

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Ozeangezeitenmodelle</b>	<b>14</b>
2.1	Entstehung und Wirkung von Gezeiten . . . . .	14
2.1.1	Ursachen für die Gezeiten . . . . .	14
2.1.2	Modellierung der Gezeiten mit Potentialen . . . . .	15
2.1.3	Wirkungen der Gezeiten . . . . .	18
2.2	Berechnung von Ozeangezeitenmodellen . . . . .	20
2.2.1	Grundlagen zur Berechnung theoretischer Ozeangezeitenmodelle . . . . .	20
2.2.2	Erstellung empirischer Ozeangezeitenmodelle . . . . .	23
2.3	Übersicht über globale Ozeangezeitenmodelle . . . . .	27
2.3.1	Beschreibung von Ozeangezeitenmodellen . . . . .	27
2.3.2	Vergleich von globalen Ozeangezeitenmodellen . . . . .	28
2.3.3	Vergleich globaler Ozeangezeitenmodelle mit Pegeldata . . . . .	29
<b>3</b>	<b>Auflastdeformationen</b>	<b>34</b>
3.1	Auflastdeformationen eines Beobachtungspunktes . . . . .	34
3.2	Modellierung von Auflastdeformationen . . . . .	35
3.3	Berechnung von Auflastdeformationen . . . . .	37
3.3.1	Berechnung der Greenschen Funktion . . . . .	37
3.3.2	Lösung des Auflastintegrals . . . . .	40
3.4	Auflastdeformationen durch Ozeangezeiten . . . . .	44
3.4.1	Besonderheiten bei der Berechnung . . . . .	44
3.4.2	Vergleich mit gravimetrischen Daten . . . . .	47
3.5	Auflastdeformationen durch die Atmosphäre . . . . .	47
3.5.1	Modellansatz . . . . .	48
3.5.2	Vereinfachungen bei der Berechnung . . . . .	50
<b>4</b>	<b>Das Global Positioning System</b>	<b>52</b>
4.1	Systembeschreibung . . . . .	52
4.2	Geodätische Koordinatenbestimmung mit GPS . . . . .	53
4.2.1	Beobachtungsgleichung der Trägerphasenmessung . . . . .	53
4.2.2	Linearkombinationen der Beobachtungen . . . . .	54
4.2.3	Auswertung von Differenzen der Beobachtungen . . . . .	56
4.3	Einflüsse auf die Positionsbestimmung mit GPS . . . . .	59
4.3.1	Zeitliche Variation der Empfängerposition . . . . .	59
4.3.2	Mehrwegeausbreitung . . . . .	61
4.3.3	Ionosphärische Refraktion . . . . .	62
4.3.4	Troposphärische Refraktion . . . . .	63
4.3.5	Variationen des Antennenphasenzentrums . . . . .	66
4.3.6	Satellitenkonstellation . . . . .	70
4.4	Auswertung von GPS-Daten mit der Berner Software . . . . .	72
<b>5</b>	<b>Simulation von GPS-Daten</b>	<b>74</b>
5.1	Auswirkung einer periodischen Auflastdeformation . . . . .	75
5.2	Einfluß der troposphärischen Refraktion . . . . .	76
5.2.1	Simulation ohne troposphärische Refraktion . . . . .	76
5.2.2	Simulation mit troposphärischer Refraktion . . . . .	77

5.2.3	Wiederholbarkeit der Tageslösungen . . . . .	80
5.2.4	Einfluß der Satellitengeometrie . . . . .	82
5.2.5	Parametrisierung der Funktion des Auflasteffektes . . . . .	83
5.3	Einfluß von Beobachtungslücken durch ionosphärische Aktivität . . . . .	85
5.4	Einfluß der Variation des Antennenphasenzentrums . . . . .	87
5.4.1	Einfluß auf Tageslösungen . . . . .	88
5.4.2	Pseudokinematische Höhenbestimmung . . . . .	90
5.4.3	Reproduzierbarkeit der Variation des Antennenphasenzentrums . . . . .	91
5.5	Vergleich der simulierten mit gemessenen GPS-Daten . . . . .	91
<b>6</b>	<b>Auswertung von GPS-Daten</b>	<b>94</b>
6.1	Beispiel Westgrönland: einheitliche Empfängertypen . . . . .	94
6.1.1	Auswertung ohne Auflastmodellierung . . . . .	94
6.1.2	Bestimmung zeitabhängiger Höhenvariationen . . . . .	96
6.1.3	Auswertung mit Auflastmodellierung . . . . .	98
6.2	Beispiel Westgrönland: verschiedene Empfängertypen . . . . .	101
