

# HYDROGRAPHISCHE NACHRICHTEN

Journal of Applied Hydrography

06/2023

HN 125

3D-Positionierung  
auf See

60km



# Vergleich von Positionierungsdiensten im Offshore-Bereich

Ein Beitrag von SEBASTIAN KNAPPE, GUNTER LIEBSCH, LUDWIG SCHRÖDER, TOBIAS PETER BAUER, AXEL RÜLKE, PETER NEUMAIER und PATRICK WESTFELD

Die Digitalisierung hält in einer stetig wachsenden Anzahl von Anwendungsbereichen Einzug. In diesem Zuge wächst auch der Bedarf an genauen Positionsangaben immer weiter an. Eine Vielzahl von Anwendungen, wie z. B. autonome Mobilität, digitale Landwirtschaft (Precision Farming), Monitoring von Infrastruktureinrichtungen, aber auch klassische Vermessungsaufgaben der Katastervermessung erfordern heutzutage genaue, zuverlässige und schnell verfügbare Koordinatenangaben in Lage und Höhe. Vor dem Hintergrund dieser Entwicklungen ist in den letzten Jahren eine Reihe von Positionierungsdiensten unterschiedlicher Anbieter auf den Markt gekommen. Sie versprechen die Positionierung in Echtzeit mit einer Genauigkeit im Zentimeter- oder Subdezimeterbereich durch die Bereitstellung von Korrekturdaten für die Globalen Satellitennavigationssysteme (GNSS). Im Rahmen einer Messkampagne an Bord des VWFS WEGA des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie konnten vier Positionierungsdienste genutzt und verglichen werden. Der Artikel gibt einen praxisorientierten Überblick der dabei gesammelten Erfahrungen.

GNSS | Positionierungsdienst | Real-Time Kinematic | Precise Point Positioning | Ntrip  
GNSS | correction service | real-time kinematic | precise point positioning | Ntrip

Digitalisation is taking its place in a steadily growing number of fields of applications. In this context, the need for precise positioning information is also continuously increasing. A variety of applications, such as autonomous mobility, digital agriculture (precision farming), monitoring of infrastructure, but also conventional surveying tasks of cadastral surveying nowadays require precise, reliable and quickly available coordinate information in position and height. Against this background of these developments, a number of correction services from different providers have been released in recent years. They promise real-time positioning with centimetre or sub-decimetre accuracy by providing correction data for the Global Navigation Satellite Systems (GNSS). Within the framework of a measurement campaign on board of the VWFS WEGA of the Federal Maritime and Hydrographic Agency, four correction services were used and compared. This article provides a practice-oriented overview of the experience gained.

## Autoren

Sebastian Knappe, Dr. Gunter Liebsch, Dr. Ludwig Schröder, Tobias Peter Bauer, Dr. Axel Rülke und Peter Neumaier arbeiten beim Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) in Leipzig und Frankfurt am Main.  
Dr. Patrick Westfeld arbeitet beim Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) in Rostock.

sebastian.knappe@bkg.bund.de

## 1 Einleitung

Zu den Aufgaben des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie (BKG) als zentraler Dienstleister des Bundes gehören die Definition, Realisierung und Bereitstellung geodätischer Referenzsysteme. In diesen Aufgabenbereich ordnen sich eine Vielzahl von Arbeiten im GNSS-Bereich von der Datenerfassung, der Berechnung von Referenzrahmen bis zur Mitwirkung an Positionierungsdiensten ein. Das BKG betreibt eigene GNSS-Referenzstationen, wie die Stationen des Integrierten Geodätischen Referenznetzes GREF (<https://graf.bkg.bund.de>). Mit den Daten der GNSS-Referenzstationen unterstützt das BKG die Bestimmung der Referenzrahmen auf globaler, europäischer und nationaler Ebene. Darüber hinaus ist das BKG selbst im Rahmen von EUREF ([www.euref.eu](http://www.euref.eu)) als Rechen- und Datenzentrum an der Bestimmung des European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89) beteiligt.

Zur Übertragung von Beobachtungen und Korrekturdaten im GNSS-Bereich wurde im Jahr 2004 der Ntrip-Standard (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) als zugrunde liegendes Transportprotokoll von der Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM) verabschiedet. Das BKG hat maßgeblich an der Entwicklung dieses Standards und dessen Verbreitung mitgewirkt (Weber et al. 2004). Neue Konzepte der Korrekturdatenübertragung werden die Skalierbarkeit für Positionierungsdienste weiter verbessern. Hier sind z. B. die Datenübertragung über einen Datenkanal des Digitalradios DAB+ oder über verschiedene Ebenen der Mobilfunksignale, wie sie durch das 3rd Generation Partnership Project (3GPP, [www.3gpp.org](http://www.3gpp.org)) beschrieben werden, in der Entwicklung. Die Bereitstellung von GNSS-Daten in Form offener Formate wird vom BKG seit vielen Jahren aktiv unterstützt. Die GNSS-Caster des BKG

GNSS Data Centers (<https://igs.bkg.bund.de>) erlauben den Zugriff auf Echtzeit-Beobachtungsdaten weltweit verteilter GNSS-Referenzstationen des Internationalen GNSS-Dienstes (IGS).

Das BKG ist am Echtzeitdienst des IGS (<https://igs.org>) als Daten-, Analyse- und Kombinationszentrum beteiligt. Die offene Bereitstellung von Satellitenbahn- und Satellitenuhrparametern durch die IGS-Analysezentren ermöglicht aktuell eine Positionierungsgenauigkeit im Dezimeterbereich bei einer Konvergenzzeit von etwa 30 Minuten. Eine hohe Genauigkeit im Bereich weniger Zentimeter sowie eine Konvergenzzeit im Bereich weniger Minuten ist das Ziel eines neuen Satellitenpositionierungsdienstes der Vermessungsverwaltungen in Deutschland. Unter dem Dach der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) bauen das BKG und die Landesvermessungen einen Positionierungsdienst unter Nutzung von Precise Point Positioning (PPP) auf (Riecken und Becker 2020). Zur Steigerung der Verfügbarkeit wird dieser Dienst an zwei Rechenstellen, einmal am BKG und einmal an der Zentralen Stelle SAPOS beim LGLN Niedersachsen, Korrekturdaten berechnen. Die Redundanz und Verfügbarkeit soll durch Ausnutzung von zwei Übertragungswegen, über Internet (Ntrip) und Digitalradio DAB+, erhöht werden. Die Echtzeitpositionierung in den küstenfernen Gebieten der Nordsee stellt unter anderem aufgrund des Fehlens eines engmaschigen Referenzstationsnetzes eine Herausforderung dar. Am LGLN Niedersachsen wird daher eine spezielle Vernetzung für die deutsche Ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ) in der Nordsee entwickelt (Jahn et al. 2022).

