecken gesondert aufgeführt und interpretiert werden (Abb. 7.7 bis 7.9).

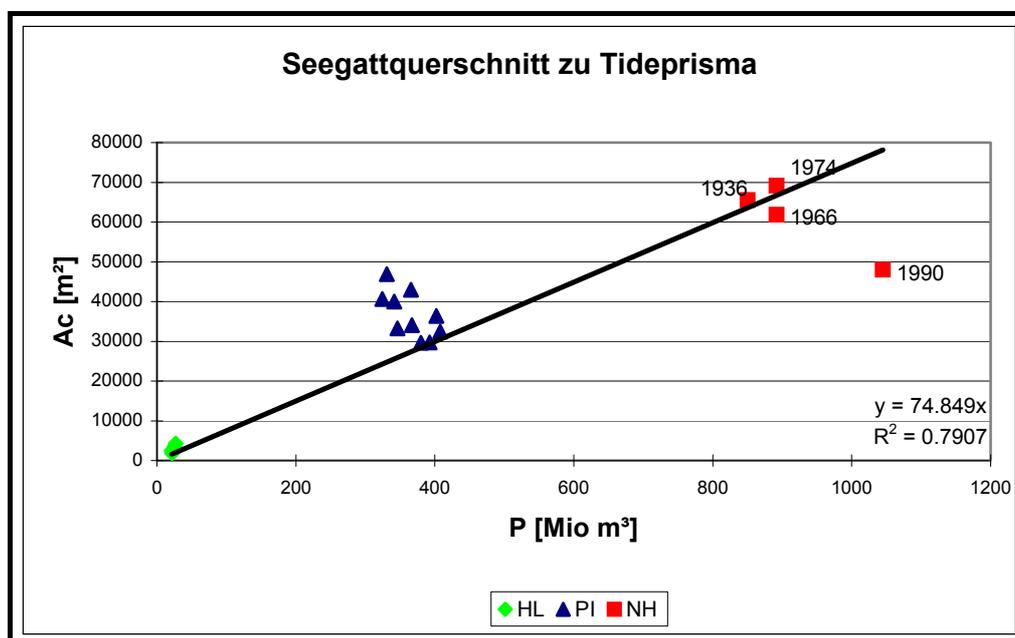


Abb. 7.6: Veränderungen des Verhältnisses des Seegattquerschnitts zum Tideprisma für die vier schleswig-holsteinischen Tidebecken HL, PI, und NH im Laufe der Zeit ($n = 18$).

7.2 Szenarien auf Basis der Ac - zu P -Beziehung

Bisher wurde in diesem Kapitel aufgezeigt, wie man anhand von Relationen den Entwicklungszustand eines Tidebeckens beurteilen kann. Insbesondere für die drei in dieser Arbeit untersuchten Tidebecken konnte die Veränderung des Verhältnisses von Ac zu P im Laufe der Zeit dargestellt werden (vgl. Abb. 7.6).

Es soll nun die bisherige Entwicklung detaillierter vorgestellt werden, um anschließend auf Basis der von MISDORP et al. (1990) entwickelten Methode die zukünftige Entwicklung der drei schleswig-holsteinischen Tidebecken abzuschätzen.

7.2.1 Norderhever-Heverstrom

Abbildung 7.7 zeigt einen Ausschnitt aus der vorherigen Abbildung, wobei der Bereich vergrößert worden ist, der von den Werten für das Tidebecken Norderhever-Heverstrom eingenommen wird. Zum besseren Verständnis sind den entsprechenden Werten die zu Grunde liegenden Vermessungszeitpunkte beigefügt. Aus den vier Werten lässt sich erkennen, dass der Seegattquerschnitt Ac zwischen 1936 und 1990 abgenommen und gleichzeitig das Tideprisma P zugenommen hat. Das Verhältnis von Ac zu P hat sich insbesondere zwischen 1974 und 1990 von der Regressionsgerade, die als Gleichgewichtslinie angesehen werden kann, entfernt. Eine mögliche Ursache hierfür ist die Vordeichung des Beltringharder Kooges in der Nordstrander Bucht im Frühjahr 1987. Durch die Vordeichung wurde der Flutraum der Holmer Fähre und somit auch des Norderhever-Heverstroms bei einer mittleren Tide um rund 40 Mio. m³ verkleinert. Das führt in erster Linie zu geringeren Strömungsgeschwindigkeiten in den Prielen, weil die einströmende Wassermenge sich reduziert. Der Prielquerschnitt ist demzufolge nach der Abdämmung zu groß. Als Reaktion hat sich auch der Seegattquerschnitt des Norderhever-Heverstroms verringert. Gleichzeitig hat das Tideprisma jedoch zugenommen, anstatt ebenfalls abzunehmen. Diese Entwicklung wurde auch bei der Abdämmung der Zuyderzee für das Tidebecken des Texelstroom in den Niederlanden festgestellt, weil zeitgleich der Tidenhub stark zugenommen hat (BATTJES 1961). Im Tidebecken des Norderhever-Heverstrom ist ähnliches zu beobachten. Dort hat der Tidenhub zwischen 1936 und 1991 um insgesamt 40 cm zugenommen, wobei allein zwischen 1974 und 1990 ein Anstieg um 30 cm erfolgte.

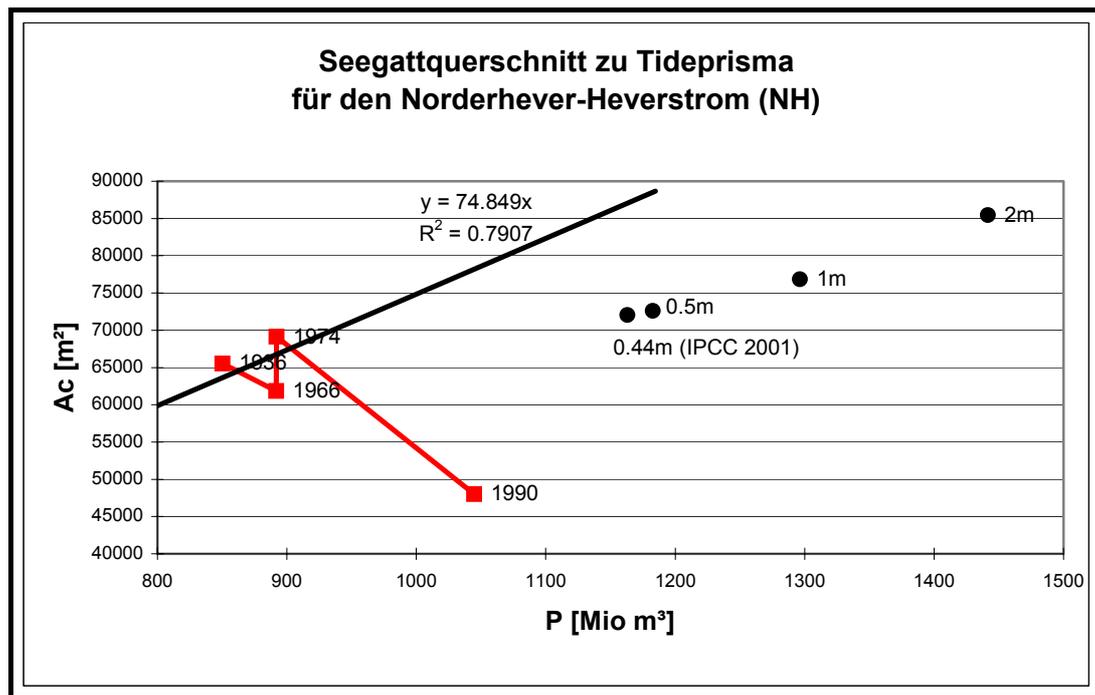


Abb. 7.7: Veränderungen des Verhältnisses des Seegattquerschnitts zum Tideprisma für das schleswig-holsteinische Tidebecken Norderhever-Heverstrom (NH) zwischen 1936 und 1990 und für vier Szenarien eines zukünftigen Meeresspiegelanstiegs.

Die in der Abbildung 7.7 mit einem schwarzen Kreis (●) eingezeichneten Werte beziehen sich auf Szenarien für einen möglichen Meeresspiegelanstieg in der Zukunft. Sie beschreiben das neue Verhältnis zwischen dem Tideprisma P und dem Seegattquerschnitt Ac , das sich bei einem entsprechendem Meeresspiegelanstieg von +0.5 m, +1.0 m oder +2.0 m ergeben würde. Die Werte 0.5 m, 1.0 m und 2.0 m beziehen sich auf die Untersuchungen von MISDORP et al. (1990), der diese Werte für seine Szenarien gewählt hat. Zusätzlich ist mit +0.44 m ein Wert für einen Meeresspiegelanstieg eingetragen worden, der dem mittleren Wert des aktuellen Szenarios des International Panel on Climate Change¹⁰ (IPCC 2001) aus dem Jahre 2001 entspricht. Das IPCC hat in seinem neuen Bericht für verschiedene Klimamodelle Meeresspiegelanstiegsszenarien von 0.11 m bis 0.77 m für den Zeitraum zwischen 1990 und 2100 veröffentlicht.

Für das Tidebecken des Norderhever-Heverstrom würde ein zukünftiger Meeresspiegelanstieg bedeuten, dass sich das Verhältnis zwischen Tideprisma zu Seegattquerschnitt weit von der als Gleichgewichtslinie definierten Regressionsgeraden entfernt (vgl. Tab. 7.1).

¹⁰ Vgl. hierzu u.a. die Homepage des IPCC unter <http://www.ipcc.ch/>

	Norderhever-Heverstrom (Tidenhub: 3.40m)			
Meeresspiegelanstieg	0.44m	0.5m	1.0m	2.0m
MThw [in m]	+2.08	+2.15	+2.64	+3.64
MTnw [in m]	-1.32	-1.26	-0.76	+0.24
P [in Mio. m³]	1163	1182	1296	1441
Ac_{MThw} [in m²]	72027	72589	76827	85477
Wattflächen %	41%	40%	33%	10%
P %	11%	13%	24%	38%
Ac %	50%	51%	60%	78%
Fall (nach MISDORP)	B	B	B	B

Tab. 7.1: Erwartete Effekte eines Meeresspiegelanstiegs von +0.44 m bis +2.0 m auf das Tideprisma (P) und den Seegattquerschnitt (Ac_{MThw}) des Norderhever-Heverstrom in Bezug auf die Situation von 1990.

In Tabelle 7.1 sind die zu erwartenden Effekte eines zukünftigen Meeresspiegelanstiegs auf das Tideprisma P und den Seegattquerschnitt Ac des Norderhever-Heverstroms berechnet worden. MISDORP et al. (1990) haben diese Vorgehensweise für die niederländischen Tidebecken Texelstroom, Eierlandse Gat und Vlietstroom gewählt, um die Folgen eines beschleunigten Meeresspiegelanstiegs auf die Entwicklung der Wattflächen dieser Becken abschätzen zu können. Sie haben jedoch als Bedingungen formuliert, dass sich einerseits der Tidenhub und andererseits die Geometrie des Tidebeckens nicht ändern.

Geht man von diesen Bedingungen aus, so ergeben sich für das Tidebecken des Norderhever-Heverstrom die in Tabelle 7.1 eingetragenen Werte. Die Zunahme des Tideprismas ist in Relation zur Zunahme des Seegattquerschnitts geringer ($\Delta P < \Delta Ac$), so dass nach der Einteilung von MISDORP et al. (1990) das Tidebecken des Norderhever-Heverstrom in den Fall B einsortiert werden muss. In diesem Fall ist der Seegattquerschnitt Ac im Verhältnis zum Tideprisma P zu groß, so dass die Tideströmungsgeschwindigkeit abnimmt und es zur Sedimentation im Seegatt und in den Prielen kommt. Gleichzeitig soll es auf den Wattflächen zu Erosionen kommen. Der Anteil der Wattfläche an der Gesamtfläche des Tidebeckens hat bereits zwischen 1936 bis 1990 von 54 % auf 45 % stark abgenommen und würde bei einem beschleunigten Meeresspiegelanstieg von +2.0 m auf nur noch 10 % abnehmen.

7.2.2 Hoogeloch

Abbildung 7.8 zeigt wiederum einen Ausschnitt aus der Abbildung 7.6, wobei der Bereich vergrößert worden ist, der von den Werten für das Tidebecken Hoogeloch eingenommen wird.

Bei dem zweiten, jedoch wesentlich kleineren Tidebecken in Nordfriesland ist festzustellen, dass sowohl der Seegattquerschnitt Ac als auch das Tideprisma P zwischen 1936 und 1992 abgenommen hat. Betrachtet man die Abbildung 7.8, so fällt auf, dass die Wertepaare von 1936, 1966 und 1974 parallel und oberhalb der Regressionsgerade liegen. Das ist darauf zu-

rückzuführen, dass der Seegattquerschnitt des Hoogelochs für das kleine Tidebecken viel zu groß ist, was durch einen ausgeprägten Reststrom vom Tidebecken des Rummellochs in das Hoogeloch verursacht wird. Es fließt ein enormer Anteil der Wassermassen des Rummellochs durch das Seegatt des Hoogelochs ab (SIEFERT et al. 1980). Der Seegattquerschnitt des Hoogelochs verfunffacht sich bei $MThw$ (vgl. Abb. 5.11). Gleichzeitig verringert sich die Fläche des Tidebeckens, weil die Außensände, welche die westliche Begrenzung des Tidebeckens darstellen, sich zwischen 1947 und 1991 um bis zu 1 600 m ostwärts verlagert haben. HOFSTEDE (1998a) geht davon aus, dass bei einem prognostizierten weiteren Meeresspiegelanstieg die Sände sich weiter nach Osten verlagern und infolgedessen sich das Tidevolumen des Seegatts Hoogeloch bis 2050 halbieren könnte. Beziehungweise könnte bei einer Zunahme der Sturmintensität und dem damit verstärkten küstenparallelen Sandtransport sich das Hoogeloch schließen und Japsand und Norderoogsand zusammenwachsen.

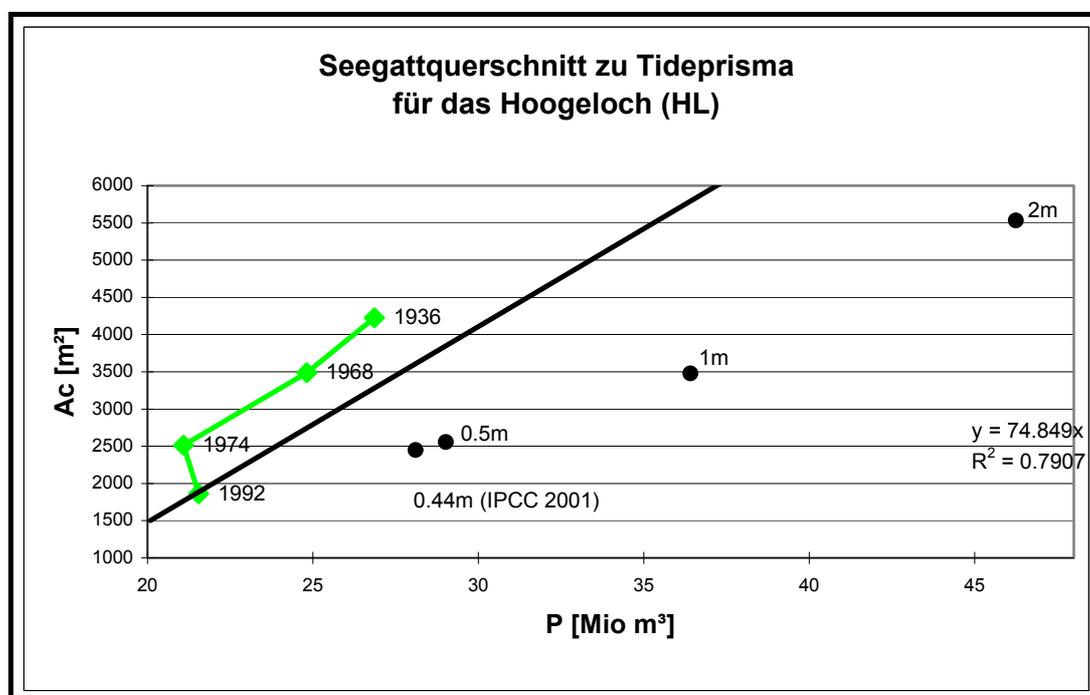


Abb. 7.8: Veränderungen des Verhältnisses des Seegattquerschnitts zum Tideprisma für das schleswig-holsteinische Tidebecken Hoogeloch (HL) zwischen 1936 und 1992. und für vier Szenarien eines zukünftigen Meeresspiegelanstiegs.

Ein zukünftiger beschleunigter Meeresspiegelanstieg hätte für das Tidebecken Hoogeloch erst bei einem hohen Meeresspiegelniveau negative morphologische Auswirkungen (Tab. 7.2). Das Verhältnis Ac zu P liegt – ähnlich wie der Wert für 1992 – auch bei einem mäßigen Meeresspiegelanstieg von +0.5 m bzw. +0.44 m in der Nähe der Regressionsgeraden. Insgesamt kann festgestellt werden, dass je höher der Meeresspiegelanstieg, desto weiter entfernen sich jedoch die Werte von der Regressionsgeraden.

	Hoogeloch (Tidenhub: 2.84m)			
Meeresspiegelanstieg	0.44m	0.5m	1.0m	2.0m
MThw [in m]	+1.76	+1.82	+2.32	+3.32
MTnw [in m]	-1.08	-1.02	-0.52	+0.48
P [in Mio. m³]	28	29	36	46
Ac_{MThw} [in m²]	2450	2557	3478	5532
Wattflächen %	80%	79%	72%	27%
P %	30%	34%	68%	114%
Ac %	31%	37%	86%	196%
Fall (nach MISDORP)	B	B	B	B

Tab. 7.2: Erwartete Effekte eines Meeresspiegelanstiegs von +0.44 m bis +2.0 m auf das Tideprisma (P) und den Seegattquerschnitt (Ac_{MThw}) des Hoogeloch in Bezug auf die Situation von 1992.

Tabelle 7.2 belegt diese Aussagen. Der Anteil der Wattfläche an der Gesamtfläche hat zwischen 1936 und 1992 leicht von 89 % auf 83 % abgenommen, wobei zu beachten ist, dass es sich beim Hoogeloch um ein Tidebecken mit einem extrem hohen Anteil an Intertidalfächen handelt. Auch bei einem Meeresspiegelanstieg von bis zu +1 m würden die Wattflächen lediglich auf 72 % reduziert werden. Trotzdem muss das Tidebecken nach der Einteilung von MISDORP et al. (1990) dem Fall B zugewiesen werden, weil in Relation der Seegattquerschnitt Ac stärker zunimmt als das Tideprisma P .

Spätestens bei diesem Tidebecken kann man die Vorgehensweise von MISDORP et al. (1990) in Frage stellen, sowohl die Geometrie als auch den Tidenhub im Tidebecken in Hinblick auf zukünftige Entwicklungen nicht zu verändern. Andererseits muss man sich fragen, ob das Tidebecken Hoogeloch sich überhaupt für diese Vorgehensweise eignet. Der große Reststrom vom Tidebecken des Rummellochs in das Hoogeloch hat zur Folge, dass der Seegattquerschnitt des Hoogeloch für das Tidebecken viel zu groß ist. Da aber bei MISDORP et al. (1990) gerade der Seegattquerschnitt als wesentliche Größe in die Untersuchung eingeht, liegt es nahe, dass ein derartiger Ansatz bei diesem Tidebecken oder auch anderen mit ähnlichen Verhältnissen zu Problemen führen kann.

7.2.3 Piep

Abbildung 7.9 zeigt wiederum einen Ausschnitt aus der Abbildung 7.6, wobei der Bereich vergrößert worden ist, der von den Werten für das Tidebecken Piep eingenommen wird.

Bei dem Tidebecken der Piep hat das Tideprisma P zwischen 1937 und 1985 stetig abgenommen (Abb. 7.9). Lediglich bei der letzten zur Verfügung stehenden Vermessung von 1991 ist im Gegensatz zu 1985 eine leichte Zunahme festzustellen. Gleichzeitig hat der Seegattquerschnitt Ac zugenommen, wobei diese Entwicklung nicht kontinuierlich verlief. Das ist im Wesentlichen auf die beiden Vordeichungen des Speicherbecken Dithmarschen in den Jahren 1972 und 1978 zurückzuführen (vgl. hierzu Kap. 6.1). Insgesamt haben die Werte, die das

Verhältnis Ac zu P angeben, den Abstand zur Regressionsgeraden vergrößert. Das Tidebecken der Piep hat sich demnach vom Zustand des Fließgleichgewichts entfernt.

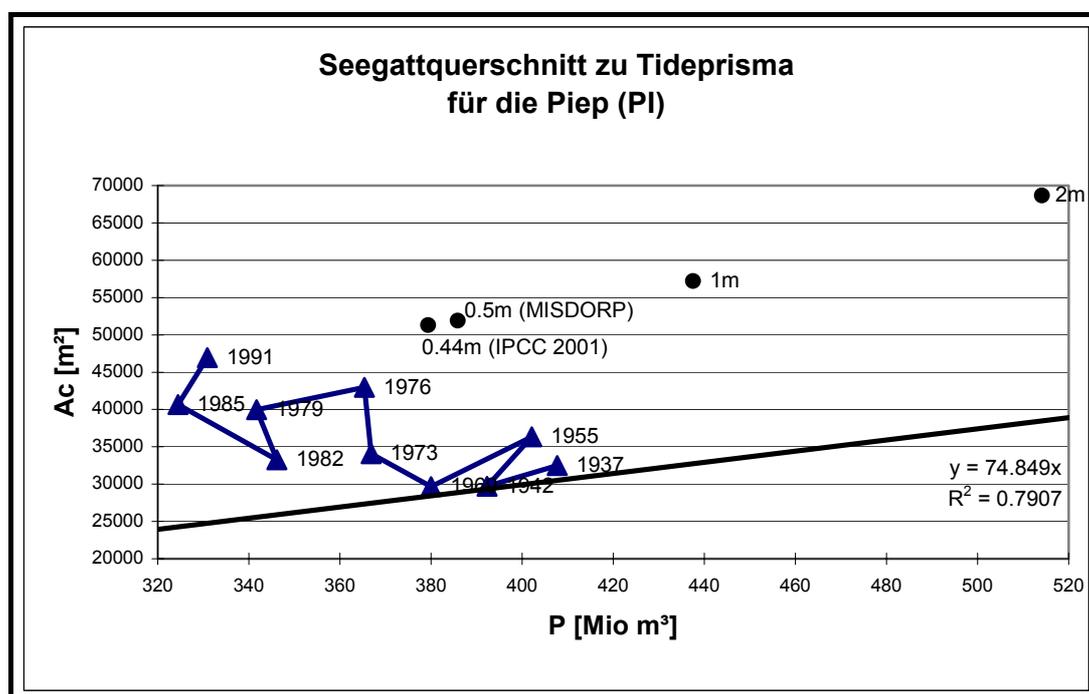


Abb. 7.9: Veränderungen des Verhältnisses des Seegattquerschnitts zum Tideprisma für das schleswig-holsteinische Tidebecken Piep (PI) zwischen 1937 und 1991 und für vier Szenarien eines zukünftigen Meeresspiegelanstiegs.

Diese Entwicklung würde sich bei einem beschleunigten Meeresspiegelanstieg von bis zu 2 m fortsetzen (vgl. Tab. 7.3). Bei diesem Tidebecken nimmt jedoch das Tideprisma P in Relation zum Seegattquerschnitt Ac für alle vier Szenarien stärker zu, so dass $\Delta P > \Delta A$ ist. Das bedeutet nach der Einteilung von MISDORP et al. (1990), dass die Piep dem Fall C zugeordnet werden muss. Beim Fall C sind relativ große inter- und supratidale Flächen im Tidebecken vorhanden. Der Anteil der Wattflächen an der Gesamtfläche hat in dem Tidebecken der Piep zwar zwischen 1937 bis 1991 von 62 % auf 54 % abgenommen, bleibt jedoch auch bei einem moderaten Meeresspiegelanstieg bis +0.5 m noch bei 50 %.

	Piep (Tidenhub: 3.24m)			
Meeresspiegelanstieg	0.44m	0.5m	1.0m	2.0m
MThw [in m]	+2.00	+2.06	+2.56	+3.56
MTnw [in m]	-1.24	-1.18	-0.68	+0.32
P [in Mio. m³]	379	385	437	514
Ac _{MThw} [in m²]	51290	51900	57193	68690
Wattflächen %	50%	50%	44%	21%
P %	14%	16%	32%	55%
Ac %	9%	10%	21%	46%
Fall (nach MISDORP)	C	C	C	C

Tab. 7.3: Erwartete Effekte eines Meeresspiegelanstiegs von +0.44 m bis +2.0 m auf das Tideprisma (P) und den Seegattquerschnitt (Ac_{MThw}) der Piep in Bezug auf die Situation von 1991.

Im Fall C ist der Seegattquerschnitt Ac im Verhältnis zum Tideprisma P zu klein, so dass die Tideströmungsgeschwindigkeit in den Prielen zunimmt. Es wird zu Erosionen in den Prielen und im Seegatt kommen. Auf den Wattflächen kann möglicherweise Sedimentation auftreten, weil die erodierten Sedimente aus den Prielen teilweise durch die steigenden Tideströmungen auf die Wattflächen transportiert werden können. Der andere Teil der erodierten Sedimente wird in Richtung Ebbdelta verfrachtet. Die Sedimentation endet, wenn ein neues Fließgleichgewicht erreicht wird.

7.3 Zusammenfassende Betrachtung

Wendet man die Vorgehensweise von MISDORP et al. (1990) auf die drei schleswig-holsteinischen Tidebecken Piep, Hoogeloch und Norderhever-Heverstrom an, so lässt sich feststellen, dass die nordfriesischen Tidebecken Hoogeloch und Norderhever-Heverstrom in den Fall B einzuordnen sind. Das bedeutet, dass es sich um Tidebecken handelt, die normalerweise einen geringen Anteil an Inter- und Supratidalflächen an der Gesamtfläche aufweisen. Bei einem beschleunigten Meeresspiegelanstieg käme es zu einer Sedimentation im Seegatt und in den Prielen, wohingegen auf den Wattflächen Erosion vorherrschen würde. Dies würde zu einer Beschleunigung in der Zunahme des P führen, bis sich ein neues Gleichgewicht eingestellt hat.

Bei dem Tidebecken Hoogeloch, das im Vergleich zu den anderen Tidebecken den größten Anteil Intertidalflächen an der Gesamtfläche hat, muss man sich aber fragen, ob dieses Tidebecken überhaupt für diese Vorgehensweise geeignet ist, da der große Reststrom vom Tidebecken des Rummellochs in das Hoogeloch den Seegattquerschnitt erheblich beeinflusst. Da dieser bei MISDORP et al. (1990) als wesentliche Größe in die Untersuchung eingeht, liegt es nahe, dass diese Vorgehensweise bei diesem Tidebecken zu einer falschen Einordnung führt. Sicherlich wäre das Tidebecken aufgrund seiner ausgedehnten Wattflächen eher dem Fall C zuzuordnen.

Das Dithmarscher Tidebecken Piep muss dem Fall C zugewiesen werden. Im Fall C hat das Tidebecken in Relation zur Gesamtfläche einen hohen Anteil an Inter- und Supratidalfläche und der Seegattquerschnitt Ac ist im Verhältnis zum Tidevolumen TV zu klein. Deswegen nimmt die Strömungsgeschwindigkeit zu, was zu einer Erosion im Seegatt und in den Prielen führt. Auf den Wattflächen ist dagegen Sedimentation möglich. Durch die Sedimentation im Intertidal nimmt TV langsam ab, bis sich wiederum ein neues Gleichgewicht einstellt.

Es ist v.a. bei dem Tidebecken Hoogeloch deutlich geworden, dass die Vorgehensweise von MISDORP et al. (1990) einige Schwächen aufweist. Auch die im Voraus getroffenen An-

nahmen schränken die Aussagen über die zukünftige Entwicklung des Tidebeckens ein. Wie MISDORP et al. (1990) bereits selbst festgehalten haben, ist nicht davon auszugehen, dass erst nach der Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs die Reaktion der Morphologie folgt. In der Natur werden vielmehr beide Prozesse simultan verlaufen. Die weiteren Einschränkungen, dass der Tidenhub bei einem Meeresspiegelanstieg gleich bleibt und die Geometrie des Tidebeckens sich ebenfalls nicht ändert, sind ebenfalls nicht realistisch.

Im folgenden Kapitel wird noch einmal auf diese Problematik eingegangen. Dort wird ein Verfahren vorgestellt, das ein Szenario beschreibt, welches auf Basis der bisherigen Tiefenwerte der einzelnen Vermessungen eine zukünftige Geometrie des Tidebeckens statistisch hochrechnet. Zudem wird bei der Berechnung der Beckenparameter ein Meeresspiegelanstieg berücksichtigt, der sich auf die Vorhersagen des IPCC (2001) stützt.

8. Szenarioberechnung mit Anpassung der Morphologie

In Kapitel 7 wurde ein Ansatz von MISDORP et al. (1990) vorgestellt, der anhand der Relation Ac zu TV bzw. Ac zu P die Auswirkungen eines beschleunigten Meeresspiegelanstiegs auf das niederländische Wattenmeer untersucht hat. Hauptkritik an dem Ansatz von MISDORP et al. (1990) war, dass sich weder der Tidenhub noch die Geometrie des Tidebeckens verändert.

Um eine Verbesserung der Vorhersage der morphologischen Entwicklung eines Tidebeckens zu erreichen, wird nun in einem neuen Ansatz versucht, die Morphologie des Beckens an einen zukünftigen Meeresspiegelanstieg anzupassen. Auf Basis der gemessenen Tiefenwerte der bisherigen Vermessungen aus den Jahren 1936 bis 1992 wird für jedes der drei ausgewählten Tidebecken eine neue Beckengeometrie durch eine Approximation der Tiefenwerte bis zum Jahr 2050 hochgerechnet.

Für die Hochrechnung wurden die digitalen Höhenmodelle als ASCII-Dateien aus dem GIS (ArcInfo) ausgelesen, um die Tiefenwerte in das Mathematik-Programm MAPLE einlesen zu können. Dort konnten dann die für die Hochrechnung notwendigen mathematischen Berechnungen durchgeführt werden.

In MAPLE wurde für jede Gitterzelle des digitalen Höhenmodells auf Basis der für jedes Tidebecken zur Verfügung stehenden Vermessungszeitpunkte eine Näherungsfunktion bestimmt.

Für alle Tidebecken wurden zunächst lineare Näherungsfunktionen der Form

$$y = a_0 + a_1x$$

angesetzt.

