

2.5 Relief (TP II-1b)

Teilprojektleiter: Prof. Dr.-Ing. R. Bill

Bearbeiter: Dipl.-Ing. F. Schmidt

2.5.1 Zusammenfassung

Das Teilprojekt „Relief“ untersucht, wie die Form der Geländeoberfläche, die für viele landschaftsökologische Prozesse ein wichtiger Regler ist, in die technologische Kette von precision agriculture eingebunden werden kann. Notwendig ist dazu ein digitales Geländemodell (DGM), das in einem Geo-Informationssystem (GIS) analysiert und mit anderen raumbezogenen Daten eines Schlags in Beziehung gesetzt wird. Natürliche Prozesse, die auf einem Schlag stattfinden, können erklärt und bei Anwendungen berücksichtigt werden. Das Teilprojekt bearbeitet folgende Fragestellungen:

- Welche Qualitätsanforderungen sind an DGMe für landwirtschaftliche Anwendungen zu stellen (räumliche Auflösung, Höhengenaugigkeit, Struktur)?
- Welche Erfassungsmethode hat bei diesen Qualitätsanforderungen das beste Kosten/Nutzen-Verhältnis?
- Welche Analysemethoden können aus dem DGM Ableitungen berechnen, die den Reliefeinfluss, der für einzelne *pre agro*-Module von Relevanz ist, quantitativ beschreiben?

Bisher wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Für 53 Projektschläge wurden DGMe bereitgestellt. Für 41 Projektschläge liegen sowohl Daten der Landesvermessung als auch hochgenaue Vermessungen durch Überfahrten mit RTK-GPS vor (1.275 ha). Als weitere zukunftsorientierte Datenquelle wurde ein Laser-Scanner-DGM für einen Projektbetrieb durch die Firma TOPSCAN aufgenommen und durch das Teilprojekt untersucht und ausgewertet.
- Das „Wetness Index-Konzept“ (Beven & Kirkby, 1979) wurde als geeignete DGM-Analysemethode identifiziert und als Datenebene für die *pre agro*-Module bereitgestellt.
- Die Anforderungen an ein DGM zur Berechnung des Wetness-Index für Anwendungen auf Schlag-/Teilschlagebene beinhalten die Repräsentation von bodenhydrologisch wirksamen Reliefformen. Als günstigste DGM-Struktur für die Modellierung wurde das Raster (Grid) ermittelt. Eine Rasterweite von 2 - 10 m ist für die Modellierung anzustreben, je nach Größe und Verteilung der Reliefformen des Untersuchungsgebietes. Die Höhengenaugigkeit sollte besser als $\pm 0,1$ m sein.
- Die Karten der elektrischen Leitfähigkeit (ECa) können bei Verschneidung mit dem Wetness-Index besser interpretiert werden (Tongehalts-Vorhersagen und Erosionsmuster).
- Die Ableitung verschiedener Indices, darunter Wetness-Index, Stream-Power-Index und Slope-Length-Factor wurde in der ersten Testversion eines Relief-Modules („Topocrop.avx“) mit der Programmiersprache AVENUE für ArcView-Grids umgesetzt.
- Für die Anwendung in den Entscheidungsunterstützungsmodulen zum pflanzenbaulichen Management wurden zusätzlich Indizes zu reliefbedingtem Auswinterungspotential sowie für die Berücksichtigung ökologischer Ziele erarbeitet.

Summary

Terrain has a considerable effect on the natural yield capability. Terrain influences soil formation, water balance, micro-climate and thus is one of the main factors causing heterogeneity on arable land. Digital Terrain Models (DTMs) can be used to include the effects of terrain into the planning of agricultural applications. This study investigates the quality requirements (spatial resolution, elevation accuracy and structure of DTMs) and the best suited methods to capture, process and analyse elevation data. So far, DTMs for 53 project plots have been generated. For most plots, RTK-GPS was used. Airborne laser scanning was investigated on two farms. Derivations from the DTMs include maps of the topographic wetness index (TWI), the length-slope factor of the RUSLE and susceptibility to frost damage. A grid resolution of 2-10 m and an elevation accuracy of ± 0.1 m is necessary for the modeling of pedohydrologic processes on the plot scale. This is not given by usual data from mapping agencies. A practical use of terrain modeling is the derivation of the pattern of potential soil moisture. This information was provided to the modules for site-specific tillage, seeding and fertiliser application.

