

Was macht die Welle an der Küste?

BESSERER KÜSTENSCHUTZ IST MÖGLICH:
MIT DIGITALEN OBERFLÄCHENMODELLEN UND GIS

Eine Küste ist eine Landschaft
im ständigen Wandel.
Auf- und Abtrag verändern
ihr Gesicht beinahe täglich.
Für die Küstenbewohner ist der
Schutz der Küste lebenswichtig.
Über die Jahrhunderte
haben sie eine ganze Reihe
von Maßnahmen entwickelt,
um ihren Lebensraum
zu schützen.
Diese könnten verbessert
werden, wenn die Veränderun-
gen an der Küste besser pro-
gnostiziert werden könnten.



Wind und Wellen bilden im Zusammenspiel eine unberechenbare Gewalt. Für die Küstenbewohner ist es daher zur Aufgabe geworden, ihren Lebensraum auf der Insel oder an der Küste vor den Naturgewalten zu schützen. Ständig den Elementargewalten ausgesetzt, kommt es an vielen Küstenabschnitten zu einem natürlichen Abtrag. Um diesen Prozess zumindest zu begrenzen, hat der Mensch eine Reihe von Maßnahmen wie Buhnen, Wellenbrecher und Deiche entwickelt. Der Neubau von Systemen aus Deck-

werken und Buhnen weicht dabei zunehmend einer Kombination aus Strandaufspülungen und ingenieurbio-logischen Maßnahmen, wie zum Beispiel dem Dünenbau. Aus diesem Grund rückt die Optimierung der Auffüllungen verstärkt in den Mittelpunkt des Interesses (Abbildung 1).

Durch gezieltes Einbringen möglichst kleiner Massen an speziell ausgewählten Positionen soll die Beständigkeit der Aufspülungen erhöht und damit die Zahl notwendiger und sehr kostenintensiver Wiederholungen reduziert werden.

Zur näheren Bestimmung des Massenauftrags und -abtrags sowie zur Optimierung der Bauweise von Deckwerken und Buhnen werden häufig numerische Modelle eingesetzt. Die Entwicklung dieser Modelle hat in den letzten Jahren, wie die gesamte Computertechnologie, eine rasante Entwicklung erfahren. Somit ist es heute möglich, räumlich und zeitlich hochaufgelöste Daten zu berechnen.

Im Gegensatz dazu hat sich die Messtechnik, die unerlässlich für die Kalibrierung und Validierung der numerischen Modelle ist, sehr langsam entwickelt und ist nach wie vor fast ausschließlich auf punktuelle Messungen mit Pegeln und Bojen beschränkt.

Ausnahmen sind jüngere Technologien, wie die Particle Image Velocimetry (PIV), die zeitlich und räumlich hochaufgelöste Messungen erlaubt, jedoch auf relativ kleine Untersuchungsgebiete beschränkt ist, oder die Auswertung von Radarbildern, die zwar große Gebiete erfassen, aber eine geringe räumliche Auflösung haben.

Durch den Einsatz photogrammetrischer Methoden kann der Seegang flächendeckend und zeitlich hochauflösend, entsprechend der Auflösung des numerischen Modells bestimmt werden.

Für jeden Zeitpunkt kann ein Digitales Oberflächenmodell (DOM) der Brandungszone generiert werden. Das DOM kann sowohl für die Kalibrierung und Validierung numerischer Modelle eingesetzt, als auch in Geografischen Informationssystemen (GIS) integriert werden.

Durch die Kombination von DOM und anderen Daten, zum Beispiel Ergebnisse numerischer Simulationen von Extremereignissen, kann der Ist-Zustand eines Gebiets exakt ermittelt und die für den Küstenschutz zu erwartenden relevanten Veränderungen mit Hilfe eines GIS prognostiziert werden.

Bestimmung der Wasseroberfläche

Zur dreidimensionalen photogrammetrischen Objektbestimmung werden mindestens zwei sich überlappende Bilder des auszuwertenden Gebiets von unterschiedlichen Standpunkten benötigt.

Durch die Zuordnung identischer Punkte des linken und rechten Bildes, dem so genannten Stereobildpaar, entsteht ein räumliches Modell. Dabei wird in beiden Bildern eines Stereopaars ein identischer Punkt ermittelt und der zugehörige Strahlengang zum Zeitpunkt der Aufnahme rekonstruiert.