Bei dem Tidebecken der Piep, das insgesamt 10 Vermessungsjahrgänge aufweist, wurden zusätzlich Näherungsfunktionen der Form

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3$$

angewendet. Polynome 3. Grades erlauben für Bereiche, die über einen Zeitraum sowohl einer Erosion als auch einer Sedimentation unterliegen, eine bessere Modellierung (vgl. MAPLE-Script im Anhang B).

Anschließend wurde – ausgehend vom ersten Vermessungszeitraum und im jährlichen Abstand – für jede Gitterzelle auf Basis ihrer individuellen Näherungsfunktion die Tiefenwerte bis zum Jahr 2050 hochgerechnet, um Aussagen über die zukünftige Entwicklung des Tidebeckens treffen zu können. Dabei ist natürlich zu beachten, dass je weiter sich die hochgerechnete Vermessung von der letzten tatsächlich gemessenen Aufnahme entfernt, desto geringer wird die Aussagekraft.

Für die Zeitschritte 2010, 2020, 2030, 2040 und 2050 wurden auf der Hochrechnung basierende digitale Höhenmodelle erstellt. Für diese wurden dann wiederum die aus Kapitel 5 und Kapitel 6 bekannten Beckenparameter mit den auf Basis der IPCC-Szenarien abgeleiteten neuen Tidekennwerten berechnet (vgl. z.B. Tab. 9.1). Die IPCC-Szenarien geben für den Zeitraum 1990 bis 2100 einen Meeresspiegelanstieg von 11 cm bis 77 cm vor. Für das in dieser Arbeit betrachtete Szenario wurde ein mittlerer Wert von 44 cm für diesen Zeitraum angenommen. Das bedeutet, dass hier von einem Meeresspiegelanstieg von 4 mm pro Jahr ausgegangen wird (bei 44 cm / 110 Jahre; vgl. hierzu auch Kapitel 7.2.1).

Der Vorteil dieser Vorgehensweise gegenüber der von MISDORP et al. (1990) ist vor allem, dass eine neue Geometrie des Tidebeckens erzeugt wird, auf der die Beckenparameter zur Charakterisierung des Beckens berechnet werden können. Diese Anpassung der Morphologie entspricht eher der natürlichen Entwicklung.

Allerdings muss beachtet werden, dass es sich – aufgrund der durch einen polynomialen Ansatz nur ansatzweise beschreibbaren natürlichen Phänomene – nur um eine Annäherung an den realen zukünftigen Entwicklungszustand handeln kann. Zudem bleibt auch bei diesem Ansatz der Tidenhub konstant. Es soll hier lediglich ein Trend betrachtet werden.

Die Werte für die jeweils letzten zur Verfügung stehenden Vermessung (1990 bis 1992) sind für einen besseren Vergleich den Tabellen der jeweiligen Hochrechnungen hinzugefügt (vgl. Tab. 8.2, 8.4 und 8.6). Sie sind im Vergleich zu den in Kapitel 6 aufgezeigten Werten etwas geringer, weil die in dieser Tabelle eingetragenen Werte sich auf die kleinste gemeinsame Geometrie aller zur Verfügung stehenden Vermessungen beziehen. Somit ist die Fläche etwas kleiner als die, die in Kapitel 6 aus den natürlichen Watthöhenscheiden abgeleitet wurde. Dieses Vorgehen ist jedoch für eine Vergleichbarkeit zwingend notwendig und wurde für alle drei untersuchten Tidebecken vorgenommen.

8.1 Hochrechnung für die Piep

Um die Qualität der Hochrechnung beurteilen zu können, wurde der letzte zur Verfügung stehende Vermessungszeitpunkt als Stützstelle bei einer Test-Hochrechnung herausgenommen. Tabelle 8.1 zeigt die Parameter für den gemessenen Zeitpunkt 1991 und die auf Basis einer linearen Annäherung (P1) hochgerechneten Werte. Zudem wurde bei diesem Tidebecken, das insgesamt 10 Vermessungszeitpunkte aufweist, die Hochrechnung mit einem Polynom 3. Grades durchgeführt (P3) und zum Vergleich dieser Tabelle beigefügt.

	1991	P1	P3
Tidekennwerte [m zu NN]			
MThw	1.56	1.56	1.56
MTmw	0.45	0.42	0.43
MTnw	-1.68	-1.68	-1.68
MThb	3.24	3.24	3.24
Flächen [km²]			
Gesamtfläche	209.3	218.6	274.6
	104%	103%	118%
Fläche unter MTnw:	95.2	104.1	131.7
Sublitoral	47%	48%	50%
Wattflächen:	108.8	110.8	130.0
Eulitoral	53%	52%	50%
Mittl. Sedimenthöhen [m]			
Charakteristische Watthöhe	1.64	1.68	1.78
Tiefen [m]			
Tiefe zu NN bei MThw	-2.16	-2.25	-2.34
Tiefe zu NN bei MTnw	-6.80	-6.84	-7.51
Maximale Tiefe	-26.05	-26.42	-30.44
Volumina [Mio. m³]			
Fassungsvolumen bei MThw	538.3	558.0	534.7
	100%	100%	100%
Fassungsvolumen bei NN	337.4	359.1	356.3
	63%	64%	67%
Prielvolumen: PV	232.4	248.7	256.6
	43%	45%	48%
Tideprisma: P	305.8	309.2	278.1
	57%	55%	52%

Tab. 8.1: Vergleich der hochgerechneten Werte für 1991 mit dem gemessenen Werten.

Die flächenhaften Parameter werden bei der linearen Hochrechnung insgesamt gut getroffen. Bei den Wattflächen gibt es eine Abweichung zwischen 1991 und P1 von lediglich 2%. Die Abweichung zwischen 1991 und P3 liegt bei den Wattflächen bei 19% und ist im Bereich des Sublitorals mit 38% sehr viel höher als bei der linearen Anpassung mit 9%.

Die mittleren Tiefen werden bei beiden Hochrechnungen überschätzt, d.h. die Becken sind im Vergleich zum gemessenen Wert zu tief. Während bei P1 die Abweichung bei den Tiefen maximal 4% beträgt, liegt sie bei P3 bei bis zu 17%.

Auch bei den Volumina schneidet die lineare Hochrechnung (P1) besser ab. Die maximale Abweichung zum gemessenen Wert beträgt 7%. Bei der Hochrechnung mit einem Polynom 3. Grades (P3) liegt die maximale Abweichung bei 10%. Es fällt hier auf, dass das Prielvolumen *PV* des Tidebeckens bei beiden Hochrechnungen zu hoch berechnet wird. Im Gegensatz hierzu wird das Tideprisma *P* bei P1 ebenfalls zu hoch, jedoch bei P3 zu niedrig berechnet.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass sich die Hochrechnung für eine Abschätzung der Entwicklung dieses Tidebeckens grundsätzlich eignet. Die Abweichungen insbesondere bei der linearen Hochrechnung halten sich bei der Piep mit maximal 7% in Grenzen, so dass die lineare Annäherung zur weiteren Analyse herangezogen wird.

	1991	2010	2020	2030	2040	2050
Tidekennwerte [m zu NN]						
MThw	1.56	1.64	1.68	1.72	1.76	1.80
MTmw	0.45	0.48	0.49	0.51	0.53	0.54
MTnw	-1.68	-1.60	-1.56	-1.52	-1.48	-1.44
MThb	3.24	3.24	3.24	3.24	3.24	3.24
Flächen [km²]						
Gesamtfläche	209.3 104%	237.8 109%	251.8 116%	265.6 125%	279.5 134%	293.2 145%
Fläche unter MTnw:						
Sublitoral	95.2 47%	115.8 51%	126.0 53%	136.6 55%	147.7 58%	159.3 60%
Wattflächen:						
Eulitoral	108.8 53%	112.0 49%	110.9 47%	109.6 45%	108.3 42%	106.6 40%
Mittl. Sedimenthöhen [m]						
Charakteristische Watthöhe	1.64	1.76	1.77	1.77	1.77	1.76
Tiefen [m]						
Tiefe zu NN bei MThw	-2.16	-2.30	-2.43	-2.59	-2.75	-2.93
Tiefe zu NN bei MTnw	-6.80	-6.99	-7.12	-7.28	-7.44	-7.60
Maximale Tiefe	-26.05	-29.62	-31.35	-33.08	-34.82	-36.55
Volumina [Mio. m³]						
Fassungsvolumen bei MThw	538.3 100%	551.8 100%	555.7 100%	562.1 100%	570.3 100%	580.0 100%
Fassungsvolumen bei NN	337.4 63%	360.0 65%	368.0 66%	377.4 67%	387.9 68%	399.3 69%
Prielvolumen: PV	232.4 43%	259.6 47%	270.8 49%	283.0 50%	296.2 52%	310.0 53%
Tideprisma: P	305.8 57%	292.2 53%	284.9 51%	279.1 50%	274.2 48%	270.0 47%

Tab. 8.2: Flächen-, Tiefen- und Volumenverteilung im Tidebecken Piep für das Szenario bis 2050.

Nachdem durch den Vergleich zwischen den gemessenen und hochgerechneten Parameter gezeigt worden ist, dass die lineare Hochrechnung prinzipiell eingesetzt werden kann, sollen nun die Parameter für das gewählte IPCC-Szenario bis 2050 analysiert werden (Tab. 8.2). Für einen besseren Vergleich wurden wieder die Parameter für die letzte zur Verfügung stehende Vermessung von 1991 hinzugefügt.

Auf Basis der Hochrechnung lässt sich für das Tidebecken der Piep feststellen, dass sich bei einem weiteren Meeresspiegelanstieg von 0.4 cm pro Jahr (vgl. Kapitel 7) der Anteil des

Sublitorals stark ansteigt und gleichzeitig der des Eulitorals abnimmt. Die Wattflächen werden bei einem prognostizierten Meeresspiegelanstieg von 24 cm von derzeit 53 % auf 40 % bis 2050 abnehmen. Wendet man den Ansatz von MISDORP et al. (1990) auf die Piep an, so stellt man fest, dass man im Trend zu ähnlichen Aussagen kommt (vgl. Kap. 7.2.3). Jedoch reduzieren sich beim MISDORP-Ansatz die Wattflächen bei einem Meeresspiegelanstieg um 50 % und dies, obwohl ein Meeresspiegelanstieg angenommen wird, der mit 50 cm mehr als doppelt so hoch angenommen wird wie in dieser Untersuchung auf Basis des mittleren IPCC-Szenarios.

MISDORP et al. (1990) gehen davon aus, dass die Tideströmungsgeschwindigkeit in den Prielen zunehmen wird. Es wird zu Erosionen in den Prielen und im Seegatt kommen. Dagegen kann auf den Wattflächen möglicherweise Sedimentation auftreten, weil die erodierten Sedimente aus den Prielen teilweise durch die steigenden Tideströmungen auf die Wattflächen transportiert werden können. Diese Aussagen werden durch die Hochrechnung dahingehend unterstützt, dass sowohl die maximale Tiefe als auch die mittlere Tiefe unter MT_{nw} – also in den Prielen – zunimmt.

In einer aktuellen Untersuchung von ASP (2001) wurde für die Piep festgestellt, dass eine bindige, konsolidierte Kleischicht in einem Tiefenbereich zwischen 16 m und 21 m eine Art „Erosionssprungschicht“ darstellt, die eine weitere Vertiefung der Rinnen hemmt. Bei der Hochrechnung hier wird dagegen davon ausgegangen, dass sich der Trend einer Vertiefung ohne „Hindernisse“ weiter fortführt. Erreicht die Erosionsbasis jedoch solch eine schwerer zu erodierende Kleischicht, so werden die Tiefen bei der Hochrechnung im Vergleich zur natürlichen Entwicklung deutlich überschätzt.

Das Prielvolumen nimmt von 1992 bis 2050 um 10 % zu und gleichzeitig das Tideprisma in der gleichen Größenordnung ab. Der Anteil des Wassers, der mit jeder Tide ein- und ausströmt, nimmt somit in der Hochrechnung ab. Das würde jedoch bedeuten, dass die Tideströmungsgeschwindigkeiten sich nicht erhöhen, weil weniger Wasser in der gleichen Zeit in das Tidebecken ein- und ausströmt. Man muss jedoch davon ausgehen, dass auch der Tidenhub bei einem Meeresspiegelanstieg weiter zunimmt. Dies wurde jedoch weder bei der Hochrechnung noch beim MISDORP-Ansatz berücksichtigt.

Es lässt sich insgesamt feststellen, dass bei beiden Ansätzen von einer Abnahme der Wattflächen im Tidebecken der Piep ausgegangen werden muss. Passt man, wie im Fall der Hochrechnung, die Geometrie mit an, so muss man davon ausgehen, dass die Wattflächen sogar noch stärker reduziert werden als bei MISDORP et al. (1990) angenommen.

8.2 Hochrechnung für den Norderhever-Heverstrom

In der Tabelle 8.3 sind zur Abschätzung der Qualität der Hochrechnung die gemessenen Werte von 1990 denen aus der Hochrechnung gegenübergestellt. Im Gegensatz zum Tidebecken der Piep wurde die Hochrechnung ausschließlich mit einer linearen Näherungsfunktion durchgeführt, weil für dieses Tidebecken insgesamt nur vier Vermessungszeitpunkte zur Verfügung standen.

	1990	P1
Tidekennwerte [m zu NN]		
MThw	1.64	1.64
MTmw	0.39	0.43
MTnw	-1.76	-1.76
MThb	3.40	3.40
Flächen [km²]		
Gesamtfläche	623.5	653.3
	100%	100%
Fläche unter MTnw:	337.8	339.9
Sublitoral	54%	53%
Wattflächen:	285.6	305.4
Eulitoral	46%	47%
Mittl. Sedimenthöhen [m]		
Charakteristische Watthöhe	1.46	1.72
Tiefen [m]		
Tiefe zu NN bei MThw	-3.09	-2.87
Tiefe zu NN bei MTnw	-8.07	-8.52
Maximale Tiefe	-29.61	-32.18
Volumina [Mio. m³]		
Fassungsvolumen bei MThw	1942.9	1821.3
	100%	100%
Fassungsvolumen bei NN	1301.7	1239.6
	67%	68%
Prielvolumen: PV	929.2	911.9
	48%	50%
Tideprisma: P	1013.8	909.4
	52%	50%

Tab. 8.3: Vergleich der hochgerechneten Werte für 1990 mit den gemessenen Werten.

Auch in diesem Tidebecken fällt beim Vergleich der hochgerechneten Werte für 1990 mit den gemessenen Werten auf, dass die flächenhaften Parameter insgesamt gut getroffen werden. Bei den Wattflächen gibt es mit 7% die größte Abweichung, wohingegen diese im Bereich des Sublitorals bei nur 5% zwischen 1990 und P1 liegt.

Die mittleren Tiefen werden bei der Hochrechnung wiederum überschätzt, d.h. die Becken sind auch im Tidebecken des Norderhever-Heverstrom im Vergleich zum gemessenen Wert zu tief. Die Abweichungen betragen bei den Tiefen 6 bis 9%.

Bei den Volumina fällt bei diesem Tidebecken auf, dass im Vergleich zur Piep alle hochgerechneten Werte systematisch unterschätzt werden. Das bedeutet, dass bei den Hochrechnungen für den Norderhever-Heverstrom davon ausgegangen werden muss, dass sowohl das Tideprisma als auch das Prielvolumen höher sein werden als die hochgerechneten Werte. Die Abweichungen schwanken zwischen 2 bis 10 %, wobei die maximale Abweichung von 10 % bei der Berechnung des Tideprismas auftritt.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Abweichungen zwischen gemessenen und hochgerechneten Werten beim Tidebecken des Norderhever-Heverstrom etwas größer sind als bei der Piep. Dies ist einerseits mit der besseren Datenlage – mehr Vermessungszeitpunkte – und andererseits mit dem Abstand der letzten Stützstelle zum hochgerechneten Wert zu begründen. Bei der Piep liegt die letzte Stützstelle vor dem hochgerechneten Wert von 1991 nur sechs Jahre zurück (1985), beim Norderhever-Heverstrom hingegen liegt die letzte Stützstelle vor dem hochgerechneten Wert von 1990 sechzehn Jahre zurück (1974). Trotzdem sind die Abweichungen mit maximal 10 % so gering, dass für die Zukunft verlässliche Trendaussagen zur morphologischen Entwicklung des Tidebeckens möglich sind.

	1990	2010	2020	2030	2040	2050
Tidekennwerte [m zu NN]						
MThw	1.64	1.72	1.76	1.80	1.84	1.88
MTmw	0.39	0.48	0.50	0.53	0.55	0.57
MTnw	-1.76	-1.68	-1.64	-1.60	-1.56	-1.52
MThb	3.40	3.40	3.40	3.40	3.40	3.40
Flächen [km²]						
Gesamtfläche	623.5	671.4	707.2	743.9	781.3	819.3
	100%	101%	102%	103%	105%	108%
Fläche unter MTnw:	337.8	370.6	400.0	431.3	463.7	497.4
Sublitoral	54%	55%	57%	58%	60%	62%
Wattflächen:	285.6	299.5	303.9	306.6	309.0	310.6
Eulitoral	46%	45%	43%	42%	40%	38%
Mittl. Sedimenthöhen [m]						
Charakteristische Watthöhe	1.46	1.51	1.50	1.48	1.47	1.47
Tiefen [m]						
Tiefe zu NN bei MThw	-3.09	-3.07	-3.15	-3.24	-3.34	-3.45
Tiefe zu NN bei MTnw	-8.07	-8.37	-8.49	-8.59	-8.68	-8.76
Maximale Tiefe	-29.61	-34.53	-36.62	-38.99	-41.37	-43.75
Volumina [Mio. m³]						
Fassungsvolumen bei MThw	1942.9	1965.9	2003.9	2044.2	2086.6	2130.9
	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Fassungsvolumen bei NN	1301.7	1312.3	1341.5	1374.1	1409.4	1446.9
	67%	67%	67%	67%	68%	68%
Prielvolumen: PV	929.2	972.3	1007.6	1045.6	1085.9	1128.3
	48%	49%	50%	51%	52%	53%
Tideprisma: P	1013.8	993.6	996.3	998.7	1000.7	1002.5
	52%	51%	50%	49%	48%	47%

Tab. 8.4: Flächen-, Tiefen- und Volumenverteilung im Tidebecken Norderhever-Heverstrom für das Szenario bis 2050.

Die zukünftige morphologische Entwicklung des Tidebeckens Norderhever-Heverstrom soll nun wiederum anhand der Veränderung der Parameter aufgezeigt werden. Der Anteil des Sublitorals wird wie bei der Piep stark ansteigen und gleichzeitig der des Eulitorals abnehmen. Die Wattflächen werden bei einem prognostizierten Meeresspiegelanstieg von 24 cm von derzeit 46 % auf 38 % bis 2050 abnehmen. Vergleicht man diesen Wert für 2050 mit dem der Piep für 2050, so fällt auf, dass trotz einer besseren aktuellen Ausgangssituation in der Piep der Anteil der Wattflächen im Tidebecken im Jahr 2050 fast gleich ist.

Bei den Tiefenwerten muss besonders die maximale Tiefe beachtet werden. Geht man von den Werten der Hochrechnung aus, so vertieft sich das Becken um fast 15 m. Die Analyse der Abweichungen zwischen Hochrechnung und gemessenen Wert ergibt jedoch für die maximale Tiefe eine Abweichung von 9 % (vgl. Tab. 8.3). Man sollte deshalb den Wert von -43.75 m als maximale Tiefe für 2050 nicht überinterpretieren, sondern lediglich den Trend einer Vertiefung festhalten.

Das Prielvolumen nimmt von 1990 bis 2050 im Vergleich zur Piep nur um 5 % zu, so dass im Gegenzug das Tideprisma in der gleichen Größenordnung abnimmt. Auch für dieses Tidebecken gilt, dass bei einer Berücksichtigung eines Anstiegs des Tidenhubs bei der Hochrechnung vielleicht ein anderer Trend zu verzeichnen gewesen wäre.

8.3 Hochrechnung für das Hoogeloch

Als letztes Tidebecken soll das Hoogeloch als ein Tidebecken ohne bisherige bauliche Eingriffe herangezogen werden. Auch hier erfolgt zuerst eine Abschätzung der Qualität der Hochrechnung.

	1992	P1
Tidekennwerte [m zu NN]		
MThw	1.32	1.32
MTnw	0.50	0.54
MTnw	-1.52	-1.52
MThb	2.84	2.84
Flächen [km²]		
Gesamtfläche	18.0	19.0
	110%	107%
Fläche unter MTnw:	2.9	3.0
Sublitoral	17%	16%
Wattflächen:	13.8	15.1
Eulitoral	83%	84%
Mittl. Sedimenthöhen [m]		
Charakteristische Watthöhe	1.57	1.56
Tiefen [m]		
Tiefe zu NN bei MThw	-0.23	-0.24
Tiefe zu NN bei MTnw	-2.44	-3.07
Maximale Tiefe	-6.70	-6.70
Volumina [Mio. m³]		
Fassungsvolumen bei MThw	21.8	22.3
	100%	100%
Fassungsvolumen bei NN	6.6	6.8
	30%	30%
Prielvolumen: PV	1.5	2.0
	7%	9%
Tideprisma: P	20.3	20.3
	93%	91%

Tab. 8.5: Vergleich der hochgerechneten Werte für 1992 mit dem gemessenen Werten.

Bei den Abweichungen zwischen dem gemessenen Werten für 1992 und dem hochgerechneten Werten fällt auf, dass die Abweichungen in der Regel in ähnlichen Dimensionen liegen wie bei den anderen Tidebecken (Flächen bis 6 %, mittlere und maximale Tiefen bis 4 % und bei den Volumina bis 3 %). Allerdings gibt es bei der mittleren Tiefe zu NN bei *MTnw* – also der mittleren Tiefe bei Niedrigwasser (ohne Wattflächen) – und beim Prielvolumen erhebliche Abweichungen von 26 % bzw. 34 %. Es wird die mittlere Tiefe des Tidebeckens im Sublitoral um ein Viertel überschätzt, so dass das Prielvolumen ebenfalls stark überschätzt wird. Das sollte bei der Analyse der hochgerechneten Parameter bis 2050 unbedingt beachtet werden.

	1992	2010	2020	2030	2040	2050
Tidekennwerte [m zu NN]						
MThw	1.32	1.39	1.43	1.47	1.51	1.55
MTmw	0.50	0.55	0.56	0.58	0.59	0.61
MTnw	-1.52	-1.45	-1.41	-1.37	-1.33	-1.29
MThb	2.84	2.84	2.84	2.84	2.84	2.84
Flächen [km²]						
Gesamtfläche	18.0 110%	18.7 113%	19.4 116%	20.0 119%	20.7 122%	21.4 126%
Fläche unter MTnw: Sublitoral	2.9 17%	3.4 20%	4.0 23%	4.6 26%	5.2 28%	5.8 31%
Wattflächen: Eulitoral	13.8 83%	13.7 80%	13.5 77%	13.3 74%	13.2 72%	13.0 69%
Mittl. Sedimenthöhen [m]						
Charakteristische Watthöhe	1.57	1.53	1.51	1.48	1.45	1.41
Tiefen [m]						
Tiefe zu NN bei MThw	-0.23	-0.27	-0.30	-0.35	-0.39	-0.45
Tiefe zu NN bei MTnw	-2.44	-2.59	-2.66	-2.75	-2.86	-2.96
Maximale Tiefe	-6.70	-6.80	-7.42	-8.05	-8.68	-9.30
Volumina [Mio. m³]						
Fassungsvolumen bei MThw	21.8 100%	22.7 100%	23.2 100%	23.9 100%	24.5 100%	25.2 100%
Fassungsvolumen bei NN	6.6 30%	7.0 31%	7.5 32%	8.1 34%	8.6 35%	9.1 36%
Prielvolumen: PV	1.5 7%	2.0 9%	2.4 10%	2.9 12%	3.4 14%	3.9 15%
Tideprisma: P	20.3 93%	20.7 91%	20.8 90%	21.0 88%	21.2 86%	21.3 85%

Tab. 8.6: Flächen-, Tiefen- und Volumenverteilung im Tidebecken Hoogeloch für das Szenario bis 2050.

Wie durch den Vergleich in Tabelle 8.5 zu erwarten war, nimmt die mittlere Tiefe im Sublitoral und das Prielvolumen bis 2050 sehr stark zu. Es ist davon auszugehen, dass die Werte für das Prielvolumen um ein Drittel geringer sein werden als hier hochgerechnet. Der Trend einer Zunahme des Prielvolumens und einer gleichzeitigen Abnahme des Tideprismas ist jedoch gegeben.

Der Anteil der Wattflächen, der in diesem Tidebecken mit derzeit 83 % außergewöhnlich hoch ist, wird bis 2050 auf 69 % abnehmen. Dieses Tidebecken hat demnach trotz eines steigenden Meeresspiegels noch ausreichende Reserven in Bezug auf die Wattflächen.

8.4 Fazit

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich der vorgestellte Ansatz einer Hochrechnung generell eignet, um Trendaussagen über die zukünftige Entwicklung eines Tidebeckens bei einem Meeresspiegelanstieg zu machen. Die Qualität der Hochrechnung wurde für jedes Tidebecken durch einen Vergleich des letzten gemessenen mit dem auf diesen Zeitpunkt hochgerechneten Wert abgeschätzt. Die Abweichungen bei einer linearen Anpassung der Beckengeometrie ist mit in der Regel bis zu 10% in einem Rahmen, der für zukünftige Aussagen über die morphologische Entwicklung eines Tidebeckens akzeptiert werden kann. Das Ziel dieser Hochrechnung war lediglich verlässliche Trendaussagen machen zu können, was mit diesem Ansatz erreicht worden ist.

Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass sich die Prozesse in der Natur nicht immer linear verhalten. Die Verlagerung eines Prieles kann mit diesem Verfahren also nicht abgebildet werden, jedoch der Trend einer Vertiefung im Priel sehr wohl.

9. 3D-Visualisierung und Animation der zeitlichen Entwicklung ausgewählter Tidebecken

Das Sprichwort „Ein Bild sagt mehr als tausend Worte“ ist allgemein bekannt. Es besitzt gerade im Bereich der Geowissenschaften Gültigkeit, weil das Bild bzw. die Abbildung eine wesentliche Hilfe beim Erkunden und Verstehen räumlicher Prozesse und Strukturen bietet. Die Darstellung von Geodaten in visueller, bildhafter Form ist schon seit langem bekannt und wird sowohl für die Analyse und Interpretation von Zusammenhängen und Veränderungen als auch zur Modellierung und Entscheidungsfindung wirkungsvoll eingesetzt (STREIT 2000).

STREIT (2000) nennt als Beispiel für eine historische Nutzung der Visualisierung die raumbezogene Analyse eines Cholera-Ausbruchs in der Mitte des 19. Jahrhunderts in London. In Abbildung 9.1 ist eine Karte von Dr. John Snow dargestellt, der damals die Wohnorte von 500 Cholera-Opfern in eine Karte eintrug. Er gewann anhand dieser Karte Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen der Wasserversorgung und dem Auftreten der Krankheit. Der Ursprung der Epidemie (rot markierter Brunnen) konnte aufgrund der gemeinsamen Darstellung der Brunnen und der von der Cholera betroffenen Wohnungen über eine rein visuelle Analyse identifiziert werden.

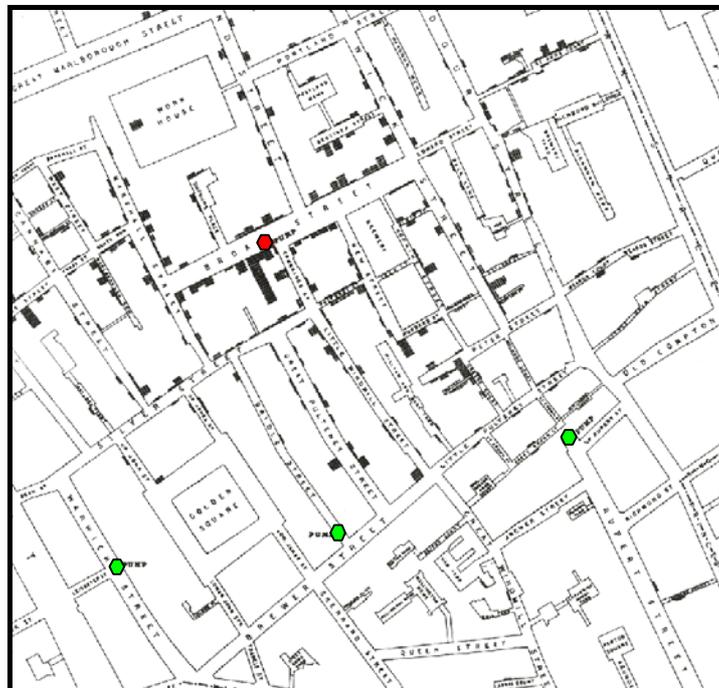


Abb. 9.1: Darstellung der Wohnorte von Opfern eines Cholera-Ausbruchs in einem Londoner Stadtviertel (schwarze Balken) und der vorhandenen Wasserbrunnen ("pumps" - nachträglich eingefärbt).

Quelle: STREIT (2000)

In den modernen Geowissenschaften spielt die Analyse sehr komplexer Daten (z.B. digitale Höhenmodelle, Simulationsergebnisse) und großer Datenmengen eine wichtige Rolle, so dass

die Auswertung ohne Computerunterstützung teilweise nicht mehr zu bewältigen ist. Sowohl die Fortschritte in der Computertechnik (z.B. größere Festplatten, schnellere Zugriffe, verbesserte Grafikkarten) als auch in der Visualisierung (verbesserte Softwareprogramme) führen zu tiefgreifenden Veränderungen im Bereich der Informationsdarstellung und -aufnahme (DRANSCH 1997). Um den neuen Anforderungen Rechnung zu tragen, müssen räumliche Informationen immer häufiger dynamisch analysiert und präsentiert werden (vgl. u.a. FRIEDHOFF & BENZON 1989, STANKOWSKI 1989, DIBIASE 1990, MACEACHREN 1994, MACEACHREN & KRAAK 1997, HUANG et al. 2001).

Da auch der wissenschaftliche Forschungsprozess an sich als ein interaktiver Prozess angesehen wird, kann die Visualisierung den Wissenschaftler bei der Datenanalyse unterstützen (WATSON 1990). Der Wissenschaftler bzw. Nutzer (engl. *user*) gewinnt Einblick (engl. *insight*) in das zu untersuchende Phänomen, formuliert daraus Hypothesen (engl. *hypothesis*), sammelt Daten (engl. *data collection*) und wertet diese aus (engl. *computation*; vgl. Abb. 9.2). Er interpretiert und überprüft das Ergebnis (engl. *result*) und durchläuft gegebenenfalls den Prozess erneut, um dabei die Ergebnisse zu verbessern (DRANSCH 1997).

