



Heft 40

Darmstadt, November 2013

Robert Weiß

Erfassung und Beschreibung des Meeresspiegels und seiner Veränderungen im Bereich der Deutschen Bucht

Schriftenreihe
Fachrichtung Geodäsie
Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Technische Universität Darmstadt

ISBN 978-3-935631-29-7

1	Der Meeresspiegel und seine Variationen im Bereich der Nordsee	1
1.1	Säkulare Änderungen des Meeresspiegels	1
1.2	Periodische Variationen des Meeresspiegels aufgrund nichtgravitativer Einflüsse	5
1.3	Gezeiten	6
1.4	Modellierung des Meeresspiegels im Untersuchungsgebiet	14
2	Geodätische Grundlagen	16
2.1	Referenzsysteme und Realisierungen	16
2.1.1	Geometrische Referenzsysteme	16
2.1.2	Schwerefeld und Höhenreferenzsysteme	20
2.1.3	Geoidmodelle und permanente Gezeiten	24
2.1.4	Realisierungen von Höhenreferenzsystemen	29
2.2	Vertikale Landbewegungen im Bereich der Deutschen Bucht	32
3	Wasserstand und Pegel	35
3.1	Grundlagen des deutschen Pegelwesens	35
3.2	Pegel	39
3.2.1	Aufbau einer Pegelanlage	39
3.2.2	Wasserstandssensoren	41
3.3	Wasserstand und Tidekennzahlen	52
3.3.1	Tidekurve und Ganglinie	52
3.3.2	Tidekennzahlen	52
3.3.3	Phasenlagen innerhalb einer Tide	57
3.3.4	Konsistenz verfügbarer Wasserstandsbeobachtungen	60
3.4	Geodätische Pegelinformationen	63
3.4.1	Pegelnullpunkt und Pegelfestpunkte	63
3.4.2	Anschlussmessungen an das amtliche Höhenreferenzsystem	67
3.4.3	Änderungen im Verlauf der Zeit	70
3.5	Unsicherheiten von Pegelbeobachtungen	82
3.5.1	Unsicherheiten des Wasserstandes über Pegelnull	82
3.5.2	Unsicherheiten lokaler, regionaler und globaler Pegelbeobachtungen	84
4	GNSS gestützte Pegelüberwachung	86
4.1	Grundlagen und GNSS-Netzwerke im Untersuchungsgebiet	86
4.2	Höhenbezüge der GNSS-Antennen relativ zu Pegelnullpunkten	90
4.3	Prozessierung und Ergebnisse	91
5	Grundlagen der Satellitenaltimetrie	103
5.1	Grundlagen und Beobachtungsprinzip	103
5.1.1	Beobachtungsprinzip	103
5.1.2	Bahnbestimmung der Altimetersatelliten	105
5.1.3	Atmosphärische Laufzeitverzögerungen	107
5.1.4	Korrekturen aufgrund der Reflektionseigenschaften	111
5.1.5	Geräteinterne Korrekturen	111
5.1.6	Korrekturen aufgrund geometrischer und geophysikalischer Einflüsse	112
5.1.7	Rückkehrimpuls und Altimeterfootprint	114
5.2	Ableitung von Meeresspiegelhöhen	121
5.3	Ableitung virtueller Pegel unter Nutzung der Altimeterbeobachtungen	124

6	Wassertiefen im Untersuchungsgebiet	127
7	Vergleiche modellierter und realer Pegelbeobachtungen	131
7.1	Vergleichsgrößen	131
7.2	Vergleiche instantaner Ergebnisse	132
7.3	Vergleiche monatlicher Differenzen	133
7.4	Vergleiche unter Berücksichtigung der Tidephase	134
7.5	Vergleiche der Eintrittszeitpunkte modellierter und realer Tidescheitel	141
8	Vergleiche von Altimeterbeobachtungen mit realen und modellierten Meeresspiegelhöhen	144
8.1	Meeresspiegelhöhen auf Basis von Altimeterbeobachtungen	144
8.2	Auswertungen von 1Hz Altimeterbeobachtungen	144
8.2.1	Vergleichsgrößen	144
8.2.2	Vergleich instantaner Altimeterbeobachtungen mit Pegelbeobachtungen	147
8.2.3	Vergleich ozeangezeitenkorrigierter Altimeterbeobachtungen mit Pegelbeobachtungen	154
8.2.4	Vergleich von Altimeterbeobachtungen mit mittleren Tidemittelwasserbeobachtungen	159
8.2.5	Vergleiche instantaner Altimeterbeobachtungen mit hydrodynamisch modellierten Meeresspiegelauslenkungen	164
8.2.6	Ableitung von langfristigen Meeresspiegeländerungen	167
8.3	Auswertung hochfrequenter Altimeterbeobachtungen	173
8.3.1	Bathymetrie, Wasserstand und Rückkehrimpulse im Untersuchungsgebiet	173
8.3.2	Analyse der 20Hz Beobachtungen unter Nutzung unterschiedlicher Re-Tracker	174
9	Zusammenfassung und Ausblick	188
A	Anhang zu Kapitel 3 und 4	201
A.1	Ausgewählte Pegelstellen im Bereich der Deutschen Bucht	201
A.2	GNSS-Pegelstationen im Bereich der Deutschen Bucht	201
B	Anhang zu Kapitel 8.2	202
B.1	Auswertungen instantaner 1Hz Altimeterbeobachtungen am Leuchtturm Alte Weser	202
B.2	Auswertungen ozeangezeitenkorrigierter 1Hz Altimeterbeobachtungen am LT Alte Weser	206
B.3	Auswertungen mittlerer 1Hz Altimeterbeobachtungen am Leuchtturm Alte Weser	209