Satellitenpositionierungsdienste, insbesondere der Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung SAPOS (Riecken und Kurtenbach 2017), werden am BKG auch im Rahmen eigener Messprojekte eingesetzt. Ein Beispiel hierfür sind die gravimetrischen Vermessungsarbeiten zur Bestimmung der Höhenbezugsflächen, dem German Combined Quasigeoid (GCG) (Schirmer et al. 2018) und dem Baltic Sea Chart Datum (BSCD2000) im Bereich von Nord- und Ostsee (Schwabe et al. 2020; Liebsch et al. 2022). Hierfür werden in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und dem Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ) seit 2013 regelmäßig Messkampagnen durchgeführt. Das Primärziel solcher Kampagnen ist die Erhebung von Schweredaten zur Bestimmung und Verbesserung der Höhenbezugsfläche. Im Zeitraum vom 28.06. bis zum 07.07.2022 wurde eine Messkampagne in der deutschen AWZ in der Nordsee an Bord des Vermessungs-, Wracksuch- und Forschungsschiffes (VWFS) *WEGA* des BSH durchgeführt. Zusätzlich zur Erhebung von Schweredaten wurde diese Fahrt genutzt, um

praktische Erfahrungen mit den Anbietern einiger Positionierungsdienste zu sammeln. Im Vordergrund standen praxisorientierte Fragestellungen wie Nutzungsvoraussetzungen, Empfangsmöglichkeiten auf See, Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Dienste, aber auch die erreichbare Konsistenz der Koordinaten mit dem amtlichen Raumbezug. Mit steigenden Genauigkeitsansprüchen in der Größenordnung weniger Zentimeter gewinnt die letztgenannte Zielsetzung zunehmend an Bedeutung.

Im Folgenden soll ein Eindruck über die gewonnenen Erfahrungen und empirischen Ergebnisse aus diesen Messungen vermittelt werden. In Abschnitt 2 werden die Spezifika der untersuchten Positionierungsdienste mit Fokus auf die Anwendung im Offshore-Bereich zusammengefasst. Anschließend wird die technische Realisierung an Bord der *WEGA* beschrieben (Abschnitt 3), woraufhin die Darlegung der Analysen zur Bewertung der an Bord erreichten Zuverlässigkeit und Genauigkeit in der Positionierung erfolgt (Abschnitt 4).

## 2 Überblick der verwendeten Positionierungsdienste

Im Rahmen der Messkampagne bestand die Möglichkeit, die Positionierungsdienste Trimble CenterPoint RTX Marine, NovAtel Oceanix, Fugro Marinestar und SAPOS HEPS zu nutzen. Die beiden letztgenannten werden im Routinebetrieb der *WEGA* zur Seevermessung verwendet. Weitere Dienste wie z. B. von den Anbietern Hemisphere GNSS, swift navigation, u-blox oder VERIPOS etc. hätten den Rahmen und die Möglichkeiten dieses Messprojektes überschritten und wurden deshalb nicht getestet. Dieser Beitrag kann und will deshalb keinen vollständigen Überblick aller im Bereich der deutschen AWZ in der Nordsee verfügbaren Positionierungsdienste geben.

Positionierungsdienste unterscheiden sich in der Art der Korrekturdaten. Beim RTK-Verfahren (Real-Time Kinematic) stellt der Korrekturdienst dem Nutzer die Satellitenbeobachtungen einer nahegelegenen physischen oder virtuellen Referenzstation bereit. Dafür muss seitens des Dienstleisters die Position des Nutzers bekannt sein, weshalb für diese Positionierungsdienste bidirektionale Verbindungen (Internetverbindung) erforderlich sind. Mit dem Ausbau der Windparks in der Nordsee wächst auch das Versorgungsgebiet für Mobilfunk. Für küstenferne Internetnutzung ist auf Schiffen eine satellitengestützte Internetverbindung (VSAT) notwendig. Das RTK-Verfahren wird derzeit beim SAPOS angeboten. Die individuelle Berechnung von Korrekturdaten für jeden einzelnen Nutzer limitiert die Skalierbarkeit klassischer RTK-Dienste. Erst PPP (Precise Point Positioning) ermöglicht eine Massennutzung der Korrekturdaten, die nutzerunabhängig und damit allgemeingültig

für ganz Deutschland ausgesendet werden. PPP-Dienste stellen den Nutzern einheitliche Korrekturdaten für das Versorgungsgebiet bereit. Da hierfür beim Dienstbetreiber keine Kenntnis über die Position des Nutzers nötig ist, können die Daten über ein Broadcastmedium übertragen werden. Anbieter von PPP-Korrekturdiensten nutzen heute vielfach geostationäre Satelliten zur Ausstrahlung der Korrekturinformationen, die eine Trägerfrequenz im Bereich der GNSS-Frequenzen verwenden (L-Band). Bei dieser Technik kann auf zusätzliches Empfangsequipment verzichtet werden, da die Korrekturdaten mittels GNSS-Antenne empfangen werden. Neben Internetverbindungen mittels VSAT stellt dies eine zuverlässige Möglichkeit für den Korrekturdatenempfang in küstenfernen Seegebieten dar. Beide Systeme, L-Band und VSAT, sind auf der WEGA im Einsatz. Die satellitengestützte Übertragung von Korrekturdaten wird, vergleichbar zu Satellitenfernsehen (DVB-S), durch Gewitterfronten beeinträchtigt.

Im Gegensatz zum RTK-Verfahren eignen sich PPP-Dienste meist nicht für sofortige Messungen. Nach Einschalten des Empfängers oder nach einem längeren Verlust der Satellitensignale muss der Nutzer warten, bis die nominale Genauigkeit des Dienstes erreicht wird (Konvergenzzeit). Bei klassischen PPP-Diensten werden vorrangig Satellitenbahnen- und -uhrenkorrekturen an den Nutzer übermittelt. Auf diese Weise gelingt eine Positionierung mit Genauigkeiten im Dezimeterbereich bei Konvergenzzeiten von ca. 30 Minuten. Erst die Übertragung weiterer Informationen, wie z. B. hardwarebedingter Signallaufzeitverzögerungen oder Informationen zu ionosphärischen oder troposphärischen Einflüssen auf die Beobachtungssignale, erlaubt die Lösung der Phasenmehrtendigkeiten in Echtzeit und damit die signifikante

Steigerung der Genauigkeit und eine deutlich verkürzte Konvergenz. Dienste, welche dieses Verfahren nutzen, werden in der Literatur oft unter den Begriffen PPP-RTK oder SSR zusammengefasst (Wübbena et al. 2005; Li et al. 2022). Seitens der Anbieter wird diese Unterscheidung häufig nicht explizit vorgenommen.

Die wesentlichen Spezifika der in der Messkampagne verwendeten Dienste sind in [Tabelle 1](#) gegenübergestellt. Trimble CenterPoint RTX Marine (im Folgenden RTX genannt) wird von der Trimble Inc. angeboten und stellt die Erweiterung des an Land verfügbaren Trimble CenterPoint RTX-Dienstes im küstennahen Bereich bis 100 Seemeilen bereit. Im angegebenen Versorgungsgebiet ist die gesamte deutsche AWZ enthalten. Auch die NovAtel Inc. bietet mit dem Dienst NovAtel Oceanix (nachfolgend als Oceanix bezeichnet) eine Versorgung in Küstennähe an. Die Grenze des Versorgungsbereiches wird mit 60 km Entfernung zur Küstenlinie angegeben. Fugro Marinestar (Fugro), der dritte an Bord genutzte PPP-Dienst, ist ein globaler maritimer Dienst. Neben den PPP-Diensten wurde der hochpräzise Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung SAPOS HEPS (SAPOS) eingesetzt. Während an Land für SAPOS HEPS ein Referenzstationsnetzwerk mit einem Stationsabstand von maximal 60 km betrieben wird, befindet sich die am weitesten vom Festland entfernte Referenzstation in der Nordsee auf der Insel Helgoland. Bei der Nutzung des Dienstes in der AWZ, insbesondere im »Entenschnabel«, muss dieser Umstand berücksichtigt werden.

