

# HYDROGRAPHISCHE NACHRICHTEN

Journal of Applied Hydrography

03/2020

HN 115

*Fokusthema:  
Meeresspiegel-  
anstieg*



Consulting



# Ocean engineering from space into depth

Realise your projects in cooperation with our hydrographic services

**CTDs & SVPs**



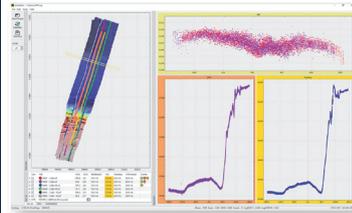
Our hydrography engineers are happy to develop systems tailored exactly to your needs and to provide professional advice and support for setting up your systems and training your staff.

MacArtney Germany benefits from being part of the MacArtney Group and enjoys unlimited access to cutting-edge engineering competences and advanced facilities.

**Acoustic sensors**



**Software**



**Position and motion sensors**



**Integration**



# Liebe Leserinnen und Leser,

gab es eigentlich einen Winter? Jedenfalls keinen, der den Namen verdient hätte. So warm wie in den vergangenen Monaten war es sonst um diese Jahreszeit nie. Manche mögen es für eine Wetterkapriole halten, andere fürchten den Klimakollaps. Jedenfalls trägt der warme Winter dazu bei, den Durchschnitt anzuheben. Das deutet auf ein sich wandelndes Klima hin. Mit den Temperaturen steigt auch der Meeresspiegel, und zwar rascher als bislang berechnet, weil das Eis in den Polarregionen schneller schmilzt, aber auch die Gletscher im Gebirge wegtauen (S. 6 und S. 43).

Bislang gab es die Leugner des Klimawandels und die Klimaaktivisten. Inzwischen sind immer mehr Leute davon überzeugt, dass es zu spät ist, die Klimakatastrophe abzuwenden. Zwischen den Alarmierten und den Verharmlosern tauchen die Resignierten auf – prominent vertreten durch den amerikanischen Autor Jonathan Franzen. Sein Argument: Seit über 30 Jahren schaffen wir es nicht, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu begrenzen. Er glaubt daher nicht, »dass die menschliche Natur sich in absehbarer Zeit ändert«.

Mit diesem Schwerpunktheft versuchen wir, den Meeresspiegelanstieg mit Zahlen und Fakten zu greifen. Noch steigt das Wasser nur um wenige Millimeter pro Jahr (S. 18 und S. 28), doch schon bald wird die Rate rapide zunehmen. Im Verlauf der nächsten Jahrzehnte summiert sich der An-

stieg leicht zu Dezimetern oder gar Metern (S. 10). Eine Größenordnung, die wir dann auch bei der hydrographischen Vermessung bemerken (S. 48).

Bei höherem Wasserstand nagen Seegang und Wellen an den Küsten, die Erosion nimmt deutlich zu. Die Küstenschutzbauwerke werden stärker belastet. Wir müssen uns aber auch darauf einstellen, dass die Sturmfluten höher ausfallen werden (S. 10). Vielleicht gibt es gar Regionen, die sicherheitshalber nicht mehr bewohnt werden können.

Manch einen machen die Berichte über versinkende Inseln und drohende verheerende Fluten regelrecht schwermütig. Schon beschäftigen sich Ärzte mit den Auswirkungen von Klimadepression und Klimaangst. Unser Interviewpartner Dr. Jacobus Hofstede vom Umweltministerium in Kiel blickt im Wissenschaftsgespräch weniger skeptisch in die Zukunft (S. 34). Er ist davon überzeugt, dass wir Menschen uns anpassen werden.

Natürlich gibt es in dieser Ausgabe auch beachtenswerte Fachbeiträge zu echten hydrographischen Themen; die stehen wegen des Fokusthemas diesmal weiter hinten im Heft (ab S. 54).

In Zeiten der akuten Krise haben wir ein besonders dickes Heft für Sie zusammengestellt, das sich mit einer Gefährdung beschäftigt, die genauso real ist wie das Coronavirus, aber viel langsamer auf uns zukommt. Handeln, verzichten und vermeiden müssen wir dennoch jetzt.



Lars Schiller

## Die Fokusthemen der nächsten Ausgaben

Wir haben uns entschieden, die Fokusthemen der nächsten Hefte schon vorab zu verraten, weil wir uns dadurch interessante Fachbeiträge von Ihnen erhoffen. Beiträge, auf die wir selbst nicht gekommen wären, die wir folglich niemals angefragt hätten.

HN 116 (Juni 2020)      **Fernerkundung und Laserbathymetrie**  
Redaktionsschluss: 30. April 2020

HN 117 (Oktober 2020)      **Tiefsee**  
Redaktionsschluss: 15. September 2020

HN 118 (Februar 2021)      **Numerische Modelle in der Hydrographie**  
Redaktionsschluss: 15. Januar 2021

Falls Sie zu einer Ausgabe einen thematisch passenden Fachbeitrag beisteuern können, so melden Sie sich bitte bei der Redaktion oder schicken Sie Ihren Beitrag an: [lars.schiller@dhyg.de](mailto:lars.schiller@dhyg.de). Fachbeiträge zu anderen Themen der Hydrographie sind natürlich weiterhin willkommen. Wir freuen uns auf das Wissen, das Sie mit uns teilen.



# R2SONIC

## Fächerlotsysteme



Sonic 2020



Sonic 2022



Sonic 2024



Sonic 2026

**Beispiellose Leistungsfähigkeit** mit 256 Beams und 1024

- Soundings bei 160° Öffnungswinkel (einstellbar) und einer Pingrate von 60 Hz
- **Breitbandtechnologie** mit Frequenzwahl in Echtzeit zwischen 200 bis 400 kHz sowie 700 kHz optional
- **Dynamisch fokussierende Beams** mit einem max. Öffnungswinkel von 0,5° x 1° bei 400 kHz bzw. 0,3° x 0,6° bei 700 kHz
- **Höchste Auflösung** bei einer Bandbreite von 60 kHz, bzw. 1,25 cm Entfernungsauflösung
- **Kombinierbar** mit externen Sensoren aller gängigen Hersteller
- **Flexibler Einsatz** als vorausschauendes Sonar und der Fächer ist vertikal um bis zu 30° schwenkbar
- **Zusätzliche Funktionen** wie True Backscatter und Daten der Wassersäule
- **MultiSpectral Modus™**, der es den R2Sonic-Systemen ermöglicht, Backscatter Daten mehrerer Frequenzen in einem einzigen Durchlauf zu sammeln

**Nautilus Marine Service GmbH** ist der kompetente Partner in Deutschland für den Vertrieb von R2Sonic Fächerecholotsystemen. Darüber hinaus werden alle relevanten Dienstleistungen wie Installation und Wartung kompletter hydrographischer Vermessungssysteme sowie Schulung und Support für R2Sonic Kunden angeboten.

**R2Sonic** ist ein amerikanischer Hersteller von modernen Fächerecholoten in Breitbandtechnologie. Seit Gründung des Unternehmens im Jahr 2009 wurden weltweit bereits mehr als 1.500 Fächerlote ausgeliefert und demonstrieren so eindrucksvoll die außergewöhnliche Qualität und enorme Zuverlässigkeit dieser Vermessungssysteme.

# HN 115 – Meeresspiegelanstieg



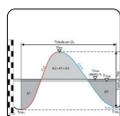
## Meeresspiegelanstieg

- 6 **Nach mir die Sintflut**  
 Oder: Wenn das Meer mehr wird  
 Ein Essay von HARTMUT HEINRICH



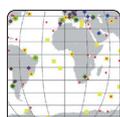
## Küstenschutz

- 10 **Meeresspiegelanstieg und die Konsequenzen für den Küstenschutz in Schleswig-Holstein**  
 Ein Beitrag von THOMAS HIRSCHHÄUSER und JACOBUS HOFSTEDÉ



## Wasserstandsmessungen

- 18 **Retrospektive der Meeresspiegelforschung in Deutschland**  
 Teil 1: Deutsche Nordseeküste  
 Ein Beitrag von JÜRGEN JENSEN



## Erdsystembeobachtung

- 28 **Globale terrestrische geodätische Referenzrahmen als Grundlage der Erdsystembeobachtung**  
 Ein Beitrag von SUSANNE GLASER und HARALD SCHUH



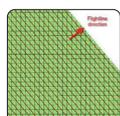
## Wissenschaftsgespräch

- 34 **»Wir Menschen werden uns anpassen – müssen«**  
 JACOBUS HOFSTEDÉ im Interview



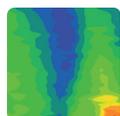
## Gletschermonitoring

- 43 **Bestimmung des Bewegungsverhaltens von Gletschern durch Analyse terrestrischer Bildsequenzen**  
 Ein Beitrag von HANS-GERD MAAS und ELLEN SCHWALBE



## Coastal zone mapping

- 48 **Coastal zone mapping with the world's first airborne multibeam bathymetric lidar mapping system**  
 An article by DON VENTURA



## Transport- und Strömungsprozesse

- 54 **EDoM'18 – ein internationales Untersuchungsprogramm an der Ems**  
 Ein Beitrag von CHRISTIAN MAUSHAKE



## Datenstandard

- 60 **Beiträge der S-100-Welt für Schifffahrtszeichen und Schiffsverkehrsmanagement**  
 Sachstandsbericht und Einschätzung  
 Ein Beitrag von JAN-HENDRIK OLTMANN



## Firmenporträt

- 68 **LiDAR-Systeme für die topo-bathymetrische Vermessung**  
 Ein Beitrag von URSULA RIEGL und MARTIN PFENNIGBAUER

# Nach mir die Sintflut

## Oder: Wenn das Meer mehr wird

Ein Essay von HARTMUT HEINRICH

Haben Sie den Katastrophenfilm »The Day After Tomorrow« gesehen? Er beginnt mit einer Szene, in der zwei Wissenschaftler auf der Flucht vor einem zerbrechenden Eisschelf sind. Ursache: der Klimawandel. Obwohl der restliche Film schräge Science-Fiction war, diese Szene hat sich als sehr realistisch herausgestellt. Die Eisschelfe, besonders diejenigen an den Rändern der Antarktis, werden zerbrechen und damit zukünftig einen erheblichen Einfluss auf die Folgen der Klimaerwärmung haben. Es könnte die gravierendste Folge der Klimaerwärmung werden. Die Schelfe sorgen dafür, dass der Eisabfluss ins Meer gebremst wird. Sind sie zerstört, dann wird es unangenehm auf dem Globus. Der Meeresspiegel würde erheblich schneller ansteigen als es jetzt schon der Fall ist. Woher wissen wir das?

Meeresspiegelanstieg | Eisschelf | Gletscher | Grönland | Antarktis | Eisschildkollaps | Treibhausgase  
sea level rise | ice shelf | glacier | Greenland | Antarctica | ice sheet collapse | greenhouse gases

Have you seen the disaster movie »The Day After Tomorrow«? It begins with a scene in which two scientists are on the run from a shattering ice shelf. The cause: climate change. Although the rest of the movie was weird science fiction, this scene turned out to be very realistic. The ice shelves, especially those on the edges of Antarctica, will break and thus have a significant impact on the consequences of global warming in the future. It could become the most serious consequence of global warming. The ice shelves ensure that the flow of ice into the sea is slowed. If they're destroyed, things are going to get nasty all over the globe. Sea levels would rise much faster than they are now. How do we know that?

### Autor

Prof. h.c. Dr. Hartmut Heinrich ist Meeresgeologe und war bis 2017 im BSH Referatsleiter mit den Arbeitsschwerpunkten Ozeanographie, Umwelt und Klimawandel. Nach ihm sind die Heinrich-Ereignisse benannt. Er ist weiter in der Forschung tätig und arbeitet als selbstständiger Consultant (10°E maritime consulting).

10e-maritime-consulting@web.de

### Vergangenes als Schlüssel zur Zukunft

Die Geschichte beginnt in den Achtzigerjahren im damaligen Deutschen Hydrographischen Institut (DHI) im Rahmen einer Risikoanalyse zur Atom-müllversenkung im Nordostatlantik. Dort wurde aus 4000 Meter Wassertiefe zufällig ein Stein mit einem dort nicht erwarteten Metalloxydbelag geborgen. Nachfolgende Sedimentkernuntersuchungen ergaben, dass während der letzten Eiszeit die großen Eisschilde von Nordamerika, Grönland und Nordwesteuropa sechs Mal abrupt kollabiert waren, was zu heftigen globalen Klima-veränderungen geführt hatte. Der Meeresspiegel stieg dabei um viele Meter, weil riesige Mengen von Eis ins Meer geschüttet wurden. Ursache war vermutlich eine (natürliche) Erwärmung des Nordatlantiks um einige Zehntelgrade. Abrupt heißt, die Kollapse und daraus resultierende Klima-veränderungen begannen innerhalb von Jahrzehnten und dauerten einige Jahrhunderte. So wie es im Moment aussieht, wird die Ozeaner-wärmung, die wir gerade durch den Ausstoß von Treibhausgasen befeuern, genau das in Grönland und vor allem in der Antarktis verursachen. Denn die obersten 2000 Meter der Ozeane sind bereits warm genug, teilweise sogar wärmer als damals in den Eiszeiten, als die Kollapse ausgelöst wurden.

Was genau passiert dort? Die riesigen Eisschelfe, wie die in der Amundsenbucht, im Weddell-Meer oder im Rossmeer, wirken wie ein Ventil, das ein schnelles Gleiten der Gletscher ins Meer verhindert (im Englischen wird dieser Effekt *buttressing* genannt). Das Schelfeis schwimmt und kann über 200 Meter mächtig sein. Die Grenze, an der ein Gletscher beginnt aufzuschwimmen, die sogenannte Grounding Line, liegt in der Regel zwischen 500 und 1000 Meter Wassertiefe. Vor den Eisschelfen der Antarktis treibt genau in dieser Tiefe das »Zirkumpolare Tiefenwasser«, das sich bereits beträchtlich erwärmt hat. Dieses Wasser strömt mittlerweile unter die Eisschelfe, greift die Grounding Lines an und schmilzt die Basis der Eisschelfe (siehe [Abb. 1](#)). Einige Schelfe verlieren pro Jahr dadurch etliche Meter an Dicke und die Grounding Line weicht in Richtung Kontinentinneres zurück. Irgendwann wird der Punkt erreicht sein, wo diese schwimmenden Eisbarrieren zu dünn werden, plötzlich instabil werden und dadurch zerbrechen. Ihr Bremseffekt auf die dahinter liegenden Gletscher geht dadurch verloren. Die Gletscher der Westantarktis, die in die Amundsenbucht laufen, gelten jetzt schon als unbremst. Noch sind die Eisschelfe vorhanden, sie werden aber schwächer. Fast monatlich berichtet die Wissenschaft von neu entdeckten Problemfällen,

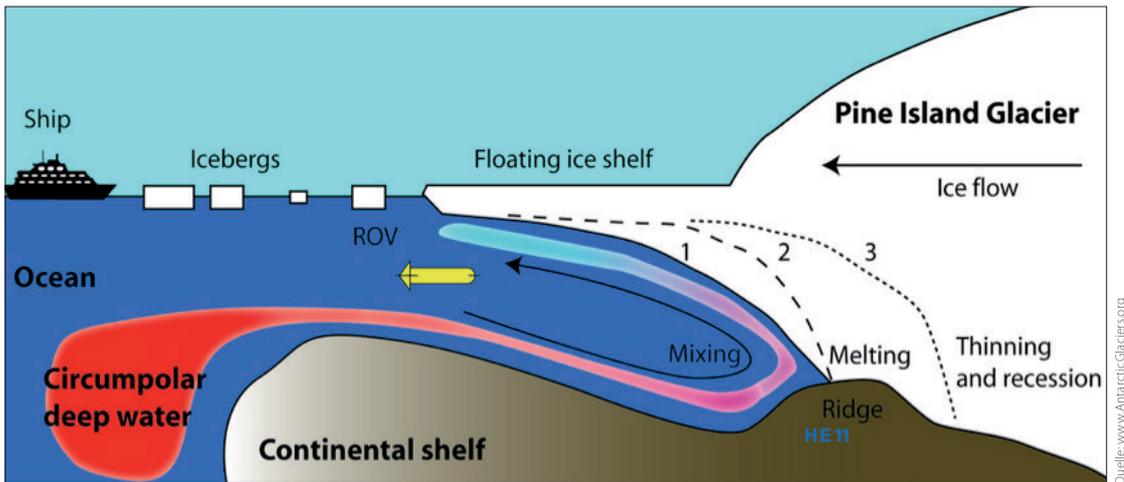


Abb. 1: Die Basis der Eisschelfe schmilzt

selbst in der Ostantarktis, die lange Zeit als unangreifbar galt.

Grönland unterscheidet sich von der Antarktis. Letztere liegt vollständig südlich 70° S und wird von kaltem Oberflächenwasser umströmt, das auch die Atmosphäre kühlt. Grönlands südliche Spitze liegt bei 60° N und damit 1000 Kilometer näher zum Äquator. Durch den südlich passierenden warmen Nordatlantikstrom und die Westwindzone können sich warme Luftmassen über der Insel ausbreiten. In immer größeren Gebieten liegen die sommerlichen Lufttemperaturen oberhalb des Gefrierpunktes. Jeden Sommer bilden sich riesige Schmelzwasserseen auf dem Eis, die entweder direkt ins Meer entwässern oder über Spalten, sogenannte Gletschermühlen, im Eis verschwinden. Erreicht das Wasser die Basis der Gletscher, so vermischt es sich mit dem Gesteinsmehl und lässt den Gletscher schneller gleiten. Der grönländische Eispanzer wird also durch Abschmelzen der Oberfläche und schnelleres Gleiten kleiner. Die abnehmende Höhe des Schilds führt dazu, dass die Oberfläche mit der Zeit in immer wärmere Luftschichten kommt, das Schrumpfen sich also beschleunigt (Abb. 2). Zurzeit sind es fast 300 Milliarden Tonnen pro Jahr, entsprechend einem Volumen von fast 300 km<sup>3</sup>. Tendenz steigend.

Die Basis der beiden Eisschilde liegt wegen deren hoher Last zum Teil bis zu 3000 Meter unter dem Meeresspiegel. Der grönländische Untergrund zum Beispiel hat die Form einer von Süd nach Nord gerichteten Schüssel mit hohen Rändern. Die Form entspricht dem Bottnischen Meerbusen, der während der letzten Eiszeit das Zentrum des skandinavischen Eisschildes bildete, mit dem norwegisch-schwedischem Gebirgszug als westlichem Schüsselrand. Eine Heimtücke lauert in diesen übertiefen Gebieten unter dem Eis: riesige Seen. Diese existieren, weil sich die Wärme aus dem Erdinneren unter den Gletschern staut und deren Basis anschmilzt. Sollte warmes Meerwasser

in diese eindringen, dann beschleunigt das zusätzlich den Kollaps der darüber liegenden Eismassen.

Die Klimaforschung ist noch nicht verlässlich in der Lage, die Prozessvielfalt der Eisschilde realistisch in ihre Modelle einzubauen. Demzufolge können sie auch noch nicht verlässlich projizieren, ob und wann es zum Zerbrechen von Eisschelfen und dadurch zum abrupten Anstieg des Meeresspiegels kommen wird. Und vor allen Dingen, wie hoch in welchen Zeiträumen der Meeresspiegel steigen wird. Die geologische Geschichte lehrt aber, dass es – irgendwann – passieren wird. Es ist bereits genug Wärme im Ozean. In Bezug auf Werte für den Meeresspiegelanstieg, auch bis zum Ende des Jahrhunderts, ist also noch ein reichliches Potenzial nach oben. Der Eisverlust der beiden großen Eisschilde wird in Zukunft der entscheidende Faktor beim Anstieg des Meeresspiegels sein und die wärmebedingte Ausdehnung des Wassers deutlich überflügeln, ebenso den Eintrag aus den Gebirgsgletschern.

### Wenn das Meer mehr wird

Allerdings wird der Meeresspiegel nicht gleichmäßig und überall gleich hoch ansteigen. Es hängt



Foto: Hartmut Heinrich

Abb. 2: Gletscherrückzug auf 72° N, Scoresby Sund, Ostgrönland

davon ab, wie sich die Wind- und Strömungssysteme ändern werden und ob Grönland oder die Antarktis schneller Masse verlieren werden, wenn die Konzentration der Treibhausgase weiter ungebremst steigt. Der differenzierte Massenverlust ist von Bedeutung, weil er regionale Auswirkungen hat. Ursache ist, dass Massen eine Anziehungskraft besitzen. Wenn also Grönland schneller und mehr Eis verliert als die Antarktis, dann wird deren Anziehungskraft relativ zu der von Grönland stärker. Das heißt, Ozeanwasser wird infolgedessen stärker von Süden angezogen und dort steigt der Meeresspiegel höher als im Norden. Der Unterschied kann viele Meter groß sein. Man beobachtet dieses schon in etwas kleinerem Maßstab an der nordostamerikanischen Küste, wo der Meeresspiegel etwas schneller steigt, weil Grönland Eismasse verliert.

Der Meeresspiegelanstieg ist das gravierendste Problem der Klimaerwärmung, weil er Verlust von Lebensraum bedeutet. Nicht nur Siedlungsfläche, sondern auch Wirtschaftsfläche geht verloren. Ob Lebensweisen auf Schiffen, wie zum Beispiel in dem Film »Waterworld« von 1995, realistisch sein werden, wage ich zu bezweifeln. Mehrere zehn, wenn nicht hunderte von Millionen Menschen werden landeinwärts ziehen müssen. Mit Sicherheit wird Migration ein riesiges Thema werden. Migration war zu allen Zeiten ein Begleitumstand von Klimaveränderungen. Während der mit den Eisschildkollapsen verbundenen Klimaveränderungen der letzten Eiszeit kam es zu Auswanderungswellen des Homo sapiens aus Afrika, weil es dort zu trocken wurde. Gleichzeitig führte in Europa und Asien die drastische Kälte des Nordatlantiks zum Aussterben des Neandertalers.

Die heutigen Risikogebiete sind die flachen und weitestgehend ungesicherten Küsten auf allen Kontinenten. Besonders betroffen sein werden Asien und Afrika, weil die Küsten sehr lang sind und die Staaten es sich auch nicht leisten können, sie zu schützen. Zusätzlich gibt es riesige Flussmündungen, die zu schützen technisch unmöglich ist. Beispiele sind die dicht besiedelten Deltas und Ästuare des Ganges/Brahmaputra, des Irawadi, Mekong, Jangtse und Hwang Ho in Asien, des Nil und des Niger in Afrika, das Mississippi-Delta in Nordamerika, in denen hunderte von Millionen Menschen leben. Siedlungsraum, landwirtschaftliche Flächen, Industrieanlagen und Infrastruktur werden dort verloren gehen. Nicht zu vergessen die unzähligen Mülldeponien, die dem Meeresspiegelanstieg zum Opfer fallen und zu einer ungeheuerlichen Meeresverschmutzung führen werden.

Wird die scheinbar gut geschützte kontinental-europäische Nordseeküste ein Problem bekommen? Gegenwärtig versucht man, durch Deichverstärkung dem bis zum Ende des Jahrhunderts durch das Intergovernmental Panel on Climate

Change (IPCC) projizierten Anstieg des Meeresspiegels entgegenzuwirken. Allerdings ist dieses nicht einfach, weil unter anderem Klei, der für den Erosionsschutz wichtig ist, mittlerweile knapp ist. Des Weiteren bedingt eine Erhöhung des Deiches eine Verbreiterung von dessen Grundfläche. Allerdings reichen manchmal Besiedlungen bis an den Deichfuß, sodass privater Grund betroffen ist. Ebenso sind aus Gründen des Naturschutzes Ausgleichsmaßnahmen erforderlich. Allerdings ist eine Deicherhöhung schon rein technisch betrachtet nicht unbedingt eine dauerhafte Lösung. Wenn nämlich selbst das Niedrigwasser permanent am Deich anliegt, droht eine ständige Durchfeuchtung sowie Unterspülung durch Qualmwasser und damit eine Schwächung des Deichs. Sollte einmal ein Deich brechen, dann gehen wohl weite Flächen für immer verloren.

Mit einem steigenden Meeresspiegel entstehen auch Probleme bei der Entwässerung von Marschengebieten. Bis auf Elbe und Weser sind an der deutschen Küste alle Fließgewässer staugeregelt, das heißt, sie sind mit Sperrwerken versehen; auch die Nebengewässer der beiden großen Flüsse. Solange Abschnitte der Gezeitenphasen niedriger als die Pegel dieser Gewässer sind, fließt das Wasser natürlich ab. Mit steigendem Wasserstand aber reduziert sich die Entwässerungskapazität, bis irgendwann permanent gepumpt werden muss, wenn man die anliegenden Gebiete trocken und nutzbar halten will. Dieses ist auch relevant für die schiffahrtlich genutzten Gewässer, insbesondere für den Nord-Ostsee-Kanal. Neben seiner Nutzung für die Schifffahrt ist er auch Vorfluter für die obere Eider. Von den durchschnittlich 600 Millionen m<sup>3</sup> Flusswasser pro Jahr werden ca. 90 % über die Schleuse Brunsbüttel in die Elbe gegeben. Mit steigendem Meeresspiegel, der auch in Elbe und Ostsee hineingreift, wird in der Zukunft eine natürliche Entwässerung des Kanals nicht mehr möglich sein. Eine Abschätzung des BSH und der BfG ergab, dass in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts die Probleme der hydrologischen Bewirtschaftung stark zunehmen werden und dadurch die Nutzbarkeit des Kanals beeinträchtigen werden kann. Dieses könnte zu einem Problem für den Hamburger Hafen werden, wenn er deswegen seine Funktion als Umschlagplatz vom Atlantik nach der Ostsee und umgekehrt verlieren sollte. Hier muss schnellstmöglich Vorsorge getroffen werden.

### Wann wird das Meer mehr?

Ein entscheidendes Problem bei der Klimaerwärmung ist der Faktor Zeit. Wie schnell werden Veränderungen sein, wann tritt eine Komplikation ein? Die Klimawissenschaften versuchen das mit Hilfe sehr komplizierter physikalisch-mathematischer Modellrechnungen zu prognostizieren. Modelle sind Versuche, das Zusammenspiel von

Charakteristiken der Natur qualitativ und quantitativ zu beschreiben. Dieses ist hochkompliziert und komplex. Zum Beispiel müssten die Energieaustausche zwischen Ozean und Atmosphäre oder zwischen Biosphäre und Atmosphäre erstens vollständig bekannt sein. Zweitens können diese nur pauschal verwendet werden, weil sie regional und zeitlich sehr variabel sind. Und je genauer man projizieren möchte, desto detaillierter muss man räumlich und zeitlich auflösen, wozu ungeheure Rechenleistungen notwendig sind, die aber nicht existieren. Ebenso ist unsicher, wie sich der Ausstoß von Treibhausgasen entwickeln wird, der die wichtigste Eingangsgröße in den Klimamodellen ist. Da die Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Dunkeln liegt, verwendet man bestimmte Emissionsszenarien als Ausgang für die zukünftige Entwicklung der Erderwärmung. Allerdings, ein Klimamodell kann niemals die Natur korrekt abbilden, und weil die Modelle der Forschergruppen zum Teil auch unterschiedlich sind, fasst man die Ergebnisse der Berechnungen wissenschaftlich (angeblich) plausibler Modelle in sogenannten Bandbreiten zusammen. Daraus entstehen dann zum Beispiel Angaben, dass der Meeresspiegel bei einem bestimmten Treibhausgasszenario bis zum Ende des Jahrhunderts zwischen x und y Zentimeter steigen würde. Da alle Ergebnisse zwischen x und y, die zu dieser Bandbreite beigetragen haben, als gleich wahrscheinlich anzusehen sind, können auch alle Werte der Bandbreite eintreten. Leider wird immer nur der Mittelwert oder Median kommuniziert, an dem man sich dann auch in der Anpassung orientiert. Der gesamte Umfang möglicher Risiken wird dabei ignoriert. Weil die Wissenschaft dauernd neue Erkenntnisse über die klimarelevanten Faktoren gewinnt, die in die Modellierungen einfließen, verändern sich auch von IPCC-Bericht zu IPCC-Bericht die Ergebnisse. Nichts kann also als fix angesehen werden. Dementsprechend stelle ich hier auch keine Werte für die deutschen Küsten vor, da diese sich ständig ändern. Im Hintergrund lauert immer die Gewissheit, die aus der geologischen Vergangenheit zu erfahren ist: Wenn das Meer wärmer als heute werden wird, dann steigt der Meeresspiegel über Jahrtausende

an, sicher um mehr als 10 Meter. Und falls die Eisschilde kollabieren sollten, steigt er auch schneller als bislang erwartet.

### Schaffen wir das?

Alles hängt davon ab, ob die Weltbevölkerung in der Lage ist, sich in ihrem Energiebedarf einzuschränken sowie den Ausstoß der Treibhausgase zu reduzieren, und inwieweit sie bereit ist, die notwendigen Änderungen umzusetzen. Technische Anpassungen sind sicherlich bis zu einem gewissen Grad möglich, aber zu bezweifeln ist, dass Menschen ihre Lebensweisen deutlich ändern wollen oder können. Zu groß sind das Bewahren von oder das Streben nach Wohlstand, der sich aus dem Produkt von Ressourcenverbrauch, Energieverbrauch und Mobilität ergibt. Nicht zu vergessen ist, dass jeder Technologiewechsel mit einem Bedarf an zusätzlichen Rohstoffen und Energie verbunden ist. Manche Bergbaugesellschaften stoßen pro Jahr so viel CO<sub>2</sub> aus wie mittelgroße Industrieländer. Wenn das alles also mit Hilfe fossiler Brennstoffe geschieht, was unvermeidlich ist, wird der Teufel mit dem Beelzebub ausgetrieben. Gegenwärtig gehören China und Indien mit zu den größten Emittenten von Treibhausgasen. Man wird die Menschen dort nicht zum Wohlstandsverzicht überreden können, damit wir in den Industrieländern unser Verhalten nicht ändern müssen. Die jüngste Klimakonferenz in Madrid hat gezeigt, dass manche Länder auch nicht willens sind, ihren Ausstoß von Treibhausgasen zu reduzieren. Die Einhaltung des Paris-Abkommens könnte so eine hübsche Illusion werden. Dieses darf aber auf keinen Fall Anlass zur Resignation geben. Die verbleibende Zeit muss so rasch wie möglich genutzt werden, um die Auswirkungen der Erwärmung auf die wachsende Menschheit wenigstens zu mildern.

Es darf nicht vergessen werden, dass auch eine um 1,5° C wärmere Atmosphäre über Jahrhunderte den Ozean aufheizen wird. Da Wasser eine sehr große Wärmekapazität hat, wird diese Wärme auch über Jahrtausende auf die Eisschilde, den Meeresspiegel und das Klima überhaupt einwirken. Sicher ist: Das Meer wird mehr werden. //

---

#### Weitere Informationen

3sat: »Steigende Pegel – wenn das Wasser kommt«

<https://www.3sat.de/programm?airtimeDate=2019-12-12>

Uni Hamburg: »Zukunft der Meeresspiegel«

<https://www.cen.uni-hamburg.de/about-cen/news/12-news-2019/2019-12-10-broschuere-meeresspiegel.html>

IPCC-Bericht: »The Ocean and the Cryosphere in a Changing Climate«

[https://report.ipcc.ch/srocc/pdf/SROCC\\_FinalDraft\\_FullReport.pdf](https://report.ipcc.ch/srocc/pdf/SROCC_FinalDraft_FullReport.pdf)

# Meeresspiegelanstieg und die Konsequenzen für den Küstenschutz in Schleswig-Holstein

Ein Beitrag von THOMAS HIRSCHHÄUSER und JACOBUS HOFSTEDÉ

Schleswig-Holsteins Küstengebiete sind besonders vom Klimawandel betroffen. Die Folgen des für die nächsten Jahrzehnte vermuteten Meeresspiegelanstiegs sind ernst. Um den künftig höher ausfallenden Sturmflutwasserständen trotzen zu können, hat das Land verschiedene Klimaanpassungsstrategien entwickelt – für das Wattenmeer, für die Ostseeküste, für die Halligen und für die Niederungen. Eine wichtige Maßnahme dabei ist der Klimadeich. Darüber hinaus wurde eine Klimakulisse ermittelt, um aufzuzeigen, welche Räume von künftigen Hochwasserständen betroffen sind.

Meeresspiegelanstieg | Küstenschutz | Klimadeich | Bemessungswasserstand | Klimakulisse  
sea-level rise | coastal protection | climate dike | design water level | climate change scenery

Schleswig-Holstein's coastal areas are particularly affected by climate change. The consequences of the rise in sea level expected for the coming decades are serious. In order to be able to withstand the higher storm surge water levels in future, the state has developed various climate adaptation strategies – for the Wadden Sea, the Baltic Sea coast, the Hallig islands and the lowlands. An important measure in this context is the climate dike. In addition, a climate change scenery has been identified to show which areas will be affected by future flood levels.

## Autoren

Dr. Thomas Hirschhäuser leitet den Geschäftsbereich 2 »Gewässerkunde, Vorarbeiten Küstenschutz« am LKN.SH in Husum.

Dr. Jacobus Hofstede ist wissenschaftlicher Direktor am Umweltministerium des Landes Schleswig-Holstein (MELUND) in Kiel.

thomas.hirschhaeuser  
@lkn.landsh.de

## Einführung und Veranlassung

Schleswig-Holstein, das Land zwischen den Meeren, ist stark von seinen Küsten geprägt. An keinem Ort ist man mehr als 60 km von einer Küste entfernt. Die bevorzugte Lage führt aber auch zu einer besonderen Herausforderung. Mit seiner etwa 1105 km langen Küstenlinie, zahlreichen Inseln und Halligen sowie den 3987 km<sup>2</sup> großen Küstenniederungen ist Schleswig-Holstein den Angriffen des Meeres in besonderer Weise ausgesetzt. In den potenziell überflutungsgefährdeten Küstenniederungen leben 354 000 Menschen und sind Sachwerte in Höhe von insgesamt 49 Milliarden Euro vorhanden. Diese Zahlen unterstreichen die Bedeutung des Küstenschutzes für Schleswig-Holstein.

Seit 1990 veröffentlicht der Weltklimarat IPCC regelmäßig Berichte mit Projektionen zum globalen Klimawandel; der nächste Bericht ist für 2021 vorgesehen. Im September 2019 wurde ein Sonderbericht über den Ozean und die Kryosphäre in einem sich wandelnden Klima veröffentlicht, unter anderem mit aktualisierten Projektionen zum globalen Meeresspiegelanstieg. Als Fazit aus den IPCC-Berichten ist festzustellen, dass die Folgen des Klimawandels für die schleswig-holsteinischen Küstengebiete ernst sind und nicht unterbewertet werden dürfen. Die Küsten und Küstenschutzanlagen werden künftig erhöhten hydrologischen Belastungen ausgesetzt sein.

Aus diesem Grunde hat Schleswig-Holstein in den letzten Jahrzehnten für verschiedene Räume Klimaanpassungsstrategien entwickelt. Diese werden – nach einer Einführung über den Küstenschutz in Schleswig-Holstein und einer Darstellung der wichtigsten Ergebnisse aus dem IPCC-Sonderbericht von 2019 – nachfolgend vorgestellt.

## Küstenschutz in Schleswig-Holstein Generalplan Küstenschutz

Der Generalplan Küstenschutz beschreibt die staatliche Strategie des Küstenschutzes in Schleswig-Holstein. Er wird in einem ca. zehnjährigen Turnus aktualisiert und an die entsprechenden Gegebenheiten angepasst. Der aktuelle Plan wurde 2012 von der Landesregierung verabschiedet und soll von einem in Bearbeitung befindlichen Plan im Jahr 2022 abgelöst werden.

Grundsätzlich beinhaltet der Küstenschutz sowohl den Küstenhochwasserschutz als Schutz der Niederungsgebiete vor Meeresüberflutungen durch Neubau, Verstärkung und Unterhaltung von Deichen, Halligwarften, Sperrwerken und sonstigen Hochwasserschutzanlagen als auch die Küstensicherung als Sicherung der Küsten gegen Uferrückgang und Erosion durch Neubau, Verstärkung, Unterhaltung von Bühnen, Deckwerken, Sicherungsdämmen, durch Erhalt des Deichvorlandes sowie durch andere Maßnahmen.

Im Generalplan werden die erforderlichen Maßnahmen des Küstenhochwasserschutzes (Landeschutzdeiche, Regionaldeiche, sonstige Küstenschutzanlagen, weitere konstruktive Bauwerke) sowie der Küstensicherung (Sandaufspülungen und sonstige Küstensicherungsmaßnahmen) benannt.

Weiterhin werden Klimaanpassungsstrategien für die Halligen, das Wattenmeer 2100 und die Ostseeküste beschrieben.

### Gewässerkundliches Monitoring

Das gewässerkundliche Messnetz stellt die Grundlage für die Beurteilung des Meeresspiegelanstiegs in Schleswig-Holstein dar. Das Land Schleswig-Holstein betreibt aktuell an der Nordseeküste, den Inseln und Halligen 48, an der Ostseeküste zwei und an der Tidelbe sechs Pegel. Dieses Messnetz wird ergänzt durch das Messnetz der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV), die in Schleswig-Holstein an der Nordseeküste acht Pegel, an der Tidelbe acht Pegel und an der Ostseeküste 14 Pegel betreibt (Abb. 1).

Eine Zusammenstellung der Kennzahlen der bedeutsamsten Pegel findet sich z. B. in dem jährlich erscheinenden Gewässerkundlichen Jahrbuch.

### Bemessungsansätze

Ein wesentliches Element des Küstenschutzes stellt die Festlegung von Bemessungswasserständen

für Küstenhochwasserschutzanlagen dar. Die Festlegung von Bemessungswasserständen basiert auf Referenzwasserständen, die in den turnusmäßig aktualisierten Generalplänen Küstenschutz festgelegt werden und dem Meeresspiegelanstieg Rechnung tragen. Aktuell wird beispielsweise für die Deichbemessung ein 200-jährliches Hochwasser mit Bezug auf 2020 verwendet ( $HW_{200,2020}$ ); in dem im Jahr 2022 aktualisierten Generalplan wird Bezug auf  $HW_{200,2030}$  genommen.

Die Bemessungsansätze müssen also den Trend des Meeresspiegelanstiegs berücksichtigen. Dies geschieht an Nord- und Ostseeküste sowie der Tidelbe durch die Verknüpfung von drei unterschiedlichen Verfahren:

- Ein statistischer Ansatz für die Nord- und Ostseeküste von Schleswig-Holstein (IAWG 2020), bezogen auf das Bezugsjahr 2030. Der aktuelle Meeresspiegelanstieg wird dabei in Form unterschiedlicher Trendansätze berücksichtigt. Wasserstandsquantile der Jährlichkeiten  $T = 25, 50, 100, 200$  werden pegelbezogen bestimmt und anschließend entlang der Küsten Schleswig-Holsteins regionalisiert.
- Ein hydrodynamischer Modellansatz für die Nordseeküste, der numerische 2D-Modellsimulationen, Bias-Korrekturverfahren und eine Vorgehensweise zur Ermittlung von Eintrittswahrscheinlichkeiten extremer Wasserstände

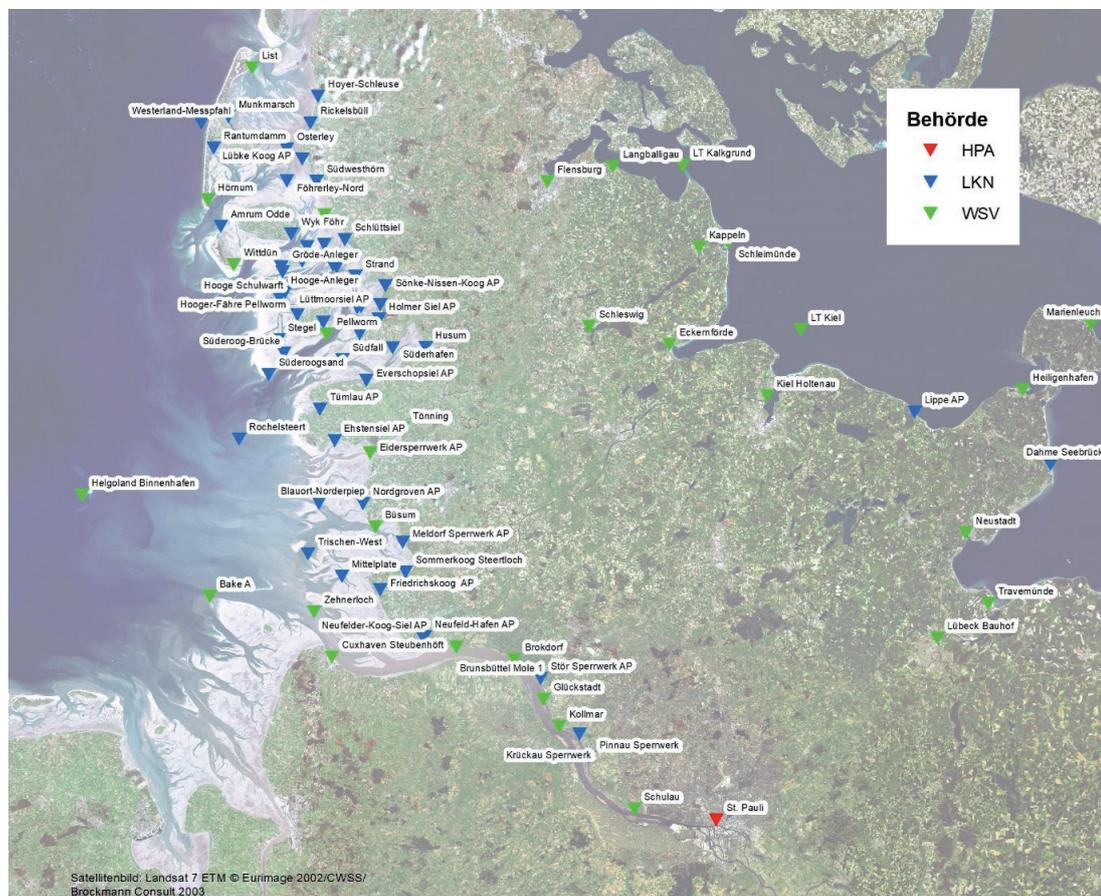


Abb. 1: Pegel im Küstengebiet Schleswig-Holsteins. Blau: Pegel des LKN,SH; grün: Pegel der WSV; rot: Pegel der HPA

unter Berücksichtigung von trendhaften Veränderungen vereint (Arns und Jensen 2019).

- Ein hydrodynamischer Modellansatz für die Tideelbe, der von einem HW<sub>200</sub> am Pegel Cuxhaven ausgeht (BAW 2019). Eine statistische Ermittlung von Referenzwasserständen entlang der Tideelbe analog zu dem Vorgehen an der Nord- und Ostsee ist aufgrund nicht vorhandener homogener Pegelzeitreihen in der Tideelbe nicht möglich. Die umfangreichen anthropogenen Maßnahmen mit ihren Auswirkungen auf Wasserstandsdaten zwischen Cuxhaven und Hamburg lassen die Ermittlung statistisch abgesicherter Wasserstände nicht zu.

Die Festlegung von Referenzwasserständen an Nord- und Ostseeküste sowie der Tideelbe basiert

auf der Verknüpfung der drei beschriebenen Verfahren:

- Für die Nordseeküste ein Hybridansatz, der für die Pegel den statistischen Ansatz gemäß IAWG (2020) verwendet und zur Interpolation auf die Küstenlinie die Ergebnisse des hydrodynamischen Modellansatzes für die Nordseeküste verwendet, da davon auszugehen ist, dass die räumliche Verteilung der Bemessungswasserstände über eine hydrodynamische Modellierung besser vorausgesagt werden kann als über ein Kriging-Interpolationsverfahren.
- Für die Ostseeküste kommt der statistische Ansatz gemäß IAWG (2020) zum Einsatz. Die vergleichsweise geringe Varianz der Sturmflutwasserstände lässt erwarten, dass das angewandte Interpolationsverfahren eine ausreichende Genauigkeit besitzt.
- Für die Tideelbe ein hydrodynamischer Modellansatz. Nur mit diesem Ansatz ist es aufgrund nicht vorhandener homogener Pegelzeitreihen möglich, Bemessungswasserstände zu ermitteln, die den aktuellen Gegebenheiten entsprechen.

Die so ermittelten Wasserstände sind beispielhaft für die nordfriesische Küste in [Abb. 2](#) dargestellt.

### IPCC-Bericht 2019

Der Weltklimarat IPCC veröffentlichte im September 2019 einen Sonderbericht über den Ozean und die Kryosphäre in einem sich wandelnden Klima. Der Bericht stellt den weltweiten wissenschaftlichen Sachstand umfassend, ausgewogen und objektiv dar. Den Projektionen des zukünftigen Meeresspiegelanstiegs liegen Szenarien zugrunde, die auf möglichen zukünftigen Entwicklungen von Bevölkerung und Wirtschaft beruhen. Bund und Küstenländer haben sich darauf verständigt, für Vorsorgezwecke das RCP8.5-Szenario zu verwenden, das die höchste Anpassungsnotwendigkeit mit sich bringt. Nach diesem Szenario liegt die wahrscheinliche Bandbreite des globalen mittleren Meeresspiegelanstiegs Ende dieses Jahrhunderts zwischen 0,61 m und 1,10 m, bei einem Medianwert von 0,84 m. Sturmflutwasserstände an den deutschen Küsten werden nach jetzigem Kenntnisstand entsprechend dem mittleren Meeresspiegelanstieg höher ausfallen. Schließlich wird der Meeresspiegel auch weit über das Jahr 2100 hinaus weiter ansteigen, für das RCP8.5-Szenario insgesamt um mehrere Meter ([Abb. 3](#)).

Als Fazit ist festzustellen, dass die Folgen des Klimawandels für die schleswig-holsteinischen Küstengebiete ernst sind und nicht unterbewertet werden dürfen. Die Küsten und Küstenschutzanlagen werden künftig erhöhten hydrologischen Belastungen ausgesetzt sein.

