de la Ą

Institut für Kartographie Universität Hannover Juni 1997

Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben

Optimierung der Beschickung im Küstenbereich der Deutschen Bucht

Förderkennzeichen MTK 0566

Bundesanstalt für Wasserbau **KFKI – Bibliothek** Wedeler Landstraße 157 22559 Hamburg

:

Eingang:

Signatur:

1.

21.01.1595 KTKI-P 42,

Bearbeiter :

Dipl.-Ing. Th. Hottendorff Dipl.-Ing. R. Ammersdörfer (01.06.95 - 31.12.96)(01.02.94 - 30.04.95)

Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. D. Grünreich

E 33010 Lif.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen MTK–0566 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

:

Inhaltsverzeichnis

z

1. Darstellung des Gesamtvorhabens		stellung des Gesamtvorhabens	5
	1.1.	Zielsetzung des Forschungsvorhabens	5
	1.2.	Zeitlicher Ablauf des Projekts	6
	1.3.	Wissenschaftlich-technischer Arbeitsstand	7
	1.4.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	8
2.	Bish	er eingesetzte Beschickungsverfahren	10
	2.1.	Das Beschickungsproblem	10
	2.2.	Das Verfahren der Wasserstandserrechnungskarte	12
	2.3.	Direkte Beschickung	14
	2.4.	Das Verfahren nach Köves	15
	2.5.	Das Verfahren nach Rosengarten	16
	2.6.	Bewertung und Diskussion der vorgestellten Beschickungsverfahren	18
3.	Kon	zeption des digitalen Wasseroberflächenmodells	21
	3.1.	Numerische Verfahren zur Oberflächenmodellierung	21
3.2. Die mathematische Modellierung der Wasseroberfläche		Die mathematische Modellierung der Wasseroberfläche	25
		3.2.1. Das funktionale Modell	26
		3.2.2. Stochastisches Modell	27
		3.2.3. Lösung	29
	3.3.	Optimierung des Modellierungsansatzes	30
	3.4.	Programmtechnische Realisierung des Modellierungsansatzes	33
4.	Unt	ersuchung der Beschickungsverfahren	35
	4.1.	Datenerfassung	35

		4.1.1. Einrichtung und Einmessung des Pegeltestnetz im Elbeästuar	35	
	4.2.	Erfassung zusätzlicher Wasserstandsdaten durch DGPS	36	
	4.3. Digitalisierung der analogen Pegelbögen			
	4.4.	Untersuchung des digitalen Wasseroberflächenmodells (DIWOM) .	40	
		4.4.1. Untersuchungskonzept	40	
		4.4.2. Modellierung mit allen Pegeln des Testnetzes	42	
		4.4.3. Modellierung mit Pegeln der optimierten Pegelkonfiguration	49	
5.	Tran	nsformation zwischen NN und dem Mittleren Springniedrigwasser	53	
	5.1.	Definition des Normalnull	54	
	5.2.	Bestimmung des Mittleren Springniedrigwassers	56	
	5.3.	Bestimmung der SKN-Fläche im Testgebiet Elbemündung	58	
	5.4.	Transformation zwischen den Höhenbezugssystemen NN und SKN	61	
6.	Zus	ammenfassung	68	
7.	Lite	raturverzeichnis	71	
Α.	Bes	chickungsgenauigkeiten mit der WEK	74	
B	We	tterdaten des Seewetteramtes Hamburg	77	
	B.1.	Windvektoren der Monate Mai bis Oktober im Elbeästuar	77	
	B.2.	Signifikante Wellenhöhe der Monate Mai bis Oktober im Elbeästuar	80	
C	. Erg	ebnisse der Pegeldatenanalyse	83	
D	. Auf	bau der Pegeldatenbank in ORACLE	86	

4

1. Darstellung des Gesamtvorhabens

1.1. Zielsetzung des Forschungsvorhabens

Im Küstenbereich werden Tiefenmessungen für die Modellierung des Unterwasserreliefs, die Herstellung von Seekarten, morphologischen Analysen und z.B. Planungen und Realisierungen im Küstenschutz benötigt. Je nach Verwendungszweck der beschickten Tiefendaten werden unterschiedliche Höhenbezugsflächen benutzt. So werden für morphologische Analysen und Aufgaben im unmittelbaren Küstenbereich, die die Integration von Wassertiefen und Landhöhen erfordern, Daten bezogen auf Normal-Null (NN) verwendet. Die Seekartenherstellung mit der vordringlichen Aufgabe, die Verkehrssicherheit der Seeschiffahrt zu gewährleisten, nutzt Wassertiefen, die auf Seekartennull (SKN) beschickt sind. Ist für verschiedene Aufgaben der Austausch von Tiefendaten unterschiedlicher Bezugssysteme erforderlich, ergeben sich Probleme, da die Beziehung zwischen SKN und NN nicht gesichert ist. Aus diesem Grund ist durch die Arbeitsgruppe Beschickung (BMV 1980) 1980 eine Vereinheitlichung der Festlegung des Kartennulls und die Verbesserung der Beschickung angestrebt worden. Unter Beschickung wird die Zuordnung gemessener Wassertiefen zu einem Höhenbezugssystem verstanden. An beschickte Tiefendaten werden zunehmend höhere Anforderungen in Bezug auf Genauigkeit und Qualität gestellt. Derzeitige Beschickungsverfahren werden diesen höheren Anforderungen jedoch nicht gerecht. Bei der Erfassung und Aufbereitung von Tiefendaten ist besonders die Beschickung ein wesentlicher genauigkeitseinschränkender Faktor. Bisher werden für die Beschickung im Küstenbereich mit indirekten Verfahren Genauigkeiten um 20 cm erzielt. Die Ursachen für die geringen Genauigkeiten liegen in der ungenügenden Modellierung der Wasseroberfläche, die häufig auf idealisierenden Modellannahmen und mittleren Tideverhältnissen beruhen.

Ziel des Forschungsvorhabens ist daher, im Küstenbereich der Deutschen Bucht ein automatisiertes Beschickungsverfahren mit einer Genauigkeit der Beschickung von besser als \pm 10 cm zu realisieren. Als Grundlage dient der von Rosengarten

1. Darstellung des Gesamtvorhabens

(1987) eingehend untersuchte Ansatz der mathematischen Wasseroberflächenmodellierung, den es in seiner Genauigkeit und Funktionalität sowie im Hinblick auf Praxisnähe und -einsatz zu optimieren gilt. Mit dem Begriff Optimierung ist dabei die Verbesserung der geometrische Anpassung der Modellfunktion an die tatsächliche Wasseroberfläche, die durch die an den Pegeln gemessenen Wasserstände repräsentiert wird, gemeint. Dabei sind wirtschaftliche und praxisrelevante Gesichtspunkte, wie etwa die Nutzung einer möglichst geringen Anzahl von Pegeln unter Beachtung der Genauigkeitsvorgaben zu berücksichtigen. Es wird unterstellt, daß die Pegelmessungen in dem Pegeltestnetz die Form der Wasseroberfläche entsprechend der Genauigkeitsvorgabe von ± 10 cm wiedergeben. Darüber hinaus soll die geometrische Beziehung zwischen den Höhenbezugssystemen Seekartennull (SKN) und Normalnull (NN) untersucht werden, um einen Datenaustausch zwischen beiden Systemen - und damit zwischen unterschiedlichen Anwendungen - unter Verwendung eines geeigneten Transformationsansatzes zu ermöglichen.

1.2. Zeitlicher Ablauf des Projekts

Der Arbeits- und Zeitplan des Projekts, das über einen Zeitraum von drei Jahren durchgeführt wurde, ist in Tabelle 1.1 dargestellt. Er ergibt sich aus den durch die Konzeption und die Zielsetzung vorgegebenen Aufgaben. Der Ablauf des Pro-

Aufgaben	1994	1995	1996
Planung, Einrichtung (Verdichtung), Einmessung und Betrieb eines Pegelnetzes im Testgebiet in Zusammenarbeit mit Experten verschiedener Bereiche (u. a. Hydrographie und Küsteningenieurwesen)			
Softwareentwicklung zur automatisierten Digitalisierung von Pegelbögen	國際		
Automatisierte Digitalisierung der Pegelbögen im Testgebiet			ЦЦ
Entwicklung, Implementierung und Einrichtung einer Pegeldatenbank			
Softwareimplementierung eines derzeitigen Beschickungsverfahrens			
Softwareentwicklung zur dynamischen Wasseroberflächenmodellierung		美花 道	li
Auswertungen und Modellrechnungen, vergleichende Untersuchung mit einem derzeitigen Beschickungsverfahren, Optimierung der Modellierung			
Untersuchung der geometrischen Beziehungen zwischen den Höhenbezugssystemen Seekartennull (SKN) und Normalnull (NN)			

Abbildung 1.1.: Zeitliche Planung des Forschungsvorhabens.

jekts läßt sich grob in die Abschnitte Datenerfassung, Methodenentwicklung und Verifizierung gliedern. Dabei sind die einzelnen Abschnitte nicht strikt getrennt voneinander zu sehen, sondern sie greifen verzahnt ineinander.

1.3. Wissenschaftlich-technischer Arbeitsstand

Derzeit finden im Seegebiet und Küstenbereich der Deutschen Nordsee unterschiedliche Beschickungsverfahren Anwendung (BMV 1980), (WSA Cuxhaven 1994). Bisherige Beschickungsverfahren lassen sich grob in drei Kategorien gliedern. Zum einen ist hier die direkte Beschickung (vgl. Abschnitt 2.3) zu nennen, die ein lokales, punktbezogenes Verfahren darstellt. Der an dem Pegel gemessene Wasserstand wird zur Beschickung herangezogen. Eine Erweiterung dieses Verfahren erfolgt durch die lineare Interpolation des Wasserstandes zwischen zwei Pegeln. Dieses Verfahren findet z.B. in den Tideflüssen Anwendung. Dabei handelt es sich um ein linienhaftes Verfahren. Eine Verfeinerung dieses Verfahren stellt das Köves-Verfahren (vgl. Abschnitt 2.4), das im Amtsbezirk des WSA Cuxhaven im Fahrwasser des Elbeästuars angewendet wird, dar. Bei diesem Verfahren wird der Wasserstand zwischen drei Pegel entlang der Verbindungslinie durch ein Lagrange-Polynom interpoliert. Zu den flächenhaften Verfahren gehört die Wasserstandserrechnungskarte (WEK). Bei der WEK (Abschnitt 2.2) wird der Wasserstand auf der Grundlage von mittleren Laufzeitdifferenzen und mittleren Springtidehubdifferenzen von einem Bezugspegel auf die Lotungsposition übertragen.

Die Schwächen dieser Beschickungsverfahren liegen in der geringen Genauigkeit, der mangelnden Wirtschaftlichkeit oder der beschränkten Einsatzmöglichkeit in lokal sehr begrenzten Bereichen. Damit werden diese Verfahren den modernen Anforderungen an beschickte Tiefendaten bezüglich Wirtschaftlichkeit, Qualität und Genauigkeit, insbesondere im Hinblick auf die Verkehrssicherheit der Schiffahrt und die Zuverlässigkeit morphologischer Analysen, nicht mehr gerecht.

Wissenschaftliche Untersuchungen im Teilprojekt R1 "Topographie und Kartographie im Küstenbereich" des Sonderforschungsbereichs (SFB) 149 (1983 u. 1984) "Vermessungs- und Fernerkundungsverfahren an Küsten und Meeres" und in einer Dissertation (Rosengarten 1987) führten zu einem völlig neuen Ansatz, dem digitalen Wasseroberflächenmodell. Ein Digitales Geländemodell (DGM) beschreibt die Oberfläche des festen Landes und ihre Formen in geometrischer Hinsicht mit Hilfe von 3-dimensionalen Stützpunkten, deren Verbindung und punktbezogenen Attributen (Hake u. Grünreich 1994). Die Übertragung dieses Gedankens auf die Wasseroberfläche führt Rosengarten (1987) zum dynamischen Wasseroberflächenmodell (DYWOM), "die geometrische Modellierung der dynamischen Wasseroberfläche mit geometrischen Größen"ohne "Berücksichtigung physikalischer Einflußgrößen". Der wesentliche Unterschied zum DGM besteht in der Dynamik, der ständigen Veränderung der Wasseroberfläche mit der Zeit, die neben Lage und Höhe als 4. Dimension in das Modell mit eingeht. Die bei der WEK durch die Verwendung von Mittelwerten und die Diskretisierung in Intervallen auftretenden Modellfehler werden bei dem Verfahren nach Rosengarten (Abschnitt 2.5) durch die flächenhafte Approximation der Wasseroberfläche vermieden.

Das Verfahren nach Rosengarten stellt für küstennahe Reviere mit einer ausreichenden Anzahl von Pegel dasjenige Verfahren dar, das die besten Beschickungsergebnisse verspricht. Bisher ist dieses Verfahren jedoch noch nicht eingesetzt worden, da es in der beschriebenen Form wegen der Vielzahl der zu bestimmenden Parameter nicht praxisgerecht ist und eine eingehende Überprüfung in einem größeren Testgebiet bisher noch nicht vorgenommen wurde.

1.4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Hinblick auf die Zielsetzung des Forschungsvorhabens zur Entwicklung eines genauen und praxisgerechten Beschickungsverfahrens, ist eine enge Zusammenarbeit mit den mit der Seevermessung befaßten Institutionen unumgänglich. Daher wurde das Forschungsvorhaben von einer Projektgruppe des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KfKI) begleitet. Dies ermöglichte eine optimale Zusammenarbeit aller Stellen und hat wesentlich zu den guten Ergebnissen des Forschungsvorhabens beigetragen. An der Projektgruppe waren folgende Institutionen und Einrichtungen beteiligt:

- Wasser- und Schiffahrtsdirektion Nordwest, Aurich.
- Bundesamt für Seeschiffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg,
- Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz,
- Amt für Land- und Wasserwirtschaft (ALW) Heide,
- Amt für Land- und Wasserwirtschaft (ALW) Husum,
- Wasser- und Schiffahrtsamt (WSA) Bremerhaven,
- Wasser- und Schiffahrtsamt (WSA) Cuxhaven,
- Wasser- und Schiffahrtsamt (WSA) Emden,

Bei der Bereitstellung von Daten und Verfahren und der Einrichtung, Einmessung und des Betriebs des Pegeltestnetzes beteiligten sich die folgenden Institutionen:

- Amt für Land- und Wasserwirtschaft (ALW) Heide,
- Amt für Land- und Wasserwirtschaft (ALW) Husum,
- Bundesamt für Seeschiffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg,
- Institut für Erdmessung (IfE), Universität Hannover,

• Wasser- und Schiffahrtsamt (WSA) Cuxhaven,

.

.

• Wasser- und Schiffahrtsdirektion Nordwest, Aurich.

Allen beteiligten Institutionen sei an dieser Stelle für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung gedankt. Ohne diese Unterstützung wäre eine Durchführung des Forschungsvorhabens in dieser Form nicht möglich gewesen.

2. Bisher eingesetzte Beschickungsverfahren

2.1. Das Beschickungsproblem

Bei der hydrographischen Vermessung werden in der Regel Wassertiefen mit einem Echolot bestimmt. Die gemessenen Wassertiefen geben den vertikalen Abstand des Meeresbodens zum Schwinger des Echolots an. Dieser Abstand ändert sich fortwährend durch den Einfluß der Gezeiten. Daher werden die gemessenen Wassertiefen auf eine definierte Bezugsfläche reduziert. Dieser Vorgang wird Be-



Abbildung 2.1.: Das Prinzip der indirekten Beschickung.

schickung genannt. Bei dem Beschickungswert handelt es sich um den vertikalen Abstand der Wasseroberfläche von der Bezugsfläche. Der Beschickungswert ist abhängig von der Zeit und dem Ort. Er ergibt sich aus Abbildung 2.1 gemäß

$$B = T - h \tag{2.1}$$

Es wird unterschieden zwischen direkten und indirekten Beschickungsverfahren. Bei den *direkten* Verfahren wird die Höhe des Schwingers über eine Höhenbe-

2.1. Das Beschickungsproblem

zugsfläche durch ein begleitendes Nivellement, eine trigonometrische Höhenübertragung oder durch differentielles GPS bestimmt. An dem Gesamtfehler sind einerseits die Ungenauigkeiten der Höhenübertragung von einem Festpunkt auf den Schwinger als auch die Ungenauigkeiten durch die Echolotung wirksam. Bei

Fehlerursache	Unsicherheit bei 5m Wassertiefe	Bemerkung	
Temperaturänderung	\pm 2,9 cm	bei $\pm 1^{\circ}$ C dv $= \pm 4\frac{m}{s}$	
Salzgehaltänderung	\pm 0,9 cm	bei $\pm 1^{\circ}/_{\infty} \mathrm{dv} = \pm 1, 2\frac{m}{s}$	
Laufzeitmessung	\pm 5 cm	allg. innere Genauigkeit	
Öffnungswinkel des Schallkegels	je nach Oberflneigung	zwischen 9° und 18°	
Frequenzwahl	je nach Sedimentart	15 kHz 300 kHz	
Beschickung	\pm 5 20 cm	verfahrens- und gebiets- abhängig.	
Eintauchtiefe	bis \pm 3 cm	bei 7-m Boot z.B. durch Tankentleerung	
Änderung der Bootslage (Squat)	bis \pm 5 cm		
Wellengang	bis \pm 10 cm	Vor allem kleinere Boote ohne Hubkompensation	
Hangneigung	± 5 cm	bei 11° Öffnungswinkel, 10° Hangneigung	
Gesamtfehler	\pm 10 cm \pm 30 cm	gemäß Fehlerfortpflan- zungsgesetz	

Tabelle 2.1.: Fehlereinflüsse bei der Tiefenmessung durch Echolotung im Küstenbereich (nach: (Rosengarten 1987)).

indirekten Verfahren wird der Abstand der Wasseroberfläche von der Bezugsfläche ausgehend von einem oder mehreren Pegeln mit verschiedenen Verfahren geometrisch modelliert. Dabei wird vorausgesetzt, daß der Abstand des Pegelnullpunktes zur Bezugsfläche an den Pegeln bekannt ist. Neben den Ungenauigkeiten durch die Echolotung tragen Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Eintauchtiefe des Schiffes und Modellfehler bei der Modellierung der Wasseroberfläche zum Fehlerbudget bei. Eine Aufstellung der einzelnen Fehleranteile und eine Abschätzung ihrer Größe gibt Tabelle 2.1 wieder. Bisher werden im Bereich der Deutschen Bucht wegen der beschränkten Reichweite direkter Verfahren vorwiegend indirekte Beschickungsverfahren angewendet. Mit der Nutzung des GPS wird sich dies unter Umständen in der Zukunft ändern, obwohl im Hinblick auf die Beschickung auf das Seekartennull mit GPS noch Fragen offen sind. Der Übergang von mit dem GPS bestimmten ellipsoidischen Höhen, bzw. NN-Höhen auf das Seekartennull ist wegen der Nichtparallelität der Bezugsflächen bislang ungeklärt (vgl. Abschnitt 5).

