

Untersuchung der Eignung des X-SAR/SRTM-Höhenmodells für die Ableitung hydrologisch relevanter Reliefparameter

MARKUS WOLF, Jena, VOLKER HOCHSCHILD, Tübingen & CHRISTIANE SCHMULLIUS, Jena

Keywords: remote sensing, hydrological modeling, DEM, DTM, X-SAR/SRTM elevation model

Zusammenfassung: In der vorliegenden Studie geht es um die Beurteilung hydrologisch relevanter Reliefparameter, die aus X-SAR/SRTM-Daten als Input für die Parametrisierung distributiver Flusseinzugsgebietsmodelle abgeleitet wurden. Anhand von angewandten geostatistischen Genauigkeitsanalysen, Geländemessungen und vergleichenden Analysen mit Referenzhöhen- und Geländemodellen in drei Thüringer Untersuchungsgebieten mit unterschiedlicher Relief- und Landschaftsausstattung (Ilm-Einzugsgebiet, Biosphärenreservat Rhön, Talsperre Zeulenroda) wird die Eignung dieses globalen Höhendatensatzes für die hydrologische Modellierung beurteilt. Aufbauend auf den durchgeführten Analysen wurde eine Methodik erarbeitet, um die Nutzungseinschränkungen von Radarhöhenmodellen, die sich aus den Interaktionseigenschaften der elektromagnetischen Wellen mit der Erdoberfläche für hydrologische Parameterableitungen ergeben, zu beseitigen. Damit wurden erhebliche Verbesserungen der hydrologischen Eigenschaften des SRTM-DHM erreicht. Diese Verbesserungen konnten anhand der abgeleiteten hydrologisch relevanten Reliefparameter im Vergleich zum Referenzmodell des Thüringer Landesvermessungsamtes, einem ERS-DHM sowie einem hoch aufgelösten E-SAR-DHM nachgewiesen werden. Dabei hat sich gezeigt, dass das Single-Pass-System durchaus in der Lage ist, auch Mittelgebirgslandschaften, wie in der Rhön, zuverlässig und ohne signifikante geometrische Abbildungsfehler nachzubilden.

Summary: *Investigation on the use of X-SAR/SRTM elevation models for the derivation of hydrological relevant relief parameters.* The aim of the paper is to demonstrate the value of Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) derived Digital Elevation Model (X-SAR-DEM) Data for parameterisation of distributive hydrological models. The quality assessment results are compared with other remote sensing derived elevation data: a photogrammetrically derived Digital Terrain Model (DTM) of the Thuringian Bureau for Land Survey, ERS Tandem Mission data (C-Band) and a high resolution radar-retrieved DEM of the airborne E-SAR system of the German Aerospace Establishment DLR. The analysis was carried out in three test sites in Thuringia (Biosphere Conservation Area Rhön Mountains, Ilm-Catchment and Zeulenroda Reservoir Area) and comprises GPS measurements, difference images between several DTMs and DEMs, statistical analysis and quality estimations as well as derivation of secondary DEM products like slope, aspect, curvature, catchment area, river density, flow direction, flow accumulation, wetness index, transport capacity, etc. These parameters are used as spatial input for distributed hydrological models. A method is presented to improve and optimise the hydrological qualities of interferometric DEM models. The investigation has proven that the single-pass-products are clearly an improvement to existing repeat-pass remote sensing products from SAR (e. g. ERS1/2-DEM).

1 Einleitung

Die distributive hydrologische Flusseinzugsgebietsmodellierung verwendet regionalisierte Landschaftsausprägungen, zu denen neben der Landnutzung, den Böden und der Geologie insbesondere das Relief zählt. Das Relief eines Einzugsgebiets hat entscheidenden Einfluss auf die dort herrschenden hydrologischen, geomorphologischen und biologischen Prozesse. Die exakte Aufnahme der Topographie und die daraus ableitbare Einzugsgebietscharakteristik stellt deshalb vor allem für die distributive hydrologische Modellierung eine unverzichtbare Eingangsgröße dar (HOCHSCHILD 2001).

Nach BROCKMANN (1998) ist „die großräumige Erfassung räumlich-hydrologischer Informationen zum Aufbau und zur Kalibrierung quantitativer hydrologischer Modelle aus technischer und wirtschaftlicher Sicht nach wie vor nicht zufrieden stellend gelöst“. Mit der SAR-Interferometrie hat in den vergangenen Jahren ein Verfahren operationellen Status erreicht, welches der Datenaufnahme und -auswertung neue Perspektiven eröffnet. Dieses flugzeug- oder satellitengetragene Aufnahmesystem zur Erzeugung von Digitalen Höhenmodellen gewinnt deshalb zunehmend an Stellenwert, weil es in der Lage ist, effizient, kostengünstig und flächendeckend Höheninformationen in einer für mesoskalige hydrologische Anwendungen ausreichenden räumlichen Auflösung und Genauigkeit bereitzustellen. Dabei sind diese Systeme weitgehend unabhängig von Bewölkung und Beleuchtung. Darüber hinaus beinhalten die Daten der Radarrückstreuung weitere, aus hydrologischer Sicht interessante Informationen über Bodenfeuchte, Oberflächenrauigkeit und Biomasse (HAJNEK 2001).

