

3.2 Relief

Teilprojektleiter:	Prof. Dr.-Ing. Ralf Bill
Bearbeiter:	Dipl.-Ing. Frank Schmidt
Einrichtung:	Institut für Geodäsie und Geoinformatik Fachbereich Landeskultur und Umweltschutz Universität Rostock

3.2.1 Ursprüngliche Aufgabenstellung

Bei der Antragstellung stand die Suche nach einer Form der Repräsentation von Reliefefinflüssen auf landwirtschaftliche Parameter mit Hilfe eines Digitalen Geländemodells (DGM) im Vordergrund. Dazu sollten Digitale Geländemodelle als Basisdaten für andere Teilprojekte zur Verfügung gestellt und hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit bewertet werden, geeignete Reliefparameter zur Modellierung der Zusammenhänge von Relief und Ertrag, Boden, Nährstoffe, Bodenwasser und Geländeklima gefunden und zusammen mit den produktionstechnischen Teilprojekten Algorithmen zur Auswahl optimaler Beprobungsstrategien erarbeitet werden.

Weiterhin sollten Interpolationsmethoden untersucht, einfache statische Modelle zur Prognose lateraler Flüsse für die pflanzenbaulichen Teilprojekte bereitgestellt, Bearbeitungsempfehlungen in Bezug auf erosionsvermindernde Bodenbearbeitungsrichtungen gegeben werden und die Reliefanalyse in Softwaremodule integriert werden.

Folgende Arbeitsziele wurden in der Antragstellung formuliert:

- Forschungsebene: Klärung der Zusammenhänge zwischen Reliefparametern und Schlageigenschaften, Integration von DGMs in pflanzenbauliche Modelle,
- Operationalisierungsebene: Entwicklung von praxistauglichen Verfahren und Empfehlungen für die Erfassung von DGMs und ökonomische Bewertung mit den Projektpartnern,
- Anwenderebene: Optimierung der Modelle und Vergleich mit praktischen Erfahrungen

3.2.2 Durchgeführte Maßnahmen und Forschungsarbeiten

Die Bearbeitung des Projektes gliederte sich in vier wesentliche Arbeitsschritte:

- Datenerfassung (Bereitstellung von Höhenmodellen für andere Teilprojekte) für 54 Projektschläge,
- Entwicklung einer effizienten Methodik der Höhenerfassung und DGM-Ableitung,
- Untersuchung der Eignung von Reliefparametern für Precision Agriculture (PA),
- Implementierung der Erkenntnisse in ein ArcView-basiertes Modul.

Im ersten Projektjahr (Mai - Dezember 1999) wurde vor allem an der Erstellung und der Basisauswertung digitaler Geländemodelle gearbeitet sowie Methoden zur Validierung und Integration in die weiteren Teilprojekte konkretisiert. Dabei wurden einerseits verfügbare digitale Geländemodelle der Landesvermessungsämter (LVA) auf regionaler Ebene erworben und andererseits eigene Geländemodelle auf Schlagebene erstellt. Für die DGM-Erfassung stand ein RTK-GPS

(Real-Time-Kinematic-GPS) mit einer Höhengenaugigkeit im Zentimeterbereich zur Verfügung. Insgesamt wurden 1999/2000 für 54 Schläge mit der Gesamtfläche von 1562 ha DGMs erstellt und die Reliefparameter Neigung, Exposition sowie der topographische Wetness-Index (TWI) abgeleitet und im Projektinformationssystem mit Qualitätsangaben den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Davon wurden 41 Schläge (1275 ha) mit dem RTK-GPS vermessen. Für diese Schläge und 13 weitere wurden DGMs der Landesvermessung in unterschiedlicher Qualität (Rasterweite, Genauigkeit) beschafft. Mit diesen DGM-Quellen und einer Laserscanner-Messung für den Betrieb Kassow wurde ein Vergleich durchgeführt, um Qualitätskriterien aufstellen zu können. Weiterhin wurden regionale DGMs mit den Schlagvermessungen verknüpft, um vollständige Einzugsgebiete bei der Berechnung von hydrologischen Indizes zu berücksichtigen. Als zusätzliche Datenquelle für die Aufstellung von Qualitätskriterien konnte für den Betrieb Kassow ein DGM auf Basis einer flugzeuggetragenen Laserscanner-Vermessung beschafft und ausgewertet werden

Im Laufe des Projektjahres 2000 mussten weitere Schläge vermessen werden, da die Witterungs-/Befahrbarkeitssituation im Winter 1999/2000 sehr ungünstig war und bei den ersten Vermessungskampagnen oft noch nicht alle Schlagflächen feststanden. Für sämtliche Betriebe wurden lokale Transformationsparametersätze berechnet, um eine präzise Koordinatentransformation zwischen dem System der Landesvermessung und dem vom GPS verwendeten WGS84 zu ermöglichen. Die Bereitstellung der DGMs im Premis erfolgte in beiden Systemen, wobei für Rasterdaten die UTM-Projektion (und das zukünftige europäische System ETRS) gewählt wurde. Für die verwendete GPS-Technik, Transformationsprogramme und Interpolationsalgorithmen erfolgte eine Genauigkeitsanalyse. Zur Dokumentation der Datenerfassung und von Qualitätsparametern wurde gemeinsam mit dem TP „Projektinformationssystem“ eine Dateinamenskonvention und ein Konzept für den Metadatensatz entwickelt und umgesetzt.

Das Validierungsprogramm bestand aus einem Vergleich mit Bodenfeuchtemessungen an ausgewählten Standorten, dem Vergleich mit bodenzeichnenden Luftbildern und ECa-Karten und wurde in Zusammenarbeit mit weiteren Teilprojekten durchgeführt. Diese Arbeiten erfolgten kontinuierlich über die gesamte Projektlaufzeit.

Im Jahr 2001 wurden Versuche zur Charakterisierung des Reliefs mit Hilfe von Maßzahlen aus dem DGM durchgeführt und für die Modulersteller spezielle Extrema-Polygone des reliefbedingten Wasserhaushaltes ausgegrenzt und bereitgestellt. Später hinzugekommene Projektschläge wurden neu erfasst und ebenfalls ausgewertet.

Das letzte Projektjahr zielte auf die Überführung der gewonnenen Erkenntnisse über geeignete Reliefparameter in ein Softwaremodul für ArcView. Weiterhin wird derzeit eine Methode entwickelt, Relief- und Bodendaten für eine kombinierte Standortpotenzialkarte zu verknüpfen. Dem liegt eine Auswertung von DGM-Ableitungen in Zusammenhang mit den ECa-Karten zugrunde. Bereitgestellt wurden für 54 Schläge in 2 Koordinatensystemen jeweils Höhen, Neigung, Exposition und Wetness Index (= 432 schlagbezogene Rasterdatensätze), zusätzlich für jeden Schlag Höhenlinien als Vektordatensätze, Punktdatensätze mit den Geländehöhen bzw. dem Wetness Index und Polygone mit den Extrembereichen des reliefbedingten Bodenfeuchtepotenzials.

3.2.3 Zielerfüllung/-erreichung

Auf Forschungsebene wurden neue Erkenntnisse zum Zusammenhang von Reliefparametern aus hochgenauen DGM und weiteren flächendeckenden Sensordaten gefunden. Speziell für DGM in der hier geschaffenen Qualität gab es bisher kaum Untersuchungen. Ein hier neu entwickelter Ansatz ist die Verschneidung von ECa-Daten mit DGM-Ableitungen zur Interpretation von Standorteigenschaften. Die Erwartung guter Korrelationen zu pflanzenbaulichen Parametern wie z.B. Kornertrag bestätigten sich nur für ausgewählte Gebiete. Gründe dafür sind die Vielzahl der Faktoren, die die Ertragsbildung beeinflussen, der unterschiedlich starke Reliefeinfluss auf einzelnen Schlägen und die großen Qualitätsschwankungen bei den Ertragskarten. Generell bleibt festzustellen, dass die gleichen Reliefpositionen bei unterschiedlichen Witterungsverläufen verschiedene Auswirkungen auf die Erträge ausüben.

Die Integration der DGMs in pflanzenbauliche Modelle wurde in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern soweit realisiert, dass Bodenfeuchtepotenzialkarten Extrembereiche auf dem Schlag anzeigen und diese optional in den Modulen mit Zu- und Abschlägen berücksichtigt werden können.

Auf der Operationalisierungsebene konnte die Vermessung mit RTK-GPS von den Fahrgassen aus, auch bei einer gleichzeitigen geoelektrischen Kartierung, als praxistaugliches Verfahren etabliert werden. Entwicklungsarbeiten fanden vor allem bei der Aufstellung von Qualitätskriterien für die Höherfassung und -bearbeitung statt. Verschiedene Aufnahmeverfahren wurden qualitativ und ökonomisch bewertet und Mindestqualitäten für den Einsatz im landwirtschaftlichen Bereich aufgestellt.

Auf Anwenderebene erfolgte der Vergleich der Bodenfeuchtepotenzialkarten mit dem Standortwissen der Landwirte im Hinblick auf ein besseres Verständnis der Prozesse, die für die Heterogenität der Standortbedingungen auf dem Schlag verantwortlich sind. Für Anwender im Dienstleistungsbereich wurden Erfahrungen im Umgang mit hochgenauen GPS-Empfängern unter Feldbedingungen gesammelt und wertvolle Erkenntnisse zur Interpolation von Daten mit streifenförmiger Ausgangsgeometrie veröffentlicht. Dies betrifft die meisten der flächigen Eingangsdaten, die aus den Fahrspuren erfasst werden.

Das DGM und die daraus abgeleiteten landwirtschaftlich relevanten Parameter haben sich als wertvolle Eingabe- und Erklärungsfaktoren für Precision Agriculture etabliert. Mit einer einmaligen Vermessung zu akzeptablen Kosten entsteht ein langfristig nutzbarer Erkenntnisgewinn über die Schläge, der in vielen Applikationsmodellen genutzt werden kann.

Für die restliche Projektlaufzeit ist die Integration der Verschneidung von ECa und DGM in das Softwaremodul das zentrale Thema.

3.2.4 Übersicht und Zusammenfassung

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 Potenziale und damit Richtung und Ausmaß der Wasserbewegung im Gelände als Reaktion eines Einzugsgebietes auf ein Niederschlagsereignis. Ein DGM leistet 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 DGMs im agrartechnischen Bereich beschränkte sich zumeist auf die visuelle Interpretation. 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).

Während der Projektbearbeitung kristallisierten sich folgende Fragestellungen als zentral heraus:

- Welche Qualitätsanforderungen an digitale Geländemodelle sind für landwirtschaftliche Anwendungen zu stellen?
- Welche Erfassungsmethode hat unter den speziellen landwirtschaftlichen Bedingungen das beste Kosten/Nutzen-Verhältnis?
- Welche Analysemethoden berechnen aus dem DGM Ableitungen, die jene Reliefeinflüsse, die für die pre agro-Module von Relevanz sind, in geforderter Genauigkeit repräsentieren?

Die wesentliche Neuerung des Teilprojektes besteht in der Entwicklung einer Methodik zur Erfassung und Analyse von DGMs im Maßstabsbereich 1:5.000 mit dem Ziel, den Informationsgewinn in teilschlagspezifische Maßnahmen zu integrieren. Die Arbeit in diesem Maßstabsbereich ist erst in den letzten Jahren durch neue Technologien in der DGM-Erfassung wie RTK-GPS und flugzeuggetragene Laserscanner 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“ (Beven & Kirkby, 1979) erwies sich als geeignete DGM-Analysemethode und wurde als Datenebene für die pre agro-Module bereitgestellt. Der Wetness-Index beruht primär auf einer Auswertung des reinen Höhenmodells und ist somit nicht auf aufwändig zu erhebende zusätzliche Felddaten angewiesen. Die Einbindung zusätzlicher Boden- und Klimadaten ist jedoch möglich, sofern diese vorliegen. Die Wetness-Index-Modelle wurden mangels hochgenauer DGMs bisher meist im mittelmaßstäbigen Bereich angewendet. Erste Korrelationsrechnungen mit Felddaten im Maßstabsbereich 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 DGMs zur Überprüfung der Modelle im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit in der Landwirtschaft.

Die Ableitung verschiedener Indizes, 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.

3.2.5 Ergebnisse

An dieser Stelle soll eine theseartige Zusammenfassung der Ergebnisse erfolgen. Die Darstellung und Diskussion der einzelnen Studien, die im Rahmen des Teilprojektes durchgeführt wurden, erfolgt im Kapitel „Ergebnisse und Diskussion“.

- Für die Module Bodenbearbeitung, Aussaat und N-Düngung stellt das „Wetness-Index-Konzept“ (TWI) eine geeignete Ableitung aus dem DGM dar, um die entscheidenden Reliefextrema für den Pflanzenbau auszugrenzen und differenziert zu bewirtschaften. Der aus dem DGM abgeleitete Wetness-Index ist hierbei eine von mehreren Datenebenen, die zur Berechnung von Bearbeitungstiefe, Aussaatmenge und N-Düngung einbezogen wird (siehe entsprechende Kapitel).
- Eine Verknüpfung dieser reliefbedingten Standortpotenziale mit ECa-Karten oder anderen flächendeckenden geoelektrischen Daten erlaubt eine Interpretation der auf dem Schlag dominierenden Prozesse, die Grundlage der Heterogenitäten sind. ECa-Signal und TWI können sich dabei gleichsinnig oder gegensinnig verhalten, was eine lokale Betrachtung der Muster erfordert.
- Die Karten der elektrischen Leitfähigkeit (ECa) können bei Verschneidung mit dem Wetness-Index besser interpretiert werden (Tongehalts-Vorhersagen und Erosionsmuster).
- Die Anforderungen an ein DGM zur Berechnung des TWI für landwirtschaftliche Anwendungen auf Schlagebene/Teilschlagebene beinhalten die Repräsentation von bodenhydrologisch wirksamen Reliefformen. Als günstigste DGM-Struktur für die Modellierung wurde das Raster ermittelt. Eine Rasterweite von 2-10 m ist für die Modellierung anzustreben, je nach Größe und Verteilung der Reliefformen des Untersuchungsgebietes. Die damit notwendige Höhengenaugigkeit sollte etwa $\pm 0,1$ m sein. Nur zwei Methoden der DGM-Erfassung erfüllen diesen Anspruch: RTK-GPS und flugzeuggetragenes Laserscanning. Auf Schlagebene ist lediglich RTK-GPS ökonomisch vertretbar. Die durch das Teilprojekt untersuchten Höhen-Daten der Landesvermessungsämter genügen den landwirtschaftlichen Anforderungen derzeit nicht.

3.2.6 Methoden/Vorgehensweise

Methodisch gliedert sich die Arbeit in:

- A. den Vergleich und die Bewertung von Erfassungs- und Interpolationsmethoden für DGMs,
- B. die Untersuchung von Reliefparametern zur Verwendung in pflanzenbaulichen Modulen,
- C. die Aufstellung von Qualitätskriterien für DGMs und
- D. die Entwicklung eines Moduls zur Ableitung und Bearbeitung der Reliefparameter.