Das entscheidende Qualitätsmerkmal einer Positionsbestimmung ist die erreichte Genauigkeit. Fehlereinflüsse auf die Koordinatenlösungen sind in der Regel autokorreliert, das heißt die Koordinate einer einzelnen Epoche wird sowohl durch

	Trimble CenterPoint RTX Marine	NovAtel Oceanix	Fugro Marinestar	SAPOS HEPS
<b>Anbieter</b>	Trimble Inc.	NovAtel Inc.	Fugro	Deutsche Landesvermessung
<b>Art</b>	PPP	PPP	PPP	RTK
<b>Unterstützte GNSS</b>	GPS Galileo GLONASS BeiDou	GPS Galileo GLONASS BeiDou	GPS Galileo GLONASS BeiDou	GPS Galileo GLONASS BeiDou
<b>Genauigkeit horizontal</b>	<2 cm	2,5 cm	1,7 cm N / 2 cm O	1 bis 2 cm
<b>Genauigkeit vertikal</b>	<5 cm (RMS)	5 cm (95 %)	5,2 cm (95 %)	2 bis 3 cm (k. A.)
<b>Konvergenzzeit</b>	15 Minuten	3 Minuten	ca. 35 Minuten	–
<b>Reichweite auf See</b>	bis ca. 200 km vor der Küste	bis 60 km vor der Küste	globaler maritimer Dienst	keine Angabe
<b>Empfangstechnik</b>	aktuelle Trimble-Empfänger	Empfänger mit NovAtel 7-OEM-Board mit RTK-Option	unterstützt von verschiedenen Empfängerherstellern	beliebiger 2-Frequenz-RTK-Empfänger
<b>Korrekturdatenempfang</b>	Internet (Ntrip) L-Band	Internet (Ntrip) L-Band	Internet (Ntrip) L-Band	Internet (Ntrip)

**Tabelle 1:** Vergleich der verwendeten Positionierungsdienste anhand von ausgewählten Kriterien. Im Fokus stehen Charakteristika, welche für die Verwendung der Dienste zur Positionierung im deutschen Seegebiet relevant sind. Die Angaben sind den Webseiten und Broschüren der Anbieter entnommen

zufällige als auch durch kurz- und längerfristige systematische Fehler beeinflusst. Die Betreiber der Positionierungsdienste verwenden unterschiedliche statistische Parameter bei der Angabe der zu erwartenden Genauigkeit ihrer Dienste (siehe [Tabelle...1](#)). Neben der Standardabweichung wird häufig die Breite des 95%-Konfidenzintervalls angegeben. Bei der statistischen Beurteilung statischer Messungen über einen längeren Messzeitraum ist die Standardabweichung gegenüber dem langzeitigen Mittelwert eine übliche Genauigkeitsangabe. Für kinematische Messungen an Bord eines Schiffes oder in einem Flugzeug ist eine Mittelbildung über mehrere Epochen jedoch nicht möglich. Für kinematische Anwendungen ist deshalb die Verwendung der doppelten oder dreifachen Standardabweichung als Qualitätsparameter sinnvoller. Beim Vergleich der Genauigkeitsangaben der verschiedenen Anbieter sollten diese Unterschiede berücksichtigt werden. Im Folgenden liegt allen berechneten Fehlermaßen die doppelte Standardabweichung zugrunde. Unter Annahme einer Normalverteilung der Messfehler entspricht die doppelte Standardabweichung dem 95%-Quantil.

Besondere Umwelteinflüsse wie Gewitterfronten oder hohe Ionosphärenaktivität schränken die erreichbare GNSS-Genauigkeit zusätzlich ein. Daher geben die Dienstanbieter ihre Genauigkeitsmaße in der Regel als »unter optimalen Bedingungen erreichbare Werte« an. Neben den Charakteristika der Dienste haben auch die Auswahl der GNSS-Technik und die Konfiguration der Empfänger einen Einfluss auf die Genauigkeit und Konsistenz der gemessenen Koordinaten. Seitens der kommerziellen PPP-Dienste gibt es daher Einschränkungen, welche Geräte mit den Diensten genutzt werden können. Listen der unterstützten Empfängertypen sind auf den Webseiten der Anbieter zu finden. Empfängereinstellungen erlauben unter anderem die Auswahl der verwendeten Satellitensysteme und GNSS-Signale, die Festlegung des geodätischen Referenzsystems der Ergebniskoordinaten und die Verwendung von Positionsfiltren.

Alle hier verwendeten Dienste versprechen eine vergleichbare Genauigkeit im Zentimeterbereich. Deshalb ist eine strikte Unterscheidung der verschiedenen geodätischen Referenzsysteme beim Koordinatenvergleich zwingend erforderlich. Ein Kriterium unseres Tests war deshalb die Überprüfung möglicher systematischer Unterschiede der mit den Diensten bestimmten Positionslösungen zum amtlichen Raumbezug. Während beim SAPOS Angaben zum Referenzsystem übertragen werden und die Positionslösung im amtlichen Raumbezug (ETRS89/DREF91 Realisierung 2016) vorliegt, erfolgt die Wahl des Referenzsystems bei Nutzung der PPP-Dienste am Empfänger. Entsprechende

Transformationen zwischen den verschiedenen Referenzsystemen müssen im GNSS-Empfänger implementiert sein. Je nach Empfängertyp und -firmware kann meist zwischen mehreren international und regional gültigen Systemen gewählt werden. Beispielsweise unterstützt der verwendete Leica GS25 Rover unter anderem das zum Zeitpunkt der Kampagne aktuelle internationale Referenzsystem ITRF2014 und die verschiedenen Realisierungen des European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89). Die Transformationsparameter zwischen diesen Referenzrahmen werden vom Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) im Rahmen von EUREF veröffentlicht (<http://etrs89.ensg.ign.fr>). Zur konsistenten Nutzung des amtlichen Raumbezugs muss dieser als neues Koordinatensystem im Empfänger definiert werden. Die Transformationsparameter werden von der AdV online zur Verfügung gestellt ([www.adv-online.de/AdV-Produkte/Integrierter-geodätischer-Raumbezug/Transformationsparameter](http://www.adv-online.de/AdV-Produkte/Integrierter-geodätischer-Raumbezug/Transformationsparameter)).

### 3 Aufbau der GNSS-Empfangstechnik an Bord der WEGA

Während der Messkampagne wurden verschiedene Experimente an Bord der WEGA durchgeführt. Die primäre Aufgabe bestand in den Schweremessungen. Zusätzlich wurden mit drei Radarpegeln Daten zur Bestimmung des Meeresspiegels erhoben. Die Lage und Höhe aller Sensoren sowie der insgesamt sechs GNSS-Antennen wurden vor Fahrtbeginn eingemessen und die Hebelarme bzw. Exzentrizitäten bestimmt.

Die vier Positionierungsdienste wurden an zwei unterschiedlichen Antennenstandorten genutzt, welche in [Abb. 1](#) hervorgehoben sind. Der beste GNSS-Empfang ist auf einem Schiff im Mast zu erwarten, da hier nur minimale Abschattungen



**Abb. 1:** Bild des VWFS WEGA im Hafen von Bremerhaven. Markiert sind die verwendeten Antennen. A – Mastantenne des Typs Leica AX1202 GG; B und C – steuerbordseitige bzw. backbordseitige Antennen auf dem Peildeck des Typs navXperience 3G+C

durch Schiffsaufbauten den Satellitenempfang stören. An der Mastantenne der *WEGA* vom Typ Leica AX1202 GG wurden über einen GNSS-Splitter durch das BKG mehrere Empfänger betrieben. Die drei Positionierungsdienste RTX, Oceanix und SAPOS konnten so direkt miteinander verglichen werden.

