

Evaluation multitemporaler, hochauflösender Fernerkundungsdaten für den Küstenschutz am Beispiel der Insel Usedom

TORSTEN PRINZ & KARL-PETER KRÜGER, Münster

Zusammenfassung: Die Anforderungen an den modernen Küstenschutz beinhalten eine Vielzahl unterschiedlicher Maßnahmen. Neben der technischen Überwachung von Schutzbauwerken ist auch die Evaluation ihrer Wirkung innerhalb eines gefährdeten Küstenabschnittes über längere Zeiträume hinweg von großer Bedeutung. Der Einsatz und die Analyse von hochauflösenden, multitemporalen Fernerkundungsdaten sowie die Verarbeitung der anfallenden Daten in Geoinformationssystemen (GIS) bietet neue Möglichkeiten der Überwachung und Beurteilung von Küstenabschnitten und den in ihnen geplanten oder bereits getroffenen Schutzmaßnahmen. Aus diesem Grunde werden multitemporale, hochauflösende Luft- und Satellitenbilder (Ikonos-II) hinsichtlich der Veränderung der Küstenmorphologie während der letzten 55 Jahre in Testgebieten der Ostseeinsel Usedom untersucht. Die Ergebnisse belegen, dass abhängig von der jeweiligen Datengrundlage unterschiedliche Erosions- und Akkumulationsprozesse sowie ihre Wechselwirkung mit z. T. historischen Küstenschutzbauwerken analysiert und für ein zukünftiges Monitoring genutzt werden können. In Kombination mit GPS-gestützten Geländedaten bezüglich des Zustandes und der Effektivität einzelner Schutzbauwerke führt eine Berücksichtigung derartiger digitaler Fernerkundungsdaten in bereits realisierte Fachinformationssysteme zu neuen Beurteilungskriterien des lokalen Küstenschutzsystems. Aus diesem Grunde wird die Auswertung digitaler hoch auflösender Fernerkundungsdaten, insbesondere geeigneter Satellitendaten, für das Küsten-Monitoring durch die Autoren empfohlen.

Summary: *Evaluation of multisensoral, high-resolution remote sensing data for the coastal zone protection management as exemplary shown for the island Usedom.* Modern coastal zone protection and management systems require a variety of different measures. Beside the technical supervision of protection constructions the evaluation of their effects within an endangered coastal sector over a longer period is of great significance. The application and analysis of high-resolution, multitemporal remote sensing data and its further processing in geoinformation systems (GIS) offers a new possibility for the supervision and examination of coastal zones, respectively planned or already established protection measures. Therefore multitemporal, high-resolution aerial- and satellite-data (Ikonos-II) are being studied with regard to changes of the coastal morphology during the last 55 years at test sites on the German Baltic Sea island Usedom. Depending on the type of data the results verify that different erosional and/or accumulation processes respectively their interaction with partly historical coastal protection constructions can be analysed and used for monitoring tasks in the future. In combination with GPS-supported field data of selected protection constructions, regarding their shape and efficiency, leads the consideration of the digital remote sensing data in already established GIS to new examination criteria for local coastal protection systems. Due to this experience the authors strongly recommend the analysis of digital high-resolution remote sensing data, in particular suitable satellite data for the purpose of coastal monitoring.

1 Einleitung

An vielen Küsten der Welt werden aufwändige Baumaßnahmen ergriffen, um das gefährdete Binnenland vor den Folgen der

Erosion, wechselnder Wasserstände, Strömungsverlagerungen und Sturmfluten mit ihren für den Menschen z. T. katastrophalen Folgen zu schützen. Insbesondere an der Nord- und Ostseeküste treffen wir einen äü-

berst dynamischen Küstenraum an, welcher schon seit jeher seinen Bewohnern all ihr technisches Geschick abforderte, um dort dauerhaft bestehen zu können. Den Küsteningenieuren steht heute, aufbauend auf den Erfahrungen der letzten Jahrhunderte, eine Reihe von typischen Küstenschutzbauwerken zur Verfügung. Deiche, Siele, Buhnen, Lahnungen, Wellenbrecher und in den letzten Jahrzehnten zunehmend die künstliche Sedimentaufspülung sollen unerwünschten Veränderungen der Küste entgegenwirken.

Im Bereich der Ostsee hat sich entlang der deutschen, polnischen und baltischen Küstenlinien seit Ende der letzten Kaltzeit die geologisch einzigartige Form der dynamischen Ausgleichküste mit ihren markanten Nehrungen, Haffs und Boddensystemen gebildet. Obwohl keine nennenswerten Gezeitenkräfte auf die Morphodynamik der deutschen Ostseeküste einwirken, können einzelne Sturmflutereignisse oder anthropogene Eingriffe in den Küstenraum gravierende Folgen für die Stabilität der heutigen Strandlinie mit sich bringen. Um die Risiken einer Küstenverlagerung und evtl. Flutereignisse möglichst niedrig zu halten, müssen alle getroffenen Küstenschutzmaßnahmen regelmäßig überwacht, gewartet und auf ihre Effizienz geprüft werden. In Mecklenburg-Vorpommern werden zu diesem Zweck überwiegend klassische Geländebegehungen entlang der Küste durchgeführt. Die Befunde werden zusammen mit anderen Statusdaten in das Geoinformationssystem *GIS-Küste* des Staatlichen Amtes für Umwelt und Natur Mecklenburg-Vorpommern (StAUN, 1996–2001) in Rostock überführt. Auf Grund der hohen Kosten einer konventionellen Begutachtung wird in den letzten Jahren verstärkt der Nutzen von Fernerkundungsdaten (FE-Daten) für den Zweck der Küstenüberwachung untersucht. Ein Schwerpunkt lag bisher bei den konventionellen Luftbildreihenaufnahmen, deren Erstellung jedoch sehr aufwändig und teuer ist. In der hier vorgestellten Arbeit wird zum ersten Mal der Einsatz hochauflösender, synoptischer Satellitenbilder des Typs Ikonos-II im Zusammenspiel mit anderen Datensätzen für die Aufgaben des Küstenschutzes

für Testgebiete auf der Insel Usedom evaluiert.

1.1 *Naturräumliche und geologisch/geomorphologische Einordnung*

Die Insel Usedom im Bundesland Mecklenburg-Vorpommern ist nach Rügen die zweitgrößte Ostseeinsel Deutschlands. Sie wird im Westen durch den Peenestrom, im Norden durch die Ostsee, im Osten durch die Swine und im Süden durch das Kleine Haff vom Festland abgegrenzt. Gemeinsam mit der polnischen Insel Wollin schließt Usedom das Odermündungsgebiet ein und bildet dessen westliche Flanke. Die Gesamtfläche der Insel beträgt 445 km², wobei der deutsche Teil der Insel 354 km² beträgt. Der Grenzverlauf zu Polen liegt südöstlich von Ahlbeck. Die Untersuchungs- und Testgebiete *Peenemünder Haken* und *Streckelsberg* sind etwa 22 km voneinander entfernt und befinden sich im NW der Insel (vgl. Abb. 1 und Titelbild).

Die NW–SE-Ausdehnung Usedom beträgt 40 km. Es ist zu beachten, dass die Insel in zwei große Teilgebiete untergliedert ist: Zwischen Zempin und Koserow liegt der Usedomer-Ahlbecker SE-Teil. Er ist mit dem kleineren Zinnowitz-Peenemünder NW-Teil durch eine Landbrücke verbunden; letzterer ist in kleinere Halbinseln gegliedert. Von SW greifen das Achterwasser mit 85 km², die Mündung des Peenestromes und das Krumminer Wiek mit 14,9 km² in die Insel ein. Der SE Usedom ist in seinem Küstenverlauf weniger stark gegliedert.