### Anpassungsstrategien

Aufgrund der in den vorangegangenen Kapiteln geschilderten zu erwartenden Änderungen des

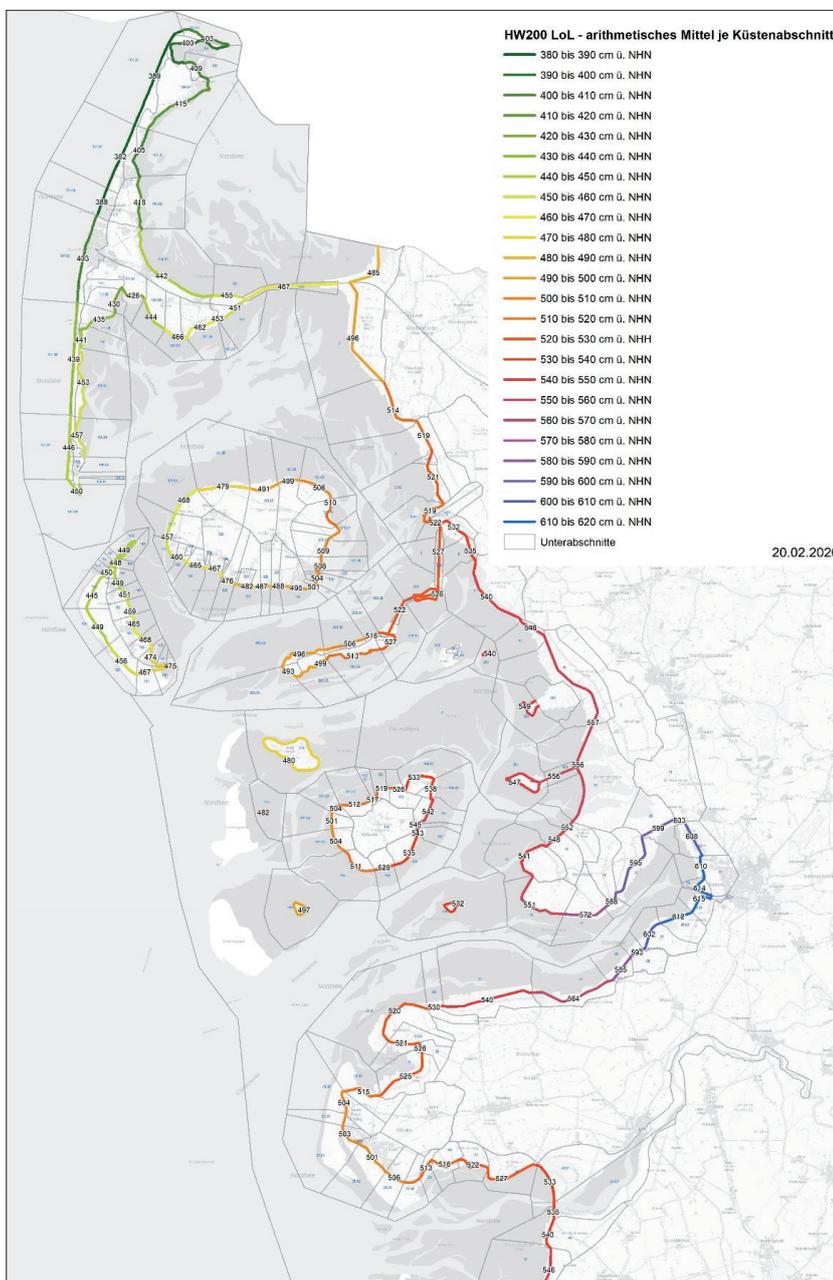


Abb. 2: HW<sub>200</sub> entlang der nordfriesischen Küste

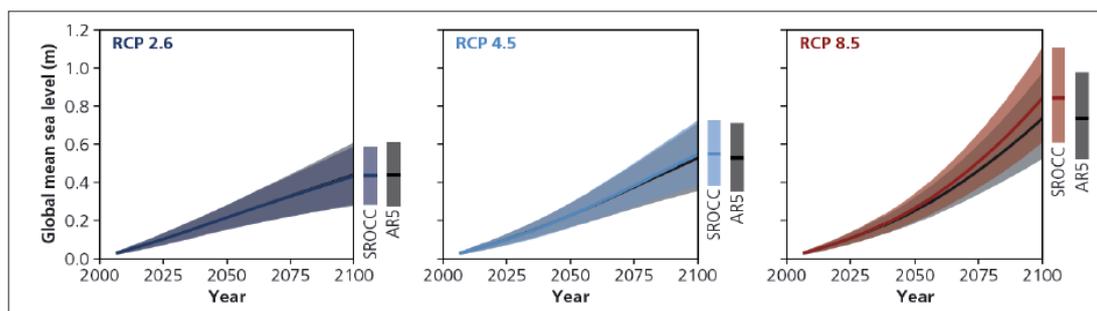


Abb. 3: Entwicklung des globalen mittleren Meeresspiegels entsprechend der Szenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 (IPCC 2019)

mittleren Meeresspiegels hat Schleswig-Holstein in den letzten Jahrzehnten verschiedene Anpassungsstrategien entwickelt, die im Folgenden beschrieben werden.

### Klimakulisse der EG-HWRL

Gemäß der europäischen Hochwasserrichtlinie (EG-HWRL) sind in den Küstengebieten von Schleswig-Holstein potenziell signifikante Hochwasserrisikogebiete zu bestimmen (EU 2007). Dies sind die Gebiete, die bei einer Sturmflut mit niedriger jährlicher Wahrscheinlichkeit (in Schleswig-Holstein von 0,005 bzw. das HW<sub>200</sub>) und ohne Vorhandensein von Küstenschutzanlagen überflutet werden könnten. Gemäß Artikel 14 Ziffer 4 der EG-HWRL ist den voraussichtlichen Auswirkungen des Klimawandels auf das Auftreten von Hochwasser Rechnung zu tragen, sodass ergänzend an den Küsten eine Klimakulisse auf der Basis des Klimazuschlages von 0,5 m für Landesschutzdeiche entwickelt wurde.

Landseitig der Landesschutzdeiche oder von Anlagen mit einem vergleichbaren Schutzstandard wurde ein Wasserstand gemäß des potenziell signifikanten Hochwasserrisikogebiets an den Küsten fortgeführt und lediglich der Klimazuschlag zum HW<sub>200</sub> addiert.

Die Regionalisierung des Referenzwasserstands HW<sub>200</sub> (+ Klimazuschlag) wird für die nicht durch Landesschutzdeiche oder durch Schutzanlagen mit einem vergleichbaren Schutzstandard geschützten Hochwasserrisikogebiete an der Küste vergleichsweise detailliert vorgenommen. Die für das entsprechende Hochwasserrisikogebiet verwendete Regionalisierung entstammt der Bearbeitung des Artikels 6 der EG-HWRL und berücksichtigt Unterschiede im Referenzwasserstand HW<sub>200</sub>, die zwischen einzelnen Küstenabschnitten bis zu 0,5 m betragen.

Die insgesamt ermittelte Fläche beträgt 4124 km<sup>2</sup>. Gegenüber dem potenziell signifikanten Hochwasserrisikogebieten durch Küstenhochwasser (3987 km<sup>2</sup>) ergibt sich eine Flächenzunahme von etwa 3,4 %.

### Strategie Wattenmeer 2100

In Anerkennung der Herausforderungen aus dem Klimawandel hat die schleswig-holsteinische Lan-

desregierung im Jahre 2015 eine Klimaanpassungsstrategie für das Wattenmeer verabschiedet. Übergeordnetes Ziel ist die langfristige Erhaltung der heutigen Strukturen und Funktionen sowie der ökologischen Integrität des Wattenmeeres bei geänderten Klimabedingungen (MELUR 2015). Die Strategie für das Wattenmeer 2100 wurde von einer Projektgruppe, bestehend aus Vertretern der Naturschutz- und Küstenschutzverwaltungen sowie der Lokalbevölkerung und Naturschutzverbände, erarbeitet. Folgende Einzelziele wurden benannt:

- Die Schutzfunktion des Wattenmeeres als Energieumwandlungszone zur Gewährleistung der Sicherheit der Insel-, Hallig- und Festlandküsten ist zu erhalten.
- Die Inseln und Halligen sind als wesentliche Strukturen des Wattenmeeres sowie als Kulturraum der Menschen zu erhalten.
- Die dynamischen Entwicklungsmöglichkeiten der charakteristischen Wattenmeerstrukturen und Lebensräume mit ihren charakteristischen Arten werden zur Wiederherstellung oder Wahrung eines günstigen Erhaltungszustands gewährleistet.
- Die ökologischen Funktionen des Wattenmeeres sind zu erhalten.
- In der gesamten Wattenmeerregion, die auch die an das Wattenmeer angrenzenden Festlands-, Meeres- und Ästuargebiete einschließt, soll eine nachhaltige Entwicklung erreicht werden, die im Einklang mit den Schutzzielen des eigentlichen Wattenmeeres über das Jahr 2100 hinaus den Schutz, die Lebensqualität und die Gestaltungsmöglichkeiten der Menschen sichert.

Hierzu wurden gemäßigte und gesteigerte hydrologische und morphologische Szenarien für einen mittelfristigen (2050) und langfristigen (2100) Zeithorizont erarbeitet (Tabelle 1).

	Mitte des Jahrhunderts		Ende des Jahrhunderts	
	gemäßigt	gesteigert	gemäßigt	gesteigert
Anstieg des mittleren Meeresspiegels	0,2 m	0,3 m	0,5 m	0,8 m
Anstiegsrate des mittleren Meeresspiegels	4 mm/a	6 mm/a	6 mm/a	20 mm/a
Sedimentakkumulation der Wattflächen	4 mm/a	5 mm/a	5 mm/a	5 mm/a

Tabelle 1: Hydrologische und morphologische Szenarien der Strategie Wattenmeer 2100

Die in den Szenarien aufgezeigten hydro-morphologischen Änderungen im Wattenmeer führen in unterschiedlichem Ausmaß und zeitlich versetzt zu Konsequenzen für die langfristige Gewährleistung des Schutzes der Küstenbewohner vor Sturmfluten und gegen Landabbruch. Die relevanten Konsequenzen für den Küstenschutz sind:

- Zunahme der hydrologischen Belastungen durch Sturmseeegang auf Küstenhochwasserschutzbauwerke auf den Inseln und Halligen sowie an der Festlandküste in Abhängigkeit vom Szenario ab Mitte bzw. zu Ende dieses Jahrhunderts.
- Zunahme der Sturmflutwasserstände an den Küstenhochwasserschutzanlagen zu Mitte des Jahrhunderts um 0,2 m bis 0,3 m sowie bis Ende des Jahrhunderts um 0,5 m bis 0,8 m.
- Zunehmende Erosion an den Westküsten der Inseln bereits im gemäßigten Szenario ab Mitte des Jahrhunderts.
- Häufigere Überflutung der Halligen. Der erhöhte Sedimenteintrag wird jedoch in keinem Szenario ausreichen, um den schnelleren Meeresspiegelanstieg auszugleichen.
- Verstärkte lokale Erosion an den Wattsockeln bereits im gemäßigten Szenario ab Mitte des Jahrhunderts.
- Kantenerosion und abnehmende Tiefe (Breite) der Salzwiesen.

Im Ergebnis der Untersuchungen ist festzuhalten, dass in den nächsten Jahrzehnten keine zusätzlichen Anpassungsmaßnahmen erforderlich sein werden. In Abhängigkeit des zukünftigen Meeresspiegels werden jedoch früher oder später Küstenerosion und Sedimentdefizite im Wattenmeer derartig zunehmen, dass – ohne Gegenmaßnahmen – langfristig mit einer starken Abnahme von Wattflächen und Salzwiesen gerechnet werden muss. Wenn Anpassungsmaßnahmen zur Begegnung der sich daraus ergebenden Beeinträchtigungen für Natur- und Küstenschutz unabdingbar werden, wären adäquate Optionen mit minimalen ökologischen Auswirkungen möglich. Ein »Wachsen mit dem Meer« wird als wichtigste Handlungsoption definiert. Entsprechend können die Defizite durch Einbringung von Sedimenten aus externen Quellen in Bereiche, von wo eine Verlagerung zu den Stellen mit Sandbedarf durch natürliche Prozesse erfolgen kann, nachhaltig ausgeglichen werden. Trotzdem bleiben, zur langfristigen Gewährleistung der heutigen Sicherheitsstandards, technische Anpassungen an Küstenschutzanlagen unumgänglich.

### Halligen 2050

Die Halligen im nordfriesischen Wattenmeer stellen weltweit einmalige und erhaltenswerte Kultur- und Naturwerte dar. Sie sind unverwechselbarer und charakteristischer Bestandteil des schleswig-holsteinischen Wattenmeeres. Wie die Sturmflut

Xaver in Dezember 2013 erneut zeigte, sind sie bereits heute durch ihre exponierte Lage im Wattenmeer den Meereskräften in besonderer Weise ausgesetzt. Höhere Sturmflutwasserstände infolge des beschleunigten Meeresspiegelanstiegs gehen mit einer Verringerung der Hochwassersicherheit für die Halligbevölkerung einher. Obwohl die etwa 280 Bewohnerinnen und Bewohner der Halligen über ein ausgeprägtes Heimatgefühl verfügen und sehr mit ihren Warften verwurzelt sind, können zunehmende Sturmflutgefährdung in Kombination mit fehlenden wirtschaftlichen Perspektiven langfristig zu einer Entvölkerung der Halligen führen. Ohne Besiedlung droht die einmalige Halligwelt als unersetzbarer Teil des schleswig-holsteinischen Kulturerbes verloren zu gehen.

Auch aus Anlass der Sturmflut Xaver vom Dezember 2013 wurde die Sicherheit der Halligwarften mit einem durch die Universität Aachen neu entwickelten Verfahren, das Wasserstände und Seeegang integrativ berücksichtigt, ermittelt. Als Sicherheitskriterium für Warften mit Ringdeich wurde ein Wasserstand von 0,5 m an Türschwellen definiert. Wenn bei einer Sturmflut mit einer jährlichen Wahrscheinlichkeit von 0,01 ( $HW_{100}$ ) der Wasserstand an mehreren Türen deutlich höher als 0,5 m aufläuft, kann die Standsicherheit der Gebäude nicht mehr als gesichert angenommen werden. Für Warften ohne Ringdeich wurde als Sicherheitskriterium ein Wellenüberlauf über die Warft-Oberkante von  $75 \text{ l/(s} \cdot \text{m)}$  definiert. Wenn deutlich mehr Wasser überläuft, können Schäden an den Gebäuden durch Wellenschlag nicht ausgeschlossen werden. Es wurde festgestellt, dass an 27 von 33 bewohnten Warften Sicherheitsdefizite vorliegen, an 18 davon größere. Nur sechs bewohnte Warften konnten als sicher eingestuft werden.

Im Ergebnis der Sicherheitsüberprüfung hat die Landesregierung im Jahre 2016 ein sogenanntes Warftverstärkungs- und -entwicklungsprogramm Halligen 2050 verabschiedet. Schwerpunkt des Programmes ist eine nachhaltige Verstärkung der Warftkörper als zentraler Siedlungs- und Wirtschaftsraum in Kombination mit baulichen Hochwasserschutzmaßnahmen an Gebäuden und mit nichtbaulichen Maßnahmen wie dem Freihalten von Schutzstreifen. Zur Umsetzung des Programmes wurden Grundsätze für die Verstärkung und Erweiterung entwickelt. Dabei wurde festgehalten, dass eine weitere Erhöhung der Ringdeiche bei dauerhaft steigenden Sturmflutwasserständen nicht nachhaltig ist bzw. langfristig zu zunehmenden Hochwasserrisiken für die Halligbevölkerung führen wird. Aus diesem Grund sind Ringdeicherhöhungen möglichst zu vermeiden. Zur Erhaltung von Entwicklungsperspektiven auf den Halligen sind gemäß Regierungsprogramm Warftverstärkungen so auszuführen, dass möglichst zusätzlicher Platz für Nutzungen geschaffen wird. Hierzu soll der Vorschlag eines Ideenwettbewerbes,

die Verstärkungen möglichst sichelförmig an der Nord- bis Südwestflanke der Warften (das heißt in Hauptangriffsrichtung der Wellen) als sogenannte Plateauverstärkung durchzuführen (Abb. 4), aufgegriffen werden. Mit dieser Warfterweiterung wird für die im Schutz dahinterliegenden Bestandsgebäude eine zusätzliche Sicherheit geschaffen. Als Grundsatz für die Höhe des Plateaus wird der örtliche Sturmflutwasserstand  $HW_{100}$  zuzüglich eines Klimazuschlages von 0,5 m und einer Wellen-Auflaufhöhe von 0,5 m festgelegt. Weiterhin soll die Außenböschung oberhalb von  $HW_{100} - 0,5$  m in der Hauptangriffsrichtung der Wellen mit einer Neigung von 1 : 12 ausgeführt werden. Neben diesen wesentlichen technischen Grundsätzen sollen vor der jeweiligen Warftverstärkung Bauleitpläne für die Warft erstellt werden, in der unter anderem ein 7-m-Schutzstreifen aufzunehmen und bildlich darzustellen ist. In den Jahren 2019 und 2020 wurden die Hanswarft (Hooge), Treuberg (Langeneß) und Norderwarft (Nordstrandischmoor) als Pilotprojekte nach diesen Grundsätzen verstärkt.

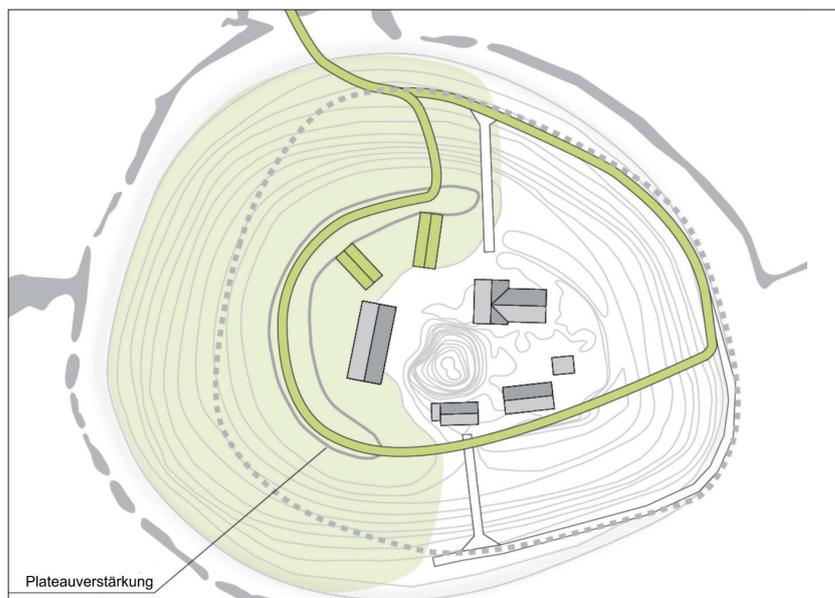


Abb. 4: Plateauverstärkung gemäß Halligen 2050

### Strategie Ostseeküste 2100

Die Sturmfluten im Januar 2017 und Januar 2019 haben an vielen Orten der schleswig-holsteinischen Ostseeküste umfangreiche Schäden an touristischen Infrastrukturen verursacht. Die Landesregierung hat nach diesen Sturmfluten zur kurzfristigen Unterstützung der besonders betroffenen Kommunen finanzielle Soforthilfen bereitgestellt.

In Anbetracht der Häufung von Schäden wurde nach der Sturmflut von 2019 beschlossen, das Problem für die Zukunft systematischer anzugehen. Die Fragen des Küstenschutzes, des Naturschutzes und des Tourismus sollen grundsätzlich diskutiert werden, um gemeinsam nachhaltige Lösungen zu entwickeln, die sich in eine Gesamtstrategie »Entwicklung Ostseeküste 2100« einfügen. Das Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung (MELUND) hat die Federführung für die Erarbeitung der Gesamtstrategie, die Ende 2024 verabschiedet werden soll.

Im Aufgabenbereich des Küstenschutzes sind mit wissenschaftlicher Unterstützung die Kenntnisse zum Sedimentbudget der Ostsee zu verbessern. Es sollen im Rahmen des Möglichen unter anderem die touristisch genutzten Küstenabschnitte identifiziert werden, die bereits heute unter den derzeitigen Verhältnissen ein sich gegebenenfalls zukünftig verstärkendes Sedimentdefizit aufweisen. Ergänzend ist vorgesehen, auf Grundlage der im Rahmen der Gesamtstrategie zu entwickelnden Szenarien zum zukünftigen Meeresspiegelanstieg die morphologischen Reaktionen der Küste bzw. einzelner Küstenabschnitte mit einem zu erstellenden Modell zu ermitteln. Anhand dieser morphologischen Projektionen sind mögliche technische und strukturelle Anpassungsoptionen abzuleiten.

Im Aufgabenbereich des Tourismus ist vorge-

sehen, mit wissenschaftlicher Unterstützung eine fundierte Bestandsanalyse der vorhandenen touristischen Infrastruktur an der Ostseeküste und ihrer Resilienz hinsichtlich künftiger Sturmflutereignisse erstellen zu lassen. Aus dieser Bestandsanalyse sollen in einem zweiten Schritt zusammen mit den Erkenntnissen aus den morphologischen Projektionen Handlungsempfehlungen abgeleitet werden, mit denen sich die touristisch relevanten Küstenorte für die Zukunft klimagerecht aufstellen können.

Im Aufgabenbereich des Naturschutzes ist die herausragende Bedeutung der schleswig-holsteinischen Ostseeküste und der ihr vorgelagerten Meeresbereiche für den Naturschutz zu berücksichtigen, die sich in der Ausweisung weiter Bereiche als Natura-2000-Gebiete und als Naturschutzgebiete sowie landseitig als großräumige Landschaftsschutzgebiete abbildet. Weite Bereiche an der Ostseeküste unterliegen auch als gesetzlich geschützte Biotope den Schutzbestimmungen des Bundes- und des Landesnaturschutzgesetzes. Ein großer Teil der Ostseeküste ist als Hotspot der biologischen Vielfalt mit bundesweiter Bedeutung klassifiziert. Generelle Handlungsleitlinien zur Bewältigung dieser naturschutzrechtlichen Anforderungen im Zuge der touristischen Entwicklung sind im Rahmen des Projektes zu erarbeiten.

### Niederungen 2050

Der Meeresspiegelanstieg hat auch starke Auswirkungen auf die Entwässerung der Niederungsgebiete in Schleswig-Holstein. Durch einen Anstieg des Tideniedrigwassers verkürzt sich der Zeitraum, in dem Einzugsgebiete über ein Siel entwässert werden können. In der Folge müssen viele Siele in Schöpfwerke umgebaut werden, was nicht nur erhebliche Investitionssummen bedeutet, sondern

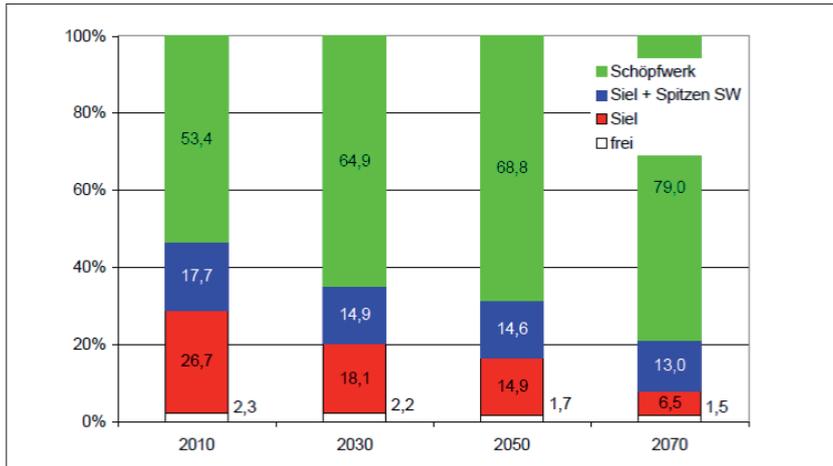


Abb. 5: Entwicklung der prozentualen Flächenanteile verschiedener Entwässerungsstrukturen in den Niederungsgebieten

auch laufende Kosten für den Betrieb der Schöpfwerkspumpen mit sich bringt. Der Marschenverband Schleswig-Holstein hat federführend eine Studie über die möglichen Folgen des Klimawandels für die Entwässerung durchgeführt (Marschenverband 2014). Die mittelfristige Prognose der Veränderung der Entwässerungsstrukturen gemäß dieser Studie ist in Abb. 5 dargestellt.

Vor diesem Hintergrund besteht die empfohlene Anpassungsstrategie für die Niederungsgebiete in Schleswig-Holstein in erster Linie darin, eine rechtzeitige Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf lokaler Einzugsgebietsebene durchzuführen, mit dem Ziel, die Anpassungserfordernisse zu konkretisieren und die Wirksamkeit und Robustheit möglicher Maßnahmen zu prüfen.

Hauptakteur für die Ableitung einer Anpassungsstrategie des Sektors Wasserwirtschaft in den Niederungsgebieten sind die Deich- und Hauptsielverbände.

### Vom Klimazuschlag zum Klimadeich

Das im Küstenschutz Schleswig-Holstein aktuell umgesetzte Konzept Klimadeich für Landesschutzdeichverstärkungen hat sich über die letzten zwei Jahrzehnte entwickelt. In den 1990er Jahren wurde

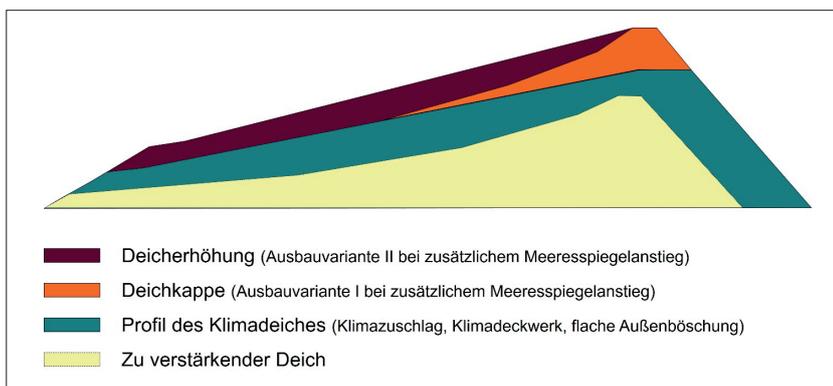


Abb. 6: Konzept Klimadeich Schleswig-Holstein

mit der Veröffentlichung der ersten zwei IPCC-Berichte klar, dass der Meeresspiegel künftig deutlich beschleunigt ansteigen wird. Diese Erkenntnis wurde 2001 in der Fortschreibung des Generalplans Küstenschutz Schleswig-Holstein durch die (weltweit erstmalige) Einführung eines Klimazuschlages von 0,5 m bei der Planung von Landesschutzdeichverstärkungen berücksichtigt. Grundlage war der dritte IPCC-Bericht (2001), wonach der globale Meeresspiegel in diesem Jahrhundert zwischen 0,09 m und 0,88 m ansteigen könnte (Mittelwert ca. 0,5 m). Im vierten IPCC-Bericht (2007) lagen die Projektionswerte zwischen 0,17 m und 0,78 m. Allerdings gab es parallel zu diesem Bericht auch Untersuchungen, wonach der Meeresspiegel noch deutlich stärker ansteigen könnte. So veröffentlichte das Potsdam Institut für Klimafolgenforschung im Jahre 2007 globale Projektionswerte zwischen 0,5 m und 1,4 m (Rahmstorf 2007). Diese deutlich höheren Werte, die sich aus der Anwendung eines semi-empirischen Berechnungsansatzes (Korrelation zwischen Temperatur- und Meeresspiegelanstieg) ergeben, waren Anlass für die Einführung einer zusätzlichen Baureserve (durchgehend flache Außenböschung, breitere Deichkrone) für Landesschutzdeichverstärkungen im Jahre 2009. Mit diesem Konzept kann einem Meeresspiegelanstieg von bis zu 1,0 m begegnet werden. Durch Aufsetzen einer Deichkappe auf die Deichkrone in einer zweiten Bauphase kann sogar einem Meeresspiegelanstieg von bis zu 1,5 m begegnet werden. Im fünften IPCC-Bericht (2014) lagen die Projektionswerte zwischen 0,28 m und 0,98 m. Dieser Bereich wurde als wahrscheinliche Bandbreite definiert. Es wurde darauf hingewiesen, dass sich die Werte noch um mehrere Dezimeter erhöhen können, wenn sich das ange deutete (aber nicht wissenschaftlich abgesicherte) verstärkte Abschmelzen der Landeiskappen auf Grönland und in der Westantarktis tatsächlich einstellen wird. Auch da globale Klimaschutzmaßnahmen (noch) nicht greifen und die Gesellschaft sich noch auf dem »Weiter wie bisher«-Pfad befindet, hat die Wissenschaft sich in den letzten Jahren verstärkt auf sogenannte High-end-Szenarien fokussiert, das heißt darauf, was im ungünstigsten (damit auch sehr unwahrscheinlichen) Fall passieren könnte. Die Annahme ist, dass die oben genannten Landeiskappen deutlich verstärkt und irreversibel abschmelzen. Für Schleswig-Holstein war dies Anlass, das Konzept Baureserve zu einem Konzept Klimadeich (Abb. 6) weiterzuentwickeln. Zusätzlich zur Baureserve wird das Deckwerk am Deichfuß, wenn vorhanden, ebenfalls um 0,5 m (das heißt um die Höhe des Klimazuschlages) extra erhöht. Weiterhin ist bei der Ermittlung der erforderlichen Tragfähigkeit des Untergrundes sicherzustellen, dass er nach der ersten Verstärkung einer nochmaligen Deicherhöhung um durchgängig 1,0 m standhalten kann. Das Konzept Klimadeich wurde

2018 eingeführt und soll sicherstellen, dass der Landesschutzdeich in zwei bis drei Bauphasen einem Meeresspiegelanstieg von bis zu 2,0 m ohne Beeinträchtigung des heutigen Sicherheitsstandards begegnen kann.

### Klimafolgenmonitoring

Mit dem aktuell in Entwicklung befindlichen Klimafolgenmonitoringkonzept wird das Ziel verfolgt, klimawandelbedingte Veränderungen von Hydrologie, Morphologie und Sedimentologie an den Küsten Schleswig-Holsteins langfristig zu überwachen. Eine besondere Herausforderung stellt dabei die Unterscheidung von klimawandelinduzierten Veränderungen zu auch ohne Klimawandel vorhandenen natürlichen Veränderungen dar. Der Schwerpunkt liegt auf der Überwachung von Parametern, die für den Küstenschutz von Bedeutung sind.

Für den Themenbereich der Morphologie werden für morphologische Strukturen Parameter definiert, die als Indikatoren einer klimawandelbedingten Veränderung einer küstenschutzrelevanten Eigenschaft überwacht werden.

Für den Themenbereich der Hydrologie werden für hydrologische Belastungen Parameter definiert, die als Indikatoren einer klimawandelbedingten Veränderung überwacht werden.

Für den Bereich der Nordsee werden das Deichvorland, die Halligen, die Watteinzugsgebiete (Watten und Priele) sowie die Strand-/Vorstrandbereiche der Außenküsten überwacht.

Für den Bereich der Ostsee werden die Uferlinien, die Steilufer und die Strand-/Vorstrandbereiche überwacht.

Für die Auswertung werden die im Zuge des Rahmenvermessungskonzeptes für den Küstenstreifen der Ostsee alle sechs Jahre erhobenen Laserscandaten und Orthofotos genutzt.

Für den Themenbereich der Hydrologie werden folgende hydrologische Belastungen betrachtet und Parameter definiert, die als Indikatoren einer klimawandelbedingten Veränderung der küstenschutzrelevanten Belastung überwacht werden:

- Meeresspiegel: Überwachung der Entwicklung des Wasserstandes anhand der Parameter Mittleres Tidehochwasser (MThw), mittleres Tideniedrigwasser (MTnw), mittleres Tidehalbwasser (MT $\frac{1}{2}$ w), Mittelwasserstand (MW) für die Ostsee, Jahreshöchstwasserstand (HThw bzw. HW).
- Tidenhub: Überwachung der Entwicklung des Tidenhubs anhand der Parameter Mittlerer Tidenhub (MThb), Verweilzeiten oberhalb definierter Schwellwerte als Stunden pro Jahr sowie mittlere Ebb- und Flutdauer.
- Seegang: Überwachung der Entwicklung des Seegangs anhand der Parameter signifikante Wellenhöhe (HS) sowie maximale Wellenhöhe (Hmax), Wellenperiode (mittlere Periode Tm, Peak-Periode Tp, Energie-Periode Tm-1,0), Wellenanlaufzeit.

### Zusammenfassung

Schleswig-Holstein als das Land zwischen den Meeren ist vom klimawandelbedingten Meeresspiegelanstieg besonders betroffen. Die wahrscheinliche Bandbreite des globalen mittleren Meeresspiegelanstiegs liegt Ende dieses Jahrhunderts zwischen 0,61 m und 1,10 m (Medianwert 0,84 m). Sturmflutwasserstände an den deutschen Küsten werden entsprechend dem mittleren Meeresspiegelanstieg höher ausfallen.

Aus diesem Grunde hat Schleswig-Holstein in den letzten Jahren mit der Strategie Wattenmeer 2100, Halligen 2050, Strategie Ostseeküste 2100 und Niederungen 2050 Klimaanpassungsstrategien erarbeitet, in denen die grundlegenden Handlungsoptionen beschrieben sind. Ein wesentlicher Baustein der Anpassungsstrategien ist die in Schleswig-Holstein entwickelte No-Regret-Maßnahme des Klimadeichs, die bereits bei verschiedenen Deichverstärkungsmaßnahmen der letzten Jahre zum Einsatz kam. In Ergänzung wurde eine Klimakulisse gemäß EG-HWRL ermittelt, um den zukünftig durch Küstenhochwasser betroffenen Raum aufzuzeigen. Aktuell befindet sich zudem ein Klimafolgenmonitoringkonzept in Entwicklung, um die für den Küstenschutz besonders relevanten hydrologischen und morphologischen Parameter langfristig zu überwachen. //

### Literatur

- Arns, Arne; Jürgen Jensen (2019): Ermittlung von extremen Wasserständen für das nordfriesische Wattenmeer. Unveröffentlichter Bericht
- BAW (2019): Modellierung von Sturmflutwasserständen in der Tideelbe. Unveröffentlichter Bericht
- IAWG (2020): Ermittlung von statistischen Sturmflutwasserständen an der West- und Ostküste Schleswig-Holsteins. Unveröffentlichter Bericht
- IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC, Summary for Policymakers
- IPCC (2019). The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, Summary for Policymakers
- EU (2007): Richtlinie 2007/60/EG über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken. Amtsblatt der Europäischen Union L 288 vom 23. Oktober 2007
- Marschenverband (2014): Grundlagen für die Ableitung von Anpassungsstrategien in Niederungsgebieten an den Klimawandel. Arbeitsgruppe Niederungen 2050, <https://marschenverband.de/downloads.html>
- MELUR (2015): Strategie für das Wattenmeer 2100. Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume, [www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/K/kuestenschutz/Downloads/strategieWattenmeer2100.pdf](http://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/K/kuestenschutz/Downloads/strategieWattenmeer2100.pdf)
- Rahmstorf, Stefan (2007): A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise. Science, DOI: 10.1126/science.1135456

# Retrospektive der Meeresspiegel- forschung in Deutschland

## Teil 1: Deutsche Nordseeküste

Ein Beitrag von JÜRGEN JENSEN

In diesem Beitrag werden die beobachteten Meeresspiegeländerungen auf Grundlage von pegelbasierten Wasserstandsmessungen an der deutschen Nordseeküste seit dem 18. Jahrhundert dargestellt. Die Auswertungen der Wasserstandszeitreihen der untersuchten Pegel sind dabei als Diagnose der bisherigen Meeresspiegelentwicklung zu verstehen. Die Wasserstandsmessungen werden mit Pegeln relativ zum Landniveau aufgezeichnet, erst in den letzten Jahren können daraus absolute (um vertikale Landbewegungen bereinigte) Meeresspiegeländerungen abgeleitet werden.

Meeresspiegel | MSL | Nordsee | Sturmfluten | Tidewasserstände | Gezeiten | Tidehub  
sea level | MSL | North Sea | storm surges | tidal water levels | tides | tidal range

This paper presents the observed sea level changes based on level-based water level measurements on the German North Sea coast since the 18th century. The evaluation of the water level time series of the investigated gauges is to be understood as a diagnosis of the sea level development to date. The water level measurements are recorded with gauges relative to the land level. It is only in recent years that absolute sea level changes (adjusted for vertical land movements) can be derived from these measurements.

### Autor

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen hat am Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen den Lehrstuhl für Hydromechanik, Binnen- und Küstenwasserbau inne.

[juergen.jensen@uni-siegen.de](mailto:juergen.jensen@uni-siegen.de)

Der zweite Teil des Beitrags beschäftigt sich mit dem Meeresspiegel an der deutschen Ostseeküste; er erscheint in einer der nächsten Ausgaben.

### 1 Einleitung und Definitionen

Diskussionen über die Folgen des Klimawandels, wie z. B. den Meeresspiegelanstieg und die entsprechenden Anpassungsstrategien, dominieren derzeit das gesellschaftliche Leben. Der Anstieg des Meeresspiegels stellt in Superposition mit Extremereignissen, wie z. B. Sturmfluten, die größte Herausforderung dar. Der Schutz der Küste und die Bemessung von Küstenschutzbauwerken ist damit unmittelbar von der Entwicklung des Meeresspiegels abhängig und robuste Abschätzungen des zukünftigen Meeresspiegels sind damit von größter Bedeutung.

Seit der letzten Eiszeit ist der Wasserstand in der Nordsee mit Transgressions- und Regressionsphasen, insbesondere infolge postglazialer Krustenbewegungen bzw. des GIA-Effektes (englisch: glacial isostatic adjustment) deutlich angestiegen. In den letzten 7000 Jahren ist der mittlere Meeresspiegel in der Nordsee um 6 bis 7 m mit regionalen Unterschieden gestiegen (Vink et al. 2007; Baeteman et al. 2011; Bungenstock und Weerts 2010; Behre 2003, 2007). Es kann dabei nicht von einem kontinuierlichen Anstieg des Meeresspiegels ausgegangen werden; heute ist der Meeresspiegel in der Deutschen Bucht etwa 1 m höher als vor 1000 Jahren (z. B. Behre 2003; Meier 2007).

Die Nordsee ist als flaches Randmeer des Nordatlantiks mit den weltweiten Ozeanen verbunden und deren Meeresspiegeländerungen wie z. B. den globalen bzw. weltweiten Meeresspiegel-

schwankungen ausgesetzt (vgl. Gregory et al. 2019). Die tiefliegenden Nordseeküsten mit ihren Inseln und Halligen werden durch einen postglazialen Meeresspiegelanstieg, zugehörige isostatische Krustenbewegungen und extreme Sturmfluten seit Jahrhunderten geprägt (z. B. Woebcken 1924). Die Deiche und Küstenschutzbauwerke wurden als Reaktion auf katastrophale Sturmfluten und steigende Wasserstände über die vergangenen mehr als 1000 Jahre stetig angepasst (z. B. Peters 1929; Kramer 1989). Durch den anthropogenen Klimawandel und den damit verbundenen Meeresspiegelanstieg steht der Küstenschutz zukünftig vor weiteren großen Herausforderungen.

Dabei ist der Anstieg des Meeresspiegels eine Folge der natürlichen Klimaänderungen und des anthropogenen Klimawandels, z. B. aufgrund der Volumenausdehnung des Wassers durch steigende Temperaturen (verursacht z. B. durch CO<sub>2</sub>-Emissionen) und wegen des Masseneintrags aufgrund des Abschmelzens landgebundener Eismassen (Gletscher, Grönland oder Antarktis). Dazu führen Landsenkungen und -hebungen sowie insbesondere Ozeanzirkulationen und atmosphärische Strömungen zu regionalen Veränderungen des Meeresspiegels. Dem absoluten (früher häufig eustatischen), das heißt sich global ändernden Meeresspiegel steht der sogenannte relative Meeresspiegel gegenüber, der sich auf Meeresspiegeländerungen in regionalem oder lokalem Maßstab

relativ zum Landniveau bezieht. Insofern ist die vertikale Landbewegung der Küsten zu berücksichtigen. Dabei sind zwei verschiedene Prozesse zu unterscheiden: zum einen der sogenannte GIA-Effekt (z. B. Peltier 2004; Peltier et al. 2015), zum anderen lokale Senkungs- oder Hebungerscheinungen, die z. B. aus Gas- oder Grundwasserentnahmen bis hin zu Bauwerkssetzungen resultieren. Insbesondere zu lokalen Senkungen und Hebungen liegen derzeit nur unzureichende Informationen vor. Die Separierung dieser Prozesse kann mit Hilfe globaler Positionsbestimmungssysteme (englisch: continuous global positioning system, CGPS) und mit geologischen Untersuchungen verbessert werden.

Die Analyse der bisherigen Wasserstandsentwicklung wird üblicherweise auf Basis von Pegelmessungen durchgeführt. Diese enthalten neben Massen- oder Dichteänderungen auch die vertikalen Landbewegungen. Dies ist hinsichtlich der Analyse klimatischer Anteile im mittleren Meeresspiegel (englisch: mean sea level, MSL) zu beachten, da die Landsenkungen in keinem Zusammenhang mit dem anthropogenen Klimawandel stehen. Um Fehlinterpretationen bei der Analyse der Pegelmessungen zu vermeiden, sollten deshalb die Anteile vertikaler Landbewegungen möglichst aus den Daten extrahiert werden.

Die Messungen der globalen Meeresspiegelhöhe bzw. der Meeresspiegeländerungen relativ zum Geoid mit Satelliten begann mit dem Start des Erdbeobachtungssatelliten »Topex/Poseidon« mit einer wissenschaftlich nutzbaren Präzision im August 1992 und wurde mit verschiedenen Satelliten fortgesetzt. Die längsten Satelliten-Messreihen reichen damit bis 1992 zurück und ermöglichen somit Aussagen zur absoluten Veränderung des globalen und regionalen Meeresspiegels, jedoch nur eingeschränkt bis an die Küsten. Für den Küstenschutz und das Überflutungsrisiko hinter einem Deich ist allerdings die relative Änderung der Wasserstände bzw. Sturmflutwasserstände (inklusive vertikaler Landbewegungen) von Bedeutung.

Die wichtigste Kenngröße zur Beschreibung der absoluten Meeresspiegeländerungen ist der MSL oder der globale mittlere Meeresspiegel (GMSL). Der MSL ist definiert als Mittelwert von Stundenwerten (oder höher aufgelöst) über den Zeitraum mindestens einer Nodaltide (Deklination des Mondes bzw. Neigung der Mondbahn zum Erdäquator mit einer Periode von 18,61 Jahren als längste relevante Gezeit) (vgl. Pugh und Woodworth 2014; Woodworth 2017). Mittelwerte über kürzere Zeiträume beinhalten Anteile der Nodaltide und führen zu Über- respektive Unterschätzungen des MSL; insbesondere Trenduntersuchungen sollten daher auf Grundlage vom Vielfachen der Nodaltide durchgeführt werden (z. B. Jensen et al. 1990, 1992). Untersuchungen zum Meeresspiegelanstieg und die Analyse der Tidewasserstände werden an den deutschen Küsten dementsprechend historisch auf Grundlage von 19-jähri-

gen (gleitenden) Mittelwerten durchgeführt. Bereits Lenz (1873) begründet die 19-jährige Mittelung korrekt mit der 18,61-jährigen Periode der Nodaltide und nutzt deshalb 19-jährige Mittel zur Beschreibung der Tidewasserstände. Er bezieht sich auf eine Arbeit des britischen Astronomen Lubbock (1836), der englische »Fluth tafeln« mit 19-jährigen Mittelwerten verbessern wollte (vgl. Bradley 1728). Bereits Paschen wertete 1868 in einer Untersuchung über die Hebung der deutschen Ostsee (Paschen 1869) Zeitreihen mit einer Länge von 19 Jahren aus; hier kann allerdings der Auswertzeitraum von 19 Jahren zufällig gewählt sein. Den Nachweis der Nodaltide in aufgezeichneten Tidehubzeitreihen auf Grundlage von Jahresmittelwerten an der deutschen und niederländischen Nordseeküste liefern Jensen et al. (1992), obwohl in vielen historischen Untersuchungen zur vermuteten Küstensenkung bzw. zum Meeresspiegelanstieg bereits 19-jährige Mittelwerte (z. B. mittleres Tidehochwasser, MThw) genutzt werden (z. B. Lenz 1873; Lüders 1936; Hensen 1938; Gaye 1951; Hundt 1955; Rohde 1977; Jensen et al. 1988).

Der MSL entspricht an der tidebeeinflussten Nordseeküste dem langjährigen mittleren Tidewasserstand (MTmw), möglichst über eine Nodaltide mit 18,61 Jahre gemittelt, und wird häufig vereinfachend aus dem Tidehalbwasser ( $T\frac{1}{2}w$ ), als arithmetisches Mittel von Tidehoch- und -niedrigwasser abgeschätzt (Abb. 1). Das MTmw bzw. der MSL ist als Referenzfläche sowohl absolut als auch relativ zum Festland zeitlichen Änderungen unterworfen.

Der MSL hat allerdings in der gezeitendominierten Nordsee keine Tradition; für das Küsteningenieurwesen werden das MThw und der mittlere Tidehub (MThb), für den Küstenschutz die höchsten Tidehochwasser (z. B. HThw) bzw. Sturmflutwasserstände und für die Belange der Schifffahrt das mittlere Tideniedrigwasser (MTnw) und niedrigste Tideniedrigwasser (NTnw) als relevante Größe herangezogen. Der Tidehub (Thb) an der deutschen Nordseeküste reicht von knapp 2 m auf den Inseln über etwa 3,5 m an der Festlandküste bis über 4 m in den Tideästuaren.

## 2 Erfassung des Meeresspiegels über Pegelmessungen seit dem 18. Jahrhundert

Erste Messungen der Wasserstände, z. B. mit Latenpegeln, an der deutschen Nordseeküste und deren Auswertungen gehen bis in das 18. Jahrhundert zurück (Brahm 1754). Etwa von 1720 bis 1752 hat Brahm einen selbst konstruierten Pegel am Jadebusen südlich von Sande beobachtet. Ab der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts sind in Ostfriesland einzelne Pegel installiert worden, auch in Brunsbüttel ist 1781 ein Pegel eingerichtet worden. Seit 1784 wurden in Cuxhaven und seit 1786 in Hamburg schließlich regelmäßig Lattenpegel abgelesen (Rohde 1975, 1977). Einzelne beobachtete Wasserstände von historischen Sturmfluten



Deutschland durch Lentz begründet. Lentz gibt auch erste Definitionen zur Ermittlung der MThw (vgl. Reinke 1787).