Abbildungsverzeichnis

1	Mittlere Meerestopographie	1
2	Zeitreihe des mittleren globalen Meeresspiegels	3
3	Globale Änderung des Meeresspiegels auf Grundlage von Beobachtungen der Satellitenaltimetrie	3
4	Windstau und resultierende Auswirkungen auf die Meeresoberfläche	5
5	Effekt des inversen Barometers auf die Meeresoberfläche	5
6	Gravitationsbeschleunigung eines Himmelskörpers und der Erdmasse im Punkt X	6
7	Spring- und Nipptide	10
8	Amplitudenspektrum von Pegelbeobachtungen zwischen Bremerhaven und Helgoland	11
9	Ausschnitt des Amplitudenspektrums aus Abbildung 8 für die täglichen Gezeiten	11
10	Ausschnitt des Amplitudenspektrums aus Abbildung 8 für die halbtäglichen Gezeiten	11
11	Ausschnitt des Amplitudenspektrums aus Abbildung 8 für Partialtiden höhere Frequenz	12

12	Reale und modellierte Wasserstände an den Pegeln Helgoland und LT Alte Weser	14
13	Reale und modellierte (BSHcmod) Wasserstände der Pegel Helgoland und LT Alte Weser .	15
14	Horizontalbewegungen im ITRF2008	17
15	Vertikalbewegungen im ITRF2008	18
16	Theoretischer Schleifenschlussfehler	21
17	Ellipsoidische, orthometrische und Normalhöhe	24
18	EGM2008 (tf) im Bereich der Nordsee	25
19	Differenzen unterschiedlicher Versionen der EGM bzw. EGG Schwerefeldmodelle	26
20	Differenzen der Undulationen zwischen einem gezeitenfreien, nullgezeiten und einem mittleren Gezeitensystem	27
21	Gezeitenfreie, mittlere und Nullgezeitenoberflächen bzw. Geoidmodelle	27
22	Netzkonfiguration des EVRF2000 und EVRF2007	30
23	German Combined Geoid in der Realisierung 2011	31
24	Differenz beider Realisierungen des German Combined Geoid	31
25	Großräumige Nivellementsaktionen im Bereich der Deutschen Bucht	31
26	Geschwindigkeitsfelder auf Basis von Nivellements- und GNSS-Beobachtungen	33
27	Geschwindigkeitsfeld als Ergebnis einer Kombination von Nivellements- und GNSS- Beobachtungen	33
28	Beispiele verschiedener Pegel	35
29	Verschiedene Ausführungen der Pegelvorschrift	36
30	Pegelstandorte der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes	37
31	Wasserstandsbeobachtungen-, geodätische Pegelinformationen und Pegelbeobachtungen .	38
32	Aufbau einer Pegelanlage	39
33	Exemplarische Beobachtungen von Radar- und Schwimmpegel	40
34	Nachlaufen des Pegels LT Alte Weser	41
35	Lattenpegel verschiedener Standorte	42
36	Druckpegel unterschiedlicher Bauart	43
37	Wassertemperatur, Salzgehalt und Wasserdichte	43
38	Wassertemperatur Norderney	44
39	Salzgehalt Norderney	44
40	Wasserdichte Norderney	44
41	Wasserdichte Knock	45
42	Dichtevariation innerhalb eines Monats am Pegel Knock	45
43	Differenzen realer Wasserstandsbeobachtungen gegenüber Druckpegelbeobachtungen . .	45
44	Wasserdichte am Standort FINO-1	46
45	Wasserstandsbeobachtungen am Standort FINO-1	47
46	Wasserstandsbeobachtungen und Dichtevariationen am Standort FINO-1	47
47	Elemente eines Schwimmpegels	48
48	Radarpegel an unterschiedlichen Standorten	49
49	Filterungen von Beobachtungen der Radarpegel	50
50	Trommelschreiber	51
51	Wasserstand über Pegelnull verschiedener Pegel	52
52	Geografische Lage ausgewählter Pegel und die zuständigen Wasser- und Schifffahrtsämter	53
53	Tidekennzahlen nach DIN 4049-3	53
54	Differenzen und Häufigkeitsverteilung zwischen Tmw und T1/2w (Pegel Helgoland- Binnenhafen)	54
55	Mittlere Differenzen/Standardabweichungen zwischen Tmw und T1/2w an ausgewählten Pegeln der Deutschen Bucht	55
56	Abweichung zwischen Tmw auf Basis aller Beobachtungen und im Bereich des Tnw ge- kürzter Beobachtungen (Pegel Helgoland-Binnenhafen)	56

