

# Abschlussbericht

## ImoNav



### INTEGRATION VON HOCHAUFGELÖSTEN MARINEN GEODATEN IN ELEKTRONISCHE NAVIGATIONSSYSTEME

Luis Becker<sup>1</sup>, Stephan Dick<sup>1</sup>, Mathias Palm<sup>2</sup>, Jana Vetter<sup>2</sup>, Stefan Grammann<sup>2</sup>,  
Michael van Zoest<sup>3</sup>, Frank Sellerhoff<sup>3</sup>, Matthias Stief<sup>3</sup>, Michael Bergmann<sup>4</sup>,  
Friedhelm Moggert-Kägeler<sup>4</sup>, Jochen Rudolph<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Bernhard-Nocht-Straße 78, 20359 Hamburg

<sup>2</sup> Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Neptunallee 5, 18057 Rostock

<sup>3</sup> smile consult GmbH, Schiffgraben 11, 30159 Hannover

<sup>4</sup> SevenCs GmbH, Zirkusweg 1, 20359 Hamburg

15.11.2020

Förderkennzeichen: 19F2018A, 19F2018B und 19F2018C

Das Verbundvorhaben ImoNav wurde im Rahmen des Modernitätsfonds mFUND des BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur) gefördert.  
Förderkennzeichen: 19F2018A, 19F2018B und 19F2018C

# ImoNav - Abschlussbericht

## Inhalt

1.	Zusammenfassung.....	7
2.	Einleitung.....	7
2.1	Motivation.....	7
2.2	Ziele des Projekts .....	8
2.3	Testgebiet.....	9
3.	Ozeanographische Daten .....	10
3.1	Generierung von dynamischen Wasserstandsflächen.....	10
3.1.1	Vorhersagedienste des BSH.....	10
3.1.2	Methode .....	11
3.1.3	Ergebnisse.....	14
3.1.4	Fazit zur Generierung von dynamischen Wasserstandsflächen.....	23
3.2	IHO-kompatible Wasserstands- und Strömungsdaten sowie Bereitstellung und Aufbereitung weiterer ozeanographische Daten .....	23
3.2.1	Einleitung.....	23
3.2.2	Vorgehen .....	24
3.2.3	Weitere ozeanographische Daten.....	27
3.2.4	Fazit zu IHO-kompatiblen Daten .....	28
4.	Bathymetrische Daten.....	30
4.1	Aufgabenstellung .....	30
4.2	Nautischer Informationsdienst des BSH .....	30
4.3	Datensituation.....	30
4.3.1	Aufnahmeverfahren .....	31
4.3.2	Koordinatenreferenzsysteme.....	32
4.3.3	Datenstrukturen, Datenauflösung und Datenformate.....	33
4.3.4	Datenqualität.....	34
4.4	Vorgehen und Ergebnisse .....	34
4.4.1	Aufteilung des Seegebietes mittels Kachelschema .....	34
4.4.2	Entwicklung einer Dateninfrastruktur .....	35
4.4.3	Workflow zur automatisierten Bearbeitung und standardkonformen Bereitstellung der bathymetrischen Daten .....	38
4.4.4	Beteiligung an der Entwicklung internationaler Standards für Bathymetriedaten.....	45
4.5	Fazit und Ausblick.....	46
5.	Automatisches Prozessieren und Verknüpfung von Daten.....	48

5.1	Datenaustauschplattform .....	48
5.1.1	Zielsetzung.....	48
5.1.2	Struktur der Daten.....	48
5.1.3	Technologische Basis .....	50
5.1.4	Dienst für den Datenbezug.....	51
5.2	Zusammenführen und Aufbereiten von Bathymetriedaten .....	52
5.3	Verknüpfung von Wasserstand und Bathymetrie.....	53
5.4	Generierung von Konturlinien für Wassertiefe.....	54
5.4.1	Konturen.....	55
5.4.2	Tiefenzahlen .....	55
5.4.3	Generalisierung .....	56
5.4.4	Qualitätsmanagement.....	57
5.5	IHO-kompatible Datenbereitstellung.....	59
5.5.1	Extended-BAG .....	59
5.5.2	Kartendienste .....	59
5.5.3	Dienst für elektronische Seekarten entlang einer Route .....	60
5.6	Datenpräsentation und Visualisierung.....	61
5.6.1	ImoNav-Portal .....	61
5.6.2	Präsentation in der mCLOUD .....	62
6.	Darstellung und Datentransfer Land-Schiff.....	65
6.1	Darstellung der Geodaten in ECDIS/ECS .....	65
6.1.1	Voranalysen:.....	66
6.1.2	PPU (Portable Pilot Unit):.....	66
6.1.3	Erweiterung der Datendarstellung.....	68
6.2	Verarbeitung der Daten für Routen- und Reiseplanung.....	70
6.2.1	Erste Implementierung des „Grid SENC“ Datenmodells .....	70
6.3	Nutzereinbindung .....	71
6.4	Datentransfer Land – Schiff.....	73
6.5	Prä-operationeller Testbetrieb .....	74
6.5.1	Auswertung der Datenströme.....	74
6.5.2	Durchführung .....	75
6.5.3	Auswertungsergebnisse .....	76
6.5.4	Auswertung der Datenströme während eines Testzeitraums .....	77
7.	Zusammenfassung.....	79
8.	Anhang.....	83

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
AIS	Automatic Identification System
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
bENC	bathymetric Electronic Navigational Chart
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
BWaStr / BWS	Bundeswasserstraße
CARIS	Computer Aided Resource Information System
CMDS	Common Maritime Data Structure
cRMSE	Centered Root Mean Squared Error
DGM	Digitales Geländemodell
DHDN	Deutsches Hauptdreiecksnetz
DHHN2016	Deutsches Haupthöhennetz 2016
DWD	Deutscher Wetterdienst
ECDIS	Electronic Chart Display and Information System
ECS	Electronic Chart System
ENC	Electronic Navigational Chart
EPSG	European Petroleum Survey Group Geodesy
ETRS89	Europäisches Terrestrisches Referenzsystem 1989
FME	Feature Manipulation Engine
FTP	File Transfer Protocol
GeoTIFF	Georeferenced Tagged Image File Format
GFS	Global Forecast System
GIS	Geoinformationssystem
HBM	HIROMB-BOOS Model
HDF(5)	Hierarchical Data Format (Version 5)
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IALA	International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities
IC-ENC	International Centre for ENCs
IHO	International Hydrographic Organization
IMO	International Maritime Organization
ImoNav	Integration von hochaufgelösten marinen Geodaten in elektronische Navigationssysteme
ISO 19100	Norm für geographische Informationen
ITZ Bund	IT-Dienstleister des Bundes
MID	Metadaten-ID
MOS	Model Output Statistics
MSE	Mean Squared Error
NetCDF	Network Common Data Form
NHN	Normalhöhennull
OGC	Open Geospatial Consortium
OPeNDAP	Open-source Project for a Network Data Access Protocol
PostgreSQL	Post graphics retrieval system Structured Query Language
PPU	Portable Pilot Unit
REST	Representational State Transfer
RTZ	Route plan exchange format

---

S-100	IHO Standard für ein universelles hydrographisches Datenmodell
SENC	System ENC Format
SIDW	Squared Inverse Distance Weighting
SIP	Strategic Implementation Plan (der IMO)
SRS	Spatial Reference System
THREDDS	Thematic Real-time Environmental Distributed Data Services
TDS	THREDDS Data Server
TWCWG	Tides, Waterlevel and Currents Working Group
UK	United Kingdom
UTM	Universal Transverse Mercator
WCS	Web Coverage Service
WFS	Web Feature Service
WG	Working Group
WMS	Web Map Service
WSA	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt
WSV	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes

# 1. Zusammenfassung

Im Projekt „Integration von hochaufgelösten marinen Geodaten in elektronische Navigationssysteme“ (ImoNav) wurden umfangreiche Datenbestände von Tiefendaten und ozeanographischen Informationen des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) verarbeitet, verknüpft und für elektronische Seekarteninformationssysteme aufbereitet. Es wurden Pilotprodukte für einen innovativen hochaufgelösten Navigationsdienst im Bereich des stark befahrenen Testgebietes der Deutschen Bucht und Tideelbe entwickelt und für die Schifffahrt ein neuartiger digitaler Zugang zu marinen Geodaten geschaffen.

Im Laufe des Projekts wurde eine neue Methode zur Berechnung von flächenhaften Wasserstandsvorhersagen entwickelt, die die Ergebnisse der existierenden Prognoseverfahren deutlich verbessert. Zudem wurden Verfahren entwickelt, mit denen künftig weitere ozeanographische Daten (z.B. Strömungen, Wassertemperatur, Seegang) verarbeitet und automatisiert bereitgestellt werden können. Mit Hilfe einer eigens entwickelten Datenbank wurden heterogene Messdaten der Wassertiefe aufbereitet und über einen Dienst dem Projektpartner smile consult GmbH zur Verfügung gestellt. Dort wurden die Daten mit der Wasserstandsprognose verknüpft und so zu einem neuartigen Produkt, der dynamischen Wassertiefe, veredelt. Die Daten wurden präoperationell verarbeitet und somit automatisch laufend aktualisiert. Des Weiteren erfolgte die Bereitstellung der Daten in IHO-kompatiblen Formaten. Die Projektpartner SevenCs GmbH und smile consult GmbH entwickelten nutzerfreundliche dynamische Anzeigen der Projektergebnisse zum Wasserstand, der dynamischen Wassertiefe und der Strömung, so dass die neuartigen Navigationsdienste am Ende des Projektes in elektronischen Seekarten (ENCs) dargestellt werden konnten.

## 2. Einleitung

### 2.1 Motivation

Für eine sichere, effiziente und energiesparende Navigation und Verkehrslenkung benötigt die Schifffahrt unterschiedliche marine Geodaten. Diese liegen am Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und in der WSV vor. Durch das Seeaufgabengesetz (SeeAufgG) ist dem BSH der Gezeiten-, Wasserstands-, Sturmflutwarn- und Nautische Informationsdienst übertragen. Zu den Produkten des BSH zählen beispielsweise die Papierseekarten, elektronische Seekarten (ENCs: Electronic Navigational Charts), Gezeitenvorausberechnungen, Wasserstandsdaten und -vorhersagen, Strömungsinformationen, Eiskarten sowie weitere ozeanographische Informationen. Im Einzelnen werden die Produkte und Dienste seit vielen Jahren für die manuelle Schiffsführung eingesetzt, sie liegen jedoch häufig in unterschiedlicher Form und in der Regel nicht im gleichen Informationssystem vor. Für eine sichere Navigation ist jedoch gerade die Verschneidung von Informationen, wie z.B. die Verknüpfung von hochaufgelösten Bathymetriedaten mit aktuellen Wasserständen zur dynamischen Wassertiefe, von besonderer Bedeutung. Die verschiedenen Informationen manuell miteinander zu verschneiden, ist für die Schiffsführung jedoch aufwendig und fehleranfällig.

Hier setzt die Idee an, im Projekt ImoNav einen neuartigen Geodatendienst für hochaufgelöste hydrographische und ozeanographische Informationen zu entwickeln, der auf den Erfahrungen der heute zum Einsatz kommenden Informationssysteme für elektronische Seekarten (ECDIS) aufbaut. Durch den neuen Geodatendienst soll das Kollisions- und Strandungsrisiko reduziert werden und eine Basis für

eine effiziente und energiesparende Schifffahrt geschaffen werden. Der Dienst ist gleichzeitig Grundlage für intelligente Systeme bei der Verkehrslenkung und -leitung, beispielsweise mit dem Ziel, Wartezeiten auf Reeden zu vermeiden. Die gesteuerte Drosselung der Fahrtgeschwindigkeit spart Treibstoff und verringert somit Schiffsemissionen. Die Wasserstraßen können so effizienter und sicherer genutzt werden.

Nicht zuletzt sollen die neuartigen Schifffahrtsdienste, in Anlehnung an Fahrassistenzsysteme anderer Verkehrsträger, wichtige Grundlagen für eine autonome Schiffsführung schaffen.

## 2.2 Ziele des Projekts

Das übergeordnete Ziel von ImoNav ist es, einen innovativen hochaufgelösten Navigationsdienst für hydrographische und ozeanographische Daten aufzubauen. Am BSH liegen hierfür umfangreiche Datenbestände (Big Data) mit Tiefen- und Wasserstandsdaten vor, die im Vorhaben für unterschiedliche Nutzer aufbereitet und in digitaler Form bereitgestellt werden sollen. Für die Schifffahrt ist dabei die tatsächliche Wassertiefe, also die Verknüpfung von digitalen hochaufgelösten Bathymetriedaten mit aktuellen Wasserständen oder Wasserstandsvorhersagen von besonderem Interesse.

Ein wichtiges Ziel des Projektes ist es, insbesondere in engen und in Tiefgang beschränkten Gewässern mit hoher Verkehrsdichte wie die innere Deutsche Bucht und das Elbe-Ästuar, durch einen neuen Geodatendienst das Kollisions- und Strandungsrisiko deutlich zu reduzieren. Das Projekt soll zudem zu einer Effizienzsteigerung bei der Schifffahrt führen, da präzise Wasserstands- und Strömungsprognosen eine Optimierung der Reiseplanung ermöglichen, wodurch sich Treibstoffverbrauch und Schadstoffemissionen reduzieren lassen. Weiterhin werden die neuen Produkte Hafenbehörden und -dienstleister unterstützen, da eine verbesserte Reiseplanung mit genaueren Ankunfts- und Abfahrtszeiten die effiziente Planung von Einsatzkräften deutlich vereinfacht.

In den aktuellen elektronischen Seekarteninformationssystemen (ECDIS) können derzeit nur begrenzt ozeanographische Informationen dargestellt werden. Für die Integration von ozeanographischen Daten in elektronische Navigationssysteme sollen deshalb im Projekt geeignete Schnittstellen zu den marinen Diensten geschaffen und IT-Routinen zur Generierung neuer Produkte entwickelt werden, die der Schifffahrt zur Optimierung des Systems Schiff-Verkehrsträger im Sinne eines Open Data-Ansatzes frei zur Verfügung gestellt werden.

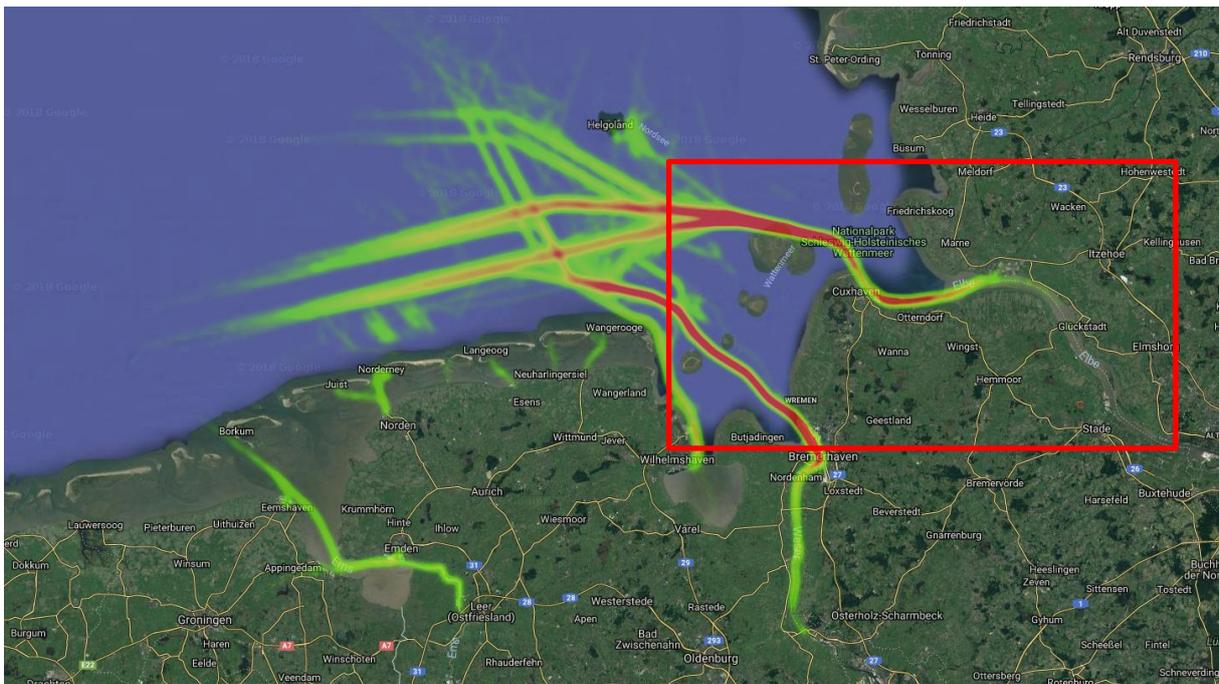
Die alphanumerische und/oder graphische Darstellung in ECDIS erfordert zusätzliche dynamische Layer, für die Datenspezifikationen zu entwickeln sind, die den IHO-Standards entsprechen. Weiterhin muss ein prä-operationeller Dienst zur routinemäßigen Bereitstellung und Darstellung der Daten eingerichtet werden. Dabei ist auch die Auswahl geeigneter Kommunikationsverfahren zur zuverlässigen Übertragung der Daten zu berücksichtigen.

Im Folgenden wird die gesamte Prozesskette des neuartigen Navigationsdienstes dargestellt. Kapitel 3 und 4 beschreiben die Bereitstellung und Verarbeitung ozeanographischer und bathymetrischer Daten durch das BSH. Kapitel 5 behandelt die Verknüpfung von Daten zu neuen Produkten sowie die Automatisierung von Prozessen zur Verarbeitung und Bereitstellung der Daten. Die Federführung für diesen Arbeitsbereich lag beim Projektpartner smile consult GmbH. Im Kapitel 6 werden ausgewählte Produkte z.B. zur Routenplanung, der Datentransfer zum Schiff sowie die Darstellung in elektronischen Seekartensystemen näher erläutert. Diese Arbeiten wurden federführend durch den Projektpartner SevenCs GmbH durchgeführt.

## 2.3 Testgebiet

Die Arbeiten im Projekt ImoNav konzentrierten sich auf ein Demonstrations- bzw. Testgebiet in der inneren Deutschen Bucht und im Elbe Ästuar. Für die Auswahl des Testgebiets sind einige Faktoren zu beachten. Es ist zwingend erforderlich, dass eine gute Datenlage gegeben ist, d.h. es müssen ozeanographische und bathymetrische Daten möglichst hochaufgelöst vorliegen. Des Weiteren ist es wünschenswert, dass in dem Gebiet ein hohes Verkehrsaufkommen gegeben ist, damit der entwickelte Service eine hohe Relevanz hat.

In [Abbildung 1](#) sind AIS-Tracks zum Schiffverkehr in der deutschen Bucht dargestellt. Mit dem Parameter Schiffsverkehrsdichte lässt sich das starke Verkehrsaufkommen klar identifizieren. Rot umrandet ist in [Abbildung 1](#) das festgelegte Testgebiet eingezeichnet. Die Auswahl beruht auf dem gezeigten hohen Verkehrsaufkommen im Mündungsgebiet der Elbe, sowie der hervorragenden Datenlage in diesem Gebiet. In den jeweiligen Kapiteln zu den fachspezifischen Arbeitspaketen wird näher auf die Datenlage eingegangen. Es ist anzumerken, dass sich die Arbeiten auch deshalb auf die Tide-Elbe und das angrenzende Seegebiet fokussieren, da für diesen Bereich das verwendete numerische Vorhersagemodell im Gegensatz zum Weser-Gebiet eine besonders hohe Auflösung und Genauigkeit aufweist.



**Abbildung 1** Heatmap zur Schiffsverkehrsdichte aus AIS-Daten [1]

## 3. Ozeanographische Daten

### 3.1 Generierung von dynamischen Wasserstandsflächen

#### 3.1.1 Vorhersagedienste des BSH

Aus den Projektzielen ergibt sich ein Bedarf an marinen Geodaten in bestmöglicher Qualität. Als maritimer Dienstleister für die Schifffahrt erstellt das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) Vorhersagen wichtiger ozeanographischer Parameter, um z.B. einen sicheren Schiffsverkehr zu ermöglichen. Eine entscheidende Größe in diesem Zusammenhang ist der Wasserstand, der die Höhe des Wasserspiegels in Bezug auf ein Referenzniveau angibt.

Im operationellen Betrieb stehen für die Wasserstandsvorhersage im BSH unterschiedliche Vorhersageverfahren zur Verfügung, von denen zwei für ImoNav von besonderem Interesse sind, da sie in automatisierter Weise zu definierten Terminen Vorhersagen bereitstellen. Auf der einen Seite wird ein numerisches Modellsystem genutzt, das sich seit Jahrzehnten in kontinuierlicher Entwicklung befindet [2]. Das numerische Modellsystem liefert unter anderem flächenhafte Wasserstandsvorhersagen für den gesamten Bereich der Nord- und Ostsee, sowie das Gebiet der Tide-Elbe. Neben einem zweidimensionalen 'Windstaumodell' für die Nordsee kommt bei der numerischen Wasserstandsvorhersage das dreidimensionale Zirkulationsmodell der Nord- und Ostsee „BSHcmod“ [3] zum Einsatz. In der aktuellen Arbeit werden jedoch Prognosen der neuen Modellversion HBM (HIROMB-BOOS Model) genutzt, die seit einiger Zeit bereits für das Elbe-Ästuar verwendet werden [2]. Da generell die Auflösung



**Abbildung 2:** MOS-Standorte im Bereich der Elbe und der deutschen Bucht

physikalischer Modelle nicht beliebig klein gewählt werden kann, Ungenauigkeiten existieren, sowie viele Prozesse in der Atmosphäre, die auf den Ozean wirken, chaotisch ablaufen oder numerisch nicht exakt beschrieben werden können, ist eine fehlerfreie Vorhersage der komplexen physikalischen Prozesse nicht möglich. Insbesondere durch die beschränkte räumliche Auflösung können lokale Besonderheiten nicht immer akkurat vorhergesagt werden. Daher existiert neben dem Modellsystem im BSH noch ein weiteres System zur Prognose von Wasserständen, das für die Berücksichtigung von lokalen Besonderheiten optimiert ist.

Die statistische Vorhersagemethode „Model Output Statistics“ (MOS) ist ein weiteres Vorhersageverfahren, das im Wasserstandsvorhersagedienst des BSH operationell genutzt wird. Es bedient sich einer bereits 1972 im Bereich der Meteorologie eingeführten Methode [4], die in der Lage ist, systematische Fehler der numerischen Vorhersagen an einzelnen Standorten zu korrigieren. Mit Hilfe von langen Beobachtungszeitreihen können Zusammenhänge im Verhaltensmuster von physikalischen Größen gefunden werden. Dabei nutzt man eine multiple lineare Regression, um eine abhängige Variable durch mehrere unabhängige Variablen zu erklären. Bei der abhängigen Variable handelt es sich beispielsweise um den Windstau (windbedingte Wasserstandsänderung) an einem Pegel und bei den unabhängigen Variablen z.B. um den vorhergesagten Wind aus dem amerikanischen GFS-Modell [5]. In der Praxis gibt es mehrere abhängige Variablen im Kontext der Wasserstandsvorhersage und eine Vielzahl an unabhängigen Variablen. Es hat sich herausgestellt, dass

in der Wasserstandsvorhersage insbesondere im Gebiet der Elbe und der Nordsee der Fehler der numerischen Modellvorhersage lokal (vgl. [Abbildung 2](#)) deutlich reduziert werden kann [6].

Da MOS in der Lage ist, den Vorhersagefehler lokal zu verbessern und auch systematische Fehler des numerischen Modells zu korrigieren, wäre es wünschenswert, das Verfahren auf möglichst viele Stellen oder die gesamte prognostizierte Wasserstandsfläche anzuwenden. Eines der Hauptprobleme dabei ist, dass nur für eine sehr begrenzte Anzahl an Positionen ausreichend lange Beobachtungszeitreihen des Wasserstandes vorliegen. Eine mögliche Alternative ist, Korrekturwerte für Modellprognosen, die man aus der MOS-Vorhersage an einzelnen Standorten gewinnen kann, in die Fläche zu bringen. Ob es geeignete Verfahren für diese Aufgabe gibt und wie sich die Vorhersage dadurch verbessert, wurde im Rahmen von ImoNav untersucht.

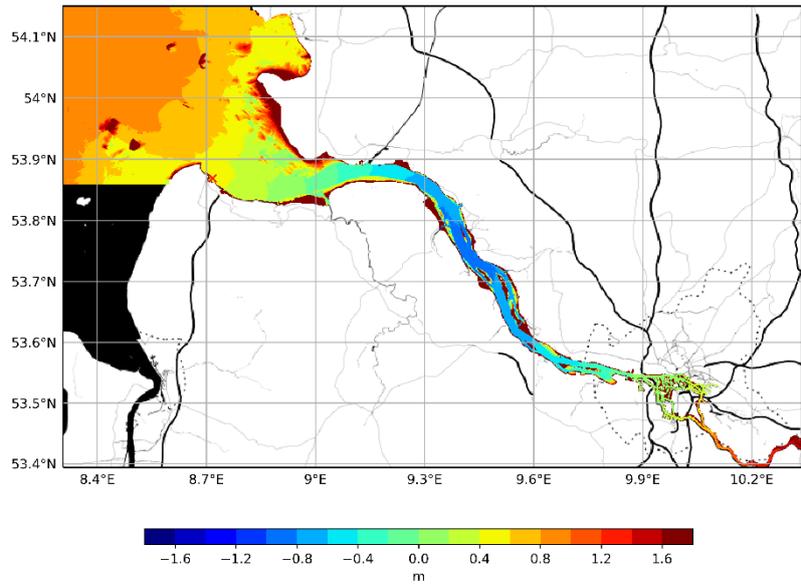
### 3.1.2 Methode

Um die Vorteile der MOS-Vorhersage in die Fläche zu bringen, können die vorhergesagten Wasserstände nicht direkt interpoliert werden. Interpolierte man Wasserstände direkt, so würde eine Wasserstandsfläche erzeugt werden, die nicht mehr den physikalischen Gesetzen unterläge und große systematische Fehler aufwiese. Anstatt Wasserstände direkt zu interpolieren, könnte man interpolierte Korrekturwerte erzeugen und die Modellfläche des Wasserstands mit der so gewonnenen „Korrekturfläche“ optimieren. Die Bestimmung der Korrekturwerte erfolgt durch die Berechnung von MOS für einzelne Pegel-Standorte und ergibt sich aus der Differenz zwischen der Modellvorhersage und MOS. Das numerische Modell liefert eine Wasserstandsfläche, die den physikalischen Gesetzen unterliegt und eine plausible Krümmung aufweist. Aus dem Unterschied der Wasserstände an den MOS-Standorten und dem Modellwasserstand an diesen Punkten kann lokal ein Wert für die Korrektur des Modell-Wasserstands gewonnen werden. Durch räumliche Interpolation kann diese Information nun in die Fläche gebracht werden. Dazu wurden im Rahmen des Projekts verschiedene Interpolationsverfahren auf ihre Nutzbarkeit für diese Anwendung untersucht (s 3.1.2.1).

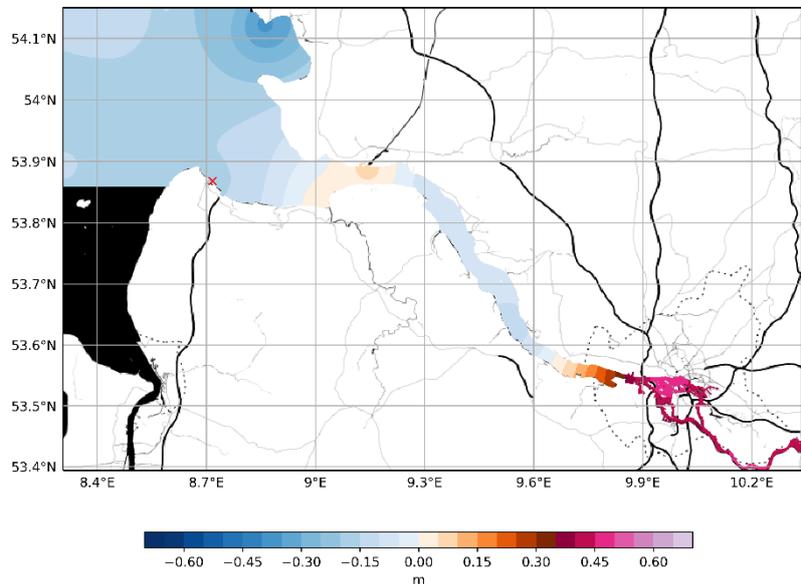
[Abbildung 3](#) zeigt am Beispiel der Elbe, wie die Korrekturflächenmethode für einen Zeitpunkt aussehen kann. Im oberen Teil der Abbildung ist die vorhergesagte Wasserstandsfläche des numerischen Modells (HBM) am 15. Januar 2020 um 12.00 Uhr zu sehen. Im mittleren Teil der Abbildung ist für den gleichen Zeitpunkt die durch Interpolation gewonnene Korrekturfläche dargestellt (Interpolation der Differenzen zwischen Modell und MOS). Im nächsten Abschnitt wird die Interpolationsmethode genauer erläutert. Nach Anwendung der Korrekturfläche auf die Modellfläche erhält man die korrigierte Wasserstandsfläche, die im unteren Teil der Abbildung dargestellt ist.

Die korrigierte Wasserstandsfläche ist auf NHN (Normalhöhennull) bezogen. Die MOS-Pegelstandorte dienen als Stützstellen für das Korrekturverfahren, und dadurch kann gleichzeitig ein genauer Höhenbezug auf NHN (Normalhöhennull) realisiert werden.

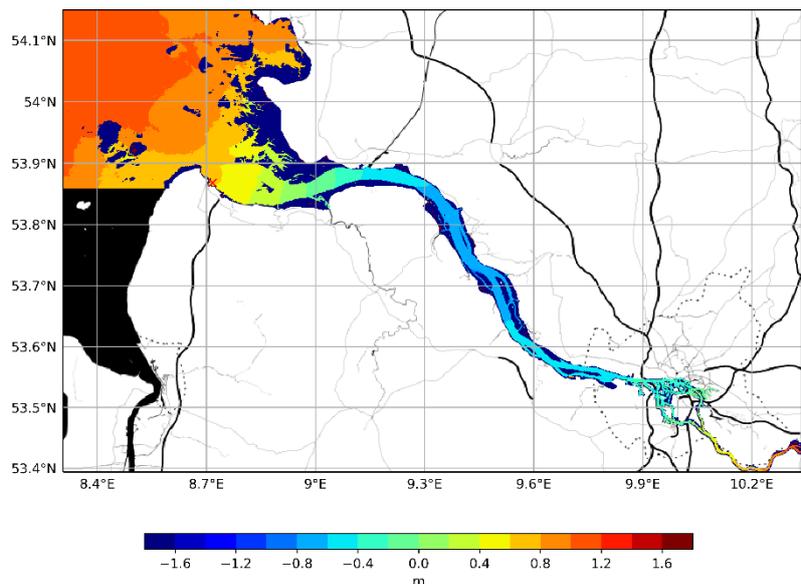
a) HBM Wasserstand  
15.01.2020 12 Uhr



b) Korrekturfläche  
15.01.2020 12 Uhr



c) Korrigierter Wasserstand  
15.01.2020 12 Uhr



**Abbildung 3** Beispielhafte Darstellung der Arbeitsschritte von der Modellfläche (a) über die interpolierten Korrekturwerte (b) zur korrigierten Wasserstandsfläche (c) für einen ausgewählten Zeitpunkt

### 3.1.2.1 Interpolationsverfahren

In den Geowissenschaften stellt sich häufig die Frage, wie am besten aus Beobachtungsdaten an einzelnen Standorten Informationen im zwei bis drei dimensionalen Raum gewonnen werden können. Es existiert bereits umfangreiche Literatur, die sich mit verschiedenen Interpolationsmethoden und deren Anwendbarkeit für unterschiedliche Fragestellungen befasst hat [6]. Als einige Beispiele für Interpolationsmethoden sind „inverse distance weighting [IDW]“, „kriging“, „polynomial interpolation“ oder „spline interpolation“ zu nennen. Je nach Anwendung stellen sich unterschiedliche Methoden als geeignet dar. In der Literatur existiert kein Konsens darüber, welche Methode generell für geowissenschaftliche Fragestellungen am besten geeignet ist. Phillips et al. empfehlen in einer Studie die Verwendung von Kriging, eine Methode die die räumliche Varianz berücksichtigt, für die Interpolation von Ozonbelastung [7]. In einer vergleichenden Studie für künstliche Oberflächen sieht Zimmermann ebenfalls Kriging als geeignetere Methode als z.B. IDW [6]. Declercq hat hingegen sowohl für sich langsam, als auch abrupt ändernde physikalische Daten mit der „squared inverse distance weighting [SIDW]“ Methode die besten Ergebnisse erzielt. Laut Declercq hat sich herausgestellt, dass mit dem Ziel, die Realität möglichst genau darzustellen, die akkurateste (die meisten Details erfassende) Interpolationsmethode nicht die beste Methode sein muss [8]. Ein größerer Ansatz kann zu besseren Ergebnissen führen. In ImoNav wurden unterschiedliche Interpolationstechniken untersucht und statistisch ausgewertet. Sehr gute Ergebnisse lieferte das Squared Inverse Distance Weighting-Verfahren (SIDW), mit dem sich zudem die numerischen Modellergebnisse und MOS-Prognosen auch bezüglich der Rechenzeit in sehr effektiver Weise verknüpfen lassen. Eine Abnahme des Signals mit dem Inversen der quadrierten Entfernung scheint eine sinnvolle Annahme zu sein, insbesondere, wenn noch nicht viel über die zu Grunde liegende Verteilung bekannt ist. In ImoNav wurde deshalb das SIDW-Verfahren eingesetzt, welches im Folgenden näher beschrieben wird.

### 3.1.2.2 Squared Inverse Distance Weighting

Die in der räumlichen Interpolation häufig verwendete Methode der „squared inverse distance weighting“ hat einige Vorteile. Der funktionale Zusammenhang kann effizient und einfach berechnet werden, und die Ergebnisse sind leicht interpretierbar, denn die interpolierten Werte ergeben das gewichtete Mittel der bekannten benachbarten Punkte [9].

$$z^*(x) = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^n w_i(x) * z_i}{\sum_{i=1}^n w_i(x)} & , \text{wenn } d(x, x_i) \neq 0 \\ z_i & , \text{wenn } d(x, x_i) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

An jedem Punkt  $x$  kann ein interpolierter Wert  $z^*$  erzeugt werden (1). Wenn der Punkt auf einem Beobachtungspunkt liegt (Distanz:  $d(x, x_i) = 0$ ), wobei  $x_i$  für die Beobachtungspunkte steht, dann ist der interpolierte Wert gleich dem beobachteten Wert. Ansonsten ergibt sich der Wert für  $z^*$  aus dem normierten gewichteten Mittel der beobachteten, benachbarten Punkte. Die Gewichte folgen aus Gleichung (2).

$$w_i(x) = \frac{1}{d(x, x_i)^2} \quad (2)$$

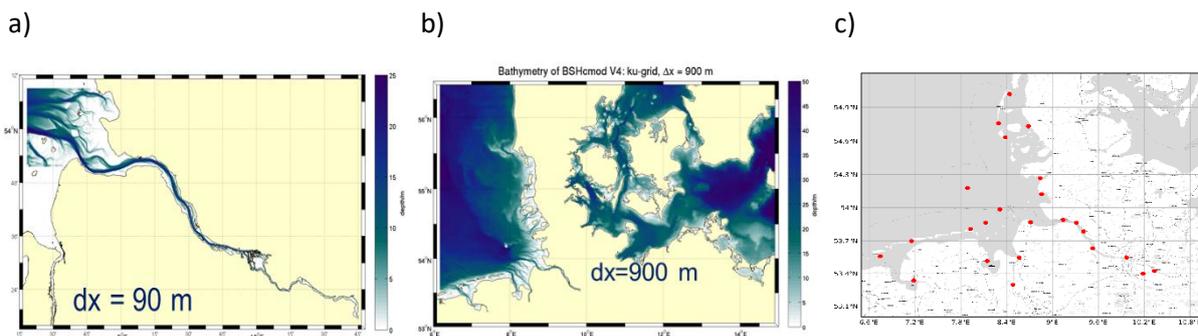
Aus (2) folgt, dass die Gewichtung mit der Entfernung im Quadrat abnimmt.

### 3.1.2.3 Konfiguration: HBM- und MOS-Daten

Für einen ersten praktischen Anwendungsfall der Methode wurden im Projekt Daten aus dem operationellen Betrieb des BSH verwendet. Das numerische Modell HBM rechnet zweimal täglich für verschiedene Raster unterschiedlich lange Vorhersagezeiträume. Für den o.g. Ansatz wurde die 0-Uhr-Simulation des Küstenrasters (deutsche Nord- und Ostseeküste) und die 0-Uhr-Simulation des Elbe-Ästuars genutzt (Abbildung 4 a und Abbildung 4 b). Es werden die ersten 24 Stunden des Vorhersagezeitraums mit einem Zeitschritt von 15 Minuten betrachtet.

Für verschiedene Pegelstandorte (vgl. Abbildung 4 c) wurden die MOS-Vorhersagen verwendet, die zeitlich am nächsten am ersten Zeitschritt der Modellvorhersage (00:15 Uhr) liegen. Aktuelle MOS-Vorhersagen des BSH liegen alle 15 Minuten vor, allerdings nicht zwingend um 00:15 Uhr. Die Zeitschritte der MOS-Vorhersage stimmen ebenfalls nicht mit den Zeitschritten des Modells überein, aber durch lineare zeitliche Interpolation der MOS-Werte wurden für exakt jeden Modell-Zeitschritt Werte erzeugt.

Der Auswertungszeitraum beginnt am 01.01.2018 und endet am 01.01.2020. Für diese Studie wurden alle unabhängigen Pegel im Bereich der Modellraster ausgewertet, für die ausreichend Beobachtungsdaten vorlagen. Es handelt sich um ca. 70 Pegelstationen, die an der Nordseeküste, Weser-Ästuar, Ems-Ästuar oder im Tidebereich der Elbe lokalisiert sind.



**Abbildung 4.** Modellraster Elbeästuar (a) und deutsche Nord- und Ostsee (b) sowie Positionen (c) der verwendeten MOS-Stationen

## 3.1.3 Ergebnisse

### 3.1.3.1 Mündungsbereich Elbe: Testgebiet mit hoher Auflösung

Für die Wasserstandsprognose des BSH ist das ImoNav-Testgebiet von außerordentlicher Bedeutung, da im Mündungs- und Tidegebiet der Elbe vielfältige und unterschiedliche Nutzeranforderungen bestehen und die Wasserstände durch verschiedene Einflüsse stark variieren. Die Vorhersagemethode wird deshalb zunächst in diesem Bereich analysiert.

Abbildung 5 zeigt die berechnete 24h-Standardabweichung der Fehler im Testgebiet für die Jahre 2018 & 2019. Abbildung 5 a) zeigt dabei die Standardabweichung der Referenzsimulation. Im Testgebiet liegt die Standardabweichung der Fehler (CRMSE) zwischen  $0.16\text{ m}$  und  $0.24\text{ m}$  (vgl. Tabelle 1). Die statistischen Größen berechnen sich dabei mit Hilfe von Beobachtungsdaten von Pegelonline, dem gewässerkundlichen Informationssystem der WSV ([www.pegelonline.wsv.de](http://www.pegelonline.wsv.de)). Ausgewertet wurden aus-

schließlich unabhängige Pegelstandorte, d.h. keine MOS-Pegel die als 'Stützstellen' für das Korrekturverfahren dienen. In [Abbildung 5 b](#)) ist der cRMSE der MOS\_sf Simulation (interpolierte MOS-Korrektur-Vorhersage) dargestellt. Die Standardabweichung der Fehler beträgt  $0.09m$  bis  $0.19m$  (vgl. [Tabelle 2](#)). Der cRMSE ist deutlich niedriger als in der Referenzsimulation. [Abbildung 5 e](#)) zeigt den Unterschied zwischen REF und MOS\_sf. Im gesamten Testgebiet wurde die Standardabweichung reduziert (zw. ca.  $0m$  und  $0.15m$ ). Mit einem F-Test für jeden Punkt wurde die Reduktion auf Signifikanz untersucht. Es hat sich herausgestellt, dass im gesamten Gebiet im 95%-Konfidenzintervall eine statistisch signifikante Reduktion vorliegt. Die REA-Simulation (interpolierte MOS-Korrektur-Anwendung basierend auf Beobachtungsdaten) zeigt eine weitere Verringerung der Standardabweichung im Vergleich zu MOS\_sf ([Abbildung 5 c, f](#)). Dass die Standardabweichung in der Simulation mit Beobachtungsdaten nicht gegen null strebt zeigt, dass das Verfahren selbst nicht geeignet ist, eine komplett fehlerfreie Vorhersage zu liefern. Es bleibt eine Unsicherheit erhalten, auch wenn Beobachtungsdaten als Eingangsdaten vorliegen. Es ist zu erwarten, dass eine dichtere Datenlage, d.h. mehr Pegel, zu noch besseren Ergebnissen führen könnten.

Für die Schifffahrt ist es sinnvoll, die Unsicherheiten möglichst genau zu quantifizieren und bei der Vorhersage zusätzlich anzugeben. Daher sind in [Abbildung 6](#) und [Abbildung 7](#) die 95%- bzw. 5%-Perzentile dargestellt. So ist eine Aussage zum erwarteten Fehlerhorizont möglich. Das 5%-Perzentil gibt dabei den Wert an, unter dem 5% aller Fehler liegen. Die negativen Werte bedeuten, dass die Simulation einen niedrigeren Wasserstand vorausberechnet hat als tatsächlich eingetreten ist. Sie sind somit mit einer Unterschätzung des Wasserstands gleichzusetzen. Bei MOS\_sf liegt der mittlere Wert im Testgebiet bei etwa  $-0.18m$ . Durch das neue Verfahren werden die Wasserstände in 5% aller Fälle um  $0.12m$  bis  $0.45m$  unterschätzt. Dies ist eine deutliche Verbesserung im Vergleich zu REF, bei der das 5% Perzentil des Wasserstands großflächig zwischen  $-0.21m$  und  $-0.46m$  liegt. Lediglich für den Pegel Bake Z ergibt sich auch nach Anwendung des Korrekturverfahrens ein Wert von  $-0.45m$ . Hier verhindern offensichtlich lokale Besonderheiten eine stärkere Korrektur, jedoch werden die Ergebnisse der Referenzvorhersage auch nicht verschlechtert.

