

# **Hinweise zur Gestaltung von Pegelnetzen im Küstenbereich**

**bearbeitet vom LAWA-Unterausschuss "Pegel"**

**Stand Dezember 2002**

## 2 Impressum

---

Herausgegeben von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)  
Vorsitz: Niedersächsisches Umweltministerium

1. Auflage: Hannover, 2002

Für den Druck wurde Recyclingpapier sowie umweltfreundliches, chlorfrei gebleichtes Papier verwendet.

Nachdruck und Vervielfältigung, auch auszugsweise, ist nur mit Genehmigung des Herausgebers gestattet.

Die vorliegende Veröffentlichung ist zu einem Preis von            Euro zu beziehen über den:  
Kulturbuchverlag Berlin GmbH  
Sprosserweg 3, 12351 Berlin  
Tel.: 030 / 661 8484; Fax: 030 / 661 7828  
Internet: <http://www.kulturbuch-verlag.de>  
e-mail: [kbvinfo@kulturbuch-verlag.de](mailto:kbvinfo@kulturbuch-verlag.de)  
ISBN - Nr.: 3-xxxxx-xxx-x

Die „Hinweise zur Gestaltung von Pegelnetzen im Küstenbereich“ wurden von der Fachgruppe „Küstenhydrologie“ des LAWA-Unterausschusses „Pegel“ erstellt. Mitgewirkt haben:

Dipl.-Ing. Benn	Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein, Flintbek
Dipl.-Ing. Blasi, MSc, DIC	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
Dipl.-Oz. Boehlich	Bundesanstalt für Wasserbau Dienststelle Hamburg
Dipl.-Ing. Götschenberg	Wasser- und Schifffahrtsamt, Wilhelmshaven
Dipl.-Ing. Neemann	Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord, Kiel
Dipl.-Ing. Niemeyer	Niedersächsisches Landesamt für Ökologie - Forschungsstelle Küste -, Norderney
Dipl.-Phys. Stigge	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Rostock
Als Gast: Dipl.-Oz. Annutsch	vormals Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg

## 4 Inhaltsverzeichnis

### Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>Einleitung</b> .....	6
<b>2.</b>	<b>Aufgabenfelder</b> .....	6
<b>3.</b>	<b>Anforderungen</b> .....	10
<b>4.</b>	<b>Kriterien</b> .....	10
	4.1 Planungsrahmen .....	11
	4.1.1 Vorgaben .....	12
	4.1.2 Zeitrahmen .....	12
	4.1.3 Kosten .....	12
	4.1.4 Ergebnisse .....	13
	4.2 Raumbezogene Gegebenheiten .....	13
	4.3 Messstellen.....	13
	4.3.1 Vorhandene Messstellen.....	13
	4.3.2 Um- und Neubau von Messstellen.....	13
	4.3.3 Daten .....	16
<b>5.</b>	<b>Umsetzung</b> .....	16
	5.1 Pegelnetzüberprüfung .....	17
	5.2 Entwurf eines neuen Pegelnetzes .....	17
<b>6.</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	18
<b>7.</b>	<b>Literatur</b> .....	18

### Anhang: Methoden

A 1	Statistische Methoden .....	20
A 1.1	Regressions- und Korrelationsanalyse .....	20
A 1.2	Wahrscheinlichkeitstheorie .....	21
A 1.3	Stichprobentheorie .....	21
A 2	Optimierungsverfahren .....	23
A 3	Numerische Modellierung .....	23
A 4	Empirische Abschätzungen .....	24

---

Die vielfältige und teilweise sehr intensive Nutzung der deutschen Küstengewässer bedarf zur sachgerechten Bewirtschaftung einer umfangreichen Kenntnis des zeitlich und räumlich variierenden Wasserdargebotes. Dies erfordert Pegelnetze, die den Anforderungen der verschiedenen Nutzer sach- und fachlich gerecht werden. Deren Bedarf hat in der Vergangenheit unterschiedliche Pegelnetze für verschiedene Aufgaben entstehen lassen.

Hier setzen die vorliegenden „Hinweise zur Gestaltung von Pegelnetzen im Küstenbereich“ an: nach Auflistung der verschiedenen Aufgabenfelder sowie der Beschreibung der Anforderungen der verschiedenen Nutzer werden die eigentlichen Kriterien, die zum Aufbau oder zur Optimierung eines entsprechenden Pegelnetzes erforderlich sind, dargelegt. Dafür geeignete Methoden werden im Anhang vorgestellt.

Ziel der vorliegenden Schrift soll es sein, sowohl dem fachlich als auch dem politisch Verantwortlichen Entscheidungshinweise zu der Gestaltung von Pegelnetzen in einem Tidefluss oder im Küstengebiet zu geben.

## 1. Einleitung

Die deutschen Küstengewässer sind Lebensraum, Schadstoffsенke, Raum für einen wachsenden Frachttransport sowie Teil des europäischen Gewässersystems und des größten Klimasystems der Erde<sup>1</sup>. Die vielfältige und teilweise sehr intensive Nutzung des Wassers erfordert in zunehmendem Maße eine sachgerechte und rechtskonforme Bewirtschaftung. Voraussetzung dafür ist eine hinreichende Kenntnis des Wasserangebotes in seiner räumlichen und zeitlichen Variabilität. Dazu bedarf es eines angemessenen, wissenschaftlichen Anspruchs genügenden Messnetzes, das die verschiedenen Parameter integrierend und damit ökonomisch erfasst.

Nach DIN 4049-1 ist ein Messnetz *die Gesamtheit der Messstellen, die einem bestimmten Zweck dienen und nach einem gleichwertigen Messprogramm betrieben werden*. Das Messprogramm ist ein *Programm, in dem die zu messenden Kenngrößen, Art, Zeitfolge und Dauer der Messungen und der Probennahme sowie Messverfahren und Randbedingungen festgelegt werden*. Je nach Aufgabe können somit im selben Netz unterschiedliche Messprogramme betrieben werden.

Die heutige Pegeltechnik reicht von Lattenpegeln, an denen ein Wasserstandswert abgelesen werden kann, bis zu elektronischen Pegeln, die Wasserstandsdaten in digitaler Form registrieren. Die Pegelvorschrift (LAWA 1997) regelt bundeseinheitlich deren Bau und Betrieb. Damit ist die Möglichkeit der Vergleichbarkeit von Messungen an unterschiedlichen Orten gegeben. Die Pegelvorschrift enthält jedoch nur grobe Vorgaben für die Gestaltung von Pegelnetzen. Hier setzen die vorliegenden Hinweise ein. Aus Gründen der Fachkompetenz beschränken sie sich auf Wasserstand und Durchfluss oberirdischer Gewässer im Küstenraum der Nord- und Ostsee.

Ziel der vorliegenden Schrift soll es sein, sowohl dem fachlich als auch dem politisch Verantwortlichen Entscheidungshinweise zu der Gestaltung von Pegelnetzen in einem Tidefluss oder im Küstengebiet zu geben.

Dazu werden in Kapitel 2 zunächst die Aufgabenfelder und in Kapitel 3 die Anforderungen an ein Pegelnetz aufgeführt, bevor in Kapitel 4 die eigentlichen Kriterien geschildert werden. Das Kapitel 5 soll die Umsetzung der Hinweise erleichtern. Bei deren Anwendung sind die Ausführungen durch die Besonderheiten vor Ort zu ergänzen. Die Umsetzungsmethoden werden im Anhang zusammengefasst.

In Vorbereitung dieser Schrift wurde mithilfe des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen 1996 an der Universität / Gesamthochschule Siegen eine Literaturstudie angefertigt (JENSEN 1996). Sie beschreibt ähnliche Arbeiten und Ansätze anderer Netzbetreiber sowie Empfehlungen der WMO, konnte aber weder auf nationaler noch auf internationaler Ebene spezielle Veröffentlichungen über die Gestaltung von Netzen im Küstengebiet ausfindig machen.

## 2. Aufgabenfelder

Aus den unterschiedlichen Aufgaben wuchs im Laufe der Jahre eine Ansammlung von Messstellen, deren Verteilung nach Raum und Zeit überwiegend unsystematisch war und sich jeweils nur an der zugeordneten Aufgabe orientierte. Mögliche Verflechtungen verschiedener Pegelnetze werden am Beispiel eines Ausschnittes im Bereich der Nordseeküste gezeigt (Abb. 1 a-h).

Die **Wasserbewirtschaftung** verlangt einerseits die verträgliche Bereitstellung von Brauchwasser für Landwirtschaft, Wirtschaft und Bevölkerung, andererseits die schadlose Abführung des Brauch- und Niederschlagswassers. Sie dient der Ertragssteigerung und Sicherung des Lebensunterhalts. Bei der Beanspruchung der vorhandenen Wasserressourcen treten konkurrierende Nutzungen auf, die beispielsweise in wasserwirtschaftlichen Rahmenplänen gegeneinander abgewogen werden.

Im Bereich der Küstenlinie sind Wasserbewirtschaftung und **Küstenschutz** miteinander verknüpft und erfordern ein abgestimmtes Handeln. Sowohl die Kenntnis von Wasserstandsdaten aus der Vergangenheit als auch der Ausblick auf zukünftige Entwicklungen sind wesentliche Planungskriterien zur Erfüllung dieses Aufgabenfeldes.

<sup>1</sup>

nach einer These der Weltklimakonferenz 1990 und der UNO-Umweltkonferenz (UNCED) 1992

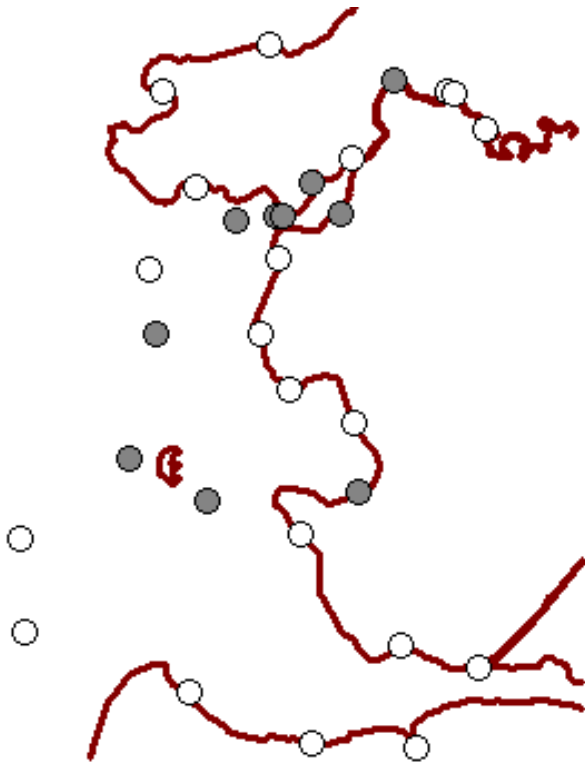


Abb. 1a: Mögliche Verflechtungen verschiedener Messnetze am Beispiel eines Bereiches der deutschen Nordseeküste, hier: Binnenentwässerung, Außentiefmorphologie