Schütte (1908) untersucht »Neuzeitliche Senkungserscheinungen an unserer Nordseeküste« und ermittelt eine langfristige Landsenkung auf Basis von geologischen und archäologischen Befunden sowie Auswertungen von MThw-Zeitreihen. Diskussionen zu Meeresspiegeländerungen reichen nach Schütte bis in die erste Hälfte des 18. Jahrhunderts zurück: »Seit dem wissenschaftlichen Streite der schwedischen Gelehrten Linne und Celsius über die Deutung der Niveauveränderungen des Bottnischen Meeres, den sie 1741 in akademischen Reden ausfochten, sind Strandverschiebungen an den nordeuropäischen Küsten immer wieder Gegenstand fachmännischer Untersuchungen und literarischer Erörterungen gewesen, ohne dass behauptet werden könnte, das Problem sei jetzt endgültig gelöst.« Schütte schätzt die Landsenkung mit Werten bis zu 50 cm in der Zeit von 1825 bis 1908 ab und kommt für Wilhelmshaven auf beachtliche MThw-Anstiegswerte von 13 mm/Jahr.

Krüger (1922) bestätigt die Aussagen von Schütte zur vermuteten Landsenkung über den relativen Anstieg der Wasserstände und formuliert dazu: »Diese Hebung des Wasserstands« – vermutlich am Pegel Wilhelmshaven – »ist eine Folge der Küstensenkung, der Betrag von 10 cm in 24 Jahren deckt sich mit dem von Schütte angenommenen Senkungsbetrag. (...) Der Senkungsbetrag ist mindestens 20 cm im Jahrhundert.«

Rietschel (1933) schließt »Neuere Untersuchungen zur Frage der Küstensenkung« an; Rietschel kommt zu einem Anstieg der MThw-Zeitreihen von 1871 bis 1929 auf Grundlage von fünfjährigen Mittelwerten für die folgenden Pegel:

- Husum: 3,6 mm/Jahr,
- Tönning: 3,4 mm/Jahr,
- Cuxhaven: 3,1 mm/Jahr,
- Bremerhaven: 2,1 mm/Jahr,
- Wilhelmshaven: 2,6 mm/Jahr.

Die beobachteten Meeresspiegeländerungen bzw. der -anstieg wurden bis in die 1930er Jahre überwiegend durch Landsenkungen begründet und erst mit Rietschel (1933) und Lüders (1936) in dem Beitrag »Über das Ansteigen der Wasserstände an der Deutschen Nordseeküste« wurde neben Landsenkungen auch ein Meeresspiegelanstieg sowie Änderungen im Gezeitenregime vermutet. Rietschel und Lüders beschreiben damit für die deutsche Nordseeküste neben tektonischen Relativbewegungen auch den Meeresspiegelanstieg, obwohl das Phänomen des eustatischen Meeresspiegelanstiegs bereits bekannt war (Maclaren 1842; Suess 1888); 1842 hat Maclaren bereits auf den Zusammenhang zwischen den weltweiten Eisvorräten und dem Meeresspiegel hingewiesen. Rietschel beschreibt weiterhin unterschiedliche Größenordnungen der Landbewegungen an den

Küsten der Schleswig-Holsteinischen und der Niedersächsischen Nordseeküste.

Krüger (1938) beschreibt in dem Beitrag »Die Küstensenkung an der Jade« wieder die Küstensenkung und gibt für den Pegel Wilhelmshaven für die 83 Jahre von 1854 bis 1936 einen MThw-Anstieg von 2,4 mm/Jahr, für das MTnw von 1,9 mm/Jahr und für das mittlere T $\frac{1}{2}$ w (Näherung für RMSL) 2,2 mm/Jahr an.

Hensen (1938) begründet in einer Studie »Über die Ursachen der Wasserstandshebung an der deutschen Nordseeküste« den relativen Anstieg auch wieder über eine vermutete Küstensenkung; er gibt für Cuxhaven einen Anstieg des MT $\frac{1}{2}$ w (Näherung für RMSL) der Zeitreihe von 1875 bis 1936 über 19-jährige Mittel von 3 mm/Jahr an; der entsprechende Anstieg des MThw ist danach etwas geringer.

Für die Ableitung von maßgebenden Sturmfluthöhen für die Deichbemessung an der schleswig-holsteinischen Westküste hat Hundt (1955) den Anstieg des MThw bzw. des Meeresspiegels für die Übertragung historischer Sturmfluten untersucht und über den Zeitraum bis 1953 einen mittleren MThw-Anstieg von 2,7 mm/Jahr ermittelt. Die Änderungen der Wasserstände begründet er mit lokalen baulichen und großräumigen Einwirkungen auf den Meeresspiegel bzw. die Gezeiten. Im Einzelnen gibt er folgende Werte auf Basis 19-jähriger Mittel der MThw-Zeitreihen an:

- Husum 1868 bis 1953: 3,1 mm/Jahr,
- Tönning 1867 bis 1953: 2,8 mm/Jahr,
- Büsum 1870 bis 1953: 2,1 mm/Jahr,
- Cuxhaven 1843 bis 1953: 2,7 mm/Jahr,
- Wilhelmshaven 1854 bis 1950: 2,3 mm/Jahr.

Rohde (1964) ermittelt für die Pegel Tönning, Büsum und Husum, die seit 1867 als Lattenpegel betrieben wurden, auf Grundlage übergreifender 19-jähriger MThw, für den Zeitraum bis 1915/33 einen Anstieg von 3 mm/Jahr; danach schwächt sich der von Rohde ermittelte Trend ab. In Rohde (1977) sind die Untersuchungen zum säkularen Meeresspiegelanstieg seit dem Rückgang der Vereisung am Ende des Pleistozäns zusammengestellt (vgl. Rohde 1964, 1968). Rohde (1977) gibt einen Anstieg der 19-jährigen Mittel der MThw für die Pegel Emden, Cuxhaven, Büsum, Tönning, Husum und Dagebüll an; der MThw-Anstieg für die Zeitreihe bis etwa 1920 beträgt im Mittel etwa 3 mm/Jahr, der Anstieg schwächt sich nach 1920 ab. Zusammengefasst gibt Rohde für den Zeitraum ab Mitte des 16. Jahrhunderts bis 1975 einen mittleren Anstieg des MThw von anfänglich 3 mm/Jahr an, der sich seit dem 19. Jahrhundert auf 2,5 mm/Jahr abschwächt. Für den Pegel Cuxhaven ermittelte Rohde für die Zeitreihe von 1784 bis 1975 einen MThw-Trend von 2,3 mm/Jahr und für Dagebüll für die Zeitreihe von 1873 bis 1975 einen MThw-Trend von 3,1 mm/Jahr.

Liese (1979) untersucht die Tidewasserstandszeitreihen ab 1946 bis 1975 von neun Inselpegeln (Borkum, Norderney, Roter Sand/Alte Weser,

Helgoland, Trischen, Pellworm, Wittdün, Hörnum und List) sowie sechs Festlandpegeln (Emden, Wilhelmshaven, Bremerhaven, Cuxhaven, Büsum und Dagebüll). Für Dagebüll stellt er z. B. eine Tidehubzunahme für diesen Zeitraum von 26 cm in 20 Jahren fest (entspricht einem MThb-Trend von 13 mm/Jahr) und führt das auf örtliche Baumaßnahmen zurück; für die Gesamtbetrachtung schließt er deshalb den Pegel Dagebüll aus. Nach Liese steigt der Thb von 1946 bis 1975 mit etwa 5 mm/Jahr an der deutschen Nordseeküste. Für die jeweils im Monat Mai beobachteten Wasserstandszeitreihen identifiziert er einen Bruchpunkt im Jahr 1963/64 mit einem stärkeren Thw-Anstieg davor und einer Trendabschwächung nach 1964.

Jensen (1984) und Führböter und Jensen (1985) kommen mit Untersuchungen zur Änderung der Tidewasserstände und des Thb an der deutschen Nordseeküste auf Grundlage von Auswertungen langjähriger Zeitreihen an zehn Pegelstandorten zu folgenden Schlussfolgerungen: über die letzten 100 Jahre (bis 1983) hat sich der Anstieg des MThw beschleunigt, das MTnw hat sich nur unwesentlich verändert und der MThb hat deutlich zugenommen. Mit diesen Untersuchungen wird eine Beschleunigung des MThw bzw. des RMSL ermittelt. Führböter und Jensen (1985) geben für die deutsche Nordseeküste auf der Basis von hundertjährigen Zeitreihen von 1884 bis 1983 (zehn Pegel) Trends für das MThw von 2,5 mm/Jahr, für das MTnw keine Änderung und für den MThb von 2,2 mm/Jahr an. Für die 50 Jahre von 1934 bis 1983 wurden Trends für das MThw von 3,3 mm/Jahr, für das MTnw eine leichte Absenkung und für den MThb eine Zunahme von 3,5 mm/Jahr ermittelt (Jensen 1984). Für die kurze Zeitreihe von 1959 bis 1983 wird ein Anstieg des MThw von 6,4 mm/Jahr bzw. für den RMSL von 3,2 mm/Jahr ermittelt; diese Werte wurden damals äußerst kontrovers diskutiert und stießen aufgrund der hohen Anstiegswerte überwiegend auf Ablehnung (Lohrberg 1989). Insbesondere die ermittelte Zunahme des Thb hat für das Küstenvorfeld und den Küstenschutz weitreichende Konsequenzen (Führböter und Jensen 1985; vgl. Jensen et al. 2014).

Im Einzelnen werden bei Jensen (1984) folgende MTnw-/MThw-/MThb-/MT $\frac{1}{2}$ w-Trends z. B. für die Zeitreihen 1934 bis 1983 angegeben:

- List: -1,1 / 2,4 / 3,5 / 0,6 mm/Jahr,
- Husum: -0,6 / 3,6 / 4,3 / 1,5 mm/Jahr,
- Büsum: 0,2 / 2,9 / 2,7 / 1,5 mm/Jahr,
- Cuxhaven: -0,3 / 2,9 / 3,2 / 1,3 mm/Jahr,
- Bremerhaven: -2,7 / 3,6 / 6,3 / 0,5 mm/Jahr,
- Wilhelmshaven: -0,9 / 3,4 / 4,3 / 1,2 mm/Jahr,
- Norderney: 0,8 / 1,6 / 0,8 / 1,2 mm/Jahr,
- Emden: 0,1 / 2,8 / 2,8 / 1,5 mm/Jahr,
- Borkum: 0,9 / 4,8 / 3,9 / 2,8 mm/Jahr.

Siefert und Lassen (1985) beschreiben die Wasserstandsverhältnisse und Tideeintrittszeitpunkte in der Deutschen Bucht; in Lassen (1989) werden die örtlichen und zeitlichen Variationen des Meeres-

spiegels, abgeschätzt mit dem k-Wert-Verfahren, in der südöstlichen Nordsee dargestellt. Der Anstieg der MTnw als Approximation für den RMSL beträgt 1,5 mm/Jahr und zeigt danach keine erkennbare Beschleunigung (vgl. Siefert und Lassen 1991). Aus den Untersuchungen der Wasserstände des Pegels Cuxhaven werden lokale Bauwerkssetzungen im Bereich des Pegels bis zum Anfang des 20. Jahrhunderts geschlossen und entsprechende Höhenkorrekturen der Wasserstandszeitreihen empfohlen.

Jensen et al. (1992) untersuchen im Rahmen eines KFKI-Projekts (vgl. Jensen et al. 1988) die Änderung der Gezeiten und der Wasserstände in der Deutschen Bucht anhand von Scheitelwasserständen (Tnw, Thw) und deren Eintrittszeiten. Damit wurden Aussagen zur Entwicklung der Ebbe- und Flutdauer sowie zu Tidelaufzeiten möglich. Für das Thw ist bei allen Pegeln ein Anstieg zu verzeichnen, der sich in den letzten Jahrzehnten verstärkt hat. Das Tnw weist, nachdem es Anfang der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts zunächst leicht absank, in den vergangenen Jahren bis Ende der 1980er Jahre ein stationäres Verhalten bzw. einen leicht positiven Trend auf; das führt nach 1950 zu einer Zunahme des Thb. Das T $\frac{1}{2}$ w zeigt demzufolge ein unterschiedliches Verhalten; es steigt in geringerem Maße als das Thw. Allerdings deuten die Auswertungen für den kurzen Zeitraum der letzten zwei Jahrzehnte bis 1991 an, dass zukünftig für das MTnw und das MThw und damit auch für das mittlere T $\frac{1}{2}$ w bzw. den MSL ein Anstieg erwartet werden kann. Die Nodaltide hat ein Maximum der Gezeitenkräfte in den Jahren 1978/79. Die Zeitdifferenzen zwischen dem Auftreten der Scheitelwasserstände und dem Monddurchgang durch den Nullmeridian weisen auf eine Reduzierung der Tidelaufzeiten hin. Für den Zeitraum der 100 Jahre bis 1991 ergibt sich als Mittelwert für die Deutsche Bucht ein Anstieg des MThw von 2,6 mm/Jahr; für das MTnw ergibt sich keine signifikante Änderung. Der Thb hat sich in dieser Zeit um 1,9 mm/Jahr und das mittlere T $\frac{1}{2}$ w um 1,7 mm/Jahr vergrößert. Über den Zeitraum einer Nodaltide bis 1991 ergibt sich für das mittlere T $\frac{1}{2}$ w ein Anstieg von 4 mm/Jahr und deutet gegenüber den längeren Zeitreihen auf eine Beschleunigung des Anstiegs hin.

Jensen et al. (2011) ermitteln auf Grundlage von RMSL-Zeitreihen lineare Trends für 1951 bis 2008:

- List: 2,4 mm/Jahr,
- Hörnum: 2,1 mm/Jahr,
- Wyk: 2,8 mm/Jahr,
- Dagebüll: 2,2 mm/Jahr,
- Wittdün: 2,6 mm/Jahr,
- Husum: 2,5 mm/Jahr,
- Helgoland: 2,1 mm/Jahr,
- Cuxhaven: 2,0 mm/Jahr,
- Bremerhaven: 1,0 mm/Jahr,
- Lt. Alte Weser: 1,7 mm/Jahr,
- Wilhelmshaven: 2,0 mm/Jahr,
- Norderney: 2,8 mm/Jahr,
- Emden: 1,3 mm/Jahr.

Für eine synthetische Zeitreihe Schleswig-Holsteins wird für den Zeitraum von 1937 bis 2008 ein RMSL-Anstieg von 2,2, für 1951 bis 2008 von 2,5 und für 1971 bis 2008 von 4,1 mm/Jahr ermittelt. Für eine synthetische Zeitreihe Niedersachsens ergibt sich für den Zeitraum von 1843 bis 2008 ein RMSL-Anstieg von 2,0, für 1901 bis 2008 von 1,7, für 1937 bis 2008 von 1,8 und für 1971 bis 2008 von 3,2 mm/Jahr. Die synthetische Zeitreihe Deutsche Bucht zeigt für den Zeitraum von 1843 bis 2008 einen RMSL-Anstieg von 2,0, für 1901 bis 2008 von 1,7, für 1937 bis 2008 von 2,0, für 1951 bis 2008 von 2,1 und für 1971 bis 2008 von 3,6 mm/Jahr. Im Rahmen dieser Untersuchungen wird damit eine Beschleunigung des RMSL-Anstiegs in den letzten Jahrzehnten festgestellt.

Untersuchungen zu absoluten Änderungen des Meeresspiegels haben sich mit der Verfügbarkeit von Satellitenaltimeternmessungen und Modellen zu postglazialen Landbewegungen ab Beginn der 1990er Jahre etabliert. Erste Untersuchungen zu absoluten MSL-Änderungen an der deutschen Nordseeküste wurden von Wahl et al. (2013) durchgeführt; Wahl et al. (2013) verglichen verschiedene methodische Ansätze zur Beschreibung der vertikalen Landbewegung mit den RMSL-Trends einzelner Pegel in der Nordsee. In Jensen et al. (2014) wird der Stand der Forschung zu Meeresspiegeländerungen in der Nordsee und ein vertieftes Prozessverständnis zusammengefasst. Seit Beginn der 2000er Jahre sind viele Untersuchungen zu Meeresspiegel- und Gezeitenänderungen und die dafür verantwortlichen Prozesse einschließlich Budgetierungsansätzen durchgeführt worden (z. B. Jensen und Mudersbach 2004; Wahl et al. 2011, 2013; Calafat et al. 2012; Dangendorf et al. 2013, 2014, 2019; Frederikse et al. 2016, 2018; Chafik et al. 2019). Auf geologischen Zeitskalen wird der MSL in der Nordsee vor allem von postglazialen Prozessen beeinflusst (vgl. Gönner et al. 2009).

Seit Beginn des 20. Jahrhundert ist demnach der RMSL um etwa 1,7 mm/Jahr in der Nordsee angestiegen. Während die Trends über das 20. Jahrhundert in etwa dem globalen Mittel gefolgt sind, zeigen sich auf intra-annualen bis dekadischen Zeitskalen Abweichungen. Neben den Änderungen im MSL zeigt sich seit Mitte der 1950er Jahre ein deutlicher Anstieg des Thb. Auch die Trends in den Extremwasserständen sind deutlich ausgeprägter als der Trend des RMSL (Mudersbach et al. 2013; vgl. Arns et al. 2015, 2017). Eine aktuelle Übersicht zum Thema MSL-Anstieg in der Nordsee findet sich in Huthnance et al. (2016) oder Weiss und Meinke (2017).

Untersuchungen zum Einfluss von vertikalen Landbewegungen auf die Pegelmessungen Ende des 19. Jahrhunderts in Cuxhaven haben Niehüser et al. (2016) durchgeführt; sie zeigten, dass Rückschlüsse auf den Anstieg des MSL auf lokaler Ebene gezogen werden können. Konkret wurde über-

prüft, ob die festgestellten Höhenbewegungen am Pegelfestpunkt des Cuxhavener Tidepegels (vgl. z. B. Siefert und Lassen 1985) auf Basis vergleichender Betrachtungen mit anderen langen Pegelzeitreihen bestätigt werden können und somit eine Korrektur der Wasserstandszeitreihe erforderlich machen. Für die Zeit zwischen 1855 und 2011 wurde ein Trend des MSL von 2,0 mm/Jahr ohne Korrektur gegenüber 1,7 mm/Jahr unter Berücksichtigung der Korrektur ermittelt.

Aktuelle Untersuchungen von Dangendorf et al. (2020) separieren die vertikalen Landbewegungen vom klimatisch induzierten relativen Meeresspiegelanstieg des globalen Ozeans über eine hybride Rekonstruktion des MSL. Dangendorf (2019) hat dazu eine hybride Rekonstruktionsmethodik entwickelt, mit der der MSL global über eine Kombination von Satellitendaten, Pegelbeobachtungen und den bekannten regionalen Mustern einzelner beteiligter Prozesse zunächst auf einem globalen Gitter ermittelt und anschließend in verfeinerter Auflösung an die deutschen Küsten transferiert wird. Die Ergebnisse zeigen etwas höhere relative MSL-Trends entlang der deutschen Nordseeküste bis 2 mm/Jahr. Überlagert werden diese Entwicklungen durch vertikale Landbewegungen, die sich im Bereich von  $\pm 0,5$  mm/Jahr bewegen; dabei werden diese Landbewegungen nicht durch Klimaänderungen verursacht.

Der Meeresspiegelanstieg ist ein instationärer Prozess und weist deutliche regionale Differenzen auf. Die Werte der Trends variieren zwischen den einzelnen Pegelstationen aufgrund lokaler Maßnahmen und atmosphärischer Effekte erheblich. Ein Teil der räumlichen Differenzen in den Langzeittrends der Wasserstände (MSL) sind mit vertikalen Landbewegungen zu erklären (vgl. Dangendorf et al. 2020). An der niedersächsischen Nordseeküste könnte die vertikale Landbewegung einen Anteil von bis zu einem Drittel des RMSL-Anstiegs beitragen.

Seit Beginn des 19. Jahrhunderts ist der MSL absolut um etwa 1,7 mm/Jahr im Mittel in der Nordsee angestiegen. Neben den Änderungen im MSL ist der Thb seit Mitte der 1950er Jahre bis zum Ende der 1990er Jahre um bis zu 10 % angestiegen. Extremwertzeitreihen von NTnw und HThw weisen gegenüber dem MSL deutlich stärkere Trends auf. Erst in aktuellen Arbeiten werden für die Zeitreihen aus der Satellitenaltimetrie von 1992 bis 2017 absolute Meeresspiegeländerungen für die deutschen Küsten im Bereich von bis zu 4 mm/Jahr ermittelt (vgl. Dangendorf et al. 2020).

#### 4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Entwicklung des Meeresspiegels, der Gezeiten, der Tidewasserstände und Sturmfluten ist ein außerordentlich komplexer Prozess mit vielen Interaktionen der verschiedenen Einflussgrößen

natürlichen und anthropogenen Ursprungs. Auch nach fast drei Jahrhunderten Meeresspiegelforschung sind die Prozesse nicht vollständig verstanden. Die umfangreichen Aufzeichnungen an Pegelstationen der Nordseeküste und den Inseln über einen Zeitraum von mehr als 200 Jahren stellen nach wie vor eine wertvolle Datengrundlage für die Meeresspiegelforschung dar. Nur auf Basis eines umfassenden Verständnisses der bisherigen Veränderungen der Wasserstände einschließlich der Extremwasserstände und der Gezeiten sind in Verbindung mit anderen methodischen Ansätzen robuste Projektionen für die zukünftige Wasserstandsentwicklung abzuleiten. Der von Brahm schon 1754 festgestellte Mangel hat kaum an Aktualität verloren: »Wären wir so glücklich, daß unsere Vorfahren von etwa zwei- bis dreihundert Jahren her, die Größe und Stärke derer grossen Seefluthen accurat aufgemessen und aufgezeichnet hinterlassen hätten, so wol als sie die Größe des Verlusts des Schadens, so dieselbe verursacht, beschrieben, hätte der Deichbau schon längstens in erwünschter Vollkommenheit sein können.«

Die vertikalen Landbewegungen wurden ab den 1950er Jahren für die deutsche Nordseeküste gegenüber dem Meeresspiegelanstieg als vernachlässigbar betrachtet; aktuelle Forschungsergebnisse widerlegen diese These. An der niedersächsischen Nordseeküste ist von einer Landsenkung im Bereich weniger Zentimeter pro Jahrhundert und an der schleswig-holsteinischen Nordseeküste von einer nahezu stabilen Lage der Landoberfläche auszugehen. Die vertikale Landbewegung ist aber für Vergleiche mit dem globalen Meeresspiegelanstieg bzw. für die Differenzierung zwischen relativem und absolutem Meeresspiegelanstieg unbedingt zu berücksichtigen; hierzu sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Die wesentlichen physikalischen Prozesse, die zu Änderungen der Wasserstände und der Gezeitenausprägung an der deutschen Nordseeküste führen, sind seit mehr als zwei Jahrhunderten bekannt. In der Gesamtschau der Meeresspiegeländerungen auf Grundlage von Wasserstands- bzw. Pegelmessungen ist festzustellen, dass sich die ermittelten Trends für die relativen Änderungen des MThw und RMSL über die vergangenen knapp eineinhalb Jahrhunderte kaum verändert haben, vielmehr zeigen die Wasserstandsänderungen in der Deutschen Bucht über die letzten beiden Jahrhunderte ein relativ gleichförmiges Verhalten, dabei haben sich vermutlich die Anteile der Veränderungen der beteiligten Prozesse deutlich verändert. Ab den 1950er Jahren zeigt sich in den Tidewasserständen eine Dynamik, die hinsichtlich der Tidehubvergrößerung Ende der 1990er Jahre wieder abklingt.

Der Anstieg des MThw kann über den Zeitraum vom 17. Jahrhundert bis Mitte/Ende des 20. Jahrhunderts mit 2,5 mm/Jahr abgeschätzt werden,

der Anstieg ist dabei aber nicht linear, z. B. wurden Anfang des 20. Jahrhunderts höhere Anstiegswerte beobachtet. Mit diesen Anstiegsraten ist eine Rekonstruktion des Meeresspiegels und der Tidewasserstände für die höhenmäßige Einordnung von historischen Sturmfluten möglich.

Die Entwicklung des RMSL ist über diesen Zeitraum sehr ähnlich, allerdings ist der Trend des MThw etwas höher als der des MTnw und des RMSL. Der RMSL-Anstieg liegt für den Zeitraum von 1900 bis 2015 für die gesamte Nordsee in einer Größenordnung von rund 1,7 mm/Jahr. Mit Beginn der Satellitenbeobachtungen wird für den Zeitraum zwischen 1992 bis 2015 ein größerer MSL-Anstieg und damit eine Beschleunigung des MSL-Anstiegs ermittelt. Entlang der Küste Schleswig-Holsteins zeigen sich höhere Raten des MSL-Anstiegs und niedrigere Raten entlang der Küste Niedersachsens. Der Meeresspiegel weist darüber hinaus jährliche bis mehrdekadische Schwankungen auf, die hauptsächlich aus langjährigen Variabilitäten der Wetter- und Windsysteme sowie Änderungen in der großskaligen Ozeanzirkulation entstehen.

Neben den Veränderungen des Meeresspiegels verändern sich auch die Ausprägungen der Gezeiten. Während das MThw kontinuierlich ansteigt, zeigt das MTnw nur geringe Veränderungen. Insgesamt hat sich damit der MThb an der deutschen Nordseeküste von Mitte der 1950er Jahre bis Mitte der 1990er Jahre um bis zu 10 % erhöht. Auch hier zeigt sich eine unterschiedliche Entwicklung an den deutschen Nordseeküsten. Der MThb hat sich in dieser Zeit an den Küsten Schleswig-Holsteins um etwa 10 % erhöht und an der Küste Niedersachsens etwas geringer erhöht. Der Anstieg des MSL und des MThb ist für die Entwicklung der Morphologie bzw. die Sedimentumlagerungen im Wattenmeer, das Küstenvorfeld, die Inseln und Halligen von größter Bedeutung, da die natürliche Anpassungsfähigkeit des Wattenmeers und der Küste begrenzt ist.

Für die Aufgaben im Küsteningenieurwesen und Küstenschutz sind regionale und lokale Änderungen des Meeresspiegels, relativ zum Land, und insbesondere der zukünftige Meeresspiegelanstieg von Bedeutung. Für den Küstenschutz an der deutschen Nordseeküste und die Bemessung von Küstenschutzbauwerken wurde ab den 1950er Jahren bis etwa 2010 ein Anstieg der Wasserstände von 25 cm (Säkularanstieg) und aktuell wird ein zukünftiger Anstieg von 50 cm berücksichtigt. In den letzten Jahrzehnten ist eine Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs festzustellen, deshalb muss die weitere Entwicklung des Meeresspiegels und insbesondere der Extremereignisse, jeweils unter Berücksichtigung der beteiligten Prozesse, sehr sorgfältig beobachtet werden, um ggf. entsprechende Anpassungen für den Küstenschutz umzusetzen. //

#### Danksagung

Mein großer Dank gilt dem Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI), das mich über fast drei Jahrzehnte mit der Förderung von vielen Projekten bei der Erforschung der Veränderung der Wasserstände, Sturmfluten und Gezeiten unterstützt hat. Weiterhin danke ich Frau Dr. Jessica Kelln, Assist.-Prof. Dr. Sönke Dangendorf und Herrn Sebastian Niehüser, M.Sc. für die interessanten Diskussionen und Anregungen.

## Literatur

- Arns, Arne; Thomas Wahl et al. (2015): The impact of sea level rise on storm surge water levels in the northern part of the German Bight. *Coastal Engineering*, DOI: 10.1016/j.coastaleng.2014.12.002
- Arns, Arne; Sönke Dangendorf et al. (2017): Sea-level rise induced amplification of coastal protection design heights. *Nature Scientific Reports*, DOI: 10.1038/srep40171
- Baeteman, Cecile; Martyn Waller; Patrick Kiden (2011): Reconstructing middle to late Holocene sea-level change: A methodological review with particular reference to a new Holocene sea-level curve for the southern North Sea presented by K.-E. Behre. *Boreas*, DOI: 10.1111/j.1502-3885.2011.00207.x
- Behre, Karl-Ernst (2003): Eine neue Meeresspiegelkurve für die südliche Nordsee. *Probleme der Küstenforschung*, 28, S. 9–61
- Behre, Karl-Ernst (2007): A New Holocene Sea-Level Curve for the Southern North Sea. *Boreas*. DOI: 10.1111/j.1502-3885.2007.tb01183.x
- Bradley, James (1728): An account of a new discovered motion of the fix'd stars. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, DOI: 10.1098/rstl.1727.0064
- Brahms, Albert (1754): Anfangs-Gründe der Deich- und Wasser-Baukunst, Teil I. Verlag H. Tapper, Aurich
- Brahms, Albert (1757): Anfangs-Gründe der Deich- und Wasser-Baukunst, Teil II. Verlag H. Tapper, Aurich
- Bungenstock, Friederike; Henk J. T. Weerts (2010): The high-resolution Holocene sea-level curve for Northwest Germany: global signals, local effects or data-artefacts? *International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau)*, DOI: 10.1007/s00531-009-0493-6
- Calafat, Francisco M.; Don P. Chambers; Mikis N. Tsimplis (2012): Mechanisms of decadal sea level variability in the eastern North Atlantic and the Mediterranean Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, DOI: 10.1029/2012JC008285
- Chafik, Léon; Jan Even Øie Nilsen et al. (2019): North Atlantic Ocean Circulation and Decadal Sea Level Change During the Altimetry Era. *Scientific Reports*, DOI: 10.1038/s41598-018-37603-6
- Dangendorf, Sönke; Christoph Mudersbach et al. (2013): Characteristics of intra-, inter-annual and decadal sea-level variability and the role of meteorological forcing: the long record of Cuxhaven. *Ocean Dynamics*, DOI: 10.1007/s10236-013-0598-0
- Dangendorf, Sönke; Francisco M. Calafat et al. (2014): Mean sea level variability in the North Sea: processes and implications. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, DOI: 10.1002/2014JC009901
- Dangendorf, Sönke; Carling Hay et al. (2019): Persistent acceleration in global sea-level rise since the 1960s. *Nature Climate Change*, DOI: 10.1038/s41558-019-0531-8
- Dangendorf, Sönke; Jessica Kelln et al. (2020): Untersuchungen zur Rekonstruktion des Meeresspiegels und vertikaler Landbewegungen an den deutschen Küsten. *Die Küste*, in Begutachtung
- DIN 4049-3 (1994): Hydrologie: Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie. Deutsches Institut für Normung, Berlin
- Frederikse, Thomas; Riccardo Riva et al. (2016): Estimating decadal variability in sea level from tide gauge records: An application to the North Sea. *Journal of Geophysical Research*, DOI: 10.1002/2015JC011174
- Frederikse, Thomas; Svetlana Jevrejeva et al. (2018): A consistent sea-level reconstruction and its budget on basin and global scales over 1948–2014. *Journal of Climate*, DOI: 10.1175/JCLI-D-17-0502.1
- Führböter, Alfred; Jürgen Jensen (1985): Säkularänderungen der mittleren Tidewasserstände in der Deutschen Bucht. *Die Küste*, 42, S. 78–100
- Gaye, Julius (1951): Wasserstandsänderungen in der Ostsee und der Nordsee in den letzten 100 Jahren. *Die Wasserwirtschaft, Sonderheft: Vorträge der Gewässerkundlichen Tagung 1951 in Hamburg*
- Gönnert, Gabriele; Jürgen Jensen et al. (2009): Der Meeresspiegelanstieg: Ursachen, Tendenzen und Risikobewertung. *Die Küste*, 76, S. 225–256
- Gregory, Jonathan M.; Stephen M. Griffies et al. (2019): Concepts and Terminology for Sea Level: Mean, Variability and Change, Both Local and Global. *Surveys in Geophysics*, DOI: 10.1007/s10712-019-09525-z
- Hagen, Gotthilf (1845): Über die Oberfläche der Flüssigkeiten: Eine in der Königlichen Akademie der Wissenschaften gelesene Abhandlung
- Hensen, Walter (1938): Über die Ursachen der Wasserstandshebung an der deutschen Nordseeküste. *Die Bautechnik*, H.1
- Hundt, Claus (1955): Maßgebende Sturmfluthöhen für das Deichbestick der schleswig-holsteinischen Westküste. *Die Küste*, 1/2, S. 96–152
- Huthnance John; Ralf Weisse et al. (2016): Recent change – North Sea. In: Markus Quante; Franciscus Colijn (Hrsg.): *North Sea Region Climate Change Assessment*, DOI: 10.1007/978-3-319-39745-0\_3
- Jensen, Jürgen (1984): Änderungen der mittleren Tidewasserstände an der Nordseeküste. *Mitteilungen des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig*, Heft 83
- Jensen, Jürgen; Andrea Töppe (1986): Zusammenstellung und Auswertung von Originalaufzeichnungen des Pegels Travemünde/Ostsee ab 1826. *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen*, 4
- Jensen, Jürgen; Hans-Eckard Mügge; Georg Visscher (1988): Untersuchungen zur Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht. *Die Küste*, 47, S. 135–161
- Jensen, Jürgen; Hans-Eckard Mügge; Wolfgang Schönfeld (1990): Development of Water Level changes in the German Bight, an Analysis Based on Single Value Time Series. *Coastal Engineering 1990*, S. 2838–2851
- Jensen, Jürgen; Hans-Eckard Mügge; Wolfgang Schönfeld (1992): Analyse der Wasserstandsentwicklung und Tidedynamik in der Deutschen Bucht. *Die Küste*, 53, S. 211–275
- Jensen, Jürgen; Christoph Mudersbach (2004): Zeitliche Änderungen in den Wasserstandszeitreihen an den Deutschen Küsten. In: Gabriele Gönnert; Hartmut Graßl et al. (Hrsg.): *Klimaänderung und Küstenschutz*, Universität Hamburg
- Jensen, Jürgen; Torsten Frank; Thomas Wahl (2011): Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste (AMSeL). *Die Küste*, 78, S. 59–163

- Jensen, Jürgen; Sönke Dangendorf et al. (2014): Meeresspiegeländerungen in der Nordsee: Vergangene Entwicklungen und zukünftige Herausforderungen mit einem Fokus auf die Deutsche Bucht. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, DOI: 10.5675/HyWa\_2014,6\_1
- Kramer, Johann (1989): Kein Deich – Kein Land – Kein Leben – Geschichte des Küstenschutzes an der Nordsee. Rautenberg, Leer
- Krüger, Wilhelm (1922): Die Jade, das Fahrwasser Wilhelmshavens. *Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft*, 4, S. 268–284
- Krüger, Wilhelm (1938): Die Küstensenkung an der Jade. *Der Bauingenieur*, 19, S. 91–99
- Lassen, Horst (1989): Örtliche und zeitliche Variation des Meeresspiegels in der südöstlichen Nordsee. *Die Küste*, 50, S. 65–95
- Lentz, Bernhard Hugo (1873): Fluth und Ebbe und die Wirkungen des Windes auf den Meeresspiegel, Otto Meissner, Hamburg, 1879
- Liese, Rudolf (1979): Veränderungen von Tidehochwasser, Tideniedrigwasser und Tidehub seit 1946. *Jahresbericht 1978*, 30, Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz Norderney
- Lohrberg, Wilhelm (1989): Änderungen der mittleren Tidewasserstände an der Nordseeküste. *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen*, 5/6
- Lubbock, John William (1836): *On the theory of the moon, and on the perturbations of the planets*. Charles Knight, London
- Lüders, Karl (1936): Über das Ansteigen der Wasserstände an der deutschen Nordseeküste. *Zentralblatt der Bauverwaltung*, 50
- Macaren, Charles (1842): The Glacial theory of Professor Agassiz, *American Journal of Science and Arts*, 42
- Meier, Dirk (2007): *Die Nordseeküste: Geschichte einer Landschaft*. 2. Auflage, Boysens Buchverlag, Heide
- Mudersbach, Christoph; Thomas Wahl et al. (2013): Trends in high sea levels of German North Sea gauges compared to regional mean sea level changes. *Continental Shelf Research*, DOI: 10.1016/j.csr.2013.06.016
- Niehüser, Sebastian; Jürgen Jensen et al. (2016): Zum Einfluss möglicher Setzungserscheinungen am Leuchtturm Cuxhaven auf die langjährigen Wasserstandsaufzeichnungen am Pegel Cuxhaven Steubenhöft. *Die Küste*, 84, S. 119–145
- Paschen, Friedrich (1869): Beitrag zur Untersuchung der Frage über die Hebung der deutschen Ostsee. In: *Beiträge zur Statistik Mecklenburgs*
- Peltier, W. Richard (2004): Global glacial isostasy and the surface of the Ice-Age earth: The ICE-5G (VM2) model and GRACE. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, DOI: 10.1146/annurev.earth.32.082503.144359.
- Peltier, W. Richard; Donald Argus; James R. Drummond (2015): Space geodesy constrains ice age terminal deglaciation: The global ICE-6G\_C (VM5a) model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, DOI: 10.1002/2014JB011176
- Peters, L. C. (1929): *Nordfriesland – Heimatbuch für Die Kreise Husum und Sütdondern*. Verlag C.F. Delff, Husum
- Pugh, David; Philip Woodworth (2014): *Sea-Level Science – Understanding Tides, Surges, Tsunamis and Mean Sea Level Changes*, Cambridge University Press
- Reinke, Johann Theodor (1787): Über die Ebbe- und Fluth-Observation auf der Elbe. *Hamburgische Adreß-Comtoir-Nachrichten*, 36
- Rietschel, Ernst (1933): Neuere Untersuchungen zur Frage der Küstensenkung, *Deutsche Wasserwirtschaft*, 5, Berlin
- Rohde, Hans (1964): Die Häufigkeit hoher Wasserstände an der Westküste von Schleswig-Holstein. *Die Küste*, 12, S. 86–112
- Rohde, Hans (1968): Wasserstandsänderungen und Sturmfluthäufigkeit an der Elbemündung. *Die Küste*, 16, S. 33–42
- Rohde, Hans (1975): Wasserstandsbeobachtungen im Bereich der deutschen Nordseeküste vor der Mitte des 19. Jahrhunderts. *Die Küste*, 28, S. 1–96
- Rohde, Hans (1977): Sturmfluthöhen und säkularer Wasserstandsanstieg an der deutschen Nordseeküste. *Die Küste*, 30, S. 52–143
- Schütte, Heinrich (1908): Neuzeitliche Senkungserscheinungen an unserer Nordseeküste. *Jahrbuch für die Geschichte des Herzogtums Oldenburg*
- Siefert, Winfried; Horst Lassen (1985): Gesamtdarstellung der Wasserstandsverhältnisse im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht nach neuen Pegelauswertungen. *Die Küste*, 42, S. 1–77
- Siefert, Winfried; Horst Lassen (1991): Mittlere Tidewasserstände in der südöstlichen Nordsee – säkularer Trend und Verhältnisse um 1980 (Schlussbericht eines KFKI-Projektes). *Die Küste*, 52, S. 85–137
- Suess, Eduard (1888): *Das Antlitz der Erde*, Band 2
- Vink, Annemiek; Holger Steffen et al. (2007): Holocene relative sea-level change, isostatic subsidence and the radial viscosity structure of the mantle of northwest Europe (Belgium, The Netherlands, Germany, southern North Sea). *Quaternary Science Reviews*, DOI: 10.1016/j.quascirev.2007.07.014
- Wahl, Thomas; Jürgen Jensen; Torsten Frank (2010): On analysing sea-level rise in the German Bight since 1844. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, DOI: 10.5194/nhess-10-171-2010
- Wahl, Thomas; Jürgen Jensen et al. (2011): Improved estimates of mean sea level changes in the German Bight over the last 166 years. *Ocean Dynamics*, DOI: 10.1007/s10236-011-0383-x
- Wahl, Thomas; Ivan David Haigh et al. (2013): Observed mean sea level changes around the North Sea coastline from 1800 to present. *Earth-Science Reviews*, DOI: 10.1016/j.earscirev.2013.05.003
- Weisse, Ralf; Insa Meinke (2017): Meeresspiegelanstieg, Gezeiten, Sturmfluten und Seegang. In: Guy P. Brasseur; Daniela Jacob; Susanne Schuck-Zöller (Hrsg.): *Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*, S. 77–85
- Woebcken, Carl (1924): *Deiche und Sturmfluten an der Nordseeküste*. Friesen-Verlag, Bremen-Wilhelmshaven
- Woodworth, Philip L. (2017): Differences between mean tide level and mean sea level. *Journal of Geodesy*, DOI: 10.1007/s00190-016-0938-1

# Gaps M5: Ready-to-use Unterwasser-Navigationssystem

Nach Jahren kontinuierlicher Innovationsarbeit und erfolgreichen Einsätzen ist Gaps ein hochpräzises Unterwasser-Navigationssystem (USBL), das keine Kalibrierung erfordert. Vom Taucher Tracking über Work-Class ROV-Vermessungen und AUV-Missionen im Flachwasser bis hin zur dynamischen Positionsbestimmung von DP3-Schiffen sind mehr als 300 Systeme weltweit im Einsatz.

Entwickelt für den Einsatz unter extremen Bedingungen und mit hohen Anforderungen gewährleistet Gaps eine Genauigkeit von mehr als 0,1% Slant range. Aufgrund des großen Erfolges des Gaps, hat iXblue mit dem Gaps-M5 ein neues, handliches konkurrenzloses Mini USBL System entwickelt, damit mehr Nutzer aus anderen Bereichen iXblue USBL einsetzen können.

## Exportfreies omnidirektionales USBL- von der Oberfläche bis in mittlere Gewässertiefen

In dem kleinen Bruder des bekannten Gaps (jetzt Gaps-M7) ist ein AHRS,

basierend auf der FOG Technologie von iXblue integriert, mit dem Schiffsbewegungen (Kurs, Roll & Pitch) kompensiert werden. Das kompaktere Gaps-M5 ist wie sein größerer Bruder kalibrierfrei und somit Ready-to-Use.

Bei extremen Störgeräuschen bietet es eine Genauigkeit von mehr als 0,5% Slant range, bis zu einer Reichweite von 995m und unterliegt keinen Exportbeschränkungen.

## Einzigartige Form für maximale Leistung

Die Form der Gaps-Produkte wurde bei der M5 Variante beibehalten, lediglich die Sensorbeine sind kürzer. Die 3D-Antenne mit 4 Hydrophonen hat unterschiedliche Beinlängen, um die horizontalen Ortungsleistungen zu verstärken. Beim Gaps-M5 ist keine Ausrichtung der Antenne erforderlich, die Akustik bietet maximale Öffnung und ermöglicht eine Rundumabdeckung von bis zu 200°. Das Gerät ist im Flachwasser und bei horizontaler Ortung leistungsstark

- vor allem, wenn rundum (360°) mehrere Fahrzeuge gleichzeitig zu verfolgen sind. Das Gaps-M5 eignet sich für alle Ortungsaufgaben, von der Verfolgung eines Tauchers, Positionierung von geschleppten Systemen, Objekten am Meeresgrund und zur Überwachung von ROV/AUV.

Gaps-M5 lässt sich für die dynamische Positionierung als akustischer Transceiver mit einem einzigen Beacon im USBL-Modus und 3+ Beacons im LBL-Mode nutzen. Die relative Position wird berechnet und über gängige DP-Protokolle ausgegeben.

Abschließend ist das Gaps-M5 ein praktisches, portables, frei exportierbares und preiswerteres Unterwasser-Navigationssystem. ■

Weitere Infos unter: [www.ixblue.com](http://www.ixblue.com),  
Kontakt: [hamburg@ixblue.com](mailto:hamburg@ixblue.com),  
Tel: +49 40 30706470

# Klein und stark.

## UNSERE USBL-FAMILIE WÄCHST



### Gaps M5

Exportfreies omnidirektionales - Unterwasser-navigationsystem - von der Oberfläche bis in mittlere Gewässertiefen (995 m) einsetzbar.

**iXblue**

Oceanology  
international  
Booth #E100

# Globale terrestrische geodätische Referenzrahmen als Grundlage der Erdsystembeobachtung

Ein Beitrag von SUSANNE GLASER und HARALD SCHUH

Die Bereitstellung geeigneter globaler terrestrischer geodätischer Referenzrahmen ist von hoher gesellschaftlicher Relevanz und von ausschlaggebender Bedeutung für ein tiefgreifendes Verständnis des Systems Erde. Dies wird deutlich, wenn es um eine genaue und zuverlässige Quantifizierung und Prognose des globalen Meeresspiegelanstiegs geht. Die Unsicherheiten im Referenzrahmen sind eine Hauptfehlerquelle bei der Bestimmung des globalen Meeresspiegels. Daher will man die Genauigkeitslimitierenden Effekte in der Bestimmung von Referenzrahmen aufdecken und minimieren. Simulationen von Referenzrahmen sind dafür ein nützliches Hilfsmittel.

Referenzrahmen | GGOS | GNSS | SLR | VLBI | DORIS | Simulationen  
reference frame | GGOS | GNSS | SLR | VLBI | DORIS | simulations

The provision of suitable global terrestrial geodetic reference frames is of high social relevance and of crucial importance for a profound understanding of the Earth's system. It is evident for an accurate and reliable quantification and prediction of global sea-level rise. The uncertainties in the reference frames are a major error source in the determination of global sea-level rise. Therefore, the accuracy limiting effects in the determination of reference frames have to be detected and minimised. Simulations of reference frames are a useful tool for this purpose.

## Autoren

Dr.-Ing. Susanne Glaser ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches Geo-Forschungszentrum GFZ. Prof. Dr. Dr. h.c. Harald Schuh ist dort Direktor am Department 1 »Geodäsie«.

[susanne.glaser@gfz-potsdam.de](mailto:susanne.glaser@gfz-potsdam.de)

## 1 Einleitung

Globale terrestrische geodätische Referenzrahmen stellen die Realisierung von Referenzsystemen dar. Diese können als dreidimensionale kartesische Koordinatensysteme der Erde verstanden werden. Terrestrische Referenzrahmen werden durch Positionen und Geschwindigkeiten global verteilter Beobachtungstationen angegeben. Eine integrierte Erdsystembeobachtung auf Basis von verschiedenen geodätischen Beobachtungen bedingt genaue und konsistente Referenzrahmen, da sie eine absolute Referenz für die zunächst nur relativen Messgrößen, wie Satellitenbeobachtungen des Globalen Positionierungssystems GPS, gewährleisten. Gegenwärtig, insbesondere in Zeiten des Klimawandels und der Bedrohung der Bevölkerung durch Naturgefahren, bilden hochgenaue Referenzrahmen eine ganz entscheidende Grundlage für die erforderliche Erfassung von Prozessen im System Erde. Unsicherheiten im Referenzrahmen spiegeln sich in gleicher Weise in den geodätischen, geophysikalischen und ozeanographischen Größen wider, die auf Basis des Referenzrahmens bestimmt werden. Es wird angenommen, dass die Genauigkeit in der Bestimmung des globalen Meeresspiegelanstiegs zu einem beträchtlichen Maße durch die Unsicherheiten im derzeit ver-

fügbaren globalen Referenzrahmen limitiert ist. Laut Sachstandsbericht des Weltklimarates (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) ist der Meeresspiegel im globalen Mittel um 3,1 mm pro Jahr gestiegen (WCRP Global Sea Level Budget Group 2018; IPCC 2019; Oppenheimer et al. 2019). Angesichts dessen wird gefordert, dass globale Referenzrahmen mindestens eine Größenordnung genauer sind. Auf dieser Grundlage sind die konkreten Forderungen des Globalen Geodätischen Beobachtungssystems (GGOS) der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG) entstanden: Ein Referenzrahmen soll eine Genauigkeit von mindestens einem Millimeter und eine Langzeitstabilität von einem Millimeter pro Dekade aufweisen.