6.2.1	Berechnung von Tageslösungen . . . . .	101
6.2.2	Berücksichtigung der Variation des Antennenphasenzentrums . . . . .	103
6.2.3	Pseudokinematische Höhenbestimmung . . . . .	106
6.2.4	Konsequenz für die Bestimmung meteorologischer Daten . . . . .	107
6.3	Beispiel Schirmacheroase: Mehrwegeeinfluß . . . . .	109
6.3.1	Modellierung des Einflusses der Mehrwegeausbreitung . . . . .	109
6.3.2	Modellierung der vertikalen Deformationen durch Ozeangezeiten . . . . .	112
6.4	Beispiel Antarktische Halbinsel: Regionalnetz . . . . .	115
6.4.1	GPS-Lösungen für die Stationshöhe . . . . .	115
6.4.2	Troposphärische Refraktion im Regionalnetz . . . . .	118
6.4.3	Pseudokinematische Höhenbestimmung . . . . .	119
6.4.4	Schätzung der Auflastdeformationen . . . . .	120
6.4.5	Bestimmung von Skalierungsfaktoren . . . . .	123
6.4.6	Validierung von Modellen der vertikalen Auflastdeformation . . . . .	125
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung der Ergebnisse</b>	<b>128</b>

# Tabellenverzeichnis

2.1	Perioden und Amplituden ausgewählter Partialtiden des Gezeitenpotentials mit Termen aus den Legendreschen Funktionen . . . . .	18
2.2	Lovesche und Shidasche Zahlen für das PREM Erdmodell . . . . .	19
2.3	Überlagerungsperioden von Partialtiden und Umlaufzeiten der Satellitenaltimeter ERS-1 und TOPEX/POSEIDON in Tagen, sowie deren Amplituden . . . . .	26
2.4	Angaben über einige wichtige globale Ozeangezeitenmodelle . . . . .	27
2.5	Korrelationen der Pegelreihen von Stationen im Bereich der Antarktischen Halbinsel und Datenreihen aus globalen Ozeangezeitenmodellen . . . . .	30
2.6	Korrelationen der Pegelreihen von Stationen an der Westküste Grönlands und Datenreihen aus globalen Ozeangezeitenmodellen . . . . .	33
3.1	Lovesche Zahlen für auflasterzeugende Potentiale; berechnet für das PREM . . . . .	37
3.2	Vergleich verschiedener Varianten der Berechnung der Greenschen Funktion für vertikale Auflastdeformationen . . . . .	38
3.3	Vergleich der Änderungen des Schwerefeldes durch die Ozeangezeiten aus Gravimeterdaten und globalen Ozeangezeitenmodellen . . . . .	47
4.1	Linearkombinationen der Trägerphasenmessungen, die in der Berner Software, Version 4.0, verwendet werden . . . . .	56
5.1	Auswirkung der vertikalen Auflastdeformation durch Ozeangezeiten auf eine aus GPS bestimmte Stationshöhe ohne bzw. mit Schätzung von Troposphärenparametern . . . . .	75
5.2	Auswirkung der vertikalen Auflastdeformation durch Ozeangezeiten auf eine aus GPS bestimmte Stationshöhe ohne bzw. mit Schätzung von Troposphärenparametern, wobei ab 22:00 UTC ein Datenausfall vorliegt . . . . .	76
5.3	Korrelationskoeffizienten zwischen pseudokinematisch bestimmten Stationshöhen aus simulierten GPS-Daten einer Basislinie in einer Breite von 60° mit vertikalen Auflastdeformationen, die in der Auswertung nicht berücksichtigt bzw. als Korrekturen angebracht wurden . . . . .	79
5.4	Gesamtlösung aller 7 Beobachtungstage des Simulationsexperiments für die vertikale Komponente einer Basislinie in einer Breite von 60°, wobei die angenommene Auflastdeformation durch Ozeangezeiten in der Auswertung nicht berücksichtigt bzw. als Korrekturen angebracht wurde . . . . .	80
5.5	Lösung für die vertikale Komponente einer Basislinie in einer Breite von 60° bei verschiedenen Varianten der Modellierung der Auflastdeformationen durch Ozeangezeiten . . . . .	84