2.2. Das Verfahren der Wasserstandserrechnungskarte

Das Standardverfahren zur Beschickung in der Deutschen Bucht ist das Verfahren der Wasserstandserrechnungskarte (WEK). Die WEK überdeckt, ausgehend von einem Bezugspegel, ein abgegrenztes Gebiet mit Zonen gleicher mittlerer Hochwasserlaufzeit und Zonen gleicher Differenz des mittleren Springtidenhubs.



Abbildung 2.2.: Wasserstandserrechnungskarte Cuxhaven Steubenhöft

Die Erstellung der WEK's erfolgt durch das Bundesamt für Seeschiffahrt und Hydrographie. Grundlage für die WEK ist eine Isolinienkarte, die Linien gleichen mittleren Hochwasserintervall (MHWI) bezogen auf den Monddurchgang im Meridian von Greenwich und Linien gleichen mittleren Springtidehubs (MSTH) enthält (Rohde 1989). Daraus läßt sich für einen Bezugspegel eine WEK erstellen indem die Laufzeit- und Höhendifferenzen aus der Isolinienkarte mit einem Bezugspegel gebildet werden. Aus den Differenzen werden die Zeit- und Hubzonen konstruieren. Das Intervall der Zeitzonen beträgt zehn Minuten; das Intervall der Hubzonen beträgt 10 cm. Die WEK's liegen sowohl in analoger als auch in

2.2. Das Verfahren der Wasserstandserrechnungskarte

digitalisierter Form vor. Die Größe des durch eine WEK überdeckten Gebietes richtet sich dabei nach den praktischen Erfordernissen der Seevermessung und der Verfügbarkeit langfristig beobachteter und repräsentativer Bezugspegel. Abbildung 2.2 zeigt die WEK mit Bezugspegel Cuxhaven Steubenhöft.

Für die Beschickung mit der WEK werden die Zeit- und die Hubzone der Lotungsposition bestimmt. Die Gezeitenkurve am Bezugspegel wird um den Betrag der Zeitzone verschoben. Die so ermittelte Höhe der Gezeit wird sodann mit der Differenz des mittleren Springtidehubs skaliert. Der Beschickungswert für eine Lotung ergibt sich aus:

$$B = -\frac{TH + 0.1 * HZ}{TH} * H$$
(2.2)

TH : Mittl. Springtidenhub am Bezugspegel

HZ : Hubzone

:

Η

Höhe der Gezeit über SKN am Bezugspegel zum Zeitpunkt $t_{Lotung} + Zeitzone$.

Die WEK weist durch die Verwendung mittlerer Hochwasserlaufzeiten und Differenzen des MSpTH einige gravierende Vereinfachungen auf, die den Einsatz auf bestimmte Tidesituationen beschränkt. Daher darf die WEK lediglich bei Hochwasser und Springzeit verwendet werden, da im allgemeinen Hochwasserlaufzeitdifferenzen und Niedrigwasserlaufzeitdifferenzen nicht gleich sind. Insbesondere in den Astuaren weicht die Tidenkurve von der Sinusform mit etwa gleichlangen Flut- und Ebbästen ab. Ebenso verhält es sich mit Springtidehüben und Nipptidehüben. Rohde (1989) hat die möglichen Fehler auf der Basis dieser Überlegungen unter Berücksichtigung des Intervalls der Zonen diskutiert. Bei einer fehlerfreien Festlegung der Zeit- und Hubzonen ermittelte er eine theoretischen Genauigkeit von ca. \pm 10 cm im ungünstigen Fall. Hierbei bleiben jedoch Fehlereinflüsse durch die unterschiedliche Form der Tidenkurve am Bezugspegel und am Lotungsort und fehlerhafte Zeit- und Hubzonenzuordnungen unberücksichtigt. So kann es durchaus zu einer fehlerhaften Zuordnung der Zeit- und Hubzonen kommen, wenn die tatsächlichen Verhältnisse stärker von den mittleren Verhältnissen abweichen. Die Untersuchung der Hochwasserlaufzeit zwischen den Pegeln Gr. Vogelsand und Cuxhaven Steubenhöft hat eine erhebliche Streuung der Hochwasserlaufzeiten ergeben. Abbildung 2.3 zeigt die beobachteten Hochwasserlaufzeiten zwischen den Pegeln Cuxhaven Steubenhöft und Gr. Vogelsand von Mai bis Oktober 1994. Jede Säule repräsentiert eine Zeitzone. Laut WEK (vgl. Abbildung 2.2) fällt die mittlere Hochwasserlaufzeit in die Zone -50 Minuten. Tatsächlich fallen jedoch nur etwa 30 % der beobachteten Laufzeiten in diese Zeitzone. Die falsche Festsetzung der Zeitzone führt zu einem Fehler der stets eine fehlerhafte Wasserstandsablesung von mindestens fünf Minuten zur Folge hat. Zur Zeit der größten Steigung der Tidekurve ändert sich der Wasserstand in 5

2. Bisher eingesetzte Beschickungsverfahren

•



Abbildung 2.3.: Histogramm der Hochwasserlaufzeiten zwischen den Pegeln Cuxhaven Steubenhöft und Gr. Vogelsand.

Minuten um fünf cm. Darüberhinaus ist zu berücksichtigen, daß die Pegelkurven am Bezugspegel und am Lotungsort in ihrer Form weitgehend übereinstimmen sollten. Die Ausprägung der Gezeitenkurve kann jedoch bedingt durch die örtliche Topographie und die Strömungsverhältnisse insbesondere in Wattgebieten variieren. Eine objektive Festlegung, welche WEK für welche Positionen die besten Ergebnisse liefert, kann wegen mangelnder Kenntnisse über diese komplexen hydrologischen Zusammenhänge nicht getroffen werden. Der Hydrograph greift daher bei der Entscheidung für eine WEK auf seine Erfahrungen zurück.

Anhang A zeigt die Genauigkeiten, die mit den WEK im Testgebiet Elbeästuar erzielt werden. Die Genauigkeiten wurden durch den Vergleich gemessener und berechneter Wasserstände aus Wasserstandsdaten eines Zeitraums von 24 Stunden bestimt. Die dabei ermittelten Genauigkeiten liegen zwischen 10 cm und 20 cm. Im Fahrwasserbereich werden in der Regel jedoch bessere Ergebnisse erzielt.

2.3. Direkte Beschickung

Die direkte Beschickung ist das einfachste indirekte Beschickungsverfahren. Dabei wird der an einem Bezugspegel ermittelte Höhe der Gezeit direkt auf die Lotungsposition übertragen. Dies ist allerdings nur in unmittelbarer Umgebung des Bezugspegels erlaubt. Abbildung 2.4 zeigt die Beschickungsgenauigkeit für die Pegel des Testgebiets, die innerhalb eines Entfernungsbereichs von 5 km liegen. Die erzielten Standardabweichungen (1σ) sind in Abhängigkeit zur Entfernung



•

Abbildung 2.4.: Beschickungsgenauigkeit (1σ) mit der direkten Beschickung.

(Abb. 2.4 unten) und zum Azimut (Abb. 2.4 oben) zwischen Bezugspegel und Beschickungsposition aufgetragen. Anhand der Steigung der Regressionsgeraden ist eine leichte Verschlechterung der Beschickungsgenauigkeit bei zunehmender Entfernung zu erkennen. Zudem treten die größten Standardabweichungen bei einem Azimut von ca. 110° Grad auf. Dies entspricht in etwa der Ausbreitungsrichtung der Tidewelle in diesem Gebiet. Dies scheint darauf hinzudeuten, daß der Ausbreitungsrichtung der Tidewelle in einem Entfernungsbereich bis 5 km eine nicht unerhebliche Bedeutung zukommt. Aufgrund der relativ geringen Anzahl von untersuchten Fällen ist es allerdings schwierig, eine gesicherte Aussage zu treffen.

2.4. Das Verfahren nach Köves

Das Wasser- und Schiffahrtsamt Cuxhaven wendet in ihrem Amtsgebiet von St. Margarethen bis zur Außenelbe zur Beschickung das Verfahren nach Köves an. Dieses Verfahren wird speziell für das Fahrwasser und fahrwassernahe Bereiche verwendet. Dabei wird die Höhe der Gezeit aus drei Pegeln auf deren Verbindungslinie mittels eines Lagrange-Polynoms interpoliert. Peilungen abseits dieser Linie werden mit der Höhe beschickt, die auf dem Fußpunkt des von der Lotungsposition auf die Verbindungslinie gefällten Lotes gefunden wird. In der Praxis werden die Pegel- und die Lotungspositionen in Fahrwasserkilometer beginnend an der Amtsgrenze WSA Hamburg / WSA Cuxhaven umgerechnet.

2.5. Das Verfahren nach Rosengarten

Im Gegensatz zur linienhaften Interpolation beim Köves-Verfahren wird beim Verfahren nach Rosengarten die Wasseroberfläche flächenhaft approximiert. Rosengarten (1987) verwendet zur großräumigen Modellierung der Wasseroberfläche den Ansatz der multiplen polynomialen Regression. Hierbei handelt es sich um die Approximation der Wasseroberfläche durch Zeit-/ Flächenpolynome, die sich den Wasserständen an den Pegelstützpunkten unter der Vorgabe der Minimierung der Summe der Abweichungsquadrate ($[vv] \rightarrow min$) anpassen. Der Wasserstand (h) ergibt sich dann in Abhängigkeit von den Parametern Ort (x, y) und Zeit (t) zu:

$$h = f(x, y, t) = \sum_{m=0}^{i_t} \sum_{l=0}^{i_y} \sum_{k=0}^{i_x} a_{klm} x^k y^l t^m$$
(2.3)

mit

 a_{klm} : Polynomkoeffizienten i_x, i_y, i_t : Polynomgrad in x, y, t

Die Schätzung der Polynomkoeffizienten geschieht nach der Methode der kleinsten Quadrate (Minimierung der Quadratsumme der Verbesserungen) mit den bekannten Algorithmen der Ausgleichungsrechnung (Pelzer 1985). Die Wasserstände an beliebigen Orten und zu beliebiger Zeit im Modellbereich lassen sich als Funktion der Polynomkoeffizienten nach (2.3) berechnen. In den trockenfallenden Wattgebieten sind bei der Wasseroberflächenmodellierung Wasserstandsanomalien aufgrund der Reibungs- und Strömungskräfte bei auf- und ablaufendem Wasser zu berücksichtigen. Sie lassen sich nur bei Kenntnis der Wattoberfläche und deren Einteilung in kleinräumige Prieleinzugsgebiete berechnen (Rosengarten 1987). Dem Verfahren muß daher eine Untergliederung in Hauptprielbereiche und Nebenprielbereiche vorgegeben werden. Die Wasseroberfläche in den Nebenprielbereichen wird auf Grundlage bestimmter morphologisch-geometrischer Strukturgrößen des Prieleinzugsgebietes bestimmt, die die Form der durch Reibungskräfte beeinflußten Wasseroberfläche ermitteln lassen. Hierzu sind das Wasserspiegelgefälle in Priellängsrichtung, in Prielquerrichtung, die Tidekurve eines im Quellbereich des Priels positionierten Pegels und die morphometrische Charakteristik zu nennen. Die morphometrische Charakteristik ist als Funktion der Flächengrößen von Niveauflächen definiert, die entsteht, wenn die Flächengrößen in Abhängigkeit von der NN-Höhe aufgetragen werden. Der Einsatz dieses Verfahrens erfordert die Erfassung dieser Strukturgrößen für jeden, im Beschickungsgebiet liegenden Nebenprielbereich. Damit ist dieses Verfahren mit einem großen organisatorischen und finanzellen Aufwand verbunden. Das Verfahren ist daher in dieser Form nicht praxisgerecht. Die in Abbildung 4.1 dargestellte Pegelanordnung erlaubt zudem lediglich die Modellierung von Hauptprielbereichen, der Wattkante und dem Fahrwasser, da die aus Reibungskräften resultierende Verformung der Wasseroberfläche hier wegen der größeren Wassertiefe nur eine untergeordnete Rolle spielt. Die Wasseroberfläche wird somit bei dem Ansatz der großräumigen Modellierung durch eine Polynomfläche repräsentiert. Die Form der Polynomfläche wird durch die Stützpunkte, an die die Fläche angepaßt wird und den Polynomgrad bestimmt. Ein hoher Polynomgrad führt zwar zu einer verbesserten Anpassung der Funktion an die Stützwerte, hat jedoch den Nachteil, daß es zwischen den Stützpunkten und an den Rändern des Modellierungsgebietes zu einem Ausschwingen der Polynomfunktion und somit zu wenig plausiblen Modellierungsergebnissen kommt. Einige Beispiele für Polynomfunktionen sind in Abbildung 2.5 dargestellt. Zur besseren Darstellbarkeit sind der Zeit- und der Flächenanteil getrennt worden. Die formelmäßige Darstellung der einzelnen



Abbildung 2.5.: Verschiedene Flächenpolynome

Bezeichnung	Unbekannte	Funktion
Schrägebene	3	$f(x,y) = a_0 + a_1 x + a_2 y$
Hyperbolische Fl.	4	$f(x,y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy$
Elliptische Fl.	6	$f(x,y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2$

Flächen lautet:

Entlang der Zeitachse wird die Wasseroberfläche durch ein Zeitpolynom approximiert, das sich möglichst gut an eine mittlere Tidekurve in dem Modellierungsgebiet anpassen muß. Auch hier sind verschiedene Polynomgrade denkbar, deren Auswahl sich an der Länge des Modellierungszeitraumes und dem Abtastintervall der Pegeldaten orientiert. Der Zeitraum der Modellierung sollte wegen der periodischen Natur der Gezeitenkurve 6 Stunden nicht überschreiten, da sich periodische Vorgänge durch Polynomansätze schlecht approximieren lassen. In Abbildung 2.6 sind die Differenzen von Polynomen verschiedenen Grades zu der Ausgangstidenkurve dargestellt. Dargestellt wird ein Zeitraum von 6 Stunden.



Abbildung 2.6.: Anpassung von Polynomen an die Gezeitenkurve

Die Anwendung dieses Approximationsansatzes auf einen Zeitpunkt während des Ebbstroms unter Verwendung einer hyperbolischen Flächenfunktion zeigt die Abbildung 2.7. Die Darstellung umfaßt das gesamte, durch ein Umringspolygon um die äußeren Pegelstützpunkte gebildete Untersuchungsgebiet. Zusätzlich geben die als Kreissymbole dargestellten Verbesserungen in den Pegelstützpunkten einen Eindruck der Anpassungsfähigkeit der Flächenfunktion an die Wasseroberfläche.

2.6. Bewertung und Diskussion der vorgestellten Beschickungsverfahren

Aus den vorangehenden Abschnitten werden die Probleme und Defizite der bisher eingesetzten Beschickungsverfahren deutlich. Die WEK basiert auf Mittelwerten für die Bestimmung der Hochwasserlaufzeit und die Differenz im MSpTH. Daher darf sie streng genommen lediglich zur Spring- und Hochwasserzeit verwendet werden. Zudem weichen die beobachteten Laufzeiten zum Teil erheblich von den mittleren Laufzeiten ab. Auch ist der Verlauf der Tidenkurve am Lotungsort mit der Tidenkurve am Bezugspegel häufig nicht kongruent. Dies ist insbesondere dort der Fall wo die Bezugspegel nahe am Ufer und in Häfen stationiert sind. Dort herrschen aufgrund von Reflektionen andere hydrologische Verhältnisse, als in den weiter außerhalb zu findenden Vermessungsgebieten. Darüberhinaus werden die Zeit- und Hubzonen der WEK aus den Gezeitengrundwerten anderer Dauerpegel inter- und extrapoliert. In Gebieten, in denen keine repräsentativen



Abbildung 2.7.: Wasseroberflächenmodell und Residuen in den Pegelstützpunkten.

Pegel stationiert sind, wird das MSpNw entsprechend schlecht modelliert. Dies ist z.B. im Testgebiet im Klotzenloch und in der Schatzkammer der Fall (siehe Abbildung 4.1). In den Wattgebieten kommen die Defizite der WEK besonders zur Geltung. Eine theoretische Genauigkeit von \pm 10 cm ist daher aus oben genannten Gründen häufig nicht gegeben. Lediglich im Fahrwasser, wo eine größere Anzahl Dauerpegel die Qualität der WEK verbessert, werden Genauigkeiten dieser Größenordnung erzielt. In den Prielen und Wattbereichen ist eher von einer Genauigkeit von \pm 20 cm auszugehen.

Im Gegensatz zur WEK werden beim Köves-Verfahren tatsächlich gemessene Wasserstände interpoliert. Somit entfallen Fehlereinflüsse, die durch die Verwendung mittlerer Werte und die Einteilung in Zeit- und Hubzonen bedingt sind. Jedoch sind, bedingt durch die linienhafte Interpolation, bestimmte Voraussetzungen an das Verfahren geknüpft. Die Pegel sollten entlang der Ausbreitungsrichtung der Tidewelle angeordnet sein, da in dieser Richtung das Gefälle der Wasseroberfläche am größten ist. Gegebenenfalls vorhandene Gefälle rechtwinkelig zu der Verbindungslinie (Quergefälle) zwischen den Pegel werden nicht berücksichtigt. Daher ist mit zunehmendem Abstand der Peilung von den Pegeln mit stark verringerten Genauigkeiten zu rechnen. Darüber hinaus läßt das Verfahren lediglich die Nutzung von drei Pegeln zu. Die Daten weiterer Pegel lassen sich also nicht in das Modell integrieren.