A. Erfassung und Interpolation der Geländehöhen

Vergleichende Bewertung von Erfassungsmethoden

Real-Time-Kinematic GPS (RTK-GPS) basiert darauf, dass die meisten Fehlereinflüsse zweier GPS-Empfänger in geringer Entfernung (bei Zweifrequenzempfängern wenige Kilometer) die gleichen Abweichungen verursachen (Resnik und Bill, 2000). Ist der Standort eines der beiden Empfänger bekannt (z. B. auf einem Festpunkt der Landesvermessung), kann über die Differenz der Positionsmessung und dem bekannten Standort der Wert des anderen korrigiert werden. Wird die Korrektur in „Echtzeit“ an den sich bewegenden Empfänger übermittelt und die endgültige Punktkoordinate dadurch schon im Feld erzeugt, spricht man von einem RTK-System (*real-time kinematic*). Eine nachträgliche Auswertung aller aufgezeichneten Satellitenbeobachtungen ist als sogenanntes *postprocessing* möglich. Beide Verfahren wurden für die DGM-Erfassung eingesetzt und verglichen.

Ein RTK-GPS ist anfälliger für Störungen beim Empfang der Satellitensignale, da nur wenige Mess-Epochen zur Bestimmung der Position zur Verfügung stehen. Das Verfahren erreicht heute fast die gleiche Genauigkeit wie statische Verfahren, die Abschaltung von Selective Availability (SA) bewirkte eine nur unwesentliche Verbesserung (Lee und Chen, 2000).

Ein konstantes Funksignal zwischen Referenzstation und dem mobilen Empfänger ist nötig. Das vom TP „Relief“ verwendete Vermessungsverfahren 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. Dabei entsteht eine ungünstige Erfassungsgeometrie (hohe Datendichte in Fahrtrichtung, aber wenige Daten transversal dazu), die durch spezielle Interpolationsverfahren zu kompensieren ist. Durch die Dichte der Aufnahmepunkte werden Reliefformen für die Modellierung der hydrologischen Eigenschaften der Geländeoberfläche ausreichend genau erfasst.

Am Standort Kassow wurde zusätzlich als neue „low-cost“-Variante die Mittelung von Mehrfachüberfahrten mit einem 8-Kanal-DGPS-Empfänger (Trimble ACE 2) in Zusammenarbeit mit M. Toft, Dronningborg, untersucht.

Die Vermessung mit flugzeuggetragenen Laserscannern wird seit Mitte der 1990er Jahren von einigen Unternehmen kommerziell angeboten. Das Messverfahren wird als LIDAR (*light detection and ranging*) bezeichnet. Die Höhenerfassung erfolgt durch eine Abtastung des Geländes bei einer Befliegung in mehreren parallel zueinander verlaufenden Streifen. Die Laufzeitmessung von gesendetem und reflektiertem Impuls im Infrarot-Bereich ergibt Polarkoordinaten von einem sich fortbewegendem Ursprung aus. Die Position des Flugzeugs wird mit DGPS koordinatenmäßig erfasst, die Orientierung des Polarkoordinatensystems mit Hilfe eines INS (*Inertial Navigation System*). Die Höhengengenauigkeit gefilterter Messpunkte beträgt beim Laserscanning je nach Bewegtheit des Geländes zwischen $\pm 0,01$ m auf Straßenbelag und $\pm 0,15$ m in freier Feldflur (Gomes Pereira und Janssen, 1999; Briese und Pfeifer, 2001).

Vorteile des Laserscannings für die Landwirtschaft sind die hohe Genauigkeit und die hohe Punktdichte (bis 5 Punkte pro m^2). Laserscanner-Befliegungen finden im Auftrag der Landes-

vermessung testweise bereits seit wenigen Jahren statt (z.B. in Baden-Württemberg standardisiert für ein landesweites, flächendeckendes DGM seit 2000). Wegen hoher Fixkosten lohnt sich das Verfahren erst bei großen Flächen. Sollten die Daten in einigen Jahren bei der Landesvermessung flächendeckend in höchster Genauigkeit vorliegen, wären sie eine ideale Basis für die Landwirtschaft.

Die Mehrzahl der heutigen DGMs der Landesvermessung erfüllt diese Ansprüche jedoch nicht. DGMs basieren auf den Höhenlinien topografischer Karten oder der Stereophotogrammetrie mit Rasterweiten ab 10 m. Für viele Regionen Deutschlands sind keine räumlichen Auflösungen unter 50 m verfügbar. Ein Problem der vorhandenen DGMs ist das teilweise hohe Alter, die mangelnde Fortführung sowie die fehlende Information darüber, ob das Gelände oder die Vegetationsoberfläche dargestellt ist (Bill et al., 2000). Nach Petzold et al. (1999) sind z.B. 33% der bayerischen Höhenlinieninformationen älter als 1918. Nur vereinzelt werden bereits Laserscanner-DGMs angeboten, so für die *pre agro*-Betriebe Raesfeld und Beckum. Die Grundkosten für ein DGM 5 der Qualitätsstufe I (Gitterweite 10 m, 12,5 m oder 20 m) betragen etwa 30 €/km², Strukturdaten sind teilweise für zusätzliche 20 €/km² erhältlich. Teilweise werden Mengen- oder Forschungsrabatte gewährt. Mindestbestellwerte bewegen sich zwischen 118,60 und 255,56 €. Die Höhengenaugigkeit für das DGM 5 wird mit $\pm 0,5-1$ m angegeben. Untersuchungen zur Genauigkeit einiger Beispielgebiete werden im folgenden Kapitel vorgestellt. Tab. 3.2-1 zeigt die Ergebnisse einer eigenen Recherche bei den Flächenländern. In Ländern, die das DGM 5 nur im 20 m-Raster anbieten, wird teilweise auf Anfrage ein 10 m-Raster interpoliert, was allerdings keine Qualitätsverbesserung bedeutet. Mehrere Vermessungsverwaltungen halten auf ihren Webseiten aktuelle Übersichtskarten des Bearbeitungsstandes, so z.B. Niedersachsen, Saarland und Sachsen.

Tab. 3.2-1: Übersicht der Verfügbarkeit des DGM 5 (10 m/12,5m Raster) in den Bundesländern (außer Stadtstaaten). Quelle: Übersicht von www.atkis.de (August 2002) und ergänzende Nachfragen (Juni-August 2002). LS= Laserscanning

Land	Stand (% der Landesfläche)	LS-DGM (Erfasst)	LS-DGM (Aufbereitet)	Bemerkung
Baden-Württemberg	7%	>65%	7%	LS landesweit 2 m bis 2005
Bayern	10%	Kleine Teilbereiche		Teilweise nur 20m
Brandenburg	-	-	-	Flächendeckend 25 m, auf 10 m interpoliert
Hessen	52%	1%	-	Digitalisierung, Photogrammetrie
Mecklenburg-Vorp.	-	-	-	
Niedersachsen	87%	11%	1%	Nur 12,5 m; Genauigkeiten tlw 2 m
Nordrhein-Westfalen	100%	Teilbereiche		Digitalisierung 1:5.000, LS 3-5 m
Rheinland-Pfalz	94%	-	-	nur 20 m
Saarland	100%	Nicht geplant		Digitalisierung, Photogrammetrie
Sachsen	?	Elbe und Elbsandstein		Nur 20 m, LS-Daten auch 5 m
Sachsen-Anhalt	100%	Kleine Teilbereiche		Digitalisierung (TK10), Photogr.
Schleswig-Holstein	25%	-	-	nur 20 m
Thüringen	„ausgewählte Gebiete“	74 %	4 %	Kein Fertigstellungstermin in Sicht

Interpolation der gemessenen Geländehöhen

Um von den ungleichmäßig verteilten Höhenmesspunkten auf eine kontinuierliche, für Modellierungen geeignete Oberfläche zu gelangen (Abb. 3.2-1), ist eine Interpolation der Messpunkte notwendig. Je geringer die Messpunktdichte (=größere Fahrgassenabstände) 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, darunter Kriging (Golden Software, 1999), die lineare Prädiktion mit Kovarianzfunktionen (Kraus, 2000), Inverse Distance Weighting (ESRI, 1999) und Spline-Verfahren wie das spezielle Topogrid-Tool (Hutchinson, 1996). Für ausgewählte Untersuchungsgebiete wurden Punkte unterschiedlich weiter Fahrgassenabstände mit den genannten Verfahren interpoliert und ein RMS-Fehler für die jeweils bei der Interpolation nicht berücksichtigten Punkte berechnet. Untersucht wurden die Interpolationsverfahren im Vergleich und für das daraus empfohlene Verfahren die Auswirkung verschieden weiter Fahrgassenabstände (Schmidt und Bill, 2000; Schmidt, 2001a).

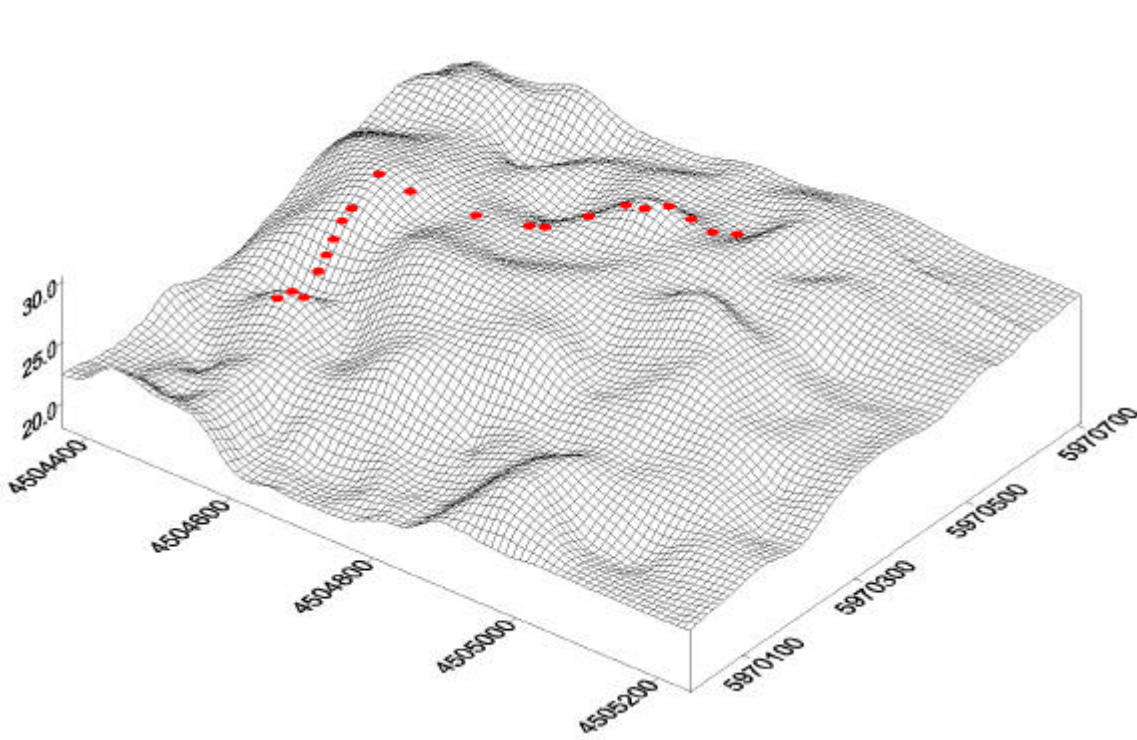


Abb. 3.2-1: DGM als Wireframe-Modell (Ausschnitt des Untersuchungsgebietes auf Schlag 111, Kassow, mit den Bodenfeuchte-Monitoring-Punkten (rot). 15-fach überhöht. Kriging-Interpolation mit Power-Modell).

B. Untersuchung von Reliefparametern

Der verbreitetste Ansatz der DGM-Analyse ist die Ableitung von lokalen morphometrischen Reliefattributen. Dies sind Größen, die sich aus einer Rasterzelle und ihren 8 Nachbar-Rasterzellen berechnen lassen. Folgende Einteilung hat sich, vor allem in der angelsächsischen Literatur (z.B. Moore et al., 1991; Wilson und Gallant, 2000), durchgesetzt:

- primäre Reliefparameter

- lokale Nachbarschaft (8 Zellen): gerichtete 1. Ableitung (Neigung, Exposition) und 2. Ableitung (Vertikal- und Horizontalkrümmung) der topographischen Oberfläche, Laplace-Operator,
- globale Nachbarschaft (DGM von Untersuchungspunkt bis zur Wasserscheide bzw. Gebietsauslass): Einzugsgebietsgröße für jede Rasterzelle, Länge von Abflusspfaden oder Entfernung von der Wasserscheide, Muldenpunkte (abflusslose Senken)
- sekundäre Reliefparameter
 - Kombinationen aus primären Reliefparametern mit weiteren, z.T. empirisch ermittelten Größen.

Vergleichsweise wurden die DGMs auch mit einem formbasiertem Ansatz in Klassen eingeteilt. Die kleinsten homogenen Reliefeinheiten werden als Relieffacetten bezeichnet. Diese Reliefeinheiten beschreiben Bereiche einheitlicher Geländeneigung und Exposition und können zu Formelementen zusammen gesetzt werden. Dazu bedient man sich primärer Reliefparameter. Die **Geländeneigung** beschreibt die Änderungsrate der Höhe zwischen zwei Punkten im Gelände und wird in [°] oder [%] angegeben. Die **Exposition** (Hangneigungsrichtung) ergibt sich aus der Winkeldifferenz zwischen abwärtsweisender Richtung der Falllinie eines Hanges und der geographischen Nordrichtung in einer gedachten horizontalen Ebene. Als Messbereich wird der Vollkreis mit 0° als Nordrichtung verwendet. Die ökologische Wirksamkeit der Exposition steigt mit der Hangneigung. **Formelemente**, das Ergebnis der hier durchgeführten Gliederung, zeigen Bereiche einheitlichen Wölbungstyps und homogener Morphodynamik und können in einem folgenden Schritt zu Reliefformen aggregiert werden. Unter **Wölbung** (ebenfalls ein primärer Reliefparameter) wird dabei die richtungsbezogene Krümmung eines Reliefausschnittes, also die Abweichung von der Ebene verstanden. Zu unterscheiden sind die Vertikalwölbung (engl. profile curvature) und die Horizontalwölbung (engl. plan curvature). Als Formelemente werden im Folgenden die neun möglichen Kombinationen aus den drei Bewegungstendenzen und den drei Krümmungstendenzen bezeichnet. Diese Einteilung basiert auf den Arbeiten von Richter (1962). Zusätzlich zu den neun Wölbungen der Formelemente wird ein ebener Bereich ausgewiesen, welchem aufgrund der geringen Neigung keine wirksame Exposition (und damit Bewegungstendenz) zugewiesen werden kann.

Tab. 3.2-2: Wölbungstypen und deren Kombination zu Formelementen (nach Richter, 1962).

Wölbungstyp	Horizontal divergierend	Horizontal parallel	Horizontal konvergierend
Vertikal konvex	Xd	Xp	Xk
Vertikal gestreckt	Gd	Gp	Gk
Vertikal konkav	Vd	Vp	Vk

Mit dem hydrologisch-prozessorientierten Ansatz („Terrain Analysis“, Wilson und Gallant, 2000) werden aus dem DGM quantitative Parameter für jede Rasterzelle abgeleitet. Verwendet wurde 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 bewegenden 3*3-Matrix ausgeht und die Beziehungen zu den acht Nachbarelementen auswertet. Wegen der einfachen rechentechnischen 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.