[Abbildung 6](#) zeigt die 95%-Perzentile, die als die Grenze zu den 5%-größten Fehlern, bei denen der Wasserstand zu hoch berechnet wurde, zu interpretieren sind. Bei REF liegt das 95%-Perzentil über das Testgebiet gemittelt bei  $0.37m$ . In 5% der Fälle ist der Wasserstand um  $0.26m$  bis  $0.49m$  niedriger eingetreten als vorhergesagt. Für die Schifffahrt sind diese Fälle besonders kritisch, denn eine Überschätzung des Wasserstands kann zu einer Gefahr werden, sofern die Fehler bei Niedrigwasser eintreten. Das 95%-Perzentil bei MOS\_sf liegt in einem niedrigeren Bereich ( $\sim 0.17m$ ), weist aber auch höhere Werte als  $0.2m$  (z.B. beim Osteriff) auf. Generell zeigt die Fehlerbetrachtung, dass MOS\_sf deutlich besser als REF abschneidet. Dennoch ist es wichtig, die bestehenden Unsicherheiten der Prognose zu berücksichtigen, um eine sichere Schifffahrt zu ermöglichen.

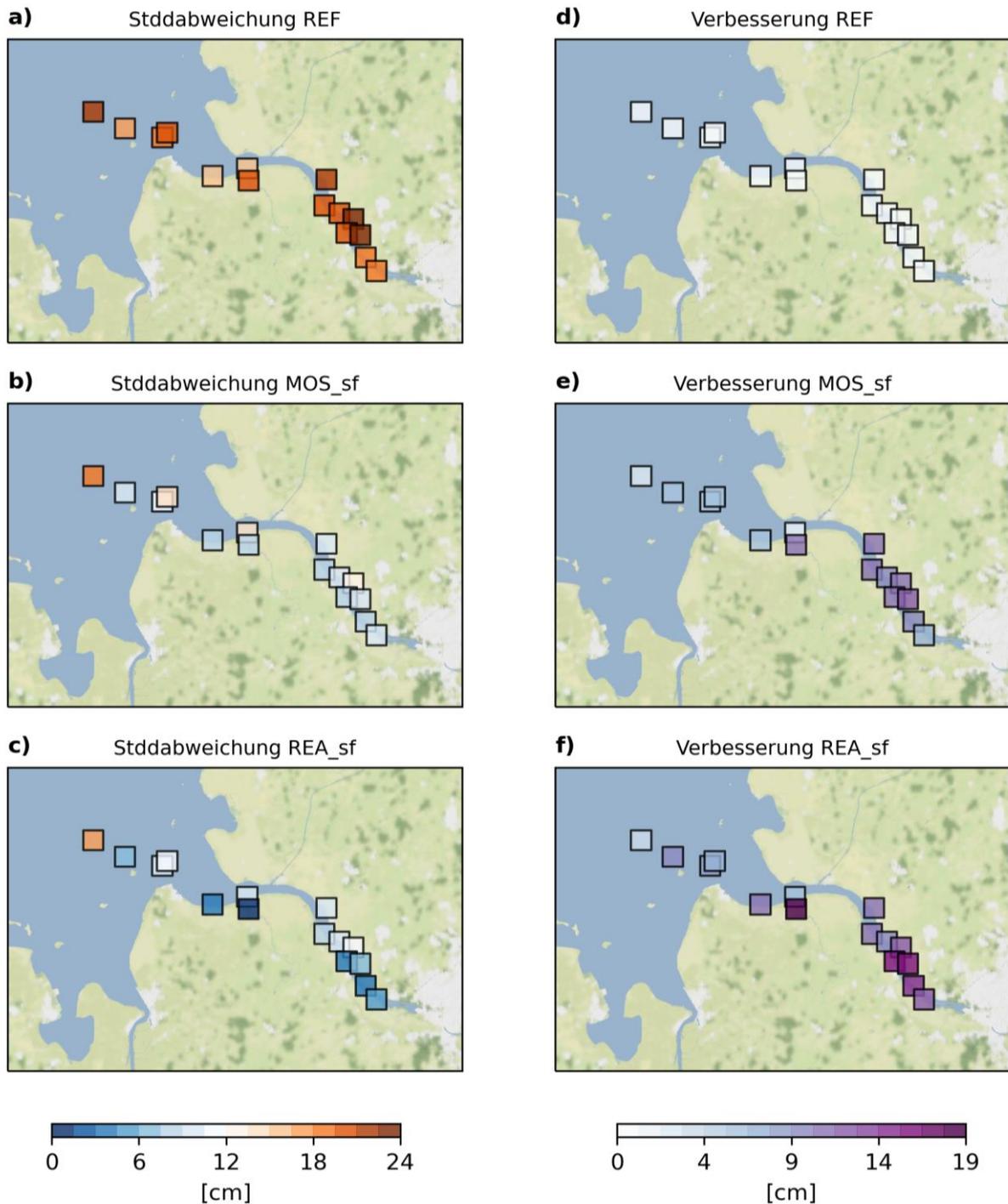
Ein Maß zur Bewertung der Verbesserung bietet der berechnete Score in [Tabelle 2](#). Er gibt das Verhältnis des Mean Squared Errors (MSE) der MOS-Korrektur-Methode zum MSE der Referenzsimulation an ( $1 - \text{MSE} / \text{MSE}_{\text{ref}}$ ). [Tabelle 2](#) zeigt eindeutig, dass für alle unabhängigen Standorte im Testgebiet in den ersten 24 Stunden der Vorhersage eine Verbesserung erzielt wurde. Dabei reicht der Score bis zu  $0.81$ , was einer Reduktion des MSE um 81% entspricht. Durchschnittlich wird der MSE im Testgebiet in den ersten 24 Stunden um 66% reduziert.

**Tabelle 1** Statistische Kenngrößen für unabhängige Pegelstandorte im Testgebiet für die **REFERENZ-Simulation** im Zeitraum vom 01.01.2018 – 01.01.2020, Coverage gibt die Datenabdeckung des Zeitraums in %, der Score gibt das Verhältnis des MSE zu Ref an ( $1 - \text{MSE}/\text{MSE}_{\text{ref}}$ ). Bei 0 identisch mit Ref, < 0 schlechter, > 0 besser als die Referenz, alle anderen Kennzahlen in Zentimetern

Names	Coverage [%]	Bias	Standardabweichung	5% Perzentil	95% Perzentil	Score
Osteriff	84.08	3	16	-22	26	0
Stör Sperrwerk	86.08	3	22	-31	42	0
Krautsand	86.55	7	20	-23	42	0
Kollmar	85.97	2	21	-29	40	0
Krückau Sperrwerk	62.81	8	24	-26	49	0
Grauerort	86.56	4	20	-25	41	0
Pinnau Sperrwerk	86.14	4	23	-28	46	0
Hetlingen	85.72	4	19	-24	39	0
Lühort	85.22	6	19	-21	39	0
Otterndorf	54.36	3	16	-24	29	0
Bake C	76.11	2	17	-26	31	0
Mittelgrund	82.82	7	19	-25	36	0
Bake Z	47.32	0	22	-46	32	0
Zehnerloch	50.23	7	20	-24	36	0
Belum	85.49	-2	20	-35	31	0
Average	76.36	3.87	19.87	-27.27	37.27	0

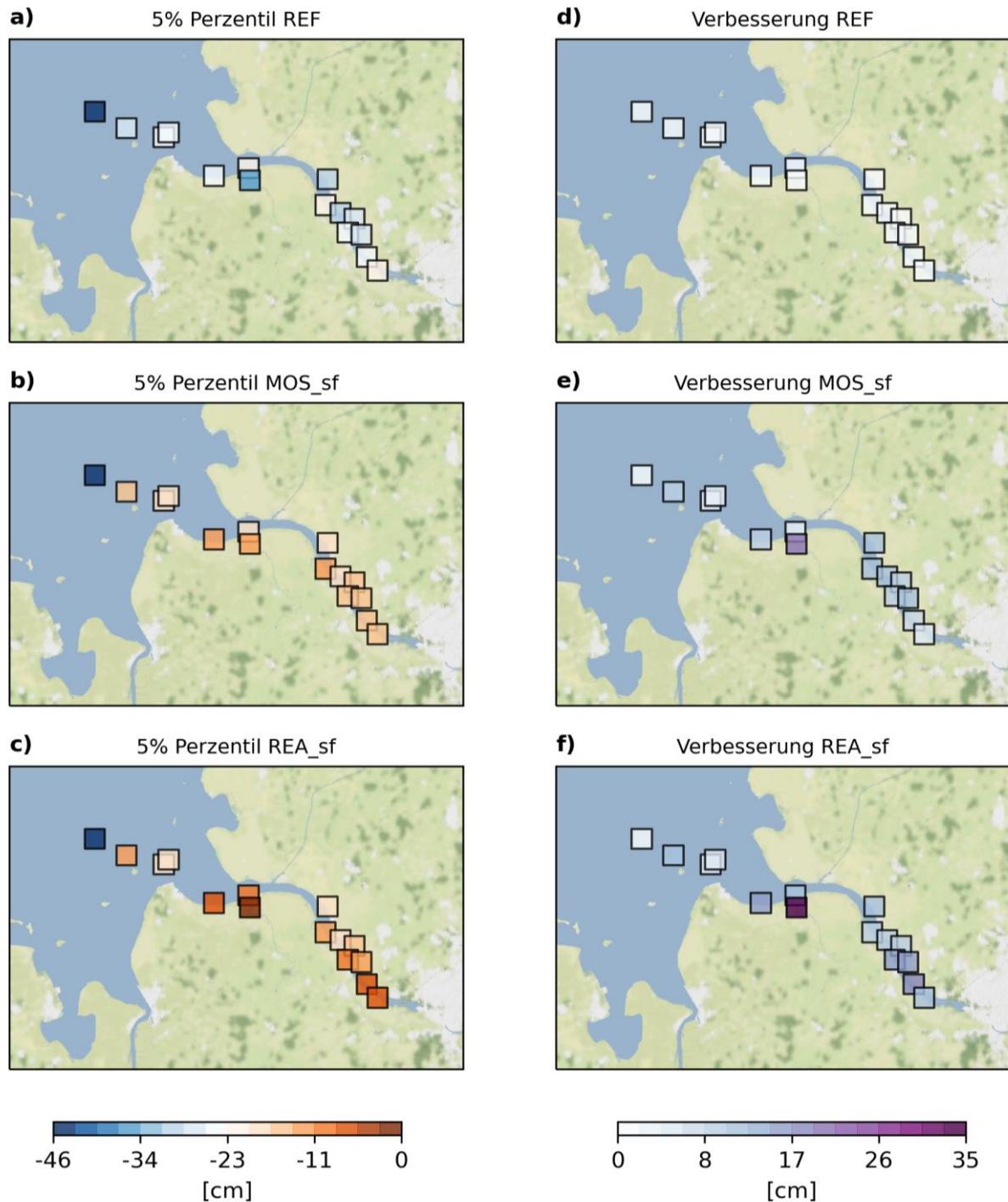
**Tabelle 2** Statistische Kenngrößen für unabhängige Pegelstandorte im Testgebiet für das **MOS\_sf** Verfahren im Zeitraum vom 01.01.2018 – 01.01.2020, Coverage gibt die Datenabdeckung des Zeitraums in %, der Score gibt das Verhältnis des MSE zu Ref an ( $1 - \text{MSE}/\text{MSE}_{\text{ref}}$ ). Bei 0 identisch mit Ref, < 0 schlechter, > 0 besser als die Referenz, alle anderen Kennzahlen in Zentimetern

Names	Coverage [%]	Bias	Standardabweichung	5% Perzentil	95% Perzentil	Score
Osteriff	84.08	4	14	-19	25	0.16
Stör Sperrwerk	86.08	-1	11	-18	17	0.74
Krautsand	86.55	2	9	-12	16	0.78
Kollmar	85.97	-2	11	-18	14	0.72
Krückau Sperrwerk	62.81	3	13	-16	21	0.72
Grauerort	86.56	-1	9	-15	13	0.81
Pinnau Sperrwerk	86.13	-1	10	-17	15	0.79
Hetlingen	85.72	-1	9	-16	11	0.78
Lühort	85.18	0	11	-16	16	0.7
Otterndorf	54.36	0	9	-14	14	0.72
Bake C	76.11	-1	10	-17	14	0.69
Mittelgrund	82.82	3	12	-20	21	0.59
Bake Z	47.32	-1	19	-45	22	0.26
Zehnerloch	50.23	2	14	-20	20	0.54
Belum	85.49	0	9	-14	13	0.82
Average	76.36	0.4	11.33	-18.47	16.8	0.66



**Abbildung 5.** Verbesserung der 24-Stunden-Vorhersage Standardabweichung der Fehler im Testgebiet. Standardabweichung der Fehler in den ersten 24h einer Simulation für eine tägliche Vorhersage im Jahr 2018 (linke Spalte). Verbesserung der Standardabweichung im Vergleich zur Referenz-Simulation (rechte Spalte). Numerisches Modell (a und d), Interpolierte MOS-Korrektur-Anwendung (b und e) und Interpolierte MOS-Korrektur-Anwendung mit Beobachtungsdaten (c und f).





**Abbildung 7** 5%- Perzentil der 24-Stunden-Vorhersage für verschiedene Simulationen. Perzentile in den ersten 24h einer Simulation für eine tägliche Vorhersage von 2018-2020. Numerisches Modell a), Interpolierte MOS-Korrektur-Anwendung b) und Interpolierte MOS-Korrektur-Anwendung mit Beobachtungsdaten c).

### 3.1.3.2 Erweiterung auf Modellgebiet mit gröberer Auflösung: südliche Deutsche Bucht

Die Korrekturfächen-Methode wurde auch außerhalb des Testgebiets auf eine tägliche Wasserstandsvorhersage im Gebiet der südlichen Deutschen Bucht angewandt. Auch hier konnte für den Untersuchungszeitraum 01.01.2018 - 01.01.2020 die numerische Modellvorhersage signifikant verbessert werden (vgl. [Tabelle 3](#)).

Bei der Betrachtung unabhängiger Pegel, d.h. der Pegel, für die keine MOS-Vorhersage existieren, wird eine mittlere Verbesserung des Bias von  $0.03\text{m}$  auf  $-0.02\text{m}$  erzielt. Die Korrekturmethode (MOS\_sf) führt zu einer Verbesserung von  $0.01\text{m}$  in Bezug auf die reine numerische Modellvorhersage (REF). Der ohnehin geringe systematische Fehler der Vorhersage wird leicht reduziert.

Der „centered root mean squared error (cRMSE)“ wird nahezu halbiert. Im Mittel beträgt der cRMSE der Vorhersage des numerischen Modells innerhalb der ersten 24 Stunden  $0.26\text{m}$ . Unter Einbeziehung der Korrekturfäche weicht die Vorhersage an unabhängigen Standorten im Mittel nur noch  $0.14\text{m}$  von der Beobachtung ab.

**Tabelle 3.** Gemittelte statistische Kennzahlen für unabhängige Beobachtungspunkte außerhalb des Testgebiets und der Elbe

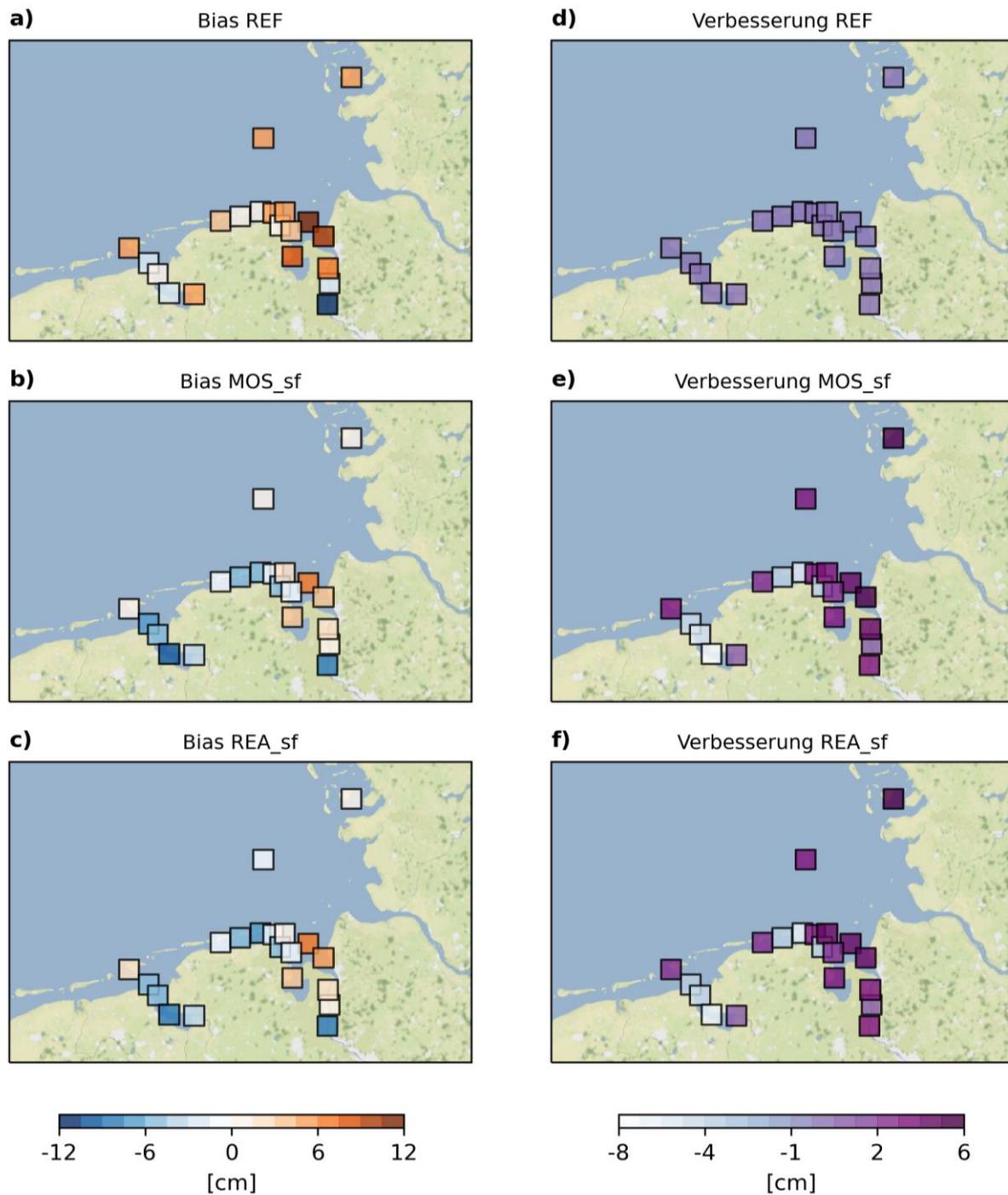
<b>Simulation</b>	<b>BIAS</b>	<b>cRMSE</b>	<b>5%-Perzentil</b>	<b>95%-Perzentil</b>
Numerisches Modell [REF]	0.03 m	0.26 m	-0.40 m	0.44 m
Mit Korrekturfäche [MOS_sf]	-0.02 m	0.14 m	-0.25 m	0.20 m
REA-Simulation [REA]	-0.02 m	0.11 m	-0.19 m	0.15 m

[Tabelle 3](#) zeigt neben MOS\_sf und REF Kennzahlen für die Auswertung einer Simulation mit Beobachtungsdaten [REA]. Dafür wurde die gleiche Methode wie für die Korrektur mit MOS verwendet, allerdings ergibt sich die Korrekturfäche aus Differenzen zwischen dem numerischen Modell und der tatsächlichen Beobachtung. Die REA-Simulation zeigt, dass noch ein Verbesserungspotenzial vorhanden ist (Bias:  $-0.02\text{m}$ , cRMSE:  $0.11\text{m}$ ), da der cRMSE-Wert kleiner als bei MOS\_sf ist. Der Unterschied zwischen REA und MOS\_sf ergibt sich lediglich aus der Güte der Eingangsdaten. Mit perfekten MOS-Vorhersagen könnte man somit an den unabhängigen Pegelstandorten außerhalb des Testgebiets einen mittleren Bias von  $-0.02\text{m}$  und einen mittleren RMSE von  $0.11\text{m}$  erreichen.

[Abbildung 8](#) zeigt den Bias der Vorhersage des numerischen Modells, der Korrekturmethode, sowie der Korrekturmethode mit Beobachtungsdaten anstelle der MOS-Prognose (REA) an unabhängigen Pegelstandorten. Der Bias wird durch die Korrekturmethode an vielen Standorten signifikant (95%-Konfidenzintervall) verbessert. Die interpolierte MOS-Korrektur-Anwendung mit Beobachtungsdaten zeigt weiterhin, dass durch die Nutzung von Beobachtungsdaten nur ein geringes zusätzliches Verbesserungspotenzial vorhanden ist.

[Abbildung 8](#) zeigt Standorte, bei denen die Methode gut funktioniert, sowie Bereiche in denen die Ergebnisse wahrscheinlich zu keinem verbesserten Ergebnis führen, bzw. sogar eine Verschlechterung des Bias hervorrufen (im Bereich der Ems). Bei den Nordfriesischen Inseln und dem Mündungsbereich der Weser kann die Vorhersage am deutlichsten verbessert werden. Hier ergibt sich eine signifikante

Reduktion des Bias von mehr als  $0.03m$ . Im Ems-Ästuar hingegen ist die Methode nicht geeignet, den Bias der numerischen Modellvorhersage zu reduzieren.



**Abbildung 8** Verbesserung des 24-Stunden-Vorhersage Bias in der Deutschen Bucht. Bias in den ersten 24h einer Simulation für eine tägliche Vorhersage im Jahr 2018 & 2019 (linke Spalte). Verbesserung des Bias im Vergleich zur Referenz-Simulation (rechte Spalte).

Im Rahmen der Verteilung der Häufigkeiten der auftretenden Fehler sind in [Tabelle 3](#) das 5% sowie das 95%-Perzentil der Fehlerhäufigkeiten angegeben. Die Perzentile haben für die Schifffahrt eine große Bedeutung, da im operativen Betrieb etwaige Unsicherheiten möglichst genau quantifiziert und bei der Bestimmung eines sicheren Navigationsbereichs berücksichtigt werden müssen. Bei MOS\_sf liegen 5% der auftretenden negativen Abweichungen zwischen  $-0.11m$  und  $-0.55 m$ . Über das Gesamtgebiet gemittelt unterschätzt MOS\_sf den Wasserstand in 5% der Fälle um etwa  $0.25m$ . REF unterschätzt den Wasserstand in 5% der Fälle um etwa  $0.40m$ . Auch hier liegt eine deutliche Verbesserung von MOS\_sf in Bezug auf die Referenz um  $0.15m$  vor. Das 95%-Perzentil zeigt ein ähnliches Bild. Bei MOS\_sf wird in 5% der Fälle der Wasserstand im Mittel um etwa  $0.20m$  überschätzt, wohingegen bei REF um  $0.44m$ . Der Unterschied zwischen MOS\_sf und REF liegt hier bei  $0.24m$ . Im Bereich der zu hoch vorhergesagten Wasserstände schneidet MOS\_sf im Vergleich zu REF noch einmal etwas besser ab als im Bereich der zu niedrig vorhergesagten Wasserstände.

[Tabelle 4](#) zeigt statistische Kenngrößen für alle unabhängigen Pegelstandorte außerhalb des Testgebiets. Es ist ersichtlich, dass alle Pegel ein besseres Ergebnis erzielen als die Referenz.

**Tabelle 4:** Statistische Kenngrößen für unabhängige Pegelstandorte im Testgebiet für das **MOS\_sf** Verfahren im Zeitraum vom 01.01.2018 – 01.01.2020, Coverage gibt die Datenabdeckung des Zeitraums in %, der Score gibt das Verhältnis des MSE zu Ref an ( $1 - \text{MSE}/\text{MSE}_{\text{ref}}$ ). Bei 0 identisch mit Ref, < 0 schlechter, > 0 besser als die Referenz, alle anderen Kennzahlen in CM

Names	Coverage [%]	Bias	cRMSE	5% Perzentil	95% Perzentil	Score
Borkum Südstrand	54.7	1	9	-13	15	0.64
Helgoland Südhafen	54.88	1	7	-11	12	0.72
Langeoog	54.05	-1	17	-33	23	0.19
Pellworm	54.41	0	19	-31	28	0.04
Spiekeroog	54.66	-5	12	-26	13	0.28
Emshörn	54.62	-7	9	-20	6	0.55
Dukegat	46.94	-6	11	-22	11	0.49
Knock	54.5	-10	13	-30	9	0.72
Pogum	54.15	-4	16	-26	19	0.75
Rechtenfleth	85.83	1	23	-38	33	0.86
Dwarsgat	54.88	7	19	-23	38	0.5
Robbensüdsteert	54.53	4	17	-26	31	0.76
Nordenham	54.73	2	32	-55	48	0.73
Elsefleth	54.81	-8	21	-38	24	0.76
WHV neuer Vorhafen	50.44	4	12	-15	22	0.82
Wangerooge West	46.67	-6	10	-23	9	0.44
Wangerooge Ost	51.31	-1	11	-16	13	0.58
Schillig	50.86	-5	10	-22	10	0.58
Mellumplate	51.89	2	10	-13	15	0.68
Hooksielplate	54.76	-1	10	-18	14	0.72
Average	54.68	-1.6	14.4	-24.95	19.65	0.59

[Tabelle 4](#) zeigt, dass für alle unabhängigen Standorte außerhalb des Testgebiets in den ersten 24 Stunden der Vorhersage eine Verbesserung erzielt wurde. Dabei reicht der Score von 0.04 bis zu 0.86, was einer Reduktion des MSE um 4% - 86% entspricht. Durchschnittlich wird er auch außerhalb des Testgebiets in den ersten 24 Stunden um 60% reduziert.

### 3.1.4 Fazit zur Generierung von dynamischen Wasserstandsflächen

Die in den vorherigen Abschnitten vorgestellte Methode zur Optimierung flächenhafter operationeller Wasserstandsvorhersagen hat sich, wie durch umfangreiche statistische Auswertung belegt, im untersuchten Zeitraum bewährt. Für das Projekt ImoNav stellt das Verfahren eine wichtige Grundlage zur routinemäßigen Bereitstellung qualitativ hochwertiger ozeanographischer Daten dar. Die Methode hat insbesondere im Testgebiet deutlich höhere Genauigkeiten als das zugrundeliegende Referenzverfahren erzielt. Daher bietet sich an, die gewonnenen Daten als Grundlage zur automatischen Kombination der Wasserstands- und Tiefendaten zu verwenden.

Während der Projektlaufzeit wurden deshalb alle Arbeitsschritte zur Generierung von dynamischen Wasserstandsflächen automatisiert und in einen prä-operationellen Betrieb überführt. Die Vorhersagedaten werden dabei im stündlichen Abstand an neue MOS-Prognosen angepasst. Der Austausch der Ergebnisse erfolgt über den FTP-Server des BSH. Dabei werden die Daten teilweise schon in IHO-kompatiblen Formaten (S-104, S-111) ausgeliefert (siehe 3.2).

Am Ende von ImoNav steht somit ein Verfahren zur Verfügung, mit dem für die Schifffahrt und weitere Anwendungen kontinuierlich und automatisiert optimierte flächenhafte Wasserstandsvorhersagen berechnet werden. Diese Wasserstandsprognosen stellen einen entscheidenden Teil des kontinuierlichen Datenflusses in ImoNav dar.

## 3.2 IHO-kompatible Wasserstands- und Strömungsdaten sowie Bereitstellung und Aufbereitung weiterer ozeanographische Daten

### 3.2.1 Einleitung

Ein weiterer fachlicher Schwerpunkt der Arbeiten des BSH im Projekt ImoNav (Arbeitspaket 2) liegt auf der Bereitstellung von ozeanographischen Daten in einem IHO-kompatiblen Format. Die IHO beschreibt die Entwicklung des S-100 IHO *Universal Hydrographic Data Model* [10] als raumbezogenen hydrographischen Datenstandard, der eine Reihe von digitalen hydrographischen Datenquellen unterstützt und an andere raumbezogenen Standards (ISO19100 [11]) angelehnt ist. Die Standardisierung ermöglicht eine einfache Integration von hydrographischen Daten in Anwendungen und raumbezogene Dienste (z.B. für die Navigation). Das Hauptziel des Daten-Modells ist es, verschiedenste hydrographische Datenquellen, Produkte und Anwender zu unterstützen. Auf Grundlage des Standards S-100 müssen zunächst Spezifikationen für verschiedene Parameter (z.B. Strömungen) erarbeitet werden, die die Eigenschaften und Besonderheiten des Parameters sowie Nutzeranforderungen gleichermaßen berücksichtigen. Für die Integration von hochaufgelösten marinen Geodaten in elektronische Navigationssysteme ist der IHO-Standard S-100 von zentraler Bedeutung. Das BSH hat während der Projektlaufzeit und darüber hinaus aktiv in der IHO-Arbeitsgruppe „TWCWG (*Tides, Waterlevel, Currents Working Group*)“ an den Spezifikationen für Strömungen (S-111) und Wasserstände (S-104) mitgearbeitet.

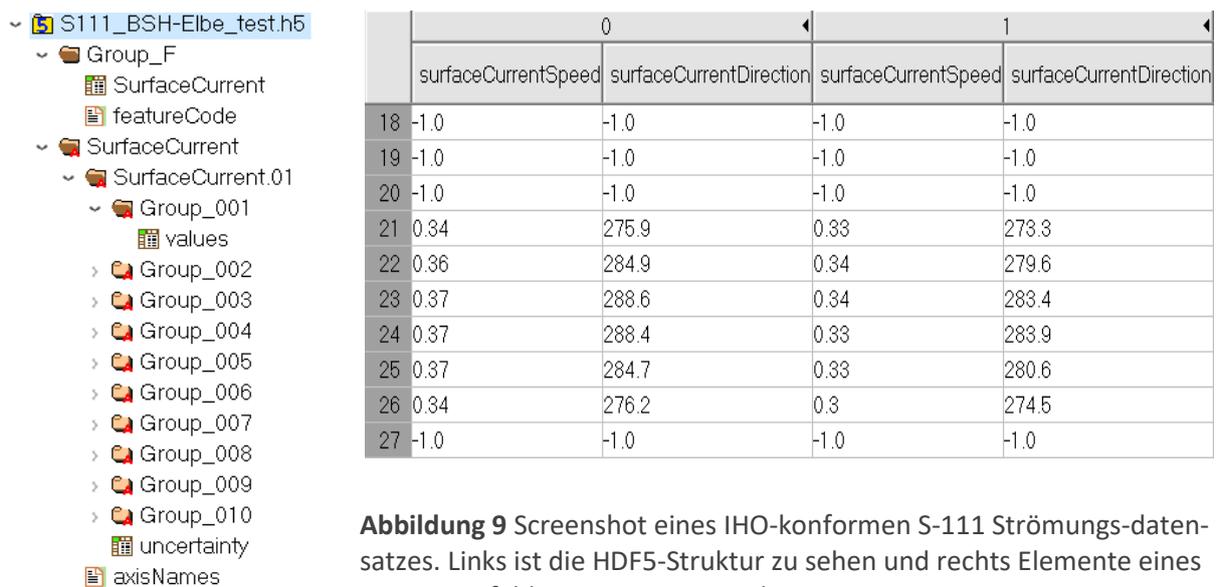
TWCWG hat die Zielsetzung, hydrographische Themen, die mit Gezeiten, Wasserständen und Strömungen zusammenhängen, zu bearbeiten und S-100-Spezifikationen für Wasserstände und Strömungen zu entwickeln.

### 3.2.2 Vorgehen

Einen globalen Datenstandard für spezielle Parameter wie Wasserstände oder Strömungen zu entwickeln, erfordert zahlreiche Arbeitsschritte. Zunächst steht die Entwicklung der parameterbezogenen Spezifikationen im Vordergrund, um einen geeigneten Standard für die Anforderungen der einzelnen Parameter zu erzielen. Hierbei ist es wichtig, Besonderheiten der Parameter zu berücksichtigen und die Perspektive des Anwenders einzunehmen. Ein Teil der Arbeiten, die im Rahmen von ImoNav kontinuierlich vorgenommen wurden, war es, Test-Datensätze zu erstellen. Mit Hilfe dieser Datensätze können Anforderungen an den Standard einfacher identifiziert werden, die wiederum in der Arbeitsgruppe TWCWG zu einer Verbesserung und Weiterentwicklung der Produktspezifikation genutzt werden können.

#### 3.2.2.1 Strömungen (S-111)

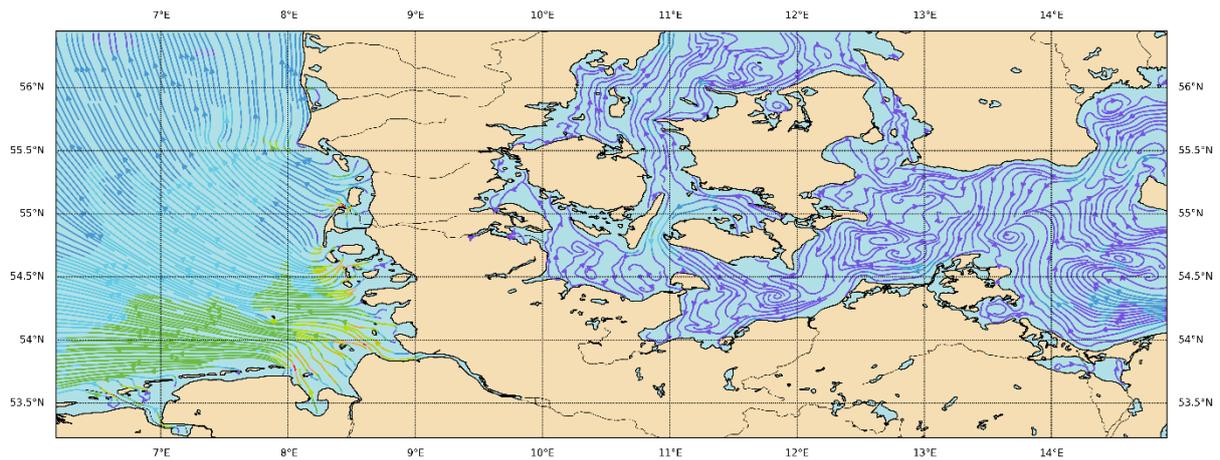
Die während der Projektlaufzeit und unter Mitarbeit des BSH fertiggestellte Spezifikation S-111 (Ed.1.0.0) [11] konnte für die Erstellung von IHO-konformen Strömungsdatensätzen (s. [Abbildung 9](#)) genutzt werden.



	0		1	
	surfaceCurrentSpeed	surfaceCurrentDirection	surfaceCurrentSpeed	surfaceCurrentDirection
18	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0
19	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0
20	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0
21	0.34	275.9	0.33	273.3
22	0.36	284.9	0.34	279.6
23	0.37	288.6	0.34	283.4
24	0.37	288.4	0.33	283.9
25	0.37	284.7	0.33	280.6
26	0.34	276.2	0.3	274.5
27	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0

**Abbildung 9** Screenshot eines IHO-konformen S-111 Strömungsdatensatzes. Links ist die HDF5-Struktur zu sehen und rechts Elemente eines Strömungsfelds zu einem Zeitpunkt

Die in ImoNav entwickelte Software zur Umwandlung des Modell-Outputs in das IHO-konforme Format S-111 ist in der Lage, automatisiert zweidimensionale Felder von Strömungsdaten in HDF5 umzuwandeln und mit den benötigten umfangreichen Metadaten auszustatten. HDF5 (**H**ierarchical **D**ata **F**ormat **5**) ist ein vielseitiges Datenformat, das sehr komplexe Datenobjekte und eine Vielzahl von Metadaten aufnehmen kann. Die Verwendung von HDF5 ist durch den S-111-, S-104- und S-102-Standard der IHO vorgegeben. Um die Daten auf Plausibilität zu überprüfen, wurde im Rahmen des Projekts ein weiteres Programm geschrieben, das die Visualisierung der erstellten Datensätze ermöglicht (s. [Abbildung 10.](#)).

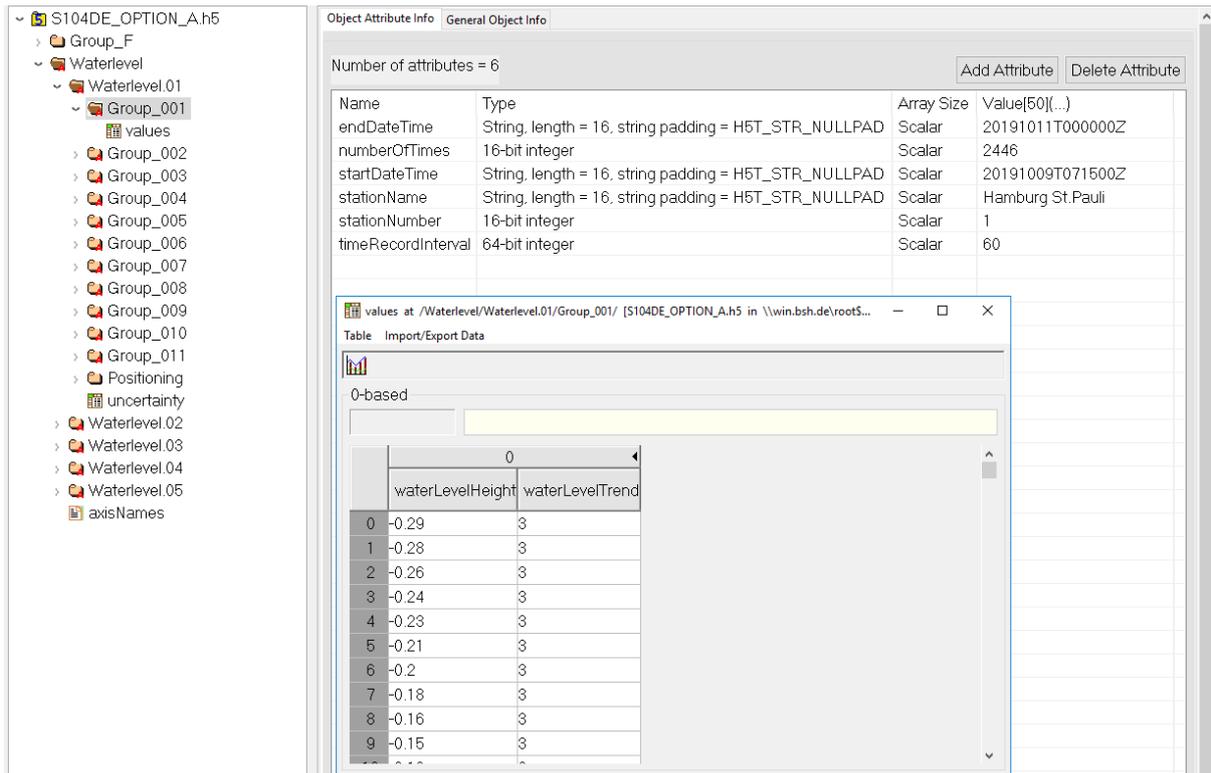


**Abbildung 10** Momentaufnahme der Strömungsverhältnisse in der Deutschen Bucht und westlichen Ostsee als Stromliniendarstellung eines S-111 Datensatzes

### 3.2.2.2 Wasserstandsdaten (S-104)

Während der Projektlaufzeit wurde im Rahmen der TWCWG an einer vorläufigen Spezifikation S-104 (Ed.0.0.6) für die Erstellung von IHO-konformen Wasserstandsdatensätzen mitgewirkt. Hierzu arbeitete das BSH intensiv und in internationaler Abstimmung an der technischen Entwicklung des HDF5-Encodings. Es wurde ein Programm erarbeitet, das die Umwandlung des BSH-Modell-Outputs in IHO-konforme Datensätze ermöglicht. Da zum jetzigen Zeitpunkt die Spezifikation noch nicht endgültig verabschiedet wurde, mussten Annahmen zu nicht eindeutig festgelegten Attributen getroffen werden. Insgesamt konnten aber bereits erste HDF5-Testdaten in der korrekten Struktur erstellt werden. Durch Erstellung der Testdatensätze und eine rege Diskussion mit der Arbeitsgruppe, konnten Schwierigkeiten bei der Spezifikation aufgedeckt und diese weiter verbessert werden.

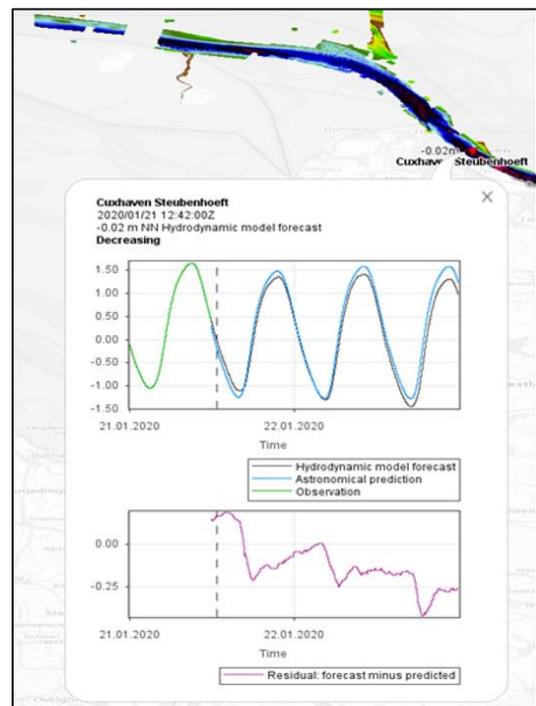
Für Zeitreihen-Daten wurden bereits erste Testdatensätze produziert. Sie beinhalten Beobachtungsdaten, MOS-Korrektur-Vorhersagedaten sowie die astronomische Vorausberechnung für verschiedene Pegelstandorte. Die Spezifikation ermöglicht es, die verschiedenen Zeitreihen in einer Datei abzulegen. Ein umfangreicher Meta-Datensatz, der innerhalb der Datei gespeichert wird, erlaubt die eindeutige Beschreibung der zu Grunde liegenden Daten. Im Rahmen des Projekts wurde ein Programm entwickelt, das aktuelle Beobachtungsdaten, sowie die zeitlich anschließenden Vorhersagedaten sammelt, auf Qualität prüft und in den neuen Datenstandard automatisch überführt. [Abbildung 11](#) zeigt ein Beispiel für das Encoding nach S-104 Ed. 0.0.6.



**Abbildung 11** Screenshot eines IHO-konformen S-104 Wasserstandsdatensatzes. Links ist die Struktur zu sehen und rechts unten Vorhersagewerte für Wasserstand und Trend für den Pegel Hamburg St. Pauli.