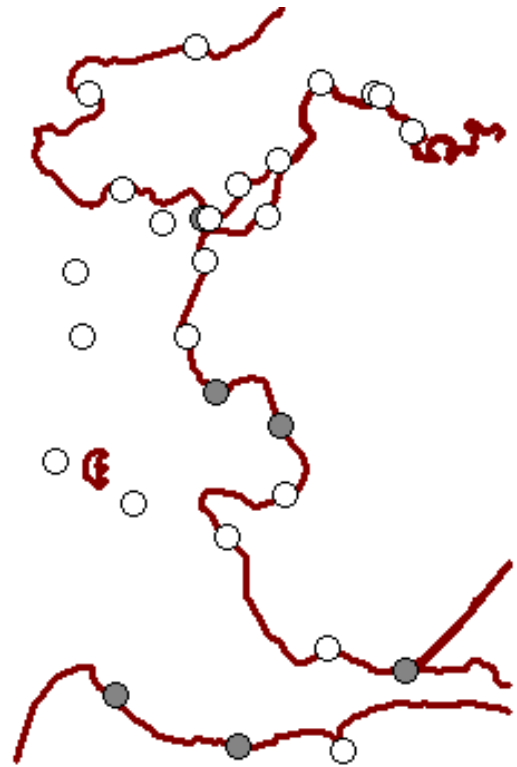


Abb. 1c: Mögliche Verflechtungen verschiedener Messnetze am Beispiel eines Bereiches der deutschen Nordseeküste, hier für Aufgaben des Naturschutzes / Nationalparks

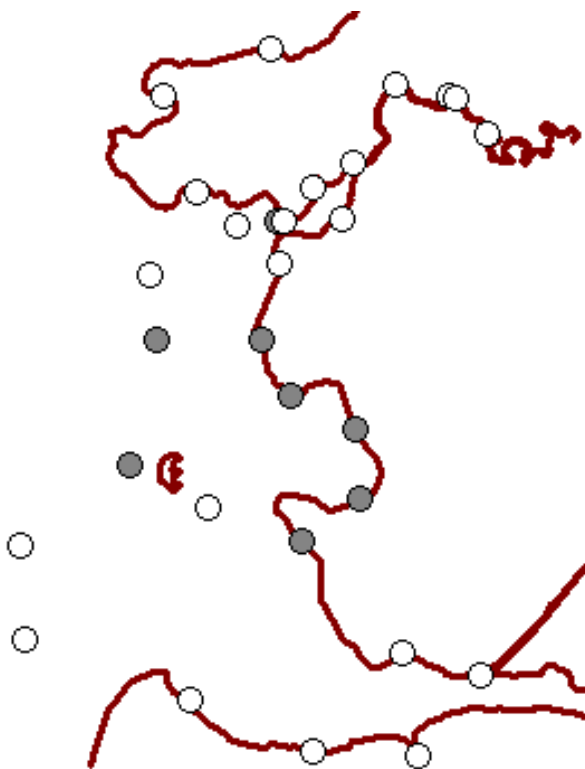


Abb. 1b: Mögliche Verflechtungen verschiedener Messnetze am Beispiel eines Bereiches der deutschen Nordseeküste, hier für die Beweissicherung in der Dithmarschen Bucht

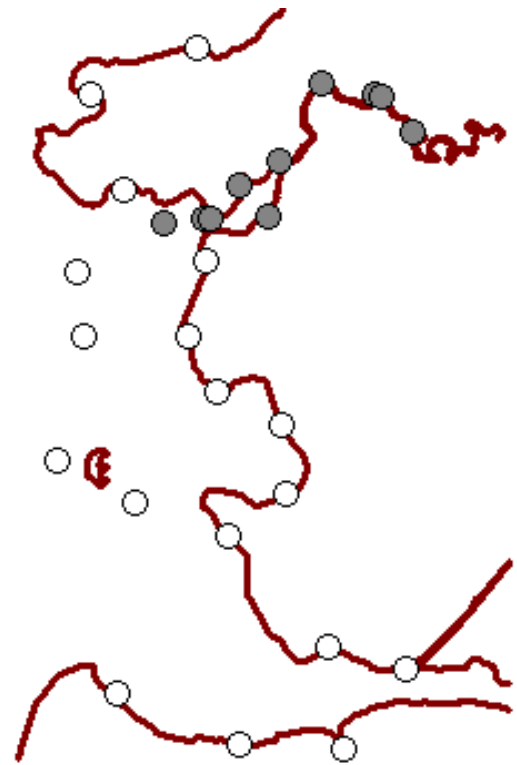


Abb. 1d: Mögliche Verflechtungen verschiedener Messnetze am Beispiel eines Bereiches der deutschen Nordseeküste, hier für die Steuerungszwecke (Eidersperwerks, Oste, NOK)

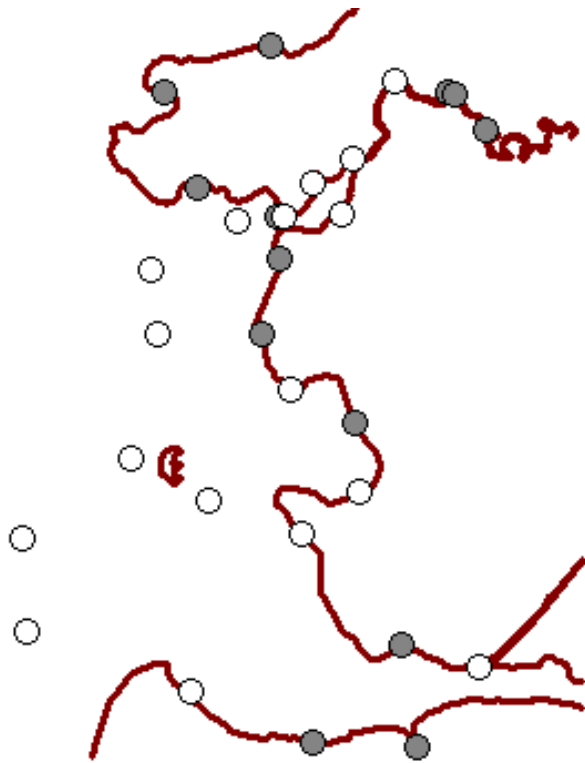


Abb. 1e: Mögliche Verflechtungen verschiedener Messnetze am Beispiel eines Bereiches der deutschen Nordseeküste, hier: zur Untersuchung der Wattenmorphologie, Peilungen

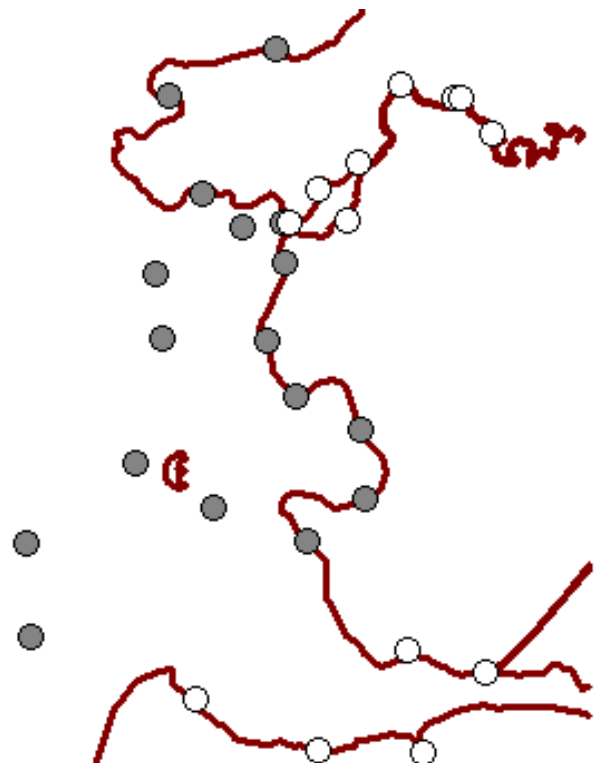


Abb. 1g: Mögliche Verflechtungen verschiedener Messnetze am Beispiel eines Bereiches der deutschen Nordseeküste, hier: zur Wasserstandsvorhersage für die Schifffahrt

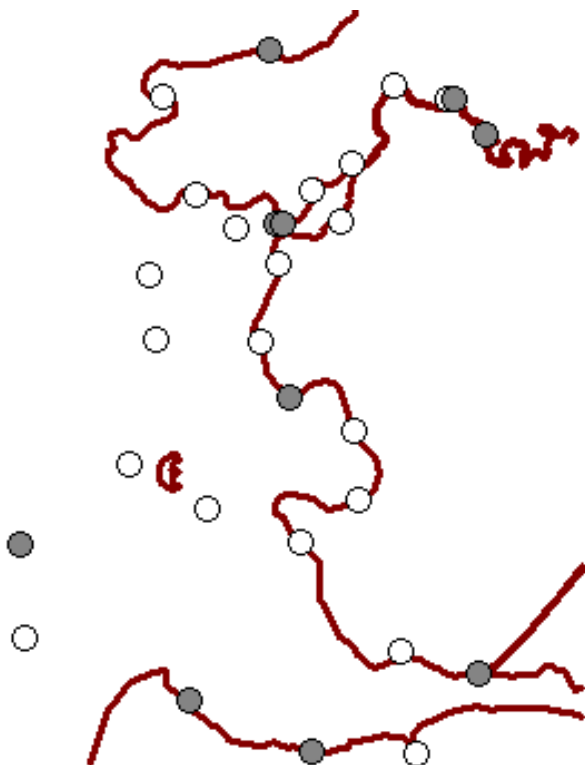


Abb. 1f: Mögliche Verflechtungen verschiedener Messnetze am Beispiel eines Bereiches der deutschen Nordseeküste, hier: Wasserstände für Baggerungen, Wracksuche usw.

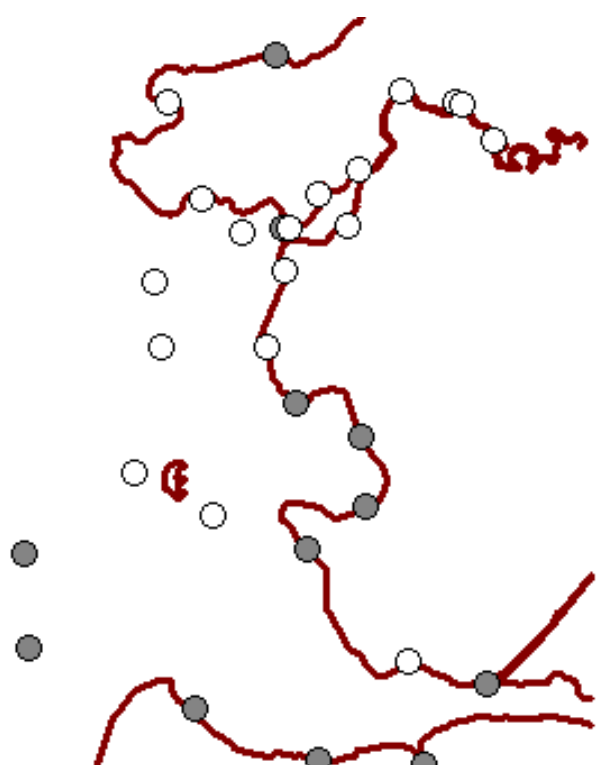


Abb. 1h: Mögliche Verflechtungen verschiedener Messnetze am Beispiel eines Bereiches der deutschen Nordseeküste, hier: Wasserstandsvorhersage (z.B. bei Sturmflut)



Das Aufgabenfeld **Wasserstraße und Hafen** dient der sicheren und leichten Abwicklung der Schifffahrt. Für Bau- und Unterhaltungsmaßnahmen werden insbesondere vor dem Hintergrund der ökologischen Verträglichkeit historische und prognostizierte Daten benötigt, für den Betrieb prognostizierte und aktuelle Daten.

Die **Ökologie** ist, historisch betrachtet, das jüngste Aufgabenfeld, dessen Ziel es ist, die natürlichen Ressourcen zu schützen, zu pflegen und zu entwickeln. Dazu sind im Bereich der Gewässer häufig Zeitreihen von Wasserständen und Durchflüssen, aber auch aktuelle und prognostizierte Werte erforderlich.