Nach ersten Korrelationsanalysen von primären und sekundären Reliefparametern mit Felddaten aus dem Betrieb Kassow (Schmidt, 1999) wurde der **Topografische Wetness-Index (TWI)**, die Kombination aus dem spezifischen Einzugsgebiet (A_s) eines Punktes und der lokalen Geländeneigung ($\tan\beta$)

$$\text{TWI} = \ln(A_s/\tan\beta) \quad (\text{Gl. 1})$$

zur weiteren Untersuchung favorisiert. 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 Gelände 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 geringer Varianz für die räumliche 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 Bodenwasserflux q 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.

Die Annahmen, auf denen die Gültigkeit des Wetness-Index beruht, lauten:

- homogene Infiltrationsrate innerhalb des Einzugsgebietes
- homogene Grundwasserneubildung und homogener vertikaler Fluss

- homogene Bodendurchlässigkeit
- exponentielle Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit mit der Tiefe
- piezometrische Druckhöhe verläuft parallel zur Geländeoberfläche
- das Gleichgewicht des oberflächennahen Zu-/Abflusses hat sich an jedem Punkt eingestellt.

Die räumliche Variation der Bodenparameter wird von den Verfechtern des Index-Konzeptes als unbedeutend im Vergleich zur Variation des Wetness-Index vorausgesetzt. Prinzipiell soll der Index zeigen, in welchen Bereichen eines Einzugsgebietes reliefbedingt zuerst Sättigung erreicht wird und damit Oberflächenabfluss einsetzt. Dies kann nach Wilson und Gallant (2000) auch als Langzeit-Bodenfeuchte-Index interpretiert werden. Der berechnete Wert des Index bedeutet jeweils nur die Abweichung vom Gebietsmittelwert. Ein höherer Index steht streng betrachtet für einen geringeren Grundwasserflurabstand.

Zur Untersuchung der mit dem TWI modellierten Bodenfeuchte wurden mehrere Ansätze verwendet:

- Vergleich mit bodenkundlichen Feld- und Labormessungen (TDR, Gravimetrie)
- Vergleich mit weiteren flächendeckenden Sensordaten (Luftbild, ECa-Kartierung, Ertrag)
- Vergleich mit dem „Expertenwissen“ des Landwirtes

C. Qualitätskriterien für DGMs

Um mit dem Wetness-Index-Konzept zu aussagekräftigen Karten zu gelangen, deren Muster die natürliche Heterogenität auf dem Schlag in Bezug auf Prozesse des lateralen Wassertransportes erklären zu können, müssen die DGMs bestimmte Qualitätsansprüche erfüllen. Qualitätskriterien für die DGMs wurden für die erforderliche Rasterweite, Höhengenaugigkeit der Messdaten und der interpolierten Oberfläche sowie für die Beschaffenheit der Oberfläche (Rauigkeit) an Hand von Mustervergleichen mit Luftbildern und ECa-Kartierungen sowie Feldbegehungen aufgestellt.

D. Entwicklung des TOPOCROP-Reliefmoduls

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden in eine vorläufige ArcView-Extension überführt und werden bis zum Ende der Projektlaufzeit weiter ergänzt. Hierbei greifen selbst erstellte AVENUE-Scripte auf die Rasterfunktionalitäten des ArcView SpatialAnalyst zurück, um Ableitungen aus einem DGM zu berechnen. Dazu wurden u.a. die Algorithmen des Wetness-Index, Stream-Power-Index und des Length-Slope-Factors (Moore and Wilson, 1992) integriert. Die erstellten Scripte wurden in einem nächsten Schritt in eine Erweiterung (*.avx) integriert, die auf entsprechenden ArcView-Userseiten und in der Web-Präsentation des Projektes frei zur Verfügung gestellt werden soll.

3.2.7 Ergebnisse und Diskussion

A. Erfassung und Interpolation der Geländehöhen

In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse des Vergleiches der Erfassungs- und Interpolationsmethoden für Geländehöhen präsentiert. Zuerst sollen die Untersuchungen der einzelnen Messmethoden vorgestellt werden. Für landwirtschaftlich nutzbare DGMs eignen sich RTK-GPS (als Dienstleistung inklusive Oberflächen-Generierung und Auswertung für Betriebe) und Laserscanning (für den regionalen Maßstab). Die DGMs, die derzeit von den Landesvermessungsämtern angeboten werden, erfüllen die Qualitätsanforderungen in der Regel nicht (Schmidt, 2001a). Abb. 3.2-2 zeigt für einen der bayerischen Projektschläge den Vergleich von topographischen Daten der Landesvermessung und hochgenauen Kontrollmessungen.

Die „low-cost“-Variante aus der Mittelung von Mehrfachüberfahrten mit einem 8-Kanal-DGPS-Empfänger (neun Überfahrten mit einer Einzel-Messgenauigkeit von $\pm 1,5$ m) erreichte zwar durch gezielte Filterung und Mittelwertbildung für 60% der Fläche eine Genauigkeit besser als $\pm 0,5$ m und damit vergleichbar den DGMs der Landesvermessung, jedoch wirkten sich die verbleibenden Fehler sehr stark auf die Ableitung der Fließrichtung und damit den TWI aus. Bei der notwendigen Anzahl von 6-10 Überfahrten (statistische 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 Mittelbildung von vielen, nicht identisch liegenden Einzelpunkten) ist ebenfalls zu berücksichtigen.

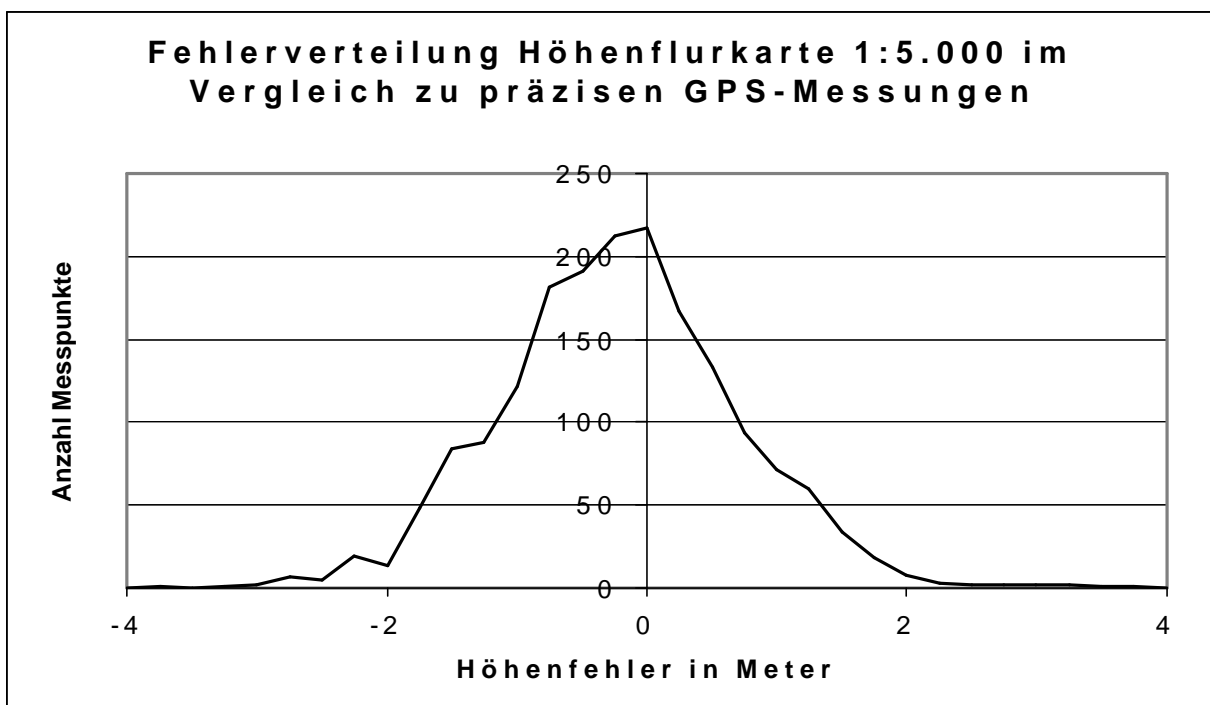


Abb. 3.2-2: Darstellung der Differenzen zwischen 1800 präzisen RTK-GPS-Messpunkten und einem auf Höhenlinien (Höhenflurkarte 1:5.000) basierenden DGM für die Pflichtschläge des Betriebes Schreiner (Standort Landshut-Reisach).

RTK-GPS

Stabilität und Wiederholbarkeit der Höhenmessung wurden in Kassow durch eine 40-minütige Aufzeichnung auf festem Standpunkt und wiederholtes Anfahren von Messpunkten auf Feldwegen getestet. Die Genauigkeit des Messwertes im RTK-Modus ist in Abb. 3.2-2 dargestellt. Während das Gerät eine Lagequalität von $\pm 0,02$ m anzeigte, lag die tatsächliche Standardabweichung der Höhenmessung bei 0,014 m mit einer Spannweite von 0,08 m. Tab. 3.2-3 zeigt die gemessenen Differenzen bei wiederholtem Anfahren der Punkte im bewegten Zustand des Rovers bei Geschwindigkeiten um 10 km/h.

RTK-Höhenmessung im Stand

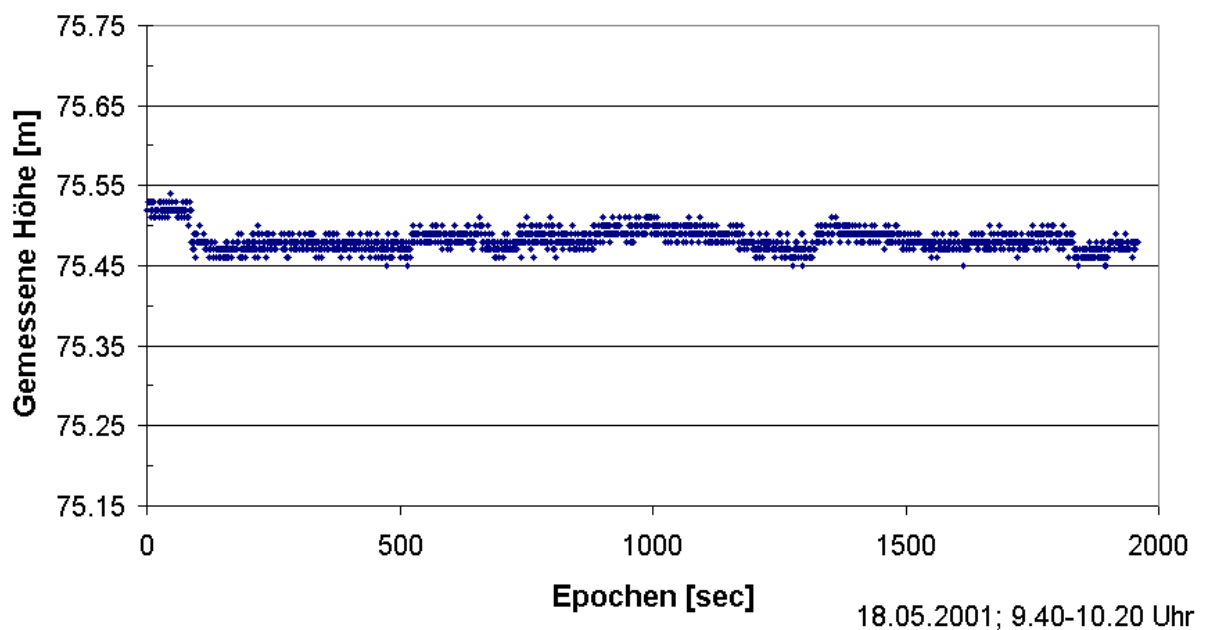


Abb. 3.2-3: Schwankungen der Höhenmessung mit Leica SR399 im ruhenden Zustand des Rovers. Die Standardabweichung beträgt 0,014 m. Die leicht erhöhten Werte am Beginn zeigen den Messwert vor Abschluss der Initialisierungsphase an.

Tab. 3.2-3: Standardabweichung s und Spannweite (Range) der Höhenaufzeichnung von vier wiederholten Überfahrten am 18.05.01 (Kassow) mit n =Anzahl der ausgewerteten Punkte entlang von acht Wegstreckenabschnitten à 3 m bei Basislinien von 100 bis 500 m.

Standardabweichung s [m]	Spannweite [m]	Anzahl der Überfahrten
0,01	0,04	7
0,03	0,07	5
0,03	0,08	7
0,03	0,08	8
0,04	0,13	7
0,04	0,12	7
0,04	0,15	14
0,05	0,10	7

Aus diesen Untersuchungen ergibt sich, dass die herstellerseitig angegebene Höhengenaugkeit der bewegten Vermessung von $\pm 0,10-0,15$ m eingehalten wird. Für die einzelnen Messpunkte ist bei optimalen Empfangsbedingungen für Satelliten- und Referenzsignal bzw. Postprocessing sogar von höherer Genauigkeit auszugehen.

Störungen beim Empfang der Satellitensignale

Störungen des Satellitenempfangs traten ab einer Nähe von 10-15 m zu Waldrändern oder Feldgehölzen auf. Sobald die Anzahl sichtbarer Satelliten unter vier sank, wurde eine Neuinitialisierung in größerem Abstand zum Hindernis notwendig und erforderte 1-2 Minuten Standzeit. Probleme des Satellitenempfangs speziell bei Zweifrequenz-Empfängern durch Funkdienste (Flugsicherung, Amateurfunk) sind bekannt¹.

Teile der bei der Projektbearbeitung aufgetretenen kurzzeitigen Ausfälle der Signalaufzeichnung von 1-2 Epochen sind auf den Filter zurückzuführen, der die Speicherung von Koordinaten mit einer internen Standardabweichung $CQ > 0,05$ m verhindert. Jedoch wurden auch bei *Postprocessing*-Kampagnen ohne Filter bis zu 25% der Messepochen nicht aufgezeichnet, was auf Fehler des 7 Jahre alten Gerätes hindeutet. Bei neueren RTK-Systemen ist von einer verbesserten Störfestigkeit auszugehen, wie parallele Versuche mit einem gleichwertigen Trimble-GPS neuerer Bauart am 18.5. 2001 zeigten (Zusammen mit Teilprojekt „Technikbetreuung und Technikvergleich“).

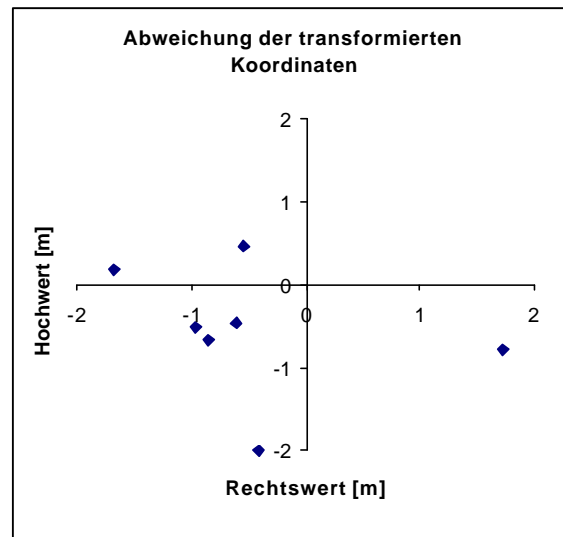


Abb. 3.2-4: Abweichung von Koordinaten, die mit bundesweit gebräuchlichen Transformationsparametersätzen von WGS84 nach Datum Potsdam transformiert wurden im Vergleich zu exakten, lokalen Parametersätzen (Tab. 3.2-4).

