

Journal of Applied Hydrography

HYDROGRAPHISCHE NACHRICHTEN

10/2025

HN 132

Vermessung
der
Küstenzone



Satellitengestützte Bathymetrie als Instrument zur schnellen Beurteilung sturmbedingter Auswirkungen auf die Strandaufschüttung

Ein Beitrag von EDWARD ALBADA, MORJANA SIGNORIN, LINDINO BENEDET, CHELSEA RYAN, KNUT HARTMANN, CHRISTIAN BÖDINGER und KIM KNAUER

Behörden stehen nach Sturmereignissen vor der Aufgabe, Strandvolumenverluste schnell zu quantifizieren, um Katastrophenmeldungen vorzubereiten. Traditionelle Methoden stützen sich auf visuelle Schätzungen und wenige Messungen wie Strandhöhe, Steilhanghöhe oder Dünenabstand. Diese Verfahren sind jedoch fehleranfällig, da Daten zum Offshore-Bereich des Strandprofils meist fehlen. Vollständige Strandprofiluntersuchungen, die sowohl den trockenen Strand als auch den Unterwasserbereich einbeziehen, liegen erst später vor. Satellitengestützte Bathymetrie (SDB) kann diese Lücke schließen: Sie liefert flächendeckende, konsistente Daten, die zeitnah vor und nach einem Sturm verfügbar sind. Dadurch lassen sich vorläufige Volumenschätzungen präzisieren und Katastrophenmeldungen auf eine fundiertere Datengrundlage stellen. Eine vergleichende Analyse von SDB-Daten und traditionellen topobathymetrischen Vermessungen am Beispiel von Coquina Beach (Anna Maria Island, Florida) zeigt, dass SDB die Genauigkeit schneller Nachsturmbeurteilungen verbessert. Trotz methodischer und verarbeitungsbedingter Einschränkungen kann SDB entscheidend dazu beitragen, wirtschaftliche Verluste realistisch abzuschätzen und eine schnellere, besser informierte Reaktion auf Sturmereignisse zu ermöglichen.

Erdbeobachtung | satellitengestützte Bathymetrie | Sturmschaden | Strandvolumen | Küstenresilienz
earth observation | satellite-derived bathymetry | storm damage | beach volume | coastal resilience

After storm events, authorities are faced with the task of quickly quantifying beach volume losses in order to prepare disaster declarations. Traditional methods rely on visual estimates and a few measurements such as beach elevation, scarp height or distance from dune to waterline. However, these methods are prone to errors because data on the offshore portion of the beach profile are usually missing. Complete beach profile surveys, including both the dry beach and the underwater area, are only available later. Satellite-derived bathymetry (SDB) can close this gap: It provides comprehensive, consistent data that is available promptly before and after a storm. This allows for more precise preliminary volume estimates and provides a more solid data basis for disaster declarations. A comparative analysis of SDB data and traditional topo-bathy surveys using Coquina Beach (Anna Maria Island, Florida) as an example shows that SDB improves the accuracy of rapid post-storm assessments. Despite methodological and processing limitations, SDB can make a decisive contribution to realistically estimating economic losses and enabling a faster, better-informed response to storm events.

Einleitung

Für Regierungsbehörden ist es oft eine Herausforderung, unmittelbar nach einem Sturmereignis schnelle Einschätzungen der Strandvolumenverluste vorzunehmen. Diese Einschätzungen spielen eine wichtige Rolle bei der Quantifizierung der Verluste und helfen bei der Entscheidungsfindung bezüglich der Erklärung des Katastrophenfalls. Traditionell wird die Strandbewertung unmittelbar

nach einem Sturm anhand von Sichtschätzungen durchgeführt, die durch begrenzte Messungen (Strandhöhe, Höhe der Böschung, Abstand zwischen Düne und Wasserlinie usw.) unterstützt werden. Schnelle Einschätzungen auf Grundlage von Sichtschätzungen und begrenzten Messungen weisen häufig eine erhebliche Fehlerquote auf, insbesondere aufgrund fehlender Daten zum Offshore-Teil des Strandprofils. Herkömm-

liche Strandprofiluntersuchungen, einschließlich des trockenen Strands und des Offshore-Teils des Strandprofils, werden erst zu einem späteren Zeitpunkt, nach ersten Einschätzungen und Erklärungen des Katastrophenfalls, durchgeführt. Die Nutzung satellitengestützter Bathymetrie (SDB) für den Offshore-Teil des Profils unmittelbar nach einem Sturm könnte das Problem fehlender Offshore-Daten während der schnellen Bewertung nach einem Sturm lösen.

Satellitengestützte Bathymetrie (SDB) hat sich als vielversprechender Ansatz zur Erfassung bathymetrischer Daten im Flachwasser erwiesen. Im Vergleich zu akustischen oder luftgestützten LiDAR-Methoden bietet sie deutliche Vorteile hinsichtlich Zugänglichkeit und Kosteneffizienz. SDB ermöglicht den Zugriff auf historische Informationen und solche in nahezu Echtzeit in sehr flachen oder gefährlichen Gewässern, die mit herkömmlichen Methoden schwer zu erfassen sind. Da die Technologie keine Mobilisierung von Personal oder Ausrüstung vor Ort erfordert, ist sie im Vergleich zu In-situ-Erhebungen äußerst kostengünstig.