57	k-Werte verschiedener Pegel	57
58	Differenzen realer Tmw zu Tmw auf Basis von Thw, Thb und k-Werten (Pegel Helgoland-Binnenhafen)	57
59	Mittlere Differenzen realer Tmw gegenüber Tmw auf Basis von Thb, Thw und k-Werten an ausgewählten Pegeln im Bereich der Deutschen Bucht	58
60	Phasenlagen innerhalb einer Tide	59
61	Beispiele von Ganglinien unterschiedlicher Pegel	60
62	Wasserstandsdifferenzen als Funktion der Tidephase	61
63	Verbleibende Differenzen nach Anwendung der empirischen Tidephasenkorrektur	62
64	Amtliche Scheitelwerte und Scheitelwerte auf Basis des Kunz-Köves Verfahren	62
65	Differenzen zwischen abgeleiteten und amtlichen Scheitelwerten am Pegel Borkum-Fischerbalje	62
66	Differenzen zwischen abgeleiteten und amtlichen Scheitelwerten am Pegel Wilhelmshaven-Neuer Vorhafen	63
67	Auswirkung von Höhenänderungen auf Pegelbeobachtungen und damit verbundene scheinbare Änderungen	64
68	Pegelfestpunkt am Pegel Papenburg	65
69	Wasserstand über Pegelnull und über dem Pegelfestpunkt	65
70	Abweichung der Pegellatten verschiedener Pegel gegenüber der über Sollhöhenunterschiede definierten Solllage	66
71	Lage ausgewählter Pegelfestpunkte am Pegel Cuxhaven-Steubenhöft	67
72	Relative, regionale und globale Pegelbeobachtungen	69
73	Unterschiedliche Formen der Wasserstandsbeobachtungen bzw. Pegelbeobachtungen	69
74	Höhenänderungen und damit verbundene Änderungen der Sollhöhenunterschiede	71
75	Lage der Pegelfestpunkte und Pegel auf der Insel Norderney	73
76	Monatliche T1/2w über Pegelnull und resultierende Trends der Pegel Norderney-Hafen und Norderney-Riffgat	74
77	Monatliche T1/2w über Pegelnull und resultierende Trends des Pegel Norderney-Riffgat	75
78	Monatliche T1/2w über Pegelnull und resultierende Trends der Pegel Norderney-Hafen und Riffgat (rel. zu PFP1)	76
79	Änderung der Höhendifferenzen verschiedener Pegelfestpunkte gegenüber dem PFP1	76
80	Monatliche T1/2w über Pegelnull und resultierende Trends des Pegels Norderney-Riffgat (rel. zu PFP55/PFP63)	77
81	Lineare Trends der Pegel Norderney-Hafen und Riffgat unter Berücksichtigung unterschiedlicher Festlegungen	78
82	Lage des Pegels Helgoland-Binnenhafen und der Pegelfestpunkte	79
83	Halbtägliche, monatliche und jährliche T1/2w des Pegels Helgoland-Binnenhafen	80
84	Choke-Ring, Antennenvorverstärker und Choke-Ring Antenne	86
85	Stationsübersicht der BfG-Auswertungen im Bereich der Nordsee	87
86	GNSS-Netzwerk und GNSS-Pegelstationen entlang der Nordseeküste	88
87	GNSS-Netzwerk und GNSS-Pegelstationen im Bereich der Deutschen Bucht	89
88	GNSS-Stationen im Bereich der Deutschen Bucht	89
89	ARP und GNSS-Marker der BfG-Stationen	90
90	Prozessierungsschema der GNSS-Beobachtungen	93
91	GNSS-Netzwerk und IGS-Lagerungsstationen	94
92	Exemplarische Ergebnisse der GNSS-Prozessierungen im IGS05/IGS08	95
93	Mittlere Koordinatendifferenzen zwischen der IGS- und BfG-Lösung (IGS05)	96
94	Mittlere Koordinatendifferenzen zwischen der IGS- und BfG-Lösung (IGS08)	97
95	Höhenkomponente und geschätzte zyklische Variationen der Stationen HELG und LHAW im IGS05	98