Mit der im Februar 2000 durchgeführten *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) gelang es erstmals, einen homogenen digitalen Höhendatensatz mit nahezu globaler Abdeckung zu generieren (SCHMULLIUS et al. 2000). An Bord des Spaceshuttles „Endeavour“ befand sich neben dem amerikanischen C-Band-System (SIR-C) auch das deutsch-italienische X-Band Radar (X-

SAR). Beide Geräte nutzten die spezielle Systemkonfiguration der Single-Pass-Interferometrie. Diese Konfiguration wurde durch den Einsatz eines 60 m langen Antennenmastes ermöglicht (KOCH et al. 2002). Das hervorgegangene X-SAR/SRTM-Höhenmodell, welches die Landmasse zwischen 60° Nord und 58° Süd abdeckt, übertrifft mit einer Auflösung von 1 × 1 Bogensekunde (1" ≈ 30 m) alle bisher zur Verfügung stehenden globalen Höhendatensätze. Der größte Vorteil, den man sich von dieser Technik versprach, war die Eliminierung der temporären Dekorrelation als einen der bedeutendsten Fehlerfaktoren. Der Single-Pass Aufnahmetechnik wird für die Zukunft noch großes Entwicklungspotential zugeschrieben, welche im Fall von SRTM letztendlich durch die Länge (60 m) und Stabilität der physikalischen Basislinie und dem Signal-Rausch-Verhältnis des Systems limitiert war (BAMLER et al. 2003). Nach Untersuchungen von GÜVEN et al. (2004) liefern die SRTM-Daten bessere Ergebnisse als die vergleichbaren Produkte der optischen Sensoren ASTER, SPOT 5 und teilweise auch IKONOS. REICH & THIEL (2002) setzen nach eigenen Untersuchungen die Datengüte sogar den vergleichbar aufgelösten Geländemodellen der Landesvermessungsämter gleich und stellen darüber hinaus fest, dass die Daten durchweg genauer sind als die der ERS-Tandem-Mission. Das X-SAR-DHM beschränkt sich jedoch technisch bedingt auf etwa 50 km breite Aufnahmestreifen, zwischen denen in Abhängigkeit von der geographischen Breite Datenlücken bestehen.

2 Zielsetzung

Die Topographie der Oberfläche ist eine wesentliche Komponente des Landschaftshaushaltes, deren Kenntnis unverzichtbar ist für die Untersuchungen zur Landschaftsdynamik, wie z. B. des Landschaftswasserhaushaltes. Vor allem der Oberflächen- und der Zwischenabfluss (Interflow) sind der Steuerung des Reliefs unterworfen. Wichtige Bedeutung besitzen aber auch Hangneigung, Exposition und Hangwölbung. Die

Wölbung (konkav, konvex) hat direkten Einfluss auf die Abflusskonzentration sowie die Abflussgeschwindigkeit bzw. Abflussbeschleunigung. Diese Faktoren wirken sich unmittelbar auf die Transportkapazität des oberflächlich abfließenden Wassers und folglich auch auf das Erosionspotenzial aus (GÜNDRA et al. 2000). Im Hinblick auf die Erforschung der hydrologischen Dynamik und Abflusstenstehung in distributiven meso- und makroskaligen Einzugsgebieten kann festgestellt werden, dass bis zur Verfügbarkeit der SRTM Höhenmodelle für Einzugsgebiete mit fehlender hydrometrischer Messinfrastruktur in der Regel zwar methodisch konsistente Informationen zur Landnutzung, Geologie und den Bodensubstraten vorlagen, Höhenmodelle aber in vielen Fällen nicht in ausreichender Qualität, Konsistenz oder grenzüberschreitender Gebietsabdeckung zur Verfügung standen.

