

# **Hochgenaue Digitale Geländemodelle - Untersuchungen zur Erstellung, Analyse und Anwendung in der Landwirtschaft**

Dissertation

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Ingenieurwissenschaften

der Universität Rostock

vorgelegt von

Frank Schmidt, geb. am 20.01.1973 in Frankfurt am Main

wohnhaft in Dresden

Eingereicht am: 11.12.2002

Tag der mündlichen Prüfungen: 06.06.2003

Verteidigung: 02.07.2003

# INHALTSVERZEICHNIS

Seite

## 1 Einführung und Problemstellung

- 1.1 Einleitung..... 1
- 1.2 Ziele und Aufbau der Arbeit..... 4

## 2 Untersuchungsrahmen

- 2.1 Das Konzept „Precision Agriculture“ (PA)..... 5
- 2.2 Das Verbundprojekt *preagro*..... 6
- 2.3 Untersuchungsgebiete..... 7
  - 2.3.1 Kassow (Mecklenburg-Vorpommern)..... 7
  - 2.3.2 Baasdorf/Wulfen (Sachsen-Anhalt)..... 8
  - 2.3.3 Groß-Twülpstedt (Niedersachsen)..... 9
  - 2.3.4 Thumby (Schleswig-Holstein)..... 9
  - 2.3.5 Raesfeld/Beckum (Nordrhein-Westfalen)..... 10
  - 2.3.6 Landshut/Essenbach (Bayern)..... 10

## 3 Erstellung von hochgenauen Digitalen Geländemodellen

- 3.1 Grundlagen der Digitalen Geländemodelle (DGMs)..... 11
  - 3.1.1 Begriffe im DGM-Umfeld..... 11
  - 3.1.2 DGMs der Landesvermessung..... 12
- 3.2 Erfassungsmethoden für DGMs..... 14
  - 3.2.1 Übersicht der Verfahren..... 14
  - 3.2.2 Praxiserfahrung bei der GPS- Vermessung..... 22
  - 3.2.3 Untersuchungen zur Genauigkeit..... 25
  - 3.2.4 Bewertung und Diskussion..... 32
- 3.3 Methoden zur Erstellung von DGMs..... 34
  - 3.3.1 Strukturierung, Interpolation und Präsentation..... 34
  - 3.3.2 Übersicht der Verfahren..... 36
  - 3.3.3 Untersuchungen zur Genauigkeit..... 42
  - 3.3.4 Bewertung und Diskussion..... 45
- 3.4 Diskussion..... 47

## 4 Analyse von hochgenauen Digitalen Geländemodellen

- 4.1 Grundlagen der Reliefanalyse..... 49
  - 4.1.1 Bedeutung und Historie der Reliefanalyse..... 49
  - 4.1.2 Ansätze zur DGM-Analyse..... 51
- 4.2 Ableitungen aus dem DGM..... 55
  - 4.2.1 Primäre Reliefattribute..... 55
  - 4.2.2 Abflussalgorithmen..... 57
  - 4.2.3 Sekundäre Reliefattribute..... 58
- 4.3 Datenbearbeitung und Metadaten..... 61
  - 4.3.1 Datenbearbeitung im GIS..... 61

4.3.2	DGM-Metadaten.....	63
4.4	Untersuchung von komplexen Größen.....	65
4.4.1	Formbasierter Ansatz: Morphometrische Größen.....	65
4.4.2	Prozessbasierter Ansatz: Topographische Indizes.....	70
4.4.3	Genauigkeit von Ableitungen in Abhängigkeit der DGM-Qualität.....	72
4.5	Untersuchungen zur Reliefkennzeichnung mit dem DGM.....	74
4.6	Diskussion.....	79
<b>5</b>	<b>Reliefparameter und bodenkundliche Größen</b>	
5.1	Bodenkundliche Grundlagen.....	81
5.1.1	Bodenphysikalische Grundlagen.....	81
5.1.2	Geophysikalische Verfahren.....	84
5.1.3	Feld- und Labormethoden.....	86
5.2	Validierung des Topographischen Wetness-Index (TWI).....	88
5.2.1	Flächenkorrelationen von Sensor- und Geländeparametern.....	89
5.2.2	Vergleich von Extremwerten des TWI mit Luftbildern.....	92
5.2.3	Vergleich von TWI und Bodenfeuchtemessungen einer Transekte.....	93
5.2.4	Vergleich von TWI, ECa und Bodenfeuchtedynamik.....	96
5.3	Vergleichende Analyse von DGM und Leitfähigkeitskartierungen.....	97
5.4	Entwicklung des Analysemoduls „Topocrop“ für Precision Agriculture.....	103
5.5	Diskussion.....	105
<b>6</b>	<b>Integration der Reliefanalyse in landwirtschaftliche Entscheidungen</b>	
6.1	Anforderungen an die Datenqualität.....	107
6.2	Erkenntnisse bei der Anwendung des Reliefanalysemoduls „Topocrop“.....	108
6.2.1	Potenzialkarten für <i>preagro</i> -Module.....	108
6.2.2	Erosionsmuster.....	110
6.3	Ansätze für weitere Analysen.....	113
6.3.1	Mikroklimatische Anwendungen.....	113
6.3.2	Naturschutz.....	115
6.3.3	Oberflächenberechnung.....	115
6.3.4	Bildflugoptimierung.....	116
6.4	Diskussion.....	117
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>119</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>122</b>