SDB-Verarbeitung

SDB ist die Berechnung der Flachwassertiefe anhand aktiver oder passiver Satellitensensoren (IHO 2024). Es gibt grundsätzlich zwei Arten von SDB-Verfahren zur Erzielung einer hohen räumlichen Auflösung: die empirische und die physikbasierte Methode. Beide basieren auf der multispektralen Reflexion des Sonnenlichts vom Meeresboden. Die empirische Methode ist eine nichtlineare Lösung, die eine Bandverhältnisberechnung (Stumpf et al. 2003; Lyzenga et al. 2006) der logarithmisch transformierten Wasserreflexion von Bändern mit unterschiedlicher Wasserabsorption verwendet und bathymetrische Daten vor Ort benötigt, um sie mit einer bekannten Tiefe zu korrelieren (IHO 2024). Mit Zugriff auf ausreichende und genaue Daten vor Ort, die mit dem Zeitpunkt der Satellitenbildaufnahme übereinstimmen, was bei Bewertungen nach Stürmen selten der Fall ist, kann die empirische Methode eine durchaus genaue SDB ergeben. Für Anwendungen ohne aktuelle und zuverlässige Vermessungsdaten (entlegene Standorte oder dynamische Umgebungen) kann nur eine physikbasierte Spektralmodellierung zuverlässige SDB-Oberflächen erzeugen. Forscher entwickeln seit den 1990er-Jahren SDB-Algorithmen. Die Prozesse umfassen verschiedene analytische Verfahren, wie z.B. Korrekturen der Nachbarschaftseffekte, Sonneneinstrahlung und Atmosphäre, unter Verwendung einer iterativen Lösung der Inversion der Strahlungstransportgleichung (Radiative Transfer Equation, RTE). Die RTE beschreibt das elektromagnetische Sonnenlichtsignal, wie es die verschiedenen Medien (z.B. obere Atmosphäre, Wasseroberfläche, Wassersäule)

durchläuft und zum Satellitensensor zurückreflektiert wird.

Für diese Studie basiert das RTE-Modell der gekoppelten Atmosphäre-Wasser-Systeme auf dem Referenzmodell der Finite-Element-Methode (FEM) (Kisselev 2004; Bulgarelli et al. 1999; Kisselev et al. 1995) im Rahmen eines »Modular Inversion Program« (MIP). Innerhalb des MIP werden Wassertiefe, optische Eigenschaften der Wasserbestandteile sowie die Reflexion des Untergrunds und des Meeresbodens in einem gekoppelten, iterativen Prozess abgeleitet (Abb. 1).

Der MIP-Prozess umfasst die folgenden Schritte:

- Korrektur der Satellitendaten hinsichtlich der Auswirkungen der Nachbarschaftseffekte angrenzender Landmassen.
- Korrektur der atmosphärischen und Meeresoberflächeneinflüsse durch gekoppelte Ableitung optischer Eigenschaften im Wasser (IOPs) und der Atmosphäre (Heege et al. 2014).
- Minimierung der Auswirkungen von Sonnenlichtreflexion auf der Wasseroberfläche.
- Ableitung räumlich aufgelöster Informationen zur spektralen Absorption und Streuung (in physikalischen Einheiten) inhärenter optischer Eigenschaften.
- Ableitung räumlich aufgelöster Informationen zur Wassertiefe und Meeresbodenalbedo.
- SDB-Daten sowie Daten zur Meeresbodenreflexion und Reflexion unterhalb der Wasseroberfläche werden hinsichtlich ihrer horizontalen Genauigkeit verbessert. Dies geschieht durch Berücksichtigung der Aufzeichnungsgeome-

Autoren

Edward Albada arbeitet bei EOMAP USA Inc.
Morjana Signorin, Lindino Benedet und Chelsea Ryan arbeiten bei Coastal Protection Engineering in Florida.
Dr. Knut Hartmann, Christian Bödinger und Kim Knauer arbeiten bei der EOMAP GmbH & Co. KG in Seefeld.

knauer@eomap.de

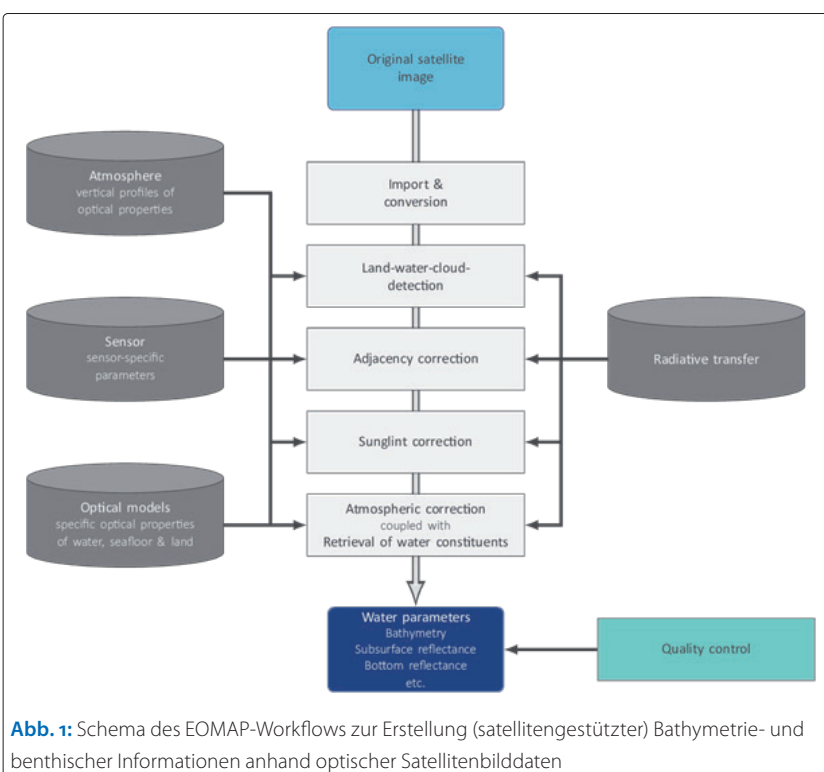


Abb. 1: Schema des EOMAP-Workflows zur Erstellung (satellitengestützter) Bathymetrie- und benthischer Informationen anhand optischer Satellitenbilddaten

trie und des Brechungsindex von Licht an der Wasseroberfläche, um den mit größerer Tiefe zunehmenden horizontalen Unsicherheiten Rechnung zu tragen.

- Korrektur der Wasserstandshöhen anhand vorhergesagter oder gemessener Tideninformationen der nächstgelegenen Station. Wenn keine gemessenen Tidendaten verfügbar sind und nicht bereitgestellt werden können, werden vorhergesagte Tidendaten aus der Admiralty-Total-Tide-Datenbank des britischen Hydrographischen Dienstes verwendet.
- Ein QA/QC-Verfahren, das Unsicherheitsprodukte aus der Fehlerfortpflanzung und manuelle Prüfungen auf verzerrte oder ungültige Pixel kombiniert, wird angewendet. Darüber hinaus werden extreme Ausreißer entfernt und die Daten auf logische Inkonsistenzen überprüft.
- Im Anschluss an den QA/QC-Prozess werden für jedes Pixel vertikale Unsicherheitsinformationen generiert. Diese Daten werden aus einer Sensitivitätsanalyse des SDB-Modells berechnet, wobei Unsicherheiten durch Meeresbodenfarbe, Wellengang und abnehmende Lichtintensität mit der Tiefe berücksichtigt werden.
- Vergleich der SDB-Raster mit allen verfügbaren vorhandenen Vermessungsdaten zur Bestätigung der allgemeinen vertikalen Genauigkeiten.

