

6 Relief (TP II-1b)

Teilprojektleiter: Prof. Dr. Ing. R. Bill

Bearbeiter: Dipl. Ing. F. Schmidt

6.1 Zusammenfassung

Das Teilprojekt „Relief“ untersucht, wie die Form der Geländeoberfläche, die für viele landschaftsökologische Prozesse ein wichtiger Regler ist, in die technologische Kette von precision agriculture am effektivsten eingebunden werden kann. Geeignet dazu sind digitale Geländemodelle, die in Geo-Informationssystemen mit sämtlichen anderen Datenebenen eines Schrages in Beziehung gesetzt werden können und somit Prozesse, die auf dem Schlag stattfinden, erklären und für Anwendungen nutzbar machen können. Im Rahmen des Projektes werden folgende Fragestellungen bearbeitet:

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

Im Laufe des Jahres 2000 wurden folgende Ergebnisse erreicht:

- Für die Module Bodenbearbeitung, Aussaat und N-Düngung stellt das „Wetness-Index-Konzept“ 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). Weiterhin benötigt das Modul „Wachstumsreglereinsatz“ Reliefinformationen.
- Die Anforderungen an ein DGM zur Berechnung des Wetness-Index 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 besser 10 cm sein.
- Folgende Methoden der DGM-Erfassung erfüllen diesen Anspruch: RTK-GPS und flugzeuggetragenes Laserscanning. Auf Schlagebene ist lediglich RTK-GPS bezahlbar. Die durch das Teilprojekt untersuchten Höhendaten der Landesvermessungsämter genügen den landwirtschaftlichen Anforderungen derzeit nur in wenigen Fällen.
- ECa-Daten können mit dem Wetness-Index verbesserte Tongehalts-Vorhersagen treffen.

6.2 Bezüge im Verbundprojekt

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 techno-
logische Bedeutung des Geländes basiert auf der Beeinflussung der Arbeitsqualität von Maschi-
nen sowie auf dem Einfluss auf Sensorleistungen und -ergebnisse (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 Teilprojek-
ten verwendet. In folgende Module fließen Geländeparameter ein: Modul Bodenbearbeitung,
Modul Aussaat und Modul N-Düngung. Die derzeitige Konzeption, Reliefinformationen in die
Module zu integrieren, besteht aus der Ausgrenzung von Extrema aus dem DGM. Als geeigneter
Parameter für die Repräsentation der Feuchte- und damit auch Boden- und Wachstumsbedingun-
gen für die Pflanzen erwies sich der Topographische Wetness-Index, TWI (Beven & Kirkby
1979, Moore et al. 1993, Schmidt & Gebbers 1999, Bobert et al. 2001). Potenzielle Vernäs-
sungszonen in Senken, optimal versorgte Bereiche in rinnenartigen Reliefformen und potentielle
Trockenbereiche an Hangschultern (bedingt durch Erosion und starken Bodenwasserabfluss bei
kleinem Zuflussgebiet) lassen sich über Wetness-Index-Extrema erkennen (siehe Ergebnisse)
und sind daher eine wertvolle Information für pflanzenbaulich orientierte Teilprojekte. An einer
Optimierung und Validierung des TWI und weiteren Reliefparametern im Hinblick auf ihre An-
wendbarkeit unter verschiedenen Reliefbedingungen besteht im Moment der größte Forschungs-
bedarf. Ziel ist die Ausarbeitung von Entscheidungskriterien für die Gegebenheiten, bei denen
Reliefinformationen eine gute Bodenfeuchterepräsentation ergeben und somit die Erfassung ei-
nes Geländemodells rentabel ist. Optimierung und Validierung ist nur in Verbindung mit anderen
Teilprojekten möglich. Eine enge Zusammenarbeit besteht mit den Teilprojekten "Hof-Boden-
karten", "Bodenwasserspeicher", "Boden- und Bestandesführung", "Bodenbearbeitung und Be-
stellung" und "Düngung". Speziell für die Module „Grunddüngung“ und „Kalk“ müssen die ent-
scheidenden Reliefparameter in gemeinsamer Arbeit noch entwickelt werden. Die Wetness-
Index-Karten sind nicht nur notwendig für sieben von neun *pre agro*-Modulen, sondern helfen
auch bei der Korrektur von weiteren Daten wie der elektrischen Leitfähigkeit (ECa-Karten). Dies
wurde gemeinsam mit dem TP „Bodenwasserspeicher“ untersucht.

Neben den Rückschlüssen auf die räumliche Verteilung des oberflächennahen Bodenwasserge-
haltes sind folgende Daten von Bedeutung für andere Teilprojekte:

Zur Erstellung der "Hof-Bodenkarten" werden die aus dem DGM abgeleiteten Höhenlinien hin-
zugezogen, um Grenzen zwischen der Ausdehnung von Bodenformen festzulegen und die Posi-
tion für optimale Beprobungspunkte zu finden. Das Teilprojekt "Luftbilder" verwendet das DGM
zur Abschätzung der Notwendigkeit der Entzerrung von Bildern auf Grund von reliefbedingtem
Bildversatz oder zur Optimierung der Bildflugplanung (Schmidt & Irrgang 2000). Für die Bo-
denbearbeitung werden die aus den DGM abgeleiteten Extrema ausgegrenzt, um dort gezielt eine
differenzierte Bearbeitung durchzuführen.

Für die Nutzung der umfangreich vorhandenen DGM-Daten besteht großer Bedarf an gezielteren
Algorithmen, die für die jeweilige Aufgabe (den Anspruch des Teilprojektes) die optimale Re-
liefinformation aus dem DGM extrahieren. Dies ist derzeit noch Forschungsgegenstand und kann
nur in Zusammenarbeit mit Daten und Wissen der jeweiligen Teilprojekte realisiert werden, denn

nicht die Höheninformation selbst, sondern möglichst automatisch daraus berechnete Ableitungen können precision agriculture effizienter werden lassen.

6.3 Einleitung und Problemstellung

Das Relief beschreibt die Form der Erdoberfläche und ist somit ein wichtiger landschaftsökologischer Faktor, der natürliche und technische Vorgänge beeinflusst. Seine Nachbildung im Rechner ist das Digitale Geländemodell (DGM). Als Hauptumsatzfläche für Strahlung und Wasserhaushalt ist das Relief Regler für die Bodenbildung, das Verhältnis von Abfluss und Versickerung, Stofftransporte, das Mikroklima und trägt entscheidend zur standörtlichen Differenzierung der Landschaft bei. Das Relief bestimmt die räumliche Verteilung der energetischen und stofflichen Potentiale und damit Richtung und Ausmaß der Wasserbewegung im Gelände als Reaktion eines Einzugsgebietes auf ein Niederschlagsereignis. DGM können bei der Erstellung der Applikationskarten einen Beitrag dazu leisten, die natürliche Heterogenität zu erklären.

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.

Zu den Anwendungsmöglichkeiten des DGM zählen die Boden-Landschaftsmodellierung, die Korrektur planimetrischer Flächenberechnung, die Luftbildentzerrung und die Korrektur von landwirtschaftlicher Sensorik. Näheres im Kapitel „Ergebnisse“.

Die bisher übliche und publizierte Anwendung von DGM im landschaftsökologisch-agrarischen Bereich beschränkte sich zumeist auf die visuelle Interpretation von DGM (in Form von Höhenliniendarstellungen), die Ausgrenzung von Reliefformen nach geomorphologischen Kriterien und präsentationsorientierten 3-D-Darstellungen. Die visuelle Interpretation gestattet zwar oft ein Erkennen von lehrbuchhaften landschaftlichen Prozessen, wie z. B. Erosionsrinnen; eine mathematisch nachweisbare Korrelation zu Messdaten ist jedoch selten vorhanden. Über bisherige Anwendungen von DGM für precision agriculture schreiben Bishop & McBratney (1999): „the use of DEMs has been poorly documented in the PA literature with main uses...to derive landform classes to derive management zones“.