2.5.2 Bezug zum Verbundprojekt/Bedarf seitens anderer Teilprojekte

Die Bedeutung des Reliefs für die Pflanzenproduktion beruht auf seinem Einfluss auf die Bodengenese, den Wassertransport, das Mikroklima und damit auf das Pflanzenwachstum. Die technologische Bedeutung des Geländes basiert auf der Beeinflussung der Arbeitsqualität von Maschinen sowie auf dem Einfluss auf Sensorleistungen (z. B. bei der Entzerrung und Interpretation von Luftbildern, der Ertragskartierung und der geoelektrischen Bodenkartierung). Deshalb werden das Geländemodell und daraus abgeleitete Parameter von mehreren Teilprojekten verwendet. In folgende *pre agro*-Module fließen bereits jetzt Reliefinformationen aus dem DGM ein: Bodenbearbeitung, Aussaat, N-Düngung und Grunddüngung. Die derzeitige Konzeption, Reliefinformationen in die Module zu integrieren, besteht aus der Verschneidung mit Extrema aus DGM-Derivaten. Als geeigneter Parameter für die Repräsentation der Feuchte- und damit auch Boden- und Wachstumsbedingungen für die Pflanzen erwies sich der Topografische Wetness-Index, TWI (Moore et al., 1993; Schmidt, 2001b). Potentielle Vernässungszonen in Mulden, Erosionsrinnen, konvergierende, optimal versorgte Bereiche und potentielle Trockenbereiche an Hangschultern (bedingt durch Erosion und starken Bodenwasserabfluss bei kleinem Zuflussgebiet) lassen sich über Wetness-Index-Extrema erkennen. Eine gezielte Zusammenarbeit besteht mit den Teilprojekten „Bodenwasserspeicher“, „Hof-Bodenkarten“, „Luftbilder“, „Boden- und Bestandesführung“, „Bodenbearbeitung und Bestellung“ und „Düngung“. Eine gemeinsame Untersuchung mit dem TP „Bodenwasserspeicher“ zeigte, wie TWI-Karten bei der Interpretation von Karten der elektrischen Leitfähigkeit (ECa) wertvolle Hinweise auf den Bodenwasserhaushalt geben (Bobert et al., 2001). Neben den Rückschlüssen auf die räumliche Verteilung des oberflächennahen Bodenwassergehaltes sind folgende Daten von Bedeutung für andere Teilprojekte: Zur Erstellung der „Hof-Bodenkarten“ werden die aus dem DGM abgeleiteten Höhenlinien hinzugezogen, um Grenzen zwischen Bodenformen bereits im Feld zu ziehen und die Positionen für optimale Beprobungspunkte zu finden. Das TP „Luftbilder“ verwendet das DGM zur Abschätzung der Entzerrungs-Notwendigkeit für Luftbilder auf Grund von reliefbedingtem Bildversatz oder zur Optimierung der Bildflugplanung (Schmidt und Irrgang, 2000) und das TP „Naturschutzziele“ fand eine gute Korrelation zwischen den TWI-Fließpfaden und den Aufenthaltsorten der Amphibienpopulationen auf den Projektschlägen in Kassow.

Für die gezielte Nutzung der umfangreich vorhandenen DGM-Daten besteht großer Bedarf an Algorithmen/Indices, die für die jeweilige Aufgabe die optimale Reliefinformation aus dem DGM extrahieren. Dies kann nur in Zusammenarbeit mit Daten und Wissen der jeweiligen Fach-TP realisiert werden, denn nicht die Höheninformation selbst, sondern möglichst automatisch daraus berechnete Ableitungen tragen zur Effizienzsteigerung von precision agriculture bei.

2.5.3 Einleitung und Problemstellung

Das Relief beschreibt die Form der Erdoberfläche. Seine Nachbildung im Rechner ist das digitale Geländemodell (DGM). Als Hauptumsatzfläche für Strahlung und Wasserhaushalt ist das Relief Regler für die Bodenbildung, das Verhältnis von Abfluss und Versickerung, Stofftransporte, das Mikroklima und trägt entscheidend zur standörtlichen Differenzierung der Landschaft bei. Das Relief bestimmt die räumliche Verteilung der energetischen und stofflichen Potentiale und damit Richtung und Ausmaß der Wasserbewegung im Gelände als Reaktion eines Einzugsgebietes auf ein Niederschlagsereignis. DGMs leisten bei der Erstellung von Applikationskarten einen Beitrag zur Berücksichtigung der natürlichen Heterogenität eines Schläges. Ein DGM besteht aus dreidimensionalen Koordinaten (x,y,z), Anweisungen zur Strukturierung der Daten und den (Interpolations-) Algorithmen (Bill, 1999). Die Menge der Höhenwerte als Funktion der Lage der Punkte wird als Digitales Höhenmodell (DHM) bezeichnet. Die bisher übliche Anwendung von DGMen im agrartechnischen Bereich beschränkte sich zumeist auf die visuelle Interpretation. Dies gestattet zwar oft ein Erkennen von lehrbuchhaft ausgebildeten landschaftlichen Phänomenen, wie z. B. Erosionsrinnen, eine mathematisch nachweisbare Korrelation zu Messdaten von Zuständen in der Landschaft ist jedoch selten vorhanden. Meist wurden Reliefeinheiten in Studien auf landwirtschaftlichen Flächen ausgegrenzt, um gezieltere Bodenbeprobungen zu realisieren oder Ertragsvariabilitäten zu erklären (MacMillan et al.; 2000, Nolan et al., 2000; Nugteren und Robert, 1999). Die wesentliche Neuerung des Teilprojektes besteht in der Entwicklung einer Methodik zur Erfassung und Analyse von DGMen im Maßstabbereich 1:5.000 mit dem Ziel, den Informationsgewinn in teilschlagspezifische Maßnahmen zu integrieren. Die Arbeit in diesem Maßstabbereich ist erst in den letzten Jahren durch neue Technologien in der DGM-Erfassung wie RTK-GPS und flugzeuggetragene Laser-Scanner ermöglicht worden. Das TP „Relief“ greift auf einfache Index-Konzepte zurück, um die Landschaft mit Hilfe des DGMs zu segmentieren. Speziell in der Landwirtschaft ist ein komplexes Modell, das auf viele Eingangsparameter angewiesen ist, von Nachteil, da die Bereitstellung der Eingangsparameter häufig den größten Kostenpunkt bedeutet. Das Wetness-Index-Konzept beruht primär auf einer Auswertung des reinen Höhenmodells und ist somit nicht auf aufwändig zu erhebende Felddaten angewiesen. Die Einbindung zusätzlicher Boden- und Klimadaten ist möglich, sofern diese vorliegen. Die Wetness-Index-Modelle wurden mangels hochgenauer DGMs meist im mittelmaßstäbigen Bereich angewendet. Erste Korrelationsrechnungen mit Felddaten im Maßstabbereich von Teilschlägen zeigten für verfügbare DGMs der Landesvermessung schwache Korrelationen. Die visuelle Interpretation ließ jedoch auf grundsätzliche Zusammenhänge von berechneten Regionen höherer Bodenfeuchte und Feuchte anzeigenden Bereichen aus Luftbildern schließen. Dies zeigte die Notwendigkeit von hochgenauen DGMen zur Überprüfung der Modelle im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit in der Landwirtschaft.