Die erreichbare Genauigkeit des resultierenden DOM wird beeinflusst durch die geometrische Messanordnung, wie zum Beispiel die Objektgröße, die Anzahl der Bilder, die Aufnahme standpunkte sowie die Messgenauigkeit für die Bestimmung identischer Punkte in den Bildern.

Zur automatischen Bildzuordnung sind manuell gemessene Startpunkte, von denen sich der Zuordnungs-Algorithmus flächenhaft ausbreitet, erforderlich.

Das Problem der Zuordnung kann unter anderem durch die automatische Bestimmung identischer Messpunkte aus den Grauwerten von mindestens zwei digitalen Bildern gelöst werden (SCHENK, 1999).

Für eine lückenlose Bestimmung identischer Bildpunkte ist daher ein ausreichender Grauwertkontrast notwendig.

Die Auswertung von Bildsequenzen erlaubt die Bestimmung bewegter Oberflächen. Die Grundidee der Sequenzauswertung von Wasseroberflächen liegt darin, dass die Änderung der Wasserspiegellänge in aufeinander folgenden Bildern im Bereich der nicht brechenden Welle sehr gering ist.

Für das erste Stereobildpaar müssen Startpunkte gegeben sein. Hier können die bereits für die Bildzuordnung gemessenen Punkte genutzt werden.

Unter Hinzunahme dieser Punkte ist es möglich, den Bildzuordnungs-Algorithmus für die Auswertung der Sequenz zu starten.

Die entwickelte Methode ist in der Lage, die benötigten Startpunkte der folgenden Stereobildpaare eigenständig zu finden (SANTEL & LINDER, 2003).

Das Ergebnis ist ein dreidimensionales DOM für jeden Zeitpunkt der Sequenz.

Numerische Simulation

Die Grundlage nahezu jeder numerischen Simulation in der Strömungsmechanik bilden Differentialgleichungen, die die physikalischen Prinzipien der Massen-, Impuls- und in einigen Fällen auch der Energieerhaltung exakt beschreiben. Da eine analytische Lösung dieser Gleichungen nur in Ausnahmefällen und unter Annahme großer Vereinfachungen möglich ist, werden sie diskretisiert, das heißt die Lösung des Gesamtproblems wird auf die Berechnung an festgelegten Stützstellen beschränkt.

Das durch die Diskretisierung entstehende System analytischer Gleichungen kann numerisch gelöst werden.

Um die Anzahl der Stützstellen und somit den Berechnungsaufwand möglichst gering zu halten, wird das eigentlich dreidimensionale Problem und die zu Grunde liegenden Differentialgleichungen häufig durch vereinfachende Annahmen auf zwei oder sogar nur eine Dimension reduziert.

Dabei wird in Kauf genommen, dass die Allgemeingültigkeit des ursprünglichen Systems verloren geht und die vereinfachten Differentialgleichungen nur noch bestimmte Probleme richtig beschreiben.

Im konkreten Fall der Brandungszone finden die so genannten Boussinesq-Gleichungen Anwendung. Sie eignen sich am besten zur zeitlich aufgelösten, flächenhaften Beschreibung des Fortschritts von Schwerewellen in relativ flachem Wasser, zum Beispiel an der Küste oder in Hafenbecken.

Wissenschaftler des Instituts für Photogrammetrie und Geoinformation und des Instituts für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen haben mit Digitalen Oberflächenmodellen (DOM) und GIS einen Weg gefunden, die zu erwartenden Veränderungen besser vorauszusagen.

Abbildung 1
Strandaufspülung Norderney
1984
Quelle: NLWK – Norden

Dabei wird ein reibungs-
freies Fluid vorausgesetzt und
die Differentialgleichungen
werden durch eine Taylor-
reihenentwicklung von drei
auf zwei Raumdimensionen
beschränkt. Der Gültigkeits-
bereich ist abhängig vom Grad
der Reihenentwicklung und
wird über das Verhältnis von
Wassertiefe zu Wellenlänge
definiert. Durch die Zweidi-
mensionalität der Gleichungen
und die Annahme eines Fluids
ohne innere Reibung sind die
Prozesse der Brandungszone
nicht direkt mit den Boussine-
sq-Gleichungen beschreibbar
und müssen durch semi-empiri-
sche Ansätze formuliert wer-
den. Die freien Parameter dies-
er Ansätze müssen schließlich
durch den Vergleich mit ge-
messenen Daten kalibriert und
validiert werden.