Die vorliegenden Entwürfe der Produktspezifikation sehen keine flächenhaften Darstellungen von Wasserstandsdaten vor. Dagegen ist es für Nutzer von besonderem Interesse, dass an ausgewählten Punkten Wasserstände und deren Trends als Zeitreihe graphisch dargestellt werden.

Abbildung 12 zeigt die Umsetzung der in der Spezifikation vorgesehenen Darstellung punktueller Wasserstandsvorhersagen von smile consult. Als Beispiel wird dort die Vorhersage für Cuxhaven anhand eines sogenannten "pick-reports" aus einem Web-Map-Service (WMS) gezeigt. Die zu Grunde liegende S-104-Datei enthält Beobachtungsdaten (grün), die astronomische Vorausberechnung (blau), sowie die in ImoNav entwickelte MOS korrigierte Vorhersage (schwarz). Im unteren Teil des "pick-reports" ist der Unterschied zwischen der astronomischen Vorausberechnung und der Vorhersage dargestellt (magenta).



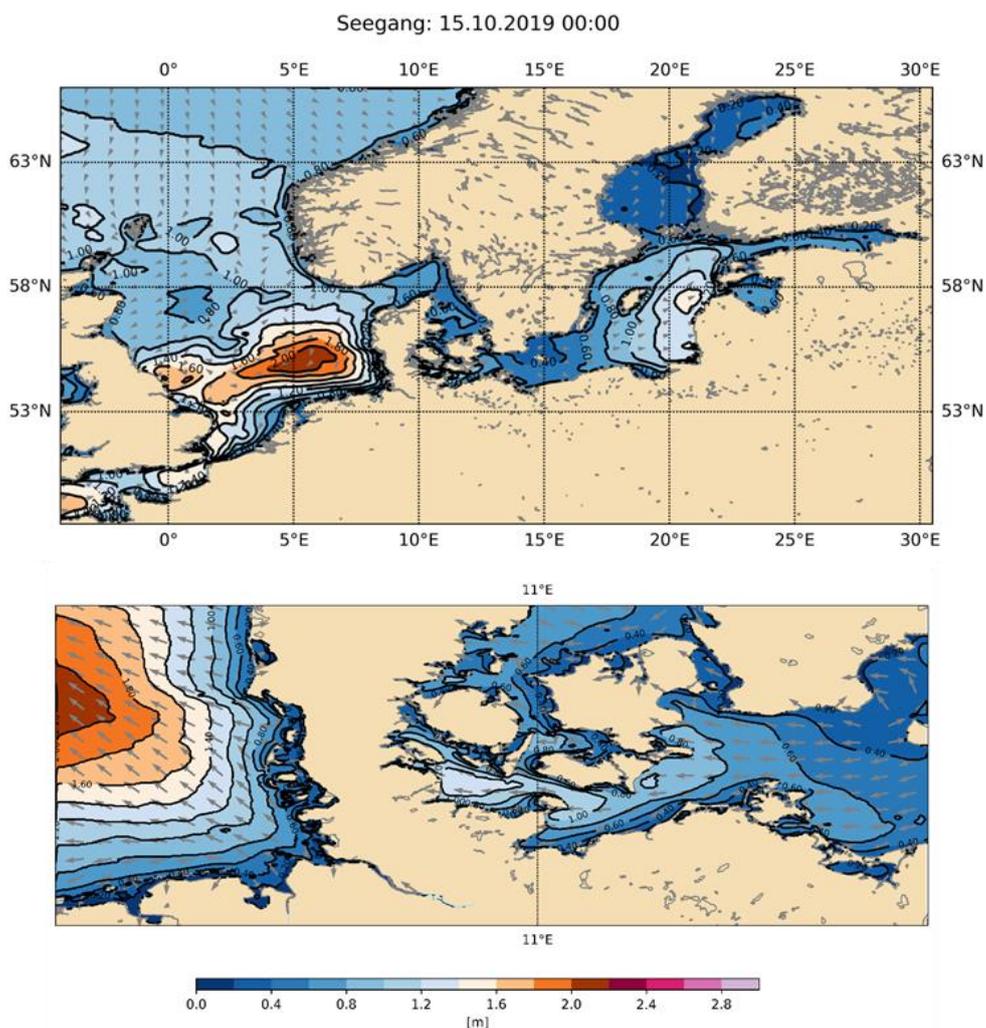
**Abbildung 12** Screenshot aus einem in ImoNav entwickelten WMS mit der Darstellung eines „pick reports“

### 3.2.3 Weitere ozeanographische Daten

Generell ist die Integration von marinen Geodaten in elektronische Navigationssysteme nicht auf Strömungen und Wasserstände beschränkt. Es gibt weitere Parameter, die sowohl für die Routenplanung als auch Sicherheit auf dem Meer von Bedeutung sind. Hierbei ist insbesondere der Seegang zu nennen, allerdings sind Informationen über die Wassertemperatur und Dichte auch von Interesse, da sich diese Parameter auf den Tiefgang eines Schiffes auswirken. Während der Projektlaufzeit wurde zwar international an den Spezifikationen S-413 für Seegang (und weitere meteorologische Parameter) gearbeitet, allerdings befindet sich die Entwicklung des Encodings erst in der Planung. Entsprechende Produktspezifikationen liegen nicht vor. Daher konnte das BSH noch keine S-413-konformen Datensätze erstellen. Die zweimal täglich zur Verfügung gestellten Datensätze entsprechen daher vorerst dem NetCDF-Format, das als Standard in der Ozeanographie weltweit verbreitet und anerkannt ist und auch in der Modell-Gruppe des BSH verwendet wird.

#### 3.2.3.1 Seegang

In [Abbildung 13](#) sind Seegangs-Vorhersagedaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) dargestellt. Diese könnten zukünftig in den ImoNav-Workflow integriert werden. Eine Darstellung in ECDIS ist mit Fertigstellung der S-413-Spezifikation ebenfalls möglich.

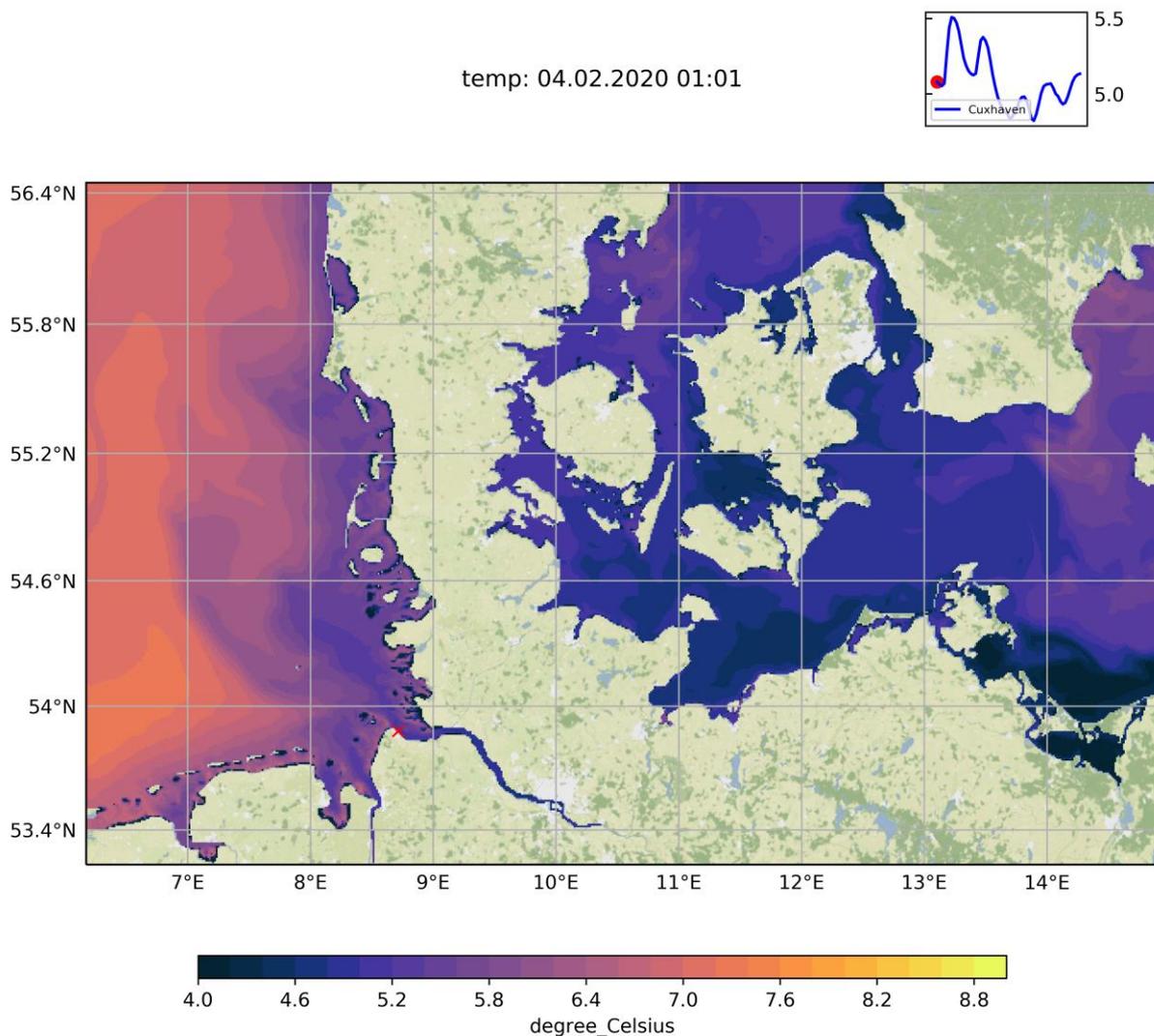


**Abbildung 13** Seegangsvorhersage für das Küstengebiet (unten), sowie die erweiterte Region (oben)

### 3.2.3.2 Oberflächen-Temperatur

In [Abbildung 14](#) sind beispielhaft Temperaturen der Meeresoberfläche dargestellt, die mit dem operationellen Modell des BSH täglich vorhergesagt werden. Angaben zu Wassertemperaturen sind, wie oben erwähnt, für die Beladung und den Tiefgang von Schiffen von besonderer Bedeutung.

Die BSH-Daten liegen ebenfalls im NetCDF-Format vor und wurden erfolgreich in den ImoNav-Workflow integriert. Die Wassertemperaturprognosen werden ebenfalls zweimal täglich aktualisiert. Eine Darstellung in ECDIS ist mit Fertigstellung der S-413-Spezifikation möglich.



**Abbildung 14** Wassertemperaturvorhersage für das Küstengebiet

### 3.2.4 Fazit zu IHO-kompatiblen Daten

Die Arbeiten im Bereich der Wasserstands- und Strömungsdaten während der Projektlaufzeit waren in der Umsetzung der IHO-Kompatibilität sehr produktiv und erfolgreich. Durch die Arbeit in der TWCWG konnte während der Projektlaufzeit in Zusammenarbeit mit IHO-Partnern eine überarbeitete und verbesserte Version der S-111-Spezifikation erstellt werden, nach der am Ende des Projektes prä-operationell Daten im neuen Format bereitgestellt wurden. Die Strömungsdaten konnten exemplarisch in

die PPU integriert werden (siehe 6). Der aktuelle Entwicklungsstand der S-104-Spezifikation für Wasserstände liegt zeitlich hinter der Entwicklung der S-111-Spezifikation zurück. Das BSH wirkte im Rahmen von ImoNav an der Entwicklung einer ersten Version von S-104 mit und hat bereits Testdatensätze erstellt. Da das Encoding für die HDF5-Daten allerdings bisher auf die Zeitreihen-Daten beschränkt und noch nicht abschließend abgestimmt ist, war es während der Projektlaufzeit nicht möglich, Rasterdaten im S-104-Format zu erstellen. Für weitere ozeanographische Daten gibt es zum jetzigen Zeitpunkt noch keine Spezifikation, die in ImoNav verwendet werden konnte. Die Entwicklung der S-413-Spezifikation geht über den Rahmen des Projekts hinaus, da sie auch zahlreiche meteorologische Daten umfasst. Daher werden die Daten vorläufig im NetCDF4-Format bereitgestellt. Eine Umwandlung in HDF5 kann mit Fertigstellung der S-413-Spezifikation erfolgen.

Zusammenfassend befindet sich die Bereitstellung von ozeanographischen Daten nach dem S-100-Datenstandard auf einem guten Weg und konnte in den Fällen der Strömungs- sowie Wasserstandsdaten in ImoNav bereits erfolgreich in den Workflow integriert werden. Bei der Entwicklung der Produktspezifikationen und IHO-konformer Testdatensätze hat Deutschland, nicht zuletzt mit Unterstützung durch ImoNav, zusammen mit den USA, Kanada und Korea eine Vorreiterrolle eingenommen.

## 4. Bathymetrische Daten

### 4.1 Aufgabenstellung

Die Projektaufgabe des Nautischen Informationsdienstes des BSH war die Zusammenführung, Aufbereitung und IHO-standardkonforme Bereitstellung der hochaufgelösten, aktuellen sowie sich kontinuierlich verändernden bathymetrischen Daten für das Testgebiet der Elbe in Form eines Prä-operationalen Dienstes.

Bathymetrische Daten sind die gemessenen Tiefen von der Meeresoberfläche bis zum Meeresboden. Sie sind für den Nautiker sowohl bei der Routenplanung als auch beim Routenmonitoring unerlässlich. Eine sichere Schiffsnavigation kann nur mit aktuellen und zuverlässigen bathymetrischen Daten ermöglicht werden.

Im Projekt bilden die bathymetrischen Daten neben den ozeanographischen Daten eine weitere wesentliche Datenbasis für den zu entwickelnden Navigationsdienst für stark befahrene Seewasserstraßen.

### 4.2 Nautischer Informationsdienst des BSH

Die Aufgabe des Nautischen Informationsdienstes des BSH ist die Produktion und Bereitstellung von kartographischen und textlichen nautischen Publikationen für die Seeschifffahrt, welche fest im Seeaufgabengesetz (§1 Nr. 10 SeeAufgG) verankert ist. Das heißt, alle marinen Geodaten, die für diese Publikationen relevant sind, werden vom Nautischen Informationsdienst beschafft, ausgewertet, verarbeitet und für den Zweck einer sicheren Navigation bereitgestellt.

Die Darstellung des Tiefenbildes ist dabei ein wesentliches Inhaltselement der ausrüstungspflichtigen nautisch-kartographischen Publikationen, wie Elektronische Seekarte (ENC) oder Papierseekarte.

Die im Rahmen des Projektes bereitzustellende IHO-standardkonforme Bathymetrie ist ein neues hochaufgelöstes Datenprodukt, welches eigenständig oder in Kombination mit den ozeanographischen Daten als Ergänzung zu den oben genannten offiziellen Produkten genutzt werden kann. Gleichzeitig bildet sie aber auch die Grundlage für diese beiden Produkte, denn neben der Aktualität und Zuverlässigkeit, muss die Widerspruchsfreiheit aller an Bord eingesetzten Datenprodukte für ein und dasselbe Seegebiet als ein wesentliches Kriterium für eine sichere Navigation berücksichtigt werden.

Um die aktuellen und künftigen nautischen Produkte qualitätsgesichert und anforderungsgerecht herstellen zu können, ist es demzufolge notwendig, alle Produkte aus ein und derselben Datenbasis abzuleiten und einen einheitlichen Workflow zu schaffen.

Das Hauptaugenmerk im Rahmen des Projektes galt damit vor allem auch der Entwicklung eines effizienten Datenmanagements und eines zentralen, robusten sowie flexiblen Prozessablaufs für alle Produkte.

### 4.3 Datensituation

Im Bereich der deutschen Nord- und Ostsee sind verschiedene Behörden für die Erfassung von bathymetrischen Daten zuständig. Der Bereich der Bundeswasserstraßen wird von den Wasserstraßen- und Schifffahrtsämtern (WSÄ) regelmäßig gepeilt, das BSH ist für die kontinuierliche Vermessung im Bereich der Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) und im deutschen Hoheitsgebiet außerhalb der

Fahrwasser verantwortlich. In den Hafenbereichen werden die Daten durch die Hafenämter bzw. Hafenbetriebe erhoben. Je nach Beschaffenheit des Seegebietes, je nach wirtschaftlichen oder auch politischen Anforderungen wird mit unterschiedlichen Methoden vermessen. Die Vermessungsintervalle können entsprechend der Dynamik des Seegebietes dabei sehr unterschiedlich sein. In einigen Fahrwassern der Nordsee wird z.B. im 14-tägigen Rhythmus gepeilt.

Im Testgebiet der Elbe wurden die Daten des WSA Cuxhaven, WSA Hamburg und WSA Brunsbüttel sowie der eigenen BSH-Seevermessung verarbeitet.

Für den Projektzeitraum von 2017 bis Mai 2020 beläuft sich die Anzahl der erfassten und verarbeiteten bathymetrischen Datensätze auf 1155. Die vermessene Bathymetrie-Fläche beträgt dabei über 1700 km<sup>2</sup> und umfasst 1,45 Milliarden Tiefenangaben.

### 4.3.1 Aufnahmeverfahren

Die bei der Datenerhebung eingesetzten Vermessungsmethoden sind das Vertikalecholot, das Flächenecholot (Mehrfachschwinger), das Fächerecholot, sowie die Laserbathymetrie.

Je nach Vermessungsmethode sind die Messwerte räumlich sehr unterschiedlich verteilt, wie [Abbildung 15](#) und [Abbildung 16](#) verdeutlichen.

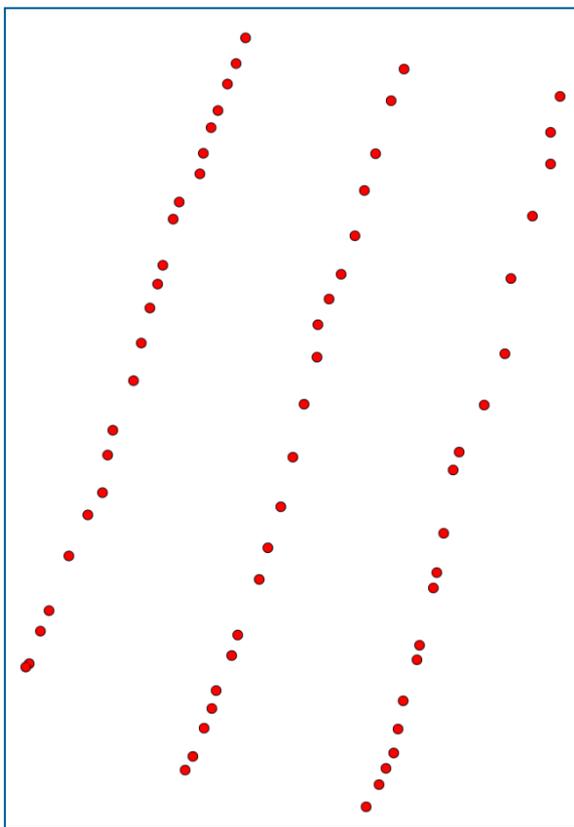


Abbildung 15 Vertikalecholot-Daten

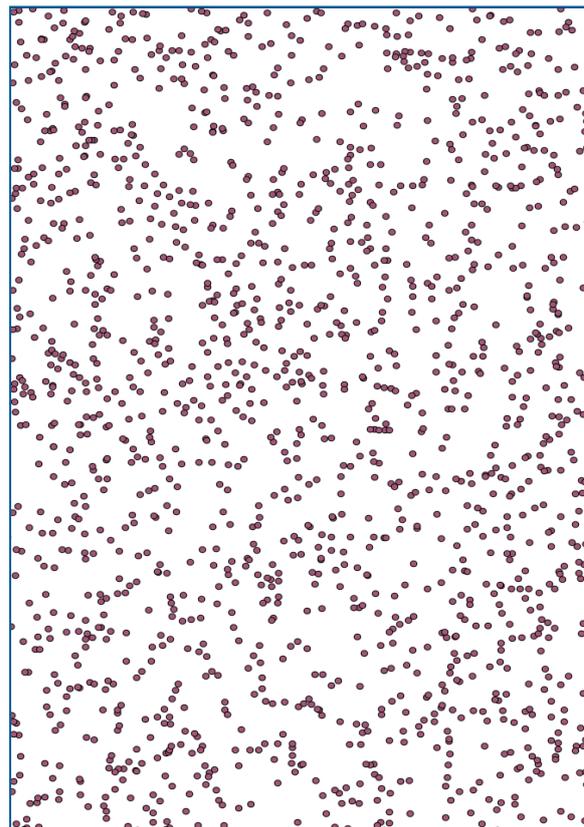


Abbildung 16 Fächerecholot-Daten

Vertikalecholot, Flächenecholot und Fächerecholot sind hydroakustische Messverfahren, bei denen die Tiefenwerte indirekt ermittelt werden. Dabei werden Schallsignale in einer bestimmten Frequenz zum Seegrund ausgesandt, von diesem reflektiert und von einem Sensor wiedererfasst. Die Entfernung vom Sensor zum Seegrund bzw. der Wert für die Tiefe wird über die Laufzeitmessung des Signals und die ermittelte Wasserschallgeschwindigkeit berechnet.

Das Vertikalecholotverfahren ist eine linienhafte Aufnahme des Meeresbodens ([Abbildung 15](#)). Die Aufnahmesensorik ist in den Bootsrumpf des Vermessungsschiffes eingebaut und liefert pro ausgesandtem Signal einen Tiefenwert. Damit ergeben sich linienförmig angeordnete Messwerte entlang der jeweils gefahrenen Profillinie. Die Messprofile werden in der Regel senkrecht zur vermuteten Gefällrichtung des Seebodens angeordnet, d.h. senkrecht zu den Tiefenlinien. Der Abstand der meist parallel angeordneten Messprofile ist abhängig von der Geländeunebenheit und der gewünschten Genauigkeit. Dieses Verfahren wird meist für die schnelle Erfassung der Seetopographie in größeren Flächen und in Gebieten hoher Veränderlichkeit gewählt. Der Nachteil hierbei ist, dass zwischen den Profilen keine Messwerte vorliegen und es damit schwieriger wird, flächenhafte Geländemodelle realitätsnah abzubilden.

Werden mehrere Aufnahmesensoren nebeneinander angeordnet wie bei dem Mehrfachschringer-System, können gleichzeitig mehrere parallele Lotlinien aufgenommen und damit bereits eine flächenhafte Aufnahme (Flächenecholot) des Meeresbodens erreicht werden. Das Verfahren wird insbesondere in sehr flachen Bereichen eingesetzt.

Beim Fächerecholotverfahren wird der Meeresboden mit einem Fächer quer zur Fahrtrichtung des Schiffes abgetastet. Die Lotprofile stellen Lotstreifen dar, deren Breite mit größerer Wassertiefe zunimmt. Werden die Profile überlappend gewählt, können die Messungen gegenseitig kontrolliert und eine insgesamt flächendeckende Aufnahme des Meeresbodens erzielt werden ([Abbildung 16](#)).

Die flugzeuggestützte Laserbathymetrie ist ein modernes Messverfahren, welches in Bereichen mit geringer bis mittlerer Wassertiefe und geringem Trübungsgrad in Ergänzung zu den zuvor genannten hydroakustischen Messverfahren zum Einsatz kommt. Es liefert wie das Fächerecholotverfahren auch flächendeckende Ergebnisse.

Die überwiegende Mehrheit der für das Testgebiet vorliegenden bathymetrischen Daten wurde mit dem Fächerecholotverfahren erhoben.

Die Daten werden von den Datenlieferanten jeweils vorprozessiert. Dies umfasst eine umfangreiche Plausibilitätsprüfung bzw. Fehleranalyse beispielsweise hinsichtlich systematischer Messfehler, der geforderten Messpunktdichte, des Messrauschens, vorhandener Bruchkanten und dergleichen mehr sowie eine Fehlerkorrektur.

### 4.3.2 Koordinatenreferenzsysteme

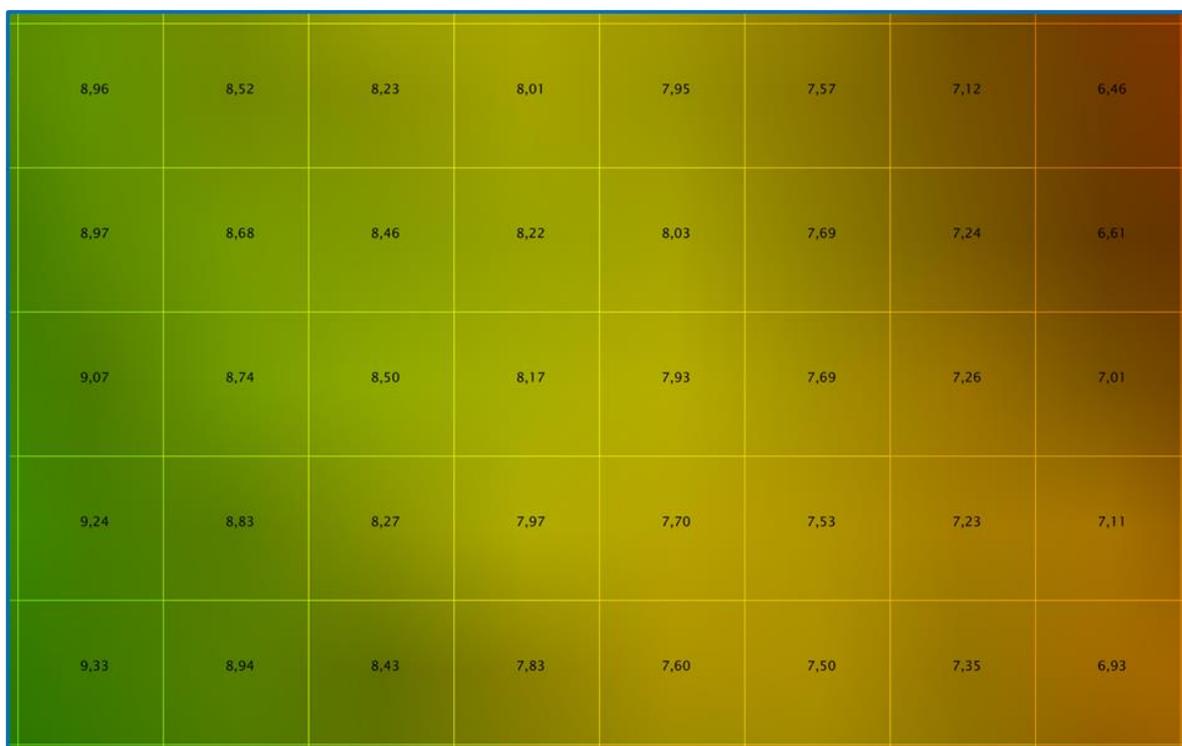
Die Koordinatenreferenzsysteme der verwendeten Messdaten entsprechen größtenteils dem seit 2016 in Deutschland gültigen geodätischen Raumbezug. Die Messdaten beziehen sich demzufolge auf das einheitliche amtliche Lagebezugssystem ETRS89 in Verbindung mit der Universalen Transversalen Mercator Projektion (UTM). Das Testgebiet befindet sich zwischen 8° und 9,5° östliche Länge, daher liegen die Messdaten im Bereich der UTM-Zone 32 und weisen den EPSG-Code 25832 (DE\_ETRS89/UTM32N) auf. Die Tiefenangaben entsprechen den aktuell gültigen Höhen im Deutschen Haupthöhennetz 2016 (DHHN2016).

Bei einzelnen Datensätzen gab es Abweichungen bezüglich des Lagebezugssystems. Sie lagen beispielsweise im System DHDN / 3° Gauss-Krüger-Zone 3 (EPSG-Code 31467) vor.

### 4.3.3 Datenstrukturen, Datenauflösung und Datenformate

Die erfassten bathymetrischen Daten wurden mehrheitlich von den Datenlieferanten bereits modelliert und lagen jeweils als regelmäßige Verteilung der Messpunkte in einem Gitter (Grid) vor. Die Struktur des Grids ist eine 2-dimensionale, rechteckige Matrix. Die Gesamtgröße einer Vermessung wird durch die Anzahl der Grid-Zellen und die Ausdehnung einer jeden Grid-Zelle auf der X- und Y-Achse bestimmt. Jede Grid-Zelle hat einen Zellenwert, der die Tiefe repräsentiert. (Abbildung 17)

Die Datenmodellierung erfolgte auf Basis der diskreten Messpunkte. Im Ergebnis stellt jeder eingegangene Datensatz ein Oberflächenmodell dar, welches den Seegrund bestmöglich abbildet. Die berechneten Tiefenwerte sind dabei keine Primärdaten mehr. Die bei der Modellbildung durchgeführten Prozessschritte und verwendeten Algorithmen können in Abhängigkeit der Aufnahmemethode und der Datenauflösung bzw. auch in Abhängigkeit der Morphologie des Seegrundes unterschiedlich sein.



**Abbildung 17** Grid-Daten

Der Umgang mit Datenlücken oder während der Vermessung erfassten Objekten variiert je nach Aufnahmemethode und Datenlieferant. Zielvorstellung war hier, kleine Datenlücken zu schließen sowie erfasste Objekte zu extrahieren und unabhängig vom Geländemodell zu speichern.

Die Bodenauflösung dieser strukturierten Daten wird mit der Gitterweite angegeben und beträgt 0.5m, 1.0m, 2.0m, 5.0m oder 10m. Der überwiegende Teil der verwendeten Datensätze hat eine Auflösung von 1.0m.

Einige wenige der eingegangenen bathymetrischen Datensätze waren nicht modelliert, sondern wurden als unstrukturierte Punktwolke der primären Messdaten bereitgestellt. Eine nachträgliche Modellierung ohne vollständige Rohdaten und Kenntnis der Vermessungsbedingungen hat zu nicht zufriedenstellenden Ergebnissen geführt.

Alle Messdaten lagen als Koordinatentripel im ASCII-Format vor, die zugehörigen Metadaten wurden als XMLs geliefert. Als relevante Metadaten wurden zusätzlich zu den Koordinatenreferenzsystemen das Aufnahmedatum mit Start- und Enddatum der Vermessung, der Datenlieferant und die Messmethode identifiziert. Ausschlaggebend dafür war, einerseits die im Projekt zu erzeugenden Datenprodukte in Übereinstimmung mit den ausrüstungspflichtigen ENC's zu bringen und eine kombinierte Nutzung der hochaufgelösten Bathymetrie mit den ENC's zu ermöglichen und andererseits die Rückverfolgbarkeit und Transparenz der Prozesskette sicherzustellen. Die Informationen waren für alle Datensätze verfügbar.

#### 4.3.4 Datenqualität

Die bei der Erfassung von bathymetrischen Daten maßgebenden Qualitätskriterien, wie z.B. Messgenauigkeiten, sind im IHO-Standard S-44 „IHO Standards for Hydrographic Surveys [13]“ in Form unterschiedlicher Anforderungskategorien für die jeweils verschiedenen Navigationszwecke definiert.

Die Qualität, d.h. die Genauigkeit der abgeleiteten Geländemodelle ist ebenso von diversen Einflussfaktoren abhängig, wie z.B. von der Beschaffenheit des Seegrundes, der Erfassungsmethode, dem Abstand der gemessenen Peillinien oder der gewählten Gridauflösung. Einen entsprechenden internationalen Standard mit einheitlich festgeschriebenen Modellierungsregeln und konkreten Genauigkeitskriterien gibt es derzeit nicht.

Die Datenlieferanten arbeiten jeweils nach eigenen Verfahrensanweisungen, die für alle Teilprozesse von der Datenaufnahme bis zur Datenbereitstellung definiert sind. Den Daten der WSV liegt beispielsweise das „Angewandte Qualitätsmanagement in der Gewässervermessung – aQua“ zugrunde, das für alle Gewässervermessungen der WSV verbindlich anzuwenden ist [14].

### 4.4 Vorgehen und Ergebnisse

#### 4.4.1 Aufteilung des Seegebietes mittels Kachelschema

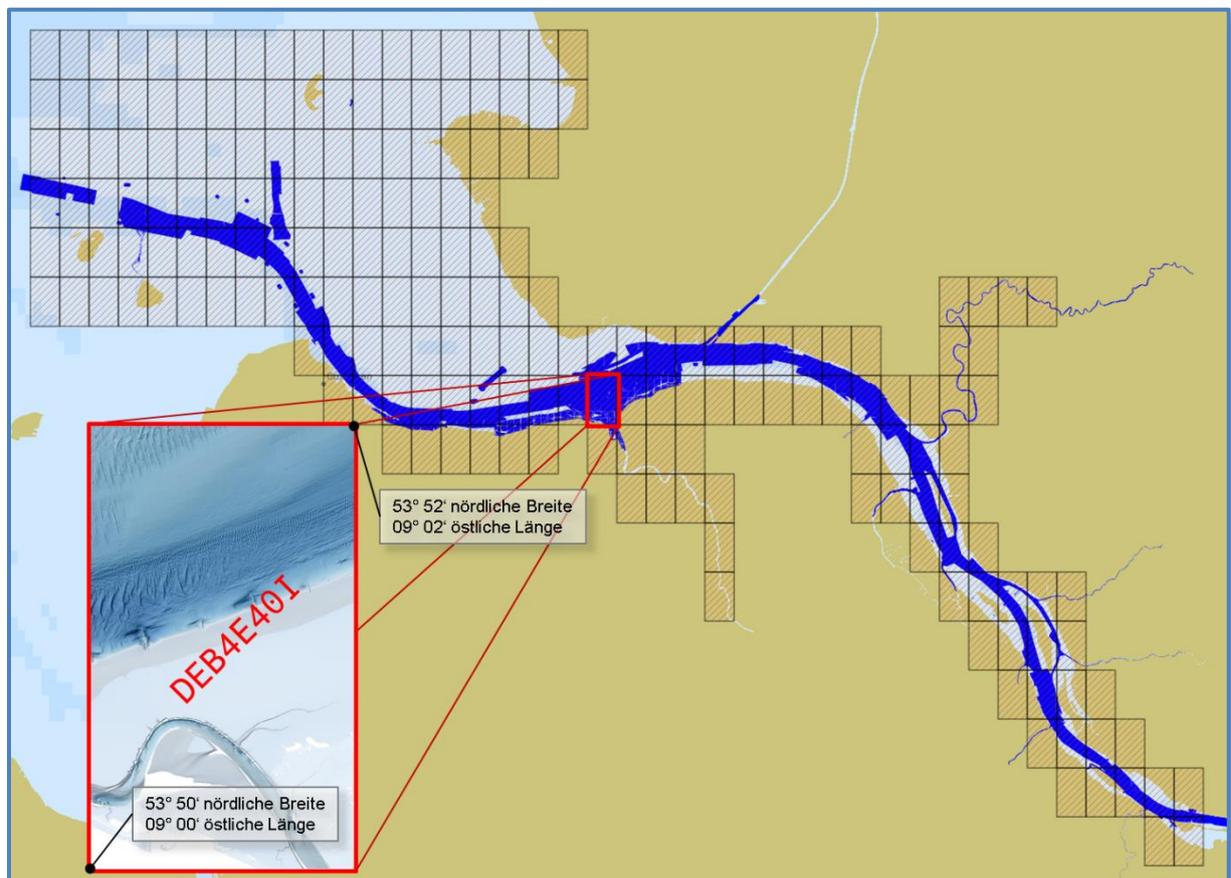
Für die Erreichung des Projektzieles, einen prä-operationellen Dienst der Bathymetrie einzurichten, welcher kontinuierlich IHO-standardkonforme Datenprodukte für die Navigation, aber künftig auch für andere Zwecke anbieten soll, war es erforderlich, ein geeignetes Blattschnittschema den Produkten zugrunde zu legen. Gleichzeitig sollte dieses mit den bestehenden ENC's in Übereinstimmung gebracht werden können. Eine weitere Bedingung war, das Datenvolumen pro Datenprodukt nicht zu groß werden zu lassen, um eine akzeptable Performance bei der Datenübertragung und Datenverarbeitung zu gewährleisten.

Die Aufteilung des gesamten deutschen Seegebietes durch ein rechtwinkliges Kachelschema mit jeweils geographischen Eckwert-Koordinaten und einer einheitlichen Kachelgröße von  $2' \times 2'$ , die eine Ausdehnung von ca. 2,2km in Ost-West-Richtung und ca. 3,7km in Nord-Süd-Richtung ergibt, wurde als geeignet eingeschätzt. Dazu wurde das bestehende Kachelschema dieser Art, welches bereits für die prototypische Produktion von bathymetrischen ENC's (bENC's) erstellt wurde, um das Testgebiet der Elbe erweitert. Bei diesem Schema sind die Kachelgrenzen so gewählt, dass diese immer auf geraden Vollminuten liegen. Auch bei den elektronischen Seekarten (ENC) wurde 2019 auf ein systematisches Kachelschema umgestellt, welches mehrere  $2' \times 2'$  Kacheln zusammenfasst, aber dieselben Grenzen verwendet. Die Erfahrungen mit den auf unterschiedlichen Produktarten abgestimmten Schemata können bei der in Entwicklung befindlichen europäischen Lösung hilfreich sein.

Für die Produktbezeichnung wurde ebenfalls die für die bENC geschaffene und an die Vorgaben der S-57 angelehnte Nomenklatur verwendet. Die Bezeichnung einer Kachel ergibt sich wie am Beispiel **DEB4E40I** (s. [Abbildung 18](#)) gezeigt, folgendermaßen:

- DE – Agency Code für das BSH
- B – Definition für die Spezifikation „Bathymetrie“
- 4 – Usage band „Approach“
- E – Bezeichnung des Seegebiets Elbe
- 40 – Spaltenkennzeichnung (2 Ziffern)
- I – Zeilenkennzeichnung (1 Buchstabe)

Das Testgebiet wird auf diese Weise mit insgesamt 207 Kacheln abgedeckt.



**Abbildung 18** Testgebiet unterteilt in Kacheln mit Beispiel DEB4E40I

#### 4.4.2 Entwicklung einer Dateninfrastruktur

Für die Speicherung, Bearbeitung und Bereitstellung der aktuellen Bathymetriedaten wurde ein Anwendungssystem entwickelt, das nach dem Client-Server-Modell ausgerichtet ist. Über eine webbasierte Benutzerschnittstelle kann auf die bathymetrischen Datenbestände zentral zugegriffen, können verschiedene Funktionen ausgeführt und die Daten in unterschiedlichen Formaten bereitgestellt werden (s. [Abbildung 19](#)).

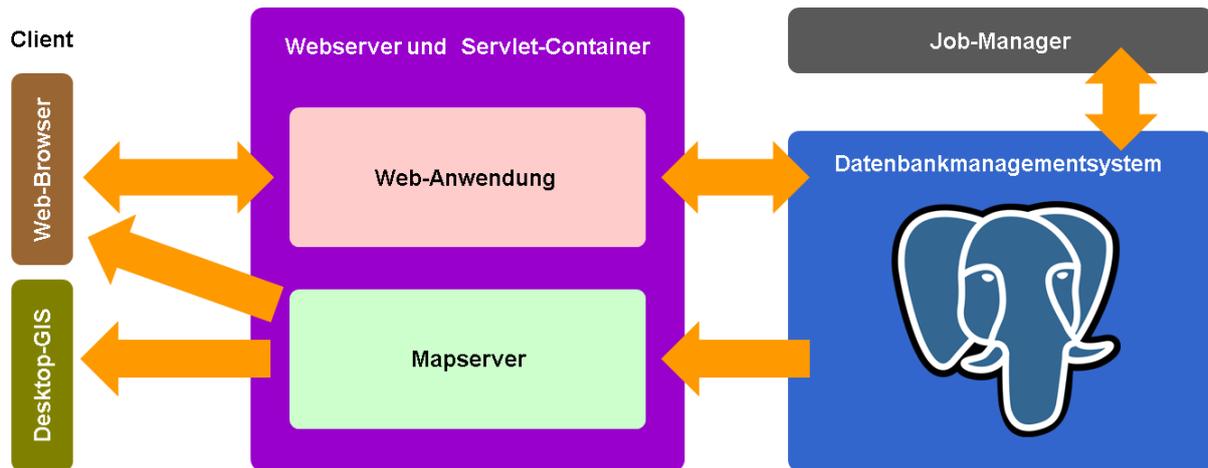


Abbildung 19 verwendete Softwarekomponenten

Um diese Daten im internen BSH-Netz verarbeiten zu können und sie gleichzeitig für diverse Zwecke interoperabel zu gestalten, wurde die Mapserver-Anwendung *GeoServer* implementiert. Die Interoperabilität wird durch die Verwendung von offenen Standards des Open Geospatial Consortium (OGC) sichergestellt. So lassen sich die Mess- und Metadaten mit Hilfe des GeoServers in Form von Geodatendiensten anwendungsübergreifend anbieten. Folgende Typen von Geodatendiensten wurden verwendet:

- WMS (Web Map Service)  
Dienst zur grafischen Visualisierung und Bereitstellung der Mess- und Metadaten im Rasterformat (zur Einbindung in Desktop- und Web-GIS Anwendungen)
- WFS (Web Feature Service)  
Dienst für den lesenden Zugriff auf die Metadaten und für die Datenweiterverarbeitung im Vektorformat (zur Einbindung in Desktop-GIS Anwendungen)
- WCS (Web Coverage Service)  
Dienst für den Zugriff auf das Geländemodell Coverage mit den Messdaten sowie zu deren weiteren Verarbeitung (zur Einbindung in Desktop-GIS Anwendungen)

Für die Datenhaltung wurde das Datenbankmanagementsystem *PostgreSQL* mit der Erweiterung *PostGIS* gewählt. Durch die Verwendung einer Datenbank kann sichergestellt werden, dass die Meta- und Messdaten konsistent zueinander gespeichert werden. Die Erweiterung *PostGIS* bietet ab der Version 2.0 die Möglichkeit, georeferenzierte Raster zu speichern. Diese wurde genutzt, um die Speicherung der modellierten Vermessungsdaten in Grid-Form vorzunehmen. Somit ist es nicht mehr erforderlich, für jeden Tiefenwert aus dem Grid auch die Koordinate (X- und Y-Wert) abzulegen, denn diese lässt sich aus der Georeferenzierung errechnen. Hierdurch wird Speicherplatz gespart und eine einfachere Weiterverarbeitung ermöglicht.

Die strukturelle Unterteilung der Datenbank erfolgt in 4 Hauptbereiche, die in [Abbildung 20](#) dargestellt sind.