Geodätische Bezugssysteme und Transformationsproblematik

Zur Verknüpfung mit amtlichen Geodaten und zur exakten Flächenberechnung muss die Koordinatenausgabe im System der Landesvermessung erfolgen. Da die GPS-Positionsmessung im World Geodetic System 1984 (WGS84) erfolgt, ist eine Transformation in das geltende Landesystem nötig. Oft wird bei nachträglicher Transformation im GIS nur ein Transformationsparametersatz auf der Ebene eines Bundeslandes verwendet. Für die Untersuchungsgebiete dieser Arbeit wurden lokale Transformationsparameter mit einer 7-Parameter-Transformation nach Bursa-Wolf berechnet und im Premis bereitgestellt. Abb. 3.2-3 zeigt die Lageabweichung von Gauß-Krüger-Koordinaten, die mit einem bundesweiten Parametersatz für sieben *pre agro*-Betriebe berechnet wurden, bezogen auf Koordinaten, für die lokale Transformationsparameter verwendet wurden. Während die Lageabweichung bei der Nutzung gebräuchlicher Transfor-

¹ Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. http://gibs.leipzig.ifag.de/cgi-bin/Info_hom.cgi?de

mationsparameter im Bereich von ± 2 m liegt, beträgt die Höhenabweichung bis zu 8 m (Tab. 3.2-4). Ein lokaler Transformationsparametersatz ist allerdings nur notwendig, wenn raumbezogene Eingangsdaten aus verschiedenen Quellen in absoluter Zentimetergenauigkeit verwendet werden sollen. Die relative Genauigkeit im Untersuchungsgebiet ist dadurch nicht beeinflusst.

Tab. 3.2-4: Absolute Fehler in x, y und z-Richtung durch Transformationsparametersätze im Vergleich zu Transformationen mit lokalen Parametersätzen mit den Programmen Transdat und Geographic Calculator.

Standort	x-Shift (Transdat) [m]	y-Shift (Transdat) [m]	x-Shift (Geogr. Calculator)	y-Shift (Geogr. Calculator)	Höhen-Shift (Geogr. Calculator)
Baasdorf	-0,82	-0,63	-0,85	-0,66	-3,77
Raguhn	-1,03	-0,43	-0,97	-0,50	-4,34
Groß-Twülpstedt	-0,58	-0,46	-0,61	-0,46	-0,74
Kassow	-0,38	-1,98	-0,41	-1,99	+0,06
Landshut	-0,60	+0,54	-0,55	+0,47	-7,18
Raesfeld	-1,55	+0,25	-1,68	+0,18	+0,82
Thumby	+1,75	-0,84	+1,72	-0,78	-2,51

Laserscanning

Für die Untersuchung der Laserscanner-DGMs standen folgende Daten zur Verfügung:

- 1) gefilterte Punktdaten vor und nach Raster-Generierung durch die Firma TOPSCAN am Standort Kassow (2 m Raster),
- 2) DGM 5 der Landesvermessung Nordrhein-Westfalen am Standort Beckum (10 m Raster, Genehmigung S 1281/99 vom 8.9.1999).

Die Genauigkeit der Laserscanner-DGMs wurde in Kassow durch Vergleiche mit RTK-GPS-Messungen untersucht. Weiterhin wurde die Beschaffenheit der Oberfläche als Hillshade-Modell visuell und auf Basis des abgeleiteten Fließmusters für Kassow und Beckum bewertet.

Die Befliegung in Kassow wurde am 19.3.2000 mit einem ALTM 1020 (Wellenlänge 1047 nm, Abtastung mit Schwingenspiegel bei Messrate von 2000 Hz, Scanfrequenz 30-50Hz) durch die Firma TOPSCAN durchgeführt.

In Kassow wurden 20.815 RTK-Messpunkte auf Schlag 104 und 9.576 Messpunkte auf Schlag 111 (RTK-Genauigkeit s.o.) mit dem 2 m Raster von der ausgewerteten LS-Befliegung verglichen. Die Standardabweichung der Differenzen beider Verfahren betrug 0,072 m (Schlag 104) und 0,064 m (Schlag 111). Für beide Schläge lagen 95% der Differenzen im Bereich $\pm 0,14$ m und damit innerhalb der erwarteten Messgenauigkeit der Laserdaten. Abb. 3.2-5 zeigt das Histogramm der Differenzen beider Verfahren für den Schlag 111.

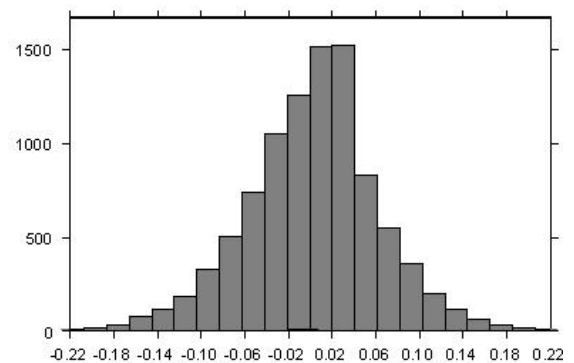


Abb. 3.2-5: Differenzen zwischen Laserscanner-DGM und RTK-DGM, Kassow 111 (9576 Messpunkte)

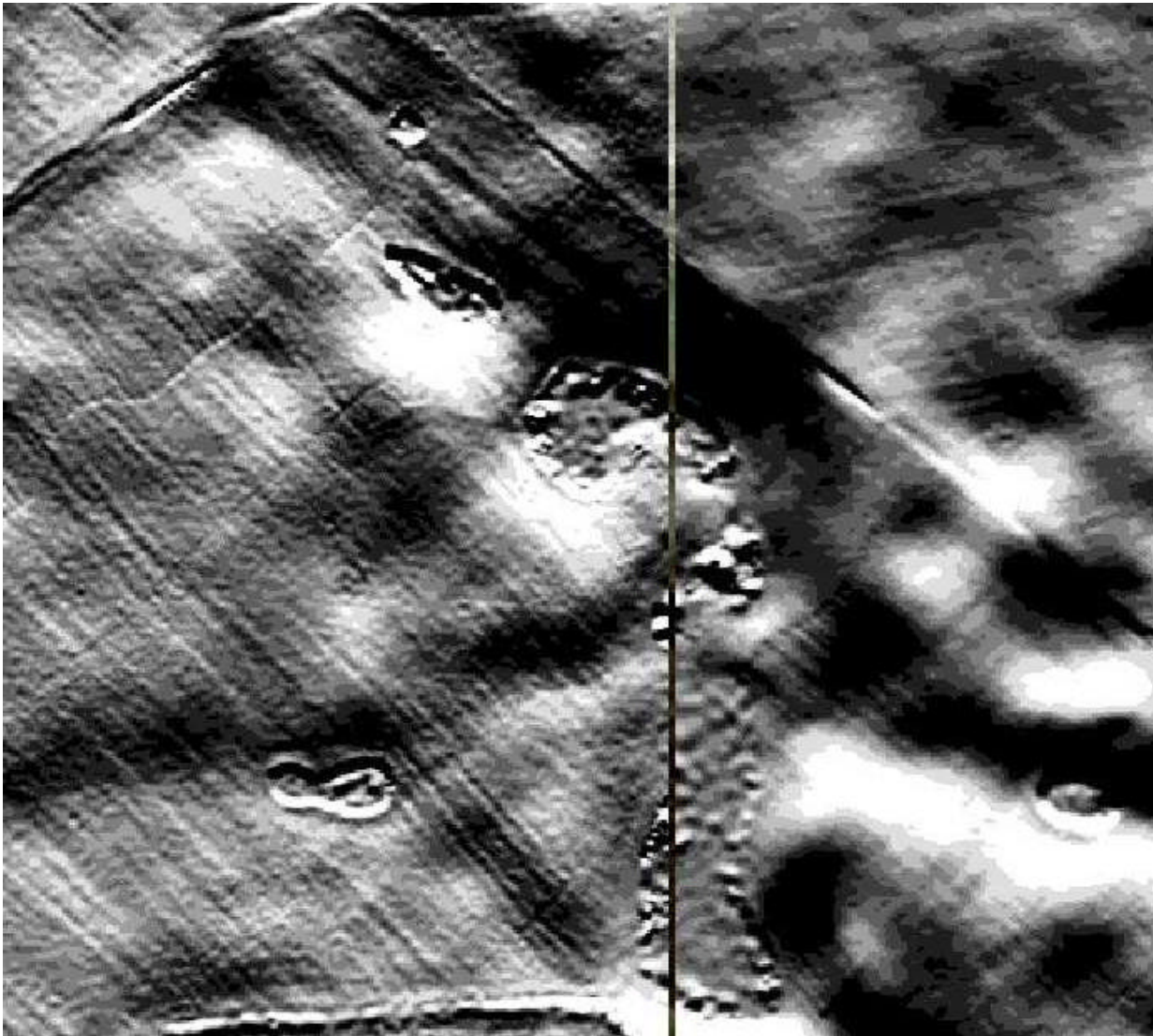


Abb. 3.2-6: Hillshade-Modell der Laserscanner-Daten Kassow mit Teilen der Schläge 107 und 104 entlang einer Kachelgrenze. Details wie Fahrgassen, Wege und Ackerhohlformen sind zu erkennen. Beleuchtungsparameter Azimut=40 und Lichtquelle von Nord. Kantenlänge des Ausschnitts: ca. 800 m.

Für beide Verfahren kann eine ähnlich hohe Genauigkeit angenommen werden, da mit unterschiedlichen Methoden nur Unterschiede im Zentimeterbereich, dem Bereich der Bodenrauigkeit, gemessen werden. Die Besonderheiten des Laser-DGM zeigten sich im hohen Detailreichtum. Zur Zeit der Befliegung betrug die Höhe des Pflanzenbestandes je nach Bodenbedingungen 0,05-0,15 m. Auf den bewirtschafteten Flächen wurde der Bestand alle 18 m durch die Reifenspuren unterbrochen (Abb. 3.2-6). Fahrgassen sind somit explizit im aufgezeichneten DGM enthalten und wirken sich auf die Modellierungen aus. Der Laserscanner zeichnete ein Mischsignal aus Bodenpunkten und Vegetationsoberfläche (Winterweizen) auf. Im Gegensatz zu der klaren Trennung von *first* und *last pulse* bei Waldflächen ist bei dem nur geringen Höhenunterschied zum Winterweizenbestand im März ein relativ homogener Mix entstanden. Bei der Ausweisung von Reliefformen ist dies ein eindeutiger Nachteil (Schmidt, 2003). Deshalb sollten Befliegungen zwischen Ernte und dem Wachstumsbeginn durchgeführt werden. Ein weiteres Problem ist ebenfalls in Abb. 3.2-6 zu erkennen: Zwei benachbarte Kacheln des DGM wurden bei der Bear-

beitung durch den Anbieter unterschiedlich stark gefiltert und vermindern die Vergleichbarkeit der Flächen. Die genannten Probleme treten bei den Laserscanner-DGMs der Landesvermessung auf Kosten der Detailinformation in den Hintergrund, da diese in der Regel nur als 10 m Raster abgegeben werden.

Generierung des DGM

Die Erstellung von DGMs 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 (Schmidt und Bill, 2000).

Aus den RTK-Höhenmesspunkten mit einer Einzelgenauigkeit von $\pm 0,02$ bis $\pm 0,1$ m wurden Oberflächen mit einer Schätzgenauigkeit bis $\pm 0,06$ m in halbem Fahrgassenabstand, also in den am weitesten von den Eingangspunkten entfernt liegenden Schätzpunkten, erreicht (Schmidt, 2003). 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. 3.2-5 gibt einen Überblick der DGM-Genauigkeiten, auf der die vorliegende Arbeit basiert. Der Messpunktabstand von 18 m entspricht der standardisierten DGM-Erfassung von den Fahrgassen aus. Sämtliche weiteren Entfernungen sollen zeigen, wie sich die Interpolationsverfahren bei ungünstigeren Aufnahmegeometrien verhalten. Die Tabelle zeigt RMS-Fehler und maximale Fehler von n Kontrollpunkten einer linienhaften Aufnahmegeometrie (Abb. 3.2-7). Die Ergebnisse der Schläge können als vergleichbar angenommen werden, da sie im gleichen Landschaftstyp „Jungmoränenlandschaft“ liegen und ähnliche Höhendifferenzen und Strukturen aufweisen.

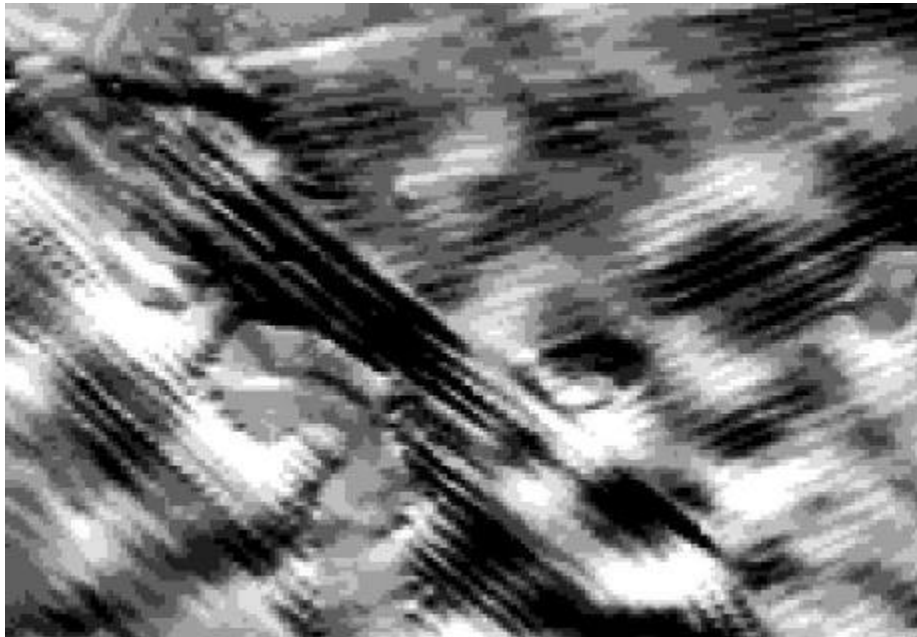


Abb. 3.2-7: Im Hillshade-Modell einer IDW-Interpolation spiegelt sich die Aufnahmegeometrie der RTK-Vermessung (Fahrgassenabstände 18 m) wieder. Kantenlänge der Abbildung: 1 km.

Tab. 3.2-5: Schätzgenauigkeiten von Interpolationsverfahren für n Kontrollpunkte eines RTK-GPS-Modells von drei *pre agro*-Schlägen.