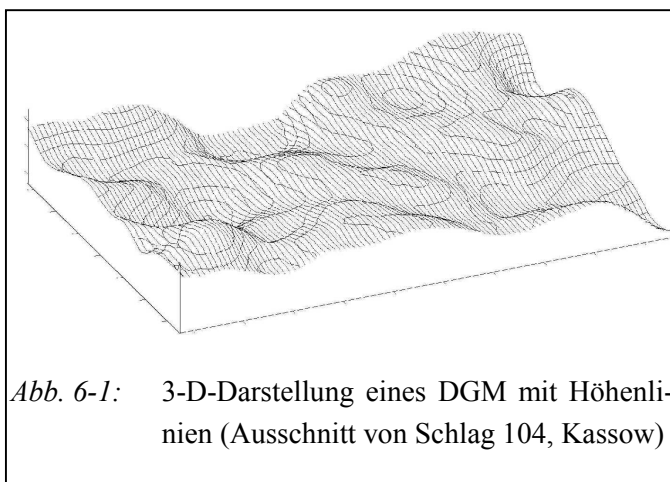


Abb. 6-1: 3-D-Darstellung eines DGM mit Höhenlinien (Ausschnitt von Schlag 104, Kassow)

Komplexe Modelle, die z. B. Stoffflüsse in der Landschaft beschreiben, wurden in der vergangenen Dekade zahlreich entwickelt, allerdings überwiegend für einen Maßstabsbereich kleiner als 1 : 10.000. Die wesentliche Neuerung des Teilprojektes besteht in der Entwicklung einer Methodik zur Erfassung und Analyse von DGM im Zielmaßstab 1 : 5.000. Dies ist erst in den letzten Jahren möglich geworden durch neue Technologien in der DGM-Erfassung, wie RTK-GPS und flugzeuggestütztes Laser-scanning. Gerade in der Landwirtschaft ist ein Modell, das auf viele Eingangsparameter ange-

lyse von DGM im Zielmaßstab 1 : 5.000. Dies ist erst in den letzten Jahren möglich geworden durch neue Technologien in der DGM-Erfassung, wie RTK-GPS und flugzeuggestütztes Laser-scanning. Gerade in der Landwirtschaft ist ein Modell, das auf viele Eingangsparameter ange-

wiesen ist, nicht wünschenswert, da die Bereitstellung der Eingangsparameter häufig den größten Kostenpunkt bedeutet. Simple, prozessorientierte Modelle wurden vor allem in Australien auf Basis des Wetness-Index-Konzeptes von Moore et al. (1993) entwickelt. Dieses Konzept beruht primär auf einer Auswertung des reinen Höhenmodells und ist somit nicht auf aufwändig zu erhebende Felddaten angewiesen. Die Einbindung zusätzlicher Boden- und Klimadaten ist möglich, sofern diese vorliegen. Die Wetness-Index-Modelle wurden jedoch auf eine Anwendung im mittelmaßstäbigen Bereich bei wesentlich größeren Höhenunterschieden, als wir sie üblicherweise auf den Schlagflächen in der Bundesrepublik finden, kalibriert. Erste Korrelationsrechnungen mit Felddaten im Maßstabsbereich von Teilschlägen zeigten für verfügbare DGM der Landesvermessung schwache Korrelationen. Die visuelle Interpretation zeigte jedoch generelle Übereinstimmungen von berechneten Regionen höherer Bodenfeuchte und Feuchte anzeigenden Bereichen aus Luftbildern. Dies zeigt die Notwendigkeit von hochgenauen DGM zur Überprüfung der Modelle im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit für die Landwirtschaft. Das Problem der Daten der Landesvermessung beruht einerseits auf der geringen räumlichen Auflösung, andererseits auf dem oftmals hohen Alter der Daten. Speziell in den neuen Bundesländern mit ihrer enormen Erdmassenbewegung durch Bautätigkeiten nutzen Geländedaten mit einem Alter von 20 Jahren wenig - unabhängig von der Qualität der damaligen Geländeerfassung. Insofern sind Ansätze gesucht für:

- eine preiswerte Erfassungsmethode mit einer Höhengenaugigkeit ± 10 cm,
- die Optimierung und Validierung vorhandener Modelle zur Reliefanalyse und Anpassung der Algorithmen auf den Maßstabsbereich größer 1 : 5.000 und ggf. Entwicklung neuer Analysemethoden,
- die Integration der Erkenntnisse in die *pre agro*-Module.

6.4 Material und Methoden

6.4.1 Erfassung der Geländehöhen

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

Das vom Institut für Geodäsie und Geoinformatik untersuchte Verfahren nutzt einen mobilen Zweifrequenzempfänger (Leica SR 399) in Kombination mit einer eigenen Referenzstation. Während die Referenzstation auf einem Trigonometrischen Punkt 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 kann sich in den Fahr-gassen bewegen, ohne den Pflanzenbestand zu beeinträchtigen. Die Referenzstation übermittelt Korrekturdaten in Echtzeit. Somit werden schon im Feld die korrigierten Koordinaten der vermessenen Punkte berechnet. Im Gegensatz dazu werden beim *Postprocessing* die Daten der beiden Empfänger erst später ausgewertet. Durch das Postprocessing lässt sich eine geringfügig höhere Genauigkeit erreichen, allerdings können die Ergebnisse nicht bereits im Feld verwendet

werden (z. B. zur Überprüfung der Lagegenauigkeit oder zum Einmessen von Punkten auf dem Schlag).

Die Befahrung der Schläge entlang der Fahrgassen bedeutet einen Abstand von 9 - 24 m je nach Arbeitsbreite der Maschinen. Bei einer Aufzeichnungsrate von einem Punkt pro Sekunde ergibt sich, je nach Fahrgeschwindigkeit, ein Punktabstand von 1,5 - 6 m. Die Fahrgeschwindigkeit sollte der Heterogenität des Reliefs angepasst werden, um die Bereiche größerer Variabilität intensiver zu erfassen.

Diese ungünstige Erfassungsgeometrie (hohe Datendichte in Fahrtrichtung, aber wenige Daten transversal dazu) lässt sich über eine Dreiecksvermaschung nicht in hydrologisch geeignete Modelle überführen, die Kriging-Interpolation und das TOPOGRID-Tool von ARC/INFO zeigten hingegen gute Ergebnisse (siehe unten). Durch die Dichte der Aufnahmepunkte werden Formelemente wie Kuppen ausreichend repräsentiert und können bei der digitalen Geländeanalyse in Bezug auf ihre hydrologischen Eigenschaften numerisch Wirkung auf sämtliche Ableitungen, wie z. B. den Wetness-Index entfalten.

6.4.1.2 Laserscanning

Flugzeuggestützte Laserscanningverfahren werden seit einigen Jahren erfolgreich zur Erstellung von DGM getestet und finden immer weitere Verbreitung (z. B. Petzold et al. 1999). Vorteile des Laserscanning sind die hohe Genauigkeit (bei 1.500 m Flughöhe, 1 m in der Länge und 10 cm in der Höhe), die hohe Punktdichte (bis 4 Punkte pro m²) und die Möglichkeit, auch die Geländeoberfläche unter lichter Vegetation zu erfassen. Laserscanningbefliegungen finden im Auftrag der Landesvermessungsämter bereits in einzelnen Bundesländern statt. Wegen seiner hohen Fixkosten lohnt sich das Verfahren erst bei großen Flächen. Sollten die Daten zukünftig bei den Landesvermessungsämtern vorliegen, wären sie eine ideale Basis für die Landwirtschaft, da flächendeckende und Einzugsgebiete umfassende Geländemodelle in optimaler Auflösung und Struktur gegeben wären.