**Abbildung 20** Struktur der Bathymetrie Datenbank

**Metadaten 3D-Datenarchiv:** In diesem Bereich werden Metadaten des 3D-Datenarchiv BWaStr (Bundeswasserstraßen) der WSV gespeichert. Er dient auch zur Recherche relevanter Vermessungsdatensätze der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes.

Zu den **Bathymetrie- und Verwaltungsdaten** gehören hauptsächlich die Meta-, Grid- und Messdaten aber auch die Kachelschemata. Der Umfang der Metadaten wurde auf ein Minimum für die Herstellung und Nachverfolgbarkeit von nautischen Produkten beschränkt, das Messanfangs- und -enddatum, die Vermessungsmethode und den Lieferanten. Alle automatisch eingehenden oder manuell eingestellten modellierten Messdaten in Grid-Form werden zunächst im *incoming*-Bereich im original bereitgestellten Lagebezug und Auflösung gespeichert. Nach einer Plausibilitätsprüfung werden die Daten in den *active*-Bereich der Datenbank verschoben. Sobald die Daten von aktuelleren Daten vollständig überdeckt sind, werden sie ins *archive* ausgelagert und werden nicht mehr für die Berechnung des Geländemodells verwendet. Kachelschemata werden sowohl für die Produkte (zuvor genannte 2'x 2' Kacheln), als auch für die Unterteilung des Digitalen Geländemodells (1km x 1km Kacheln) verwendet. Die Unterteilung dient der einfacheren Handhabbarkeit und der partiellen Aktualisierung.

Aus allen Grid-Daten im *active*-Bereich wird durch Harmonisierung (z.B. Lagebezugssystem, Grid-Auflösung) und Sortierung (Vermessungsenddatum) ein flächendeckendes **Digitales Geländemodell** berechnet und gespeichert.

Dieses Modell dient der Ableitung bathymetrischer Datenprodukte, wie bathymetrische ENC (bENC) oder S-102-Datenprodukt sowie für fachübergreifende Anwendungen, wie z.B. die Verknüpfung mit den im Kapitel 3 genannten ozeanographischen Daten in geeigneter und den internationalen Standards entsprechender Form. Die Verwaltung der dazugehörigen Metadaten (z.B. Edition-Nummer, Zeitstempel des letzten Exports) wird im Bereich der **Produktdaten** gespeichert.

Der eingesetzte Open-Source-Webserver *Apache Tomcat* bildet zusammen mit der *Web-Anwendung* die Schnittstelle zwischen dem *PostgreSQL* Datenbankserver und dem Nutzer mit Web-Browser.

Über den verwendeten Job Manager *Windows Task Scheduler* können Aufgaben, wie z.B. die Abfrage von neuen Daten der WSV zeitgesteuert und automatisiert abgearbeitet werden.

### 4.4.3 Workflow zur automatisierten Bearbeitung und standardkonformen Bereitstellung der bathymetrischen Daten

Der Workflow zur automatisierten Bearbeitung und standardkonformen Bereitstellung der hochauflösenden Bathymetrie umfasst die Prozessschritte des Dateneingangs, der Datenplausibilisierung, der Datenverarbeitung mit dem Ziel der Schaffung eines flächendeckenden Digitalen Geländemodells (DGM) und die Bereitstellung der Daten entsprechend des aktuellen Standards S-102 für die Verknüpfung mit den ozeanographischen Daten. Die Sicherung von Aktualität und Qualität war dabei eine wesentliche Anforderung.

#### 4.4.3.1 Dateneingang

Hauptquelle der im Testgebiet erfassten Daten sind Daten, die die WSV erhoben hat. Alle Daten der WSV werden zentral im sogenannten 3D-Datenarchiv BWaStr (Bundeswasserstraßen) archiviert und den Nutzern bereitgestellt. Der Datenbestand dieses Archivs umfasst die erhobenen Gelände- und Gewässerbett-Daten aller Wasserstraßen- und Schifffahrtsämter im gesamten Bundesgebiet. Das 3D-Datenarchiv ist eine webbasierte Anwendung, die vom IT-Dienstleister des Bundes (ITZ Bund) administriert wird.

Aufgrund des Umfangs und der Erfassungshäufigkeit der WSV-Daten sowie zur Sicherstellung einer konsistenten Datenübernahme wurde es als erforderlich angesehen, eine automatisierte Schnittstelle zwischen dem 3D-Datenarchiv und der eigenen Bathymetrie-Datenbank zu entwickeln. Durch das ITZ Bund wurden dafür die Voraussetzungen in Form von drei Geodatendiensten geschaffen:

- WFS für die Metadaten aller freigegebenen Vermessungsdatensätze
- WFS für die zurückgezogenen Datensätze (z.B. wegen gefundener Messfehler)
- REST-Schnittstelle für die Messdaten (als Textdatei mit XYZ Werten)

Aufgabe des Nautischen Informationsdienstes war es, die Verknüpfung zwischen dem 3D-Datenarchiv und der Bathymetrie-Datenbank herzustellen, eine kontinuierliche Abfrage des 3D-Datenarchivs nach den für das Testgebiet relevanten und neu eingestellten Datensätzen sowie deren Übernahme bzw. Weiterverarbeitung zu realisieren.

Dabei waren vier wesentliche Kriterien zu berücksichtigen:

1. Die Daten der WSV sind im 3D-Datenarchiv bundesweit für alle Wasserstraßen verfügbar und müssen für den Zuständigkeitsbereich gefiltert werden.
2. Die relevanten Metadaten sind für jeden Messdatensatz lückenlos zu übertragen.
3. Die eindeutige Rückverfolgbarkeit der aus dem 3D-Datenarchiv übernommenen Datensätze ist zu gewährleisten.
4. Teilweise werden Datensätze aus dem 3D-Datenarchiv zurückgezogen, wenn beispielsweise im Nachhinein Fehler festgestellt werden. Der Informationsfluss für diese Datensätze ist dabei sicherzustellen.

Mittels des Windows Task Scheduler werden mit einem Abfrageintervall von 5 Minuten die neu ins 3D-Datenarchiv eingestellten Datensätze über deren Metadaten abgefragt und mit den in der Bathymetrie-Datenbank bereits vorhandenen Metadaten abgeglichen (siehe [Abbildung 20](#)). In der [Tabelle 5](#) sind

die Metadaten aufgelistet, die für jeden Vermessungsdatensatz verfügbar sind. Werden über die gesetzte Filterung (Datenlieferant und gleichzeitig geographische Lage) neue relevante Datensätze festgestellt, dann erfolgt der Download dieser Messdatensätze sowie die Prüfung, ob es sich um strukturierte Daten (Grid-Daten) handelt und anschließend in den *incoming*-Bereich der Bathymetrie-Datenbank abgelegt.

**Tabelle 5** Vermessungsmetadaten vom 3D-Datenarchiv

Bezeichnung - Metadatum	Erläuterung	Beispiel
MID	ID im 3D-Datenarchiv (zur Sicherung der Rückverfolgbarkeit)	75845
WSD_ID	ID der Wasser- und Schifffahrtsgeschichte	100
WSD_NAME	Name der Wasser- und Schifffahrtsgeschichte	WSD Nord
WSA_ID	ID des Wasserstraßen- und Schifffahrtsamtes	113
WSA_NAME	Name des Wasserstraßen- und Schifffahrtsamtes	WSA Brunsbüttel
BWS_ID	Bundeswasserstraßennummer	3401
BWS_NAME	Bundeswasserstraßenname	Nord-Ostsee-Kanal (Hauptstrecke)
TITLE	Beschreibung des Zwecks und des Inhalts der Vermessung	Verkehrssicherungspeilung und Böschungspeilung   VKS2-20 und BOE2-20   (3401) Nord-Ostsee-Kanal (Hauptstrecke)   Weststrecke km 22,6 bis km 26,1   22.6 bis 26.1   2020-04-22
SURVEYING_START	Datum des Vermessungsbeginns	2020-04-22
SURVEYING_END	Datum des Vermessungsendes	2020-04-24
SURVEYING_METHOD	Vermessungsmethode	Mehrfachschwinger
SRS	Lagebezugssystem als EPSG-Code	25832
HRS	Höhenbezugssystem	DHHN2016
MODIFIED	letzter Änderungszeitpunkt	2020-05-05T09:58:47

Bezeichnung - Metadatum	Erläuterung	Beispiel
HIERARCHYLEVEL	Angabe über die Strukturierung der gelieferten Tiefenwerte	regelmäßige Quadratgitter-Stützpunkte (GRID) ohne Einbeziehung von Kanteninformationen
GEOM	Vermessungsumring als Polygon	<pre> &lt;gml:Polygon&gt;   &lt;gml:outerBoundaryIs&gt;     &lt;gml:LinearRing&gt;       &lt;gml:coordinates decimal="." cs="," ts=" "&gt;         54.34772715,9.75903889         54.35057362,9.764018         54.35056738,9.7650032         54.3403375,9.74412649         54.34659468,9.75606232         54.3465885,9.75704743         54.34773334,9.75805375         54.34772715,9.75903889       &lt;/gml:coordinates&gt;     &lt;/gml:LinearRing&gt;   &lt;/gml:outerBoundaryIs&gt; &lt;/gml:Polygon&gt; </pre>

Die zurückgezogenen Datensätze des 3D-Datenarchivs werden ebenfalls im 5-Minuten-Intervall abgefragt und in die Bathymetrie-Datenbank übernommen. Übermittelt werden ausschließlich die in [Tabelle 6](#) dargestellten Informationen.

**Tabelle 6** Metadaten für Zurückgezogene Vermessungsdatensätze

Bezeichnung - Metadatum	Erläuterung	Beispiel
MID	ID im 3D-Datenarchiv (zur Sicherung der Rückverfolgbarkeit)	75845
MODIFIED	Zeitpunkt des Zurückziehens des Vermessungsdatensatzes	2020-05-07T14:18:41

Alle Datensätze, die von anderen Datenlieferanten bereitgestellt wurden, wurden manuell mit ihren entsprechenden Metadaten in die Bathymetrie-Datenbank übernommen.

#### 4.4.3.2 Datenplausibilisierung

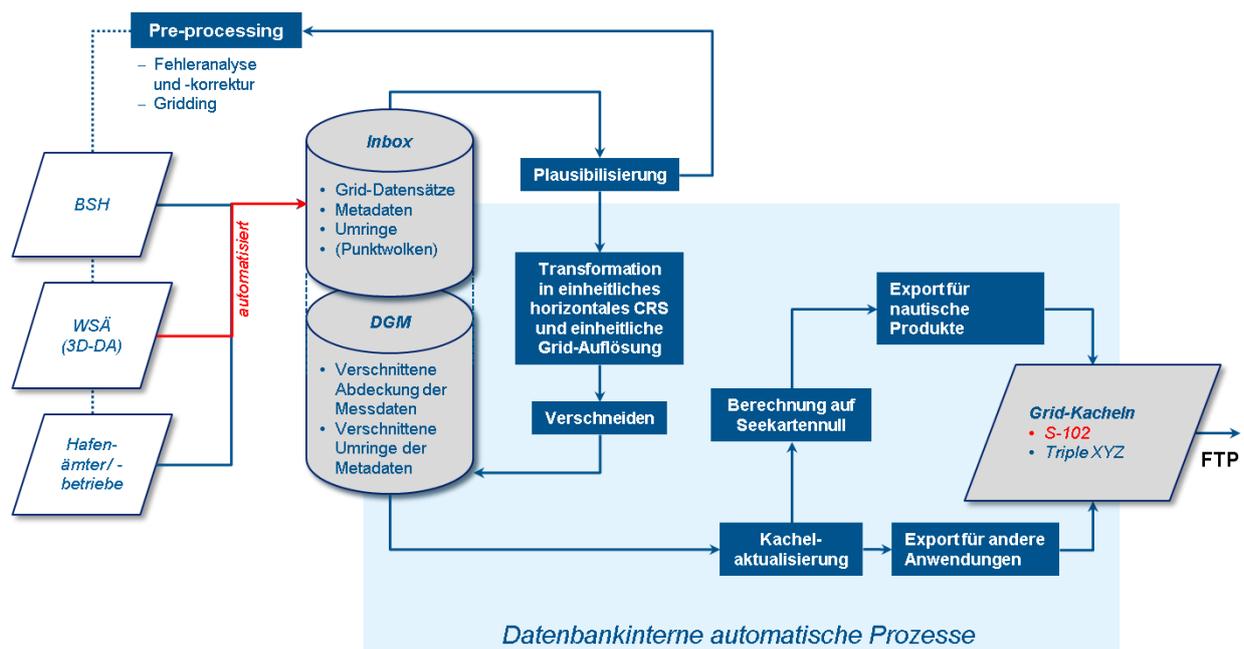
Die sich anschließende Plausibilisierung erfolgt teils automatisch, teils manuell. Zum automatischen Teil gehört die Prüfung, ob die Datenstruktur (Grid) richtig erkannt und der Datensatz vollständig übernommen wurde. Technisch wird für diesen Schritt eine FME-Workbench eingesetzt, welche ein Protokoll mit dem Prüfergebnis ausgibt.

Die manuelle Plausibilisierung beinhaltet z.B. eine Kontrolle der Übereinstimmung von Mess- und Metadaten, es werden visuell eventuelle Widersprüche innerhalb des eingegangenen Datensatzes oder zwischen unterschiedlichen Datensätzen aufgedeckt und mögliche Redundanzen geklärt.

Die Tätigkeiten zur Plausibilisierung werden außerhalb der Datenbank mit den Programmen CARIS BASE Editor oder QGIS durchgeführt. Sowohl das Protokoll der automatischen Prüfung, als auch das Ergebnis der manuellen Plausibilisierung werden in der Datenbank dokumentiert.

#### 4.4.3.3 Datenverarbeitung und DGM

Die wichtigste Anforderung an das Datenbanksystem war, die Verschneidung der Mess- und Metadaten nach definierten Kriterien automatisch vornehmen zu können, um letztlich ein überlappungsfreies Modell des Meeresbodens zu erhalten. Jeder neu in der Datenbank erfasste und plausibilisierte Datensatz wird automatisch in dieses Modell integriert, ein manuelles Eingreifen ist damit nicht mehr erforderlich. Der Datenfluss ist schematisch in [Abbildung 21](#) dargestellt.



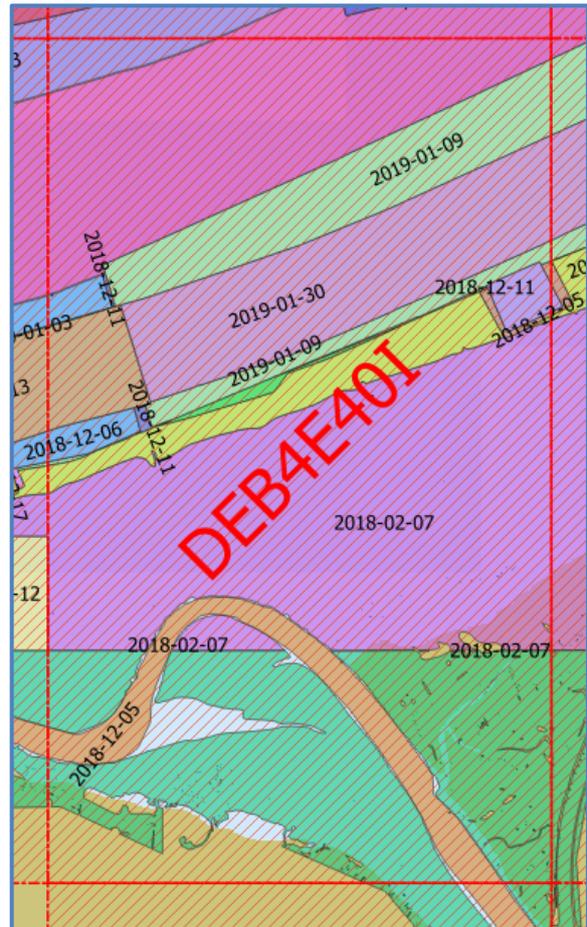
**Abbildung 21** Teilautomatischer Workflow der Verarbeitung der Bathymetriedaten

Ausgelöst wird diese Prozesskette durch die Eingabe eines positiven Plausibilisierungsergebnisses. Jeder Vermessungsdatsatz wird einzeln abgearbeitet. Als erster Schritt des Integrationsprozesses findet die Identifikation aller zu aktualisierenden DGM-Kacheln statt. Anschließend wird für jede Kachel, die räumlich betroffen ist, eine vollständige Neuberechnung der Selben durchgeführt. Dazu werden alle Vermessungsdatsätze, die geographisch im Bereich der Kachel liegen, aus dem *active*-Bereich der Datenbank (siehe [Abbildung 20](#)) herausgesucht, das Lagebezugssystem und die Grid-Auflösung harmonisiert und auf die Kachelbegrenzung zugeschnitten. Um nun daraus ein digitales Geländemodell

zu berechnen, bei dem die zuletzt vermessenen Bathymetriebereiche priorisiert werden, ist eine Sortierung nach dem Vermessungsenddatum notwendig. Zum Schluss werden die sortierten Vermessungsdaten der Reihe nach miteinander verschnitten (neuere Tiefenwerte verdrängen ältere) (Abbildung 22), so dass diese neu berechnete Kachel im DGM-Kachelschema ausgetauscht und dadurch das gesamte digitale Geländemodell aktualisiert wird. Während der Verschneidung wird auch eine Metadatenübersicht für die Kachel berechnet, die aufzeigt aus welcher Vermessung jede einzelne Tiefe stammt und so eine Nachverfolgbarkeit gewährleistet (Abbildung 23).



**Abbildung 22** Verschnittene Messdaten am Beispiel der Gridzelle DEB4E40I



**Abbildung 23** Verschnittene Metadaten am Beispiel der Gridzelle DEB4E40I

Das nun berechnete Geländemodell hat als vertikales Bezugssystem DHHN2016. Dies ist für die gemeinsame Nutzung mit den Wasserstands- und Vorhersagedaten auch erforderlich. Für eine Weiterverarbeitung in nautischen Produkten, wie ENC's und Papierseekarten, die als vertikales Bezugssystem Seekartennull verwenden, ist eine entsprechende Transformation notwendig. In der Datenbank ist zu diesem Zweck ein passendes Differenzenmodell hinterlegt, welches beim Export der Bathymetriedaten bedarfsweise angewendet werden kann.

Für den Export der Daten wurden folgende 3 Formate bisher implementiert:

- ASCII Textdatei mit XYZ
- Extended Bathymetric Attributed Grid (Extended BAG)

- IHO S-102 Version 2.0.0 (mit Erweiterung für die Vermessungsmetadaten – siehe Abschnitt Datenbereitstellung)

#### 4.4.3.4 Datenbereitstellung

Ein wesentlicher Fokus im Projekt lag auf der IHO-standardkonformen Bereitstellung der Bathymetrie-daten. Die entsprechende IHO-Produktspezifikation ist die S-102 „Bathymetric Surface“ in der aktuellen Version 2.0.0, welche Ende 2019 veröffentlicht wurde.

Die Entwicklung dieses Standards geht zurück auf die *Open Navigation Surface Working Group* (ONSWG), einer internationalen Arbeitsgruppe bestehend aus Verwaltung, Industrie und Wissenschaft. Aktuell ist die S-100 Working Group der IHO für die Pflege und Weiterentwicklung der S-102-Produktspezifikation zuständig. Die Version 2.0.0 ist momentan aber noch nicht operationell einsetzbar. Dafür weist diese Version noch diverse Unzulänglichkeiten auf, wie z.B. fehlende Möglichkeiten, die Metadaten für die verarbeiteten Datenquellen angeben zu können. In laufenden Testbettszenarien müssen diese Unzulänglichkeiten konkretisiert und beschrieben werden, um entsprechende Lösungen zu entwickeln und sie als notwendige Änderungsvorschläge zur internationalen Abstimmung zu bringen. Die parallel stattfindenden Entwicklungstätigkeiten und die noch unvollständige Version dieser Produktspezifikation machte das Ausrichten auf ein entsprechendes Datenausgabeformat äußerst schwierig. Nichtsdestotrotz ist es gelungen, S-102-konforme Datensätze automatisch erzeugen zu können. Darüber hinaus wurde ein Vorschlag entwickelt, die S-102-Produktspezifikation um die fehlenden Metadaten zu erweitern, der auf dem nächsten S-100 WG Meeting in die Diskussion eingebracht werden soll.

Das in der S-102-Spezifikation beschriebene Datenformat fußt, wie die im Arbeitspaket 2 erläuterten ozeanographischen Daten, auch auf dem Format HDF5 (Hierarchical Data Format), einem sogenannten Containerformat, welches insbesondere für sehr große Datenmengen genutzt wird. Die Struktur des Containerformates lässt es zu, verschiedene Komponenten, wie beispielsweise unterschiedliche Datenarten zusammenzuführen und sie als komplexe Einheit abzubilden.

Abbildung 24 zeigt das in der S-102 Version 2.0.0 spezifizierte Datenformat als Baumstruktur und als graphische Darstellung. Demnach besteht ein S-102-Datensatz aus 3 Komponenten, der *Group\_F*, dem *BathymetryCoverage* und dem *TrackingListCoverage*.

In der Gruppe *Group\_F* befinden sich Metadaten, die den Inhalt (Feature Typen) des Datensatzes beschreiben - die beiden enthaltenen Coverages.

Das *BathymetryCoverage* ist obligatorisch und stellt das bereits erwähnte Grid in Form einer 2-dimensionalen, rechteckigen Matrix dar. Jedem Punkt in diesem 2D-Grid ist ein Wertepaar bestehend aus Tiefe und Unsicherheit zugeordnet. Jede Zelle kann durch die Zeile und Spalte des Grids adressiert werden. Daher ist es nicht erforderlich, die direkte Position jeder Gridzelle zu speichern. Der Gridabstand in beide Richtungen definiert die Abmessungen des Grids. Der Ursprung jedes Grid Coverages ist die nordwestliche Ecke und gibt die Koordinaten des Grids in Bezug auf ein externes Koordinatensystem an.

Das *TrackingListCoverage* ist ein optionales Feature in einem S-102-Datensatz, welches Korrekturen bezüglich der Tiefenwerte beinhalten kann, die vom Hydrographen manuell vorgenommen wurden. Sie stellt eine Punktmenge dar und wird als einfache Tabelle bzw. Liste gespeichert. Die Positionen in der Tracking List sind Verweise auf Zeile und Spalte im *BathymetryCoverage*. Sie hat bei der Erfassung

und Verarbeitung von bathymetrischen Daten an der deutschen Küste keinerlei Bedeutung, sondern spiegelt offensichtlich die Vorgehensweise anderer Hydrographischer Dienste wider.

Jedes Feature in einem S-102-Datensatz hat seine eigenen strukturellen Metadaten (z. B. räumliche Referenzierung), die als Attribute des Grid Coverage oder der Punktmenge enthalten sind.

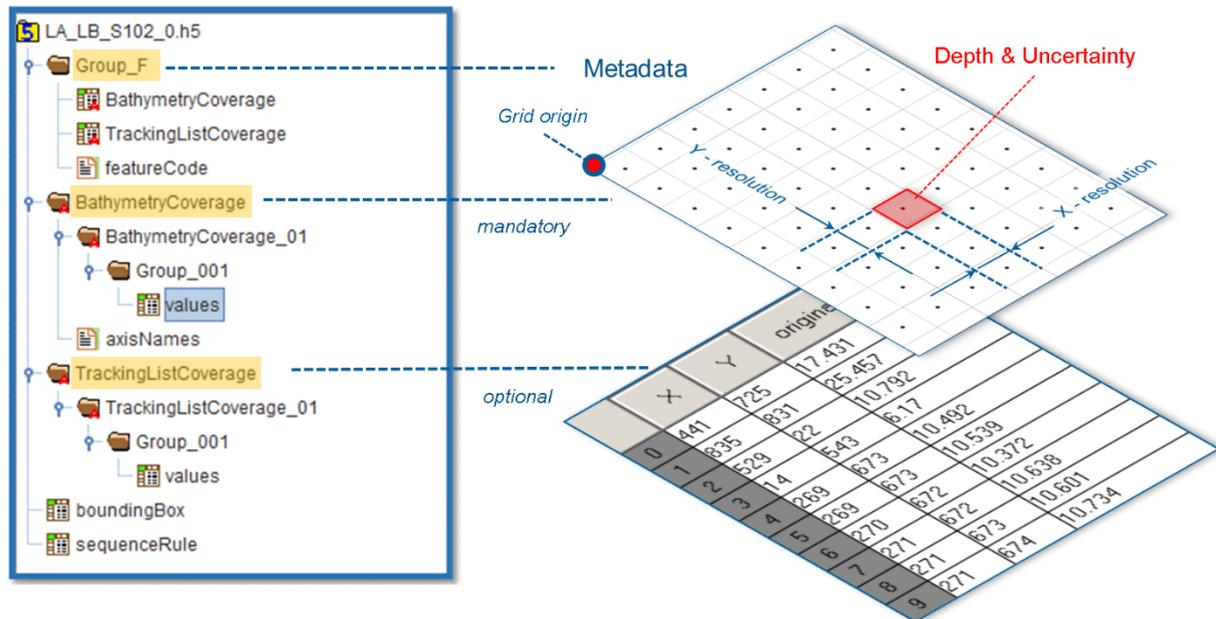


Abbildung 24 Struktureller Aufbau des S-102-Dateiformates

Die vorliegende Version der S-102 zielt vorrangig darauf ab, pro Vermessung jeweils einen S-102-Datensatz abzugeben. Unser Ziel war es demgegenüber, die S-102-Datensätze als regelmäßige Kacheln mit dem jeweiligen Ausschnitt des überlappungsfreien Geländemodells zu produzieren. Das bedeutet, die verschnittenen Messdaten mit ihren zugehörigen Metadaten, die innerhalb einer Kachel enthalten sein können, müssen im HDF5 Container abgebildet werden können.

Abbildung 25 zeigt die Struktur eines S-102-Datensatzes mit der im Projekt dafür entwickelten Erweiterung, dem zusätzlichen Feature Typ *QualityOfSurveyCoverage*. Dieser setzt sich aus einem Grid Coverage und einem Listen Coverage zusammen. Das Listen Coverage ist als *Compound Dataset* implementiert worden und enthält die Metadaten zu den einzelnen Vermessungsdatsätzen, die für die Berechnung des Geländemodells genutzt wurden. Deren Identifier dient in jeder der Gridzellen des Grid Coverages als Verweis. Da *BathymetryCoverage* und das Grid vom *QualityOfSurveyCoverage* deckungsgleich sind, kann zu jedem Tiefenwert eine Aussage getroffen werden, wann und von welchem Datenlieferant dieser erhoben wurde.

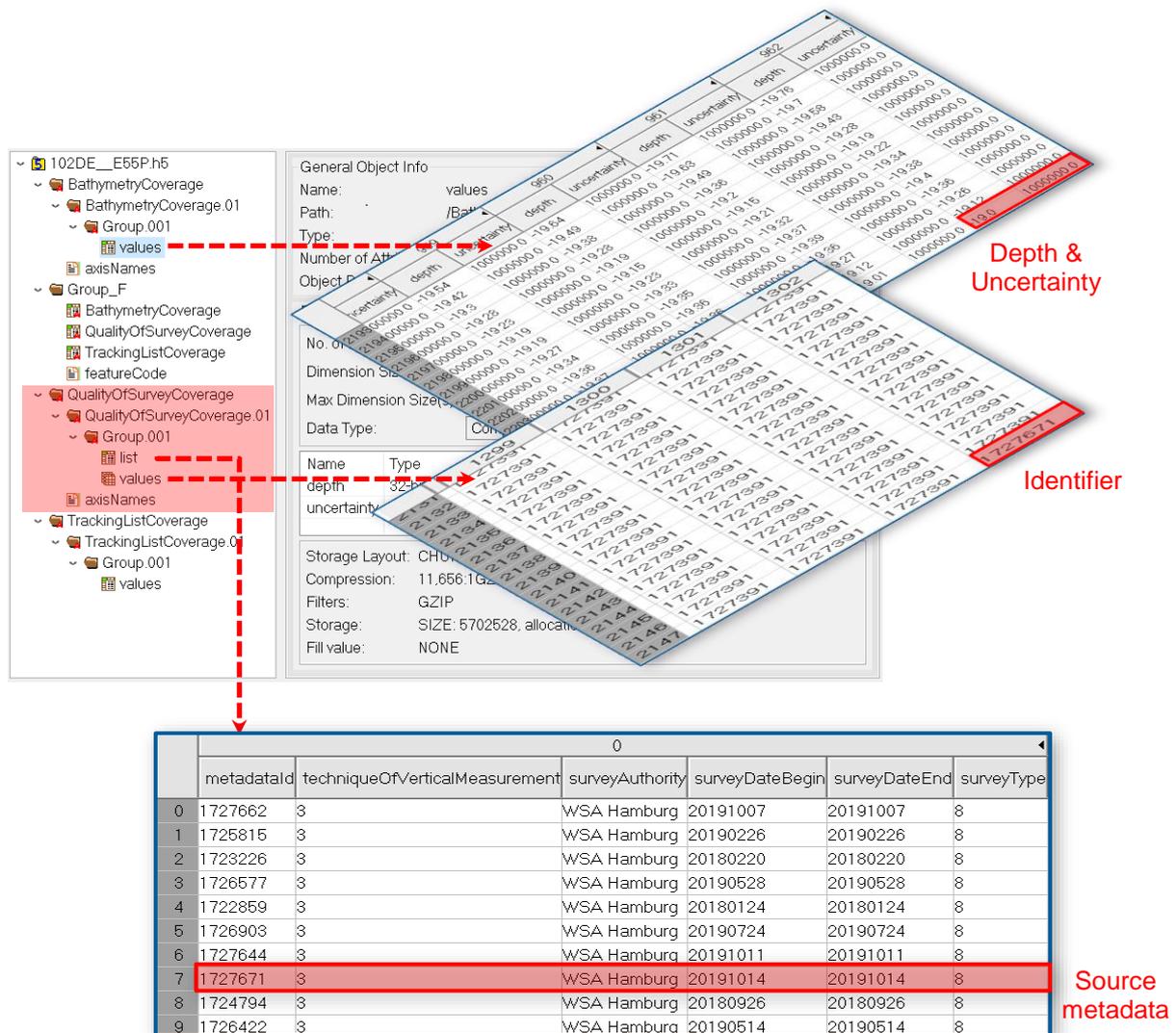


Abbildung 25 Darstellung des S-102-Datenformates mit Erweiterung der Metadaten

Um die Bathymetriedaten im Arbeitspaket 4 mit den Wasserstands- und Vorhersagedaten zu verknüpfen, werden diese exportiert. Der Austausch erfolgt über den FTP-Server des BSH im IHO-kompatiblen Format S-102. Auch dieser Prozessschritt läuft automatisch ab. Ein vollständiger Export mit allen 207 Kachel auf den FTP-Server dauert etwa 30 Minuten.

#### 4.4.4 Beteiligung an der Entwicklung internationaler Standards für Bathymetriedaten

Der Nautische Informationsdienst ist aktiv beteiligt an den Entwicklungsaktivitäten der S-100 Working Group sowie weiterer IHO-Arbeitsgruppen und temporär bestehender Projektteams. So wurde beispielsweise intensiv an der Finalisierung der S-102-Produktspezifikation Version 2.0.0 mitgewirkt. Weitere konkrete Aktivitäten des BSH werden auch nach Abschluss von ImoNav erfolgen, um mitzuhelfen, den Standard S-102 künftig operationell einsetzen zu können.

Darüber hinaus ist der Nautische Informationsdienst Mitglied in einer neu eingerichteten Arbeitsgruppe des IC-ENC (International Centre for ENCs). Das IC-ENC mit Sitz in Taunton (UK) ist das für das BSH zuständige RENC (Regional ENC Coordinating Centre), dessen Aufgabe es ist, die ENC-Produzenten

bei der Harmonisierung der Produktion und des Vertriebs von qualitativ hochwertigen ENC's zu unterstützen. Im Zuge der Entwicklungsaktivitäten bezüglich der neuen S-100-konformen Datenprodukte, ist das IC-ENC dabei seine Validierungs- und Vertriebsprozesse an die neuen Anforderungen anzupassen. Zu diesem Zweck wurden u.a. die im Projekt erzeugten S-102-Testdaten des Testgebiets der Elbe für ein Testbettszenario zur Verfügung gestellt. Weitere begleitende Aktivitäten in dieser Kooperation werden folgen. Ziel seitens des Nautischen Informationsdienstes hierbei ist, mit den anderen teilnehmenden Hydrographischen Diensten gemeinsame Erfordernisse für die S-102-Produktspezifikation herauszuarbeiten und gemeinschaftlich auf entsprechende Anpassungen hinzuwirken.

Ein weiterer wesentlicher Punkt internationaler Zusammenarbeit im Hinblick auf die Standardisierung war der im April 2019 beim BSH durchgeführte Workshop mit teilnehmenden Hydrographischen Diensten der Nord- und Ostseeanrainer sowie Partnern aus der Industrie. Ziel war es, sich über die jeweils aktuellen Prozessschritte bei der Datenverarbeitung und über die vorhandenen technischen Möglichkeiten auszutauschen sowie auch hier gemeinsame Anforderungen an die IHO-Standards und Verarbeitungstools speziell bezüglich bathymetrischer Daten zu formulieren. Der Workshop bot eine ideale Plattform, sich über die genannten Aspekte auszutauschen, Gemeinsamkeiten und Unterschiede bei der Bearbeitung der jeweiligen Seegebiete zu verdeutlichen und schließlich konkrete Ideen für die Optimierung der eigenen Arbeitsabläufe ableiten zu können. Darüber hinaus konnten direkte Regeln für die derzeit gültigen Standards und gemeinsame Anforderungen an die neuen IHO-Standards entwickelt werden.

## 4.5 Fazit und Ausblick

Die Fahrwasserbereiche im Testgebiet konnten mit aktuellen bathymetrischen Daten der WSV vollständig abgedeckt werden. Aus diesen eingegangenen Datensätzen wurde ein hochaufgelöstes, überlappungsfreies DGM erstellt. Die Datenbereitstellung erfolgt automatisiert und kontinuierlich je nach eingegangenem Quelldatensatz sowie in einheitlicher Kachelform auf einem FTP-Server des BSH. Die gesamte Verarbeitungsdauer eines Vermessungsdatensatzes vom Eingang bis zur Bereitstellung in der S-102-Kachel beträgt weniger als ein Arbeitstag.

Die Interoperabilität der Daten und Produkte wird durch die realisierte, auf allgemeingültigen GIS-Standards basierende Datenhaltung und –verarbeitung ermöglicht. Die für den nautischen Verwendungszweck einzuhaltenden IHO-Standards werden aus den Daten des allgemeingültigen GIS-Standards generiert.

Das Datenausgabeformat der nautischen Produkte entspricht dabei dem derzeit aktuellen IHO-Standard S-102 Version 2.0.0, welches zusätzlich um die relevanten Metadaten erweitert wurde. Es ist vorgesehen, diese Erweiterung zum nächstmöglichen Meeting der S-100-Arbeitsgruppe vorzustellen und zur Abstimmung zu bringen.

Im Rahmen des Projektes wurden außerdem wesentliche Teile der bislang dateibasierten Verarbeitungskette für bathymetrische Daten, die mit einem hohen manuellen Arbeitsaufwand und diversen Schnittstellen versehen ist, automatisiert.

Die eingangs erwähnte notwendige Widerspruchsfreiheit für den parallelen Einsatz von ausrüstungspflichtigen nautischen Produkten und der hochaufgelösten Bathymetrie an Bord eines Schiffes ist durch die Schaffung einer einheitlichen Datenbasis und eines zentralen Workflows gewährleistet.

Das im Projekt entwickelte Pilotverfahren soll noch in diesem Jahr in den Wirkbetrieb zur Erstellung der offiziellen nautisch-kartographischen Produkte überführt werden. Um dies vollumfänglich realisieren zu können, sind jedoch noch weitere Entwicklungsarbeiten erforderlich, wie z.B. die Erweiterung der Datenbank-Benutzeroberfläche um eine graphische Anzeigemöglichkeit oder die Schaffung einer Speichermöglichkeit für Punktwolken, wie z.B. den Vertikallotdaten. Eine wichtige Voraussetzung für den angestrebten Wirkbetrieb ist ebenso die vollständige Erfassung aller aktuellen bathymetrischen Daten für den BSH-Zuständigkeitsbereich von deutscher Nord- und Ostsee.

Noch offene Fragestellungen, die im Projekt nur angeschnitten werden konnten, betreffen insbesondere diverse Aspekte der Datenqualität. Die Datenqualität wird durch die drei verschiedenen Prozessschritte – Datenerfassung, Datenmodellierung und Generalisierung – unterschiedlich beeinflusst. Die aktuellen IHO-Standards greifen diesbezüglich nur unzureichend ineinander bzw. es fehlen derzeit einheitliche Definitionen und Regeln. Offen ist ebenso, welche der Informationen zur Datenqualität für den Nautiker tatsächlich relevant sind und in welcher Form diese Informationen bei seinen Entscheidungen hilfreich sein können. Hierzu bedarf es weiterer umfangreicher Entwicklungsarbeiten.

## 5. Automatisches Prozessieren und Verknüpfung von Daten

### 5.1 Datenaustauschplattform

Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln zu lesen war, sind die verschiedenen Tätigkeiten im Rahmen des ImoNav-Projektes mit einer sehr umfangreichen Datenmenge verknüpft. Die dabei verwendeten Daten sind in unterschiedlicher Art und Weise zu Datensätzen zusammengefasst und zeichnen sich durch eine sehr unterschiedliche Struktur aus. Hinzu kommt, dass die vier Arbeitsbereiche des Projektes, räumlich getrennt voneinander, mit Teilprozessen betraut sind, die den fortlaufenden Austausch von Datensätzen untereinander bedingen. Diese fungieren zum Teil zunächst nur als unveröffentlichte Zwischenergebnisse und werden in einer Verarbeitungskette zusammen mit anderen Datensätzen zu neuen Informationen verknüpft oder in anderer Art und Weise transformiert.

Diese Faktoren führen zu einem erheblichen Datenaufkommen, welches geordnet vorgehalten, frei von Interpretationen verständlich und mit Metadaten beschrieben sein muss. Darüber hinaus wird mit einem Werkzeug für den Datenaustausch die Erwartung verknüpft, dass der effiziente Zugriff auf die benötigten Datensätze jederzeit in komfortabler Art und Weise möglich ist.

Um diese Erwartungen zu erfüllen, wurde für die Projektlaufzeit der Bedarf für eine Plattform mit der Zielstellung formuliert, den Datenaustausch zwischen den Partnern zu gewährleisten und die Ergebnisse der Projektarbeit für die Öffentlichkeit zugänglich zu machen.

#### 5.1.1 Zielsetzung

Bei der Suche nach einer Lösung für den Datenaustausch im Rahmen der Projektarbeit wurde zunächst eine Reihe von Vorgaben definiert. So soll die Umsetzung die relevanten Standards unterstützen und den performanten Zugriff auf zum Teil sehr umfangreiche Datensätze ermöglichen. Darüber hinaus muss auch der Abruf von Teildatensätzen (sowohl räumliche als auch zeitliche Ausschnitte von Daten) gewährleistet sein. Neben den Daten selbst spielt die Durchgängigkeit der begleitenden Metadaten von den Eingangsdaten bis hin zu den Produkten eine entscheidende Rolle für den Projekterfolg. Da die unter den Partnern ausgetauschten Daten sich fortlaufend ändern bzw. in aktuellen Versionen bereitgestellt werden, muss eine gewisse Robustheit gegenüber permanentem und zeitgleichem Schreib- und Lesezugriff gegeben sein.

#### 5.1.2 Struktur der Daten

Bevor auf die konkrete technische Umsetzung der Datenaustauschplattform eingegangen wird, soll zunächst ein Blick auf die Struktur der auszutauschenden Daten geworfen werden. Unter dem Begriff "Struktur" werden in diesem Zusammenhang die folgenden Eigenschaften verstanden:

- Datenvolumen
- räumliche Ausdehnung
- zeitliche Ausdehnung
- geometrische Struktur (regelmäßiges Gitter oder Vektordaten)
- Veränderlichkeit über die Zeit

Da die Datensätze zusätzlich fortlaufend von den Partnern aktualisiert und auf der Plattform in Form von neuen Versionen bereitgestellt werden, müssen zusätzlich die folgenden Punkte berücksichtigt werden:

- Aktualisierungsintervall
- Art und Weise der Aktualisierung (partiell oder komplett)
- Fortschreibung der Zeitachse

Der zeitlichen Aktualisierung ist ein besonderes Augenmerk zu schenken, da im Rahmen eines Forecasts für Zeitpunkte innerhalb der kommenden 48 Stunden stündlich neue, verbesserte Ergebnisse bereitgestellt werden. Das Zeitfenster verschiebt sich dabei in unregelmäßigen Abständen in Richtung Zukunft und kann dabei vom Umfang her variieren.

Nachfolgend wird anhand von drei ausgewählten Beispielen die große Bandbreite der zu behandelnden Daten und die daraus resultierenden Herausforderungen für einen reibungslosen Datenaustausch beschrieben.

#### *5.1.2.1 Stationäre strukturierte Daten*

Bei der Bathymetrie handelt es sich um einen hochaufgelösten, quasi stationären, strukturierten Datensatz. Wegen des großen Umfangs dieses Datensatzes liegt dieser in Form von Teildatensätzen, den sogenannten Kacheln, vor.

Der Bathymetrie-Datensatz wird fortlaufend durch Vermessungsaktivitäten lokal aktualisiert. Aufgrund des großen Datenvolumens erfolgt eine vergleichsweise niederfrequente, partielle Aktualisierung von ausgewählten Kacheln. Da das Kachelschema in geographischen Koordinaten definiert, die Bathymetrie aber in einem projizierten Koordinatensystem abgelegt ist, verfügen die einzelnen Kacheln nicht immer über vollgefüllte Zeilen und Spalten. Deshalb ist bei der Aktualisierung der Bathymetriebasis den Übergängen zwischen den Kachelgrenzen erhöhte Aufmerksamkeit zu schenken.

#### *5.1.2.2 Instationäre strukturierte Daten*

Die ozeanographischen Daten, wie beispielsweise Wasserstand und Strömung, sind instationäre Skalare oder vektorielle physikalische Größen, die an Positionen auf einem strukturierten Gitter gegeben sind. Im Vergleich zur Bathymetrie liegen diese mit Gitterweiten zwischen 90 m (Elbregion) und bis zu 6 km (Deutsche Küste) in einer vergleichsweise geringen Auflösung vor. Trotz der geringen räumlichen Auflösung wächst das Datenvolumen dadurch erheblich, dass an jedem Gitterpunkt eine Zeitreihe mit unterschiedlichen zeitlichen Abständen vorliegt. Beim Wasserstand beträgt dieser Abstand im Mittel 15 Minuten und im Datensatz der Strömung liegen die Werte im Mittel stundenweise vor.