6.1	Korrelationskoeffizienten zwischen den pseudokinematischen Höhen für Sisimiut in Bezug auf Kangerlussuaq und den vertikalen Auflastdeformationen durch ozeanische Gezeiten . . . . .	97
6.2	Anzahl der Beobachtungen und Konditionszahlen für die Normalgleichungen der Basislinie Kangerlussuaq → Sisimiut . . . . .	99
6.3	Wiederholbarkeiten der Höhenkomponente für die Basislinien von Forster zu den Punkten am Untersee aus verschiedenen Berechnungsvarianten . . . . .	114
6.4	Gesamtlösung für die Stationshöhe mit der Standardabweichung für eine Tageslösung für die einzelnen Basislinien ohne und mit Einführung des Modells der vertikalen Auflastdeformationen durch die Ozeangezeiten . . . . .	116
6.5	Gesamtlösung für die Stationshöhe mit der Standardabweichung für eine Tageslösung aus den Netzlösungen ohne und mit Einführung des Modells der vertikalen Auflastdeformationen durch die Ozeangezeiten . . . . .	117
6.6	Standardabweichung der Residuen der Schätzung der Regressionsgerade zwischen den Troposphärenparametern benachbarter Stationen des Regionalnetzes ohne und mit Einführung des Modells der vertikalen Auflastdeformationen durch die Ozeangezeiten . . . . .	119

6.7	Gesamtlösung für die Stationshöhe der einzelnen Basislinien im Bereich der Antarktischen Halbinsel, die bei gleichzeitiger Schätzung der Parameter der Auflastdeformation erhalten werden . . .	121
6.8	Skalierungsfaktoren für die vertikalen Auflastdeformationen durch die Ozeangezeiten aus GPS-Daten . . . . .	123
6.9	Vergleich von Stationshöhenunterschieden aus verschiedenen Kombinationen unabhängiger Basislinienlösungen . . . . .	126
6.10	Schätzung von Skalierungsfaktoren zur Validierung des Modells der vertikalen Auflastdeformationen durch Ozeangezeiten im südlichen Bereich der Antarktischen Halbinsel . . . . .	127

## Abbildungsverzeichnis

2.1	Erde-Mond-System als Grundlage für die Entstehung der Gezeiten . . . . .	14
2.2	Erde-Mond-System als gezeitenverursachendes System . . . . .	15
2.3	Übergang vom lokalen Winkel $\beta$ zu globalen astronomischen Koordinaten im Erde-Mond-System . . . . .	16
2.4	Massenbilanz einer Wassersäule . . . . .	22
2.5	Prinzip der Satellitenaltimetrie und geometrische Zusammenhänge . . . . .	25
2.6	Lage der Pegelstationen, die zum Vergleich der globalen Ozeangezeitenmodelle im Bereich der Antarktischen Halbinsel verwendet wurden . . . . .	29
2.7	Vergleich von vier Haupttiden aus der Gezeitenanalyse für die Pegeldaten von zwei Stationen im Bereich der Antarktischen Halbinsel und den entsprechenden Datenreihen aus den globalen Ozeangezeitenmodellen FES95.2.1 und CSR3.0 . . . . .	31
2.8	Lage der Pegelstationen, die zum Vergleich der globalen Ozeangezeitenmodelle an der Westküste Grönlands herangezogen wurden, sowie einiger GPS-Stationen, die in den Beispielen in Kapitel 6 verwendet werden . . . . .	32
2.9	Vergleich von vier Haupttiden aus der Gezeitenanalyse für die Pegeldaten von zwei Stationen an der Westküste Grönlands und den entsprechenden Datenreihen aus den globalen Ozeangezeitenmodellen FES95.2.1 und CSR3.0 . . . . .	33
3.1	Krustendehformationen an einem Beobachtungspunkt P durch die Masse des Ozeanwassers und die Masse der Atmosphäre . . . . .	34
3.2	Lovesche Zahlen $h'_n$ für verschiedene Erdmodelle . . . . .	36
3.3	Lösungen der Greenschen Funktion für die vertikale Deformation für verschiedene Sätze Lovescher Zahlen . . . . .	40