## Zusammenfassung

Erstellungsmethoden und Anwendungen für Analysen von hochgenauen digitalen Geländemodellen in der teilschlagspezifischen Landwirtschaft (Precision Agriculture) wurden vorgestellt und auf mehr als 50 Praxisschlägen in verschiedenen Regionen der Bundesrepublik getestet. Der Schwerpunkt der Arbeit lag auf der praxisnahen Erfassung, Verarbeitung und Analyse der Geländehöhen von landwirtschaftlichen Schlagflächen in Größen von 6 - 180 ha. Das Ziel war, Aussagen über die Schlagheterogenität zu finden, um Schlagbereiche („Teilschläge“) für eine standortangepasste Bewirtschaftung abzugrenzen.

Die fahrzeuggestützte Vermessung mit dem RTK-GPS erwies sich als ökonomischste Variante zur DGM-Erstellung bei den in dieser Arbeit aufgestellten Qualitätsansprüchen. Einfache Interpolationsverfahren konnten für die ungünstige streifenförmige Verteilung der RTK-GPS-Messpunkte keine Oberfläche mit genügender Abflusskontinuität für hydrologische Algorithmen erzeugen. Für die RTK-DGMs erwies sich die Kriging-Interpolation als effektive Variante, doch auch das ARC/INFO-Topogrid-Tool und SCOP erzeugten DGM-Oberflächen, die den hohen Qualitätsansprüchen genügen. Für Anwender im Dienstleistungsbereich wurden Erfahrungen im Umgang mit RTK-GPS-Empfängern unter landwirtschaftlichen Bedingungen gesammelt und wertvolle Erkenntnisse zur Interpolation von Daten mit streifenförmiger Ausgangsgeometrie veröffentlicht. Diese Erkenntnisse betreffen die meisten fahrzeuggestützten Messkampagnen in der Landwirtschaft, die aus den Fahrspuren erfolgen und flächenhafte Daten wie z. B. Ertragskarten zum Ziel haben. Ein Vergleich mit einem Laserscanner-DGM für das Untersuchungsgebiet Kassow ergab ähnliche Genauigkeiten der Höhenmessung (RMSE von  $\pm 0,06 - 0,1$  m) bei einem größeren Detailreichtum der Laserscannerdaten. In Bezug auf die Ableitung hydrologischer Parameter jedoch war eine stärkere Glättung als bei den RTK-DGMs notwendig, um landwirtschaftlich relevante Muster der Bodenvariabilität zu erkennen. Die DGM-Angebote der Landesvermessung erwiesen sich für präzise Auswertungen im Hinblick auf die Untersuchung der reliefbedingten Bodenvariabilität in der Regel als unzureichend. Lediglich Muster der Ableitungen von Laserscanner-DGMs der Landesvermessung ergaben Übereinstimmungen mit anderen flächendeckenden Daten der Schläge, wie z. B. dem Luftbild und der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit des Bodens (ECa). Allerdings werden auf absehbare Zeit nur für wenige Regionen Laserscanner-DGMs verfügbar sein.