6.4.1.3 DGM der Landesvermessung

Die Mehrzahl der DGM der Landesvermessung basiert auf einer Abdigitalisierung der Orthophotosteuerprofile, der Höhenlinien topographischer Karten oder der Stereophotogrammetrie. Vereinzelt, z. B. in Nordrhein-Westfalen, sind für Teilgebiete bereits Laserscanning-DGM verfügbar, so für die *pre agro*-Betriebe Raesfeld und Beckum. Die Spanne der angebotenen Rasterweiten beginnt bei 10 m (Laserscanning bzw. in den neuen Ländern aus der TK 10 digitalisiert). Für einige Regionen der Bundesrepublik ist jedoch ein 50 m Raster das derzeit beste verfügbare DGM (z. B. für die Betriebe in Groß-Twülpstedt, Thumby und die bayerischen Projektbetriebe). Ein Problem der bisherigen DGM ist das teilweise hohe Alter der TK-basierten Daten, die mangelnde Fortführung sowie die fehlende Information darüber, ob das Gelände oder die Vegetationsoberfläche dargestellt ist (Bill et al. 2000). Die Grundkosten für ein DGM der Qualitätsstufe I (Gitterweite 10 - 20 m) betragen ca. 100 DM · km². Eine Höhengenaugigkeit von 0,5 - 1 m wird von den Landesvermessungsämtern angegeben. Flächendeckend liegt es bereits in Thüringen

und Rheinland-Pfalz vor. Baden-Württemberg erstellt bis 2003 ein landesweites, homogenes DGM mit der Genauigkeit $\pm 0,5$ m auf Basis von Laserscanner-Befliegungen. Für *pre agro* wurden ATKIS-DGM im 10 m Raster (basierend auf der TK 10) für einige Schläge der Betriebe Wulfen und Queis beschafft.

6.4.2 Generierung des DGM

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

6.4.3 Ansätze zur Analyse des DGM

6.4.3.1 Einführung

Der hier verwendete Ansatz basiert auf der digitalen Geländeanalyse („Terrain Analysis“, Wilson & Gallant 2000). Dabei werden aus dem DGM quantitative Parameter abgeleitet. Verwendet wurde dazu das Programmpaket TAPES-G. Im Gegensatz zum klassischen geomorphologischen Ansatz, bei dem Reliefformen aus der Kombination von Vertikal- und Horizontalkrümmung zusammengesetzt werden, teilt man quantitative Reliefparameter in zwei Klassen ein: primäre topografische Parameter, die allein aus dem DGM berechnet werden und sekundäre Parameter, die aus primären zusammengesetzt sind und oft empirisch ermittelte Parameter enthalten.

Die Algorithmen zur Ableitung der primären Parameter basieren in der Regel auf einem zentralen Finite-Differenzen-Ansatz, der vom inneren Rasterelement einer sich über das DGM bewegendem 3*3-Matrix ausgeht und die Beziehungen zu den Nachbargitterpunkten 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 (boden-)hydrologischen Modellierungen selten genutzt, da sie in flachen Bereichen dazu tendieren, ebene Dreiecke zu erzeugen, auf denen keine Fließrichtung bestimmbar ist und somit den Fließalgorithmus beenden. Dieses Problem tritt speziell bei linienförmiger Aufnahmegeometrie häufig auf, welche jedoch Hauptdatengrundlage für landwirtschaftliche Anwendungen ist. Die Rasterweite für die Modellierung muss so gewählt werden, dass abflusswirksame Reliefelemente noch repräsentiert werden. Hauptanwendung dieser Bodenlandschaftsmodellierung ist die flächenbezogene Vorhersage von Bodenparametern aufgrund von Einzelmessungen. Solche „Muster“ in der Landschaft sind das Ergebnis von landschaftlichen Prozessen wie Bodenbildung oder Erosion.

6.4.3.2 Der Topografische Wetness-Index

Eine Methode zur flächenbezogenen Vorhersage von Bodenparametern bietet das Konzept des „Wetness Index“ (Beven und Kirkby 1979, Moore et al. 1991). Der Wetness-Index ist eine nicht-lineare Verknüpfung aus dem spezifischen Einzugsgebiet (A_s) eines Punktes und seiner lokalen Neigung ($\tan\beta$) und wurde 1979 von Beven und Kirkby erstmals präsentiert: $\ln(A_s/\tan\beta)$. Das Konzept basiert auf der Annahme, dass die Geländeform die Bewegung des Wassers auch im oberen Bodenbereich bestimmt und somit über die räumliche Verteilung des Bodenfeuchtemusters entscheidet. Ein hoher Index-Wert ist charakteristisch für konvergierendes, flaches Gelände. Niedrige Werte treten in steilem Terrain mit kleinem Zuflussgebiet auf. Solche Gebiete können bei Aussaat und Düngung nun optimal an die Pflanzenbedürfnisse angepasst bewirtschaftet werden. Das Konzept gilt nur, wenn der laterale Fluss einen essenziellen Anteil am Gesamt-Bodenwasserfluss eines Einzugsgebietes umfasst. Hierzu argumentieren Barling et al. (1994), dass die Durchlässigkeit der meisten natürlichen Böden mit der Tiefe abnimmt und sich eine laterale Komponente des Abflusses ausbildet, sobald das Gelände eine Neigung und damit einen geländebedingten hydraulischen Gradienten aufweist. 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 Index ein Geländemodell mit einer entsprechend hohen Auflösung gefordert.

Die Grundannahmen, 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 ist jedem Punkt gegeben.

Das spezifische Einzugsgebiet A_s ist die zum Zufluss beitragende Fläche A geteilt durch eine „einheitliche Höhenlinienlänge“ b , auf die das Einzugsgebiet eines Punktes normiert wird. Die Herleitung des Wetness-Index beruht auf dem Bodenwasserflux q_i als Produkt der Geländeneigung (angenommen als angenähert parallel zur Oberfläche des Grundwasserspiegels) und der Bodendurchlässig-

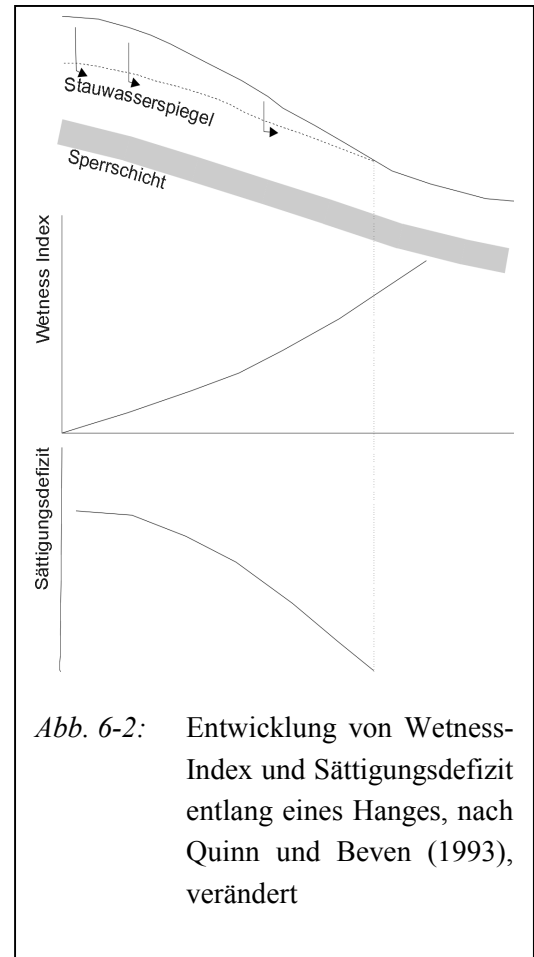


Abb. 6-2: Entwicklung von Wetness-Index und Sättigungsdefizit entlang eines Hanges, nach Quinn und Beven (1993), verändert