2.5.4 Material und Methoden

2.5.4.1 Erfassung der Geländehöhen

2.5.4.1.1 Real-Time-Kinematic GPS (RTK-GPS)

Das vom Institut für Geodäsie und Geoinformatik der Universität Rostock untersuchte Verfahren nutzt einen mobilen Zweifrequenzempfänger (Leica SR 399) mit einer eigenen Referenzstation. Während die Referenzstation auf einem Festpunkt der Landesvermessung oder einem selbst eingemessenen Punkt verbleibt, wird der Empfänger, der die Koordinaten aufzeichnet („Rover“), in fester Höhe auf einem Fahrzeug montiert. Das Fahrzeug befährt die Fahrgassen, ohne den Pflanzenbestand zu beeinträchtigen. Die Referenzstation übermittelt Korrekturdaten in Echtzeit. Bereits im Feld werden die korrigierten Koordinaten der vermessenen Punkte berechnet. Bei einer Aufzeichnungsrate von einem Punkt pro Sekunde ergibt sich, je nach Fahrgeschwindigkeit, ein Punktabstand von 1,5 - 6 m entlang der Fahrgassen. Die ungünstige Erfassungsgeometrie (hohe Datendichte in Fahrtrichtung aber wenige Daten transversal dazu) kann mit geostatistischen Verfahren (Kriging-Interpolation) ausgeglichen werden. Durch die Dichte der Aufnahmepunkte werden Reliefformen für die Modellierung der hydrologischen Eigenschaften der Geländeoberfläche ausreichend genau erfasst.

2.5.4.1.2 Laser-Scanning

Die Vermessung mit flugzeuggetragenen Laser-Scannern wird seit den 90er Jahren erfolgreich zur Erstellung von DGMen getestet und inzwischen kommerziell angeboten. Vorteile des Laser-Scannings für die Landwirtschaft sind die hohe Genauigkeit (ca. $\pm 0,1$ m in der Höhe; Briese und Pfeifer, 2001) und die hohe Punktdichte (bis 5 Punkte pro m^2). Laser-Scanner-Befliegungen finden im Auftrag der Landesvermessung bereits in einzelnen Bundesländern statt, z. B. in Baden-Württemberg. Wegen hoher Fixkosten lohnt sich das Verfahren erst bei großen Flächen. Sollten die Daten zukünftig bei der Landesvermessung vorliegen, wären sie eine ideale Basis für die Landwirtschaft.

2.5.4.1.3 DGMe der Landesvermessung

Die Mehrzahl der DGMe der Landesvermessung basiert derzeit noch auf den Höhenlinien topografischer Karten oder der Stereophotogrammetrie mit Rasterweiten ab 10 m. Für einige Regionen Deutschlands sind keine räumlichen Auflösungen unter 50 m verfügbar. Nur vereinzelt werden bereits Laser-Scanner-DGMe angeboten, so für die *pre agro*-Betriebe Raesfeld und Beckum. Die Grundkosten für ein DGM der Qualitätsstufe I (Gitterweite 10-20 m) betragen ca. 100 DM/km². Ein Qualitätsvergleich von einem 10 m ATKIS-DGM für den Schlag Kiesberg (14 m Höhendifferenz) mit 1.800 präzisen RTK-GPS-Messpunkten ergab einen RMS-Fehler von 0,55 m (nach Elimination eines Offsets von 1,9 m). In kuppertem Relief wurden für die Datenquelle TK 10 allerdings auch Abweichungen bis zu 6 Höhenmeter festgestellt.



2.5.4.2 Generierung des DGMeS

Um von den ungleichmäßig verteilten Höhenmesspunkten auf eine kontinuierliche, für Modellierungen geeignete Oberfläche zu gelangen, ist eine Interpolation der Messpunkte notwendig. Je geringer die Messpunktdichte ist, desto stärker beeinflusst die Wahl des Interpolationsverfahrens das Erscheinungsbild der berechneten Oberfläche. Untersucht wurde die Eignung der Verfahren, die ArcView SpatialAnalyst, ARC/INFO, Surfer 7.0 und SCOP bieten.

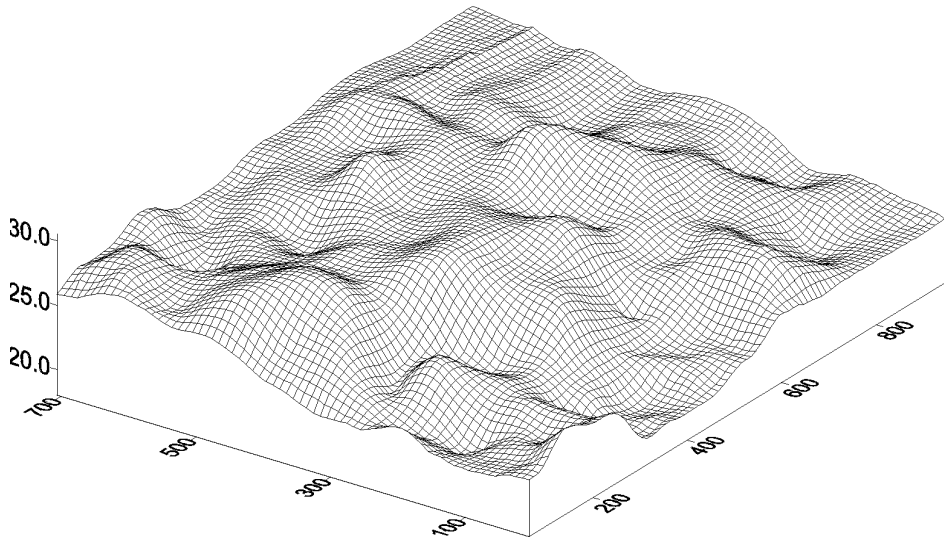


Abb. 2.5-1: DGM als Wireframe-Modell (Kassow, Schlag 111, 8-fach überhöht)

Fig. 2.5-1: Wireframe model of Kassow DEM, plot 111. (Vertical exaggeration factor: 8)