Die aktuelle offizielle Realisierung ITRF2014 (International Terrestrial Reference Frame 2014) (Altamimi et al. 2016) erreicht diese geforderte Genauigkeit und Langzeitstabilität bisher allerdings nicht. Es wird in der Geodäsie international intensiv an der Erstellung hochgenauer Referenzrahmen gearbeitet (Abschnitt 2), um ein genaues und zuverlässiges Monitoring verschiedener Erdsystemprozesse, vor allem des Meeresspiegelanstiegs, zu ermöglichen (Abschnitt 3). Geplante Entwicklungen in der Referenzrahmenbestimmung können dabei fundiert mittels geeigneter

Simulationen (Abschnitt 4) abgeschätzt und bewertet werden.

## 2 Erstellung hochgenauer Referenzrahmen

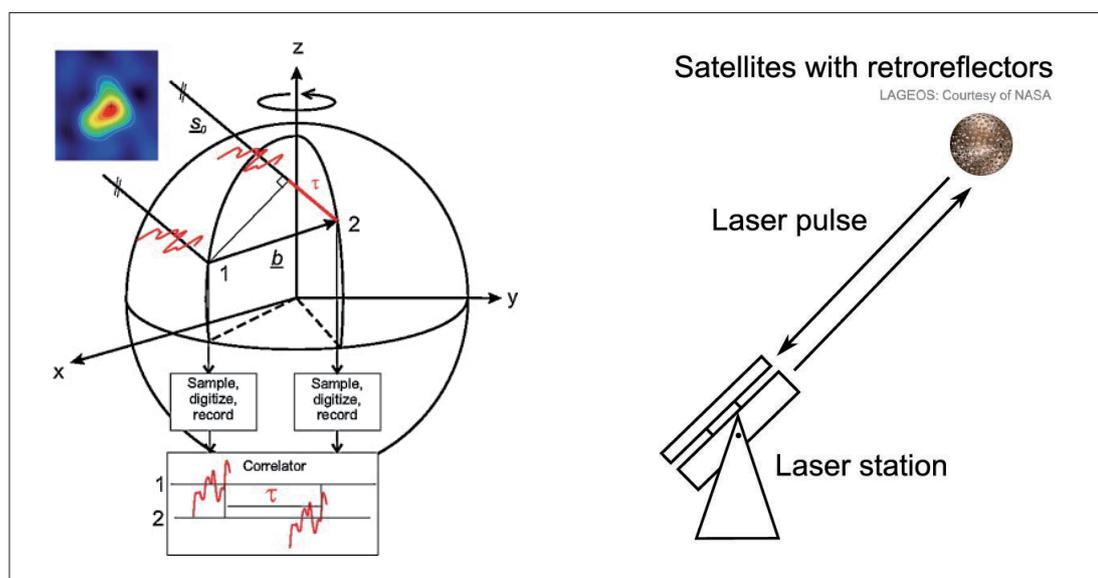
Für einen möglichst genauen und stabilen Referenzrahmen werden vier geodätische Weltraumverfahren in geeigneter Weise kombiniert, da jedes Verfahren individuelle Stärken und Schwächen aufweist. Zu den Weltraumverfahren zählen die Globalen Navigationssatellitensysteme (Global Navigation Satellite Systems – GNSS), einschließlich des vielen bekannten amerikanischen Globalen Positionierungssystems (GPS), des russischen GLONASS-, des chinesischen Beidou- sowie des europäischen Galileo-Systems. Weitere wichtige geodätische Verfahren sind die Laserentfernungsmessungen zu Satelliten (Satellite Laser Ranging – SLR), die Radiointerferometrie auf sehr langen Basislinien (Very Long Baseline Interferometry – VLBI) sowie das französische Dopplermessverfahren (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite – DORIS).

Es tragen nicht alle dieser Verfahren gleichermaßen zum terrestrischen Referenzrahmen bei. Ein Referenzrahmen wird üblicherweise durch sieben definierende Parameter angegeben: drei Translationen des Ursprungs in X-, Y- und Z-Koordinatenrichtung, drei Rotationen um die X-, Y- und Z-Achse sowie ein Maßstabsfaktor für das globale Stationsnetz. VLBI realisiert zusammen mit SLR den Netzmaßstab. VLBI hat eine sehr lange Beobachtungshistorie zurück bis ins Jahr 1979 und ist weiterhin durch ein stabiles Raumsegment charakterisiert, das durch jeweils zwei raumfeste Himmelskoordinaten von extragalaktischen Radioquellen, meist Quasaren, gegeben ist. Das Grundprinzip des Messverfahrens ist in [Abb. 1](#) (links) dargestellt. Das

ermöglicht eine sehr stabile Realisierung des Netzmaßstabes bei der Bestimmung des Referenzrahmens.

Allerdings ist VLBI nicht sensitiv für den Massenmittelpunkt der Erde. SLR ist durch das relativ einfache Messprinzip (siehe [Abb. 1](#), rechts) mit einer weniger komplexen Modellierung der Beobachtungen sehr gut zur Realisierung des Ursprungs des Referenzrahmens geeignet. Die beiden Verfahren SLR und VLBI haben jedoch ein weniger gut ausgebautes und ungleichmäßig verteiltes Stationsnetz als GNSS und DORIS, die wesentlich zur Verdichtung des Referenzrahmens beitragen. Die vier Techniken haben ebenfalls unterschiedliche Sensitivitäten bei der Bestimmung der Erdorientierungsparameter. Diese sind unerlässlich für die Transformation zwischen terrestrischem (erdfestem) und zälestischem (himmelsfestem) Referenzrahmen, was Voraussetzung für die Navigation auf der Erde und im Weltraum ist. VLBI ist die einzige Technik, die die Orientierung der Erde bezüglich des Nullmeridians (UT1-UTC) absolut bestimmen kann. Dagegen können die Koordinaten des terrestrischen Pols mit GNSS aufgrund des global besser verteilten Stationsnetzes genauer bestimmt werden. Es wird damit deutlich, dass eine konsistente Kombination zwingend erforderlich ist, um geodätische Schlüsselparameter, wie Referenzrahmen und Erdorientierungsparameter, bestmöglich bestimmen zu können.

Im Abstand weniger Jahre wird regelmäßig eine aktualisierte Version des offiziellen Referenzrahmens veröffentlicht. Die erste Realisierung, die aus einer Kombination verschiedener Verfahren bestimmt wurde, ist das BTS84 (Bureau International de l'Heure Terrestrial System aus dem Jahre 1984) (Petit und Luzum 2010). Spätere Referenzrahmen seit der Gründung des Internationalen Dienstes



**Abb. 1:** Messprinzip der geodätischen Weltraumverfahren. Links: Radiointerferometrie auf sehr langen Basislinien (Very Long Baseline Interferometry – VLBI); rechts: Laserentfernungsmessungen zu Satelliten (Satellite Laser Ranging – SLR)

für Erdrotation und Referenzsysteme (IERS – International Earth Rotation and Reference Systems Service) tragen den Namen ITRF, angefangen von ITRF88 bis ITRF2014, mit insgesamt 13 Versionen bis heute. Während dieser Zeit ist die Erstellung der Referenzrahmen mit stetigen Verbesserungen einhergegangen. Der aktuelle Referenzrahmen ITRF2014 weist eine Genauigkeit von 3 mm und eine Stabilität von 0,2 mm/Jahr zur Referenzepoche 2010.0 für den Ursprung in Bezug auf die vorherige Realisierung ITRF2008 (Altamimi et al. 2011) auf. Im realisierten Maßstab gibt es eine Differenz zwischen den beiden Techniken SLR und VLBI von 1,37 ppb und 0,02 ppb/Jahr zur Epoche 2010.0, was auf der Erdoberfläche ungefähr 8,7 mm und 0,13 mm/Jahr entspricht. Hinsichtlich der geforderten Genauigkeit von 1 mm ist dies als kritisch zu erachten, und es bestehen intensive Bemühungen, diese Differenz zu reduzieren. Die Ursachen liegen zum einen in einer unzureichenden Modellierung der Einzeltechniklösungen und zum anderen in der Kombinationsstrategie. Es ist zu erwarten, dass in der nächsten Realisierung ITRF2020 die Differenz deutlich minimiert werden kann.

Die offizielle Realisierung, der ITRF, wird am Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN) in Paris, Frankreich, als einem von weltweit drei Kombinationszentren des IERS gerechnet. Weitere Kombinationszentren mit den entsprechenden aktuellen Realisierungen DTRF2014 (Seitz et al. 2016) und JTRF2014 (Abbondanza et al. 2017) sind das Deutsche Geodätische Forschungsinstitut der Technischen Universität München (DGFI-TUM) sowie das Jet Propulsion Laboratory (JPL) der NASA, Pasadena, USA. Alle drei Realisierungen stimmen im Bereich weniger Millimeter überein; allerdings gibt es bezüglich des Netzmaßstabes Differenzen, hauptsächlich

zwischen ITRF2014 und DTRF2014 (Seitz et al. 2015; Abbondanza et al. 2017; Bloßfeld et al. 2018). Es ist Gegenstand aktueller Forschung, die signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Referenzrahmen zu verstehen.

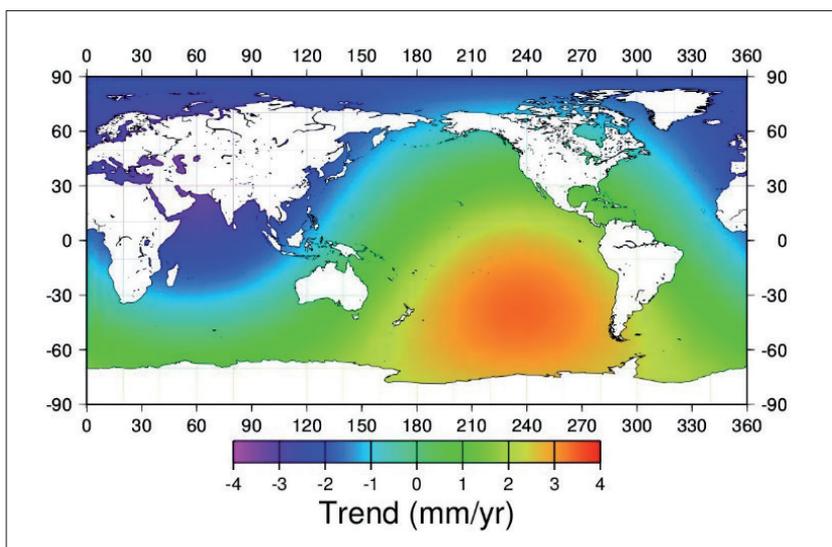
Bevor eine neue Version eines Referenzrahmens berechnet wird, stellen die Technikzentren jedes geodätischen Verfahrens auf der Grundlage der Ergebnisse der einzelnen Analysezentren Einzeltechniklösungen bereit. Diese werden dann an den drei Kombinationszentren (IGN, DGFI-TUM, JPL) analysiert und letztendlich wird ein Referenzrahmen wie der ITRF2014, DTRF2014 und JTRF2014 als Kombination der Einzeltechniklösungen bestimmt. Die einzelnen Analysezentren sind internationalen wissenschaftlichen Diensten (Services) für eine optimale Koordination innerhalb des IERS zugeordnet. Zum Beispiel betreibt das Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungszentrum (GFZ) im Department 1 »Geodäsie« in der Sektion 1.1 »Geodätische Weltraumverfahren« jeweils ein Analysezentrum des International GNSS Service (IGS) (Johnston et al. 2017) und des International VLBI Service (IVS, assoziiert) (Schuh und Behrend 2012; Nothnagel et al. 2015), in Sektion 1.2 »Globales Geomonitoring und Schwerfeld« jeweils ein Analysezentrum des International Laser Ranging Service (ILRS) (Pearlman et al. 2002) und des International DORIS Service (IDS, assoziiert) (Willis et al. 2010).

Vom IERS werden außerdem festgelegte Standards in sogenannten Conventions, wie den IERS Conventions 2010 (Petit und Luzum 2010) veröffentlicht, die einer konsistenten Auswertung der verfahrensspezifischen Beobachtungen in den verschiedenen Analysezentren aller Dienste weltweit dienen.

### 3 Referenzrahmen und Meeresspiegel

Obwohl die Definition und Realisierung von Referenzrahmen dem Bereich der geodätischen Grundlagenforschung zugeordnet werden kann, ist die Bereitstellung geeigneter Referenzrahmen von hoher gesellschaftlicher Relevanz und für ein tiefgreifendes Verständnis des Systems Erde von ausschlaggebender Bedeutung. Dies wird vor allem deutlich für eine genaue und zuverlässige Quantifizierung und Prognose des globalen Meeresspiegelanstiegs. Die Unsicherheiten im Referenzrahmen werden als eine Hauptfehlerquelle bei der Bestimmung des globalen Meeresspiegels angenommen (Blewitt et al. 2010; Beckley et al. 2017).

Zum Beispiel zeigen die Unterschiede zwischen zwei Referenzrahmen – dem IGSb00, angepasst an ITRF2000, und dem nur aus GNSS-Beobachtungen bestimmten IGS PPP – Unsicherheiten im Meeresspiegelanstieg im Bereich von –3 bis +3 mm/Jahr (Abb. 2). Der globale Meeresspiegelanstieg selbst wird dabei mit 3,1 mm/Jahr seit 1993 auf



Quelle der Abbildung: Plag (2006), S. 32

**Abb. 2:** Der Unterschied von zwei verschiedenen Referenzrahmen des IGS (IGSb00, angepasst an ITRF2000, vs. IGS PPP) führt zu Unsicherheiten in der Abschätzung des Meeresspiegelanstieges im Bereich von –3 bis +3 mm/Jahr

der Grundlage von Altimeterdaten angegeben (WCRP Global Sea Level Budget Group 2018). Eine Unsicherheit von einem Zentimeter im realisierten Ursprung des Referenzrahmens führt zu einer Unsicherheit von bis zu  $-1,2$  mm im mittleren Meeresspiegel, abgeleitet aus Satellitenaltimetermessungen (Morel und Willis 2005).

Die Vereinten Nationen haben in einer ersten Resolution zur Geodäsie die Relevanz sehr genauer Referenzrahmen für das Monitoring des Systems Erde hervorgehoben, die im Februar 2015 unter dem Titel »A global geodetic reference frame for sustainable development« (A/RES/69/266, www.unggrf.org) verabschiedet wurde.

#### 4 Simulationsstudien

Es besteht demnach ein großes Interesse in der geodätischen Gemeinschaft, die Genauigkeitslimitierenden Effekte in der Bestimmung von Referenzrahmen aufzudecken und zu minimieren. Zu erwartende Genauigkeitssteigerungen durch zukünftige Entwicklungen für die nächsten Referenzrahmen können mit Simulationen zuverlässig bewertet werden (Schuh et al. 2015). Dazu zählen zum Beispiel der Ausbau der Stationsnetze durch neue Beobachtungsstationen und eine Verbesserung der Genauigkeit und Verfügbarkeit geodätischer Beobachtungen. Innerhalb verschiedener Projekte am GFZ wurde eine Simulationsumgebung für die geodätischen Weltraumverfahren zur Bestimmung von Referenzrahmen im Hinblick auf die oben genannten Ziele von GGOS geschaffen. Die simulierten Stationsnetze sind in [Abb. 3](#) dargestellt. Dabei hat man sich an den realen Stationsnetzen des Referenzrahmens ITRF orientiert, allerdings wurde die Anzahl an Stationen begrenzt, um den Rechenaufwand zu minimieren. Diese bestehenden Stationsnetze wurden dann um zusätzliche geplante Stationen ergänzt und deren Einfluss mittels der Simulationen untersucht.

Die Simulationsstudien wurden mit VLBI-Beobachtungen aktueller Stationsnetze begonnen und es wurden verschiedene Modelle des Messrauschens angesetzt. Dabei konnte festgestellt werden, dass die simulierten Beobachtungen, die auf den Genauigkeiten und Verfügbarkeiten realer Beobachtungen basieren, der offiziellen Realisierung ITRF am nächsten kommen, allerdings noch zu optimistisch sind (Glaser et al. 2016).

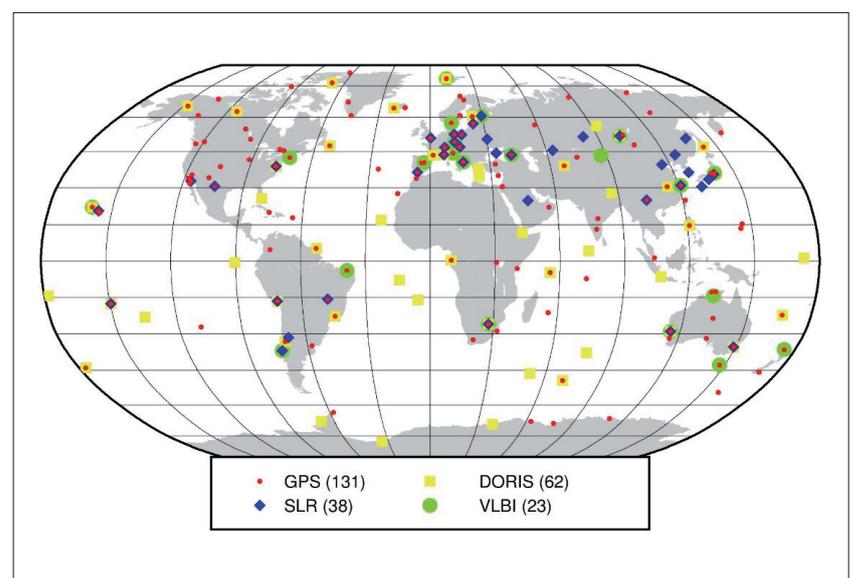
Zusätzliche VLBI-Stationen der nächsten Generation des VLBI-Systems VGOS (VLBI Global Observing System) führten zu deutlichen Genauigkeitssteigerungen, und es wurde gezeigt, welche Stationen bei der Erstellung des Referenzrahmens besonders wichtig sind. Bereits eine einzige zusätzliche Station in entlegenen Gebieten, wie zum Beispiel Tahiti, Französisch-Polynesien, verbessert die geschätzten Stationspositionen im globalen Mittel um bis zu 13 % (Glaser et al. 2017).

Die Erstellung von Referenzrahmen basiert auf

der Kombination der verschiedenen Verfahren. Dabei gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Verfahren miteinander zu verbinden. Gewöhnlich erfolgt die Kombination am Boden an sogenannten Kolokationsstationen, wo Beobachtungen zu mindestens zwei verschiedenen Verfahren durchgeführt werden können. Differenzvektoren (local ties) zwischen den Markern der Empfänger der Verfahren werden mittels klassisch vermessungstechnischer Methoden bestimmt und in die Kombination als zusätzliche Beobachtungen eingeführt. Diese Differenzvektoren zeigen Unterschiede zu den Positionen, wie sie aus den Weltraumverfahren abgeleitet werden, von bis zu wenigen Zentimetern (Glaser et al. 2015b; Altamimi et al. 2016), was zu Unsicherheiten im Referenzrahmen führt. Verschiedene Simulationsszenarien mit den local ties, die somit die Rolle von Schlüsselparametern in der Kombination spielen, wurden ebenfalls umfangreich analysiert (Glaser et al. 2019a). Um einen Referenzrahmen zu erhalten, der die GGOS-Anforderungen erfüllt, müssen die local ties genauer als auf einen Zentimeter vorliegen. Die Simulation systematisch verfälschter local ties bestätigte, dass GPS für die Verbindung der Verfahren essenziell ist. Außerdem kann die kombinierte Lösung als robust gegen einzelne verfälschte local ties angenommen werden.

Die Kombination kann ebenfalls über Parameter erfolgen, die aus allen Weltraumverfahren gemeinsam bestimmt werden können. Dazu zählen zum Beispiel die Erdrotationsparameter, die dann als global ties (Seitz et al. 2012; Glaser et al. 2015a; 2017) bezeichnet werden, oder die Troposphärenparameter als atmospheric ties (Krügel et al. 2007; Balidakis et al. 2019; Heinkelmann et al. 2019).

SLR ist das einzige der vier Verfahren, das auf Wellen im optischen Bereich und nicht auf Mikro-



**Abb. 3:** Übersicht über die für die Simulationsstudien verwendeten Stationsnetze der einzelnen geodätischen Weltraumverfahren (GPS, SLR, DORIS, VLBI) mit Anzahl an Stationen

wellen basiert. Dies zieht eine Wetterabhängigkeit der SLR-Beobachtungen nach sich, da Sicht ohne Wolken zwischen Station und Satellit bestehen muss. Um realistische Simulationen für zukünftige SLR-Stationen durchführen zu können, sind erstmals Informationen zur lokalen Wolkenbedeckung aus dem numerischen Wettermodell ERA5 in die Simulationen eingeflossen. Die Erweiterung des SLR-Netzes um 14 zum Teil bereits geplante Stationen verbessert den Ursprung des Referenzrahmens um 22 % und den Netzmaßstab um 20 % (Glaser et al. 2019b).

Technische Weiterentwicklungen der Verfahren, wie sie zum Beispiel für eine nächste Generation des Galileo-Systems angedacht sind, und deren Einfluss auf geodätische Schlüsselparameter wurden ebenfalls simuliert. In Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) wird der Einfluss von Inter-Satelliten-Links und hochgenauen optischen Uhren einer vorgeschlagenen »Kepler«-Konstellation ([www.kepler.global](http://www.kepler.global)) untersucht (Günther 2018; Giorgi et al. 2019). In dieser Konstellation werden die 24 höher fliegenden Satelliten (Medium Earth Orbit – MEO) durch vier niedrig fliegende Satelliten (Low Earth Orbit – LEO) ergänzt, die zusammen mit den Inter-Satelliten-Links eine perfekte Synchronisation der Satellitenuhren erlauben. Die Kepler-Konstellation offenbart dabei ein vielversprechendes Potenzial für die Erstellung von Referenzrahmen, insbeson-

dere für die Realisierung des Ursprungs und des Netzmaßstabes. Es ergeben sich für den realisierten Ursprung Verbesserungen um Faktor 43 in Z-Richtung und Faktor 8 in X- und Y-Richtung in Bezug auf eine gewöhnliche Galileo-Konstellation (Glaser et al. 2020).

## 5 Zusammenfassung

Globale terrestrische geodätische Referenzrahmen stellen die Grundlage der Erdsystemebeobachtung dar, um Zielgrößen, wie den globalen Meeresspiegel bestimmen zu können. Bisher verfügbare Referenzrahmen erfüllen noch nicht die Genauigkeitsanforderungen, wie sie vom Globalen Geodätischen Beobachtungssystem (GGOS) festgelegt wurden, im Hinblick auf eine genaue und zuverlässige Abschätzung des globalen Meeresspiegels.

Simulationen von Referenzrahmen stellen dabei ein nützliches Hilfsmittel dar, um zum einen genauigkeitslimitierende Faktoren aufzudecken und zum anderen den Einfluss zukünftiger Entwicklungen auf den Referenzrahmen eindeutig bewerten zu können. Verschiedene nationale und internationale Gruppen arbeiten intensiv an der Verbesserung aktueller Referenzrahmen, wie zum Beispiel in der Arbeitsgruppe PLATO (Performance Simulations and Architectural Trade-offs) (Männel et al. 2018). Es ist zu erwarten, dass die nächste Realisierung, der ITRF2020, eine deutliche Genauigkeitssteigerung mit sich bringen wird. //

---

## Literatur

- Abbondanza, Claudio; Toshio M. Chin et al. (2017): JTRF2014, the JPL Kalman filter and smoother realization of the International Terrestrial Reference System. *Journal of Geophysical Research – Solid Earth*, DOI: 10.1002/2017JB014360
- Altamimi, Zuheir; Xavier Collilieux; Laurent Métivier (2011): ITRF2008: an improved solution of the International Terrestrial Reference Frame. *Journal of Geodesy*, DOI: 10.1007/s00190-011-0444-4
- Altamimi, Zuheir; Paul Rebischung et al. (2016): ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *Journal of Geophysical Research – Solid Earth*, DOI: 10.1002/2016JB013098
- Balidakis, Kyriakos; Susanne Glaser et al. (2019): Combination of space geodetic techniques with atmospheric and local ties. A simulation study. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 21, EGU2019-1509, <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2019/EGU2019-1509.pdf>
- Beckley, Brian D.; Philip S. Callahan et al. (2017): On the »Cal-Mode« Correction to TOPEX Satellite Altimetry and Its Effect on the Global Mean Sea Level Time Series. *Journal of Geophysical Research – Oceans*, DOI: 10.1002/2017JC013090
- Blewitt, Geoff; Zuheir Altamimi et al. (2010): Geodetic Observations and Global Reference Frame Contributions to Understanding Sea Level Rise and Variability. Wiley-Blackwell, DOI: 10.1002/9781444323276.ch9
- Bloßfeld, Mathis; Detlef Angermann; Manuela Seitz (2018): DGFI-TUM Analysis and Scale Investigations of the Latest Terrestrial Reference Frame Realizations. *International Association of Geodesy Symposia*. Springer, Berlin, Heidelberg, DOI: 10.1007/1345\_2018\_47
- Giorgi, Gabriele; Tobias D. Schmidt et al. (2019): Advanced Technologies for Satellite Navigation and Geodesy. *Advances in Space Research*, DOI: 10.1016/j.asr.2019.06.010
- Glaser, Susanne; Mathias Fritsche et al. (2015a): A consistent combination of GNSS and SLR with minimum constraints. *Journal of Geodesy*, DOI: 10.1007/s00190-015-0842-0
- Glaser, Susanne; Mathias Fritsche et al. (2015b): Validation of Components of Local Ties. *IAG Symposia REFAG2014*, DOI: 10.1007/1345\_2015\_190
- Glaser, Susanne; Dimitrios Ampatzidis et al. (2016): Simulation of VLBI observations to determine a global TRF for GGOS. *IAG Symposia IUGG2015*, DOI: 10.1007/1345\_2016\_256
- Glaser, Susanne; Rolf König et al. (2017): A Global Terrestrial Reference Frame from simulated VLBI and SLR data in view of GGOS. *Journal of Geodesy*, DOI: 10.1007/s00190-017-1021-2
- Glaser, Susanne; Rolf König et al. (2019a): On the impact of local ties on the datum realization of global terrestrial reference frames. *Journal of Geodesy*, DOI: 10.1007/s00190-018-1189-0

- Glaser, Susanne; Rolf König et al. (2019b): Future SLR station networks in the framework of simulated multi-technique terrestrial reference frames. *Journal of Geodesy*, DOI: 10.1007/s00190-019-01256-8
- Glaser, Susanne; Grzegorz Michalak et al. (2020): Origin and scale realization within a future GNSS constellation. *Journal of Geodesy* (in Begutachtung)
- Günther, Christoph (2018): Kepler – A Satellite Navigation System without Clocks and little Ground Infrastructure. Proceedings of the 31st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2018), Miami, FL, USA, DOI: 10.33012/2018.15997
- Heinkelmann, Robert; Jan Douša et al. (2019): IAG JWG Tropospheric Ties – Activities During the Last Term, IUGG19-3573, 27th IUGG General Assembly July 8-18, 2019, Montréal, Canada, [www.czech-in.org/cmPortalV15/CM\\_W3\\_Searchable/iugg19/normal#!abstractdetails/0000760500](http://www.czech-in.org/cmPortalV15/CM_W3_Searchable/iugg19/normal#!abstractdetails/0000760500)
- IPCC (2019): The Ocean and the Cryosphere in a Changing Climate. [https://report.ipcc.ch/srocc/pdf/SROCC\\_FinalDraft\\_FullReport.pdf](https://report.ipcc.ch/srocc/pdf/SROCC_FinalDraft_FullReport.pdf)
- Johnston, Gary; Anna Riddell; Grant Hausler (2017): The International GNSS Service. In: Peter J.G. Teunissen; Oliver Montenbruck (Eds.): *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Springer, Cham, Schweiz, DOI: 10.1007/978-3-319-42928-1
- Krügel, Manuela; Daniela Thaller et al. (2007): Tropospheric parameters: combination studies based on homogeneous VLBI and GPS data. *Journal of Geodesy*, DOI: 10.1007/s00190-006-0127-8
- Männel, Benjamin; Daniela Thaller et al. (2018): Recent Activities of the GGOS Standing Committee on Performance Simulations and Architectural Trade-Offs (PLATO). In: Jeffrey T. Freymueller; Laura Sánchez (Eds.): *International Symposium on Advancing Geodesy in a Changing World*. Springer, Cham, Schweiz, DOI: 10.1007/1345\_2018\_30
- Morel, Laurent; Pascal Willis (2005): Terrestrial reference frame effects on global sea level rise determination from TOPEX/Poseidon altimetric data. *Advances in Space Research*, DOI: 10.1016/j.asr.2005.05.113
- Nothnagel, Axel et al. (2015): The IVS data input to ITRF2014. International VLBI service for geodesy and astrometry, GFZ data services, DOI: 10.5880/GFZ.1.1.2015.002
- Oppenheimer, Michael; Bruce Glavovic et al. (2019): Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. In: IPCC (2019): *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a changing Climate*
- Pearlman, Michael R.; John J. Degnan; John M. Bosworth (2002): The International Laser Ranging Service. *Advances in Space Research*, DOI: 10.1016/S0273-1177(02)00277-6
- Petit, Gérard; Brian Luzum (eds.). (2010): *IERS Conventions* (2010). Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main
- Plag, Hans-Peter (2006): National geodetic infrastructure: current status and future requirements – The example of Norway. *Nevada Bureau of Mines and Geology, Bulletin* 112
- Schuh, Harald; Dirk Behrend (2012): VLBI: A fascinating technique for geodesy and astrometry. *Journal of Geodynamics*, DOI: 10.1016/j.jog.2012.07.007
- Schuh, Harald; Rolf König et al. (2015): GGOS-SIM: simulation of the reference frame for the Global Geodetic Observing System. Springer, Cham, Schweiz, DOI: 10.1007/1345\_2015\_217
- Seitz, Manuela; Detlef Angermann et al. (2012): The 2008 DGFI realization of the ITRS: DTRF2008. *Journal of Geodesy*, DOI: 10.1007/s00190-012-0567-2
- Seitz, Manuela; Detlef Angermann et al. (2015): ITRS Combination Centres – Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGFI). In: Wolfgang R. Dick; Daniela Thaller (eds.): *International Earth Rotation and Reference Systems Service, Central Bureau*. Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, [www.iers.org/IERS/EN/Publications/AnnualReports/AnnualReport2015.html](http://www.iers.org/IERS/EN/Publications/AnnualReports/AnnualReport2015.html)
- Seitz, Manuela; Mathis Bloßfeld et al. (2016): The new DGFI-TUM realization of the ITRS: DTRF2014 (data). *Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, München*, DOI: 10.1594/PANGAEA.864046
- Willis, Pascal; Hervé Fagard et al. (2010): The International DORIS Service (IDS): Toward maturity. *Advances in Space Research*, DOI: 10.1016/j.asr.2009.11.018
- WCRP Global Sea Level Budget Group (2018): Global sea-level budget 1993–present. *Earth System Science Data*, DOI: 10.5194/essd-10-1551-2018

## Hydrographische Nachrichten HN 115 – März 2020

### Journal of Applied Hydrography

Offizielles Organ der Deutschen Hydrographischen Gesellschaft – DHyG

#### Herausgeber:

Deutsche Hydrographische Gesellschaft e. V.  
c/o Innomar Technologie GmbH  
Schutower Ringstraße 4  
18069 Rostock

ISSN: 1866-9204

© 2020

#### Chefredakteur:

Lars Schiller  
E-Mail: [lars.schiller@dhyg.de](mailto:lars.schiller@dhyg.de)

#### Redaktion:

Peter Dugge, Dipl.-Ing.  
Horst Hecht, Dipl.-Met.  
Holger Klindt, Dipl.-Phys.  
Dr. Jens Schneider von Deimling  
Stefan Steinmetz, Dipl.-Ing.  
Dr. Patrick Westfeld

#### Hinweise für Autoren und Inserenten:

[www.dhyg.de](http://www.dhyg.de) > Hydrographische Nachrichten > Mediadaten und Hinweise

# »Wir werden uns anpassen – müssen«

Ein Wissenschaftsgespräch mit JACOBUS HOFSTEDÉ

Dr. Jacobus Hofstede arbeitet in Kiel als wissenschaftlicher Direktor am Umweltministerium des Landes Schleswig-Holstein, wo er in den Bereichen Küstenschutz und Klima-Anpassung tätig ist. Im Interview nennt der Geograph alarmierende Zahlen, gibt aber auch beruhigende Antworten – und er schlägt so manche ironisch-überraschende Volte. Dabei blickt er insgesamt eher optimistisch in die Zukunft.

Meeresspiegelanstieg | Klimawandel | Küstenschutz | Landesschutzdeich | Sturmflut  
sea-level rise | climate change | coastal protection | coastal flood defence | storm surge

Dr. Jacobus Hofstede works in Kiel as scientific director at the Ministry of the Environment of Schleswig-Holstein, where he is responsible for coastal flood and erosion management. In the interview, the geographer cites alarming figures, but also gives reassuring answers – and he makes some ironic and surprising turns of phrase. Overall, he looks rather optimistic into the future.

## Interviewer

Das Interview mit Dr. Jacobus Hofstede führten Lars Schiller, Holger Klindt und Jens Schneider von Deimling am 30. Januar in Kiel.

Textbearbeitung: Lars Schiller

Herr Hofstede, Ihre Kollegen in Deutschland halten Sie noch für einen halben Holländer, Ihre Freunde in den Niederlanden finden Sie recht deutsch.

Ich weiß auch nicht so recht. Immerhin bin ich mir sicher, dass ich in Gouda in einem Krankenhaus vier Meter unter dem Meeresspiegel geboren wurde, wobei ich ehrlicherweise nicht weiß, ob die Entbindungsstation im Erdgeschoss war. Nachdem ich in Utrecht Physische Geographie studiert habe, bin ich dann vor über drei Jahrzehnten nach Deutschland gekommen, um an der TU Berlin zu promovieren.

Da ging es um »Hydrologie und Morphodynamik im Tidebereich der Deutschen Bucht«. Was von Ihren damaligen Erkenntnissen ist heute, genau 30 Jahre später, noch gültig?

Die Ergebnisse kann man meines Erachtens noch immer so stehen lassen. Ich habe das Wattinzugsgebiet südlich der Elbmündung in Bereiche unterschiedlicher Hydro- und Morphodynamik eingeteilt. Da gibt es höhere stabile Wattflächen, die eine ganz andere Dynamik aufweisen als die tiefen Priele, die sich sehr schnell verlagern können. In einer Brandungszone wird viel Energie durch brechende Wellen freigesetzt. Dadurch kommt es kurzfristig zu kleinräumigen Änderungen. Langfristig tut sich nicht viel, der Strand ist insgesamt stabil. Ich habe damals diese unterschiedliche Dynamik mittels morphologischer Parameter charakterisiert und mit der Hydrodynamik in Bezug gesetzt. Das würde immer noch funktionieren. Allerdings würde man heute anders an die Aufgabe herangehen. Damals habe ich im Wesentlichen Naturdaten ausgewertet, den Computer quasi als Taschenrechner genutzt. Heute würde man das Ganze auf der Grundlage von Naturdaten modellieren.

Ihre nächste Station war Kiel, wo Sie bis heute sind. Es war vielleicht Zufall. Gerade als ich mit meiner Promotion fertig war, Ende 1990, gab es eine neu geschaffene Stelle für einen Küstengeomorpholo-

gen in Kiel. Zuerst war ich im Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten tätig, seit 20 Jahren arbeite ich im Ministerium. Ins Ministerium wurde ich versetzt, um die anstehende Fortschreibung des Generalplans Küstenschutz Schleswig-Holstein zu bearbeiten. Diese Pläne werden etwa alle zehn Jahre fortgeschrieben, zur Zeit beschäftige ich mich schwerpunktmäßig mit der fünften Fortschreibung, die für 2022 geplant ist. Diesmal soll der Generalplan einen klaren Fokus auf das Thema Klimaanpassung haben. Ende des Jahres soll der Entwurf ins Kabinett. 2021 wird es dann eine Anhörung geben, einschließlich Regionalkonferenzen, und im Frühjahr 2022 soll der dann sechste Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein von der Landesregierung verabschiedet werden.

Bei den Regionalkonferenzen geht es vermutlich zur Sache, oder?

Ich erinnere mich gut an die Konferenzen zum Generalplan 2001. Insbesondere an der Westküste gab es bei Teilen der Lokalbevölkerung emotionale bzw. subjektive Vorbehalte gegenüber dem Naturschutz. Die Regionalkonferenzen wurden als passende Gelegenheit gesehen, diese vorzutragen, und wir saßen irgendwie dazwischen. Drinnen war Regionalkonferenz, draußen standen die Protestbanner. Vor der Verabschiedung wurde der Generalplan dann als Programm der Landesregierung auch im Landtag beraten. Naturgemäß sind bei solchen Programmen die Regierungsparteien dafür, die Opposition argumentiert dagegen. Beim Generalplan Küstenschutz war und ist das anders, da gibt es eigentlich kaum inhaltlichen Dissens.

Eigentlich wollen wir über den steigenden Meeresspiegel reden. Doch bei vielen ist die Angst vor einer Sturmflut weitaus präsenter. Wie schützen Sie die überflutungsgefährdeten Niederungen?

Ich gehe zuerst kurz auf den Zusammenhang zwischen Meeresspiegel und Sturmflut ein. Sturm-

fluten können zu Überflutungen führen. Wie sich Sturmfluten langfristig ändern, hängt wesentlich vom mittleren Meeresspiegel ab. Momentan geht man davon aus, dass die Sturmintensität sich nicht ändern wird; künftige Stürme wüten also nicht heftiger als heutige und damit ändert sich auch der Windstau an der Küste nicht wesentlich. Doch wenn nun der Meeresspiegel um einen Meter höher steht, dann wird ein Sturm, der genauso stark ist wie heute, logischerweise einen um einen Meter höheren Wasserstand erzeugen. Deswegen ist der mittlere Meeresspiegel für Sturmflutwasserstände ein wesentlicher Parameter. Bei jeder Deichverstärkung geht es daher auch darum, den künftig zu erwartenden Sturmflutwasserstand unter Berücksichtigung von langfristigen Meeresspiegeländerungen zu kennen. Weiterhin führen Sturmfluten zu Erosionen an sandigen Küsten. Langfristig sind aber auch hier Änderungen des mittleren Meeresspiegels für die Entwicklung der Küste entscheidend. Ein Küstengeomorphologe sagte dazu bereits in den Siebzigerjahren: »Sea-level rise sets the states for profile adjustment through storm surges.« Das heißt, wenn der Meeresspiegel nicht weiter stiege, würde irgendwann ein Gleichgewichtsprofil entstehen und die Küste würde strukturell nicht weiter zurückweichen, sie würde sich in ihrer Lage stabilisieren. Auch wenn der Meeresspiegel an sich gar keine eigene Energie hat, so bestimmt er doch den Bereich, wo die Energie einwirkt.

Damit komme ich zu Ihrer eigentlichen Frage: Wie schützen wir vor Überflutungen? In erster Linie eben mit Deichen. »Wer nicht will deichen, der muss weichen«, das ist nach wie vor das Credo, wenn es

um Küstenhochwasserschutz geht. In Anbetracht der hohen Vulnerabilitäten kommt insbesondere an unserer Westküste die Alternative des Zurückweichens als generelle Option nicht infrage. Beim zweiten Küstenschutzthema, der Küstensicherung, steht das Verhindern bzw. Kompensieren von Küstenabbruch und Erosionen an vulnerablen Küstenabschnitten im Vordergrund. Denken Sie an Sylt mit seinen über 18 000 Einwohnern. Dort werden die sturmflutbedingten Erosionen im Strand- und Vorstrandbereich durch Sandersatzmaßnahmen kompensiert, seit 1972 mit einem Gesamtvolumen von über 50 Millionen Kubikmetern.

**Das geht an der Nordseeküste, aber in der Ostsee gibt es doch gar nicht so viel Sand.**

Das ist wohl wahr. Die Gletscher der Eiszeit haben den Ostseeboden vor Schleswig-Holstein regelrecht abgeschmirgelt und das Lockermaterial aufs Land verfrachtet. Deswegen haben wir hier die schöne Hobbit-Landschaft. Weil der Sand in Nord- und Ostsee so ungleich verteilt ist, kommt es in Schleswig-Holstein oft zum Disput. An der Nordseeküste, wo mehr als genug Sand vorhanden ist, ist Sandersatz eine nachhaltige Sicherungsmaßnahme, an der Ostseeküste leider nicht.

**Sie geben denen nicht nur keinen Sand, Sie schützen sogar die Steilküsten explizit nicht. Das ist für die Bewohner hart.**

Auch das ist zunächst mal ein nachvollziehbarer Einwand. Dass in der Ostsee keine nennenswerten Sandvorkommen existieren, sagte ich gerade. Umso eminent ist es, nicht auch noch den wichtigsten natürlichen Sandlieferanten zur Stabilisierung von Stränden und bewohnten Niederungs-



küsten an der Ostsee zu verlieren. Und das sind eben die Steilufer. Das dort erodierte Material landet letztlich auf den Stränden; salopp gesagt: ohne Steiluferabbruch kein Strand. Im Übrigen, wo Menschen oder hohe Sachwerte gefährdet sind und damit ein starkes öffentliches Interesse vorhanden ist, können auch Steilufer geschützt werden.

[Wie sieht es mit Eindeichungen aus?](#)

Das ist für mich ein Unwort, da es inhärent den Vorwurf von Landgewinnung auf Kosten der Natur ausdrückt. Die letzte Landgewinnungsmaßnahme fand in Schleswig-Holstein, aus für mich damals noch nachvollziehbaren Gründen, in den Fünfzigerjahren statt. In den Achtzigern gab es die letzte Eindeichung bei Nordstrand, übrigens nicht mit dem Ziel, Land zu gewinnen, sondern zur Verbesserung des Küstenschutzes und der Entwässerung.

[Angenommen, die schlimmste Sturmflut würde sich wiederholen, wären die Küsten geschützt?](#)

Die Landesschutzdeiche an der Westküste hätten überhaupt keine Probleme damit. Und das sage ich nicht nur so daher. Im Jahr 2000 gab es am Pegel Husum den zweithöchsten je registrierten Wasserstand; nur 1976 lag er noch höher. Nicht viele haben es gemerkt, das Wasser stand immer noch etwa drei Meter unterhalb der Deichkrone. Dies hängt damit zusammen, dass, neben dem Wasserstand, auch der Wellenaufbau bei der Berechnung der erforderlichen Deichhöhen berücksichtigt wird. Unsere Deiche an der Nordseeküste und entlang der Tideelbe sind so sicher, dass sie problemlos mit dem, was wir bisher hatten, klar kommen. Die Sturmflut von 1976 war in den meisten Bereichen an unserer Westküste und in der Tideelbe die bisher höchste Sturmflut; im nördlichen Nordfriesland war es die Sturmflut von 1981. Unsere Deiche hat das nicht beeindruckt. Anders sieht es allerdings beim Thema Küstensicherung aus, zum Beispiel auf Sylt sowie an der Ostseeküste.

[Wer sagt, dass die nächste Sturmflut nicht höher ausfällt?](#)

Soweit ich weiß, keiner. Aktuell liegt das Wiederkehrintervall der 1976er-Sturmflut regional unterschiedlich bei etwas mehr als 50 Jahren. Die Landesschutzdeiche an der Westküste sind für einen 200-jährigen Wasserstand ausgelegt. Diesen höheren Wasserstand sollen die Deiche kehren. Darüber hinaus bauen unsere Wasserbauingenieure eine ganze Menge an zusätzlichen Sicherheiten ein.

[Zum Beispiel?](#)

Bei der Sturmflut 1962 sind auch in Schleswig-Holstein viele Deiche gebrochen. Die Innenböschungen waren damals noch sehr steil, teilweise nur 1:1,5. Durch über die Deichkrone laufendes Wasser erodierten die steilen Innenböschungen und die Deiche brachen quasi von innen nach außen. Heute sind die Böschungen viel flacher. Professor Führböter aus Braunschweig hat damals berechnet, dass das überlaufende Wasser bei einer Neigung von 1:3 schadlos abfließen kann, ohne dass

es zu Erosionen führt. Unsere Deiche haben inzwischen Innenböschungen von 1:3. Nach unserem Sicherheitsstandard soll bei einem 200-jährigen Wasserstand der Wellenüberlauf über die Deichkrone nicht mehr als zwei Liter pro Sekunde und laufendem Meter betragen. Nun haben Forscher in den Niederlanden bei Versuchen festgestellt, dass ein moderner Deich, auch wenn pro Sekunde und laufendem Meter bis zu 30 Liter Wasser in Form von Wellen über die Deichkrone schwappen, nicht von innen erodiert. Das heißt, wir haben dort große zusätzliche Sicherheiten.

[Sind die Deiche in Holland und Dänemark genauso hoch? Oder könnten wir in den Grenzregionen absaufen?](#)

Mit Blick in Richtung Holland bzw. Niedersachsen haben wir kein Problem. Wenn in Dänemark der Deich unmittelbar nördlich der Grenze brechen würde, könnte das Wasser theoretisch in den Rückelsbüller Koog laufen. Aus diesem Grund wurde 1982 in der deutsch-dänischen Grenzregion der Deich nach den gleichen Prinzipien verstärkt.

[Heißt es nicht, dass die Sicherheitsstandards in den Niederlanden viel höher sind?](#)

In den Niederlanden gibt es neuerdings einen probabilistischen Ansatz zur Berechnung der erforderlichen Deichsicherheit oder, besser gesagt, des zulässigen Überflutungsrisikos. Demnach gilt dort als genereller Standard, dass in der jeweiligen geschützten Küstenniederung maximal ein Mensch pro 100 000 Einwohner pro Jahr durch eine Überflutung umkommen darf. Diese Form des Hochwasserschutzes ist risikobasiert und nicht mehr mit unserem auf Sicherheit basierten Verfahren zu vergleichen. Das A und O ist meines Erachtens letztendlich, dass sich die Menschen hinter den Deichen sicher fühlen. Risikoforschung zeigt auf, dass Menschen relativ wenig Unterschied zwischen unterschiedlichen Schutzstandards machen; es gilt die gefühlte Sicherheit. Der Mensch hat grundsätzlich eine subjektive Wahrnehmung – bei Sicherheit genauso wie bei Risiko. Mit unserem Generalplan Küstenschutz haben wir einen Standard eingeführt, der hier gesellschaftlich akzeptiert ist.