Für die Erfassungsmethoden und die erstellten DGMs wurden Qualitätskriterien aufgestellt, um aus DGM-Ableitungen auf bodenbedingte Standortunterschiede zu schließen. Je nach Landschaftstyp zeigte sich, dass eine räumliche Auflösung von 2- 10 m bei einer Höhen Genauigkeit des interpolierten DGM von  $\pm 0,15$  m notwendig ist, um Zusammenhänge zwischen Relief und Boden auf Schlagebene nachweisen zu können. 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.

Index-Konzepte aus der hydrologisch motivierten DGM-Analyse wurden untersucht, um die räumliche Variabilität der Bodeneigenschaften abzugrenzen und damit die Landschaft mit Hilfe des DGM zu segmentieren. Als zentraler Baustein einer landwirtschaftlich orientierten DGM-Auswertung erwies sich der Topographische Wetness-Index  $TWI = \ln(A_s/\tan\alpha)$  nach der Glättung mit einem Mean-Filter.

Die Bodenfeuchteuntersuchungen der vorliegenden Arbeit zeigten, dass im Frühling und nach Niederschlägen oberflächennah und im Frühsommer im unteren Bereich der durchwurzelter Tiefe des Bestandes ein guter Zusammenhang zwischen dem TWI-Muster und der tatsächlichen Bodenfeuchte besteht. Extremwerte des TWI korrelieren mit Arealen, die hohe Bodenfeuchte durch laterale Zuflüsse aufweisen bzw. zuerst abtrocknen und mangels Zuflüssen von Wasser und Nährstoffen bei gleichzeitiger Netto-Auswaschung über ungünstige Standortigenschaften verfügen. Lineare Bereiche besonders hoher TWI-Werte repräsentieren Erosions-

rinnen, in denen auf Grund langfristiger Wirkung von Abflüssen nach Starkregen mit größerem Substrat zu rechnen ist. Dies wurde durch Vergleiche mit Karten der elektrischen Leitfähigkeit (ECa) und Untersuchung ausgewählter Bodeneigenschaften nachgewiesen. Bei Trockenheit ist die Bodenfeuchte stärker von der Textur abhängig, deren räumliches Muster zumindest bei nicht komplex geschichteten Böden gut durch die ECa-Kartierung abgebildet wurde. Somit wird vorgeschlagen, für Bewirtschaftungsmaßnahmen während trockener Perioden stärker das ECa-Muster zu beachten und bei Maßnahmen während feuchter Jahreszeiten das TWI-Muster. Über eine gewichtete Verschneidung lassen sich Übergangsmuster berechnen. Für die Teilflächenbewirtschaftung bedeutet dies, dass auf Schlägen mit Hilfe von ECa und TWI für verschiedene Managementzeitpunkte und Anwendungsfälle stabile Standortzonen ausgewiesen werden können.

Es zeigten sich Unterschiede zwischen den als organisiert/strukturiert dargestellten Schlägen (in Bezug auf das TWI-Abflussmuster) und kleinen Schlägen ohne ausgeprägtes Abflussmuster. Für die strukturierten Schläge ist die Berücksichtigung der Reliefinformation und eine weitergehende Analyse anzuraten. Ein Vergleich von mehreren Datenebenen bietet sich an, um die Genese konkreter Muster auf dem Schlag zu verstehen und zu bewerten. Eine subjektive Auswahl von Standorten für das Aufzeigen von Zusammenhängen muss in jedem Fall durch den Bearbeiter begründet und in den Zusammenhang der Prozesse auf dem Gesamtschlag gestellt werden. Die Scatterplots verschiedener Datenebenen und Raumausschnitte demonstrierten, dass die Richtung der Korrelation sich zwischen Teilbereichen eines Schlages unterscheiden kann, was in der Summe des Schlages zu niedrigen Korrelationskoeffizienten führt. Rasterkarten lokaler Korrelationskoeffizienten können diese Areale vor allem auf den strukturierten Schlägen abgrenzen, was am Beispiel von TWI und ECa gezeigt wurde. Das derzeitige Prozessverständnis kann noch nicht auf ganze Schlagsysteme angewendet werden.