2.5.4.3 Ansätze zur Analyse des DGMeS

2.5.4.3.1 Einführung

Vergleichsweise wurden die DGMe mit einem prozessbasierten und einem formbasierten Ansatz in Klassen zur spezifischen Bewirtschaftung eingeteilt. Der formbasierte Ansatz führt zu geomorphologisch bestimmten Formelementen (Kombination von Vertikal- und Horizontalkrümmung). Mit dem hydrologisch-prozessorientierten Ansatz („Terrain Analysis“, Wilson & Gallant, 2000) werden aus dem DGM quantitative Parameter für jede Rasterzelle abgeleitet. Verwendet wurden dazu das Programmpaket TAPES-G und einige durch das Teilprojekt entwickelte AVENUE-Scripte auf Basis des ArcView SpatialAnalyst. Die Algorithmen zur Ableitung von primären, direkt aus den Geländehöhen gewonnenen Parametern basieren auf einem zentralen Finite-Differenzen-Ansatz, der vom zentralen Rasterelement einer sich über das DGM bewegendem 3*3-Matrix ausgeht und die Beziehungen zu den acht Nachbarelementen auswertet. Wegen der einfachen

rechenstechnischen Umsetzung von hydrologischen Algorithmen bei Rastermodellen wird in den meisten Fällen das „Grid“, das aus quadratischen Zellen besteht, zur Strukturierung der Höhendaten verwendet. Triangulierte Irreguläre Netzwerke (TIN) werden bei Modellierungen selten genutzt, da sie in flachen Bereichen dazu tendieren, ebene Dreiecke zu erzeugen, auf denen keine Fließrichtung bestimmbar ist. Dieses Problem tritt speziell bei linienförmiger Aufnahmegeometrie (z. B. mobiler GPS-Vermessung) auf.

2.5.4.3.2 Der Topografische Wetness-Index

Eine Methode zur flächenbezogenen Prognose von Bodenparametern bietet das Konzept des „Topografischen Wetness Index“ (TWI). Der TWI ist eine nichtlineare Kombination aus dem spezifischen Einzugsgebiet (A_s) eines Punktes und der lokalen Geländeneigung $\tan\beta$:

$$\ln(A_s/\tan\beta).$$

Dieser von Beven und Kirkby (1979) erstmals präsentierte Index basiert auf der Annahme, dass die Geländeform die Wasserbewegung auf einer Oberfläche und im oberflächennahen Boden bestimmt und somit über die räumliche Verteilung des Bodenfeuchtemusters entscheidet. Hohe Index-Werte sind charakteristisch für konvergierendes, flaches Gelände. Niedrige Werte treten in steilem Terrain mit kleinem Zuflussgebiet auf. Das Konzept gilt nur, wenn der laterale Fluss einen essenziellen Anteil am Bodenwasserfluss eines Einzugsgebietes umfasst. Da die Durchlässigkeit der meisten natürlichen Böden mit der Tiefe abnimmt, kann sich, flächenhaft betrachtet, auch bei geringen Neigungen ein hydraulischer Gradient ausbilden, der zu einer lateralen Komponente des Abflusses führt, auf Äckern z. B. in Pflugsohlentiefe. Die vertikale Komponente der Bodenwasserbewegung wird als homogen innerhalb des Untersuchungsraumes betrachtet und deshalb als von geringem Einfluss auf die Varianz der räumlichen Verteilung der Bodenfeuchte angenommen. Da der Wetness-Index sensibel auf Konvergenz und Divergenz des Geländes reagiert, ist für die rechnergestützte Ermittlung des TWI ein DGM mit einer entsprechend hohen Auflösung und glatten Oberfläche gefordert.

Die Herleitung des TWI beruht auf dem Bodenwasserfluss q_i als Produkt der Geländeneigung und der Bodendurchlässigkeit. Letztere wird als Funktion der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und des Abstandes der Geländeoberfläche zu einem Stauwasserspiegel angenommen. Prinzipiell sollte der Index zeigen, in welchen Bereichen eines Einzugsgebietes reliefbedingt zuerst Sättigung erreicht wird und damit Oberflächenabfluss einsetzt. Dies kann als Langzeit-Bodenfeuchte-Index interpretiert werden (Wilson und Gallant, 2000). Weitere, in den 90er Jahren entwickelte Indizes können durchschnittliche Abflusszeiten zwischen einzelnen Niederschlagsereignissen (bis zur hypothetischen Einstellung des Gleichgewichtes zwischen Zu- und Abfluss) durch eine Verminderung des spezifischen Einzugsgebietes berücksichtigen. Für die Berechnung der Fließzeit unter Berücksichtigung des Darcy-Gesetzes wird die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit K_f und die Porosität f als hochaufgelöstes Raster erforderlich.



2.5.5 Ergebnisse

2.5.5.1 Erfassung der Geländehöhen

Für landwirtschaftlich nutzbare DGMe eignen sich RTK-GPS (als Dienstleistung inklusive Oberflächen-Generierung und Auswertung für Betriebe) und Laser-Scanning (für den landwirtschaftlich regionalen Maßstab). Die DGMe, die derzeit von den Landesvermessungsämtern angeboten werden, erfüllen die Qualitätsanforderungen in der Regel nicht (Schmidt, 2001a).

Im Jahre 2001 wurde als neue „low-cost“-Variante die Mittelung von Mehrfachüberfahrten mit einem 8-Kanal-DGPS-Empfänger (Trimble ACE 2) in Zusammenarbeit mit M. Toft, Fa. Dronningborg, untersucht. Die aus neun Überfahrten mit einer Einzel-Messgenauigkeit von $\pm 1,5$ m erstellten DGMe erreichten zwar durch gezielte Filterung und Mittelwertbildung für 60 % der Fläche eine Genauigkeit besser als $\pm 0,5$ m und damit vergleichbar den DGMen der Landesvermessung, jedoch wirkten sich die verbleibenden Fehler sehr stark auf die Ableitung der Fließrichtung und damit den TWI aus. Weitere Versuche sind mit Kopplung eines präzisen Inklinometers für 2002 geplant. Bei der notwendigen Anzahl von 6 - 10 Überfahrten (theoretische Genauigkeitsverbesserung um \sqrt{n} mit n = Anzahl der Überfahrten) bedeutet dies allerdings eine hohe Anzahl an Überfahrten oder eine lange Wartezeit, bis die Eingangsdaten für das Geländemodell vorliegen. Der höhere Nachbearbeitungsaufwand (die Mittelwertbildung von vielen, nicht identisch liegenden Einzelpunkten) ist ebenfalls zu berücksichtigen.