Interpolationsmethode	RMSE [m]	Max. Fehler [m]	Messpunktabstand [m]	Schlag	n
Spline (Tension)	0,06	0,27	18	111	548
Ordinary 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
Ordinary Kriging (Gauß-Modell)	0,12	0,47	27	111	769
SCOP (Filterwert 0,05)	0,16	0,92	36	104	4830
Ordinary Kriging (Exp. Modell)	0,17	0,97	36	104	4830
Ordinary Kriging (Power Model)	0,18	0,96	36	104	4830
Topogrid-Tool (ARC/INFO)	0,19	1,10	36	104	4830
Minimum Curvature	0,29	3,64	36	104	4830
Minimum Curvature (Tension)	0,28	4,20	36	104	4830
Spline (Tension)	0,36	5,34	36	104	4830
IDW (12 Nachbarn)	0,30	1,40	36	104	4830
IDW (Suchradius 50 m)	0,31	1,52	36	104	4830
Ordinary Kriging (Gauß-Modell)	0,33	1,39	48	Alt-Gr.	1909
Topogrid-Tool (ARC/INFO)	0,34	1,34	48	Alt-Gr.	1909
TIN mit lin. Interpol. (Surfer)	0,36	1,83	48	Alt-Gr.	1909
IDW (12 Nachbarn)	0,43	1,74	48	Alt-Gr.	1909
Minimum Curvature (Tension)	0,46	1,51	48	Alt-Gr.	1909

Tab. 3.2-5 zeigt die erwartete Überlegenheit von Kriging-Verfahren sowie von SCOP und Topogrid-Tool, vor allem bei zunehmenden Schätzentfernungen und die Probleme der Spline und

Minimum Curvature-Interpolationen mit Ausschwingungen (hohe maximale Fehler). Bei geringen Fahrgassenabständen liegt der RMSE bei allen Verfahren ähnlich, Probleme liegen jedoch bei Artefakten in halber Schätzdistanz bei IDW (Schmidt, 2003). Wurden Splines unter Spannung (Tension) gelegt, sank der RMS-Fehler leicht, der maximale Fehler nahm jedoch zu. Kriging-Modelle zeigten sich als relativ robust gegenüber veränderten Parametern, solange der Nahbereich gut an das empirische Variogramm angepasst war.

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“, z.B. Abb. 3.2-7) 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 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.

Die Vermessung mit RTK-GPS bietet folglich auf den gering abgeschatteten Ackerflächen beste Voraussetzungen mit Punktgenauigkeiten von $\pm 0,02$ - $0,1$ m. Lokal kann es zu Abschattungs- und Störeffekten durch Waldränder/Feldgehölze oder Interferenzen mit Funksendern kommen, bei denen auf andere Verfahren ausgewichen werden muss. Die relativ hohen Gerätekosten für geodätische Zweifrequenz-Empfänger können nur bei großer Flächenleistung durch einen Dienstleister amortisiert werden. Für die RTK-Vermessung spricht aus wirtschaftlicher Sicht der präzise Schlagbezug. Dienstleister könnten RTK-Empfänger für verschiedene Einsatzgebiete vorhalten und die DGM-Erfassung mit einer präzisen Schlagvermessung oder anderen Sensorüberfahrten, die ebenfalls GPS-gestützt erfolgen, koppeln. Produkte der Landesvermessung bzw. Produkte externer Anbieter werden in Kacheln herausgegeben. So ist für die in der Region verteilten Schläge oft ein Mehrfaches der Schlagfläche zu erwerben, während terrestrische Vermessungen gezielt auf den Schlagflächen bzw. bis zur Einzugsgebietsgrenze durchgeführt werden. Aus Effizienzgründen und zur Schonung von Boden und Pflanze sollte die Befahrung auf die Fahrgassen beschränkt bleiben, was zu einer ungünstigen Verteilung der Messpunkte für die weitere Bearbeitung führt. Dennoch ist die Dichte der Aufnahmepunkte meist ausreichend für die Repräsentation der hydrologisch/pedologisch wirksamen Geländeformen. Im Echtzeit-Modus werden die Koordinaten direkt im Feld berechnet und können auch zur präzisen Anfahrt von Untersuchungspunkten genutzt werden. Ist die Echtzeit-Vermessung auf Grund von Hindernissen für die Telemetrier Verbindung nicht möglich, kann auf das nachbereitungsaufwändigere Postprocessing ausgewichen werden, das sich in stark hügeligen Lagen anbietet.

Die Vermessung mit flugzeuggetragenen Laserscannern bietet im offenen Gelände, wie gezeigt auch auf den Projektflächen, eine Punktgenauigkeit von $\pm 0,1$ m bei hoher Messpunktdichte (1-3 m). Abb. 3.2-8 zeigt einen Vergleich der Messpunktgeometrie von Laserscanning und RTK-GPS (Fahrgassenvermessung) und demonstriert den mit Laserscannern erreichbaren Detaillierungsgrad.

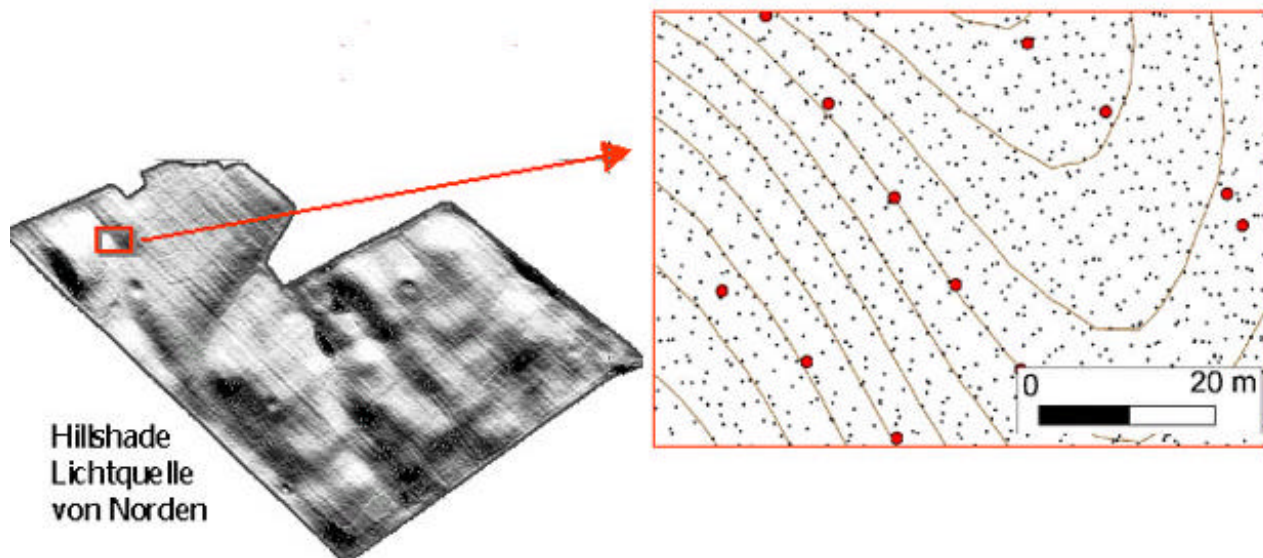


Abb. 3.2-8: Vergleich der Aufnahmegeometrie von Laser-Messpunkten (schwarz) und RTK-GPS-Messpunkten (rot; Aufnahmefrequenz 1 Hertz, Fahrgassenabstand 18 m).

Je nach Aufnahmezeitpunkt und Nachbearbeitung sind beim Laserscanning-Verfahren Pflanzenbestand und Fahrgassen (als Differenz von Boden und Bewuchshöhe) im DGM zu erkennen (Abb. 3.2-6). Die Kosten für eine Laserscanner-Befliegung sind hoch und können nur bei großer Flächenleistung wirtschaftlich mit der RTK-Vermessung konkurrieren. Eine zukunftssträchtige Datenquelle sind aus wirtschaftlicher Sicht die Laserscanner-DGMs der Landesvermessung (LVA), die allerdings nur für regionale Ausschnitte vorliegen und meist nur in einem 10 m-Raster angeboten werden. Ein weiterer Nachteil dieser preiswerten Daten gegenüber einer RTK-GPS-Vermessung ist die mangelnde Qualitätskontrolle. Bei den LVA-Laserscanner-DGM ist man auf einen Befliegungstermin und eine bereits erfolgte Datenbearbeitung angewiesen, welche nicht unbedingt den landwirtschaftlichen Bedürfnissen (Vegetationsfreiheit der Schläge) im Sinne der hier aufgestellten Qualitätsparametern entsprechen.

In Tab. 3.2-10 sind die flächenabhängigen Kosten der auf Grund der Untersuchungen favorisierten Verfahren dargestellt. Die Rahmenbedingungen beziehen sich bei der RTK-GPS-Erfassung auf eine Geräteabschreibung von 5 Jahren und gängige Lohnkosten für einen Ingenieur. Die Kosten einer Laserscanning-Kampagne schwanken je nach Untersuchungsgebiet und Nachbereitung zwischen 200 und 1000 €/km² und wurden für die Kalkulation hier mit 400 €/km² angenommen, bei Fixkosten von 12.000 € für die Befliegung. Für die DGMs der Landesvermessung muss beachtet werden, dass sie nur für einen kleinen Teil einzelner Bundesländer vorliegen und in der Regel in 5-fach schlechterer Auflösung als die Originaldaten herausgegeben werden. Zusätzlich zu den festen Kosten von 30 €/km² muss der Mindestbestellwert (je nach Bundesland 120-250 €) bei der Kalkulation beachtet werden.

Im Vergleich zu anderen Datenebenen für Precision Agriculture ist die DGM-Erstellung als günstig zu bewerten. Viele Sensordaten und Nährstoffbeprobungen müssen in regelmäßigen Zeitabständen neu erfasst werden. Bei der DGM-Nutzung für die Landwirtschaft kann eine lange Gültigkeit der Daten vorausgesetzt werden. Bei einer Kostenabschreibung z. B. auf 10 Jahre liegt die DGM-Erstellung mit RTK-GPS bei unter 1 €/(ha*Jahr).

Tab. 3.2-6: Kosten der Erfassung/Datenquelle pro Hektar in Abhängigkeit der Flächengröße. Die Laserscanner-DGM der Landesvermessung (DGM 5) sind nur für wenige Landesteile verfügbar. RTK-Vermessungen können schlaggenau erstellt werden, für LS-DGMs sind auf Grund der Kachelung i.d.R. größere Flächen zu erwerben.

Kosten in €/ha	RTK	Laserscanning	DGM 5 (Laser)
100 ha	7,5	124	2,5
1000 ha	5,5	16	0,3
10.000 ha	5,0	5	0,3

Die Zusatzkosten der Erstellung eines hochgenauen DGM im Vergleich zu DGMs niedriger Güte (Digitalisierung, Einfrequenz-GPS etc.) liegen dann im Cent-Bereich pro Hektar. Digitale Geländemodelle sind somit als kostengünstige, flächenhafte Datenquelle dringend als Bestandteil eines landwirtschaftlichen Minimaldatensatzes zu empfehlen.

B. Untersuchung von Reliefparametern

Schwerpunktmäßig wurden die Vorhersagen des TWI-Konzeptes 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, 2002).

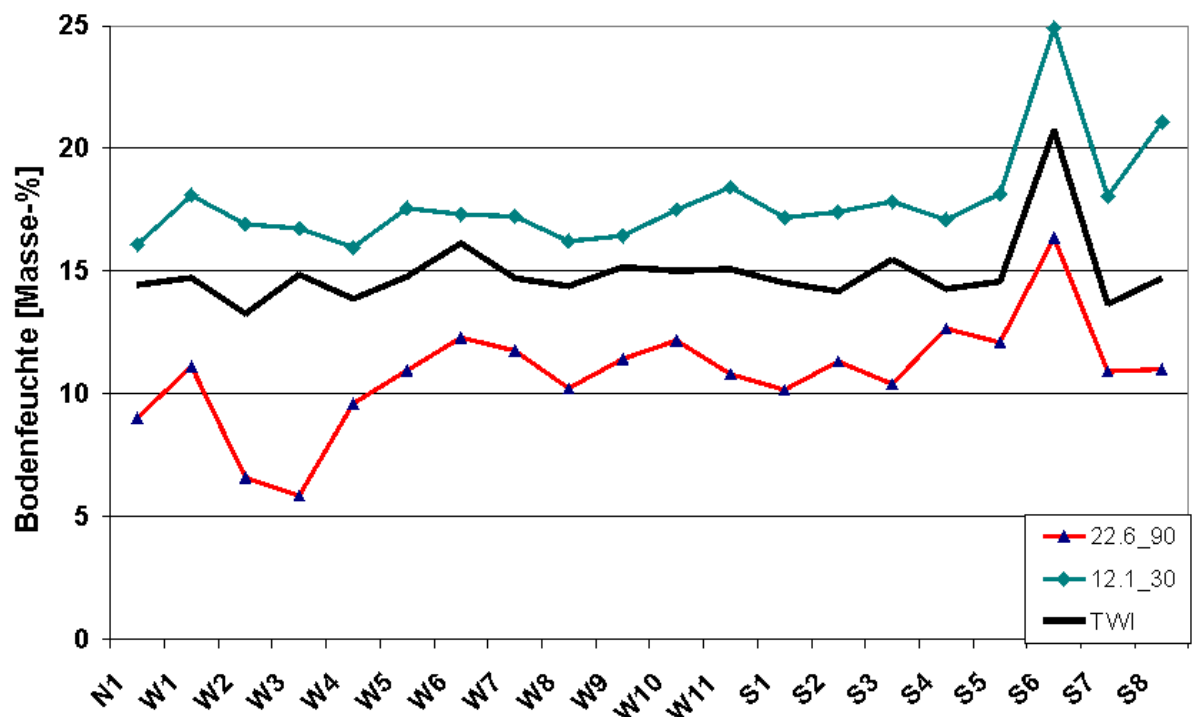


Abb. 3.2-9: Verlauf von Bodenfeuchte und TWI entlang einer Messtransecte (Kassow 111).

Korrelationen von TWI-Werten und Bodenfeuchtemessungen variieren stark mit Jahreszeit, Dauer seit dem letzten Niederschlagsereignis und der Auswahl der Messpunkte. Zwanzig morphologisch ausgewählte Punkte auf Schlag 111, Kassow, ergaben Korrelationen von $r^2=0,3$ bis $0,8$. Abb. 3.2-9 zeigt den Verlauf von gemessener Bodenfeuchte und TWI für zwei Messtage.

Auf der Abzisse sind die Messpunkte einer 430 m langen West-Ost-Transekte (W) durch den welligen Bereich des Schlages und einer 190 m langen Nord-Süd-Transekte (S1-5 Südhang, S7/8 Nordhang) aufgetragen. Zur Lage der Punkte siehe Abb. 3.2-1. Die Werte des TWI sind hierbei auf ein willkürliches Bodenfeuchteniveau angepasst. Deutlich zu sehen sind die guten Korrelationen im Senkenbereich (S6), wo winters wie sommers die Vorhersagen des TWI (hoher Werte = relativ feuchter als in den Nachbarregionen) zutreffen. Peaks des TWI stehen in der Regel für lokale topographische Tiefpunkte (hier: 1-3 m Höhenunterschied), in denen ein Zusammenfluss von Oberflächenwasser erfolgt, lokale Minima des TWI zeigen in der Regel Oberhangbereiche an. Diese Phänomene werden durch die Bodenfeuchtemessungen nicht so deutlich bestätigt wie der ausgeprägte Senkenbereich S6. Die deutlich geringere Bodenfeuchte im Juni an den Punkten W2 und W3 erklärt sich durch eine lokale Sandlinse, die durch Bohrstockbeprobungen bestätigt wurde. Hier überprägt der Einfluss der Textur deutlich den Reliefeinfluss. Dieses Problem wird in Folge durch Verschneidung mit anderen Datenebenen behandelt.

Abb. 3.2-10 zeigt den zeitlichen Verlauf der Korrelation von TWI und Bodenfeuchte in verschiedenen Bodentiefen. Diese Untersuchung wurde gemeinsam mit dem TP „Bodenwasserspeicher“ auf dem Schlag 641 (Wulfen) durchgeführt (Bobert et al., 2001).