Die direkte Beschickung ist ebenfalls nur in einem lokal begrenzten Bereich einsetzbar. Mit zunehmendem Abstand verringert sich die Genauigkeit, sodaß für die flächenhaft Überdeckung eine recht große Pegeldichte notwendig wird. Dies :

bedeutet jedoch einen großen Beobachtungs- und Betreuungsaufwand. Die Genauigkeit verschlechtert sich mit zunehmendem Abstand der Peilungen vom Bezugspegel. Zudem ist die Ausbreitungsrichtung der Tidewelle zu beachten. Bessere Genauigkeiten werden bei der Beschickung von Peilungen, die rechtwinkelig zur Ausbreitungsrichtung liegen, erzielt.

Die Defizite oben genannter Verfahren sind durch Vereinfachungen und Einschränkungen des Modellierungsansatzes gegeben. Diese lassen sich durch die Verwendung eines entsprechenden flächenhaften Modellierungsansatzes weitgehend vermeiden. Daher wird nachfolgend ein flächenhafter Modellierungsansatz entwickelt und verifiziert.

3. Konzeption eines neuen Beschickungsverfahrens mittels des digitalen Wasseroberflächenmodells

3.1. Überblick über die numerischen Verfahren zur Oberflächenmodellierung

Die Modellierung von Oberflächen zur Formanalyse und Visualisierung ist in vielen Fachdisziplinen verbreitet. Speziell in der Kartographie und Geodäsie sind vielfältige Verfahren zur Modellierung der Erdoberfläche durch ein Digitales Geländemodell (DGM) entwickelt worden. Im allgemeinen erfolgt die Interpolation von Höhenpunkten aus einer Anzahl von bekannten Stützpunkten, die sowohl unregelmäßig als auch regelmäßig verteilt sein können. Die hier verwendeten Methoden berücksichtigen insbesondere die Unstetigkeitsstellen des Reliefs in Form von Bruchkanten und Formlinien (Geripplinien) (vgl. z.B. Höpfner 1990, Petrie und Kennie 1987). Im Fall der Modellierung der Wasseroberfläche kann hingegen von einem stetigen Verlauf mit verhältnismäßig geringen Krümmungen der Oberfläche ausgegangen werden. Es werden jedoch hohe Anforderungen an die Anpassung der Modellfläche an die tatsächliche Wasseroberfläche gestellt. Dies ist bei der Auswahl der Interpolationsmethode zu berücksichtigen.

Die einfachste Form der flächenhaften Interpolation bzw. Approximation ist die der Polynominterpolation. Die Wasseroberfläche wird durch eine Polynomfläche interpoliert oder approximiert. Man spricht von Interpolation wenn die Anzahl der zu schätzenden Unbekannten der Polynomfläche gleich der Anzahl der Stützpunkte ist. Die Polynomfläche verläuft durch die Stützpunkte. Approximation meint die Anpassung einer Polynomfläche, deren Anzahl der zu bestimmenden Koeffizienten kleiner ist als die Anzahl der Stützpunkte ist. Die Bestimmung der Koeffizienten in dem überbestimmten System erfolgt durch die Methode der kleinsten Quadrate. Die Formgebung der Modellfäche läßt sich durch den Po-

3. Konzeption des digitalen Wasseroberflächenmodells

lynomgrad steuern. Bei der Auswahl der Polynomfunkton muß ein Kompromiß zwischen einem geringen Polynomgrad und guter Anpassung an die Stützpunkte gefunden werden. Ein hoher Polynomgrad führt zwar zu einer guten Anpassung der Polynomfläche an die Stützpunkte, zwischen den Stützpunkten jedoch kommt es leicht zu einem unerwünschten Ausschwingen der Fläche. Bespiele zu den Ergebnissen, die mit dieser Methode erzielt werden, finden sich in Abschnitt 2.5.

Eine Verfeinerung dieser Methode besteht darin, nur diejenigen Stützpunkte durch eine Polynomfläche zu approximieren, die um den zu bestimmenden Gitterpunkt liegen. Das am Institut für Kartographie der Universität Hannover entwickelte Programmsystem TASH nutzt diesen Ansatz, der Methode der gleitenden Flächen genannt wird und bei der DGM Modellierung sehr gute Ergebnisse liefert. Für die Wasseroberflächenmodellierung ist dieser Ansatz jedoch nicht geeignet. Wegen der geringen Anzahl der Stützpunkte entspricht dieses Verfahren dann einer Polynomapproximation.

Eine andere Möglichkeit der Modellierung von Rasterpunkten bietet die Finite-Elemente-Methode (Wild 1983). Bei dieser Methode wird die zu beschreibende Fläche mit einem dichten Netz von Rasterpunkten überzogen. Die die Geländefläche beschreibenden Rasterpunkte werden durch eine Ausgleichung nach vermittelndenden Beobachtungen geschätzt. Neben den Stützpunkthöhen werden zusätzlich die Krümmungen entlang der Rasterlinien und der Winkelhalbierenden zwischen den Rasterlinien als fiktive Beobachtungen eingeführt. Die Krümmungen können ebenso wie die Stützpunkthöhen als Funktion der Rasterhöhen dargestellt werden und erhalten den Wert 0. Der Ausgleichungsansatz führt auf eine Aufspaltung der Matrizen in Submatrizen:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_I \\ \mathbf{v}_{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_I \\ \mathbf{A}_{II} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{x} - \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{s} \end{bmatrix}$$
(3.1)

 \mathbf{v}_I : Krümmungen in den Rasterpunkten.

v_{II} : Verbesserung an den Stützwerten.

x : Unbekannte Rasterpunkthöhen.

- 0 : Nullvektor.
- s : Stützwerte.
- A_I : Koeffizientenmatrix f
 ür die unbekannten Rasterpunkthöhen entsprechend der Verbesserungsgleichungen f
 ür die Kr
 ümmungen.
- A_{II} : Koeffizientenmatrix für die unbekannten Rasterpunkthöhen entsprechend der Verbesserungen der Stützwerte.

Die Einführung einer Gewichtsmatrix in den Ausgleichungsansatz mit einer ent-

sprechenden Unterteilung in Submatrizen erlaubt die Zuordnung von Gewichten zu jeder Stützpunkthöhe und jeder Krümmung. Damit ist eine flexible Steuerung der Interpolation möglich.

Bei der Methode der multiquadratischen Flächen (Göpfert 1977) wird die Modellfläche als Linearkombination einfacher geometrischer Flächen gebildet. Diese einfachen geometrischen Flächen geben das Flächenverhalten der Interpolationsfläche insbesondere in unmittelbarer Nähe des Stützpunktes wieder. In der Regel werden Rotationsflächen verwendet. Rotationsflächen sind quadratische Funktionen (Kernfunktion), die um die Vertikalachse im Stützpunkt rotieren. Bei diesem Verfahren werden fehlerfreie Stützpunkte vorausgesetzt. Die Interpolationsfläche führt also durch die Stützpunkte.

Als Kernfunktion für die Rotationsfläche läßt sich im einfachsten Fall eine Gerade mit der Steigung 1 verwenden. Die Gleichung lautet:

$$f(s_j) = s_j = \sqrt{((x - x_j)^2 + (y - y_j)^2)}$$
(3.2)

Daraus läßt sich die Kernfunktionsmatrix der Stützwerte ableiten zu:

$$\mathbf{C} = \left[f(s_{ij}) \right]. \tag{3.3}$$

Die Interpolationskoeffizienten $k_j, j = 1 \dots n$ des Stützpunktfeldes ergeben sich aus der Auflösung der Gleichungssystems

$$\overline{\mathbf{z}} = \mathbf{C}\mathbf{k} \tag{3.4}$$

mit

z : Vektor der zentrierten Stützwerte

C : Kernfunktionsmatrix

k : Vektor der Interpolationskoeffizienten

Die Interpolation eines Punktes (x, y) erfolgt durch Berechnung von

$$z = \overline{z} + \mathbf{d}^T \mathbf{k} \tag{3.5}$$

mit

d : Vektor der Kernfunktion zwischen den Stützwerten und dem Interpolationspunkt

Die auf diese Weise gefundenen Stützwerte ergeben eine plausible Interpolationsfläche. Die Interpolation läßt sich beeinflussen durch die Wahl der Kernfunktion. Vorteile dieser Methode sind die Einfachheit der Programmierung und die Schnelligkeit. Nachteilig ist hingegen die Vernachlässigung fehlerbehafteter Stützwerte. Aus der Theorie stationärer stochastischer Prozesse leitet sich das Verfahren der linearen Prädiktion ab. Bei diesem Verfahren werden die Stützpunkthöhen aufgespalten in einen Trendanteil, einen Signalanteil und einen Rauschanteil. Zunächst wird der langwellige Trendanteil durch die Anpassung eines Polynoms niedrigen Grades aus den Stützpunkthöhen eliminiert. Der verbleibende Signalanteil wird zusammen mit einer Kovarianzfunktion genutzt, um Signalanteile zwischen den Stützpunkten zu prädizieren. Der Rauschanteil erlaubt die Festlegung eines Filterbetrages in den Stützpunkten. Er kann nach den Stützwertgenauigkeiten individuell für jeden der Stützpunkte festgelegt werden. Die Prozessierung der Prädiktion in zwei Schritten wird Kollokation genannt. Die Schwierigkeit bei der Anwendung der linearen Prädiktion liegt in der Wahl einer zutreffenden Kovarianzfunktion. Zumeist wird als Kovarianzfunktion eine Gauß'sche Glockenkurve verwendet (vgl. Gl. 3.14), die bei homogenen und isotropen Verhältnissen eine Funktion der Distanz ist. Die Ausformung der Approximationsfläche wird beeinflußt durch das Zusammenspiel des Filterbetrages (Rauschanteil) und der Erhaltensneigung der Kovarianzfunktion. Ein geringer Filterbetrag zusammmen mit einer flachen Kovarianzfunktion führt zu einem Ausschwingen der Approximationsfläche. Der Festlegung der Kovarianzfunktion kommt daher eine wichtige Bedeutung zu. Stehen genügend Stützwerte bereit, läßt sich die Kovarianzfunktion auch empirisch aus den Stützwerten bestimmen (Moritz 1973).

Verschiedene Untersuchungen (Schut 1975, Clerici, E. und K. Kubik 1975, Hein, G. und K. Lenze 1979) zeigen, daß die letztgenannten drei Verfahren ähnliche Interpolationsergebnisse liefern. Entscheidender Faktor für eine plausible Modellierung der Oberfläche ist die Verfügbarkeit einer ausreichenden Anzahl repräsentativer Stützpunkte und weniger der Modellierungsansatz. Daher wird die Entscheidung zur Auswahl eines Modellierungsansatzes für die Wasseroberflächenmodellierung in großem Maße von Faktoren wie Einfachheit der Programmierung, flexible Auswahl der zu interpolierenden Funktion und Berücksichtigung von Genauigkeiten bestimmt. Bei Berücksichtigung dieser Faktoren zeigt sich, daß das Verfahren der linearen Prädiktion die gewünschten Eigenschaften aufweist.

Das Verfahren ist leicht zu programmieren und ist nicht auf die Interpolation von Rasterpunkten in einem regelmäßigen Gitter beschränkt sondern erlaubt die Prädiktion von Höhen an beliebigen Positionen im Modellierungsgebiet. Zudem ist es möglich, unterschiedliche Genauigkeiten in den Stützwerten durch variable Filterbeträge zu berücksichtigen. Die Wahl der Kovarianzfunktion kann einerseits vorgegeben und andererseits empirisch aus den Stützwerten ermittelt werden. Damit kann das Verfahren auf die durch den Tideverlauf variierenden Bedingungen optimal angepaßt werden.

3.2. Die mathematische Modellierung der Wasseroberfläche durch lineare Prädiktion

Das Verfahren der linearen Prädiktion hat seinen Ursprung in der Theorie stochastischer Prozesse. Dies bedeutet, daß die Beobachtungen, also die gemessenen Wasserstände, als Zufallsgrößen aufgefaßt werden. Da sie dies im allgemeinen nicht sind, ist es erforderlich, einen Trend abzuspalten (vgl. Abbildung 3.2). Nach der Abspaltung des Trends liegen die verbleibenden Signalanteile in der Nähe von Null. Je nach Wahl der Trendfunktion sind die Signalanteile miteinander korreliert. Im Fall der Wasseroberfläche wird davon ausgegangen, daß nahe beieinander liegende Pegel untereinander korreliert sind. Dies ist unabhängig von der Richtung der Pegel zueinander. In diesem Fall spricht man von homogenen und isotropen Verhältnissen.

Die entfernungsabhängige Korrelation der Wasserstände wird mit Hilfe einer Kovarianzfunktion beschrieben. Die Kovarianz beschreibt das Gewicht eines gemessenen Wasserstandes bei der Prädiktion auf den zu berechnenden Wasserstand. Die Wahl der Kovarianzfunktion hat, zusammen mit der Wahl der Trendfunktion, entscheidenden Einfluß auf das Interpolationsergebnis. In der Regel ist die korrekte Kovarianzfunktion für ein Modellierungsgebiet nicht bekannt. Im Fall der Wasseroberflächenmodellierung kommt hinzu, daß die Kovarianzfunktion mit der Tidephase variiert. Daher wird die Kovarianzfunktion aus den gemessenen Wasserständen für jeden Modellierungszeitpunkt geschätzt. Dieses Vorgehen führt zu optimalen Interpolationsergebnissen.



Abbildung 3.1.: Filterung und Prädiktion

Die Bestimmung von Interpolationswerten erfolgt durch die Lösung eines Gleichungssystems nach der Methode der kleinsten Quadrate. Das mathematische Modell und dessen Lösung wird nachfolgend erläutert.

3.2.1. Das funktionale Modell

Bei dem Verfahren der Kollokation werden die Stützwerte in drei Anteile aufgespalten. Es werden der deterministischen Anteil, der Signalanteil und das Rauschen unterschieden.

Die Beobachtungsgleichungen ergeben sich zu:

$$h_i = a_0 + a_1 x_1 + \ldots + a_u x_u + s_i + n_i \tag{3.6}$$

In Matrizenschreibweise lauten sie:

$$\frac{\mathbf{h}}{n,1} = \frac{\mathbf{A} \ \mathbf{x}}{n,u \ u,1} + \frac{\mathbf{s}}{n,1} + \frac{\mathbf{n}}{n,1}$$
(3.7)

Bekannt sind die beobachteten Wasserstände h und die Koeffizientenmatrix A. Gesucht ist der Unbekanntenvektor x, das Signal s und der Rauschanteil n. Der erste Term der Gleichung 3.7 ist der Trendanteil der beobachteten Wasserstände. Dieser muß von den Beobachtungen abgespalten werden, um die Voraussetzung, daß der Signalanteil und der Rauschanteil Zufallsgrößen sind, zu erfüllen. Hier findet eine Polynomfläche niedrigen Grades, z.B. eine Schrägebene der Form:

$$z = f(x) = a_0 + a_1 x + a_2 y \tag{3.8}$$

Verwendung. Die Trendfunktion sollte so gewählt werden, daß die Residuen in Teilbereichen um 0 liegen. Die Koeffizientenmatrix A enthält somit die linearisierte Trendfunktion. Im Fall einer Schrägebene (Glg. (3.8)) als Trendfunktion ergibt sich die Koeffizientenmatrix zu:

$$\mathbf{A} = \frac{\delta f(\mathbf{x})}{\delta \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n \end{bmatrix}$$
(3.9)

Die Abspaltung eines Trends führt auf die als Zufallsgrößen definierten Signalund Rauschanteile s und n. Sowohl das Rauschen als auch das Signal folgen der Normalverteilung:

$$\mathbf{n} \sim N_n(\mathbf{0}, \mathbf{C}_{nn})$$
 $\mathbf{s} \sim N_s(\mathbf{0}, \mathbf{C}_{ss})$

mit den Kovarianzmatrizen C_{ss} und C_{nn} . Die Trennung dieser beiden Anteile erfolgt über die Kovarianzmatrizen. Die Kovarianzmatrix C_{nn} enthält die Varianzen des Rauschanteils. Das Rauschen ist als der Fehleranteil, der durch zufällige Ablese- und Gerätefehler entsteht, definiert. Das Rauschen verschiedener Beobachtungen ist daher nicht korreliert. Das Signal verschiedener Beobachtungen ist hingegen als korreliert zu betrachten. Daher ist die Signalkovarianzmatrix C_{ss} eine vollbesetzte symmetrische Matrix.

Die Lösung des Gleichungssystems erfolgt über den Ansatz der Bedingungsgleichungen mit Unbekannten (Allgemeinfall der Ausgleichungsrechnung). Dazu wird Glg. (3.7) umgeschrieben in:

$$\mathbf{B}^T \mathbf{v} + \mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{h} \tag{3.10}$$

mit

•

$$\mathbf{B}^{T} = [\mathbf{E}\mathbf{E}]; \qquad \mathbf{v} = \begin{bmatrix} \mathbf{s} \\ \mathbf{n} \end{bmatrix}; \qquad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{ss} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_{nn} \end{bmatrix}$$
(3.11)

3.2.2. Stochastisches Modell

Zur Lösung des System sind die Matrizen C_{nn} , C_{ss} zu schätzen. Da das Rauschen als zufälliger Beobachtungsfehler definiert ist und somit keine Korrelationen vorliegen, ist C_{nn} eine Diagonalmatrix. Im Falle der Pegeldatenerfassung kann der zufällige Fehler auf $s_n \simeq \pm 3.0$ [cm] abgeschätzt werden. Dieser Wert ergibt sich aus den Genauigkeiten aus der Einmessung ($\pm 1,7$ [cm]), der Übertragung der Höhe auf die Registriereinheit (± 2.0 [cm]), der Erfassungsfehler der Registriereinheit (± 1.0 [cm] und der Digitalisierung (± 1.0 [cm]). Die Kovarianzmatrix des Rauschens lautet somit:

$$C_{nn} = \begin{bmatrix} s_n^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & s_n^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & s_n^2 \end{bmatrix}$$
(3.12)
$$s_n = \pm 3.0 \, [\text{cm}]$$
(3.13)

Die Kovarianzmatrix des Signals beschreibt die Beziehungen der gemessenen Stützstellen untereinander. Diese werden im allgemeinen durch eine Kovarianzfunktion gefunden, die entweder aus theoretischen Überlegungen oder empirisch aus den Stützwerten gewonnen werden kann. Ein geeignetes Beispiel für eine Kovarianzfunktion für das Testgebiet wäre:

$$C_{ik} = C(0)e^{-\left(\frac{\Delta d}{k}\right)^2} \tag{3.14}$$

3. Konzeption des digitalen Wasseroberflächenmodells

- C(0) : Varianz des Signalanteils der Stützwerte
- Δd : Entfernung zwischen den Stützpunkten i und k
- k : Steigung der Exponentialfunktion im Mittelteil
- Cik : Kovarianz zwischen den Stützpunkten i und k



Abbildung 3.2.: Kovarianzfunktion

Eine Möglichkeit zur empirischen Bestimmung der Kovarianzfunktion ist von Assmus und Kraus (1974) vorgeschlagen worden. Hierbei wird die Kovarianzfunktion aus den gemessenen Stützpunkten selber ermittelt. Dazu werden alle n(n-1) möglichen Stützpunktkombinationen gebildet und die Entfernungen zwischen diesen berechnet. Die entfernungsabhängige Sortierung der Stützpunkt-



Abbildung 3.3.: Bestimmung einer entfernungsabhängigen empirischen Kovarianzfunktion (Assmus und Kraus 1974).

kombinationen in Klassen gemäß $d - \Delta d \leq d_{ik} < d + \Delta d$ (vgl. Abbildung 3.3) und die anschliessende Berechnung der Kovarianz für jede Klasse nach:

$$C_{ik} = \frac{1}{n_{ik}} \sum_{1}^{n_{i,k}} v_i v_k \tag{3.15}$$

ergibt eine Näherung für eine entfernungsabhängige glockenförmige Kovarianzfunktion nach Gleichung 3.14. Der Faktor k steuert die Steigung der Kurve und somit die Korrelation zwischen den Stützwerten in Abhängigkeit von der Entfernung.