keit. Letztere wird als Funktion der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und des Abstandes von der Geländeoberfläche zu einem Stauwasserspiegel angenommen. Es wurde ein relativer Wetness-Index für jeden Punkt des Einzugsgebietes geschaffen, der nur von A_s und $\tan\beta$, den beiden topografischen Variablen, abhängig ist. 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 weiterer Index, der *quasi-dynamic wetness index* (Barling et al. 1994), mindert die Annahme, dass sich ein Gleichgewicht zwischen Zu- und Abfluss eingestellt hat durch die Einführung einer Abflusszeit-Begrenzung: Für die Ermittlung der Fläche, aus der Wasser dem zu berechnenden Punkt zufließt, steht nur die durchschnittliche Zeit zwischen zwei bedeutenden Niederschlagsereignissen zur Verfügung. Als bedeutend zählt ein Niederschlagsereignis, wenn es zu einer Nivellierung der Bodenwasserverteilung innerhalb des Einzugsgebietes durch gleichmäßige Infiltration führt. Die zum quasi-dynamischen Index beitragende Fläche wird dadurch je nach Niederschlagsverteilung verringert. Das Muster der Feuchteverteilung ähnelt mit steigender Abflusszeit dem des statischen Index. Für die Berechnung der Fließzeit werden die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit K_s und die Porosität f erforderlich.

6.5 Ergebnisse

Im Jahre 2000 wurde die Erfassung und Aufbereitung von Geländemodellen für die Pflichtschläge abgeschlossen. Für 52 Schläge mit der Gesamtfläche von 1.550 ha (Pflichtschläge und ausgewählte Untersuchungsschläge) wurden als Basisparameter Neigung, Exposition sowie der topographische Wetness-Index (TWI) abgeleitet und im Projektinformationssystem den Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

6.5.1 Erfassung der Geländehöhen

6.5.1.1 RTK-GPS

Als kostengünstigste Aufnahmemethode unter den landwirtschaftlichen Bedingungen und Anforderungen ergab sich das fahrzeuggestützte, hochpräzise DGPS. Durch die Erfassung im real-time kinematic Mode (RTK) wird das aufwändige Postprocessing vermieden und es verbleibt für die Vermessung eine größere Speicherkapazität, da nur die berechneten, in Echtzeit korrigierten Koordinaten aufgezeichnet werden. Dies ist von Bedeutung, wenn die Vermessung mit einer regulären Feldbearbeitung verknüpft wird und keine Zeit für einen Datenträgerwechsel zur Verfügung steht. Die Genauigkeit der aufgezeichneten Messpunkte war durchweg besser als ± 5 cm. Mehrere Einflussfaktoren auf die Qualität der ermittelten 3-D-Koordinaten wurden untersucht. Mit der Höhe der GPS-Antenne über Grund und der Geländeneigung steigt der horizontale Versatz der Messung. Bei $y = 3$ m und einer Neigung von 5° entspricht dies 26 cm. Die Höhenunge-

nauigkeit beträgt bei 5° nur 1 cm, bei 15° allerdings 10 cm. Bezogen auf die Größe des DGM-Rasters (5 m) ist dieser Fehler vernachlässigbar.

Die maximal zulässige Sendeleistung für eine eigene Referenzstation erlaubt selten mehr als 2 km Reichweite. Alternativ zur eigenen Referenzstation kann gegen eine Gebühr ein Referenzsignal von einem DGPS-Dienst der Landesvermessung bezogen werden. Dies wird von großem Interesse sein, wenn in naher Zukunft der Hochpräzise Echtzeit-Positionierungs-Service (HEPS) im Rahmen von SAPOS auch im ländlichen Raum empfangen werden kann.

In der Regel ist eine Koordinatenausgabe im System der Landesvermessung erwünscht. Nur so sind Vermessungsdaten an amtliche Daten anzuschließen. Da die GPS-Positionsmessung im World Geodetic System 1984 (WGS84) erfolgt, ist eine Transformation in das Landeskoordinatensystem nötig. Oft werden nur Transformationsparametersätze auf der Ebene eines Bundeslandes oder wahlweise für das Bessel- bzw. Krassowsky-Ellipsoid verwendet. Vor allem die Höhengenaugigkeit in Bezug auf die Datensätze der Vermessungsämter nimmt stark ab, wenn keine lokal berechneten Transformationsparameter zur Verfügung stehen. Für die *pre agro*-Pflichtschläge wurden mit der Software SKI lokale Transformationsparameter ermittelt. Absolute Abweichungen zwischen Koordinaten von Kontrollpunkten, die vergleichsweise mit bundesweit „gültigen“ und lokal berechneten Parametersätzen ermittelt wurden, liegen im Bereich von 0,2 - 2 m in der Lage und bis 7 m in der Höhe. Tabelle 6-1 zeigt Abweichungen der berechneten Koordinaten bei Verwendung der Transformationsparameter kommerzieller Software (Transdat und Geographic Calculator) zu lokal berechneten Parametersätzen. Der ermittelte Fehler bezieht sich als absoluter Fehler auf die von der Landesvermessung geführten Daten.

Tab. 6-1: Absolute Fehler (in m) in x-, y- und z-Richtung durch Transformationsparametersätze im Vergleich zu Transformationen mit lokalen Parametersätzen

Ort	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
Gr.-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

Für eine Planung der DGM-Erfassung mit DGPS bedeutet dies, im Vorfeld Transformationsparameter zu erwerben oder mit entsprechender Software zu berechnen, falls die Daten an amtliche Daten angeschlossen werden sollen. Dies geschah im Rahmen von *pre agro*, um für die Einzugsgebietsermittlung der zu modellierenden Schläge DGM der Landesvermessungsämter mit den Vermessungsdaten zu kombinieren. Weiterhin muss gewährleistet sein:

- die Befahrbarkeit der Fläche (Nutzung und Bodenzustand),
- der Empfang der Signale von mindestens 4 GPS-Satelliten (Bahndaten, Sichthindernisse),
- der Empfang von Korrektursignalen (eigene Referenzstation bzw. Korrekturdienst).

6.5.1.2 Laserscanning

Im Rahmen von *pre agro* wurde ein Laserscanning-DGM für die Pflichtschläge in Kassow durch die Firma Topscan erstellt, durch das Teilprojekt ausgewertet und mit einer RTK-GPS-Vermessung verglichen. 99 % der Differenzen von 20.800 Messpunkten waren im Bereich ± 10 cm. Die Standardabweichung der Differenzen beider Verfahren betrug 3,8 cm und damit weniger als die angegebene Höhengenaugigkeit der einzelnen Verfahren. Qualitativ liefern beide Verfahren somit ähnliche Ergebnisse. Der große Vorteil der Laserscanning-Daten besteht darin, dass die Erfassung nicht auf Fahrgassen angewiesen ist, sondern flächendeckende Daten mit einer Dichte von bis zu 4 Messpunkten pro m^2 liefert. Interpolationen der Höhendaten über mehrere Meter (Kap. 6.5.2) sind nicht mehr nötig. Jedoch setzt auch diese Methode eine fachkundige Kontrolle der Daten voraus. Die Entscheidung für ein Verfahren sollte über den Preis getroffen werden. Dabei ergeben sich erst ab einer zusammenhängenden Fläche von 10.000 ha Vorteile für Laserscanning (5 - 10,- DM pro Hektar).