96	Höhenkomponente und linearer Trend (IGS05) der Stationen HELG und LHAW mit und ohne zyklische Variationen	98
97	Residuen nach der Schätzung eines linearen Trends auf den Stationen HELG und LHAW .	98
98	Mittlere Meerestopografie an ausgewählten Pegelstandorten	102
99	Bodenspuren der NASA/CNES und ESA-Altimetermissionen	104
100	Beobachtungsprinzip der Satellitenaltimetrie	104
101	Bahnbestimmung der Altimetersatelliten	106
102	Geometrie der Satellitenaltimetrie	107
103	Differenzen unterschiedlicher Orbitmodelle am Beispiel der Satelliten Jason-1/Jason-2 . .	108
104	Mittlere Differenzen und Standardabweichungen der Orbithöhen im Bereich der Deutschen Bucht	108
105	Variationen unterschiedlicher Korrekptionsmodelle für die den trockenen Anteil der troposphärischen Laufzeitverzögerung	108
106	Differenzen und Standardabweichungen zwischen zwei Modellen der troposphärischen Laufzeitverzögerung	108
107	Variationen unterschiedlicher Korrekptionsmodelle und Radiometerbeobachtungen für den feuchten Anteil der troposphärischen Laufzeitkorrektion	109
108	Differenzen und Standardabweichungen unterschiedlicher Korrekptionsmodelle für den feuchten Anteil der troposphärischen Laufzeitverzögerung	109
109	Variationen der ionosphärischen Laufzeitkorrekturen bei einer Nutzung unterschiedlicher Modelle	110
110	Mittlere Differenzen und Standardabweichungen unterschiedlich modellierter ionosphärischer Laufzeitverzögerungen	111
111	Variationen der IB-Korrekturen unter Nutzung unterschiedlicher Korrekptionsmodelle . . .	114
112	Differenzen und Standardabweichungen unterschiedlicher IB-Modelle (MOG2D-Global) .	114
113	Ellipsoidische Meeresspiegelhöhen relativ zu dem TOPEX- und GRS80-Ellipsoid	115
114	Korrektur für die Überführung der ellipsoidischer Meeresspiegelhöhen auf das GRS80-Ellipsoid	115
115	Reflektion des Mikrowellenimpulses	116
116	Form Rückkehrimpulses	116
117	Sichtbereich des Altimetersatelliten	116
118	Prinzip des OCOG Algorithmus / ICE3-Re-Tracker	118
119	Footprintdurchmesser als Funktion der Wellenhöhe	120
120	Footprints von 20Hz und 1Hz Altimeterbeobachtungen	121
121	Meeresspiegelhöhen auf Basis von Altimeterbeobachtungen	122
122	Auswirkung der Auflastzeiten auf Pegel- und Altimeterbeobachtungen	123
123	Bodenpunkte der NASA/CNES-Altimetermissionen (Missionsphase A)	125
124	Bodenpunkte der ESA-Altimetermissionen	125
125	Abstände zwischen Altimeterfußpunkten und realen Beobachtungen	125
126	Kreuzungspunkte aufsteigender und absteigender Überflüge	126
127	Bezugshorizonte der Bathymetrie	127
128	Bathymetrie und LAT im Bereich der Deutschen Bucht	128
129	Wassertiefen relativ zu NHN für den Bereich der Deutschen Bucht	128
130	Land- und Wasserverteilung bei minimalem Niedrigwasser und maximalem Hochwasser .	129
131	Wassertiefen bei Tidehoch- und Tideniedrigwasser im Bereich der Ostfriesischen Inseln . .	130
132	Wassertiefen bei Thw/Tnw im Bereich der Nordfriesischen Inseln	130
133	Lage der Pegel Helgoland, LT Alte Weser und UF Dwarsgat im Mündungstrichter der Weser	131
134	Modellierte Meeresspiegelauslenkungen und reale Pegelbeobachtungen.	132
135	Ganglinien und Differenzen zwischen modellierten Meeresspiegelauslenkungen und realen Pegelbeobachtungen	133