Der Vorteil der DGM-Analyse liegt darin, dass sie auf der Geländehöhe, einem statischen Wert, als einziger zu erfassender Datenquelle beruht. 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, Prozesse auf einzelnen Schlagteilen zu erklären. Optional wird die Verschneidung mit Karten der elektrischen Bodenleitfähigkeit vorgeschlagen, um Bodeneigenschaften zu berücksichtigen. Deren Erfassung kann in einem Arbeitsgang mit der DGM-Erfassung erfolgen. Viele Modelle, die landschaftsökologische Prozesse beschreiben, haben dagegen den Nachteil eines umfangreichen Parameterbedarfes, der von einem Landwirt nicht aufzubringen ist. DGMs sind eine sehr effiziente Datengrundlage, da sie eine lange Gültigkeitsdauer besitzen. Mit einer einmaligen Vermessung zu akzeptablen Kosten entsteht ein langfristig nutzbarer Erkenntnisgewinn über die Schläge, der in vielen Applikationsmodellen genutzt werden kann. Auf Schlägen mit geringer Varianz der Vergleichsparameter sind in der Regel keine Zusammenhänge zu finden. Dort ist allerdings auch eine Teilflächenbewirtschaftung ökonomisch nicht sinnvoll.

Die Integration der DGMs in die Erstellung von Applikationskarten wurde in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern soweit realisiert, dass Bodenfeuchtepotezialkarten Extrembereiche auf dem Schlag anzeigen und diese in den Modulen mit Zu- und Abschlügen berücksichtigt werden können. Für ArcView wurde eine Extension (topocrop.avx) entwickelt, die mittels Nachbarschaftsstatistik (Glättung) praxistaugliche Karten des Bodenfeuchtemusters sowie weitere DGM-Indizes wie den Stream-Power-Index und den Length-Slope-Faktor zur Abschätzung des Erosionsmusters liefert.

Ein grundsätzliches Problem von Precision Agriculture ist der Mangel an hochaufgelösten Eingangsdaten. Insofern ist gerade die Information aus dem DGM und den daraus abgeleiteten Parametern, v.a. in Verbindung mit der Messung der elektrischen Leitfähigkeit eine wertvolle Größe.

## Thesen

1. Digitale Geländemodelle (DGMs) leisten einen Beitrag zur Erklärung der Heterogenität von Standortfaktoren auf landwirtschaftlichen Nutzflächen (Schlägen). Der Vorteil der DGM-Analyse liegt darin, dass nur ein statischer Wert, die Geländehöhe, zu erfassen ist und daraus Hinweise auf den Ablauf von Prozessen in der Landschaft ableitbar sind. Im Gegensatz dazu zeigen andere Datenquellen wie Luftbilder und Bodenkarten nur die Ergebnisse von Prozessen als Summenparameter (z. B. Vernässungsstellen, Erosionsrinnen).
2. Um Zusammenhänge zwischen Relief und Boden auf Schlagebene nachweisen zu können, ist eine räumliche Auflösung des DGM je nach Landschaftstyp von 2- 10 m bei einer Höhengenaugigkeit des interpolierten DGM von  $\pm 0,15$  m notwendig.
3. Zur Erstellung von DGMs der geforderten Genauigkeit eignen sich verschiedene Methoden. Die fahrzeuggestützte Vermessung mit dem Realtime-Kinematic (RTK)-GPS ist die ökonomischste Variante zur Geländehöhenerfassung unter landwirtschaftlichen Bedingungen. Die Verarbeitung der Höhendaten mit streifenförmiger Anordnung der GPS-Messpunkte in den Fahrgassen erfordert jedoch spezielle Interpolationsverfahren.
4. Die Kriging-Interpolation mit manueller Variogrammanpassung ist die effektivste Variante zur Oberflächenerstellung aus den RTK-GPS-Messpunkten. Die erzeugten DGM-Oberflächen sind gleichwertig mit den Ergebnissen der aufwändigeren Werkzeuge ARC/INFO-Topogrid-Tool und SCOP. Wesentliches Kriterium ist eine DGM-Oberfläche mit genügender Abflusskontinuität für hydrologische Algorithmen. Die erreichbare Genauigkeit für die interpolierten DGMs liegt im Bereich  $\pm 0,06 - 0,1$  m.
5. Flugzeuggetragene Laserscanner-DGMs bieten eine detailreiche Alternative zur GPS-Vermessung bei fast gleich hoher Messpunktgenauigkeit. Durch die hohe Punktdichte entfallen die Interpolationsprobleme. Erfolgt die Vermessung jedoch zur Vegetationszeit, entstehen Probleme durch den dichten Pflanzenbestand. Pflanzen- und Bodenpunkte können nicht eindeutig getrennt werden. Fahrgassen auf dem Acker spiegeln sich im DGM wider und verfälschen sowohl die Ergebnisse der Abflussalgorithmen als auch die Formenbildung. Laserscanner-DGMs der Landesvermessung haben ein großes Potenzial, werden aber mangels Nachfrage zu selten vollständig ausgewertet und angeboten.
6. Der Topographische Wetness-Index (TWI)  $\ln(A_s/\tan\alpha)$  ist nach der Glättung mit einem Mean-Filter ein wichtiger Baustein der landwirtschaftlich orientierten DGM-Analyse. Während der TWI ein generelles Bodenfeuchtemuster gut wiedergibt, ist er nicht geeignet, kleine Punktmessungen der Bodenfeuchte mit hohen Bestimmtheitsmaßen zu bestätigen. Ein guter Zusammenhang ( $r^2 > 0,5$ ) zwischen dem TWI-Muster und der tatsächlichen Bodenfeuchte besteht im Frühling und nach Niederschlägen im oberflächennahen Boden sowie im Frühsommer im unteren Bereich der durchwurzelten Zone.