Die Positionierung mit dem RTX-Dienst erfolgte mit einem Trimble MB-TWO-Empfänger, verbaut in einem Gerät der Firma Alberding GmbH (Firmware 4.11). Dieser erlaubte die Positionierung mit den Satellitensystemen GPS, Galileo und GLO-NASS. Zur Nutzung des Oceanix-Korrekturdienstes wurde ein Leica GS25-Empfänger (Firmware 11.00) und zur Positionierung mit SAPOS ein Javad TRE-3 Delta-Empfänger (Firmware 4.1.04-211206) verwendet. In beiden Fällen trug neben GPS, Galileo und GLONASS auch das chinesische Satellitensystem BeiDou zur Positionsbestimmung bei.

Das Vermessungssystem der *WEGA* nutzt einen 2-Antennen-Empfänger des Typs Septentrio AsteRxU marine, welcher an zwei GNSS-Antennen vom Typ navXperience 3G+C auf dem Peildeck des Schiffes angeschlossen ist. Mittels dieses Empfängers konnte der Dienst der Firma Fugro verwendet werden. Die ermittelte Koordinate bezieht sich auf die steuerbordseitige Antenne.

Die Einwahl beim SAPOS-Server erfolgte über die VSAT-Anlage des Schiffes. Genutzt wurde das VRS-Verfahren über die Einwahl der Zentralen Stelle SAPOS. Der Korrekturdatenempfang für die drei PPP-Dienste RTX, Oceanix und Fugro erfolgte über L-Band.

Die Referenzsysteme für die mit den PPP-Diensten gemessenen Koordinaten sind an den Empfängern einzustellen. Für RTX und Oceanix wurden die Koordinaten im internationalen Referenzsystem ITRF2014 aufgezeichnet und für die Auswertung nachträglich unter Verwendung der für 2022 veröffentlichten Transformationsparameter in den amtlichen Raumbezug (ETRS89/DREF91 Realisierung 2016) transformiert.

Am Schiffsempfänger wurden keine Konfigurationsänderungen vorgenommen. Für den Fugro-Dienst war das europäische Referenzsystem ETRS89 am Empfänger eingestellt. Als internationales Bezugssystem wäre an diesem Empfänger WGS84 auswählbar. Eine genaue Einstellung des Referenzrahmens war nicht möglich.

#### 4 Ergebnisse

Die Positionslösungen, welche während der Messkampagne mit den vier Positionierungsdiensten ermittelt wurden, sollen hinsichtlich Stabilität, Verfügbarkeit und Genauigkeit untersucht werden. Im Fokus stehen die Fragestellungen, ob in der Messkampagne die Dienste in den erwarteten Versorgungsgebieten genutzt werden konnten, eine stabile Positionslösung verfügbar war und

der prognostizierte Genauigkeitsbereich tatsächlich erreicht werden konnte.

Bei der Positionsbestimmung mittels GNSS wird zwischen Code-, Float- und Fix-Lösung unterschieden, mit denen unterschiedliche Genauigkeiten erreicht werden. Code-Lösungen erlauben eine Genauigkeit im Meterbereich. Eine genaue Koordinatenbestimmung im Zentimeterbereich ist nur mit Fix-Lösungen möglich. Sie setzen in Echtzeitanwendungen zwingend die Nutzung von Korrekturdaten entsprechender Positionierungsdienste voraus. Informationen zur Art der Positionslösung werden in der Regel zusammen mit den Koordinaten vom GNSS-Empfänger ausgegeben und können zur Beurteilung der Qualität herangezogen werden. Im Folgenden wird der Anteil der Messepochen mit einer Fix-Lösung zur Beurteilung der Stabilität der Positionslösung herangezogen. Als Versorgungsgebiet kann jener Fahrtbereich identifiziert werden, in welchem eine Fix-Lösung für den Großteil der Messepochen erreicht wurde. Das Vorliegen einer Code-Lösung bedeutet, dass der Positionierungsdienst zu dieser Messperiode nicht genutzt werden konnte.

Zur Beurteilung der Genauigkeit der mit den Echtzeit-Positionierungsdiensten bestimmten kinematischen Koordinatenlösungen werden Vergleichskordinaten benötigt. Hierfür wurden die aufgezeichneten Beobachtungsdaten der GNSS-Empfänger im Postprocessing nachträglich ausgewertet. In einem ersten Schritt der Analyse soll die hier genutzte Vergleichslösung auf ihre Eignung untersucht werden. Zur Bewertung werden mögliche systematische Abweichungen vom amtlichen Raumbezug sowie die Fehlercharakteristik der Lösung herangezogen (Abschnitt 4.1).

Für die Analyse der Echtzeitpositionslösungen und die Beurteilung der erreichten Genauigkeit wird anschließend für jede Messperiode die Differenz zwischen Echtzeit- und Vergleichslösung untersucht. Alle Lösungen werden zum Vergleich in den amtlichen Raumbezug (ETRS89/DREF91 Realisierung 2016) transformiert. Während der Messkampagne standen nicht zu jeder Zeit alle vier Dienste zur Verfügung. So führte die Fahrt zum Teil durch Abschnitte, welche außerhalb des Versorgungsbereiches bestimmter Dienste lagen. Weiterhin entstanden auch Datenlücken in den Korrektursignalen durch Abrisse der Übertragung. Damit ein direkter Vergleich der vier Positionierungsdienste möglich ist, werden daher in der Untersuchung zunächst nur jene Fahrtabschnitte verglichen, auf denen alle vier Dienste Fix-Lösungen lieferten. Diese Abschnitte erstrecken sich über Zeiträume von mehreren Stunden an unterschiedlichen Tagen und sind maßgeblich durch den Versorgungsbereich des Oceanix-Dienstes definiert. Um den Einfluss von groben Ausreißern auf die statistischen Parameter zu reduzieren, werden

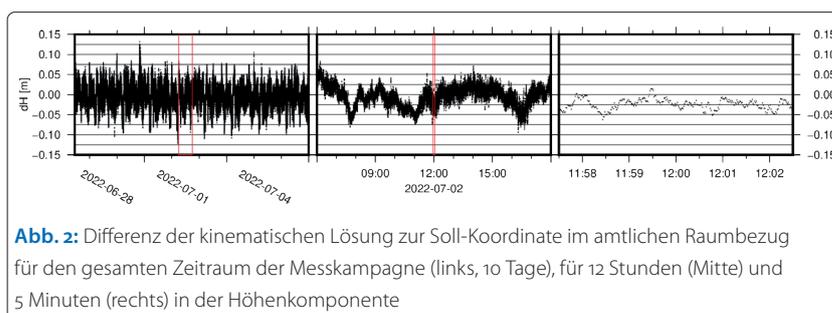
robuste Schätzer verwendet. Als Maß für die mittlere Abweichung wird der Median angegeben. Die Messunsicherheit wird mit Hilfe der mittleren absoluten Abweichung vom Median (MAD) berechnet. Um diese Größen mit den Herstellerangaben der 95%-Konfidenzintervalle zu vergleichen, wurde der MAD unter Annahme einer Normalverteilung skaliert, er entspricht somit der zweifachen Standardabweichung. In den weiteren Schritten soll dann bewertet werden, ob Unterschiede der Fehlercharakteristik in Abhängigkeit von der Entfernung zur Küste vorhanden sind. Außerdem kann für den RTX- und den Oceanix-Dienst das Konvergenzverhalten anhand je eines Fahrtabschnittes diskutiert werden.