Zielsetzung der hier vorgestellten Arbeiten ist die Untersuchung der Abbildungseigenschaften des SRTM-DHM im Hinblick auf die Ableitung hydrologisch relevanter Modellierungsparameter. Dazu wurde mit Hilfe einer eingehenden geostatistischen Genauigkeitsanalyse und dem Vergleich mit weiteren Höhenmodellen die Eignung und Anwendbarkeit dieses globalen Datensatzes für die hydrologische Modellierung beurteilt. Als Untersuchungsgebiete wurden drei Thüringer Einzugsgebiete (Ilm, Rhön, Zeulenroda) mit unterschiedlichem Reliefcharakter ausgewählt. Zum Vergleich standen das Referenz-Geländemodell DGM50 (25 m × 25 m) des Thüringer Landesvermessungsamtes sowie Höhenmodelle der ERS-Tandem-Mission bzw. aus einer E-SAR (Experimental Synthetic Aperture Radar) Befliegung zur Verfügung.

Aufbauend auf den durchgeführten Analysen wurde eine gezielte Methodik zur Verbesserung der hydrologischen Eigenschaften des SRTM-DHM entwickelt. Die Verbesserungen zielen auf die Korrektur der in Radar-Höhenmodellen enthaltenen Vegetationshöhen sowie texturbedingter Auswirkungen ab. Diese Korrekturen sind eine notwendige Erfordernis, um die Einschränkungen der interferometrisch erzeugten SAR-

Höhenmodelle bei der Anwendung in hydrologischen Fragestellungen zu kompensieren bzw. so zu vermindern, dass das SRTM-DHM eine ernst zu nehmende Alternative zu photogrammetrisch-kartographisch erzeugten Geländemodellen der Landesvermessungsämter darstellen kann (HOCHSCHILD & WOLF 2004).

3 Datenaufbereitung und Berechnung der Reliefparameter

Bevor die Analysen zur Datenqualität und die Ableitung der Reliefparameter durchgeführt werden konnten, war zunächst eine umfangreiche Datenaufbereitung (Formatkonvertierung, Datumstransformation in UTM WGS84, Pixel-Resampling und Clipping der Einzugsgebiete) für alle verwendeten Höhen- und Geländemodelle notwendig. Da es sich bei den SRTM-Daten um ein interferometrisch erzeugtes SAR-Produkt handelt, unterliegt das Höhenmodell bestimmten Charakteristiken der Aufnahmegeometrie, die sich auf die Anwendbarkeit für die hydrologische Parameterableitung auswirken. Nutzungseinschränkungen bei einzugsgebietsbezogenen Ableitungen können sich durch geometrische Abbildungsfehler sowie durch die Interaktionseigenschaften der elektromagnetischen Wellen mit der Erdoberfläche ergeben.

3.1 Vegetationskorrektur

Interferometrisch erstellte DHM enthalten Höheninformationen der Vegetation und anthropogener Objekte. Besonders die kurzen Wellenlängen, wie das X-Band, können das Vegetationsdach kaum durchdringen. Ein Großteil der gesendeten elektromagnetischen Strahlung wird bereits von der Baumkrone reflektiert. Derartige Höhenaufsätze können vor allem in Auenbereichen grobe Fehler bei der Berechnung der Abflussrichtungen verursachen, da die Vegetation im Höhenmodell ein unnatürliches Fließhindernis bildet. Der vegetationsbedingte Höhenaufsatz wurde durch Subtraktion des LVA-DGM vom SRTM-DHM berechnet. Die so erzeugte Waldmaske wurde

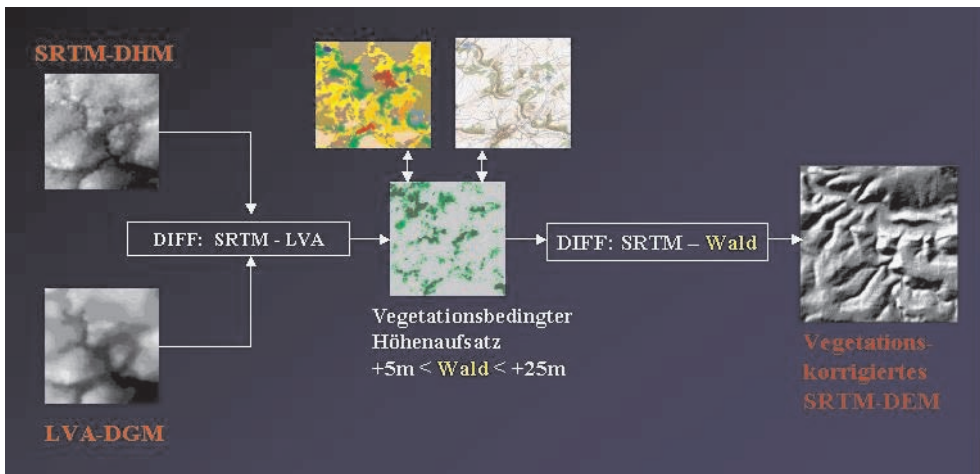


Abb. 1: Methodischer Ablauf zur Erzeugung eines vegetationskorrigierten SRTM-DHM durch Subtraktion des LVA-DGM vom SRTM-DHM unter Verwendung einer Landnutzungsklassifikation (Land-sat 5 TM) und TK 1:10 000.

dann vom SRTM-DHM abgezogen, um das für die hydrologische Modellierung notwendige vegetationskorrigierte SRTM-DHM zu erhalten (Abb. 1).