136	Monatliche mittlere Differenzen und Standardabweichungen zwischen Pegelbeobachtungen und modellierten Meeresspiegelauslenkungen	134
137	Phasenabhängige Differenzen zwischen modellierten Meeresspiegelauslenkungen (FES2004) und realen Pegelbeobachtungen	135
138	Phasenabhängige Differenzen zwischen modellierten Meeresspiegelauslenkungen (BSHcmod) und realen Pegelbeobachtungen	136
139	Monatliche Differenzen zwischen beobachteten und modellierten Meeresspiegelauslenkungen (FES2004) im Jahr 2009	136
140	Monatliche Differenzen zwischen beobachteten und modellierten Meeresspiegelauslenkungen (BSHcmod) im Jahr 2009	137
141	Monatliche Differenzen und deren Standardabweichungen zwischen modellierten und beobachteten Meeresspiegelauslenkungen (Helgoland)	138
142	Monatliche Differenzen und deren Standardabweichungen zwischen modellierten und beobachteten Meeresspiegelauslenkungen (LT Alte Weser)	138
143	Monatliche Differenzen und deren Standardabweichungen zwischen modellierten und beobachteten Meeresspiegelauslenkungen (Dwarsgat)	139
144	Differenzen der Eintrittszeitpunkte und der Wasserstände am Pegel LT Alte Weser	140
145	Differenzen der Eintrittszeitpunkte (FES2004) an ausgewählten Pegeln	141
146	Differenzen der Eintrittszeitpunkte (BSHcmod) an ausgewählten Pegeln	142
147	Monatliche Differenzen der Eintrittszeitpunkte	143
148	Prozentualer Anteil der verfügbaren Altimeterbeobachtungen	146
149	Ellipsoidische Meeresspiegelhöhen auf Basis von Pegel- und Altimeterbeobachtungen (Referenzpegel Helgoland)	147
150	Instantane Differenzen ellipsoidischer Meeresspiegelhöhen (Referenzpegel Helgoland)	148
151	Instantane Differenzen ellipsoidischer Meeresspiegelhöhen als Funktion der Zeit und Tidephase (Referenzpegel Helgoland)	148
152	Tidephasenkorrigierte instantane Differenzen der ellipsoidischen Meeresspiegelhöhe (Referenzpegel Helgoland)	149
153	Tidephasenkorrigierte instantane Differenzen der physikalischen Meeresspiegelhöhe (Referenzpegel Helgoland)	150
154	Häufigkeitsverteilung der instantanen Differenzen der Meeresspiegelhöhe (Referenzpegel Helgoland)	151
155	Korrelationsfaktoren zwischen Altimeterbeobachtungen und dem Pegel Helgoland im Bereich der Deutschen Bucht (mit und ohne empirische Tidephasenkorrektion)	152
156	Standardabweichung der Differenzzeitreihen pegel- und altimeterbasierter Meeresspiegelhöhen im Bereich der Deutschen Bucht (mit und ohne empirische Tidephasenkorrektion, Referenzpegel Helgoland)	153
157	Mittelwert der Differenzzeitreihen pegel- und altimeterbasierter ellipsoidischer Meeresspiegelhöhen im Bereich der Deutschen Bucht (Referenzpegel Helgoland)	153
158	Mittelwert der Differenzzeitreihen pegel- und altimeterbasierter physikalischer Meeresspiegelhöhen im Bereich der Deutschen Bucht (Referenzpegel Helgoland)	154
159	Instantane, modellierte (FES2004) und gezeitenkorrigierte Differenzen der Meeresspiegelhöhe gegenüber dem Pegel Helgoland	155
160	Beobachtete und modellierte mittelwertzentrierte Differenzen (EOT11a) der ellip. Meeresspiegelhöhe gegenüber dem Pegel Helgoland	156
161	Korrelationsfaktoren der unkorrigierten bzw. ozeangezeitenkorrigierten (FES2004) Differenzen (Pegel Helgoland)	158
162	Standardabweichungen der unkorrigierten bzw. ozeangezeitenkorrigierten (FES2004) Differenzen (Pegel Helgoland)	158

163	Standardabweichungen der unkorrigierten bzw. ozeangezeitenkorrigierten (EOT11a) Differenzen (Pegel Helgoland)	159
164	Ellipsoidische monatliche Tmw des Pegels Helgoland und monatliche ellip. SSH auf Basis von Altimeterbeobachtungen	160
165	Ellipsoidische Differenzen zwischen monatlichen Tmw des Pegels Helgoland und SSH auf Basis von Altimeterbeobachtungen	161
166	Mittlere ellipsoidische Differenzen und die Standardabweichungen der einzelnen Monate zwischen den Ergebnissen der NASA/CNES Missionen und dem Referenzpegel Helgoland	162
167	Monatliche mittlere Differenzen und Standardabweichungen unter Nutzung unterschiedlicher IB-Korrekturen (Referenzpegel Helgoland)	163
168	Mittlere Differenzen und Standardabweichung der Differenzzeitreihe zwischen BSHcmod V3.0 und V4.0	165
169	Ellipsoidische Differenzen zwischen BSHcmod-Wasserständen und instantanen Altimeterbeobachtungen (NASA/CNES-Missionen) an ausgewählten Punkten	165
170	Ellipsoidische Differenzen zwischen BSHcmod-Wasserständen (um saisonale Variationen korrigiert) und instantanen Altimeterbeobachtungen (NASA/CNES-Missionen) an ausgewählten Punkten	166
171	Mittlere ellipsoidische Differenzen zwischen Ergebnissen des BSHcmod und instantanen Altimeterbeobachtungen (NASA/CNES-Missionen)	168
172	Mittlere ellipsoidische Meeresspiegelhöhen und deren Standardabweichung auf Basis der NASA/CNES-Missionen	168
173	Mittlere SLA und deren Standardabweichungen auf Basis der NASA/CNES-Missionen und dem EGM2008 (mean-tide) Schwerefeldmodell	169
174	Mittlere SLA und deren Standardabweichungen auf Basis der NASA/CNES-Missionen und dem EGG2008 (mean-tide) Schwerefeldmodell	170
175	Lineare Trends und Standardabweichungen der Residuen auf Basis der NASA/CNES-Missionen und Pegel	170
176	Lineare Trends auf Basis jährlicher und monatlicher Altimeter- und Pegelbeobachtungen (Pegel Helgoland)	172
177	Wassertiefe, Referenzpegel und Überflüge im Bereich der Deutschen Bucht	174
178	Wassertiefe (Referenzpegel Langeoog), Waveform und Wassertiefenverteilung innerhalb des Footprints	175
179	Wassertiefe (Referenzpegel Pellworm), Waveform und Wassertiefenverteilung innerhalb des Footprints	176
180	Wassertiefe, Waveforms und Wassertiefenverteilung entlang Überflugs 213	177
181	Wassertiefe, Waveforms und Küstenabstand entlang Überflugs 213	177
182	Differenzen instantaner Meeresspiegelhöhen auf Basis von Altimeter- und Pegelbeobachtungen (Hörnum, Nordfriesland)	179
183	Differenzen instantaner Meeresspiegelhöhen auf Basis von Altimeter- und Pegelbeobachtungen (Pellworm, Nordfriesland)	179
184	Differenzen instantaner Meeresspiegelhöhen auf Basis von Altimeter- und Pegelbeobachtungen (Langeoog, Ostfriesland)	180
185	Statistische Kennzahlen entlang des Überflugs 94 (Pegel Hörnum, Nordfriesland)	181
186	Statistische Kennzahlen entlang der Überflugs 213 (Pegel Pellworm, Nordfriesland)	181
187	Statistische Kennzahlen entlang des Überflugs 213 (Pegel Langeoog, Ostfriesland)	181
188	Wassertiefen, beobachtete Meeresspiegelhöhen und Küstenabstand zum Zeitpunkt der Umläufe 46 und 113, Überflug 94 (Pegel Hörnum)	184
189	Wassertiefen, beobachtete Meeresspiegelhöhen und Küstenabstand zum Zeitpunkt der Umläufe 46 und 113, Überflug 213 (Pegel Pellworm)	185