3.4	Anordnung der Flächenelemente bei der „spherical disc method“ . . . . .	42
3.5	Anordnung der Flächenelemente bei der „template method“ . . . . .	42
3.6	Amplituden der vertikalen Auflastdeformation durch die Ozeangezeiten der Partialtiden $K_1$ und $M_2$ aus dem Ozeangezeitenmodell FES95.2.1 für die Station Jubany/Dallmann unter Verwendung verschiedener Integrationsverfahren zur Berechnung der mittleren Elongation der Ozeangezeiten einer Berechnungszelle, wobei deren Größe variiert wurde . . . . .	44
3.7	Geographische Übersicht für den Bereich der Schirmacheroase, Dronning Maud Land, Antarktis . . . . .	46
3.8	Vertikale und horizontale Auflastdeformation entlang des Meridians von $12^\circ$ östlicher Länge durch eine gleichmäßige Wasserschicht von 1 m Höhe im Ozeanbereich . . . . .	46
3.9	Deformationen durch eine angenommene Luftdruckanomalie ohne Ozeane (kein inverses Barometer) . . . . .	49
3.10	Deformationen durch eine angenommene Luftdruckanomalie mit Ozean (perfektes inverses Barometer) . . . . .	49
4.1	Größenordnungen von Amplituden vertikaler Deformationen der Erdkruste durch verschiedene Einflüsse, die zu einer zeitlich variablen Empfängerposition führen . . . . .	60
4.2	Geometrischer Zusammenhang zur Herleitung der partiellen Ableitung der GPS-Beobachtung des Beobachtungspunktes $i$ zum Satelliten $k$ nach der Stationshöhe . . . . .	64
4.3	Beträge der partiellen Ableitungen zur Schätzung der Troposphärenparameter und Stationshöhen . . . . .	65

4.4	Histogramm der Höhenwinkel, unter denen innerhalb eines Tages auf einer Station Satelliten beobachtet werden können . . . . .	65
4.5	Korrelation zwischen Troposphärenparameter und Stationshöhe bei der Verwendung von verschiedenen Höhenwinkelmasken . . . . .	65
4.6	Ansatz für ein höhenwinkelabhängiges Antennenphasenmodell . . . . .	67
4.7	Relative, höhenwinkelabhängige Korrekturen für die Beobachtungen aus dem Antennenphasenmodell von Rothacher und Mader (1996) für die geodätische Antenne von Trimble (4000ST L1/L2 GEOD) in Bezug auf die Dorne Margolin-Antenne . . . . .	69
4.8	Relative, höhenwinkelabhängige, vertikale Korrekturen aus dem Antennenphasenmodell von Rothacher und Mader (1996) für die geodätische Antenne von Trimble (4000ST L1/L2 GEOD) in Bezug auf die Dorne Margolin-Antenne . . . . .	69
4.9	Fehler der vertikalen Komponente für eine Basislinie zwischen einer geodätischen Antenne von Trimble (4000ST L1/L2 GEOD) und einer Dorne Margolin-Antenne, wenn bei der Berechnung des Höhenunterschiedes der höhenwinkelabhängige Anteil des Antennenphasenmodell nicht berücksichtigt wird und keine Troposphärenparameter geschätzt werden . . . . .	69
4.10	Fehler der vertikalen Komponente für eine Basislinie zwischen einer geodätischen Antenne von Trimble (4000ST L1/L2 GEOD) und einer Dorne Margolin-Antenne, wenn bei der Berechnung des Höhenunterschiedes der höhenwinkelabhängige Anteil des Antennenphasenmodell nicht berücksichtigt wird und neben der Stationshöhe Troposphärenparameter geschätzt werden . . . . .	69
4.11	Azimet-Höhenwinkeldiagramm der Satellitenüberflüge . . . . .	71
4.12	Höhenwinkel, unter denen die Satelliten beobachtet werden können . . . . .	71
4.13	Anzahl von beobachtbaren Satelliten sowie Index für die Satellitengeometrie zur Berechnung der horizontalen und vertikalen Komponenten der Stationskoordinaten . . . . .	71