[Trotz unterschiedlichen Standards sind die Deiche im niederländischen und schleswig-holsteinischen Wattenmeer in etwa gleich hoch. Warum?](#)

Im Wesentlichen, weil bei uns der 200-jährige Wasserstand einen deutlich höheren Windstau erzeugt als in den Niederlanden, in dessen Folge während eines vergleichbaren Sturmereignisses die Wassertiefen und damit auch die Wellenhöhen vor dem Deich in Schleswig-Holstein höher sind.

[Woher kommt der Unterschied beim Windstau? Liegt es an der Windrichtung?](#)

Der Unterschied hängt wohl in erster Linie mit der Breite bzw. Tiefe des Wattenmeers zusammen. Das niederländische Wattenmeer erstreckt sich zehn bis zu 15 Kilometer vor der Küstenlinie, in Schleswig-Holstein sind es 30 bis 40 Kilometer.

Der Windstau verhält sich umgekehrt proportional zur Wassertiefe und nimmt mit der Breite des Wattenmeeres landwärts zu. Deswegen haben wir mit die höchsten Windstauwerte. Am Pegel Husum betrug der Windstau einmal über 5,5 Meter, 1949 war das – zum Glück bei Tide-Niedrigwasser.

**Küstenschutz ist nicht nur eine technische Aufgabe, sondern man muss auch ganz viel gesellschaftliche Arbeit leisten.**

Ich bin Geograph, das ist mein Metier. Es ist schon lange her, dass die Deiche noch ohne umfassende Bürgerbeteiligung errichtet bzw. verstärkt wurden. Bürger und NGOs treten seit Langem aktiv für ihre Interessen ein; Beteiligungsverfahren sind selbstverständlich und gesetzlich vorgeschrieben. In Schleswig-Holstein wurde bereits 1999 ein Ministerbeirat Integriertes Küstenschutzmanagement gegründet, in dem Vertreter der Kommunen und Verbände mit der Küstenschutzverwaltung zweimal jährlich offen über generelle Aspekte des Küstenschutzes diskutieren und ihre Belange einbringen. Da ist es vielleicht richtig, einen Geographen dabei zu haben, der interdisziplinär mit Blick für andere Interessen ausgebildet wurde. Seit der Gründung bin ich Geschäftsführer dieses Beirates und möglicherweise auch deswegen am Ministerium geduldet.

**Nerven die Diskussionen nicht?**

Damit verdiene ich mein Geld. Aber die Herausforderungen nehmen beständig zu, um es zunächst diplomatisch zu formulieren. Die Regelungsdichte ist an sich schon sehr groß, hinzu kommt meines Erachtens noch die Art der Auslegung in Deutschland. Um es dann doch mal etwas provokant zu formulieren: In den Niederlanden plant man – auf Grundlage derselben EU-Regelungen – eine Küstenschutzmaßnahme, und nach sechs Jahren ist sie meistens umgesetzt. Bei uns plant man eine Maßnahme, und nach zehn Jahren diskutiert man immer noch über mögliche Varianten. Planfeststellungsverfahren können, in Abhängigkeit von den Rahmenbedingungen, mitunter sehr kompliziert sein. So sollen Deichverstärkungen im Wattenmeer grundsätzlich nicht nach außen stattfinden, um die wenigen natürlichen bzw. naturnahen Habitate, die wir in Deutschland noch haben, nicht weiter zu verringern. Nach innen können wir aber auch nicht einfach verstärken, weil da oft intensive Nutzung stattfindet oder Bürgerinteressen betroffen sind.

**Und wie lösen Sie das Dilemma?**

Der Küstenschutz ist meines Erachtens eine Dienstleistung für die Menschen. Sie stehen im Mittelpunkt, ihre Interessen sollen möglichst berücksichtigt werden. Allerdings können die Planungen deshalb manchmal Jahrzehnte dauern. Ein Beispiel ist die Deichverstärkung vor der nördlichen Seenniederung auf Fehmarn. Erste Planungen gab es dort nach meinem Wissen bereits um 1970. Mit Pausen wird dort bis heute geplant; mit jedem neuen Lösungsvorschlag gibt es neue Gesetzes- und Interessenslagen, die zu berücksichtigen sind.

Für einen Wasserbauer, der am Bau und letztendlich am Schutz der Einwohner vor Überflutungen interessiert ist, ist das mit Sicherheit frustrierend.

**Ist das eine Eigenheit der Deutschen, gehen andere pragmatischer an die Sache heran?**

Vielleicht bin ich dann doch noch zu sehr Niederländer, manchmal kommt es mir tatsächlich so vor. Aus meiner früheren Heimat kenne ich den Begriff »Polderoplossing«. Man setzt sich mit allen Betroffenen an einem Tisch zusammen und diskutiert, bis man eine von allen mitgetragene Lösung findet, möglichst eine Win-Win-Situation.

**Was bedeutet Polderoplossing?**

Was in Holland die Polder sind, sind an unserer Westküste die Köge, die deichgeschützten Niederungen. In einem Polder bzw. Koog

sitzen alle im gleichen Boot. Wenn Probleme auftreten, sucht man eine Polder- bzw. Koog-Lösung. Meines Erachtens führt das zu pragmatischerem Handeln. Meist sind die Niederländer, wie gesagt, nach wenigen Jahren aus der Planungsphase raus. Aber nicht nur die Niederländer, auch bei den Dänen mache ich vergleichbare Erfahrungen.

**Trotzdem halten Sie es in Deutschland aus. Erstaunlich.**

Sie haben ja noch gar nicht gefragt, warum ich nach Deutschland gekommen bin. Wegen einer Frau, die in West-Berlin wohnte und die es seitdem mit mir aushält. Deshalb bin ich hier hängen geblieben, im schönsten Bundesland auf Erden.

**Was ist ein Klimadeich?**

Da muss ich Ihnen eine Skizze zeigen. Ein Bild sagt manchmal mehr als tausend Worte.



Das ist ein Schnitt durch einen Landesschutzdeich. Das Hellgelbe ist das Standardprofil eines zu verstärkenden Deiches. Der Deich fängt außen unten flach an, wird nach oben hin steiler bis 1:6, hat oben die Deichkrone und dann die erwähnte 1:3-Böschung nach innen.

**Sieht aber aus wie 1:1.**

Stimmt, der Deich ist stark überhöht dargestellt. Im Generalplan von 2001 haben wir zum ersten Mal das Thema Klimaanpassung berücksichtigt. Auf der Basis der damaligen globalen Meeresspiegel-Projektionen des Weltklimarates IPCC haben wir uns gesagt, wir müssen einen halben Meter höher bauen als erforderlich. So kamen wir zu dem hellgrünen Profil. Das ist der Klimazuschlag von 0,5 Metern.

**Das heißt, momentan würde der hellgelbe Deich nicht ausreichen?**

Genau; im Rahmen der Fortschreibungen unseres Generalplanes Küstenschutz prüft unser Landes-

*»Im Jahr 2000 hatten wir in Husum den zweithöchsten je registrierten Wasserstand. Nicht viele haben es gemerkt«*

Dr. Jacobus Hofstede

**Bisher erschienen:**

Horst Hecht (HN 82),  
 Holger Klindt (HN 83),  
 Joachim Behrens (HN 84),  
 Bernd Jeuken (HN 85),  
 Hans Werner Schenke (HN 86),  
 Wilhelm Weinrebe (HN 87),  
 William Heaps (HN 88),  
 Christian Maushake (HN 89),  
 Monika Breuch-Moritz (HN 90),  
 Dietmar Grünreich (HN 91),  
 Peter Gimpel (HN 92),  
 Jörg Schimmler (HN 93),  
 Delf Egge (HN 94),  
 Gunther Braun (HN 95),  
 Siegfried Fahrentholz (HN 96),  
 Gunther Braun, Delf Egge, Ingo Harre, Horst Hecht, Wolfram Kirchner und Hans-Friedrich Neumann (HN 97),  
 Werner und Andres Nicola (HN 98),  
 Sören Themann (HN 99),  
 Peter Ehlers (HN 100),  
 Rob van Ree (HN 101),  
 DHyG-Beirat (HN 102),  
 Walter Offenborn (HN 103),  
 Jens Schneider von Deimling (HN 104),  
 Mathias Jonas (HN 105),  
 Jürgen Peregovits (HN 106),  
 Thomas Dehling (HN 107),  
 Egbert Schwarz (HN 108),  
 Ingo Hennings (HN 109),  
 Harald Sternberg (HN 110),  
 Uwe Jenisch (HN 111),  
 Petra Mahnke (HN 112),  
 Holger Rahlf (HN 113),  
 Boris Schulze (HN 114)

betrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz regelmäßig, wo bei einem 200-jährigen Wasserstand der Überlauf signifikant größer wäre als die erlaubten zwei Liter pro Sekunde pro laufendem Meter. Diese Deichabschnitte sind zu verstärken und werden in eine Prioritätenliste im Generalplan Küstenschutz aufgenommen. Zunächst wird die Deichverstärkung so bemessen, dass der Deich einen Wellenüberlauf von zwei Litern pro Sekunde und laufendem Meter aushält, das heißt, er wird höher. In Anbetracht einer geplanten Lebensdauer von etwa 100 Jahren ist der Meeresspiegelanstieg mit zu berücksichtigen. Als sogenannter Klimazuschlag wurde im Jahr 2001 einfach ein halber Meter oben drauf gepackt. Damals waren wir weltweit die ersten, die sich in der Bemessung von Deichverstärkungen konkret mit dem menschengemachten Klimawandel auseinandergesetzt haben. Irgendwann hieß es dann, es könnte auch deutlich mehr als ein halber Meter sein.

**Die Rede ist mittlerweile von über einem Meter.**

Insbesondere die Bandbreite des künftig möglichen Meeresspiegelanstieges ist groß. Um nicht unnötig viele Steuermittel auszugeben, müssen wir daher mit vertretbaren Kosten so bauen, dass wir zum einen den erwarteten Meeresspiegelanstieg ausgleichen, zum anderen aber auch eine Reserve haben, wenn es doch mehr wird. Entsprechend wurde im Generalplan 2012 das Prinzip »Baureserve« für Verstärkungen von Landesschutzdeichen eingeführt. Die Breite der Deichkrone wird verdoppelt und die Außenböschung einheitlich flacher gestaltet, wie im dunkelgrünen Profil dargestellt. Damit ist der Deich noch nicht höher, wir haben aber die Möglichkeit einer Nachverstärkung geschaffen. Später, wenn zum Beispiel nach 60 Jahren festgestellt wird, dass der halbe Meter nicht ausreicht, kann dem Deich eine Deichkappe aufgesetzt werden. Das ist die orange Ausbaustufe. Damit wird das alte, nach oben steiler werdende Profil wiederhergestellt. Diese Skizze ging um die Welt. Oben drauf kann man schließlich noch eine zweite Baureserve setzen (lila in der Abbildung), die wir vor zwei Jahren als Konzept Klimadeich eingeführt haben. Wenn auch die Deichkappe nicht reicht, kann man alternativ die gesamte Außenböschung anheben. Damit kann insgesamt in mehreren Bauphasen ein Meeresspiegelanstieg von etwa zwei Metern ausgeglichen und somit die Sicherheit bis weit ins nächste Jahrhundert gewährleistet werden. Dazu müssen wir bereits heute sicherstellen, dass der Untergrund auch für diese Ausbaustufe tragfähig ist. Schon heute wird daher so geplant, dass der Deich auch die zusätzliche Auflast, sollte sie später erforderlich sein, noch abkann.

**Gegenwärtig arbeiten Sie also daran, den dunkelgrünen Zustand herzustellen.**

Ganz genau. Ein positiver Nebeneffekt von diesem abgeflachten Profil ist übrigens, dass wir dadurch den Wellenauflauf effektiv verringern. Der

nimmt nämlich mit flacherer Böschungsneigung ab. Eine Abflachung von 1:6 auf 1:10 reduziert den Wellenauflauf um etwa einen halben Meter. Insgesamt wird durch Klimazuschlag und Abflachung in der ersten Baustufe in etwa ein Meter Meeresspiegelanstieg ausgeglichen.

**Sie denken weitere Bauphasen gleich mit?**

Beim Klimadeich haben wir mehrere Bauphasen, deshalb sprechen wir auch von einem Klima-Anpassungsweg. Ein Vorteil des Konzeptes Klimadeich ist übrigens, dass die nachfolgenden Verstärkungen innerhalb des bestehenden Deichprofils erfolgen können; eine mitunter zeitraubende Planfeststellung ist dann nicht mehr nötig.

**Wie viele Kilometer Klimadeich gibt es schon?**

Fertiggestellt sind bisher etwa fünf Kilometer, die nächsten sechs Kilometer sind im Bau. Aber wir haben insgesamt 430 Kilometer Landesschutzdeiche. Im Moment schaffen wir mit unseren finanziellen und personellen Ressourcen etwa drei Kilometer pro Jahr.

**Woher kommt das Geld?**

Mit EU-Geldern können wir eine Maßnahme zu 50 Prozent finanzieren. Vereinfacht gesagt, bei einer Deichverstärkung mit Kosten in Höhe von 10 Millionen Euro kommen die ersten fünf Millionen von der EU. Die anderen fünf Millionen Euro zahlt zu 70 Prozent der Bund und zu 30 Prozent das Land. Allerdings sind die EU-Fördermittel limitiert, ein Teil der Deichverstärkungen muss allein mit Bundes- und Landesmitteln nach obigem Schlüssel finanziert werden. Eine Herausforderung bei der Umsetzung von Deichverstärkungen sind allerdings nicht nur die finanziellen, sondern insbesondere auch die personellen Ressourcen, gerade in Anbetracht der aufwendigen Planungsprozesse.

**Sie haben also noch einen weiten Weg vor sich.****Was sieht Ihr neuer Generalplan denn vor?**

In jedem Generalplan wird eine Sicherheitsüberprüfung der Landesschutzdeiche durchgeführt auf der Basis von fortgeschriebenen Sturmflutstatistiken. Gerade sind wir damit fertig geworden und konnten feststellen, dass es gegenüber 2012 keine signifikanten Änderungen gegeben hat. Damals wurde festgestellt, dass 93 Kilometer unserer Landesschutzdeiche den bereits genannten Sicherheitsstandard nicht erfüllen. Diese 93 Kilometer wurden in die Prioritätenliste aufgenommen und werden sukzessive durch unseren Landesbetrieb verstärkt. Dieses bestehende Programm wird wahrscheinlich weiter abgearbeitet. Irgendwann wird der Meeresspiegel allerdings deutlich stärker als bisher steigen und immer mehr Deiche, die momentan noch sicher sind, werden in die Prioritätenliste aufgenommen werden müssen. Entsprechend wichtig ist es, die erste Bauphase möglichst schnell abzuschließen.

Im IPCC-Sonderbericht von 2019 wird, je nach zugrunde gelegtem Szenario, für dieses Jahrhundert mit einem globalen Meeresspiegelanstieg zwi-

schen 0,3 und 1,1 Metern gerechnet, höhere Werte werden jedoch nicht ausgeschlossen. Mit welchem Anstieg des Meeresspiegels rechnen Sie?

Bund und Küstenländer haben sich darauf verständigt, für Vorsorgezwecke das höhere RCP8.5-Szenario zu nutzen. Das ist der Pfad, auf dem wir uns momentan weltweit bewegen. Dieses RCP8.5-Szenario nennt Werte von 0,6 bis 1,1 Meter. Das ist die wahrscheinliche Bandbreite, in der Gaußschen Glockenkurve also der Bereich von rund 66 Prozent in der Mitte; zwischen 17 Prozent und 83 Prozent. Die 83 Prozent entsprechen für das RCP8.5-Szenario einem Anstieg von 1,1 Meter. Es könnte also mit 17-prozentiger Wahrscheinlichkeit noch höher kommen, in manchen Veröffentlichungen findet man Extremwerte von über drei Metern. Mit unserem abgeflachten und erhöhten Profil decken wir bereits heute einen Anstieg von etwa einem Meter ab; mit den Baureserven eingerechnet bis zu zwei Metern. Auf der Grundlage der neuen IPCC-Werte stellen die Küstenländer derzeit Überlegungen über abgestimmte Anpassungsstrategien an. **Bauvorhaben an den Küsten sollen im Einklang mit den dort wirkenden physikalischen Kräften erfolgen. Was verbirgt sich hinter der Strategie: »Wir müssen mit der Natur bauen und nicht gegen sie«?** Ich würde diese Umschreibung nicht nutzen. Jeder Bau ist ein künstlicher Eingriff in die Natur. Der Be-

griff »ökosystembasierter Küstenschutz« ist da meines Erachtens passender. Ein solcher Küstenschutz, der nach meiner Überzeugung teilweise bereits seit Langem umgesetzt wird, hat mehrere Aspekte. Erstens basieren Küstenschutzbauwerke grundsätzlich auf Kenntnissen über das Ökosystem, zum Beispiel beruht der Bemessungswasserstand auf Kenntnissen über Sturmfluten. Zweitens minimieren wir auf der Grundlage von bestehendem Recht, aber auch aus eigener Überzeugung die notwendigen Eingriffe in die Natur. Indem wir zum Beispiel möglichst nach innen und nicht nach außen verstärken. Der dritte Aspekt ist relativ neu, nämlich die Ökosystemleistung, obwohl dies im Küstenschutz eigentlich auch schon lange praktiziert wird. Da geht es zum Beispiel um die Nutzung von Salzwiesen als schützendes Deichvorland. Durch Vorlandmanagement werden Salzwiesen an der Westküste entwickelt und erhalten, unter anderem damit die Sturmwelle ihre Energie auf der Salzwiese abgibt und der Deich hydrodynamisch weniger belastet wird. Insbesondere aber reduziert eine Salzwiese vor dem Deich das Volumen des bei einem Deichbruch in die Küstenniederungen eindringenden Wassers. Dies reduziert dort wiederum die Wassertiefen und damit die Schadenserwartungen, wie unsere Kollegen aus Niedersachsen nachweisen konnten. Vorlandmanagement ist somit eine typische ökosystembasier-



## OBTAIN COMPREHENSIVE HYDROGRAPHIC DATA IN DEEP WATER AND COASTAL REGIONS

We draw on our vast experience and extensive resources, including a fleet of dedicated survey vessels and airborne systems, to deliver a high-quality service that meets your data objectives.

To find out more visit  
**fugro.com**

te Küstenschutzmaßnahme. Die Salzwiese als Ökosystem erbringt eine Leistung für den Küstenschutz. Das ist keine Leistung des Ökosystems für die Natur; es ist vielmehr eine Dienstleistung der Natur für uns Menschen. Beim ökosystembasierten Küstenschutz versuchen wir also, mögliche Ökosystemleistungen zu nutzen. Wenn vor Sylt Sand aufgespült wird, ist das ebenfalls eine seit Langem umgesetzte ökosystembasierte Küstenschutzmaßnahme, weil die Dienstleistung des Ökosystems Strand für den Küstenschutz dadurch erhalten wird.

**Gibt es europaweit eine gemeinsame Sicht auf den Küstenschutz?**

Die EU-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie betrachtet Küsten- und Flusshochwasser auf Ebene der Flusseinzugsgebiete. Da zum Beispiel die Elbe durch Tschechien und Deutschland fließt, müssen sich beide EU-Staaten gemäß Richtlinie abstimmen. Das Gleiche gilt auch innerhalb von Deutschland. Niedersachsen, Hamburg und Schleswig-Holstein stimmen sich über den Küstenhochwasserschutz an der Tideelbe ab, wobei abstimmen für mich nicht automatisch vereinheitlichen heißt.

**Sondern?**

Man muss das gesellschaftlich betrachten – viele Wege führen nach Rom. In Niedersachsen werden die Deiche deterministisch, in Schleswig-Holstein statistisch bemessen. Abstimmung heißt für mich in erster Linie, dass die Verfahren nicht zu Ungleichheiten zwischen den Ländern und damit zu unterschiedlicher Lebensqualität führen. Damit sie optimal funktionieren, sollen die Managementpläne den jeweiligen lokalen und regionalen physikalischen wie gesellschaftlichen Gegebenheiten angepasst sein. Nach meiner Auffassung impliziert dies, sie können und sollten auch räumlich variieren.

**Wir müssen unsere Deiche also nicht genauso auslegen wie die Niederländer?**

In den Niederlanden besitzt der Küstenschutz seit der nationalen Katastrophe im Jahre 1953 übergeordnete Priorität; über 10 Millionen Einwohner bzw. zwei Drittel des Landes sind direkt betroffen. Deswegen ist dort ein sehr hoher Sicherheits- bzw. geringer Risikostandard gesellschaftlich legitimiert.

**Wie finden Sie den neuen risikobasierten Ansatz?**

Ich habe große Probleme mit den vielen Annahmen, die notwendigerweise bei einem solchen probabilistischen Verfahren getroffen werden müssen. Ein Beispiel: Wie viel Prozent der Bevölkerung werden bei einem Deichbruch tatsächlich evakuiert – 10, 30, 50, 70 oder 90 Prozent? Bleiben Menschen im Stau stecken, wie 2007 in New Orleans? Entsteht dieser Stau genau im tiefsten Bereich des Polders oder auf einem Hügel? Bricht der Deich am Tag oder in der Nacht, am Wochenende, an Weihnachten? Wohnen dort viele alte Menschen? Und so weiter und so fort. Je nach Annahme zu diesen Parametern komme ich auf einen Toten oder auf tausend Opfer, und der Deich müsste fünf oder 20 Meter hoch werden. Deswegen ist

das für mich keine wirkliche Alternative zu unserem Verfahren.

**Eine Sturmflut, wie sie alle 200 Jahre einmal auftritt, das klingt sehr abstrakt. Einer von 100 000, das ist plakativ und vielleicht besser verständlich.**

Einmal in 200 Jahren finde ich ebenfalls plakativ. Am Ende ist es vielleicht gehüpft wie gesprungen. Die deutsche Gesellschaft ist nach meinem Gefühl eher sicherheitsorientiert. Da passt die Aussage, dass eine 200-jährige Sturmflut sicher gekehrt werden kann, möglicherweise besser.

**Wann sind zuletzt Menschen bei einer Sturmflut ums Leben gekommen?**

Das war die Ostsee-Sturmflutkatastrophe von 1872, bei der 31 Menschen gestorben sind. Bemerkenswert, wenn man bedenkt, wie sehr der Fokus bei uns auf der Westküste liegt. Diese Sturmflut lief an unserer Ostseeküste übrigens etwa einen Meter höher auf als alle Sturmfluten danach. Es handelt sich um ein sogenanntes singuläres Ereignis, das statistisch nicht zu erfassen ist.

**Wer überwacht die Küstenschutzanlagen und garantiert uns, dass sie tun, wofür sie bestimmt sind?**

Der Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz ist als Behörde des Umweltministeriums verantwortlich für den Küstenschutz in Schleswig-Holstein. Dort arbeiten über 400 Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen täglich daran, dass die Küstenschutzanlagen wehrfähig sind und bleiben. Absolute Sicherheit vor Überflutungen gibt es übrigens nicht; auch Landesschutzdeiche können brechen, wenn auch mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit. Daher ist es wichtig, immer wieder auf das Restrisiko hinzuweisen.

**Würden Sie hinter einen solchen Deich ziehen?**

Ja, natürlich. Ich selbst lebe allerdings 30 Meter über dem Meeresspiegel in der Nähe von Kiel. Wenn der Meeresspiegel um einige Meter ansteigt, blicke ich auf eine Meeresbucht. Damit steigt der Wert meines Grundstücks, wie ich meinen zwei Töchtern ab und zu mal sage.

**Direkt am Meer gelegene Grundstücke sind begehrter. Heute dürfen in einigen Bereichen keine Gebäude mehr errichtet werden, dort hat der Küstenschutz Vorrang. Wie groß sind diese Zonen?**

Nach Landeswassergesetz dürfen bauliche Anlagen in einer Entfernung bis zu 150 Metern landwärts von der oberen Böschungskante eines Steilufers oder vom seewärtigen Fußpunkt einer Düne oder eines Strandwalles nicht errichtet oder wesentlich geändert werden.

**Und was soll dort eines Tages entstehen?**

Bislang stieg der Meeresspiegel an den deutschen Küsten um etwa 2 Millimeter pro Jahr. Am Ende des Jahrhunderts könnten es gemäß RCP8.5-Szenario etwa 15 Millimeter sein mit entsprechenden Konsequenzen für den Küstenabbruch. Um langfristig Schäden zu vermeiden, wurden diese Bauverbotszonen im Landeswassergesetz aufgenommen. Weiterhin sind zum einen die nicht ausreichend

geschützten Küstenhochwasserrisikogebiete als Bauverbotszone im Landeswassergesetz ausgewiesen, zum anderen Streifen hinter Deichen.

**Sie haben gesagt, die sandigen Küsten an der Ostsee werden verstärkt erodieren. Sind die Strände in einigen Jahrzehnten weg?**

Der Meeresspiegelanstieg führt zu einem strukturellen Rückgang der Küsten. Dieser Rückgang erfolgt allerdings auf natürliche Weise über das gesamte Profil. Das heißt, die Strände verlagern sich zwar landeinwärts, bleiben aber erhalten.

**Aber nur, wenn wir die Steilküsten nicht schützen?**

Genau, der Sand für die Strände kommt aus den Kliffs. Klingt vielleicht paradox, aber der Sand ist da, weil die Küsten zurückweichen. Eben deshalb müssen wir bereit sein, die Kliffs erodieren zu lassen. Sonst müssten wir eines Tages in Dänemark oder auf dem Bungsberg nach Sand suchen.

**Unterscheidet sich eine Sturmflut an der Westküste eigentlich von einer an der Ostküste?**

An der Ostküste sind die Sturmfluten wegen der fehlenden Tide und ohne flaches Wattenmeer zwar nicht so hoch, können dafür aber viel länger andauern. An der Westküste geht das Wasser mit der Tide nach wenigen Stunden wieder runter. An der Ostküste können die Sturmwellen mitunter tagelang auf erhöhtem Niveau an der Küste nagen.

**Wie sieht der Küstenschutz in Mecklenburg-Vorpommern aus?**

Das sollten Sie meine Kollegen dort fragen. Eine Besonderheit in Mecklenburg-Vorpommern sind die Bodden, die durch eine vorgelagerte Inselreihe von der Ostsee abgeschirmt werden. Das Bestreben der dortigen Küstenschutzverwaltung ist es, die Außenküste als Barriere aufrechtzuerhalten. Weiterhin gibt es dort, im Gegensatz zu Schleswig-Holstein, Sand in der Ostsee, je weiter im Osten, desto mehr. Eine dort angewandte Küstenschutzstrategie ist es daher, die Außenküste durch Sandaufspülungen zu stabilisieren.

**Die Halligen im nordfriesischen Wattenmeer sind einmalig. Jedes Mal, wenn die Salzwiesen einer Hallig unter Wasser stehen, lagert sich Sediment ab. Dadurch wächst die Hallig allmählich in die Höhe. Doch das Meer steigt schneller, oder?**

Zur Zeit wachsen die Halligen einen, maximal drei Millimeter pro Jahr. Das in Anbetracht von »Land unter« relevante mittlere Tidehochwasser steigt schon seit Jahrzehnten drei bis vier Millimeter pro Jahr an. Das bisherige Höhenwachstum reicht also nicht aus, um den MThw-Anstieg auszugleichen. Beim beschleunigten Meeresspiegelanstieg wird das Defizit sich noch vergrößern. Göttinger Geologen untersuchen, wie der Aufwuchs beschleunigt werden kann. Wenn das mit Schlick beladene Wasser über längere Zeit auf den Halligen stehen würde, könnte sich mehr Sediment ablagern. Mit kleinen Schwellen in den Halligprielen kann man bewirken, dass das Wasser verlangsamt wieder ins Wattenmeer zurückläuft. Auch wurde versucht,

das Wasser mit kleinen Dämmen länger auf der Hallig zu halten. Die bisherigen Ergebnisse deuten zwar daraufhin, dass eine stärkere Sedimentation durch solche Maßnahmen möglich ist; allerdings wird es wohl nicht ausreichen.

**Und dann?**

Schwer zu sagen. Sicherlich ist es ein sehr langsamer Prozess, dem teilweise auch durch angepasste Nutzungsformen begegnet werden kann. Vor 100 Jahren, als die Halligen durch Deckwerke zunehmend in ihrer Lage stabilisiert wurden, fand intensive landwirtschaftliche Nutzung statt. Heute liegt der Schwerpunkt beim Tourismus, der nicht so sensibel gegenüber »Land unter« ist. **Blicken Sie eigentlich optimistisch in die Zukunft?**

Erst mal versuche ich, die Lage als Privatperson objektiv zu betrachten. Wenn zum Beispiel der kommende Sommer dem langjährigen Klimadurchschnitt von 1961 bis 1990 entspräche, empfänden wir ihn als sehr kalt. Der Mensch hat sich schnell an die neue Situation angepasst, obwohl ich bereits heute Schnee und Eis im Winter vermisste. Auch habe ich gehört, dass in den Elbmarschen anstelle von Äpfeln erfolgreich Trauben angebaut werden. Die Herausforderung sehe ich vielmehr in den Extremen, da bin ich kein Optimist. Meinen »objektiven Ansatz« möchte ich noch mit folgendem Beispiel erläutern. Der Extremsommer von 2003 war in Deutschland im langjährigen Durchschnitt regional über vier Grad zu warm; die Folgen waren katastrophal. Wenn ein solcher Sommer zu Ende dieses Jahrhunderts jedes dritte Jahr eintritt, nähert er sich dem Mittelwert und ist kein Extremereignis mehr. Auch die Folgen wären nach meiner heutigen Einschätzung in Deutschland nicht katastrophal. Der Mensch wird sich, immer bis zu einem gewissen Grad und regional unterschiedlich, an neue Durchschnitte anpassen können, die Natur müsste es gezwungenermaßen auch. Die entscheidende Frage für mich als Küstenschützer ist, ob es dann vergleichbare oder noch stärkere Extreme, das heißt Abweichungen von den Mittelwerten, geben wird. Mein bisheriger Kenntnisstand hierzu ist, dass die größten Extreme in Zeiten des Klimawandels zu erwarten sind, wenn das Klima sich sozusagen von einem zum nächsten »stabilen Zustand« bewegt. Wenn der neue stabile Zustand erreicht ist, sollte auch die Intensität der Abweichungen wieder abnehmen. Neben den Extremen werden gerade uns natürlich auch die Folgen des mittleren Meeresspiegelanstieges beschäftigen, das brauche ich aber hier nicht zu wiederholen.

**Was passiert eigentlich mit Sylt? Wird der charakteristische Umriss der Insel am Ende des Jahrhunderts noch zu erkennen sein?**

*»Die Salzwiese erbringt eine Leistung für den Küstenschutz. Das ist keine Leistung des Ökosystems für die Natur, es ist vielmehr eine Dienstleistung der Natur für uns«*

Dr. Jacobus Hofstede

Eine gute Frage. Das hängt auch wesentlich davon ab, wie erfolgreich wir beim Klimaschutz sind, wie die Eiskappen auf Grönland und in der Westantarktis sich künftig verhalten und wie effizient Sandersatzmaßnahmen beim beschleunigten Meeresspiegelanstieg gestaltet werden können. Auf jeden Fall werden wir viel Sand benötigen.

**Wenn kein Sand vorgespült wird, wäre Sylt weg?**

Nicht weg, die Insel als Barriere würde vermutlich noch lange überdauern, sie würde allerdings nach Osten wandern und könnte an einigen Stellen durchbrechen. Sylt ist im Vergleich zu anderen Inseln im Wattenmeer sehr lang. Der Landesbetrieb hat einen langfristigen natürlichen Rückgang der Insel von etwa einem Meter pro Jahr ermittelt, an den Inselenden noch mehr. Dieser Rückgang wird durch die Sandersatzmaßnahmen ausgeglichen.

**Wie macht sich ein um einen halben Meter gesteigener Meeresspiegel in Hamburg bemerkbar, wenn die Flut im tidebeeinflussten Teil der Elbe mehr Wasser ins Landesinnere transportiert?**

Salopp gesagt: Das Wasser steht im Hafen an den Kaianlagen höher, nicht nur kurzzeitig, sondern permanent. Beispielhaft ist aus meiner Sicht das sogenannte HafenCity-Konzept, das im Grunde genommen eine Warftlösung darstellt. Das HafenCity-Gelände, das außerhalb der Hochwasserschutzlinie liegt, wurde und wird vor Errichtung

von neuen Nutzungen so weit erhöht, dass Sturmflutwasserstände sie nicht mehr erreichen.

**Was würden Sie gerne besser können?**

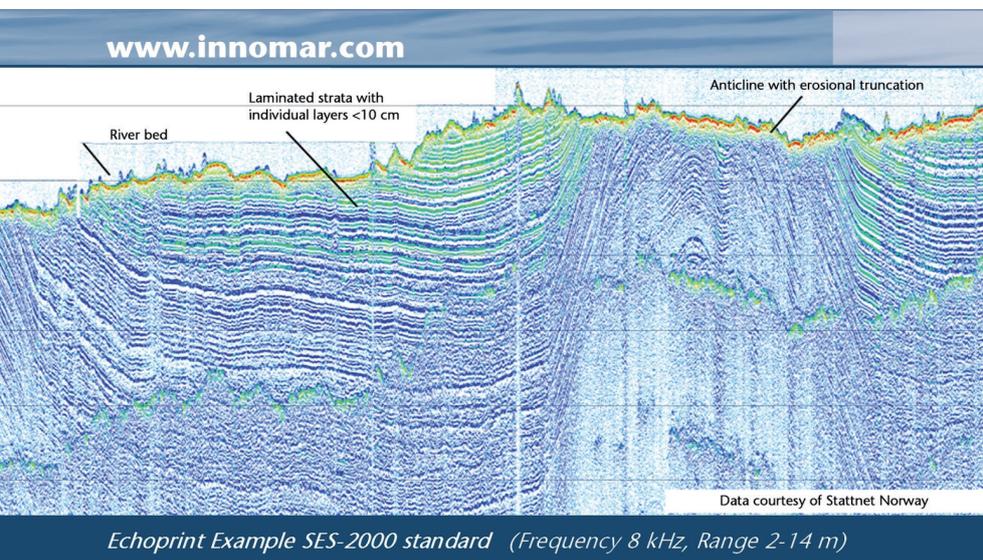
Modellieren. Ich staune immer, was die Experten aus ihren Modellen rauskriegen. Etwas misstrauisch bin ich allerdings bei solchen Begriffen wie Bias-Korrektur. Wenn ich es richtig verstehe, werden damit verbleibende systematische Abweichungen der Modellergebnisse von den Erwartungswerten bzw. Naturmessungen korrigiert. Das klingt für mich dann nach Drehen an den Stellschrauben, bis es passt, was mich als Manager skeptisch macht.

**Was möchten Sie denn modellieren?**

Zum Beispiel den Risikostandard: ein Opfer pro x Einwohner pro Jahr. Wie kann man das Verhalten der Menschen plausibel simulieren, wenn sie zum Beispiel bei einem drohenden Deichbruch in den Elbmarschen in Panik versuchen, auf die Geest zu kommen? Das wäre möglicherweise genau die falsche Reaktion. Denn wenn das Wasser dann plötzlich kommt, stehen alle womöglich im Stau, wo das Wasser am tiefsten ist. Besser wäre, sie blieben zu Hause oder gehen dorthin, wo es relativ hoch ist, vielleicht sogar auf den Deich. Wenn ich das modellieren und dann auch kommunizieren könnte ...

**Was wissen Sie, ohne es beweisen zu können?**

Das Klima wird sich ändern, und wir werden uns anpassen – müssen. //



www.innomar.com

## SES-2000 Parametric Sub-Bottom Profilers

Discover sub-seafloor structures and embedded objects with excellent resolution and determine exact water depth

- ▶ Different systems for shallow and deep water operation available
- ▶ Menu selectable frequency and pulse width
- ▶ Two-channel receiver for primary and secondary frequencies
- ▶ Narrow sound beam for all frequencies
- ▶ Sediment penetration up to 200 m (SES-2000 deep)
- ▶ User-friendly data acquisition and post-processing software
- ▶ Portable system components allow fast and easy mob/demob
- ▶ Optional sidescan extension for shallow-water systems



# Bestimmung des Bewegungsverhaltens von Gletschern durch Analyse terrestrischer Bildsequenzen

Ein Beitrag von HANS-GERD MAAS und ELLEN SCHWALBE

Die Auswertung von Bildsequenzen terrestrischer Kameras stellt ein wertvolles Werkzeug zur Analyse von Gletscherbewegungen in Ergänzung zu satellitenbasierten Verfahren dar. Durch subpixelgenaue Verfahren der multi-temporalen Bildzuordnung lassen sich Bewegungen zwischen Bildern einer Sequenz mit Genauigkeiten im Bereich eines Zehntelpixels bestimmen. Durch geeignete Verfahren der Georeferenzierung über geodätisch-photogrammetrische Netze lassen sich diese auf die Gletscheroberfläche übersetzen und erlauben die Bestimmung von Bewegungsvektor- und -trajektorienfeldern mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern in einer Entfernung von einigen Kilometern zur Kamera. Die fast beliebig hohe zeitliche Auflösung erlaubt dabei über die Bestimmung der Bewegungsgeschwindigkeit von Gletschern auch die Analyse dynamischer Prozesse wie gezeitenabhängiger Bewegungen oder Kalbungsereignissen.

Photogrammetrie | Glaziologie | Bildanalyse | Geschwindigkeitsfeld | Georeferenzierung  
photogrammetry | glaciology | image analysis | velocity field | georeferencing

Terrestrial camera image sequence processing depicts a valuable tool for the analysis of the motion behaviour of glaciers, complementing and validating satellite based methods. Subpixel accuracy multi-temporal image matching techniques allow for the determination of motion between two consecutive images with a precision in the order of a tenth of a pixel. Suitable methods of georeferencing via geodetic-photogrammetric networks allow to translate velocity information to metric object space with a precision of a few centimetres for points in a distance of several kilometres from the camera. The almost arbitrarily high temporal resolution of terrestrial image sequence acquisition also allows for the analysis of dynamic events such as tide-dependent glacier motion or calving events.

## 1 Einleitung

Die globale Erwärmung hat weltweit zu einem sehr signifikanten Massenverlust an Eisschildern und Gletschern geführt (Vaughan et al. 2013). Die räumlich-zeitliche Änderung von Gletschern stellt daher einen der Fokuspunkte der klimabezogenen Forschung dar. Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), auch als Weltklimarat bezeichnet, ist eine Institution der Vereinten Nationen, in deren Auftrag Wissenschaftler weltweit den aktuellen Stand der Klimaforschung zusammentragen und anhand anerkannter Veröffentlichungen den Kenntnisstand zum Klimawandel analysieren. Die IPCC WG 1 beschäftigt sich dabei unter anderem auch mit der Analyse von globalen Gletscherinventaren (Church et al. 2013) und dem Beitrag von Gletschern zum globalen Meeresspiegelanstieg. Solche Inventare sind z. B. das Projekt *Global Land–Ice Measurements from Space (GLIMS)*, in dem 60 Institutionen weltweit Informationen zur Veränderung von Gletschern primär auf Basis von Satellitenbilddaten zusammen-

tragen ([www.glims.org](http://www.glims.org), Bishop et al. 2004), und das *Randolph Glacier Inventory (RGI)* mit Daten zu den Umrissen von 200 000 Gletschern ohne Grönland und Antarktis (Pfeffer et al. 2014).

Neben Gletschern in der Arktis und Antarktis sind Gebirgsgletscher von besonderem Interesse, da sie wegen ihrer sensitiven Reaktion auf Klimaänderungen als wichtige Klimaindikatoren anzusehen sind (Oerlemans 1994). Laut Gardner et al. (2013) trugen Gebirgsgletscher im Zeitraum von 2003 bis 2009 etwa ein Drittel zum globalen Meeresspiegelanstieg bei, obwohl sie nur etwa 1 % der globalen Eismasse ausmachen.

Die an Gletschern zu beobachtenden Veränderungen zeigen sich neben Änderungen der Temperatur und Beschaffenheit des Gletschereises primär in Form eines Rückzugs der Gletscherfront, einer Reduktion der Eisdicke und einer Veränderung des Bewegungsverhaltens. In den vergangenen Jahrzehnten wurde eine Vielzahl von Techniken zur Überwachung der Veränderung von Gletschern auf lokalen und globalen Skalen entwickelt. In

## Autoren

Prof. Dr. Hans-Gerd Maas lehrt an der TU Dresden Photogrammetrie.

Dr. Ellen Schwalbe ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung an der TU Dresden.

[hans-gerd.maas@tu-dresden.de](mailto:hans-gerd.maas@tu-dresden.de)



Foto aus: Schwalbe et al. 2020

**Abb. 1:** Installation einer Kamera in wetterfestem Gehäuse am Lange Glacier, King George Island

vielen Fällen beschränkt sich die Überwachung auf das Monitoring der Lage (bzw. des Rückzugs) von Gletscherfronten, welche als guter Indikator für klimainduzierte Änderungen gilt, und zwar aus monoskopischen Satellitenaufnahmen (z. B. Meier et al. 2018; Winsvold et al. 2016). Fernerkundungsdaten stellen darüber hinaus auch eine gute Basis für die Analyse des Bewegungsverhaltens von Gletschern dar. Beispielsweise verwendet Kääh (2005) optische und Radarfernerkundungsaufnahmen zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeiten von Gletschern im Himalaya, und Rosenau et al. (2015) nutzten 37 000 Landsat-Szenen, um Geschwindigkeitsfelder grönländischer Gletscher für den Zeitraum von 1972 bis 2015 zu bestimmen.

Neben diesen Fernerkundungsverfahren mit globalem Fokus spielt auch die Analyse der Aufnahmen terrestrischer Kameras eine wichtige Rolle im Kontext von glaziologischen Anwendungen mit lokalem Bezug. Dabei haben Kameras, die primär zur Visualisierung des Rückgangs von Gletscherfronten und von kapitalen Kalbungsereignissen eingesetzt werden, in den letzten Jahren einige Medienaufmerksamkeit erhalten (z. B. Jason Box' *Extreme Ice Survey*, [www.extremeicesurvey.org](http://www.extremeicesurvey.org)).

Im Rahmen dieses Beitrags werden photogrammetrische Verfahren gezeigt, die aus Bildsequenzen solcher terrestrischer Kameras räumlich-zeitlich hochaufgelöste Geschwindigkeitsfelder als Basis für Analysen des Bewegungsverhaltens (bzw. der Änderung des Bewegungsverhaltens) von Gletschern bestimmen. Im Vergleich zu satellitenbasierten Verfahren weisen diese Verfahren den offensichtlichen Nachteil der lokalen Beschränkung auf. Demgegenüber steht jedoch im Vergleich zu den durch die Satellitenorbits gegebenen Aufnahmefrequenzen eine praktisch beliebig hohe zeitliche Auflösung, die auch kurzzeitige Analysen wie z. B. Gezeitenabhängigkeiten oder Kalbungsereignisse erlaubt. Außerdem weisen terrestrische Aufnahmesysteme

me eine geringere Wetterabhängigkeit auf als optische Fernerkundungssysteme, und die genauen terrestrischen Messungen können zur Validierung von aus Fernerkundungsdaten gewonnenen Geschwindigkeitsinformationen dienen.

Der Beitrag gibt dabei einen kompakten Überblick über die Methodik der Bestimmung räumlich-zeitlich hochaufgelöster Geschwindigkeitsfelder aus terrestrischen Bildsequenzen sowie über Anwendungen in Grönland, Patagonien und der Antarktis (Schwalbe und Maas 2017; Maas et al. 2013; Maas et al. 2008; Schwalbe et al. 2020). Die folgenden Kapitel stellen kurz die verwendete Kamera-Hardware vor, stellen Methoden der Bildsequenzanalyse und der Georeferenzierung vor und zeigen exemplarische Resultate. Für detailliertere Beschreibungen der Methodik sowie der Resultate sei auf die genannten Publikationen verwiesen.

## 2 Kameras zur Gletscherbeobachtung

Zur Aufnahme der terrestrischen Bildsequenzen dienen handelsübliche hochauflösende Spiegelreflex- oder Systemkameras, die in einem wetterfesten Gehäuse installiert sind (Abb. 1) und so aufgestellt werden, dass ihre Blickrichtung etwa orthogonal zur Bewegungsrichtung des Gletschers ist. Wenn, wie in den meisten Fällen, signifikante Querkomponenten des Bewegungsvektorfeldes ausgeschlossen sind, reicht eine einzelne Kamera zur Aufnahme aus. Zur Stromversorgung dienen Solarpanels und eine Pufferbatterie. Die Kameras werden über einen Intervallometer ausgelöst, welcher je nach Gletschergeschwindigkeit und Aufnahmemaßstab typischerweise auf Aufnahmeintervalle von 15 bis 60 Minuten eingestellt ist. Die aufgenommenen Sequenzen erstrecken sich je nach Zielstellung über wenige Tage bis zu zwei Jahren. Die Bilddaten werden auf einer internen Speicherkarte gespeichert, bei Echtzeitanforderungen ist zusätzlich eine aufwendige Satellitendatenverbindung zu implementieren.

## 3 Verfahren der subpixelgenauen Bildzuordnung auf der Zeitachse

Abb. 2 zeigt ein Einzelbild einer Sequenz am Jacobshavn Isbrae in Grönland, das mit einer 14-Megapixel-Kamera aufgenommen wurde. Zugehörige Videos finden sich auf der Webseite des IPF der TU Dresden.