2.5.5.2 Generierung des DGMe

Die Erstellung von DGMen aus RTK-GPS-Höhenmesspunkten mit stark linienförmiger Aufnahmegeometrie für hydrologische Auswertungen erfordert anspruchsvolle Interpolationsalgorithmen. Als gleichwertig erwiesen sich bei Untersuchungen mit den Vermessungsdaten der Projektschläge das Ordinary Kriging (nach Modellanpassung an empirische Variogramme), die lineare Prädiktion mit lokal angepasster Kovarianzfunktion (SCOP; Kraus, 2000) und lokal angepasste thin-plate Splines (ARC/INFO-Topogrid-Tool; Hutchinson, 1996). Die Vorteile der ersten beiden Verfahren liegen u. a. in der Möglichkeit, einen Filterwert festzulegen, mit dem gezielt die Glättung der Geländeoberfläche gesteuert werden kann. Der Filterwert lässt sich aus dem Variogramm schätzen oder aus der bekannten Messgenauigkeit angeben. Alle drei Verfahren erfordern Hintergrundwissen. Von automatischen Modellanpassungen bei Kriging-Interpolationen, wie in ArcView-Erweiterungen möglich, ist abzuraten. Für die Anwendung des Topogrid-Tools in Jungmoränenlandschaften ist es notwendig, auf das Entfernen von Mulden („spurious pits“) zu verzichten, da diese real vorkommen. Weitere Spline-Methoden, wie „Minimum Curvature“, beginnen in Bereichen geringer Messpunktdichte stark zu schwingen und führen zu großen maximalen Fehlern, auch wenn weite Bereiche sehr gut abgebildet werden. Die in Standard-GIS integrierten Verfahren wie IDW, Spline oder Triangulation mit linearer Interpolation zeigten zwar gleichwertige Ergebnisse bei günstiger Messpunktverteilung, berechnen bei linearen Messpunktstrukturen (hoher Fahrgassenabstand) jedoch Artefakte.

Aus den Höhenmesspunkten mit einer Einzelgenauigkeit von $\pm 0,02$ bis $\pm 0,1$ m wurden Oberflächen mit einer Schätzgenauigkeit bis $\pm 0,06$ m im halben Fahrgassenabstand, also in den am weitesten von den Eingangspunkten entfernt liegenden Schätzpunkten, erreicht. Die Ergebnisse von Genauigkeitsuntersuchungen sind in Tabelle 2.5-1 zusammengestellt. Zur

Ermittlung der Werte wurde der RMS-Fehler im halben Fahrgassenabstand durch Kontrollpunkte einer dichteren Befahrung in verschiedenen Testgebieten auf den Schlägen 111 und 104 in Kassow ermittelt. Bei engen Befahrungen liegen die RMS-Fehler der Verfahren dicht zusammen. Die Ergebnisse unterscheiden sich nur in der „Güte“ der Oberfläche. Sobald die Fahrgassen weiter auseinander liegen, behalten nur Kriging, SCOP und Topogrid die hohe Schätzgenauigkeit.

Tab. 2.5-1: Schätzgenauigkeiten von Interpolationsverfahren. RMSE = root mean square error, n = Anzahl der verwendeten Kontrollpunkte

Tab. 2.5-1: Accuracy of interpolation. Root mean square error for n control points

Interpolationsmethode	RMSE [m]	Max. Fehler [m]	Messpunkt-abstand [m]	Schlag	n
Spline (tension)	0,06	0,27	18	111	548
Kriging (Gauß-Modell)	0,10	0,42	18	111	548
Minimum Curvature	0,11	0,40	18	111	548
SCOP (Filterwert 0,05)	0,11	0,48	18	111	548
IDW (12 Nachbarn)	0,12	0,44	18	111	548
SCOP (Filterwert 0,05)	0,11	0,43	27	111	769
Kriging (Gauß-Modell)	0,12	0,47	27	111	769
SCOP (Filterwert 0,05)	0,16	0,92	36	104	4830
Kriging (exponentielles Modell)	0,17	0,97	36	104	4830
Topogrid Tool (ARC/INFO)	0,19	1,10	36	104	4830
Minimum Curvature	0,29	3,64	36	104	4830
Spline (tension)	0,36	5,34	36	104	4830
IDW (12 Nachbarn)	0,31	1,52	36	104	4830

Eine Qualitätssicherung ist unabhängig von Referenzmessungen qualitativ-visuell möglich. Ableitungen aus dem DGM reagieren sehr sensibel auf kleine Anomalien und weisen somit auf Fehler der Ausgangsdaten oder Schwächen der Interpolation hin. Ebenso gibt bereits ein einfaches Beleuchtungsmodell („hillshade“) einen guten Eindruck der Qualität der generierten Oberfläche. Als qualitativ hochwertig wird hierbei ein DGM angesehen, das bei minimaler Filterung eine möglichst glatte Oberfläche aufweist. Diese „Glattheit“ ist notwendig für die präzise Vorhersage der oberflächigen Fließrichtungen, welche entscheidend zur Größe des berechneten Einzugsgebietes und damit des TWI-Wertes beitragen. Verfahren mit geringem RMS-Fehler (Tab.2.5-1) führen nicht zwangsläufig zu einer qualitativ hochwertigen Oberfläche. Obwohl IDW und Kriging für ein Testgebiet beide einen RMS-Fehler von 0,12 m aufwiesen, war nur das Kriging-Modell für eine Abflussmodellierung geeignet.