Die bisher genannten Aufgabenfelder erfordern oftmals lange Reihen. Der zu deren Gewinnung erforderliche Zeitrahmen passt oft nicht mit den aktuellen Aufgaben zusammen. Um dennoch Aussagen treffen zu können, ist im Rahmen der staatlichen **Vorsorge** ein Messnetz zu betreiben, das je nach Bedarf Daten für unterschiedliche Aufgabenfelder liefern kann. So dienen diese Messungen zum Zeitpunkt ihrer Erhebung nicht unmittelbaren Zwecken, sondern diese ergeben sich eventuell erst mit fortschreitendem Erkenntnisgewinn.

Für **wissenschaftliche** Zwecke erforderliche Daten werden z.T. dem Messnetz anderer Aufgabenfelder entnommen, benötigen darüber hinaus aber immer wieder sehr speziell konfigurierte Messstellen, die wiederum für andere Aufgabenfelder wenig relevant sind.

Tabelle 1 listet die Aufgaben detailliert auf. Die einzelnen Projekte sind beispielhaft aufgeführt. Jedes Aufgabenfeld sowie dessen Projekte haben entsprechend ihrer Bedeutung rechtliche Grundlagen und Aspekte. Sie sind daher nicht besonders benannt.

Maßnahmen, die sich direkt oder indirekt auf das mengen- oder gütemäßige Wasserdargebot auswirken oder zu einer weiteren Inanspruchnahme des Wasserhaushaltes oder der Gewässer führen können, sind hinsichtlich ihrer Verträglichkeit mit den insgesamt vorhandenen Anforderungen an den Wasserhaushalt zu überprüfen. Für den unmittelbaren wasserrechtlichen Gesetzesvollzug sind hierbei

- Entscheidungen über Gewässernutzungen
- Entscheidungen über Ausbauvorhaben
- die Ausweisung von Wasserschutz- und Überschwemmungsgebieten

Aufgabenfeld	Projekte	Datenbedarf der Projekte		
		in der Vergangenheit erfasste Daten	momentan erfasste Daten	prognostizierte Daten
Wasserwirtschaft	Rahmenplanung	X		X
	Bewirtschaftungspläne		X	
	Wassernutzung			
	- Betriebssteuerung von Anlagen		X	X
	- Vorflutregelung		X	
Küstenschutz	Festlegung der Überschwemmungsgebiete	X		
	Festlegung der Eigentumsgrenzen	X		
	Bemessungswasserstand	X		X
Wasserstraße/ Hafen	Windstau	X		
	Bauwerkskonstruktion und -unterhaltung		X	X
	Gefahrenabwehr bei Sturmflut			X
	Sturmflutwarndienst	X	X	X
	Verkehrssicherung		X	
Ökologie	- Verkehrssicherungspeilung		X	
	- Tidefahrplan		X	X
	- Wasserstandsvorhersage	X	X	X
	Aktuelle Wasserstandsinformation		X	
	Hafen- und Strombau	X	X	X
Vorsorge, Wissenschaft	Überflutungsdauern	X		
	Wasserbeschaffenheit		X	
	Biotopzonierung	X		X
	Renaturierung	X		X
Vorsorge, Wissenschaft	EU-Rahmenregelungen	X		X
	Gewässerkundliches Jahrbuch	X		
	Meeresspiegeländerung	X		
	Festlegen des Kartennulls	X		
	Topographische Geländeaufnahme		X	
	Verifikation numerischer Modelle	X		
Analyse der Tidedynamik	X	X		

Tabelle 1: Aufgaben der Wasserstandsmessnetze im Küstengebiet

- die Regelung der Gewässer- und Anlagenunterhaltung
- die Gefahrenabwehr
- die Erstellung wasserwirtschaftlicher Pläne von besonderer Relevanz.

Im Einzelnen hat der gewässerkundliche Dienst im Küstengebiet die Aufgabe, die Daten für das wasserwirtschaftliche Handeln bereitzustellen, das auf

- die Nutzung der Gewässer zur Entwässerung, als Verkehrsträger und für Freizeit und Erholung
- die Sicherstellung eines ökologisch vertretbaren Hochwasserschutzes
- den Schutz des Gewässers durch Minimierung der chemischen und biologischen Belastungen
- die Erstellung von Prognosen aufgrund von Klimaänderungen ausgerichtet ist (nach LAWA 2000).

### 3. Anforderungen

Dem gewässerkundlichen Mess- und Beobachtungsdienst erwachsen aus den Aufgabefeldern folgende maßgebliche Anforderungen und Konsequenzen:

- An die Entscheidungsgrundlagen – und damit an die Zuverlässigkeit der Datenbasis – sind hohe Anforderungen zu stellen.
- Nachweis des Umfangs und der Eintragspfade von Gewässerbelastungen und der ökologischen Einflüsse. Neben punktuellen sind auch die flächenhaften Einträge zu erfassen.
- Aufgrund der Vielzahl der Einflussgrößen sowie ihrer räumlichen und zeitlichen Variabilität ist eine umfassende messtechnische Erfassung aus finanziellen Gründen nicht möglich. Eine Beschränkung auf die maßgeblichen Einflussgrößen erfordert hinreichende Kenntnis der sie steuernden Größen. Die dafür erforderlichen Daten Grundlagen sind vom gewässerkundlichen Messdienst zu erheben und zu analysieren. Die dafür erforderlichen Methoden sind von Wissenschaft und Forschung bereitzustellen (LAWA 2001).

Anforderungen an die Gestaltung eines künftigen Pegelnetzes hat die LAWA in mehreren Schriften genannt (LAWA 1999a, 1999b, 2000, 2001). Zusätzlich erlangen die Regelungen der EU auch im Bereich des Wasserrechts eine

wachsende Bedeutung, insbesondere durch die Verabschiedung der Wasserrahmenrichtlinie.

### 4. Kriterien

Ökonomische Zwänge und neue technische Möglichkeiten gebieten eine optimale Integration und Gestaltung der Netze. Es ist heute nicht mehr zu akzeptieren, dass sich ein staatliches Messnetz aus mehr oder weniger unkoordinierten Teilnetzen zusammensetzt, die teilweise das zufällige Ergebnis einer Reihe von Ad-hoc-Antworten auf Fragen der Vergangenheit sind (LAWA 1999b). Die dafür notwendigen Kriterien werden nachfolgend aufgeführt.

Für jedes der aufgabenspezifischen Pegelnetze ist zu Beginn der Netzgestaltung zunächst der Messumfang qualitativ und quantitativ festzulegen und eine präzise Beschreibung des gesamten Aufgabenspektrums zu erstellen. Sie beeinflusst entscheidend die Qualität des Messergebnisses, das wissenschaftlichen Ansprüchen genügen muss.

Dabei hängt die Qualität eines Messnetzes nicht nur von der Beschaffenheit der einzelnen Messstellen, sondern auch von der Art des zugrundegelegten Messprogramms ab. Außerdem bestimmt die Zielrichtung den Aussagegehalt der Messdaten (JENSEN 1996).

Die Beschreibung setzt gute Kenntnisse der technischen und methodischen Umsetzbarkeit voraus. Sie sollte stets am Anfang eines Projekts, gleich in welcher Qualität und in welchem Umfang, stehen. Sie wurde bisher allerdings selten systematisch durchgeführt.

Die Beschreibung sollte neben der Nennung der Aufgabe auch Angaben zu den räumlichen Gegebenheiten, den vorhandenen und geplanten Messstellen und den vorhandenen und zu gewinnenden Daten machen.

Bei einer Überprüfung eines bestehenden Pegelnetzes muss eine Aussage getroffen werden, ob das Netz inhaltlich und qualitätsmäßig noch den Ansprüchen genügt und seinen Zweck erfüllt. Eventuell muss es in eine andere Aufgabe integriert werden.

Die verschiedenen Aufgaben werden einer strukturellen und methodischen Betrachtung unterzogen. Bei der strukturellen Betrachtung

werden die Ziele, die Aufgaben und der Zweck der Messnetze genau definiert (s. Tab. 1) und somit die Gründe für das Messen dargelegt. Außerdem sind Tätigkeitsfelder der beteiligten Organisationen zu beschreiben (JENSEN 1996). Die methodische Betrachtung von Messnetzen beinhaltet die Abschätzung der hydrologischen Zusammenhänge von ablaufenden physikalischen Prozessen. Zur Minimierung der verbleibenden Unsicherheiten, welche teilweise im Messen selbst liegen bzw. in den nicht bekannten Prozessen, werden mathematische Methoden angewendet, die im Anhang vorgestellt werden.

In einem Messnetz sollen die Standorte der Messgeräte (Pegel) so angeordnet sein, dass einerseits aus Gründen der Wirtschaftlichkeit möglichst wenig Geräte zum Einsatz kommen, andererseits aus den registrierten Messungen die Parameter an Stellen, an denen nicht gemessen wurde, mit einem bestimmten maximalen Fehler interpoliert werden können. Voraussetzung dafür ist die Kenntnis des Zusammenhangs zwischen den Werten an Messstellen und den Werten an anderen Stellen.

Dabei können Messnetze in zwei Typen unterteilt werden:

- Flächennetze, charakterisiert durch physiografische Einheiten, z.B. Wattgebiete oder Einzugsgebiete im Tidebinnengebiet;
- lineare Netze, charakterisiert durch (Tide-) Flüsse.

Flächennetze erfordern eine zweidimensionale Interpolation; lineare Netze kommen mit eindimensionaler Interpolation aus.

Eine Zuweisung der Messstellen zu einem Messnetztyp kann vorteilhaft sein. SHAW hat die Empfehlungen zur Bezeichnung von Messstationen der WMO in folgender Weise beschrieben (SHAW 1983):

- Primärstationen sind permanent arbeitende Messstationen, u.a. für Wasserstands- und Durchflussmessungen, deren Aufzeichnungen möglichst komplett und genau sein sollen.
- Sekundärstationen bleiben solange installiert, bis eine zufriedenstellende Korrelation zu den Primärstationen gefunden ist. Der Messumfang in einer Sekundärstation sollte so groß wie möglich sein; Beobachtungen sowie Aufzeichnungen sollten dem Standard von Primärstationen entsprechen.
- Spezialstationen erfüllen besondere Anforderungen. Sie sind meist einem speziellen Projekt zugeordnet. Sie können je nach Er-

fordernis permanente oder temporäre Stationen sein und Primär- bzw. Sekundärstationen zugeordnet sein (JENSEN 1996).

Bei der Verteilung der Stationen werden bereits weitreichende Entscheidungen über die späteren Nutzungsmöglichkeiten des Netzes getroffen. Auch wenn diese noch nicht in allen Einzelheiten bekannt sind, sollte der Versuch unternommen werden, dies in einem frühen Stadium zu berücksichtigen. Eine Messnetzgestaltung nach dem Motto „Je mehr desto besser“ führt nicht nur zu Fehlinvestitionen. Bei einem zu dichten Netz können zudem personelle Probleme bei der Gewinnung und Auswertung der umfangreichen Datenmengen auftreten. Unterdimensionierte Messnetze bergen hingegen die Gefahr, fehlerhafte Grundlagen für wasserwirtschaftliche Planungen zu liefern und Fehldimensionierungen von Bauwerken zu bewirken.

Aufgrund des komplexen und teilweise uneinheitlichen Aufgabengebiets kann bei der Gestaltung von Pegelnetzen nicht ein allgemein gültiger Katalog von Kriterien aufgestellt werden. Es sind von Fall zu Fall individuelle Entscheidungen zu treffen, bei denen gleichwohl auf einen Katalog allgemeiner Ansätze und Forderungen zurückgegriffen werden kann (JENSEN 1996), wie er nachfolgend aufgeführt ist. Für jede Aufgabe innerhalb der in Kap. 2 genannten Aufgabengebiete sind individuell die Kriterien auszuwählen, die zur Gestaltung des Messnetzes optimal erscheinen. Ein pauschales Vorgehen führt meist zu schlechteren Lösungen.