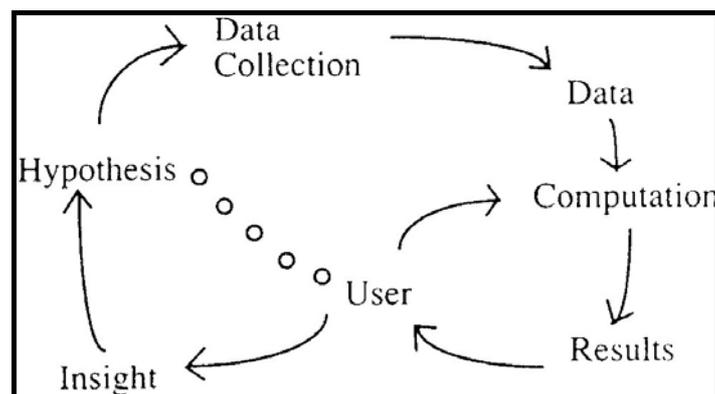


Abb. 9.2: Modell des wissenschaftlichen Forschungsprozesses.
Quelle: DRANSCH 1997 (nach WATSON 1990)

Ein Schwerpunkt der wissenschaftlichen Visualisierung liegt im Bereich der Datenexploration (engl. *Exploratory Data Analysis*). Dort werden mittels graphischer Darstellungen Einblicke in die Daten und ihre Struktur gewonnen, die möglicherweise mit herkömmlichen statistischen Methoden nicht sichtbar werden (TURKEY 1977, 1980, DIACONIS 1985). Die Datenexploration eignet sich vor allem für die Analyse großer Datenmengen mit multi-dimensionalem Charakter oder Zeitreihendaten, wie sie auch in dieser Arbeit zum Einsatz kommen.

9.1 Visualisierung

Im Bereich der Informatik wird die Visualisierung als die „Transformation von Daten in ein sichtbares Bild zur Unterstützung der Exploration (Erkundung), Kognition (Erkennen) und Explanatation (Erklärung) von Strukturen und Prozessen“ definiert (STREIT 2000). Wie auch die Abbildung 9.2 verdeutlicht, ist die Visualisierung eine wichtige Methode für den wissenschaftlichen Erkenntnisprozess und zugleich ein Verfahren zur raschen Übermittlung komplexer Informationen zwischen Wissenschaft und Praxis.

Die Geovisualisierung spezifiziert den obigen Ansatz auf raumbezogene Informationen. Deren traditionelle Darstellung in Form von analogen Karten ist aufgrund des verwendeten Mediums Papier allerdings beschränkt, vor allem weil eine Karte lediglich einen „statischen Charakter“ hat (vgl. Abb. 9.1). Der vierdimensionale Georaum musste bisher mit seinen drei Raumdimensionen und der Zeit auf die zweidimensionale Kartenebene reduziert werden. In jüngster Zeit wird jedoch zunehmend auch das Potential des Computers für eine erweiterte Informationspräsentation genutzt (z.B. Multimedia und Animationen). Der Schwerpunkt der Forschung im Bereich der Visualisierung liegt mittlerweile u.a. auf den Gebieten der 3D-Computergraphik, der Zeitreihenanimation und der Interaktivität in Echtzeitsimulationen (HUANG et al. 2001, RIEDL 2002).

In der vorliegenden Arbeit soll die Visualisierung eingesetzt werden, um die morphologischen Veränderungen in den dreidimensionalen Höhenmodellen des Wattenmeeres im Laufe der Zeit darzustellen. Bei der Untersuchung der zeitlichen Entwicklungen der Tidebecken wird ein komplexer vierdimensionaler Georaum betrachtet, der sich nur unzureichend auf eine zweidimensionale Kartenebene reduzieren lässt. Eine traditionelle Karte kann diese Anforderungen nicht erfüllen. Aber auch ein GIS bietet in der Regel nur die Möglichkeit, dreidimensionale Daten statisch zu visualisieren. Zeitliche Abläufe lassen sich in einem GIS nur beschränkt darstellen. Deshalb soll in dieser Arbeit zusätzlich zur GIS-gestützten Analyse der morphologischen Entwicklung im Wattenmeer auf eine dynamische Visualisierung in Form einer Computer-Animation zurückgegriffen werden. Die Zeit wird als vierte Dimension direkt eingesetzt, um die Veränderungen der Tidebecken im Laufe der Jahre zu dokumentieren.

9.2 Animation

Der Begriff Animation leitet sich aus dem Lateinischen „animare“ ab. Wörtlich übersetzt bedeutet „animare“ beleben. Im Bereich der Graphik wird unter einer Animation die Erzeugung belebter Bilder verstanden. Genauer gesagt, handelt es sich bei einer Animation um eine Sequenz von Einzelbildern, die beim Betrachter die Illusion flüssiger Bewegung erweckt. Animationen bzw. Computer-Animationen werden nicht nur für wissenschaftliche Zwecke eingesetzt, sondern vor allem im Design-, Multimedia- sowie Film- und Fernsbereich, wo sie auch ihren Ursprung haben. In neuerer Zeit werden sie auch zur Gestaltung von Web-Sites und grafischen Benutzeroberflächen herangezogen (HUANG 2001, RIEDL 2002).

DRANSCH (1997) definiert die Animation aus Sicht der Kartographie als eine vollständig am Computer generierte Bildsequenz aus sich sukzessiv verändernden Darstellungen. Die Veränderungen stehen dabei in einem logischen Kontext und können sich auf alle bildbeschreibenden Parameter beziehen.

Das Prinzip der Animation, mittels einer Sequenz variierender Bilder fließende Bewegung oder Veränderung darzustellen, basiert auf perzeptiven Vorgängen. Es beruht auf der Tatsache, dass das Auge nicht in der Lage ist, in einer Sequenz sich leicht variierender Bilder, die in schneller Folge auf die Retina projiziert wird, einzelne Bilder wahrzunehmen. Stattdessen wird die Sequenz als zusammenhängendes Ganzes wahrgenommen, in dem eine kontinuierliche Veränderung abläuft (WERTHEIMER 1912, DRANSCH 1997).

In der Computer-Animation werden zwei grundsätzliche Anwendungsbereiche unterschieden:

- temporale Animationen und
- non-temporale Animationen.

Bei der temporalen Animation werden die Veränderungen von räumlichen Daten in einem Zeitintervall gezeigt. Sie eignet sich daher insbesondere für die dynamische Darstellung georäumlicher Veränderungen und Prozesse. Bei der non-temporalen Animation werden dagegen die räumlichen Daten eines Zeitpunktes in unterschiedlicher Aufbereitung und graphischer Darstellung wiedergegeben. Es handelt sich also um eine variable Darstellung georäumlicher Informationen (DRANSCH 1997).

In dieser Arbeit soll eine temporale Animation angefertigt werden. Dabei sollen die Veränderungen der Morphologie in einem Tidebecken im Laufe der Zeit dargestellt werden. Die Geoobjekte (hier die digitalen Höhenmodelle) werden in ihrem räumlichen

Zusammenhang und in Form von Zeitreihen (über die verschiedenen Vermessungsjahrgänge) auch in ihrem zeitlichen Kontext dargestellt.

9.3 Animationsprozess und -erstellung

Die Erstellung einer Animation erfolgt in mehreren Arbeitsschritten (Abb. 9.3). Sie lässt sich in die zwei übergeordneten Teilprozesse der Konzeption und der Erzeugung aufteilen.

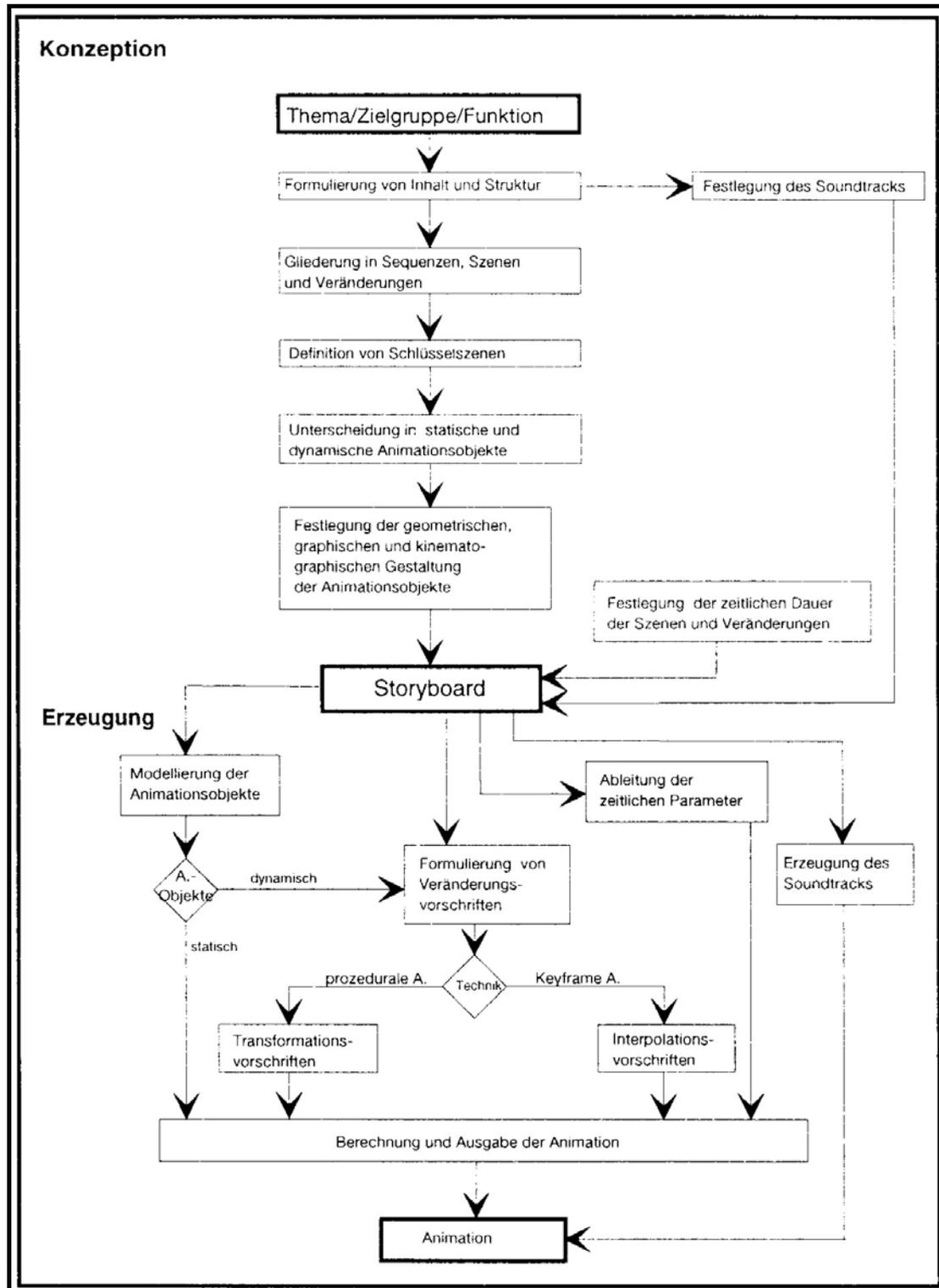


Abb. 9.3: Der Animationsprozess.

Quelle: DRANSCH (1997)

Bevor anhand der Abbildung 9.3 der Animationsprozess dieser Arbeit detailliert vorgestellt wird, muss auf ein Problem eingegangen werden, das sich mit der Transformation der Daten aus dem GIS in die Animationssoftware beschäftigt.

Es wurde bereits angesprochen, dass ein GIS zwar die Möglichkeit bietet, 3D-Daten zu visualisieren und zu analysieren, jedoch keine ausreichenden Möglichkeiten zur Animation bereitstellt. Auf der anderen Seite gibt es mächtige Softwarepakete, die im Bereich der 3D-Animation beheimatet sind (z.B. MAYA, 3D Studio Max), jedoch das Einlesen realistischer Geländeoberflächen aus einer GIS-Software standardmäßig nicht anbieten. Somit steht der Benutzer bereits vor der eigentlichen Erstellung der Animation vor dem Problem, dass er z.B. sein digitales Höhenmodell nicht direkt in die gängigen Animationsprogramme einlesen kann. Deshalb mussten in dieser Arbeit die Höhenmodelle zuerst als ASCII-Dateien aus ArcInfo ausgelesen werden, um durch eine eigene programmierte Anpassung ein Format zu erzeugen, das in das Animationsprogramm MAYA von Alias Wavefront eingelesen werden konnte (vgl. Anhang B). Sind die Rasterzellen in das von MAYA erwartete Format überführt worden, so werden die für die Animation notwendigen Höhenmodelle in das Animationsprogramm importiert. Dabei werden alle für das jeweilige Tidebecken zu animierenden Höhenmodelle nacheinander als sich überlagernde Ebenen (engl. *planes*) in einen einzigen File eingeladen.

Im Folgenden wird anhand des Schemas der Abbildung 9.3 der Prozess zur Erstellung der hier eingesetzten Animationen detailliert erläutert. Eingangs sollte man sich mit den wesentlichen Aspekten der zu erstellenden Animation in der so genannten Konzeptionsphase auseinandersetzen.

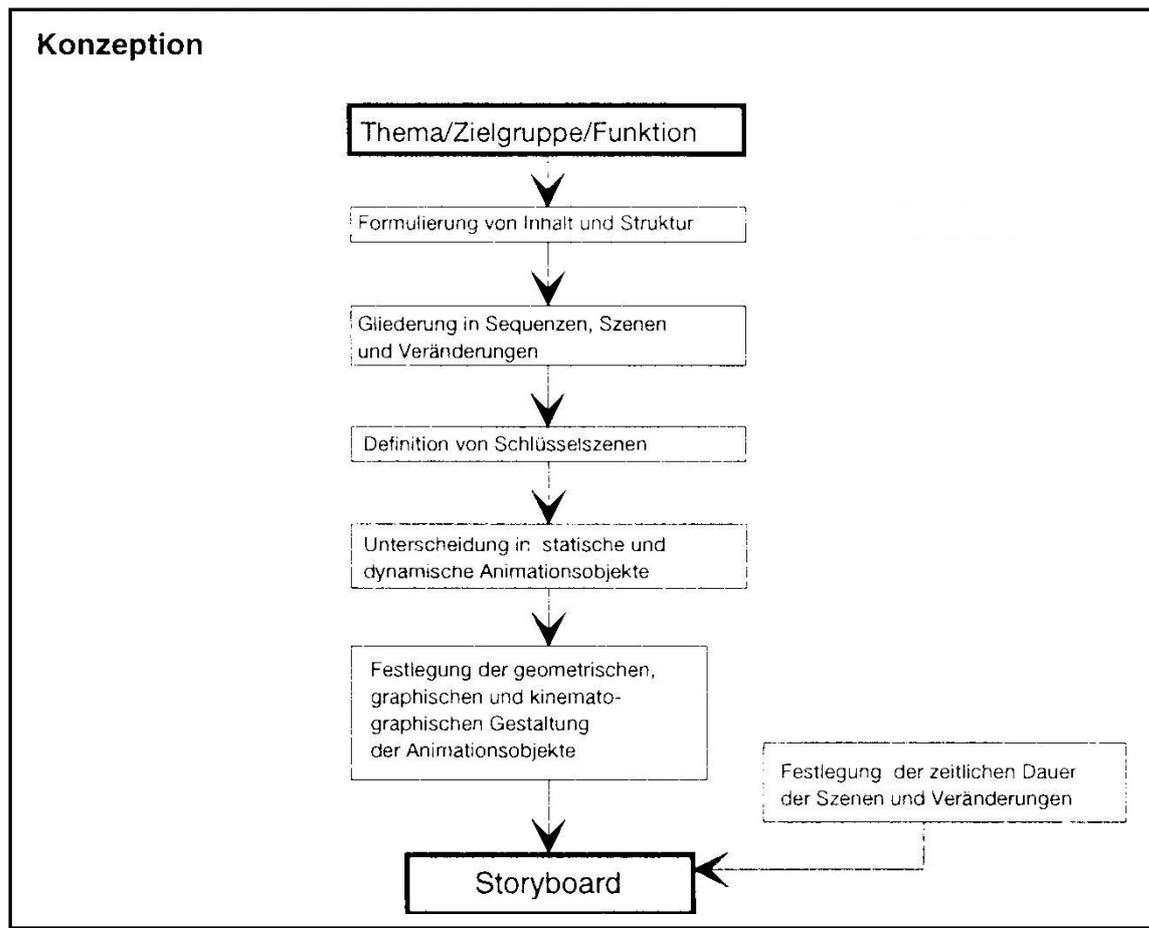


Abb. 9.4: Die Konzeptionsphase beim Animationsprozess.

Quelle: DRANSCH (1997); verändert

Dabei muss zuerst das Thema, die Zielgruppe und die Funktion der Animation genau definiert werden (Abb. 9.4). In dieser Arbeit soll die Animation eingesetzt werden, um die morphologischen Veränderungen in den dreidimensionalen Höhenmodellen des Wattenmeeres im Laufe der Zeit darzustellen. Gerade bei dieser Fragestellung bietet sich die Erstellung einer Animation an, um – in diesem Fall einem Fachpublikum – die Analyse der hier verwendeten komplexen Daten (digitale Höhenmodelle) und der großen Datenmengen mit ihrem multidimensionalen Charakter anschaulich darstellen zu können (vgl. hierzu FRIEDHOFF & BENZON 1989, STANKOWSKI 1989).

Nachdem das Ziel der Animation definiert ist, wird der genaue Inhalt und die Struktur formuliert. Die Strukturierung und die Gliederung der Animation in Sequenzen, Szenen und Veränderungen erfordern bereits sehr konkrete Vorstellungen über den Aufbau der Animation. Zur Verdeutlichung der Begrifflichkeiten ist zu erwähnen, dass eine Menge von Animationsobjekten (s.u.) eine Szene erzeugt. Eine Folge von Szenen, die aufgrund von Veränderungen variieren, bildet dann eine Sequenz, wobei wiederum eine oder mehrere Sequenzen die Animation aufbauen (MAGNENAT-THALMANN et al. 1990).

In der hier vorgestellten Animation wird beispielsweise auf eine temporale Animation zurückgegriffen, welche zum Ziel hat, die Veränderungen von räumlichen Daten in einem Zeitintervall darzustellen. Die temporale Animation wird vor allem zur dynamischen Darstellung geo-räumlicher Veränderungen und Prozesse eingesetzt (DRANSCH 1997).

Nach der Gliederung der Animation, die in dieser Arbeit durch die zeitliche Abfolge der Vermessungsjahrgänge der digitalen Höhenmodelle vorbestimmt ist, müssen die so genannten Schlüsselszenen (engl. *keyframes*) definiert werden. Es ist bei dieser Animation vorgesehen, dass alle zur Verfügung stehenden Vermessungszeitpunkte in die Animation eingebracht werden, um die an die natürliche Entwicklung gekoppelten morphologischen Änderungen aufzuzeigen. Deshalb werden die Jahre, für die Vermessungen vorliegen, als Schlüsselszenen festgelegt. Der morphologische Zustand zu diesen Zeitpunkten soll in der Animation genau wiedergegeben werden.

Als nächstes ergibt sich die Frage, welche Animationsobjekte statisch und welche dynamisch dargestellt werden. Die Animationsobjekte sind die Grundelemente einer Animation. Sie lassen sich weiter in die eigentlichen Graphikobjekte, Kamera und Lichtquelle unterteilen. In einer geowissenschaftlichen Animation werden die Graphikobjekte durch die Geoobjekte dargestellt, welche hier durch die zu animierenden Höhenmodelle gegeben sind. Hingegen sind die Kameraposition (Blickrichtung) und das Beleuchtungsmodell (Lichtquelle) in dieser Animation statische Objekte, da beide während des Ablaufs der gesamten Animation unverändert bleiben. Ein gegenteiliges Beispiel wäre ein Überflug über das Wattenmeer auf einem vorgegebenen Pfad (vgl. hierzu ANDRESEN 2000).

Der in der Abbildung 9.4 aufgeführte nächste Schritt der Festlegung der geometrischen, graphischen und kinematographischen Gestaltung der Animationsobjekte entfällt hier insofern, als dass die Höhenmodelle als Animationsobjekte bereits im GIS modelliert und somit geometrisch und graphisch festgelegt sind.

Nachdem die konzeptionellen Bedingungen für die Animation fixiert worden sind, kann nun mit der eigentlichen Erstellung der Animation begonnen werden, wobei ebenfalls auf das Schema der Abbildung 9.3 zurückgegriffen werden soll.

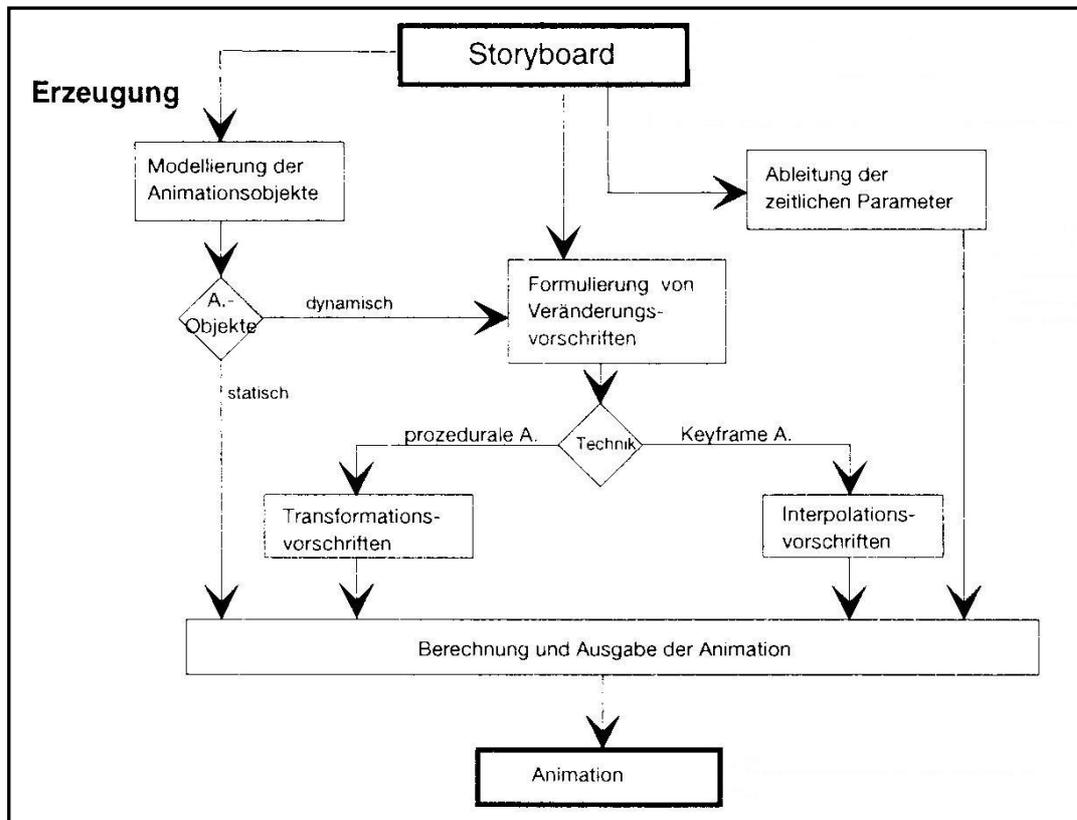


Abb. 9.5: Die Erzeugungsphase beim Animationsprozess.

Quelle: DRANSCH (1997); verändert

Es wurde bereits bei der Konzeption angesprochen, dass die geometrische Modellierung der wesentlichen Graphikobjekte (digitale Höhenmodelle) bereits im GIS erfolgt ist, so dass nur noch die Modellierung einiger zusätzlicher Graphikobjekte sowie der Kamera (Position, Distanz, Neigungs- und Richtungswinkel) und der Beleuchtung (Position der Lichtquelle, Lichtfarbe, Lichtintensität und Beleuchtungsmodell) erfolgen muss. Die Modellierung zusätzlicher Graphikobjekte bezieht sich in dieser Arbeit auf die Erstellung von Ebenen (engl. *planes*), die zur Unterteilung bestimmter Höhenbereiche im Höhenmodell herangezogen werden. Gemeint sind hier sich dynamisch an den jeweiligen Vermessungszeitpunkt anpassende *MThw*- und *MTnw*-Bezugsebenen, so dass optisch beim Abspielen der Animation die Tiefen- bzw. Höhenbereiche des Subtidals, Intertidals und des Supratidals durch verschiedene Farbgebungen unterschieden werden können.

Sind die Animationsobjekte erzeugt, so muss unterschieden werden, ob sie in der Animation dynamisch oder statisch auftreten (s.o.). Die statischen Animationsobjekte sind einerseits die Kameraposition und andererseits das Beleuchtungsmodell (Lichtquelle), d.h. die Blickrichtung und somit auch die Position der Lichtquelle (hier als ambientes weißes Umgebungslicht)

bleiben während des Ablaufs der Animation konstant. Bei den dynamischen Animationsobjekten – hier den Graphikobjekten (digitales Höhenmodell und Bezugsebenen) – müssen hingegen Veränderungsvorschriften festgelegt werden (Abb. 9.5). Dieser Bereich ist der zentrale Kern einer Animation, der vor allem für die Qualität der gesamten Animation verantwortlich ist.

Werden – wie in dieser Arbeit – die Veränderungen von Animationsobjekten zwischen zwei Schlüsselszenen mit Hilfe einer Interpolation erzeugt, so spricht man von einer Keyframe-Animation. Die Interpolation der zwischen den Schlüsselszenen (engl. *keyframes*) liegenden Szenen (engl. *inbetweens*) erfolgt in der Regel über eine lineare Interpolation. Dabei werden die Parameter, welche die Animationsobjekte beschreiben (z.B. Positionskoordinaten, Farbwert), interpoliert (DRANSCH 1997).

In dieser Arbeit wird sowohl bei den Bezugsebenen für das *MThw* und *MTnw* als auch bei den Höhenmodellen auf eine lineare Interpolation zwischen den Schlüsselszenen, die durch die Vermessungszeitpunkte induziert werden, zurückgegriffen. Für die Höhenmodelle bedeutet dies, dass für jede Rasterzelle der Tiefenwert linear bis zur nächsten Schlüsselszene ab- oder zunimmt, je nachdem ob für den betrachteten Zeitraum eine Erosions- oder eine Sedimentationsphase in diesem Bereich des Tidebeckens vorherrscht. Dies wird in der Animation technisch durch eine Überblendung (engl. *blend shape*) des aktuellen Höhenmodells auf das Höhenmodell des folgenden Keyframes erreicht.

Zu diesem Zweck müssen die zeitlichen Parameter der Animation abgeleitet werden. Nimmt man als Beispiel die Animation für das Tidebecken der Piep, so sollen die morphologischen Veränderungen von 1937 bis 1991 dargestellt werden. Dies bedeutet, dass in der Animation ein Zeitraum von 54 Jahren darzustellen ist. Um den Eindruck einer fließenden Bewegung zu erzeugen, benötigt man 24 Bilder pro Sekunde (vgl. Kap. 9.2). Wählt man 6 Stützstellen für jedes darzustellende Jahr, so benötigt man für die 54 Jahre, in denen die Piep vermessungstechnisch erfasst ist, insgesamt 324 Bilder (engl. *frames*). Das bedeutet, dass pro Sekunde 6 Jahre vergehen und somit die gesamte Animation in diesem Fall 9 Sekunden dauert. Die Zuordnung der Vermessungen zu den entsprechenden Frames kann auf dieser Grundlage einfach berechnet werden. Beispielsweise liegt die Vermessung von 1973 36 Jahre vom Beginn der Animation im Jahr 1937 entfernt. Geht man dann davon aus, dass sechs Stützstellen bzw. Frames pro Jahr vorgegeben sind, so muss die Vermessung von 1973 dem Frame 216 zugeordnet werden.

Sind alle Komponenten der Animation festgelegt worden, kann die Berechnung und Ausgabe erfolgen. Die Berechnung bezieht sich vor allem auf das so genannte Rendern der Szenen. Dabei wird für jede Szene (Frame) die auf Basis der Kamera- und Lichtposition beeinflusste

Textur des Graphikobjektes berechnet. Da sich für jede Szene (Frame) entweder die Kamera- und Lichtposition oder das Graphikobjekt selbst verändert, muss jede Szene einzeln gerendert werden. Als Ausgabe – hier im Bildformat 1024 x 768 Pixel (bzw. 800 x 600 Pixel für die Teilbecken) - kann dann beispielsweise ein Video im AVI-Format, ein VRML-File oder ein Shockwave 3D-File (W3D-Format; z.B. zur weiteren Verarbeitung mit dem Autorenwerkzeug Macromedia Director) erzeugt werden.

9.4 VRML

Die erstellten Animationen wurden einerseits als Videos (AVI) und andererseits als VRML-Files (VRML) generiert. Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Ausgaben besteht darin, dass die Animation als Video über alle Zeitpunkte abläuft und somit die morphologischen Veränderungen betrachtet werden können, der Benutzer jedoch keine Möglichkeit hat, interaktiv in den Ablauf einzugreifen. Bei einer VRML-Ausgabe hat der Benutzer hingegen die Möglichkeit, die dargestellte Szene interaktiv vielfältig zu beeinflussen (z.B. durch Zoomen oder Drehen).

VRML ist eine Skriptsprache zur Beschreibung von virtuellen 3D-Welten, die über das World Wide Web ausgetauscht werden können. Die Abkürzung VRML steht für **V**irtual **R**eality **M**odelling **L**anguage. Ähnlich wie HTML (**H**yper **T**ext **M**arkup **L**anguage) ist VRML keine Programmiersprache im herkömmlichen Sinn, sondern eine Beschreibungssprache, mit der man definiert, wie dreidimensionale Objekte aussehen, wie sie in einer virtuellen Welt angeordnet sind und welche Wechselwirkung sie miteinander haben (vgl. Abb. 9.6).

```
#VRML V2.0 utf8
Background { skyColor [ 1.0 1.0 1.0 ] }
Transform {
  translation -4 0 0
  children [
    Shape {
      appearance Appearance { material Material {
        diffuseColor 1 0 0      # Farbe Rot
      }}
      geometry Sphere {}
    }
  ]
}
```

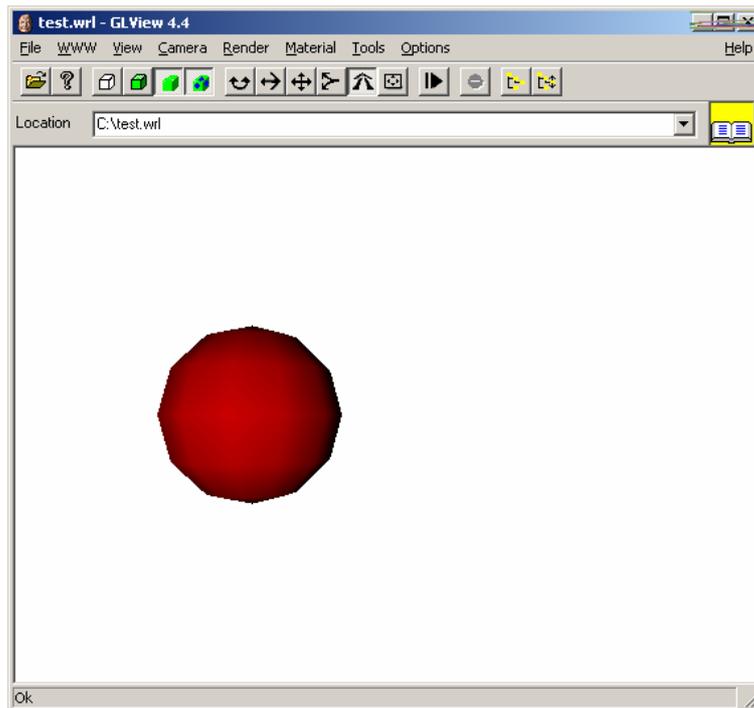


Abb. 9.6: Eine um vier Einheiten nach links verschobene rote Kugel in VRML.