#### 4.1 Validierung der GNSS-Vergleichslösung

Für die Auswertungen fiel die Wahl der Vergleichslösung auf den kinematischen Postprocessing-PPP-Dienst von Natural Resources Canada (CSRS-PPP), welcher sich bereits bei den Analysen vorangegangener Fahrten bewährt hatte. Zur Validierung dieser Positionslösung wurde eine kinematische Prozessierung von zwei GNSS-Referenzstationen des BKG auf der Insel Helgoland durchgeführt. Für beide Stationen erfolgte die Auswertung von Daten eines Javad TRE-3 Delta-Empfängers für den Zeitraum der Messkampagne von zehn Tagen mit CSRS-PPP im kinematischen Modus. Die Koordinaten des CSRS-PPP lagen zunächst im ITRF2014 vor und wurden nachträglich in den amtlichen Raumbezug (ETRS89/DREF91 Realisierung 2016) transformiert. Der Median der Koordinatenabweichungen von der Stationskoordinate im amtlichen Raumbezug ist zusammen mit der Messunsicherheit in [Tabelle 2](#) angegeben. An beiden Stationen fällt eine systematische Lageabweichung von 1 bis 2 cm in der Ost- und Nordkomponente auf. Systematische Unterschiede der Höhenkomponente in einer Größenordnung bis zu 1,5 cm sind vor dem Hintergrund des erhöhten Messrauschens statistisch nicht signifikant. Die Messunsicherheit der Höhenkomponente beträgt 5,0 cm, während die Lagekomponenten mit ca. 2 cm deutlich genauer bestimmt sind. Die Genauigkeit der Vergleichslösung ist damit in derselben Größenordnung wie die Genauigkeitsangaben zu den Positionierungsdiensten (siehe [Tabelle 1](#)) und begrenzt die Vali-

	HEL2	HELG
<b>Ostwert</b>	2,0 ± 1,4 cm	2,0 ± 1,4 cm
<b>Nordwert</b>	1,1 ± 2,0 cm	2,1 ± 1,6 cm
<b>Höhe</b>	-1,4 ± 5,0 cm	-0,3 ± 5,0 cm

**Tabelle 2:** Median und Unsicherheit (95 %) der Differenzen zwischen der kinematischen Postprocessing-Lösung mit CSRS-PPP und der amtlichen Koordinate der GREF-Stationen HEL2 (links) und HELG (rechts) auf der Insel Helgoland über den gesamten Kampagnenzeitraum



**Abb. 2:** Differenz der kinematischen Lösung zur Soll-Koordinate im amtlichen Raumbezug für den gesamten Zeitraum der Messkampagne (links, 10 Tage), für 12 Stunden (Mitte) und 5 Minuten (rechts) in der Höhenkomponente

dierungsmöglichkeiten auf diesen Genauigkeitsbereich.

[Abb. 2](#) zeigt die Differenz der kinematischen Lösung zur Soll-Koordinate im amtlichen Raumbezug für unterschiedliche Zeiträume in der Höhenkomponente. Man erkennt bei der Betrachtung über den gesamten Kampagnenzeitraum eine Unsicherheit in der Größenordnung von 5 cm. Einzelne Ausreißer erreichen eine Größe von bis ca. 10 cm. Beim Fokus auf kürzere Zeiträume wird deutlich, dass die Unsicherheiten maßgeblich durch systematische Abweichungen über Zeiträume von mehreren Minuten bis Stunden bestimmt werden und benachbarte Messepochen in dieser Koordinatenlösung nur geringfügige Unterschiede zueinander aufweisen. Hierin kommt die Autokorrelation der Fehlereinflüsse auf die Lösung zum Ausdruck.

#### 4.2 Verfügbarkeit und Stabilität der Positionslösungen

Die aufgezeichneten Daten für die Positionierungsdienste RTX, Oceanix und SAPOS enthalten als Qualitätsparameter Informationen zur Art der Positionslösung. Aufgrund der technischen Realisierung der Datenaufzeichnung lagen uns keine belastbaren Informationen zur Art der Positionslösung für den Fugro-Dienst vor. In [Tabelle 3](#) sind die Anteile an Fix-Epochen für RTX, Oceanix und SAPOS gegenübergestellt.

Der RTX-Dienst wurde erst während der Fahrt, am 29.06.2022 um 12:26 Uhr UTC, freigeschaltet und am Empfänger aktiviert. Zu diesem Zeitpunkt war die WEGA auf dem ersten längeren Fahrtabschnitt in Richtung »Entenschnabel« unterwegs. Von da an war der Dienst für die gesamte Messkampagne verfügbar. Der Anteil der Fix-Epochen liegt bei 96 %.

	Trimble RTX	Oceanix	SAPOS HEPS		
			50 km	50–100 km	>100 km
<b>Anteil der Fix-Epochen</b>	96 %	96 %	93 %	90 %	63 %

**Tabelle 3:** Anteil der Fix-Epochen. Der Wert bezieht sich auf das jeweilige Versorgungsgebiet (RTX: gesamte Messkampagne ab Aktivierung des Dienstes am 29.06.2022; Oceanix: bis 60 km von der Küste; SAPOS: deutsche AWZ, bei unterschiedlicher Entfernung von der Küste)