Dieser Ansatz, der wegen der Verwendung einer einzigen entfernungsabhängigen Kovarianzfunktion homogene und isotrope Verhältnisse voraussetzt, wird für jeden Modellierungszeitpunkt durchgeführt.

3.2.3. Lösung

Die Lösung der Ausgleichungsaufgabe gelingt mit Hilfe der Beziehungen

$$\mathbf{N} = \mathbf{C}_{ss} + \mathbf{C}_{nn} = \mathbf{C}_{zz} \tag{3.16}$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{Q}_{xx} \mathbf{A}^T \mathbf{C}_{zz}^{-1} \mathbf{w}; \qquad \mathbf{Q}_{xx} = (\mathbf{A}^T \mathbf{C}_{zz}^{-1} \mathbf{A})^{-1}$$
(3.17)

$$\mathbf{z} = \mathbf{w} - \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{s} + \mathbf{n} \tag{3.18}$$

$$\mathbf{k} = \mathbf{C}_{\mathbf{r}}^{-1}\mathbf{z} \tag{3.19}$$

$$\mathbf{Q}_{kk} = \mathbf{C}_{zz}^{-1} - \mathbf{C}_{zz}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{Q}_{xx} \mathbf{A}^T \mathbf{C}_{zz}^{-1}$$
(3.20)

man erhält schließlich

$$\mathbf{s} = \mathbf{C}_{ss}\mathbf{k} \tag{3.21}$$

$$\mathbf{n} = \mathbf{C}_{nn}\mathbf{k} \tag{3.22}$$

Die gefilterten Stützwerte und die Kofaktormatrix ergeben sich somit zu

$$\mathbf{f} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{s}; \qquad \mathbf{Q}_{ff} = \mathbf{A}\mathbf{Q}_{xx}\mathbf{A}^T + \mathbf{C}_{ss}\mathbf{Q}_{kk}\mathbf{C}_{ss} \tag{3.23}$$

Die Prädiktion von Wasserständen an beliebigen Positionen innerhalb des Modellierungsgebietes erfolgt nach:

$$\mathbf{s}' = \mathbf{C}_{\mathbf{s}'\mathbf{s}}\mathbf{k} \tag{3.24}$$

$$\mathbf{g} = \mathbf{A}'\mathbf{x} + \mathbf{s}'; \qquad \mathbf{Q}_{gg} = \mathbf{A}'\mathbf{Q}_{xx}\mathbf{A}'^T + \mathbf{C}_{s's}\mathbf{Q}_{kk}\mathbf{C}_{s's} \qquad (3.25)$$

29

3. Konzeption des digitalen Wasseroberflächenmodells

- g : Vektor der prädizierten Wasserstände (Dim. p, 1)
- A' : Koeffizientenmatrix der zu prädizierenden Wasserstände (p, u)
- s' : Signal der zu prädizierenden Werte (p, 1)
- $C_{s's}$: Kovarianzmatrix zwischen den beobachteten und den zu prädizierenden Wasserständen (p, n)

Auch hier werden die Kovarianzen mittels Glg. (3.14) bestimmt.

3.3. Optimierung des Modellierungsansatzes

Wie in Abschnitt 3.2 erläutert, sind die wesentlichen Parameter bei der linearen Prädiktion die Kovarianzfunktion und die Trendfläche. Neben diesen beiden Parametern ist außerdem die Nutzung repräsentativer Modellierungspegel von großer Bedeutung für das Beschickungsergebnis. Die Bestimmung und Auswahl der für eine Beschickungsposition repräsentativen Pegel kommt daher für ein optimales Ergebnis eine große Bedeutung zu. Die Auswahl repräsentativer Pegel führt nicht nur zu einer verbesserten Genauigkeit der Beschickung, sondern erlaubt auch die Bewertung der existierenden Pegelkonfiguration und führt somit zu einem wirtschaftlicheren Betrieb der Pegel.

Die Ausprägung der Wasseroberfläche und der Gezeitenkurven verschiedener Pegel unterliegen vielfältigen Einflüssen, die in einem komplexen Zusammenhang stehen. Je nach äußeren Bedingungen ändern sich die Formen der Gezeitenkurven. Daher kann eine bestimmte Pegelkonfiguration nur mittlere Verhältnisse in einem Gebiet wiederspiegeln; extreme hydrologische Verhältnisse werden unter Umständen nicht berücksichtigt. Ein Pegel, der für bestimmte Bedingungen und eine bestimmte Pegelkonfiguration repräsentative Wasserstände liefert, kann während einer anderen Wetterlage oder einer anderen Tidephase für diese Beschickungsposition ungeeignete Wasserstände aufzeichnen.

Die Ermittlung einer repräsentativen Pegelkonfiguration für die Beschickung mit DIWOM muß durch den Vergleich beobachteter Wasserstände mit berechneten Wasserständen erfolgen. Ein denkbares Vorgehen ist es, alle möglichen Pegelkonfigurationen in einem gegebenen Pegelnetz zu testen und die Beschickungsergebnisse mit gemessenen Wasserständen zu vergleichen. Einen solches Vorgehen wird nachfolgend erläutert.

Eine optimale Pegelkonfiguration muß zwei Bedingungen erfüllen. Sie muß für das Revier flächendeckend eine bestimmte Beschickungsgenauigkeit gewährleisten. Dies sollte mit einem minimalen Betreuungs- und Beobachtungsaufwand zu realisieren sein. Das Kriterium für die Optimierung ist also die Beschickungsgenauigkeit in Form der durch den Vergleich gemessener und berechneter Wasserstände ermittelten Standardabweichung das Optimierungskriterium dar.

Damit die resultierende Pegelkonfiguration allgemein verwendbar ist und mittlere Verhältnisse wiederspiegelt, sind zunächst Testzeiträume, die möglichst unterschiedliche Bedingungen wiedergeben, auszuwählen (vgl. Abschnitt 4.4.1). Für jeden Testzeitraum und jeden Pegel im Testnetz wird die optimale Pegelkonfiguration bestimmt. Ablauf der Ablauf der Bestimmung der optimalen Bestimmung der optimalen Der schematische Ablauf des Optimierungsprozesses ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Bei dem Optimierungsprozeß handelt es sich um ein





iteratives Vorgehen, bei dem, ausgehend von einer gegebenen Pegelkonfiguration, sukzessive diejenigen Pegel, die zu einer Verschlechterung der Beschickungsgenauigkeit an einer bestimmten Position führen, eliminiert werden.

Eine repräsentative Pegelkonfiguration läßt sich ermitteln aus der Kombination der acht Testzeiträume. Die Kombination erfolgt durch Summenbildung der optimierten Pegelkonfigurationen der einzelnen Testzeiträume. Die Ergebnisse der Summenbildung sind in den Balkendiagrammen im Anhang C aufgeführt. Die

3. Konzeption des digitalen Wasseroberflächenmodells

Hochachse gibt die Anzahl des Auftretens eines Pegels in den optimierten Pegelkonfigurationen des Testgebietes. Pegel, die häufig in den optimierten Pegelkonfigurationen auftreten, erhalten eine hohe Priorität. Für die Beschickung mit DIWOM unter Nutzung einer optimierten Pegelkonfiguration werden die Pegel hoher Priorität zur Beschickung herangezogen. Für jede Pegelposition im Testgebiet steht nach Abschluß des Optimierungsprozesses eine optimierte Pegelkonfiguration zur Verfügung.

Die Analyse der ermittelten Pegelkonfigurationen nach der Häufigkeit des Auftretens der Pegel gibt einen wichtigen Hinweis auf die generelle Positionierung der Pegel in einem bestimmten Revier für die Beschickung mit DIWOM. Die Häufigkeit der Pegel ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Zu erkennen ist, daß die Pe-



Abbildung 3.5.: Häufigkeit der Pegel in den optimalen Pegelkonfigurationen.

gel, die den äußeren Umring des Modellierungsgebietes bilden, besonders häufig auftreten. Dies bestätigt, daß eine Extrapolation von Beschickungswerten nach Möglichkeit vermieden werden muß. Genauigkeitsaussagen zu einer aus Abbildung 3.5 ermittelten Pegelkonfiguration werden in Abschnitt 4.4.3 getroffen.

Streng genommen läßt sich eine optimierte Pegelkonfiguration nur auf den Standpunkt, für den sie bestimmt wurde, anwenden. Bei der Nutzung wird davon ausgegangen, daß die Pegelkonfiguration auch in der Umgebung des Pegels zu verbesserten Beschickungsergebnissen führt. Daher wird eine Auswahl der Pegelkonfiguration der Pegel über den Abstand der Beschickungsposition zu der Pegelposition getroffen. Diese Annahme wird nur dann zulässig sein, wenn die Beschickungs- und die Pegelposition nicht durch Sande o.ä. voneinander getrennt sind. Die Beschickung mit optimierten Pegelkonfiguration wird im Abschnitt 4.4.3 näher untersucht. Dort finden sich Aussagen zu den erzielten Genauigkeiten.

3.4. Programmtechnische Realisierung des Modellierungsansatzes

Das in diesem Kapitel vorgestellte Konzept eines Beschickungsverfahrens ist in einem Programmsystem realisiert worden. Alle Programme sind im ANSI-C Standard programmiert und lassen sich problemlos auf verschiedene Plattformen portieren. Es existieren lauffähige Versionen für verschiedene UNIX-Varianten und



Datenfluß Programmsystem DIWOM

Abbildung 3.6.: Datenfluß des Programmsystems DIWOM.

3. Konzeption des digitalen Wasseroberflächenmodells

MS-DOS. Die Anbindung an die Pegeldatenbank ist über die Embedded-SQL-Schnittstelle des relationalen Datenbanksystem ORACLE unter UNIX realisiert worden. Der Datenfluß und die einzelnen Programmmodule sind in dem Blockbild dargestellt. Die linke Seite des Blockbildes zeigt den Datenfluß zwischen den Modulen der Pegeldatenanalyse und der Beschickung unter Verwendung der Peildaten. Die rechte Seite zeigt den Datenfluß zur Gewinnung und Bereitstellung der Wasserstandsdaten. Die Wasserstandsdaten werden in dem Datenbanksystem in zwei Tabellen abgelegt. Eine Tabelle nimmt die Pegelstammdaten auf, während die andere Tabelle die Wasserstandsdaten im Minutenintervall beinhaltet. Die Verknüpfung dieser Tabellen erfolgt über eine eindeutige Pegelnummer.

Der Vorteil der Pegeldatenbank liegt in der einfachen Verwaltung und dem einfachen Zugriff auf die Wasserstandsdaten. Das Datenbanksystem überprüft die Daten auf Konsistenz und Integrität. Der Zugriff auf die Datenbank über Embedded-SQL ist einfach und schnell zu realisieren. Nachteilig an der Datenbanklösung ist der gegenüber einer Dateiverwaltung langsamere Zugriff auf die Daten und der größere Aufwand bei der Administration der komplexen Datenbanksoftware. Der Aufbau der Datenbanktabellen ist in Anhang D aufgeführt. Zusätzlich zu der Datenbankschnittstelle wurde daher auch der Zugriff auf die Wasserstandsdaten über die Monatsdateien realisiert.

4. Untersuchung der Beschickungsverfahren

4.1. Datenerfassung

4.1.1. Einrichtung und Einmessung des Pegeltestnetz im Elbeästuar

Voraussetzung für die Entwicklung des Beschickungsverfahrens sind Wasserstandsdaten in ausreichender räumlicher und zeitlicher Auflösung in einem einheitlichen Höhen- und Lagebezugssystem. Daher ist in der Elbmündung in Zusammenarbeit mit den örtlichen Wasser- und Schiffahrtsbehörden ein Pegeltestnetz eingerichtet und über einen Zeitraum von einem halben Jahr beobachtet worden. Das Testnetz umfaßt 21 Dauer- und Reisepegeln, die von Mai 1994 bis Oktober 1994 beobachtet wurden (siehe Abb. 4.1).

Die Position und die Höhe der Pegel bezogen auf NN ist in zwei GPS-Meßkampagnen ermittelt worden.

Die Digitalisierung der Wasserstandsdaten ist im Rahmen des Projekts mit einem On-Screen Verfahren mit einer zeitlichen Auflösung von einer Minute erfolgt. Somit stehen für einen Zeitraum von einem halben Jahr Wasserstandsdaten in einem ca. 400 km² großen Testgebiet in der Elbmündung mit einer zeitlichen Auflösung von einer Minute für 21 Pegel zur Verfügung. Die Wasserstände liegen in einem einheitlichen Höhenbezugssystem (NN) vor.

Die Genauigkeit der Höhenkomponente des GPS-Punktes aus der Einmessung beträgt 1,7 cm (Goldan 1995). Unter Berücksichtigung der Fehlereinflüsse bei der Übertragung dieser Höhe auf den Pegelschreiber, die Erfassungsungenauigkeit der Registriereinheit und die Digitalisierung kann die Standardabweichung für einen Wasserstand mit ± 3 cm abgeschätzt werden.





Abbildung 4.1.: Das Pegelnetz im Testgebiet Elbeästuar mit angrenzenden Wattgebieten

4.2. Erfassung zusätzlicher Wasserstandsdaten durch DGPS

Zusätzlich zu den Pegeln wurden Wasserstandsdaten durch den Einsatz von Differential GPS (DGPS) auf Schiffen gewonnen. Vier Schiffe der Wasser- und Schiffahrtsverwaltung wurden an solchen Positionen verankert, die mit Schreibpegeln nicht zu besetzen waren. Die Höhenlage der Schiffe wurde mit Hilfe von DGPS ermittelt (Goldan 1995). Die Beobachtungszeit betrug insgesamt ca. 25 Stunden vom 25. bis 26. Mai 1994. Die Position der Schiffe kann Abbildung 4.1 entnommen werden.

Die mit DGPS aufgezeichneten Wasserstandsdaten sind in den Abbildungen 4.9
dargestellt. Es handelt sich dabei um geglättete Daten. Die Qualität der Wasserstandsdaten der einzelnen Schiffe ist recht unterschiedlich. Während die Daten der Komet, dem größten Schiff, von recht guter Qualität sind, weisen die Daten der Oland recht großes Meßrauschen auf. Dies ist vermutlich auf die Frequenz der Schiffsbewegungen zurückzuführen. Stimmt z.B. die Periode der Rollbewegung des Schiffes mit der Datenrate des GPS (5 sec) überein, kommt es zu Aliasing-Effekten, die die Datenqualität negativ beeinflussen. Leider läßt sich dies wegen fehlender Schiffslagedaten nicht überprüfen.

4.3. Digitalisierung der analogen Pegelbögen

Die Erfassung der Wasserstandsdaten aus den Pegelbogenoriginalen erfolgt mit dem am IfK entwickelten graphisch-interaktiven Programmsystem IMAGE (vgl. Abb. 4.2). Dazu stehen im IfK ein PC-gesteuerter Trommelscanner der Firma CST, UNIX-Rechner der Firma Silicon Graphics sowie X-Terminals der Firma Tektronix zur Verfügung. Die zweifarbigen Pegelbögen werden mit einer in der Regel individuell optimierten Farbtabelle von 32 Farben sowie einer Auflösung von 150 μm gescannt. Die erzeugten Rasterdaten werden in ein von IMAGE lesbares Format konvertiert.