Die Informationen der ozeanographischen Daten werden in Form eines einzelnen Datensatzes ausgetauscht, welcher als Ganzes aktualisiert wird. Die zeitliche Ausdehnung aufeinanderfolgender Versionen solcher zeitabhängiger Daten verschiebt sich in unregelmäßigen Abschnitten in die Zukunft und kann eine unterschiedliche und nicht vorhersagbare Anzahl von Zeitschritten enthalten. Im Mittel wird ein Zeitraum von ca. 2,5 Tagen vorhergesagt.

#### *5.1.2.3 Stationäre unstrukturierte Daten*

Bei den elektronischen Seekarten handelt es sich um Vektordaten, welche mit umfangreichen Attributen verknüpft sind und die über eine komplexe Geometrie und Topologie beschrieben werden. Das

Datenmodell S-57 [15] und die im Standard S-52 (künftig S-101) festgelegten Regeln zur Darstellung [16] werden von der IHO festgeschrieben. Die sehr fachspezifischen Anforderungen werden vom im Projekt verwendeten THREDDS Data Server nicht erfüllt. Daher kann dort nicht auf bestehende Schreib-Lese-Schnittstellen oder gar Visualisierungen zurückgegriffen werden. Ein Datensatz dieser Gattung wird bei der Aktualisierung durch eine neue Datei ersetzt und somit in seiner gesamten räumlichen Ausdehnung aktualisiert.

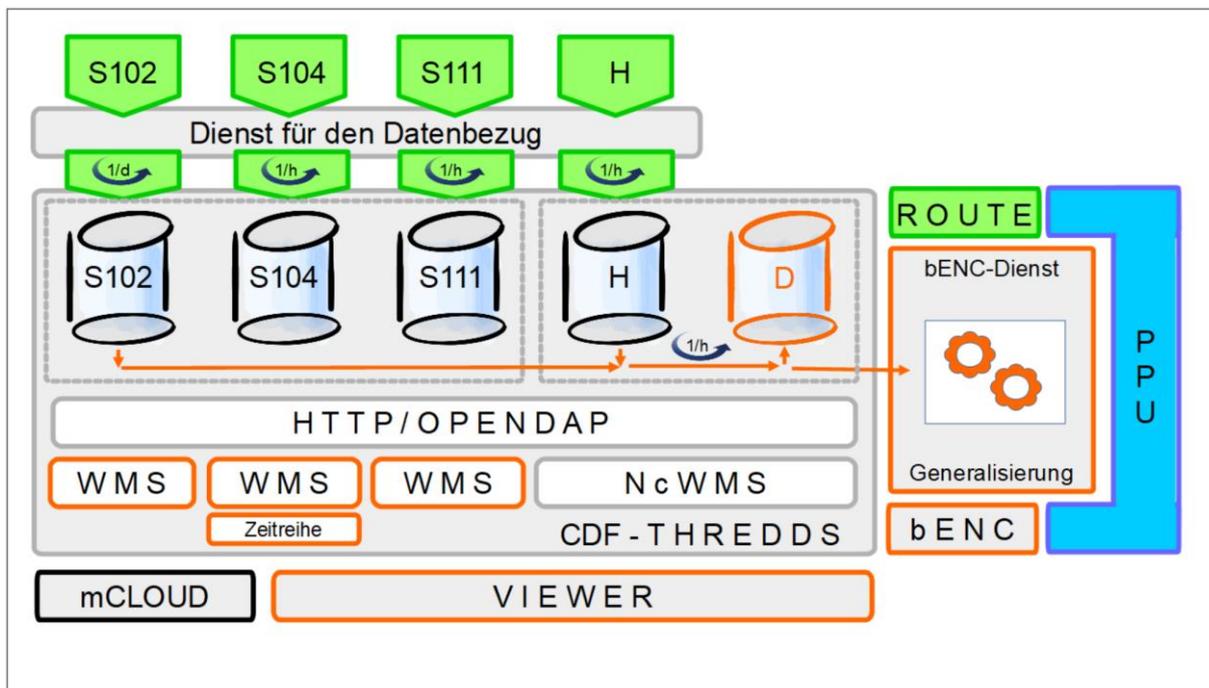
### 5.1.3 Technologische Basis

Nach Aufnahme der Projektstätigkeit war sehr bald erkennbar, dass eine einfache Lösung, wie z. B. ein FTP-Server oder ein Webserver, nicht den Anforderungen genügen würde. Des Weiteren wurde eine komplette Neuentwicklung als zu aufwändig und nicht mit den zur Verfügung stehenden Projektressourcen vereinbar erachtet. Eine Recherche nach geeigneten Plattformen für den Austausch wissenschaftlicher Daten offenbarte, dass der THREDDS Data Server (TDS), eine freie verfügbare Technologie, bereits über wesentliche in den Anforderungen formulierte Funktionalitäten verfügt.

Der TDS ist ein Webserver, der wissenschaftliche Daten und deren Metadaten beherbergen kann und für diese eine Reihe gängiger Schnittstellen bereitstellt. Unter diesen standardisierten Schnittstellen befinden sich neben HTTP beispielsweise OPeNDAP, OGC WMS und WCS [17]. Der TDS wird von Unidata, einer Abteilung der University Corporation for Atmospheric Research ([UCAR](http://ucar.edu)), entwickelt und von der National Science Foundation gefördert [18].

Basierend auf der Grundlage dieser Technologie wurden im Rahmen des Projektes eine Reihe von Erweiterungen geschaffen, welche die bereits vorhandene Basisfunktionalität ergänzen und die spezifischen Anforderungen seitens der Projektziele - zumindest in prototypischer Form - erfüllen.

Der Aufbau der Datenaustauschplattform ist in [Abbildung 26](#) dargestellt. Nachfolgend werden die verschiedenen Komponenten der Datenaustauschplattform in kompakter Form beschrieben.



**Abbildung 26** Die Datenaustauschplattform von ImoNav

Der TDS wird über einen Update-Mechanismus, der fortlaufend Daten von den Projektpartnern heranzieht, gespeist. Für alle auf dem Projektserver befindlichen Datensätze werden eine Reihe von Zugriffsschnittstellen und Darstellungsdiensten bereitgestellt, von denen ausgewählte im Metadatenportal des Projektträgers, der mCLOUD, veröffentlicht werden. Die gesamte Palette der Projektergebnisse wird in aufbereiteter Form auf dem ImoNav-Portal (<https://imonavviewer.smileconsult.de>) der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Die Schnittstellen des TDS werden auch vom ImoNav-Dienst für elektronische Seekarten entlang einer Route mit den jeweils aktuellen Datensätzen versorgt.

Mit Hilfe des TDS ist es möglich, sämtliche Datenströme innerhalb des Projektes erfolgreich an einer zentralen Stelle zu bündeln und trotz der hohen Dynamik der Daten dank des mitlaufenden Monitorings stets die Kontrolle und den Überblick über die vielfältigen, ablaufenden Prozesse zu behalten.

Die ergänzenden Visualisierungen für die im Projekt vorangetriebenen, noch in der Entwicklung befindlichen IHO-Standards haben zu einem erheblichen Erkenntnisgewinn geführt und ermöglichen es zudem, die innovativen Produkte des Projekts der Öffentlichkeit zu präsentieren.

#### 5.1.4 Dienst für den Datenbezug

Auf einem FTP-Server des BSH werden von den Referaten M1 und N2 fortlaufend Bathymetrie (S-102), flächenhafter Wasserstand, Wasserstandszeitreihen an ausgewählten Positionen (S-104), Strömung (S-111), Seegang, Salzgehalt und Wassertemperatur bereitgestellt. Der Dienst für den Datenbezug prüft stündlich (dies entspricht dem kürzesten Aktualisierungsintervall auf dem FTP-Server) die Verfügbarkeit neuer Daten und überträgt diese nach einer Konsistenz- und Plausibilitätsprüfung auf die Projektplattform.

Die folgende Tabelle zeigt für die verschiedenen hydrographischen und ozeanographischen Informationen das Aktualisierungsintervall, das Dateiformat und das mittlere übertragene Datenvolumen.

**Tabelle 7** Eigenschaften der verschiedenen hydrographischen und ozeanographischen Informationen

Ozeanographische Information	Aktualisierung	Dateiformat	Datenvolumen [MB]
Bathymetrie (S-102)	unregelmäßig	S-102 Version 1.0.0	186 (207 Dateien)
Flächenhafter Wasserstand (Elbe)	1 x stündlich	NetCDF	500
Wasserstand Zeitreihe <sup>5</sup> (S-104)	1 x stündlich	S-104	< 1
Strömung (S-111)	4 x täglich	S-111	111
Seegang	1 x täglich	NetCDF	500
Salzgehalt	1 x täglich	NetCDF	57
Wassertemperatur	1 x täglich	NetCDF	57

<sup>5</sup> an ausgewählten Positionen innerhalb des Projektgebietes

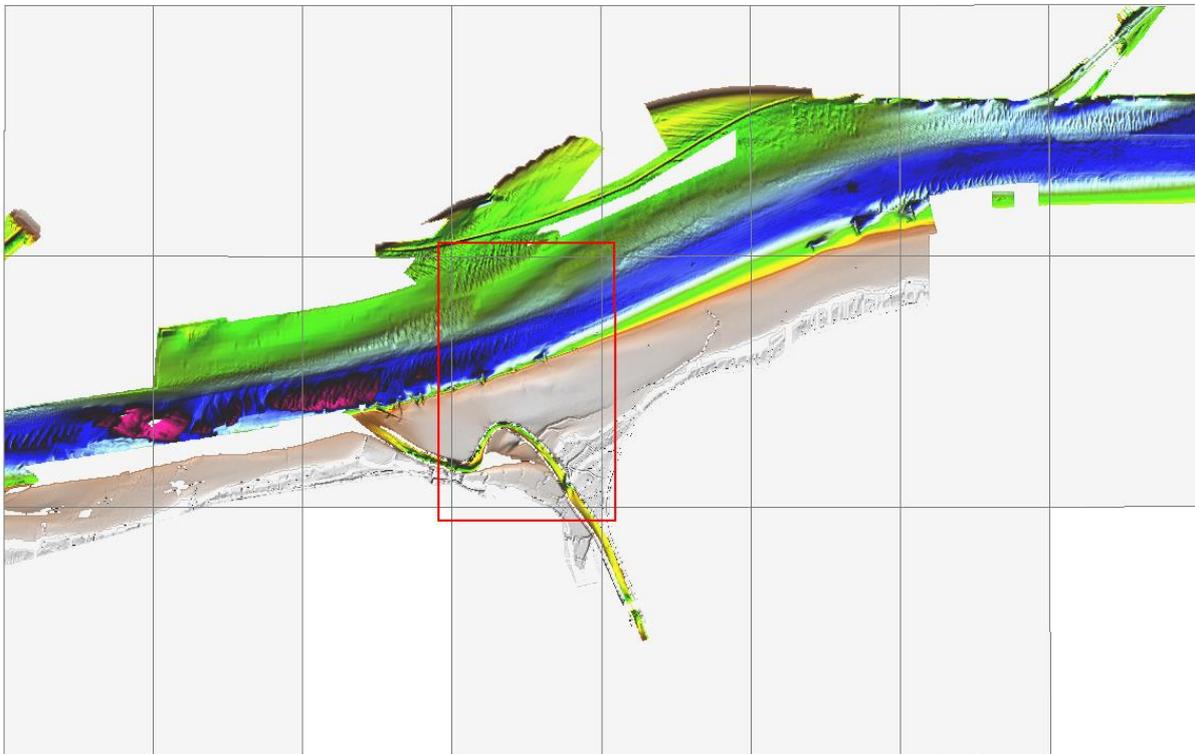
Der periodisch weiterentwickelte Dienst für den Datenbezug erfüllt seit der Inbetriebnahme im letzten Quartal 2019 fortlaufend seine Aufgabe.

## 5.2 Zusammenführen und Aufbereiten von Bathymetriedaten

Vom BSH-Referat N2 werden die hochaufgelösten Bathymetriedaten im S-102-Format mit einem Punktabstand von 1 Meter im Koordinatensystem UTM32 bereitgestellt. Die Bathymetriedaten sind in Abständen von 2 Gradminuten in XY-Richtung im Koordinatensystem WGS84 in Kacheln aufgeteilt.

Im Zuge der Weiterverarbeitung zu einer Seekarte ist jedoch aus Gründen der kontinuierlichen Kachelübergänge ein größerer Ausschnitt der Tiefeninformation nötig als die Ausdehnung der Seekarte selbst (s. Abbildung 27). Daher wird für die Berechnung der Wassertiefe ein Zielraster erstellt, welches abhängig von dem Grad der Generalisierung vergrößert wird.

Die Stützstellen des Zielrasters sind lagegleich zu denen der ursprünglichen Bathymetrie. Daher können die Tiefenwerte ohne Interpolation auf das Zielraster übertragen werden.

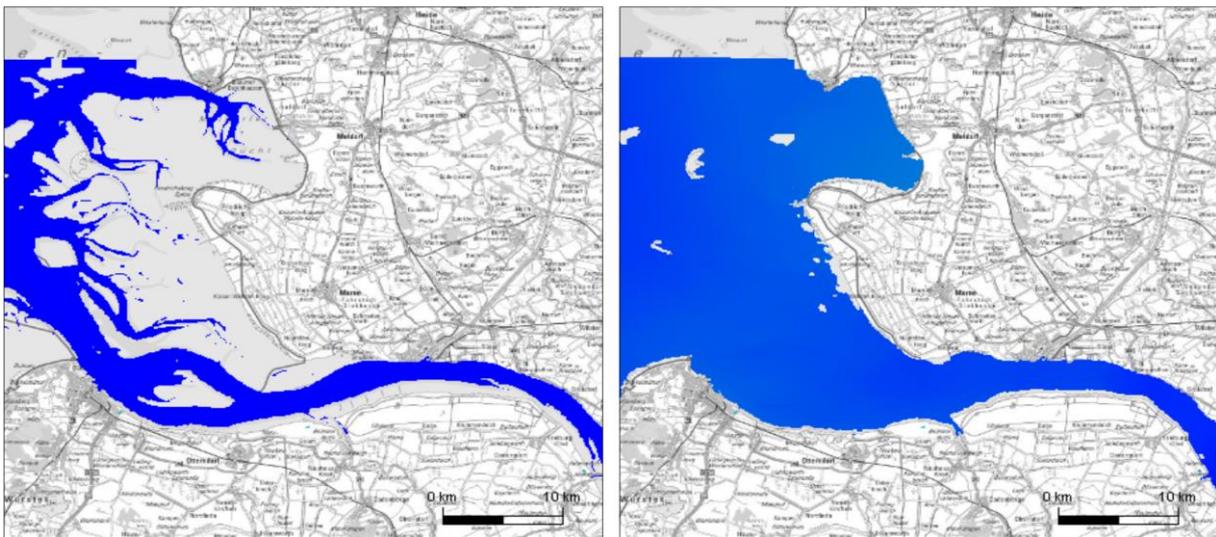


**Abbildung 27** Ausschnitt der Bathymetrie, Kacheln grau, gewünschter Ausschnitt rot

### 5.3 Verknüpfung von Wasserstand und Bathymetrie

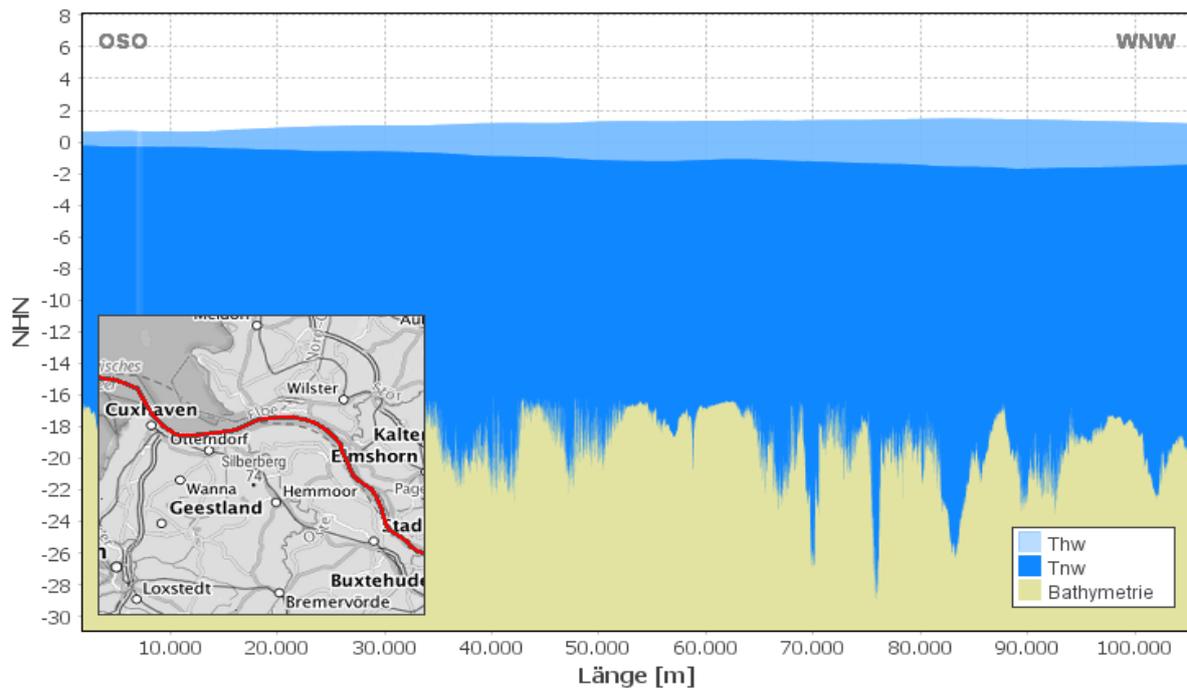
Für die Berechnung von dynamischen Wassertiefen werden der flächenhafte Wasserstand und die hochaufgelöste Bathymetrie miteinander verknüpft. Da beide Größen auf dem gleichen Höhenbezugssystem (NHN) vorliegen, kann hierbei die Wassertiefe als Differenz aus Wasserstand und Bathymetrie berechnet werden. Bei der Differenzenbildung muss eine Reihe von Sonderfällen berücksichtigt werden. So kann die Wassertiefe nur angegeben werden, wenn beide Informationen am Ort vorliegen. Zusätzlich kann es Bereiche geben, an denen das hydrodynamische Modell trockengefallen ist (der Wasserstand hat den konstanten Wert -10) oder der Wasserstand unterhalb des Niveaus der Bathymetrie liegt. In beiden Fällen wird als Wassertiefe der Wert 0 gesetzt.

Die folgenden Darstellungen in Abbildung 28 zeigen nicht trockengefallene Bereiche bei Tideniedrigwasser (Tnw) und Tidehochwasser (Thw).



**Abbildung 28** Wasserflächen (blau), links: bei Tnw, rechts: bei Thw  
[Hintergrund: WMS DTK250 des BKG in Grauwerten]

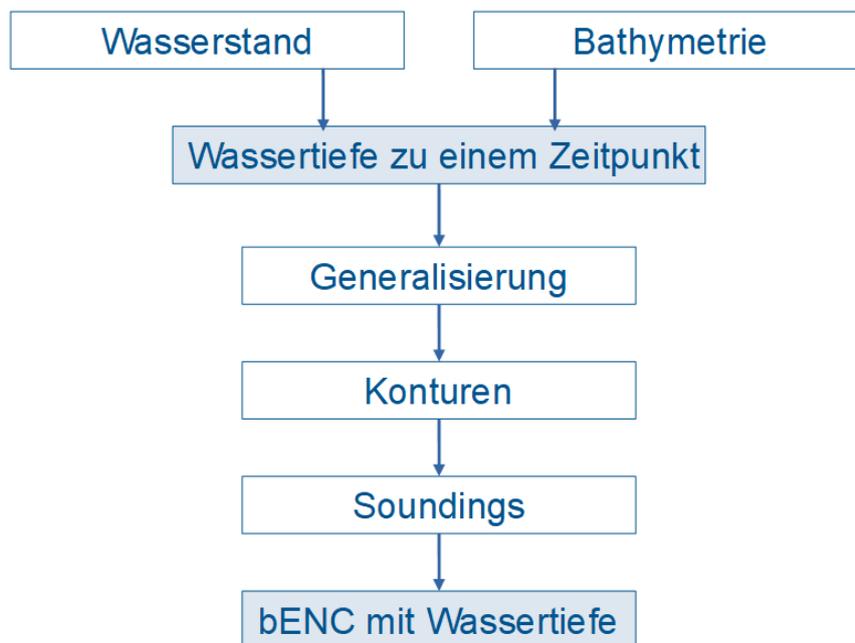
In Abbildung 29 ist ein Profilschnitt von Wasserstand und Gewässersohle entlang der Fahrrinne gezeigt. Die Differenz zwischen dem minimalen und maximalen Wasserstand am Ort wird durch die Bereiche mit blauer Färbung markiert. Unterschiede in der Wassertiefe von bis zu 3 m offenbaren das Potenzial für die nachfolgende Berechnung der Seekarten.



**Abbildung 29** Schnitt über Thw, Tnw und Bathymetrie der Elbe mit 2 - 3 m Tidenhub [Hintergrund: WMS TopPlus des BKG]

### 5.4 Generierung von Konturlinien für Wassertiefe

Aus den zuvor erstellten Wassertiefen können Seekarten mit Konturen und Tiefenzahlen generiert werden (Abbildung 30). Der Ausschnitt wird generalisiert und im Anschluss werden Konturen berechnet. Für die Auswahl der Tiefenzahlen wird die Wassertiefe ohne eine Generalisierung genutzt.



**Abbildung 30** Ablaufschema: Generierung von Konturlinien für Wassertiefe

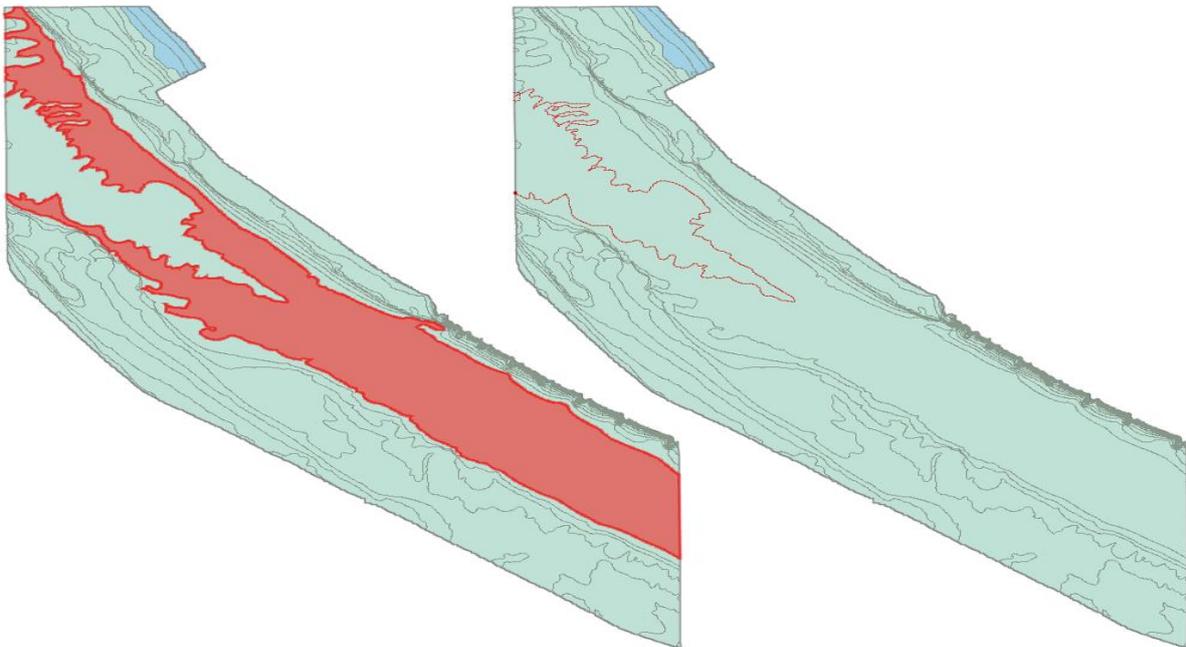
Die Ausgabe der Konturen und Tiefenzahlen erfolgt im Format S-57, welches hohe Anforderungen an die Topologie von Konturen stellt. Daher wurden Kontrollmechanismen erstellt, die die Güte der Ergebnisse sicherstellen.

### 5.4.1 Konturen

Bei den Konturen wird unterschieden zwischen Konturlinien und Konturflächen (s. [Abbildung 31](#)).

Eine Konturlinie ist eine Linie, die Punkte gleicher Wassertiefe verbindet, die aus Gründen der Klarheit und Verallgemeinerung manchmal deutlich außerhalb der Messdaten, jedoch immer zur nautisch sicheren Seite verschoben ist. Konturlinien stellen daher eine ungefähre Lage der Linie gleicher Tiefe in Bezug auf die aus der Quelle abgegrenzte Vermessungslinie dar.

Eine Konturfläche ist ein Bereich des Wasserkörpers, dessen Tiefe innerhalb eines definierten Wertebereichs liegt. Gebildet wird sie mit Hilfe der Konturlinien des Wertebereichs und der Berandung des Ausschnitts. Die Herausforderung bei der Erstellung von Konturen ist die topologische Korrektheit. Jede Konturlinie ist Teil von genau zwei Konturflächen. Bereiche ohne Daten sind entsprechend durch Flächen zu kennzeichnen. Für Berandung, Konturlinien und Flächen sind identische geometrische Objekte zu verwenden. Hinzu kommt, dass das Dateiformat S-57 eine begrenzte Anzahl an Nachkommastellen zulässt, wodurch die Möglichkeit besteht, dass Flächen aufgrund mangelnder Unterscheidbarkeit "zusammenfallen".



**Abbildung 31** links: Konturfläche (rot), rechts: Konturlinie (rot)

### 5.4.2 Tiefenzahlen

Eine Tiefenzahl ist eine gemessene Wassertiefe oder ein geometrisches Objekt, welches mangels räumlicher Ausdehnung auf einen vertikalen Bezugspunkt reduziert wurde. Tiefenzahlen ergänzen die Konturen ([Abbildung 32](#)). Besonders bei großen Wertebereichen der Konturflächen zeigen Tiefenzahlen ein detailliertes Bild der Wassertiefe auf. Die Anzahl der Messpunkte ist immer zu groß, um alle Messwerte lesbar darzustellen. Daher wird eine Selektion vorgenommen, die besonders flache und

relevante Bereiche hervorhebt. Für die Auswahl wird ein Mindestabstand (abhängig vom Maßstab der S-57) der Tiefenzahlen definiert. Die Messwerte werden nach Wassertiefe sortiert und schrittweise der S-57 hinzugefügt. Begonnen mit dem flachsten Punkt wird folgend geprüft, ob der Abstand zu den bereits gewählten Tiefenzahlen gegeben ist. Ist dies nicht der Fall, wird der Punkt übersprungen und nicht weiter für die Tiefenzahlen verwendet.

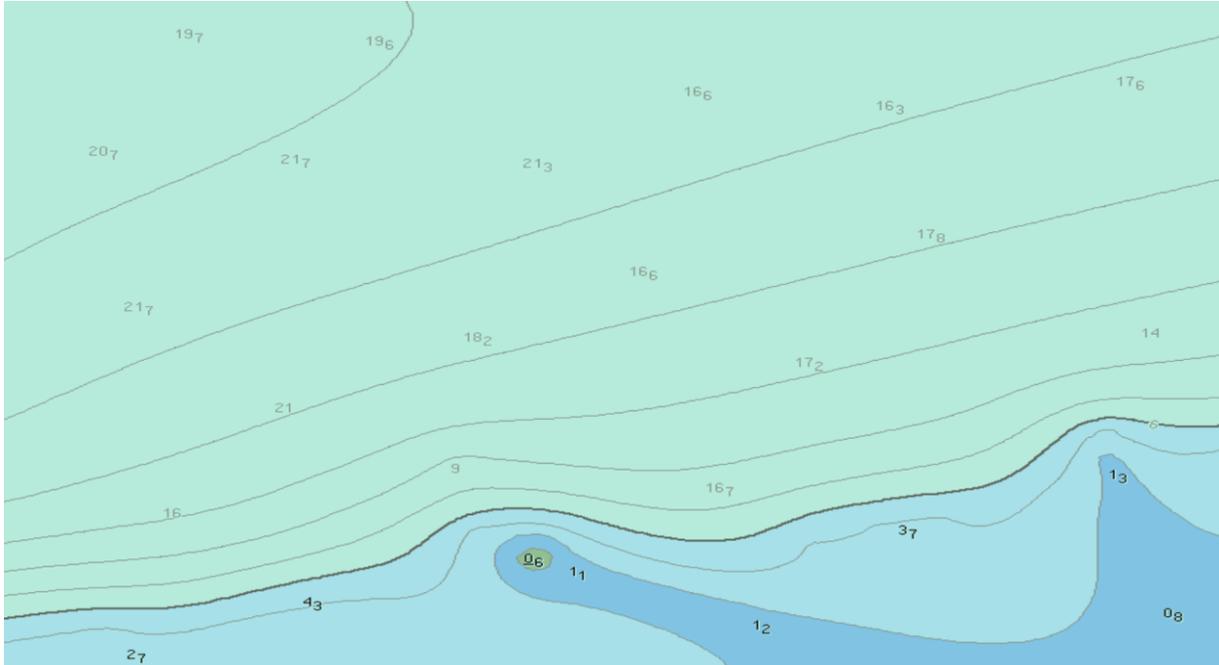


Abbildung 32 ENC mit Tiefenzahlen

### 5.4.3 Generalisierung

Bei der Generalisierung wird der erforderliche Karteninhalt so vereinfacht, dass folgende Punkte optimiert werden:

- Sicherheit bei der Navigation
- optimale Darstellung der schiffbaren Bereiche
- benötigter Speicherverbrauch
- Verarbeitungsgeschwindigkeit auf den Endgeräten für ENCs

Im Projekt ImoNav wurden Konturen generalisiert und Tiefenzahlen ausgewählt.

Bei der Erzeugung elektronischer Seekarten wurden Arbeitsweisen aus der bislang manuellen, zeichnerischen Erstellung von der analogen in die nun digitale Verarbeitung übernommen. Dies hat zur Folge, dass viele Kriterien zur Ausgestaltung der Karten vom Zeichner während der Bearbeitung festgelegt werden, nicht oder nur vage formuliert sind und somit nicht als objektive, messbare Kriterien verfügbar sind.

Im vorliegenden Projekt lag der Schwerpunkt auf der automatischen Generierung der elektronischen Seekarten. Das Fehlen objektiver Kriterien erschwert die Festlegung geeigneter Parameter bei der automatischen Verarbeitung und ist ein noch nicht abgeschlossener Prozess, der sowohl mit den bisherigen Erzeugern der Produkte sowie deren Nutzer derzeit abgestimmt wird.

Bei dem relativ neuen Produkt hochauflösender bENCs gibt es kaum Erfahrungswerte und einheitliche Standards / quasi-Standards sind in einer bisher nicht konsolidierten Form gegeben. Daher wurde an dieser Stelle untersucht, welche Konturlinienintervalle mit welcher Generalisierung bei welcher Auflösung der Eingangsdaten zu einem geeigneten Ergebnis führen. Die automatisch erzeugten Seekarten wurden mit den Bearbeitern manuell erzeugter Seekarten diskutiert.



**Abbildung 33** links: ohne Generalisierung, Mitte: geeignete Generalisierung, rechts: zu intensive Generalisierung

Folgende Tabelle zeigt, wie sich eine Generalisierung der Konturen (s. in [Abbildung 33](#) angegebenes Beispiel) auf die Anzahl der geometrischen Objekte und die daraus resultierende Dateigröße auswirkt. Die Stärke der Auswirkung einer Generalisierung ist zudem abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit des Gebietes.

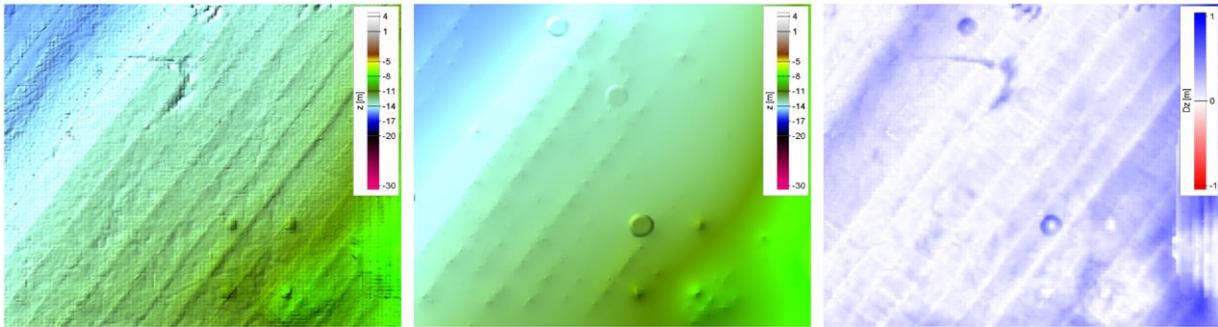
**Tabelle 8** Anzahl der geometrischen Objekte und Dateigrößen für unterschiedliche Generalisierungen

Generalisierung	Dateigröße	Punktobjekte	Liniensegmente
ohne	20 MB	ca. 1 Mio	25.431
geeignet	800 KB	42.786	1.621
zu intensiv	364 KB	14.488	796

Die Generalisierung ist eingebettet in den Prozess der Erstellung von ENC's. Bei steigendem Grad der Generalisierung steigt auch die Dauer der Prozessierung. Da die Konturerstellung nach der Generalisierung des Meeresbodens erfolgt, kann bei der Erstellung der Konturen durch die vereinfachte Struktur Verarbeitungszeit eingespart werden. Für die Generierung von hochaufgelösten Konturen aller Kacheln (207) für einen Zeitschritt der dynamischen Wasserstandsflächen werden ca. 10 Minuten Rechenzeit benötigt.

#### 5.4.4 Qualitätsmanagement

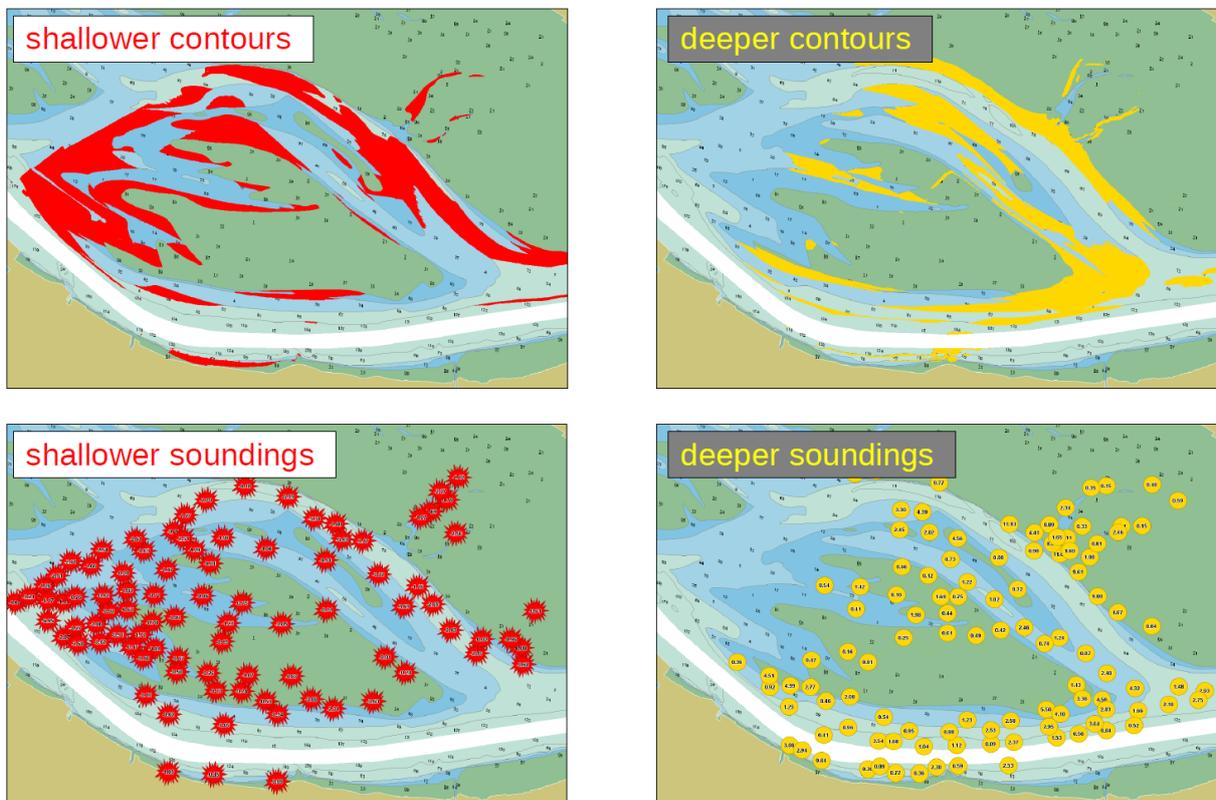
Bei Seekarten ist die nautische Sicherheit oberstes Ziel. Daher wird das Modell des Meeresbodens so vereinfacht dargestellt, dass im Ergebnis keine Position eine größere Wassertiefe angibt, als es die Ausgangsdaten zulassen. Dazu sind zwei Kontrollmechanismen entwickelt worden, die die nautische Sicherheit der Seekarten überprüfen.



**Abbildung 34** links: ohne Generalisierung, Mitte: mit Generalisierung, rechts: Differenzen

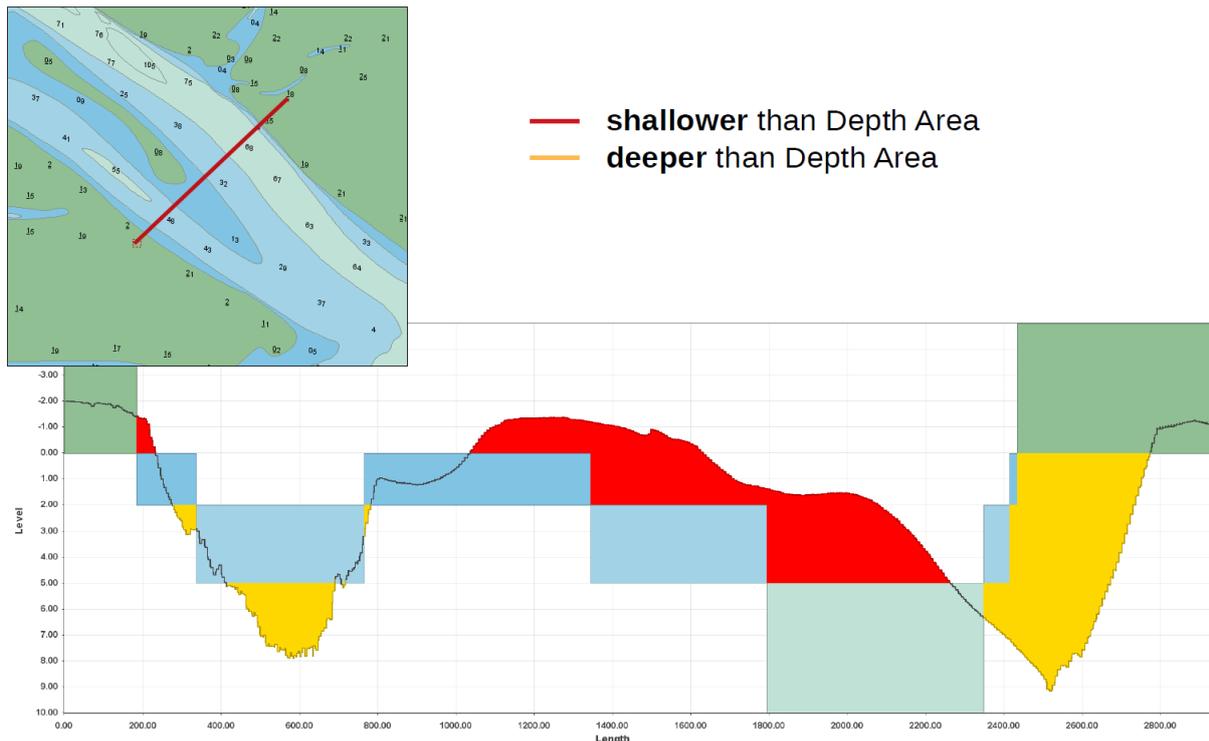
Differenzen müssen einseitig zur flachen Wassertiefe sein, da sonst eine größere Schiffbarkeit vorge-täuscht wird.

Auch eine Seekarte kann gegen ihre Eingangsdaten geprüft werden.



**Abbildung 35** Vergleich einer ca. 1 Jahr alten Seekarte mit aktuellen Vermessungsdaten

In den oben gezeigten Abbildungen (Abbildung 35) wurde bewusst eine ältere Seekarte mit aktuellen Vermessungsdaten verglichen. Die roten Bereiche sind in der Karte im Vergleich zu den aktuellen Messdaten tiefer angegeben. Diese Seekarte ist daher zu aktualisieren. Die gelben Bereiche zeigen an, wo in der Seekarte theoretisch eine größere Tiefe angegeben werden könnte. Eine weitere Vergleichsmöglichkeit ist das Bilden von gemeinsamen Profilschnitten auf Messdaten und Seekarte (Abbildung 36).



**Abbildung 36** Vergleich einer alten Seekarte mit aktuellen Vermessungsdaten entlang eines Profils  
Bereiche, die tiefer als die Seekarte sind, werden gelb und Bereiche, die flacher sind, rot dargestellt.

Die Firma SevenCs hat die Anwendung SevenCs Analyzer in das Projekt eingebracht. Diese validiert die erzeugten S-57-Dateien in Bezug auf die Einhaltung von IHO-Standards sowie syntaktische und topologische Korrektheit.

Mit Hilfe aller Qualitätsmaßnahmen konnten erfolgreich Seekarten mit Wassertiefen in hoher Auflösung fehlerfrei erstellt werden.