Einen Problemfall für die Modellierung stellen die Laser-Scanner-Daten gerade wegen ihrer hohen vertikalen Auflösung dar. Auf dem Laser-Scanner DGM Kassow (2 m Rasterweite) sind sämtliche Fahrgassen erkennbar, da der dichte, nur ca. 0,1 m hohe Pflanzenbestand zum Aufnahmezeitpunkt (19.03.2000) zu einem Mischsignal aus Geländeoberfläche und Vegetation führte, das bei der Vorfilterung durch TOPSCAN nicht getrennt wurde (Abb. 2.5-2, s. Anhang). Wird dieses DGM ungefiltert für die Ableitung von Parametern verwendet, pausen sich die Fahrgassen vor allem in den Ableitungen wie den Geländeformen und dem TWI durch. Dies kann durchaus von Vorteil sein (z. B. bei der Identifikation von Erosionsrinnen, die durch Fahrgassen gefördert werden), verfälscht jedoch Interpretationen, die sich auf die Oberflächenform oder oberflächennahe Parameter, wie die Bodenfeuchte, beziehen. Eine mehrfache Filterung ist erforderlich, um die zur Fließrichtungsbestimmung

notwendige „glatte“ Oberfläche zu erhalten. Gute Ergebnisse liefert eine Filterung mit Neighbourhood-Statistik.

2.5.5.3 Ansätze zur Analyse des DGMes

Die Vorhersagen des TWI-Konzeptes wurden mit gravimetrischen Proben und TDR-Sonden sowie Bodenfeuchtedaten von anderen Teilprojekten („Bodenwasserspeicher“, „Hof-Bodenkarten“ und „lokaler N-Austrag“) und Fernerkundungsdaten verglichen. Eine Untersuchung von verschiedenen TWI-Berechnungsverfahren und DGM-Auflösungen wurde zusammen mit A. Persson (Swedish Institute of Agricultural and Environmental Engineering, JTI, Uppsala) durchgeführt (Schmidt und Persson, 2001).

Korrelationen von TWI-Werten und Bodenfeuchtemessungen variieren stark mit der Jahreszeit, Dauer seit dem letzten Niederschlagsereignis und der Auswahl der Messpunkte. Zwanzig morphologisch ausgewählte Punkte auf Schlag 111, Kassow, ergeben Korrelationen von $r^2=0,3$ bis $0,8$. Der zeitliche Verlauf der Korrelation von TWI und Bodenfeuchte in verschiedenen Tiefen ist gemeinsam mit dem TP „Bodenwasserspeicher“ zusätzlich auf dem Schlag 641 (Wulfen) untersucht worden (Bobert et al., 2001). Für Rasterbeprobungen finden sich nur schwache Korrelationen. Visuelle Übereinstimmungen zwischen dem TWI-Muster und Mustern auf bodenzeichnenden Luftbildern ergeben sich für fast alle Schläge. Die Übereinstimmungen von ausgegrenzten TWI-Extrema (Abb. 2.5-2, s. Anhang) und der spektralen Information aus Rot-, Grün- und NIR-Kanälen von zehn bodenzeichnenden Luftbildern wurden mit dem t-Test bzw. Wilcoxon-Rank-Test auf Signifikanz geprüft. Die Hypothese, dass signifikante Mittelwertunterschiede der Spektralinformation zwischen TWI-Extrema-Polygonen vorliegen, konnte für 80 % der untersuchten Schläge nachgewiesen werden, wobei der rote Farbkanal die besten Ergebnisse lieferte. Als problematisch bei dieser Methode stellten sich lokale Restflächen mit Pflanzenbestand und Bodenverdichtung entlang der Fahrgassen dar. Dadurch war eine hohe spektrale Varianz innerhalb der einzelnen Extrema-Polygone gegeben.

Zur Berücksichtigung der Bodenheterogenität bei der TWI-Ableitung wurde eine Verschneidung mit Karten der elektrischen Leitfähigkeit des TP „Bodenwasserspeicher“ und der Universität Potsdam (Dr. Lück) untersucht (Abb. 2.5-3, s. Anhang). Hohe Werte der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit (ECa) repräsentieren in der Regel Böden mit höherem Tongehalt und organischem Anteil. Mit steigendem Tongehalt ist ein Anstieg der Feldkapazität und ein Absinken der hydraulischen Leitfähigkeit (vertikale Wasserbewegung) des Bodens zu erwarten. Beides führt zu einer höheren Bodenfeuchte. Durch die Verknüpfung von reliefbedingter Bodenfeuchte und den räumlichen Unterschieden der potentiellen Versickerung aufgrund der Bodenart, die den Reliefeinfluss überprägen kann, ist eine verbesserte Schätzung des tatsächlichen Bodenfeuchtemusters auf Schlägen mit heterogenen Böden zu erwarten. Im Gegenzug kann die Tongehaltsschätzung der ECa-Karten verbessert werden, wenn der reliefbedingte Trendanteil aus dem ECa-Signal entfernt wird. Für den Schlag 641 (Wulfen) wurde diese Studie zusammen mit dem TP „Bodenwasserspeicher“ erfolgreich durchgeführt (Tab. 2.5-2). Untersuchungen zur Übertragbarkeit auf andere Regionen sollen folgen.

Tab. 2.5-2: Bestimmtheitsmaß r^2 von ECa-Werten mit Texturanalysen vor und nach Abzug des TWI-Trends ($ECa = 2.6922 * TWI - 9.1446$) von 12 Monitorpunkten, Schlag 641 (Wulfen).