190	Wassertiefen, beobachtete Meeresspiegelhöhen und Küstenabstand zum Zeitpunkt der Umläufe 46 und 113, Überflug 213 (Pegel Langeoog)	185
191	Ellipsoidische Meeresspiegelhöhen auf Basis von Pegel- und Altimeterbeobachtungen (Referenzpegel LT Alte Weser)	202
192	Instantane Differenzen ellipsoidischer Meeresspiegelhöhen als Funktion der Zeit und Tidephase (Referenzpegel LT Alte Weser)	203
193	Tidephasenkorrigierte instantane Differenzen der physikalischen Meeresspiegelhöhe (Pegel LT Alte Weser)	203
194	Korrelationsfaktoren zwischen Altimeterbeobachtungen und dem Pegel LT Alte Weser mit und ohne Tidephasenkorrektur im Bereich der Deutschen Bucht	204
195	Standardabweichung der Differenzzeitreihen pegel- und altimeterbasierter Meeresspiegelhöhen im Bereich der Deutschen Bucht (mit und ohne Tidephasenkorrektur, Referenzpegel LT Alte Weser)	204
196	Instantane, modellierte (FES2004) und gezeitenkorrigierte Differenzen der Meeresspiegelhöhe gegenüber dem Pegel Helgoland	206
197	Beobachtete und modellierte mittelwertzentrierte Differenzen (EOT11a) der ellip. Meeresspiegelhöhe gegenüber dem Pegel LT Alte Weser	207
198	Korrelationsfaktoren der unkorrigierten und ozeangezeitenkorrigierten (FES2004) Differenzen (Pegel LT Alte Weser)	207
199	Standardabweichungen der unkorrigierten und ozeangezeitenkorrigierten (FES2004) Differenzen (Pegel LT Alte Weser)	208
200	Standardabweichungen der unkorrigierten bzw. ozeangezeitenkorrigierten (EOT11a) Differenzen (Pegel LT Alte Weser)	208
201	Ellipsoidische monatliche Tidemittelwasser des Pegels LT Alte Weser und monatliche ellip. SSH auf Basis von Altimeterbeobachtungen	210
202	Ellipsoidische Differenzen zwischen monatlichen Tidemittelwasser des Pegels LT Alte Weser und SSH auf Basis von Altimeterbeobachtungen	210
203	Mittlere ellipsoidische Differenzen und die Standardabweichungen der einzelnen Monate zwischen den Ergebnissen der NASA/CNES Missionen und LT Alte Weser	211
204	Mittlere physikalische Differenzen und die Standardabweichungen der einzelnen Monate zwischen den Ergebnissen der NASA/CNES Missionen LT Alte Weser	211
205	Lineare Trends auf Basis jährlicher und monatlicher Altimeter- und Pegelbeobachtungen (LT Alte Weser)	212