7. Lineare Muster hoher Wetness-Index-Werte auf landwirtschaftlichen Flächen weisen auf Bodenveränderungen durch Wasser- und Materialtransporte hin und nicht, wie erwartet, auf hohe potenzielle Bodenfeuchte. Diese Bereiche stellen Erosionsrinnen dar, in denen auf Grund langfristiger Wirkung von (Starkregen-)Abflüssen mit größerem Substrat zu rechnen ist. Dies beweist den Zusammenhang von Relief und bodenphysikalischen und -chemischen Eigenschaften.
8. Eine Nutzung des TWI für teilflächenspezifische Maßnahmen in der Landwirtschaft ist über Zu- und Abschläge bei Bodenbearbeitungstiefe, Aussaat- und Düngermenge möglich, da das räumliche Muster der potenziellen Bodenfeuchte ein wichtiges Kriterium für die Optimierung der Applikationsmengen darstellt. Extremwerte des TWI korrelieren mit Arealen, die hohe Bodenfeuchte durch laterale Zuflüsse aufweisen bzw. zuerst abtrocknen und mangels Zuflüssen von Wasser und Nährstoffen bei gleichzeitiger Netto-Auswaschung über ungünstige Standorteigenschaften verfügen.
9. Es bestehen Unterschiede zwischen den als organisiert/strukturiert dargestellten Schlägen (in Bezug auf das TWI-Abflussmuster) und kleinen Schlägen ohne ausgeprägtes Abflussmuster. Für die strukturierten Schläge ist die Berücksichtigung der Reliefinformation und eine weitergehende Analyse sinnvoll. Ein Vergleich von mehreren Datenebenen bietet sich an, um die Genese konkreter Muster auf dem Schlag zu verstehen und zu bewerten. Die Richtung der Korrelation unterscheidet sich zwischen Teilbereichen eines Schlages bei den „strukturierten“ Schlägen. Dies begründet die niedrigen globalen Korrelationskoeffizienten zwischen TWI und ECa. Rasterkarten lokaler Korrelationskoeffizienten grenzen diese Areale effektiv ab. Das derzeitige Prozessverständnis kann noch nicht auf ganze Schlagsysteme angewendet werden.
10. Eine Kopplung der Reliefanalyse mit Bodeninformation ist über eine Verschneidung mit Karten der elektrischen Bodenleitfähigkeit (ECa) möglich und sinnvoll, um räumliche Muster der Bodenartenunterschiede beim lateralen Abfluss zu berücksichtigen. Je nach Bedeutung der lateralen Komponente ist eine Gewichtung bei der Verschneidung anzuraten. Vorgeschlagen wird eine Multiplikation normalisierter Karten. Die ECa-Datenerfassung kann in einem Arbeitsgang mit der DGM-Erfassung erfolgen.
11. Die vorgestellten DGM-Analysen bieten stabile Standortzonen für die teilflächenspezifische Variation von pflanzenbaulichen Maßnahmen und sind ein wirkungsvolles Werkzeug zum Generieren von Standortkarten. Gerade diese flächendeckende Information ist für Precision Agriculture eine wertvolle und preiswerte Datenquelle. Bei der DGM-Erstellung müssen jedoch die hier aufgestellten Qualitätskriterien eingehalten werden.