## 5.5 IHO-kompatible Datenbereitstellung

### 5.5.1 Extended-BAG

Der Standard S-102 Bathymetric Surface wurde während des Projektes von der IHO fortentwickelt. Da im frühen Stadium des Standards nicht abzusehen war, ob die Anforderungen des Projekts erfüllt werden würden, wurde der Vorgänger des S-102-Standards, das BAG-Format, im Projekt um die Bedürfnisse der Projektpartner erweitert, ohne die Abwärtskompatibilität zum BAG-Format zu verletzen. Eine spätere Überführung zum S-102-Format wurde dabei berücksichtigt. Die Firma smile consult hat die Lesbarkeit geprüft und die Visualisierung und Verarbeitung realisiert.

Das Ziel, Metadaten bei der Produktion von ENCs (S-57-Standard) mitzuführen, konnte erreicht werden.

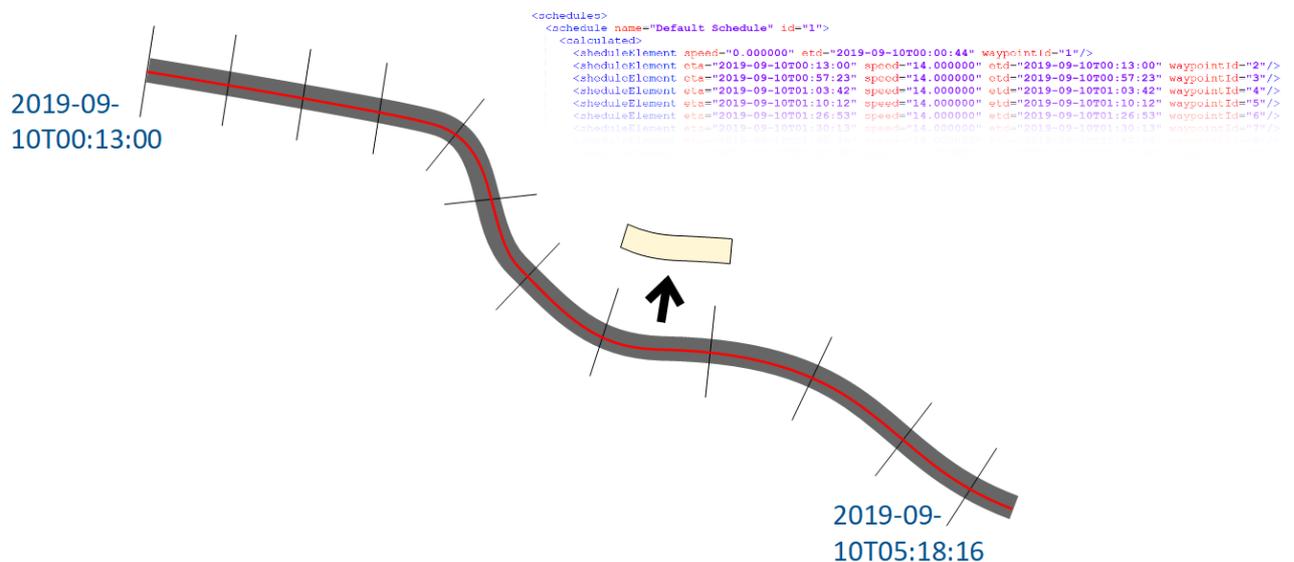
### 5.5.2 Kartendienste

Neben den IHO Dateiformaten wurden Kartendienste entwickelt, die es erlauben, mit geringem technischen Aufwand innovative Produkte des Projektes zu betrachten. Voraussetzung ist, dass eine Software den Web-Map-Service (WMS) Standard des Open Geospatial Consortium (OGC) unterstützt. Da-

mit konnte die Lesbarkeit der Ausgangsdateien und deren Inhalt geprüft werden. Vor allem Dateiformate, welche sich in der Standardisierung befinden, sind mit verhältnismäßig geringem Aufwand erstmals in verschiedenen Anwendungen erfahrbar gemacht worden. Darstellung und Datenbezug werden gebündelt, indem eine Anfrage ein Bild (Map Request) zurückliefert. Detailinformationen werden über ein Feature Request transportiert. Des Weiteren wurde für die Kartendienste ein Webportal erstellt, um diese mit einem Webbrowser zu nutzen. Die Kartendienste ergänzen zudem die Visualisierungsmöglichkeiten des TDS um weitere Dateiformate.

### 5.5.3 Dienst für elektronische Seekarten entlang einer Route

Um dynamische zeitlich und räumlich hochaufgelöste Wassertiefen in einer Portable Pilot Unit (PPU) zu nutzen, wurde prototypisch ein Dienst entwickelt (s.a. 6.1.2). Dieser liefert gezielt für die Zeit und Position eines Schiffes Wassertiefen in Form von bENCs. Dies kann für den Zeitraum der dynamischen Wasserstandsflächen und für die Abdeckung der digitalen hochaufgelösten Bathymetriedaten erfolgen. Um den Zeitraum und die Ausdehnung der zu erstellenden Seekarten einzugrenzen, eignet sich ein geplanter Schiffsroutenverlauf im RTZ-Format. Die Route wird in räumliche und zeitliche Abschnitte aufgeteilt (Abbildung 37). Für jeden Abschnitt werden mehrere bENCs mit Wassertiefen zu unterschiedlichen Zeitpunkten berechnet. Für jeden räumlichen Abschnitt werden zusätzlich mehrere Zeitpunkte bestimmt, damit auch bei einem verzögerten / verfrühten Ablauf der Route die entsprechenden Seekarten mit zeitlich geeigneter Wassertiefe zur Verfügung stehen.

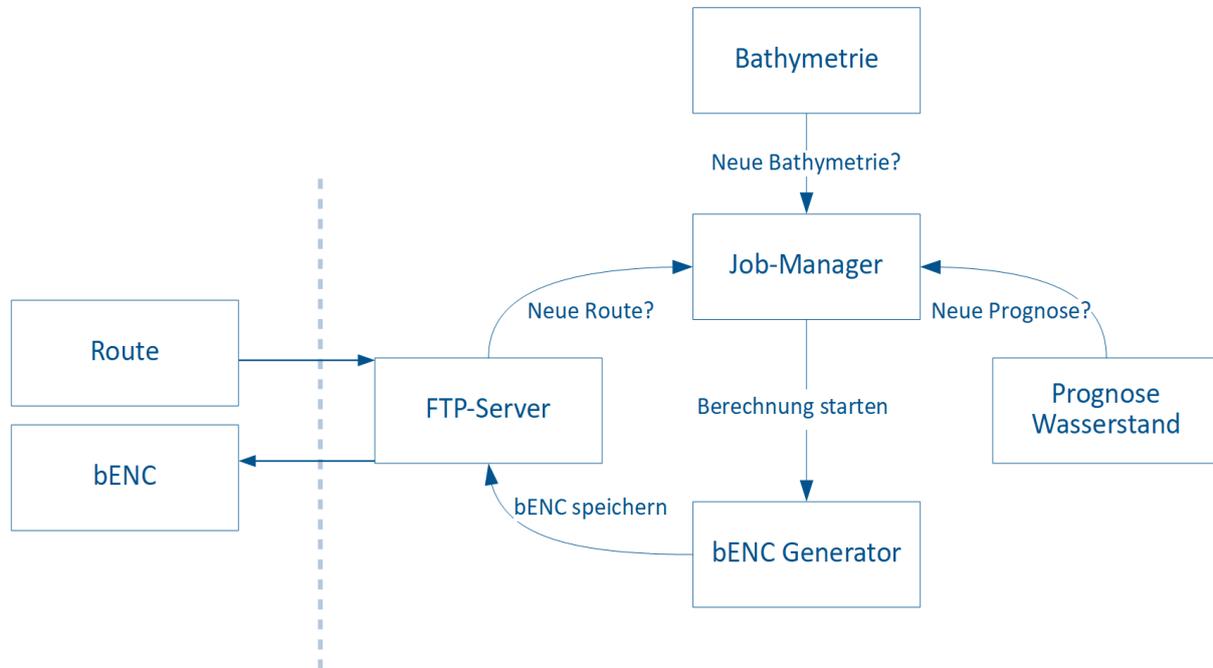


**Abbildung 37** Unterteilung einer Route für die Berechnung von Wassertiefen für einen Zeitraum

Durch die gezielte Berechnung der Wassertiefen wird die Verarbeitungslast des berechnenden Servers sowie das zu transportierende Datenvolumen erheblich reduziert.

Um Seekarten mit Wassertiefen zu beziehen, wird eine RTZ-Route per FTP-Protokoll auf einen FTP-Server gelegt. Dieser erkennt automatisch die neue Route und berechnet fortlaufend aktualisierte bENCs bis die zeitliche Ausdehnung der Route überschritten wird. Bei einer Aktualisierung der Wasser-

standsdaten oder der Bathymetrie werden die bENCs neu berechnet, da flächenhafte Wasserstandsvorhersagen mit großer zeitlicher Differenz an Genauigkeit einbüßen. Das Ablaufschema zur Berechnung für die Berechnung dynamischer Wassertiefen entlang einer Route ist in Abbildung 38 dargestellt.

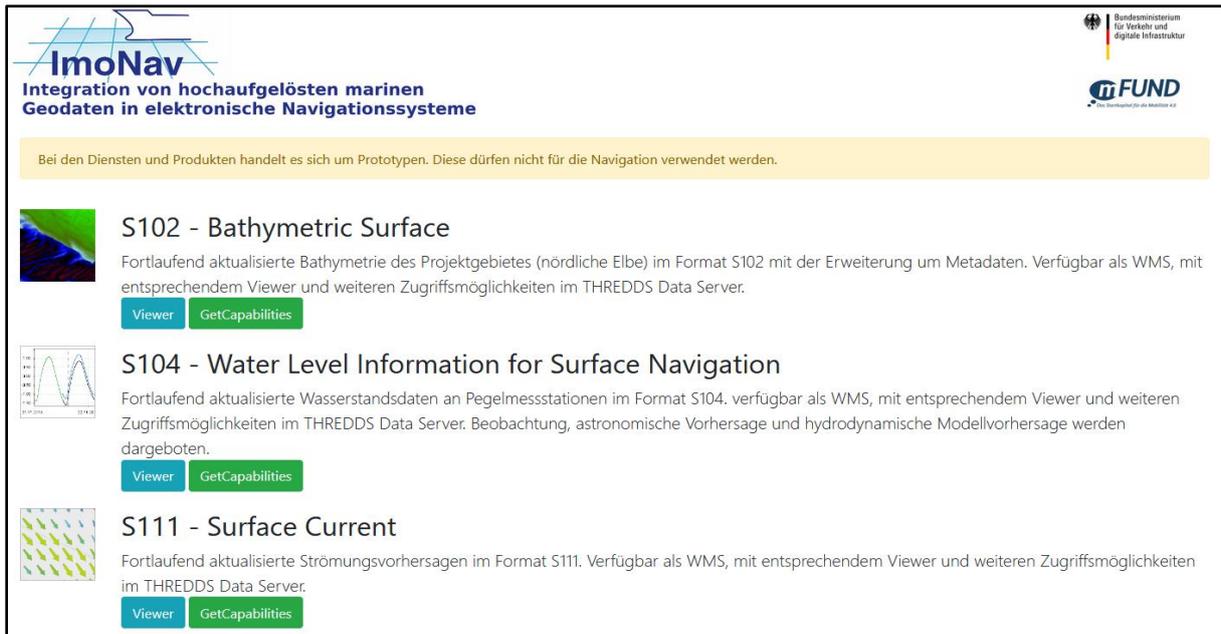


**Abbildung 38** Ablaufschema des Dienstes für elektronische Seekarten entlang einer Route

## 5.6 Datenpräsentation und Visualisierung

### 5.6.1 ImoNav-Portal

Auf der Portalseite (<http://imonavviewer.smileconsult.de>) werden relevante Kartendienste der Öffentlichkeit mit geringer technischer Hürde zugänglich gemacht. Die Dienste sind mit einer Kurzbeschreibung gelistet und können online betrachtet werden (Abbildung 39). Zusätzlich sind die URLs zu den Diensten zur Nutzung mit einer OGC-WMS-kompatiblen Software angegeben. Weitere Produkte und Zwischenprodukte können zusätzlich auf dem im Portal verlinkten TDS betrachtet oder heruntergeladen werden.



**ImoNav**  
Integration von hochaufgelösten marinen Geodaten in elektronische Navigationssysteme

Bei den Diensten und Produkten handelt es sich um Prototypen. Diese dürfen nicht für die Navigation verwendet werden.

**S102 - Bathymetric Surface**  
Fortlaufend aktualisierte Bathymetrie des Projektgebietes (nördliche Elbe) im Format S102 mit der Erweiterung um Metadaten. Verfügbar als WMS, mit entsprechendem Viewer und weiteren Zugriffsmöglichkeiten im THREDDS Data Server.  
[Viewer](#) [GetCapabilities](#)

**S104 - Water Level Information for Surface Navigation**  
Fortlaufend aktualisierte Wasserstandsdaten an Pegelmessstationen im Format S104. verfügbar als WMS, mit entsprechendem Viewer und weiteren Zugriffsmöglichkeiten im THREDDS Data Server. Beobachtung, astronomische Vorhersage und hydrodynamische Modellvorhersage werden dargeboten.  
[Viewer](#) [GetCapabilities](#)

**S111 - Surface Current**  
Fortlaufend aktualisierte Strömungsvorhersagen im Format S111. Verfügbar als WMS, mit entsprechendem Viewer und weiteren Zugriffsmöglichkeiten im THREDDS Data Server.  
[Viewer](#) [GetCapabilities](#)

**Abbildung 39** Bildschirmfoto des ImoNav-Portals (Ausschnitt)

Auf dem Nutzerworkshop (s.a. 6.3) konnten die Teilnehmer das Portal auf einem großen Touchscreen ausprobieren und bereits Feedback geben. Es wurde darauf hingewiesen, dass eine kombinierte Betrachtung von großem Nutzen sei. Zusätzlich kam bei den Teilnehmern der Wunsch auf, weitere Kartendienste, wie zum Beispiel Seegang und Wind, bereitzustellen.

### 5.6.2 Präsentation in der mCLOUD

Am Beispiel der Wasserstandsdaten wird die Präsentation in der mCLOUD beispielhaft gezeigt:

#### Projekt ImoNav: Wasserstandsvorhersagen für die Deutsche Bucht und westliche Ostsee

Wasserstandsvorhersagen des numerischen Vorhersagemodells des BSH, die mit Ergebnissen des MOS-Verfahrens (MOS: Model Output Statistics) verknüpft und flächenhaft optimiert wurden. Die Wasserstandsabweichungen beziehen sich auf NHN. Dargestellt ist ein Testdatensatz für einen Vorhersagezeitraum von 24 Stunden im Bereich der Deutschen Bucht und westlichen Ostsee.

#### Bereitgestellt durch

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)

#### Art des Datenzugangs

Portal / WMS

#### Aktualität der

Datensatzbeschreibung

14.02.2019

mFUND-Projekt: ImoNav, FKZ: 19F2018A



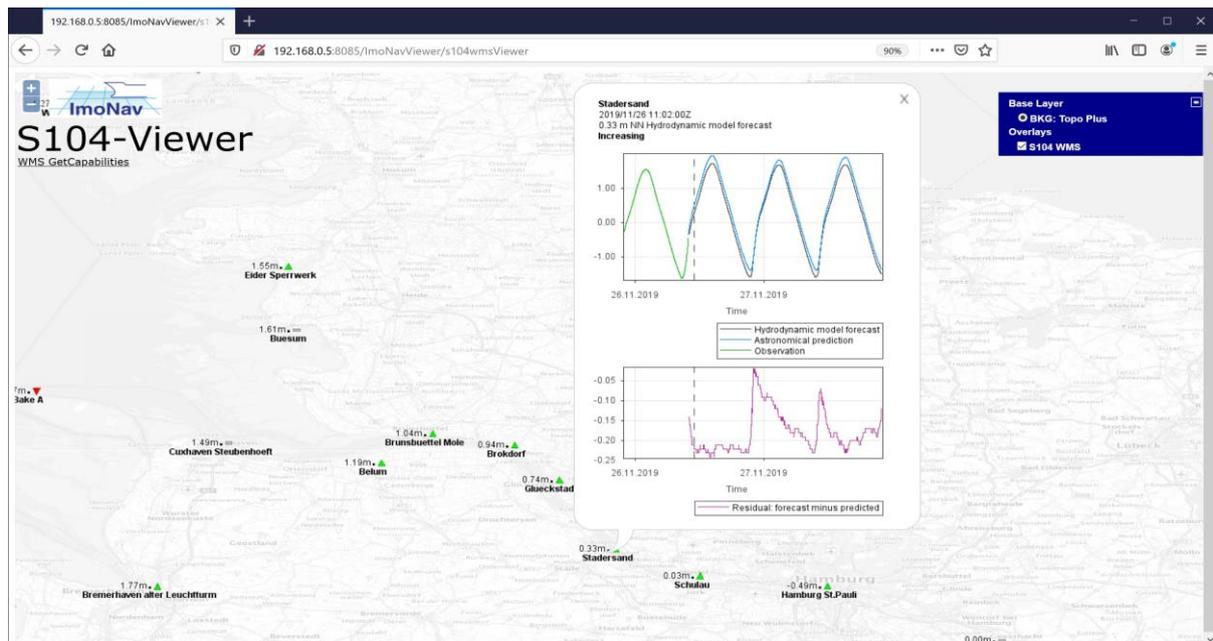
Wasserstraßen  
und Gewässer



Data-Run

**Abbildung 40** Präsentation der Wasserstandsdaten in der mCLOUD

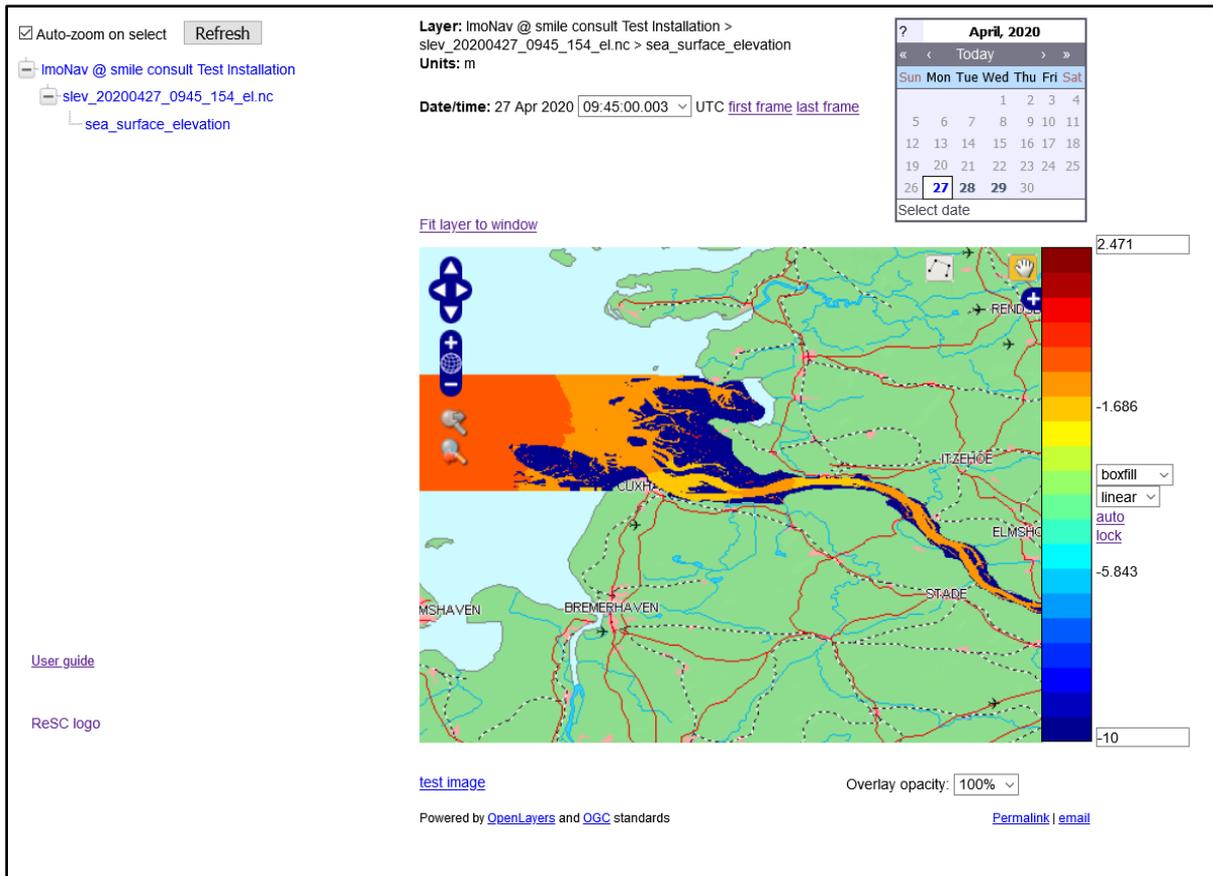
Der Eintrag zu den Wasserstandsdaten in der m-Cloud (**Abbildung 40**) enthält unter anderem zwei Verweise, die zum bereits genannten Portal sowie auf das getcapabilities-Dokument des zugehörigen WMS führen. Eine Ausgabe des WMS für die Wasserstandsvorhersage ist beispielhaft in der nachfolgenden **Abbildung 41** zu sehen.



**Abbildung 41** Wasserstandszeitreihe am Ort

Der in Anlehnung an das zugrundeliegende Datenformat (S-104, IHO-Standard) benannte S-104-Viewer stellt in Überlagerung mit einer topographischen Karte verschiedene Positionen entlang des Projektgebietes dar, für die eine Vorhersage des Wasserstandes in Form einer Zeitreihe verfügbar ist. Die Auswahl einer dieser Stationen in der Karte führt zu einer graphischen Darstellung der Zeitreihe.

Neben dieser punktuellen Information ist auch ein Kartendienst für die flächenhafte Darstellung des Wasserstandes verfügbar. Die graphische Ausgabe dieses Dienstes ist beispielhaft in der folgenden [Abbildung 42](#) wiedergegeben.



**Abbildung 42** Kartendienst für den vorausberechneten, flächenhaften Wasserstand für das Projektgebiet

Da es sich bei dem Wasserstand um eine zeitabhängige Größe handelt, die im Mittel für zwei bis drei Tage in der Zukunft verfügbar ist, lässt sich ein Zeitpunkt in 15-Minuten-Schritten aus diesem Zeitraum interaktiv wählen.

## 6. Darstellung und Datentransfer Land-Schiff

### 6.1 Darstellung der Geodaten in ECDIS/ECS

Seit geraumer Zeit wird die Nutzung von Geodaten zur Unterstützung der sicheren Navigation von Schiffen zunehmend vorangetrieben. Die ersten Anwendungen, die der Schifffahrt zur Verfügung standen, waren innovative Entwicklungen von privaten Schifffahrtselektronik-Firmen. Aufbauend auf den Erfahrungen der proprietären Datenformate hat die IHO bereits recht früh den internationalen S-57-Datentransfer-Standard für elektronische Seekarten („Electronic Navigational Chart“, ENC) entwickelt [19]. Parallel dazu erstellte die IMO Leistungsstandards für Systeme zur Nutzung dieser ENCs, sogenannte „Electronic Chart Display and Information Systems“ (ECDIS). Nach anfänglich freiwilliger Nutzung dieser Systeme wurde das ECDIS von der IMO als ausrüstungspflichtig für bestimmte Schiffsklassen verbindlich in die SOLAS-Konvention aufgenommen.

Das ENC-Konzept der IHO basiert auf Grundlage eines Datentransferstandards, der es hydrographischen Diensten ermöglicht, Seekarteninformationen an Bord verfügbar zu machen. Der Standard für die Darstellung der Informationen wurde in die bordseitigen Systeme integriert. Diese Zweiteilung ist problematisch, weil Verbesserungen der Standards nicht immer in allen an Bord befindlichen Systems eingespielt werden konnten. Basierend auf diesen Erkenntnissen einwickelte die IHO den S-100-Standard als universelles hydrographisches Datenmodell. Dieses Modell löst das geschilderte Dilemma und ermöglicht zusätzlich die Integration verschiedener hydrographischer und anderer Informationen. Dies war ein entscheidender Schritt in Richtung digitaler Transformation in der maritimen Branche (Maritime 4.0). Die IMO nahm den Trend ebenfalls auf und startete die E-Navigation-Initiative. Neben der Annahme eines „Strategic Implementation Plan (SIP) für die elektronische Navigation“ stimmte die IMO zu, die IHO Geospatial Information Registry (GI-Registry), in dem sich die Komponenten der IHO S-100-Standardserie befinden, als Grundlage für die Common Maritime Data Structure (CMDS) der IMO zu verwenden. Die IHO-GI-Registry hostet jetzt S-100-kompatible Standards verschiedener Organisationen und ermöglicht zukünftig den Austausch von Datenkonzepten und Datenmodellen zwischen den verschiedenen Standards. Sie ist künftig auch geeignet, die Interoperabilität zwischen verschiedenen S-100-basierten Produkten zu unterstützen.

Derzeit gibt es in der Schifffahrt zwei verschiedene Gruppen von Darstellungssystemen kartographischer Informationen. Zum einen das bereits erwähnte ECDIS, das den IMO „Performance Standards“ und den entsprechenden Teststandards der IEC entspricht und als solches ENC der hydrographischen Dienste nutzt. Zum anderen das sogenannte ECS („Electronic Chart System“), das ebenfalls elektronische Seekarten darstellt, aber nicht den genannten Standards entspricht und zusätzlich zu den ENC auch inoffizielle Daten benutzt. Die verschiedenen ECSs haben teilweise einen größeren Funktionsumfang, da sie nicht an die Regeln der genannten Standards gebunden sind und deshalb schneller neue Technologien umsetzen können. Eine besondere Ausformung des ECS sind die „Portable Pilot Units“ (PPU), die auf spezielle Informationsbedarfe von Lotsen in Abhängigkeit der Revierbesonderheiten zugeschnitten sind.

Innerhalb des ImoNav-Projekts wurden beide Darstellungssysteme betrachtet. Im Projektverlauf wurden Anwendungen für integrierte Datenströme mit Fokus auf die PPU des Projektpartners SevenCs sowie für Web-basierte Darstellungen entwickelt und getestet.

### 6.1.1 Voranalysen:

In der ersten Phase des Projekts wurden verschiedene Voranalysen durchgeführt.

Dabei wurden die derzeitigen internationalen Standards im Anwendungsbereich des Projektes ImoNav sowie die zu erwartenden neuen Standards mit Bezug zum Projekt untersucht und dokumentiert. Diese Arbeitsdokumente bilden sowohl die Grundlage für die Anforderungsprofile, soweit diese sich auf internationale Standards beziehen, als auch die Arbeitsgrundlage für die projektbegleitende Validierung von Projektergebnissen.

Darüber hinaus wurden Recherchen zu verwandten Projekten und Produkten durchgeführt (Beispiel DUKC® - Dynamic Under Keel Clearance)<sup>6</sup>, um eventuelle Doppelentwicklungen zu vermeiden bzw. auf Ergebnisse von Vorprojekten zurückgreifen zu können. Die projektinternen Voranalysen haben ergeben, dass es zwar einige Querverbindungen geben könnte, aber der Ansatz in ImoNav anders ist. ImoNav konzentriert sich auf Seegebiete, die von großen Tiden- und Strömungsschwankungen geprägt sind. Demgegenüber bezieht DUKC® die Welleneffekte mit ein. Es ist zu empfehlen, im Projektnachgang von ImoNav die dann vollständigen Ergebnisse mit den relevanten Projekten zu vergleichen, um eventuelle Synergien für die Verwertung der Ergebnisse zu nutzen.

Des Weiteren wurden generelle Anforderungsprofile für die geplante Verbesserung der PPU-Software unter Einbeziehung von Anwenderbedürfnissen, die durch Interviews erarbeitet wurden, erstellt. Die Voranalysen beinhalteten auch die Dokumentation von zu verwendenden Daten-Formaten und notwendigen Schnittstellen in der Software zu externen Systemen und erste Entwürfe der Anforderungsprofile für den Datentransfer.

Weiter wurde die Spezifizierung und Entwicklung eines Datenmodells für „gridded data“ im SevenCs S-100-Kernel "Nautilus" als Vorbereitung für die spätere Nutzung der zu erwartenden Daten in der vorhandenen Anwendersoftware vorangetrieben.

### 6.1.2 PPU (Portable Pilot Unit):

Ergänzend zur Verwendung von ECDIS, die auf Schiffen entsprechender Klassen von der IMO ausrüstungspflichtig sind, werden von vielen Lotsen sogenannte „Portable Pilot Units“ (PPU) verwendet. Dabei handelt es sich um Systeme ähnlich eines Tablets, die von den Lotsen mit an Bord gebracht werden und spezielle elektronische Navigationskarten sowie andere, für die Beratung der Schiffsführung erforderliche Daten und Sensorinformationen darstellen. Mit diesen zusätzlichen Informationen werden den Lotsen detaillierte Lageinformationen zur Verfügung gestellt, um die sichere Lotsung der Schiffe zu unterstützen (s. Abbildung 43).

Die bisherige PPU Software des Projektpartners SevenCs nutzt den existierenden SevenCs Kernel, der auch in ECDIS Systemen der ersten Generation von SevenCs genutzten Basissoftware eingesetzt wird, unterstützt aber nicht die neuen S-100-Standards. Die Software musste an diese neuen Standards, hier vor allem an die Standards S-101 [20] und S-102 [21], angepasst werden. In der ersten Phase wurden hierfür entsprechende Anforderungsprofile entwickelt und deren Realisierbarkeit untersucht. Dabei lag ein besonderer Schwerpunkt auf der Integration von "Gridded Data" in ein sogenanntes SENC (Sys-

---

<sup>6</sup> <https://omcinternational.com/products/dukc-series-5/>

tem ENC Format), das von der IHO (International Hydrographic Organization) als proprietäres Austauschformat vorgesehen ist. Das sogenannte SENC-Format, ein von ENC-Datendienstleistern genutztes und extern zertifiziertes proprietäres Datenformat, unterstützt die Nutzung der S-57-, S-101- oder S-102-Originaldaten durch Vorabauflbereitung (preprocessing) innerhalb der Logistikkette der Datenerlieferung.



**Abbildung 43** PPU mit Nutzung von ENCs

Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Unterstützung der Daten in der Testanwendung zunächst nur prototypisch implementiert wurde. Zur Einbindung von S-102 wurde versucht, den IHO-Standard als Grundlage für die Implementierung zu nehmen. Allerdings wurde bei den Versuchen der praktischen Implementierung festgestellt, dass der derzeitige S-102-Datenstandard nicht konsistent ist, sowie noch fehlerhaft bzw. uneindeutig. Von einer proprietären Implementierung von S-102 in das Nauticus-Kernel wurde abgesehen, da dies nicht dem Wesen eines ECDIS-Kernels entspricht.

Eine tiefere Analyse zum besseren Verständnis der Unzulänglichkeiten des S-102-Standards hinsichtlich seiner Praxistauglichkeit wurde vorgenommen. Verbesserungsvorschläge wurden erarbeitet und sollen beim „S-102 Project Team Meeting“ der IHO im Oktober 2020 (zusammen mit solchen anderer internationaler Interessensvertreter aus der Industrie) vorgestellt werden.

In einer auf die gewonnenen Erkenntnisse der S-102-Analyse basierenden überarbeiteten Version der PPU-Software ist es kurz vor Projektende gelungen, eine Darstellung von S-102-Daten (incl. 3D-Darstellung) zu realisieren ([Abbildung 44](#)).

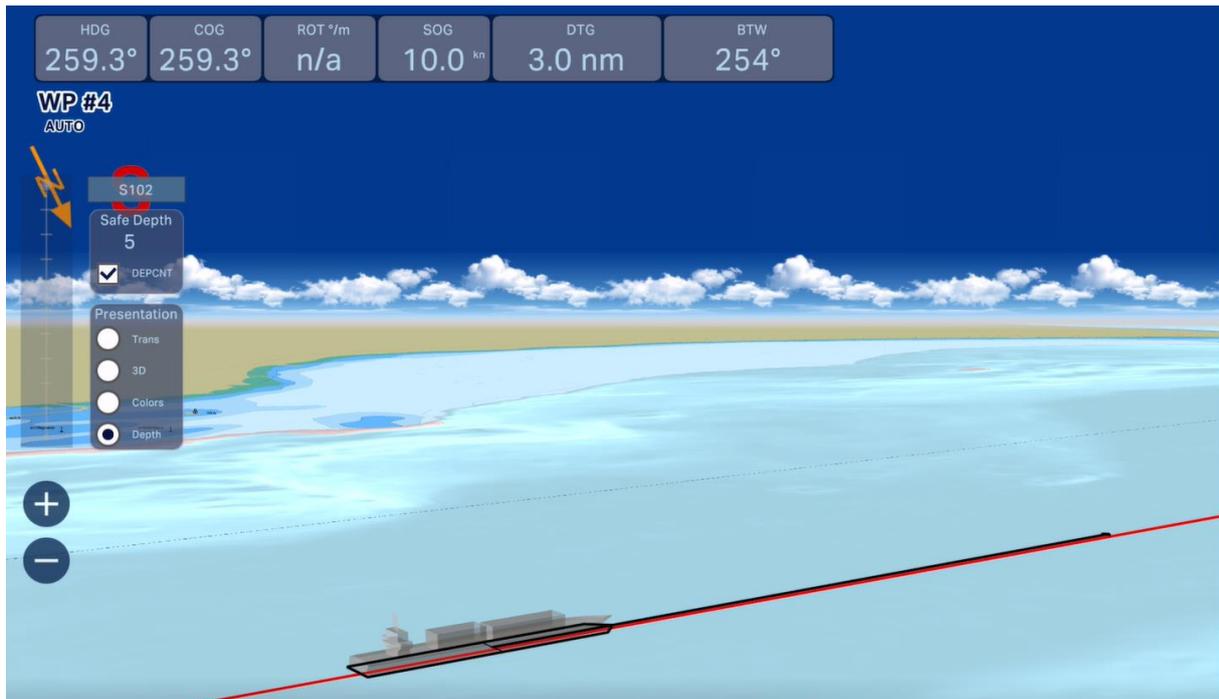
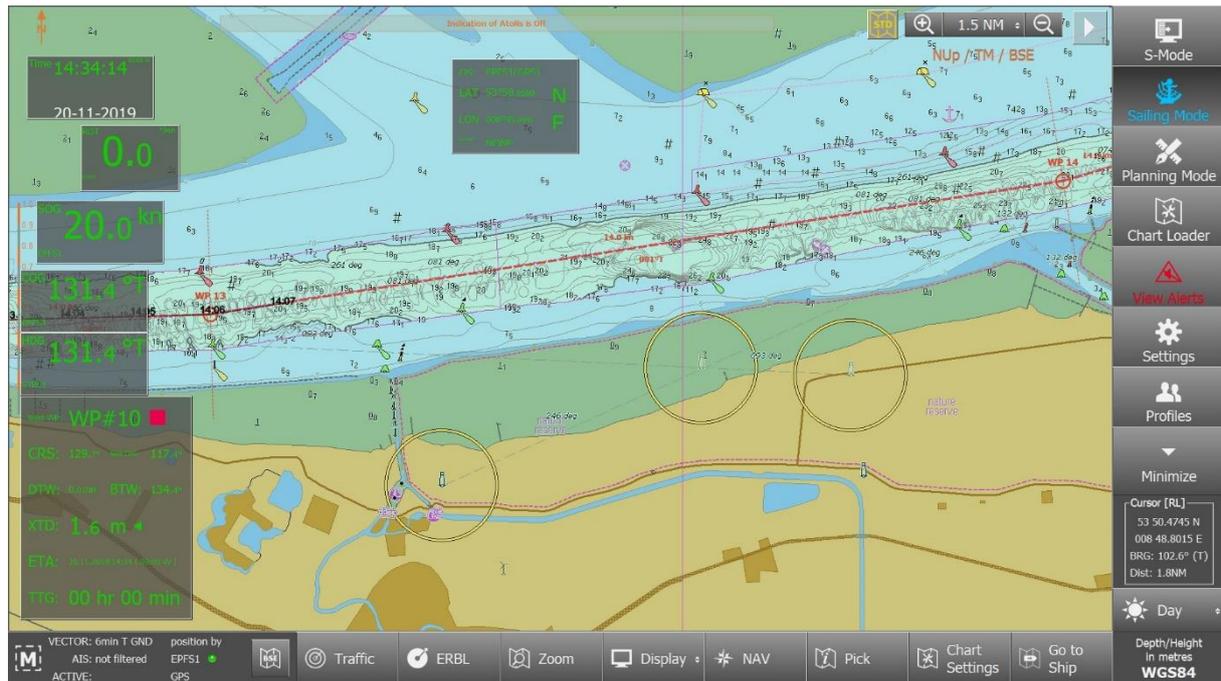


Abbildung 44 3D-Darstellung von S-102 Daten in einer PPU

### 6.1.3 Erweiterung der Datendarstellung

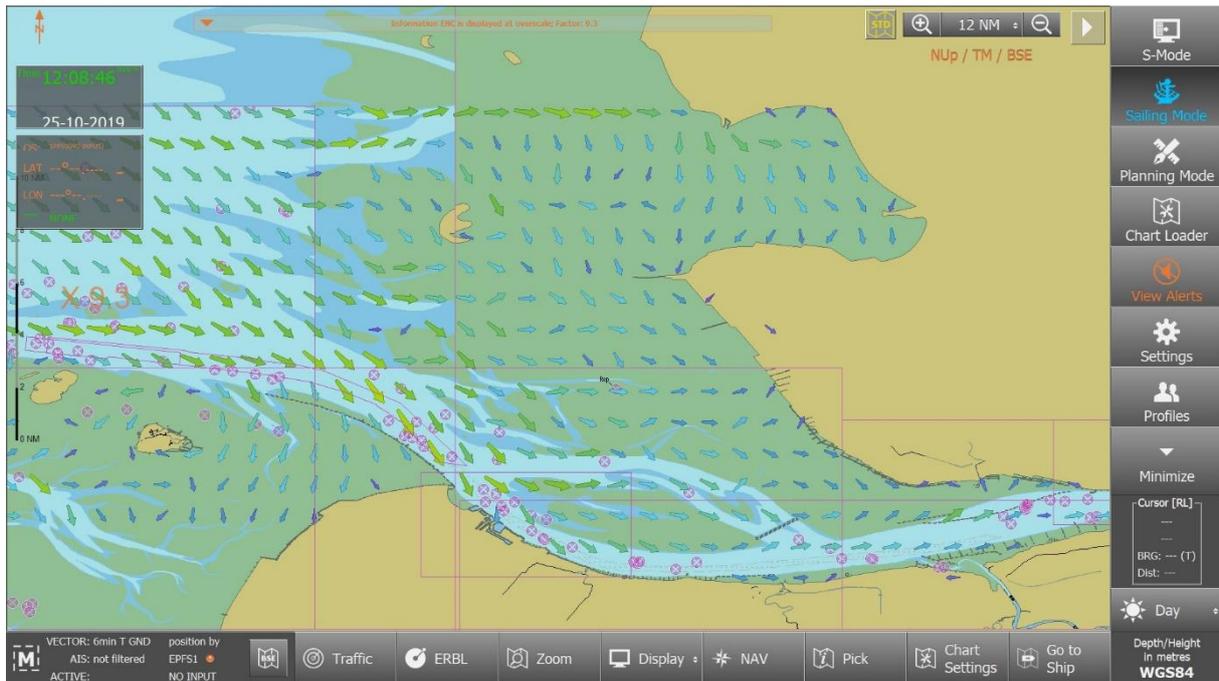
Im weiteren Projektverlauf wurden die "Display Engine" (die für die Kartendarstellung benutzten Grafikkomponenten und Module) der Software "Nautilus", der sogenannte S-100-Kernel, von Grund auf neu erstellt. Diese Neuentwicklung war nötig, um die Software zur Verarbeitung des neuen S-100-Datenformates der IHO zu ertüchtigen. Darüber hinaus wurde die Software so gestaltet, dass sie die benötigte Interoperabilität verschiedener Produkte erlaubt.

Ursprünglich war die Anforderung an ECDIS-Kernel aller Hersteller auf die Unterstützung eines einzigen Datenproduktes, nämlich der Electronic Navigational Chart (ENC) im herkömmlichen S-57-Datentransferstandard beschränkt. Diese Anforderung hat sich, vor allem für die Entwicklung innovativer Produktideen des Projekts, verändert. Diese erweiterte Anforderung zur Einbindung unterschiedlicher Datenprodukte, z.B. ENCs im S-101-Format, Bathymetriedaten im S-102-Format und weitere Produkte, erhöht zugleich die Anforderung an die Leistungsfähigkeit des Systems, da die Darstellung aus verschiedenen Datenprodukten, das Rendering, in angemessenem Zeitrahmen erfolgen muss.



**Abbildung 45** PPU im ImoNav Modus

Im Projekt wurde die Darstellung der unterschiedlichen Datentypen und deren Zusammenspiel erweitert bzw. verbessert, um so den Nutzeranforderungen besser Rechnung zu tragen. Dazu wurde die Präsentation der aufbereiteten Informationen um Bathymetriedaten erweitert (s. [Abbildung 45](#)). So genannte „dynamische bENCs“ wurden eingeführt, deren Besonderheit darin liegt, Tiefeninformationen in Abhängigkeit einer zeitlichen Komponente (aktuelle Zeit oder Zukunft) darstellen zu können. Weiterhin wurde die Darstellung von Strömungsdaten im WMS-Format in die PPU implementiert. Darüber hinaus wurde die Einbindung von zusätzlichen Daten als WMS-Overlay ermöglicht, um so weitere Information, auch solche, die derzeit noch nicht zur Verfügung stehen, den Nutzern präsentieren zu können. Dieser Schritt verdeutlicht die Zukunftssicherheit des im Projekt erstellen Testprodukts.



**Abbildung 46** PPU, Seekarte überlagert mit Strömungsdarstellung

Bei der grafischen Präsentation wurde zum einen die Darstellung im derzeitigen Anzeigemodus, das heißt entsprechend der Regelungen der IHO zur ENC-Präsentation, ermöglicht, zum anderen wurde eine erweiterte Darstellung unter Einbeziehung der integrierten ImoNav-Datenströme implementiert. Es wurden innovative routen- und schiffsbasierte Datensätze unter Einbeziehung der Zeitschiene eingeführt und zusätzlich geobasierte Daten, wie z.B. Strömungen im WMS Format, dargestellt ([Abbildung 46](#)). Weiterhin wurde die Integration von zukünftigen IHO-Datenstandards wie S-104 (Water Level Information for Surface Navigation) und S-111 (Surface Currents) vorbereitet.