Die Höhe der resultierenden Streuzentren liegt bei Radarwellen in Abhängigkeit von der Wellenlänge, Vegetationsdichte, -struktur und phänologischem Zeitpunkt zwischen Vegetationsoberfläche und dem Boden (HARDING & CARABAJAL 2001). Zur Validierung der Korrekturmethode wurden neben der Landnutzungsklassifikation auch Geländemessungen (Baumhöhenvermessung von Forstbeständen, Kartierung von Baumarten, Bestandsdichte, Bedeckungsgrad, Bestandsalter) durchgeführt, um eine Waldmaske anlegen zu können, mit der letztendlich die SRTM-Höhen automatisiert korrigiert werden konnten. Dazu wurden die SRTM-Bestandshöhen mit den korrespondierenden Geländemessungen in Beziehung gebracht. Diese Höhen wurden unter Berücksichtigung der Eindringtiefe der elektromagnetischen Strahlung in Vegetationsbestände korrigiert. Der durchschnittliche Waldhöhenaufsatz, der sich aus dem Digitalen Höhenmodell extrahieren ließ, entsprach bei 22 Messungen im Durchschnitt lediglich 60% der im Gelände erhobenen Baumhöhen (siehe Abb. 2). Dabei

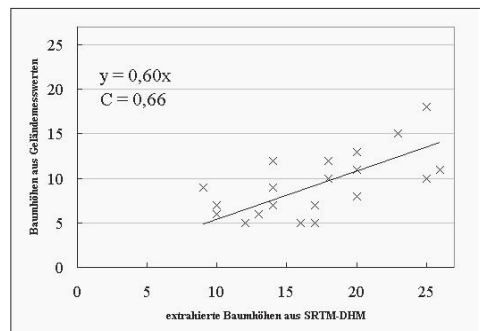


Abb. 2: Scattergramm zwischen DHM-Baumhöhen und im Gelände gemessenen Baumhöhen.

zeigte sich eine starke Abhängigkeit vom Bestandsalter und der Bestandsdichte. Während die Rückstreuung der X-Band-Wellen direkt im Kronendach der Bäume zu erwarten gewesen wäre, stellte sich heraus, dass ein Teil der elektromagnetischen Wellen weitaus tiefer in die Waldbestände eindrang.

Verantwortlich dafür ist die Tatsache, dass in den Testgebieten überwiegend ausgewachsene Fichtenbestände auftreten, die kein ausgeprägtes Kronendach aufweisen (Abb. 3), was eine höhere Eindringtiefe der Radarwellen begünstigte. Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Wuchshöhe zum Zeitpunkt der SRTM-Mission (Feb. 2000)



Abb. 3: Typischer Fichtenbestand im Testgebiet Zeulenroda.

berücksichtigt werden muss. Die jährliche Wuchshöhe ist in Abhängigkeit vom Bestandsart und -alter zu korrigieren.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass man die vegetationskorrigierten Höhenmodelle nicht ohne weiteres als Geländemodelle bezeichnen kann. Es handelt sich lediglich um eine Annäherung an die Charakteristik eines Geländemodells im Sinne einer Verbesserung der hydrologischen Eigenschaften für die Ableitung topographisch-hydrologischer Parameter.

3.2 Beseitigung texturbedingter Effekte

Aufgrund des relativ hohen *noise*-Level (small spatial frequency height errors) und vereinzelt auftretender Artefakte in den X-SAR-Daten war die Anwendung spezieller Filtertechniken notwendig. Da konventionelle Filteroperationen (Median-Filter, MATHER 2004) mit einem Verlust an morphologischen Details einher gehen, wurde zunächst ein Tiefpassfilter (*Mexican Hat*) sowie ein Limit-Filter mit einem Fenster von 3×3 Pixeln eingesetzt. Dadurch wurde eine Reduktion des Speckle-Effekts und lokaler Datenfehler erreicht. Die Filtertechnik be-

wirkt eine für die Ableitung hydrologischer Parameter günstige Glättung der Oberfläche, ohne dabei die originalen Höhenwerte der Daten bzw. ihre hydrologischen Eigenschaften übermäßig zu modifizieren. Weiterhin erfolgte neben der lokalen Korrektur von Wasserflächen, die aufgrund von schwacher Kohärenz zum Teil erhebliche Höhenfehler beinhalten, mittels *Kriging*-Interpolation auch die Auffüllung abflussloser Senken. Diese stellen bei der Ableitung des Gewässernetzes unnatürliche Fließhindernisse dar und verursachen bei der Berechnung sekundärer Reliefparameter fehlerhafte Artefakte. Die Beseitigung erfolgte nach dem Verfahren von RIEGER (1998). Dabei wurden die Zellwerte am Auslass der Depression gezielt abgesenkt, so dass die Reliefinformation innerhalb der Senken größtenteils erhalten blieb.