Tab. 2.5-2: Correlation coefficient r^2 of ECa and texture prior to and after removal of TWI trend ($ECa = 2.6922 * TWI - 9.1446$) for 12 monitor sites on plot 641 (Wulfen)

R^2	Schluff + Ton	Schluff	Ton	TWI
Eca	0.25	0.14	0.28	0.47
ECa corr	0.71	0.49	0.53	***

2.5.5.4 Weitere Anwendungen

2.5.5.4.1 Auswinterungspotential

Es wurde eine Multikriterienabfrage aus Hangneigung, Exposition und Vertikalwölbung entwickelt, die potentiell auswinterungsgefährdete Bereiche anzeigt. Dabei handelt es sich um Oberhang- und Kuppenlagen in Hauptstreichrichtung kontinentaler Winde (Wurzelabriss bzw. Erfrieren) und südexponierte Hanglagen (Vertrocknung bei Spätfrost). Sind in der Vergangenheit Schäden auf einer Fläche aufgetreten, kann das hier entwickelte Verfahren die Potentialflächen im Vorfeld eingrenzen und bei der Erstellung der Aussaatkarte berücksichtigen (s. Kap. 6.2). Als Ergebnis liegen zwei Polygontypen vor („Frostwechsel“ und „Kälte-tod“). Um den regionalen, von der reinen Topografie des Schlages unabhängigen, mesoklimatischen Effekt einzubeziehen, sollte auf Basis historischer Daten geprüft werden, wie oft Auswinterungsschäden auftraten. Die Analyse sollte nur für Regionen durchgeführt werden, in denen der Landwirt erfahrungsgemäß regelmäßig Schäden zu erwarten hat.

2.5.5.4.2 Naturschutz

Das TP „Naturschutzziele“ fand gute Übereinstimmungen zwischen den linienhaften Strukturen hoher TWI-Werte und den Wanderwegen von Amphibien auf den untersuchten Schlägen in Kassow. Näheres ist im Kapitel 8.5 beschrieben.

2.5.6 Diskussion

Es bestehen hohe Qualitätsanforderungen an die Geländemodelle. Die Qualität, d. h. Güte der Geländerepräsentation, wird beeinflusst durch die Ausgangsdaten, die Rasterweite sowie das Interpolationsverfahren. Ziel der geforderten hohen räumlichen Auflösung ist es, eine hydrologisch kontinuierliche Oberfläche mit allen abflussrelevanten Reliefformen zu erhalten. Indizes auf Basis von Abflussalgorithmen liefern eine Aussage über die potentielle Verteilung des Bodenwassers und spiegeln die Abflussbahnen in der Landschaft wider. Die Höhenmessung muss genauer sein als die Höhenvariation benachbarter Rasterzellen. Unterstützt werden die hier angegebenen Qualitätsangaben durch Vergleiche von berechneten TWI-Werten mit Bodenfeuchtemessungen und bodenzeichnenden Luftbildern. In heterogenen Landschaften, wie der welligen Grundmoränenplatte Mecklenburgs, werden eindeutige Korrelationen erst bei DGMen mit 2 m Rasterweite und einer Höhengenaugigkeit von wenigen Zentimetern erreicht (Schmidt und Persson, 2001), während in fluvial geprägten Landschaften bereits bei 5 m Rasterweite aus dem DGM eine gute Korrelation zu den Bodenfeuchtemessungen gefunden werden konnte (Bobert et al., 2001). Die DGM-Angebote der Landesvermessungsämter sind derzeit für präzise Modellierungen im

landwirtschaftlichen Ziel-Maßstab 1:5.000 nur selten ausreichend (Schmidt, 2001a). Mit der zunehmenden Verfügbarkeit von Laser-Scanner-DGMen wird sich dies ändern.

Die in Standard-GIS verwendeten Abflussalgorithmen basieren auf dem D8-Konzept, das den potentiellen Abfluss aus einer Nachbarzelle ausschließlich an den tiefstgelegenen Nachbarn weitergibt. Parallel verlaufende Abflusslinien an gestreckten Hängen sind ein häufiges, nicht der Realität entsprechendes Produkt dieser Analysen. Spezielle Reliefanalyse-Software wie TAPES (Wilson und Gallant, 2000) bietet Abhilfe und führt zu einer besseren Güte der Bodenfeuchteschätzung mit dem TWI. Der Vorteil des TWI-Konzeptes ist, dass es auf der Geländehöhe als einziger zu erfassender Datenquelle beruht. Für ArcView wurde im Rahmen des Teilprojektes eine Extension (topocrop.avx) entwickelt, die mittels Tiefpassfilterung und eines angepassten TWI praxistaugliche Karten des Bodenfeuchtemusters sowie weiterer DGM-Indices liefert. Optional soll die Verschneidung mit Karten der elektrischen Bodenleitfähigkeit integriert werden, um Bodeneigenschaften zu berücksichtigen. Viele Modelle, die landschaftsökologische Prozesse beschreiben, haben den Nachteil eines umfangreichen Parameterbedarfes, der von einem Landwirt nicht aufzubringen ist. DGMs sind eine sehr effiziente Datengrundlage, da sie eine lange Gültigkeitsdauer besitzen. Während andere Datenquellen wie Luftbilder und ECa-Karten nur die Ergebnisse dieser Prozesse als Summenparameter zeigen (z. B. Vernässungsstellen, Erosionsrinnen), können DGMs dazu genutzt werden, diese Prozesse zu erklären.