Die Insel besitzt ein quartäres Alter und zählt im geologischen Sinn zu den glaziofluvialen Strukturelementen der *Nordost-deutschen Senke*. Sie ruht dabei auf einem unterschiedlich tief abgesenkten paläozoischen Grundgebirgsfundament und den darauf diskordant folgenden Festgesteinen des Mesozoikums. Das Erdmittelalter wird von mächtigen Lockersedimenten, vor allem pleistozänen Ablagerungen, mit Mächtigkeiten von bis zu 450 m überdeckt (WEISS 1996). Auf Usedom werden Mächtigkeiten des Quartärs von max. 80 m erreicht (DUPHORN 1995). Der Untersuchungsraum ist

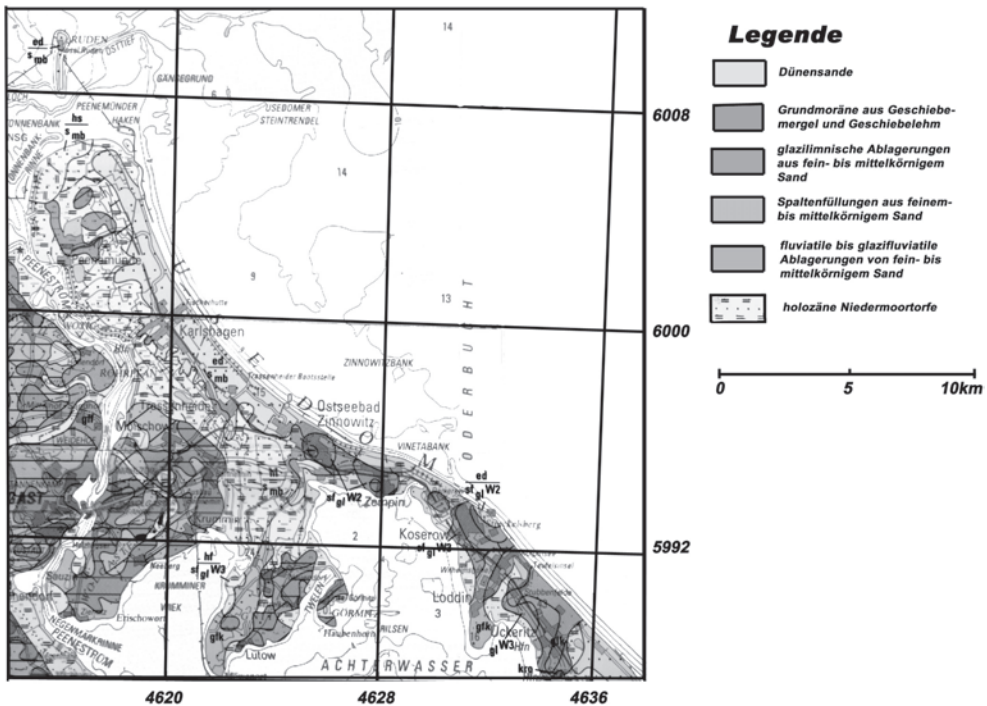


Abb. 1: Quartärgeologische Übersichtskarte des Untersuchungsraumes zwischen Peenemünde und Ahlbeck (modifiziert nach LUNG 1996); siehe auch Titelbild.

Bestandteil der Nord-Rügen-Ost-Usedomer Endmoränenstaffel, welche von der Greifswalder Oie zum *Streckelsberg* im Bereich des heutigen Ostseeschelfs verläuft und im Wesentlichen aus weichsel-kaltzeitlichen Lockersedimenten besteht (KLEWE 1960). Der nordwestliche Teil Usedoms vom *Peenemünder Haken* bis Zinnowitz bilden pleistozäne Inselkerne aus Geschiebemergeln und in der Peeneniederung aus sandigen fluvialen Ablagerungen. An der Ostseeküste liegen Dünenansand unterschiedlichen Alters nebeneinander, so dass sie sich in Braun- und Gelbdünen differenzieren lassen (KLEWE 1973). Dieser Dünengürtel reicht vom *Peenemünder Haken* bis Zempin und ist häufig mit Kiefernwald bestanden. Landeinwärts vom Peeneufer, der westlichen Grenze Usedoms, bis zu den Boddengewässern Krumminer Wiek und dem Achterwasser haben sich holozäne Niedermoortorfe gebildet.

Der südwestliche Teil von Mulschow bis Wolgast besteht aus einer Abfolge von mergeligtonigen Grundmoränenmaterial und fein- bis mittelkörnigem Sand aus Spaltenfüllungen der Moräne. Diese Abfolge setzt sich östlich des Krumminer Wiefs bei Lütow fort. Hier sind auch vereinzelt Stauchmoränen anzutreffen, welche mit weiteren pleistozänen Inselkernen bei Zempin vorkommen. Die Endmoränenstaffel wird zwischen Zempin und Koserow von Niedermoortorfen unterbrochen.

Im SE bestehen die Uferbereiche des Achterwassers ebenfalls aus Niedermoortorfen, welche nordwestlich von Ückeritz bis zum Kölpinsee durchreichen. Westlich werden diese Torfe von einem niedrigen Höhenzug aus Grundmoränenmaterial flankiert, welcher von Loddin bis zum Kölpinsee reicht. Hauptsächlich besteht der südöstliche Teil Usedoms aus Stauchendmoränenmaterial und Gletscherzungenbecken des Pommer-

schen Stadiums (14.800–15.200 a) und des Mecklenburger Vorstoßes (13.200–12.800 a). Eine Ausnahme bildet der *Streckelsberg*, der als größte Erhebung (56 m) aus Dünenansenden des Pommerschen Stadiums besteht.

Kennzeichnend für die Küsten ist im Osten der mehrmalige Wechsel von Steil- und Flachküstenpartien. Dabei überwiegen im Unterschied zum westlichen Teil Usedom's Steilküstenstrecken, während der NE-Teil der Insel vorwiegend aus Grundmoränen und Seesandebenen gebildet wird. Das unterschiedlich stark ausgeprägte Relief der Insel ist somit direkt geologisch bedingt. Durch die marine Erosion der pleistozänen Inselkerne, dem Sedimenttransport und der Akkumulation entstand die heutige Bodenausgleichsküste. Im Verlauf von vier Entwicklungsstadien erhielt sie ihre heutige Gestalt mit Haken und Nehrungen (JANKE et al. 1992). Diese Prozesse folgen einem küstenparallelen, von NW nach SE gerichteten Sedimenttransport, welcher an exponierten Lagen, wie z. B. dem *Streckelsberg*, erosiv, an lee-seitigen geschützteren Lagen, wie z. B. Teilen des *Peenemünder Haken*, reakkumulierend wirkt.

2 Datengrundlage

2.1 Luftbilder

Für den Untersuchungsraum des *Streckelsberg* bei Koserow wird die Küstenmorphodynamik innerhalb zweier Zeitintervalle untersucht: 1944 bis 1992 und von 1998 bis zum Jahr 2000. Letzterer Zeitraum berücksichtigt den umfangreichen Bau von Küstenschutzbauwerken. Für den Zeitraum von 1944 bis 1992 liegen ein panchromatisches (s/w-) Luftbild (1 : 18.000) vom 6. August 1944 und ein Farbluftbild (1 : 20.000) vom 20. Mai 1992 vor. Im August 1998 erfolgte eine weitere Befliegung (Farbaufnahmen, 1 : 20.000) zur Aufnahme aller Küstenschutzbauwerke. Die geometrische Auflösung liegt hier zwischen 1 m und 2 m/Pixel.