3.3 Ableitung hydrologisch relevanter Parameter

Die Anwendungsmöglichkeiten Digitaler Höhenmodelle in der hydrologischen Modellierung sind abhängig von deren Qualität und räumlichen Auflösung. Die Anwendungsskalen von aus Höhenmodellen abgeleiteten Parametern reichen dabei von der Ableitung mikroskaliger Erosionswege bis hin zu regionalen und überregionalen Stoff- und Energiekreisläufen. SCHMIDT & DIKAU (1999) stellen ein Schema zur Extraktion geomorphometrischer Parameter aus digitalen Höhenmodellen vor. Generell unterscheidet man bei der digitalen hydrologischen Reliefanalyse primäre Reliefparameter, die sich direkt aus den Höhenwerten eines Geländemodells ableiten lassen (z. B. Exposition, Neigung, Wölbung, Einzugsgebietsgröße, etc.) und sekundäre Reliefparameter (z. B. Topographical Wetness Index), die sich aus der Kombination verschiedener primärer Reliefparameter berechnen lassen (MOORE et al. 1992).

Der Topographische Bodenfeuchteindex (engl.: Topographic Wetness Index, $TWI = \ln(A_s/\tan\beta)$) geht auf BEVEN & KIRKBY (1979) zurück. Er beschreibt den Einfluss der Topographie auf das hydrologische Ge-

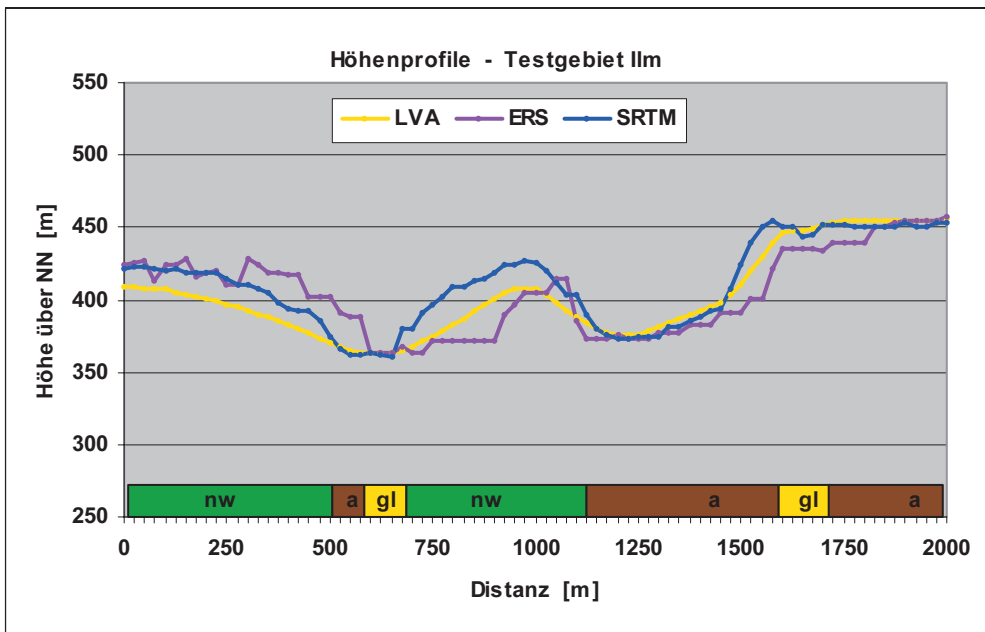


Abb. 4: Profilschnitt Testgebiet Ilm (nicht maßstäblich) mit Landnutzung (nw: Nadelwald, a: Acker-
nutzung, gl: Grünland).

schehen mit A_s als spezifisches Einzugsgebiet und der Hangneigung β , wobei die realistischsten Ergebnisse der Multiple Flow Direction Algorithmus liefert. Durch die Einbeziehung von weiteren Parametern wie z. B. dem Sättigungsdefizit kann der Index als Maß für die Bodenwassersättigung verwendet werden. Der Stream Power Index ($SPI = A_s \tan\beta$) ist ein Maß für die Größe der potenziellen Erosionskraft des Oberflächenabflusses (MOORE et al. 1992). Der Slope-Length Factor [$SL = (m + 1) (A_s/22,13)^m (\sin\beta/0,0896)^n$] stellt einen Index für die Sedimenttransportkapazität dar. Für Hanglängen < 100 m und Hangneigungen $< 14^\circ$ werden nach MOORE et al. 1992 die Konstanten $m = 0,4$ und $n = 1,3$ gesetzt.