2.5.7 **Ausblick/zukünftige Arbeiten**

Die derzeitigen Arbeiten konzentrieren sich auf eine Umsetzung der erreichten Ergebnisse in einer ArcView-Erweiterung, die aus DGM-Grids gezielt die gewünschten Informationen für die Module bereitstellen kann. Die Ableitung des TWIs, des Stream Power-Index (Moore et al., 1991) und des Slope-Length-Faktors der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung sind bereits in einer ersten Stufe realisiert, die nächsten Schritte haben die Integration der optionalen Verschneidung mit den ECa-Karten und die Ausgabe des teilschlagspezifischen Auswinterungspotentials zum Ziel. Für das Frühjahr 2002 sind Messungen der bodennahen Minimumtemperaturen auf den stärker reliefierten Schlägen in Kassow geplant, um Modellierungen der reliefbedingten Temperaturunterschiede zu überprüfen. Ziel dieser Untersuchung ist eine Abschätzung, welcher Anteil der Ertragsvariabilität durch z. B. das räumliche Muster der Temperatursummenunterschiede erklärt werden kann. Parallel dazu soll eine TDR-Messkampagne zur Erklärung des Zusammenhanges zwischen Reliefeinfluss und EM38-Signal beitragen. Auf dem Schlag 106 (Kassow) korrelieren hohe TWI-Werte sowohl mit EM38-Maxima (Vernässungsstellen in Mulden) als auch EM38-Minima (Erosionspfade). Die Erosionsabschätzung wird mit Hilfe des Stream-Power-Index (Abtragungspfade) und des Slope-Length-Faktors (erodierte Bereiche) im Frühjahr 2002 auf dem gleichen Schlag intensiv bearbeitet werden und als entsprechende Funktion in das Topocrop-Modul unter Verrechnung mit den digitalen Hof-Bodenkarten integriert. Die weitere Zusammenarbeit mit dem TP „Bodenwasserspeicher“ soll speziell den Zusammenhang zwischen dem räumlich stabilen TWI-Muster und der dort modellierten zeitlichen Dynamik beschreiben.

Weiterhin sollen spezifischere Reliefparameter auf Basis minimaler Ausgangsdaten speziell für die landwirtschaftlichen Bedingungen entwickelt werden („Topocrop-Indices“).

Die bereits begonnene Untersuchung zu einer Standardisierung der DGM-Erfassung während der normalen Feldbearbeitung und somit minimalen zusätzlichen Personal- und Gerätekosten werden weiter in Zusammenarbeit mit M. Toft, Fa. Dronningborg, untersucht.

Ziel ist es, mit Derivaten aus dem DGM und minimalen Kosten einer einmaligen Datenerfassung und -modellierung lange gültige räumliche Muster für die verschiedenen Teilaspekte von precision agriculture zur Verfügung zu stellen.

2.5.8 Literatur

- Beven, K.J.; Kirkby, M. (1979): A physically-based, variable contributing area model of basin hydrology. In: *Hydrological Sciences Bulletin* 24, S.43-69
- Bill, R. (1999): *Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 2: Analysen, Anwendungen und neue Entwicklungen.* Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg
- Bobert, J.; Schmidt, F.; Gebbers, R.; Selige, T.; Schmidhalter, U. (2001): Estimating soil moisture distribution for crop management practices with capacitance probes, EM-38 and digital terrain analysis. In: Grenier, G.; Blackmore, S. (Hrsg.): *Third European Conference on Precision Agriculture*, June 18th-21st, Montpellier, France: 349-354
- Briese, Ch.; Pfeifer, N. (2001): Airborne Laser Scanning and Derivation of Digital Terrain Models. In: *Proceedings of 5th Conference on Optical 3-D measurement techniques*, Vienna, Austria, 2001.
http://www.ipf.tuwien.ac.at/np/articles+abstracts/vienna_airbornels_pfeifer.pdf
- Hutchinson, M.F. (1996): A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models. In: *Proceedings, 3rd International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modelling*, Santa Fe, NM, January 21-26, 1996. Santa Barbara, CA: National Center for Geographic Information and Analysis
- Kraus, K. (2000): *Photogrammetrie. Band 3: Topographische Informationssysteme.* Dümmler-Verlag, Bonn. 419 S
- MacMillan, R.A.; Pettapiece, W.W.; Nolan, S.C.; Goddard, T.W. (2000): A generic procedure for automatically segmenting landforms. In: *J. Fuzzy Sets and Systems*, July 2000, Vol. 113 (1): 81-109
- Moore, I.D.; Grayson, R.; Ladson, A. (1991): Digital Terrain Modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. In: *Hydrological Processes*, Vol. 5, S. 3-30
- Moore, I.D.; Gessler, P.; Nielsen, G.; Peterson, G. (1993): Soil Attribute Prediction using Terrain Analysis. In: *Soil Science Society America Journal* (57): 443-452
- Nolan, S.C.; Goddard, T.W.; Lohstraeter, G.; Coen, G.M. (2000): Assessing management units on rolling topography. In: *Precision Agriculture: Proc. 5th International Conference*, Minneapolis, MN. July 16-19, 2000 ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI
- NUGTEREN, A.; ROBERT, P. (1999): Usefulness and feasibility of high accuracy digital elevation models for Precision Management. In: Stafford, J. (Hrsg.): *Precision Agriculture'99. Proceedings of the 2nd European Conference on Precision Agriculture.* Odense, Denmark. Sheffield Academic Press, Sheffield: 561-569
- Schmidt, F. (2001a): Erfassung, Interpolation und Auswertung von digitalen Geländemodellen für die Landwirtschaft. In: *Zeitschrift für Vermessungswesen* (3): 128-134
- Schmidt, F. (2001b): Abgrenzung von Reliefeinheiten mit Geo-Informationssystemen für teilflächenspezifische Bewirtschaftung. In: Kögl, H.; Spilke, J.; Birkner, U. (Hrsg.): *Referate der 22. GIL-Jahrestagung in Rostock 2001. Berichte der Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft* (14): 195-198
- Schmidt, F.; Irrgang, A. (2000): Improved GIS data accuracy for Precision Agriculture and aerial photography management by use of digital elevation models. 2nd Int. Symposium on New Technologies for Environmental Monitoring and Agro-Applications. October 2000, Tekirdag/Turkey. Trakya University Publication No.29
- Schmidt, F.; Persson, A. (2001): Comparison of DEM data capture and topographic wetness indices. *Precision Agriculture*. Submitted
- Wilson, J.P.; Gallant, J.C. (Hrsg.)(2000): *Terrain Analysis. Principles and Applications.* John Wiley, New York