6.5.1.3 DGM der Landesvermessung und Digitalisierung von Höhenlinien

Für *pre agro* wurden ATKIS-DGM im 10 m Raster (basierend auf der TK 10) für sechs Schläge der Betriebe Wulfen und Queis beschafft. Die Kosten betragen 60,- DM $\cdot km^2$. Ein Qualitätsvergleich mit präzisen RTK-GPS-Messpunkten für den Schlag Kiesberg und den Nachbarschlag Zuchauer Straße ergab einen RMS-Fehler (root mean square error) von 1,8 m. Nach Elimination eines positiven Offsets von 1,9 m (Median der Residuenverteilung) ließ sich der RMS-Fehler auf 0,55 m reduzieren. Eine solche Qualitätsverbesserung ist allerdings nur bei relativ planaren Hanglagen möglich. In kuppertem Relief wurden für die Datenquelle TK 10 maximale Abweichungen bis 6 m in der Höhe festgestellt. Eine Qualitätsunter-

suchung der TK 25 für Kassow ergab einen RMS-Fehler (für 900 Messpunkte entlang der Höhenlinien) von 0,56 m im Vergleich zum Laserscanning-DGM. Die Fehlerspanne betrug $\pm 2,3$ m. Die Genauigkeit von DGM aus digitalisierten Höhenlinien der höchsten Qualitätsstufe (DGK 5 in den alten Bundesländern bzw. Höhenflurkarte in Bayern) wurde an Beispielschlägen der Standorte Groß-Twülpstedt und Landshut untersucht. Hierbei wurden für sämtliche RTK-GPS-Messpunkte die Höhen des aus den Höhenlinien mittels Kriging-Interpolation erstellten DGM abgegriffen und statistisch untersucht. Für die bayerischen Schläge, auf denen Höhendifferenzen von bis zu 20 m vorkommen, schwankten die Fehler der höhenlinienbasierten DGM von - 4 bis +

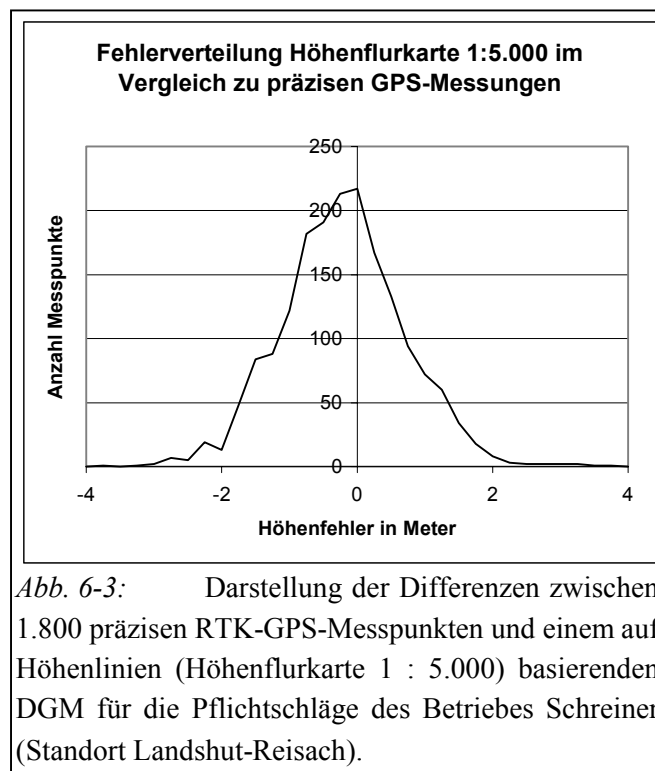


Abb. 6-3: Darstellung der Differenzen zwischen 1.800 präzisen RTK-GPS-Messpunkten und einem auf Höhenlinien (Höhenflurkarte 1 : 5.000) basierenden DGM für die Pflichtschläge des Betriebes Schreiner (Standort Landshut-Reisach).

4 m. 67 % der Messpunkte zeigten eine Genauigkeit von $\pm 0,92$ m, 3 % der Messpunkte hatten einen Fehler > 2 m. Für den Schlag Espenberg (Groß-Twülpstedt) ergab der Vergleich von präziser Höhenmessung und DGM auf Basis der DGK 5 Abweichungen bis 3 m. Nach Elimination eines Offsets von 1,4 m ließ sich die Standardabweichung auf 0,27 m senken.

6.5.1.4 Zusammenfassung der Ergebnisse „Erfassungsmethoden“

Für landwirtschaftlich nutzbare DGM eignen sich RTK-GPS (als Dienstleistung zusammen mit der Oberflächen-Generierung und Auswertung für einen Betrieb angeboten) und Laserscanning (für den regionalen Maßstab, möglichst durch Landesvermessungsämter (LVA) bereitgestellt).

Die Modelle, die derzeit von den LVA angeboten werden, erfüllen die Kriterien in der Regel nicht. Das gleiche gilt für Modelle, die auf Topografischen Karten beruhen, da die Relieferfassung meist 30 - 60 Jahre zurück liegt und die notwendige Qualität auch bei der DGK 5 nicht immer gegeben ist. Mit entsprechender Nachbereitung lassen sich auch DGM auf dieser Basis für eine exakte Modellierung der Bodenfeuchte nutzen, jedoch sind dazu Kontrollmessungen nötig. In solchen Fällen ist eine DGM-Neuerfassung mit RTK-GPS die günstigere Variante.

6.5.2 Generierung des DGM

Das Interpolationsverfahren, das auf die im Sekundentakt in den Fahrgassen aufgezeichneten RTK-GPS-Punktmessungen angewendet wird, um eine Oberfläche zu generieren, ist ein entscheidender Einflussfaktor auf die Genauigkeit des DGM. Von dieser Genauigkeit hängt die exakte Berechnung der räumlichen Verteilung von Geländeattributen, wie dem Wetness-Index, ab. Die linienförmige Aufnahmegeometrie mit einer hohen Punktdichte entlang den Fahrgassen und bis zu 24 m Abstand der Messpunkte transversal dazu stellt besondere Ansprüche an das Interpolationsverfahren. Standardmethoden, wie Inverse Distance Weighting (IDW), schätzen Oberflächen, die für hydrologische Modellierungen, vor allem die Ableitung von Fließpfaden, inakzeptabel sind. Ähnliches gilt für DGM auf Basis von Triangulationen (TIN). Bei beiden Verfahren ist nicht nur die Größe des RMS-Fehlers, sondern auch die Berechnung von Artefakten (z. B. „bull-eye-Effekt“ bei IDW) von Nachteil. Ausgefeiltere Verfahren, wie Kriging, stoßen für hohe Punktemengen schnell an die Kapazitätsgrenze von PC's. Zur Verdeutlichung: Ein 100 ha Schlag wird bei RTK-GPS aus bis zu 30.000 Einzelpunkten modelliert, um sämtliche hydrologisch wichtigen Geländestrukturen zu erfassen. Die Qualität der Kriging-Schätzung hängt wesentlich von der Güte der Anpassung des theoretischen an das empirische Variogramm ab. Eine zeiteffiziente und brauchbare Interpolation gewährleistet das TOPOGRID-Tool von ARC/INFO, das auf lokal angepassten thin-plate Splines basiert. Die Güte von verschiedenen Verfahren wurde mit einer Kreuzvalidierung auf mehreren Schlägen geschätzt. Dazu wurden 50 % der Messpunkte (jede 2. Fahrgasse) bei der Interpolation ausgelassen und im Nachhinein mit den Interpolationsergebnissen an deren Ort verglichen. Die maximale Entfernung von zu schätzenden Werten zum nächstgelegenen Messwert wurde somit für den Untersuchungsschlag (ein 56 ha großer Ausschnitt von Schlag 104 in Kassow) von 9 auf 18 m heraufgesetzt. Die hier präsentierte

Güte des DGM stellt also einen weit ungünstigeren Fall dar und zeigt, dass die im Projekt bereitgestellten DGM von besserer Qualität sind, da sie auf der halben Schätzentfernung beruhen.