Das am Institut für Strö-
mungsmechanik entwickelte
Programm BOWAM2 löst er-
weiterte Boussinesq-Gleichun-
gen bis zu einem Verhältnis
von Wassertiefe zu Wellenlän-
ge von 1,5 (SCHRÖTER ET AL.,
1994).

Die Diskretisierung erfolgt
auf Basis eines Finite-Differen-
zen Ansatzes mit möglichst
gleichmäßig verteilten Stütz-
stellen auf einem rechteckigen
Gitter. Der durch das
Brechen der Wellen verursachte
Energie- und damit Wellen-
höhenverlust wird durch den
Ansatz einer künstlichen inne-
ren Reibung realisiert.

Temporär nasse und trocke-
ne Bereiche beim Auflaufen
der Wellen am Strand oder
einer Buhne werden durch
Ansatz eines ständig vorhan-
denen dünnen Wasserfilms an
den betreffenden Knoten des
Berechnungsgitters simuliert
(STRYBNY & ZIELKE, 2000).

Messkampagne

Die Erhebung der notwendi-
gen Daten für die photogram-
metrische Auswertung und
die numerische Modellierung
erfolgte im Rahmen zweier
Messkampagnen im August
2002 und im Mai 2003.

Das Untersuchungsgebiet ist
ein Bühnenfeld vor Norderney
mit einer Größe von ca. 200 x
200 Quadratmeter.

Die photogrammetrischen
Aufnahmen wurden von
Dächern zweier Hochhäuser
in unmittelbarer Nähe des
Bühnenfeldes durchgeführt
(siehe weiße Punkte in Abbil-
dung 2).

den müssen, wird die Aus-
lösung der Kameras über
einen externen Trigger syn-
chronisiert.

Während der Messkampa-
gnen wurden unterschiedliche
Wasserstände mit einer Fre-
quenz von 8 Hertz bei einer
Aufnahmedauer von bis zu
20 Minuten aufgenommen.

Für die numerische Simula-
tion wurden zusätzlich die
Strand- und Unterwassertopo-
grafie vermessen.

Ferner waren Bojen, Ge-
schwindigkeits-Druck-Sonden
und Wellenmessdrähte im
Bühnenfeld installiert, deren
Daten als weitere Referenz für
die geplanten Auswertungen
genutzt werden können.

Abbildung 2
Untersuchungsgebiet Norderney
und Kamerastandpunkte (weiße
Punkte)

Quelle: NLWK – Norden

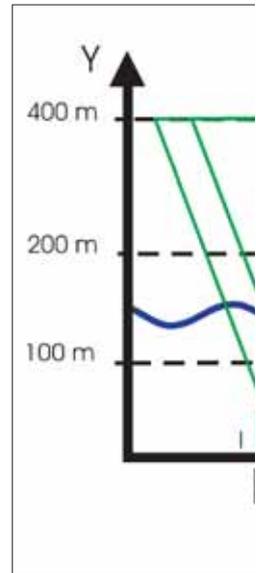


Abbildung 3
Aufnahmekonfiguration

Auf jedem Gebäude wur-
den zwei Kameras aufgestellt,
so dass sich aus der gewählten
Aufnahmekonfiguration zwei
überlappende Stereomodelle
ergeben (siehe Abbildung 3).

Zur photogrammetrischen
Datenerfassung wurden vier
digitale Videokameras Ikega-
mi SKC-131 mit einem 2/3
inch CCD eingesetzt. Der CCD-
Sensor hat eine Auflösung von
6.7 x 6.7 (µm² pro Pixel). Die
Sensorgröße beträgt 1296 x
1031 Pixel und die maximale
Bildfrequenz 12 Hertz.