Diese Kombination ermöglicht dem System in Zukunft, neue Datensätze, die in WMS zugeliefert werden, einfach und ohne Softwareänderungen darstellen zu können.

## 6.2 Verarbeitung der Daten für Routen- und Reiseplanung

### 6.2.1 Erste Implementierung des „Grid SENC“ Datenmodells

SevenCs entwickelte in ImoNav einen "Nautilus"-basierten Prototypen zur Verarbeitung und Visualisierung gegriddeter Daten, d.h. Daten die in quadratischen Kacheln gleicher Größen zur Verfügung gestellt werden. Dazu wurde die Darstellung von Strömungsdaten als Beispiel implementiert. Der Prototyp wurde genutzt, um erste Ergebnisse hinsichtlich des Verhaltens und der Performance zu erhalten und zu prüfen, ob das Modell für die Darstellung gegriddeter Daten geeignet ist. Weiterhin wurde das „Grid SENC Modell“ (Nautilus-internes Datenmodell für gerasterte Geodaten) für die Nutzung in der Routen- und Reiseplanung sowie für die Darstellung der Geodaten optimiert.

Gemeinsam mit den Projektpartnern wurden verschiedene, vor allem technische Aspekte definiert, die dem Zielsystem PPU ermöglichen, Informationen zu Wassertiefen darzustellen. Diese betreffen sowohl aktuelle Wassertiefen, als auch Vorhersagedaten der erwarteten Wassertiefen in der Zukunft. Ferner wurden auch Entwicklungen der internationalen Standards mit Projektbezug verfolgt. Nach entspre-

chenden Voranalysen wurden die internen Arbeitsdokumente für die Entwicklungsarbeiten bei SevenCS entsprechend angepasst. Hier fanden vor allem die Entwicklungen der IHO Standards S-102, S-104 und S-111 Eingang, deren aktueller Stand zur Ergänzung der Anforderungen herangezogen wurden. Im Besonderen wurde das Arbeitsdokument „Nutzeranforderungen für ImoNav“, das als Grundlage für die Produkt- und Softwareentwicklungen diente, angepasst. In dieses Dokument flossen auch die Ergebnisse verschiedener Nutzerbefragungen ein, die im Jahr 2018, unter anderem in Zusammenhang mit dem ImoNav-Nutzerworkshop und der Beteiligung an Konferenzen erfasst wurden. Damit wurde auch eine Validierung der bisherigen Nutzeranforderung erreicht und eine Anpassung der geplanten Projektergebnisse an die sich ändernden Anforderungen der maritimen Welt durchgeführt.

### 6.3 Nutzereinbindung

Bereits in der Eingangsphase des Projekts wurden Nutzerbedürfnisse durch gezielte Interviews und die Einbindung von Ergebnissen verschiedener e-Navigation-Initiativen und Testszenarien ("Test Beds") in das Anforderungsprofil eingepflegt. Dabei wurden auch die Erfahrungen der Projektmitarbeiter von IHO-, IMO- und IALA-Initiativen, wie etwa der Entwicklung der IMO RESOLUTION MSC.467(101) „GUIDANCE ON THE DEFINITION AND HARMONIZATION OF THE FORMAT AND STRUCTURE OF MARITIME SERVICES IN THE CONTEXT OF E-NAVIGATION“, genutzt.

Ein wichtiges Element der Nutzereinbindung war der nach Arbeitsplan vorgesehene Nutzerworkshop. Dieser wurde bewusst in einen Zeitraum gelegt, an dem bereits sichtbare Ergebnisse und verwertbare Darstellungen in Endanwendungen vorlagen, der aber auch noch zeitliche Möglichkeiten bot, Anregungen und Bemerkungen der Nutzer in das Projekt einfließen zu lassen. Diesen Nutzerworkshop führte das Konsortium am 28. November 2019 durch. Am Workshop, geleitet von SevenCs, nahmen fast 30 Teilnehmer von Industrie und Behörden teil.



**Abbildung 47** Vortragsteil des Nutzerworkshops von ImoNav

Im Vortragsteil des Workshops ([Abbildung 47](#)) wurden die bisherigen Ergebnisse des Projektes vorgestellt, einschließlich einer Live-Demo der entwickelten Nutzersoftware.

Im anschließenden interaktiven Teil ([Abbildung 48](#)) brachten die Teilnehmer ihre Sicht auf das Projekt und Erweiterungswünsche ein.



**Abbildung 48** Interaktiver Teil des Nutzerworkshops von ImoNav

Zunächst wurden die Teilnehmer um Beiträge gebeten, wie die vorgestellten ImoNav-Produkte verändert oder erweitert werden könnten. Die Teilnehmer wurden zudem gefragt, welche Anforderungen sie an die Produkte haben, insbesondere hinsichtlich Datenqualität und Genauigkeitsangaben. Anschließend wurden Beiträge, die den Teilnehmern besonders wichtig erschienen, durch Punktevergabe priorisiert. Die Nennungen mit den jeweils höchsten Punktzahlen wurden im Nachgang des Nutzerworkshops im Projektteam detailliert betrachtet. Die am höchsten priorisierten Beiträge je Frage waren:

Frage 1: Was ist gut an den vorgestellten Produkten?

- Anwendung von Standards

Frage 2: Was fehlt oder was sollte verändert werden?

- Anwendung unabhängig vom Betriebssystem
- Qualitätsinformation nutzerfreundlich
- Anzeige für Schleusentorstand (offen/geschlossen)

Frage 3: Welche Anforderungen haben Sie als Nutzer an die Produkte?

- intuitive Visualisierung
- unabhängig vom Endgerät

Frage 4: Welche Angaben zu Datenqualität und Genauigkeit sind für Sie relevant und wie könnten Sie umgesetzt werden?

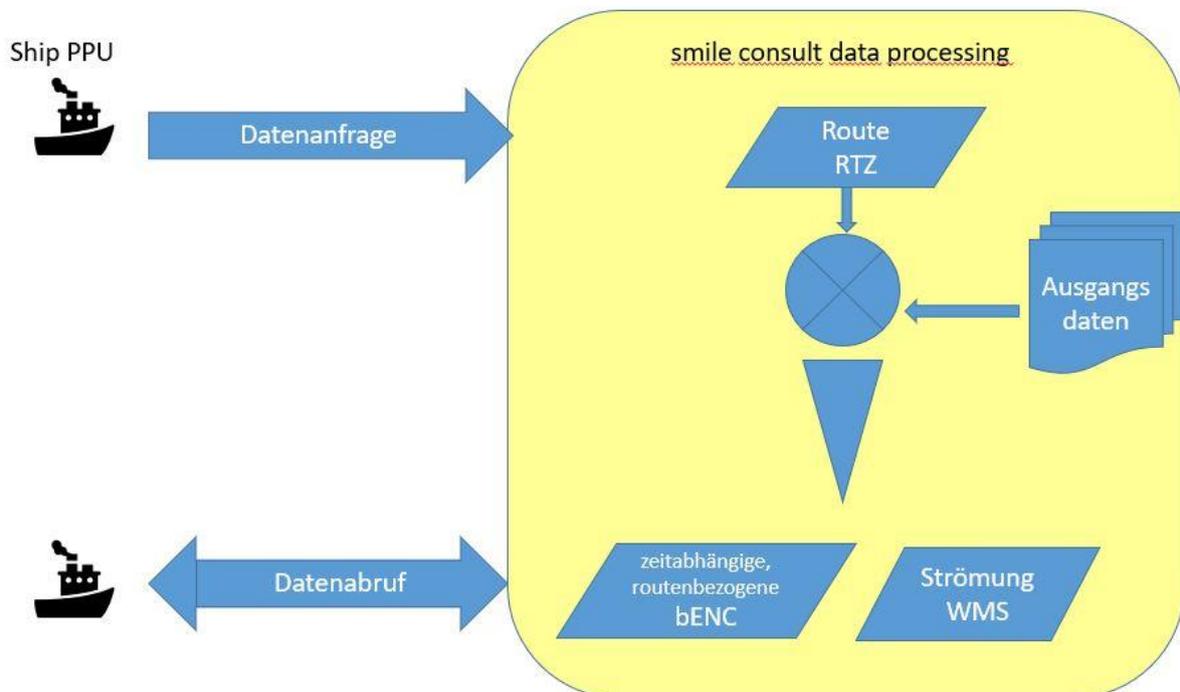
- Integrität/Genauigkeit
- Validierung der Strömungsdaten anhand von Naturmessungen

Die Ergebnisse des Workshops wurden zur Anpassung der Nutzeranforderungen genutzt. Im weiteren Projektverlauf wurde die Forderung nach intuitiver Visualisierung im Projekt aufgenommen. Der Wunsch nach Offline-Nutzung der Daten wurde ebenfalls berücksichtigt. Die anderen Forderungen, z.B. Nutzung auf globaler Ebene oder Betriebssystemunabhängigkeit, überschritten den Projektrahmen. Es wird empfohlen, dies in Nachfolgeprojekten oder in der projektunabhängigen Produktentwicklung weiterzuentwickeln. Details zum Nutzerworkshop befinden sich im Anhang 8.2.

## 6.4 Datentransfer Land – Schiff

Für die Konzipierung des Datentransfers Schiff-Land-Schiff und um die schiffsroutenbezogene Datenvernetzung zu ermöglichen, wurden Tests mit dem Projektpartner smile consult zum Austausch von Schiffsrouten im vorgegebenen Routenaustauschformat RTZ (route plan exchange format), wie im Standard IEC-61174:2015 (Redline Version) beschrieben, durchgeführt. Von SevenCs wurden Schiffsrouten im RTZ-Format für Fahrten von Hamburg nach Bremerhaven dem Partner smile consult zur Verfügung gestellt. In diesem Zusammenhang wurden Analysen des RTZ-Formats in Bezug auf solche Komponenten und Elemente durchgeführt, die von smile consult aufgenommen werden können, um dies auf die vom Projektpartner BSH zur Verfügung gestellten Wasserstandsvorhersagen anwenden zu können.

Die Implementierung war zwar zeitaufwendig, in ImoNav konnte aber erreicht werden, dass das existierende Routenaustauschformat in das Projekt eingebunden werden konnte und eine allgemeine Nutzbarkeit einer daraus resultierenden Lösung ermöglicht wurde.



**Abbildung 49** Datenströme in ImoNav

Der Datenaustausch mit dem Projektpartner smile consult wurde 2019 erfolgreich implementiert und getestet. Dieser beinhaltete sowohl die Übermittlung der geplanten Schiffsroute an smile consult als auch den Empfang der verschnittenen Daten entlang der Route von smile consult (Abbildung 49).

Im Sommer 2019 wurde zudem eine Analyse der Mobilfunkabdeckung im Revier durchgeführt. Die Abbildungen 50 und 51 zeigen beispielhaft für zwei Anbieter graphische Darstellungen der Mobilfunkabdeckung auf der Elbe mit einigen Details relevanter Mobilfunklücken im Bereich Elmshorn und in der Elbemündung. Dabei wurde deutlich, dass im Elbeverlauf 4G weitgehend verfügbar ist. Die Anbieter Telekom und Vodafone decken fast den gesamten Verlauf mit 4G ab. Auswertungen für den Anbieter O2 zeigten eine vergleichbare Abdeckung.

Genauere Analysen (z.B. Tageszeit und Witterungsabhängige Abdeckungsschwankungen) sind nicht vorhanden. Deren genaue Erfassung sprengen den Projektrahmen und sind für die Zielsetzung des Projektes von geringer Relevanz.



Abbildung 50 Mobilfunkabdeckung Elbe – Telekom

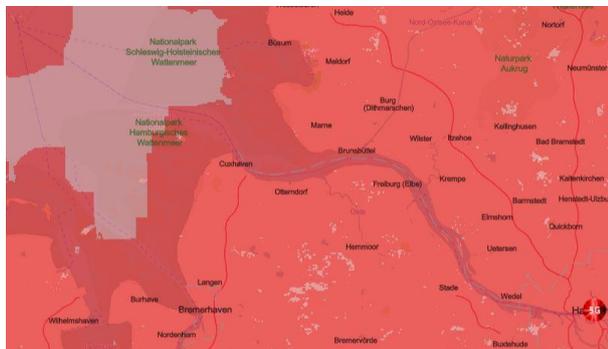


Abbildung 51 Mobilfunkabdeckung Elbe -Vodafone

## 6.5 Prä-operationeller Testbetrieb

Um die Datenübertragung im angestrebten Testbetrieb zu gewährleisten, erstellte SevenCs eine Detail-Analyse der Abdeckung des geplanten Testgebietes (Elbe und Hafen Hamburg) mit Mobilfunk (s. 6.4). Mit einer Abdeckung von größer als 80% wurde entschieden, die 4G-Mobilfunktechnologie für den Praxistest zu nutzen.

Der für März/April 2020 geplante Testbetrieb wurde inhaltlich von SevenCs vorbereitet. Geplant war die Nutzung einer Fähre von Hamburg nach Helgoland. Erste Gespräche zur Durchführung wurden geführt und Genehmigungen eingeholt. Durch die Beschränkungen aufgrund der COVID-19-Pandemie konnte der Testbetrieb nicht im vollen Umfang durchgeführt werden. Allerdings wurde ein erster präoperativer Testbetrieb mit eingeschränkter Fahrt im Hamburger Hafengebiet durchgeführt.

### 6.5.1 Auswertung der Datenströme

Neben dem o.g. Praxistest wurden während des gesamten Testbetriebs vom 01.03. bis 30.04.2020 die Datenströme ausgewertet und die Verfügbarkeit von ImoNav-Produkten geprüft. Diese Komponente des Testbetriebs wurde von smile consult koordiniert und analysiert. Das generelle Vorgehen zur Auswertung der Datenströme ist in [Abbildung 52](#) dargestellt. Protokolliert wurden die Anzahl, Dauer und das Volumen der zur Datenaustauschplattform übertragenen Daten durch die Komponente "Updater", Anzahl und Umfang der durchgeführten Berechnungen auf dem Server, Aufkommen der aufgerufenen Dienste und das dabei aufgezeichnete Datenvolumen. Um eine vertiefte Kenntnis über die Verwendung der bereitgestellten Dienste zu erhalten, wurden hierbei zusätzlich die Art des Aufrufs (Parameter etc.) sowie die räumliche Ausdehnung des betroffenen Gebietes protokolliert.

Für alle genannten Vorgänge wurde zudem festgehalten, ob der jeweilige Vorgang mit oder ohne Erfolg durchgeführt wurde. Im Fehlerfall wurden Details zur Problematik erhoben. Insbesondere aus den zuletzt genannten Informationen erhoffen sich die Autoren einen Erkenntnisgewinn über die Stabilität und Robustheit des entwickelten Gesamtsystems. Es sollte möglich sein, auf der Basis der gemachten Erfahrungen nützliche Hinweise für einen operationellen Betrieb in einem praxistauglichen Maßstab

abzuleiten. Die Auswertung der Datenströme bildete die Grundlage für die Durchführung und Auswertung des Testbetriebs.

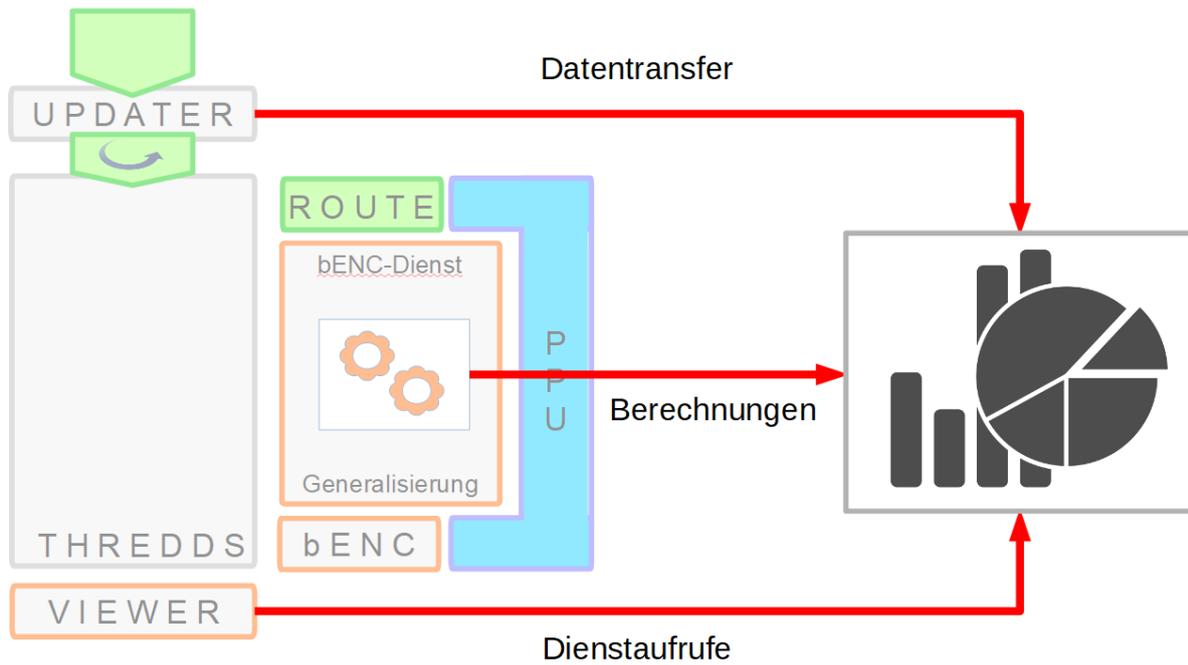


Abbildung 52 Prinzipskizze zur Auswertung der Datenströme der Datenaustauschplattform

### 6.5.2 Durchführung

Die Testfahrt erfolgte mit HADAG-Fähren zwischen Elbphilharmonie und Teufelsbrück am 09.03.2020 (Abbildung 53).



Abbildung 53 Beim Testbetrieb genutzte Fährstrecken

Bei dieser Testfahrt wurden mehrfache Aufrufe der Dienste via <http://imonavviewer.smileconsult.de> auf jedem Streckenabschnitt durchgeführt. Falls die Website nicht direkt geladen werden konnte, erfolgte ein Refresh nach kurzer Zeit.

Folgende Daten wurden dabei übertragen:

- S-102 - Bathymetric Surface
- S-104 - Water Level Information for Surface Navigation
- S-111 - Surface Current

Dargestellt wurde die integrierte Datenlage (Combined View) mit Schwerpunkt auf der Wassertiefe (Water Depth) (s. [Abbildung 54](#)). Zur Dokumentation wurden auf dem Testgerät Bildschirmfotos (Service + Position via Google Maps) an 17 Positionen erstellt (siehe Anhang 2).

### 6.5.3 Auswertungsergebnisse

Die Mobilfunk-Abdeckung im getesteten Gebiet war sehr gut. An jeder Position konnte der WMS über <http://imonavviewer.smileconsult.de> aufgerufen werden. Allerdings ist zu bedenken, dass es sich hierbei nicht um einen wissenschaftlich fundierten Langzeittest handelt, sondern um Ergebnisse von Stichproben in einem begrenzten Testgebiet.

In Tabelle 9 werden die Antwortzeiten während der Testfahrt am 09.03.2020 dargestellt.

**Tabelle 9** Antwortzeiten der Testfahrt

WMS	Minimum [s]	Maximum [s]	Mittelwert [s]	Median [s]
<b>Antwortzeiten GetMap-Anfrage (Testfahrt 09.03.2020)</b>				
S-102	1,05	38,15	7,92	5,05
S-104	0,16	0,47	0,26	0,26
S-111	0,36	3,43	0,91	0,46
<b>Antwortzeiten GetFeatureInfo-Anfrage / Pick-Report (Testfahrt 09.03.2020)</b>				
S-102	0,71	9,22	1,97	0,99
S-104	0,08	0,16	0,14	0,14

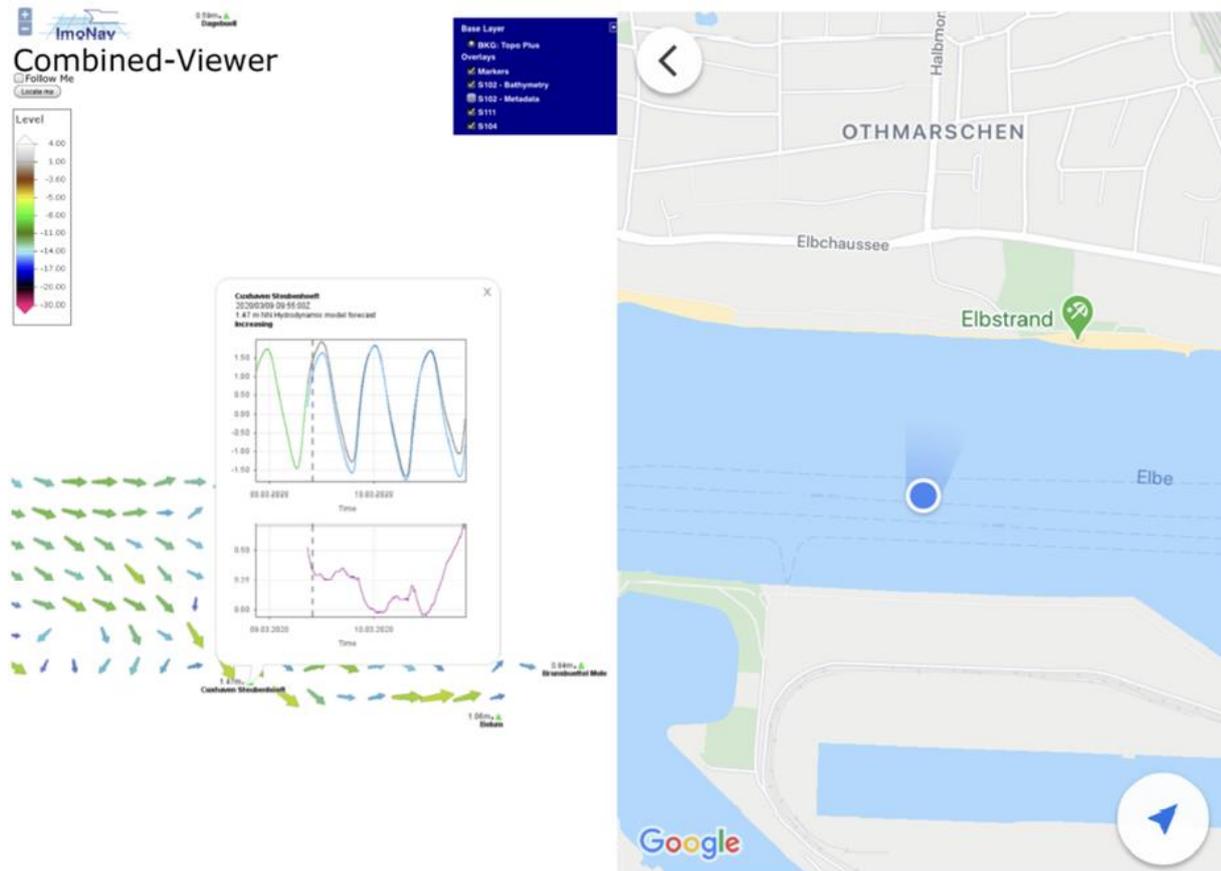


Abbildung 54 Beispiel für fehlerhaften Kartenhintergrund

Der Ladevorgang des Service hatte im Bereich der Hintergrundkarte die meisten Probleme.

Zoom-Vorgänge benötigten an einigen Positionen eine für den Nutzer nicht alltagstaugliche Zeit. Der Layer der ozeanographischen / bathymetrischen Daten verursachte keine Probleme.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass im Hamburger Hafenbereich, mit Ausnahme der wenigen Positionen, an denen das Zoomen schwierig war, der Service über Mobilfunk sehr gut genutzt werden kann.

#### 6.5.4 Auswertung der Datenströme während eines Testzeitraums

Für den Zeitraum vom 01.03.2020 bis 30.04.2020 wurde eine generelle Auswertung der Datenströme vorgenommen. In diesem Zeitraum wurden insgesamt 3.882 Daten mit insgesamt einem Volumen von 1517,336 GB bezogen. Hierfür wurden insgesamt 75,70 h benötigt. Der Datenbezug verlief sehr robust. Innerhalb dieses Zeitraums kam es lediglich bei 19 Datenbezügen zu vorzeitigen Abbrüchen, was einem Anteil von unter 0,5% entspricht.

Die folgende Tabelle 10 zeigt statistische Kenngrößen für die Antwortzeiten der Kartendienste während dieses Zeitraums.

**Tabelle 10** Antwortzeiten der Kartendienste

WMS	Minimum [s]	Maximum [s]	Mittelwert [s]	Median [s]
<b>Antwortzeiten GetMap-Anfrage (Zeitraum 01.03.2020 - 30.04.2020)</b>				
S-102	0,02	60,10	5,45	4,67
S-104	0,02	1645,11	5,60	0,08
S-111	0,12	1733,09	10,10	0,38
S-57	0,65	1,17	0,94	0,97
<b>Antwortzeiten GetFeatureInfo-Anfrage / Pick-Report (Zeitraum 01.03.2020 - 30.04.2020)</b>				
S-102	0,42	9,22	1,53	0,83
S-104	0,01	0,23	0,12	0,13
S-57	0,26	0,29	0,27	0,28

Bis auf einige Ausreißer für eine GetMap-Anfrage des WMS S-102, welche bei sehr feinen Zoomstufen zu erkennen sind, waren die Kartendienste zuverlässig und performant.

## 7. Zusammenfassung

Im mFUND-Projekt ImoNav konnten erfolgreich Prototypen für neuartige hochauflösende Navigationsdienste für elektronische Seekarten entwickelt werden. Dabei wurden Fortschritte auf unterschiedlichen Arbeitsgebieten erzielt.

Auf dem Gebiet der ozeanographischen Daten wurde eine innovative Methode entwickelt, mit der flächenhafte Wasserstandsvorhersagen des BSH optimiert und in elektronische Seekarten integriert werden können. Grundlage hierfür bilden die operationellen Vorhersagen der numerischen BSH-Modelle sowie Prognosen des MOS-Verfahrens (Model Output Statistics) an ausgewählten Pegelstandorten. Durch statistische Validation konnte nachgewiesen werden, dass sich mit der in ImoNav entwickelten Korrekturmethode die vorliegenden Ergebnisse signifikant verbessern und flächenhafte Vorhersagen in hoher Qualität erzeugen lassen. Durch automatisierte Prozessierung werden die Vorhersagen kontinuierlich aktualisiert. Sie sind nicht nur eine wichtige Grundlage für darauf aufbauende Navigationsdienste, sondern auch für weitere Anwendungen aus dem Bereich des Katastrophenschutzes, des Küstenschutzes oder der Beschickung (Tiefenkorrektur von Seevermessungen) von Interesse.

In ImoNav wurden neben Wasserstandsdaten auch Strömungsvorhersagen so aufbereitet, dass sie in elektronische Seekarten integriert werden können. Die Arbeiten erfolgten in enger Zusammenarbeit mit der verantwortlichen Arbeitsgruppe der IHO. Beiträge und Test-Datensätze aus ImoNav lieferten dabei einen wichtigen Input zur Weiterentwicklung der Produktspezifikationen für Wasserstände (S-104) und Strömungen (S-111).

Bei Nutzern und Anwendern besteht zudem Bedarf nach weiteren ozeanographischen und meteorologischen Daten (z.B. Seegang, Wind und Wassertemperaturen). Da für diese Parameter IHO-konforme Produktspezifikationen während der Laufzeit von ImoNav nicht vorlagen, wurden Datensätze im Format NetCDF4, einem weit verbreiteten Standard im Bereich der Ozeanographie, bereitgestellt.

Als weitere wesentliche Datenbasis für den zu entwickelnden Navigationsdienst wurden in ImoNav bathymetrische Daten in dem sich kontinuierlich verändernden Testgebiet der Tide-Elbe zusammengeführt, aufbereitet und IHO-konform als prä-operationeller Dienst bereitgestellt. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf der Entwicklung eines effizienten Datenmanagements und eines zentralen, robusten sowie flexiblen Prozessablaufs für alle Produkte. Es konnte erfolgreich ein Datenbanksystem implementiert werden, mit dem die Verschneidung der Mess- und Metadaten nach definierten Kriterien automatisch durchgeführt wird, um letztlich ein überlappungsfreies Modell des Meeresbodens zu erhalten. Sobald neue Tiefeninformationen im Testgebiet vorliegen, wird durch den in ImoNav entwickelten automatisierten Prozessablauf ein neues flächendeckendes Digitales Geländemodell generiert, aus dem sowohl eigenständige bathymetrische Datenprodukte, wie bathymetrische ENC's (bENC) oder S-102-Datenprodukte abgeleitet als auch kombinierte Produkte, z.B. zur dynamischen Wassertiefe, erzeugt werden können.

Ein besonderer Fokus lag im Projekt auf der IHO-konformen Bereitstellung der Bathymetriedaten. Das Ausgabeformat der Bathymetriedaten entspricht den im Projektzeitraum existierenden Versionen 1.0.0 und 2.0.0 des IHO-Standards S-102, welcher in ImoNav zusätzlich um einige relevante Metadaten erweitert wurde. Wie schon bei den ozeanographischen Daten konnten Erfahrungen aus ImoNav direkt in die internationale Gremienarbeit von S-100-Arbeitsgruppen der IHO eingebracht werden. Die Arbeiten werden nach Projektende durch ImoNav-Partner fortgesetzt.

Durch die Verknüpfung von ozeanographischen und bathymetrischen Daten konnten in ImoNav neuartige Produkte entwickelt werden, die für eine sichere Navigation von hoher Bedeutung sind. So wurden die oben erwähnten optimierten flächenhaften Wasserstandsvorhersagen mit hochaufgelösten Bathymetriedaten verknüpft und daraus Raster- und Vektordaten für dynamische Wassertiefen berechnet. Auf Grundlage dieser Daten wurden in ImoNav für das Testgebiet Pilotprodukte für Routenplanung und Routenmonitoring entwickelt. Bei Kenntnis des Tiefgangs und des Schiffsverhaltens lassen sich schiffsbezogene Konturlinien für einen sicheren Navigationsbereich (safety contour) ableiten.

Als Plattform für den Austausch von Daten wurde in ImoNav ein THREDDS Data Server (TDS) genutzt und hierfür eine Reihe von Zugriffs-Schnittstellen und Darstellungsdiensten entwickelt, von denen ausgewählte im Metadatenportal des Projektträgers, der mCLOUD des BMVI, veröffentlicht werden.

Außer über die mCLOUD wurden die im Projekt bereitgestellten Datensätze und neuen Produkte auch über ein internes Projekt-Portal (<http://imonavviewer.smileconsult.de>) als Kartendienste veröffentlicht. Die Visualisierungen haben zu einem erheblichen Erkenntnisgewinn geführt und ermöglichen es zudem, die Ergebnisse des Projekts der Öffentlichkeit auf einfache Weise zugänglich zu machen.

Für die Darstellung der neuen ImoNav-Produkte in ECDIS und sogenannten Portable Pilot Units (PPUs) musste die Software zur Verarbeitung der neuen S-100-Datenformate grundlegend erweitert werden, wobei zu beachten war, dass sie die benötigte Interoperabilität verschiedener Produkte erlaubt. Für die PPU konnten erfolgreich Pilot-Dienste für Tiefenlinien, Strömungen und andere relevante Informationen erstellt werden.

In einem mehrwöchigen Testbetrieb wurde sowohl die automatisierte Prozessierung von ImoNav-Produkten als auch der Empfang der Daten und Produkte im Testgebiet evaluiert. Leider konnte der anwendungsbezogene Testbetrieb aufgrund der Beschränkungen durch die Covid-19-Pandemie nur sehr eingeschränkt erfolgen.

Ergebnisse und neuartige Produkte von ImoNav wurden Ende 2019 beim Nutzerworkshop Industrie und Behörden präsentiert. Die Rückmeldungen aus dem Nutzerworkshop haben gezeigt, dass bei Nutzern und Anwendern starkes Interesse an und großer Bedarf nach hochaufgelösten marinen Geodaten in standardisierter Form besteht.

Leider konnten in ImoNav noch nicht alle Nutzerwünsche für neuartige Navigations- und Schifffahrtsdienste umgesetzt oder marktreife Produkte realisiert werden. Es wurde erneut deutlich, dass der Prozess der internationalen Abstimmung und Standardisierung in Arbeitsgruppen der IHO und IMO sehr langwierig ist und für die Entwicklung mancher Produkte derzeit noch nicht die erforderlichen Spezifikationen und Rahmenbedingungen vorliegen. Hierfür sowie für die weitere Entwicklung neuartiger Produkte sind von Behörden und Industrie gleichermaßen weitere Anstrengungen und Entwicklungsarbeiten erforderlich.

## Referenzen

- [1] Wüllner, T., OFFIS e.V. - Institut für Informatik, FuE Bereich Verkehr | R&D Division Transportation, Vortrag zum Projekt EASE
- [2] Brüning, T., et al. "Operational ocean forecasting for German coastal waters." *Die Küste*, 81 Modelling 81 (2014): 273-290.
- [3] Dick, S., et al. "The operational circulation model of BSH (BSH cmod). Model description and validation", *Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie* 29/2001, Hamburg, Germany, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, 2001.
- [4] Glahn, H.R., et al. „The Use of Model Output Statistics (MOS) in Objective Weather Forecasting.“ *Journal of Applied Meteorology* 11, 1203-1211
- [5] Müller-Navarra, S. et al. „Improvement of water level forecasts for tidal harbours by means of model output statistics (MOS).“ *Berichte des BSH*, Nr.47
- [6] Zimmerman, Dale, et al. "An experimental comparison of ordinary and universal kriging and inverse distance weighting." *Mathematical Geology* 31.4 (1999): 375-390.
- [7] Phillips, Donald L., et al. "Use of auxiliary data for spatial interpolation of ozone exposure in southeastern forests." *Environmetrics: The official journal of the International Environmetrics Society* 8.1 (1997): 43-61.
- [8] Declercq, F. A. N. (1996). Interpolation methods for scattered sample data: accuracy, spatial patterns, processing time. *Cartography and Geographic Information Systems*, 23(3), 128-144.
- [9] Lu, George Y., and David W. Wong. "An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique." *Computers & geosciences* 34.9 (2008): 1044-1055.
- [10] IHO, S-100 Specification Numbers, 2020 (<https://iho.int/en/standards-and-specifications>, Stand: 12.10.2020)
- [11] ISO 19100 Series of geographic information, <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:19115:-1:ed-1:v1:en>
- [12] IHO (2018), S-111 - Surface Currents Product Specification (Edition 1.0.0, December 2018)
- [13] S-44 - IHO Standards for Hydrographic Surveys, [https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/s-44/S-44\\_Edition\\_6.0.0\\_EN.pdf](https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/s-44/S-44_Edition_6.0.0_EN.pdf)
- [14] Angewandtes Qualitätsmanagement in der Gewässervermessung – aQua (<http://www.aqua.wsv.de/>)
- [15] IHO, S-57 Appendix B.1 - Annex A, Edition 4.1.0, 01/2018
- [16] IHO, SPECIFICATIONS FOR CHART CONTENT AND DISPLAY ASPECTS OF ECDIS, Edition 6.1(.1), 06/2015
- [17] undidata, Data Services and Tools for Geoscience, THREDDS Data Server, (<https://www.unidata.ucar.edu/software/tds/>, Stand: 16.04.2020)
- [18] undidata, Data Services and Tools for Geoscience, THREDDS Data Server 4.6, 11/2018 (<https://www.unidata.ucar.edu/software/tds/current/>, Stand: 16.04.2020)
- [19] IHO (2000), S-57 - IHO Transfer Standard for Digital Hydrographic Data (Edition 3.1.0, November 2000)
- [20] IHO (2018), S-101 - ENC Product Specification (Edition 1.0.0, December 2018)
- [21] IHO (2019), S-102 - Bathymetric Surface Product Specification (Edition 2.0.0, October 2019)



## 8. Anhang

### 8.1. Testbetrieb

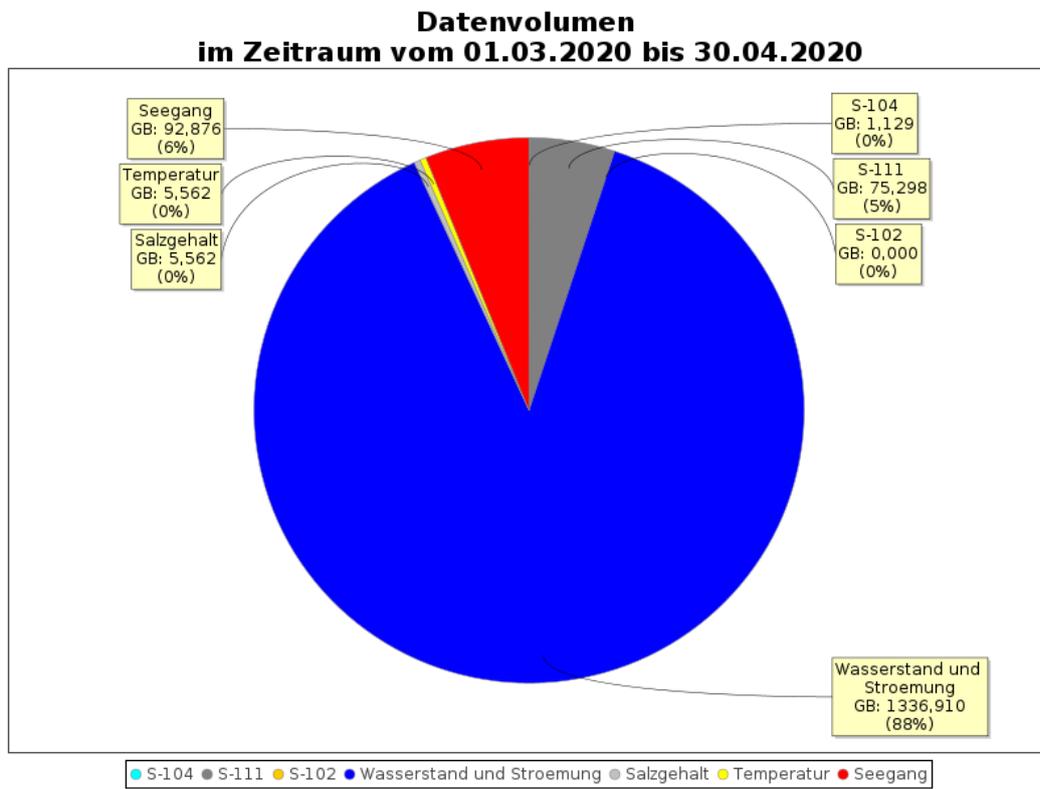


Abbildung A 1 Aufteilung des Datenvolumens nach Datenart im Testzeitraum

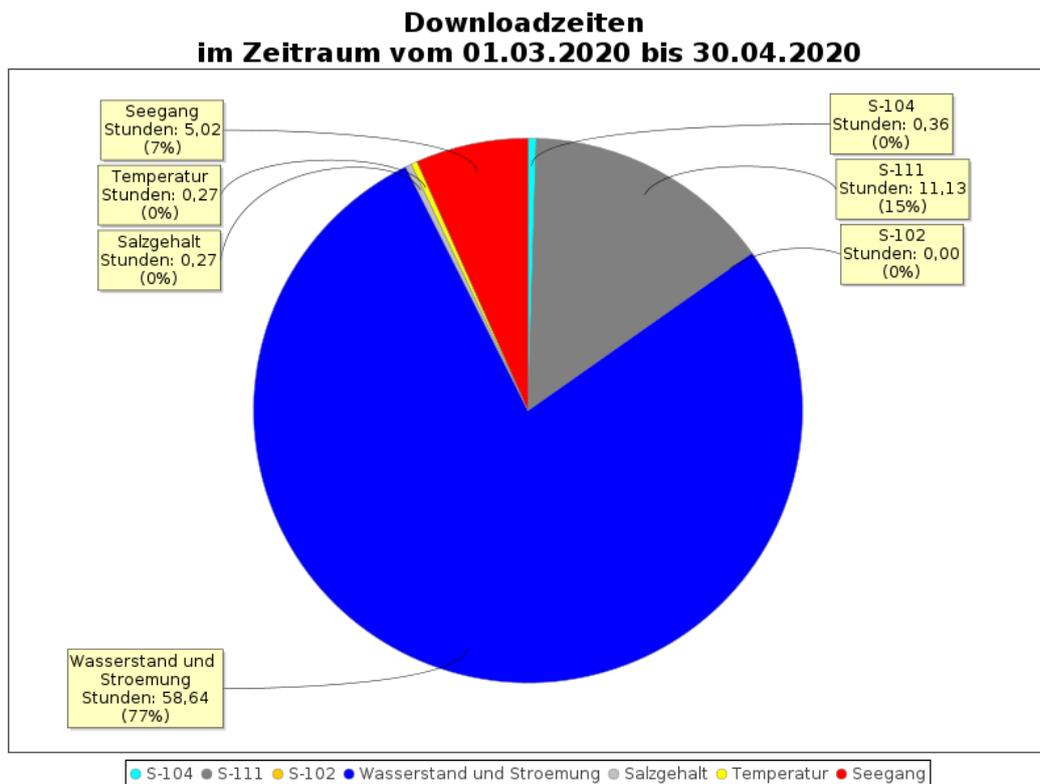


Abbildung A 2 Aufteilung der Downloadzeiten nach Datenart im Testzeitraum

**Dateien heruntergeladen  
im Zeitraum vom 01.03.2020 bis 30.04.2020**

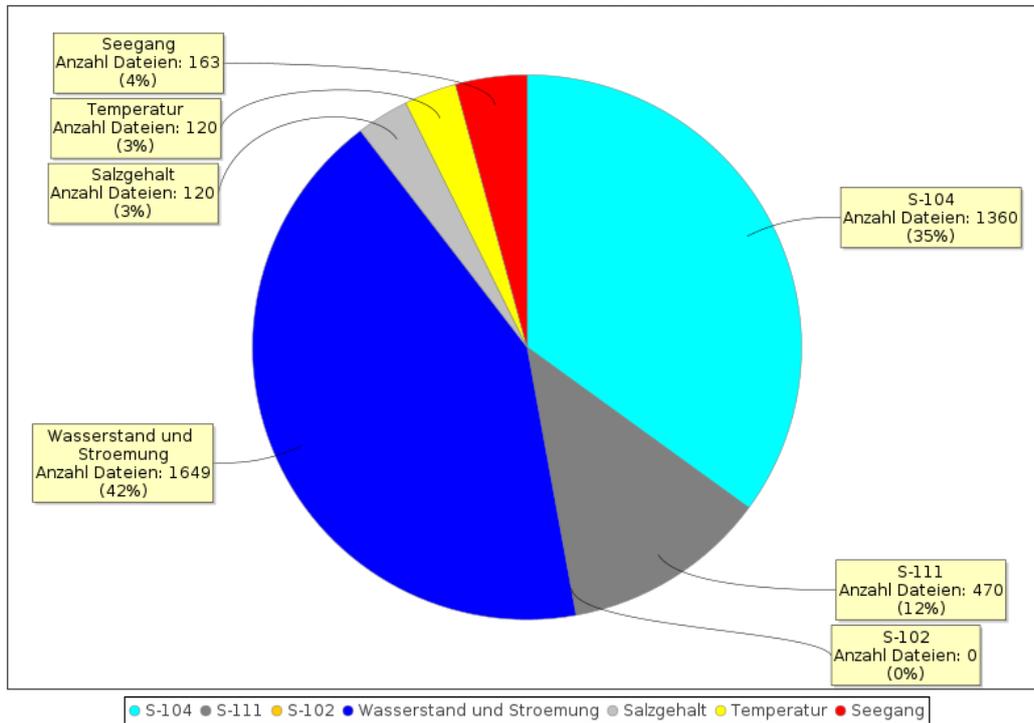


Abbildung A 3 Aufteilung des Datenbezuges nach Datenart im Testzeitraum

**Datenbezug  
im Zeitraum vom 01.03.2020 bis 30.04.2020**

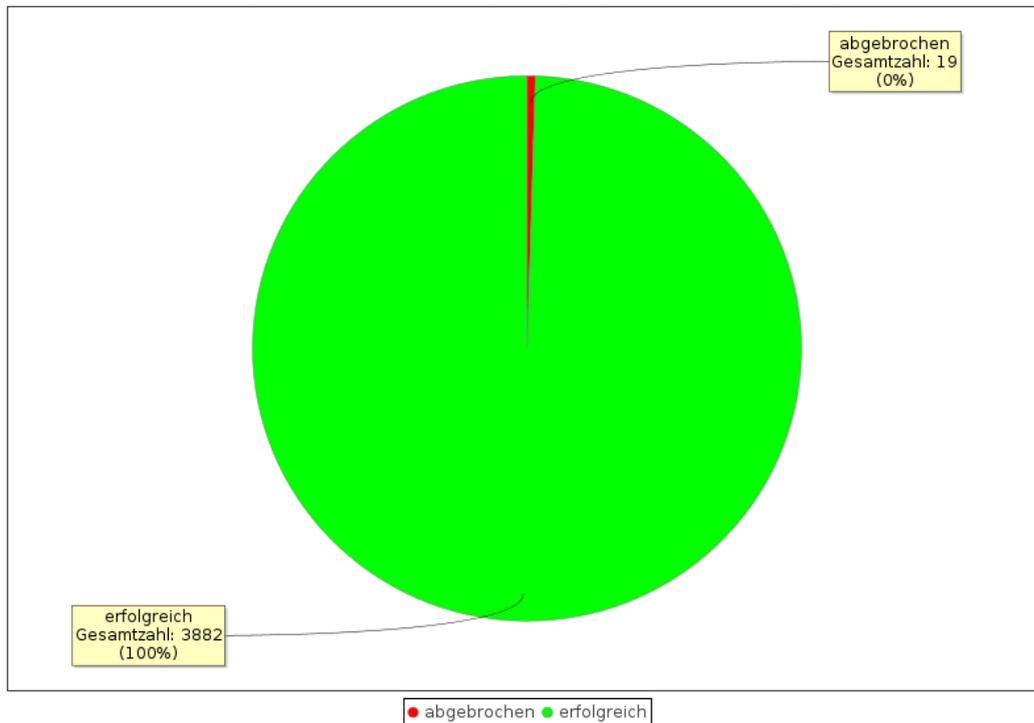


Abbildung A 4 Aufteilung des Datenbezuges nach erfolgreich und abgebrochen im Testzeitraum