Da Kriterien von der gesellschaftlichen Entwicklung und von Naturwissenschaft und Technik abhängen, sind die Messnetze von Zeit zu Zeit zu überprüfen und anzupassen.

## 4.1 Planungsrahmen

Der Planungsrahmen eines Messnetzes umfasst die Definition von Ziel und Zweck des Projekts, die allgemeinen und speziellen Vorgaben, den Zeitrahmen und die zu erwartenden Kosten und Ergebnisse. Auch sind Prioritäten zu setzen: Die Wartungsfreundlichkeit darf z.B. nicht die hydrologischen Forderungen dominieren.

Die Forderung nach der Formulierung von Ziel und Zweck des Messnetzes erscheint sowohl einfach als selbstverständlich, doch weisen ge-

genwärtige Messnetze gerade an dieser Stelle deutliche Defizite auf. Die Folgen solcher Mängel können den Nutzen des ganzen Netzes in Frage stellen (JENSEN 1996).

#### 4.1.1 Vorgaben

Vorgaben lassen sich in politische und administrative Forderungen unterteilen.

Politische wie sozio-ökonomische Forderungen geben die Richtung des Messwesens insgesamt vor und haben somit häufig direkten Einfluss auf die Netzgestaltung. Pegelnetze werden heute fast ausschließlich staatlich betrieben. Sie unterstehen somit direkt dem politischen Willen. Im Vordergrund politischen Handelns steht die Umsetzung des gesellschaftlichen Auftrags. Eine wichtige Voraussetzung für den Projekterfolg ist seine Einbettung in diesen Auftrag.

##### Gesetze, Normen, Richtlinien

Wassergesetze schaffen die rechtlichen, Normen die technischen Grundlagen für den Umgang des Menschen mit dem Wasser. Richtlinien geben konkrete Handlungsanweisungen. Landeswassergesetze bilden z.B. die rechtliche Basis für den Betrieb gewässerkundlicher Messanlagen; die DIN 4049 definiert Begriffe der Hydrologie und die Pegelvorschrift der LAWA gibt Hinweise zur sachgerechten Errichtung und zum Betrieb von Pegeln. Sie alle haben normativen Charakter und damit Vorrang vor allen anderen Kriterien. Folgende Bundesgesetze bilden den Rahmen für Messnetzkonzepte: Wasserhaushaltsgesetz, Bundesnaturschutzgesetz, Bundeswasserstraßengesetz, Seeaufgabengesetz. Auf Seiten der Küstenländer sind es: Wassergesetze, Deichgesetze, Naturschutzgesetze und Nationalparkgesetze. Sie alle sind nicht nur im nationalen Kontext zu sehen, sondern müssen übergeordneten europäischen Rahmenrichtlinien angepasst werden.

##### Spezielle Vorgaben

sind aufgabenspezifisch und orientieren sich oft an orts- und verwaltungspolitischen Vorgaben. Sie sind häufig von ökonomischen Annahmen geprägt, die mit den hydrologischen Notwendigkeiten in Einklang zu bringen sind.

#### 4.1.2 Zeitrahmen

Umfang und Ausgestaltung eines Messnetzes sind auch abhängig von der Zeit, die bis zur er-

warteten Ablieferung des Ergebnisses zur Verfügung steht. Ein kurzzeitiges Netz wird anders geplant werden müssen als ein Netz, das über Jahrzehnte bestehen und alle Eventualitäten abdecken soll.

Verschiedene Aufgaben erfordern lange Reihen, (z.B. Analyse der Tidedynamik, Ermittlung von Überflutungsdauern, Wasserstandsvorhersage), andere können unmittelbar nach Abarbeitung der Aufgabe beendet werden (z.B. Baggerungen, Sturmflutwarn- und Meldedienste).

Die zeitliche Begrenzung von Messaktionen ist häufig an bestimmte Maßnahmen, wie z.B. Beweissicherungen oder Planungsräume gebunden. Besondere örtliche Verhältnisse können ebenfalls zeitliche Begrenzungen zur Folge haben: Die im Watt aufgestellten Pegel werden z.B. zum Schutz vor Zerstörung durch Eisgang in den Wintermonaten eingezogen. Die entstandene Lücke muss mit geeigneten Methoden aus den Aufzeichnungen der in Betrieb gebliebenen Pegel geschlossen, die dabei auftretenden Unsicherheiten hingenommen werden (LAWA 1998). Die so gewonnenen Daten bieten dennoch einen höheren Erkenntnisgewinn als Abschätzungen.

#### 4.1.3 Kosten

Kosten und Nutzen sind unter Berücksichtigung der Nachteile zu quantifizieren, die aus einer abgeschätzten oder ungenauen Datenlage entstehen. Einzubeziehen ist auch eine Würdigung der zu erwartenden und hinnehmbaren Messungenauigkeiten, da dadurch der Kostenaufwand u.U. erheblich beeinflusst wird.

Die Kosten-Nutzen-Analyse zeigt Schwächen oder Stärken eines Messnetzes in monetärer Hinsicht auf. Sie ist aufwändig zu erstellen, da alle Kosten, die ein Messnetz direkt oder indirekt verursacht, und der Nutzen, der aus einem Netz zu gewinnen ist, analysiert werden müssen. Sie gibt aber Sicherheit gegenüber politischer Begehrlichkeit und kann u.U. Personal- und Messkapazität sowie Kompetenz sichern. Die Nachteile durch den Verlust von Informationen durch Messfehler oder falsche Standorte sind monetär zu bewerten.

#### 4.1.4 Ergebnisse

Schon zu Beginn einer Netzgestaltung sollte überschläglich das erwartete Ergebnis genannt werden. Es dient der Orientierung bei der konkreten Ausgestaltung des Netzes. Es soll auch Aussagen über die Erwartungen an den Zeitpunkt und den Umfang der Verfügbarkeit sowie den Genauigkeitsgrad der Daten enthalten. Details werden im Kapitel 4.3 genannt.

#### 4.2 Raumbezogene Gegebenheiten

Astronomische, topografische, meteorologische und anthropogene Gegebenheiten prägen das hydrologische Geschehen überwiegend und in vielfältiger Weise. Sie können kontinuierliche, schleichende oder sprunghafte Veränderungen in unterschiedlich langen Zeitspannen verursachen. Auf die Gestaltung eines Pegelnetzes haben sie stets einen großen Einfluss, der aber kaum erschöpfend beschrieben werden kann, da er meist zu komplex ist. Es gilt daher, für die zu betrachtenden physiografischen Einheiten (z.B. Wattgerinne, Tidebecken, Platen, Tideflüsse, Bodden) Kenngrößen zu erfassen, die die Gegebenheiten des Einzugs- oder Einflussgebietes möglichst klar erkennbar wiedergeben. Dazu zählen u.a. Angaben zur

- Topografie:
  - Lage und Begrenzungen der physiografischen Einheiten
  - Anlagen aus Wasserwirtschaft, Siedlungen, Verkehr (z.B. Sperrwerke, Siele, Schöpfwerke, Schleusen)
  - Sperr- und Sondergebiete
- Morphologie:
  - Oberflächengestalt der physiografischen Einheiten
  - Quer- und Längsprofile
  - Gebiete mit starker Sediment- und Schwebstoffführung, Rinnenverlagerungen
- Hydrologie:
  - Erfasste und mögliche Extremwasserstände
  - Strömungs- und Seegangsexponierte Bereiche
  - Salzgehalt, Wassertemperatur
- Meteorologie:
  - Windrichtung und -stärke
  - Luftdruck
  - Niederschlag
  - Lufttemperatur.

#### 4.3 Messstellen

Als Messstelle wird die Einheit von Geber, Datenübertragung und –aufzeichnung verstanden.

##### 4.3.1 Vorhandene Messstellen

Häufig sind im Plangebiet oder dessen Umfeld bereits Messstellen vorhanden, die es zunächst zu berücksichtigen gilt. Dazu ist jede Messstelle qualitativ zu bewerten. Wichtige Faktoren sind Zuverlässigkeit und Dauer, sowie die in den nachfolgenden Kapiteln aufgeführten Kriterien.

##### 4.3.2 Um- und Neubau von Messstellen

Die Lage und Gestaltung der Messstelle sollte naturverträglich sein und mit den Betroffenen (z.B. Grund- und Gewässereigentümer, Wasser- und Bodenverband) abgestimmt werden. Baumaßnahmen wie Profilsicherungen, Messstege und Pegelhäuser sind in empfindlichen Gebieten auf das unbedingt Notwendige zu beschränken und rechtzeitig mit den Naturschutzbehörden abzustimmen. Auch die Zuwege sollten hier möglichst kurz sein.

Die Verlegung einer Messstelle sollte möglichst vermieden werden, um die Homogenität langer Reihen nicht zu stören. Das gilt u.U. auch, wenn durch die Einführung neuer Messtechnik ein Standort leichter erreichbar wäre. Ist eine Verlegung unumgänglich, ist über einen ausreichend langen Zeitabschnitt nach der Pegelvorschrift, Stammtext (LAWA 1997) ein paralleler Betrieb an dem neuen und bisherigen Standort erforderlich, um ggf. Veränderungen nachweisen zu können.

Die Anlage muss wartungsfreundlich und leicht zugänglich sein und der Arbeitssicherheit genügen. Der im Küstengebiet starke Bewuchs durch sessile Tiere darf das Messergebnis nicht beeinträchtigen. Die Messeinrichtung darf nicht einfrieren oder durch Eisgang zerstört werden.

Die Lage in der Fläche muss folgendes berücksichtigen:

- Die Messstelle muss für ein größeres Gebiet repräsentativ sein. Bei vielen Untersuchungszielen wird von einem Messnetz allgemein eine flächenbezogene Aussage erwartet. In jedem Fall muss zu den benachbarten Messstellen des Messnetzes eine so

enge Beziehung bestehen, dass eine verlässliche Interpolation der Messwerte möglich ist (LAWA 2000). Es gilt, ein Optimum zwischen der notwendigen Information und der Anzahl der Messstellen zu finden. Zur Bestimmung dieses Optimums können verschiedene Methoden oder Verfahren eingesetzt werden. Sie arbeiten häufig nach dem Prinzip der Minimierung von Informationsverlust und Fehlern. Für das Aufgabenfeld Vorsorge und Wissenschaft sind diese Verfahren mit Vorsicht einzusetzen, da im Bereich der Wissenschaft Grundlagen für Gebiete erarbeitet werden sollen, die noch nicht völlig erforscht sind. Die Messnetze für diese Bereiche unterliegen einem ständigen Wandel, der sich an dem wachsenden Erkenntnisgewinn orientiert.

- Die im Anhang dargestellten Verfahren und Methoden können für die Auswahl eines Pegelstandortes gute Ergebnisse liefern. Allen gemeinsam ist, dass auch sie Messdaten benötigen, wenn auch häufig nur über eine kurze Dauer, dafür aber u.U. in höherer räumlicher Dichte. Außerdem erfordert deren Anwendung meist große Erfahrung und einen bedeutenden Zeitaufwand. Im Einzelnen ist abzuwägen, wie vorzugehen ist.
- Die Dichte des Pegelnetzes ist eine Funktion der erforderlichen Genauigkeit: In Fällen irregulärer Verteilung hydrologischer Variablen wird ein dichteres Pegelnetz erforderlich. Es gilt allerdings auch hier der Grundsatz: Wenige genaue Messwerte sind besser als viele schlechte.
- Bevorzugte Standorte für Pegel sind nach STAROSOLSZKY(1986) Einmündungen wichtiger Nebengewässer, Gewässerverzweigungen sowie Punkte, an denen sich das hydrologische Regime ändert (z.B. Tidegrenze, Mündung ins Meer, Wehre, Sperrwerke, Siele, Schöpfwerke). An Fließgewässern sind Staueinflüsse durch einmündende Gewässer, Schöpfwerke und Düker zu beachten.
- Der Pegel muss Daten liefern, die als repräsentativ sowohl für die Zeitspanne als auch für den Ort gelten können, für die die Messstelle errichtet wird. Dauermessstellen sollten so angelegt werden, dass deren Daten über eine möglichst lange Zeitspanne homogen erfasst werden können.
- Zur Ermittlung der Einträge in die Nord- oder Ostsee sind repräsentative Daten erforderlich.