- Der letzte Schritt umfasst die Erstellung des Lieferpakets, einschließlich der Derivate (Höhenlinien, Objektidentifikation und -beschriftung, FGDC-konforme Metadaten).

Bemerkenswert ist, dass die physikbasierte Methode neben den bathymetrischen Daten auch die Extraktion wertvoller Daten zur Reflexion unterhalb der Wasseroberfläche und des Meeresbodens ermöglicht. Die Reflexion unterhalb der Wasseroberfläche wird um den Einfluss von Atmosphäre, angrenzenden Landmassen und Wasseroberflächeneffekten korrigiert und stellt eine Ansicht des Meeresbodens dar, wie man ihn beim Schnorcheln knapp unter der Wasseroberfläche sehen würde. Sie ermöglicht die detailliertere Identifizierung von Meeresbodenmustern und -objekten als die Strahlungsdaten an der Obergrenze der Atmosphäre. Sie ermöglicht zudem einen normalisierten Vergleich über Standorte und Zeiten hinweg, was bei Strahlungsdaten nicht der Fall ist. Die Reflexion des Meeresbodens wird ebenfalls um den Einfluss von Atmosphäre, angrenzenden Landmassen, Wasseroberflächen- und Wassersäuleneffekten korrigiert und stellt eine Ansicht des trockenen Meeresbodens ohne die darüberliegende Wassersäule dar. Mit anderen Worten: Die Meeresbodenreflexionsdaten werden um die Effekte der darüberliegenden Wassersäule (sowie der Atmosphäre, der Wasseroberfläche, der Beleuchtung und der Betrachtungsgeometrien) normalisiert. Dadurch ermöglicht sie die Identifizierung von Bodenmerkmalen ähnlicher Farbe in verschiedenen Tiefen (eine der zentralen Herausforderungen der satellitengestützten Meeresbodenkartierung). Da die Lichtdurchdringung mit längeren Wellenlängen stark abnimmt, hängt der Umfang der Reflexionsinformationen von den Bändern/Wellenlängen der Satelliten ab. Die blauen und grünen Wellenlängen haben die höchste Eindringtiefe, während Wellenlängen im roten oder nahen Infrarotbereich nur Daten zur Meeresbodenreflexion in sehr flachen Gewässern liefern.

Die räumliche Auflösung der SDB hängt vom verwendeten Satellitenbild ab und reicht von sehr hoch (40 bis 200 cm) bis hoch (10 m). Die Bearbeitungszeiten betragen je nach Projektkomplexität und Standort zwischen wenigen Stunden und einem Tag nach der Satellitenbildaufnahme. Aufgrund der hohen räumlichen Auflösung und der schnellen Verarbeitungszeit kann die SDB ein vielseitiges Instrument zur Unterstützung schneller Sturmfolgenbewertungen sein.

Vergleich der Sturmreaktion zwischen SDB und SBES

Vom 29. bis zum 30. August 2023 traf Hurrikan Idalia Florida als Hurrikan der Kategorie 4 und war damit der drittstärkste Hurrikan in der Big-Bend-



Abb. 2: Coquina Beach, Manatee County, Florida

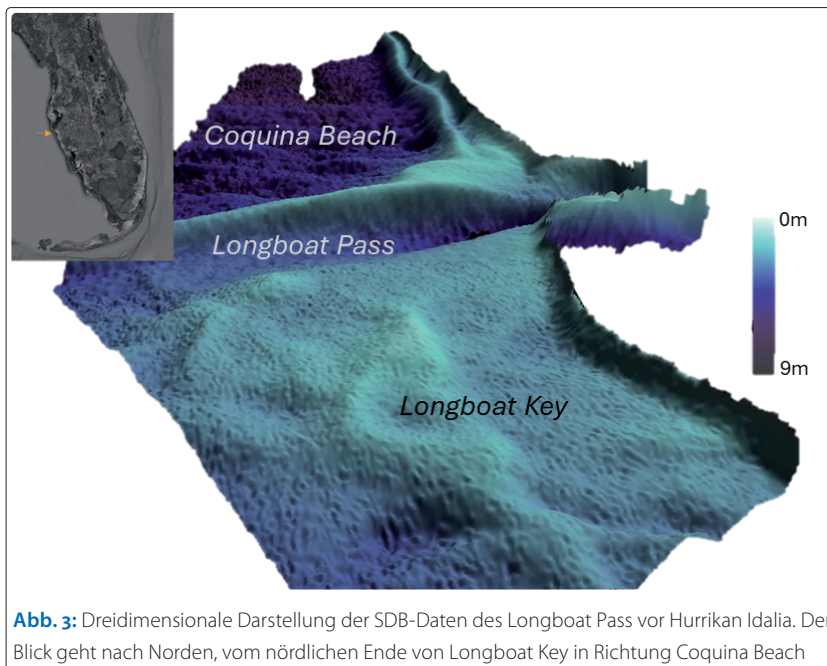
Region Floridas (NOAA 2023). Coquina Beach, ein Strand am südlichen Ende von Anna Maria Island im Manatee County, Florida (Abb. 2), war besonders von einer Kombination aus extremer Brandung und Wellengang betroffen. Die NOAA-Station 42099 (vor der Küste von St. Petersburg, Florida) maß eine signifikante Wellenhöhe von 10,3 m und in Tampa wurde eine Sturmflut von +1,37 m-MLLW aufgezeichnet (NOAA 2024). Diese Sturmbedingungen beschleunigten die Erosion am Coquina Beach, an dem im Jahr 2021 eine Strandaufschüttung von etwa 57300 m³ erfolgte (Manatee County 2024).