Da die Bilder für eine Ste-
reoauswertung zum gleichen
Zeitpunkt aufgenommen wer-

Ergebnisse

Die Auswertung einer Bildse-
quenz von 30 Sekunden, auf-
genommen während der Mes-
skampagne 2002 mit einer
Frequenz von 8 Hertz, konnte
erfolgreich durchgeführt wer-
den. Abbildung 4 zeigt im lin-
ken Teil exemplarische Aus-
schnitte aus drei generierten
Wasseroberflächen der Bildse-
quenz mit einem zeitlichen
Abstand von 1 Sekunde. Die
Position der Wellenfronten
kann in den Oberflächenmo-
dellen gut erkannt und ver-
folgt werden. Die zusätzlich
erzeugten Orthophotos wur-
den den generierten Ober-

flächenmodellen überlagert (siehe rechte Hälfte der Abbildung 4). Durch die Überlagerung der Orthophotos können die Ergebnisse der Bildzuordnung visuell überprüft werden. Verdeutlicht wird dies durch die identische Position der Welle in beiden Darstellungen. Die Auswertung des gesamten Bühnenfelds geschieht durch die Kombination der zwei sich überlappenden Stereomodelle.

Bis jetzt ist nur die visuelle Bewertung der Bildzuordnung möglich. In Zukunft werden die Ergebnisse durch manuelle Stereoauswertungen überprüft und mit den Messungen der

Hier wurden die nahezu zeitgleich zur photogrammetrischen Erfassung der Wasseroberfläche aufgemessenen Topografiedaten verwendet, so dass der numerischen Simulation die Bedingungen zum Zeitpunkt der jeweiligen Messkampagne zu Grunde liegen.

Das Ergebnis eines Zeitpunkts ist in Abbildung 5 dargestellt.

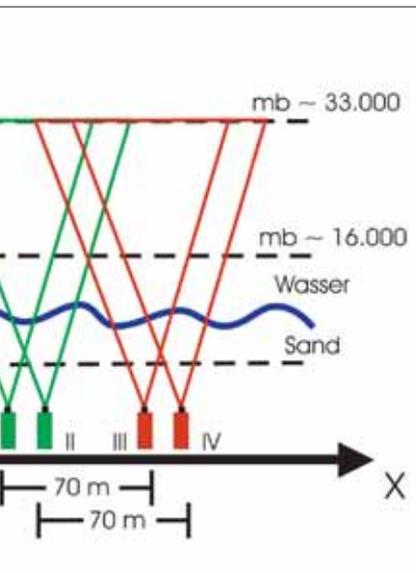
Es ist gut zu erkennen, wie die leicht schräg einlaufenden Wellen durch Topografie und Bühnen bedingten Veränderungen in Form und Bewegungsrichtung unterliegen.

Die weißen Bereiche an einigen Wellenkronen kennzeichnen brechende Wellen.

Die am seeseitigen Rand eingesteuerten Wellen wurden auf Basis der Bojenmessungen generiert und erlauben daher keine exakte Reproduktion des Seegangs im Bühnenfeld.

In Zukunft werden die Randbedingungen aus den photogrammetrisch ermittelten Daten gewonnen, die an jedem Punkt des Gebietsrands eine Information über die einlaufende Welle liefern.

Somit ist ein direkter Vergleich der simulierten und gemessenen Wellen möglich und die freien Parameter in den Wellenbrech- und Wellenauflaufstrategien können optimal angepasst werden.



Bojen, Geschwindigkeits-Druck-Sonden und Wellenmessdrähte verglichen.

Die numerische Simulation der Brandungszone im Bühnenfeld erfolgte mit dem oben beschriebenen Boussinesq-Modell BOWAM2.

Da die Veränderung der Wellen maßgeblich von der Topografie beeinflusst wird, ist deren möglichst exakte Reproduktion im numerischen Modell von großer Wichtigkeit.

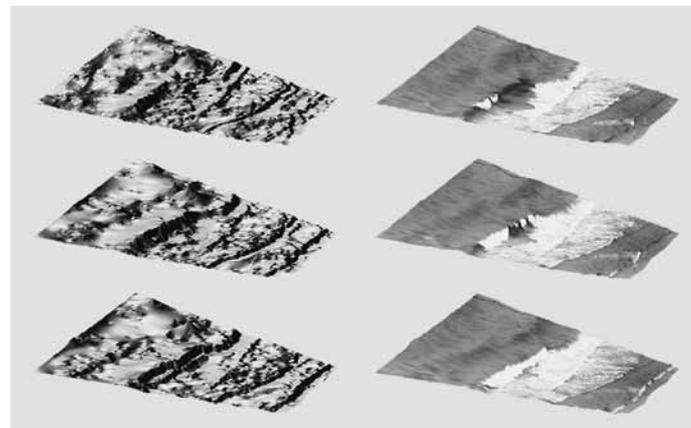


Abbildung 4
Sequenz von Wasserflächen mit $\Delta t = 1$ s
links: Oberflächenmodelle,
rechts: mit überlagerten Orthophotos