Die primäre Aufgabe bei der Bestimmung von Geschwindigkeitsvektorfeldern aus monokularen Bildsequenzen besteht in einer Zuordnung auf der Zeitachse. Hierfür stehen eine Reihe von merkmals- oder flächenbasierten Bildzuordnungsverfahren zur Verfügung. Für die Auswertung der vorliegenden Bildsequenzen wurde eine modifizierte Variante des Least-Squares-Matching (LSM) verwendet, da dieser Ansatz die Verschiebung von Bildinhalten zwischen zwei (oder mehr) Bildern mit Subpixelgenauigkeit bestimmt und damit eine Vo-



Foto aus: Maas et al. 2008

Abb. 2: Einzelbild einer Sequenz am Jacobshavn Isbrae, Grönland

raussetzung für ein hohes Genauigkeitspotenzial liefert. Das Grundprinzip des LSM liegt hier darin, die Parameter einer Transformation zwischen zwei Ausschnitten (»Patches«, Abb. 3) zweier aufeinanderfolgender Bilder einer Bildsequenz so zu bestimmen, dass die Summe der Quadrate der Grauwertdifferenzen zwischen den Patches minimal wird. Die Form der Patches kann dabei quadratisch oder rechteckig gewählt werden. Als Transformation wird meist eine Translation angesetzt oder eine 6-parametrig Affintransformation, durch die auch Maßstabsänderungen, Rotationen und Scherungen zwischen den beiden Patches kompensiert werden können. Bei der stark zerklüfteten Oberfläche vieler Gletscher insbesondere in der Nähe der Gletscherfront (siehe auch Abb. 2) kann die durch den Sonnengang verursachte Bewegung von Schatten das Resultat systematisch verfälschen. Der LSM-Ansatz wurde daher so modifiziert, dass durch Schattenwurf betroffene Pixel ausmaskiert werden (Schwalbe und Maas 2017).

Als Resultat des LSM liegen für jedes Patch (typischerweise mehrere tausend Punkte pro Bild) die beiden Komponenten des Verschiebungsvektors im Bild vor. Zusätzlich bestimmt LSM die Standardabweichungen für die Parameter, die bei dem vorliegenden Datenmaterial meist in der Größenordnung von ca. 0,1 Pixeln lagen. Die beiden Patches in Abb. 3 liegen in einer Entfernung von etwa 3 km zur Kamera. Aufgenommen mit einem Normalwinkelobjektiv entspricht ein Pixel etwa  $60 \times 60 \text{ cm}^2$ , sodass sich hier eine Standardabweichung der Geschwindigkeitsvektorkomponenten von etwa 6 cm ergibt.

Ein wichtiger Aspekt bei der Auswertung der Bildsequenzen ist die Trennung zwischen Gletscherbewegungen und scheinbaren Bewegungen, die durch windinduzierte Kamerabewegungen verursacht werden. Zu diesem Zweck können z. B. im Vordergrund des Bildes feste Zielmarken installiert werden (unten in Abb. 2 sichtbar), die eine Kompensation der windinduzierten Effekte erlau-

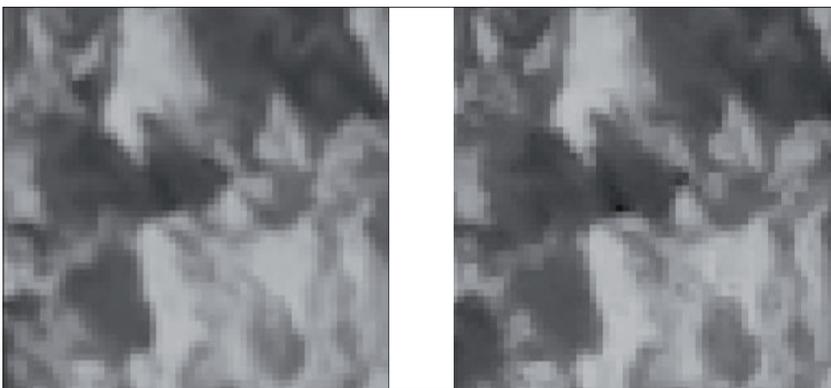


Abb. 3: Patches in zwei aufeinander folgenden Bildern einer Sequenz am Jacobshavn Isbrae, Grönland

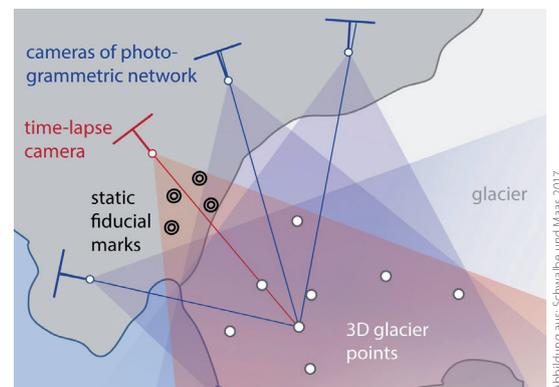


Abbildung aus: Schwalbe und Maas 2017

Abb. 4: Geodätisch-photogrammetrisches Netz zur Georeferenzierung monoskopischer Bildsequenzen

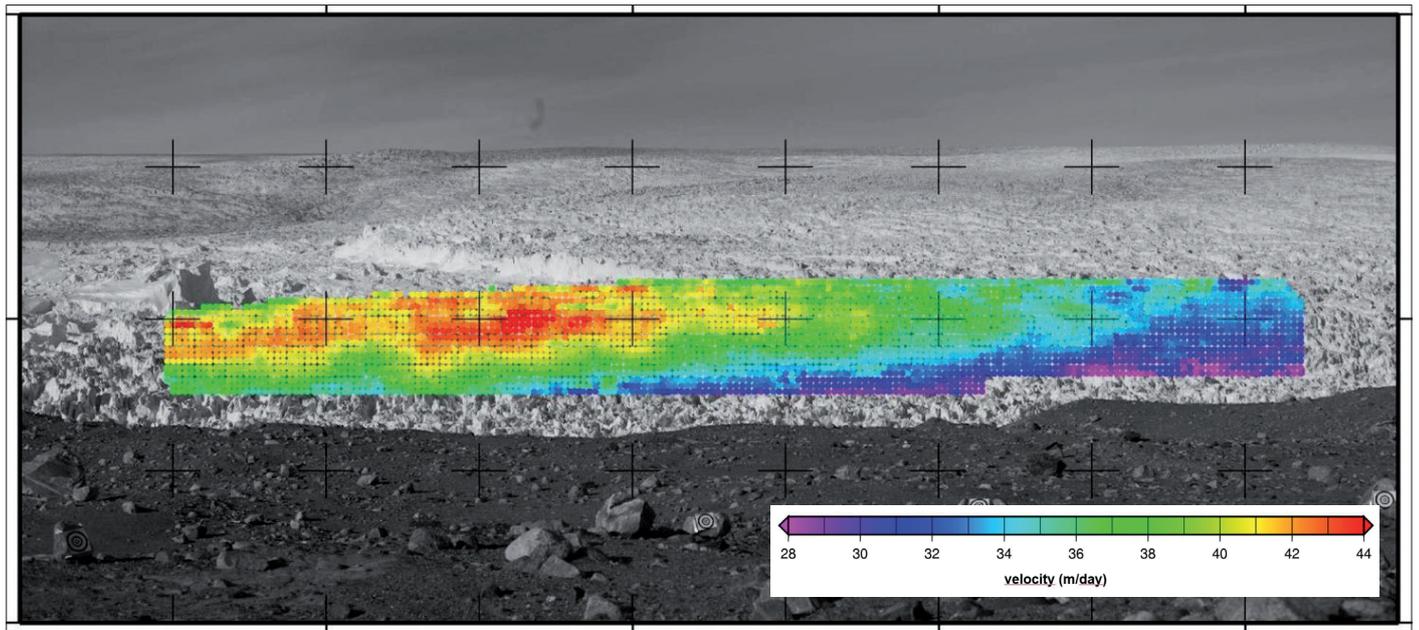


Abb. 5: Farbcodierte Darstellung der täglichen Bewegung im Frontbereich des Jacobshavn Isbrae, Grönland

ben. Bei entsprechender Topographie und geeigneten Beleuchtungsbedingungen können auch ortsfeste natürliche Merkmale im Vorder- oder Hintergrund als statische Referenz verwendet werden.

#### 4 Verfahren der Georeferenzierung

Als Resultat der Bildsequenzanalyse liegt ein räumlich-zeitlich hochaufgelöstes Geschwindigkeitsvektorfeld vor, welches jedoch noch vom Bildraum in den Objektraum (und damit auch von der Einheit Pixel in ein metrisches Maß) transformiert werden muss. Bei einer Stereokamerakonfiguration kann dies konventionell durch eine relative und absolute Orientierung mittels Verknüpfungs- und Passpunkten erfolgen. Der im Vorigen skizzierte monoskopische Ansatz bedingt hier eine angepasste Vorgehensweise, die in Schwalbe und Maas (2017) im Detail beschrieben ist. Der Ansatz basiert auf der Messung eines geodätisch-photogrammetrischen Netzes (Abb. 4), bei dem vor und/oder nach der Aufnahme der Bildsequenz ein Mehrbild-

verband aufgenommen wird, aus dem ein temporäres Oberflächenmodell des Gletschers bestimmt wird. Die Georeferenzierung kann über GNSS-Messungen an den Kamerastandorten erfolgen, und der Maßstab für jeden Bildpunkt ergibt sich durch einen Schnitt des orientierten Bildstrahls mit dem Gletscheroberflächenmodell.

#### 5 Resultate

Die in den vorigen Kapiteln skizzierten Verfahren wurden in einer Reihe von Pilotstudien eingesetzt und getestet: Jakobshavn Isbræ, Støre Qarajaq, Eqip Sermia, Sermeq Avangnardleq und Sermeq Kujatdleq in Grönland (Maas et al. 2008; Schwalbe et al. 2017), Glaciar San Rafael, Glaciar Colonia und Glaciar Grey in Patagonien (Maas et al. 2013; Schwalbe et al. 2016), Kaskawulsh Gletscher in Kanada sowie Lange Glacier auf King George Island, Antarktis (Schwalbe und Maas 2020).

Abb. 5 zeigt eine Visualisierung der Länge der Bewegungsgeschwindigkeit im Frontbereich des Jacobshavn Isbrae in Grönland für einen Tag im Sommer 2004, abgeleitet aus 4400 Trajektorien (Dietrich et al. 2007; Maas et al. 2008). Die Geschwindigkeiten erreichen dabei teilweise über 40 Meter pro Tag, was eine Verdoppelung gegenüber den Geschwindigkeiten Ende der 1990er Jahre darstellt. Mit Standardabweichungen der Geschwindigkeiten in der Größenordnung von etwa 10 cm (siehe Kap. 3) sind die ermittelten Geschwindigkeiten hoch signifikant und deutlich genauer als aus Satellitenbilddaten bestimmbare Geschwindigkeiten. Die Resultate der Prozessierung terrestrischer Bildsequenzen stellen damit auch eine gute Option zur Validierung der Resultate satellitenbasierter Verfahren dar (Johnson et al. 2020).

Abb. 6 zeigt einen Ausschnitt eines Geschwin-



Abbildung (Ausschnitt) aus: Dietrich et al., 2007

Abb. 6: Ausschnitt eines Geschwindigkeitsfeldes mit gezeiteninduzierter Vertikalbewegung

digkeitsfeldes, bestehend aus 96 Bildern einer Sequenz, dessen Trajektorien über 24 Stunden eine systematische vertikale Wellenbewegung zeigen. Diese Wellenbewegung ist fast perfekt mit der Gezeitenkurve korreliert und beweist damit, dass die Gletscherzunge auf dem Wasser des Fjordes aufschwimmt und sich mit den Gezeiten auf und ab bewegt. Eine Analyse der Partizipation der Bewegung von Punkten an der Gletscheroberfläche mit der Gezeitenkurve erlaubt somit die Detektion

der Aufsetzlinie des Gletschers, welche unter anderem für eine Vorhersage des Kalbungsverhaltens und damit der Größe der vom Gletscher produzierten Eisberge relevant ist (Maas et al. 2008; Dietrich et al. 2007). Hier zeigt sich der Vorteil der fast beliebig hohen zeitlichen Auflösung ortsfester terrestrischer Kameras (hier mit 15 Minuten Aufnahmeintervall) – auf Basis von Satellitenbilddaten wäre eine solche zeitaufgelöste Analyse nicht möglich. //

---

## Literatur

- Bishop, Michael P.; Jefferey A. Olsenholler et al. (2004): Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS): Remote Sensing and GIS Investigations of the Earth's Cryosphere. Geocarto International, DOI: 10.1080/10106040408542307
- Church, John; Peter Clark et al. (2013): Sea Level Change. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Cambridge University Press
- Dietrich, Reinhard; Hans-Gerd Maas et al. (2007): Jakobshavn Isbræ, West Greenland: Flow velocities and tidal interaction of the front area from 2004 field observations. Journal of Geophysical Research, DOI: 10.1029/2006JF000601
- Gardner, Alex S., Geir Moholdt et al. (2013): A Reconciled Estimate of Glacier Contributions to Sea Level Rise: 2003 to 2009. Science, DOI: 10.1126/science.1234532
- Johnson, Erling; Dana Floricioiu et al. (2020): Calving dynamics derived from satellite SAR data in support of mass balance estimations in Lange Glacier, Antarctica. IEEE Latin American GRSS & ISPRS Remote Sensing Conference (LAGIRS)
- Kääb, Andreas (2005): Combination of SRTM3 and Repeat ASTER Data for Deriving Alpine Glacier Flow Velocities in the Bhutan Himalaya. Remote Sensing of Environment, DOI: 10.1016/j.rse.2004.11.003
- Maas, Hans-Gerd; Ellen Schwalbe et al. (2008): Determination of spatio-temporal velocity fields on glaciers in West-Greenland by terrestrial image sequence analysis. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVII-B8, S. 1419–1424
- Maas, Hans-Gerd; Gino Casassa et al. (2013): Photogrammetric Techniques for the Determination of Spatio-temporal Velocity Fields at Glaciär San Rafael, Chile. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, DOI: 10.14358/PERS.79.3.299
- Meier, Wolfgang J.-H.; Jussi Griebinger et al. (2018): An Updated Multi-Temporal Glacier Inventory for the Patagonian Andes With Changes Between the Little Ice Age and 2016. Frontiers in Earth Science, Vol. 6, Art. 62
- Oerlemans, Johannes (1994): Quantifying global warming from the retreat of glaciers. Science, DOI: 10.1126/science.264.5156.243
- Pfeffer, W. Tad; Anthony A. Arendt et al. (2014): The Randolph Glacier Inventory: a globally complete inventory of glaciers. Journal of Glaciology, DOI: 10.3189/2014JG13J176
- Rosenau, Ralf; Mirko Scheinert; Reinhard Dietrich (2015): A processing system to monitor Greenland outlet glacier velocity variations at decadal and seasonal time scales utilizing the Landsat imagery. Remote Sensing of Environment, DOI: 10.1016/j.rse.2015.07.012
- Schwalbe, Ellen; Robert Koschitzki; Hans-Gerd Maas (2016): Recognition of drainage tunnels during glacier lake outburst events from terrestrial image sequences. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B8-537-2016
- Schwalbe, Ellen; Hans-Gerd Maas (2017): The determination of high-resolution spatio-temporal glacier motion fields from time-lapse sequences. Journal of Earth Surface Dynamics, DOI: 10.5194/esurf-5-861-2017
- Schwalbe, Ellen; Robert Koschitzki et al. (2020): Stereophotogrammetric measurement of spatio-temporal velocity fields at Lange Glacier, King George Island. IEEE Latin American GRSS & ISPRS Remote Sensing Conference (LAGIRS)
- Vaughan, David G.; Josefino C. Comiso et al. (2013): Observations: Cryosphere. In: Climate Change 2013, S. 317–382
- Winsvold, Solveig Havstad; Andreas Kääb; Christopher Nuth (2016): Regional Glacier Mapping Using Optical Satellite Data Time Series. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2527063

## Danksagung

Die Entwicklung der Methodik zur Bestimmung räumlich-zeitlich hochaufgelöster Geschwindigkeitsfelder aus terrestrischen Bildsequenzen wurde von der DFG gefördert. Die Anwendung der Verfahren unter anderem in Patagonien wurde von der TU Dresden im Rahmen ihres StB-Programms gefördert. Die Arbeiten in der Antarktis wurden von der chilenischen INACH unterstützt.

Die im Rahmen der Arbeiten entwickelte Software für subpixelgenaue Merkmalsverfolgung und Georeferenzierung steht frei zur Verfügung (<https://tu-dresden.de/geo/emt>).

# Coastal zone mapping with the world's first airborne multibeam bathymetric lidar mapping system

An article by DON VENTURA

Coastal zone mapping is becoming more and more important due to the magnified impacts on coastal communities due to climate change and the gradual but inexorable rise in global mean sea level. Accurate determination of the nearshore bathymetry and low-lying coastal terrain is vital for providing better modelling of the likely impact to areas due to storm surges and flooding. With this new concept in airborne lidar bathymetry (ALB) technology, mapping this challenging domain is now more possible to achieve in an efficient and effective way.

ALB | lidar | coastal zone mapping | RAMMS | UAV  
ALB | Lidar | Küstenzonenkartierung | RAMMS | UAV

Die Kartierung der Küstenzonen wird immer wichtiger, da sich der Klimawandel und der allmählich, aber unaufhaltsam ansteigende globale mittlere Meeresspiegel sich spürbarer auf die an den Küsten liegenden Gemeinden auswirkt. Eine genaue Bestimmung der küstennahen Bathymetrie und des tiefliegenden Küstengeländes ermöglicht es, die wahrscheinlichen Auswirkungen von Sturmfluten und Überflutungen besser zu modellieren. Mit einem neuen Ansatz der luftgestützten Lidar-Bathymetrie-Technologie ist es einfacher geworden, die Kartierung effizient und effektiv durchzuführen.

## Author

Don Ventura is Hydrographic Business Development Manager at Fugro in Hillcroft, Houston, Texas, USA.

dventura@fugro.com

## Acknowledgements

M. Filippone, M. Stender, M. MacDonald, J. Martinez, T. Mitchell – Fugro  
S. Anderson, E. Korpie – Areté

## For more information:

m.stender@fugro.com

## Introduction

To map the coastal and nearshore environments, contemporary airborne lidar bathymetry (ALB) technology has always faced a serious challenge regarding data density and point accuracy sufficient to satisfy many agencies' requirements. The focus on coastal zone mapping is becoming even more important due to the magnified impacts on coastal communities due to climate change and the gradual but inexorable rise in global mean sea level. Accurate determination of the nearshore bathymetry and low-lying coastal terrain is vital for providing better modelling of the likely impact to areas due to storm surges and flooding. Relatively high-energy output ALB systems have sought to penetrate the water column sufficiently to create usable coverage to a depth where traditional acoustic technology can achieve parity in terms of efficiency (swath width) and cost per unit area. This design template typically creates data densities that do not meet International Hydrographic Organization (IHO) standards for target detection and therefore fail the IHO Order 1a criteria. The advent of lightweight »topo-bathy« systems, combining the 532 nm green laser of a bathy system with a topographic lidar design approach partially addresses some of the limitations of »deep« systems but at the expense of water penetration and consistent coverage, limiting their use in areas

of marginal water clarity and variable bathymetry. To address these limitations, Fugro has, in partnership with system manufacturer Areté, adopted a new design paradigm and created the world's first multibeam bathymetric lidar, the Fugro Rapid Airborne Multibeam Mapping System (RAMMS). RAMMS is now operational and realising the design goals which were set: to attain accurate, fully attributed bathymetric data, at a data density exceeding that required to achieve IHO Order 1a and the associated seabed coverage and target detection criteria. This article describes the benefits of this technical approach, how it differs from contemporary bathymetric lidar technology and the considerable advantages it provides to the end user.

## Depth penetration versus data resolution – yesterday's dilemma and the case for something new

In the 1990s, Fugro helped commercialise the use of airborne lidar bathymetry for regional mapping of the world's coastal zones in favourable bathymetric conditions. Due to the properties of laser light, »favourable« conditions require low water turbidity and a reasonably reflective seabed against which the light will be reflected in sufficient energy levels (photon count) to be detected back at the receiver. All bathymetric lidar systems require the same environmental conditions; some are better at

overcoming water clarity and seabed reflectance to a degree, whilst some provide very good data resolution but at the expense of depth penetration and coverage. However, before RAMMS, all systems used a pulsed diode to create discrete, individual parcels of energy. In these legacy systems, moving mirrors are used to divert the individual laser pulses from side-to-side or in an elliptical pattern, collecting data over a specific swath. As the light energy returns to the receiver, each point provides an independent water depth measurement.

Over the last several years, the world's leading hydrographic agencies have consistently challenged the industry to provide higher standards of quality in data collection and deliverables, most specifically to meet their requirements in airborne lidar bathymetry suitable for nautical charting. This precondition includes the underlying impositions on the data used; namely that it must support both safety of navigation (SoN) and, by inference, safety of life at sea (SOLAS). Great trust is put upon official nautical charts by the world's maritime community and, in turn, hydrographic charting agencies' need to have trust in the data used to compile their products as meeting the accuracy and resolution standards mandated for the safe navigation of surface vessels. As these standards have been raised in recognition of the advancement in hydrographic survey technology capability and fidelity, it was recognised that, in the case of ALB, Fugro could not wait for industry and manufacturers to solve this challenge and that affirmative action to meet the needs of our primary clients had to be taken. By identifying and leveraging decades of defence department technology for shallow-water littoral mapping, which utilised a completely different design and technology concept, and then refining it for hydrographic surveying, Fugro's RAMMS was born.

As mentioned earlier, the global hydrographic market includes a variety of stakeholder client groups, all with a varying need for hydrographic data. Although chief amongst these stakeholders is the nautical charting agencies group, other significant users of the data include the coastal zone management groups and agencies, whose main requirements are not limited to bathymetry but also the capture of the land-sea interface. Obtaining this seamless data, across the realm where the greatest interaction between land and water creates the scenario and extent of storm surge and coastal inundation, is most efficiently and successfully captured using airborne sensors. It also provides an abundance of baseline survey data depicting current sea level along the world's coastlines and therefore the basis for any subsequent sea-level change monitoring and assessment. Many of the world's coastlines, particularly those of low-lying, remote and often developing nations, where current mapping and charting is

inadequate, are the very areas where better determination of the land-sea interface is critical to the safety of nearshore communities and critical infrastructure.

### RAMMS system description and contemporary system comparison

Fugro RAMMS is a modular design concept featuring a new bathymetric lidar sensor from Fugro and technology partner Areté, based on Areté's earlier Airborne Laser Mine Detection System (ALMDS) and the Pushbroom Imaging Littoral Lidar System (PILLS) technology. These technologies are a result of over two decades of design and evolution for defence activities.

RAMMS was designed to advance bathymetric mapping quality and efficiency beyond current airborne mapping systems in the coastal and nearshore environments. Modular components can be added to provide the client with a tailored product delivery for the hydrographic, coastal zone management, marine engineering and environmental market sectors. Fugro's heritage and expertise in ALB has been leveraged to ensure that the evolved system has been designed with the future in mind; cost efficiency and improved data quality are major considerations, so access to this vital data by an increasing number of stakeholders is possible.

The RAMMS' integrated lidar system is used for simultaneously acquiring high-resolution bathymetry and topographic data, together with the required situational (processing) imagery and associated position and attitude sensory information. Further, the intensity of the returning imagery is a measure of the reflectance of the seabed materials; the processing of this intensity data can in turn generate a reflectance imagery product akin to (but different from) acoustic backscatter that is used extensively by today's contemporary acoustic hydrographic sonar technology providers to assist in determining the surface material composition of the seabed.

The RAMMS system provides timely and cost-effective capabilities for hydrographic surveying. Operational efficiencies translate into significant improvements in data quality and/or costs when compared to current methods, allowing for optimised value for collection of necessary data. The primary sensor weighs approximately 14 kg; this grows to a still very modest 35 kg as a system, which includes the main lidar sensor, the power distribution unit (PDU), a highly accurate inertial motion unit (IMU) and a multispectral (4-band) camera, all integrated within a protective housing, making it extremely portable and a viable option for working on smaller aircraft and uncrewed platforms. This allows not only more sensor combinations per cubic metre of space in the aircraft, it means that a much greater number of suitable

platforms can be used to support survey operations. Other advantages include:

- Solid-state electronics creates more ruggedised, low-maintenance design;
- Greatly minimised shipping logistics;
- Greatly minimised mobilisation and check calibration procedures;
- Modularity and small overall size provide ease of installation;
- Laser ranging absolute accuracy is sub-decimetre;
- Compact metadata architecture;
- Real-time data processing results in rapid QC estimates in the field and onward processing routines by integrating and leveraging Fugro Back-2-Base technology;
- Point cloud data generation faster than actual acquisition;
- Point cloud data can be brought into any third-party mapping software (e.g. CARIS, QINSy).

### Design concept and development

RAMMS, as the acronym suggests, represents a paradigm shift in conceptualising the airborne bathymetry approach. In summary, the sensor differs from other sensors on the market today in the following fundamental aspects:

- No mirrors;
- No scanner;
- No moving parts;
- No energy-hungry componentry;
- Very lightweight and portable;
- Already mission-proven as suitable for uncrewed autonomous vehicle (UAV) operations.

The original sensor was developed from a US Office of Naval Research (ONR) requirement for a »lightweight topo/bathy charting system for UAVs«. The original system (Fig. 1) was intended to map shallow littoral waters; initial designs were matured in 2010 and research and development

continued throughout 2015. These designs from the outset required the system to operate from UAVs, which gives RAMMS its earliest design parameters. In other words, it is not a miniaturisation of an earlier, bulkier predecessor, but the evolution of an already very lightweight, portable design.

Focus on a commercially viable bathymetric system occurred from 2015 onwards with continued collaboration between Areté and Fugro. While most lidar systems use moving mirrors to divert laser pulses from side-to-side or in an elliptical pattern, the RAMMS unique push broom sensor fires pulses of laser energy that undergo divergence at the sensor and are spread outward laterally, perpendicular to the direction of flight. This creates a »fan« of energy, and in so doing, produces a true swath coverage. The laser energy returns to the receiver and is digitised into individual returns resembling a 2D cross section (~900 observations across-track with elevation/depth for each swath return). RAMMS single laser pulse thus achieves what a traditional lidar system would need hundreds of pulses to collect. These »2D returns« are collected every time the laser is fired along-track, to create representations of the ground or seafloor. Such a technique is not only unique in the bathymetric lidar realm, it is very analogous with multibeam sonar conceptualisation, and this has additional advantages in utilising processing software and practices.

### Swath characteristics

As RAMMS has no moving parts, the scan characteristics are dependent upon beam divergence at the transceiver, altitude, speed and pulse rate frequency (PRF). The current configuration has the swath width approximately 83 % the altitude, with nominal operational altitude at 325 m above ground level (AGL).

### Physical characteristics

As the primary sensor is extremely compact and light, platform suitability is considerably expanded over heavier, more power-hungry conventional systems with adoption of a much lighter, power-efficient system. The main design characteristics of RAMMS include two main templates, depending on whether a manned aircraft or UAV is the platform of choice: for aircraft, a vertically aligned (»stack«) frame allows a small physical footprint for the sensor above a standard photogrammetric port in the aircraft fuselage (which in turn also allows other sensors to occupy the same port), whilst for the fixed-wing UAV option, a longitudinal »pod« design is more in keeping for that platform profile. The outline characteristics of RAMMS are as follows:

- Current sensor contained in a 10 cm × 23 cm × 99 cm housing (0.023 m<sup>3</sup>) (longitudinal »pod« design, Fig. 1) or a 76 cm × 42 cm × 37 cm housing (0.118 m<sup>3</sup>) (upright »stack« design, Fig. 2);



Fig. 1: PILLS onboard a SeaHunter UAV – this represents the »pod« configuration of RAMMS

- Sensor weight < 14 kg in UAV »pod« mode;  
35 kg in aircraft »stack« mode;
- Power draw is < 10 A @ 28 V DC;
- No chiller or air conditioner (unlike all other contemporary ALB systems);
- Low-power = low-heat generation – operable over a wider environmental window;
- 532 nm output (green);
- 30 Hz PRF, each producing equating to 0.33 m spacing across-track and 1 m to 2 m along-track (speed dependent).

By combining the core fundamentals of this defence-based technology with Fugro's decades of multibeam and bathymetric lidar surveying, RAMMS capabilities have been developed with new and higher standards in mind. In addition, one of the foundations and vision of this technology was our focus on how to assimilate the features and abilities to multibeam, but from an airborne collection perspective. After three years of development and testing, this new technology has been field-proven on multiple projects since 2017.

Fugro conducted a technical evaluation of various contemporary ALB systems and then compared these to RAMMS to confirm that the new system performance not only exceeds the capabilities of competing systems but also fulfils the specifications outlined in modern international hydrographic specifications. Specifically, Fugro evaluated various contemporary systems on the requirements as they relate to the systems being capable of achieving IHO Order 1 accuracies to a depth of 40 m in optimum water conditions and providing a density in-line with typical requirements of at least two points in a 2 m × 2 m bin size throughout.

Moreover, the Fugro RAMMS system's unique push broom technology, coupled with the water column processing algorithms at its core, make it the first and only system to allow for water column volume analysis and increased data density by utilising this feature. This water column insight from the push broom technology allows for detailed analysis of wreck investigations unlike any other airborne sensor, all by taking full advantage of its technology roots for littoral mapping activities.

In assessing the utility of RAMMS, Fugro conducted comparisons with the Optech CZMIL NOVA and Titan systems, and Leica's Chiroptera II/HawkEye III. These sensors provide different capabilities based on laser power, laser repetition rates and scanning type, which ultimately impact results in terms of point density and depth of bottom detection. It was determined that while all sensors are capable of meeting the outline specifications to some degree, it came down to which would cover all requirements of the specifications in the most holistic and efficient way. Specifically, the requirement for a sounding density of two unique data points



Fig. 2: RAMMS in »stack« configuration for use in manned aircraft missions

in a bin with sides of 2 m and the potential to deliver sounding density of up to nine data points in a 2 m bin for significantly large areas (no less than two points per bin) dictated which sensors were capable of achieving specification. These density requirements dictated two variables that needed to be assessed for use of either system configuration (sounding spacing and number of line passes), all while balancing the swath width and operational efficiency of the technology under consideration.

It must be noted, however, that even by recording the base requirement of two data points per 2 m bin, this does not ensure points are not lost to uncontrollable environmental issues such as sea foam, mist, turbidity, whitecaps or similar. The statistical metric of 90 % attainment in data density was assumed, and Fugro evaluated what could be expected from each configuration. It was

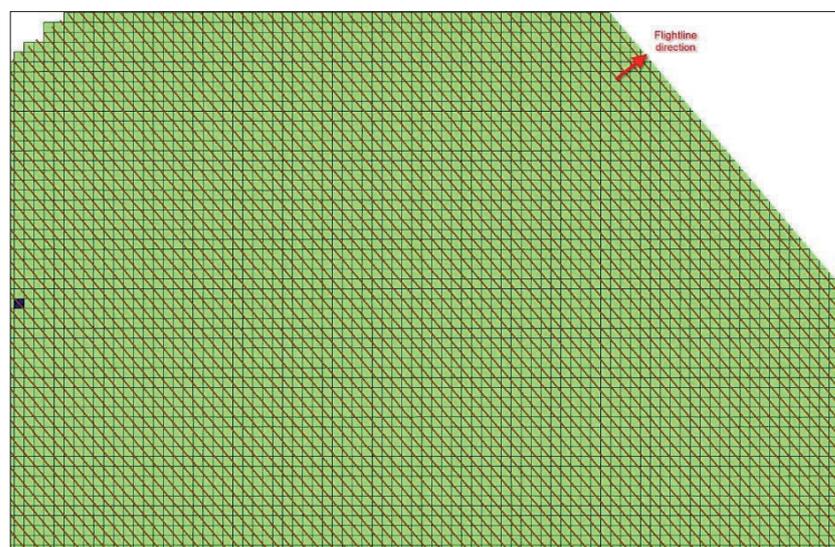


Fig. 3: Fugro RAMMS point density over 2 m bins (single pass)

anticipated that there would likely be six or more unique soundings in each 2 m bin, with side lap areas excluded from each primary waveform pulse alone. Fig. 3 illustrates actual RAMMS point pattern when flown at 120 kts and 325 m of altitude. The 2 m bins are coloured green, which indicated all of them (100 % coverage) have two or more points; the inset illustration shows a zoomed-in view of the point pattern.

In addition to an average six points per 2 m bin from each individual pulse, RAMMS can capture the full push broom water column returns to allow for potentially doubling the primary density, from six to twelve points per 2 m bin in the along-track direction. By capturing the water column, a 3D representation of areas with multiple overlapping coverage, in excess of the original single return, can be combined and evaluated independently from the stand-alone primary returns. This method, leveraging the shallow water littoral mapping techniques of the core technology, takes the multiple views outside the single return and combines them to allow for a deeper and separate standalone analysis algorithm. The overlapping illuminated coverage of the area is scanned using all common excess coverage across the multiple views of the same location, covered by the stand-alone single returns shown in Fig. 3. This allows the algorithms to detect potential returns that would not be detected in a single return. In addition, any

detections that were weak or dark, have a better chance of being captured in this additional analysis, due to the redundant views and separate analysis. While this unique RAMMS feature is available at all water depths, it does lose effectiveness as water clarity degrades due to turbidity noise influencing the detections. However, in optimal conditions, it is anticipated the feature will produce up to twelve points per 2 m bin to 40 m water depth (localised environmental conditions permitting).

This method of combining water column views of additional areas allows for both an increase in density due to multiple views of the seafloor and also a more in-depth and intelligent method of performing wreck analysis from lidar. As shown in Fig. 4, weaker returns in a single pulse return are not strong enough to be picked by the detection algorithm. When combining multiple views and analysing the water column of that multiple view, even weaker returns can be identified, as well as new points common to the multiple views with strong returns in all the samples.

In comparison to all other systems that derive all information from a single spot return, more logical and valuable information is collected via this water column method. In Fig. 5, the potential returns could not be visualised with a »spot« system, as they would simply be consumed within the single waveform pulse of that one location that has a strong bottom return attached. Any possible object in the water column of the single spot return would only be detectable somewhere between the two large amplitude wave returns (which represent the water surface and seabed returns). Visualisation of any water column noise is virtually impossible to spatially assess with the spot single location returns.

The study confirmed that contemporary solutions, while partially attaining some of the facets required to meet nautical charting-quality hydrographic data, still resulted in a compromise between data density and depth penetration capabilities, and that the efforts to develop RAMMS based on attaining all the appropriate standards – not just some – is well-founded.

## Advantages and applications

RAMMS' design and operational characteristics provide a number of clear advantages over contemporary systems. The key performance differentiators are summarised in the Table 1.

Although RAMMS and some shallow-water ALB systems are capable of being supported from UAV platforms as listed above, some integration effort would still be required to adapt system designs to fit the specific UAV selected (although the fact that RAMMS can be provided in a »pod« configuration already greatly simplifies this task).

In addition to the output data meeting or exceeding the requirements of current international

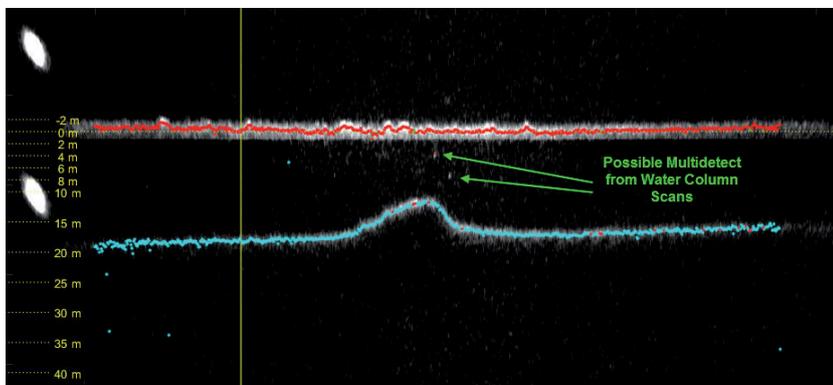


Fig. 4: Fugro RAMMS water column data example

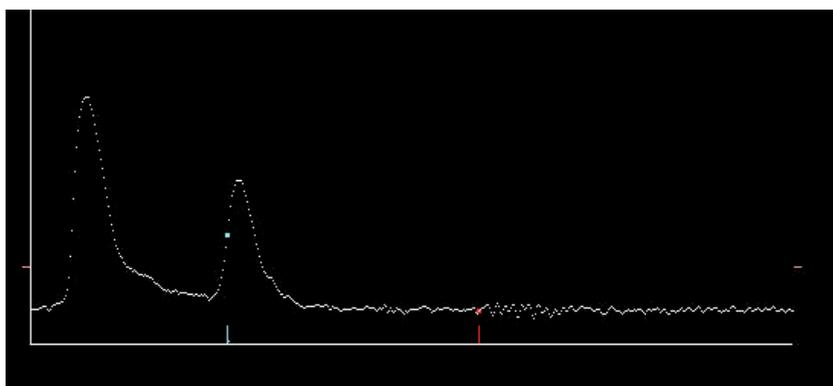


Fig. 5: Limited assessment from spot sensor

RAMMS	Current deep-water ALB	Current shallow-water ALB
3 Secchi depth-capable	2 to 3 Secchi depth-capable	1 to 1.5 Secchi depth-capable
~1:1 swath :flying altitude	0.7:1 swath :flying altitude	0.7:1 swath :flying altitude
25,000 observations/second	10,000 observations/second	Up to 550,000 observations/second (1 Secchi depth) Up to 70,000 observations/second (1.5 Secchi depth)
1.6 points/m <sup>2</sup> @ 300 m altitude @ 140 knots	0.49 points/m <sup>2</sup> @ 400 m altitude @ 140 knots	Up to 18 points/m <sup>2</sup> @ 600 m altitude @ 140 knots
Continuous cross-track acquisition	Individual observations	Individual observations
< 10 A current draw	> 70 A current draw	~17 A current draw
UAV-capable (now)	Non-UAV-capable	UAV-capable (now)
Large platform flexibility	Manned aircraft types only	Large platform flexibility

**Table 1:** Key performance differentiators of RAMMS in comparison with other ALB systems

hydrographic data standards, a number of other advantages result from RAMMS' design:

- Compact designs, low mass and very modest power requirements widen the number of suitable aircraft platforms, including UAVs, that can accommodate the system. This includes single- and piston-engine aircraft, from which contemporary ALB systems cannot be adequately supported.
- The small system size and solid-state componentry makes physical installation and mobilisation both more rapid and simple to conduct. This also allows for more flexible »bundling« with other sensors deployed in the same aircraft such as dedicated topographic lasers, hyperspectral cameras and the new generation of mini-imagers, micro synthetic aperture radars, etc.
- The smaller, lighter aircraft suitable to accommodate the system allow, in turn, more operational flexibility in the type of airfields and associated services necessary for the aircraft type. Many smaller airports and/or those with non-asphalt runways which cannot support larger turbo-prop aircraft can now be factored into mission planning.
- Increased endurance is possible compared to that achieved with previous systems using the same aircraft type, resulting in more effective flight planning.
- A smaller operational field crew is required for both mobilisation and field operations, reducing the HSE level of risk of any operation.
- Logistical overheads such as shipping are hugely reduced in scope and expense.
- The carbon footprint of hydrographic data acquisition is markedly reduced through the use of smaller aircraft, more airfield accessibility, less or no shipping, etc.
- More rapid deployment is possible due to the low shipping volume and smaller team of personnel required for data acquisition: in many cases the selected aircraft can mobilise with the system already installed, omitting entirely the need for shipping freight.

- The exciting use of UAVs is »now« rather than some future goal, further expanding the operational and geographic envelope in the use of the technology.

Regarding the extent to which RAMMS and ALB can be utilised, various stakeholder groups requiring nearshore and land-sea interface data represent a host of applications to which the data can provide useful input. The following list is not definitive but illustrates the breadth and diversity of possible clients over and above those involved in traditional nautical charting and terrestrial mapping markets:

- Cadastral (land usage and ownership) surveyors;
- Nearshore oil and gas industry;
- Tourism;
- Aquaculture;
- Cultural agencies;
- Conservation and natural resource groups;
- Renewable energy industry;
- National security and defence agencies;
- Cable route surveys for oil and gas, telecommunications and power;
- Fishing agencies;
- Recreation industry;
- Nearshore mineral extraction activities (e.g. beach renourishment, sediment mining);
- Coastal engineering (construction, etc.).

## Summary

Fugro RAMMS continues to be refined, with further development of various advantageous workflows and updated software solutions constantly underway. Nonetheless, the system today is already fully operational and functional, heralding a new efficient, cost-effective and higher-resolution ALB solution on the marketplace. As the world's only 3-Secchi capable multibeam bathymetric lidar, Fugro RAMMS sets the standard for ALB systems by attaining the data quality and density standards demanded by an ever-growing customer base, who want quality data in challenging nearshore and coastal environments where flooding, tidal storm surges and undeniable sea-level rise require measuring and mitigation. //

# EDoM'18 – ein internationales Untersuchungsprogramm an der Ems

Ein Beitrag von CHRISTIAN MAUSHAKE

Das Emsästuar zwischen der Nordsee und der Tidegrenze ist ein Problemfall. Überwiegend anthropogene Einflüsse haben zu einem verstärkten Eintrag von Sedimenten geführt. Der Schwebstoffgehalt im Wasser ist mittlerweile so hoch, dass der Zustand der Ems sowohl unter dem Aspekt der wirtschaftlichen Unterhaltung der Schifffahrtsstraße als auch aus ökologischer Sicht als kritisch zu bewerten ist. Wissenschaftler und Ingenieure haben sich in dem internationalen Verbundprojekt EDoM'18 daran gemacht, mit Hilfe eines groß angelegten Messprogramms einigen grundlegenden Fragen zu den Transport- und Strömungsprozessen auf den Grund zu gehen. Dieser Artikel gibt einen kurzen Überblick über das Untersuchungsgebiet, beschreibt die Motivation für das Projekt EDoM'18 und erwähnt erste, ausgewählte Ergebnisse.

Ems | EDoM'18 | Masterplan Ems 2050 | Fluid Mud | Verschlickung  
Ems | EDoM'18 | Masterplan Ems 2050 | fluid mud | siltation

The Ems estuary between the North Sea and the tidal limit is a problem. Predominantly anthropogenic influences have led to increasing sediment input. The suspended sediment concentration in the water is now so high that the condition of the Ems is critical both from the point of view of the economic maintenance of the waterway and from an ecological point of view. In the international joint project EDoM'18, scientists and engineers have set out to get to the bottom of some fundamental questions about transport and hydrodynamic processes with the help of a large-scale measurement programme. This article gives a short overview of the research area, describes the motivation for the EDoM'18 project and mentions first, selected results.

## Autor

Dipl.-Ing. Christian Maushake arbeitet seit 1989 bei der Dienststelle Hamburg der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), wo er für das Aufgabengebiet »Naturmessungen« zuständig ist.

christian.maushake@baw.de

## Die Ems

Die Ems ist nach der Elbe und der Weser das dritte große Tideästuar im Gebiet der Deutschen Bucht. Von der Tidegrenze am Wehr Herbrum erstreckt es sich über 45 km als relativ schmaler Tidefluss bis zum Sturmflutsperrwerk in Gandersum, um sich dann einige Kilometer flussabwärts trichterförmig bis zur Nordsee aufzuweiten. In diesem Bereich schließt sich südlich der Dollart an, eine ca. 90 km<sup>2</sup> große Tidebucht, die – ebenso wie der Mündungstrichter – zum Teil auf niederländischem Staatsgebiet liegt (Abb. 1). Mit einem Tidenhub von ca. 2,5 m bei Emden und 3,5 m am Wehr Herbrum zählt die Ems zu den mesotidalen Ästuaren. Der Oberwasserabfluss variiert zwischen 16 und 360 m<sup>3</sup>/s; das langjährige Mittel ist mit ca. 80 m<sup>3</sup>/s relativ gering im Vergleich zu anderen Ästuaren.

In den Blickpunkt einer breiteren Öffentlichkeit gerät die Ems immer dann, wenn teilweise spektakuläre Überführungen von Kreuzfahrtschiffen der Meyer Werft aus dem ca. 50 km stromaufwärts liegenden Papenburg in die Nordsee stattfinden. Aber auch darüber hinaus ist die Ems eine wichtige Bundeswasserstraße, die die Häfen an der Unterems versorgt, wie z. B. Emden (unter anderem Autos) oder Leer (unter anderem Baustoffe und Agrar). Ab Papenburg geht die Ems dann in den Dortmund-Ems-Kanal über und stellt so die

Verbindung in das Netz der deutschen Binnenwasserstraßen her.

## Tidedynamik und das »Schlickproblem«

Anthropogene Einflüsse, wie z. B. Vertiefungen und Anpassungen der Fahrrinne oder der Deichbau, haben in den vergangenen Jahrzehnten dazu geführt, dass sich die Tidedynamik des Emsästuars nachhal-

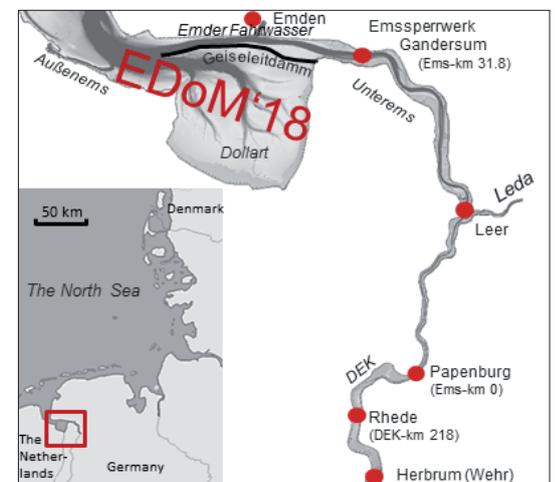


Abb. 1: Die Ems von der Nordsee (Außenems) und dem Dollart über das Emden Fahrwasser bis in die Unterems und den Dortmund-Ems-Kanal (DEK) mit dem Schwerpunktgebiet von EDoM'18

tig verändert hat. So hat sich das Tideniedrigwasser seit Beginn der 1980er Jahre im Emdrer Fahrwasser um ca. 0,5 m abgesenkt. Die Tidekurve selbst hat sich stark deformiert, man spricht von Tideasymmetrie. Aufgrund abnehmender Reibungseinflüsse spielt der Effekt der Reflexion der einlaufenden Tidewelle am Wehr Herbrum (Abb. 1) eine zunehmende Rolle und führt zu einer deutlichen Verkürzung der Flutstromdauer, wobei die Wasserstände in der Flut rapide ansteigen. Dieser Effekt verstärkt sich von der Mündung stromaufwärts. Abb. 2 zeigt, wie stark sich die Tidekurve und die Strömungsganglinie vom Emssperwerk bei Gandersum nach Rhede verändert. Für die dargestellte Tide am 28.06.2015 (Messungen der BAW) beträgt die Flutdauer bei Rhede nur noch ca. drei Stunden, während die Ebbe ca. neun Stunden dauert. Die damit einhergehenden hohen Flutstromgeschwindigkeiten – und insbesondere die Geschwindigkeitsgradienten – sorgen für einen starken stromaufwärts gerichteten Transport von Sedimenten. Während des Tidehochwassers bleibt das Wasser über längere Zeit unbewegt und die Schwebstoffe können sich ablagern. Der einsetzende schwächere Ebbstrom ist dann nicht in der Lage, das sedimentierte Material zu remobilisieren und wieder seewärts zu transportieren. Dieser Prozess des sogenannten »Tidal Pumping« hat zusammen mit dem Einfluss des Oberwassers sowie horizontalen und vertikalen Zirkulations- und Dichteeffekten zu einer zunehmenden Verschlickung der Unterems geführt.