4 Ergebnisse

4.1 Geostatistische Analyse der Höhenmodelle

Die geostatistischen Analysen dienen der Untersuchung der SRTM-Daten im Hinblick auf numerische und kontextuelle Ge-

naugigkeiten. Unter anderem wurden hier Texturanalysen, Berechnung des PEARSON-Korrelationskoeffizienten, Streuungsmaße etc. durchgeführt. Infolge der Interferenzerscheinungen in den SRTM-Daten zeigte sich eine leicht verrauschte Textur. Dieser *Speckle*, der sich durch gezielte Filteroperationen beseitigen ließ, bewegt sich in einem Bereich von 1–3 m und schlägt sich in den Werten der Streuungsmaße nieder. Der Einfluss der Landnutzung ist in den Rasterdaten unverkennbar.

Über Waldgebieten weist das SRTM-DHM wegen seiner relativ hohen Kohärenz wesentlich genauere Ergebnisse auf als das ERS-Tandem-DHM. Mit Ausnahme der Gewässer treten keine Abweichungen bzw. Dekorrelationseffekte auf. Die Ergebnisse der bivariaten statistischen Untersuchungen zeigen, dass die Qualität der SRTM-Daten sehr zufriedenstellend ist, im Vergleich mit GPS- und TK10-Referenzpunkten sogar besser als die Herstellerhöhengenaugigkeit von 5–6 m. Für das Testgebiet Zeulenroda lag die mittlere Differenz zu den GPS-Messungen bei $-1,8$ m, zu den TK10-Höhen-

punkten bei $-2,8$ m. Der RMS-Fehler war mit $3,5$ m nur wenig höher als im E-SAR-DHM ($3,0$ m) und im LVA-DGM ($2,8$ m). Die größten Fehler traten aufgrund der Dekorrelation bei Wasserflächen auf, so dass diese Flächen ausmaskiert wurden und der Höhenwert aus der Topographischen Karte übernommen wurde.

Profilдарstellungen ermöglichen eine gute Beurteilung der Datenqualität aus hydrologischer Sicht, da damit die Wiedergabe der Hanggeometrien (konvex, konkav) beurteilt werden kann. Abb. 4 zeigt ein solches Profil aus dem Einzugsgebiet der Ilm in Thüringen, bei dem deutlich wird, dass das SRTM-DHM den Geländeverlauf bedeutend akkurater nachbildet als das ERS-DHM, welches aufgrund der temporalen Dekorrelationen enorme Abweichungen bei der Wiedergabe der Höhe über Waldgebieten zeigt. Die linke Talflanke wird trotz unruhiger Textur des Waldaufsatzes noch nachvollziehbar abgebildet. Jedoch treten an der rechten Talseite massive Abweichungen zum LVA-DGM auf, bei denen es sich offenbar um Höhenfehler aufgrund niedriger Kohärenz über Wald handelt. Das SRTM-DHM dagegen gibt die Hangform trotz des Höhengaufsatzes der Waldbestände (ca. $10-20$ m) kontinuierlich und ohne Höhengsprünge wieder. Insgesamt hat sich gezeigt, dass die Single-Pass-Konfiguration aufgrund der stabilen Basis-

linienabstände und der Minimierung temporaler Dekorrelationen eine erhebliche Verbesserung der numerischen und kontextuellen Genauigkeit gegenüber dem herkömmlichen Verfahren der Repeat-Pass-Interferometrie ermöglicht.

4.2 Generierung der Reliefparameter

Innerhalb eines Geographischen Informationssystems wurden Hangneigung, Exposition, Wölbung, Abflussrichtungen, Einzugsgebietsgrenzen, Fließakkumulation, Fließlänge und Entwässerungsnetz als primäre-, Topographic Wetness Index (TWI), Stream Power Index und SL-Faktor als sekundäre Reliefparameter berechnet. Der Vergleich der abgeleiteten Entwässerungsnetze hat gezeigt, dass die geometrische Genauigkeit der Reliefpräsentation des SRTM-DHM sehr hoch ist. Während beim ERS-Tandem-DHM zum Teil erhebliche horizontale Lageverschiebungen bei der Extraktion der Tiefenlinien im Vergleich zum Referenzmodell nachgewiesen wurden, verliefen die Abflussbahnen des SRTM-DHM nahezu deckungsgleich mit dem LVA-DHM (Abb. 5). Trotz der unterschiedlichen Geländecharakteristik der drei Untersuchungsgebiete offenbarten die Analysen keine reliefabhängigen Fehler im SRTM-DHM, welche sich nachhaltig auf die abgeleiteten Parameter