- In einem Wattstrom oder Tidefluss sollte die auflaufende Tidewelle erfasst werden, da Formänderungen ein Indiz für bedeutende Veränderungen des Wattstrom- oder Flusregimes sind. Dazu sind nach Pegelvorschrift an einem Wattstrom mindestens 3 Pegel erforderlich.

Die Lage am Gewässer muss repräsentativ für den Gewässerabschnitt sein, an dem die Messstelle liegt. Dazu zählen gute Bedingungen für Messen und Beobachten, wie möglichst geringer Abstand zwischen dem Registriergerät und der Stelle am Gewässer, an der gemessen wird, vollständige Erfassbarkeit der Ganglinie für den benötigten Höhenbereich (einschließlich der extremen Wasserstandsbereiche), ggf. geeignete Möglichkeiten zur Durchführung von Durchfluss- und Wellenmessungen, sowie sonstiger Messungen in Reichweite des Pegels, stabile Morphologie (geringe Erosionen oder Anlandungen im Messquerschnitt).

Die Geräteausstattung und das Messverfahren müssen abhängig von Aufgabendefinition und Aussagegenauigkeit gestaltet werden.

Dazu sind Messgeräte mit einer Datenauflösung in Höhe und Zeit zu wählen, die erwarten lassen, dass das angestrebte Ergebnis erreicht werden kann. Handelt es sich dabei um Standardgeräte mit einer höheren Auflösung als erforderlich, ist ggf. die Auflösung festzulegen. Eine unnötig hohe Auflösung kann zu erhöhten Kosten bei Datengewinnung, -auswertung und -vorhaltung führen.

Obwohl einige Aufgaben mit Daten in zeitlich weiter Folge auskommen, ist es zu deren Bestimmung erforderlich, in zeitlich hoher Auflösung zu registrieren. Tabelle 2 gibt auch Auskunft über die Anforderungen an die zeitliche Auflösung der Kennwerte. Allen gemeinsam ist die Forderung, dass der Zeitpunkt des Beginns der Messungen, deren zeitliche Auflösung und Dauer so zu wählen sind, dass die Ergebnisse eine wissenschaftlichen Ansprüchen genügende Qualität aufweisen, um die Beantwortung der aus den gestellten Aufgaben entstandenen Fragen zu ermöglichen. Wenn dafür an bestimmten Orten Langzeitmessungen fehlen, ist, wenn möglich, die Übertragung der Messergebnisse von Nachbarstationen erforderlich. Gleiches gilt für Aufzeichnungen, die Lücken aufweisen.

	Schifffahrt	Ver- messung	Küsten- schutz	Entwässerung		Ökologie	Vorsorge
				tideaußen	tidebinnen		
Handlungs- rahmen	SeeStrG WStrG SeeAufgG	WStrG SeeAufgG LWG	LWG	LWG	LWG	LNatG	LWG
Aufgabe (Fehler- toleranz)	10 cm	5 cm	1 cm	1 cm	1 cm	5 cm	1 cm
Ausrichtung des Netzes	Linie	Linie / Fläche	Linie / Fläche	Punkt	Fläche	Fläche	Fläche
Verfahren	Optimie- rungsverf.	Optimie- rungsverf.	Optimie- rungsverf.	Num. Modell	N-A- Modell	Num. Modell	Aufgaben- abhängig
Überschnei- den mit ande- ren Aufgaben	Prüfen	Prüfen	Prüfen	Prüfen	Prüfen	Prüfen	Prüfen
örtliche Kriterien							
Gebiets- repräsentanz	Wasser- straße	Wasser- straße, Wattflä- che, Küs- tenlinie	sandige Küste, Watten, Vorländer	Aussentief	Fläche des ober- irdischen Einzugs- gebietes	Rinnen, Watten, Vorländer, Bodden	Küsten und Tideflüsse
Aufgaben- repräsentanz	Funk- daten, Netz- anschluss	temporär, Funk	lange Reihe: Funk für Sturmflut- warn- dienst		lange Reihe		lange Reihe: unfallsi- cher, langlebig, Netz- anschluss
Orts- repräsentanz	hohe Auf- lösung, volle Tide	hohe Auf- lösung, Mittel- bis HW	hohe Auf- lösung, volle Tide	hohe Auf- lösung, örtliches Tnw–Thw	günstige Lage am Gewässer	aufgaben- abhängig	hohe Auf- lösung, volle Tide
Zeit- repräsentanz	10- Jahres- zeitreihe	aktuell	lange Reihe	aktuell	aktuell, lange Reihe	aufgaben- abhängig	lange Reihe
Wartungs- freundlichkeit	hoch	gering	hoch	mittel	hoch	mittel	hoch

Tabelle 2: Checkliste Gestaltung von Pegelnetzen

Die Art und Weise der Messung ist grundsätzlich so einzurichten, dass sie aufgabengerecht erfolgt. Daher muss sich die Genauigkeit der Messung nach der Aufgabe mit der höchsten Anforderung richten. Bei hohen Anforderungen an die Messgenauigkeit bestehen grundsätzliche Schwierigkeiten, die zudem von solchen überlagert werden, die für das Küstengebiet spezifisch sind.

Bei Dauermessstellen ist höchste Qualität mit langer Lebensdauer, geringem Wartungsaufwand, ausreichender zeitlicher Auflösung bei geringem Ausfall und hoher Registrierrichtigkeit zu fordern. Die Geräteausstattung muss möglichst kompatibel mit der vorherigen und nachfolgenden Generation sein und möglichst sicher

gegen Vandalismus und Diebstahl. Sie muss weiterhin den besonderen Bedingungen der Küste gewachsen sein (sichere Funktion auch bei Bewuchs, Korrosion, Verschmutzung, hoher Luftfeuchtigkeit, Seegang, Sturm, Gischt), langzeitstabil und netzautark mit geringer Leistungsaufnahme sein und durch technisch/organisatorische Maßnahmen Sicherheiten gegen Datenverlust bieten.

Ein küstenspezifisches Problem ist der nahezu ständig unruhige Wasserspiegel, der ein Ablesen der Pegellatte mit hohen Genauigkeitsanforderungen wesentlich erschwert. Daher ist bei Wellenschlag eine Kalibrierung der Messgeräte mithilfe eines Rohres oder eines Beckens mit gedämpftem Wasserstand anzustreben.

Zu den allgemeinen Schwierigkeiten zählen die Herstellung einer genauen Höhenreferenz, das Konstanthalten der Sollhöhenunterschiede zwischen dem Pegelmessgerät und den Pegelfestpunkten (LAWA 1997, Anlage C) sowie die gleichbleibende Qualität der Messung. Während den erstgenannten Problemen durch eine sorgfältige Einmessung und durch bauliche Maßnahmen begegnet werden kann, kann letztgenanntes Problem am besten durch Einrichtung eines redundanten Messsystems behoben werden. In dem Moment, in dem die beiden Messungen um mehr als einen zulässigen Wert voneinander abweichen, kann z.B. ein Alarm dafür sorgen, dass keine falschen Messungen verwertet werden. Idealerweise sind die Messungen des redundanten Systems voneinander unabhängig und werden mit unterschiedlichen Messverfahren durchgeführt.

Das Preis-/Leistungsverhältnis muss stimmen. Dazu zählen auch die Betriebskosten. Eine visuelle Fernkontrolle per digitaler Bildübertragung mit redundanter Datengewinnung kann durch Verlängerung der Beobachtungsintervalle deutlich kostensenkend wirken. Die Fehlerakzeptanz sowie die Festlegung der Betriebsdauer bei temporären Messstellen kann ebenso wirken.

### 4.3.3 Daten

Die Qualität und Verfügbarkeit der Daten hat einen bedeutenden Einfluss auf die Netzgestaltung. Daten müssen zu dem Zeitpunkt, in dem Umfang und mit der Genauigkeit bereitgestellt werden, wie sie benötigt werden. Technik und Verfahrensabläufe sind darauf auszurichten. Eine Bedarfsanalyse muss ergeben, welche Messstellen mit Datenfernübertragung auszurüsten sind. Definierter Genauigkeitsgrad und Zugriffsintervalle müssen so festgelegt werden, dass die vorgegebenen Fehlertoleranzen (s. Tab. 2) nicht überschritten werden.

Die Aussagegenauigkeit steht eng mit der Aufgabendefinition in Verbindung. Sie unterscheidet sich von der Messgenauigkeit durch zusätzliche Aussagen zur Genauigkeit der Extrapolationen in Zeit, Höhe und Fläche. Sie muss auch Angaben machen, wie mit Inhomogenitäten der Messdaten umzugehen ist. Die Unterstützung durch Modellberechnungen oder statistische Verfahren ist hilfreich. Durch Messungenauigkeiten sowie Annahmen bei der Auswertung sind nach MOSS, THOMAS und GILROY (1985) trotz vieljähriger Datenerhebungen nur wenige

hydrologische Berechnungen mit absoluter Sicherheit möglich. Es wird trotz perfekter Messtechnik immer ein Rest an Unsicherheit und Ungenauigkeit erhalten bleiben. Darauf verweisen auch MCCUEN und SNYDER (1986) mit ihrer These, dass *Hydrologie im Wesentlichen eine Wissenschaft ist, die auf wenig perfekten Beobachtungen in einem komplexen und manchmal un einheitlichen Gebiet beruht*. Um aus seiner Arbeit den größten Nutzen zu gewinnen, muss der Hydrologe die Unsicherheiten reduzieren, wobei er einerseits das Verständnis für hydrologische Prozesse vertieft, andererseits Daten sammelt. Dabei haben Daten an sich keinen Wert; erst durch ihre Einbindung in Strukturen und Prozesse entsteht eine Information, die die Grundlage für Entscheidungen bilden kann (nach MOSS, THOMAS und GILROY 1985).

## 5. Umsetzung

Die Gestaltung eines Pegelnetzes enthält vier Hauptbestandteile (in Anlehnung an STAROSOLSZKY 1986):

1. Erstellung eines Konzeptes mit den Kenngrößen des Einzugs- bzw. Einflussgebiets<sup>2</sup>, einschl. Lage der Messstellen, mit zu messenden Parametern, sowie Häufigkeit und Dauer der Messungen
2. Auswahl der technischen Ausrüstung einschl. Datenübermittlung und –auswertung
3. Aufbau und Inbetriebnahme (Kalibrierung)
4. Überprüfung der Standorte anhand der Ergebnisse

Daraus lässt sich erkennen, dass die Optimierung eines Pegelnetzes ein iterativer Prozess ist, der sowohl für den Neubau als auch für die Optimierung bestehender Netze gilt. Dabei sollten alle verfügbaren Informationen genutzt werden und die künftigen Standorte mit anderen Pegelnetzen möglichst koordiniert werden.

Der Aufwand für die Optimierung eines Pegelnetzes mag zunächst in keinem Verhältnis zum Nutzen zu stehen; führt man sich aber die Kosten für den Betrieb und die Auswertung und Haltung der Daten vor Augen, gewinnt die Betrachtung meist schnell eine andere Dimension.