Als die Pioniere von VRML gelten Mark Pesce und Tony Parisi, die erste Ideen zur Realisierung virtueller Welten im Internet hatten. Im Mai 1994 präsentierten sie auf der ersten Webkonferenz in Genf den Prototypen eines 3D-Browsers und den Entwurf einer Sprache zur Beschreibung von 3D-Objekten im Internet (VRML 1.0). Da zunächst noch wesentliche Elemente einer Virtual-Reality-Umgebung wie Interaktion und Animation fehlten, wurde die VRML-Gemeinde aufgerufen, sich weltweit an der Ausarbeitung eines erweiterten Standards zu beteiligen. Zur Koordinierung der weltweiten Aktivitäten gründeten acht VRML-Pioniere die „VRML Architecture Group (VAG)“, die bis zur Entstehung des VRML-Konsortiums als oberstes Gremium zur Weiterentwicklung von VRML fungierte. Nach einem bis dato einmaligen Abstimmungsverfahren wurde im August 1996 „Moving Worlds“ als VRML 2.0 Spezifikation freigegeben. Kurz nach dem Erscheinen von VRML 2.0 gründete sich ein VRML-Konsortium (VRMLC), an dem neben großen Softwarefirmen wie Microsoft, SUN, SGI und Netscape weitere 30 Unternehmen beteiligt waren. Die Aufgabe des Konsortiums bestand darin, VRML als offenen Standard für 3D-Multimedia und virtuelle Welten im Internet zu entwickeln, zu unterstützen und zur weiteren Verbreitung beizutragen. Mit geringen Änderungen wurde VRML 2.0 im September 1997 schließlich unter dem Namen VRML97 zum Industriestandard der „International Standards Organization (ISO)“ erklärt (KLOSS et al. 1998, DÄSSLER 1999).

Es gibt mittlerweile fast zu jedem gängigen 3D-Format ein VRML-Konvertierungsprogramm. Allerdings ist die Qualität der Konvertierung recht unterschiedlich. Bei statischen Modellen gibt es kaum Probleme. Viele Tools haben aber Probleme mit der Konvertierung dynamischer Welten. Deshalb läuft bei der Animation, die als VRML-File exportiert wurde, keine Anima-

tion ab, sondern es ist nur ein einziger Vermessungszeitpunkt (z.B. 1992) dargestellt, der jedoch interaktiv betrachtet werden kann. Die VRML-Files können insbesondere genutzt werden, um sich Teilbereiche durch Zoomen genauer anzusehen oder den Blickwinkel zu verändern (vgl. hierzu Kap. 9.5, Abb. 9.14 und Abb. 9.15).

Der Vorteil von VRML ist wie von HTML die Plattformunabhängigkeit. Auf der im Anhang beigefügten CD findet sich ein VRML-Browser (glView) als so genannter „Stand-alone-Browser“. Diese Browser können die VRML-Welten aus dem Internet laden und darstellen, sind jedoch in der Regel nicht HTML-fähig, d.h. sie können keine Webseiten abbilden. Eine andere Variante besteht darin, einen Standard-Webbrowser VRML-fähig zu machen. Dazu benötigt man eine Zusatzsoftware zum Webbrowser, ein so genanntes PlugIn, welches man in der Regel zusätzlich zum Webbrowser installieren muss. Das wohl am häufigsten verwendete VRML-PlugIn ist der „Cosmo Player“ von SGI (KLOSS et al. 1998, DÄSSLER 1999).

9.5 Interpretation der Animationsergebnisse

9.5.1 Animation der Piep

Für das Tidebecken der Piep wurden zwei Animationen erstellt. Die erste Animation ([piep_gesamtbecken.avi](#)) zeigt die morphologische Entwicklung des gesamten Tidebeckens zwischen 1937 und 1991. Da in der zweiten Animation der Bereich der Meldorfer Bucht noch einmal näher betrachtet wird, soll hier zunächst nur auf die morphologische Entwicklung des seewärtigen Bereichs des Tidebeckens von Büsum bis zum Seegatt eingegangen werden. Der Standort der Kamera ist am Seegatt des Tidebeckens der Piep. Der Blick ist in Richtung Osten auf die Küste und die Meldorfer Bucht gerichtet (vgl. z.B. Abb. 9.7). Man erkennt auf der linken Seite vorspringend die Landspitze mit dem Ort Büsum und dessen Hafen. Zur besseren Orientierung sind zwei halbtransparente farbige Ebenen hinzugefügt worden, die das Höhenniveau $MThw$ bzw. $MTnw$ darstellen. Das bedeutet, dass alle dunkelblauen Bereiche unter $MTnw$ liegen und somit den Bereich des Sublitorals abdecken. In diesem Bereich kann man sehr gut die Prielstrukturen erkennen. Die hellblauen Flächen beschreiben den Höhenbereich zwischen $MTnw$ und $MThw$, also die intertidalen Flächen oder Wattflächen. Alle darüber liegenden Bereiche sind ockerfarben und stellen die supratidalen Bereiche des Tidebeckens dar.

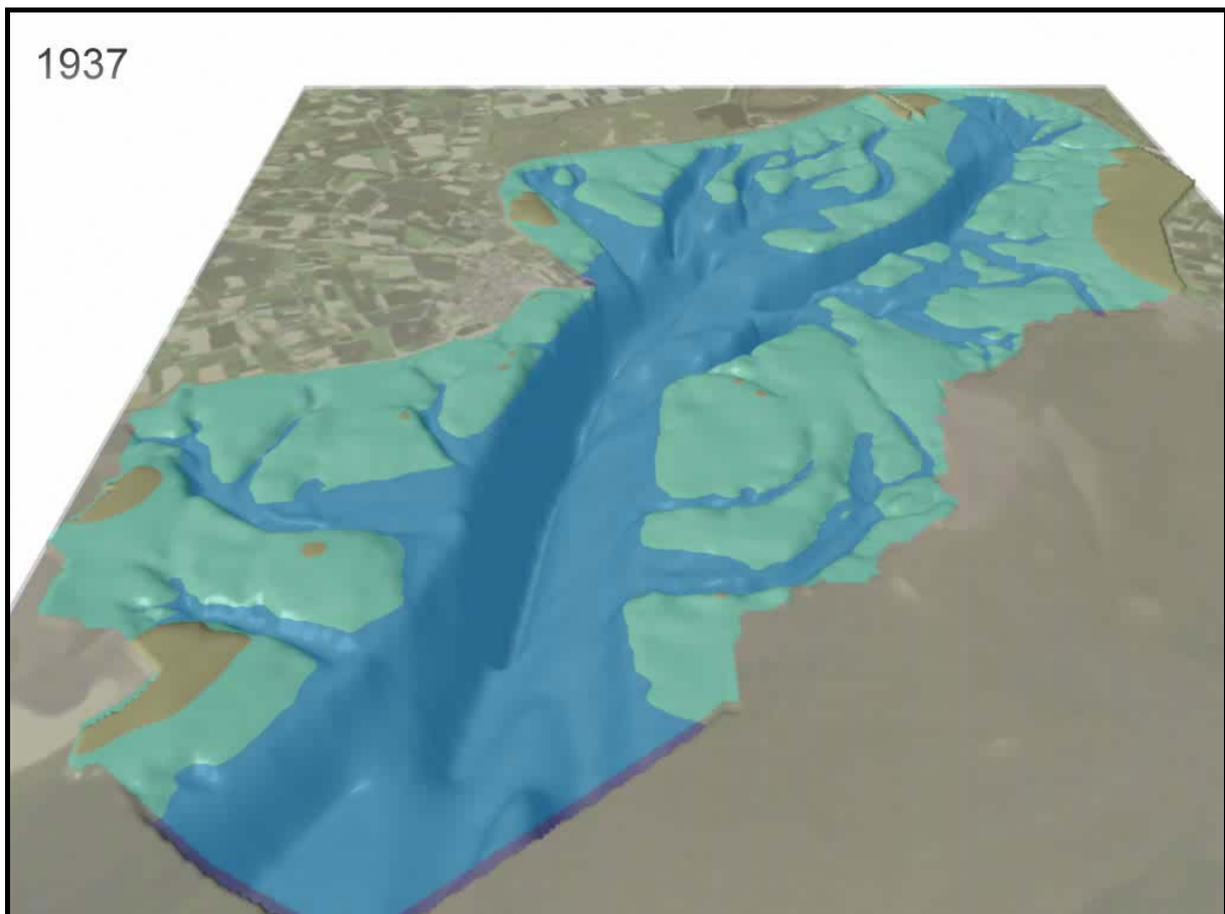


Abb. 9.7: Screenshot aus der Animation des Tidebeckens der Piep im Jahr 1937.

Außerhalb der Grenzen des Tidebeckens ist ein Landsat-TM-Satellitenbild vom 27.06.1995 als Texturinformation überlagert, das insbesondere zur besseren Orientierung dienen soll. In allen Animationen läuft ein Timer mit, der nachträglich in dem Videobearbeitungsprogramm Premiere von Adobe eingearbeitet worden ist, um eine zeitliche Einordnung der aktuell dargestellten Zustände vornehmen zu können.

In der Animation ist zu erkennen, dass der Prielstrom der Piep im seewärtigen Bereich zweigeteilt ist. Der Tertiusand teilt die Piep in eine nördliche und eine südliche Rinne (Abb. 9.7). Der Flutstrom fließt vorwiegend durch die kleinere Südrinne, hingegen der Ebbstrom durch beide Rinnen strömt. Folgt man dem Priel landwärts, so zeigt sich, dass sich die Piep in der Höhe von Büsum in drei Teiläste aufspaltet, die in der zweiten Animation näher betrachtet werden.

Beim Ablauf der ersten Animation fällt vor allem auf, dass sich der Priel der Piep im Laufe der Zeit vertieft. Zugleich verlagert sich die kleinere Südrinne im Bereich des Seegatts erst in Richtung Süden, um sich dann wieder nach Norden zu bewegen. Insgesamt bleibt die Rinne jedoch im Untersuchungszeitraum in ihrer Lage stabil.

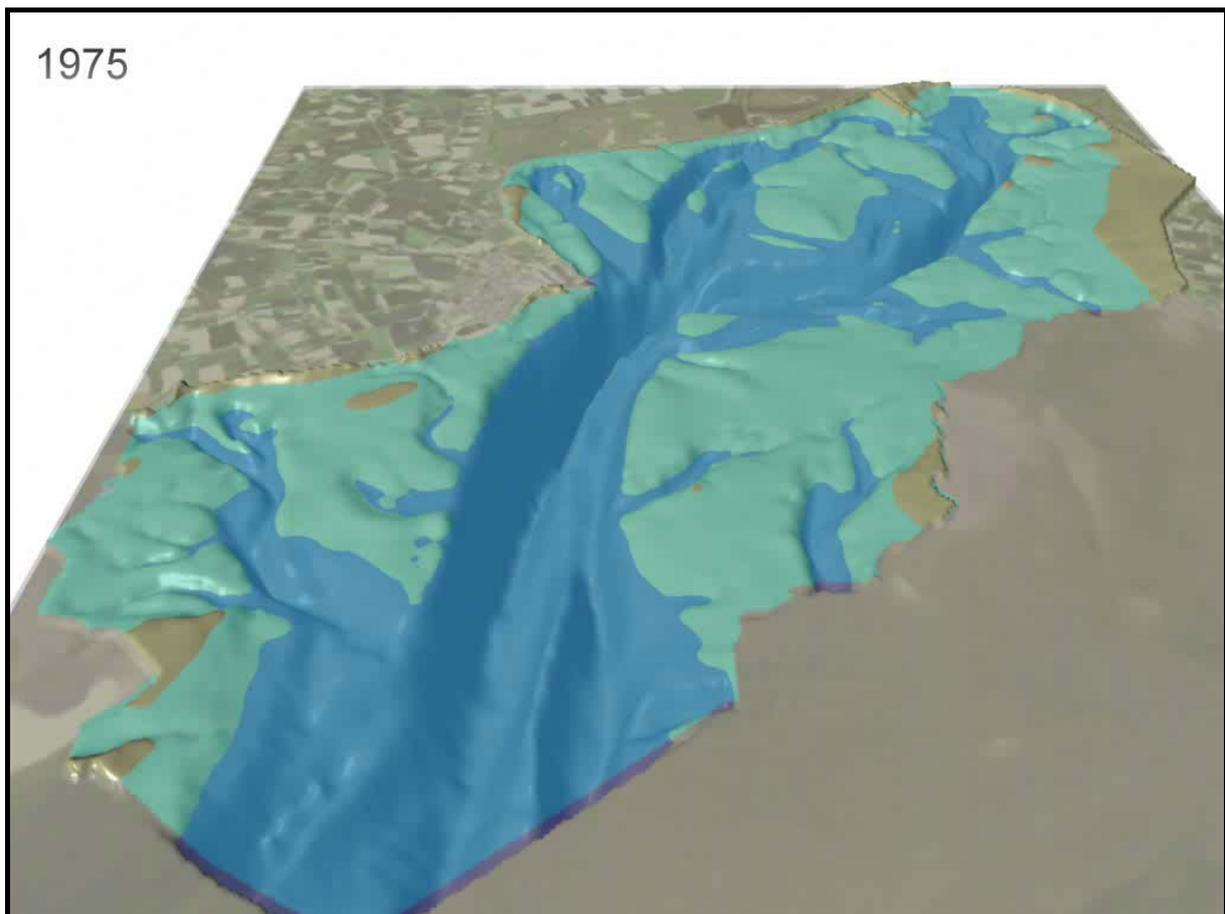


Abb. 9.8: Screenshot aus der Animation des Tidebeckens der Piep im Jahr 1975.

Die Wattflächen zeigen während dieses Zeitraums eine stärkere Dynamik. Alle Wattflächen wachsen in diesem seewärtigen Bereich des Tidebeckens auf. Dies gilt sowohl nördlich als auch südlich des Prielstroms der Piep. Im nördlichen Bereich sind die Wattflächen durch die landwärtige Verlagerung des Blauortsandes, der sich allein zwischen 1938 und 1969 im Durchschnitt um 32 m pro Jahr ostwärts in Richtung Festland bewegt (vgl. hierzu ausführlicher WIELAND 1972, EHLERS 1988), besonders aktiv. Durch die Verlagerung des Blauortsandes bildet sich das vordere Prielsystem zurück und zugleich verlagert sich das hintere - aus Sicht der Kamera - etwas seewärts und vertieft sich, weil es nun ein größeres Gebiet entwässern muss (vgl. hierzu Abb. 9.7 zu Abb. 9.8).

Zudem kann man bei dieser Animation erkennen, dass die Hauptrinne der Piep seewärts von Büsum in Richtung des Festlandes bzw. Deiches wandert, so dass der Wattbereich westlich von Büsum stark abnimmt (Abb. 9.9).

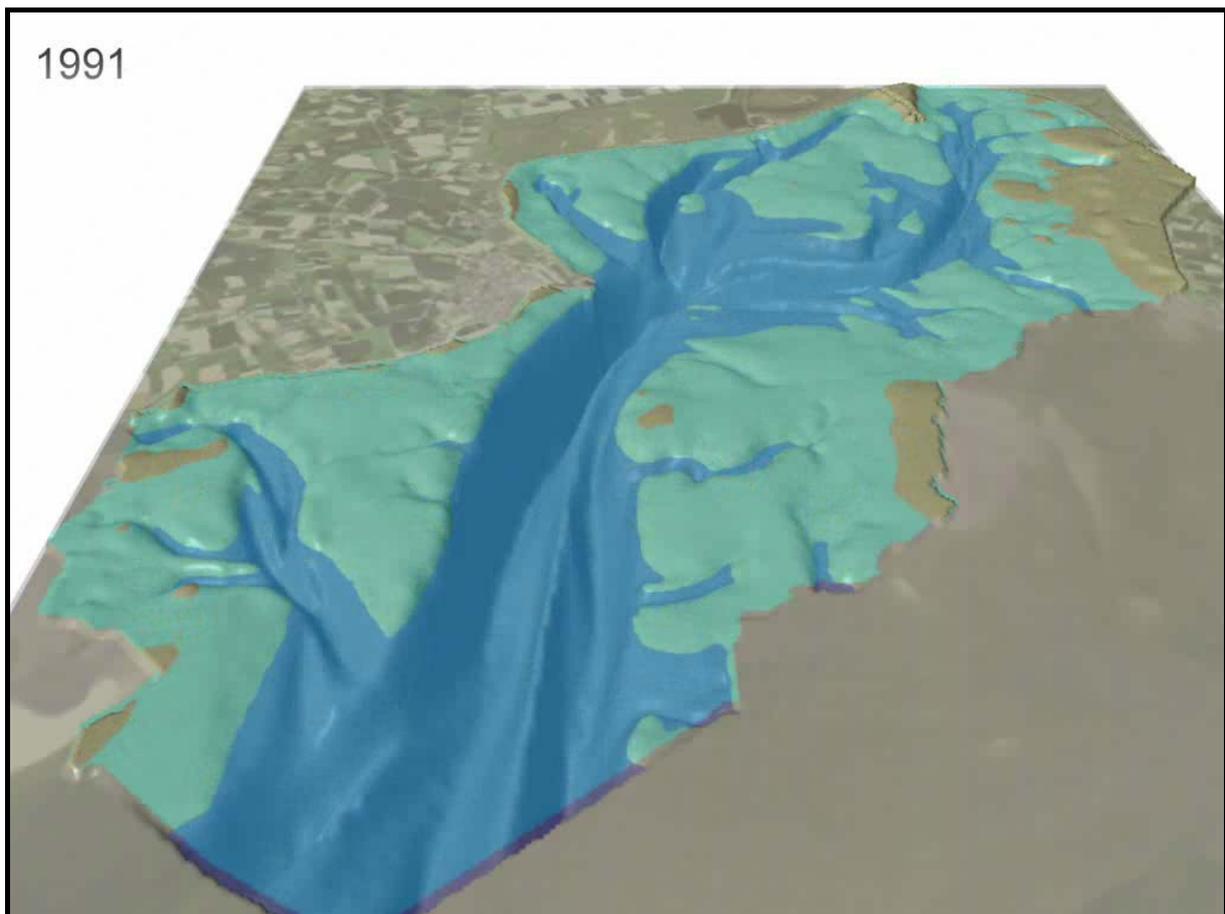


Abb. 9.9: Screenshot aus der Animation des Tidebeckens der Piep im Jahr 1991.

Die zweite Animation ([piep_teilbecken.avi](#)) zeigt den Bereich der Meldorfer Bucht detaillierter. In dieser Animation wird die morphologische Entwicklung der drei von den Vordeichungen des Speicherbeckens Dithmarschens betroffenen Teilbecken des Wöhrdener Loch, des Kronenlochs und des Sommerkoog-Steertlochs aufgezeigt (vgl. auch [piep_1969.wrl](#) und [piep_1991.wrl](#)). Beim Ablauf der Animation ist vor allem im südlichen Teilbecken Sommerkoog-Steertloch nach der ersten Vordeichung 1972 eine Verlandung der Rinne zu erkennen (Abb. 9.10). Nach der zweiten Vordeichung 1978 – diese betraf nur die beiden nördlichen Priele – vertieft sich die Rinne wieder, weil die Wassermengen der einströmenden Flut nicht mehr in diesem Umfang in die beiden abgekappten nördlichen Priele eindringen können und somit die Rinne des Sommerkoog-Steertlochs revitalisiert wird. Im Gegensatz dazu ist zeitgleich eine Verlandung der beiden anderen Rinnen zu verzeichnen, da der Seegattquerschnitt im Verhältnis zum einlaufenden Tideprisma zu groß ist (Abb. 9.11).

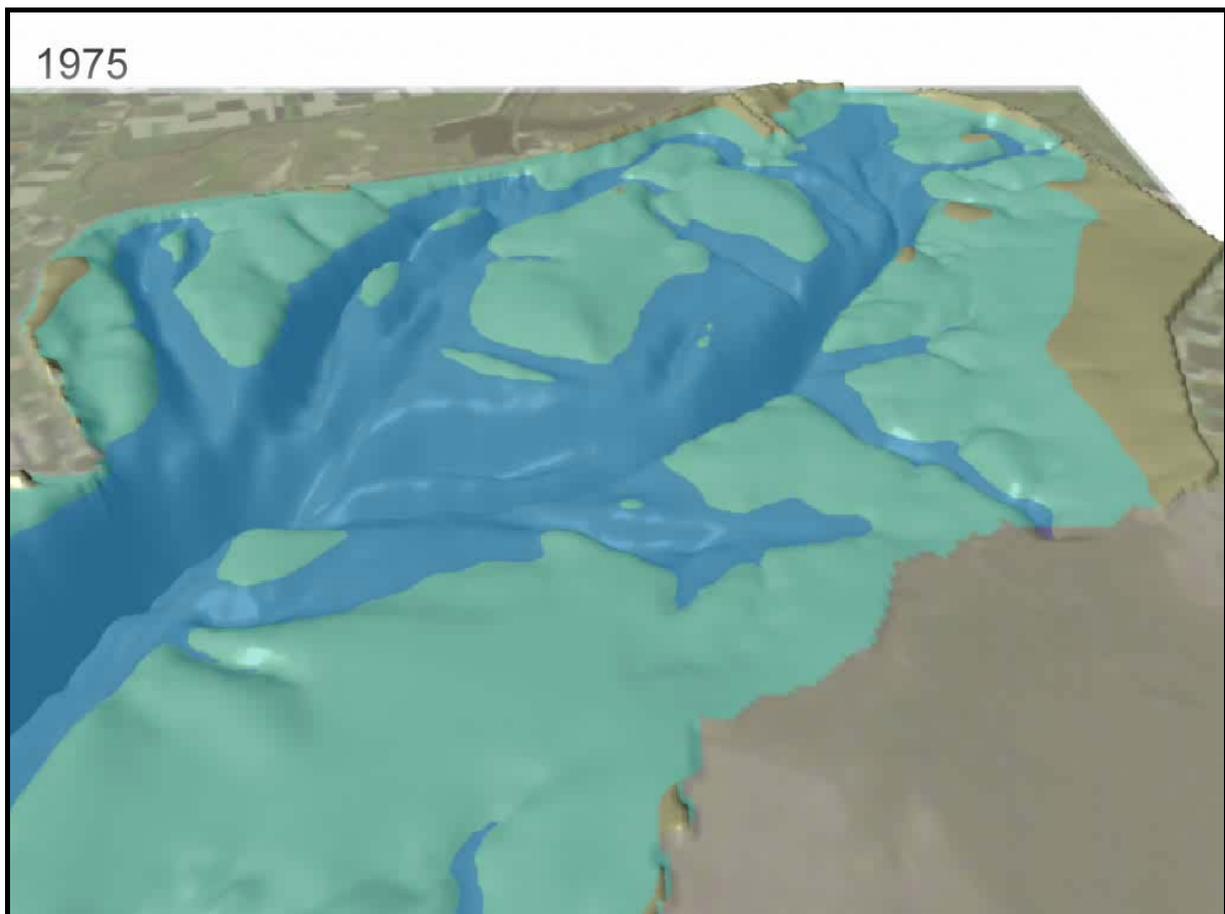


Abb. 9.10: Screenshot aus der Animation der Teilbecken in der Meldorfer Bucht im Jahr 1975.

Betrachtet man im Teilbecken Sommerkoog-Steertloch die supratidalen Flächen (ockerfarben), so fällt auf, dass nach der zweiten Eindeichung 1978 die Salzwiesen vor Friedrichskoog erkennbar zunehmen (Abb. 9.11). Diese Beobachtung steht in Einklang mit den empirischen Auswertungen in Kapitel 6 (vgl. S. 85 f., Abb. 6.5).

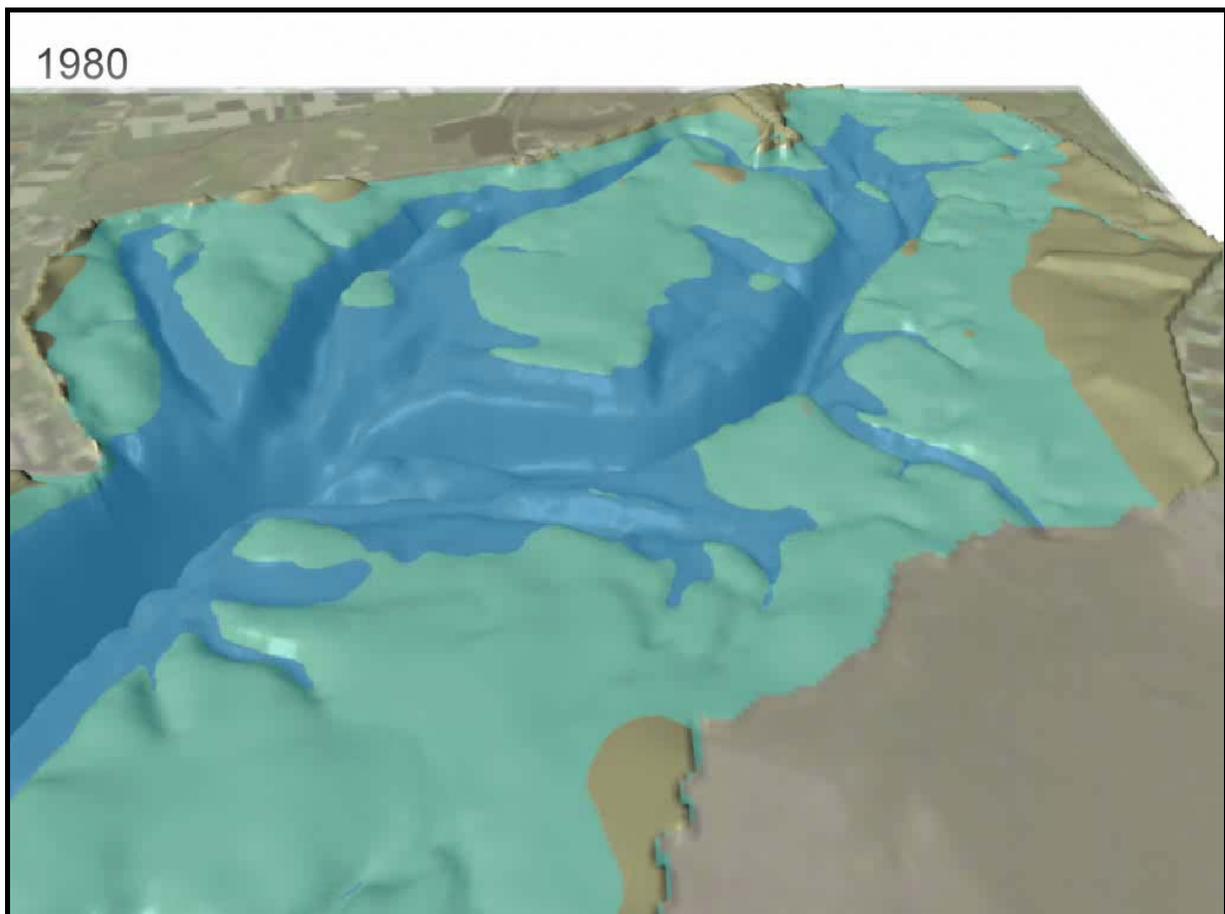


Abb. 9.11: Screenshot aus der Animation der Teilbecken in der Meldorfer Bucht im Jahr 1980.

9.5.2 Animation des Norderhever-Heverstroms

Auch für das Tidebecken des Norderhever-Heverstroms wurden zwei Animationen erstellt. Die erste Animation ([norderhever_gesamtbecken.avi](#)) zeigt die morphologische Entwicklung des gesamten Tidebeckens zwischen 1936 und 1990. In der zweiten Animation ([norderhever_teilbecken.avi](#)) wird der nördliche Bereich des Norderheverstroms mit den beiden Teilbecken Holmer Fähre und Strandley detaillierter dargestellt, um die Auswirkungen der Vordeichung des Beltringharder Kooges aufzuzeigen.

Der Standort der Kamera ist für die erste Animation am Seegatt des Norderhever-Heverstroms. Die Blickrichtung ist auf die Küste in Richtung Osten gerichtet. Wieder kennzeichnen die dunkelblau eingefärbten Bereiche die Priele (Subtidal), die hellblauen Bereiche die Wattflächen (Intertidal), während die über dem *MThw*-Niveau liegenden Bereiche des Tidebeckens (z.B. die Außensände) eine Ocker-Färbung annehmen.