2.2 Landsat TM

Zur Generierung multispektraler Information werden zudem archivierte Landsat-5 TM-Daten vom Juli 1989 herangezogen. Die geometrische Auflösung der Aufnahme liegt bei 25 m/Pixel.

2.3 Ikonos-II

Zur Abschätzung der Wirksamkeit der 1998 gesondert am *Streckelsberg* ergriffenen Küstenschutzmaßnahmen wird der Ausschnitt eines Satellitenbildes des neuartigen, hochauflösenden Ikonos-II Satelliten vom 2. Oktober 2000 verwendet. Diese Daten bieten neben der hohen geometrischen Auflösung im panchromatischen Modus (ca. 1 m pro Pixel) auch einen synoptischen Eindruck über eine Fläche von ca. 165 km² und eine erweiterte radiometrische Tiefe von 11 bit. Durch letztere Eigenschaft werden 2.048 Graustufen erreicht, wodurch ein erhöhter Informationsgehalt bezüglich der Geoobjekte erreicht wird.

2.4 Kartenwerke

Zur Bearbeitung (Referenzierung) des Datenmaterials innerhalb des GIS werden digitalisierte, amtliche topographische Karten im Maßstab 1 : 10.000 verwendet. Zur geologischen Interpretation des Untersuchungsraumes dienen die geologischen Karten der quartären Bildung (1 : 200.000) von 1996, die Oberflächenkarte bis 5 m Teufe (1 : 100.000) von 1969 und die preußische geologische Kartierung (1 : 25.000) von 1915/17.

2.5 Geländedaten

Während einer Feldkartierung im August 2000 wurden mittels (D)GPS wichtige morphodynamische Elemente, Bauwerke und schützende Vegetationsareale am Küstensaum zwischen *Peenemünder Haken* und *Streckelsberg* mittels mobiler digitaler Geodatenerfassung (MDE) aufgenommen. Hierbei erfolgte die Attributierung der Geoobjekte direkt GIS-konform in Anlehnung

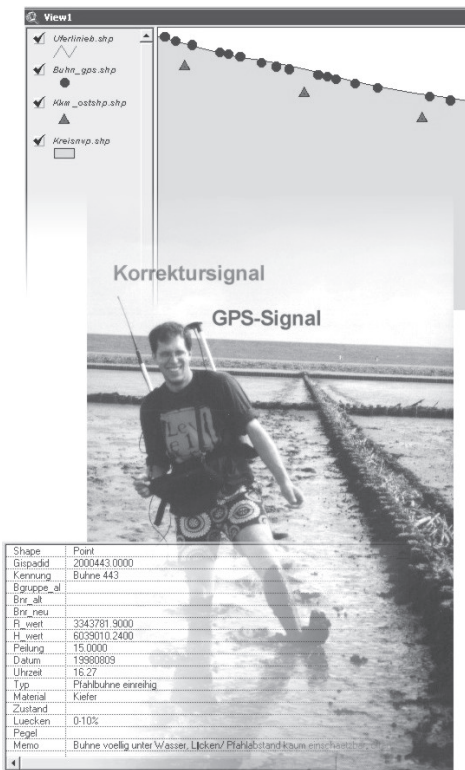


Abb. 2: Mobile, digitale und GIS-konforme Attributaufnahme von Küsten-Bunnensystemen mittels DGPS-Feldcomputer.

an den Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz Mecklenburg-Vorpommern (1998) über eine vorbereitete Eingabemaske (Abb. 2) im Gelände. Ziel war die Schaffung von Referenzobjekten/-flächen für die spätere Fernerkundungsanalyse. Für den DGPS-Betrieb im Bereich des Ostsee empfiehlt sich die Einbindung der RTCM-Korrekturdaten des Senders Wustrow auf 314.500 KHz unter Verwendung eines Zusatzempfängers wie z. B. dem *Shipmate RS 5660*. Hier können Lagegenauigkeiten von < 1 m erreicht werden, deren Fehlerbelastung später in der digitalen Karte (1 : 10.000) zu vernachlässigen sind.

3 Methodik

3.1 Datenaufbereitung

Sowohl die analogen FE-Daten als auch das Kartenmaterial wurden hochauflösend (400 dpi) digitalisiert und genau wie die Satellitendaten auf das Gauß-Krüger-System, Krassowsky-Ellipsoid mit geodätischem Datum Pulkow 1942 georeferenziert. Für die Ikonos-Daten wurden zusätzlich notwendige Bildmosaike geschaffen, da der Sensor einen nur 11 km breiten Streifen in

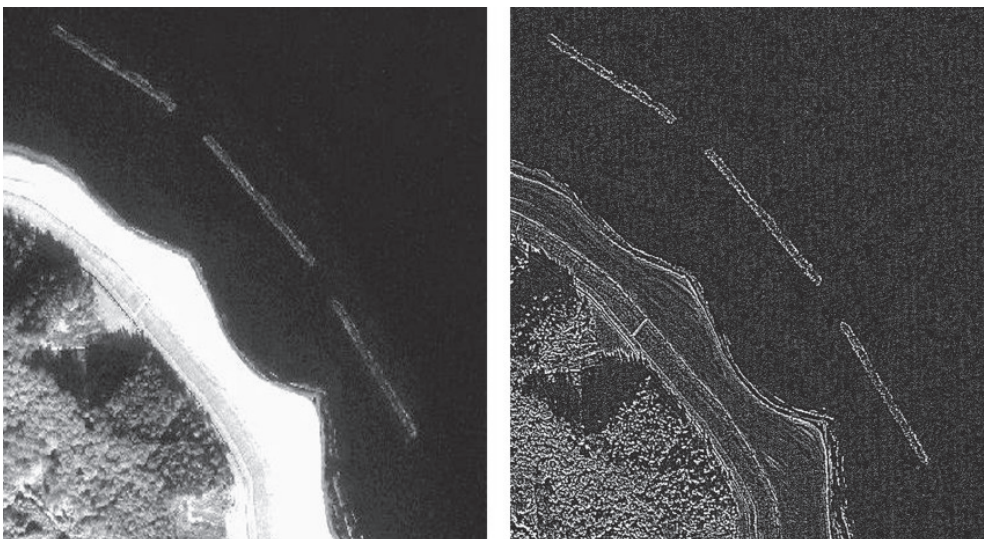


Abb. 3: Hochpass-Filteroperation zur Verbesserung der Visualisierung von Küstenschutzbauwerken in 11 bit Ikonos-II Aufnahmen vom *Streckelsberg* (hier: Wellenbrecher und Dünenschutzpflanzung).

W-O-Erstreckung abtastet und die Rohdaten in zwei separaten Dateien vorlagen. Neben den geometrischen Transformationen wurden an nahezu allen Daten auch radiometrische Transformationen, wie z. B. spezielle Grauwertstreckungen einzelner, besonders wichtiger Areale (AOI's) oder Filter-Operationen zur Verbesserung der Visualisierungsmöglichkeiten von relevanten Geoobjekten durchgeführt (vgl. Abb. 3). Weiterhin wurden auf der Basis aller Rasterdaten mittels der Vektorisierung Polygonzüge wie Kliffkanten, Strandlinien, Bauwerke, Vegetationsflächen etc. erzeugt. An dieser Stelle erfolgte auch die Adaption einiger bereits vorhandener Vektordatensätze aus dem *GIS-Küste* des StaUN in Rostock (1996–2001).