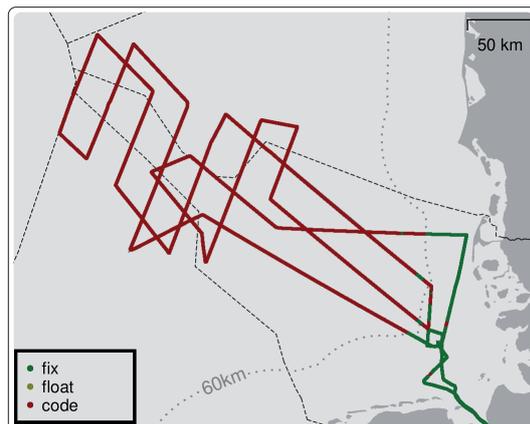


Abb. 3: Art der Positionslösung mit dem Oceanix-Dienst während der Messkampagne

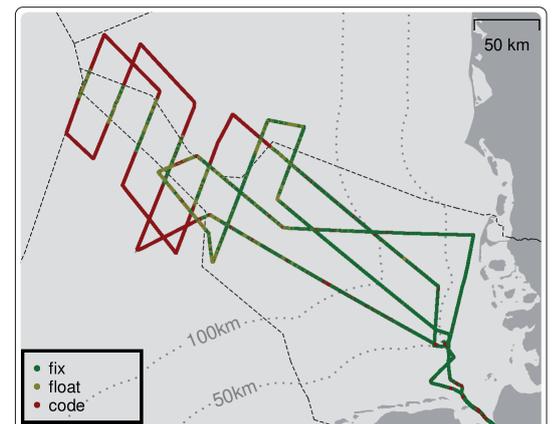


Abb. 4: Art der Positionslösung mit SAPOS während der Messkampagne

Wie erwartet deckt der Dienst die deutsche AWZ in der Nordsee vollständig ab. Das Versorgungsgebiet des Oceanix-Dienstes endet laut Aussage des Anbieters bei einer Entfernung von 60 km von der Küste. Dies bestätigte sich während der Messkampagne, da ab dieser Entfernung keine Fix-Lösung mehr möglich war (siehe Abb. 3). Innerhalb des küstennahen Bereiches liegt der Anteil an Fix-Epochen bei 96 %. Für SAPOS liegen keine Angaben zum Versorgungsbereich vor. Da SAPOS ein RTK-Dienst ist, muss von einer Abhängigkeit der Qualität und Stabilität relativ zum Abstand von der verwendeten Referenzstation ausgegangen werden. Abb. 4 zeigt die Art der Positionslösung während der Messkampagne mit SAPOS. Im Lösungsverhalten ist die erwartete Abhängigkeit von der Entfernung zur Küste erkennbar. Bis zu einer Entfernung von ca. 50 km sind nur vereinzelte Unterbrechungen der Fix-Lösung zu verzeichnen und der Anteil der Fix-Epochen liegt bei 93 %. Diese Entfernung entspricht dem üblichen Stationsabstand im SAPOS-Referenzstationsnetzwerk. Eine zusätzliche Ursache für Unterbrechungen in der Fix-Lösung mit SAPOS liegt in der Stabilität der Internetverbindung, da die VSAT-Verbindung bei bestimmten Fahrtrichtungen durch Schiffsaufbauten gestört war. Eine genaue Quantifizierung dieser Unterbrechungen erfolgte in diesem Experiment allerdings nicht. Zwischen 50 und 100 km Entfernung von der Küste traten vermehrt Float-Lösungen auf. Der Anteil der Fix-Epochen verändert sich nicht nennenswert und liegt immer noch bei 90 %. Bei einer Entfernung von mehr als 100 km wurde keine zuverlässige Lösung mehr erwartet. Dennoch hat der Empfänger in 63 % der Fälle Fix-Lösungen berechnet. In Abb. 4 erkennt man, dass auf diesen Fahrtabschnitten der Empfänger häufig zwischen Fix- und Float-Lösungen wechselt. Dies ist ein Anzeichen, dass trotz Fix-Lösung nicht die nominale Genauigkeit erreicht wurde. Außerhalb der deutschen AWZ war nahezu keine Fix-Lösung möglich. Offensichtlich unterstützt SAPOS hier keine Positionierung.

### 4.3 Vergleich der erreichten Genauigkeit in Küstennähe

Die weiteren Betrachtungen berücksichtigen das jeweilige Versorgungsgebiet der Dienste. Die Bewertung der SAPOS-Lösung erfolgt in Abhängigkeit von der Entfernung zur Küste. Es werden ausschließlich die Fahrtabschnitte innerhalb der deutschen AWZ genutzt.

Die Untersuchung der erreichten Genauigkeit erfolgt hier anhand der Differenz zwischen den Echtzeitleösungen und den Postprocessing-Koordinatenlösungen des CSRS-PPP-Dienstes (siehe Abschnitt 4.1). Um die Ergebnisse für alle Dienste vergleichen zu können, beschränkt sich die Analyse zunächst auf jene Fahrtabschnitte, in welchen RTX, Oceanix und SAPOS eine Fix-Lösung erreichten. Der Bereich ist maßgeblich durch das Versorgungsgebiet des Oceanix-Dienstes definiert (bis ca. 60 km Entfernung vom Festland, siehe Abb. 5). Der Fugro-Dienst wird in allen hier analysierten Messepochen berücksichtigt, auch wenn keine Informationen zur Art der Positionslösung vorliegen.

Die mittleren Abweichungen zwischen den Positionslösungen und der Vergleichslösung sind für diese Fahrtabschnitte in Tabelle 4 aufgeführt. Für alle vier Dienste betragen die mittleren Ab-



Abb. 5: Betrachtungsgebiet für küstennahen Genauigkeitsvergleich

	Trimble CenterPoint RTX Marine	NovAtel Oceanix	Fugro Marinestar	SAPOS HEPS
<b>Ostwert</b>	$-1,7 \pm 2,0$ cm	$-1,4 \pm 1,6$ cm	$-2,6 \pm 2,0$ cm	$-1,6 \pm 1,4$ cm
<b>Nordwert</b>	$-0,8 \pm 2,4$ cm	$-0,6 \pm 2,0$ cm	$-0,8 \pm 3,0$ cm	$-0,7 \pm 1,6$ cm
<b>Höhe</b>	$-0,3 \pm 6,2$ cm	$1,7 \pm 6,0$ cm	$0,5 \pm 7,4$ cm	$1,7 \pm 4,8$ cm

**Tabelle 4:** Differenz zwischen den Positionslösungen der Dienste und der Postprocessing-Lösung ermittelt mit CSRS-PPP.

Angegeben ist jeweils der Median zusammen mit der Messunsicherheit (95 %). Die Werte beziehen sich auf die in [Abb. 5](#) dargestellten Fahrtabschnitte

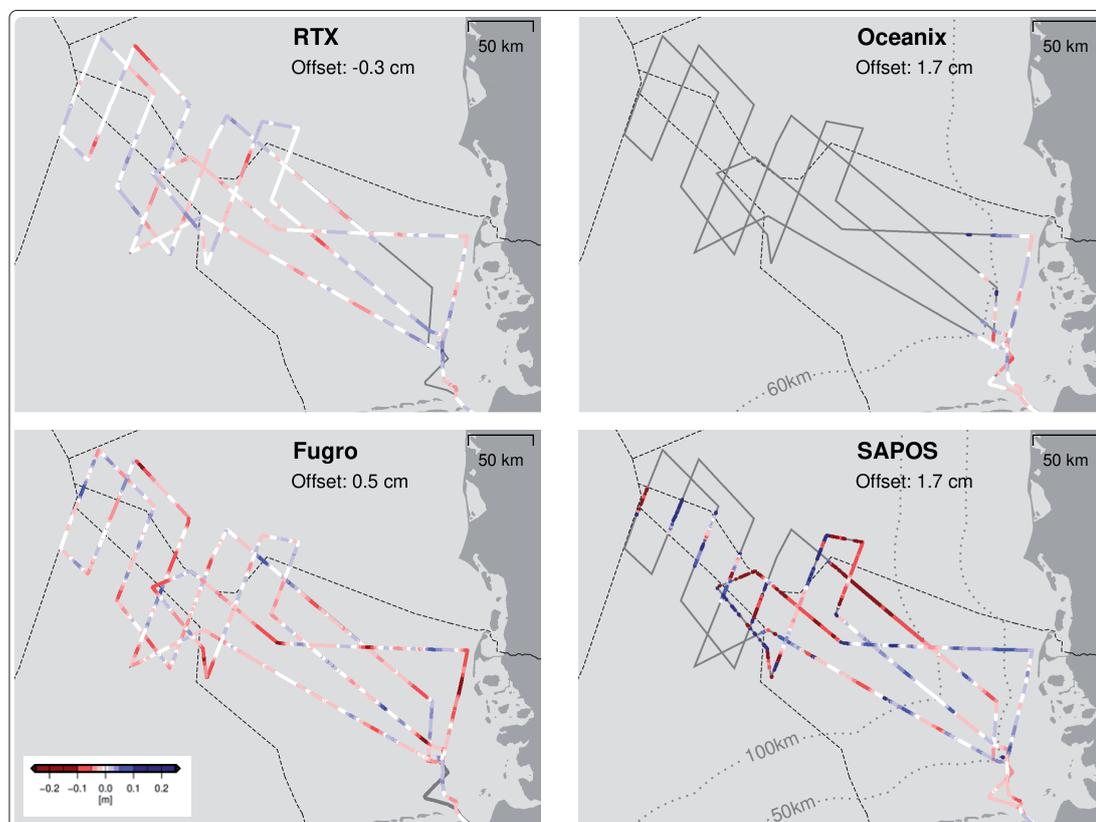
weichungen in den drei Koordinatenkomponenten wenige Zentimeter. Für die PPP-Dienste RTX, Oceanix und Fugro liegt die Messunsicherheit (95 %) bei 2 bis 3 cm in beiden Lagekomponenten und bei 6 bis 7,5 cm in der Höhenkomponente. Mit SAPOS wurden ca. 1,5 cm in beiden Lagekomponenten und 5 cm in der Höhenkomponente erreicht. Unter Berücksichtigung der Genauigkeit der Vergleichslösung stimmen die erzielten Genauigkeiten mit den Angaben der Betreiber überein (siehe [Tabelle 1](#)).