Tabellenverzeichnis

1	Zusammensetzung des mittleren Meeresspiegelanstiegs	2
2	Doodson Elemente zur Beschreibung der Position von Sonne und Mond relativ zur Erde	8
3	Ursprung und Periodendauer ausgewählter Partialtiden	8
4	Partialtiden der Modelle FES2004, GOT4.7, DTU10 und EOT11	13
5	Parameter des Normalschwerefeldes	23
6	Undulationen verschiedener Schwerefeldmodelle (EGM2008(tf) / EGG2008(zt)) und die Differenzen gegenüber einem mean-tide Gezeitensystem	29
7	Aufbau der Pegelvorschrift	36
8	Radar- und Wasserstandsbeobachtungen am Pegel LT Alte Weser	40
9	Differenzen aufgrund variierender Dichteeinstellungen am Wasserstandssensor	46
10	Ausgewählte Tidekennzahlen nach DIN 4049-3	56
11	Mittlere Differenzen realer Tmw und Tmw auf Basis einer gekürzten Ganglinie	56
12	Mittlere Differenzen realer Tmw und Tmw auf Basis der Thw, Thb und k-Werte sowie mittlere Differenzen zwischen Tmw und T1/2w an verschiedenen Pegeln in der Deutschen Bucht	58

13	Ergebnisübersicht der Stationaritätstests verschiedener Pegel	59
14	Pegelnulldpunkt und Standardabweichung der verbleibenden Differenzen nach einer Übertragung des Wasserstandes mithilfe tidephasenabhängiger Korrekturen	60
15	Angebrachte Korrekturen der minütlichen Wasserstandsbeobachtungen	63
16	Auswirkung von Wasserstandsänderungen auf Pegelfestpunkthöhen	66
17	Höhen- und Statusangaben des Pegelfestpunktes 1 am Pegel Norderney-Riffgat	68
18	Amtliche Sollhöhenunterschiede der Pegel Norderney-Hafen und Norderney-Riffgat	73
19	Amtliche und BfG-Sollhöhenunterschiede der Pegel Norderney-Hafen und Norderney-Riffgat	75
20	Resultierende Sollhöhenunterschiede bei einer Beibehaltung eines Sollhöhenunterschiedes für Norderney-Hafen und Norderney-Riffgat	76
21	Resultierende Sollhöhenunterschiede des Pegels Norderney-Riffgat bei der Beibehaltung konstanter Sollhöhenunterschiede der PFP55 und PFP63	77
22	Höhenangaben und Korrekturen verschiedener Festlegungen der Pegel Norderney-Riffgat und Norderney-Hafen	77
23	Lineare Trends auf Basis der T1/2w unter Nutzung verschiedener repräsentativer Pegelfestpunkte	78
24	Langfristige Änderungen der T1/2w in Relation zu verschiedenen Realisierungen des Deutschen Haupthöhennetzes	79
25	Amtliche Angaben zu Höhen und Sollhöhenunterschieden des Pegels Helgoland-Binnenhafen	80
26	Resultierende Sollhöhenunterschiede des Pegels Helgoland-Binnenhafen unter Beibehaltung der geometrischen Beziehung zwischen ausgewählten Pegelfestpunkten und dem Pegelnulldpunkt	81
27	Resultierende Sollhöhenunterschiede des Pegels Helgoland-Binnenhafen unter Beibehaltung der geometrischen Beziehung zwischen ausgewählten Pegelfestpunkten und dem Pegelnulldpunkt (letzte amtliche Festlegung)	81
28	Höhenangaben und Korrekturen der amtlichen Festlegung und einer Festlegung mit konstanten Sollhöhenunterschieden am Pegel Helgoland-Binnenhafen	81
29	Angaben zu Festlegungen und der Verfügbarkeit geodätischer Pegelinformationen für ausgewählte Pegel im Bereich der Deutschen Bucht	81
30	Abschätzung der Beiträge der Unsicherheit von globalen Wasserstandswerten	84
31	GNSS-Stationen mit Bezug zu einem WSV-Pegel im Bereich der Deutschen Bucht	88
32	Prozessierungsparameter der GNSS-Prozessierung	92
33	Koordinatenergebnisse der GNSS-Marker im IGS05/08	94
34	Koordinatenergebnisse der Pegelnulldpunkte im IGS05/08	96
35	Koordinatendifferenzen zwischen IGS- und BfG-Lösung	96
36	Lineare Höhenänderungen von GNSS-Stationen (mit und ohne Berücksichtigung zyklischer Variationen) im Bereich der Deutschen Bucht	99
37	Koordinatenergebnisse der Pegelnulldpunkte im ITRF2005	99
38	Koordinatendifferenzen der BfG-Lösung gegenüber der offiziellen ITRF2005-Lösung	100
39	BfG-Koordinatenlösung der Pegelnulldpunkte im ITRF2005 und Undulationen des EGM2008 bzw. EGG2008	101
40	Mittlere Meerestopografie an ausgewählten Pegelstandorten	102
41	Auswahl aktueller und vergangener Satellitenaltimetermissionen	103
42	Sichtfeldradien verschiedener Altimetersatelliten	117
43	Geschätzte Parameter unterschiedlicher Re-Tracker	119
44	Transformationsparameter zwischen DHDN und ETRS89/DREF91 des BKG für den Bereich Norddeutschland	127
45	Amtliche Höhenangaben der Pegelnulldpunkte der Pegel Pellworm und Langeoog	129