<sup>2</sup>

als Einflussgebiet wird hier die Fläche definiert, von der noch hydrologische Auswirkungen auf den Pegel zu erwarten sind



## 5.1 Pegelnetzüberprüfung

1. Zusammenstellen der Vorgaben (Kap. 4.1)
  - allgemein: politisch, sozio-ökonomisch, Gesetze, Normen, Richtlinien
  - speziell: örtliche Vorgaben (Flächennutzungsplan, Bebauungsplan, Richtlinien für den Gewässerausbau), Finanzrahmen, erwartete Ergebnisse
2. Beschreiben des gesamten Aufgabenspektrums und des Messumfangs, einschl. Umsetzbarkeit (Kap. 2)
  - qualitativ, quantitativ
  - methodisch, technisch
  - Zeit
  - Kosten
  - Nutzen
3. Beschreiben der Rollen und Ziele aller beteiligten Organisationen und Institutionen zur Verbesserung der Koordination und Integration der Aufgabenfelder (Kap. 2)
4. Bewerten der verschiedenen Aufgabenfelder
  - strukturell
  - methodisch
5. Zusammenstellen der Kenngrößen des Einzugs- bzw. Einflussgebietes (Kap. 4.2). Dazu zählen insbesondere:
  - Größe, Topografie des Einzugs- bzw. Einflussgebietes, Anlagen aus Wasserwirtschaft, Siedlungen, Verkehr, Sperr- und Sondergebiete, Quer- und Längsschnitte im Einflussgebiet (bei Pegeln an der offenen Küste Darstellung des Seegrundes), morphologisch aktive Gebiete (Rinnenverlagerungen, hohe Sediment- und Schwebstofffrachten), zu erwartende extreme Wasserstände und Abflüsse, strömungs- und seegangsexponierte Gebiete, mittlere Windstärke und -richtung, Salzgehalt, Wassertemperatur
  - Zusammenstellung der Daten vorhandener Pegel: Lage der Messstelle: naturverträglich, wartungsfreundlich, arbeitsicher, gebietsrepräsentativ (Fläche, Örtlichkeit, Einträge in Nord- oder Ostsee, Auflaufen der Tidewelle), Berücksichtigung der Einmündung bedeutender Gewässer, Verzweigungen, Änderungen des hydrologischen Regimes, Beschreibung der Geräteausstattung: zielführende Datenauflösung, wartungsfreundlich, langlebig, langzeitstabil, kompatibel zu Vorgängern und Nachfolgern, unempfindlich gegen Vandalismus, biogenen Bewuchs, hohe Luftfeuchtigkeit, niedrige Temperaturen, kurzzeitige Überflutung, Sturm, Gischt, netzautark mit geringer Leistungsaufnahme, bedienerfreundliche Datenübergabe, Hilfsvorrichtung zum Ablesen des Wasserstandes bei ständig unruhigem Wasserspiegel, Zweck des Betriebs (Kap. 4.3), vorhandene und zu gewinnende Daten, deren Bereitstellung und Genauigkeit, Länge der Reihe (Kap. 4.3.3)
6. Prüfen der Homogenität und Repräsentativität der Messreihen in Zeit und Raum mithilfe geeigneter Verfahren (Anhang A1)
7. Überprüfen des vorhandenen Netzes auf Erfüllung des ursprünglichen Zwecks und der inhaltlichen und qualitätsmäßigen Ansprüche. Eventuell Integration in andere Aufgabe
8. Definition der gewünschten Ergebnisgenauigkeit nach Durchführen einer Kosten/Nutzen-Analyse
9. Festlegen der maßgebenden Kriterien für ein optimales Pegelnetz. Bei gleichrangigen kollidierenden Forderungen: Setzen von Prioritäten
10. Bewerten jeder Messstelle
11. Optimieren des Pegelnetzes durch die Annahme des versuchsweisen Weglassens oder Hinzufügens einzelner Messstellen und Überprüfen der Ergebnisgenauigkeit mithilfe geeigneter Verfahren unter Abschätzung der Fehlerquote für die Ermittlung von Daten an nicht durch Messung belegten Stellen, ggf. Unterteilung in Flächen- und Liniennetz und Zuweisung zu einem Messnetztyp. Setzen von Prioritäten
12. Abschätzen der Auswirkungen des Betriebes auf den personellen Aufwand. Ermittlung und Bewertung der Kosten (Kap. 4.1.3)
13. Konkrete Bauplanung, eventuell Unterteilung in kurz- und langfristige Planungsziele
14. Festlegen einer Zeitspanne von mehreren Monaten oder Jahren, nach der der Vorgang zu wiederholen ist
15. Protokollierung des Handlungsablaufs und seiner Besonderheiten

## 5.2 Entwurf eines neuen Pegelnetzes

1. wie Punkt 3 und 4 aus Kap. 5.1
2. Entwurf eines neuen Pegelnetzes mithilfe geeigneter Verfahren (Anhang A1) und unter Verwendung der Erkenntnisse aus ähnlichen Netzen
3. Punkt 7 und 8 wie in Kap. 5.1

## 6. Zusammenfassung

Die vorliegenden Hinweise stellen die verschiedenen Gesichtspunkte vor, die bei der Gestaltung oder Überprüfung von Pegelnetzen zu berücksichtigen sind. Diese Gesichtspunkte sind sehr facettenreich und umfassen die verschiedensten Randbedingungen und Aspekte, z.B. wirtschaftliche und politische Vorgaben, Vorschriften, Regelwerke sowie Gesetzeswerke. Dabei sind die verschiedenen Aufgabenfelder mit den Projekten, für welche die Pegelnetze benötigt werden, von maßgebender Bedeutung.

Jede Aufgabe zur Pegelnetzgestaltung oder -überprüfung erfordert eine individuelle Bearbeitung unter den gegebenen Randbedingungen und Prämissen; meistens sind die vorhandenen Pegelnetze zu berücksichtigen, die oft historisch gewachsen sind. Die Pegelnetzgestaltung ist somit keine Standardaufgabe. Sie erfordert Erfahrungen und Kenntnisse auf dem Gebiet der Küstenhydrologie sowie der Örtlichkeit, des Systemverhaltens und der angewandten Methoden und Verfahren, von denen einige im Anhang vorgestellt werden.

Die sich weiter entwickelnde Mess- und Auswertetechnik wird eine Überprüfung der gefundenen Netze in regelmäßigen Abständen erfordern.

## 7. Literatur

BOEHLICH, M.J.; FRITZSCH, R.: Untersuchungen zur optimalen Lage der Pegel in einem Tidefluss mit Anwendung auf die Tideelbe. Hydrographische Nachrichten Nr. 60, Deutsche Hydrographische Gesellschaft e.V., 2001.

CHRISTIANSEN, H.; HAAR, S.; SCHRÖDER, G.: Pegel im Hamburger Elbeabschnitt – Empfehlungen zur Veränderung des Pegelnetzes. Gewässerkundliche Studie Nr. 9; Strom- und Hafenbau, Hamburg, Juli 1989.

DE RONDE, J.: persönliche Mitteilung an C. Blasi, 1995.

Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 4049-1 bis 4049-3 Hydrologie. Beuth Verlag, Berlin Teil 1 1990, Teil 2 1992, Teil 3 1994.

HARTUNG, I.; ELPET, B.: Multivariate Statistik. Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik, 2. Auflage. Oldenbourg-Verlag, München, 1986.

HOLDER, R. L.: Multiple Regression in Hydrology. Institute of Hydrology, Wallingford, UK, 1985.

JENSEN, J.: Literaturstudie zur Vorbereitung eines Kriterienkatalogs für Meßnetze im Küstengebiet. Siegen, 1996 (Nachweis: KFKI-Bibliothek, <http://kfkf.baw.de>).

LANGE, O.: Entwicklung des Pegelwesens. In: Gedenkschrift der Bundesanstalt für Gewässerkunde zur 50-jährigen Wiederkehr der Gründung der Preussischen Landesanstalt für Gewässerkunde. Besondere Mitteilungen zum Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch Nr. 4, Herausgeber: Bundesanstalt für Gewässerkunde, Bielefeld, 1952.

LAWA Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Arbeitskreis Pegel, Pegelvorschrift, 4. Auflage, herausgegeben von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser und dem Bundesministerium für Verkehr, Kulturbuch Verlag, Berlin, 1997.

LAWA Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Arbeitskreis „Küstenpegel“: Empfehlungen zum Schließen von Lücken in Wasserstandsganglinien des Tideaußengebietes. Kulturbuchverlag, Berlin, 1998.

LAWA Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Arbeitskreis Optimierung des Grundwasserdienstes: Empfehlungen zur Optimierung des Grundwasserdienstes (quantitativ). Kulturbuch Verlag, Berlin und Bonn, 1999a.

LAWA Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Arbeitskreis Optimierung des Grundwasserdienstes: Empfehlungen zur Konfiguration von Messnetzen sowie zu Bau und Betrieb von Grundwassermessstellen (qualitativ). Kulturbuch Verlag, Berlin und Bonn, 1999b.

LAWA Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Ständiger Ausschuss Daten: Leitlinien eines zukünftigen Mess- und Beobachtungsdienstes. Schwerin, 2000 (download: [www.lawa.de](http://www.lawa.de)).

LAWA Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Unterausschuss Pegelvorschrift: Gewässerkundliche Pegel. Aufgaben, Anforderungen, Abgrenzungen. Schwerin, 2001 (download: [www.lawa.de](http://www.lawa.de)).

---

MCCUEN, R.; SNYDER, W.: Hydrologic Modeling: Statistical Methods and Applications. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1986.

MOSS, M.E.; THOMAS, W.O.; GILROY, E.J.: The Evaluation of Hydrological Data Networks. In: Facets of Hydrology, Vol.II, Edt. by J.C. Rodda, Chichester, 1985.

RIDGLEY, M.A.: Raising Dikes for Rising Seas: Optimization Models for Holland. In: International Workshop „Sea Level Changes and their Consequences for Hydrology and Water Management“, 19-23 April 1993, Noordwijkerhout, Netherland, 1993.

SHAW, E.: Hydrology in Practice. Berkshire, England, 1983.

STAROSOLSZKY, O.: Design and Operation of Hydrologic Networks. In: Applied Surface Hydrology, Water Resources Publications, Colorado, 1986.

WMO: Technical Reports in Hydrology and Water Resources No. 50. International Workshop on Network Design Practices. World Meteorological Organisation, WMO/TD-No. 671, Genf, 1991.

## Anhang: Methoden

Zur Messnetzgestaltung eignen sich u.a. folgende Verfahren:

- Statistische Methoden
- Optimierungsverfahren
- Numerische Modellierung
- empirische Abschätzungen

Neben der Regressions- und Korrelationsanalyse gibt es weitere Verfahren, die sowohl statistische und mathematische Methoden als auch die Regionalisierung einbeziehen. Aus dem breiten Spektrum der statistischen Methoden werden hier nur einige Verfahren gezeigt.

### A 1 Statistische Methoden

#### A 1.1 Regressions- und Korrelationsanalyse

Die Regression dient der Bestimmung eines funktionalen Zusammenhangs zwischen einem Merkmal Y (Regressand) und einem Merkmal X (Regressor), z. B. dem Nachweis des funktionalen Zusammenhangs zweier benachbarter Pegel. Werden mehrere Regressoren berücksichtigt, so spricht man von multipler Regression (HOLDER 1985). Die Regressionsanalyse hat als Ziel:

- den Nachweis einer bestehenden Beziehung,
- das Schätzen der Parameter eines bestehenden funktionalen Zusammenhangs,
- das Erkennen eines funktionalen Zusammenhangs oder
- das Prognostizieren des Regressanden Y bei gegebenen Regressoren.