3.2 Digitales Geländemodell (DGM)

Zur verbesserten Analyse der Küstenmorphodynamik (s. Kap. 4.4) und ihrer Beziehung zur unterlagernden Geologie wurde ein digitales Geländemodell (DGM) erstellt. Als Datengrundlage dienten die digitalisierten topographischen Karten (1 : 10.000). Das DGM erstreckt sich auf den Bereiche der Außenküste vom *Peenemünder Haken* bis zu den Pagelunbergen im NO von Ueckeritz. Die Interpolationsgitterweite liegt bei 10 m. Zur Optimierung des DGM wurden sowohl punktuelle Daten, als auch Informationen aus digitalisierten Isohypsen

berücksichtigt. Neben den Vorzügen der großmaßstäbigen Datengrundlage bietet die Verwendung der TK 1 : 10.000 auch Nachteile: So sind die dichten Düngürtel mit hoher Reliefenergie vom *Peenemünder Haken* bis Zinnowitz/Zempin im Kartenwerk nicht detailgetreu dargestellt, sondern nur generalisiert erfasst. Einer Korrektur im DGM kann nur durch die Verschneidung mit dem Dünenkataster erfolgen. Dennoch bietet das hier berücksichtigte DGM ausreichende und grundlegende Interpretationsmöglichkeiten bezüglich der geologisch/morphodynamischen Zusammenhänge in den Testgebieten sowie einer potenziellen Hochwassergefährdung.

4 Datenanalyse im GIS

4.1 Differenzierungsmöglichkeiten von Geoobjekten

Je nach verwendetem FE-Datensatz unterscheiden sich die Differenzierungsmöglichkeiten der verschiedenen Küstenschutzmaßnahmen deutlich voneinander. Je nach Aufnahmezeitpunkt, Befliegungsmaßstab, geometrischer und radiometrischer Auflösung, aber auch der geometrischen Form und Topologie der Geoobjekte selbst, lassen sich viele Bauwerke in den Testgebieten kartieren und beurteilen. In Tab. 1 sind die Differenzierungsmöglichkeiten einzelner Objekte für das Gebiet *Streckelsberg* nach ihrer Signifi-

Tab. 1: Übersicht über die Erkennbarkeit der für den Küstenschutz relevanten Geoobjekte innerhalb verschiedener FE-Datensätze für das Testgebiet *Streckelsberg*.

	s/w Luftbild	Farbluftbild	Landsat-TM	Ikonos-II
Aufnahmejahr	1944/1983	1992/98	1989	2000
Buhnen	gut	gut	nicht möglich	mäßig
Wellenbrecher	–	sehr gut	–	mäßig
Aufspülungen	gut	gut	mäßig	gut
Küstenschutzwald	mäßig	gut	gut	gut
Deiche	unzureichend	unzureichend	nicht möglich	unzureichend
Strandmauern	mäßig	gut	nicht möglich	gut
Strandlinie/Spülsaum	gut	sehr gut	mäßig	sehr gut
Kliffkante	gut	sehr gut	mäßig	sehr gut
Dünenbepflanzungen	–	nicht möglich	nicht möglich	sehr gut

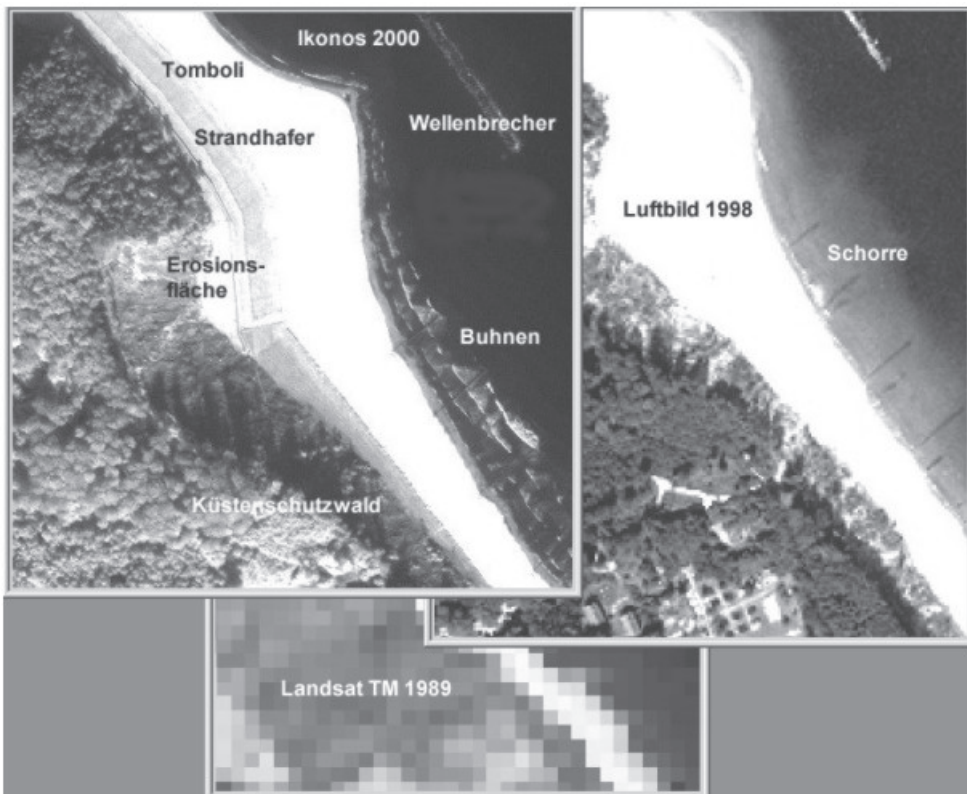


Abb. 4: Unterschiedliche Differenzierbarkeit von Geobjekten des Küstenschutzes in Ikonos-, Luftbild- und Landsat TM-Aufnahmen des Untersuchungsraumes *Streckelsberg* auf Usedom.

kanz in den verschiedenen FE-Daten zusammengefasst. Es wird deutlich, dass ein Datensatz allein keine erschöpfende Informationsquelle für die Beurteilung der Gesamtmaßnahmen darstellen kann. Vielmehr lassen sich nur in einer bewusst gewählten Kombination unterschiedlicher Datenquellen (z. B. panchromatische Ikonos-Aufnahmen mit Farbluftbildern oder IR-Satellitenbildern) wesentliche qualitative bzw. quantitative Aspekte wichtiger Geobjekte erfassen.

Obwohl man zunächst davon ausgehen muss, dass in Luftbildern auf Grund ihrer hohen geometrischen Auflösung fast alle Schutzbauwerke hinreichend gut zu erkennen sind, zeigte sich während der Untersuchung rasch, dass diese pauschale Aussage nicht richtig ist. Gerade im Bereich des Sandstrandes neigen Farbluftbilder häufig

zu Überstrahlungseffekten, welche eine Differenzierung von kleineren Objekten verhindern (z. B. Buhnen oder lichte, junge Dünen-schutzbepflanzungen). Letztere lassen sich hingegen in den synoptisch weiter reichenden, panchromatischen Ikonos-Aufnahmen sehr gut erkennen und beurteilen. Bezüglich der Buhnensysteme im Schorrbereich bieten Luftbilder jedoch die einzige verlässliche Datenquelle, da sich die häufig sehr schmalen Buhnen nur hier kontrastreich von ihrer Umgebung (Wasser!) abheben. Zum Teil lassen sich sogar Aussagen über die Vollständigkeit einer Buhnenreihe treffen (vgl. Abb. 4).

Andere fest installierte Schutzbauten wie Deiche und Strandmauern lassen sich in hochauflösenden Farbluft- oder panchromatischen Ikonos-Aufnahmen nur bedingt differenzieren. Deutlich besser sind die Dif-

ferenzierungsmöglichkeiten erosionsanfälliger Bereiche wie der Kliffkante oder des Strandes bzw. der Schorre. Insbesondere der Verlauf der z. T. deutlich ausgeprägten jungen Hangrutschungen sowie Erosionsrinnen am Kliff oder auch die Tomboli-Bildungen auf der Schorre geben in den Luft- bzw. Ikonos-Aufnahmen Auskunft über das Maß der Küstenmodifikation. Sedimentkörper und Aufspülungen können z. T. noch bis zu einer Tiefe von ca. 5 m unter der Wasseroberfläche auf der Schorre im Farbluftbild erkannt werden.