Dadurch kommt es zu extrem hohen Konzentrationen von Schwebstoffen in der Wassersäule. Es können Werte von bis zu 300 g/l auftreten. Das liegt zwei bis drei Größenordnungen (!) über vergleichbaren Werten aus den anderen Ästuaren (Elbe, Weser) und fünf bis sechs Größenordnungen über Werten aus der offenen Nordsee, beispielsweise rund um Helgoland. In weiten Teilen der Unterems – vorwiegend im Sommer und bei niedrigen Oberwasserverhältnissen – bilden sich mächtige Flüssigschlick-Schichten von bis zu mehreren Metern Mächtigkeit aus, sogenannter »Fluid Mud«. Die Ems wird damit als »hyperturbid« klassifiziert. So werden Flusssysteme bezeichnet, die (zumeist infolge von anthropogenen Maßnahmen) durch extrem hohe Schwebstoffkonzentrationen und die Ausbildung ausgeprägter Flüssigschlick-Schichten (Fluid Mud) gekennzeichnet sind. Andere Beispiele für hyperturbide Ästuare in Europa sind die Loire sowie die Gironde (in Frankreich) und die Themse (in Großbritannien).

Insgesamt hat die Ems heute einen Zustand erreicht, der hohe finanzielle Belastungen erzeugt und aus ökologischer Sicht als kritisch einzustufen ist. Zum einen muss das überwiegend feine Material durch aufwendige und kostenintensive Ausbaggerungen durch die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) beseitigt werden, um die Schifffahrt der Seeschiffahrtsstraße sicherzu-

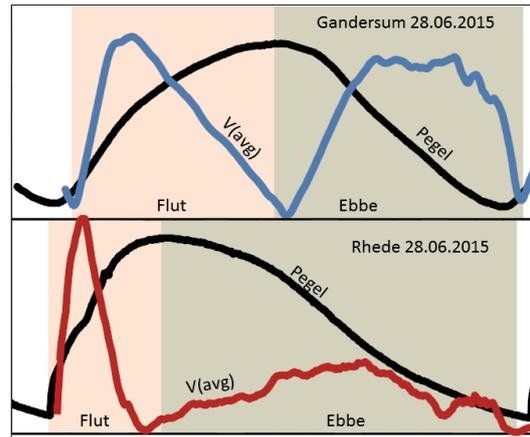


Abb. 2: Tideasymmetrie am Beispiel Gandersum (oben) und Rhede (unten). Dargestellt ist der Wasserstand (schwarz) und die Strömungsgeschwindigkeit (blau bzw. rot)

stellen. So fielen in den Jahren 2015 und 2016 jeweils 8 bis 9 Mio. Tonnen Baggermaterial mit einem Kostenvolumen von 30 bis 40 Mio. Euro an (aus Drucksache 18/12887 des Deutschen Bundestages). Zum anderen führt die Verschlickung der Ems auch zu erheblichen ökologischen Problemen, wie z. B. hohen Sauerstoffdefiziten im Wasser. Dies war die Veranlassung für die EU-Kommission, die Einhaltung der einschlägigen Vorschriften und Richtlinien (Natura-2000, Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie, Wasserrahmenrichtlinie etc.) und die Einleitung konkreter Maßnahmen einzufordern.

Die Verbesserung des ökologischen Zustandes ist somit eines der Hauptziele in der Region und seit 2015 im sogenannten »Masterplan Ems 2050« (www.masterplan-ems.info) festgeschrieben. Der Bund, das Land Niedersachsen, Landkreise, Unternehmen und Umweltverbände haben sich in diesem Vertrag darauf verständigt, bis 2050 Maßnahmen für einen »schiffbaren und lebendigen Fluss« umzusetzen. Da Teile des Dollart und der sich weiter anschließenden Außenems teilweise auf niederländischem Staatsgebiet liegen, besteht auch von dieser Seite ein großes Interesse an der Lösung der Probleme in der Ems. Auch in den Niederlanden ist eine dem »Masterplan Ems 2050« vergleichbare Initiative aufgelegt worden (<https://eemsdollard2050.nl>).

### Motivation für EDoM'18

Aus wissenschaftlicher Sicht ist jedoch zu sagen, dass die Mechanismen und Prozesse, die zu den hohen Sedimentablagerungen und der Verschlickung der Unterems führen, noch nicht genau verstanden sind und durch theoretische Betrachtungen und Berechnungen in Simulationsmodellen derzeit nicht vollständig erklärt werden können. Eine zentrale Rolle wird hierbei dem Bereich des Emdrer Fahrwassers zugeschrieben, welches die Verbindung zwischen Unter- und Außenems darstellt. So ist beispielsweise nicht geklärt, warum dieser Stromabschnitt, in dem sehr hohe Strömungsgeschwindigkeiten auftreten, auch ein (zumindest

zeitweiliger) Baggerschwerpunkt ist, aus dem große Mengen feinen Bodenmaterials entnommen werden müssen. Auch die Wechselwirkung des Emders Fahrwassers mit dem Dollart ist noch nicht ausreichend erforscht. Der Dollart ist durch den Geiseleitdamm vom Emders Fahrwasser getrennt und nur über den Hochwasserscheitel überströmt.

Diese Fragen des generellen Systemverständnisses waren die Motivation, unter dem Titel EDoM'18 (Ems-Dollart-Measurements 2018) ein niederländisch-deutsches Forschungsprojekt aufzulegen, um so z. B. die genannten Maßnahmenpläne gezielter unterstützen zu können. Unter Federführung einer Planungsgruppe, bestehend aus Rijkswaterstaat, Deltares, dem Projektmanagement-Dienstleister Royal HaskoningDHV (alle Niederlande) und der BAW (Bundesanstalt für Wasserbau, im Auftrag des WSA Emden), haben sich insgesamt 16 Behörden, Institutionen und Universitäten in einem Partnerschaftsabkommen bereit erklärt, Beiträge zu diesem Untersuchungsprogramm zu liefern. Die weiteren Projektpartner sind: der niedersächsische Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), das Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW), das Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee (NIOZ) sowie die Universitäten von Oldenburg und Kiel (Deutschland), von Twente, Wageningen und Delft (Niederlande), von Plymouth (Großbritannien) und von Maine (Vereinigte Staaten). Insgesamt sind über 20 Wissenschaftler und Ingenieure in die Durchführung der Messungen, die Datenanalyse und die Publikation der Ergebnisse eingebunden.

### Messkampagne von EDoM'18

Kernstück von EDoM'18 war die Durchführung zweier Messkampagnen unter unterschiedlichen

hydrologischen Randbedingungen im August 2018 bei niedrigem Oberwasser und im Januar 2019 bei hohem Oberwasser. In einem eigens für das Messprogramm entworfenen Netz aus insgesamt zehn Unterwasser-Beobachtungsstationen wurden mit hoher zeitlicher Auflösung physikalische Zustandsgrößen aufgezeichnet. So wurden über einen Zeitraum von ca. einem Monat unter anderem Informationen über die Verteilung des Salzgehaltes und der Schwebstoffkonzentration sowie über die Strömungsverhältnisse und die einlaufende Tidewelle gesammelt. Innerhalb dieses Zeitraumes wurde eine weitere Messkampagne über den Zeitraum einer Tide (ca. 13 Stunden) eingebettet, bei der insgesamt acht Messschiffe noch einmal verdichtete Daten erhoben haben. Wichtige Grundlagendaten liefert das dauerhafte gewässerkundliche Messnetz, welches von der WSV und dem NLWKN betrieben wird. Das für EDoM'18 verwendete Messnetz zeigt Abb. 3, eine Übersicht über die erhobenen Daten gibt Tabelle 1.

Die erhobenen Messdaten werden derzeit von den Projektpartnern analysiert, dokumentiert und auf einem zentralen Projekt-Datenserver bereitgestellt. Es ist zu erwarten, dass die Fülle und die Komplexität des Datenmaterials die beteiligten Institutionen noch eine Weile beschäftigen wird. Erste interessante Ergebnisse sind aber bereits erarbeitet worden.

### Überströmung des Geiseleitdamms

Durch Strömungsmessungen auf dem Geiseleitdamm (Abb. 1) konnte eine Zirkulationsströmung zwischen Dollart und Emders Fahrwasser erfasst werden. Damit wurden Ergebnisse aus numerischen Simulationsrechnungen bei der BAW bestätigt. Derartige voneinander unabhängige Analysen sind z. B. für die Validierung der Prognose von

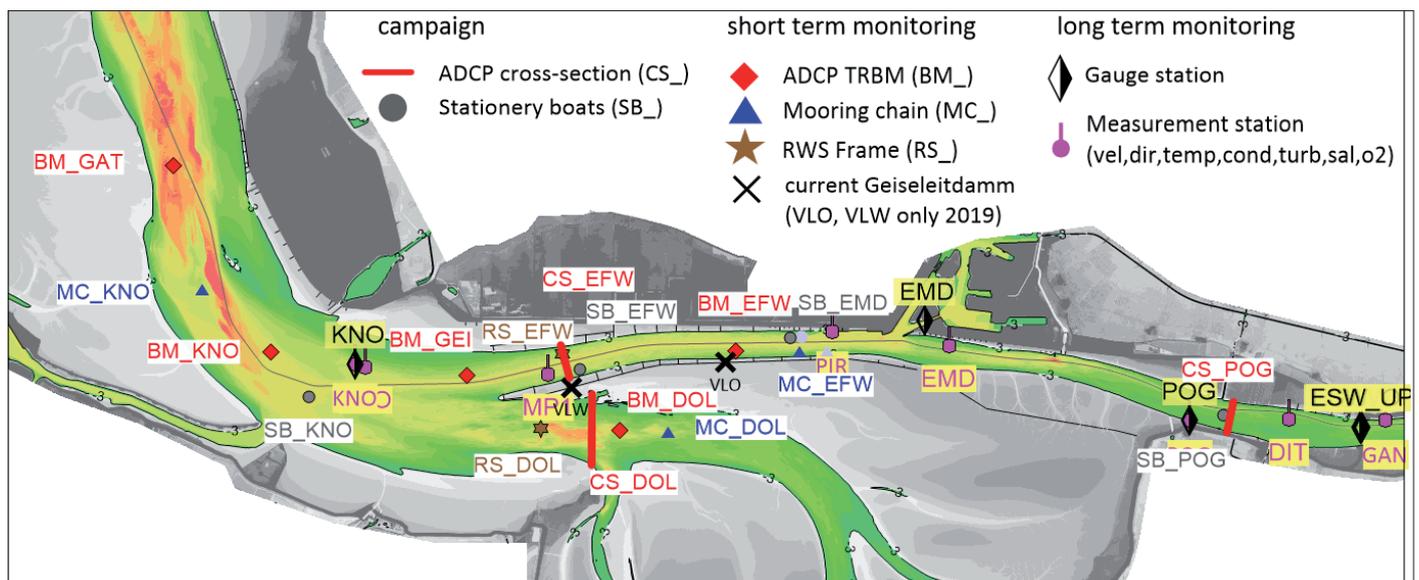


Abb. 3: Alle Messpositionen im Untersuchungsgebiet von EDoM'18: die Langzeit-Stationen des NLWKN und der WSV (long term monitoring), die speziell eingerichteten Stationen (short term monitoring) sowie die Kampagnenmessung (campaign)

Art der Messung	Messpositionen	Dauer	Messgeräte	Parameter
Schiffsgestützte ADCP-Querschnittsmessungen	CS_DOL, CS_EFW, CS_POG	Eine Tide (campaign)	ADCP, SMU, GNSS, (Sediment-)SBES	Geschlossene Querprofile für Strömung und akustischer Backscatter, Ableitung von Tidebilanzen (Volumen, Masse), (Sediment-)Echolotung
Schiffsgestützte stationäre Messungen	SB_KNO, SB_EFW, SB_EMD, SB_POG	Eine Tide (campaign)	ADCP, Multiparameter-Messrahmen, Probennehmer, SMU, GNSS	Salinität, Temperatur, Schwebstoffkonzentration, Turbulenz, Korngrößenverteilung, Dichteschichtung, Strömung und akustischer Backscatter, Wasser- und Bodenproben
Bodenanker	BM_GAT, BM_KNO, BM_GEI, BM_DOL, BM_EFW	4 Wochen (short term monitoring)	ADCP, CTD-Sonde, Trübungssensor	Vertikale ADCP-Geschwindigkeits- und Backscatterprofile, bodennahe CTD- und Trübungsmessungen
Verankerte Messketten	MC_KNO, MC_DOL, MC_EFW	4 Wochen (short term monitoring)	Strömung (1-Punkt), CTD-Sonde, Trübungssensor	Strömung, CTD- und Trübungsmessungen an drei Messpunkten in der Wassersäule
Multiparameter-Bodenanker	RS_DOL, RS_EFW	2 Wochen (short term monitoring)	ADCP, ADV, CTD-Sonde, Trübungssensor, Sonar	Vertikale ADCP-Geschwindigkeits- und Backscatterprofile, CTD- und Trübungsmessungen, ADV-Turbulenzmessungen, Scanning Sonar
Strömung GLD	GLD_o, GLD_w	3 Wochen (nur 2019)	Strömung (1-Punkt)	Überströmung des Geiseleitdamms
Gewässermonitoring NLWKN/WSA	Knock, Emden, Pogum und weitere	permanent (long term monitoring)	Pegel, Strömung (1-Punkt), CTD-Sonde, Trübung, O <sub>2</sub>	Wasserstand, Strömung (1 Punkt), CTD, Trübung, O <sub>2</sub> , Oberwasserzufluss

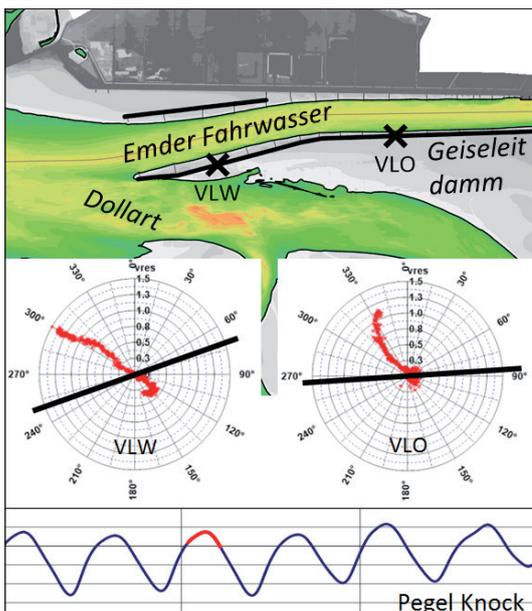
**Tabelle 1:** Messpositionen (aus Abb. 3) und Parameter im Rahmen von EDoM'18

residuellen Transportprozessen in numerischen Simulationsmodellen von großer Bedeutung (residueller Transport: seewärts- oder landwärts gerichteter Transport über einen bestimmten Zeitraum, z. B. einen Nipp-Spring-Zyklus oder eine Tide). Die Messungen auf dem Geiseleitdamm wurden mit Strömungssonden vom Typ Nortek Vektor durchgeführt. Diese wurden direkt auf dem Bauwerk eingebaut und liefern Strömungsgeschwindigkeit und -richtung, wobei der Damm zeitweilig trockenfällt und nicht überströmt wird. Abb. 4 zeigt die Geschwindigkeitsvektoren in Betrag und Richtung über eine von insgesamt 41 Messtiden an den beiden Messpositionen VLO und VLW (jeder Punkt ist eine Messung). Es gibt ein klares Strömungssignal vom Dollart in das Emdener

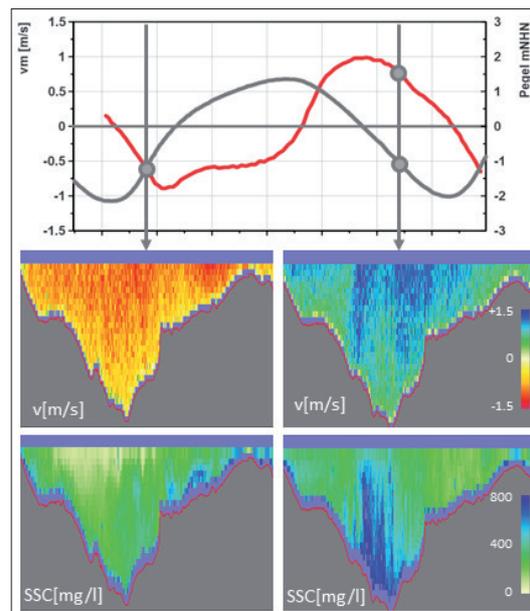
Fahrwasser. Inwieweit hiermit auch der Transport von Sedimenten verbunden ist, muss die weitere Auswertung klären.

### ADCP-Querschnittsmessungen

Schiffsgestützte ADCP-Querschnittsmessungen haben sich schon seit Langem als leistungsfähige und aussagekräftige gewässerkundliche Messmethode etabliert. Im Rahmen von EDoM'18 wurden sie auf drei Querschnitten parallel über eine Tide durchgeführt (CS\_DOL, CS\_EFW und CS\_POG in Abb. 3). Die Daten wurden mit ADCPs verschiedener Frequenzen (600/1200 kHz) von Teledyne RDI sowie zusätzlicher Sensorik (GNSS, teilweise Motionunits, Echosounder und CTD) aufgenommen. Die Ergebnisse erlauben eine Analyse der



**Abb. 4:** Überströmung des Geiseleitdamms während einer Messtide (rot auf der Pegelkurve) an den Positionen VLW und VLO

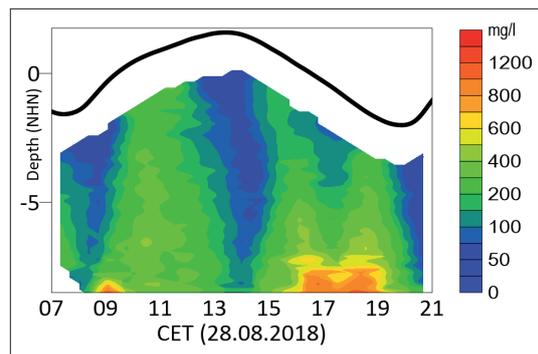


**Abb. 5:** Unten: Strömungsverteilung ( $v$ ) und Verteilung der Schwebstoffkonzentration (SSC) auf zwei Messquerschnitten im Dollart (CS\_DOL). Oben: Tideganglinie (Pegel) und querschnittsgemittelte Strömungsgeschwindigkeit, markiert sind die Zeitpunkte der Querschnittsmessungen

Strömungsverteilung und des Durchflusses im Querschnitt sowie die Erstellung von Transportbilanzen über einen Tidezyklus. Je nach Profillänge werden dabei typischerweise zwischen 50 und 200 Querprofile aufgezeichnet. Abb. 5 zeigt das Beispiel von zwei ADCP-Profilen aus dem Dollart, aufgenommen am 24. Januar 2019 durch den niederländischen Rijkswaterstaat. Zu sehen sind zum einen zwei Strömungsquerprofile zu verschiedenen Tidephasen (quasi das »ADCP-Standardprodukt«), zum anderen sind die entsprechenden Plots als Querschnittsverteilung der Schwebstoffkonzentration (SSC) gezeigt. Diese Daten entstehen durch die Normierung des akustischen Backscatters sowie dessen weitere Kalibrierung anhand von In-situ-Wasserproben.

### Stationäre Vertikalprofilmessungen

Ebenso sind hochauflösende stationäre Vertikalprofilmessungen von großer Bedeutung bei der Beurteilung von Prozessen des Transportes und der Dichteschichtung. Abb. 6 zeigt beispielhaft die Schwebstoffkonzentration in der Wassersäule,



**Abb. 6:** Vertikale Verteilung der Schwebstoffkonzentration (SSC) über einen Tidezyklus, abgeleitet aus kalibrierten optischen Backscatter-Messungen (hier: Seapoint STM) an der Messposition SB\_EFW (Abb. 3)

abgeleitet aus 15- bis 30-minütlichen Messungen mit einem Multiparameter-Rahmen über die Dauer einer Tide (ca. 13,5 Stunden). Von besonderem Interesse ist hier neben der Variabilität über den Tidezyklus die Herausbildung von besonderen Verteilungsmustern wie in dem gezeigten Beispiel das bodennahe Konzentrationsmaximum, welches sich kurz vor Tideniedrigwasser einstellt.

Die Daten sind mit mehreren optischen Backscattersensoren aufgenommen worden, deren Rohdaten durch eine Kalibrierung anhand von In-situ-Wasserproben in Schwebstoffkonzentrationen umgerechnet wurden.

### Sinkgeschwindigkeiten

Ein weiteres interessantes Ergebnis ist die Analyse der Sinkgeschwindigkeiten im Emdener Fahrwasser. Die Ergebnisse an der Messposition SB\_EMD (Abb. 3) weisen darauf hin, dass die Sinkgeschwindigkeit der Schwebstoffe in der Wassersäule höher ist, als es die einschlägigen Theorien beschreiben. Dies sind wichtige Hinweise im Hinblick auf das Sedimentationsverhalten in diesem Gebiet. Die Messungen wurden von der Universität Plymouth mit einer dort entwickelten optischen »Sedimentkamera« in einem eigens eingerichteten Labor auf einem der beteiligten Messschiffe durchgeführt.

### Ausblick

Erste wissenschaftliche Veröffentlichungen sind in Vorbereitung und im Laufe des Jahres soll noch eine Abschlusskonferenz mit allen beteiligten Projektpartnern und weiteren Interessierten stattfinden. Mit EDoM'18 ist es gelungen, behördlich-administrative Aufgaben (unter anderem den Masterplan Ems 2050) mit wissenschaftlich anspruchsvollen Fragestellungen zu verknüpfen und in einem internationalen Kooperationsprojekt zu bündeln. //

#### Literatur

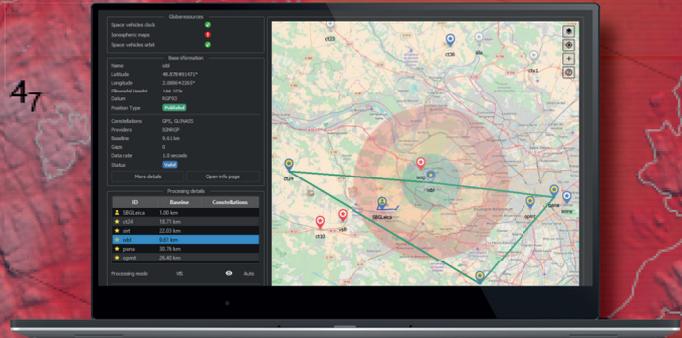
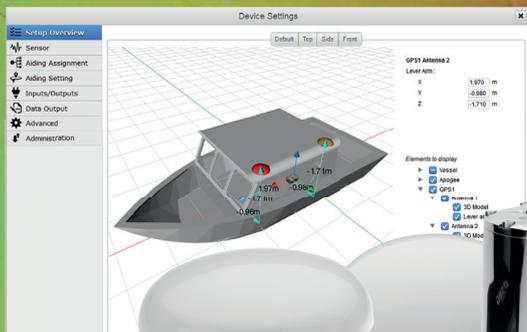
- Chernetsky, Alexander S.; Henk M. Schuttelaars; Stefan A. Talke (2010): The Effect of Tidal Asymmetry and Temporal Settling Lag on Sediment Trapping in Tidal Estuaries. Ocean Dynamics, DOI: 10.1007/s10236-010-0329-8
- Krebs, Martin; Holger Weilbeer (2008): Ems-Dollart Estuary. Die Küste 74, S. 252–262
- Van Maren, Bas; Thijs van Kessel; Katherine Cronin; Luca Sittoni (2015): The impact of channel deepening and dredging on estuarine sediment concentration. CONT SHELF RES, DOI: 10.1016/j.csr.2014.12.010
- Winterwerp, Johan C.; Julia Vroom et al (2017): SPM response to tide and river flow in the hyper-turbid Ems River. Ocean Dynamics, DOI: 10.1007/s10236-017-1043-6

#### Weitere Informationen

- Website zur Initiative »Ems Dollard 2050« (niederländisch, teilweise deutsch): <https://eemsdollard2050.nl>
- Website zum Masterplan Ems 2050 (deutschsprachig): [www.masterplan-ems.info](http://www.masterplan-ems.info)

# Making Hydrographers' Tasks Easier

Courtesy of CADDEN



## Navsight Marine Solution

State-of-the-art Motion  
& Navigation Solution

## Qinertia

The Next Generation INS/GNSS  
Post-processing Software

OFFICIAL DISTRIBUTOR

**MacArtney**  
UNDERWATER TECHNOLOGY

**MacArtney Germany GmbH**

Wischhofstrasse 1-3  
Geb. 11  
D-24148 Kiel  
Germany

Phone: +49 431 535500 70  
Email: [hydro@macartney.com](mailto:hydro@macartney.com)  
Web: [www.macartney.de](http://www.macartney.de)



# Beiträge der S-100-Welt für Schifffahrtszeichen und Schiffsverkehrsmanagement

## Sachstandsbericht und Einschätzung

Ein Beitrag von JAN-HENDRIK OLTSMANN

Das Universelle Hydrographische Datenmodell der IHO (UHDM) soll das grundlegende Rahmenwerk für die gesamte Welt der maritimen Daten werden. Jüngst sind erste S-100-konforme Modellierungen von Datenprodukt-Spezifikationen fertiggestellt worden, die auch das Verkehrsmanagement in der Schifffahrt und die Unterstützung des Schiffsverkehrs durch landgestützte Navigationshilfen in den Blick nehmen. Die S-100-Welt soll dereinst die »digitale Schiffbarkeit« ermöglichen, das setzt freilich »digitale Zwillinge« von Schiff und Umwelt voraus. Der Beitrag informiert über den Stand der Entwicklungen und wagt einen Ausblick, wie der S-100-Standard dereinst wirksam wird.

UHDM | S-100 | Datenprodukt-Spezifikation | digitale Schiffbarkeit | digitaler Zwilling | E-Navigation | Schifffahrtszeichen | Schiffsverkehrsmanagement | Schiffsverkehrsdienste  
UHDM | S-100 | data product specification | digital navigability | digital twin | e-navigation | aids to navigation | vessel traffic management | vessel traffic services

The Universal Hydrographic Data Model of the IHO (UHDM) is to become the basic framework for the entire world of maritime data. Recently, the first S-100 compliant modelling of data product specifications have been completed, that focus on traffic management in shipping and the support of maritime navigation by land-based aids to navigation. The S-100 World will one day make »digital navigability« possible, but this requires »digital twins« of ship and environment. The article provides information on the status of developments and ventures a look at how the S-100 standard will one day become effective.

### Autor

Dipl.-Ing. Jan-Hendrik Oltsmann  
ist Dezernent bei der General-  
direktion Wasserstraßen und  
Schifffahrt (GDWS) der Wasser-  
straßen- und Schifffahrtsverwal-  
tung des Bundes (WSV) in Kiel.

jan-hendrik.oltsmann  
@wsv.bund.de

### Die Struktur der S-100-Welt und ihre internationale Harmonisierung

Das von der International Hydrographic Organization (IHO) geschaffene Universelle Hydrographische Datenmodell (Universal Hydrographic Data Model, UHDM) – besser bekannt unter seiner Veröffentlichungsnummer als Special Publication S-100 – soll das grundlegende Rahmenwerk für die gesamte Welt der maritimen Daten werden. Dies hatte die Internationale Schifffahrtsorganisation (International Maritime Organization, IMO) zwar schon seit geraumer Zeit als Teil ihrer E-Navigation-Strategie beschlossen. Aber erst in jüngerer Zeit sind erste S-100-konforme Modellierungen von solchen Datenprodukt-Spezifikationen mindestens zu Testzwecken fertiggestellt worden, die nicht dem eigentlichen hydrographischen Kern des UHDM zuzuordnen sind, sondern vielmehr auch das Verkehrsmanagement in der Schifffahrt und die Unterstützung des Schiffsverkehrs durch landgestützte Navigationshilfen (Aids to Navigation, AtoN; Schifffahrtszeichen oder Seezeichen) in den Blick nehmen. Über diese Entwicklungen

möchte dieser Aufsatz überblicksartig informieren.

In dem gemeinsamen Rahmen von S-100 soll die gleichzeitige Datenmodellierung und Datenprodukt-Spezifikation verschiedenster Fachgebiete, die auf der Weltbühne jeweils von dort relevanten internationalen Organisationen vertreten werden, möglich sein. Dazu wurde bereits vor einiger Zeit zwischen der IHO und diesen internationalen Organisationen abgestimmt, welche Datenprodukt-Spezifikation von wem zu erstellen sei. Zwar gibt jede der beteiligten internationalen Organisationen jeweils ihre Datenprodukt-Spezifikationen in eigener Zuständigkeit heraus. Aber um kenntlich zu machen, dass sie alle zu der einen S-100-Welt gehören, sich also an die insbesondere in S-100 verankerten gemeinsamen Regeln halten und also miteinander im S-100-Rahmenwerk international harmonisiert sind, haben diese Dokumente ebenfalls eine S-Nummer erhalten, als alleinige Bezeichnung oder als Bezeichnung parallel zur jeweils hausinternen Ordnungsnummer.

Für die verschiedensten internationalen Organisationen wurde dergestalt jeweils ein S-Nummernbereich reserviert. Diesen kann und soll jede der beteiligten internationalen Organisationen nunmehr sukzessive mit Datenprodukt-Spezifikationen besiedeln:

- Den Nummernbereich S-100 ff hat die IHO sich dabei selbst vorbehalten.
- Für das Schifffahrtszeichenwesen und für die Schiffsverkehrsdienste (Vessel Traffic Services, VTS) – einem wesentlichen Teil des Schiffsverkehrsmanagements – wurde dem international als dort zuständig anerkannten Weltverband der Schifffahrtszeichenverwaltungen (International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities, IALA) der Nummernbereich 200 ff zugeteilt.
- Im S-Nummernbereich 400 ff sind verschiedenste weitere internationale Organisationen mit ihren jeweiligen Fachgebieten tätig.

Eine vollständige und jeweils aktuelle Liste dieser Allokationen kann bei der IHO bzw. bei den beteiligten anderen internationalen Organisationen abgerufen werden (siehe Links am Ende).

Inhaltliche Überlappungen, die durch die gleichzeitige Arbeit unweigerlich entstehen, werden auf dieser Ebene dadurch bereinigt, dass vorgemerkte Allokationen von Datenprodukt-Spezifikationen zwischen den Nummernbereichen verschoben

werden können, je nachdem, welche der beteiligten internationalen Organisationen die Arbeit an einer Datenprodukt-Spezifikation mit dem entsprechenden Nachdruck aufnimmt.

Um die inzwischen recht umfangreiche Zahl an Allokationen anschaulich zu machen, ist eine Auswahl der zum Erstellungszeitpunkt vorliegenden oder avisierten Datenprodukt-Spezifikationen in eine schematische Darstellung der maritimen Welt eingetragen worden (Abb. 1). Diese Darstellung ist unter der Bezeichnung »S-100-Welt« bekannt geworden. Die wichtigsten Datenprodukt-Spezifikationen in dieser Darstellung sind natürlich die für die Elektronische Seekarte (Electronic Navigational Chart, ENC) selbst (S-101) und die für die bathymetrische Oberfläche (Bathymetric Surface) (S-102). Aber auch eine Reihe anderer wichtiger Aspekte einer Wasserstraße an sich hat die IHO bereits durch entsprechende Allokationen von Datenprodukt-Spezifikationen adressiert, nämlich insbesondere die Wasserstandsinformationen für die Oberflächennavigation (Water Level Information for Surface Navigation) (S-104), die Oberflächen-Strömungsverhältnisse (Surface Currents) (S-111) sowie die dynamische Wasserstandsdatenübertragung (Dynamic Water Level Data Transfer) (S-112).

Des Weiteren wurden die Bereiche der Navigation und des Schiffsverkehrs berücksichtigt:

- Die Datenprodukt-Spezifikation S-122 soll Meeresschutzgebiete (Marine Protected Areas) und

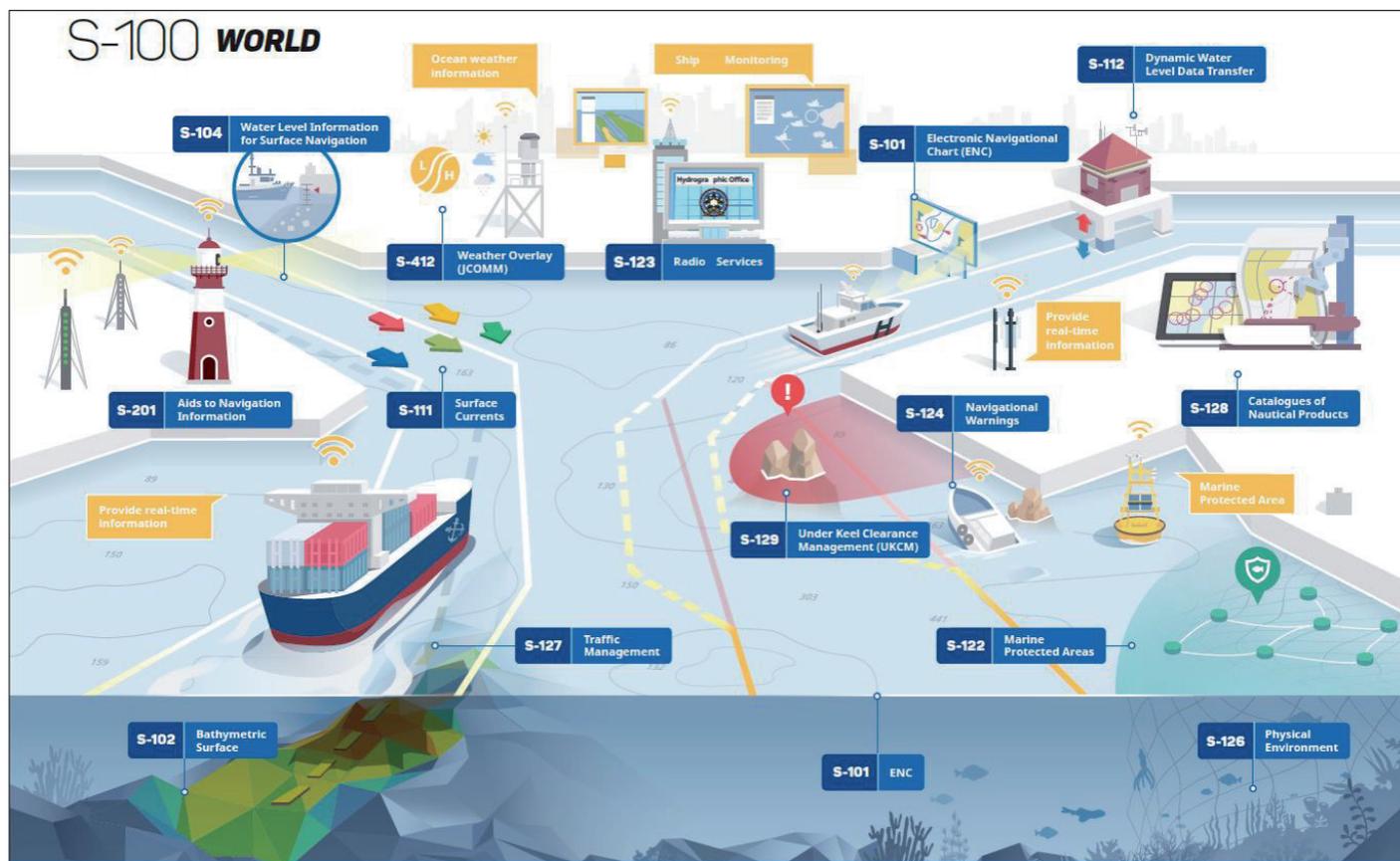


Abb. 1: Die S-100-Welt (IHO 2020)

- mithin von der Schifffahrt zu meidende Gebiete abbilden,
- S-124 soll nautische Warnnachrichten (Navigational Warnings) adressieren,
  - S-123 die für die Seeschifffahrt landseitig bereitgestellten Funkdienste (Marine Radio Services),
  - S-127 das Schiffsverkehrsmanagement für die Seeschifffahrt (Marine Traffic Management),
  - S-129 das Verhältnis von Schiff zur Wasserstraße, insbesondere die Aussagen zur örtlich jeweils verfügbaren Wassertiefe unter dem Schiffsrumpf (Under Keel Clearance Management),
  - S-201 die von bzw. über Schifffahrtszeichen bereitgestellten Informationen (Aids to Navigation Information) und
  - S-412 die nautisch relevante Seewetterlage (Weather Overlay).

Die Datenprodukt-Spezifikationen S-201 und S-412 sind konkrete Beispiele dafür, wie in der einen S-100-Welt auch die Fachbeiträge anderer internationaler Organisationen neben denen der IHO von Anbeginn bereits harmonisiert berücksichtigt worden sind, nämlich hier die der IALA (S-201) und die der meteorologischen Dienste (S-412).

### Der Beitrag der S-100-Welt zur »digitalen Schiffbarkeit«

Es ist wichtig, sich stets vor Augen zu führen, dass alle genannten Datenprodukt-Spezifikationen die Abbildungen von relevanten realen, oft physischen Sachverhalten oder Entitäten in den digitalen Raum aufnehmen. Dies hat das Ziel, betriebliche Abläufe – wie hier die Fahrt eines Schiffes – im digitalen Raum genauso – das heißt hinsichtlich der relevanten realen Eigenschaften wirklichkeitsgetreu – ablaufen lassen zu können wie in der realen Welt. Damit ein »digitaler Zwilling« eines Schiffes im digitalen Raum weitestgehend wirklichkeitsgetreu und insbesondere sicher navigieren kann, müssen auch alle anderen relevanten, realen Sachverhalte und Entitäten mittels ihrer entsprechenden »digitalen Zwillinge« in ihren relevanten Eigenschaften weitestgehend wirklichkeitsgetreu abgebildet werden. Letzteres will und kann die S-100-Welt grundsätzlich leisten. Dabei darf nicht vergessen werden, dass die Abbildung eines Sachverhaltes oder einer Entität im digitalen Raum selbstverständlich niemals völlig identisch ist mit dem realen, oft physischen Original.

Die Bedeutung der Datenprodukt-Spezifikationen der S-100-Welt liegt also nun darin, dass sie von Anbeginn bestmöglich international harmonisiert sind – wie es dem grundsätzlich globalen Wesen der Seeschifffahrt entspricht – und also eben nicht mehr die nachgelagerte Abstimmung verschiedenster historisch gewachsener Standards in verschiedenen Weltgegenden erfordern. Insofern leisten die Datenprodukt-Spezifikationen der S-100-Welt einen signifikanten, greifbaren und

praktischen Beitrag zur »Digitalisierung der maritimen Welt« auf globaler Ebene.

Dies gilt mindestens im Prinzip; ob es dann so kommt, wird die Technikgeschichte erweisen. Aber einmal angenommen, es seien alle avisierten Datenprodukt-Spezifikationen der S-100-Welt der-einst erstellt worden, dann sind sie aber dennoch »nur« eine Ermöglichung, keinesfalls aber eine für die realen Wasserstraßen entlang der Schifffahrtsrouten bereits vollzogene Umsetzung. Um »digitale Schiffbarkeit« entlang einer Schifffahrtsroute zu erreichen, müssen alle Wasserstraßen auf dieser Schifffahrtsroute – ob See- oder Binnenwasserstraßen – jeweils individuell und zugleich einheitlich umfassend in die digitale Welt abgebildet werden – mit der Verlässlichkeit und Verfügbarkeit wie sie jeweils für die Betriebszeiten dieser Schifffahrtsroute zu fordern sind: im Seebereich in der Regel also rund um die Uhr.

Diese Betrachtung verdeutlicht das Ausmaß des Projektes »Digitalisierung der maritimen Welt«, und sie ist ernüchternd. Das hat die IHO und andere internationale Organisationen allerdings nicht davon abgehalten, die Arbeit daran aufzunehmen. Wie viel Zeit verstreichen wird, bis die digitale Schiffbarkeit auf den wichtigsten Schifffahrtsrouten der Welt – also die betrieblich nutzbare Umsetzung der jeweils umfassenden digitalen Abbildungen der jeweils betroffenen realen Wasserstraßen nebst ihrer Entitäten und Randbedingungen – erreicht sein wird, ist gegenwärtig noch völlig unabsehbar.

Selbstverständlich können auch in den digitalen Raum bereits abgebildete Teilaspekte der realen Welt nützlich gemacht werden – aber eben »nur« als punktuell wirksames Werkzeug für die Navigation in der realen physischen Welt (ein Beispiel hierfür liefert seit Langem die Elektronische Seekarte, auch bereits in ihrer älteren Datenprodukt-Spezifikation S-57). Und wahrscheinlich ist die sukzessive Umsetzung von Teilaspekten der einzig praktisch überhaupt nur gangbare Weg zum Erreichen der skizzierten Vision. Die nun folgenden Sachstandsdarstellungen für die zwei Teilaspekte Schifffahrtszeichen und Schiffsverkehrsmanagement sind als solche Umsetzungen von Teilaspekten zu verstehen.

### Stand der Arbeit bei der IALA an der Datenprodukt-Spezifikation S-201 für Schifffahrtszeichen

Die IALA ist gegenwärtig eine nicht-regierungsamtliche internationale Organisation mit Sitz in Saint-Germain-en-Laye bei Paris. Sie ist weltweit anerkanntermaßen die zuständige internationale Organisation für Schifffahrtszeichen und für Schiffsverkehrsdienste. Zu den Schifffahrtszeichen zählen klassische visuelle Schifffahrtszeichen (Tonnen, feste Feuer usw.) und klassische Nebelschallanlagen ebenso wie funktechnische Systeme für die Navigation (z. B. terrestrische Funknavigations-Unterstüt-

zungs- bzw. -Ersatzdienste und Radarantwortbaken). Daneben hat die IALA seit den 1990er Jahren das Automatische Schiffsidentifizierungssystem (Automatic Identification System, AIS) maßgeblich vorangetrieben, namentlich durch substanzielle eigene Fachbeiträge und durch die Koordination der operationellen und technischen Entwicklungsarbeiten zwischen den beteiligten internationalen Organisationen (IMO, International Telecommunications Union – ITU, International Electrotechnical Commission – IEC). Die IALA nimmt anerkanntermaßen seitdem auch die Rolle einer internationalen Systembetreuung für das AIS ein. Schifffahrtszeichen, Schiffsverkehrsdienste und AIS sind jeweils durch entsprechende internationale Vereinbarungen bei der IMO völkerrechtlich verankert (z. B. in SOLAS). Gegenwärtig treibt die IALA die internationale Entwicklung eines leistungsfähigen Datenübertragungssystems im Seefunkband (156 bis 162 MHz) mit dem Namen VHF Data Exchange System (VDES) in gleicher Weise voran wie seinerzeit die Entwicklung des AIS. Die IALA war des Weiteren maßgeblich bei der Entwicklung der E-Navigation-Strategie der IMO beteiligt und hat hierbei intensiv mit der IHO zusammengearbeitet. Schließlich befindet sich die IALA gegenwärtig in einem Umwandlungsprozess von einer nicht-regierungsamtlichen internationalen Organisation in eine zwischenstaatliche internationale Organisation; die völkerrechtlichen Voraussetzungen dazu werden gegenwärtig geschaffen. Von dieser Umwandlung wird auf längere Sicht unter anderem erwartet, dass Zuständigkeiten für die landseitige Navigationsunterstützung und für die Schiffsverkehrsdienste von der IMO auf die IALA übertragen werden.

Nach circa acht Jahren Vorarbeit und in Abstimmung mit der IHO hat die IALA im Herbst 2019 nun die erste Ausgabe der S-100-konformen Datenprodukt-Spezifikation S-201 für Schifffahrtszeichen-Informationen fertiggestellt (IALA 2019). Diese Ausgabe ist eine für die Praxiserprobung vorgesehene Edition. Sie bezweckt, die bereits in dem älteren Datenprodukt-Standard S-57 enthaltenen Spezifikationen bezüglich Schifffahrtszeichen in die S-100-Konformität zu portieren, jüngere Arten von Schifffahrtszeichen wie synthetische und virtuelle AIS-Schifffahrtszeichen zu ergänzen und nicht zuletzt solche Merkmale von Schifffahrtszeichen aufzunehmen, die auch und gerade für Schifffahrtszeichenverwaltungen als deren Betreiberorganisationen von Belang sind.

Die Bedeutung von S-201 liegt nun erstens darin, dass sie den weltweit harmonisierten Datenaustausch von Schifffahrtzeichendaten zwischen Schifffahrtszeichenverwaltungen untereinander, zwischen Schifffahrtszeichenverwaltungen und Hydrographischen Diensten und zwischen Schifffahrtszeichenverwaltungen und anderen Beteiligten an der maritimen Verkehrssicherung bzw. dem Schiffsverkehrsmanagement ermöglicht.

Zweitens kann S-201 als das maßgebliche Datenmodell für die Schifffahrtszeichen-Datenbank(en) einer Schifffahrtszeichenverwaltung selbst genutzt werden und so Datenkonvertierungsschritte auf der Verarbeitungskette von der Datenerhebung über die Datenhaltungen bis hin zur Datenbereitstellung ersparen helfen. Die damit verbundene Straffung von Geschäftsprozessen kann neben der Datenintegrität auch eine Beschleunigung der Datenbereitstellung von Schifffahrtszeichendaten insbesondere beim Endnutzer auf der Bordseite bewirken, bis hin zur Quasi-Echtzeitlichkeit.

Schließlich besteht die Bedeutung von S-201 darin, dass alle relevanten Sachverhalte zu Schifffahrtszeichen in S-201 gebündelt sind und in einem gemeinsamen Datenmodell konsistent vorliegen. Damit ist es möglich, den Bereich der Schifffahrtszeichen-Datenobjekte von den anderen ENC-Datenobjekten in S-101 vollständig zu entflechten. Dies ermöglicht wiederum, die betriebliche Bereitstellung der Daten dieser verschiedenen Bereiche unter den beteiligten Organisationen – hier zwischen Hydrographischen Diensten und Schifffahrtszeichenverwaltungen – entsprechend der jeweiligen Zuständigkeiten und betrieblichen Verantwortungen zu entflechten. Dies ist sowohl international möglich – also zwischen IALA und IHO – als auch zwischen den einzelnen Küstenstaaten entlang der Schifffahrtsrouten, je nach örtlichen Zuständigkeiten. Die letztlich für den Endnutzer auf der Schiffsbrücke angezeigten Daten für ENC und Schifffahrtszeichen würden zwar wie bisher unverändert gemeinsam in einer Kartendarstellung erscheinen, jede der beiden Datenarten aber auf je gesonderten Darstellungsschichten. Die IALA hat jedenfalls in diesem Sinne die Aufnahme der Arbeit an der Datenprodukt-Spezifikation zu den Darstellmustern für Schifffahrtszeichen (Portrayal) in den Blick genommen, die gegenwärtig als S-125 im IHO-Bereich gelistet ist.