Um die Auswirkungen des Hurrikans auf Coquina Beach zu quantifizieren, wurde im Oktober 2023 nach Durchzug des Sturms »post-Idalia« eine traditionelle Strandprofiluntersuchung mit akustischen Messungen mittels Single-Beam-Echolot (SBES) durchgeführt. Diese Untersuchung wurde mit einer im Dezember 2022 vor Hurrikan Idalia durchgeführten Untersuchung verglichen. Diese bathymetrischen SBES-Messungen vor und nach dem Sturm bieten eine praktische Vergleichsbasis mit SDB-basierten Untersuchungen. Zu diesem Zweck wurden SDB-Daten (Abb. 3) aus Satellitenbildern erstellt, die im gleichen Zeitraum wie die Untersuchungen aufgenommen wurden. Die Ergebnisse dieses Vergleichs bieten Einblicke in die potenziellen Anwendungen von SDB in der Bewertung nach Stürmen.

Daten und Methoden

Wie oben erwähnt, wurden im Dezember 2022 (vor Hurrikan Idalia) und im Oktober 2023 (nach Idalia) topografische und bathymetrische Vermessungen des Strandes an jedem veröffentlichten Referenzpunkt des Florida Department of Environmental Protection (FDEP) zwischen T-30 und R-41+305 durchgeführt (vergleiche Abb. 4 bis Abb. 6 für Positionen der Referenzpunkte). Die vertikalen und horizontalen Vermessungsdaten wurden relativ zum North American Vertical Datum 1988 (NAVD88) und dem Florida-West-State-Plane-Koordinatensystem, North American Datum 1983 (NAD83), erhoben.

Die satellitengestützte Bathymetrie (SDB) wurde für dieselben Zeiträume erstellt, basierend auf Daten der Super-Dove-Satelliten von Planet, einer Konstellation multispektraler Sensoren mit acht Spektralbändern von Blau bis Nahinfrarot mit täglichen Überflügen. Die SDB-Daten wurden mit einer räumlichen Auflösung von ca. 3 m im UTM-Koordinatensystem Zone 18N relativ zum mittleren Meeresspiegel (MSL) in Metern bereitgestellt und anschließend in das Florida-West-State-Plane-Koordinatensystem relativ zu NAVD88 in Fuß umgerechnet. Bereiche ohne Sonnenlichtreflexion vom Meeresboden (und somit ohne SDB-Daten) wurden ausgeschlossen.



Volumenänderungen zwischen den Zeitpunkten vor und nach dem Sturm wurden für beide Datentypen entlang von Querprofilen an jeder R-Landmarke vom landseitigen Vermessungslimit bis zur sogenannten »depth of closure« (DOC) berechnet. Die DOC ist die vertikale Grenze des aktiven Strandprofils, unterhalb derer der Quersandtransport im Jahresmittel als vernachlässigbar gilt. Für Coquina Beach wurde die DOC basierend auf früheren Berichten und historischen Daten auf –5,5 m NAVD88 festgelegt. Einschränkungen galten für Daten in tieferen Gewässern sowie für Gebiete mit künstlichen Riffen oder felsigem Untergrund, wo das Sensorsignal für SDB zu schwach war.

Oberflächenkarten wurden erstellt, um die Bodenhöhen vor und nach dem Sturm visuell darzustellen. Beide Datentypen wurden auf die Ausdehnung der hydrographischen Daten von Oktober 2022 abgestimmt. Die Single-Beam-Vermessungsdaten wurden mittels Delaunay-Triangulation interpoliert, um Höhenunterschiede zu berechnen und Differenzkarten zu erzeugen.

Vergleich zwischen SDB-Daten und traditionellen Vermessungen

Vergleich von Oberflächenkarten

Oberflächenkarten wurden für Dezember 2022 und Oktober 2023 sowohl mit hydrographischen Vermessungsdaten als auch mit SDB-Daten erstellt. Zusätzlich wurden Differenzkarten erstellt, die die Veränderungen vor und nach dem Sturm zeigen. Abb. 4 und Abb. 5 zeigen die Tiefenmessungen beider Methoden, während Abb. 6 die Höhenveränderungen zwischen den Zeitpunkten darstellt. Jede Karte zeigt die DOC-Grenze und die Lage der

zuvor kartierten felsigen Böden und künstlichen Riffe.

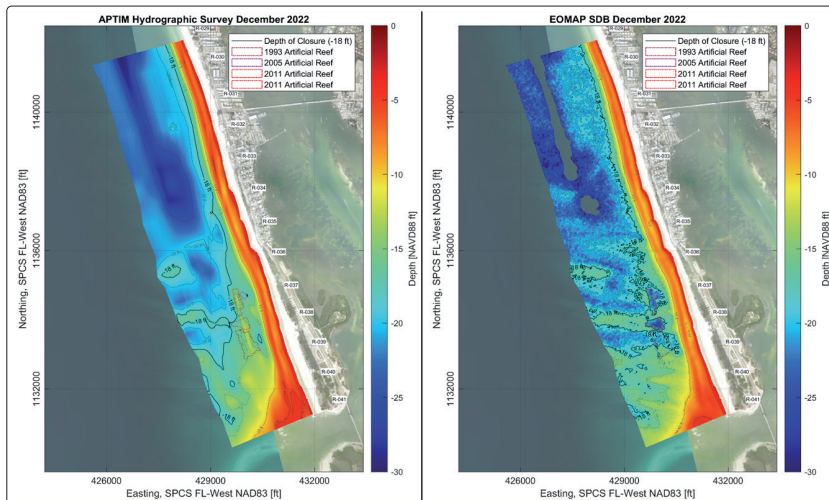


Abb. 4: Hydrographische Vermessung vom Dezember 2022 und SDB-Tiefen zum gleichen Zeitpunkt