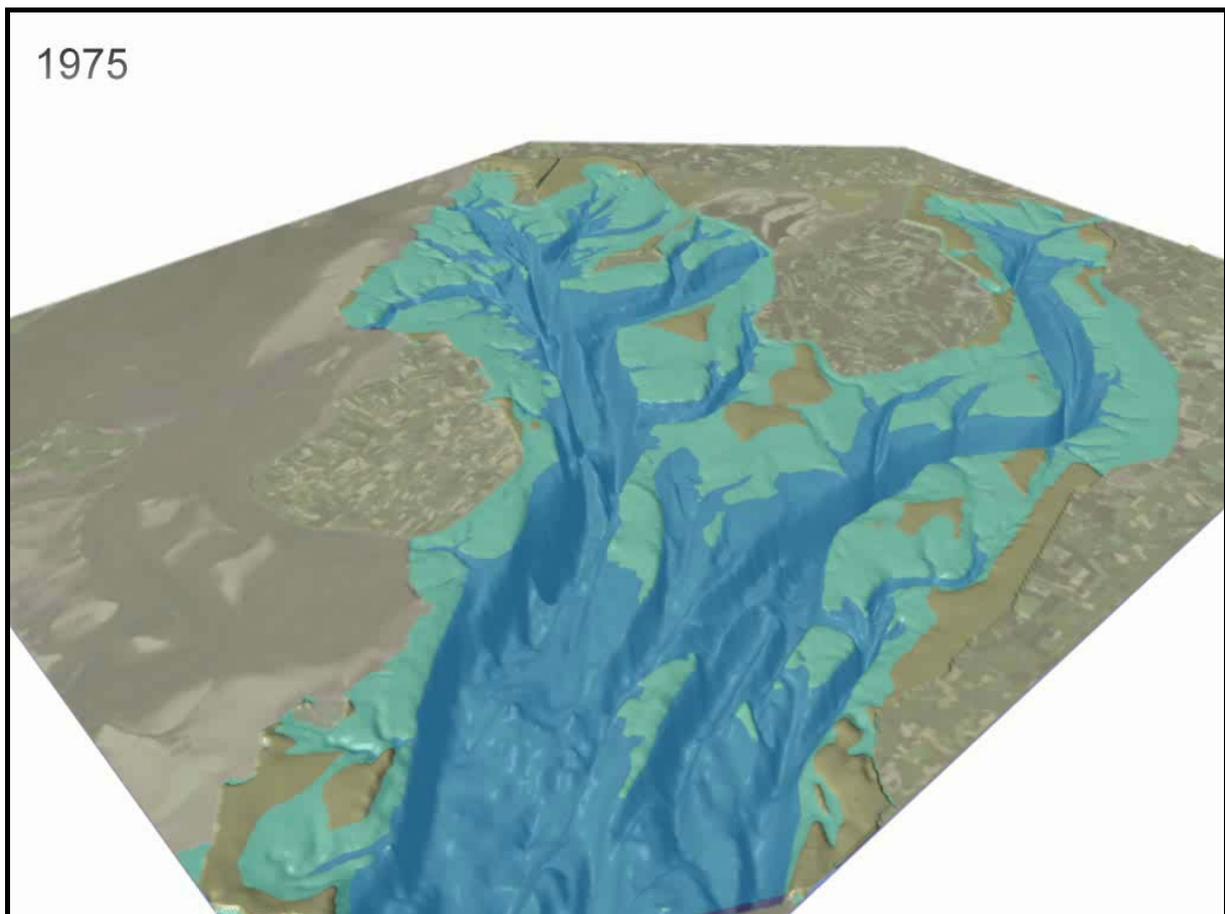


Abb. 9.12: Screenshot aus der Animation des Tidebeckens des Norderhever-Heverstroms im Jahr 1975.

Im Folgenden soll zunächst auf den Bereich des Seegatts und des Heverstroms eingegangen werden, der durch den großen Anteil an tiefen Prielbereichen (70 %) dominiert wird. Er weist insgesamt nur einen sehr geringen Anteil an Wattflächen (30 %) auf (vgl. Tab. 6.24). Das Seegatt des Norderhever-Heverstroms ist fast 10 km breit und erreicht mit 67 900 m² die größte Querschnittsfläche eines Seegatts in Schleswig-Holstein (vgl. Tab. 6.25). Es besteht dabei nicht nur aus einer einzigen dominierenden Rinne, sondern weist je nach Vermessungszeitpunkt drei bis vier Rinnen auf (Abb. 9.12). Untersuchungen von z.B. HIGELKE (1978) haben ergeben, dass es sich bei den Sedimentkörpern zwischen den Rinnen um große tidale Barren handelt, die ihre Position kontinuierlich ändern. Sie verlagern sich mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 20 m pro Jahr südwärts und folgen somit der Richtung des küstenparallelen Sedimenttransports (vgl. auch EHLERS 1988). Diese Prozesse sind allerdings aufgrund der gegebenen zeitlichen und räumlichen Auflösung der Ausgangsdaten nicht in der Animation zu erkennen.

Lässt man die Animation ablaufen, so fällt bei den Wattflächen und v.a. bei den supratidalen Bereichen (ockerfarben) auf, dass sie von 1936 bis 1974 aufwachsen, um dann zum letzten Vermessungszeitpunkt im Jahr 1990 hin stark abzunehmen (Abb. 9.13). Dagegen ist die Vertiefung der Priele aufgrund der komplexen Morphologie nicht so deutlich zu erkennen (im Gegensatz beispielsweise zur Piep).

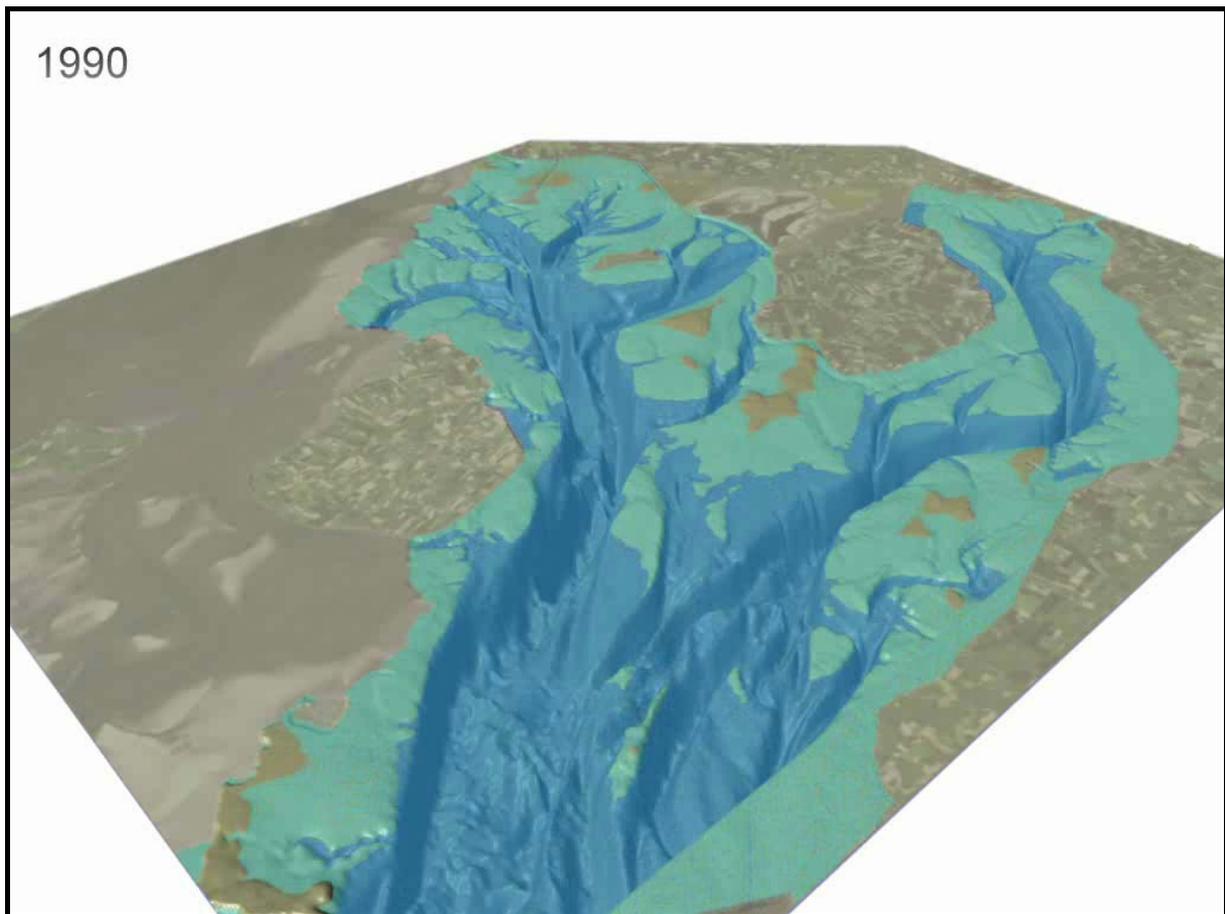


Abb. 9.13: Screenshot aus der Animation des Tidebeckens des Norderhever-Heverstroms im Jahr 1990.

Nachdem die Wassermassen des Wattstroms das Seegatt passieren, teilen sie sich südwestlich der Hallig Südfall auf dem Heversteert in den nördlichen Norderheverstrom und den Heverstrom, der südlich von Nordstrand zum Festland verläuft. Zunächst soll die Interpretation der Animation für die Bereiche der Teilbecken westlicher Heverstrom und östlicher Heverstrom (vgl. Abb. 6.6) erfolgen.

Auch der Heverstrom zeigt in den hier dargestellten 54 Jahren eine deutliche Vertiefung, wobei die Hauptrinne sehr lagestabil ist, was mit den Ergebnissen aus Kapitel 6.2 in Einklang steht. Das Seegatt des Heverstroms hat sich von einem ehemals breiten und flachen Seegattprofil mit einer maximalen Tiefe von lediglich -13 m kontinuierlich im Laufe der Zeit zu dem tiefsten Seegattprofil Schleswig-Holsteins mit einer maximalen Tiefe von -28 m ausgebildet. Diese Entwicklung kommt bei der Animation (AVI) jedoch aufgrund der gewählten Blickrichtung nicht so deutlich zum Ausdruck. In diesem Fall ist es sinnvoll, auf den VRML-File zurückzugreifen (Abb. 9.14 und Abb. 9.15; [norderhever_1936.wrl](#), [norderhever_1990.wrl](#)). Dort hat man die Möglichkeit, diesen Bereich durch Zoomen und Drehen aus einer anderen Blickrichtung zu betrachten. Allerdings ist man pro VRML-File auf einen einzigen Zeitpunkt beschränkt, weil die Animation durch die Überblendungstechnik (*blend shape*) beim Export nicht übernommen wurde.

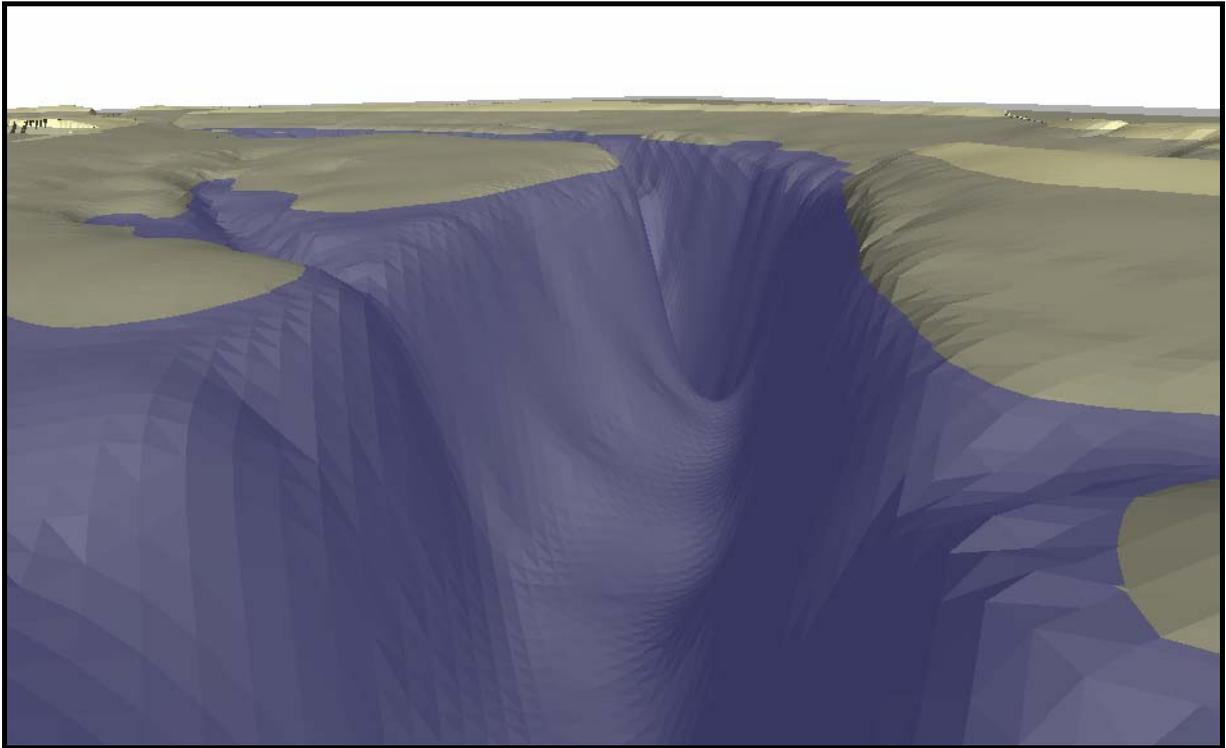


Abb. 9.14: Screenshot aus dem VRML-File des Teilbereichs des Heverstroms im Jahr 1936.

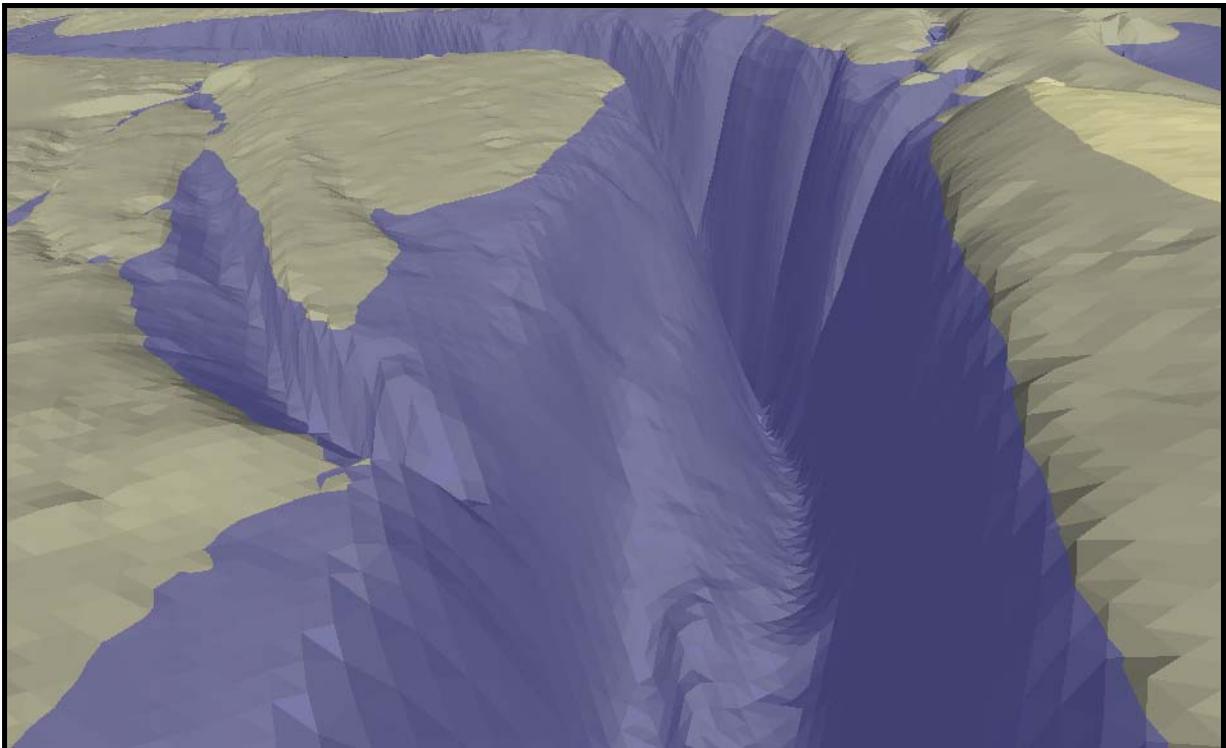


Abb. 9.15: Screenshot aus dem VRML-File des Teilbereichs des Heverstroms im Jahr 1990.

Der östliche Bereich des Heverstroms ist fast vollständig von (Fest-)Land umgeben. Der Tidenhub ist hier aufgrund des Buchteneffekts mit bis zu 3.53 m um ca. 20 cm höher als im See-

gattbereich des Norderhever-Heverstroms (vgl. Tab. 6.39). Aus den Untersuchungen in Kapitel 6.2 ist bekannt, dass die Watten bis 1966 stark aufwachsen, dann bis 1974 auf das Ausgangsniveau von 1936 zurückfallen und in den folgenden 16 Jahren zwischen 1974 und 1990 sich dramatisch reduzieren (vgl. Tab. 6.42). Wenngleich die Änderung der Höhenlage der Wattflächen aus der Animation aufgrund der räumlichen Auflösung nicht deutlich ersichtlich wird, so ist eindeutig zu erkennen, wie die supratidalen Bereiche, die eine ähnliche Entwicklung durchlaufen haben, in ihrer Ausdehnung zunächst konstant bleiben, um dann im letzten Teil der Animation fast vollständig zu verschwinden.

Bei der zweiten Animation, die einen vergrößerten Ausschnitt des Norderheverstroms zeigt, wird der Bereich detaillierter betrachtet, der flächenhaft von der Vordeichung des Beltringharder Kooges betroffen war. Die Vordeichung beeinflusste insbesondere die morphologische Entwicklung in den Teilbecken der Holmer Fähre und des Strandley (vgl. Abb. 6.6). Dabei war das Teilbecken der Holmer Fähre von der Vordeichung im Jahr 1987 am stärksten betroffen, weil es mehr als die Hälfte seiner Gesamtfläche eingebüßt hat. Zwischen 1974 und 1990 wurde durch die Vordeichung die Fläche unterhalb von *MThw* um mehr als die Hälfte, die Intertidalflächen um ein Drittel der vorherigen Fläche reduziert. In der Animation ist aus der gewählten Perspektive nur die Vertiefung der Rinne festzustellen, die ansonsten in ihrer Lage und Ausdehnung stabil bleibt (Abb. 9.17). Eine zu erwartende Sedimentation in der Rinne nach der Vordeichung zum Ende der Animation ist jedoch nicht zu erkennen (Abb. 9.16). Entweder ist die zeitliche Auflösung der Ausgangsdaten nicht ausreichend oder diese eigentlich zu erwartende morphologische Reaktion hat drei Jahre nach der Vordeichung noch keinen sichtbaren Effekt erzeugt.

Die Abnahme der Wathöhen, die 1974 einsetzt und in Kapitel 6.2 nachgewiesen wurde, tritt in der Animation ähnlich wie beim Gesamtbecken nicht deutlich hervor. Man kann allerdings auch für die Teilbecken die morphologischen Auswirkungen der Abnahme der hohen Bereiche an der deutlich sichtbaren Reduktion der supratidalen Bereiche festmachen. Diese ockerfarbenen Bereiche, die sich zu Beginn der Animation noch ausdehnen, nehmen am Ende der Animation offensichtlich ab (vgl. Abb. 9.16 zu Abb. 9.17).

Das nördliche Teilbecken des Norderhever-Heverstroms wird durch die Priele Strandley, Butterloch, Bensley und Rummelloch be- und entwässert, wobei dem Strandley als Verbindungspriel zwischen Norderhever und Süderau eine besondere Bedeutung zukommt (Abb. 6.6). Die Rinne des Strandley hat sich von 2 m zu Beginn des letzten Jahrhunderts (1909) auf über 12 m bis 1992 vertieft, so dass es infolgedessen auch zu Erosionen der umliegenden Wattbe- reiche kam.

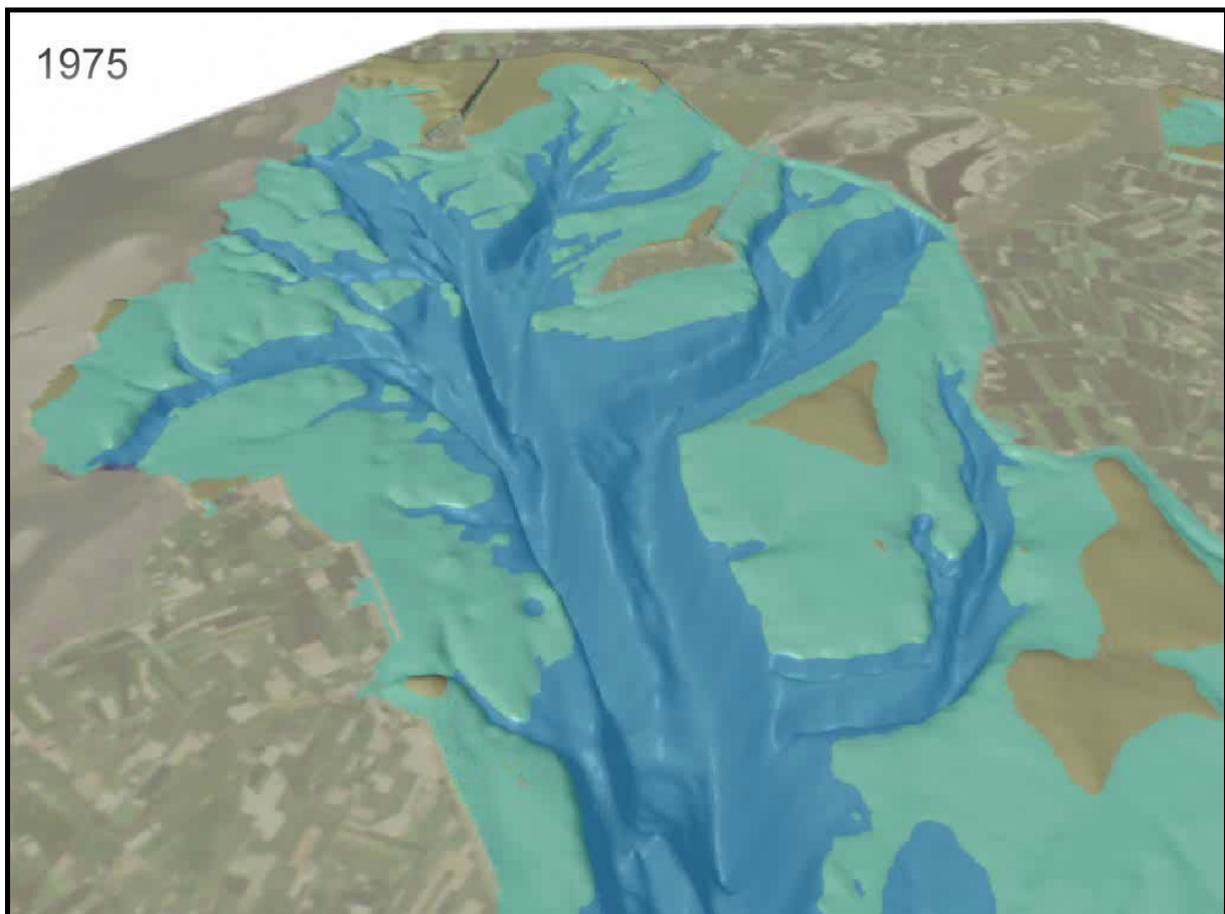


Abb. 9.16: Screenshot aus der Animation des Teilbereichs des Norderheverstroms im Jahr 1975.

In der Animation fällt in diesem Bereich besonders auf, dass die Ausdehnung der subtidalen Flächen (dunkelblau) im Laufe der Zeit abnimmt und sich zugleich die Rinnen des Strandley und v.a. des Butterlochs markanter ausbilden. Dies macht sich insbesondere durch eine Vertiefung der Rinnen bemerkbar. Aufgrund der gewählten Kameraposition bzw. der Blickrichtung tritt dieses Phänomen deutlicher für das Butterloch als für das Strandley hervor.

Im letzten Teil der Animation erkennt man beim Rummelloch, welches nördlich der Insel Pellworm in Richtung Westen verläuft, dass sich die Rinne stark vertieft (Abb. 9.17). Als Konsequenz folgt, dass der Wasserübertritt vom Rummelloch zum Tidebecken des Rummelloch West sich verstärkt hat und somit von einer Zunahme der Umströmung der Insel Pellworm in diesem Bereich zumindest für den betrachteten Zeitraum auszugehen ist.

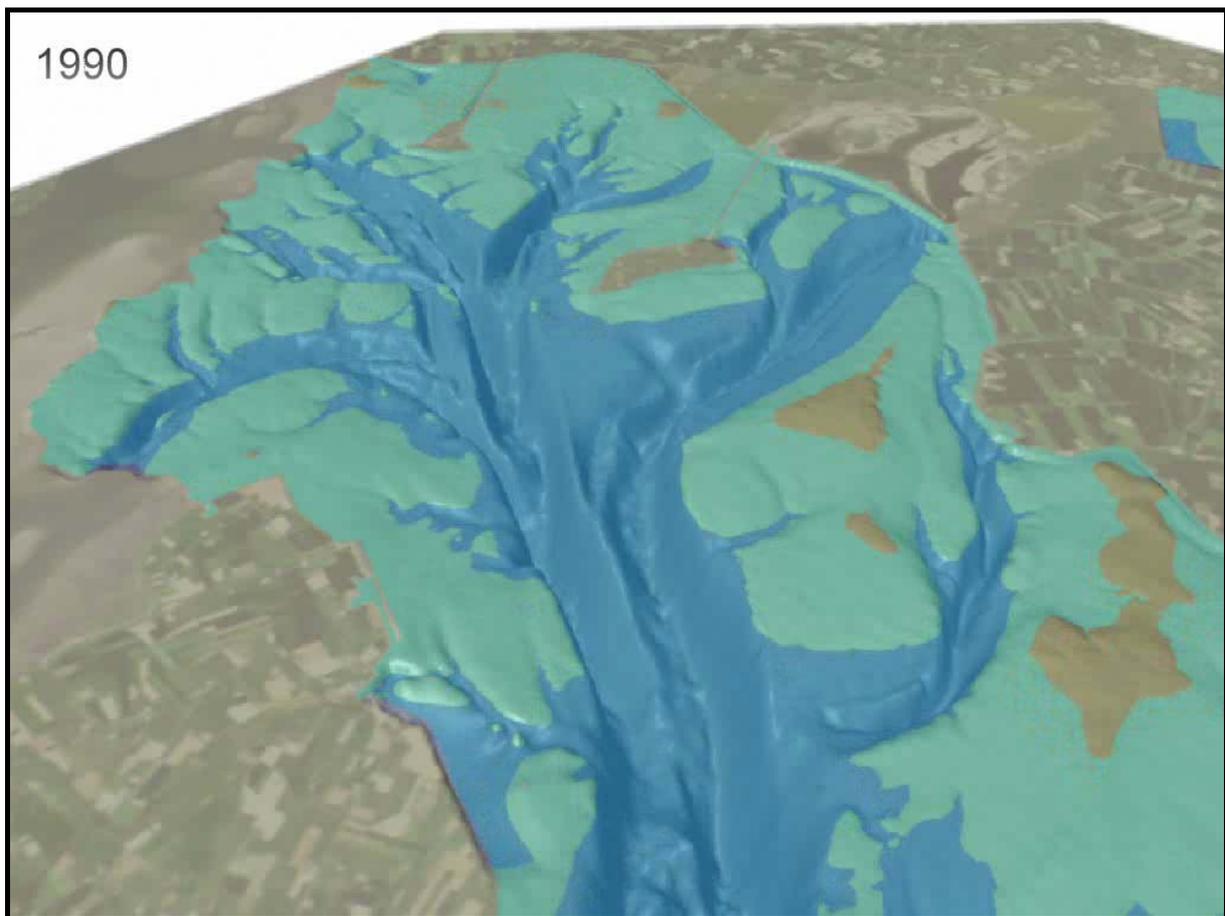


Abb. 9.17: Screenshot aus der Animation des Teilbereichs des Norderheverstroms im Jahr 1990.

9.5.3 Animation des Hoogelochs

Für das Tidebecken Hoogeloch wurde eine Animation ([hoogeloch.avi](#); VRML-Files: [hoogeloch_1936.wrl](#), [hoogeloch_1992.wrl](#), [hoogeloch_2050.wrl](#)) erstellt, welche die morphologische Entwicklung des Tidebeckens zwischen 1936 und 2050 zeigt (Abb. 9.18 bis 9.20). Da das Tidebecken keinem baulichen Eingriff unterlegen war, steht dieses Becken als Beispiel für eine unbeeinflusste Entwicklung. Des Weiteren sollen anhand dieses kleinen Tidebeckens die Ergebnisse der in Kapitel 8 erstellten Hochrechnung stellvertretend visualisiert werden.

Für den ersten Zeitraum der Animation von 1936 bis 1992 standen vier aus Vermessungen abgeleitete digitale Höhenmodelle als Keyframes zur Verfügung. Für den Bereich der Animation, der die Zukunft (hier von 1992 bis 2050) beschreibt, wurde aus den Messwerten der vier Zeitpunkte für jede Rasterzelle eine lineare Regressionsfunktion berechnet, um damit das digitale Höhenmodell im Jahr 2050 schätzen zu können (vgl. hierzu Kap. 8). Anschließend wurde bei der Animationserstellung der Zustand von 1992 in den hochgerechneten Zustand von 2050 linear überblendet (Abb. 9.20). Diese Vorgehensweise verhindert, dass zwischen dem letzten real gemessenen Wert und dem ersten hochgerechneten Wert ein Sprung oder

Bruch in der ablaufenden Animation erkennbar wird.

Um eine unrealistische Erhöhung der Wattflächen bei der Hochrechnung zu vermeiden, wurden diese bei 1.80 m über NN gekappt. Flächen, deren geschätzter Höhenwert oberhalb dieses Wertes liegt, erscheinen also als Ebene.

Der Standort der Kamera befindet sich am Seegatt des Tidebeckens zwischen den Außensänden Japsand links (im Norden) und Norderoogsand rechts (im Süden). Die Blickrichtung ist auf die Hallig Hooge in Richtung Osten orientiert. Ansonsten gelten für die Einfärbungen die gleichen Einstellungen wie für die beiden anderen Tidebecken. Da keine Festlandsbereiche an das Hoogeloch angrenzen, wurde allerdings auf eine Überlagerung mit dem Satellitenbild verzichtet.

In der Animation ist zu erkennen, dass sich der Prielstrom des Hoogelochs zu Beginn im hinteren (landnäheren) Bereich y-förmig aufspaltet und die über *MThw* aufragenden Außensände flächenmäßig noch nicht so groß sind (Abb. 9.18).