Es bleibt abzuwarten, ob die oben genannten Erwartungen im Laufe der Zeit betrieblich tatsächlich in nennenswertem Umfang weltweit erfüllt werden. Turnusmäßige Erneuerungen von Schifffahrtszeichen-Datenbanken bei den Küstenstaaten könnten z. B. zur Migration hin zu S-201 genutzt werden. Die IALA möchte die Datenprodukt-Spezifikation S-201 durch die nun anlaufenden Tests erproben und dann in einer neuen Version finalisieren. Eine Erprobung von S-201 wurde bei der IALA von einzelnen Mitgliedern angekündigt, wie z. B. von südkoreanischer Seite im Rahmen des dortigen SMART Navigation Project.

### S-100-basierte Beiträge zum Datenaustausch für das Schiffsverkehrsmanagement

Gegenüber den landseitig vorgehaltenen statisch wirksamen Schifffahrtszeichen ist Schiffsverkehrs-

management (Traffic Management) eine laufzeitlich veränderliche und der gegenwärtigen Verkehrssituation angepasste Einflussnahme einer Landstelle auf den Schiffsverkehr und schließt direkte Interaktionen Land-Schiff/Schiff-Land ein. Einen wesentlichen Teil des Schiffsverkehrsmanagements stellen die Schiffsverkehrsdienste dar. Letztere beschreibt eine IMO-Entschließung in relevanten Einzelheiten (IMO 1997). Diese IMO-Entschließung, die in SOLAS-Kapitel V verankert ist, wird nach über 20 Jahren seit ihrer Verabschiedung gegenwärtig der ersten Novellierung unterzogen (IMO 2020).

Auch in der ganzheitlichen Architektur für die E-Navigation-Strategie der IMO ist die Interaktion Land-Schiff/Schiff-Land zentral verankert, und zwar insbesondere in ihrer Kommunikationsbeziehung zu den Verkehrszentralen für Schiffsverkehrsdienste (VTS) (vgl. Abb. 2). Wie bereits dargestellt, ist die IALA für die weltweit harmonisierte Funktionalitätsbeschreibung der Schiffsverkehrsdienste federführend; die Hydrographischen Dienste der Küstenstaaten geben traditionell die »VTS-Guides« als »Nautische Publikationen« für jeweils konkrete Schiffsverkehrsdienste in ihren Seegebieten heraus. Bei den VTS-Guides handelt es sich um endnutzer-orientierte Darstellungen der statischen

Konfiguration der in den jeweiligen Schifffahrtsrouten angebotenen Schiffsverkehrsdienste (mit Angaben von Servicegebieten und den Kontaktaufnahmemöglichkeiten insbesondere mittels UKW-Seefunk).

Neben den Schiffsverkehrsdiensten, die regelmäßig auch einen hoheitlichen Anspruch des jeweiligen Küstenstaates repräsentieren, gibt es seit einiger Zeit auch Bestrebungen, Schiffsverkehrsmanagement durch andere landseitige Organisationen insbesondere in Bezug auf die logistisch und wirtschaftlich optimale Reiseplanung von Schiffen wahrzunehmen. Diese Bestrebungen werden von Schifffahrtsverwaltungen einzelner Küstenstaaten – in Nordeuropa insbesondere von der schwedischen Schifffahrtsverwaltung – sowie von Reedern, Häfen und F&E-Einrichtungen getragen, z. B. im Rahmen des 2019 zu Ende gegangenen Sea Traffic Management (STM) Validation Projects.

In der S-100-Welt sind gegenwärtig mindestens folgende Datenprodukt-Spezifikationen mit Bezug zum Schiffsverkehrsmanagement erstellt worden bzw. in Arbeit:

- S-127 »Marine Traffic Management« bildet die statischen oder quasistatischen Konfigurationen von Schiffsverkehrsdiensten, Lotsdiensten sowie Schiffsführungs- und Schiffsmeldesysteme

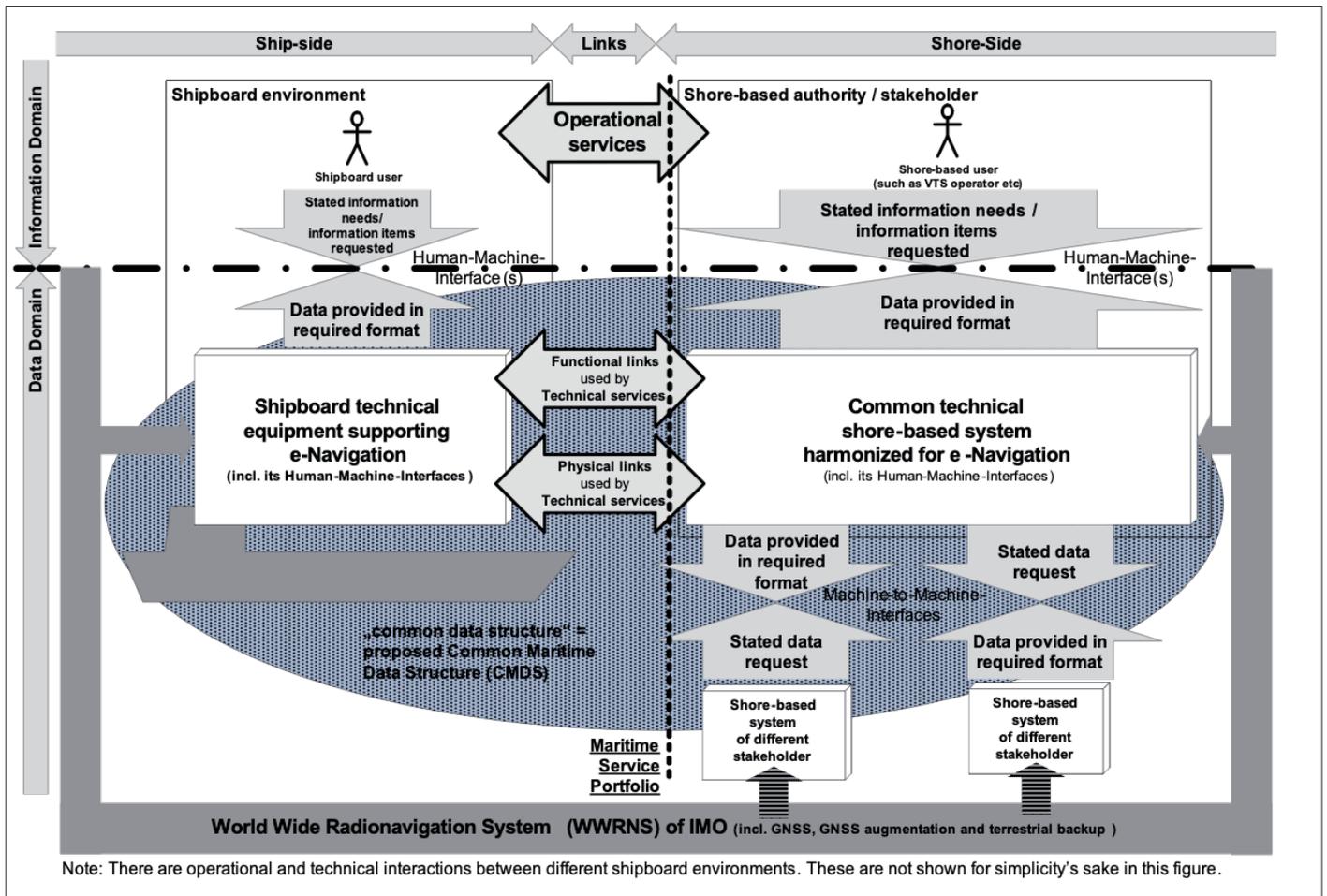


Abb. 2: Die umfassende generische Systemarchitektur für E-Navigation, wie sie von der IMO angenommen worden ist (IMO 2014)

men ab. S-127 ist seit 2019 ebenfalls als Testversion 1 bei der IHO abrufbar, von der sie auch erstellt wurde (IHO 2019).

- S-421 »Route Plan Based on S-100« befasst sich mit den verschiedensten laufzeitlichen Aspekten einer Schiffsreise und stellt hierzu Datenobjekt-Definitionen zum lauf- bzw. echtzeitlichen Datenaustausch bereit (IEC 2019). Als zukünftiger IEC-Standard 63173-1 ist S-421 unter die IEC-Normreihe zur Navigations- und Funkkommunikations-Geräteausrüstung von Seeschiffen eingeordnet und wird insofern zukünftig die international harmonisierte Entwicklung entsprechender Funktionalität von Schiffsausrüstungen ermöglichen – diese setzt natürlich eine komplementäre Funktionalität bei anderen Schiffen und auf der Landseite voraus. S-421 zielt also darauf ab, lauf- und/oder echtzeitlich kooperative Schiff-Land- bzw. Land-Schiff-Anwendungen zu ermöglichen.

Die Datenprodukt-Spezifikation S-421 deckt insbesondere folgende Anwendungsfelder ab:

- Lauf- und/oder echtzeitlicher Austausch, Vorschlag, Vereinbarung, Abgleich oder gar Optimierung Schiff-Schiff, Schiff-Land bzw. Land-Schiff von Plänen für Fahrtrouten (route plans, reference route, route optimisation), die ein individuelles Schiff einzuschlagen beabsichtigt oder als einzuschlagen vorgeschlagen oder gar vorgegeben bekommt. Innerhalb der Fahrtrouten kann es an bestimmten Wegepunkten (route action points) auch eine Vielzahl vordefinierter, bordseitig durchzuführender Aktionen geben, die exakt datenmodelliert sind.
- Verkehrsflussmanagement (flow management): hier kommt die Kenntnis der Fahrpläne aller teilnehmenden Schiffe durch eine Landstelle in den Blick und die Absicht, die Passagezeiten aller teilnehmenden Schiffe von Land aus zu optimieren.
- Verbessertes Monitoring (enhanced monitoring) auf der Grundlage von zuvor abgeglichenen bzw. vereinbarten Fahrtrouten.
- Fahrt in Eisgebieten (ice navigation), wobei ein Eisbrecher die sichere, das heißt eisfrei gemachte Fahrtroute vorgibt.
- Ermöglichung von sicherer Flachwassernavigation bei maximal möglichem Tiefgang (under keel clearance management).
- Optimierung der Fahrtrouten einer gesamten Schiffsflotte einer Reederei (fleet route planning).
- Ermöglichung von bloß ausschnittsweiser Bereitstellung von Seekarten gemäß der beabsichtigten Fahrtroute (chart management).
- Hafenanlauf-Synchronisierung (port call synchronisation) bezweckt die Abstimmung aller beim Hafenanlauf eines Schiffes Beteiligten durch einen virtuellen Hafenkoordinator (virtual actor called port coordinator).

- Vorgabe und Austausch von Suchmustern (search pattern) durch eine Seenotrettungsleitstelle (MRCC).

S-421 hat also einen inhaltlichen Erstreckungsrahmen, der den Bereich der Schiffsverkehrsdienste ebenso signifikant berührt und zugleich übersteigt wie den Bereich der von der IMO verlangten Reiseplanung von Schiffen insgesamt. Dabei behält S-421 die ganzheitliche Sicht von E-Navigation auf den Datenfluss von einer Datenquelle (z. B. an Land) zu einer Daten Senke (z. B. an Bord) durch alle erforderlichen technischen Instanzen konsequent im Blick (vgl. [Abb. 2](#)). S-421 wurde von der relativ jungen IEC-Arbeitsgruppe TC80/17 entwickelt, deren Aufgabe darin besteht, die »gemeinsame maritime Datenstruktur« (Common Maritime Data Structure) praktisch nutzbar zu machen (vgl. das Oval in [Abb. 2](#), das die gemeinsame und einheitliche Datendefinition für die Bord- und für die Landseite symbolisieren soll). Das wird bis hin zu veranschaulichenden und zugleich normativ gemeinten Anwendungsfall-, Sequenz- und Zustandsübergangs-Diagrammen für jedes beschriebene Anwendungsszenario durchgehalten.

Wegen dieser Herkunft bei der IEC ist S-421 vermittelt über die europäische Normungsorganisation CENELEC bereits auf dem Weg hin zu einer neuen DIN EN 63173-1 gleichen Namens; S-421 wird also – sobald demnächst fertiggestellt – den Rang einer im EU-Binnenmarkt harmonisierten Norm haben. Eine EN stellt neben ihrer Bedeutung als belastbare Referenz für die europäische Gesetzgebung und Regulierung sowie für die öffentliche Vergabe auch stets ein belastbares Abbild des »Standes der Technik« dar.

- Die IALA schließlich hat zwar bereits vor einiger Zeit mit S-210 einen Inter-VTS-Datenaustausch-Standard erstellt (IALA 2011), der es ermöglicht, Schiffs- und Schiffsverkehrsdaten zwischen Schiffsverkehrsdiensten z. B. verschiedener Küstenstaaten untereinander sowie mit anderen Bedarfsträgern in einem weltweit harmonisierten Format auszutauschen; außerdem hat die IALA mit S-211 eine Datenprodukt-Spezifikation für den bei einem Hafenanlauf erforderlichen Datenaustausch erstellt (IALA 2018). Was gegenwärtig aber noch aussteht, ist die volle Annahme der S-100-Welt und ihrer Datenprodukt-Spezifikationen für Schiffsverkehrsdienste durch die IALA als zuständiger internationaler Organisation und die daraus folgende konzeptionell vollumfängliche, zugleich überlappungsfreie und lückenschließende Erarbeitung von Datenprodukt-Spezifikationen in der S-100-Welt. Diese würde die mit oben vorgestellten Datenprodukt-Spezifikationen abgedeckten Sachverhalte einbetten, ge-

benenfalls fortschreiben und ergänzen – in Zusammenarbeit mit den jeweiligen Erstellerorganisationen und weiteren, im Schiffsverkehrsmanagement tätigen internationalen Organisationen. Allerdings muss hierzu wohl erst der Abschluss der gerade laufenden Novellierung der IMO-Entscheidung zu den Schiffsverkehrsdiensten sowie unter Umständen sogar auch der Abschluss der Überführung der IALA in eine zwischenstaatliche internationale Organisation abgewartet werden.

### Wirksamwerden von S-100-Standards: Randbedingungen und Ausblick

Datenmodellierungen und Datenprodukt-Spezifikationen sind eine Sache; die Verwendung von Datenprodukt-Spezifikationen der S-100-Welt für funktionsfähige, hochverfügbare, betrieblich auf dauerhafte Nutzung ausgelegte Anwendungen in den Bereichen von Schifffahrtszeichenwesen und Schiffsverkehrsmanagement sind eine völlig andere Sache. Hierzu ist die ganzheitliche Betrachtung des Daten- und Informationsflusses von den Datenquellen über geeignete (technische) Datenkommunikationsmittel Land-Schiff/Schiff-Land hin zu den Datensinken erforderlich – die ganzheitliche Sicht von E-Navigation eben. Für jedes Glied in der jeweiligen Übertragungskette sind Anforderungen, Aktivitäten und Verantwortlichkeiten zu bestimmen und abzustimmen – auch und gerade bei Implementierungen durch Küstenstaaten. Die in den Datenprodukt-Spezifikationen der S-100-Welt international harmonisierten Daten und Funktionalitäten sind »nur« Ermöglichungsbausteine; weitere Schritte zur Umsetzung müssen folgen.

Nachdem bis hierher der gegenwärtige Bestand an Datenprodukt-Spezifikationen in der S-100-Welt mit Bezug zum Schifffahrtszeichenwesen und zum Schiffsverkehrsmanagement dargestellt worden ist, soll abschließend der Frage nach dem Wirksamwerden von derartigen Datenprodukt-Spezifikationen der S-100-Welt und mithin der Frage nach ihrer zukünftigen Verbindlichkeit nachgegangen werden. Dazu werden nachfolgend Faktoren und Mechanismen aufgezeigt. Dies geschieht am Beispiel von S-421, aber die dabei herausgestellten Faktoren und Wirkmechanismen sind im Prinzip auch auf andere genannte Datenprodukt-Spezifikationen in der S-100-Welt übertragbar.

Des Weiteren ist erfahrungsgemäß eine Migration in den Binnenbereich nur eine Frage der Zeit, auch wenn die genannten Datenprodukt-Spezifikationen zum Teil zunächst ausdrücklich nur für den Seebereich geschaffen worden sind; insofern wird hinsichtlich Faktoren und Mechanismen des Wirksamwerdens auch der Binnenbereich in den Blick genommen.

In jedem Fall gilt: Die nachfolgende Darstellung ist rein analytisch-beschreibend gemeint, also aus-

drücklich nicht als Zusammenstellung von Forderungen zu verstehen.

Bei Durchsicht der Datenprodukt-Spezifikation S-421 ist erkennbar, dass ein dereinst fertiggestellter IEC-/EN-Standard große normative und faktische Wirksamkeit beim Datenaustausch Schiff/Schiff, Schiff/Land bzw. Land/Schiff entfalten kann. Diese zukünftige Bedeutung kann sich in mehreren Schritten entfalten.

**1. Schritt:** Die bloße Existenz des Standard-Entwurfs, aber erst recht die bloße Existenz eines dereinst fertig gestellten Standards schafft regelverändernde Fakten:

- Kaum jemand, der Anwendungen, Geschäftsprozesse oder technische Lösungen mit ähnlicher Funktionalität plant, entwickelt und in Betrieb nimmt, wird sich dann dem Vorwurf der Schaffung proprietärer Lösungen und/oder von Doppelarbeit aussetzen wollen.
- Aufmerksamkeit für die im Standard(-Entwurf) angesprochenen Themen und Inhalte wird in weiten Kreisen der einschlägigen bord- wie landseitig orientierten Fachwelt geweckt, was regelmäßig zum Einschwenken auf die vom Standard(-Entwurf) vorgezeichneten Lösungswege führt.
- Bordgeräte-Hersteller werden im Standard(-Entwurf) beschriebenen Funktionalitäten ganz oder teilweise von sich aus nach Möglichkeit und möglichst bald einbauen, sofern dies einen Vorteil für ihre Produkte am Markt verspricht. Bei kooperativen Land-Schiff- bzw. Schiff-Land-Anwendungen wird dabei aber oft auch der Ruf nach einer verbindlichen Unterstützungszusage dieser Anwendungen seitens der an Land jeweils zuständigen Organisationen, unter anderem seitens der Schifffahrtszeichen- bzw. Schifffahrtsverwaltungen, laut.

**2. Schritt:** Nicht rechtsverbindliche, aber auf Einfluss beruhende Wirksamkeit der Standard-Inhalte:

- Einzelne zwischenstaatliche oder private Organisationen oder bekannte Projekte können den Einsatz solcher Standards empfehlen für ihren jeweiligen Zuständigkeitsbereich:
  - Die IALA könnte bei ihrer Abbildung von Schiffsverkehrsdiensten in die S-100-Welt – wie oben skizziert – dereinst die Verwendung von S-421 für ihre Mitglieder empfehlen; wichtigste Gruppe der IALA-Mitglieder sind die Schifffahrtszeichen- und Schifffahrtsverwaltungen der Küstenstaaten.
  - Die Helsinki-Kommission (HELCOM) ist diesen Schritt bereits gegangen, und empfiehlt ihren Mitgliedsstaaten im Ostseeraum die Benutzung von digitalen Reiseplanungs- und -Austausch-Verfahren, wozu S-421 per Definition ja geschaffen worden ist. Auch bei der IMO

lassen sich derartige, freilich noch unverbindliche Hinweise finden.

- Die bloße Einreihung des IEC-Standards (bzw. Standard-Entwurfs) als S-421 in die international harmonisierte IHO-Normreihe S-100 hat empfehlende Wirkung.
- S-421 nutzt die von der IMO im Rahmen ihrer E-Navigation-Strategie beschlossene Abstützung der gemeinsamen Maritimen Datenstruktur auf S-100 als Teil ebendieser.
- Verbreitete Nutzung bei Schlüssel-Anwendergruppen verstärken die Wirksamkeit: So könnte eine in S-421 definierte Hafenanlauf-Synchronisierung durch Lotsen in ihren PPU's (Portable Pilot Units) bereits in nur einem namhaften Land zu darüber hinaus reichender Verbreitung führen.

### 3. Schritt: Rechtsverbindliche Wirksammachung:

- »Stand der Technik«: Ein dereinst existierender IEC-Standard, im europäischen Binnenmarkt harmonisiert eingeführt als EN, reflektiert den »Stand der Technik« in der Europäischen Union bzw. im europäischen Wirtschaftsraum und gegebenenfalls darüber hinaus.
- Die IHO als zwischenstaatliche, internationale Organisation könnte für alle Hydrographischen Dienste, die entsprechende landseitige Unterstützung für die kooperativen Land-Schiff/Schiff-Land-Anwendungen auf dem fachlichen Gebiet der Fahrtroutenplanung und -durchfüh-

rung von Schiffen bereitstellen wollen, weltweit verbindlich S-421 als Grundlage vorgeben.

- Die IMO könnte (ausgewählte) Funktionalitäten zur Pflichtausrüstung für eine zukünftige Generation von Bordausrüstungen vorgeben: ECDIS ist auf diese Weise über die Schritte 1 und 2 nun im Schritt 3 angekommen, nach ca. 25 Jahren Dauer; AIS brauchte von der Herausgabe des ersten Standards bis zur Pflichtausrüstung nur circa fünf Jahre.
- Die EU könnte die bord- wie landseitige Nutzung EU-weit rechtsverbindlich vorgeben – analog dem Vorbild der AIS-Einführung sowie AIS-basierter Schiffsverfolgung durch Verkehrszentralen zu Beginn der 2000er-Jahre.
- Organisationen mit zwischenstaatlicher Zuständigkeit für Flussgebiete (z. B. die für den Rhein, die Donau und die Mosel zuständigen Kommissionen) könnten das jeweils für ihre Region tun – als Anwendung auf den Binnenbereich.

Es bleibt abzuwarten, in welchem Umfang und mittels welcher Wirkmechanismen die S-100-Welt zukünftig in konkrete Anwendungsimplementierungen übernommen werden wird. //

#### Hinweis

Die hier dargestellte Sicht beruht auf der fachtechnischen Expertise des Verfassers und stellt nicht notwendigerweise die Auffassung der WSV dar.

---

#### Literatur

- IALA (2011): S-210 Inter VTS Exchange Format. [www.iala-aism.org/product/inter-vts-exchange-format-service-145](http://www.iala-aism.org/product/inter-vts-exchange-format-service-145)
- IALA (2018): S-211 Port Call Messages. Edition 1.0.0. [www.iala-aism.org/technical/data-modelling/iala-s-200-development-status/s-211/](http://www.iala-aism.org/technical/data-modelling/iala-s-200-development-status/s-211/)
- IALA (2019): IALA S-201 Aids to Navigation Information Product Specification. Edition 1.0.0. IALA-Dokument ARM10-13.3.1
- IEC (2019): IEC 63173-1 Ed.1.0 – Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems – Data Interface – Part 1: S-421 Route Plan Based on S-100, Committee Draft, IEC80-948
- IHO (2019): NIPWG Product Specifications. <https://iho.int/en/nipwg-product-specifications>
- IHO (2020): S-100 Introduction. <http://s100.iho.int/S100/home/s100-introduction>
- IMO (1997): Resolution A.857(20) – Guidelines for Vessel Traffic Services. [www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Assembly/Documents/A.857\(20\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Assembly/Documents/A.857(20).pdf)

- IMO (2014): NCSR 1/28, Annex 7, Draft e-Navigation Strategy Implementation Plan. [www.imo.org/en/OurWork/Safety/Navigation/Documents/enavigation/SIP.pdf](http://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Navigation/Documents/enavigation/SIP.pdf)
- IMO (2020): NCSR 7/7. Sub-Committee on Navigation, Communications and Search and Rescue (NCSR), 7th session, 15-24 January 2020

#### Weitere Informationen

- Listen der Datenprodukt-Spezifikationen von IHO und IALA: <https://iho.int/en/s-100-based-product-specifications>  
[www.iala-aism.org/technical/data-modelling/iala-s-200-development-status](http://www.iala-aism.org/technical/data-modelling/iala-s-200-development-status)
- SMART Navigation Project: [www.smart-navigation.org/eng/html/Index\\_New](http://www.smart-navigation.org/eng/html/Index_New)

# LiDAR-Systeme für die topobathymetrische Vermessung

Ein Beitrag von *URSULA RIEGL* und *MARTIN PFENNIGBAUER*

3D-Daten sind wesentlicher Bestandteil des Vermessungswesens und bilden die Grundlage für viele Anforderungen unserer zunehmend digitalen Umgebung. Laserscanner von RIEGL sind heute weltweit im Einsatz, um die immer genauere und höher auflösende Vermessung der Welt vom Boden aus, zu Wasser und aus der Luft voranzutreiben. LiDAR-Technologie spielt dabei auch für die Erfassung von Wasserwegen und Küstengebieten eine wichtige Rolle.

RIEGL | Laserscanner | ALS | TLS | BLS | ULS | Wellenformanalyse  
RIEGL | laser scanner | ALS | TLS | BLS | ULS | wave form analysis

3D data are an essential part of surveying and mapping and are the basis for many requirements of our increasingly digital environment. Today, laser scanners from RIEGL are in use worldwide to advance the ever more accurate and high-resolution surveying of the world from a ground position, on water and from the air. LiDAR technology also plays an important role in the survey of waterways and coastal areas.

## Autoren

Mag. Ursula Riegl ist Assistentin der Geschäftsführung bei der RIEGL Laser Measurement Systems GmbH in Horn, Österreich.  
Dr. Martin Pfennigbauer ist dort Director Research & Intellectual Property.

[mpfennigbauer@riegl.com](mailto:mpfennigbauer@riegl.com)

Bei der Entwicklung von leistungsstarken und innovativen Geräten, die für sehr unterschiedliche Aufgabenbereiche optimiert sind, beruft sich RIEGL auf über 40 Jahre Unternehmenserfahrung im Bereich der Lasermesstechnik. Erfahrung meint dabei sowohl die Perfektionierung der Basistechnologie als auch die kontinuierliche Herausforderung, in klassischen Anwendungsbereichen wie auch in neuen Feldern neue Maßstäbe zu setzen. Diese Zielsetzung – und Leidenschaft – findet Ausdruck im Firmenleitspruch »Innovation in 3D«.

Seit den Anfängen des im niederösterreichischen Waldviertel ansässigen Unternehmens werden Laserentfernungsmessgeräte entwickelt – ursprünglich hauptsächlich für Industrieanwendungen – und auch vor Ort gefertigt. Seit der Einführung von Laserscannern richtete sich das RIEGL-Produktportfolio immer mehr auch an die Vermessungsbranche, dem heute wesentlichsten Absatzmarkt. In der luftgestützten Kartographie wurde die Effizienz von 2D-Laserscannern (Airborne Laserscanning, ALS) bald gewinnbringend eingesetzt, und auch in der Vermessung vom Stativ aus – zum Beispiel in den Bereichen Infrastrukturvermessung, Archäologie, Architektur – behauptete sich 3D-Laserscanning (Terrestrisches Laserscanning, TLS). Heute ist Laserscanning in diesem Markt längst zur Selbstverständlichkeit geworden.

Die komplette Entwicklung und Produktion von RIEGL-Produkten findet nach wie vor am Stammsitz in Horn statt. Hier sind Labor-, Fertigungs- und Testeinrichtungen vorhanden und damit eine enge Anbindung und ein reger Austausch zwischen den Design- und Entwicklungsteams und den vertriebsbezogenen Abteilungen. Niederlassungen in

den USA, Japan, China, Kanada und Australien gewährleisten die internationale Marktpräsenz und – gemeinsam mit zahlreichen Partnern – den weltweiten Vertrieb von RIEGL-Produkten. Am Standort USA sind in Orlando, Florida, in den letzten Jahren auch eine Servicestelle sowie ein Test- und Kalibrierfeld angelegt worden, um auf Supportaufgaben schneller reagieren zu können.

Ein entscheidender Technologiesprung gelang RIEGL 2005 mit der Vorstellung des luftgestützten Laserscanners LMS-Q560. Es war dies das erste kommerzielle ALS-Gerät, das die Wellenform aller Echosignale digitalisierte und die digitalen Signale zur späteren Analyse auf einem Datenrekorder speicherte. Die gespeicherten Signale werden nach der Befliegung im Postprocessing einer auf Gaußscher Dekomposition beruhenden Wellenformanalyse zugeführt. Mit dieser Kombination aus fortschrittlicher Hard- und Software können Messungen mit hoher Genauigkeit, Mehrzielfähigkeit und zusätzlichen Attributen realisiert werden. Aus räumlichen Abstandsdaten waren Punktwolken – bestehend aus kompakten Informationskernen – geworden: die neue Waveform-LiDAR-Technologie führte damit eine zuvor unbekannte Datenqualität als Standard ein. Datenanalyse und -filterung, Flächenklassifikation, die semiautomatische Generierung digitaler Geländemodelle (Digital Terrain Model, DTM) sind einige der Features, die den Vorteil von Waveform-LiDAR gegenüber bildgebenden Verfahren ausmachen. Diese kommen ganz besonders in der Vermessung – und dabei speziell bei der Durchdringung – von Vegetation zum Tragen.

Mit der Einführung der V-Line-Gerätegeneration

beginnend ab 2009 konnte die Wellenformanalyse von der Nachverarbeitung direkt in das Gerät verlagert werden, wo sie in Echtzeit während der Datenaufnahme erfolgt. Dies bewirkt eine deutliche Beschleunigung der Datenverarbeitung und ist nicht zuletzt aufgrund der kontinuierlich gesteigerten Leistungsdaten der Scanner eine essenzielle Funktion. Während die Messrate 2005 noch bei 100 kHz lag, stellte RIEGL auf der Intergeo 2019 das Zwei-Kanal-ALS-System VQ-1560 II mit einer Messrate von 2,66 MHz vor. Mit Geräten dieser Leistungsklasse können selbst aus großer Flughöhe hochauflösende und hochgenaue Punktwolken aufgenommen und somit hunderte Quadratkilometer pro Stunde vermessen werden. Dies kommt beispielsweise bei der regelmäßigen Vermessung der Rocky Mountains durch die NASA zur Bestimmung der Schneehöhe und damit der Süßwasser-Reserven für Kalifornien zur Anwendung.

Ein Trend, der von RIEGL wesentlich mitbestimmt wird, sind benutzerfreundliche Systemlösungen für mobile Anwendungen auf Schienen- oder Straßenfahrzeugen im Bereich der Infrastrukturvermessung und in der luftgestützten Vermessung. Neben Einzelscannern (Scan Engines) bietet RIEGL nun vermehrt Gesamtsysteme an, die aus einem oder mehreren Laserscannern, aus integrierter INS-Lösung (Inertial Navigation System), aus Kamera(s) und Datenspeicher bestehen, welche ab Werk kalibriert und somit einfach und rasch auf einer Trägerplattform integrierbar sind. Diese Multi-Sensor-Systeme entsprechen durch die Konfiguration der integrierten Einzelsensoren der kundenseitigen

Forderung, in einer einzelnen Aufnahmeemission ein Maximum an komplementärer Information (Bild, Lage, Georeferenzierung etc.) über einen ebenso möglichst perfekt räumlich abgedeckten Vermessungsbereich zu generieren.

Ein Beispiel für ein derartiges leistungsstarkes Sensorsystem ist das Airborne-Laserscanning-System VQ-880-G, das 2014 auf den Markt kam: ein topo-bathymetrisches System, das zusätzlich zu den Systemkomponenten bathymetrischer (»grüner«) Laserscanner, INS und GNSS auch einen infraroten Laserscanner und eine Kamera enthält. Obschon RIEGL-Geräte seit Beginn auch im Umfeld von Wasser eingesetzt wurden – beispielsweise als Abstandssensoren für Dockinganlagen und für die Vermessung von Hafeninfrasturktur, Uferböschungen, Staudämmen und Küstenregionen mit Erosionsrisiko – war die Erfassung der Grundtopographie durch die Wasseroberfläche hindurch mit den bisher angebotenen Produkten nicht durchführbar gewesen. Als Thema von Forschungsarbeiten zusammen mit dem Arbeitsbereich Wasserbau der Universität Innsbruck wurde das Potenzial von LiDAR für die Bathymetrie ausgelotet. Dieses liegt in der Vermessung von Bereichen mit geringer Wassertiefe und in den Übergangszonen zwischen Land und Wasser (Abb. 1). Der erste RIEGL ALS-Scanner der neuen Klasse »Topo-bathymetric« für Flachwasserkartierung kam 2011 auf den Markt. Zusätzlich wurde geeignete Software entwickelt, um die spezifischen Herausforderungen bei der Verarbeitung der Daten – nämlich Wasserklassifikation, Wasseroberflächenmodellierung, Refrak-

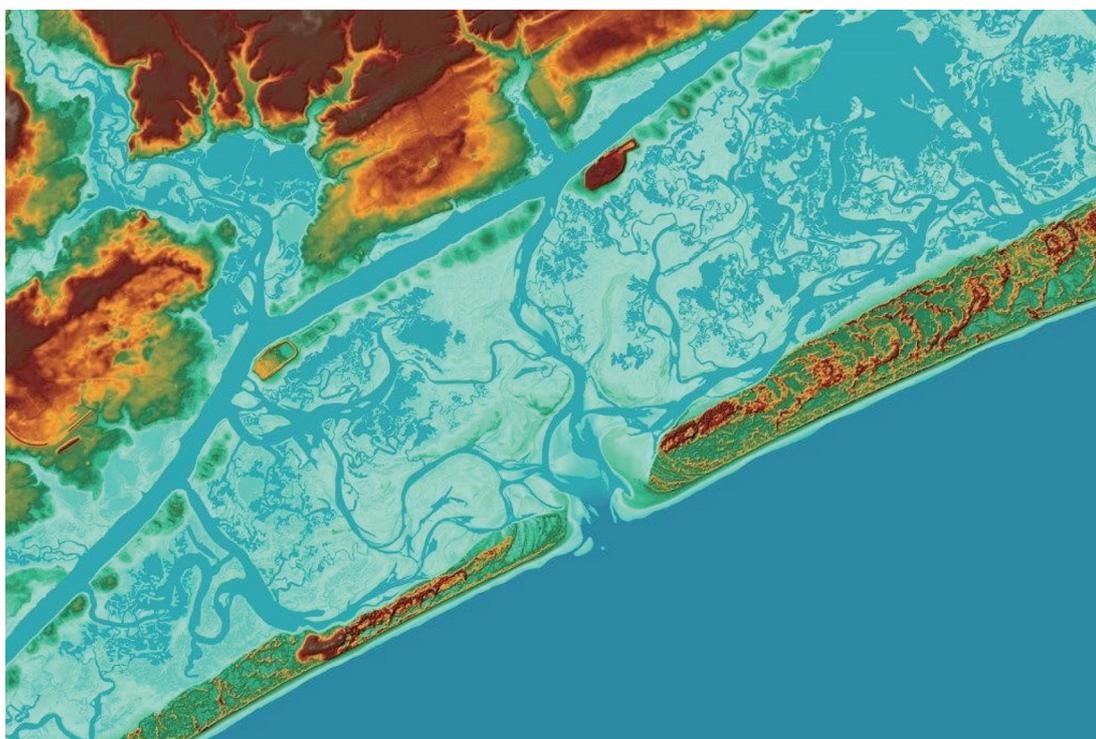


Abb. 1: Onslow Bucht, North Carolina, USA: Topo-bathymetrische LiDAR-Daten veranschaulichen die Küsten- und Meerestiefeninformation und die Kraft der natürlichen Gezeitenströme

tionskorrektur – verlässlich zu meistern. Aus dieser Nische wurde für RIEGL schlussendlich ein eigener Produktbereich: Bathymetrisches Laserscanning, abgekürzt BLS.

Auf Hydrographie spezialisierte Vermessungsbüros, Geodatenprovider, Forschungsinstitute und staatliche Organisationen verwenden RIEGL-Scanner – oft auch in Verbindung mit Photogrammetrie- und Sonarsystemen – für die Vermessung von weitreichenden Küstenabschnitten, Flussläufen und Gletschergebieten. Die Ergebnisdaten dienen z. B. der Feststellung von topographischen Veränderungen und damit der Einschätzung von Risikofaktoren oder auch der Berechnung von Wassermengen.

Parallel zur Nachfrage nach Multi-Sensor-Systemen spiegelt sich ein weiterer Trend im RIEGL-Produktangebot: die Miniaturisierung von Sensoren. Gewicht und Größe spielen vor allem bei der Integration in komplexe Robotiksysteme und Drohnen eine wesentliche Rolle. Unbemannte Luftfahrzeuge haben in den letzten Jahren ihr nunmehr unbestrittenes Potenzial bewiesen und damit auch den Vermessungsmarkt revolutioniert. Der Miniaturlaserscanner RIEGL VUX-1 war 2014 der weltweit erste speziell für die UAV-basierte Vermessung entwickelte Laserscanner, mittlerweile bietet RIEGL eine Serie von Kleingeräten und komplexen Systemaufbauten an – und auch eine vollintegrierte UAV-Komplettlösung, den RiCOPTER mit VUX-SYS.

Der Einsatz von Laserscannersystemen von Drohnen aus eröffnete neue Perspektiven: Durch keine andere Methode war es davor möglich gewesen, sich in den Zielumgebungen so ungebunden wie in der luftgestützten Vermessung, aber dabei auch fast so nahe am Objekt wie bei terrestrischem Laserscanning zu bewegen. Das Ergebnis sind dichte, verschattungsfreie Aufnahmen, selbst in sehr komplexen räumlichen Situationen. Aktuell wird der Ein-

satz von UAVs ausgestattet mit LiDAR-Multi-Sensor-Systemen für den Einsatz in Katastrophenszenarien getestet. Anders als bei präzisen Modellierungsaufgaben werden die Daten in Echtzeit für die unmittelbare Lageeinschätzung und Koordination der Hilfskräfte bereitgestellt. Weitere typische Aufgaben für ULS (UAV-basiertes Laserscanning) finden sich bei Routine-Monitoringaufgaben zu Sicherheitszwecken im Infrastrukturbereich oder zur Dokumentation im Bauwesen oder im Tagebau.

Das Interesse, die Möglichkeiten der völlig neuen Aufnahmeposition vom UAV aus und der sich daraus ergebenden Vorteile auch für bathymetrische Anwendungen nutzbar zu machen, führte zur Entwicklung eines ersten UAV-basierten Laser-Profilmessgerätes RIEGL BDF-1 (2015), das sich hauptsächlich zur Vermessung von Fließgewässern eignet. Im Abstand der gewählten Fluglinien des Träger-UAVs ergeben sich Linien aus Einzelmesspunkten, die das Flussbettprofil und die Uferböschung abzeichnen. Die vielversprechenden Ergebnisse aus der Entwicklung dieses ersten U(B)LS-Gerätes ließen rasch den Wunsch nach einem ersten UAV-basierten Bathymetriescanner laut werden. Diesem wurde 2018 mit der Präsentation des RIEGL VQ-840-G entsprochen. Das kompakte BLS-System mit einem Gewicht von nur etwa 12 kg weist mit bis zu 200 kHz Messrate und einer Eindringtiefe von mehr als zwei Secchi-Tiefen aus einer Flughöhe von etwa 75 m sehr attraktive Leistungsdaten auf. Gewässerabschnitte von kleinem bis mittlerem Umfang können mit diesem System schnell und mit sehr hoher Auflösung vermessen werden.

Parallel zu dieser Entwicklung wurden auch für den Airborne-Sektor Upgrades im bathymetrischen Produktportfolio vorgestellt: Die Schwestertypen RIEGL VQ-880-GH, spezialisiert für die Integration im Helikopter (Abb. 2), und RIEGL VQ-880-G II für Flächenflieger. Mit moderner Kamerakonfiguration, höherer Messrate und deutlich verbessertem Infrarotkanal stellen diese Systeme die ideale Lösung für großflächige Projekte dar.

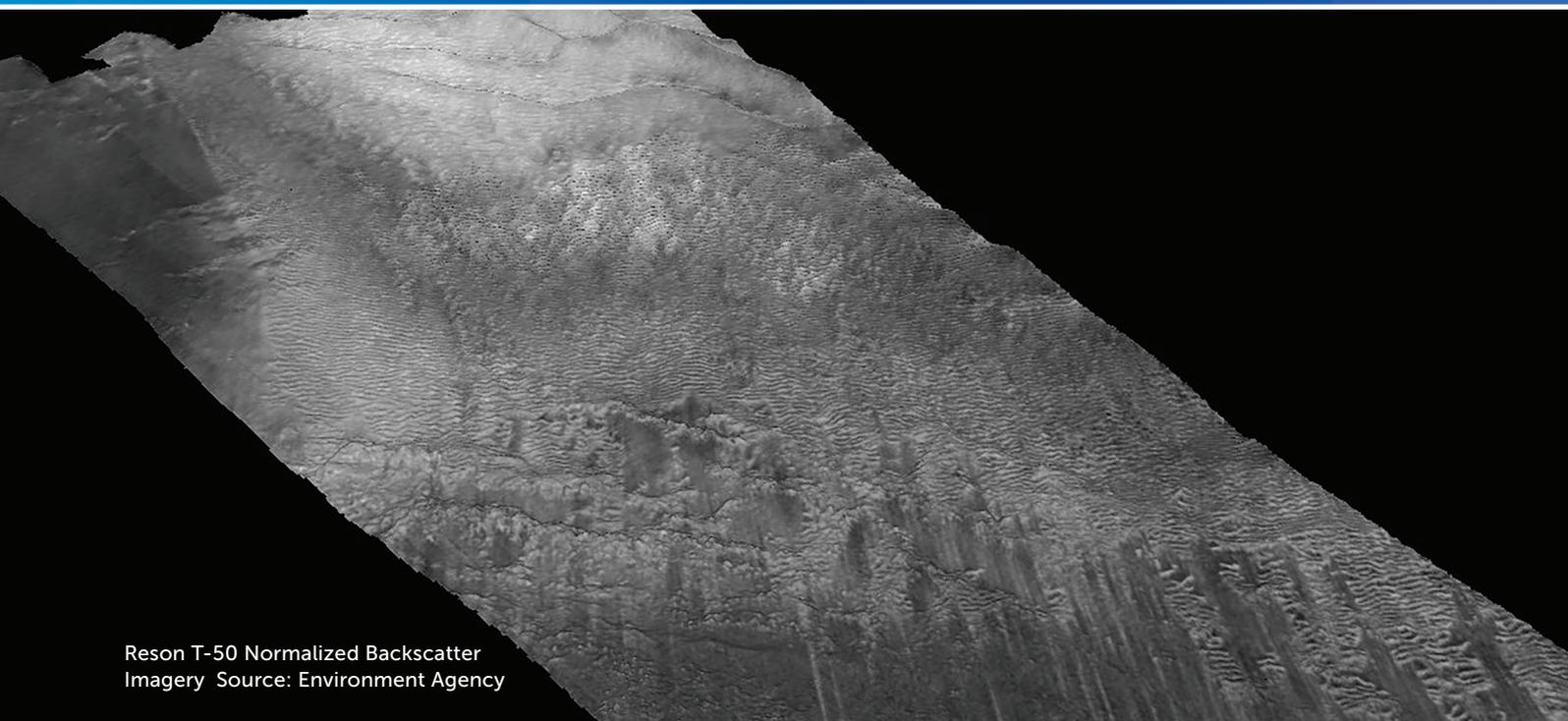
Die Bedeutung der hydrographischen Vermessung hat in den letzten Jahren verstärkt öffentliche Aufmerksamkeit erhalten: Die dramatische Gefährdung unserer Gewässer als Trinkwasservorrat, Nahrungsmittelquelle und Verkehrsweg, aber auch die Bedrohungen von Lebensraum und Ressourcen durch Trockenheit und Überflutungen sind aktuell viel diskutierte Themen. Es ist zu erwarten, dass sich hieraus weiteres Marktpotenzial für die zum Einsatz gebrachten Messsysteme – aber auch zusätzliche, neue Anforderungen – ergeben werden. Durch intensive Zusammenarbeit mit Kunden, Partnern und Forschungsinstituten setzt RIEGL alles daran, neue Fragestellungen früh zu erkennen und durch kontinuierliche Weiterentwicklung zuverlässige technologische Antworten zu definieren. //



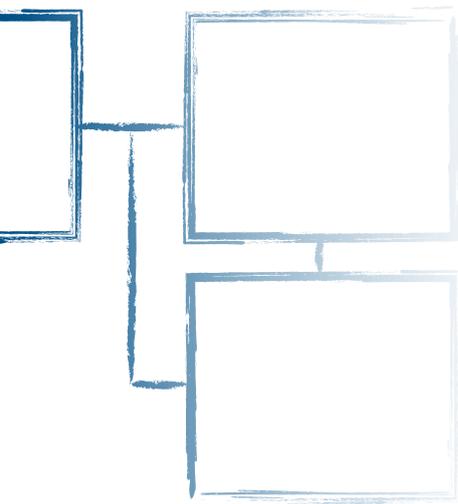
**Abb. 2:** Vermessung von Küstengebieten in Japan mit dem RIEGL VQ-880-GH, integriert im Vermessungshubschrauber von NAKANIHON



# AUTOMATION FOR BACKSCATTER PROCESSING



Reson T-50 Normalized Backscatter  
Imagery Source: Environment Agency



## CARIS HIPS and SIPS has your backscatter covered

The focus of most multibeam surveys is collecting quality depth information, but why should that lead to hours of adjusting data to end up with quality backscatter products? At CARIS we are taking the stress out of backscatter by providing industry leading automated backscatter corrections and mosaicing techniques.



Get more CARIS HIPS and SIPS details  
[www.teledynecaris.com/hips-and-sips](http://www.teledynecaris.com/hips-and-sips)



**TELEDYNE CARIS**  
Everywhereyoulook™

Part of the Teledyne Imaging Group



## Präzise 3D-Positionierung mit GNSS und Polarmessverfahren

Die Leica GNSS-Instrumente empfangen und verarbeiten die Signale aller aktuellen und zukünftigen Navigationssysteme.

Höchste Präzision bei voller Automatisierung der Messabläufe garantieren die Leica Polarmesssysteme.



Leica Geosystems GmbH Vertrieb  
[www.leica-geosystems.de](http://www.leica-geosystems.de)



- when it has to be **right**

**Leica**  
Geosystems