Das Programmsystem IMAGE führt anschließend eine Farbtrennung der schwarzen bis grauen Pegelkurven im Vordergrund von dem rötlich braunen Zeit-Wasserstand-Gitter im Hintergrund auf der Basis des IHS-Farbraums (Intensity=Helligkeit, Hue=Farbton, Saturation=Sättigung) durch. Eine Binärisierung der extrahierten Pegelkurven unter Verwendung eines globalen Schwellwertoperators liefert dann deren Schwarz-Weiß-Darstellung. Auf die binärisierte Darstellung der Rasterdaten setzt das Kernstück der Datenerfassung, die Erzeugung von Tageslinien in Vektordatenform durch halbautomatische Linienverfolgung, auf. Sie ermöglicht die automationsgestützte Verfolgung der einzelnen Tageslinienskelette und den interaktiven Eingriff des Anwenders an solchen Stellen, an denen er zur Vermeidung oder Berichtigung von Fehlinterpretationen des Linienverlaufs durch das System Entscheidungen zu treffen hat. IMAGE erlaubt das gleichzeitige Laden eines Raster- und eines Vektorbildes. Mit Hilfe von Editierfunktionen können u. a. Fehler in den Vektordaten interaktiv behoben und Datenlücken durch sogenanntes on-screen-digitizing (Digitalisierung von Daten am Bildschirm auf einem Rasterbild im Hintergrund) aufgefüllt werden. Zur Glättung des teilweise sehr unruhigen Pegelkurvenverlaufs steht ein Tiefpaßfilter (Chatfield 1982), das auf dem Algorithmus des gleitenden Mittels beruht, zur Verfügung. Außerdem ist ein Douglas-Peucker-Filter (Douglas u. Peucker 1973) zur Reduzierung der Anzahl von Punkten in den Vektordaten implementiert. Für die weitere Bearbeitung der Vektordaten ist der Bezug zwischen dem Bildkoordinatensystem der Pegelkurven und dem Zeit-Wasserstand-Koordinatensystem erforderlich. Diesen Bezug



4. Untersuchung der Beschickungsverfahren

Abbildung 4.2.: Datenerfassung mit den Programmsystemen IMAGE und PE-GELKOR.

stellen vier Paßpunkte her, die der Anwender bei geladenem Rasterhintergrund auf eindeutig erkennbaren Schnittpunkten des Zeit-Wasserstand-Gitters in den vier Ecken eines Pegelbogens definiert und denen er die zugehörigen Zeiten auf 1 Minute und Wasserstände auf 1 cm zuweist. Ein einfacher, iterativ arbeitender Transformationsansatz überträgt die Bildkoordinaten der Vektordaten mit Hilfe der Paßpunkte in das Zeit-Wasserstand-Koordinatensystem. Mit der Speicherung der Vektordaten tageweise als Zeitangabe mit zugehörigem Wasserstand

	Dateiinhalt		Bemerkungen	
Uhrzeit [h]	Wasserstand [m]	Zusätze		
DAY 02.05.1994			Schlüsselwort: neuer Tagesbeginn	
12,47035983	3,02994578	< 0	Zusatz: Nr. der Tageslinie	
12,59571742	3,04202674			
4		4		
23,91418823	3,01819185			
23,96842841	2,99623475	>	Zusatz: Tageslinienende	
DAY 03.05.1994	() () () () () () () () () ()	1.1	Schlüsselwort: neuer Tagesbeginn	
0,01857560	2,97517780	< 1	Zusatz: Nr. der Tageslinie	
		1.1		
13,01473892	3,12937618	1.		
GAP		P	Schlüsselwort: Datenlücke	
20,37218863	5,97472204			
		A 12		

in tabellarischer Form in eine ASCII-Datei (Abb. 4.3) wird die Bearbeitung mit IMAGE beendet.

Abbildung 4.3.: Beispiel einer ASCII-Ausgabedatei des Programmsystems IMAGE.

Probleme bei der Datenerfassung mit IMAGE entstehen in erster Linie aufgrund der unterschiedlichen Qualität der einzelnen Pegelbögen. Mit fast leeren Stiften gezogene, schwer erkennbare Pegelkurven bereiten Schwierigkeiten beim Scannen und der anschließenden Farbtrennung, da Farbtöne des Vorder- und Hintergrundes ineinander übergehen. Die Bearbeitungszeit bei der Linienverfolgung und der interaktiven Nachbearbeitung erhöht sich u. a. mit der Anzahl der Datenausfälle (Linienunterbrechungen), der Anzahl der Tageslinien auf einem Pegelbogen (Tageszuordnung) sowie kleiner werdendem Format bzw. Zeitmaßstab (Verdichtung der Pegelkurven). Ein optimaler Pegelbogen sollte daher einen Zeitmaßstab von mehr als 2,3 cm pro Stunde, eine mittlere Strichstärke, möglichst tiefschwarze Strichfarbe und nicht mehr als 14 Tageslinien aufweisen. Die im Vektorformat vorliegenden Pegelkurven beinhalten noch die dem Kurvenverlauf eigenen Fehler, die auf den Bögen nur als Hinweise erscheinen. Ursachen wie z. B. ein Gang oder Sprung im Uhrwerk oder das Ansetzen des Trommelschreibers beim Pegelbogenwechsel auf eine falsche Uhrzeit und/oder einen falschen Wasserstand führen zu Zeit- und Wasserstandshöhenfehlern. Daneben entstehen umgeklappte Scheitel, wenn der Trommelschreiber seine obere oder untere Bereichsbegrenzung erreicht. Die Berichtigung dieser Fehler geschieht mit Hilfe des alphanumerisch arbeitenden, interaktiven Programms PEGELKOR. Zusätzlich interpoliert PEGEL-KOR die Wasserstände in 1-Minuten-Intervallen und erzeugt Pegelbogendateien mit Pegelinformationen sowie Wasserstände in einem vom Anwender zu wählenden Intervall von minimal 1 Minute. Daneben bietet es auch eine Funktion zur Erstellung von Monatsdateien, die Wasserstände jeweils eines Pegels und Kalendermonats enthalten. Darüberhinaus werden die Wasserstandsdaten in einer relationalen Datenbank (ORACLE) gespeichert und verwaltet. Der Zugriff auf die Wasserstandsdaten durch die Beschickungssoftware kann wahlweise auf die Datenbank oder auf die Monatsdateien erfolgen.

4.4. Untersuchung des digitalen Wasseroberflächenmodells (DIWOM)

4.4.1. Untersuchungskonzept

Zur Beurteilung des neu entwickelten Beschickungsverfahren sind eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt worden. Das Beschickungsergebnis mit DIWOM läßt sich mittels einer Reihe von Parametern beeinflussen. Ziel der Untersuchung ist es daher, diejenigen Parameter zu identifizieren, die zu einem optimalen Beschickungsergebnis im Testgebiet führen. Zunächst sind daher Beschickungswerte unter Verwendung aller Pegel mit verschiedenen Parametern durchgeführt worden. Um den Einfluß der Mondphase und unterschiedlicher meteorologischer Bedingungen zu erfassen, erstrecken sich die Untersuchungen über acht Testzeiträume.

Die Beschickungsergebnisse werden im wesentlichen durch die Wahl der Kovarianzfunktion und der Trendfläche beeinflußt (vgl. Abschnitt 3.2). Die Kovarianzfunktion kann einerseits konstant vorgegeben und andererseits empirisch für jeden Beschickungszeitpunkt aus den Pegeldaten ermittelt werden. Die Wirkung der Kovarianzfunktion wird bestimmt durch die zugrunde liegende Trendfunktion. Eine Trendfunktion niedrigen Grades führt zu größeren Signalanteilen. Daher wird der Einfluß der Kovarianzfunktion größer bei Trendfunktionen niedrigeren Grades. Zunächst gilt es, zu ermitteln, welchen Einfluß die Wahl der Trendfunktion auf das Beschickungsergebnis hat. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 4.4.2 vorgestellt. Abschnitt 4.4.2 zeigt den Vergleich von Ergebnissen bei Verwendung einer konstanten gegenüber einer empirischen Kovarianzfunktion. Aus den Ergebnissen dieser beiden Abschnitte läßt sich ermitteln, welche Parameter zu den besten Beschickungsergebnissen führen.

40

Auswahl der Testzeiträume

Die vorgestellten Untersuchungen im Testgebiet wurden innerhalb von acht repräsentativen Testzeiträumen durchgeführt. Die Auswahl der Testzeiträume erfolgte in Abstimmung mit der projektbegeitenden Gruppe nach praktischen Gesichtspunkten. Die Testzeiträume wurden so gewählt, daß der Einsatz eines Meßfahrzeugs aufgrund der Wetter- und Seegangsbedingungen möglich war. Daher liegt die maximale Windstärke innerhalb des Meßzeitraumes bei etwa 5 Bft. und die signifikante Wellenhöhe bei ca. 4 nach Seegangsskala. Es wurden Daten des Seewetteramtes Hamburg der Meßstellen LT Gr. Vogelsand und Cuxhaven verwendet. Die ausgewählten Testzeiträume sind in Tabelle 4.1 nachgewiesen. Windund Seegangsdiagramme finden sich in Anhang B.

Zeitraum		Vorherrschende Windrichtung	Wind- geschwindigkeit	Signifikante Wellenhöhe	
von	bis		Bft.	Seegangsskala	
13.5.1994	14.5.1994	0	4-5	2-3	
12:00 Uhr	12:00 Uhr				
19.5.1994	20.5.1994	ONO	4	2	
00:00 Uhr	00:00 Uhr				
27.5.1994	28.5.1994	N	3	3	
00:00 Uhr	00:00 Uhr				
25.5.1994	26.5.1994	NNW	3	1	
09:00 Uhr	10:00 Uhr				
07.9.1994	08.9.1994	SSW	2	2	
00:00 Uhr	00:00 Uhr				
21.9.1994	22.9.1994	NO	4	-	
12:00 Uhr	12 Uhr			1	
13.10.1994	14.10.1994	NW	3-4	2-3	
00:00 Uhr	00:00 Uhr	10.000			
26.10.1994	27.10.1994	WSW	4	4	
00:00 Uhr	00:00 Uhr				

Tabelle 4.1.: Testzeiträume für die Untersuchung der Wasseroberflächenmodellierung.

Beurteilung der Modellierungsergebnisse

Die Beurteilung der Modellierungsergebnisse erfolgt anhand der äußeren Genauigkeit durch den Vergleich gemessener Wasserstände mit berechneten Wasserständen am Pegel. Die gemessenen Wasserstandsdaten an dem jeweiligen Pegel sind bei der Modellierung nicht berücksichtigt worden. Die Standardabweichung des Einzelwertes für einen Pegel eines bestimmten Zeitraums läßt sich aus den Differenzen d mit

$$s_d = \pm \sqrt{\frac{[dd]}{2n}} \tag{4.1}$$

bestimmen. Die Differenzen werden über den Testzeitraum für jede Minute gebildet. Die resultierende Standardabweichung gibt ein gutes Maß für die Übereinstimmung der Gezeitenkurven. Zusätzlich ist eine Differenzierung nach den Tidephasen Hochwasser, Ebbast, Niedrigwasser, Flutast möglich. Diese Differenzierung gibt zusätzliche Hinweise auf Problembereiche bei der Modellierung. Hochund Niedrigwasserzeiträume werden durch den Bereich zwei Stunden vor bis zwei Stunden nach Eintritt des Ereignisses festgelegt. Ebb- und Flutast bezeichnen die dazwischen liegenden Zeiträume.

4.4.2. Modellierung mit allen Pegeln des Testnetzes

Ziel dieses Abschnitts ist es, diejenigen Parameter der linearen Prädiktion zu ermitteln, die bei einer großen Anzahl von Pegel zu optimalen Ergebnissen führen. Zunächst gilt es, diejenige Trendfunktion zu identifizieren, die unter Verwendung der gesamten Pegel ein Höchstmaß an Genauigkeit gewährleistet. Daher sind für alle Zeiträume und alle verfügbaren Pegel im Testgebiet die Wasserstände im Minutenintervall berechnet worden. Der jeweils untersuchte Pegel wurde bei der Prädiktion nicht berücksichtigt. Die Modellierung wurde zunächst hinsichtlich der Trendfunktion variiert. Als Trendfunktionen wurden folgende Polynomflächen verwendet:

Bezeichnung	Funktion
Horizontalebene	$f(x,y) = a_0$
Schrägebene	$f(x,y) = a_0 + a_1 x + a_2 y$
Hyperbolische Fl.	$f(x,y) = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 x y$
Elliptische Fl.	$f(x,y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5x^2.$

3

4.4. Untersuchung des digitalen Wasseroberflächenmodells (DIWOM)

Variation der Trendfläche

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Wasseroberflächenmodellierung unter Verwendung unterschiedlicher Trendfunktion aufgeführt. Für die Prädiktion sind folgende Parameter verwendet worden:

Parameter	Wert	
Bezugshorizont	NN	
Kovarianzfunktion	empirisch.	

Die erzielten Genauigkeiten lassen sich aus den Abbildungen 4.4 und 4.5 entnehmen. Für jeden Pegel des Testgebietes ist ein Säulendiagramm mit den Standardabweichungen der einzelnen Testzeiträume erstellt worden. Allgemein werden sehr gute Ergebnisse im Fahrwasserbereich seewärts Cuxhaven mit Standardabweichung deutlich unter 10 Zentimetern erzielt. Dies ist unabhängig von der Wahl der Trendfunktion. Größere Unterschiede treten hingegen in den Randbereichen des Testgebietes auf. Bedingt durch die Extrapolation der berechneten Wasserstände hat die Wahl der Trendfunktion offensichtlich einen erheblichen Einfluß auf die Qualität der Modellierung. Insbesondere die Verwendung einer Horizontalebene (Abb. 4.4 a)) als Trendfläche führt in den Randbereichen (Pegel 4, 7, 8) zu unbefriedigenden Ergebnissen. Recht große Standardabweichung in den Randbereichen des Testgebietes treten auch bei Verwendung einer elliptischen Polynomfläche (Abb. 4.5 b)) als Trendfunktion auf. Dies ist damit zu begründen, daß höhere Polynomansätze an den Rändern des Modellierungsgebietes zum Ausschwingen neigen.

Modellierungsergebnisse von annähernd gleicher Qualität werden bei Verwendung einer Schrägebene und einer hyperbolischen Fläche erzielt. Auffallend ist, daß, trotz unterschiedlicher Flächenparameter, tendenziell gleiche Modellierungsergebnisse auftreten. In den Randbereichen des Modellierungsgebietes zeigt sich, daß mit der Verwendung der Schrägebene als Trendfunktion die besten Ergebnisse erzielt werden.

4. Untersuchung der Beschickungsverfahren



Abbildung 4.4.: Genauigkeit des DIWOM bei Verwendung einer a) Horizontalebene und einer b) Schrägebene als Trendfunktion.



Abbildung 4.5.: Genauigkeit des DIWOM bei Verwendung einer a) hyperbolischen und einer b) elliptischen Fläche als Trendfunktion.

4. Untersuchung der Beschickungsverfahren

Die Korrelation der erzielten Standardabweichungen mit den Wetterdaten ist schwierig. So zeigen sich z.B. bei den Pegeln an der Mittelplate (Pegel 6 und 15) sowohl bei WSW-Wind als auch bei NO-Wind recht große Standardabweichungen. Eine genaue Aussage über die Ursache läßt sich aufgrund der komplexen Zusammenhänge nicht treffen. Neben der Windrichtung und Stärke haben u.a. die Tidephase, die Morphologie des Meeresbodens, und die für die Modellierung verwendete Pegelkonfiguration einen ganz erheblichen Einfluß auf die Modellierung und die Form der Tidenkurve am Untersuchungspegel.

Zusammenfassend läßt sich konstatieren, daß eine rein geometrische Modellierung der Wasseroberfläche auf der Grundlage gemessener Wasserstandsdaten zu einer Genauigkeit von besser als 10 Zentimetern bei der Beschickung führt. Der Ansatz der linearen Prädiktion erweist sich als ein geeigneter Modellierungsansatz. Mit der Schrägebene als Trendflächenparameter werden die besten Genauigkeiten auch im Randbereich des Modellierungsgebietes erzielt. Der Randbereich stellt wegen der Extrapolation der Wasserstandsdaten einen Problembereich dar. Insbesondere in den Wattgebieten treten Genauigkeiten auf, die um zehn Zentimetern liegen.

Modellierung mit konstanter Kovarianzfunktion

Ziel dieser Untersuchung ist es, den Einfluß der empirisch ermittelten Kovarianzfunktion auf die Genauigkeit der Modellierung zu ermitteln. Im vorherigen Abschnitt ist die Modellierung mit einer variablen, empirisch ermittelten Kovarianzfunktion durchgeführt worden. Für jeden Tidewasserstand wurde diese Kovarianzfunktion aus den Wasserstandsdaten bestimmt.

In diesem Abschnitt hingegen ist die Berechnung des Wasserstands für jeden Pegel und jeden Testzeitraum unter Verwendung einer konstanten Kovarianzfunktion durchgeführt worden. Die Kovarianzfunktion (vgl. Abbildung 3.2.2) wurde durch den Steigungsfaktor k = 5000 festgelegt. Alle weiteren Parameter wurden nicht verändert. Als Trendflächenparameter wurde die Schrägebene gewählt.

Ein Vergleich mit der entsprechenden Abbildung aus Abschnitt 4.4 zeigt, daß durch die Verwendung der konstanten Kovarianzfunktion in den meisten Fällen eine Verschlechterung der Genauigkeiten auftritt. Deutlich wird dies z.B. an den Pegeln Trischen West (8) und Cuxhaven (vgl. Abbildung 4.7). Die Verwendung einer empirischen Kovarianzfunktion führt demnach also zu verbesserten Modellierungsergebnissen. Der Genauigkeitsgewinn erstreckt sich über alle Testzeiträume.



Abbildung 4.6.: Genauigkeit des DIWOM bei Verwendung einer konstanten Kovarianzfunktion.



Abbildung 4.7.: Vergleich der Genauigkeiten zwischen der Modellierung mit konstanter und empirischer Kovarianzfunktion.

Modellierung mit Bezug auf das Mittlere Springniedrigwasser

Alle vorhergehenden Untersuchungen sind mit Normal-Null als Bezugssystem durchgeführt worden. Alle Pegel in dem Pegeltestnetz sind auf NN eingemessen worden. Die Genauigkeit der Höhenkomponente aus der Einmessung beträgt 1,7 cm (Goldan 1995). Zusätzlich ist für jeden Reisepegel das MSpNw berech-

4. Untersuchung der Beschickungsverfahren

net worden (vgl. Abschnitt 5.2). Das MSpNw ist durch eine Anschlußanalyse aus den Wasserstandsdaten eines halben Jahres bestimmt worden. Bedingt durch den kurzen Beobachtungszeitraum ist die Festlegung des MSpNw an den Reisepegeln unsicher.

Das Seekartennull an der deutschen Nordseeküste ist definiert als das örtliche MSpNw. Daher repräsentieren die an den Dauer- und Reisepegeln bestimmten Werte näherungsweise das Seekartennull. Beschickungen im Küstenbereich werden für die Zwecke der Seekartenherstellung häufig auf das Seekartennull durchgeführt. Daher werden die bei der Berechnung auf NN gefundenen Genauigkeiten in diesem Abschnitt mit den Genauigkeiten, die bei der Beschickung auf das Seekartennull erzielt werden, verglichen. Die erreichten Genauigkeiten sind in



Abbildung 4.8.: Genauigkeit des DIWOM bei der Beschickung auf SKN.