Die Korrelation ist ein Maß für die Abhängigkeit eines Merkmals X von dem Merkmal Y, z.B. der Wasserstandsdaten zweier benachbarter Pegel. Die multiple Korrelation ist definiert als die betragsmäßig größte einfache Korrelation zwischen dem Merkmal X und einer Linearkombination  $a_1Y_1 + a_2Y_2 + \dots + a_pY_p$  der Merkmale  $Y_1, \dots, Y_p$  mit beliebigen Gewichten  $a_1, \dots, a_p$ . Die Regressionsanalyse dagegen erbringt z. B. den Nachweis des funktionalen Zusammenhangs zweier oder mehrerer benachbarter Pegel.

Die Anwendung der Regressions- und Korrelationsanalyse erfordert die Lage der Pegel inner-

halb einer hydrografischen Einheit (z.B. Wattgerinne, Bodden).

Aus einem möglichst großen Datenkollektiv werden die Tageswerte von je zwei Pegeln miteinander korreliert bzw. die Regression aufgestellt. Alle Pegel eines hydrologisch homogenen Gebietes oder Flussabschnittes werden so miteinander in Beziehung gesetzt (multiple Regression) und die Pearsonschen Koeffizienten berechnet. Dabei wird deutlich, dass es zwischen den verschiedenen möglichen, einfachen Korrelationen deutliche Unterschiede im Grad des Zusammenhanges gibt. Durch Hinzufügen und Wegnehmen einzelner Pegel lässt sich der Grad des Zusammenhanges innerhalb einer hydrologischen Einheit so verändern, dass das Messnetz unter Berücksichtigung der Ansprüche des jeweiligen Nutzers oder von Regelwerken und Vorschriften optimiert wird. Die genannte Methode wurde zur Überprüfung und Optimierung von bestehenden Pegelnetzen unter anderem von der Freien und Hansestadt Hamburg (CHRISTIANSEN et al. 1989), sowie von der niederländischen Wasserwirtschaftsverwaltung (DE RONDE 1995) eingesetzt.

Die beträchtlichen Schwankungen der Einflussfaktoren machen es notwendig, den Gebrauch von Regressions- und Korrelationsrechnungen ausführlich zu planen, sinnvoll einzusetzen und die Ergebnisse kritisch zu würdigen. Dies gilt insbesondere, da alle statistischen Verfahren die physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Wasserstandsverläufe nicht abbilden, sondern nur Rückschlüsse auf sie zulassen.

Statistische Methoden erfordern vielfach sehr lange Reihen. Sie haben gegenüber den übrigen Verfahren den Vorteil der einfachen und übersichtlichen Handhabbarkeit. Ihre Aussagen sind kritisch zu werten, da gute Ergebnisse nicht unbedingt richtig und zielführend sind.

#### Beispiel 1:

Die Ostseepegel Zingst und Neuendorf sind 27 km voneinander entfernt. Ihre Wasserstände lassen sich im Allgemeinen durch lineare Regression verknüpfen und weisen dabei einen Korrelationskoeffizienten von  $R=0,97$  auf.

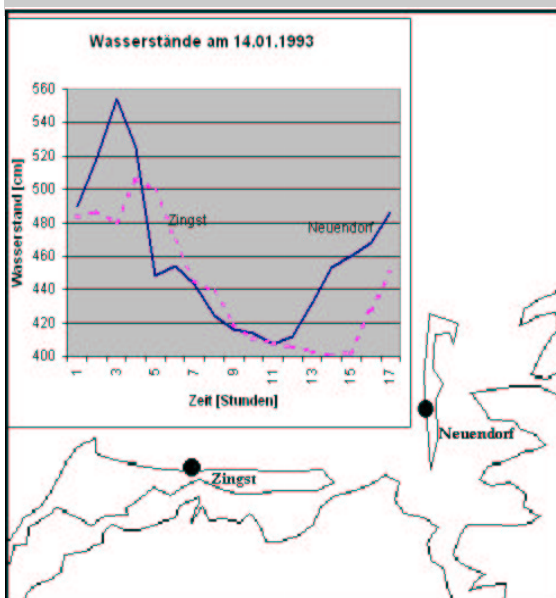


Abb. A1: Wasserstandsverlauf in einer Sturmsituation an zwei benachbarten Pegeln

Abb. A 1 zeigt jedoch die Unterschiede der Wasserstandsganglinien bei einem Sturm aus westlicher Richtung. Für die ersten 6 Stunden des 14.01.93 beträgt der Korrelationskoeffizient nur  $R = 0,43$  und signalisiert lineare Unabhängigkeit. Schon die Vergrößerung des Messintervalls auf den ganzen Tag bewirkt einen Anstieg von  $R$  auf  $0,73$ . Mit einem Messintervall von 14 Tagen erhält man  $R=0,91$  und für den Monat Januar stellt sich mit  $R=0,97$  wieder der o.g. typische Korrelationskoeffizient ein.

Das Beispiel zeigt, wie die Interpretation der Statistik von der Zweckbestimmung des Pegels abhängt. Aus gewässerkundlicher Sicht kann man auf einen dieser Pegel verzichten, nicht jedoch, wenn es auf seine Funktion als Hochwassermeldepegel ankommt.

#### Beispiel 2:

Bei bestimmten Windrichtungen und Oberwasserführungen löst sich der statistische Zusammenhang zwischen zwei Pegeln zunehmend auf, wie Abb. A 2 und A 3 zeigen. An der Oste wirkt sich der Oberwassereinfluss sowie die Schließung des Sperrwerkes, in der Elbe das lokale Windfeld zwischen den etwa 100 km entfernten Pegeln St. Pauli und Cuxhaven aus.

## A 1.2 Wahrscheinlichkeitstheorie

Zur Berücksichtigung der Unsicherheiten hydrologischer Phänomene, die immer in einem gewissen Maß vorhanden sind, wird die Wahr-

scheinlichkeitstheorie verwendet. Ohne diese Unsicherheiten wären ohne entsprechende Messnetze eindeutige hydrologische Bedingungen vorhersagbar.

Der direkte Nutzen der Wahrscheinlichkeitstheorie liegt in der Anwendung auf spezielle hydrologische Phänomene wie das Schätzen extremer Ereignisse, z.B. Sturmflutwasserstände.

## A 1.3 Stichprobentheorie

Die Stichprobentheorie hat das Ziel, Schlüsse aus einer „gezogenen Stichprobe“ auf eine interessierende Grundgesamtheit (hydrologische Einheit) zu ziehen, die aber nur aus der exakten Kenntnis aller Elemente der Gesamtheit zu gewinnen sind.

Die folgende Gleichung wird in der Stichprobentheorie am meisten verwendet und eignet sich am besten zur Erläuterung der Theorie.

$$\sigma_{x_m}^2 = \sigma_x^2 / N$$

$\sigma_{x_m}^2$  ist die Varianz der Mittelwerte von  $N$  völlig frei gewählten Beobachtungen der Variablen  $x$ .  $\sigma_x^2$  ist die Varianz von allen möglichen Beobachtungen von  $x$ . Wenn  $\sigma_{x_m}^2$  sehr groß ist, dann ist sehr viel Variabilität in  $x$ . Für den Fall  $\sigma_{x_m}^2$  gleich Null, ist  $x$  konstant. In der Hydrologie bedeutet dies, dass die Varianz der mittleren höchsten jährlichen Hochwasserstände an einem Pegel, der seit  $N$  Jahren betrieben wird, mit der Zunahme der Beobachtungsjahre kleiner wird. Die obengenannte Gleichung ist eine Art Schätzung, wie gut der mittlere jährliche Hochwasserstand in Relation zu den jährlichen Hochwasserständen ist. Die Stichprobentheorie bedient sich noch weiterer Gleichungen, in denen nicht nur der Mittelwert eine Rolle spielt. Das Hauptmerkmal der Stichprobentheorie spiegelt sich jedoch bei der Messnetzgestaltung in der Verbesserung der Genauigkeit bei längeren Beobachtungsreihen wieder (HARTUNG & ELPET 1986).

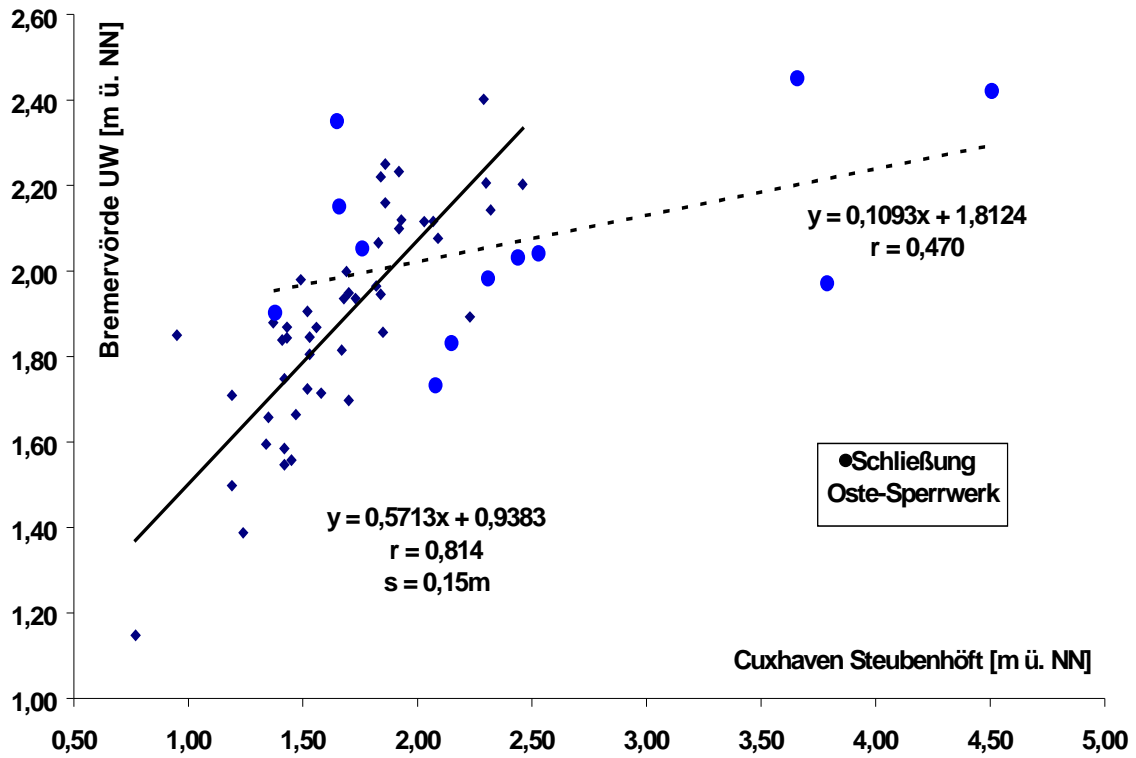


Abb. A2: Regression Tidescheitel Thw Pegel Bremervörde UW und Cuxhaven Steubenhöft