4.14	Datenfluß in der Berner Software, Version 4.0 . . . . .	72
5.1	Anzahl der Satelliten pro Epoche für verschiedene Höhenwinkelmasken; Auswirkung der angenommenen Auflastdeformation durch die Ozeangezeiten auf die Stationshöhe bei einer Mittelbildung über 24 Stunden mit einer Gewichtung entsprechend der Anzahl der Beobachtungen je Epoche . . . . .	74
5.2	Analyse simulierter GPS-Daten, die neben dem Meßrauschen nur eine angenommene Auflastdeformation enthalten; die Auswertung der etwa 100 km langen Basislinie in einer Breite von 60° erfolgte sowohl ohne als auch mit Schätzung von Troposphärenparametern . . . . .	77
5.3	Pseudokinematische Höhen aus simulierten GPS-Daten in einer Breite von 60° mit den Differenzen zwischen vorgegebenen und geschätzten Troposphärenparametern . . . . .	78
5.4	Tageslösungen für die Stationshöhe aus simulierten GPS-Daten in einer Breite von 60° mit den geschätzten Troposphärenparametern . . . . .	81
5.5	Vergleich der Troposphärenparameter aus den Lösungen ohne bzw. mit Auflastmodellierung mit den Werten, die bei der Simulation für die troposphärische Refraktion angenommen wurden . . . . .	82
5.6	Lösungen für die Stationshöhe aus den 7 Tagen des Simulationsexperimentes für Satellitenkonstellationen in unterschiedlichen geographischen Breiten . . . . .	83
5.7	Amplitude und Phase, die sich bei der Analyse der simulierten Daten für Basislinien in einer Breite von 60° bei der Parametrisierung der Auflastdeformationen durch Ozeangezeiten ergeben . . . . .	85
5.8	Tageslösungen für die Höhe aus simulierten GPS-Daten in einer Breite von 60° mit den geschätzten Troposphärenparametern, wobei im Zeitraum von 22:00 bis 24:00 UTC eine Beobachtungslücke angenommen wurde . . . . .	86
5.9	Einfluß der Schutzkappe bei einer Choke Ring-Antenne von Ashtech, wie er sich aus der Kalibrierung von Mader (1996) ergibt . . . . .	88
5.10	Tageslösungen für die Höhe aus simulierten GPS-Daten in einer Breite von 60° mit den geschätzten Troposphärenparametern, wobei die Antenne mit einer angenommenen Schutzkappe versehen war, die bei der Auswertung nicht berücksichtigt wurde . . . . .	89
5.11	Korrelatogramme zwischen pseudokinematisch bestimmten Höhen aus GPS und den angenommenen Ozeanauflastdeformationen . . . . .	90
5.12	Ergebnisse der Schätzung des Modells der höhenwinkelabhängigen Variationen des Antennenphasenzentrums für die Verwendung einer Schutzkappe aus simulierten Daten . . . . .	91
5.13	Anzahl der Satelliten pro Epoche für die simulierten Daten der Basislinie in einer Breite von 60° und für die aufgezeichneten Daten der Basislinie Marambio → Esperanza . . . . .	92
5.14	Histogramm über die Höhenwinkel, die in die Auswertung eingegangen sind . . . . .	93
5.15	Histogramm über die Residuen der Auswertung mit einer Höhenwinkelmaske von 10° . . . . .	93

6.1	Koordinatenlösungen und Wiederholbarkeit für die Basislinie Kangerlussuaq → Sisimiut . . . . .	95
6.2	Vertikale Auflastdeformationen durch die ozeanischen Gezeiten aus dem FES95.2.1-Modell für die Stationen Sisimiut und Kangerlussuaq . . . . .	96
6.3	Vergleich der Ergebnisse der pseudokinematischen Höhenbestimmung für Sisimiut relativ zu Kangerlussuaq mit den vertikalen Auflastdeformationen aus dem Ozeangezeitenmodell FES95.2.1 . . . . .	97
6.4	Wiederholbarkeit für eine Tageslösung der Basislinie Kangerlussuaq → Sisimiut mit und ohne Modellierung der Auflastdeformationen durch die Ozeangezeiten . . . . .	98