Abbildung 4.8 aufgeführt. Die Ergebnisse der Beschickung auf SKN weisen in der Regel eine schlechtere Genauigkeit auf als die vergleichbare Beschickung auf NN (vgl. Abbildung 4.4 b)). Dies ist insbesondere auf der östlichen Seite des Untersuchungsgebietes in den Wattgebieten und im Ästuar der Fall. Hier werden Genauigkeiten, die zum Teil deutlich über 10 cm liegen bestimmt. Der Grund für die verschlechterte Genauigkeit liegt in der Ausprägung der MSpNw-Fläche. Diese Fläche weist, im Gegensatz zur NN-Fläche, in den Wattgebieten größere Krümmungen als in tieferen Gewässern auf. In Küstennähe und in den Prielen

4.4. Untersuchung des digitalen Wasseroberflächenmodells (DIWOM)

nimmt durch die Reibungseffekte der Tidenhub zu. Das MSpNw wird daher in diesen Bereichen tiefer festgelegt sein. Diese Effekte lassen sich durch rein geometrische Modellierung nicht erfassen und führen somit zu größeren Abweichungen der berechneten Werte zu den geschätzten Werten.

Ergebnisse

Ziel der vorhergehenden beiden Abschnitte war, auf der Grundlage der linearen Prädiktion aus der Gesamtheit der zur Verfügung stehenden Pegel die optimale Wahl der Parameter für die Prädiktion zu ermitteln. Zudem sollten die Genauigkeiten ermittelt werden, die mit diesem Ansatz in einem sehr dichten Pegelnetz zu erzielen sind.

Die vorgestellten Untersuchungen haben gezeigt, daß die Anwendung der linearen Prädiktion für die geometrische Modellierung der Wasseroberfläche geeignet ist. Mit diesem Ansatz werden in allen Bereichen des Pegeltestnetzes äußere Genauigkeiten unter 10 cm erzielt. Dies erstreckt sich über alle acht Testzeiträume.

Die beiden wesentlichen Parameter zur Beeinflussung der linearen Prädiktion sind die Trendfläche und die Kovarianzfunktion. Die besten Ergebnisse im Hinblick auf die Genauigkeit werden erzielt mit einer Schrägebene als Trendflächenparameter und der empirischen Ermittlung der Kovarianzfunktion aus den Wasserstandsdaten.

Die Beschickung auf die Bezugshorizonte NN und MSpNw (SKN) ergibt unterschiedliche Ergebnisse. Die Beschickung auf NN erweist sich als die bessere Variante. Die NN-Fläche läßt sich wegen ihrer geringeren Variation besser durch ein Pegelnetz repräsentieren.

4.4.3. Modellierung mit Pegeln der optimierten Pegelkonfiguration

Die vorhergehenden Abschnitte dienten der Bestimmung einer optimalen Parameterwahl. Dieser Abschnitt dagegen hat das Ziel, daß in Kapitel 3.3 vorgestellte Konzept zur Bestimmung einer optimalen Pegelkonfiguration zu verifizieren. Das Konzept sieht vor, durch den Vergleich gemessener und berechneter Wasserstände diejenigen Pegel zu identifizieren, die für eine Position die besten Beschickungsergebnisse liefern. Die Ergebnisse des Optimierungsprozesses finden sich in Anhang C.

Eine Überprüfung der Ergebnisse des Optimierungsprozesses läßt sich durch den Vergleich von Beschickungswerten mit unabhängigen Wasserstandsdaten, wie sie durch die Schiffe der WSV erfaßt wurden, durchführen (vgl. Abschnitt 4.2). Die Abbildungen 4.9 zeigen die Beschickungsergebnisse für die Beschickung auf die



Abbildung 4.9.: Beschickungsergebnis aus der optimierten Pegelkonfiguration.

Schiffe bei Verwendung der optimierten Pegelkonfiguration für den jeweils naheliegendsten Pegel. Für die Komet und die Nigewark sind für Vergleichszwecke die zwei nächstgelegenen Pegel als Referenz verwendet worden. Die Abbildung zeigen, daß die Differenzen im wesentliche aus der Wasserstandsbestimmung mit DGPS stammen. Nichtsdestotrotz liegen die Genauigkeiten unter 10 cm (vgl. Tab. 4.2). Die Beschickung unter Verwendung aller Pegel ergibt in etwa die gleichen Genauigkeiten.

Eine Überprüfung der erzielbaren Genauigkeit der in Abbildung 3.5 ermittelten

Schiff	Optimierte Pegelkonfiguration	Gesamtkonfiguration
Komet	8,3/6,4 cm	7,1 cm
Nigewark	3,9/5,0 cm	4,2 cm
Oland	8,7 cm	7,9 cm
Stickersgatt	9,1 cm	8,7 cm

4.4. Untersuchung des digitalen Wasseroberflächenmodells (DIWOM)

Tabelle 4.2.: Vergleich der Standardabweichungen zwischen der optimierten Pegelkonfiguration und der Gesamtkonfiguration.





Gesamtpegelkonfiguration kann wiederum durch den Vergleich gemessener und berechneter Wasserstände erfolgen. Für die Beschickung mit DIWOM wurden die Wasserstände folgender Pegel verwendet:

• Pegel Otterndorf (7)

÷

- Pegel Gr. Vogelsand (5)
- Pegel Medemgrund Nord (16)

- 4. Untersuchung der Beschickungsverfahren
 - Pegel Trischen West (8)
 - Pegel Scharhörn (1)
 - Pegel Cuxhaven (4).

Dies sind diejenigen Pegel, die mit der größten Häufigkeit in den optimierten Pegelkonfigurationen auftauchen. Die Beschickung unter Verwendung dieser Pegel führt, wie in Abbildung 4.10 dargestellt, zu Genauigkeiten besser als 10 cm. Problematisch stellen sich auch hier die Pegel in den Prielen dar.

Ergebnisse

In diesem Abschnitt sind die Ergebnisse der Pegeldatenanalyse mit den optimierten Pegelkonfigurationen und einer daraus abgeleiteten Gesamtkonfiguration verifiziert worden. Die erzielten Beschickungsergebnisse liegen bei einer geringeren Anzahl von Pegeln bei Genauigkeiten unter 10 cm. Somit werden mit diesem Ansatz die Anforderungen an das Beschickungsverfahren hinsichtlich der Genauigkeit erfüllt. Darüberhinaus werden diese guten Beschickungsergebnisse durch die Verwendung von lediglich sechs Pegeln außerordentlich wirtschaftlich erzielt.

Mit dem hier vorgestellten Verfahren der Pegeloptimierung ist die Möglichkeit gegeben, aus einer bestehenden Pegelkonfiguration diejenigen Pegel zu ermitteln, die im Hinblick auf die Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit einen guten Kompromiß bieten. Mit einem Minimum an Pegeln wird eine Beschickungsgenauigkeit erzielt, die in der Regel 10 cm nicht überschreitet.

5. Transformation zwischen NN und dem Mittleren Springniedrigwasser

Präzise Höhen- bzw. Tiefenangaben werden für viele Zwecke im marinen Bereich benötigt. So erfordern z.B. Baggerarbeiten in Fahrwassern eine möglichst genaue Festlegung der Tiefen. Die Ermittlung von Höhen bzw. Tiefen allgemein ist jedoch schwierig, da es sich um Abstände von einem gedachten Bezugshorizont handelt. Eine direkte Messung ist daher nicht möglich. Vielmehr muß man Höhen über die Bestimmung von Differenzen zu höhenmäßig bekannten Festpunkten ermitteln.

Im Bereich der deutschen Nordseeküste sind mehrere unterschiedliche Höhenbezugssysteme im Gebrauch. Diese resultieren aus den unterschiedlichen Anforderungen, die an Höhenangaben auf dem festen Land einerseits und an Tiefenangaben in Seekarten andererseits gestellt werden.

Der Höhenbezug an Land orientiert sich am Schwerefeld des Erdkörpers. Gleiche Höhen liegen daher in etwa auf derselben Äquipotentialfläche des Erdschwerefeldes. Geringfügige Abweichungen entstehen durch die Umrechnung des Potentialwertes eines Punktes in einen Höhenwert. Das Erdschwerefeld im Küstenbereich ist in den für die Beschickung relevanten Entfernungsbereichen recht homogen. Die Äquipotentialflächen weisen daher nur geringe Krümmungen auf (vgl. Goldan 1995). Die Festlegung des Höhensystems erfolgt durch die Punkte des Deutschen Haupthöhennetzes (DHHN), das durch die Landesvermessungsämter der Bundesländer gepflegt wird.

In Seekarten ist das Seekartennull (SKN) die Bezugsfläche. Das SKN orientiert sich am mittleren Springniedrigwasser (MSpNw) (vgl. Abschnitt 5.2). Das MSpNw ist im wesentlichen von der lokalen Hydrologie abhängig und stellt ein Niveau dar, welches vom tatsächlichen Wasserstand selten unterschritten wird. Es wird realisiert durch Dauerpegel entlang der Nordseeküste, für die das BSH Gezeitengrundwerte erstellt. Diese Festlegung des Bezugshorizontes soll einerseits gewährleisten, daß die in Seekarten angegebenen Tiefen auch bei niedrigem Wasserstand möglichst nicht unterschritten werden und daß andererseits trocken-

5. Transformation zwischen NN und dem Mittleren Springniedrigwasser

fallende Wattflächen in etwa lagerichtig in der Karte wiedergeben werden. Die Festlegung des Seekartennulls durch das örtliche MSpNw stellt einen Kompromiß dieser Forderungen dar. Daher treten durchaus Wasserstände auf, die zu geringeren als den angegebenen Teifen führen.

Für die Seekartenerstellung wird das SKN an den Bezugspegeln jährlich neu festgelegt. Der Fortführungszyklus für die Seekartenerstellung beträgt drei Jahre. Die in den Seekarten ausgewiesenen Tiefen werden stets neu erfaßt. Für die Umrechnung von auf SKN bezogenen Tiefen auf einen anderen Bezugshorizont bedeutet dies, daß nicht nur der Ort sondern auch der Zeitpunkt der Beschickung eines Tiefenwertes bekannt sein muß. Darüber hinaus hängt der Beschickungswert einer Tiefenmessung auch von der Wahl des Bezugspegel und dem Beschickungsverfahren (vgl. Abschnitt 2) ab. In vielen Gebieten gibt es z.B. zwei oder mehrere WEK unterschiedlicher Bezugspegel die zur Beschickung herangezogen werden.

Neben den beiden zuvor beschriebenen Bezugshorizonten werden in den Tideflüssen Elbe, Weser und Ems durch die zuständigen Wasser- und Schiffahrtsämter zum Teil weitere Bezugshorizonte verwendet, die sich ebenfalls an dem MSpNw orientieren. Für die Aufgaben der Wasser- und Schiffahrtsämter ist eine jährliche Änderung des SKN ungünstig. Hier bedarf es einer längerfristig gültigen Festlegung, um z.B. Solltiefenfestlegungen und Baggermengenberechnungen nicht jedes Jahr ändern zu müssen. Daher erfolgt eine Änderung des Kartennulls erst, wenn das MSpNw um einen bestimmten Betrag, in der Regel sind dies 0.5 dm oder 1 dm, von dem Kartennull abweicht.

5.1. Definition des Normalnull

Eine geeignete Höhenbezugsfläche für Höhenangaben an Land stellt das Geoid dar. Das Geoid ist eine Äquipotentialfläche ($W_0 = const.$) des Erdschwerefeldes, die näherungsweise mit dem mittleren Meeresspiegel zusammenfällt (Torge 1975). Der mittlere Meeresspiegel wird aus Pegelbeobachtungen abgeleitet. Zumeist wird für einen bestimmten Zeitraum aus den Pegelbeobachtungen ein mittlerer Wasserstand abgeleitet, der dann das Niveau der Bezugsfläche definiert. Ein Punkt auf der Erdoberfläche kann durch die Potentialdifferenz zum Geoid festgelegt werden. Diese wird als geopotentielle Kote bezeichnet.

$$C = W_0 - W_P = -\int_{P_0}^{P} dW = \int_{P_0}^{P} g dn$$
 (5.1)

a manual descention of the

. >

Anschaulicher als die geopotentielle Kote ist jedoch die längs der gekrümmten Lotlinie gemessene Abstand des Oberflächenpunktes vom Geoid, die orthometrische Höhe H^{O} . Für die Berechnung der orthometrischen Höhe wird der Schwere-



Abbildung 5.1.: Höhensysteme und Bezugsflächen (nach Denker (1995))

verlauf entlang der Lotlinie im Erdinnern benötigt.

$$H^{O} = \frac{C}{\overline{g}} \qquad mit \qquad \overline{g} = \frac{1}{H} \int_{P_{0}}^{P} g dn.$$
 (5.2)

Da dieser in der Regel nicht meßbar ist, hat man sich bei der Anlage des deutschen Haupthöhennetzes einer Vereinfachung bedient und sphäroidisch-orthometrische Höhen (H^{NO}) verwendet. Dabei wird die tatsächliche Schwere längs der Lotlinie durch die Normalschwere in sphärischer Näherung ersetzt (Torge 1975). Die Normalschwere läßt sich von einem Niveauellipsoid wie z.B. dem Geodätischen Referenzsystem (GRS) 1980 ableiten. Werden nicht die Schwerewerte aus der sphäroidischen Näherung sondern aus dem Ellipsiod zur Reduktion von Nivellementergebnissen verwendet, erhält man sogenannte Normalhöhen H^N . Höhen des Deutschen Haupthöhennetzes werden zukünftig Normalhöhen sein.

Alle drei dieser Höhensysteme haben eine andere Höhenbezugsfläche von denen einzig das Geoid eine Äquipotentialfläche darstellt. Die Höhenbezugsfläche für Normalhöhen ist das Quasigeoid. Das Quasigeoid entsteht durch den Abtrag der Normalhöhen nach unten. Im Küstenbereich betragen die Differenzen zwischen dem Geoid und dem Quasigeoid wenige cm. Die Bezugsfläche für die sphäroidischorthometrischen Höhen wird mit NN-Fläche bezeichnet (Schmidt 1991). Sie entsteht analog zum Quasigeoid durch den Abtrag der sphäroidisch-orthometrischen Höhen des DHHN nach unten.

Die Vermessungsverwaltungen der Länder führen zur Zeit verschiedene Höhensysteme nebeneinander. Die verschiedenen Höhensysteme werden DHHN 12, DHHN 85 und DHHN 92 genannt.Das DHHN 12 ist aus Messungen der Jahre 1912 bis

5. Transformation zwischen NN und dem Mittleren Springniedrigwasser

1956 entstanden. Durch die lange Beobachtungszeit und die zum Teil ungünstige Berechnung weist das DHHN 12 nicht unerhebliche Netzspannungen auf. Daher hat die AdV 1973 beschlossen, das DHHN 12 durch umfangreiche Wiederholungsmessungen in den Jahren 1980 bis 1985 zu erneuern. Die Auswertung der Wiederholungsmessungen erfolgte durch zwangsfreie Ausgleichung der geopotentiellen Koten. Anschlußpunkt an das DHHN 12 ist der Punkt Wallenhorst bei Osnabrück. Die Festlegung der Niv.-Punkte 1. Ordnung erfolgte als sphäroidischorthometrische Höhen. Dieses Höhensystem wird mit DHHN 85 bezeichnet. Eine neuerliche Berechnung des Nivellementnetzes ist mit der politischen Vereinigung der Bundesrepublik Deutschland und der DDR notwendig geworden. Nachdem die notwendigen Verbindungsmessungen durchgeführt worden waren, sind die Daten der Wiederholungsmessungen zum DHHN 85 und in den neuen Ländern Messungen aus den Jahren 1972 bis 1976 verwendet worden. Als Höhensystem hat man sich auf Normalhöhen, die in der DDR schon länger verwendet wurden, geeinigt. Die Höhenbezugsfläche wird Normalhöhennull (NHN) genannt (Weber 1995). Die Niv.-Punkte des Netzes 1. Ordnung bilden das DHHN 92.

Zur Zeit werden somit also drei unterschiedliche Höhenbezugssysteme in der Bundesrepublik Deutschland verwendet. Der Übergang auf das DHHN 92 erfolgt schrittweise bis zur völligen Ablösung der beiden älteren Systeme. Die Höhenbezugsflächen ergeben sich aus den Höhen der Niv.-Punkte 1. Ordnung.

5.2. Bestimmung des Mittleren Springniedrigwassers

Grundlage für die Festlegung des SKN und örtlicher KN ist die Berechnung des MSpNw des BSH. Bei den Gezeitengrundwerten handelt es sich um verschiedene Kenngrößen für die Gezeiten an einem Pegel. Unter anderem sind dies das MSpNw und das MSpHw. Die Berechnung der Gezeitengrundwerte wird für die deutsche Nordseeküste durch das BSH durchgeführt. Die Berechnung erfolgt jährlich unter Verwendung der Daten der vorausgehenden Jahre. Für die Dauerpegel des BSH wird die Berechnung in der Regel mit einem Datensatz von 19 Jahren durchgeführt. Der Zeitraum von 19 Jahren ist auf den Umlauf des Mondknotens zurückzuführen. Der Umlauf des Mondknotens beträgt 18.6 Jahre und ist die größte Periode, die noch nennenswerte Auswirkungen auf die Höhe der Gezeit hat. Laukart (1981) hat für diese Frequenz bei der Analyse der Wasserstandsdaten des Pegels Wilhelmshaven eine Amplitude von 1-2 cm errechnet.

Die einzelnen Niedrig- bzw. Hochwasserhöhen untereinander sind nicht gleich, sondern weichen von den Mittelwerten ab. Die Differenz zwischen dem mittleren Niedrigwasser und der tatsächlichen Niedrigwasserhöhe wird Ungleichheit eines Niedrigwassers in Höhe bezeichnet. Sie ist definiert als:

$$\Delta H = H - MNw \tag{5.3}$$

Die Ungleichheit ΔH läßt sich in verschiedene Perioden zerlegen. Eine dieser Perioden ist der Umlauf des Mondknotens (18.6 Jahre). Die wichtigste Periode ist die halbmonatliche Ungleichheit (14.77 Tage). Dies ist die Zeit, die von einem Vollmond zu einem Neumond vergeht. Sie wird halber synodischer Mond genannt. Springzeit ist, wenn die halbmonatliche Ungleichheit ihren größten Wert annimmt.