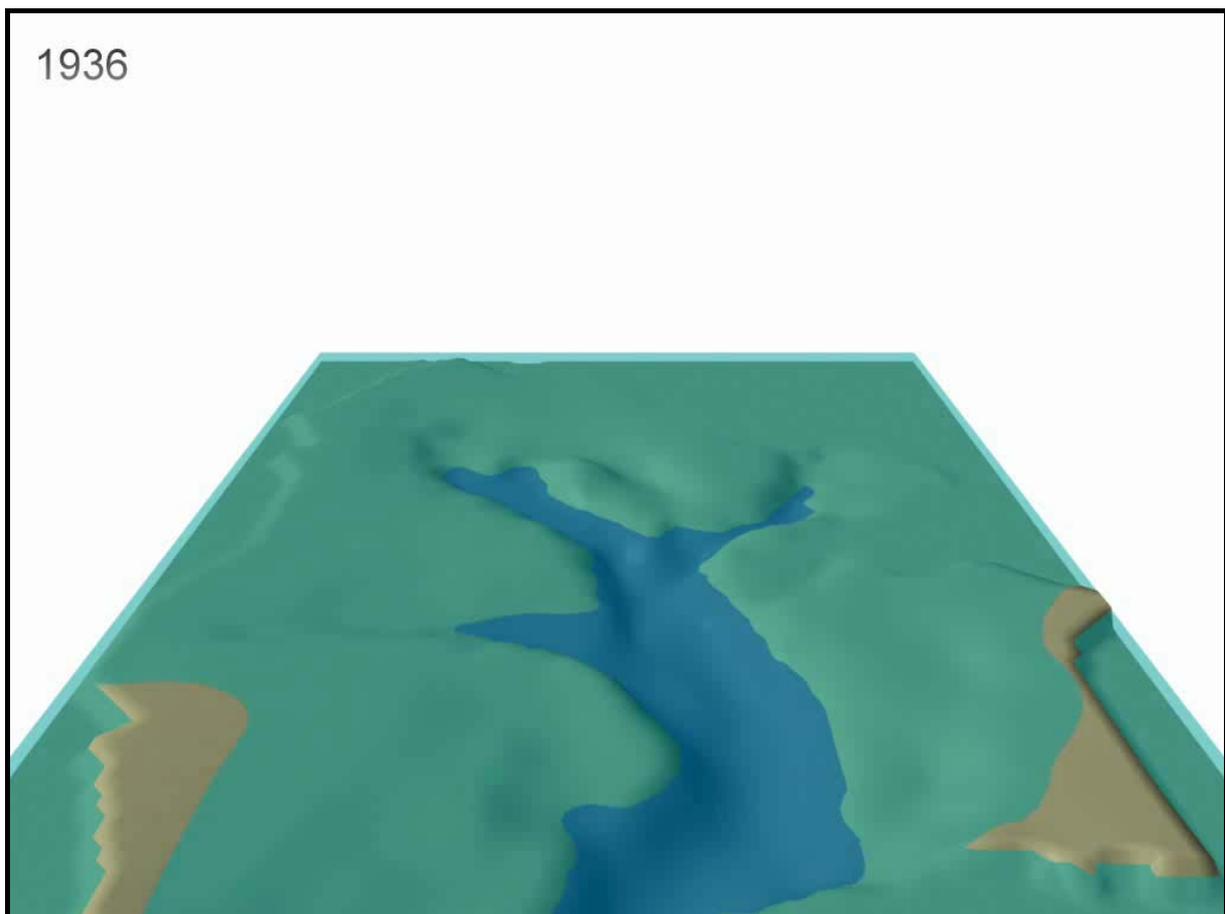


Abb. 9.18: Screenshot aus der Animation des Tidebeckens des Hoogelochs im Jahr 1936.

Lässt man die Animation ablaufen, so kann man beobachten, dass sich der rechte (südliche) Teilast zurückbildet. Diese morphologische Entwicklung findet zwischen 1936 und 1968 statt

und bleibt danach bis 1992 erhalten (Abb. 9.19). Dieser nun durchgängige Hauptpriel vertieft sich im Laufe der Zeit immer stärker. Im vorderen Bildbereich fällt auf, dass sich v.a. zum Ende der Animation die dunkelblauen Flächen in dem Maße nach links (Norden) verschieben, in dem der Außensand Norderoogsand sich nach Norden ausdehnt bzw. wandert. Es ist also zu erkennen, dass die Hauptprielrinne des Hoogelochs im Seegattbereich von dem nordwärts wandernden bzw. sich ausdehnenden Norderoogsandes nach Norden abgedrängt wird. Auch der nördlich angrenzende Japsand vergrößert sich, wird jedoch in seiner südwardigen Ausdehnung – zumindest bis 1992 – durch die Rinne des Hoogelochs begrenzt.

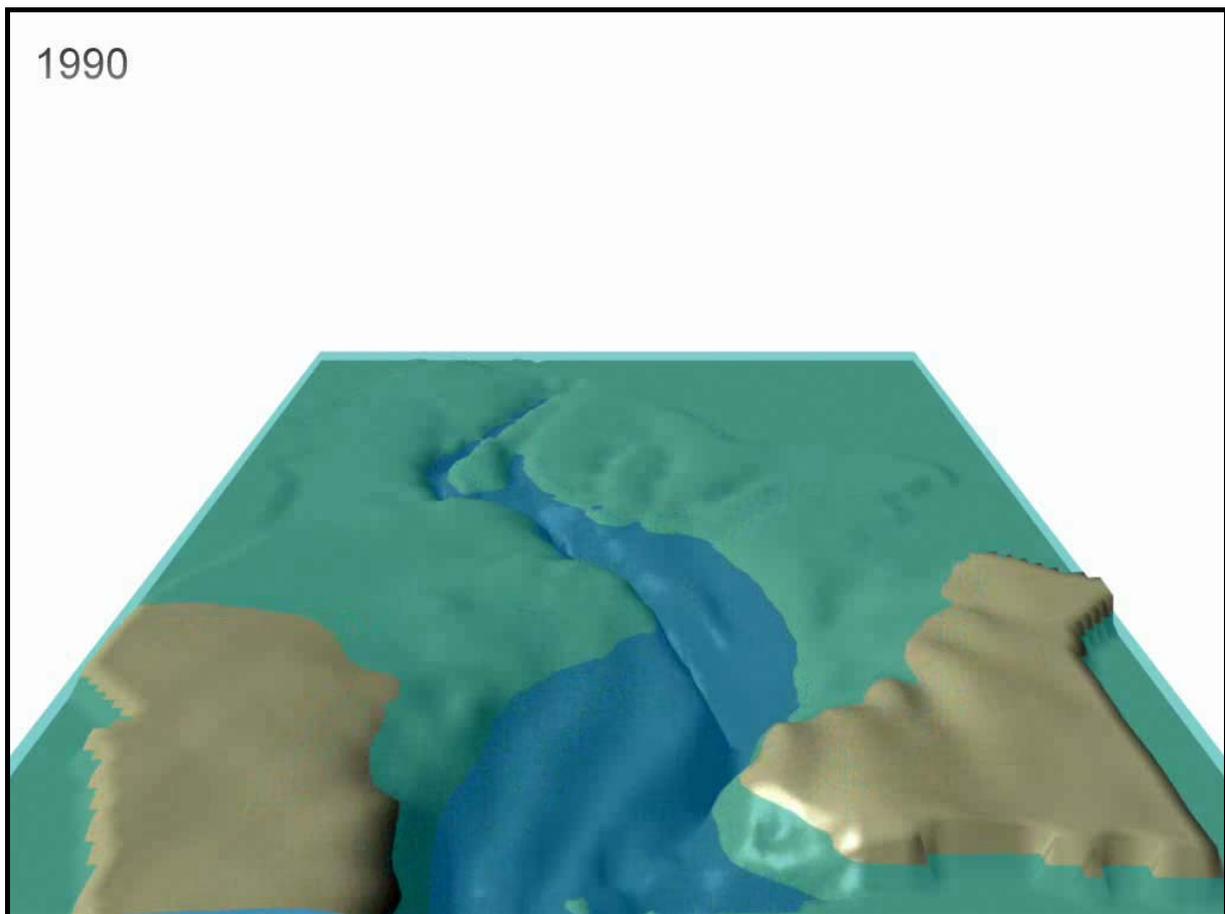


Abb. 9.19: Screenshot aus der Animation des Tidebeckens des Hoogelochs im Jahr 1990.

Insgesamt erhält man bei der Betrachtung der Animation den Eindruck, dass sich einerseits die Rinne des Hoogelochs vertieft und andererseits die Außensände Japsand und Norderoogsand auf Kosten der Wattflächen im Seegattbereich ausbreiten.

Im weiteren Verlauf der Animation, der die morphologischen Entwicklung von 1992 bis zum Jahr 2050 zeigt, fällt besonders auf, dass die beiden Außensände Japsand und Norderoogsand sich weiter in das Tidebecken des Hoogelochs ausdehnen und gleichzeitig weiter aufhöhen (Abb. 9.20).

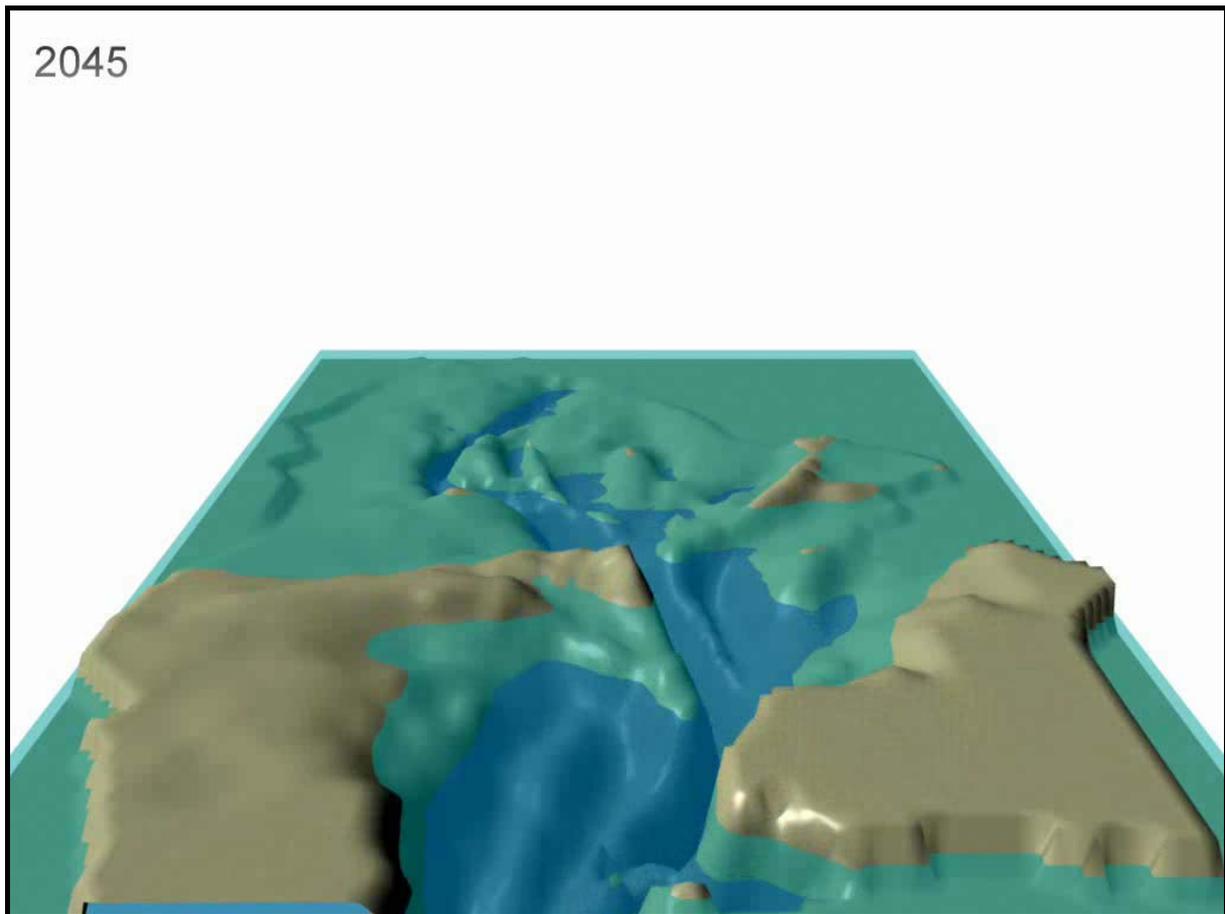


Abb. 9.20: Screenshot aus der Animation des Tidebeckens des Hoogelochs im Jahr 2045.

Bei der hier angenommenen linearen Entwicklung der Morphologie im Tidebecken würde der Japsand weit nach Osten in das Tidebecken des Hoogelochs vordringen und die Hauptrinne besonders im mittleren Bereich des Beckens immer stärker einengen, weil zeitgleich der Norderoogsand nach Norden und Osten wandert. HOFSTEDÉ (1998a) hat die Vermutung geäußert, dass sich bei einem prognostizierten weiteren Meeresspiegelanstieg die Sände weiter nach Osten verlagern und infolgedessen das Tidevolumen des Seegatts Hoogeloch bis 2050 halbiert werden könnte. Zudem könnte sich bei einer Zunahme der Sturmintensität und dem damit verstärkten küstenparallelen Sandtransport das Hoogeloch schließen und Japsand und Norderoogsand zusammen wachsen. Diese Annahme wird durch die gezeigte Animation dahingehend unterstützt, dass das Seegatt durch die beiden Außensände eingeengt wird. Es ist ebenfalls zu erkennen, dass im Tidebecken die dunkelblauen Bereiche des Sublitorals zumindest flächenhaft stark abnehmen.

10. Fazit

In dieser Arbeit wurde zunächst die bisherige morphologische Entwicklung ausgewählter schleswig-holsteinischer Tidebecken anhand verschiedener Parameter vorgestellt. Anschließend sollten auf dieser Basis Aussagen über zukünftige Veränderungen in den Tidebecken getroffen werden. Dies ist besonders vor dem Hintergrund geänderter Klimabedingungen und dementsprechend eines beschleunigt steigenden Meeresspiegels zu sehen.

Bei der Auswahl der Untersuchungsgebiete wurde mit Hilfe einer hierarchischen Clusteranalyse festgestellt, dass fast alle Tidebecken Schleswig-Holsteins durch die Analyse der drei „typischen“ Tidebecken Hoogeloch, Piep und Norderhever-Heverstrom in ihren charakteristischen Eigenschaften abgedeckt werden. Deshalb wurden diese Tidebecken stellvertretend für die übrigen untersucht.

Die für den Küstenschutz zuständigen Behörden haben sich zum Ziel gesetzt, die langfristige Erhaltung des Wattenmeeres in seiner heutigen Form und Ausdehnung zu sichern (vgl. Generalplan 2001). Bereits in der Vergangenheit wurden bauliche Eingriffe getätigt, um erosive Tendenzen im Wattenmeer einzugrenzen. Die in Schleswig-Holstein eingesetzten Küstenschutzmaßnahmen wurden ausführlich in Kapitel 3 diskutiert, um anschließend beispielhaft die Auswirkungen einer flächenhafte Küstenschutzmaßnahme – der Vordeichung des Beltringharder Kooges und des Dithmarscher Speicherbeckens – zu analysieren.

Bei der Betrachtung der bisherigen Entwicklung der drei Tidebecken wurde festgestellt, dass die Priele in der Regel eine Zunahme der Tiefen aufweisen. Dies ist insofern nachzuvollziehen, weil der Tidenhub im Untersuchungszeitraum in allen Becken zugenommen hat. Eine Zunahme des Tidenhubes hat zur Folge, dass pro Tide mehr Wasser in das Tidebecken ein- und ausströmt. Da dies in der gleichen Zeitspanne (Tidedauer bleibt konstant) geschehen muss, erhöhen sich die Tideströmungsgeschwindigkeiten in den Prielen, so dass verstärkt Sediment erodiert werden kann.

Diese Entwicklung wird nur dann in den Tidebecken unterbrochen, wenn ein flächenhafter baulicher Eingriff wie beispielsweise eine Vordeichung das Becken verkleinert. In diesem Fall reduzieren sich der Flutraum und somit auch das Flutvolumen (Tideprisma). Infolgedessen nehmen die Strömungsgeschwindigkeiten ab. Da der Querschnitt eines Prieles in direktem Zusammenhang mit der ihn durchfließenden Wassermenge steht, folgt, dass bei einer Abnahme der in den Priel ein- und ausströmenden Wassermenge der Querschnitt des Prieles zu groß ist. In diesem Fall findet besonders in den betroffenen Teilbecken zumindest zeitweise eine Sedimentation in den Prielen statt, die v.a. im zeitlich gut aufgelösten Tidebecken der Piep nachgewiesen werden konnte. Die Sedimentation muss dabei solange anhalten, bis der

Querschnitt dem neuen Tideprisma entspricht.

Die Entwicklung der Wattflächen weist in allen untersuchten Tidebecken einen einheitlichen Trend auf. Bei dem von anthropogenen Eingriffen unbeeinflussten Tidebecken Hoogeloch ist eine Abnahme der Wattflächen gegeben. Da der Anteil der Wattfläche an der Gesamtfläche mit 84 % im Jahr 1992 jedoch immer noch sehr hoch ist, kann davon ausgegangen werden, dass dieses Tidebecken im Hinblick auf einen weiteren Meeresspiegelanstieg in naher Zukunft keine dramatischen Entwicklungen erwarten lässt.

Bei den großen Tidebecken Piep und Norderhever-Heverstrom nehmen die Wattflächen ebenfalls ab. Das Tidebecken der Piep (54 % im Jahr 1991) weist jedoch im Vergleich zum Norderhever-Heverstrom (46 % im Jahr 1990) einen höheren Anteil der Wattfläche an der Gesamtfläche auf. Zudem ist insgesamt das Höhenniveau der Wattflächen in der Piep mit 1.69 m (1991) im Hinblick auf einen Meeresspiegelanstieg bezüglich einer möglichen Pufferfunktion günstiger als im Norderhever-Heverstrom mit lediglich 1.49 m (1990). Betrachtet man die Entwicklung der Wattflächen in den Teilbecken, dann ist diese sehr stark an die Vordeichungen gekoppelt. Ist das Teilbecken direkt flächenhaft von der Vordeichung betroffen, so nimmt der Anteil der Wattflächen unmittelbar nach der Eindeichung stark ab, weil gerade diese hohen Bereiche eingedeicht werden. In den Teilbecken der Piep konnte festgestellt werden, dass der Anteil der Wattflächen nach den Eindeichungen und auch die charakteristische Watthöhe im Anschluss daran wieder zunahm. Dies weist auf eine ausreichende Sedimentverfügbarkeit im Dithmarscher Wattenmeer hin.

Im Gegensatz dazu wurde im Tidebecken Norderhever-Heverstrom eine dramatische Abnahme der Perzentilwerte der Wattflächen festgestellt – was einer dramatischen Reduktion der hohen Wattbereiche entspricht. Diese Entwicklung beschränkt sich nicht nur auf das von der Vordeichung des Beltringharder Kooges betroffene Teilbecken Holmer Fähre. Durch die verstärkte Umströmung der Insel Pellworm kam es zu Erosionen der umliegenden Wattbereiche, so dass zumindest für das Teilbecken des Strandleys eine Erklärung für die Abnahme gegeben ist.

Eine weitere Erklärung für die drastische Abnahme der Watthöhen zwischen 1974 und 1990 für die Teilbecken, die nicht von der Vordeichung direkt betroffen sind, kann darin gesehen werden, dass aufgrund des höheren Tidenhubes der Seegang und die Tidenströmungsgeschwindigkeiten auf den Wattflächen zugenommen haben und somit eine flächenhafte Erosion stattgefunden hat. Diese Vermutung wird durch EHLERS (1988) unterstützt, der die hydrologischen und morphologischen Konsequenzen der Abdämmung der Zuider Zee in den Niederlanden aufzeigt. Durch die Vordeichung bzw. Abdämmung hat sich der Tidenhub dort um bis zu 50 cm erhöht und die Tidenströmungen haben sich geändert, was sich v.a. in einer

Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit um 10 %- 26 % bemerkbar gemacht hat. Es haben sich demnach die Strömungsgeschwindigkeiten nicht nur in den Prielen erhöht, sondern auch auf den Wattflächen, so dass infolgedessen in beiden Bereichen Erosionen auftreten können.

Um von der bisherigen zur zukünftigen morphologischen Entwicklung in einem Tidebecken zu gelangen, wurde auf die Untersuchung von MISDORP et al. (1990) zurückgegriffen. Wendet man die Vorgehensweise auf die drei schleswig-holsteinischen Tidebecken Piep, Hoogeloch und Norderhever-Heverstrom an, so lässt sich feststellen, dass es sich bei den nordfriesischen Tidebecken Hoogeloch und Norderhever-Heverstrom um Tidebecken handelt, die normalerweise einen geringen Anteil an Inter- und Supratidalflächen an der Gesamtfläche aufweisen. Bei einem beschleunigten Meeresspiegelanstieg käme es zu einer Sedimentation im Seegatt und in den Prielen, wohingegen auf den Wattflächen Erosion vorherrschen würde. Dies würde zu einer Beschleunigung in der Zunahme des Tideprismas führen, bis sich ein neues Gleichgewicht eingestellt hat.

Das Dithmarscher Tidebecken Piep hat in Relation zur Gesamtfläche einen hohen Anteil an Inter- und Supratidalfläche und der Seegattquerschnitt ist im Verhältnis zum Tidevolumen zu klein. Deswegen nimmt die Strömungsgeschwindigkeit zu, was zu einer Erosion im Seegatt und in den Prielen führt. Auf den Wattflächen ist dagegen Sedimentation möglich. Durch die Sedimentation im Intertidal nimmt das Tidevolumen langsam ab, bis sich wiederum ein neues Gleichgewicht einstellt.

Es ist v.a. bei dem Tidebecken Hoogeloch deutlich geworden, dass die Vorgehensweise von MISDORP et al. (1990) einige Schwächen aufweist. Auch die im Voraus getroffenen Annahmen schränken die Aussagen über die zukünftige Entwicklung des Tidebeckens ein. Wie MISDORP et al. (1990) bereits selbst festgehalten haben, ist nicht davon auszugehen, dass erst nach der Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs die Reaktion der Morphologie folgt. In der Natur werden vielmehr beide Prozesse simultan ablaufen. Die weiteren Einschränkungen, dass der Tidenhub bei einem Meeresspiegelanstieg gleich bleibt und die Geometrie des Tidebeckens sich ebenfalls nicht ändert, sind ebenfalls nicht realistisch.

Deshalb wurde in dieser Arbeit ein neues Verfahren vorgestellt, das auf Basis der bisherigen Tiefenwerte der einzelnen Vermessungen eine zukünftige Geometrie des Tidebeckens statistisch hochrechnet. Zudem wird bei der Berechnung der Beckenparameter ein Meeresspiegelanstieg berücksichtigt, der sich auf die Vorhersagen der IPCC-Szenarien von 2001 stützt. Es konnte u.a. gezeigt werden, dass im Tidebecken der Piep der Anteil der Wattfläche an der Gesamtfläche, der zwischen 1937 und 1991 bereits von 62% auf 54% abgenommen hat, bei einem Meeresspiegelanstieg von 24cm bis 2050 um weitere 13% auf einen Anteil von 40% reduzieren würden, und damit eine stärkere Abnahme zeigt, als bei einem Ansatz ohne An-

passung der Morphologie.

Die Qualität der Hochrechnung wurde für jedes Tidebecken durch einen Vergleich des letzten gemessenen mit dem auf diesen Zeitpunkt hochgerechneten Wert abgeschätzt. Die Abweichungen bei einer linearen Anpassung der Beckengeometrie ist in der Regel mit maximal 10% in einem Rahmen, der für zukünftige Aussagen über die morphologische Entwicklung eines Tidebeckens akzeptiert werden kann. Das Ziel dieser Hochrechnung war lediglich die Formulierung tendenzieller Aussagen über die zukünftige Entwicklung, was mit diesem Ansatz erreicht worden ist.

Um die raumzeitliche Entwicklung der Tidebecken zu visualisieren und damit die Interpretierbarkeit der Geländedaten zu erhöhen, wurde zudem für jedes Tidebecken eine Animation erstellt, welche die topographischen Veränderungen in den Tidebecken zeigt. Neben den natürlichen Entwicklungen sind zudem die morphologischen Auswirkungen der baulichen Eingriffe deutlich zu erkennen.

11. Literatur

- AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM (1979): Morphologische Veränderungen im Tidebecken Norderhever und ihre Bedeutung für den Küstenschutz. Gewässerkundliche Berichte 5/79. unveröff.
- AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM (1985): Fachplan Küstenschutz Sylt. Husum. 186 S. unveröff.
- AMT FÜR LÄNDLICHE RÄUME HUSUM (1995): Beweissicherungsmaßnahmen in der Nordstrander Bucht. Zwischenbericht. Husum, 26 Seiten. unveröff.
- AMT FÜR LÄNDLICHE RÄUME HUSUM (1996): Zwischenbericht zu „Untersuchungen zum Wattensicherungsdamm Festland-Pellworm (Sicherungsdamm Pellworm)“. 3. Ausfertigung. Husum. 118 S. unveröff.
- AMT FÜR LÄNDLICHE RÄUME HUSUM (1997): Fachplan Küstenschutz Sylt - Fortschreibung. Husum, 109 Seiten. unveröff.
- AMT FÜR LÄNDLICHE RÄUME HUSUM (1999): Fachplan Küstenschutz Föhr (Südküste). Husum, 141 Seiten. unveröff.
- ANDERSEN, T.J. & PEJRUP, M. (2001): Suspended sediment transport on a temperate, microtidal mudflat, the Danish Wadden Sea. *Marine Geology* 173: 69-85.
- ANDRESEN, T. (2000): Visualisierung von Geodaten mit Hilfe von 3D-Animationen – Analyse des Informationsgewinnes anhand einer Animation der Morphodynamik des Elbe-Ästuars. Diplomarbeit, Uni Kiel, 139 S. unveröff.
- ASP, N.E. (2001): Morphologische und sedimentologische Untersuchungen im Dithmarscher Wattenmeer. Jahresbericht des Forschungs- und Technologiezentrums Westküste. Büsum. unveröff.
- BAHRENBERG, G. & GIESE, E. (1975): Statistische Methoden und ihre Anwendung in der Geographie. Teubner Studienbücher: Stuttgart. 308 S..
- BAHRENBERG, G., GIESE, E. & NIPPER, J. (1999): Statistische Methoden in der Geographie 1. Univariate und bivariate Statistik. Teubner Studienbücher: Stuttgart. 234 S..
- BAHRENBERG, G., GIESE, E. & NIPPER, J. (1992): Statistische Methoden in der Geographie 2. Multivariate Statistik. Teubner Studienbücher: Stuttgart. 415 S..
- BANTELMAAN, A. (1967): Die Landschaftsentwicklung an der schleswig-holsteinischen Westküste. Offa-Bücher 21: Wachholtz Verlag. Neumünster.
- BARTELME, N. (1995): Geoinformatik. Modelle, Strukturen und Funktionen. Springer: Heidelberg. 414 S..
- BARTHOLDY, J. & AAGAARD, T. (2001): Storm surge effects on a back-barrier tidal flat of the Danish Wadden Sea. *Geo Marine Letters* 20(3): 133-141.
- BARTLETT, D.J. (2000): Working on the Frontiers of Science: Applying GIS to the Coastal Zone. In: WRIGHT, D. & BARTLETT, D.J.: *Marine and Coastal Geographical Information Systems*. Taylor & Francis: London: 11-24.

-
- BATTJES, J.A. (1961): Study of the Texelstroom tidal inlet. Report 62.4, Rijkswaterstaat, Hoorn. Netherlands.
- BEARMAN, G. (1997): Waves, Tides and Shallow - Water Processes. The Open University, Oxford. 187 S..
- BEHRE, K.-E. (1987): Meeresspiegelbewegungen und Siedlungsgeschichte in den Nordseemarschen. Vorträge d. Oldenb. Landschaft 17. Oldenburg. 47 S..
- BERTALANFFY, L. VON (1951): General system Theory: a new approach to unity of science. Human biology, Vol. 24, No. 4, Baltimore.
- BETTAC, W., SCHLEIDER, W. & SINDERN, J. (1984): Das Küstenkartenwerk 1:25 000 der Deutschen Bucht - Vermessung und Kartographie. Die Küste 40: 13-32.
- BILL, R. (1996): Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Analysen, Anwendungen und neue Entwicklungen. Bd. 2. Wichmann: Heidelberg. 463 S..
- BIEGEL, E.J. (1992): Impact of Sea Level Rise on the Morphology of the Wadden Sea in the scope of its ecological function. Part 2: Selected data of the Dutch Wadden Sea - Inst. for Marine and Atmosphere Research Utrecht + Delft. Emmeloord In opdracht van Rijkswaterstaat - Dienst Getijdewateren. 18 S.
- BOCK, S. & WITEZ, P. (1999): Errors in measurement and their effects on digital elevation models of flat terrains. In: SHI, W., GOODCHILD, M.F. & FISCHER, P.F.: Proceedings of the international symposium on spatial data quality: 219-227.
- BOOTHROYD, J.C. (1985): Mesotidal inlets and estuaries. In: DAVIS, R.A.: Coastal Sedimentary Environments: 445-532.
- BOORMANN, L.A. & HAZELDEN, J. (1995): Saltmarsh Creation and Management for Coastal Defence. In: HEALY & DOODY: Directions in European Coastal Management. Samara Publishing Limited: 175-183.
- BOORMAN, L.A., GARBUS, R.A. & BARTLETT, D. (1996): The establishment of saltmarsh vegetation on agricultural land following marine inundation. Proceedings of the 31st MAFF Conference of River and Coastal Engineering MAFF, Flood and Coastal Defence Div.. London.
- BREDOW, E. (1953): Das Watt in der Topographischen Karte. Kartographische Nachrichten 2: 7-9.
- BRÜCKNER, H. (1999): Küsten – sensible Geo- und Ökosysteme unter zunehmendem Stress. Petermanns Geographische Mitteilungen 143: 6-21.
- BRUUN, P. (1962): Sea level rise as a cause of shore erosion. Journal of the Waterways and Harbours Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers 88: 117-130.
- BRUUN, P. (1978): Stability of tidal inlets - theory and engineering. Developments in Geotechnical Engineering 29. Elsevier, Amsterdam. 510 S..
- BRUUN, P. (1988): The Bruun rule of erosion by sea level rise: a discussion of large-scale two- and three-dimensional usages. Journal of Coastal Research 4 (4): 627-648.