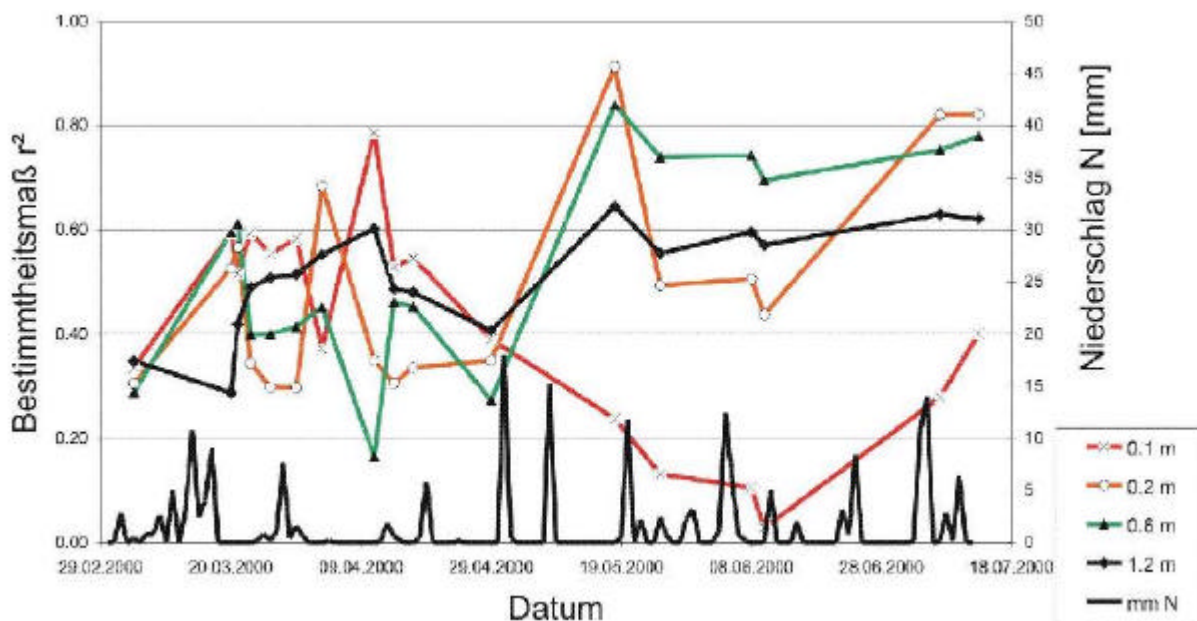


Abb. 3.2-10: Verlauf der Korrelation von Bodenfeuchte und TWI für acht Monitorpunkte auf Schlag 641, Wulfen für März-Juli 2000. Zusätzlich sind die Niederschlagsmengen aufgetragen.

Die besten Zusammenhänge zwischen TWI, also dem von lateralen Zu- und Abflussprozessen gesteuerten Bodenfeuchtepotenzial, und Bodenfeuchtemessungen finden sich wenige Tage nach Niederschlagsereignissen. Die Abflussmengen des Niederschlagswassers verteilen sich dem Re-

liefe entsprechend. Nach der Infiltration schwächen sich diese Zusammenhänge ab und der Texturinfluss wird stärker. Im Laufe der Vegetationsphase sind diese Zusammenhänge in zunehmender Tiefe zu finden. Ist im Frühjahr (bei Bodenwassersättigung) die Korrelation an der Oberfläche höher, schwächt sich diese bei zunehmender Abtrocknung im Frühsommer ab. Das Bodenwasser bewegt sich in 0,6 m Tiefe stärker dem Relief folgend. In größeren Tiefen ist der Bodenwasserhaushalt träger.

Für Rasterbeprobungen finden sich nur schwache Korrelationen zu Reliefparametern. Visuelle Übereinstimmungen zwischen dem TWI-Muster und Mustern auf bodenzeichnenden Luftbildern ergeben sich für fast alle Schläge (z.B. Abb. 3.2-11).

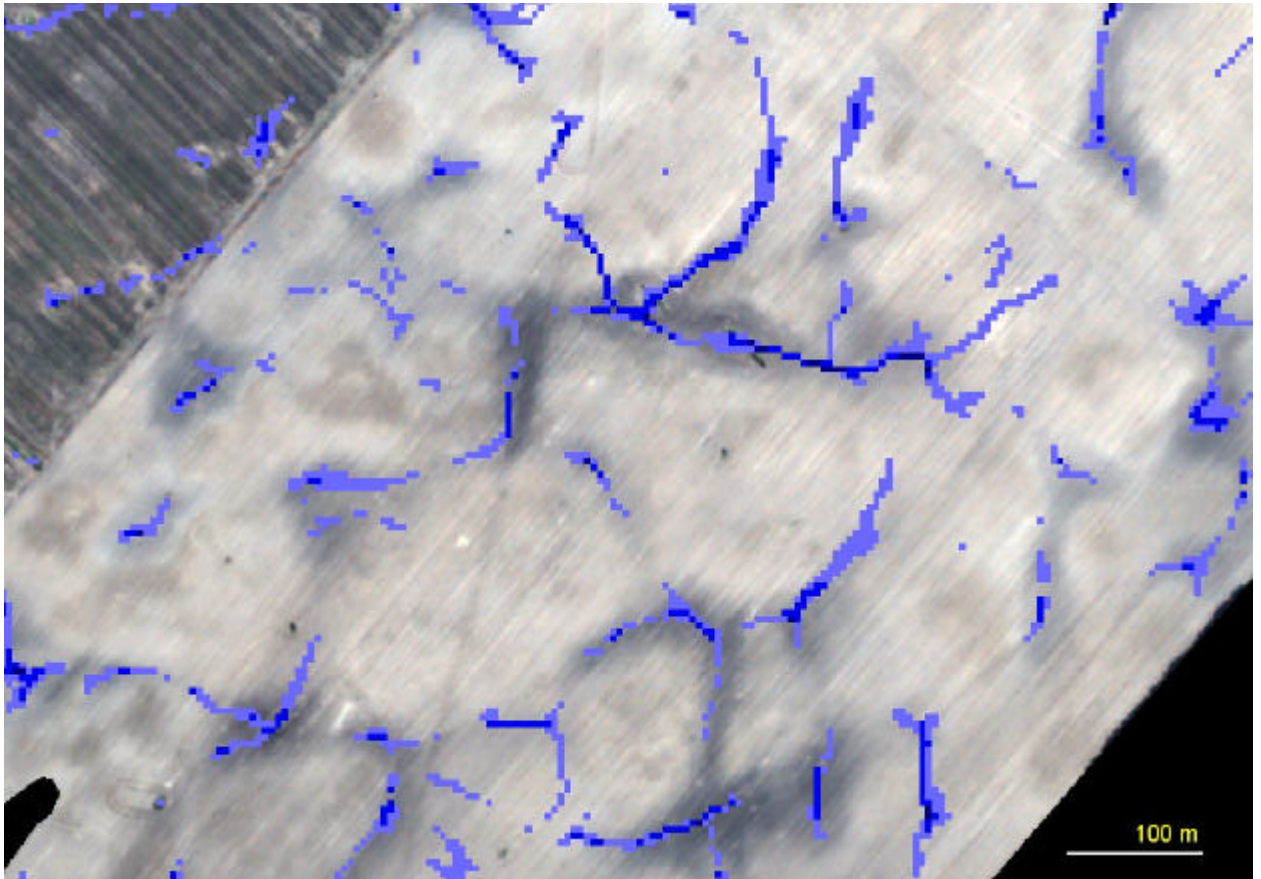


Abb. 3.2-11: Berechnete Abflusslinien aus dem TWI (blau) und Luftbild Kassow, Schlag 111 (Teilschlag) vom 24.9.2000 (TP „Luftbilder“). Dunkle Bereiche weisen auf höhere Feuchte/Humusgehalte des Oberbodens hin.

Die mit dem TWI aus dem DGM geschätzten Abfluss- und Akkumulationsmuster zeichnen sich auf dem bodenzeichnenden Luftbild deutlich ab und weisen auf erhöhte Feuchte und höheren Humusgehalt hin. Es ist mit reliefbedingt veränderten bodenphysikalischen und -chemischen Parametern zu rechnen, die sich bei Untersuchungen von Körnung, Kationenaustauschkapazität (KAK), k_f und p_v zeigten (Schmidt, 2003).

Die Übereinstimmungen von ausgegrenzten TWI-Extrema 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“ untersucht (Abb. 3.2-12). Hohe Werte der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit (ECa) repräsentieren in der Regel Böden mit höherem Tongehalt, Wassergehalt, organischem Anteil, Lagerungsdichte und Salzgehalt. 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 potenziellen 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.

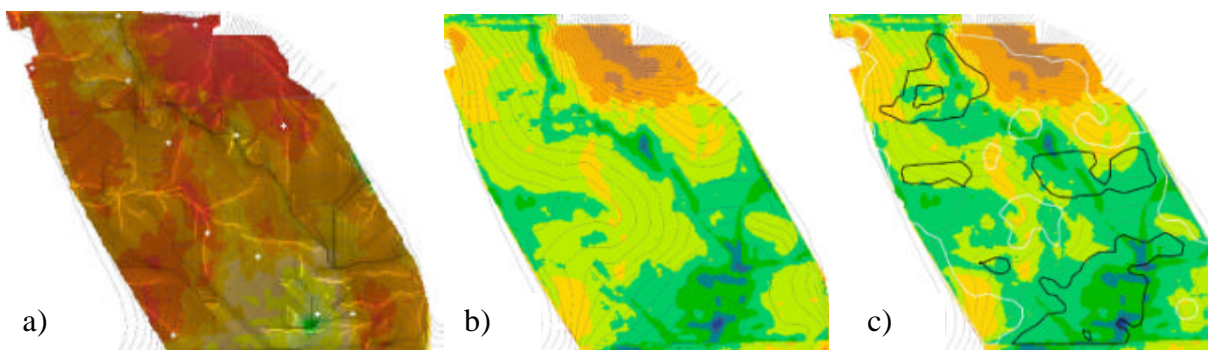


Abb. 3.2-12: Überlagerung von TWI und ECa. a) zeigt die durch den TWI ermittelte Struktur des Reliefs (Abflusslinien [dunkel] und Gerippelinien [hell]) als Farbtiefe der ECa-Karte. b) stellt die Verschneidung von ECa und gefiltertem TWI dar (Verknüpfung durch Multiplikation) im Vergleich zu den 1m-Höhenlinien. In c) sind auf das Verschneidungsergebnis Zonen hohen Ertrages (schwarz) und niedrigen Ertrages (weiß) projiziert.

Für den Schlag 641 (Wulfen) wurde diese Studie zusammen mit dem TP „Bodenwasserspeicher“ durchgeführt (Tab. 3.2-7). Dies funktioniert nur auf Schlägen, bei denen ECa und TWI deutlich positiv korrelieren. Schläge mit ausgeprägtem reliefbedingtem Abflussnetz (z.B. Kassow und teilweise Beckum sowie Groß-Twülpstedt) korrelieren entlang der Linien hohen TWI-Wertes stark negativ auf Grund der beschriebenen Bodenveränderungen (Schmidt, 2003).

Tab. 3.2-7: 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).

r^2	Schluff + Ton	Schluff	Ton
ECa	0.25	0.14	0.28
ECa_corr	0.71	0.49	0.53

Die Reliefanalyse und die Kartierung der elektrischen Leitfähigkeit (ECa) zeigen statische räumliche Muster, die sich je nach Landschaftsentwicklung unterschiedlich stark ähneln. Die Schwierigkeit in der Interpretation der ECa-Karten liegt in der komplexen Natur des Signals (siehe TP „Bodenwasserspeicher“), das einen integralen Wert über etwa 1-1,5 m Tiefe, also ggf. über mehrere Schichten unterschiedlicher Textur, liefert. Das DGM, bzw. daraus abgeleitete topografische Indizes, erlauben Rückschlüsse auf die laterale Transportrichtung, die relative Größe der potenziellen Verlagerungsprozesse und die Bodenfeuchteverteilung bei beginnender Abtrocknung der Böden. Das Relief gibt also Richtung und Ausmaß landschaftlicher Prozesse vor, während die elektrische Leitfähigkeit die aktuelle Ausprägung von Bodenparametern als Ergebnis der u.a. vom Relief gesteuerten Prozesse anzeigt. Informationen über die vertikale Wasserbewegung lassen sich in TWI-Muster integrieren. Dazu wurden verschiedene Rasteroperationen getestet. Als erfolgsversprechendste Variante zeigte sich die simple Multiplikation beider Ebenen (Abb. 3.2-13). Es wird eine Beziehung zwischen hydraulischer und elektrischer Leitfähigkeit der Art $ECa \sim 1/k_f$ angenommen, die auf der Abhängigkeit beider Parameter vom Tongehalt beruht. Somit wird in Bereichen hoher potenzieller vertikaler Transporte, also z.B. Sandlinsen oder -bänder, der TWI mit einem geringeren Faktor (ECa-Signal) belegt als in Bereichen von Böden mit höheren Ton- und Schluffanteilen (bessere Wasserhaltung).

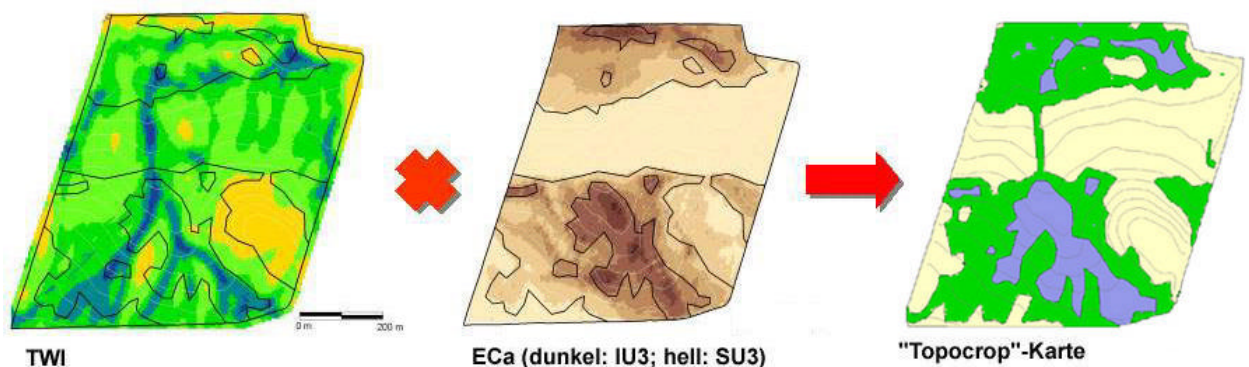


Abb. 3.2-13: Verschneidung von TWI-Raster und ECa-Raster zu einer kombinierten Relief-ECa-Karte. Betrieb Wulfen, Schlag Finkenherd. Texturangaben nach Hofbodenkarte. Die Abbildungen sind überlagert mit den 0,5 m-Höhenlinien.

Abb. 3.2-13 zeigt den Fall eines wenig reliefierten, stark von einem sandigen Band beeinflussten Schlages in der Köthener Ebene. Dort hilft der TWI zur Erklärung der hohen ECa-Werte im Zentrum der südlichen Hälfte (konvergierende laterale Wasserflüsse und Nährstofftransporte) und des Trockenbereiches im Osten der südlichen Hälfte. Dieser Trockenbereich stellt eine divergierende Reliefform dar. Sollte sich lateraler Wasserzufluss im Bereich des sandigen Bandes auswirken, dann zuerst in der im Gelände kaum wahrnehmbaren Abflussrinne im Zentrum.