Die Ermittlung des MSpNw erfolgt durch eine Ausgleichung der beobachteten Niedrigwasserhöhen. Jedes beobachtete Niedrigwasser wird für diesen Zweck auf die Zeit des Monddurchgangs durch den Meridian von Greenwich bezogen. Dies wird Kulmination des Mondes genannt. Somit werden die Niedrigwassereintrittszeiten auf den täglichen Mondumlauf, der den wesentlichen Einfluß auf die Gezeiten in der Deutschen Bucht hat, bezogen. Der tägliche Mondumlauf beträgt im Mittel 24h 50'.

Die auf die Mondkulmination im Meridian von Greenwich bezogenen Niedrigwasserhöhen werden durch eine Fourierreihe, die nach vier Koeffizienten abbricht, ausgeglichen. Die Fourierreihe lautet:

$$H = A_0 + \sum_{j=1}^{4} (A_j * \cos j\omega t_k + B_j * \sin j\omega t_k)$$
(5.4)

 $A_0 \dots A_4$ $B_0 \dots B_4$: Fourierkoeffizienten ω : Winkelgeschwindigkeit $\frac{30^\circ}{h}$ t_k : zugeordnete Mondkulminationszeit für H

Die Berechnung der Fourierkoeffizienten wird zweimal durchgeführt. Nach der ersten Berechnung werden diejenigen Niedrigwasserhöhen eliminiert, die um mehr als die dreifache Standardabweichung von dem aus der Fourierreihe berechneten Wert abweichen. Dieses Vorgehen dämpft den Einfluß meteorologisch stark gestörter Niedrigwasser. Die endgültigen Fourierkoeffizienten werden aus den verbleibenden Beobachtungen bestimmt. Das Mittlere Springniedrigwasser wird festgelegt als das absolute Minimum der Fourierreihe (5.4). Das mittlere Niedrigwasser läßt sich unmittelbar aus dem Koeffizienten A_0 ablesen (BMV 1980).

Das MSpNw läßt sich auch aus kürzeren Beobachtungsreihen approximieren. Dieses weicht durch die Vernachlässigung längerer Perioden von dem MSpNw aus einer Zeitreihe von 19 Jahren ab. Der Mindestzeitraum für eine Beobachtungsreihe sollte jedoch mindestens ein Jahr mit 600 Niedrigwassern und 600 Hochwassern

5. Transformation zwischen NN und dem Mittleren Springniedrigwasser

betragen. Stehen weniger Beobachtungen zur Verfügung, so wird eine sogenannte Anschlußanalyse gerechnet.

Bei der Anschlußanalyse wird eine Fourierreihe aus den Differenzen der Niedrigwasserhöhen zu einem beliebigen, in der Nähe liegenden Bezugspegel berechnet (Goffinet 1996). Als Bezugspegel wird ein Dauerpegel gewählt, für den Gezeitengrundwerte aus einer neunzehnjährigen Beobachtungsreihe bestimmt worden sind. Die Fourierreihe für die Wasserstandsdifferenzen lautet:

$$\Delta h = dA_0 + \sum_{j=1}^{4} (dA_j * \cos j\omega t_k + dB_j * \sin j\omega t_k)$$
(5.5)

$dA_0 \dots dA_4$		
$dB_0 \dots dB_4$:	Fourierkoeffizienten für die Wasserstandsdifferenzen
		zwischen Berechnungs- und Bezugspegel
Δh	:	Differenzen in der Niedrigwasserhöhe zwischen Bezugs-
		und Berechnungspegel

Die Ergebnisse der Anschlußanalyse sind sehr stark von der Übereinstimmung der Tidenkurven des Bezugs- und des Berechnungspegels abhängig. Da die Form der Tidenkurve stark von der örtlichen Topographie abhängig ist, ist eine Auswahl des Bezugspegels nach geographischer Nähe nicht immer sinnvoll. Vielmehr sollte sich die Auswahl nach der Ähnlichkeit der Form der Tidenkurven richten. Als Kriterium für die Auswahl des Bezugspegels kann die aus der Anschlußanalyse resultierende Standardabweichung dienen.

5.3. Bestimmung der SKN-Fläche im Testgebiet Elbemündung.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens ist zu klären, mit welcher Genauigkeit der Übergang von Tiefen bezogen auf SKN zu Tiefen bezogen auf NN vollzogen werden kann. Das Kernproblem in diesem Zusammenhang besteht darin, die Lage der SKN-Fläche¹, die lediglich in den Pegelstützpunkten festgelegt ist, für beliebige Orte innerhalb eines Meßgebietes zu ermitteln. Es handelt sich dabei also um ein Interpolationsproblem. Damit stellt sich die Frage, wie dicht die Stützpunkte (Dauerpegel) zu legen sind, um eine repräsentative SKN-Fläche ableiten zu können. Weniger Bedeutung hat die Interpolation der NN-Fläche, da diese wesentlich geringere Krümmungen aufweist als die SKN-Fläche. Eine plausible

¹Streng genommen handelt es sich um die MSpNw-Fläche, da das SKN erst durch offizielle Bekanntgabe des BSH bestimmt wird. Hier wird trotzdem der Einfachheit halber von SKN-Fläche gesprochen.

NN-Fläche läßt sich also aus einer geringeren Anzahl von Stützpunkten ermitteln.



Abbildung 5.2.: Die Beziehung zwischen der NN-Fläche und der MSpNw-Fläche.

Die Berechnung des MSpNw für die Pegel des Testnetzes Elbeästuar ist durch das BSH durchgeführt worden. Das BSH setzt das SKN jedes Jahr neu fest. Die Neufestsetzung erfolgt aus Berechnungen des MSpNw, die die neuesten Wasserstandsbeobachtungen einschließen. Dies bedeutet, daß in Seekarten angegebene Tiefenwerte nur dann nach NN transformiert werden können, wenn bekannt ist, auf welches SKN diese Tiefen bezogen worden sind. Sind in einer Seekarte Tiefen vorhanden, die auf SKN unterschiedlicher Jahre bezogen worden sind, so lassen sich diese nicht untereinander vergleichen. Die innerhalb von drei Jahren, dem Fortführungszyklus der Seekarten in der Deutschen Bucht, auftretenden Differenzen im MSpNw betragen zumeist nur wenige cm. Die Abbildung 5.3 zeigt die Entwicklung des MSpNw im Verlauf von zehn Jahren für drei ausgewählte Pegel. Dabei treten über den gesamten Zeitraum Schwankungen auf, die 10 cm überschreiten können. Interessant ist, daß der Verlauf der Kurven in Abbildung 5.3 recht ähnlich verläuft. Dies läßt vermuten, daß für die Schwankungen des MSpNw weniger lokale als vielmehr regionale Effekte verantwortlich sind.

Zur Abschätzung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Festlegung des MSpNw sind Anschlußanalysen mit verschiedenen Pegelkonfigurationen berechnet worden. So sind zum einen sämtliche Pegel unter Verwendung der halbjährlichen Zeitreihe an den Pegel Cuxhaven Steubenhöft angeschlossen worden. Zum Vergleich ist für diejenigen Pegel, für die 19-jährige Beobachtungsreihen vorliegen, ein MSpNw aus dieser Zeitreihe bestimmt worden. Diese in Tabelle 5.1 zusammengestellten Werte geben Aufschluß, mit welchen Differenzen bei der Verwendung halbjährlicher Zeitreihen zu rechnen ist.

Selbst bei der Berechnung des MSpNw aus halbjährlichen Beobachtungen mit unterschiedlichen Methoden treten bereits nicht unerhebliche Differenzen auf. Tabelle 5.2 stellt die Ergebnisse für zwei unterschiedliche Vorgehensweisen bei der Berechnung zusammen. Der Anschluß der Pegel an den Bezugspegel Cuxhaven

5. Transformation zwischen NN und dem Mittleren Springniedrigwasser



Abbildung 5.3.: Die Entwicklung des MSpNw im Verlauf der letzten 10 Jahre (Rauß 1997).

Pegel	6 Monate Daten	19 Jahre Daten	Differenz
	[cm]	[cm]	[cm]
Gr. Vogelsand (5)	322,86	326,92	4,1
Zehnerloch (3)	320,78	335,13	14,4
Scharhörn (1)	309,65	319,55	9.9
Mittelplate (6)	309,81	316,00	6,2
Otterndorf (7)	332,39	341,00	8,6
Trischen West (8)	314,11	320,00	5,9

Tabelle 5.1.: Vergleich der MSpNw aus 6-monatiger und 19-jähriger Zeitreihe.

ergibt stets ein zwischen 5 und 8 cm niedrigeres MSpNw als der Anschluß an einen Bezugspegel, der mit dem Standardabweichungskriterium ermittelt wurde. Da der in Tabelle 5.1 durchgeführte Vergleich auch stets zu niedrige MSpNw für die Anschlußanalyse liefert, erscheinen die Ergebnisse aus der Anschlußanalyse mit Standardabweichungskriterium plausibler als die Ergebnisse aus dem Anschluß an den Pegel Cuxhaven. Die durch eine Anschlußanalyse ermittelten MSpNw im Testgebiet weisen somit Differenzen zum tatsächlichen MSpNw aus einer 19jährigen Zeitreihe von deutlich weniger als 10 cm auf.

Pegel	Anschlußpegel Cuxhaven	Stabw kriterium	Differenz
	[cm]	[cm]	[cm]
Bake Echo (9)	301	308	7
Gelbsand Bake X (10)	322	330	8
Gelbsand Nord (12)	326	332	6
Klotzenloch Ost (13)	313	320	7
Kratzsand Nord (14)	325	333	8
Krabbenloch (15)	261	267	6
Medemgrund Nord (16)	314	320	6
Schatzkammer (17)	313	320	7
Trischen Süd (19)	288	296	8
Spitzsand Nord (20)	327	332	5
Spitzsand West (21)	309	317	8

5.4. Transformation zwischen den Höhenbezugssystemen NN und SKN

Tabelle 5.2.: Vergleich der MSpNw aus 6-monatiger Zeitreihe bei Verwendung unterschiedlicher Berechnungsverfahren.

5.4. Transformation zwischen den Höhenbezugssystemen NN und SKN

Für den Bereich des Pegeltestnetzes liegen die Differenzen MSpNw - NN nach der Berechnung des BSH für 20 Pegel vor. Diese Pegel dienen als Grundlage für die Interpolation einer Differenzenfläche, wie sie für eine Transformation benötigt wird. Die Differenzen sind in Tabelle 5.3 aufgeführt.

Eine Interpolation läßt sich mit dem im Abschnitt 3 vorgestellten Ansatz durchführen. Da es sich hierbei wiederum um eine Fläche mit verhältnismäßig geringen Krümmungen handelt, bleibt die in Abschnitt 3 gegebene Begründung zur Wahl des Approximationsansatzes auch hier gültig. Jedoch ist eine Filterung hier nicht erwünscht, da die in den Stützpunkten gefundenen Differenzen definierte Werte darstellen. Daher wird man den in Gleichung (3.12) festgelegten Filterbetrag auf 0 setzen.

Die Differenzenfläche aus einem linearen Prädiktionsansatz für das Testgebiet zeigt Abbildung 5.4. Zur Bestimmung der Differenzenfläche sind alle oben aufgeführten Pegel verwendet worden. Deutlich bildet sich in der Isoliniendarstellung das Fahrwasser der Elbe heraus. Der Übergang auf die Wattflächen ist durch die engere Scharung der Isolinien ausgeprägt. Der Übergang verläuft in etwa entlang

Pegel	MSpNw-PN	NN-PN	NN-MSpNw
	[m]	[m]	[m]
Scharhörn (1)	3,20	4,99	1,79
Mittelgrund (2)	3,26	5,00	1,74
Zehnerloch (3)	3,35	5,00	1,65
Cuxhaven (4)	3,32	5,02	1,70
Gr. Vogelsand (5)	3,27	5,00	1,73
Mittelplate (6)	3,16	5,05	1,89
Ötterndorf (7)	3,41	5,00	1,59
Trischen West (8)	3,20	5,06	1,86
Bake Echo (9)	3,08	4,87	1,79
Gelbsand Bake X (10)	3,30	5,05	1,75
Gelbsand Nord (12)	3,32	5,12	1,80
Klotzenloch Ost (13)	3,20	5,15	1,95
Kratzsand Nord (14)	3,33	5,08	1,75
Krabbenloch (15)	2,67	4,58	1,91
Medemgrund Nord (16)	3,20	4,84	1,64
Schatzkammer (17)	3,20	5,02	1,82
Schatzkammer (18)	3,04	4,82	1,78
Trischen Süd (19)	2,96	4,88	1,92
Spitzsand Nord (20)	3,32	5,16	1,84
Spitzsand West (21)	3,17	4,84	1,67

Tabelle 5.3.: Differenzen NN-MSpNw für das Pegeltestnetz.

einer durch die Pegel 16, 14, 18 und 11 gebildeten Linie. Außerhalb des durch die Pegel gebildeten konvexen Umrings sind lokale Maxima bzw. Minima zu erkennen. Diese entstehen durch die Extrapolation der Fläche. Eine Extrapolation sollte daher möglichst vermieden werden.

Abbildung 5.5 zeigt eine analoge Darstellung, die aus den im Testgebiet aufgestellten Dauerpegeln erstellt wurde. Die Differenzenfläche weist aufgrund der Verwendung von nur acht Pegeln einen wesentlich glatteren Verlauf auf. Die in Abbildung 5.4 zu erkennende Beziehung zur Meeresbodentopographie tritt daher jetzt nicht mehr in Erscheinung.

Ein Vergleich der in den Abbildungen 5.4 und 5.5 dargestellten Differenzen zwischen NN und SKN zeigt signifikante Differenzen vor allen Dingen in den Wattgebieten (vgl. Abbildung 5.6). Dies ist auf die differenziertere Ausbildung der Dif-

÷



Abbildung 5.4.: Die Beziehung zwischen der NN-Fläche und der MSpNw-Fläche unter Einbeziehung aller Pegel im Testgebiet.



Abbildung 5.5.: Die Beziehung zwischen der NN-Fläche und der MSpNw-Fläche unter Verwendung der Dauerpegel im Testgebiet.

ferenzenfläche durch die Verwendung der Pegel im Wattgebiet zurückzuführen. Die Abbildungen zeigen, daß ein zuverlässiger Transformationsansatz zwischen NN und SKN in erster Linie von der Dichte und Position der Pegel abhängt. In Wattgebieten, in denen jedoch das MSpNw als Höhenbezugssystem eine unter-



Abbildung 5.6.: Differenzen zwischen Transformationsflächen bei Verwendung unterschiedlicher Pegelkonfigurationen (Äquidistanz: 2,5 cm).

geordnete Rolle spielt, muß ein dichtes Netz von Pegeln angestrebt werden. Hier weist die MSpNw-Fläche vergleichsweise starke Krümmungen auf. In den tieferen Bereichen innerhalb des Testgebietes hat die MSpNw-Fläche einen glatteren Verlauf. Hier kann der Abstand der Pegel weiter gewählt werden. Tabelle 5.4 zeigt die Differenzen zwischen einem interpolierten und dem aus Pegelbeobachtungen berechnetem MSpNw. Der untersuchte Pegel ist bei der Bestimmung der Differenzenfläche nicht verwendet worden, sodaß ein Vergleich zwischen der berechneten und der interpolierten Differenz MSpNw - NN durchgeführt werden konnte. Die Ergebnisse bestätigen die zuvor getroffenen Aussagen. Die Abweichungen liegen in etwa bei 5 cm. Problematisch wird die Interpolation bei den Pegeln Zehnerloch und Klotzenloch. Ersterer liegt an der Südseite einer tiefen Rinne östlich des Gelbsandes. In diesem Gebiet treten sehr starke Gezeitenströme auf. Die Probleme bei der Interpolation sind also durch die besonderen hydrologischen Verhältnisse begründet. Der Pegel Klotzenloch liegt tief in dem Priel Klotzenloch mit relativ geringen Wassertiefen. Das Tidegeschehen an diesem Pegel ist wesentlich durch den Abfluß des Wassers von den Platen bestimmt.

Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß beide Höhenbezugssyteme, also das NN und das SKN, durch die Festlegung in den Pegelstützpunkten definiert werden. Das NN ist ein über lange Zeit stabiles Bezugssystem, vorausgesetzt es werden keine Neuberechnungen durchgeführt. Durch die Orientierung am Erdschwerefeld weist die Bezugsfläche (NN-Fläche) relativ geringe Krümmungen auf.

Das Seekartennull hingegen wird aus langen Pegelbeobachtungsreihen abgeleitet.

Pogel	MSpNw	MSpNw interpoliert	Differenz
I egei	[m]	[m]	[m]
Scharhörn (1)	1,79	1,78	1
Mittelgrund (2)	1,74	1,73	1
Zehnerloch (3)	1,65	1,75	-10
Cuxhaven (4)	1,70	1,65	5
Gr. Vogelsand (5)	1,73	1,76	-3
Mittelplate (6)	1,89	1,93	-4
Otterndorf (7)	1,59	1,63	-4
Trischen West (8)	1,86	1,83	3
Bake Echo (9)	1,79	1,74	5
Gelbsand Bake X (10)	1,75	1,76	-1
Gelbsand Nord (12)	1,80	1,76	4
Klotzenloch Ost (13)	1,95	1,81	14
Kratzsand Nord (14)	1,75	1,72	3
Krabbenloch (15)	1,91	1,94	-3
Medemgrund Nord (16)	1,64	1,71	-7
Schatzkammer (17)	1,82	1,86	-4
Schatzkammer (18)	1,78	1,81	-3
Trischen Süd (19)	1,92	1,86	6
Spitzsand Nord (20)	1,84	1,78	6
Spitzsand West (21)	1,67	1,74	-7

5.4. Transformation zwischen den Höhenbezugssystemen NN und SKN

Tabelle 5.4.: Differenzen zwischen berechneten und interpolierten MSpNw-Höhen.