In Tab. 6-2 sind die RMS-Fehler verschiedener untersuchter Verfahren und die maximale Abweichung berechneter Oberflächenpunkte zu Messpunkten aufgezeigt. Der Vergleich basiert auf 10.400 Messpunkten (Fahrgassenabstand 18 m).

Tab. 6-2: Güte verschiedener Interpolationsverfahren

Interpolationsmethode	RMS-Fehler [m]	Max. Abweichung [m]
Ordinary Kriging (exponentielles Model)	0,17	0,97
Ordinary Kriging (Power Model)	0,18	0,96
Topogrid Tool (ARC/INFO)	0,19	1,10
Minimum Curvature, 1.000 Iterationen	0,29	3,64
Minimum Curvature, tension, 1.000 Iterationen	0,28	4,20
IDW (12 Nachbarn)	0,30	1,40
IDW (Radius 50 m)	0,31	1,53

Das Verfahren „Ordinary Kriging“ nach einer interaktiven Variogrammanpassung mit SURFER 7.0 lieferte mit 17 cm den geringsten RMS-Fehler. Als einziges Spline-basiertes Verfahren bietet das ARC/INFO-Topogrid-Tool eine vergleichbare Güte zu den Kriging-Verfahren. Weitere Spline-Methoden, wie „Minimum Curvature“, beginnen sehr stark zu schwingen und führen zu großen maximalen Fehlern, auch wenn weite Bereiche gut abgebildet werden.

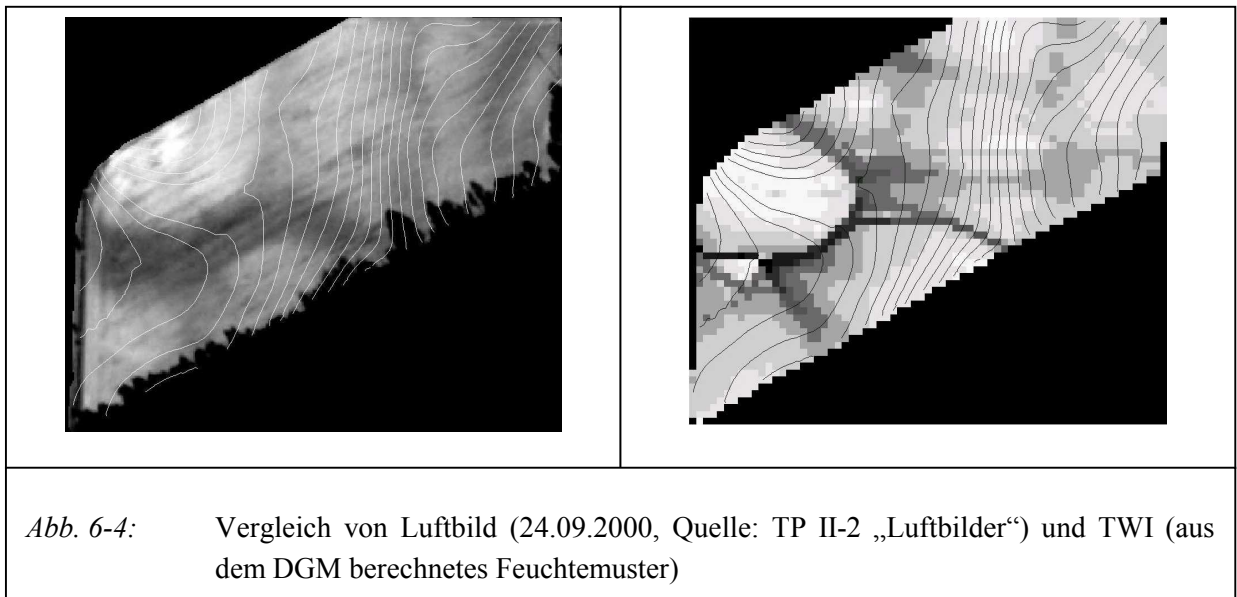
Eine Qualitätssicherung ist unabhängig von Referenzmessungen oder einer Kreuzvalidierung auch qualitativ durch visuelle Kontrolle möglich. Ableitungen aus dem DGM wie z. B. Neigung (1. Ableitung) oder Krümmung (2. Ableitung) reagieren sehr sensibel auf kleine Anomalien und weisen somit auf Fehler der Ausgangsdaten oder Schwächen der Interpolation hin.

6.5.3 Ansätze zur Analyse des DGM

6.5.3.1 Boden-Landschaftsmodellierung

Im Mittelpunkt der bisherigen DGM-Analyse stand die Überprüfung des Wetness-Index-Konzeptes anhand des Vergleiches von berechneter Bodenfeuchteverteilung und Bodenfeuchtemessungen. Eigene Messungen wurden dazu in Kassow auf dem Schlag 111 durchgeführt, Bodenfeuchtedaten von anderen Schlägen wurden von den Teilprojekten „Hof-Bodenkarte“, „Bodenwasserspeicher“, „Düngung“ und „Lokaler N-Austrag“ zur Verfügung gestellt. Korrelationen von Wetness-Index-Werten und Bodenfeuchtemessungen gestalten sich nach den bisherigen Untersuchungen wie folgt: Betrachtet man prozessmorphologisch ausgewählte Punkte, z. B. die eigene Catena auf Schlag 111 mit 20 Monitorpunkten, ergeben sich gute Korrelationen von $r=0,4$ bis $0,9$ je nach Bodenfeuchtezustand und Niederschlagshistorie. Der zeitliche Verlauf der Korrelation von TWI und Bodenfeuchte in verschiedenen Tiefen ist gemeinsam mit dem TP „Bodenwasserhaushalt“ untersucht worden und im Kapitel „Bodenwasserhaushalt“ dargestellt, siehe auch Bobert et al. (2001). Für Rasterbeprobungen finden sich dagegen nur schwache Korrelationen.

nen. Visuelle Übereinstimmungen zwischen dem Wetness-Index-Muster und Mustern auf bodenzeichnenden Luftbildern ergeben sich für fast alle Schläge, z. B. für den Schlag „Langer Berg“ (Abb. 6-4). Die Güte der Korrelation und damit der Bodenfeuchtevorhersage ist abhängig vom Zeitpunkt der Messung in Bezug auf rezente Niederschlagsereignisse und der Auflösung und Qualität des DGM. Die Rasterweite für die Modellierung muss so gewählt werden, dass abflusswirksame Reliefelemente noch repräsentiert werden. Das bedeutet je nach Geländeeigenschaften eine Rasterweite von 2 - 10 m und eine Höhengenaugigkeit der Erfassungsmethode von ca. 0,1 m.