Bei der Untersuchung des Betriebes Kassow wurde deutlich, dass die Werte von TWI und ECa sowohl gleich- als auch gegensinnig wirken können. Dieses Phänomen wurde auch für andere Betriebe, z.B. Beckum nachgewiesen. Abb. 3.2-14 zeigt für einen Ausschnitt von Schlag 104 (Kassow) dieses Phänomen. Innerhalb sämtlicher episodischer Abflussrinnen auf den untersuchten Schlägen in Kassow und Beckum ist die elektrische Leitfähigkeit um 8-12 mS/m geringer als in unmittelbarer Nachbarschaft. Das Substrat wurde an diesen Stellen als geringfügig tonärmer und sandreicher bestimmt. Die KAK war an diesen Stellen signifikant niedriger als an den 10-30 m entfernten Randbereichen der Rinne (Schmidt, 2003). Auf dem Schlag Tühlig in Beckum spiegelte sich die so erkannte, breite, sandige Abflussbahn auch im Ertrag wider.

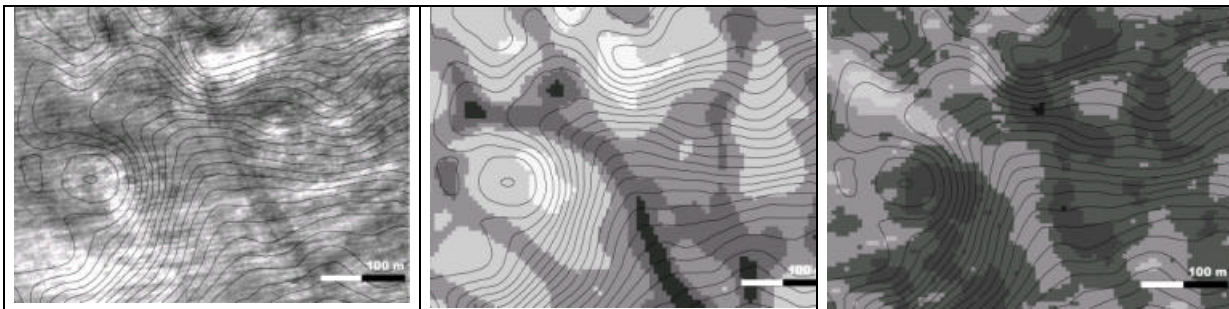


Abb. 3.2-14: Muster des auflaufenden Raps (Luftbild vom 24.2. 2002, TP „Luftbilder“), des TWI und der elektrischen Leitfähigkeit (Kassow, Schlag 104) im Vergleich zu den 1 m-Höhenlinien. Dunkle Grauwerte zeigen geringe Reflexion bzw. hohe TWI-Werte und hohe ECa-Werte.

Dies zeigt, dass auch Reliefformen, die nur nach wenigen Starkregen Wasser führen, im Laufe der Zeit über die allmähliche Veränderung des Substrates einen Einfluss auf das Standortpotenzial ausüben und ein Regler der Standortheterogenität sind. Eine Diskussion des Konzeptes mit quantitativen Ergebnissen folgt in Schmidt et al. (2003).

Der Vergleich von Luftbild und TWI in Abb. 3.2-14 zeigt zudem trockene Hangschultern, die eine geringere Auflauftrate haben. Hier führen die mit dem TWI abgrenzbaren Trocken-Extrema zu schlechteren Auflaufbedingungen. Die Unterschiede im Pflanzenbestand werden jedoch im Laufe der Vegetationsperiode häufig nivelliert und wirken je nach aktuellem Witterungsverlauf unterschiedlich.

Die nach dem TWI-Konzept als „feuchte Rinnen“ kartierten Bereiche bedürfen auf Grund dieser Erkenntnisse einer neuen Bewertung. Ein hoher TWI bedeutet nicht in jeder Situation ein höheres Bodenfeuchtepotenzial. Das Muster ist mit Hilfe anderer Daten zu interpretieren, um dadurch Rückschlüsse auf die landschaftlichen Prozesse zu ziehen. Die Kombination mit Geoelektrikdaten wie dem EM38 zeigt an, wie das potenzielle Verhältnis von lateralem und vertikalem Abfluss einzuschätzen ist und welche Abflussart folglich den Wasserhaushalt eines Schlages dominiert. Als Hinweis dient aus der TWI-Karte, möglichst das Einzugsgebiet betreffend und über den Schlagrand hinaus betrachtend, die Abflussstruktur. Sind aus dem TWI klare Abflussbahnen zu erkennen, ist davon auszugehen, dass die oben beschriebenen Prozesse die Textur der somit erkannten Rinnen auch bei nur wenigen Zentimeter aktuellem Höhenunterschied zu größerem Substrat hin verändert haben. Lokale Tiefpunkte und konvergierende Bereiche stehen immer für er-

höhtes Feuchtepotenzial im Frühjahr und bestimmen über die Auflaufbedingungen mit. Gibt es keine ausgeprägte Abflussstruktur auf dem Schlag, ist von einem geringeren Reliefeinfluss auszugehen aber einer höheren Wahrscheinlichkeit einer linearen Beziehung zwischen Bodenfeuchte/ECa-Daten und dem TWI. Voraussetzung für diese Annahmen ist jeweils ein DGM nach den im folgenden Abschnitt aufgestellten Qualitätskriterien.

C. Qualitätskriterien für DGMs

Die Untersuchungen zu Qualitätskriterien beruhen auf

- der visuellen Einschätzung von Artefakten (Hillshading-Modell),
- der visuellen Einschätzung der Abflussstruktur nach TWI-Konzept,
- dem Vergleich von Kontrollpunkten (RMSE) unterschiedlicher Datenerfassungsmethoden (präzise Methode versus Untersuchungsmethode) und
- dem Vergleich von Kontrollpunkten (RMSE) zur Cross-Validierung der Interpolation.

Es bestehen hohe Qualitätsanforderungen an die Geländemodelle. Die Qualität, d.h. Güte der Geländerepräsentation, wird beeinflusst durch Verteilung und Genauigkeit der Ausgangsdaten, Rasterweite sowie das Interpolationsverfahren. Ziel der geforderten hohen räumlichen Auflösung ist es, eine hydrologisch kontinuierliche Oberfläche mit allen abflussrelevanten Reliefformen zu erhalten. Die Höhenmessung muss genauer sein als die Höhenvariation benachbarter Rasterzellen. Unterstützt werden die hier angegebenen Qualitätsangaben durch Vergleiche von berechneten TWI-Werten unterschiedlich hoch aufgelöster DGMs mit Bodenfeuchtemessungen (Schmidt und Persson, 2002; Bill und Schmidt, 2001; Schmidt, 1999). In heterogenen Landschaften wie der welligen Grundmoränenplatte Mecklenburgs werden eindeutige Korrelation erst bei DGMs mit 2 m Rasterweite und einer Höhengenaugigkeit von wenigen Zentimetern erreicht, während in fluvial geprägten Landschaften bereits bei 5-10 m Rasterweite aus dem DGM eine gute Korrelation zu den Bodenfeuchtemessungen gefunden werden konnte (Bobert et al., 2001). Somit sollte je Landschaftstyp eine Rasterweite von 2-10 m verwendet werden. Präzision und Höhengenaugigkeit müssen dieser Skale entsprechen und liegen im Bereich bis $\pm 0,15$ m.

Eine geringere räumliche Auflösung führt zu geringeren Neigungsberechnungen und folglich zu höheren TWI-Werten. Zur Vergleichbarkeit muss also die gleiche Skale der Erfassung gewählt werden. Weder absolute Werte noch Muster von 2 m Laserscanning-DGMs können direkt mit fahrgassenbasierten RTK-GPS-Modellen verglichen werden. Bei der Wahl der vertikalen Präzision ist entscheidend, dass eine geringere Diskretisierung der Daten häufig zu gleichen Werten benachbarter Zellen statt zu kontinuierlichen Übergängen führt und dadurch keine Abflussrichtung bestimmt werden kann. Dies erfordert eine höhere Präzision in flachen Bereichen, die dort auf jeden Fall bei wenigen Zentimetern, also fast im Bereich der Bodenrauigkeit liegen muss. In Steillagen sind auch ungenauere Werte zu tolerieren.

Als Besonderheit der Genauigkeitsansprüche für landwirtschaftlich nutzbare DGM sei erwähnt, dass nicht die exakte Oberfläche mit oder ohne Bodenrauigkeit, sondern der Bodenbereich inklusive der oberen durchflossenen Bodenschicht für die Modellierung relevant ist. Insofern wirkt eine Rauigkeit des Modells, sei sie auch noch so exakt, störend auf die Algorithmen. Eine Glät-

tung des DGM vor der Modellierung (z.B. Nachbarschaftsstatistik) kann die Modellierungsergebnisse entscheidend verbessern, z.B. bei hoch aufgelösten Laserscanning-DGMs.

Neben den hier genannten messpunktbezogenen, quantitativen Kriterien von 2-10 m Auflösung der Lage und $\pm 0,15$ m in der Höhe sind auch qualitative Kriterien von gleicher Bedeutung. Die Beschaffenheit der Oberfläche muss eine durchgängige Abflussmodellierung erlauben, also über eine gewisse „Glattheit“ verfügen. Zur Einschätzung kann ein Hillshade-Modell (Schattenwurf bei vorgegebenem Sonnenstand) dienen. Sind Artefakte wie in Abb. 3.2-7 (Aufnahmegeometrie) zu erkennen, ist von Schwächen bei der Abflussmodellierung auszugehen.

Zur Dokumentation der DGM-Qualität (Metainformation) werden folgende Angaben gefordert:

- Erfassungsmethode (Präzision und Genauigkeit der Lage- und Höhenmessung),
- Zeitpunkt der Erfassung (Datenalter, ggf. Störungen durch Vegetationshöhe),
- Lage der Messpunkte als Kartendarstellung,
- Interpolationsmethode und -parameter,
- Angaben zur Weiterverarbeitung des DGM (z.B. Filterung/Glättung),
- Hillshade-Modell als Image.

D. Analyse von DGMs mit dem Modul TOPOCROP

Im Rahmen des Teilprojektes wurden verschiedene AVENUE-Scripte erstellt und in eine vorläufige ArcView-Erweiterung integriert. Bisher war die Ableitung des TWI in keiner ArcView-Erweiterung verfügbar. Dies stellt die zentrale Funktion des neuen Tools dar (Abb. 3.2-15).



Abb. 3.2-15: Das Topocrop-Reliefmodul (für *pre agro* entwickelte ArcView-Erweiterung)

Der TWI berechnet sich hierbei aus dem Logarithmus des Quotienten aus potenzieller Zuflussmenge (AVENUE request *flowaccumulation*) und der Geländeneigung (request *slope*). Als spezielles Feature wurde ein Glättungsparameter eingeführt, der als Summand zur Abflussmenge addiert werden kann. Somit kann gesteuert werden, wie stark Kammlinien im TWI-Modell sichtbar sein sollen. Ein hoher Summand sorgt für eine Mindestwassermenge in jeder Zelle und somit einer Nivellierung der Werte, z.B. für niederschlagsreiche Regionen.

Formelemente Schlag 111

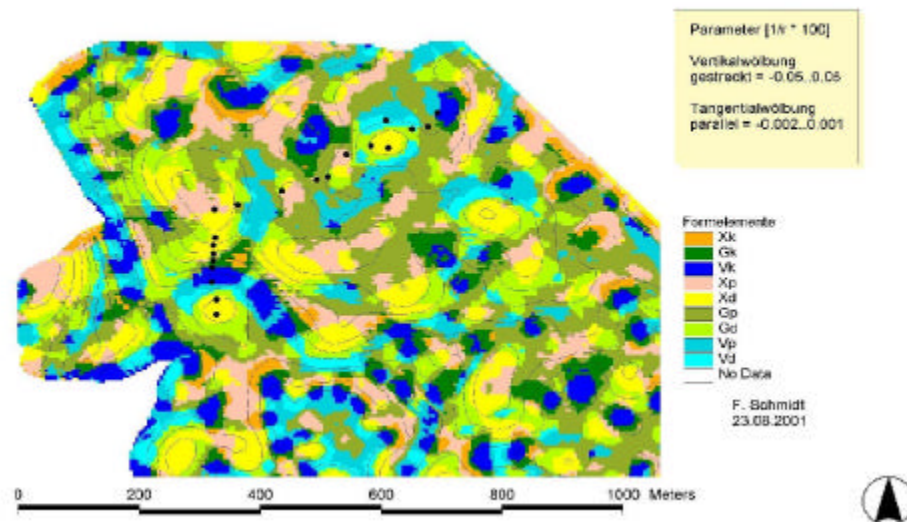


Abb. 3.2-16: Berechnung der Formelemente mit dem Topocrop-Modul.

Weiterhin können zur Erosionsabschätzung der Streampower-Index (Stärke des Abtragsvermögens aufgrund von Zuflussmenge und Gefälle) und der Slope-Length-Faktor zur Verwendung in der Revised Universal Soil Loss Equation RUSLE (empirische Variante nach Moore und Wilson (1992) berechnet werden. Die Erkennung von Formelementen (Kombination der Wölbungstypen, Tab. 3.2-2) ist für DGM der RTK-GPS-Erfassungsskala mit dem hierfür durch das TP erstellten Script „Landform Elements“ möglich. Hierbei wird eine formbasierte Einteilung der Landschaft möglich, in der z.B. „Xd“ (konvex-divergierend) kuppige Bereiche bzw. Hangschultern anzeigt und „Vk“ (konkav-konvergierend) einem zuflussdominierten Bereich, z.B. Hangfuß oder Senke entspricht.

Auf Grund der schlechten numerischen Darstellbarkeit der Übergangsformen wurde dieses Konzept für die Auswertung nicht weiter verfolgt. Die erzielten Muster ähneln stark dem TWI-Konzept (da beide entscheidend auf Berechnung der Geländekrümmung aus dem gleichen DGM beruhen), lassen sich aber in Bezug auf das Feuchteregime nicht ordinal skalieren und somit nicht in Management-Empfehlungen integrieren.

Das RMSE-Script berechnet einen numerischen Qualitätsparameter für die DGM-Interpolation. Als Eingangsdaten sind dazu die Original-Höhenmesspunkte erforderlich, aus denen nur ein Teil für die DGM-Berechnung verwendet werden dürfen. Auf Basis des interpolierten Grids und den nicht verwendeten Kontrollpunkten wird ein Maß zur DGM-Qualität ausgegeben (siehe Tab. 3.2-5). Weitere Funktionen, die in der restlichen Projektlaufzeit integriert werden sollen, sind die

automatische Ausgrenzung der TWI-Extrema als Polygone für die pflanzenbaulichen Module und die Verschneidung mit den ECa-Grids.