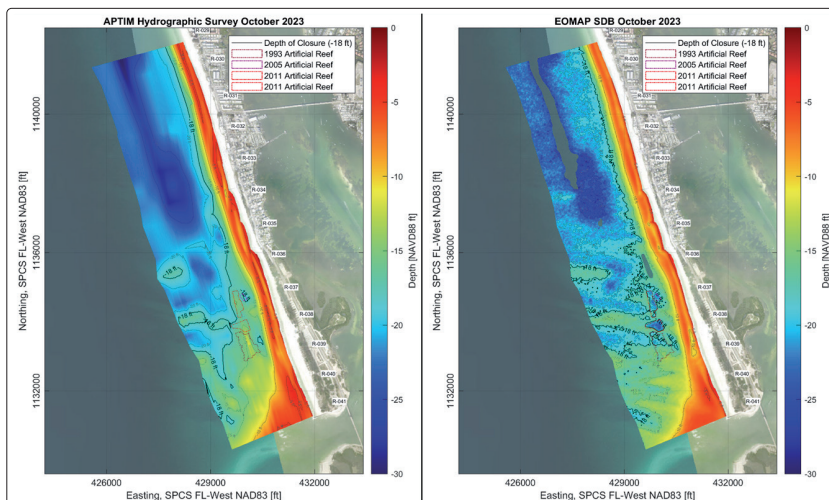


Abb. 5: Hydrographische Vermessung vom Oktober 2023 und SDB-Tiefen zum gleichen Zeitpunkt

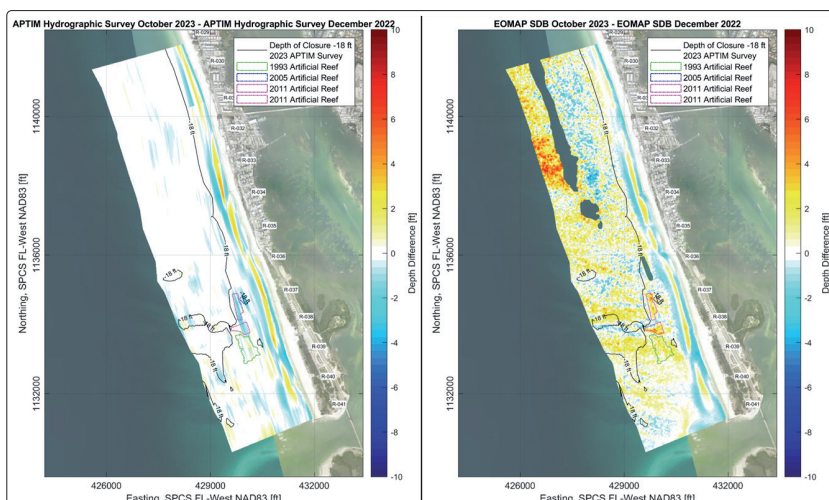


Abb. 6: Höhenunterschied von Dezember 2022 zu Oktober 2023 für die hydrographische Vermessung (links) und SDB-Daten (rechts)

Ein Vorteil der SDB ist die hohe räumliche Auflösung, die eine detaillierte Darstellung der Tiefenveränderungen im gesamten Untersuchungsgebiet ermöglicht. Im Gegensatz dazu liefern hydrographische Vermessungen Datenpunkte in etwa 300 m Abstand. Besonders nahe der Mündung zeigen die SDB-Daten feine morphologische Merkmale, während die Single-Beam-Vermessung eine geglättete Morphologie aufweist. Zwischen den Linien der hydrographischen Vermessung erfasste Merkmale werden durch SDB sichtbar und bieten ein vollständigeres Bild der Morphologie.

Die Differenzkarten zeigen ähnliche Trends bei bathymetrischen Veränderungen in Bereichen oberhalb der DOC, mit Erosions- und Akkumulationsmustern an der küstennahen Sandbank. Unterhalb der DOC zeigen die Datensätze größere Unterschiede. Die Konfidenzzone (CATZOC) der SDB (quantifiziert als »vertikale Unsicherheit« pro Pixel) nimmt mit zunehmender Wassertiefe und abnehmender Klarheit zu.

Auffällig sind Unterschiede bei den künstlichen Riffen (zwischen R-36 und R-39), wo SDB größere Tiefen als die hydrographische Vermessung angibt. Dunkle Hartbodenstrukturen erscheinen in Satellitenbildern wie Vertiefungen, ähnlich wie ausgebagerte Bereiche, was in Abb. 6 sichtbar ist. Dies weist auf eine physikalische Einschränkung der SDB-Methoden hin, die darauf angewiesen sind, dass Sonnenlicht vom Meeresboden reflektiert wird – extrem dunkle Oberflächen behindern diese Reflexion. Um Unsicherheiten in diesen kritischen Bereichen zu vermeiden, können die betreffenden Standorte vor der SDB-Verarbeitung identifiziert werden. Dies kann entweder durch manuelle Erkennung bekannter Riffgebiete oder durch eine separate satellitengestützte Klassifizierung des Meeresbodens (Seafloor Classification, SFC) erfolgen. Die so erkannten Bereiche würden dann entweder im Modell angepasst oder mit einer festgelegten, bekannten Tiefe maskiert, um die vertikale Unsicherheit zu verringern.

Angesichts dieser Einschränkungen wurden Bereiche mit küstennahen Hartböden und künstlichen Riffen von den Volumenberechnungen in den folgenden Abschnitten dieser Arbeit ausgeschlossen.

Vergleich von Strandprofil-Diagrammen aus SDB und Vermessungen

Für einen direkten Vergleich zwischen den gemessenen SBES-Daten und den verarbeiteten SDB-Daten wurden die SDB-Daten an denselben Standorten extrahiert, an denen die topobathymetrischen Vermessungen bei den Landmarken T-30 bis R-41+305 durchgeführt wurden. Die Vergleiche erfolgten für die Zeitpunkte Dezember 2022 und Oktober 2023. Abb. 7 zeigt ein Beispielsdiagramm eines Vergleichsdiagramms.

Beim Vergleich einzelner Profilverläufe zeigt sich, dass die SDB-Daten die Gesamtform des Strandprofils mit wenigen Ausnahmen präzise erfassen. Im Durchschnitt beträgt die Abweichung zwischen der hydrographischen Vermessung und den SDB-Messungen etwa 30 cm. In flacheren Bereichen ist die Standardabweichung tendenziell geringer, während in tieferen Bereichen – insbesondere unterhalb von -4 m – größere Unterschiede zwischen den beiden Datensätzen auftreten.