6.5.3.2 Weitere Anwendungen

Korrektur von Sensordaten (Bodenleitfähigkeit): Der Wetness-Index stellt den reliefbedingten Bodenfeuchteanteil dar, während die ECa-Daten sowohl durch die Bodenfeuchte als auch die Korngrößenverteilung beeinflusst werden. Somit kann der durch den Bodenwassergehalt bedingte Anteil am ECa-Signal mit Hilfe des TWI eliminiert werden. Für den Untersuchungsschlag 641 in Wulfen wurde eine solche Untersuchung mit Texturdaten des TP „Bodenwasserspeicher“ durchgeführt. Die Korrelation von ECa-Daten mit Ton-/Schluffgehalt konnte durch Subtraktion des TWI-Anteils vom ECa-Signal von $r=0,5$ auf $r=0,84$ verbessert werden. Der Zusammenhang von TWI und ECa betrug dabei $r=0,52$. Für eine Übertragung dieser Methode von einzelnen Untersuchungspunkten in die Fläche sind weitere Untersuchungen notwendig.

Ermittlung von tatsächlichen Oberflächengrößen: Bei Flächenermittlungen aus einer GPS-Schlaggrenzenerfassung bzw. aus Katasterkarten erhält der Eigentümer lediglich die planimetrische Fläche. Dies führt zu einer Unterschätzung der zu bestellenden Fläche um den Faktor $1/\cos\beta$ (mit β =Geländeneigung). Mit Hilfe eines DGM kann die tatsächliche Oberfläche berechnet werden (Tab. 6-3). Diese wird umso genauer, je höher die Auflösung des DGM ist. Die Berechnung der tatsächlichen Oberfläche als Nebenprodukt einer Geländemodell-Analyse ist ohne

großen Aufwand möglich und wird damit in bewegtem Gelände auch technische Bedeutung erreichen können.

Tab. 6-3: Unterschätzung von tatsächlichen Flächengrößen durch planimetrische Flächenberechnung in Abhängigkeit der DGM-Auflösung

Region	Fläche [ha]	Rasterweite [m]	Unterschätzung (%)	Min. / Max. Neigung (°)	Mittl. Neigung (°)
Kassow (104)	85	5	0.5	0..9.0	1.8
Kassow (104)	85	10	0.3	0..5.4	1.6
Groß-Twülpstedt (Espbg.)	12	5	0.4	0..9.0	2.8
Groß-Twülpstedt (Espbg.)	12	50	0.5	0..3.7	2.1
Thumbby (Alt-Grünholz)	38	5	0.7	0..9.5	1.7
Thumbby (Alt-Grünholz)	38	50	0.2	0..3.6	1.4
Landshut (Lohzipfel)	6	5	0.9	0.5 ... 12.3	6.2
Landshut (Lohzipfel)	6	50	0.7	4.1 ... 7.9	6.8

6.6 Diskussion

Aus den genannten Gründen bestehen hohe Qualitätsanforderungen an die Geländemodelle. Die Qualität, d. h. Güte der Geländerepräsentation, wird beeinflusst durch die Ausgangsdaten (also Erfassungsmethode), die Rasterweite sowie das Interpolationsverfahren. Ziel der geforderten hohen räumlichen Auflösung ist es, eine hydrologisch kontinuierliche Oberfläche mit allen relevanten Reliefformen zu erhalten, damit Fließalgorithmen, die Aussagen über die Verteilung des Bodenwassers liefern, die realen Abflussbahnen in der Landschaft widerspiegeln. In flachen Bereichen ist deswegen eine höhere Genauigkeit gefragt. Die Messung muss folglich genauer sein als die Höhenvariation benachbarter Rasterzellen (z. B. bei 5 m Rasterweite genauer als die Höhendifferenz in 5 m Entfernung). Unterstützt werden die hier angegebenen Größen durch Vergleiche von berechneten Wetness-Index-Werten mit Bodenfeuchtemessungen. In heterogenen Landschaften, wie der welligen Grundmoränenplatte Mecklenburgs, werden eindeutige Korrelationen erst bei 2 m-Modellen mit einer Höhengenaugigkeit von wenigen cm erreicht, während in fluvial geprägten Landschaften bereits bei 5 m Rasterweite aus dem DGM eine gute Korrelation zu den Bodenfeuchtemessungen gefunden werden konnte (Bobert et al. 2001).

Auf eine GPS-Erfassung bezogen, kommen aus ökonomischer und qualitativer Sicht nur Zweifrequenzempfänger im RTK-Modus in Frage. Mit Einfrequenzempfängern mit Phasenglättung (Höhengenaugigkeit 0,75 – 1,5 m) ist eine DGM-Erstellung bereits möglich, wenn genügend Daten zur Mittelwertbildung vorliegen, z. B. durch mehrere Überfahrten. Yao & Clark (1999) demonstrieren dies für einen Untersuchungsschlag in den USA. Bei der notwendigen Anzahl von 6 - 10 Überfahrten (Genauigkeitsverbesserung um \sqrt{n} mit n = Anzahl der Überfahrten) bedeutet dies allerdings eine unnötig hohe Anzahl an Überfahrten oder eine lange Wartezeit, bis die Ausgangsdaten für das Geländemodell bereitliegen. Der höhere Nachbearbeitungsaufwand (die Mittelbildung von vielen, nicht identisch liegenden Einzelpunkten) ist ebenfalls zu berücksichtigen. In Kassow sind für März ähnliche Untersuchungen mit einem 8-Kanal-DGPS-Empfänger geplant, um die Auswirkungen dieser verringerten Qualität auf den Wetness-Index und den höhe-

ren Bearbeitungsaufwand zu untersuchen. Ziel dieser Untersuchung ist eine DGM-Aufnahme während der landwirtschaftlichen Applikationsmaßnahmen und somit ohne zusätzliche Personal- und Gerätekosten. Lediglich die Datenaufbereitung und Ableitung des TWI erfordern zusätzliche Fachkenntnisse. Die DGM-Angebote der Landesvermessungsämter sind derzeit für präzise Modellierungen im landwirtschaftlichen Ziel-Maßstab 1 : 5.000 nur selten ausreichend. Mit der zunehmenden Verfügbarkeit von Laserscanning-DGM kann sich dies ändern.

Bei größeren Neigungen ist auch eine geringfügig schlechtere Höhengenaugigkeit tolerierbar, solange die Messgenauigkeit höher ist als die Höhendifferenz zweier benachbarter Rasterzellen. Die hydrologischen Algorithmen berechnen dann noch immer gleiche Fließrichtungen. Die in Standard-GIS verwendeten Algorithmen basieren auf dem D8-Konzept, das den potentiellen Abfluss aus einer Nachbarzelle ausschließlich an den tiefstgelegenen Nachbarn weitergibt. Parallel verlaufende Abflusslinien an gestreckten Hängen sind ein häufiges, nicht der Realität entsprechendes Produkt dieses Algorithmus. Spezielle Reliefanalyse-Softwareprodukte wie TAPES (Wilson & Gallant 2000) bieten Abhilfe und führen zu einer besseren Güte der Bodenfeuchteabschätzung. Der bestechende Vorteil des TWI-Konzeptes ist, dass es auf der Geländehöhe als einziger zu erfassender Datenquelle beruht. Viele Modelle, die landschaftsökologische Prozesse beschreiben, haben den Nachteil eines umfangreichen Parameterbedarfes, der von einem Landwirt nicht aufzubringen ist. DGM sind eine sehr effiziente Datengrundlage, da sie eine lange Gültigkeitsdauer besitzen, vor allem in Gebieten mit geringer menschlicher Bautätigkeit. Mit geeigneten Modellen lassen sich landschaftsökologische Prozesse darstellen. Während andere Datenquellen, wie Luftbilder und ECa-Karten nur die Ergebnisse dieser Prozesse zeigen (z. B. Vernässungsstellen, Erosionsrinnen), können DGM dazu genutzt werden, diese zu erklären. So lässt sich bei einer Verbindung dieser Verfahren z. B. klären, ob Vernässungsstellen reliefbedingt sind (wenn sie einen hohen Wetness-Index und dunkle Färbung auf einem bodenzeichnenden Luftbild aufweisen). Falls nur in einer Informationsquelle Bodenfeuchteextrema auftreten, weist dies auf eine Besonderheit des Bodens hin und wäre eine ideale Stelle für gezielte Bodenprobenahme. Durch eine Klärung dieser Besonderheiten lassen sich die geeignetsten Maßnahmen ergreifen, wie z. B. eine teilschlagspezifisch durchgeführte, größere Bodenbearbeitungstiefe.