-
- BULLINGER, A. (2000): Vergleich von Interpolationsverfahren und digitalen Geländemodellen für Wattgebiete – GIS-gestützte Untersuchungen am Beispiel der morphologischen Modellierung von Tidebecken in Schleswig-Holstein. Diplomarbeit, Uni Kiel. 121 S. unveröff.
- BURROUGH, P.A. & Mc DONNELL, R.A. (1998): Principles of Geographical Information Systems. University Press. Oxford. 333 S..
- BUZIEK, G., DRANSCH, D. & RASE, W.-D. (2000) (Hrsg.): Dynamische Visualisierung. Grundlagen und Anwendungsbeispiele für kartographische Animationen. Springer, 234 S..
- CAMARA, A.S. & RAPER, J. (1999) (Hrsg.): Spatial Multimedia and Virtual Reality. Taylor & Francis, 159 S..
- CAMERON, T.D.J., DOORN, D. van, LABAN, C. & STREIF, H.J. (1993): Geology of the Southern North Sea Basin. In: HILLEN, R. & VERHAGEN, H.J. (Hrsg.): Coastlines of the Southern North Sea Coast: 14-26.
- CARTER, R.W.G. (1988): Coastal Environments. An Introduction to Physical, Ecological and Cultural Systems of Coastlines. Academic Press. London. 617 S.
- CROMMELIN, D. (1940): De herkomst van het zand van de Waddenzee. Tijdschrift van het Koninklijk Nederlandsch Aardrijkskundig Genootschap. Deel LVII.
- DÄSSLER, R. (1999): Das Einsteigerseminar VRML. Kaarst: bhv-Verlag. 416 S..
- DAVIS, R.A. & HAYES, M.O. (1984): What is a wave dominated coast? Marine Geology 60: 313-329.
- DEAN, R.G. & WALTON, T. L. (1975): Sediment transport processes in the vicinity of inlets with special reference to sand trapping. In: CRONIN, L.E. (Hrsg.): Estuarine Research 2, Geol. and Eng., Academic Press, New York: 129-149.
- DEAN, R.G. (1988): Sediment interaction at modified coastal inlets: processes and policies. Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies 29: 412-439.
- DIACONIS, P. (1985): Theoris of data analysis: from magical thinking through classical statistics. In: HOAGLIN, D.C., TUKEY, J.W. & MOSTELLER, F. (Hrsg.): Exploring data tables, trends, and shapes: 1-36.
- DIBIASE, D. (1990): Visualization in the earth sciences. Earth and Mineral Sciences, Pennsylvania State University 59(2).
- DIECKMANN, R. (1984): Flächenhafter Küstenschutz. Mitteilungen des Franzius-Instituts der TU Hannover 59: 305-325.
- DIECKMANN, R. (1985): Geomorphologie, Stabilitäts- und Langzeitverhalten von Watteinzugsgebieten der Deutschen Bucht. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der TU Hannover 60: 133-361.
- DIECKMANN, R. (1988): Entwicklung der Vorländer an der nordfriesischen Festlandsküste. Wasser und Boden 3: 146-150.

-
- DIECKMANN, R. (1990): Anmerkungen zum zukünftigen Küstenschutz und Naturschutz aus geomorphologischer Sicht. *Wasser und Boden* 1: 44-47.
- DIECKMANN, R. (1992): Morphological Structures in German Tidal Flat Areas. *Proceedings of the International Coastal Congress*: 365-376.
- DIETRICH, G., KALLE, K. & KRAUSS, W. (1975): *Allgemeine Meereskunde*. 3. Aufl., Gebrüder Bornträger. Stuttgart. 593 S.
- DIJKEMA, K.S. (1987): Changes in salt-marsh area in the Netherlands Wadden Sea after 1600. In: HUISKES, A.H.L., BLOM, C.W.P.M. & ROZEMA, J. (Hrsg.): *Vegetation between land and sea*. Junk Publishers Dordrecht: 42-49.
- DIJKEMA, K.S., BOSSINADE, J.H., BOUWSEMA, P. & DE GLOPPER, R.J. (1990): Salt marshes in the Netherlands Wadden Sea: rising high tide levels and accretion enhancement. In: BEUKEMA, W.J. WOLFF & J.J.W.M. BROUNS (Hrsg.) (1990): *Expected effects of climatic change on marine coastal ecosystems*. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht.
- DIKAU, R. & SAURER, H. (1999): *GIS for Earth Surface Systems. Analysis and Modelling of Natural Environment*. Gebrüder Borntraeger: Berlin. 197 S..
- DITTMER, E. (1952): Die nacheiszeitliche Entwicklung der schleswig-holsteinischen Westküste. *Meyniana* 1: 138-168.
- DOLEZAL, R. (1966): Das Luftbild im Dienste wasserwirtschaftlicher Maßnahmen. *Deutsche Gewässerkundl. Mitteilungen* 6: 174-182.
- DOLEZAL, R. (1974): Vermessungstechnische Methoden zur Erfassung der Topographie von Küsten mit und ohne Gezeiten. *Zeitschrift für Vermessungswesen* 12: 552-563.
- DOLLNER, J. & HINRICHS, K. (2000): An object-oriented approach for integrating 3D visualization systems and GIS. *Computers and Geosciences* 26(1): 67-76.
- DORFNER, L. (2000): Interactive visualization of terrain models and orthophotos. *Geodetski Vestnik* 44(3): 205-212.
- DÖRJES, J. (1978): Das Watt als Lebensraum. In: REINECK, H.-E. (Hrsg.): *Das Watt. Ablagerungs- und Lebensraum*. Kramer-Verlag. Frankfurt a.M.: 107-143.
- DRANSCH, D. (1997): *Computer-Animation in der Kartographie*. Springer. 145 S.
- EHLERS, J. (1988): *The morphodynamics of the Wadden Sea*. A. A. Balkema. Rotterdam. 397 S.
- EHLERS, J. (1990): Sedimentbewegung und Küstenveränderungen im Wattenmeer der Nordsee. *Geographische Rundschau* 42(12): 640-647.
- EITNER, V. (1995): Sedimentologische und morphologische Untersuchungen der ersten kombinierten Vorstrand- und Strandauffüllung im Bereich des Bühnen-Deckwerks-Systems von Norderney. *Die Küste* 57: 25-45.
- ERCHINGER, H.F. (1971): Landgewinnung und Lahnungsbau im Wattgebiet. *Die Küste* 21: 102-108.

-
- ERCHINGER, H.F. & KNAACK, H. (1995): Die Versuchsstrandaufspülung 1992 auf Norderney und Messungen zum äolischen Sandtransport. *Die Küste* 57: 1- 23.
- ERCHINGER, H.F., COLDEWEY, H.-G. & MEYER, C. (1996): Interdisziplinäre Erforschung des Deichvorlandes im Forschungsvorhaben „Erosionsfestigkeit von Hellern“. *Die Küste* 58: 1-46.
- ESRI: Online Dokumentation zu ArcInfo 7.2.1.
- ESSELINK, P., DIJKEMA, K.S., REENTS, S. & HAGEMAN, G. (1998) : Vertical accretion and profile changes in abandoned man-made tidal marshes in the Dollard Estuary, the Netherlands. *Journal of Coastal Research* 14: 570-582.
- EYSINK, W.D. (1991): Morphologic Response of tidal basins to changes. Proceedings of the 22nd International Conference on Coastal Engineering, Delft 2, ASCE, New York.
- FERK, U. (1992): Wirkung von Meeresspiegeländerungen auf Watteinzugsgebiete. Diplomarbeit, unveröff., Hamburg.
- FERK, U. (1995): Folgen eines beschleunigten Meeresspiegelanstiegs für die Wattgebiete der niedersächsischen Nordseeküste. *Die Küste* 57: 135-156.
- FLEMMING, B.W. & BATHOLOMÄ, A. (1997): Response of the Wadden Sea to a Rising Sea Level: a Predictive Empirical Model. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift* 49(2/3): 343-353.
- FRENCH, P.W. (1999): Managed retreat: a natural analogue from Medway estuary, UK. *Ocean & Coastal Management* 42: 49-62.
- FRIEDHOFF, R.M. & BENZON, W. (1989): Visualization: The second computer revolution. New York.
- FÜHRBÖTER, A. & JENSEN, J. (1985): Säkularänderungen der mittleren Tidewasserstände in der Deutschen Bucht. *Die Küste* 42: 78-100.
- FÜHRBÖTER, A. & DETTE, H.-H. (1992): Strandvorspülungen vor der Westküste von Sylt. *Die Küste* 53: 51-126.
- GAST, R., KÖSTER, R. & RUNTE, K.-H. (1984): Die Wattsedimente in der nördlichen und mittleren Meldorfer Bucht. *Die Küste* 40: 165-257.
- GERRITSEN, F. & DE JONG, H. (1983): Stability of the tidal inlet of the Westerschelde. Report nr. WWKZ-83.V008. Rijkswaterstaat, Vlissingen, the Netherlands: 1-38.
- GERRITSEN, F. & DE JONG, H. (1985): Stability parameters of tidal inlets the Dutch Wadden Sea. Note WWKZ-84.V0,16, Rijkswaterstaat, the Hague, the Netherlands: 1-53.
- GERRITSEN, F. (1990): Morphological stability of inlets and channels of the Western Wadden Sea. Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, GWAO-90.019, Den Haag.
- GERRITSEN, F. & DUNSBURGEN, D.W. (1998): Morphological-Empirical Relationships for Ebb Tidal Deltas as a Tool in Dynamic-Empirical Modelling. *Journal of Coastal Research* 26: 273-281.
- GÖHREN, H. (1968): Triftströmungen im Wattenmeer. *Mitteilungen des Franzius-Instituts der TU Hannover* 30.

-
- GÖNNERT, G. (1996): Auswirkungen des Eidersperrwerkes auf die Morphodynamik des Eiderästuars. *Die Küste* 58: 75-107.
- GÖNNERT, G. & FERK, U. (1996): Natürliche und anthropogen beeinflusste Entwicklung von Sturmfluten in der Deutschen Bucht und der Unterelbe. In: STERR, H. & PREU, C. (Hrsg.): Beiträge zur aktuellen Küstenforschung, Aspekte - Methoden - Perspektiven. VSAG 18: 13-32.
- GOLDENBOGEN, R. (1994): Erste Ergebnisse empirischer Modellierung der Morphodynamik eines Wattenzugsgebietes am Beispiel der Dithmarscher Bucht. *Die Küste* 56: 135-149.
- GOODCHILD, M.F. & KEMP, K. (Hrsg.) (1990): NCGIA Core Curriculum. Technical Issues in GIS. Santa Barbara: National Center for Geographic Information and Analysis.
- GRIPP, K. (1964): Erdgeschichte von Schleswig-Holstein. Wachholtz Verlag. Neumünster. 411 S.
- HARDISTY, J., MIDDLETON, R., WHYATT, D. & ROUSE, H. (1997): Geomorphological and Hydrodynamic Results from Digital Terrain Models of the Humber Estuary. In: LANE, S.N., RICHARDS, K.S. & CHANDLER, J.H. (Hrsg.): Landform Monitoring, Modelling and Analysis. John Wiley & Sons. Chichester: 421-433.
- HAYES, M.O. (1975): Morphology and sand accumulation in estuaries. In: CRONIN, L.E. (Hrsg.): Estuarine Research 2: 3-22.
- HAYES, M.O. (1979): Barrier Island morphology as a function of tidal and wave regime. In: LEATHERMAN, S.P. (Hrsg.): Barrier Islands: 1-29.
- HEARNSHAW, H.M. & UNWIN, D.J. (1994) (Hrsg.): Visualization in Geographical Information Systems. John Wiley & Sons, Chichester. 243 S..
- HIGELKE, B. (1978): Morphodynamik und Materialbilanz im Küstenvorfeld zwischen Hever und Elbe. Ergebnisse quantitativer Kartenanalysen für die Zeit von 1936 bis 1969. *Regensburger Geographische Schriften* 11, 167 S.
- HIGELKE, B. (1981): Bestandaufnahme des Wattreliefs, Morphodynamik und Tendenzen morphologischer Veränderungen im Tidebecken der Norderhever und westlich der Insel Pellworm. *Schriftenreihe der Landesregierung Schleswig-Holstein* 12: 155-174.
- HIGELKE, B., HOFFMANN, D. & MÜLLER-WILLE, M. (1982): Das Norderhever-Projekt.
- HIGELKE, B. (1998): Das nordfriesische Wattenmeer seit dem Mittelalter. Landesamt für den Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer, Umweltbundesamt (Hrsg.): Umweltatlas Wattenmeer. Bd. 1. Nordfriesisches und Dithmarscher Wattenmeer. 28 S., Stuttgart: Ulmer.
- HOFFMANN, D. (1986): Beobachtungen und Daten zur jüngeren Entwicklung des Küstengebietes von Dithmarschen und Nordfriesland. Ergebnisse von Profilaufnahmen beim Bau einer Erdgasleitung. *Offa* 43: 251-264.

-
- HOFSTEDTE, J.L.A. (1996a): Systemanalyse der Salzwiesen im Wattenmeer von Schleswig-Holstein. In: STERR, H. & PREU, C. (Hrsg.): Beiträge zur aktuellen Küstenforschung, Aspekte - Methoden - Perspektiven. VSAG 18: 53-64.
- HOFSTEDTE, J.L.A. (1996b): Process-response analysis for the North Frisian supratidal sands (Germany): *Journal of Coastal Research* 13: 1-7.
- HOFSTEDTE, J.L.A. & SCHIRMACHER, R. (1996): Vorlandmanagement in Schleswig-Holstein. *Die Küste* 58: 61-74.
- HOFSTEDTE, J.L.A. (1997): Morphologie des St. Peter-Ording-Sandes. *Die Küste* 59: 143-171.
- HOFSTEDTE, J.L.A. (1998a): Die nordfriesischen Außensände. Landesamt für den Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer, Umweltbundesamt (Hrsg.): *Umweltatlas Wattenmeer*. Bd. 1. Nordfriesisches und Dithmarscher Wattenmeer. S. 36, Stuttgart: Ulmer.
- HOFSTEDTE, J.L.A. (1998b): Optimierung von Küstensicherungsarbeiten im Küstenvorfeld der Nordseeküste: Projektüberblick und -synthese. Teil 1. Schlussbericht des Forschungsvorhabens MTK 0564. LANU. Flintbek. unveröff.
- HOFSTEDTE, J.L.A. (1999a): Process-response analysis for Hörnum tidal inlet in the German sector of the Wadden Sea. *Quaternary International* 60: 107-117.
- HOFSTEDTE, J.L.A. (1999b): Regional differences in the morphological behaviour of four German Wadden Sea barriers. *Quaternary International* 56: 99-106.
- HOFSTEDTE, J.L.A. (1999c): Mögliche Auswirkungen eines Klimawandels im Wattenmeer. *Petermanns Geographische Mitteilungen* 143 (4): 305-314.
- HOFSTEDTE, J.L.A. & SPITTA, V. (2000): Morphogenese und -dynamik im Seegat und Ebb-Delta des Hörnum Tiefs. *Die Küste* 62: 141-157.
- HOUWING, E.-J. (2000): Morphodynamic development of intertidal mudflats: Consequences for the extension of the pioneer zone. *Continental Shelf Research* 20: 1735-1748.
- HJULSTRÖM, F. (1935): Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by River Fyris. *Bulletin of the Geological Institutions of the University of Uppsala* 25: 221-527.
- HUANG, B., JIANG, B. & LI, H. (2001): An integration of GIS, virtual reality and the internet for visualization, analysis and exploration of spatial data. *International Journal of Geographical Information Science* 15(5): 439-456.
- HUTCHINSON, M.F. (1988): Calculation of hydrologically sound digital elevation models. *Third International Symposium on Spatial Data Handling, Sydney*. Columbus, Ohio: International Geographical Union.
- HUTCHINSON, M.F. (1989): A new procedure for gridding elevation and streamline data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology* 106: 211-232.

-
- HUTCHINSON, M.F. & DOWLING, T.I. (1991): A continental hydrological assessment of a new grid-based digital elevation model of Australia. *Hydrological Processes* 5: 45-58.
- HUTCHINSON, M.F. (1993): Development of a continent-wide DEM with applications to terrain and climate analysis. In: GOODCHILD, M.F., BRADLEY, O.P. & STEYAERT, L.T. (Hrsg.): *Environmental Modeling with GIS*. New York, Oxford University Press: 392-399.
- HUTCHINSON, M.F. (1996): A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models. In *Proceedings, Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*, Santa Fe, NM, January 21-26, 1996. Santa Barbara, CA: National Center for Geographic Information and Analysis.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL OF CLIMATE CHANGE (IPCC) (Hrsg.) (2001): *Climate Change 2001: Synthesis Report*, Cambridge Univ. Press, 397 S..
- JANSEN, J.H.F. (1979): Late Quaternary sedimentation in the North Sea. In: OELE, E., SCHÜTTENHELM, R.T.E. & WIGGERS, A.J. (Hrsg.): *The Quaternary history of the North Sea*. Uppsala. *Acta Universitatis Upsaliensis*: 175-187.
- JANSSEN-STELDER, B. (2000): The effect of different hydrodynamic conditions on the morphodynamics of a tidal mudflat in the Dutch Wadden Sea. *Continental Shelf Research* 20: 1461-1478.
- JELGERSMA, S. (1979): Sea level changes in the North Sea Basin. In: OELE, E., SCHÜTTENHELM, R.T.E. & WIGGERS, A.J. (Hrsg.): *The Quaternary history of the North Sea*. Uppsala. *Acta Universitatis Upsaliensis*: 233-248.
- JENSEN, J., MÜGGE, H. - E. & SCHÖNFELD, W. (1992): Analyse der Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht. *Die Küste* 53: 211-276.
- JENSEN, F. (1998): Gezeitenbewegung in der Nordsee und im nordfriesischen Wattenmeer. Landesamt für den Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer, Umweltbundesamt (Hrsg.): *Umweltatlas Wattenmeer*. Bd. 1. Nordfriesisches und Dithmarscher Wattenmeer. S. 54, Stuttgart: Ulmer.
- KELLETTAT, H.D. (Hrsg.) (1998): *German geographical coastal research: the last decade*. Inst. for Scient. Co-operat. Tübingen.
- KEMPF, N., LANP, J. & PROKOSCH, P. (1987): Salzwiesen: Geformt von Küstenschutz, Landwirtschaft oder Natur? – Tagungsbericht WWF Heft1, 476 S.
- KLEEF, A.W. van (1991): Empirical relationships for tidal inlets, basins and deltas. Rapport GEOPRO 1991. 19. RIKZ, Den Haag.
- KLOSS, J., ROCKWELL, R., SZABÓ, K. & DUCHROW, M. (1998): VRML97: der neue Standard für interaktive 3D-Welten im World Wide Web. Bonn: Addison Wesley. 366 S..

-
- KOHSIEK, L.H.M., BUIST, H. J., BLOKS, P., MISDORP, R., V.D. BERG, J. H., VISSER, J. (1988): Sedimentary processes on a sandy shoal in a mesotidal estuary (Eastern Scheldt). In: DE BOER, P. L., van GELDER, A., NIO, S. D. (Hrsg.): Tide-influenced sedimentary environments and facies. Reidel Publ. Comp: 201-214.
- KÖSTER, R. & RICKLEFFS, K. (1998): Sediments and suspended matter in the Sylt-Romo tidal area: A summary of results collected in the „SWAP“-Project. *Senckenbergiana Maritima* 29: 101-109.
- KRAMER, J. (1978): Küstenschutzwerke an der deutschen Nord- und Ostsee. *Die Küste* 32: 124-139.
- KUNZ, H., NIEMEYER, H.D., GOLDENBOGEN, R. & SCHROEDER, E. (1998): Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben „WADE“ (Wadden Sea morphological development). Niedersächsisches Landesamt für Ökologie – Forschungsstelle Küste –, Bericht zum Forschungsvorhaben MTK 0508, Norderney, 78 S.
- LANDESAMT FÜR DEN NATIONALPARK SCHLESWIG-HOLSTEINISCHES WATTENMEER (Hrsg.) (1996): Ökosystemforschung Wattenmeer – Synthesebericht: Grundlagen für einen Nationalparkplan. Schriftenreihe des Nationalparks Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer 8, 784 S.
- LANE, S.N., RICHARDS, K.S. & CHANDLER, J.H. (1997): Landform Monitoring, Modeling and Analysis. John Wiley & Sons. Chichester. 454 S.
- LANG, A.W. (1975): Untersuchungen zur morphologischen Entwicklung des Dithmarscher Watts von der Mitte des 16. Jahrhunderts bis zur Gegenwart. *Hamburger Küstenforschung* 31.
- LANGE, E. (1999): Von der analogen zur GIS-gestützten 3D-Visualisierung bei der Planung von Landschaften. *Geo-Informationssysteme* 12(2): 29-37.
- LASSEN, H. (1995): Interpretation von Wasserstandsänderungen in der Deutschen Bucht auf der Basis der Ergebnisse eines KFKI - Projektes. *Die Küste* 57: 121-134.
- LASSEN, H. & SIEFERT, W. (1991): Mittlere Tidewasserstände in der südöstlichen Nordsee - säkularer Trend und Verhältnisse um 1980. *Die Küste* 52: 85-137.
- LI, R. (2000): Data Models for Marine and Coastal Geographical Information Systems. In: WRIGHT, D. & BARTLETT, D.J. (Hrsg.): Marine and Coastal Geographical Information Systems. Taylor & Francis: London: 25-36.
- LIEBERMANN, VON N., SCHWARZE, H. & ZIMMERMANN, C. (1998): Ausführung und Wirkungsweise von Lahnungen. *Die Küste* 60: 191-226.
- LOCHTER, F. et al. (1999): Internetfähige 3D-GIS-Software entwickelt für den internationalen Austausch von wissenschaftlichen Tiefbohrungsdaten. *Geo-Informationssysteme* 12(1): 4-8.
- MASSEL, S. (1989): Hydrodynamics of Coastal Zones. Elsevier Oceanography Series 48. Amsterdam. 336 S.

-
- MACEACHREN, A.M. (1994): Time as a Cartographic Variable. In: HEARNshaw, H.M. & UNWIN, D.J. (1994): Visualization in Geographical Information Systems. Chichester.
- MACEACHREN, A.M. & TAYLOR, B.R.F. (Hrsg.) (1994): Visualization in modern cartography. Oxford.
- MACEACHREN, A.M. & KRAAK, M.-J. (1997): Exploratory cartographic visualization: Advancing the agenda. Computers & Geosciences 23(4).
- MAGNENAT-THALMANN, N. & THALMANN, D. (Hrsg.) (1990): Computer animation: Theory and practice. Tokyo-Berlin.
- MAGUIRE, D.J., LONGLEY, P.A., GOODCHILD M.F. & RHIND, D. (Hrsg.) (1999): Geographic Information Systems and Science. Longman Scientific & Technical. Essex.
- MATHEJA, A., SCHWARZE, H. & ZIMMERMANN, C. (1998): Simulation von Sedimentation und Erosion in Lahnungsfeldern. Die Küste 60: 161-190.
- MCCULLAGH, M.J. (1998): Quality, Use and Visualisation in Terrain Modelling. In: LANE, S.N., RICHARDS, K.S. & CHANDLER, J.H. (Hrsg.): Landform Monitoring, Modelling and Analysis. John Wiley & Sons. Chichester: 95-117.
- MINISTER FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN (MELFF) (1981): Gutachten zur geplanten Vordeichung der Nordstrander Bucht. Schriftenreihe der Landesregierung Schleswig-Holstein 12.
- MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHE RÄUME, LANDESPLANUNG, LANDWIRTSCHAFT UND TOURISMUS (MLR) (2001): Generalplan Küste 2001. Integriertes Küstenschutzmanagement in Schleswig-Holstein.
<http://www.schleswig-olstein.de/landsh/mlr/kuestenschutz/downloads/Generalplan0521.pdf>
- MISDORP, R., STEYAERT, F., HALLIE, F. & DE RONDE, J. (1990): Climate Change, Sea level rise and morphological developments in the Dutch Wadden Sea, a marine wetland. In: BEUKEMA, J.J., WOLFF, W.J. & BROUNS, J.W.M.(Hrsg.): Expected Effects of Climatic Change on Marine Coastal Ecosystems: 123-131.
- MOLEN, J. van der & DIJCK, B. van (2000): The evolution of the Dutch and Belgian coasts and the role of sand supply from the North Sea. Global and Planetary Change 27: 223-244.
- MÜLLER, F. & FISCHER, O. (1955): Das Wasserwesen an der schleswig-holsteinischen Nordseeküste. III. Teil, Das Festland, Bd. 1.
- NIEMEYER, H.D. (1986): Ausbreitung und Dämpfung des Seegangs im See- und Wattgebiet von Norderney. Jahresbericht 1985 der Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz Norderney 37: 49-95.
- NIEMEYER, H.D. & KAISER, R. (1997): Variationen im lokalen Seegangsklima infolge morphologischer Änderungen im Riffbogen. Berichte der Forschungsstelle Küste 41: 107-117.

-
- NIEMEYER, H.D. & KAISER, R. (1998): Hydrodynamik als ökosystemarer Gestaltungsfaktor im Wattenmeer. In: PREU, C. (Hrsg.): Aktuelle Beiträge zur interdisziplinären Meeres- und Küstenforschung: Ansätze, Methoden und Perspektiven. VSAG 20: 45-62.
- NIEMEYER, H.D. (2000): Forschungsvorhaben WADE – Synthese und Ausblick. Die Küste 62: 87-100.
- NORCLIFFE, G.B. (1981): Schließende Statistik für Geographen. Eine Einführung. Springer-Verlag: Berlin. 250 S.
- O'BRIEN, M.P. (1931): Estuary Tidal Prism Related to Entrance Areas. ASCE, Civil Engineering 1(8).
- O'BRIEN, M.P. (1969): Equilibrium flow areas of tidal inlets on sandy coasts. Journal of the Waterways and Harbours Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineering 96, No. WW1.
- OOST, A.P. (1995): Dynamics and sedimentary development of the Dutch Wadden Sea with emphasis on the Frisian Inlet. PhD-Thesis, Geologica ultraiectina, Mededelingen van de Faculteit Aardwetenschappen, Univ. Utrecht 126. 454 S..
- OOST, A.P. & DE BOER, P.L. (1994): Sedimentology and development of barrier islands, ebb-tidal deltas, inlets and backbarrier areas of the Dutch Wadden Sea. Senckenbergiana maritima 24 (1/6): 65-116.
- OSTERTHUN, M. (1988): Vorlandbildung an Deichen und Sicherungsdämmen – Ein BMFT-Forschungsprojekt – . Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover 67: 323-342.
- OSTERTHUN, M., ZHU, J. & PARTENSCKY, H.-W. (1992): Analyse und Simulation von Vorlandveränderungen an der deutschen Nordseeküste. Die Küste 53: 171-210.
- OVESEN, C.H. (1990): Salt marsh management in the Wadden Sea region. Proceedings of the 2nd trilateral Working Conference, Rømø, Denmark. Ministry of the Environment. The National Forestry Agency. 203 S.
- PARTENSCKY, H.-W. (1984): Untersuchungen über die morphologischen Verhältnisse in der Meldorfer Bucht und der Piep. Gutachterliche Stellungnahme, unveröffentlicht.
- PETERSEN, M. (1959): Die topographische Wattkarte und ihre Bedeutung für den Küstenschutz. Die Wasserwirtschaft 3: 62-65.
- PETHICK, J.S. (1997): Coastal Management and Sea Level Rise: a Morphological Approach. In: LANE, S.N., RICHARDS, K.S. & CHANDLER, J.H. (Hrsg.): Landform Monitoring, Modelling and Analysis. John Wiley & Sons. Chichester: 405-419.
- POSTMA, H. (1961): Transport and accumulation of suspended matter in the Dutch Wadden Sea. Netherlands Journal of Sea Research 1: 148-190.
- POSTMA, H. (1981): Exchange of materials between the North Sea and the Wadden Sea. Marine Geology 40: 199-213.
- PROBST, B. (1996): Deichvorlandbewirtschaftung im Wandel der Zeit. Die Küste 58: 47-60.

-
- PROBST, B. (2000): Generalplanungen für den Küstenschutz in Schleswig-Holstein. In: ZIMMERMANN, C. (Hrsg.): Risikomanagement im Küstenraum. Mitteilungen des Franzius-Instituts 85: 69-76.
- RAPER, J. (2000a): 2.5- and 3-D GIS for Coastal Geomorphology. In: WRIGHT, D. & BARTLETT, D.J. (Hrsg.): Marine and Coastal Geographical Information Systems. Taylor & Francis: London: 128-136.
- RAPER, J. (2000b): Multidimensional Geographic Information Science. Taylor & Francis: London. 300 S..
- REISE, K. (1998): Coastal change in a tidal backbarrier basin of the northern Wadden Sea: Are tidal flats fading away? *Senckenbergiana Maritima* 29: 121-127.
- REINECK, H.-E. (1978): Die Watten der deutschen Nordseeküste. *Die Küste* 32: 66-83.
- REINECK, H.-E. (1982): Topographie und Geomorphologie. In: REINECK, H.-E. (Hrsg.): Das Watt. Ablagerungs- und Lebensraum. Senckenberg-Buch 50. Frankfurt/M: 7-10.
- RENGER, E. (1974): Untersuchungen von Wateinzugsgebieten. Mitteilungen des Franzius-Instituts der TU Hannover 40: 243-254.
- RENGER, E. & PARTENSCKY, H.-W. (1975): Stabilitätskriterien für Tidebecken. *Die Küste* 27: 63-73.
- RENGER, E. (1976a): Grundzüge der Analyse und Berechnung von morphologischen Veränderungen in Wattengebieten. Mitteilungen des Franzius-Instituts 44.
- RENGER, E. (1976b): Quantitative Analyse der Morphologie von Wateinzugsgebieten und Tidebecken. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Uni Hannover 43: 1-160.
- RIEDL, A. (2002): Web3D: Entwicklung, Standards, Formate. *Kartographische Nachrichten* 5: 214-220.
- RIETVELD, C.F.W. (1963): The natural development of the Wadden Sea after the enclosure of the Zuider Zee. Proc. 8th Conf. Coastal Eng., Mexico City.
- RODLOFF, W. (1970a): Über Wattwasserläufe. Mitteilungen des Franzius-Instituts der TU Hannover 34: 1-88.
- RODLOFF, W. (1970b): Über die Morphologie einiger Wattgebiete der schleswig-holsteinischen Westküste. *Die Küste* 20: 73-100.
- SHELLNHUBER, H.-J. & STERR, H. (1993): Klimaänderungen und Küste. Springer Verlag: Berlin. 400 S..
- SCHERER, B. (1998): Der Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer. Landesamt für den Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer, Umweltbundesamt (Hrsg.): Umweltatlas Wattenmeer. Bd. 1. Nordfriesisches und Dithmarscher Wattenmeer. S. 12, Stuttgart: Ulmer.
- SCHERENBERG, R. & SAGGAU, W. (1988): Der Bau der Vordeichung vor der Hattstedter Marsch im Rahmen der Küstenschutzmaßnahmen in der Nordstrander Bucht. *Die Küste* 47: 205-243.