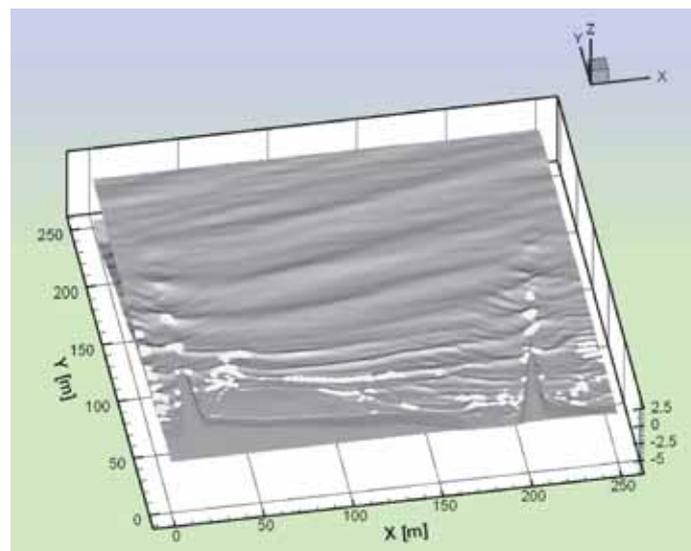


Abbildung 5
Ergebnis einer BOWAM2 Berechnung



Dipl.-Ing. Folke Santel

Jahrgang 1975, ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Photogrammetrie und Geoinformation.



Dipl.-Ing. Stefan Schimmels

Jahrgang 1974, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen.

Ausblick

Die vorgestellten Verfahren zur Bestimmung der Wasseroberfläche werden weiterentwickelt und das daraus resultierende DOM durch Vergleichsmessungen verifiziert. Das numerische Modell wird mit den photogrammetrischen Daten am Gebietsrand angesteuert, so dass die Ergebnisse innerhalb des Gebiets exakt mit den Ergebnissen der Photogrammetrie verglichen werden können. Dies wird zur Optimierung der implementierten Strategien und zu einer genaueren Modellierung der Prozesse in der Brandungszone führen. Des Weiteren können durch den Einsatz der räumlich und zeitlich hoch aufgelösten photogrammetrischen Daten detaillierte Informationen über die Physik der Brandungszone gewonnen werden.

Dank

Die vorgestellte Arbeit ist ein Teil des Projekts WaveScan. WaveScan ist ein Gemeinschaftsprojekt des Instituts für Photogrammetrie und Geoinformation (IPI) und dem Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen (ISEB).

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und dem Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) für die Finanzierung sowie der Forschungsstelle Küste (FSK) des Niedersächsischen Landesamts für Ökologie (NLÖ) und der Betriebsstelle Norden des Niedersächsischen Landesbetriebs für Wasserwirtschaft und Küstenschutz (NLWK) für ihre tatkräftige Unterstützung.

Literatur

- Santel, F. & Linder, W., 2003: Digitale Bildzuordnung zur Bestimmung von bewegten Wasseroberflächen. In: Luhmann, T. (Hrsg.), Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik, Wichmann Verlag, S. 145–151.
- Schenk, T., 1999: Digital Photogrammetry. Vol. I, Terra Science, Laurelville.
- Schröter, A., Mayerle, R., Zielke, W., 1994: Optimized dispersion characteristics of the Boussinesq wave equations. Proceedings of Waves – Physical and Numerical Modelling, Vancouver, S. 416–425.
- Strybny, J. & Zielke, W., 2000: Extended Eddy Viscosity Concept for Wave Breaking in Boussinesq Type Models, ASCE, Proc. 27th International Conference on Coastal Engineering (ICCE), Sydney, Vol. 2, S. 1307–1320.