Anthropogen bedingte Vegetationsflächen sind besonders gut in Luft- und Ikonos-Daten zu unterscheiden (Küstenschutzwald!). Es ist jedoch bemerkenswert, dass sich die jungen, künstlichen Strandhaferanpflanzungen im Primärdünengürtel anschließend in den panchromatischen Ikonos-Daten auf Grund der höheren radiometrischen Datentiefe von 11 bit klar differenzieren lassen. In den Farbluftbildern kommt es hier zur Totalreflexion der Strahlung an den Sandoberflächen der Dünen (s. o.). Hinsichtlich einer spektralen Aufweitung der Unterscheidungsmöglichkeiten hilft hier eine Verschneidung mit IR-Daten des TM-Systems: Die multispektrale Zusatzinformation (Infrarot = IR) erlaubt dann sogar eine Klassifikation der Gewächsorten (z. B. innerhalb des Küstenschutzwaldes). An dieser Stelle sei der Hinweis auf die Bedeutung von zukünftig einzusetzenden hochauflösenden multispektralen FE-Daten für die Zwecke des Küstenschutzes hingewiesen (z. B. 4-kanalige IR-Ikonos-Daten mit 4 m/Pixel).

4.2 Visualisierung und Reihenanalyse

4.2.1 Streckelsberg

Dieser ca. 4 km² große Küstenabschnitt wurde bis 1996/98 lediglich durch historische Schutzbauwerke seit 1858 gegen die erosive Kraft der Meeresströmungen gesichert (WERNICKE 1930). Im Laufe der Vergangenheit unterlag das gesamte Schutzsys-

tem allerdings einem starken Verfall und wurde nur sporadisch ausgebessert (WEISS 1992). Der *Streckelsberg* selbst besteht aus holozänen Dünenstränden mäßiger Festigkeit und stellt deshalb der Erosion eine nur geringe Widerstandskraft entgegen.

Bei der Analyse der FE-Daten und der Verschneidung der aus ihnen abgeleiteten Vektordaten im GIS (Abb. 5a und b) zeigt sich, dass die abtragende Wirkung der Erosion sich an der Ostflanke des *Streckelsberges* am stärksten ausgewirkt. Im Beobachtungszeitraum von 1944 bis 1992 kam es zu einer Rückverlagerung der Strandlinie von etwa 70 m. Dieses Ergebnis deckt sich weitgehend mit Aussagen anderer Autoren (GURWELL & ZIEMER 1991), welche für vergleichbare Küstenabschnitte mittels geodätischer Feldmethoden Küstenrückgänge von 150 m pro 100 Jahre prognostizierten. Von uns durchgeführte Verschneidungs- und Abfrageprozesse, welche die wichtigsten Polygonzüge der Zeitreihenbetrachtungen von Strandlinie, Kliffkante etc. in einem GIS berücksichtigen, belegen, dass im gesamten Untersuchungszeitraum ca. 40.000 m² Strandfläche verloren gingen. Weiterhin kam es zu einer großflächigen Rutschung im Mittelkegel des *Streckelsberges* nach 1950: 1944 war noch eine geschlossene Vegetationsdecke vorhanden, 1953 zeichnet sich eine erste, kleine Denudationsfläche ab, die sich bis heute zu einem großflächigen, vegetationsfreien Hangeinschnitt entwickelt hat. Auf Grund dieser starken Abtragungsprozesse am *Streckelsberg* wurden 1998 neue, umfangreiche Küstenschutzmaßnahmen ergriffen: Passive Maßnahmen, wie der Bau von Buhnen und Aufspülungen, bewirken eine lee-seitige Sedimentakkumulation im Schorrbereich; aktive Maßnahmen, wie der Einsatz von Wellenbrecher, bewirken eine Minderung der Wellenenergie und somit eine geringere Erosionskraft. Gemäß der „natürlichen“ Wirkung von Wellenbrechern, welche unter Idealbedingungen zur Ausbildung von Tomboli streben (WEISS 1991), sind die größten morphologischen Veränderungen an den Aufspülungsflächen zu erwarten. Diese sollten in Lee der Wellenbrecher Akkumulationsflächen und zwi-

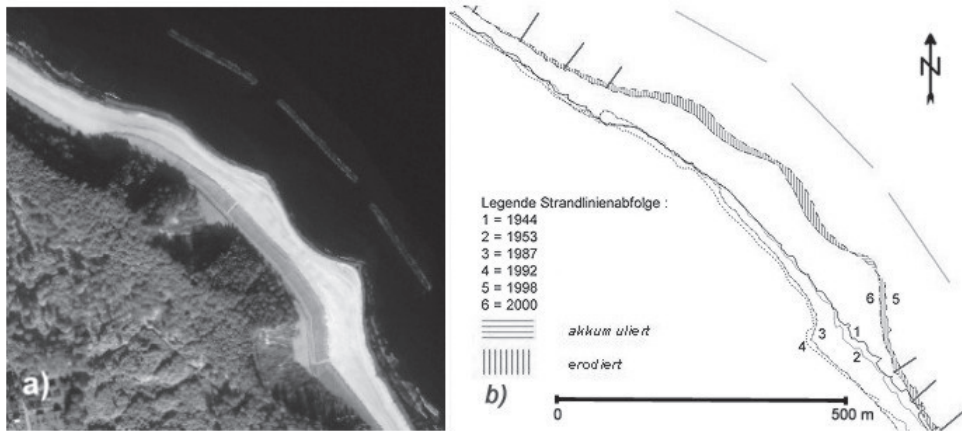


Abb. 5: Zeitreihenanalyse relevanter Küstenlinien (b) auf der Basis verschiedener FE-Daten für den Küstenschutz am *Streckelsberg* von 1944 bis 2000. Beispielhaft dargestellt ist die Ikonos-Aufnahme vom Oktober 2000 (a).

schen den Bauwerken Erosionserscheinungen zeigen.

Die aktuellen Ikonos-Daten (Abb. 5a) belegen, dass die prognostizierten Sedimentverlagerungen während der zurückliegenden zwei Jahre nur bedingt eingetroffen sind. Wie auch zuvor kam es zu einer großflächigen Erosion im Untersuchungsraum, bemerkenswerterweise auch entlang der Aufspülungsareale in Lee der Wellenbrecher. Das Ausmaß der Erosion beträgt hinsichtlich der künstlich aufgespülten Ursprungsflächen etwa 12.000 m². Die veränderte Form der Schorre legt den Schluss nahe, dass besonders im Bereich der Durchflüsse zwischen den Wellenbrechern starke Strömungen entstehen, welche entlang der Strandlinie zur Ausbildung von Tomboli führen. Eine kleinflächige Reakkumulation der Sedimente konnte nur im Lee des südöstlichen Wellenbrecher bestätigt werden.

Obige Untersuchungen zeigen, dass eine deutliche Veränderung im Sedimenttransport und der Erosionsprozesse während der letzten 56 Jahre stattfand; so kam es im Zeitraum von 1944 bis 1992 maßgeblich zur Abtragung der Ostflanke des *Streckelsberges*. Der spätere Bau von Küstenschutzwerken (Buhnen, Wellenbrecher) bewirkte Akkumulationsprozesse, aus denen ein sehr geringer Flächengewinn (300 m²) resultiert.