Die Unsicherheit ist für Fugro nur geringfügig größer als für die anderen Dienste. Dies deutet darauf hin, dass auch mit diesem Dienst für den Großteil der Messepochen Fix-Lösungen berechnet werden konnten.

#### 4.4 Diskussion der Genauigkeit während der gesamten Messkampagne

[Abb. 6](#) stellt die Differenzen (abzüglich der mittleren Abweichung) zwischen den Positionslösungen

der Dienste und der Vergleichslösung (CSRS-PPP) in der Höhenkomponente dar. Ebenfalls wurde zur Reduzierung der Streuung benachbarter Messepochen ein gleitender Filter über 15-Minuten-Intervalle angebracht. Berücksichtigt sind für RTX, Oceanix und SAPOS ausschließlich Fix-Lösungen. Die [Abb. 6](#) zeigt für SAPOS erneut den Zusammenhang zwischen Genauigkeit und Entfernung zur Küste. Die Abweichung von der Vergleichslösung kann auch für Fix-Epochen in den küstenfernen Fahrtabschnitten (>100 km) mehrere Dezimeter betragen, während in Küstennähe die Differenz in der Regel unter 5 cm liegt (vgl. [Tabelle 4](#)). Die Positionslösungen mit RTX und Fugro lassen keine solche Abhängigkeit erkennen. Dies bestätigt eine Betrachtung der küstenfernen Fahrtabschnitte. [Tabelle 5](#) zeigt mittlere Abweichung und Unsicherheit der Differenz zwischen den Echtzeitleösungen und der Vergleichslösung für einen charakteristischen Abschnitt von 13 Stunden in maximaler Entfernung zum Festland (~350 km). Im



**Abb. 6:** Höhenabweichung der kinematischen Positionslösungen von der Vergleichslösung bestimmt mit CSRS-PPP.

Dargestellt sind ausschließlich Fix-Lösungen, welche um den Offset (vgl. [Tabelle 5](#)) korrigiert wurden

	Trimble CenterPoint RTX Marine	Fugro Marinestar
<b>Ostwert</b>	$-1,6 \pm 1,6$ cm	$-2,3 \pm 2,4$ cm
<b>Nordwert</b>	$-0,8 \pm 2,0$ cm	$-0,4 \pm 3,4$ cm
<b>Höhe</b>	$-0,1 \pm 5,0$ cm	$0,1 \pm 8,6$ cm

**Tabelle 5:** Median und Messunsicherheit (95 %) der Differenz zwischen den Positionslösungen der Dienste und der Postprocessing-Lösung in den küstenfernsten Regionen des Untersuchungsgebietes

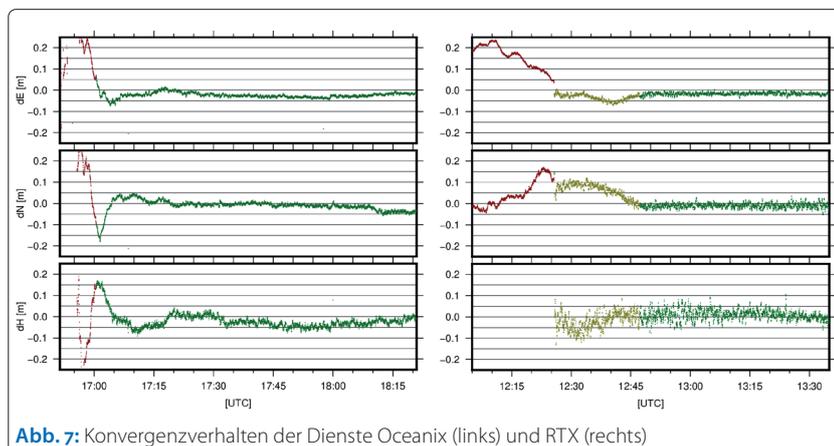
Vergleich zu den küstennahen Fahrtabschnitten (siehe [Tabelle 4](#)) liegen keine signifikanten Unterschiede in der Genauigkeit vor. Der Oceanix-Dienst war, wie diskutiert, nur bis 60 km Abstand von der Küste verfügbar.

#### 4.5 Konvergenzzeit

Neben der räumlichen Verfügbarkeit ist insbesondere bei Echtzeitanwendungen auch die Wartezeit zwischen Einschalten des jeweiligen Empfängers und Bereitstellung präziser Koordinaten entscheidend. Aus [Tabelle 1](#) ist abzulesen, dass sich hier die Spezifika der Dienste mit Angaben von 3 bis 35 min stark unterscheiden. Im Rahmen dieser Messkampagne konnte das Konvergenzverhalten für die Dienste RTX und Oceanix anhand von je einem Zeitabschnitt beobachtet werden. Es wurden keine dezidierten Versuche zur Ermittlung der erreichbaren Konvergenzzeit durchgeführt. Für den Fugro-Dienst erfolgte während der Fahrt keine Re-Initialisierung und bei SAPOS ist verfahrensbedingt kein Konvergenzverhalten beobachtbar.

Die Betrachtung des Einlaufverhaltens für den RTX-Dienst erfolgt anhand der ersten Initialisierung am 29.06.2022, um 12:26 Uhr UTC. Ab 12:48 Uhr UTC, also ca. 22 Minuten später, vermerkte der Empfänger, dass eine Fix-Lösung erreicht werden konnte. Ab diesem Zeitpunkt sind auch keine größeren systematischen Abweichungen zur Vergleichslösung mehr festzustellen (vgl. [Tabelle 4](#) und [Tabelle 5](#)). Somit betrug die Konvergenzzeit in diesem Falle ca. 22 Minuten, bis die nominale Genauigkeit erreicht wurde (siehe [Abb. 7](#)).

Durch einen Neustart des Leica-Empfängers, am 28.06.2022 um 16:50 Uhr UTC, konnte das



**Abb. 7:** Konvergenzverhalten der Dienste Oceanix (links) und RTX (rechts)

Einlaufverhalten mit dem Oceanix-Dienst beobachtet werden (siehe [Abb. 7](#)). Nach dem Wiedereinschalten vermerkte der Empfänger gegen 16:55 Uhr UTC den Beginn der Konvergenzzeit und ab 17:00 Uhr UTC, also ca. 5 Minuten später, gab der Empfänger an, eine Fix-Lösung erreicht zu haben. Die Differenz zur Vergleichslösung ist zu diesem Zeitpunkt jedoch noch größer als 10 cm. Nach weiteren 3 bis 5 Minuten reduziert diese sich auf weniger als 5 cm. Somit wurde in diesem Experiment die nominale Genauigkeit nach ca. 15 Minuten erreicht.