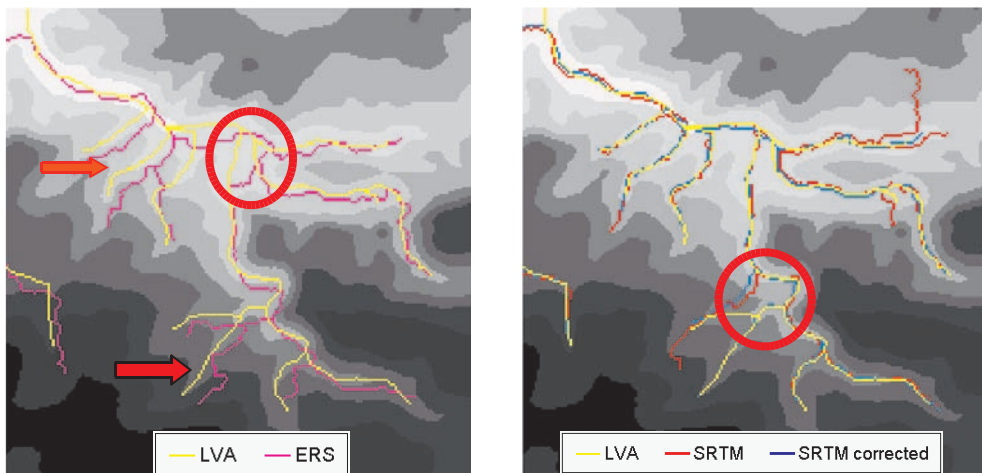


Abb. 5: Vergleich der abgeleiteten Gewässernetze im Testgebiet Ilm.

ausgewirkt hätten. Selbst zwischen SRTM-Kreuzungspunkten auf- und absteigender Aufnahmeorbits und einfach beleuchteten Geländeausschnitten konnten keine signifikanten Qualitätsunterschiede nachgewiesen werden. Die Vorteile der zweifach beleuchteten Geländeausschnitte kommen offensichtlich erst im reliefenergiereichen Hochgebirge zum tragen, wenn die Hangneigungswerte 50° überschreiten und somit der Einfallswinkel nicht ausreicht, die Schattenbereiche steiler Hänge zu erreichen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Da das Relief die hydrologische Prozessdynamik eines Einzugsgebiets steuert, stellt es einen Kernparameter für den Modellinput dar. Die Digitalen Geländemodelle nehmen in der Prozessmodellierung infolgedessen eine unverzichtbare Stellung ein. Die enormen Fortschritte im Bereich der Informationstechnologien haben der digitalen Reliefanalyse und damit der hydrologischen Modellierung neue weitreichende Möglichkeiten eröffnet.

Berücksichtigt man bei der Bewertung der SRTM-Daten die Verhältnismäßigkeit zur Auflösung und den Abbildungseigenschaften, wird das Potenzial der orbitgestützten Single-Pass-Interferometrie deutlich. In den durchgeführten Analysen ergaben sich klare Vorteile gegenüber bisherigen Höhenprodukten mit vergleichbarer Skalierung (z. B. ERS-1/2-DHM) in punkto Genauigkeit, Qualität und Konsistenz.

Trotz der hervorragenden Qualität der SRTM-Daten müssen sie vor der Verwendung in hydrologischen Fragestellungen einer Vorverarbeitung unterzogen werden, um den erforderlichen Standards gerecht zu werden. Hierzu wird eine Korrektur des SRTM-Reliefs durch Filterung, Beseitigung abflussloser Senken und Korrektur von vegetationsbedingten Höhenaufsetzungen, Gebäudeinformationen und fehlerbehafteten Wasserflächen empfohlen. Dennoch kann die in der Zielsetzung formulierte Frage nach der Datenqualität als eindeutig positiv beantwortet werden. Für den Bereich mesoskaliger hydrologischer Modellierungen lie-

fert das SRTM-DHM qualitativ gute Ergebnisse. Die Daten sind für kleine Einzugsgebiete hervorragend geeignet und stellen damit eine vielversprechende Alternative zu existierenden DHMs dar.

Derzeit werden die Arbeiten mit den amerikanischen SIR-C/SRTM-Daten fortgesetzt, die global in einem 90 m Raster frei verfügbar sind. Diese weisen aus hydrologischer Sicht einen gravierenden Vorteil gegenüber den X-SAR-Daten auf: sie liegen flächendeckend vor und können aufgrund der Datenhomogenität deshalb in der grenzübergreifenden Einzugsgebietsmodellierung problemlos eingesetzt werden.