46	Höhenlage der amtlichen Pegelnullpunkte ausgewählter Pegelnullpunkte der näher betrachteten Pegel	132
47	Monatliche mittlere Differenzen und Standardabweichungen zwischen modellierten Meeresspiegelauslenkungen und realen Pegelbeobachtungen	135
48	Monatliche mittlere Differenzen zwischen modellierten (FES2004) und beobachtete Meeresspiegelhöhen (Pegel Helgoland)	139
49	Monatliche mittlere Differenzen zwischen modellierten (BSHcmod) und beobachteten Meeresspiegelhöhen (Pegel Helgoland)	140
50	Monatliche mittlere Differenzen und Standardabweichungen der Tidescheitel am Pegel Helgoland	143
51	Genutzte Beobachtungsdaten der RADS-Datenbank	144
52	Filterkriterien für RADS- und PISTACH-Beobachtungen	145
53	Standardkorrekturen von Beobachtungen der Satellitenaltimetrie	145
54	Ausgewählte Altimeterfußpunkte für die exemplarische Auswertungen	145
55	Statistische Kennzahlen ausgewählter Altimeterfußpunkte gegenüber dem Referenzpegel Helgoland	151
56	Statistische Kennzahlen für gezeitenkorrigierte Beobachtungen ausgewählter Altimeterfußpunkte (NASA/CNES-Missionen) gegenüber dem Referenzpegel Helgoland	157
57	Statistische Kennzahlen der Differenzen der monatlichen ellipsoidischen Meeresspiegelhöhen gegenüber dem Pegel Helgoland (NASA/CNES-Missionen)	161
58	Statistische Kennzahlen der Differenzen der monatlichen ellip. Meeresspiegelhöhen gegenüber dem Pegel Helgoland unter Nutzung unterschiedlicher IB-Korrektionsmodelle	163
59	Mittlere Differenzen und Standardabweichung zwischen dem BSHcmod V3.0 und V4.0 an sechs ausgewählten Kreuzungspunkten	164
60	Statistische Kennzahlen der Differenzen zwischen dem BSHcmod und Altimeterbeobachtungen	166
61	Monatliche mittlere Differenzen und Standardabweichungen zwischen instantanen Meeresspiegelhöhen und modellierten Meeresspiegelauslenkungen des BSHcmod	167
62	Mittlere SLA an ausgewählten Punkten auf Basis der NASA/CNES-Missionen	167
63	Undulationen der EGM2008 und EGG2008 Schwerefeldmodelle an ausgewählten Punkten	169
64	Differenzen der mittleren SLA (auf Basis der NASA/CNES-Missionen) gegenüber Schwerefeldmodellen an ausgewählten Punkten	169
65	Mittlere Bias der Schwerefeldmodelle im Untersuchungsgebiet	170
66	Mittlere Tmw und deren Trends ausgewählter Pegel über den Zeitraum der verfügbaren Altimeterbeobachtungen	171
67	Lineare Änderung der ellipsoidischen Meeresspiegelhöhe an ausgewählten Punkten auf Basis der NASA/CNES-Missionen	171
68	Korrektionsmodelle für PISTACH-Anwendungen	174
69	Statistische Kennzahlen der Differenzen ausgewählter Altimeterfußpunkte gegenüber Pegelbeobachtungen im Bereich Nordfriesland	182
70	Statistische Kennzahlen der Differenzen ausgewählter Altimeterfußpunkte gegenüber Pegelbeobachtungen im Bereich Ostfriesland	183
71	Beobachtungsanzahl, Standardabweichungen und IMP-Faktoren im Bereich des Pegel Hörnum (Umlauf 94, alle Cycles)	186
72	Beobachtungsanzahl, Standardabweichungen und IMP-Faktoren im Bereich des Pegels Pellworm (Umlauf 213, alle Cycles)	186
73	Beobachtungsanzahl, Standardabweichungen und IMP-Faktoren im Bereich des Pegel Langeoog (Umlauf 213, alle Cycles)	187
74	Ausgewählte Pegelstandorte im Bereich der Deutschen Bucht	201
75	GNSS-Pegelstationen im Bereich der Deutschen Bucht (Stand 2012)	201

76	Statistische Kennzahlen ausgewählter Altimeterfußpunkte gegenüber dem Referenzpegel LT Alte Weser	205
77	Statistische Kennzahlen für gezeitenkorrigierte Beobachtungen ausgewählter Altimeterfußpunkte (NASA/CNES-Missionen) gegenüber dem Referenzpegel LT Alte Weser	209
78	Statistische Kennzahlen der Differenzen der monatlichen ellipsoidischen Meeresspiegelhöhe gegenüber den Pegel LT Alte Weser (NASA/CNES-Missionen)	209