Statistischer Vergleich zwischen SDB- und Vermessungsdaten

Die SDB-Ergebnisse wurden statistisch mit den Vermessungsdaten validiert, wobei die Messungen vom Oktober 2023 und Dezember 2022 getrennt analysiert wurden (siehe Abb. 8). Für beide Zeitpunkte zeigen die Statistiken die vertikale Genauigkeit gemäß CATZOC (Category Zone of Vertical Confidence), einem gängigen Maß zur Angabe von Unsicherheiten in Seekarten (IHO 2024). Für diese Validierung wurde die Kategorie CAT A2 erreicht, was bedeutet, dass über 95 % der Daten eine absolute Unsicherheit von 1 m und eine relative Unsicherheit von 2 % aufweisen. Es wird jedoch angemerkt, dass auch die höchste Kategorie CAT A1 (mit 50 cm absoluter und 1 % relativer Unsicherheit) fast erreicht wurde.

Diese Statistiken basieren auf allen Vermessungsprofilen, wobei – wie in den vorherigen Abschnitten gezeigt – die vertikale Genauigkeit je nach lokalen Bedingungen variieren kann.

Wichtig ist, dass die SDB-Daten ohne Zugriff auf die Single-Beam-Vermessungsdaten erstellt wurden. Daher dient die Single-Beam-Vermessung hier ausschließlich als Vergleichsgrundlage und nicht als Trainingsdatensatz. Dies ist relevant, da die Studie untersuchen sollte, wie genau SDB den Meeresboden erfassen kann, ohne auf aktuelle Vermessungsdaten zurückzugreifen – mit dem Ziel, zukünftige Veränderungen des Meeresbodens allein durch SDB zu erkennen.

Ergebnisse der Volumenänderung

Die Volumenänderungen wurden zwischen den einzelnen Vermessungspunkten von T-30 bis R-41+305 im Zeitraum von Dezember 2022 bis Oktober 2023 berechnet. Basierend auf den SDB-Daten wurde ein Volumenverlust von 54000 m^3 im Untersuchungsgebiet ermittelt, was einer Materialdichte von etwa $245 \text{ m}^3/\text{m}$ Küstenlinie entspricht. Im Vergleich dazu ergaben die hydrographischen Vermessungsdaten einen Volumenverlust von rund 59400 m^3 , entsprechend einer Dichte von $268 \text{ m}^3/\text{m}$ Küstenlinie.

Die Differenz zwischen den beiden Datensätzen beträgt somit 5000 m^3 , was einer Abweichung von $23 \text{ m}^3/\text{m}$ Küstenlinie entspricht.

Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass bei ei-

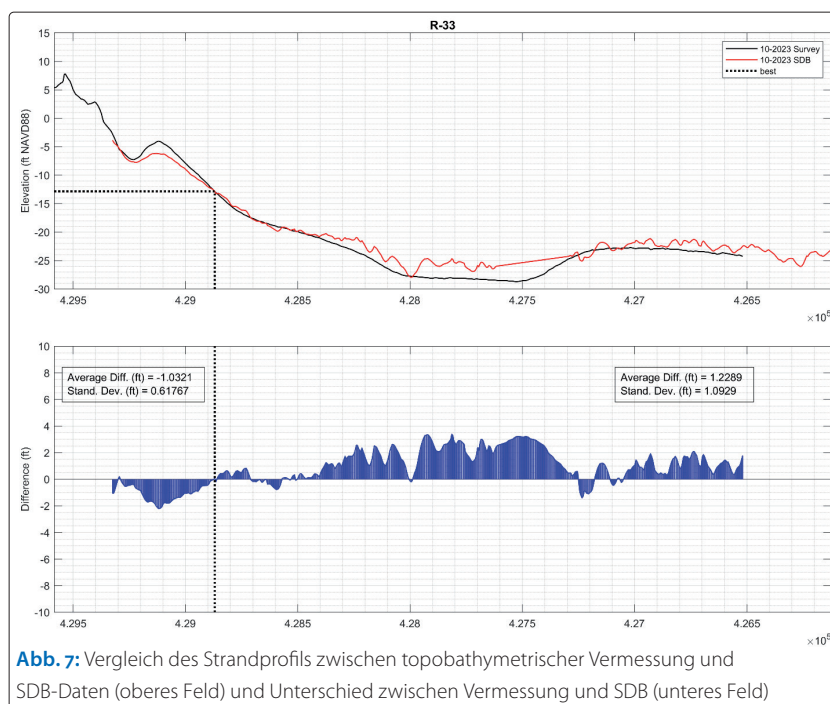


Abb. 7: Vergleich des Strandprofils zwischen topobathymetrischer Vermessung und SDB-Daten (oberes Feld) und Unterschied zwischen Vermessung und SDB (unteres Feld)

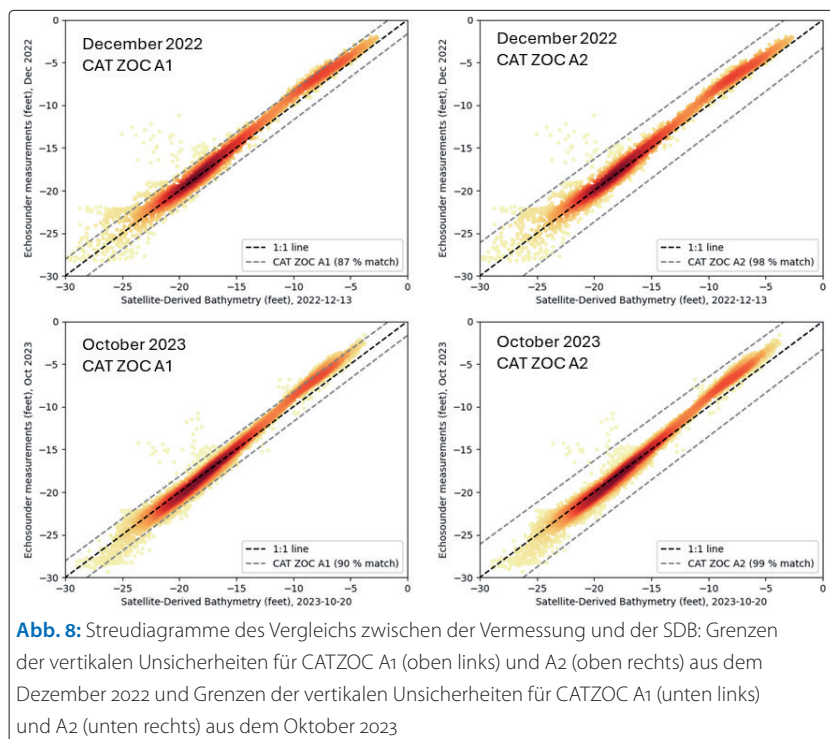


Abb. 8: Streudiagramme des Vergleichs zwischen der Vermessung und der SDB: Grenzen der vertikalen Unsicherheiten für CATZOC A1 (oben links) und A2 (oben rechts) aus dem Dezember 2022 und Grenzen der vertikalen Unsicherheiten für CATZOC A1 (unten links) und A2 (unten rechts) aus dem Oktober 2023