Literatur

- BAMLER, R., EINEDER, M., KAMPES, B., RUNGE, H. & ADAM, N., 2003: SRTM and beyond: current situation and new developments in spaceborne InSAR. – Proceedings of Joint ISPRS / EARSeL Workshop "High resolution mapping from space 2003", Oct. 6th-8th.
- BEVEN, K.J. & KIRKBY, M.J., 1979: A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. – *Hydrological Science Bulletin* **24**: 43–69.
- BROCKMANN, H., 1998: Einsatzmöglichkeiten der flugzeuggestützten Laser-Scanner-Technik zur Erfassung räumlich-hydrologischer Informationen an Fließgewässern. – *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen* **42** (2): 68–75.
- GÜNDRA, H., ASSMANN, A. & JÄGER, S., 2000: Geomorphologische Parameter mit hydrologischer Relevanz und die Qualität der zugrunde liegenden Digitalen Höhenmodelle. – *Hydrologie und Wasserwirtschaft* **3**: 114–121.
- GÜVEN, K., BUYUKSALIH, G. & JACOBSEN, K., 2004: Analysis of Digital Elevation Models determined by high Resolution Space Images. – *Int. Arch. PhRS*, Band XXXV, Teil B4: 636–641; Istanbul.
- HAJNSEK, I., 2001: Pilotstudie Radarbefliegung der Elbaue. Abschlussbericht. – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme, Oberpfaffenhofen.
- HARDING, D.J. & CARABAJAL, 2001: SRTM and Laser Altimeter View of Western Washington State Topography. – *Eos Trans. AGU* **82**(47).
- HOCHSCHILD, V., 2001: Die Integration hochauflösender Fernerkundungsdaten für die physiographische Parametrisierung von Wasser- und

- Stofftransportmodellen – Fallbeispiele aus Thüringen und dem südlichen Afrika. – Habilitationsschrift, FSU Jena.
- HOCHSCHILD, V. & WOLF, M., 2004: ABLEITUNG hydrologisch relevanter Reliefparameter aus X-SAR/SRTM-Höhenmodellaten. – In: STROBL, J., BLASCHKE, T. & GRIESEBENER, G. (Hrsg.): *Angewandte Geoinformatik 2004*. – Beiträge zum 16. AGIT-Symposium Salzburg, 237–242; Heidelberg.
- KOCH, A., HEIPKE, C. & LOHMANN, P., 2002: Analysis of SRTM DTM – Methodology and Practical Results. – IPI Universität Hannover, Commission IV, WG IV/6.
- MATHER, P.M., 2004: *Computer Processing of Remotely Sensed Images*. – Wiley.
- MOORE, I.D., GRAYSON, R.B. & LADSON, A.R., 1992: Digital Terrain Modelling: A Review of Hydrological, Geomorphological and Biological Applications. – In: BEVEN, K.J. & MOORE, I.D. (eds.): *Terrain analysis and distributed modelling in hydrology*. – 7–34.
- REICH, M. & THIEL, K.-H., 2002: Vergleich von Höhenmodellen. – Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Band 11, Vorträge 22. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF 24.–26. September 2002, Neubrandenburg.
- RIEGER, W., 1998: A phenomenon-based approach to upslope contributing area and depression in DEMs. – *Hydrological Processes* **12**: 857–872.
- SCHMIDT, J. & DIKAU, R., 1999: Extracting geomorphometric attributes and objects from digital elevation models. – In: DIKAU, R. & SAURER, H. (Hrsg.): *GIS for Earth Surface Systems – Analysis and Modelling of the Natural Environment*. – 153–174; Berlin.
- SCHMULLIUS, C., FLÜGEL, W., FROTSCHER, K., HOCHSCHILD, V., & MÜSCHEN, B., 2000: The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) and Applications in Europe, Africa and Siberia. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* **2000** (5): 361–366.
- Anschriften der Verfasser:
- Dipl.-Geogr. MARKUS WOLF
Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Geographie, Löbdergraben 32, D-07737 Jena,
Tel.: 03641-948 884, FAX: 03641-948 852,
e-mail: Markus.Wolf@uni-jena.de
- Prof. Dr. rer. nat. VOLKER HOCHSCHILD
Universität Tübingen, Institut für Geographie,
Rümelinstr. 19–21, D-72074 Tübingen,
Tel.: 07071-2975316, FAX: 07071-295318
e-mail: c7bokl@geogr.uni-jena.de
- Prof. Dr. rer. nat. CHRISTIANE SCHMULLIUS
Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Geographie, Löbdergraben 32, D-07737 Jena,
Tel.: 03641-948 877, FAX: 03641-948852,
e-mail: c9srech@uni-jena.de
- Manuskript eingereicht: Februar 2005
Angenommen: Mai 2005