**Antwortzeiten der Kartendienste während der Testfahrt am 09.03.2020**

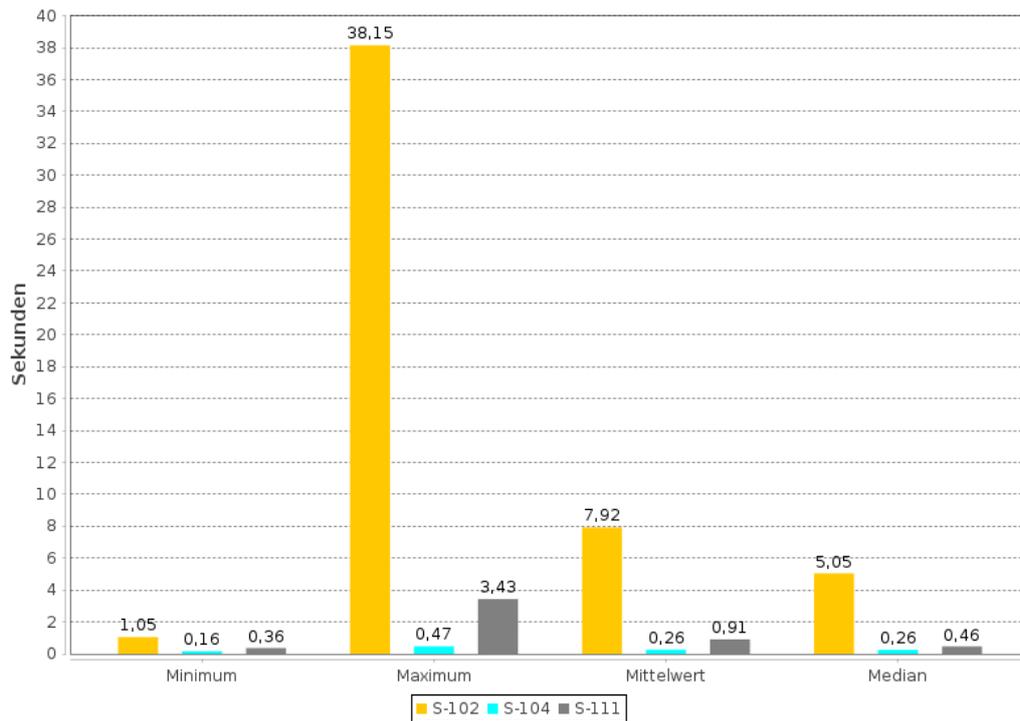


Abbildung A 5 Kennzahlen der Antwortzeiten der Kartendienste während der Testfahrt

**Antwortzeiten von Informationsabfragen während der Testfahrt am 09.03.2020**

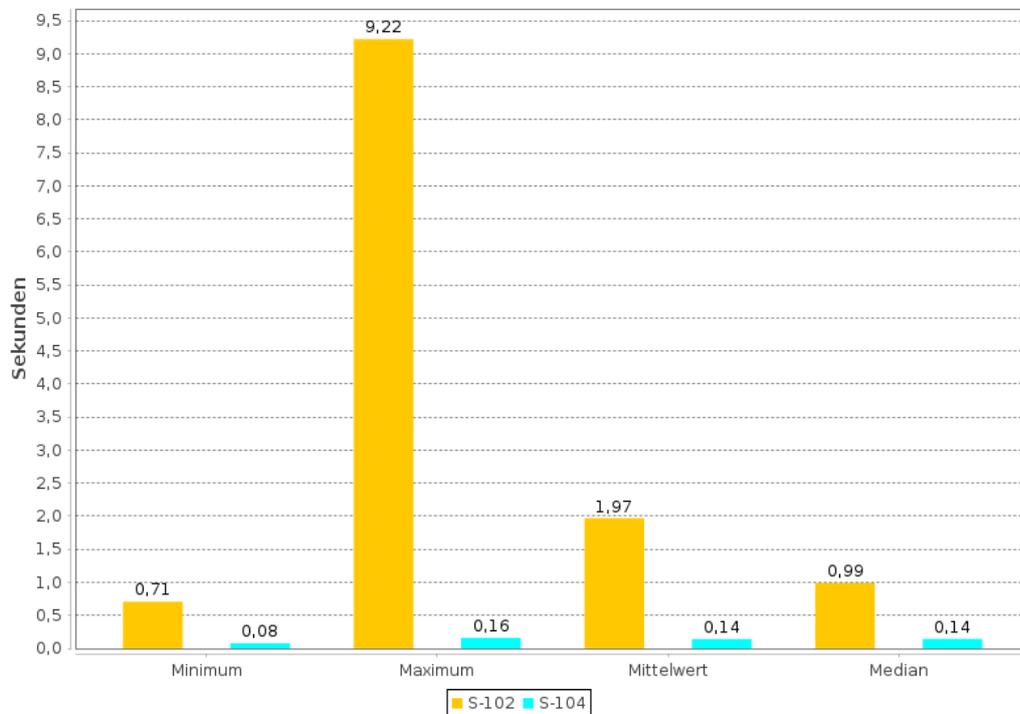


Abbildung A 6 Kennzahlen der Antwortzeiten der Informationsabfragen während der Testfahrt

**Antwortzeiten der Kartendienste  
im Zeitraum vom 01.03.2020 bis 30.04.2020**

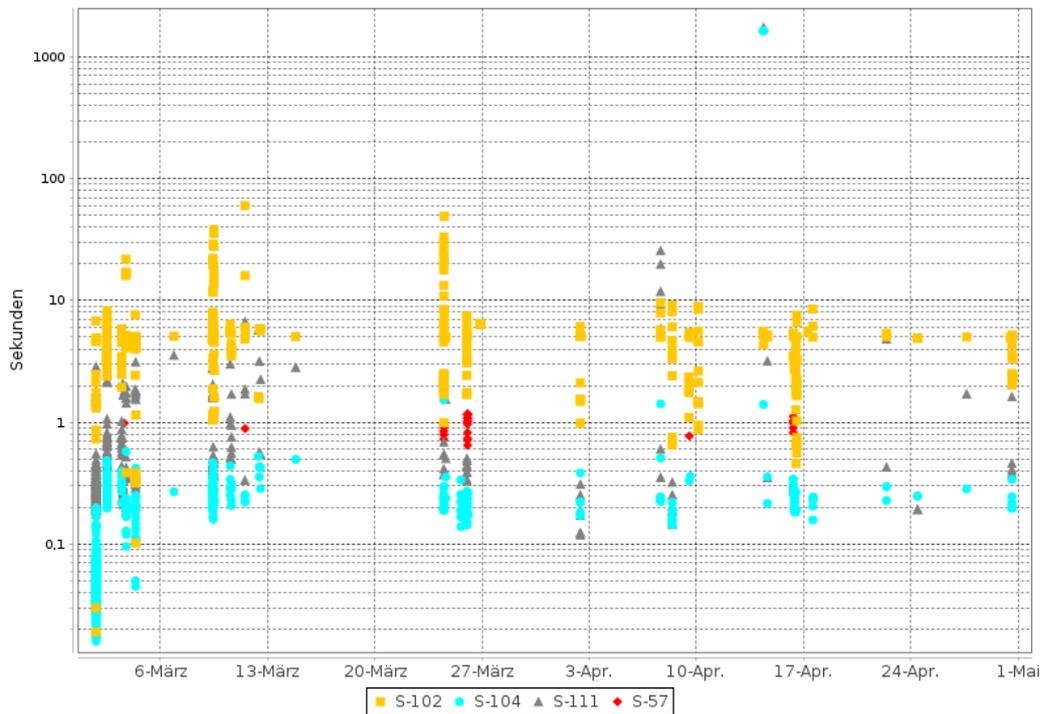


Abbildung A 7 Antwortzeiten der Kartendienste im Testzeitraum

**Korrelation der Kartendienste  
im Zeitraum vom 01.03.2020 bis 30.04.2020**

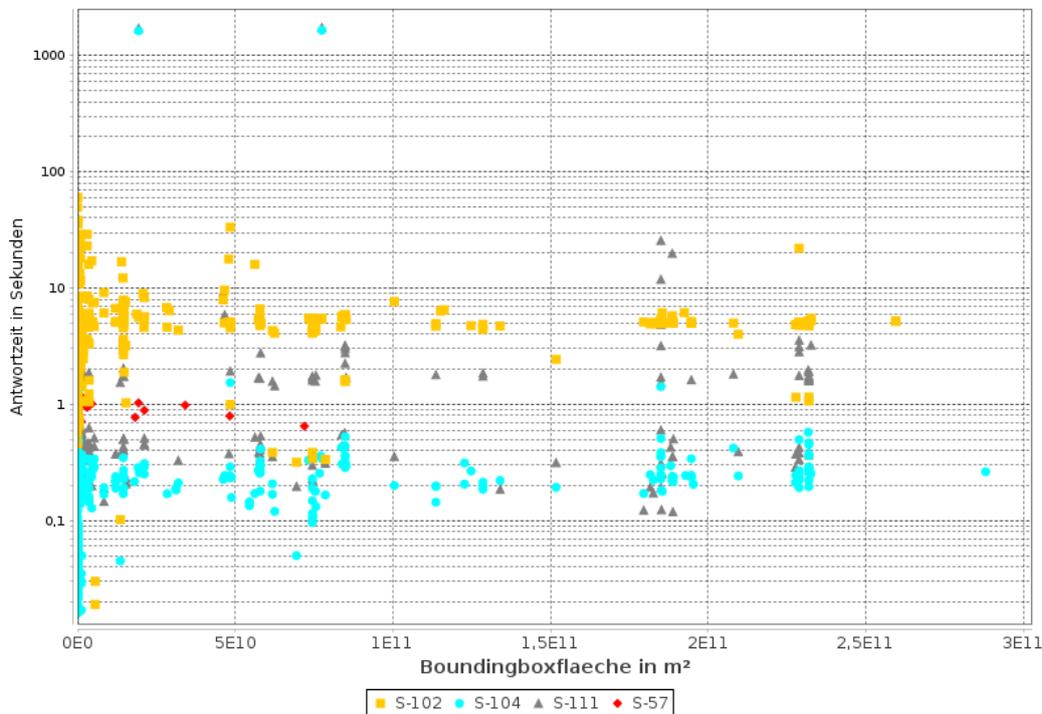


Abbildung A 8 Korrelation der Kartendienste im Testzeitraum

**Antwortzeiten der Kartendienste  
im Zeitraum vom 01.03.2020 bis 30.04.2020**

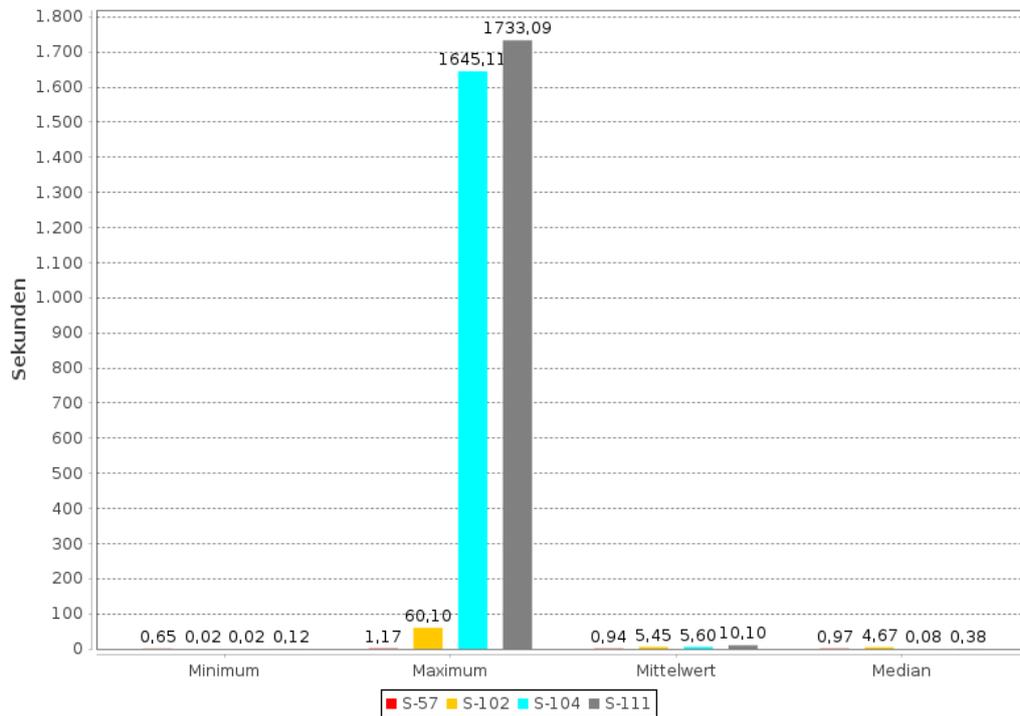


Abbildung A 9 Kennzahlen der Antwortzeiten der Kartendienste im Testzeitraum

**Antwortzeiten von Informationsabfragen  
im Zeitraum vom 01.03.2020 bis 30.04.2020**

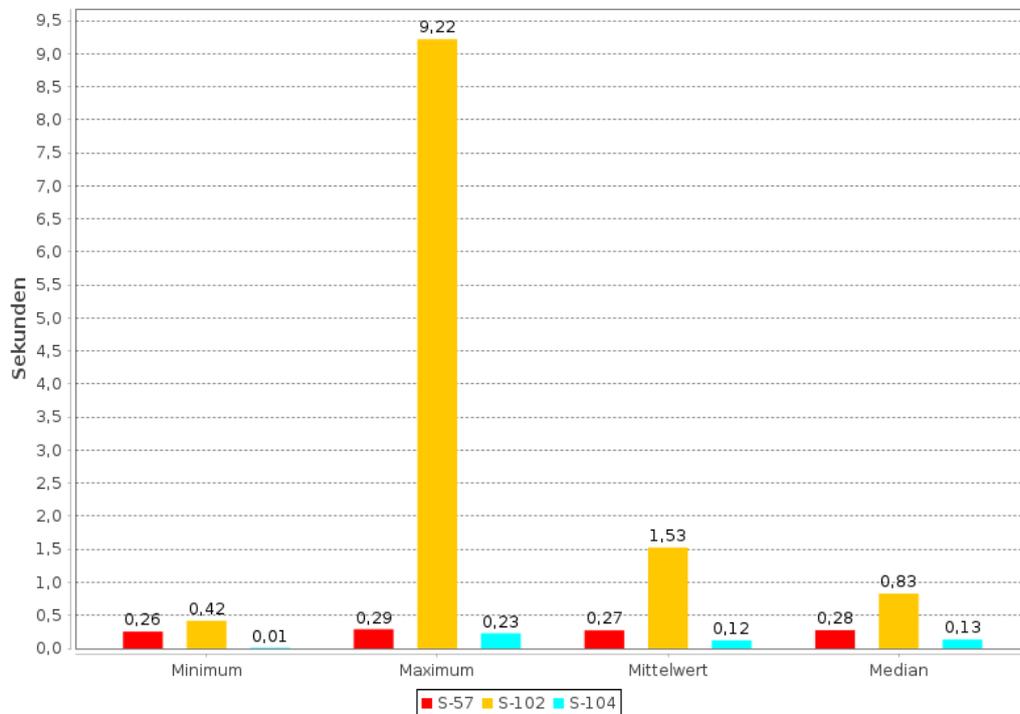


Abbildung A 10 Kennzahlen der Informationsabfragen im Testzeitraum

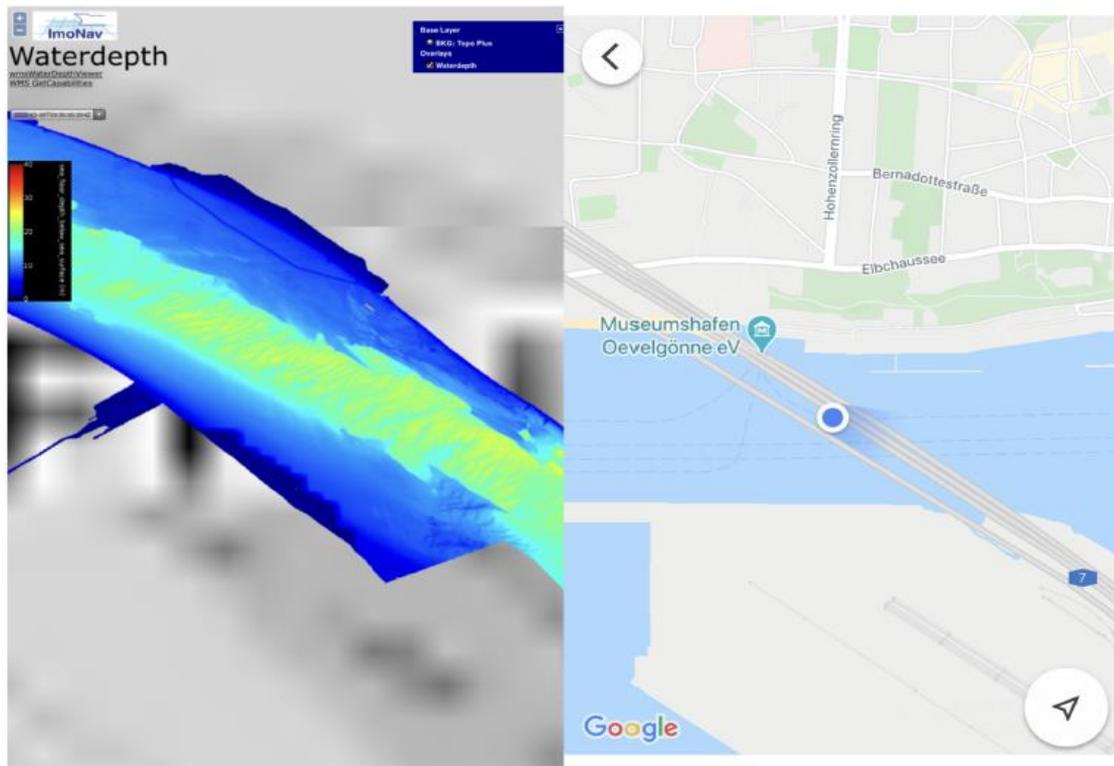


Abbildung A 11 Wassertiefe am angegebenen Punkt

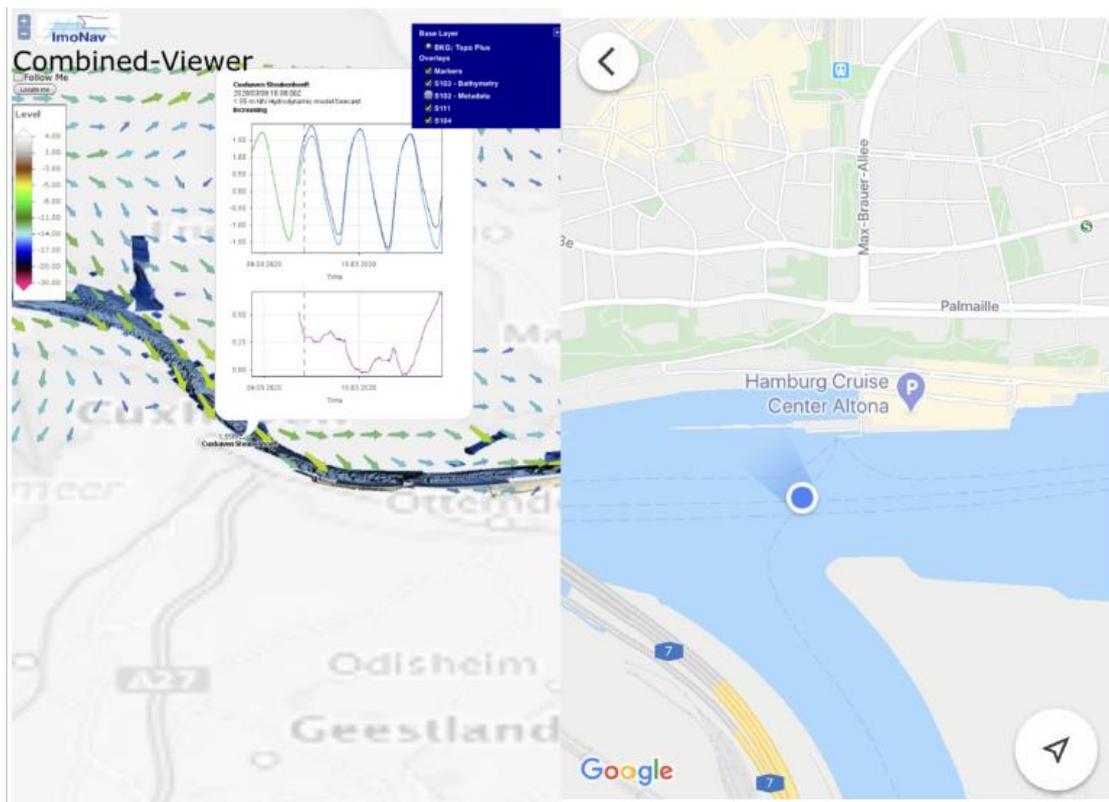


Abbildung A 12 Kombinierte graphische und Detail Darstellung von S-102, S-104 und S-111 Daten am angegebenen Punkt

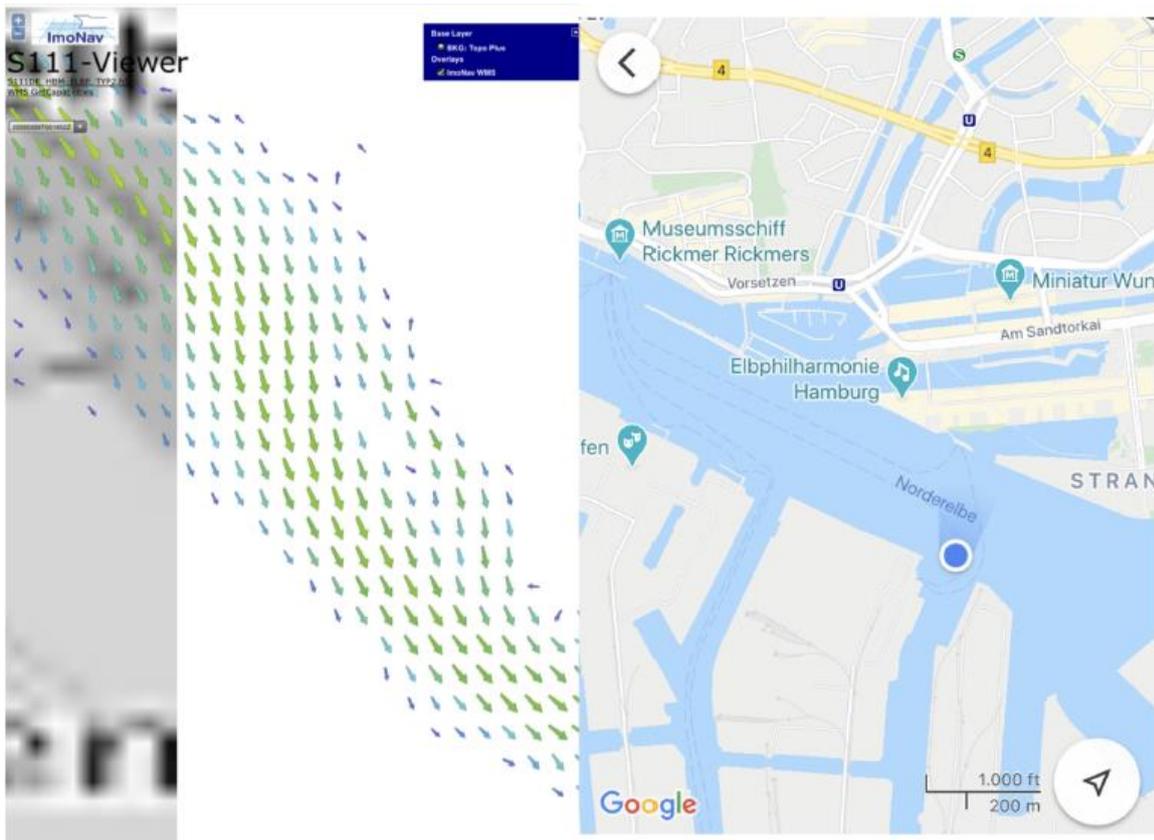


Abbildung A 13 S-111 Strömungsdaten am angegebenen Punkt - Hintergrund nur teilweise geladen

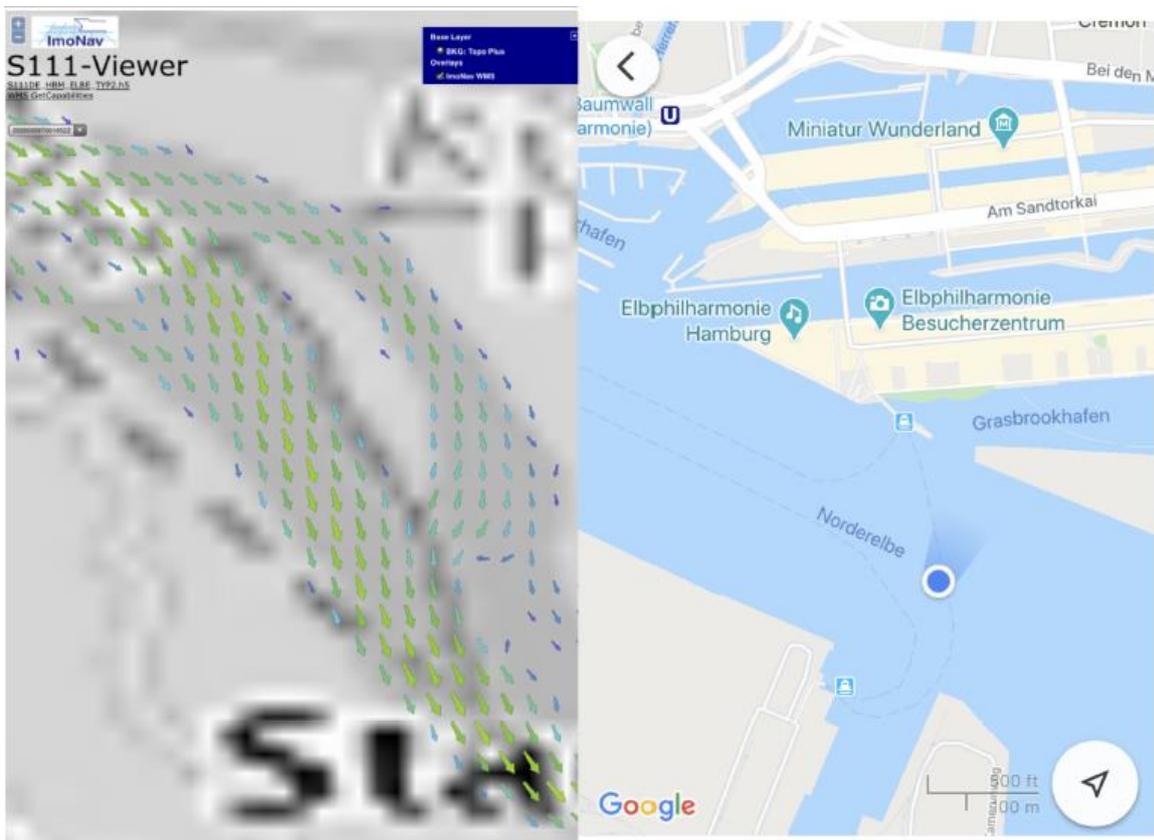


Abbildung A 14 S-111 Strömungsdaten am angegebenen Punkt - Hintergrund vollständig geladen

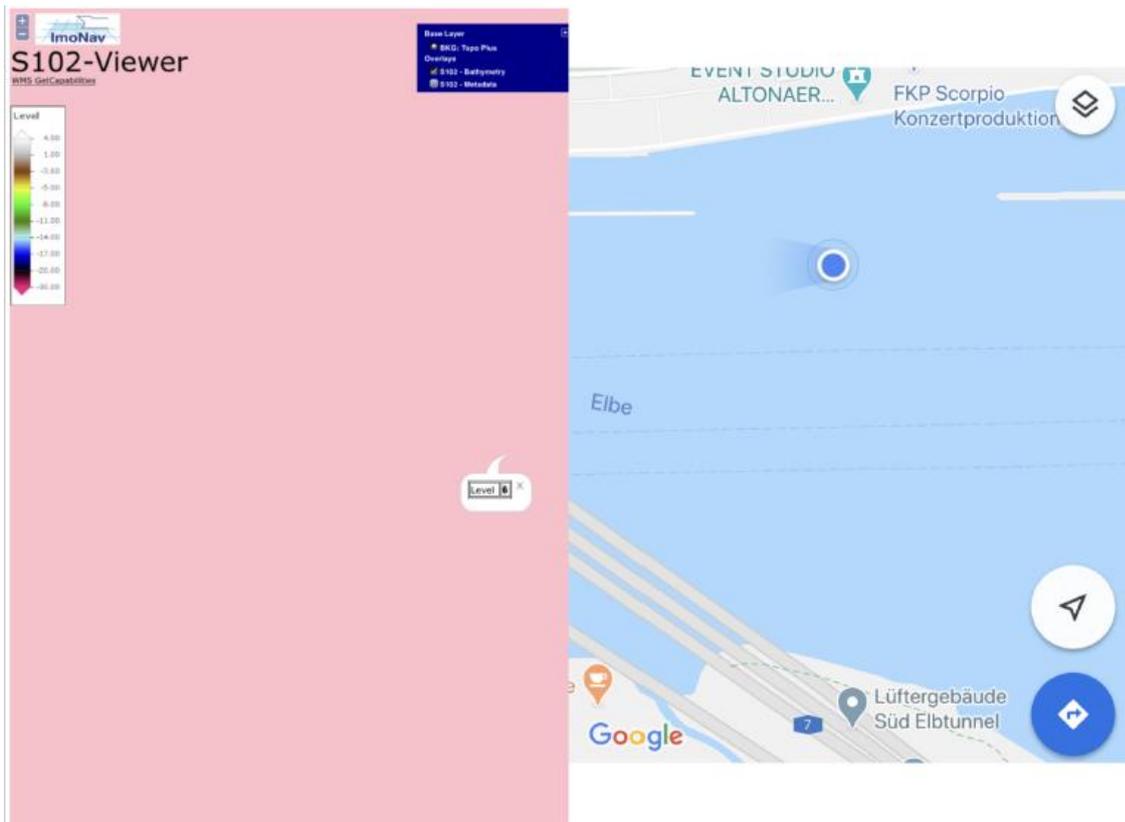


Abbildung A 15 S-102 Bahymetriedaten Ladefehler am angegebenen Punkt

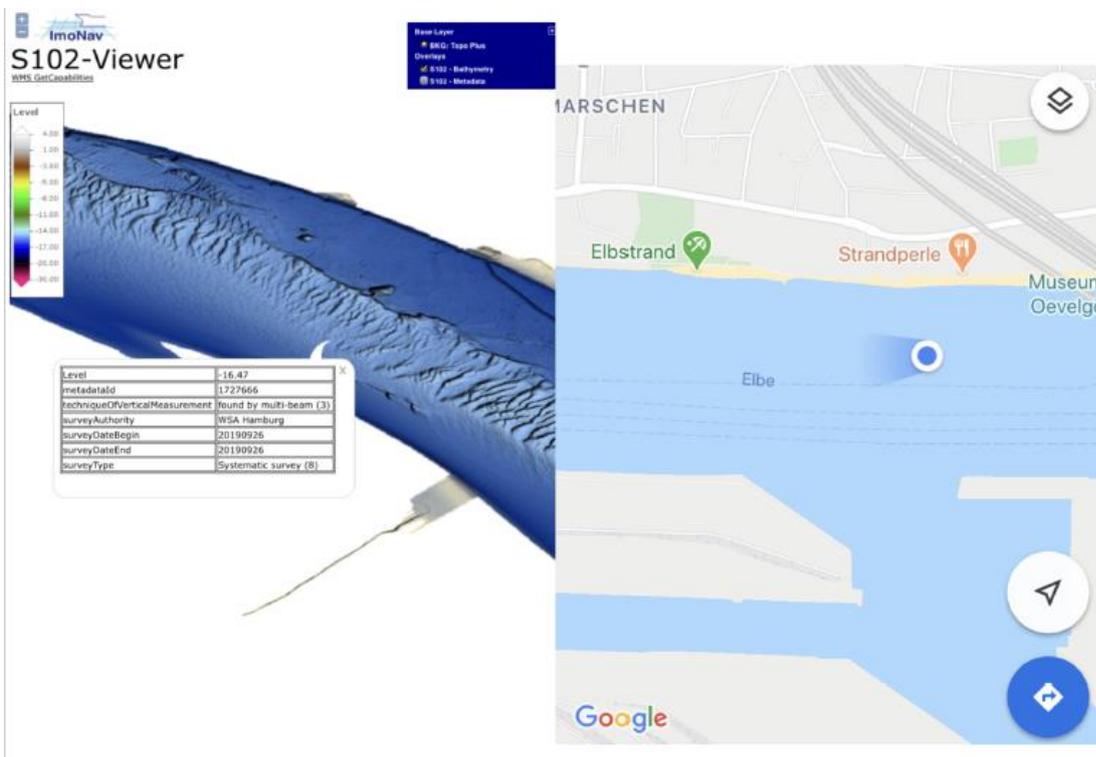


Abbildung A 16 Vollständig geladene Bathymetriedaten mit Details am angegebenen Punkt

## 8.2. Nutzerworkshop 28.11.2019

### Einführung

Das Projekt ImoNav verfolgt einen nutzerorientierten Ansatz. Ziel ist es eine nutzbare Gesamt-Anwendung zu entwickeln, die den Bedürfnissen der Nutzer entspricht und zu verstärkter Sicherheit und Effizienz des Schiffsverkehrs beiträgt. Im Projektverlauf wurden Nutzeranforderungen konsolidiert und diese in verschiedene Projektaspekte, wie Datenerfassung, Datenverschnitt und zur Verfügung Stellung sowie Darstellung in Demoanwendungen eingebunden.

Zur Validierung der bis zum Nutzerworkshop geleisteten Arbeit, inklusive der erarbeiteten Nutzeranforderungen, sowie zur Erweiterung der Nutzungsmöglichkeiten, wurde im Projekt am 28.11.2019 ein Nutzerworkshop durchgeführt. Hierzu wurden ausgewählte Nutzergruppen eingeladen und die vorliegenden Projektergebnisse vorgestellt. Es sollten von den Nutzern Kommentare eingeholt, die Nutzbarkeit der bisherigen Testversionen der Gesamt-Anwendung überprüft und Anregungen, beziehungsweise weitere Vorschläge direkt von den Nutzern dokumentiert werden, um im weiteren Projektverlauf die Resultate des Projektes zu verbessern und dem angestrebten Ziel näher zu bringen.

Folgende Nutzer wurden zum Nutzerworkshop eingeladen:

### Häfen

- Hafen Hamburg
- Hamburg Port Authority
- Oberhafenamt Hamburg
- Hafen Bremen und Bremerhaven
- Hansestadt Bremen
- Hafen Rostock
- Hafen Rostock

### Lotsen

- Bundeslotsenkammer
- Lotsenbrüderschaft Elbe
- Lotsenbrüderschaft NOK I
- Lotsenbrüderschaft NOK II
- Lotsenbrüderschaft NOK II
- Lotsenbrüderschaft Wismar/ Rostock / Stralsund
- Lotsenbrüderschaft Emden

### Reedereien

- Hapag-Lloyd AG
- Hamburg Süd
- Frachtkontor Junge & Co. GmbH
- Evergreen Evergreen Shipping Agency (Europe)
- H. C. Röver Maritime Agency GmbH
- China Ship
- COSCO Shipping Lines GmbH

- Hyundai Merchant Marine GmbH & Co. KG
- PWL Port Services

#### Wasser-, Schifffahrtsämter

- Dienststelle Schiffssicherheit, BG Verkehr (Deutsche Flagge)
- Bundesanstalt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Ozeanographie und Vorhersagedienste
- Bundesanstalt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Nautische Dienste
- Bundesanstalt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Navigations- und Kommunikationssysteme
- Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, Nationale und internationale Standards und Normen der Verkehrstechnik
- Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, Verkehrstechnik
- Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, Direktorat Nord/Nord-West
- GDWS, Dezernat Verkehrsmanagement/Schifffahrtspolizei
- GDWS, Unterabteilung Verkehrstechnik
- GDWS, Dezernat U22
- Wasser und Schifffahrtsamt Hamburg
- Wasser und Schifffahrtsamt Jade-Weser-Nordsee
- Wasser und Schifffahrtsamt Emden
- Schiffsmeldedienst GmbH, Hamburg

#### Dienstleister

- DNV-GL Hamburg
- Port Communication Services, DAKOSY Datenkommunikationssystem AG
- HVCC Hamburg Vessel Coordination Center GmbH
- Bremer Schiffsmeldedienst
- MPC Hamburg Port Consulting GmbH
- @FleetMon (JAKOTA)
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) - Institut für den Schutz maritimer Infrastrukturen
- Fraunhofer-Center für Maritime Logistik und Dienstleistungen CML

Das Programm des Nutzerworkshops umfasste eine Projektübersicht und Vorstellung der bisherigen Ergebnisse sowie zwei interaktive Teile, in der die Teilnehmer ihre Meinung einbringen, bewerten und priorisieren konnten.

## Ergebnisse Interaktiver Teil Nutzerworkshop ImoNav

Bemerkung	Voting für Priorisierung
Unabhängig vom Betriebssystem und Endgerät, auch Web Zugriff	23
Anwendung von Standards, gemeinsame Basis S-100	14
intuitive Visualisierung	13
Globale, aktuelle, qualitätsgesicherte Daten von zertifizierten Anbietern	11
Integrität/Genauigkeit	9
Online und Offline Betrieb	6
Service ohne Kosten öffentlich verfügbar mit einfache Zugänglichkeit	6
Qualitätsinformation nutzerfreundlich	5
Schleusentorstand (offen/geschlossen) Anzeige	5
Auflösung Strömung 5X5	4
langlebiges Produkt und ständige Aktualisierung (auch neue Produkte)	4
Validierung der Strömungsdaten anhand von Naturmessungen	4
Interactive, nutzerspezifische Visualisierung /3D Darstellung	3
Zugang zu den Daten; Datenbereitstellung für Dritte	2
Operationelle Daten (Brücke auf/zu), Wind Overlay	2
Metadaten zu den Datenquellen	2
Eigenschiffabhängige Erstellung der bENC	1
Abruf in Echtzeit	1
Vielfalt der Voreinstellungen	1
dynamische Datenqualität in Abhängigkeit zur Zeit	1
gemeinsame Nutzung verschiedener Geodaten	0
1h Auflösung ausreichend	0
generierte Tiefenlinien müssen sich anpassen lassen (0,2/0,5/...)	0
Verfügbarkeit wichtiger als Genauigkeit	0