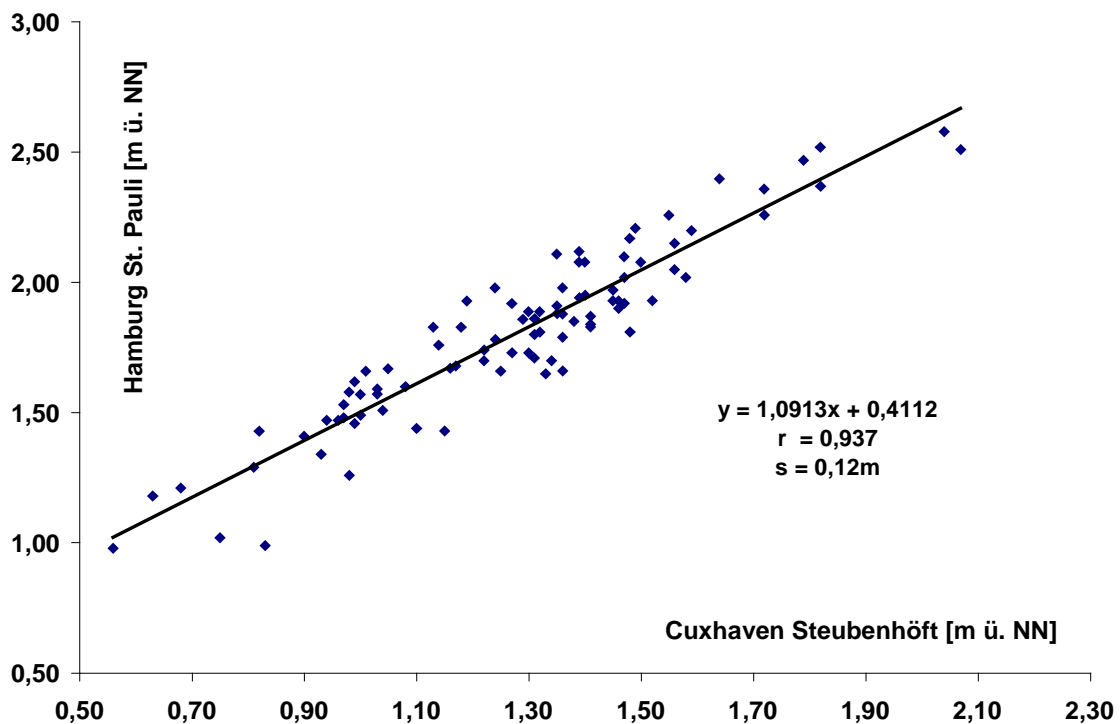


Abb. A3: Regression Tidescheitel Thw Pegel HH St. Pauli und Cuxhaven Steubenhöft

## A 2 Optimierungsverfahren

Unter Optimierungsverfahren versteht man solche Verfahren, mit denen bestimmte Zielstellungen durch rationellen Einsatz der gegebenen Möglichkeiten optimiert werden können. Die Aufgabenstellung, bei der meistens die monetären Aspekte mit einbezogen werden, führt entweder zu einer Maximal- oder Minimalaufgabe, die meist eine Vielzahl von Variablen enthält.

Zur Lösung der Aufgabenstellung, welche genau definiert sein muss, werden mathematische Verfahren, wie dynamische und lineare Programmierung, herangezogen. Mit deren Hilfe können die mathematisch formulierte Aufgabenstellung und die vorher festgelegten Randbedingungen, Zielsetzungen und Anforderungen gelöst werden. Dies erfordert z.B. die Festlegung des Untersuchungsgebiets und, soweit erforderlich, die Einteilung in eine oder mehrere geschlossene physiografische und hydrologische Einheiten, für die eine eindeutige Beziehung zu einem hydrologischen Parameter besteht. Die erforderliche Messgenauigkeit und der damit verbundene Informationsverlust müssen ebenfalls berücksichtigt werden. Der monetäre Aspekt wird meist mit den Investitionskosten, den Betriebskosten und den entstehenden Kosten durch den Informationsverlust bei festgelegter Genauigkeit berücksichtigt. Mit den Investitionskosten wird gleichzeitig die Anzahl der Messstellen und die Zeitspanne für den Betrieb des Messnetzes festgelegt.

Eine solche Optimierung lässt sich an einem Tidefluss z.B. mit den Ergebnissen einer mathematischen Modellierung durchführen, so dass einerseits bei vorgegebener Anzahl der Pegel diese an optimalen Standorten errichtet werden können, andererseits bei vorgegebener Obergrenze des Interpolationsfehlers zwischen den Standorten die Anzahl der Standorte minimiert werden kann. „Optimale Standorte der Pegel“ bedeutet hier, das durch lineare Verbindung der Wasserstandsmesswerte aller Pegel zu einem bestimmten Zeitpunkt der entstehende Fehler zwischen den Pegelstandorten möglichst klein bleibt. Fehler in diesem Sinne ist die Abweichung zwischen den berechneten Werten und den „wahren“ Werten. Die „wahren“ Werte des Wasserstandes zwischen den Pegeln werden hier durch die Ergebnisse eines mathematischen Modells dargestellt, die sowohl räumlich als auch zeitlich in hoher Dichte vorliegen.

Ein Beispiel für derartige Daten ist in Abb. A 4 dargestellt (12 Zeitpunkte).

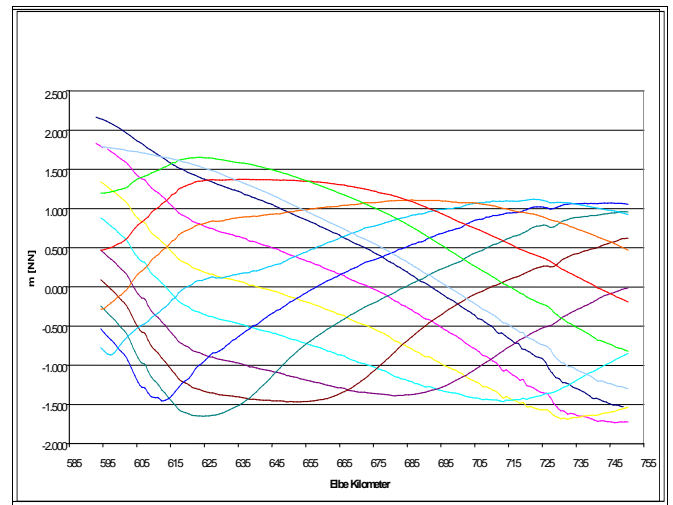


Abb. A 4: Tidewellenlinien aus dem mathematischen Modell der Tideelbe (aus: BOEHLICH & FRITZSCH, 2001)

Bereits mit dem bloßen Auge lässt sich anhand der vorliegenden Tidewellenlinien erkennen, wo die Pegel weiter auseinander stehen dürfen (dort, wo zu allen Zeiten die Kurve nahezu gerade verläuft) und wo sie enger stehen müssen, um überall den gleichen maximalen Fehler zu haben. Mathematisch lässt sich die Krümmung einer Kurve durch die 2. Ableitung derselben nach oben abschätzen. Dort, wo die Krümmung groß ist, ist auch die 2. Ableitung groß.

Mit diesem Ansatz ist der Lösungsweg der Optimierungsaufgabe vorgegeben (BOEHLICH & FRITZSCH, 2001):

1. Bilde von allen Kurven (Tidewellenlinien) die 2. Ableitung
2. Finde für jeden Ort das lokale Maximum der 2. Ableitung aller Kurven
3. Finde eine Methode, die mit der aus 2. erhaltenen Funktion die Pegelstandorte so lokalisiert, das der maximale lokale Fehler zwischen 2 Pegelstandorten entlang des Ästuars für alle Zeitpunkte konstant ist. Wie aus der Variationsrechnung bekannt, ist dann der maximale lokale Fehler minimal.

## A 3 Numerische Modellierung

Seit mehreren Jahrzehnten werden im Küsteningenieurwesen numerische Modelle für die verschiedensten Aufgaben und Probleme eingesetzt. Sie beschreiben die ablaufenden physi-

kalischen Prozesse üblicherweise mit partiellen Differentialgleichungen. Je nach Dimensionalität und Auflösung des Modells erhält man Wasserstand, Strömung und weitere Größen im Berechnungsnetz.

Als Eingangsdaten werden Zeitreihen von z.B. Wasserständen und Zu- bzw. Abflüssen an den sogenannten offenen Rändern des Untersuchungsgebietes vorgegeben. Die Ergebnisse der Modellierung zeigen die flächen- oder linienhafte Verteilung des Wasserstandes für die unterschiedlichsten Tidezeiten.

Nach einer Analyse der Tidekennwerte (Thw, Tnw, Thb usw.) lassen sich diese und der aktuelle Wasserstand mit den in A1 und A2 beschriebenen Verfahren wie Messdaten verwenden, wobei gemessene Daten vorzuziehen sind. Damit lassen sich auch für größere Gebiete repräsentative Standorte ohne aufwändige Messeinsätze finden.

Der Aufwand für Modellerstellung und -betrieb ist im allgemeinen recht groß. Die Methode bietet aber den Vorteil, Wasserstandsdaten an beliebiger Stelle zu nahezu jedem beliebigen Zeitpunkt bei vergleichsweise geringem Messaufwand ermitteln zu können. Auch numerische Modelle benötigen zunächst einige Messdaten, jedoch nicht die Vielzahl wie bei den Methoden nach A1 oder A2.

Zu beachten ist, dass jedes Modell nur für die Zeiten Ergebnisse liefert, für die Randwerte vorliegen und eingesteuert wurden. Diese Randwerte sind oft nur schwer oder in unzureichender Qualität zu beschaffen. Dennoch sind numerische Modelle unter Beachtung ihrer Randbedingungen ein geeignetes Instrument für die Überprüfung und Verfeinerung von Messnetzen, da sie, selbst wenn sie aufgrund mangelhafter Datengrundlage nicht vollständig kalibriert sind, die Strukturen der Wasserstandsverteilung im Untersuchungsgebiet sehr gut beschreiben.

Künftig denkbar wäre hier auch die Einbeziehung der Wasserspiegellagemessung mit Hilfe von Satellitenmessungen. Die Technik dazu ist derzeit allerdings noch nicht ausgereift.

## A 4 Empirische Abschätzungen

Hier werden die Standorte eines Pegelnetzes aus physikalischen Zusammenhängen abgeleitet. Messdaten sind für dieses Vorgehen nicht zwingend erforderlich. Es eignet sich ei-

nerseits für die Konzipierung eines Messnetzes, wenn aus terminlichen oder monetären Gründen keine geeigneten Messdaten heranzuziehen sind, andererseits für die Abschätzung der Daten bestimmter, meist aussergewöhnlicher Ereignisse.

### Beispiel 3:

Die Standorte vorhandener Messstellen sollen auf ihre Relevanz für die Beurteilung einer Hochwassersituation überprüft werden. Nach der linearen Wellentheorie ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Hochwasserwelle

$$c = (g \cdot h)^{1/2}$$

mit  $g$  = Erdbeschleunigung und  $h$  = Wassertiefe. Bei Annahme einer konstanten Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Hochwasserwelle kann ein sinnvoller Abstand  $s$  zweier Pegelstationen mit Hilfe dieser Ausbreitungsgeschwindigkeit wie folgt abgeschätzt werden:

$$s = (g \cdot h)^{1/2} \cdot t$$

Dabei stellt  $t$  die kürzeste Zeitspanne dar, in der im Falle signifikant unterschiedlicher Wasserstände eine operationelle Reaktion erfolgen kann, bzw. eine solche Reaktion erfahrungsgemäß sinnvoll und technisch möglich ist. Diese Zeit liegt meist bei  $t = 1\text{h} = 3600\text{s}$ . Für ein Seegebiet mit 20 m Wassertiefe ergäbe sich damit der Abstand  $s = (9,81\text{ m/s}^2 \cdot 20\text{ m})^{0,5} \cdot 3600\text{ s} = \text{ca. } 50\text{ km}$ . In Gewässern von nur 5 m Tiefe wäre es sinnvoll, die Abstände der Pegel auf 25 km zu reduzieren. Ein Vergleich mit existierenden Messnetzen zeigt, dass diese Faustregel in Gebieten mit hohem Gefährdungspotenzial meist erfüllt ist.

Voraussetzung für eine befriedigende Lösung ist die Richtigkeit der physikalischen Annahmen. Um Gewissheit zu erlangen, sollten diese Ansätze nachträglich durch Messung belegt werden.