-
- SCHLEIDER, W. & BUZIEK, G. (1991): Digitales Geländemodell Küste (DIGEKÜ) - Grundlagen und Aufgabe -. Die Küste 52: 139-144.
- SCHLEIDER, W. (1997): Erfassung der Gewässertopographie im Küstengebiet. DAWAKO 1996, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft TH Darmstadt 98.
- SCHLEIDER, W. (2000): 5x synoptische Vermessung der deutschen Küstengewässer der Nordsee / Archivierung der Ergebnisse / Nutzung des Digitalen Tiefenmodells Küste DIGEKÜ. Die Küste 62: 37-51.
- SCHMIDTKE, K.-D. (1995): Die Entstehung Schleswig-Holsteins. 3. Aufl., Wachholtz Verlag. Neumünster. 128 S.
- SHA, L.P. (1992): The variability of the ebb-tidal delta and inlet morphology: a model for the west and East Frisian Islands, The Netherland and Germany. Marine Geology.
- SIEFERT, W. (1974): Über den Seegang in Flachwassergebieten. Mitteilungen des Leichtweiß-Instituts der TU Braunschweig 40: 1-243.
- SIEFERT, W. (1990): Sea-Level Changes and Tidal-Flat Characteristics. In: BEUKEMA, J.J., WOLFF, W.J. & BROUNS, J.J.W.M. (Hrsg.): Expected effects of climatic change on marine coastal ecosystems. Developments in Hydrobiology 57. Kluwer Academic: 105-112.
- SIEFERT, W., FAHSE, H., MIEßNER, F., RICHTER, H.- H., TAUBERT, A. & WIELAND, P. (1980): Die Strömungsverhältnisse vor der Westküste Schleswig-Holsteins - Ergebnisse eines KFKI-Meßprogramms. Die Küste 35: 147-186.
- SIEFERT, W. & LASSEN, H. (1985): Gesamtdarstellung der Wasserstandsverhältnisse im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht nach neuen Pegelauswertungen. Die Küste 42: 1-77.
- SINDERN, J. & KATHAGE, F. (1966): Das Wasserlinienverfahren (Serien-Einzelbildmessung) – eine neue Art der Wattvermessung. Deutsche Gewässerkundl. Mitteilungen 6: 182-189.
- SPIEGEL, F. (1997a): Die Tidebecken des schleswig - holsteinischen Wattenmeeres: Morphologische Strukturen und Anpassungsbedarf bei weiter steigendem Meeresspiegel. Büsum (= Berichte, Forschungs- und Technologiezentrum Westküste der Universität Kiel, Nr. 14).
- SPIEGEL, F. (1997b): Morphologische Charakterisierung der Tidebecken des schleswig - holsteinischen Wattenmeeres vor dem Hintergrund säkularer Meeresspiegeländerungen. Die Küste 59: 115-142.
- SPITTA, V. (1998): Das Rätsel der Sandbank. Diplomarbeit, Uni Kiel, 61 S. unveröff.
- STANKOWSKI, A. (1989): Visuelle Kommunikation. Berlin.
- STENGEL, T. & ZIELKE, W. (1994): Der Einfluß eines Meeresspiegelanstiegs auf Gezeiten und Sturmfluten in der Deutschen Bucht. Die Küste 56: 93-118.
- STERR, H. & SCHMIDT, K. (1995): Auswirkungen des Klimawandels auf den deutschen Küstenraum. Geographische Rundschau 47: 105-112.

-
- STOCK, M. (1993): Salt Marshes in Schleswig-Holstein: From a Green Towards a Natural Succession. *Wadden Sea Newsletter* 1: 11-14.
- STRAATEN, L.M.J.U. van & KUENEN, H. (1958): Tidal action as a cause of clay accumulation. *Journal of Sedimentary Petrology* 28: 406-413.
- STREIF, H. (1990): Das ostfriesische Küstengebiet. - Nordsee, Inseln, Watten und Marschen. *Sammlung geologischer Führer Bd. 57. 2. Aufl.. Borntraeger. 376 S..*
- STREIT, U. (2000): Einführung in die Visualisierung von Geodaten. Digitales Vorlesungsskript des Instituts für Geoinformatik der Universität Münster, Version 1.0.
<http://castafiore.uni-muenster.de/vorlesungen/Visualisierung/>
- TAUBERT, A. (1981): Wohin wandern die Außensände? Formänderungen der nordfriesischen Außensände und deren küstengeographische Beurteilung. *Nordfriesland* 61/62, Band 16 / 1-2: 37-48.
- TAUBERT, A. (1986): Morphodynamik und Morphogenese des Nordfriesischen Wattenmeeres. *Hamburger Geogr. Schriften* 42, 269 S.
- THEOBALD, D.M. (1989): Accuracy and bias issues in surface representation. In: GOODCHILD, M. & GOPAL, S.: *The Accuracy of Spatial Databases: 99-106.* Taylor & Francis: London. 290 S..
- TÖPPE, A. (1993): Zur Analyse des Meeresspiegelanstieges aus langjährigen Wasserstandsaufzeichnungen an der deutschen Nordseeküste. *Mitteilungen des Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig* 120.
- TÖPPE, A. (1994): Beschleunigter Meeresspiegelanstieg an der deutschen Nordseeküste? *Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft* 49: 200-210.
- TURKEY, J.W. (1977): *Exploratory data analysis.* Reading, MA.
- TURKEY, J.W. (1980): We need both exploratory and confirmatory. *The American Statistician* 34(1): 23-25.
- VEENSTRA, H.J. (1976): Het westeuropese waddengebied als kustvorm. *Waddenbulletin.*
- VOS, P.C. & KESTEREN, W.P. van (2000): The long-term evolution of intertidal mudflats in the northern Netherlands during the Holocene: natural and anthropogenic processes. *Continental Shelf Research* 20: 1687-1710.
- WACKERNAGEL, H. (1995): *Multivariate Geostatistics. An Introduction with Applications.* Springer: London. 257 S..
- WALTHER, F. (1934): Die Gezeiten und Meeresströmungen im Norderneyer Seegat. *Die Bautechnik* 12(13).
- WALTHER, F. (1972): Zusammenhänge zwischen der Größe der ostfriesischen Seegaten mit ihren Wattgebieten sowie Watten und Strömungen. *Jahresbericht 1971 der Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz* 23.
- WALTON, T.L. & ADAMS, W.D. (1976): Capacity of inlet outer bars to store sand. *Proceedings of the 15th ICCE (2): 1919-1927.*

-
- WATSON, D. (1990): The state of the art of visualization. Proceedings of the Super Computing Europe Fall Meeting, Aachen.
- WEIBEL, R. & HELLER, M. (1991): Digital terrain modeling. In: MAGUIRE, D.J., GOODCHILD, M.F. & RHIND, D.W. (Hrsg.): Geographical information systems: principles and applications. Longman, London: 269-297.
- WERTHEIMER, M. (1912): Experimentelle Studien über das Sehen von Bewegung. Zeitschrift für Psychologie 61: 161-265.
- WIELAND, P. (1972): Untersuchungen zur geomorphologischen Entwicklungstendenz des Außensandes Blauort. Die Küste 23: 122-149.
- WIELAND, P. & THIES, E. (1975): Methoden der Wattvermessung an der schleswig-holsteinischen Westküste. Die Wasserwirtschaft 65: 194-198.
- WIELAND, P. (1984): Untersuchungen über geomorphologische Veränderungen in der Dithmarscher Bucht. Die Küste 40: 107-138.
- WIELAND, P. (1985): Umfang und Häufigkeit topographischer und fotografischer Erfassung des Wattengebietes zwischen Hever- und Elbemündung von 1934 bis 1984. Die Küste 42: 237-244.
- WIELAND, P., THIES, E. & BERGHEIM, V. (1987): Bilanz hydrologischer und morphologischer Untersuchungen in der Dithmarscher Bucht. Büsumer Gewässerkundliche Berichte 54. ALW Heide, Dez. Gewässerkunde Büsum.
- WIELAND, P. (1999): Entwicklungen in der Eider nach ihrer mündungsnahen Abdämmung. HTG-Jahrbuch 1999: 208-226.
- WIELAND, P. (2000a): Entwicklungen in der Eider. HANSA 137(2): 35-40.
- WIELAND, P. (2000b): Trischen – die Geschichte einer alluvialen Insel im Dithmarscher Wattenmeer. Die Küste 62: 101-140.
- WIGLEY, T.M.L. & RAPER, S.C.B. (1993): Future changes in global mean temperature and sea level. In: WARRICK, R.A., BARROW, E.M. & WIGLEY, T.M.L. (Hrsg.): Climate and sea level change: observations, projections and implications. Cambridge Univ. Press.
- WIJNEN, H.J. van & BAKKER, J.P. (2001): Long-term surface elevation change in salt marshes: A prediction of marsh response to future sea-level rise. Estuarine Coastal and Shelf Science 52: 381-390.
- WINSKOWSKY, U. (1998): Strömungen im nordfriesischen Wattenmeer. Landesamt für den Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer, Umweltbundesamt (Hrsg.): Umweltatlas Wattenmeer. Bd. 1. Nordfriesisches und Dithmarscher Wattenmeer. S. 48, Stuttgart: Ulmer.
- WISE, S.M. (1998): The Effect of GIS Interpolation Errors on the Use of Digital Elevation Models in Geomorphology. In: LANE, S.N., RICHARDS, K.S. & CHANDLER, J.H. (Hrsg.): Landform Monitoring, Modelling and Analysis. John Wiley & Sons. Chichester: 139-164.

-
- WITEZ, P., BOCK, S. & HOFSTEDE, J.L.A. (1998): Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben „Modelluntersuchungen zur morphologischen Stabilität des Wattenmeeres bei einem beschleunigten Meeresspiegelanstieg.“ Forschungs- und Technologiezentrum Westküste der Christian-Albrechts-Universität. Büsum, 138 S. unveröff.
- WOLF, F.C.J. (1997): Hydrodynamics, Sediment transport, and Daily Morphological Development of a Bar-Beach System. Netherlands Geographical Studies 232.
- WORBOYS, M.F. (1998): GIS: A Computing Perspective. Taylor & Francis: London. 376 S..
- ZEILER, M., SCHULZ-OHLBERG, J. & FIGGE, K. (2000): Materialinventur an der deutschen Nordseeküste. Die Küste 62: 53-86.
- ZYBALA, T. (1992): Der Einfluß von Vordeichungen auf die Morphodynamik von Wattgebieten im Bereich der Dithmarscher Bucht. Diplomarbeit, Univ. Hamburg. unveröffentl..

Anhang A: Korrelationskoeffizienten

Korrelationskoeffizienten zwischen verschiedenen Beckenparametern,
berechnet auf Basis der Tidebecken
von unterschiedlichen Vermessungszeitpunkten
(n = 54)

	MTHW	MTNW	MTMW	ABGES_A	ABMTHW_A	ABMTMW_A	ABMTNW_A	ABINT_A	ABSUP_A
MTHW	1.000	-.785	.730	-.312	-.308	-.329	-.424	-.142	-.329
MTNW	-.785	1.000	-.496	.200	.197	.236	.361	-.023	.240
MTMW	.730	-.496	1.000	-.676	-.677	-.692	-.728	-.572	-.434
ABGES_A	-.312	.200	-.676	1.000	1.000	.997	.979	.966	.683
ABMTHW_A	-.308	.197	-.677	1.000	1.000	.997	.979	.966	.666
ABMTMW_A	-.329	.236	-.692	.997	.997	1.000	.988	.950	.648
ABMTNW_A	-.424	.361	-.728	.979	.979	.988	1.000	.894	.660
ABINT_A	-.142	-.023	-.572	.966	.966	.950	.894	1.000	.634
ABSUP_A	-.329	.240	-.434	.683	.666	.648	.660	.634	1.000
WV	-.257	.156	-.636	.990	.992	.990	.966	.965	.622
WVNN	-.302	.199	-.652	.990	.991	.990	.973	.954	.631
PV	-.264	.167	-.613	.985	.986	.983	.963	.957	.632
P	-.249	.145	-.656	.990	.992	.991	.964	.968	.609
ISV	.132	-.324	-.330	.829	.830	.797	.703	.941	.530
DNNMTHW	.222	-.124	.790	-.857	-.860	-.863	-.841	-.831	-.491
DNNMTNW	-.291	.452	.349	-.672	-.674	-.648	-.547	-.795	-.381
DMTHW	.001	.050	.645	-.808	-.812	-.811	-.767	-.820	-.429
DMTNW	-.207	.349	.429	-.731	-.733	-.710	-.620	-.832	-.430
SG_DMTHW	.243	-.244	.600	-.686	-.685	-.687	-.687	-.641	-.501
SG_DMTNW	.432	-.395	.719	-.723	-.720	-.728	-.749	-.641	-.565
ACMTNW	-.329	.203	-.713	.942	.942	.935	.920	.912	.656
ACMT1_2W	-.238	.118	-.665	.930	.930	.920	.893	.920	.642
ACMTHW	-.230	.119	-.661	.915	.915	.908	.882	.902	.596

	WV	WVNN	PV	P	ISV	DNNMTHW	DNNMTNW	DMTHW	DMTNW
MTHW	-.257	-.302	-.264	-.249	.132	.222	-.291	.001	-.207
MTNW	.156	.199	.167	.145	-.324	-.124	.452	.050	.349
MTMW	-.636	-.652	-.613	-.656	-.330	.790	.349	.645	.429
ABGES_A	.990	.990	.985	.990	.829	-.857	-.672	-.808	-.731
ABMTHW_A	.992	.991	.986	.992	.830	-.860	-.674	-.812	-.733
ABMTMW_A	.990	.990	.983	.991	.797	-.863	-.648	-.811	-.710
ABMTNW_A	.966	.973	.963	.964	.703	-.841	-.547	-.767	-.620
ABINT_A	.965	.954	.957	.968	.941	-.831	-.795	-.820	-.832
ABSUP_A	.622	.631	.632	.609	.530	-.491	-.381	-.429	-.430
WV	1.000	.998	.997	.997	.845	-.851	-.681	-.815	-.735
WVNN	.998	1.000	.998	.993	.821	-.840	-.642	-.793	-.700
PV	.997	.998	1.000	.989	.839	-.821	-.651	-.783	-.705
P	.997	.993	.989	1.000	.845	-.877	-.707	-.843	-.761
ISV	.845	.821	.839	.845	1.000	-.699	-.870	-.747	-.874
DNNMTHW	-.851	-.840	-.821	-.877	-.699	1.000	.785	.975	.841
DNNMTNW	-.681	-.642	-.651	-.707	-.870	.785	1.000	.871	.994
DMTHW	-.815	-.793	-.783	-.843	-.747	.975	.871	1.000	.909
DMTNW	-.735	-.700	-.705	-.761	-.874	.841	.994	.909	1.000
SG_DMTHW	-.665	-.661	-.645	-.682	-.514	.723	.518	.687	.575
SG_DMTNW	-.691	-.696	-.673	-.706	-.458	.741	.436	.662	.508
ACMTNW	.937	.940	.930	.939	.778	-.882	-.674	-.830	-.734
ACMT1_2W	.930	.927	.921	.935	.815	-.891	-.737	-.860	-.789
ACMTHW	.918	.915	.909	.923	.794	-.891	-.733	-.862	-.785

	SG_DMTHW	SG_DMTNW	ACMTNW	ACMT1_2W	ACMTHW
MTHW	.243	.432	-.329	-.238	-.230
MTNW	-.244	-.395	.203	.118	.119
MTMW	.600	.719	-.713	-.665	-.661
ABGES_A	-.686	-.723	.942	.930	.915
ABMTHW_A	-.685	-.720	.942	.930	.915
ABMTMW_A	-.687	-.728	.935	.920	.908
ABMTNW_A	-.687	-.749	.920	.893	.882
ABINT_A	-.641	-.641	.912	.920	.902
ABSUP_A	-.501	-.565	.656	.642	.596
WV	-.665	-.691	.937	.930	.918
WVNN	-.661	-.696	.940	.927	.915
PV	-.645	-.673	.930	.921	.909
P	-.682	-.706	.939	.935	.923
ISV	-.514	-.458	.778	.815	.794
DNNMTHW	.723	.741	-.882	-.891	-.891
DNNMTNW	.518	.436	-.674	-.737	-.733
DMTHW	.687	.662	-.830	-.860	-.862
DMTNW	.575	.508	-.734	-.789	-.785
SG_DMTHW	1.000	.972	-.729	-.722	-.694
SG_DMTNW	.972	1.000	-.770	-.741	-.714
ACMTNW	-.729	-.770	1.000	.992	.980
ACMT1_2W	-.722	-.741	.992	1.000	.990
ACMTHW	-.694	-.714	.980	.990	1.000

Anhang B: MAPLE-Script für die Hochrechnung

```

> restart;
> with(stats):
> with(fit):
> with(describe):
> with(statevalf):
> datax:=[1937,1942,1955,1969,1973,1976,1979,1982,1985,1991];
      datax := [1937, 1942, 1955, 1969, 1973, 1976, 1979, 1982, 1985, 1991]
> datay:=datax;
      datay := [1937, 1942, 1955, 1969, 1973, 1976, 1979, 1982, 1985, 1991]
> with(LinearAlgebra):
> vector_datax:=Vector(datax);
      vector_datax :=
      [
      1937
      1942
      1955
      1969
      1973
      1976
      1979
      1982
      1985
      1991
      ]
> times:=Dimension(vector_datax);
      times := 10
> start_time:=1938;
      start_time := 1938
> end_time:=1938;
      end_time := 1938
> step:=1;
      step := 1
> measure:=true;
      measure := true
> conf:=false;
      conf := false
> scale:=100;
      scale := 100
> tidal_max:=180.0;
      tidal_max := 180.0
>
fin[1]:=fopen("/work_74GB/oahu/backup/hawaii/LANU/Daten/Statistik/Hochrechnung/pi_szenario/pi01937s
ze.asc",READ);

```

```

                                fin1 := 0
> ncols:=fscanf(fin[1],"%s %d");
                                ncols := ["ncols", 377]
> nrows:=fscanf(fin[1],"%s %d");
                                nrows := ["nrows", 329]
> xllcorner:=fscanf(fin[1],"%s %d");
                                xllcorner := ["xllcorner", 3480274]
> yllcorner:=fscanf(fin[1],"%s %d");
                                yllcorner := ["yllcorner", 5988425]
> cellsize:=fscanf(fin[1],"%s %d");
                                cellsize := ["cellsize", 50]
> nodata_value:=fscanf(fin[1],"%s %d");
                                nodata_value := ["NODATA_value", -9999]
>
fin[2]:=fopen("/work_74GB/oahu/backup/hawaii/LANU/Daten/Statistik/Hochrechnung/pi_szenario/pi01942s
ze.asc",READ);
> for i from 1 to 6 do:
>   readline(fin[2]):
> end do;
                                fin2 := 1
                                "ncols    377\r"
                                "nrows    329\r"
                                "xllcorner 3480274\r"
                                "yllcorner 5988425\r"
                                "cellsize  50\r"
                                "NODATA_value -9999\r"
>
fin[3]:=fopen("/work_74GB/oahu/backup/hawaii/LANU/Daten/Statistik/Hochrechnung/pi_szenario/pi01955s
ze.asc",READ);
> for i from 1 to 6 do:
>   readline(fin[3]):
> end do;
                                fin3 := 2
                                "ncols    377\r"
                                "nrows    329\r"
                                "xllcorner 3480274\r"
                                "yllcorner 5988425\r"
                                "cellsize  50\r"
                                "NODATA_value -9999\r"
>
fin[4]:=fopen("/work_74GB/oahu/backup/hawaii/LANU/Daten/Statistik/Hochrechnung/pi_szenario/pi01969s

```

```
ze.asc",READ);  
> for i from 1 to 6 do:  
>   readline(fin[4]):  
> end do;
```

```
fin4 := 3
```

```
"ncols  377\r"
```

```
"nrows  329\r"
```

```
"xllcorner  3480274\r"
```

```
"yllcorner  5988425\r"
```

```
"cellsize  50\r"
```

```
"NODATA_value -9999\r"
```

```
>
```

```
fin[5]:=fopen("/work_74GB/oahu/backup/hawaii/LANU/Daten/Statistik/Hochrechnung/pi_szenario/pi01973s  
ze.asc",READ);  
> for i from 1 to 6 do:  
>   readline(fin[5]):  
> end do;
```

```
fin5 := 4
```

```
"ncols  377\r"
```

```
"nrows  329\r"
```

```
"xllcorner  3480274\r"
```

```
"yllcorner  5988425\r"
```

```
"cellsize  50\r"
```

```
"NODATA_value -9999\r"
```

```
>
```

```
fin[6]:=fopen("/work_74GB/oahu/backup/hawaii/LANU/Daten/Statistik/Hochrechnung/pi_szenario/pi01976s  
ze.asc",READ);  
> for i from 1 to 6 do:  
>   readline(fin[6]):  
> end do;
```

```
fin6 := 5
```

```
"ncols  377\r"
```

```
"nrows  329\r"
```

```
"xllcorner  3480274\r"
```

```
"yllcorner  5988425\r"
```

```
"cellsize  50\r"
```

```
"NODATA_value -9999\r"
```

```
>
```

```
fin[7]:=fopen("/work_74GB/oahu/backup/hawaii/LANU/Daten/Statistik/Hochrechnung/pi_szenario/pi01979s  
ze.asc",READ);  
> for i from 1 to 6 do:
```

```
> readline(fin[7]):  
> end do;
```

```
fin7 := 6  
"ncols  377\r"  
"nrows  329\r"  
"xllcorner  3480274\r"  
"yllcorner  5988425\r"  
"cellsize  50\r"  
"NODATA_value -9999\r"
```

```
>
```

```
fin[8]:=fopen("/work_74GB/oahu/backup/hawaii/LANU/Daten/Statistik/Hochrechnung/pi_szenario/pi01982s  
ze.asc",READ);  
> for i from 1 to 6 do:  
> readline(fin[8]):  
> end do;
```

```
fin8 := 7  
"ncols  377\r"  
"nrows  329\r"  
"xllcorner  3480274\r"  
"yllcorner  5988425\r"  
"cellsize  50\r"  
"NODATA_value -9999\r"
```

```
>
```

```
fin[9]:=fopen("/work_74GB/oahu/backup/hawaii/LANU/Daten/Statistik/Hochrechnung/pi_szenario/pi01985s  
ze.asc",READ);  
> for i from 1 to 6 do:  
> readline(fin[9]):  
> end do;
```

```
fin9 := 8  
"ncols  377\r"  
"nrows  329\r"  
"xllcorner  3480274\r"  
"yllcorner  5988425\r"  
"cellsize  50\r"  
"NODATA_value -9999\r"
```

```
>
```

```
fin[10]:=fopen("/work_74GB/oahu/backup/hawaii/LANU/Daten/Statistik/Hochrechnung/pi_szenario/pi01991  
sze.asc",READ);  
> for i from 1 to 6 do:  
> readline(fin[10]):  
> end do;
```

```

        fin10 := 9
        "ncols  377\r"
        "nrows  329\r"
        "xllcorner  3480274\r"
        "yllcorner  5988425\r"
        "cellsize  50\r"
        "NODATA_value -9999\r"
> for i from start_time by step to end_time do:
>   istr:=convert(i,string):
>
fout[i]:=fopen(cat(cat("/work_74GB/oahu/backup/hawaii/LANU/Daten/Statistik/Hochrechnung/pi_szenario/
pi_real/",istr),".asc"),WRITE):
>   fprintf(fout[i],"%s %s %d\n",ncols[1]," ",ncols[2]):
>   fprintf(fout[i],"%s %s %d\n",nrows[1]," ",nrows[2]):
>   fprintf(fout[i],"%s %s %d\n",xllcorner[1]," ",xllcorner[2]):
>   fprintf(fout[i],"%s %s %d\n",yllcorner[1]," ",yllcorner[2]):
>   fprintf(fout[i],"%s %s %d\n",cellsize[1]," ",cellsize[2]):
>   fprintf(fout[i],"%s %s %d\n",nodata_value[1]," ",nodata_value[2]):
>
fout_maya[i]:=fopen(cat(cat("/work_74GB/oahu/backup/hawaii/LANU/Daten/Statistik/Hochrechnung/pi_sz
enario/pi_real/",istr),"_maya.ma"),WRITE):
> end do;

        istr := "1938"
        fout1938 := 10
        19
        19
        23
        23
        18
        21
        fout_maya1938 := 11
> if conf then
>   for i from start_time by step to end_time do:
>     istr:=convert(i,string):
>
        fout_l[i]:=fopen(cat(cat("/work_74GB/oahu/backup/hawaii/LANU/Da-
ten/Statistik/Hochrechnung/pi_szenario/pi_real/",istr),"_l.asc"),WRITE):
>
>     fprintf(fout_l[i],"%s %s %d\n",ncols[1]," ",ncols[2]):
>     fprintf(fout_l[i],"%s %s %d\n",nrows[1]," ",nrows[2]):
>     fprintf(fout_l[i],"%s %s %d\n",xllcorner[1]," ",xllcorner[2]):
>     fprintf(fout_l[i],"%s %s %d\n",yllcorner[1]," ",yllcorner[2]):
>     fprintf(fout_l[i],"%s %s %d\n",cellsize[1]," ",cellsize[2]):
>     fprintf(fout_l[i],"%s %s %d\n",nodata_value[1]," ",nodata_value[2]):

```

```

fout_l_maya[i]:=fopen(cat(cat("/work_74GB/oahu/backup/hawaii/LANU/Daten/Statistik/Hochrechnung/pi_s
zenario/pi_real/",istr),"_l_maya.ma"),WRITE):
> end do;
> for i from start_time by step to end_time do:
>   istr:=convert(i,string):
>   fout_u[i]:=fopen(cat(cat("/work_74GB/oahu/backup/hawaii/LANU/Da-
ten/Statistik/Hochrechnung/pi_szenario/pi_real/",istr),"_u.asc"),WRITE):

>   fprintf(fout_u[i],"%s %s %d\n",ncols[1]," ",ncols[2]):
>   fprintf(fout_u[i],"%s %s %d\n",nrows[1]," ",nrows[2]):
>   fprintf(fout_u[i],"%s %s %d\n",xlcorner[1]," ",xlcorner[2]):
>   fprintf(fout_u[i],"%s %s %d\n",yllcorner[1]," ",yllcorner[2]):
>   fprintf(fout_u[i],"%s %s %d\n",cellsize[1]," ",cellsize[2]):
>   fprintf(fout_u[i],"%s %s %d\n",nodata_value[1]," ",nodata_value[2]):
fout_u_maya[i]:=fopen(cat(cat("/work_74GB/oahu/backup/hawaii/LANU/Daten/Statistik/Hochrechnung/pi_
szenario/pi_real/",istr),"_u_maya.ma"),WRITE):
> end do;
> end if;
> count:=0;

count := 0

> for i from 1 to nrows[2] do:
>   for j from 1 to ncols[2] do:
>     nodata:=false:
>     for k from 1 to times do:
>       temp:=fscanf(fin[k],%f):
>       datay[k]:=temp[1];
>       if datay[k]=-9999 then nodata:=true:
>       end if:
>     end do:
>     if not(nodata) then
>       if not(measure) then
>         if (times<5) or conf then f:=rhs(leastsquare[[x,y],y=a0+a1*x,{a0,a1}][[datay,datay]]):
>         elif times<8 then f:=rhs(leastsquare[[x,y],y=a0+a1*x+a2*x^2,{a0,a1,a2}][[datay,datay]]):
>         else f:=rhs(leastsquare[[x,y],y=a0+a1*x+a2*x^2+a3*x^3,{a0,a1,a2,a3}][[datay,datay]]):
>         end if:
>       end if:
>       for k from start_time by step to end_time do:
>         if measure then
>           f_value:=datay[1];
>         else
>           f_value:=eval(f,x=k);
>         end if:
>         if f_value < tidal_max then
>           fprintf(fout[k],"%.5f %s",f_value,""):
>           fprintf(fout_maya[k],"%s %d %s %.7f %s\n","setAttr '.pt'",(i-1)*ncols[2]+ncols[2]-j+1,""] -type
'float3' 0",f_value/5000*scale,"0 ;"):
>         else
>           fprintf(fout[k],"%.5f %s",tidal_max,""):
>           fprintf(fout_maya[k],"%s %d %s %.7f %s\n","setAttr '.pt'",(i-1)*ncols[2]+ncols[2]-j+1,""] -type
'float3' 0",tidal_max/5000*scale,"0 ;"):
>         end if:
>         count:=count+1;

```

```

> end do:
> if conf then
>   for k from start_time by step to end_time do:
>     if f_value < tidal_max then
>       stderr:=sqrt(((times-1)*(variance(datay)-eval(diff(f,x),x=1)^2*variance(datax)))/(times-
2))*sqrt(1/times+(k-mean(datax))^2/((times-1)*variance(datax))):
>       temp:=statevalf[icdf,studentst[times-2]](0.95/2)*stderr:
>       fprintf(fout_l[k],"%s %.5f %s",f_value-temp,""):
>
>       fprintf(fout_l_maya[k],"%s %d %s %.7f %s\n",setAttr '.pt[",(i-1)*ncols[2]+ncols[2]-j+1,"] -type
'float3' 0",f_value-temp)/5000*scale,"0 ;"):
>       fprintf(fout_u[k],"%s %.5f %s",f_value+temp,""):
>       fprintf(fout_u_maya[k],"%s %d %s %.7f %s\n",setAttr '.pt[",(i-1)*ncols[2]+ncols[2]-j+1,"] -
type 'float3' 0",f_value+temp)/5000*scale,"0 ;"):
>     else
>       fprintf(fout_l[k],"%s %.5f %s",tidal_max,""):
>
>       fprintf(fout_l_maya[k],"%s %d %s %.7f %s\n",setAttr '.pt[",(i-1)*ncols[2]+ncols[2]-j+1,"] -type
'float3' 0",tidal_max/5000*scale,"0 ;"):
>       fprintf(fout_u[k],"%s %.5f %s",tidal_max,""):
>       fprintf(fout_u_maya[k],"%s %d %s %.7f %s\n",setAttr '.pt[",(i-1)*ncols[2]+ncols[2]-j+1,"] -
type 'float3' 0",tidal_max/5000*scale,"0 ;"):
>     end if:
>   end do:
> end if:
> else
>   for k from start_time by step to end_time do:
>     fprintf(fout[k],"%d %s",-9999,""):
>   end do:
>   if conf then
>     for k from start_time by step to end_time do:
>       fprintf(fout_l[k],"%d %s",-9999,""):
>     end do:
>     for k from start_time by step to end_time do:
>       fprintf(fout_u[k],"%d %s",-9999,""):
>     end do:
>   end if:
> end if:
> end do:
> for j from start_time by step to end_time do:
>   fprintf(fout[j],"%s","/n"):
> end do:
> end do;
>
> for i from 1 to times do:
>   fclose(fin[i]):
> end do;
> for i from start_time by step to end_time do:
>   fclose(fout[i]):
> end do;
> for i from start_time by step to end_time do:
>   fclose(fout_maya[i]):
> end do;

```

```
> if conf then
>   for i from start_time by step to end_time do:
>     fclose(fout_l[i]):
>   end do;
>   for i from start_time by step to end_time do:
>     fclose(fout_l_maya[i]):
>   end do;
>   for i from start_time by step to end_time do:
>     fclose(fout_u[i]):
>   end do;
>   for i from start_time by step to end_time do:
>     fclose(fout_u_maya[i]):
>   end do;
> end if;
> count;
```

59934