Weitere Untersuchungen wurden zur Ableitung des Auswinterungspotenzials aus dem DGM durchgeführt, aber mangels Validierungsmöglichkeiten (Kartierung von Auswinterungsschäden) nicht in das Modul integriert. Dies bleibt zukünftigen Arbeiten überlassen. Die Ableitung basiert auf einer Multikriterienabfrage aus Hangneigung, Exposition und Vertikalwölbung. Damit werden Oberhang- und Kuppenlagen in Hauptstreichrichtung kontinentaler Winde (Wurzelabriss bzw. Erfrieren) und südexponierte Hanglagen (Vertrocknung bei Spätfrost) ausgegrenzt. Sind in der Vergangenheit Schäden auf einer Fläche aufgetreten, kann das hier entwickelte Verfahren die Potenzialflächen im Vorfeld eingrenzen und bei der Erstellung der Aussaatkarte berücksichtigen. Als Ergebnis wurden für die Projektschläge zwei Polygontypen bereitgestellt („Frostwechsel“ und „Kältetod“).

Von Wurzelabriss/Erfrieren bei kontinentalen Winden sind am stärksten Nord-Ost exponierte Oberhanglagen und Kuppen betroffen. Nach KA4 wurde als Kriterium die „Schattseite“ gewählt, beginnend bei Nord = 0° bis 112.5° . Um diese Auswahl auf Oberhanglagen und Kuppen zu begrenzen, kann die Vertikalwölbung verwendet werden, da die gesuchten Reliefpositionen eine konvexe Krümmung aufweisen. Als Grenzwert wurde nach Analyse von mehreren Schlagflächen des *pre agro*-Projektes der Krümmungsradius 1000 m (Vertikalwölbung < -0.1) gewählt.

Vertrocknung durch Frostwechsel ist an südexponierten Hängen bei bestimmten Wetterlagen zu erwarten. Für die Abfrage wurden folgende Grenzwerte gewählt: Exposition $157.5 < x < 247.5$ (stärkste Einstrahlung nach KA4) und Hangneigung $> 3^\circ$.

Die Ergebnis-Grids wurden im Anschluss mit einer Resampling-Operation auf die Rasterweite 10 m vereinheitlicht. Durch die Resampling-Methode „nearest neighbor“ werden Zellen, deren Werte entscheidend von den Nachbarwerten abweichen, unterdrückt. Um Polygone für Zuschläge bei der Berechnung der Applikationskarten zu erhalten, wurde eine Vektorisierung und anschließende Elimination von Teilflächen unter der maschinell spezifisch bewirtschaftbaren Größe von 400 m^2 durchgeführt. Mit dieser Methode wurden mehrere Schläge des *pre agro*-Projektes untersucht, um das Verfahren in verschiedenen Landschaftsräumen, wie z.B. der norddeutschen Jungmoräne, der Leipziger Tieflandsbucht, der Münsterländischen Tieflandbucht und im Tertiärhügelland zu testen. Auf gefährdeten Standorten wurden bis zu 33 % der Schlagfläche als auswinterungsgefährdet klassifiziert, während Schläge mit geringem Relief wenig bis gar keine Auswinterungspotenziale aufwiesen. Allerdings wurden auch Potenzialflächen auf Schlägen ermittelt, die in Regionen mit sehr geringem Auswinterungsrisiko liegen. Um den regionalen, von der reinen Topographie des Schlages unabhängigen, mesoklimatischen Effekt einzubeziehen, sollte vor Anwendung des Verfahrens auf Basis historischer Daten geprüft werden, ob bzw. wie oft Auswinterungsschäden auftreten. Die Analyse sollte nur für Regionen durchgeführt werden, in denen der Landwirt regelmäßig Schäden zu erwarten hat. In solchen Fällen kann die DGM-Analyse diese Schadpotenziale lokalisieren und direkt bei der Aussaat berücksichtigen.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Das TWI-Konzept zeigte sich als zentraler Baustein einer landwirtschaftlich orientierten DGM-Auswertung. Der Vorteil liegt darin, 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 Nachbarschaftsstatistik (Glättung) praxistaugliche Karten des Bodenfeuchtemusters sowie weitere DGM-Indizes liefert. Optional wird die Verschneidung mit Karten der elektrischen Bodenleitfähigkeit integriert, 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. 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 Laserscanner-DGMs wird sich dies voraussichtlich für mehrere Regionen Deutschlands in einigen Jahren ändern. Für die derzeitige Situation erwies sich die Vermessung mit dem RTK-GPS als ökonomischste Variante zur DGM-Erstellung.

3.2.8 Kooperation mit anderen Teilprojekten

Die Bedeutung des Reliefs für die Pflanzenproduktion beruht auf seinem Einfluss auf die Boden-genese, 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 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. Potenzielle Vernässungszonen in Mulden, Erosionsrinnen, konvergierende, optimal versorgte Bereiche und potenzielle Trockenbereiche an Hangschultern (bedingt durch Erosion und starken Bodenwasserabfluss bei kleinem Zuflussgebiet) lassen sich über Wetness-Index-Extrema erkennen. Eine gezielte Zusammenarbeit bestand 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“ wurden 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“ verwendete 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.

3.2.9 Ausblick

Während der Projektlaufzeit wurde eine umfangreiche Datenbasis für vielfältige Anwendungsmöglichkeiten erstellt. Dazu wurden Tools zur Relieffanalyse entwickelt, die ein verbessertes Verständnis der Heterogenität auf landwirtschaftlichen Flächen ermöglichen und diese Erkenntnisse mit dem Raumbezug für die Erstellung von Applikationskarten zur Verfügung stellen. Die gewonnene Expertise und die gut dokumentierte und auf ihre Qualität hin intensiv untersuchte Datengrundlage sollte auf jeden Fall einer weiteren Nutzung dienen.

Gerade die neu entwickelte Methode der Verschneidung mit geoelektrischen Daten stellt sowohl ein großes Potenzial zum Verständnis der bodenkundlichen Prozesse als auch ein Tool zur standortbedingten Aufteilung der Schläge dar. Die Zusammenhänge zwischen pflanzenbaulich wichtigen Bodeneigenschaften und ECa-Signal bzw. der hier vorgestellten „Topocrop“-Karten sind jedoch nur ein erster, kritisch zu betrachtender und weiter zu entwickelnder Ansatz, um stabile Muster auf den Schlagflächen zu bearbeiten. Vor allem im Bereich der geschichteten Böden sind Lösungen zu finden, z.B. durch Tests mit der bisher noch nicht untersuchten Gleichstrom-Geoelektrik. Für einen nächsten Schritt sind gezielte Boden- und Pflanzendaten auf ausgesuchten Testflächen zu mehreren Zeitpunkten der Vegetationsphase zu erheben, um die Auswirkungen des Reliefs zu quantifizieren und in Algorithmen einzubinden. Zur Planung der zeitlichen und räumlichen Auflösung dieser Untersuchungen sind im Laufe der Projektbearbeitung durch die intensive Zusammenarbeit mit den pflanzenbaulich und bodenkundlich orientierten Teilprojekten die fachlichen Grundlagen erarbeitet worden.

3.2.10 Literatur

- Barling, R.D., Moore, I. D. and Grayson, R.B. (1994): A quasi-dynamic wetness index for characterizing the spatial distribution of zones of surface saturation and soil water content. *Water Resources Research*, Vol. 30, No.4, p. 1029-1044.
- 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.
- Bill, R., Teichert, B., Zimmermann, A. (2000): ATKIS – Eine Bestandsaufnahme. In: *ATKIS - Stand und Fortführung.* Schriftenreihe des DVW, Band 39. Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart. S. 1-8.
- 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, S.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
- ESRI (1996): ArcView SpatialAnalyst. Advanced Spatial Analysis Using Raster and Vector Data. Environmental Systems Research Institut Inc. Redlands, Ca.
- Golden Software, Inc. (1999): SURFER for Windows. Version 7 User's Guide. Contouring and 3D Surface Mapping. Golden, Colorado (USA).
- Gomes Pereira, L.M., Janssen, L.L.F. (1999): Suitability of laser data for DTM generation: a case study in the context of road planning and design. In: ISPRS Journal of Photogrammetry, Remote Sensing 54, S. 244-253.
- 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 Modeling, 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.
- Lee, J.-T., Chen, W.-F. (2000): Performance Evaluation of RTK-GPS without SA effect. 21st Asian Conference on Remote Sensing. Taipeh, Taiwan. <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2000/ts13/masg0003.html>
- 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, S. 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., Wilson, J.P. (1992): Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation. In: Journal of Soil and Water Conservation, Vol.47, S. 423-428.
- Moore, I.D., Gessler, P., Nielsen, G., Peterson, G. (1993): Soil Attribute Prediction using Terrain Analysis. In: Soil Science Society America Journal, Vol. 57, S. 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. Stafford, J. (Hrsg.): Precision Agriculture'99. Proceedings of the 2nd European Conference on Precision Agriculture. Odense, Denmark. Sheffield Academic Press, Sheffield, S. 561-569.
- Petzold, B., Reiss, P., Stössel, W. (1999): Laser scanning-surveying and mapping agencies are using a new technique for the derivation of digital terrain models. In: ISPRS Journal of Photogrammetry, Remote Sensing 54, S. 95-104.
- Resnik, B., Bill, R. (2000): Vermessungskunde für den Planungs-, Bau- und Umweltbereich. Wichmann-Verlag, Heidelberg. 266 S.
- Richter, H. (1962): Eine neue Methode der großmaßstäbigen Kartierung des Reliefs. In: Petermanns Geogr. Mitt., 106. Gotha. S. 309-312.
- Schmidt, F. (1999): Bodenfeuchtemodellierung mit Hilfe digitaler Geländemodellanalyse und Geo-Informationssystemen. Diplomarbeit am Fachbereich Landeskultur und Umweltschutz, Universität Rostock, unveröffentlicht.

- Schmidt, F., Bill, R. (2000): Digitale Geländemodelle in der Landwirtschaft. In: ArcView GIS: Fachanwendungen mit einem Desktop-GIS. Hrsg: W. Liebzig und J. Schaller. 2. völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage. Wichmann-Verlag, Heidelberg, S.189-208.
- 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. (2001): Erfassung, Interpolation und Auswertung von digitalen Geländemodellen für die Landwirtschaft. In: Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 3/2001, S. 128-134.
- Schmidt, F., Persson, A. (2003): Comparison of DEM data capture and topographic wetness indices. Precision Agriculture. Kluwer Academic Publishers. Accepted (October 2002).
- Schmidt, F., Gebbers, R., Lück, E. (2003): A method for Advanced Soil Modelling with Digital Elevation Models and Geophysical Data. In preparation for 4th European Conference on Precision Agriculture. 15-18 June 2003. Berlin. In preparation.
- Schmidt, F. (2003): Hochgenaue Digitale Geländemodelle - Untersuchung zu Erfassung und Analyse am Beispiel Precision Agriculture. Dissertation. Universität Rostock. In Vorbereitung.
- Wilson, J.P., Gallant, J.C. (Hrsg.) (2000): Terrain Analysis. Principles and Applications. John Wiley, New York.

Eigene Veröffentlichungen, vollständige Liste

- Schmidt, F. (2003): Hochgenaue Digitale Geländemodelle - Untersuchung zu Erfassung und Analyse am Beispiel Precision Agriculture. Dissertation. Universität Rostock. In Vorbereitung.
- Schmidt, F., Gebbers, R., Lück, E. (2003): A method for Advanced Soil Modelling with Digital Elevation Models and Geophysical Data. In preparation for 4th European Conference on Precision Agriculture. 15-18 June 2003. Berlin. In preparation
- Schmidt, F., Persson, A. (2002): Comparison of DEM data capture and topographic wetness indices. Precision Agriculture. Kluwer Academic Publishers. Accepted (October 2002).
- Schmidt, F. (2002): Ableitung von reliefbedingten Standorteigenschaften für das Teilflächenmanagement. Landtechnik 2/2002. Landwirtschaftsverlag, Münster. S. 122.
- Bill, R., Schmidt, F. (2002): Relief. In: Werner, A., Jarfe, A.: Precision Agriculture - Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis. KTBL-Sonderveröffentlichung 038. Darmstadt. S. 65-76.
- Schmidt, F. (2001): Erfassung, Interpolation und Auswertung von digitalen Geländemodellen für die Landwirtschaft. In: Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 3/2001, S. 128-134.
- Schmidt, F. (2001): 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. Band 14, S. 195-198.
- Schmidt, F. (2001): Generation and analysis of digital terrain models for agricultural applications. In: Grenier, G., Blackmore, S. (Hrsg.): Third European Conference on Precision Agriculture, June 18th-21st, Montpellier, France, S. 109-114.
- 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, S.349-354.
- Schmidt, F., Irrgang, A. (2001): Mapping soil moisture pattern for crop management with digital terrain analysis and remote sensing. Poster presentation / Book of abstracts. Third European Conference on Precision Agriculture, June 18th-21st, Montpellier, France, France, S. 62-63.
- Schmidt, F. (2001): Bodenfeuchteabschätzung mit digitalen Geländemodellen. Workshop-Beitrag bei den 3. Informations- und Kommunikationstagen Mecklenburg-Vorpommern (IuK-Tagen). Rostock, 13.-15.6.2001.
- Schmidt, F., Irrgang, A. (2000): Improved GIS data accuracy for precision agriculture and aerial photography management by use of digital elevation models. Agroenviron 2000. 2nd International Symposium on New Technologies for Environmental Monitoring and Agro-Applications. Proceedings. 18-20 October 2000, Tekirdag / Turkey. Trakya University Publications No 29, S. 111-120.
- Schmidt, F. (2000): Digital Terrain Modeling for Precision Agriculture. Agroenviron 2000. 2nd International Symposium on New Technologies for Environmental Monitoring and Agro-Applications. Proceedings (Workshop). 18-20 October 2000, Tekirdag / Turkey. Trakya University Publications No 29, S. 33-37.
- Schmidt, F., Gebbers, R. (2000): Erstellung und Auswertung von digitalen Geländemodellen. In: B.Resnik, (Hrsg.): GPS - Grundlagen, Anwendungen und Produkte. Tagungsband zum Workshop am 16.3.2000 an der Universität Rostock. Interner Bericht Nr. 13, Institut für Geodäsie und Geoinformatik. Rostock, S. 69-85.
- Schmidt, F. (2000): Nutzung von digitalen Geländemodellen (DGM) im Projekt preagro. Landtechnik 3/2000. Landwirtschaftsverlag, Münster. S. 259.
- Behnken, C., Bill, R., Grenzdörffer, G., Lamp, J., Reiche, E.W., Schmidhalter, U., Schmidt, F., Selige, T., Sperl, C., Brozio, S., Gebbers, R., Herbst, R., Kersebaum, C., Lorenz, K., Wenkel, K.O. (2000): Ermittlung und Analyse der Zustände der Geofaktoren. In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) [Hrsg.] Sonderveröffentlichung 032: Management für ortsspezifischen Pflanzenbau zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit der Landwirtschaft und zur Förderung ihrer Umweltleistung / Verbundprojekt pre agro - Zwischenbericht 2000, S. 45-74. Darmstadt.
- Schmidt, F., Bill, R. (2000): Digitale Geländemodelle in der Landwirtschaft. In: ArcView GIS: Fachanwendungen mit einem Desktop-GIS. Hrsg: W. Liebig und J. Schaller. 2. völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage. Wichmann-Verlag, Heidelberg, S.189-208.
- Gebbers, R., Schmidt, F. (1999): DGM-Erfassung mittels RTK-DGPS und Nutzung in der Landwirtschaft. In: R. Bill, G. Grenzdörffer, und F. Schmidt (Hrsg.): Sensorsysteme im Precision Farming. Tagungsband zum Workshop 27./28.9.1999 an der Universität Rostock. Interner Bericht Nr. 12, Institut für Geodäsie und Geoinformatik.