Durch die zusätzliche künstliche Aufschüttung von Material an der Westflanke des *Streckelsberges* und im vorgelagerten Schorrbereich konnte nun erheblich mehr Material abgetragen werden. Hieraus ergeben sich Erosionsflächen, welche in den Jahren zuvor nicht so deutlich ausgeprägt waren, die sich aber lediglich im vorgelagerten, künstlich geschaffenen Strandareal befinden. Eine unmittelbare Gefährdung des *Streckelsberges* kann somit nur temporär abgewendet werden. Diese Ergebnisse decken sich mit theoretischen Betrachtungen von WEISS (1991), welcher betont, dass Aufspülungen selten einmalige Maßnahmen seien, sondern in der Regel alle 6 bis 7 Jahre durchgeführt werden müssten.

4.2.2 Peenemünder Haken

Der Untersuchungsraum am *Peenemünder Haken* umfasst hauptsächlich nur das zur Ostsee und dem Durchfluss zum Greifswalder Bodden exponierte Gebiet, die Peenemündung selbst wurde nicht berücksichtigt. Der Untersuchungsraum nimmt eine Fläche von ca. 6 km² ein, in dem alle für den Küstenschutz relevanten Geoobjekte der Küste auf der Basis der FE-Daten aufgenommen wurden (vgl. Abb. 6a und b). Bei der Analyse der FE-Daten und der Verschneidung

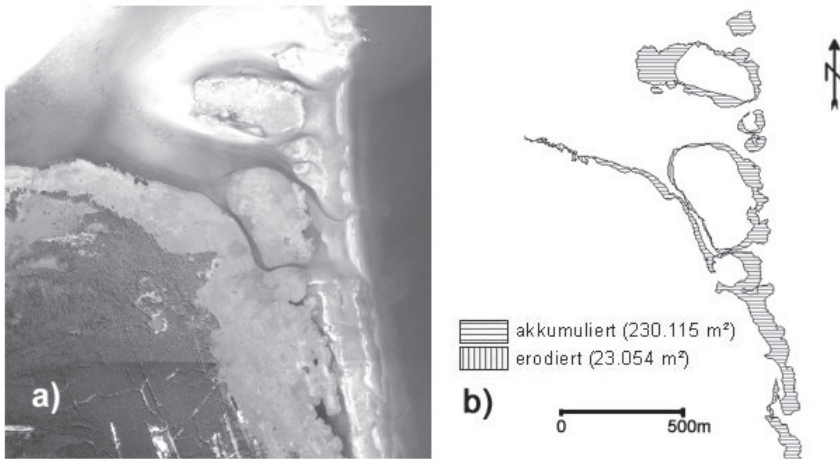


Abb. 6: Zeitreihenanalyse relevanter Küstenlinien (b) auf der Basis verschiedener FE-Daten für den Küstenschutz am *Peenemünder Haken* von 1953 bis 1998. Beispielhaft dargestellt ist das Luftbild von August 1998 (a).

der aus ihnen abgeleiteten Vektordaten im GIS zeigt sich eine deutliche Veränderung des Sedimentationsraumes von 1953 bis 1998. Es können Rückschlüsse bezüglich der Verlagerung von Strandlinien sowie die Aufnahme von Erosions- und Akkumulationsflächen getroffen werden. In der Bilanz wird deutlich, dass es größere akkumulative Flächen als erodierte Areale gibt. Die ausgeprägteste Zone positiven Sedimenthaushaltes ist die Lee-Seite des *Peenemünder Hakens*. Aber auch auf den vorgelagerten kleineren Inseln im Norden des Hakens sind im Verlauf der Jahre deutliche Flächengewinne zu verzeichnen. In den Luftbildern von 1998 sind Letztere hauptsächlich am östlichen Küstensaum nachweisbar, können aber, auf Grund lokaler Strömungsverhältnisse, auch vereinzelt in westlichen Inselarealen auftreten. Der Gesamtumfang der in den FE-Daten nachweisbaren Landgewinne beträgt ca. 230.100 m². Es resultiert eine seewärtige Verlagerung der Strandlinie von bis zu 100 m am Festland und über 200 m auf den vorgelagerten Inseln. Dieser Zuwachs dokumentiert sich auch in einer hohen Bestandsdichte von Pionierpflanzen: 1953 (historisches Luftbild) deuten helle, überstrahlende Reflexionen auf offene Sandflächen hin;

1998 sind diese Flächen bereits dauerhaft mit Strandgräsern und Schilf bestanden.

Die Küstenabschnitte mit dominierenden Erosionserscheinungen befinden sich im Nordwesten, direkt am Greifswalder Bodden oder an luvseitigen Strandabschnitten der vorgelagerten Inseln. Dort bieten insbesondere die Ablagerungen des holozänen Niedertoorfmoores wenig Erosionsresistenz gegenüber der hier zunächst NE gerichteten Strömung der Peene. Die erodierte Gesamtfläche beträgt nach Analyse der FE-Daten etwa 23.000 m². Somit ergibt sich im Untersuchungsraum des *Peenemünder Haken* ein Verhältnis von Akkumulation zu Erosion von 11 : 1. In der Gesamtbilanz überwiegen mit insgesamt 207.000 m² natürlichem Landgewinn akkumulative Prozesse.

Obige Untersuchungen belegen, dass der Einsatz von anthropogenen Küstenschutzmaßnahmen, durch die naturräumliche Morphodynamik der Region *Peenemünder Haken*, an ausgedehnten Strandabschnitten nicht erforderlich ist, da die Strandlinie durch akkumulative Prozesse stetig seewärts verlagert wird. An den wenigen Strandabschnitten des Festlandes, an welchem Erosionsprozesse wirken, wurden teilweise Deiche als Küstenschutzmaßnahme errich-

tet. Den erosiven Prozessen auf den vorge-lagerten Inseln wird nicht entgegengewirkt.

4.3 Einbindung eines DGM

Die Einbindung eines DGM in das GIS erlaubt die Visualisierung von geologisch-/morphodynamischen Aspekten im Untersuchungsraum. In Abb. 7 (a, b) ist der Küstenabschnitt vom *Streckelsberg* über den Kølpinsee bis zu den Pagelunsbergen bei Stubbenfelde in Kombination mit der geologischen Karte (a) und den Ikonos-Daten (b) dargestellt. Es lässt sich die reliefprägende Wirkung der glazilimnischen Mittel- und Feinsande des Weichselglazials gegenüber den holozänen Niedermoortorfen in der Niederung vom Achterwasser zum Kølpinsee erkennen. Dort wo Stauch- und Grundmoränenmaterial ansteht, sind auch kleinräumige morphologische Hochgebiete entwickelt (meist in Form N-S streichender

Sandrücken). Weiterhin wird deutlich, dass die Erhebung des *Streckelsberges* und seiner Ausläufer ausschließlich aus Sanden besteht und ihre morphologische Ausprägung nicht als Resultat besonderer Erosionsresistenz gegenüber der Umgebung gesehen werden darf. Vielmehr hat die Ostsee an dieser Stelle einen mächtigeren Ablagerungsbereich glazilimnischer Lockersedimente angeschnitten, die ohne anthropogene Sicherungsmaßnahmen sicher stärkerer Erosion ausgesetzt wären. Dies gilt insbesondere für Areale, deren schützende Pflanzendecke bereits zerstört wurden – so gut mittels FE-Daten und DGM am *Streckelsberg* dokumentierbar (hier bilden sich bereits gefährliche Erosionsrinnen bzw. -fächer aus).