6.7 Ausblick/zukünftige Arbeiten

Im bisherigen Projektverlauf wurden die Bereiche Datenerfassung und Bodenfeuchtemodellierung sehr intensiv bearbeitet. Es wurde ein großes Datenpotential (DGM und Basisparameter für 52 Schläge) aufgebaut, das bisher erst stichpunktartig untersucht werden konnte. Um die Anwendung der Reliefanalyse effizient gestalten zu können, ist als nächster Schritt die regionalspezifische Auswertung und die Erarbeitung von Kriterien, bei welchen Reliefbedingungen die Erfassung von DGM für die Umsetzung in Precision-Agriculture-Module zu ökonomisch vertretbaren, qualitativen Verbesserungen des Pflanzenbaus führt, vorgesehen. Weiterhin sollen spezifischere Reliefparameter auf Basis minimaler Ausgangsdaten speziell für die landwirtschaftlichen Bedingungen entwickelt werden (Arbeitsname: Topocrop-Indices). Speziell der Bodenwasserhaushalt steht dort mit den Einflussfaktoren Geländeneigung, Einzugsgebiet und Exposition im

Vordergrund. Außerdem soll die Anwendbarkeit von simplen Erosionpotential-Modellen, wie dem Stream-Power-Index, getestet werden. Der Bereich Erosion wurde in den letzten Jahrzehnten von vielen Forschergruppen intensiv bearbeitet, meist mit enormen Ansprüchen an Grundlagendaten. Für precision agriculture kann ein einfacher Ansatz die notwendigen Ausgrenzungen von gefährdeten Arealen für spezifische Maßnahmen leisten. Diese Tests sind für Frühjahr/Sommer geplant. Intensive Zusammenarbeit mit anderen Teilprojekten, wie in Kap. 6.2 beschrieben, wird nun, nach Abschluss der Datenerfassung, verstärkt. Dazu zählt die gemeinsame Erklärung von bodenbeeinflussenden Prozessen auf konkreten Intensivschlägen durch die Synopse der Datenebene DGM mit Luftbild (Validierung von ausgegrenzten Geländeextrema im Bereich Boden, Pflanzenaufgang und Ertrag), NIR (Bodenfeuchteabschätzung), ECa (Erklärung des Feuchteanteils an der Leitfähigkeit) und Hof-Bodenkarte. In vielen Bereichen (v. a. bei Grunddüngung, Kalkung und Einsatz von Wachstumsregulatoren) ist die mögliche Qualitätsverbesserung der Modulergebnisse durch den Informationsgehalt, den das DGM bietet, noch nicht ausgeschöpft. Deshalb gilt es, die verbleibende Projektzeit zu nutzen, um die Art der abzuleitenden Informationen aus dem DGM und deren Format spezifisch auf die Bedürfnisse der anderen Teilprojekte anzupassen. Dies umfasst auch die Entwicklung von gezielteren Algorithmen als Vorlauf für die einzelnen Module. Das Teilprojekt Relief ist an folgenden Intensivschlägen beteiligt, um neue Erkenntnisse durch die gemeinsame Untersuchung sämtlicher Datenebenen zu erhalten und dies auf den Pflichtschlägen zu überprüfen: Alt-Grünholz (Thumbby), 111 (Kassow), Oberlengharter Feld und Lohzipfel (beide Landshut) sowie Langer Berg (Groß-Twülpstedt). Diese Schläge zeigen reliefbedingte Effekte und eignen sich zur Aufstellung von „Regeln“, die sukzessive auf Schlägen mit geringerer Reliefenergie getestet werden müssen, um das oben erwähnte, ökonomisch für die Praxis entscheidende Grenzkriterium zu finden.

6.8 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.
- Bill, R. (1999): *Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 2: Analysen, Anwendungen und neue Entwicklungen.* Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Bill, R., Teichert, B. und Zimmermann, A. (2000): ATKIS – Eine Bestandsaufnahme. In: *ATKIS - Stand und Fortführung.* Schriftenreihe des DVW, Band 39. Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart. S. 1-8.
- Beven, K.J. and Kirkby, M. (1979): A physically-based, variable contributing area model of basin hydrology. - *Hydrological Sciences Bulletin* 24, S.43-69.
- Bobert, J., Schmidt, F., Gebbers, R., Selige, T. and Schmidhalter, U. (2001): Estimating soil moisture distribution for crop management practices with capacitance probes, EM-38 and digital terrain analysis. - *Proceedings of the 3rd European Conference on Agriculture.* Montpellier, France. Sheffield Academic Press, Sheffield. (in press).
- Moore, I. D., Gessler, P., Nielsen, G. and Peterson, G. (1993): Soil Attribute Prediction using Terrain Analysis. - *Soil Science Society America Journal*, Vol. 57, S. 443-452.

- Petzold, B., Reiss, P. and Stössl, W. (1999): Laser Scanning – surveying and mapping agencies are using a new technique for the derivation of digital elevation models. - *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 54, S.95-104.
- Quinn, P. F. and Beven, K. J. (1993): Spatial and temporal predictions of soil moisture dynamics, runoff, variable source areas and evapotranspiration for Plynlimon, Mid-Wales. - *Hydrological Processes* 7, S. 425-448.
- Schmidt, F. und Gebbers, R. (2000): Erstellung und Auswertung von digitalen Geländemodellen. - In: B. Resnik, [Hrsg.]: *GPS - Grundlagen, Anwendungen und Produkte*. Tagungsband zum Workshop am 16.03.2000 an der Universität Rostock. Interner Bericht Nr. 13, Institut für Geodäsie und Geoinformatik. Rostock.
- Schmidt, F. and Irrgang, A. (2000): Improved GIS data accuracy for Precision Agriculture and aerial photography management by use of Digital Terrain 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.
- Wilson, J.P. and Gallant, J. C. [Hrsg.] (2000): *Terrain Analysis. Principles and Applications*. - John Wiley, New York.
- Yao, H. and Clark, R. (1999): Evaluation of the potential to use sub-meter accuracy GPS receivers to develop topographic maps for precision farming. In: Stafford, J. [Hrsg.]: *Precision Agriculture'99. Proceedings of the 2nd European Conference on Precision Agriculture*. Odense, Denmark. Sheffield Academic Press, Sheffield, S. 847-856.

6.9 Adressen

Prof. Dr. R. Bill
Dipl. Ing. agr. F. Schmidt
Universität Rostock
Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät
Fachbereich Landeskultur und Umweltschutz
Institut für Geodäsie und Geoinformatik
Justus-von-Liebig-Weg 6
18059 Rostock
Tel: 0381/4982185
0381/4982165
Fax: 0381/4982188
E-Mail: ralf.bill@agrarfak.uni-rostock.de
frank.schmidt@agrarfak.uni-rostock.de