6.5	Einfluß der vertikalen Auflastdeformationen durch die Ozeangezeiten auf die GPS-Tageslösungen der Basislinie Kangerlussuaq → Sisimiut . . . . .	99
6.6	Tageslösungen aus GPS mit Troposphärenparametern für die Basislinie Kangerlussuaq → Sisimiut	100
6.7	Koordinatenlösungen und Wiederholbarkeit für die Basislinie Kellyville → Sisimiut . . . . .	101
6.8	Unterschiede der berechneten Stationshöhen ohne bzw. mit Modellierung der vertikalen Auflastdeformation durch Ozeangezeiten . . . . .	102
6.9	Modell der höhenwinkelabhängigen Variation des Antennenphasenzentrums, das für die Station Kellyville zur Berücksichtigung des Einflusses der Schutzkappe geschätzt wurde . . . . .	103
6.10	Vergleich von verschiedenen Berechnungsvarianten für die Höhenkomponente der Basislinie Kellyville → Sisimiut . . . . .	105
6.11	Korrelatogramm zwischen den Troposphärenparametern der Stationen Kangerlussuaq und Kellyville aus den GPS-Lösungen . . . . .	105
6.12	Vergleich der Ergebnisse der pseudokinematischen Höhenbestimmung für Sisimiut relativ zu Kellyville mit vertikalen Auflastdeformationen aus dem Ozeangezeitenmodell FES95.2.1 . . . . .	106
6.13	Differenz der Troposphärenparameter zwischen denen, die bei der pseudokinematischen Höhenbestimmung geschätzt wurden, und denen, die aus der Gesamtlösung stammen . . . . .	107
6.14	Differenzen zwischen den Troposphärenparametern aus den pseudokinematischen Lösungen mit und ohne Auflastmodellierung . . . . .	108
6.15	Modellierung des Einflusses der Mehrwegeausbreitung für die Basislinien zwischen Forster und zwei der Punkte am Untersee . . . . .	110
6.16	Anwendung der Modellierung der Mehrwegeausbreitung für die Basislinie Forster → Untersee I . . . . .	112
6.17	Tageslösungen für die Höhenkomponente der Basislinie Forster → Untersee I mit der Anzahl der Beobachtungen je Stunde . . . . .	113
6.18	GPS-Stationen, die für das Beispiel Antarktische Halbinsel verwendet wurden . . . . .	115
6.19	Amplitude und Phase der vertikalen Auflastdeformation durch die Ozeangezeiten entsprechend des FES95.2.1-Modells für die Haupttiden im Bereich der Antarktischen Halbinsel . . . . .	116
6.20	Vergleich des Einflusses der troposphärischen Refraktion für benachbarte Stationen im Regionalnetz	118
6.21	Pseudokinematische Höhenbestimmung mit GPS auf der Basislinie Marambio → Notter Point . . . . .	119
6.22	Energiespektrum für die Zeitreihe der Stationshöhen aus der pseudokinematischen GPS-Lösung für die Basislinie Marambio → Notter Point sowie zum Vergleich das Spektrum der Zeitreihe der Ozeanauflastdeformation aus dem Modell auf der Grundlage des FES95.2.1 . . . . .	120
6.23	Vergleich von Amplitude und Phase der Auflastdeformationen, die aus GPS-Daten für verschiedene Basislinien geschätzt wurden, mit denen des Modells, das auf der Grundlage des Ozeangezeitenmodells FES95.2.1 entstand . . . . .	122
6.24	Skalierungsfaktoren der Auflastmodelle auf der Grundlage des Ozeangezeitenmodells FES95.2.1 für verschiedene Basislinien im Bereich der Antarktischen Halbinsel mit unterschiedlicher Beobachtungsdauer . . . . .	124
6.25	Vergleich von Amplitude und Phase der Auflastdeformationen, die aus GPS-Daten für verschiedene Basislinien geschätzt wurden, mit denen des Modells, das auf der Grundlage des Ozeangezeitenmodells FES95.2.1 entstand . . . . .	125