In einem eingeschränkten Umfang lässt sich das DGM auch als Grundlage zur Simulation extremer Sturmhochwasserereignisse heranziehen. So können die Regionen und Flächenanteile ermittelt werden, welche

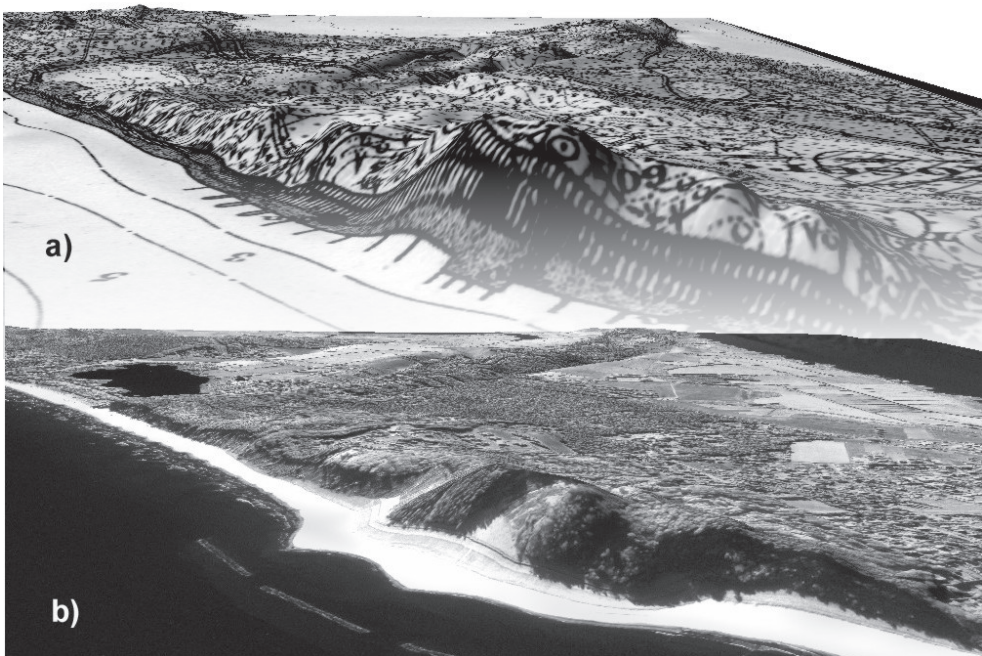


Abb. 7: Digitales Geländemodell (DGM, 3- und 2-fach überhöht) des Testgebietes *Streckelsberg* mit geologischer Information (a) und hochauflösenden Ikonos-Daten (b). Die Verzerrungen in a) sind auf die ungenaue geologische Kartengrundlage von 1915 zurückzuführen. Deutlich zu erkennen ist jedoch die Morphologie der Grund- und Stauchmoränenzüge.

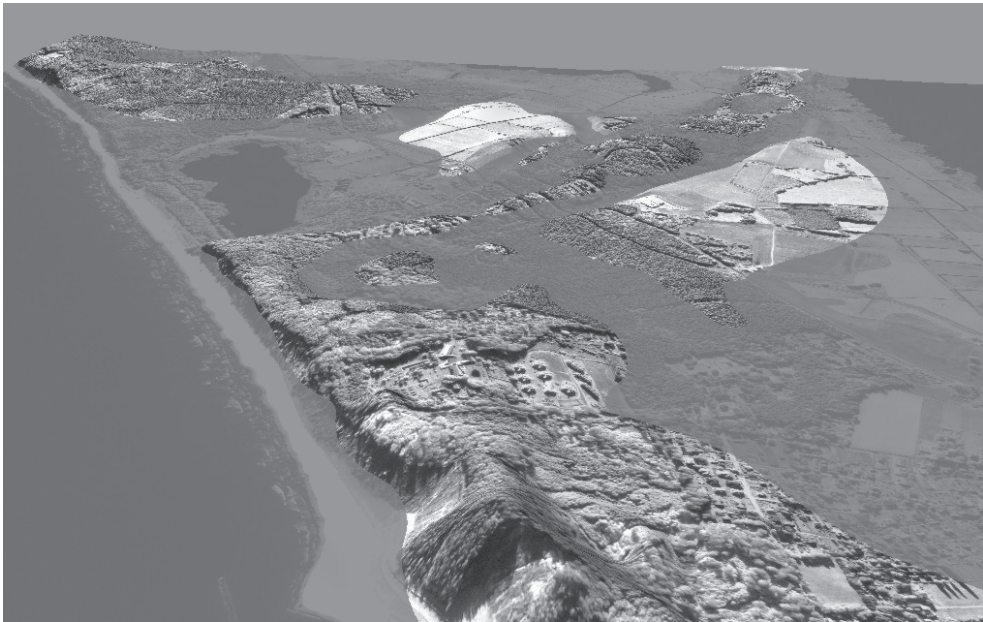


Abb. 8: Digitales Geländemodell (3-fach überhöht, Blickrichtung SE) mit Ikonos-Daten und simulierten maximalem Hochwasserstand von 1872 (Bemessungswasserstand = 3,40 m üMW) im SE des Testgebietes *Streckelsberg*. Weite Teile des Hinterlandes wären bei einem Sturmhochwasser von einer Flutkatastrophe betroffen (Ausnahme: Die Grund- und Stauchmoränenzüge).

bei einem maximalen Hochwasserstand (hier: Jahrhunderthochwasser von 1872 mit ca. 3,50 m üMW als Bemessungsgrundlage der Küstenschutzbauwerke nach KOLP 1955) überflutet würden. In Abb. 8 kann ein solcher Wasserstand als Simulation betrachtet werden. Es zeigt sich, dass bis auf die Grund- und Stauchendmoränenzüge im Sturmflutfall weite Gebiete Usedom überflutet werden. Insbesondere dienen die Niederungen zwischen dem *Streckelsberg* im NW und den Pagelunsbergen im SE als Flutungspforte in Richtung Achterwasser und Bodden. Die direkten Folgen wären neben den negativen Auswirkungen auf den anthropogenen Siedlungsraum, auch die kleinräumigen Veränderungen im Sedimenthaushalt der Ausgleichsküste sowie die z. T. irreversiblen Modifikationen der Außenküstenmorphologie zu nennen. In diesem Bereich müssen deshalb die Küstenschutzbauwerke besonders gut überwacht und ggf. ausgebaut werden. Die Bedeutung des *Streckels-*

berges sowie seiner glazigenen Ausläufer als natürliches, geomorphologisches ‚Küstenschutzbauwerk‘ wird in der Simulation bestätigt.

5 Schlussfolgerungen

Wir konnten zeigen, dass mittels Einbindung von FE-Daten in ein Informationssystem (Abb. 9) für den Küstenschutz wichtige erosive bzw. akkumulative Vorgänge entlang zweier Testgebiete auf Usedom (*Peenemünder Haken* und *Streckelsberg*) in ihrem morphodynamischen, historischen Kontext zu bewerten sind. Obige Untersuchungen belegen den hohen Stellenwert von unterschiedlichen FE-Daten als wichtiges Bindeglied in der Beurteilung von langfristig angelegten Küstenschutzmaßnahmen innerhalb eines Fachinformationssystems. Insbesondere ist im Vorfeld zukünftiger Planungen die Auswertung von historischen Fernerkundungszeitreihen sinnvoll, soweit die