## 5 Zusammenfassung

Auch wenn die Messkampagne auf dem WWFS WEGA nicht primär der Validierung von Positionierungsdiensten diente, konnte eine Reihe von interessanten Ergebnissen und Erfahrungen gesammelt werden. Der Vergleich der hier verwendeten Positionierungsdienste Trimble CenterPoint RTX Marine (RTX), NovAtel Oceanix (Oceanix), Fugro Marinestar (Fugro) und SAPOS HEPS (SAPOS) erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Für diese Dienste wurden anwendungsspezifische Informationen wie ihre Versorgungsgebiete, die erreichbare Genauigkeit und Zuverlässigkeit sowie die Möglichkeiten zum Korrekturdatenempfang zusammengestellt.

Während der Dienst von NovAtel nur küstennahe Positionierung bis 60 km unterstützt, umfasst das Versorgungsgebiet der Dienste von Trimble und Fugro die deutsche AWZ vollständig. In dem jeweiligen Versorgungsgebiet waren die Dienste RTX und Oceanix mit einer Zuverlässigkeit von 96 % verfügbar. Mit SAPOS konnte küstennah eine vergleichbare Zuverlässigkeit erreicht werden. Erst ab einer Entfernung von ca. 100 km vom Festland lässt die Zuverlässigkeit bei der Nutzung von SAPOS erwartungsgemäß deutlich nach und die Genauigkeit der Fix-Lösung erreicht nicht mehr das übliche Zentimeterniveau.

Bei der Auswahl eines Positionierungsdienstes ist auf die Vergleichbarkeit der angegebenen Genauigkeitsmaße zu achten. Als Genauigkeitsangaben dient häufig die Standardabweichung (RMS) oder das 95%-Quantil. Letzteres entspricht im Falle einer Normalverteilung der doppelten Standardabweichung. Alle Dienste geben eine nominale Genauigkeit von besser als 5 cm in der Lage und 10 cm in der Höhe an (95%-Quantil).

Für einen unabhängigen Vergleich der vier Positionierungsdienste wurde die erreichte Genauigkeit anhand einer Vergleichslösung ermittelt, die mit Hilfe des Postprocessing-PPP-Dienstes von Natural Resources Canada (CSRS-PPP) berechnet wurde. Das Referenzsystem der Echtzeitpositionslösung ist bei der Nutzung eines PPP-Dienstes am Empfänger einstellbar. Um einen Koordinatenvergleich zu ermöglichen, wurden alle Lösungen

mittels der von der AdV bereitgestellten Transformationsparameter in den amtlichen Raumbezug (ETRS89/DREF91 Realisierung 2016) überführt. Im Rahmen der Genauigkeit der Vergleichslösung von ca. 3 cm horizontal und ca. 5 cm vertikal konnten die Genauigkeitsangaben der Dienstanbieter bestätigt werden. Die transformierten Positionslösungen waren in diesem Genauigkeitsbereich untereinander sowie mit der ermittelten Vergleichslösung konsistent. Erwartungsgemäß wur-

de mit SAPOS in Küstennähe eine etwas höhere Genauigkeit erreicht als mit den PPP-Diensten. Die Dienste RTX und Fugro zeigen innerhalb der AWZ keine Abhängigkeit ihrer Genauigkeit vom Küstenabstand.

Die durchgeführten Tests erlauben keine abschließende Beurteilung des Konvergenzverhaltens der Dienste. Im vorliegenden Fall konnte nach ca. 20 Minuten die nominale Genauigkeit erreicht werden. //

## Literatur

- AdV (2023): Transformationsparameter. [www.adv-online.de/AdV-Produkte/Integrierter-geodaetischer-Raumbezug/Transformationsparameter/](http://www.adv-online.de/AdV-Produkte/Integrierter-geodaetischer-Raumbezug/Transformationsparameter/)
- CSRS-PPP (2023): <https://webapp.csrscs-scrcs.nrcan-rncan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>
- Fugro Marinestar (2023): [www.fugro.com/our-services/marine-asset-integrity/satellite-positioning/marinestar](http://www.fugro.com/our-services/marine-asset-integrity/satellite-positioning/marinestar)
- Jahn, Cord-Hinrich; Patrick Westfeld; Bernd Vahrenkamp et al. (2022): Development and Realisation of a Real-time High Positioning SSR-RTK Service for the North Sea Exclusive Economic Zone. *International Hydrographic Review*, DOI: 10.58440/ihr-28-a16
- Li, Xingxing; Jiaxin Huang; Xin Li et al. (2022): Review of PPP-RTK: achievements, challenges, and opportunities. *Satellite Navigation*, DOI: 10.1186/s43020-022-00089-9
- Liebsch, Gunter; Joachim Schwabe; Patrick Westfeld; Christoph Förste (2022): Improving the Geodetic Infrastructure for Bathymetry and 3D Navigation in the German Exclusive Economic Zone of the North and Baltic Sea. *International Hydrographic Review*, DOI: 10.58440/ihr-28-a17
- NovAtel Oceanix (2023): <https://novatel.com/products/gps-gnss-correction-services/oceanix-correction-services>
- Riecken, Jens; Paul Becker (2020): Ein neuer Satellitenpositionierungsdienst für Deutschland. *zfv*, DOI: 10.12902/zfv-0304-2020
- Riecken, Jens; Enrico Kurtenbach (2017): Der Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung – SAPOS. *zfv*, DOI: 10.12902/zfv-0180-2017

- Schirmer, Uwe; Joachim Schwabe et al. (2018): Modellierung des Quasigeoides GCG2016. In: Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland, Arbeitskreis Raumbezug (Hrsg.): DHHN2016 – Die Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes und der einheitliche integrierte geodätische Raumbezug 2016, DOI: 10.5675/Raumbezug\_2016\_Hauptdokument
- Schwabe, Joachim; Jonas Ågren et al. (2020): The Baltic Sea Chart Datum 2000 (BSCD2000). Implementation of a common reference level in the Baltic Sea. *International Hydrographic Review*, [https://iho.int/uploads/user/pubs/ihrview\\_P1/IHR\\_May2020.pdf](https://iho.int/uploads/user/pubs/ihrview_P1/IHR_May2020.pdf)
- Trimble RTX (2023): <https://positioningservices.trimble.com/en/rtx>
- Weber, Georg; Denise Dettmering; Harald Gebhard; Rudy Kalafus (2005): Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (Ntrip) – IP-Streaming for Real-Time GNSS Applications. 18th International Technical Meeting, ION GNSS-05, September 13-16, 2005, Long Beach, California, S. 2243–2247
- Wübbena, Gerd; Martin Schmitz; Andreas Bagge (2005): PPP-RTK: Precise Point Positioning Using State-Space Representation in RTK Networks. 18th International Technical Meeting, ION GNSS-05, September 13-16, 2005, Long Beach, California. [www.geopp.com/pdf/ion2005\\_fw.pdf](http://www.geopp.com/pdf/ion2005_fw.pdf)
- Zentrale Stelle SAPOS (2023): <https://zentrale-stelle-sapos.de/news-produktinfos/2/>

## Danksagung

Die Arbeiten des BKG im Bereich der Ost- und Nordsee sind das Ergebnis einer langjährigen, konstruktiven Zusammenarbeit mit dem BSH. Wir danken dem BSH für die Bereitstellung der Schiffskapazitäten und die logistische Unterstützung. Unser besonderer Dank gilt der Besatzung des VWFS *WEGA* unter Leitung von Kapitän Michael Barth, die unsere Vermessungsarbeiten engagiert begleiteten und die maßgeblich zum Erfolg der Messungen beitrugen. Für die Durchführung der Messungen haben wir Demo-Lizenzen für die Dienste Trimble CenterPoint RTX Marine und NovAtel Oceanix genutzt, die uns freundlicherweise von den Firmen bereitgestellt wurden.