Es handelt sich dabei um ein spezielles Niedrigwasser (MSpNw). Dieses Niedrigwasser ist jedoch, bedingt durch Änderungen in der Meeresbodentopographie und anthropogenen Einflüssen, wie etwa Baumaßnahmen, zeitlich nicht konstant. Diesem Umstand wird durch die jährliche Neufestsetzung Rechnung getragen. Die Anzahl der Pegelstützpunkte, die das Seekartennull definieren, ist, gemessen an der Größe des abgedecktem Gebiets, recht gering. Die Festlegung erfolgt durch ca. 70 Pegel. Insbesondere im küstennahen Bereich in den Wattgebieten sind, wie das Beispiel des Pegeltestnetzes zeigt, geringere Pegelabstände erforderlich, soll eine Transformation mit einer Genauigkeit von besser als 10 cm durchgeführt werden. Als Höhenbezugssystem für Höhen und Tiefen, die langfristig gültig bleiben, ist

5. Transformation zwischen NN und dem Mittleren Springniedrigwasser

das Seekartennull daher nicht geeignet. Damit sind alle Tiefenmessungen, um sie auf den aktuellen Stand zu halten jährlich an das neue SKN anzupassen. Ältere Tiefenmessungen können nur mit Kenntnis der Veränderungen des Seekartennulls auf das aktuelle SKN bezogen werden.

Für die Transformation zwischen den Höhenbezugssystemen sind zwei Fälle zu unterscheiden:

- 1. Es liegen Tiefenangaben aus älteren Seekarten bezogen auf SKN vor, die mit neueren Messungen die auf SKN oder NN bezogen sind, kombiniert werden sollen.
- 2. Es liegen neue Tiefen in einem der beiden Höhenbezugssystemen vor, die in den jeweils anderen transformiert werden sollen.

NN wird als zeitlich konstantes Referenzsystem eingeführt. Für die älteren Tiefen muß die Beziehung zwischen dem SKN und dem NN am Bezugspegel zum Zeitpunkt der Beschickung bekannt sein. Weiterhin bekannt sein muß, welches Beschickungsverfahren verwendet wurde (vgl. Abschnitt 2), da durch das Beschickungsverfahren die Realisierung des Bezugssystems erfolgt. Die auf SKN bezogenen Tiefenangaben lassen sich dann nach NN überführen. Die auf NN bezogenen Tiefen mit unterschiedlicher Meßzeit lassen sich dann untereinander vergleichen oder in ein beliebiges anderes System überführen, von dem die Beziehung zum NN bekannt ist.

Sind die benötigten Informationen zu der SKN-Festlegung, dem Bezugspegel und dem Beschickungsverfahren nicht bekannt, kann lediglich eine Näherungslösung durch die Interpolation der Differenzenfläche erfolgen, vorausgesetzt diese läßt sich aus bekannten Pegelstützpunkten gewinnen. Es zeigt sich, daß der Weg der Rücktransformation nur dann beschritten werden kann, wenn eine Reihe zusätzlicher Informationen zur beschickten Tiefe bekannt sind. Da diese Informationen für ältere Karten in den seltensten Fällen bekannt sind, wird in der Regel die Näherungslösung über einen Interpolationsansatz anzustreben sein. Will man diese Probleme zukünftig vermeiden, so sind Informationen zum Bezugspegel, der Lage des SKN und des Beschickungsverfahrens zusätzlich zu den Tiefen zu archivieren. Vereinfachen läßt sich dies durch eine klare Zuordnung der Peilungen zu einem Bezugspegel und einem Beschickungsverfahren.

Die Schwierigkeiten bei der Transformation lassen sich vermeiden, wenn die gemessenen Tiefen bezogen auf NN vorgehalten und bei Bedarf auf SKN transformiert werden. Das Transformationsverfahren kann mit einem vorgegebenen Interpolationsansatz und einer festen Auswahl von Dauerpegeln klar definiert werden, sodaß auch eine Rücktransformation problemlos möglich ist. In der Regel wird man jedoch von dem Grunddatenbestand der auf NN bezogenen Tiefen ausgehen können, und bei Bedarf in andere Bezugssysteme transformieren. Als

5.4. Transformation zwischen den Höhenbezugssystemen NN und SKN

Basisbezugssystem sind nicht nur das NN vorstellbar sondern die Tiefen könnten künfitg z.B. auch bezogen auf das Ellipsoid vorgehalten werden, wenn die 3D-Schiffspositionen aus GPS Messungen stammen, auf die auch die Tiefenmessungen bezogen sind.

. .

6. Zusammenfassung

Die Zielsetzung des Forschungsvorhabens "Optimierung der Beschickung im Küstenbereich der Deutschen Bucht "war die Entwicklung eines automatisierten Verfahrens zur Beschickung von Lotungsmessungen auf der Grundlage der geometrischen Modellierung der Wasseroberfläche aus Wasserstandsdaten. Wie gezeigt werden konnte, erfüllt das digitale Wasseroberflächenmodell DIWOM die Anforderungen hinsichtlich der Genauigkeit und der Wirtschaftlichkeit, die an ein modernes Beschickungsverfahren gestellt werden. Dieses Verfahren erlaubt einen umfassenden digitalen Datenfluß. In der Praxis werden heute fast ausschließlich digital registrierende Echolote verwendet. Auch die Wasserstandsdaten werden inzwischen weitgehend digital aufgezeichnet. Somit läßt sich jetzt aus den gemessenen Wassertiefen ohne manuelle Bearbeitung ein Tiefenlinienplan bestimmen.

Das digitale Wasseroberflächenmodell stellt ein Verfahren dar, daß auf gemessenen Wasserständen basiert. Die Bestimmung des Beschickungswertes erfolgt, im Gegensatz zu Echtzeit-GPS Lösungen, wegen der Nutzung redundanter Wasserstandsdaten mit großer Zuverlässigkeit. Die Beschickung mittels Echtzeit-GPS-Verfahren ist zur Zeit noch nicht absolut zuverlässig. Je nach Satellitenkonfiguration, Lösungsalgorithmus und Entfernung zu den Referenzstationen werden die Trägerphasenmehrdeutigkeiten in 60 % bis 90 % aller Fälle richtig gelöst (Böder u.a. 1996). Das digitale Wasseroberflächenmodell kann daher zur unabhängigen Kontrolle von Echtzeit-GPS Lösungen herangezogen werden. Das Verfahren ist durch die Einrichtung einer Wasserstandsdatenfernübertragung echtzeitfähig.

Die Untersuchungen in dem Abschnitt 4.4.2 haben ergeben, daß die Wasseroberflächenmodellierung unter Verwendung eines linearen Prädiktionsansatzes am besten gelingt, wenn:

- als Trendfunktion eine Schrägebene gewählt wird. Bei der Wahl der Trendfunktion muß einerseits eine ausreichende Anpassung an die Stützwerte angestrebt werden, andererseits führt eine Polynomfläche höheren Grades zu einem Ausschwingen an den Rändern des Modellierungsgebietes. Dies ist insbesondere bei der Extrapolation von Beschickungswerten der Fall.
- die Kovarianzfunktion des Pr\u00e4diktionsansatzes aus den Pegeldaten empirisch bestimmt wird. Eine konstante Kovarianzfunktion wird den Ver\u00e4nde-

rungen der Wasseroberfläche im Tideverlauf nicht gerecht. Mit der Bestimmung einer empirischen Kovarianzfunktion für jede Lotung aus den Wasserstandsdaten ist stets eine optimale Anpassung der Wasseroberflächenmodells an die Tideverhältnisse gewährleistet.

- eine Beschickung auf das Höhenbezugssystem Normal-Null durchgeführt wird. Die Bezugsfläche des Normal-Null fällt näherungsweise mit einer Äquipotentialfläche des Erdschwerefeldes, dem Geoid, zusammen. Das Niveau des Geoids wird durch die Niv.-Punkte des DHHN festgelegt. Es fällt näherungsweise mit dem mittleren Meeresspiegel zusammen. Die NN-Fläche weist im Küstenbereich vergleichsweise geringe Krümmungen auf. Die SKN-Fläche ist definiert als das örtliche mittlere Springniedrigwasser. Diese Bezugsfläche ist insbesondere in Küstennähe wegen der hydrologischen Definition durch stärkere Krümmungen gekennzeichnet. Eine Beschickung auf SKN in Küstennähe und insbesondere in den Wattgebieten erfordert daher ein höhere Pegeldichte.
- die Pegel in einem Meßgebiet gleichmäßig an den Rändern positioniert sind. Die Extrapolation von Beschickungswerten sollte möglichst vermieden werden.

Das Verfahren erlaubt die Bestimmung von Beschickungswerten mit einer Genauigkeit von besser als 10 cm (1 σ). Diese Genauigkeit wird sowohl in tieferen Bereichen (Fahrwasser) als auch in Wattgebieten erzielt. In den Wattgebieten ist jedoch an hydrologisch bedeutsamen Positionen, wie das Beispiel des Pegels Klotzenloch (13) zeigt, ein Pegel zu stationieren.

Der zweite Arbeitsschwerpunkt in dem Forschungsvorhaben war die Untersuchung der Beziehung zwischen der NN-Fläche und der SKN-Fläche. Zu diesem Zweck ist für die Pegel in dem Testgebiet das MSpNw berechnet worden. Aus den Differenzen zu der NN-Höhe der Pegel im Testgebiet sind Differenzenflächen mit verschiedenen Eingangspegeln interpoliert worden. Werden lediglich die Dauerpegel im Testgebiet zur Bestimmung der Differenz herangezogen, treten Abweichungen gegenüber gemessenen Differenzen von bis zu 25 cm auf. Dies bedeutet, das durch die Verwendung eines Interpolationsansatzes zur Transformation zwischen SKN und NN insbesondere in den Wattgebieten eine hohe Pegeldichte angestrebt werden muß. Dies ist jedoch wegen der langen Beobachtungszeit lediglich mit einem hohen Aufwand zu realisieren. Daher ist ein Vorschlag erarbeitet worden, die Beschickung grundsätzlich auf NN durchzuführen. Die Transformation nach SKN kann dann durch einen klar definierten Interpolationsansatz durchgeführt werden. Der Vorteil dieses Vorgehens ist, daß die Tiefen in dem eindeutig definierten und reproduzierbaren NN-System mit einer guten Genauigkeit vorliegen. Die Transformation nach SKN kann bedarfsweise durchgeführt werden. Die Transformation ist eindeutig und ohne Genauigkeitsverlust umkehrbar. Zudem führt die

6. Zusammenfassung

Beschickung auf NN mit DIWOM zu genaueren Ergebnissen.

Der Vorschlag zur Transformation zusammen mit dem digitalen Waseroberflächenmodell DIWOM führen zu einer automatischen Beschickung mit einer Genauigkeit von besser als 10 cm. Das Projektziel wurde daher erreicht.

7. Literaturverzeichnis

- Ammersdörfer, R. 1995. Zwischenbericht 1994 zum Forschungsvorhaben "Optimierung der Beschickung im Küstenbereich der Deutschen Bucht'. Unveröffentlichter Zwischenbericht des Jahres 1994 zu dem Forschungsvorhaben "Optimierung der Beschickung im Küstenbereich der Deutschen Bucht". Hannover.
- Assmus, E. und K. Kraus 1974. Die Interpolation nach kleinsten Quadraten Prädiktionswerte simulierter Beispiele und ihre Genauigkeiten. Deutsche Geodätische Kommission. Reihe A. Nr. 76.
- Böder, V., F. Heimberg und M. Schmitz 1996. Präzise GPS-gestützte Höhenzuordnung für kontinuierliche Lotungsmessungen auf Gewässern. Schlußbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben. Instituts für Erdmessung, Universität Hannover.
- Bundesministerium für Verkehr (BMV) 1980. Vorschläge zur Vereinheitlichung der Beschickung bei Vermessungen in küstennahen Gewässern der Nordsee. Abschlußbericht der Arbeitsgruppe Beschickung. 1980.
- Chatfield, C. 1980. Analyse von Zeitreihen eine Einführung. Carl Hanser Verlag München.
- Clerici, E. und K. Kubik 1975. The theoretical accuracy of point interpolation on topographic surfaces. In: Proc. Sympos. ISP, Comm. III, Stuttgart 2. -6. 9. 1974. Dt. geod. Komm. Reihe B, Heft 214, München 1975, S. 179-187.
- Denker, H. 1995. Großräumige Höhenbestimmung mit GPS und Schwerefelddaten. 34./ DVW-Seminar "GPS Leistungsbilanz", DVW-Schriftenreihe 18/95, Karlsruhe 1995.
- Göpfert, W. 1977. Interpolationsergebnisse mit der Multiquadratischen Methode. ZfV 102, 457-460, 1977.
- Goffinet, P. 1996. Persönliche Gespräche.

- Goldan, H. -J. 1995a. Ergebnisbericht zu den GPS Höhenmessungen im Forschungsvorhaben "Optimierung der Beschickung im Küstenbereich der Deutschen Bucht". Unveröffentlichter Ergebnisbericht des Instituts für Erdmessung der Universität Hannover.
- Goldan, H. -J. 1995b. Präziser Höhenanschluß des Helgoländer Pegels. Schlußbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben. Instituts für Erdmessung, Universität Hannover.
- G. Hake und D. Grünreich 1994. Kartographie. Walter de Gruyter & Co. Berlin.
- Hein, G. W. und K. Lenze 1979. Zur Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit verschiedener Interpolations- und Prädiktionsmethoden. ZfV 104, 492-505, 1979.
- Höpcke, W. 1980. Fehlerlehre und Ausgleichungsrechnung. Walter de Gruyter & Co. Berlin.
- Höpfner, J. 1990. Methoden zur Höheninterpolation in digitalen Reliefmodellen. Vermessungstechnik 38, Heft 9 S. 317- 320
- Kraus, K. 1980. Photogrammetrie Band 2 Theorie und Praxis der Auswertesysteme. Dümmler Verlag, Bonn.
- Laukart, W. 1981. Ermittlung langfristiger Wasserstandsänderungen aus Pegelregistrierungen. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität. Nr. 104. Hannover.
- Lucht, F. 1973. Vergleichende Untersuchung der angewandten Beschickungsverfahren in den Küstengewässern der Deutschen Bucht und im Wattenmeer. Teil I der Untersuchung "Die Beschickung im von Lotungen im Küstengebiet der Deutschen Bucht und im Wattenmeer". Hrsg. F. Lucht. Hamburg.
- Moritz, H. 1973. Least Squares Collocation. Deutsche Geodätische Kommission. Reihe A. Nr. 75.
- Pelzer, H. (Hrsg.) 1985. Geodätische Netze in der Landes- und Ingenieurvermessung II. Vorträge des Kontaktstudiums Februar 1985 in Hannover.
- Rohde, H. -P. 1989. Beschickung von Lotungen. Informationen der Deutschen Hydrographischen Gesellschaft (DHyG), Nr. 15, Juli 1989.
- Rosengarten, H. 1987. Ein geometrisches Modell zur Modellierung der Wasseroberfläche zur Beschickung von Küstenvermessungen. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität. Nr. 150. Hannover.
- Schmidt, R. 1991. Zur Terminologie und zur Klarstellung: Was sind NN-Undulationen? Zeitschrift für Vermessungswesen 116, Nr. 7, S. 296-300, 1991.
- Schödlbauer, A. 1993. Höhenbestimmung mit dem Global Positioning System. In: Das Global Positioning System im praktischen Einsatz der Landes- und Ingenieurvermessung. Schriftenreihe des Studienganges Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München. Heft 45, Neubiberg, 231-263, 1993.
- Schut, G. H. 1975. Evaluation of some interpolation methods. In: Proc. Sympos. ISP, Comm. III, Stuttgart 2. - 6. 9. 1974. Dt. geod. Komm. Reihe B, Heft 214, München 1975, S. 160-170.
- Sonderforschungsbereich (SFB) 149. 1983 und 1984. Vermessungs- und Fernerkundungsverfahren an Küsten und Meeren. Jahresberichte 1982 und 1983, Hannover.
- Torge, W. 1975. Geodäsie. Walter de Gruyter & Co. Berlin.
- Wasser-/ und Schiffahrtsamt Cuxhaven 1994. Fernmündliche Mitteilungen ehemaliger und derzeitiger Bediensteter zum Beschickungsverfahren nach Köves./ Cuxhaven / Hannover.
- Weber, D. 1995. Das Deutsche Haupthöhennetz 1992. In: Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV), AK Niv., Deutsches Haupthöhennetz 1992, Bayerisches Landesvermessungsamt, München, 1995.
- Wild, E. 1983. Die Prädiktion mit Gewichtsfunktionen und deren Anwendung zur Beschreibung von Geländeflächen bei topographischen Geländeaufnahmen. Dt. geod. Komm., Reihe C, Heft 277, München 1983.

A. Beschickungsgenauigkeiten mit der WEK



Abbildung A.1.: Genauigkeit der Beschickung mit der WEK Cuxhaven Steubenhöft.



Abbildung A.2.: Genauigkeit der Beschickung mit der WEK Trischen (oben) und der WEK Gr. Vogelsand (unten).



Abbildung A.3.: Genauigkeit der Beschickung mit der WEK Zehnerloch.

B. Wetterdaten des Seewetteramtes Hamburg

B.1. Windvektoren der Monate Mai bis Oktober im Elbeästuar



Abbildung B.1.: Windvektoren LT. Gr. Vogelsand.

B. Wetterdaten des Seewetteramtes Hamburg

Winddaten Juni 1994



Winddaten Juli 1994



Winddaten August 1994



Abbildung B.2.: Windvektoren LT. Gr. Vogelsand.



Winddaten September 1994

Winddaten Oktober 1994



Abbildung B.3.: Windvektoren LT. Gr. Vogelsand.

B.2. Signifikante Wellenhöhe der Monate Mai bis Oktober im Elbeästuar



Abbildung B.4.: Signifikante Wellenhöhe.



Abbildung B.5.: Signifikante Wellenhöhe.

÷.,



Abbildung B.6.: Signifikante Wellenhöhe.









ł

1

-

-

1

where we are a set

1.

...

D. Aufbau der Pegeldatenbank in ORACLE

	Tabelle PEGELDATEN	
Pegelnummer	Datum und Uhrzeit	Wasserstand
	[dd.mm.jjjj hh.mm]	[mm]
number(3)	date	number(5)
1	01.05.1994 00:00	4915
1	01.05.1994 00:01	4925
:		:
2	31.10.1994 23:59	5180
2	01.05.1994 00:00	4915
2	01.05.1994 00:01	4925
÷	:	:
2	31.10.1994 23:59	5180
n	01.05.1994 00:00	4915
n	01.05.1994 00:01	4925
:		:
n	31.10.1994 23:59	5180

Tabelle D.1.: Aufbau der Tabelle PEGELDATEN.