nem Vergleich der Volumenänderungen profilweise teils deutliche Unterschiede zwischen einzelnen Profilen festgestellt wurden, während andere Profile nur geringe Abweichungen zeigten (siehe Tabelle 1).

Vergleich von Zeit und Kosten zwischen SDB und SBES

Die Hauptvorteile der satellitengestützten Bathymetrie (SDB) gegenüber der schiffsbasierten Single-Beam-Vermessung (SBES) liegen in der Effizienz: SDB kann nach einem Sturmereignis schnell

Profile	Distanz	SDB		Hydrographische Vermessungen		Differenz	
		Dichte	Volumen	Dichte	Volumen	Dichte	Volumen
T-30	1126 ft	-2,3 cy/ft	-1900 cy	-5,0 cy/ft	-2000 cy	2,7 cy/ft	100 cy
R-31	900 ft	-1,1 cy/ft	-4500 cy	1,4 cy/ft	-900 cy	2,5 cy/ft	3600 cy
R-32	966 ft	-8,9 cy/ft	-10400 cy	-3,3 cy/ft	-1900 cy	5,6 cy/ft	8500 cy
R-33	952 ft	-12,5 cy/ft	-15200 cy	-0,5 cy/ft	-8600 cy	12,0 cy/ft	6600 cy
R-34	1019 ft	-19,5 cy/ft	-7600 cy	-17,5 cy/ft	-8300 cy	2,0 cy/ft	700 cy
R-35	922 ft	4,6 cy/ft	700 cy	1,2 cy/ft	-900 cy	3,4 cy/ft	1600 cy
R-36	521 ft	-3,2 cy/ft	-4200 cy	-3,1 cy/ft	-2000 cy	0,1 cy/ft	2200 cy
R-36.5	506 ft	-12,9 cy/ft	-4000 cy	-4,6 cy/ft	-2700 cy	8,3 cy/ft	1300 cy
R-37	440 ft	-2,8 cy/ft	-2800 cy	-6,1 cy/ft	-3300 cy	3,3 cy/ft	500 cy
R-37.5	440 ft	-9,9 cy/ft	-1900 cy	-8,7 cy/ft	-4200 cy	1,2 cy/ft	2300 cy
R-38	464 ft	1,4 cy/ft	-2100 cy	-10,5 cy/ft	-4000 cy	11,9 cy/ft	1900 cy
R-38.5	465 ft	-10,4 cy/ft	-3400 cy	-6,7 cy/ft	-7800 cy	3,7 cy/ft	4400 cy
R-39	453 ft	-4,3 cy/ft	400 cy	-27,0 cy/ft	-6800 cy	22,7 cy/ft	7200 cy
R-39.5	453 ft	6,2 cy/ft	3700 cy	-3,1 cy/ft	-6000 cy	9,3 cy/ft	9700 cy
R-40	429 ft	10,3 cy/ft	-800 cy	-23,3 cy/ft	-7200 cy	33,6 cy/ft	6400 cy
R-40.5	425 ft	-14,1 cy/ft	-8000 cy	-10,3 cy/ft	-7100 cy	3,8 cy/ft	900 cy
R-41	291 ft	-23,5 cy/ft	-9200 cy	-23,0 cy/ft	-4000 cy	0,5 cy/ft	5200 cy
R-41+305		-39,9 cy/ft		-4,4 cy/ft		35,4 cy/ft	
Study Area	10774 ft	-6,6 cy/ft	-71200 cy	-7,2 cy/ft	-77700 cy	0,6 cy/ft	6500 cy

Tabelle 1: Volumenänderungen zwischen Untersuchungen vor und nach dem Sturm unter Verwendung jedes Datensatzes auf Profilbasis

und kostengünstig genaue Daten liefern. Ein wertbares Satellitenbild für die SDB-Verarbeitung ist unmittelbar nach dem Durchzug des Sturms möglich – vorausgesetzt, die Wolkenbedeckung und die Wassertrübung normalisieren sich. Planets multispektrale SuperDove-Satelliten können Daten mehrmals täglich erfassen.

Da die physikbasierten SDB-Daten aus der Ferne verarbeitet werden und keine Vor-Ort-Daten erforderlich sind, muss kein Vermessungsteam oder Schiff entsendet werden. Dies spart Zeit und vermeidet Risiken, die mit manuellen Vermessungen verbunden sind. Die Verarbeitung der SDB-Daten

erfolgt wenige Stunden nach Erhalt des Bildmaterials – deutlich schneller als eine traditionelle schiffsgestützte Vermessung. Diese Faktoren führen zu erheblichen Kosteneinsparungen. Obwohl keine genauen Kosten für die SBES-Vermessungen vorliegen, ist davon auszugehen, dass SDB etwa zehnmal günstiger ist als herkömmliche SBES-Messungen.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Diese Analyse vergleicht hydrographische Vermessungen vor und nach Hurrikan Idalia mit SDB-Daten. Die wichtigsten Erkenntnisse sind:

- SDB liefert hochauflösende räumliche Veränderungen und ermöglicht eine präzise Darstellung morphologischer Veränderungen im gesamten Untersuchungsgebiet. Besonders in der Nähe von Mündungen zeigt SDB feine Strukturen, die mit SSB nicht erfasst werden.
- Die Gesamtform des Strandprofils wird durch SDB zuverlässig erfasst, insbesondere in Bereichen oberhalb der »depth of closure« (DOC), die als Grenze für Volumenberechnungen nach Sturmereignissen dient.
- Die durchschnittliche Abweichung zwischen SDB und SBES beträgt etwa 30 cm, wobei die Genauigkeit in flachen Gewässern höher ist als in tieferen Bereichen.
- An künstlichen Riffen zeigen sich deutliche Unterschiede: SDB weist größere Tiefen auf als SBES, was auf methodische Einschränkungen bei der SDB-Datenanalyse zurückzuführen ist. Diese können vermieden werden, wenn Riffstandorte vorab identifiziert werden.
- Die SDB-Daten erfüllen die Anforderungen der Genauigkeitskategorie CATZOC A2 und nähern sich sogar der höchsten Kategorie CATZOC A1 – und das ohne Einsatz von Trainingsdaten vor Ort. Weitere Verbesserungen sind durch nachträgliche Kalibrierung mit wenigen Vermessungsprofilen möglich.
- Vertikale Unsicherheiten nehmen zu bei geringer Lichtreflexion des Meeresbodens, etwa durch große Wassertiefe oder dunkle Sedimente. In solchen Fällen kann eine Maskierung der Daten zur Sicherstellung einer Mindestgenauigkeit erfolgen.
- Beide Datensätze zeigen ähnliche Volumenverluste im Untersuchungsgebiet:
 - SBES: ca. 59400 m³,
 - SDB: ca. 54400 m³.
 Diese Unterschiede sind auf lokale Morphologie und das Vorhandensein von dunklem, felsigem Seegrund zurückzuführen.

In Anbetracht der durchgeführten Analyse haben die SDB-Daten das Potenzial, ein wertvolles Instrument für die schnelle Katastrophenbewertung künstlich angelegter Strände nach Stürmen zu

sein. Im Vergleich zu herkömmlichen Methoden bietet SDB Vorteile hinsichtlich Zugänglichkeit und Kosteneffizienz sowie die einzigartige Möglichkeit, vor dem Sturmereignis eine bathymetrische Basisoberfläche zu erstellen und anschließend eine schnelle Bewertung nach dem Sturm durchzuführen. Daher ist es ein wertvolles Instrument für schnelle Entscheidungen nach einem Sturm, insbesondere für die Erstellung erster Schätzungen der Volumenverluste für Katastrophenerklärungen durch staatliche und bundesstaatliche Behörden. Bestimmte Einschränkungen der Methode müssen jedoch im Einzelfall berücksichtigt werden, abhängig von den geomorphologischen Merkmalen des Gebiets, für das die Daten bereitgestellt werden.

Zukünftige Trends bei multispektralen Satellitenbildern für Küstenanwendungen

Der Bedarf an sehr hochauflösenden Bildern sowohl für archivierte (historische) Daten als auch für Nachsturmereignisse, die für diese Analyse erforderlich sind, stellt für die Anbieter multispektraler Satellitenbilder eine Herausforderung dar. Für

die benötigten hochauflösenden Daten verfügen derzeit nur die SuperDoves von Planet über eine kontinuierliche tägliche Aufzeichnung der Erde in einer räumlichen Auflösung von unter 4,5 Metern. Im Gegensatz zu anderen Anbietern kommerzieller Satellitendaten (oder luftgestützter Dienste), die auf Abruf arbeiten, sammelt Planet systematisch Bilder ohne spezifisches Tasking, was ein erheblicher Vorteil für die Analyse der Auswirkungen von Stürmen auf Strände vor und nach dem Ereignis ist.

In letzter Zeit gab es einen deutlichen Anstieg der Kapazitäten neuer Satelliten aus verschiedenen Quellen. Die ersten Satelliten der Maxar-Legion-Konstellation wurden kürzlich gestartet und werden in der Lage sein, ähnlich anspruchsvolle Anwendungen mit höherer räumlicher Auflösung zu unterstützen. Auch andere Anbieter wie Airbus tragen zur Bereitstellung von hochauflösenden Bildern bei, um eine kontinuierliche Beobachtung der Hurrikan-bedrohten Gebiete innerhalb der kontinentalen USA zu ermöglichen. Mit der Inbetriebnahme technologisch fortschrittlicherer Satellitensensoren wird die Fähigkeit zur Erstellung hochauflösender SDB in Qualität, Genauigkeit und Häufigkeit zunehmen. //

Literatur

- Bulgarelli, Barbara; Viatcheslav B. Kisselev; Laura Roberti (1999): Radiative transfer in the atmosphere-ocean system: The finite-element method. *Applied Optics*, DOI: 10.1364/AO.38.001530
- Heege, Thomas; Viatcheslav Kiselev; Magnus Wettle; Nguyen Nghia Hung (2014): Operational multi-sensor monitoring of turbidity for the entire Mekong Delta. *International Journal of Remote Sensing*, DOI: 10.1080/01431161.2014.890300
- IHO (2024): Guidance to Satellite-derived Bathymetry (1st ed.). IHO Publication B-13, International Hydrographic Organization, Monaco. https://iho.int/uploads/user/pubs/bathy/B_13_Ed100_032024.pdf
- Kisselev, Viatcheslav; Barbara Bulgarelli (2004): Reflection of light from a rough water surface in numerical methods for solving the radiative transfer equation. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, DOI: 10.1016/S0022-4073(03)00236-X
- Kisselev, Viatcheslav; Laura Roberti; Giovanni Perona (1995): Finite-element algorithm for radiative transfer in vertically inhomogeneous media: Numerical scheme and applications. *Applied Optics*, DOI: 10.1364/AO.34.008460
- Lyzena, David R.; Norman P. Malinas; Fred J. Tanis (2006): Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, DOI: 10.1109/TGRS.2006.872909
- Manatee County (2024): Beach nourishment updates. www.myanatee.org/departments/sports_and_leisure_services/parks__preserves____beaches/beach_renourishment_update
- NOAA (2023): National Hurricane Center Tropical Cyclone Report: Hurricane Idalia (AL102023). www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL102023_Idalia.pdf
- NOAA (2024): National Data Buoy Center, Station 42099 – Offshore St. Petersburg, FL (144). www.ndbc.noaa.gov/station_page.php?station=42099
- Stumpf, Richard P.; Kristine Holderied; Mark Sinclair (2003): Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, DOI: 10.4319/lo.2003.48.1_part_2.0547