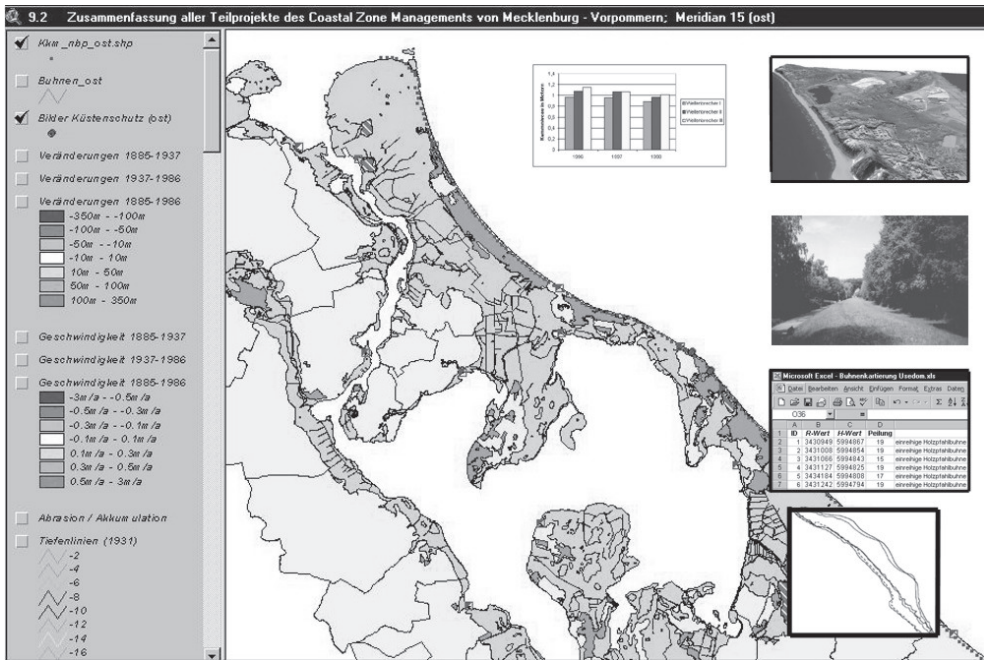


Abb. 9: Ausschnitt aus dem GIS-Küste für den Bereich des Untersuchungsraumes Usedom. Fernerkundungsdaten, DGM, Geländebefunde sowie Sachinformationen dienen als Planungsgrundlage für den effizienten und ökonomischen Küstenschutz.

Daten eine hinreichende geometrische/radiometrische Auflösung besitzen. Für aktuelle Betrachtungen können moderne Satellitendaten, wie z. B. Ikonos-Aufnahmen, einen befriedigenden, synoptischen Ersatz von aufwändigen Luftbildreihen darstellen. Hier sei auch an die zusätzliche Möglichkeit einer multispektralen Ikonos-II Befliegung mit reduzierter geometrischer Auflösung (4 m pro Pixel) aber hinreichender IR-Information als Ersatz der klassischen TM-Aufnahmen hingewiesen. Mit Hilfe moderner Bildverarbeitungstechniken sind so für weite Areale die Veränderungen der Küstenmorphologie rasch erfassbar. Zusätzlich wird der zeitliche Aufwand für die notwendigen Ortsbegehungen minimiert, da die FE-Daten auch als Planungs- und Bewertungsgrundlage für Geländetätigkeiten geeignet sind. Unter zusätzlicher Berücksichtigung eines DGM's können Rückschlüsse auf die oft geologisch bzw. morphologisch bedingte Erosionsresistenz eines Küsten-

abschnittes und einer möglichen Hochwassergefährdung gezogen werden. Geländereferenzdaten sollten verstärkt in wenigen ausgewählten Testgebieten mittels Feldcomputer GIS-konform gesammelt werden. Hier wird eine direkte (D)GPS-gestützte digitale Aufnahme empfohlen, da so der spätere Attributdatentransfer in das GIS zu vereinfachen bzw. die Fachinformation bereits im Gelände vorzuhalten ist.

Hinsichtlich der Küstenschutzanstrengungen im Bereich des *Streckelsberges* gibt es nach unseren Erkenntnissen keinen Anlass zur langfristigen Entwarnung. Trotz enormer bisheriger Bemühungen zum Schutze des Küstenabschnittes überwiegt nach wie vor eine größtenteils defizitäre Sedimentationsbilanz. Weitere Sedimentaufspülungen sowie der Ausbau des Bühnensystems und der intensive Schutz der strandnahen Vegetationsgürtel wird durch den Menschen folgen müssen.

Danksagung

Die Autoren möchten den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des StAUN in Rostock, insbesondere Dr. BIRGA GURWELL und Dr. LARS TIEPOLT der Abteilung Küste, für ihre Unterstützung und die Bereitstellung wichtiger Daten und Literatur danken. Hinsichtlich der notwendigen Recherchen nach historischem Karten- und Bildmaterial sei den Luftbildstellen im Bundesarchiv Berlin und dem Landesvermessungsamt in Schwerin gedankt.

Literatur

- DUPHORN, K., 1995: Die Deutsche Ostseeküste. – Sammlung geologischer Führer, **88**, 281 S., Borntraeger, Stuttgart.
- GURWELL, B. & WIEMER, R., 1991: Die Ostseeküste in Mecklenburg-Vorpommern. – Wasser und Boden, **43**: 13–16, Paul Parey-Verlag, Berlin.
- KLIEWE, H., 1960: Die Insel Usedom in ihrer spät- und nacheiszeitlichen Formenentwicklung. – 266 S., VEB Deutscher Verlag d. Wissenschaften, Berlin.
- KLIEWE, H., 1973: Zur Genese der Dünen im Küstenraum der DDR. – Petermanns Geographische Mitteilungen, H. **3/73**: 161–168, Haack-Verlagsgesellschaft, Gotha.
- KOLP, O., 1955: Sturmflutgefährdung der deutschen Ostseeküste zwischen Trave und Swine. – 170 S., Seehydrographischer Dienst der DDR, Stralsund.
- LUNG, 1996: Karte Mecklenburg-Vorpommern 1 : 200.000 der quartären Bildungen: Oberflächen bis fünf Meter Tiefe. – Blatt Stralsund, Schwerin.
- JANKE, W., KLIEWE, H. & STERR, H., 1992: Holo-zäne Genese der Boddenküste Mecklenburg-Vorpommerns und deren künftige klimabedingte Entwicklung. – Klimaänderung und Küste, 137–151, Springer-Verlag, Berlin.
- Ministerium für Bau, Landesentwicklung und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern (Hrsg.), 1998: Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz Mecklenburg-Vorpommern. – 114 S., Schwerin.
- WEISS, J., 1991: Küstenschutzbauwerke an der Ostseeküste von Mecklenburg-Vorpommern. – Wasser und Boden, **43**: 206–224, Paul Parey-Verlag, Berlin.
- WEISS, D., 1992: Schutz der Ostseeküste von Mecklenburg-Vorpommern. – Historischer Küstenschutz, DVWK (Hrsg.), Konrad Wittwer-Verlag, Stuttgart.
- WEISS, W. (Hrsg.), 1996: Mecklenburg-Vorpommern. – Länderprofile, S. 27–41., Klett-Perthes-Verlag, Gotha.
- WERNICKE, W., 1930: Die Küste der Inseln Usedom und Wollin – Vom Peenemünder Haken bis zum Swinehöft. – 113 S., von Bruncken & Co., Greifswald.

Anschriften der Verfasser:

Dr. rer. nat. Dipl.-Geol. TORSTEN PRINZ

Dipl.-Geogr. KARL-PETER KRÜGER

Informations-Verarbeitungs-Versorgungseinheit (IVV-FB14)

Geowissenschaften

Robert-Koch-Straße 26, D-48149 Münster

Tel.: 0251-83-300 15, Fax: 0251-83-397 63

e-mail: prinz@uni-muenster.de

http://ivvgeo.uni-muenster.de

Manuskript eingereicht: Mai 2001

Angenommen: Juni 2001