

High-Quality Digital Elevation Models – Capturing, Analysis and Applications in Precision Agriculture

Dissertation at the Faculty for Engineering Sciences, University of
Rostock/Germany

This is a translation of the summary. The original work is available in German only. An overview of English publications based on this work can be found at www.fs-privat.de

Original Title:

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. 2003.

by Frank Schmidt

Submitted:	11.12.2002
Oral Exams:	06.06.2003
Colloquium:	02.07.2003

Examinators:

Prof. Dr.-Ing. Ralf **Bill**, Rostock/Germany

Prof. Dr.-Ing. Karl **Kraus**, Vienna/Austria

Prof. Dr. Bernd **Diekkrüger**, Bonn/Germany

Content	Page
1 Introduction	
1.1 Introduction.....	1
1.2 Goals and Structure of the Thesis.....	4
2 Scope of the Thesis	
2.1 The concept of „Precision Agriculture“ (PA).....	5
2.2 The Joint Project <i>PREAGRO</i>	6
2.3 Study Sites.....	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 Generation of Precise Digital Elevation Models	
3.1 Basics of Digital Elevation Models.....	11
3.1.1 Terms.....	11
3.1.2 DEMs offered by German Mapping Agencies.....	12
3.2 Capturing Methods for DEM Data.....	14
3.2.1 Overview.....	14
3.2.2 Practice Experience with RTK-GPS Surveying Campaigns.....	22
3.2.3 Accuracy Investigations.....	25
3.2.4 Assessment and Discussion.....	32
3.3 Methods for DEM Generation.....	34
3.3.1 Structuring, Interpolation and Presentation.....	34
3.3.2 Overview.....	36
3.3.3 Accuracy Investigations.....	42
3.3.4 Assessment and Discussion.....	45
3.4 Discussion.....	47
4 Analysis of Precise Digital Elevation Models	
4.1 Basics of Terrain Analysis.....	49
4.1.1 Scope and History of Terrain Analysis.....	49
4.1.2 Methods for Terrain Analysis.....	51
4.2 DEM Derivatives.....	55
4.2.1 Primary Terrain Attributes.....	55
4.2.2 Flow Algorithms.....	57
4.2.3 Secondary Terrain Attributes.....	58
4.3 Data Processing and Meta Data.....	61

4.3.1	Data Processing with GIS.....	61
4.3.2	Meta Data for DEMs.....	63
4.4	Investigations of Complex Attributes.....	65
4.4.1	Form Based Approach: Morphometric Attributes.....	65
4.4.2	Process Based Approach: Topographic Indices.....	70
4.4.3	Precision of Attributes in Relation to DEM Quality.....	72
4.5	Terrain Classification with a DEM.....	74
4.6	Discussion.....	79
5	Terrain Attributes and Soil Parameters	
5.1	Basics of Soil Science.....	81
5.1.1	Basics of Soil Physics.....	81
5.1.2	Geophysical Methods.....	84
5.1.3	Field and Laboratory Methods.....	86
5.2	Validation of the Topographic Wetness Index (TWI).....	88
5.2.1	Correlation of Sensor and Field Parameters.....	89
5.2.2	TWI versus Aerial Photographs.....	92
5.2.3	TWI versus Soil Moisture Measurements (Transect).....	93
5.2.4	TWI versus ECa and Soil Moisture Dynamics.....	96
5.3	Comparative Analysis of DEM and Conductivity Mapping.....	97
5.4	Development of the Extension „Topocrop“ for Precision Agriculture.....	103
5.5	Discussion.....	105
6	Integration of Terrain Analysis Agricultural Decisions	
6.1	Requirements on Data Quality.....	107
6.2	Application of the Terrain Analysis Module „Topocrop“.....	108
6.2.1	Potential Maps for <i>preagro</i> Modules.....	108
6.2.2	Erosion Patterns.....	110
6.3	Further Analysis Approaches.....	113
6.3.1	Microclimatic Applications.....	113
6.3.2	Nature Conservation.....	115
6.3.3	Real Surface Calculations.....	115
6.3.4	Optimisation of Aerial Photograph Flight Campaigns.....	116
6.4	Discussion.....	117
7	Summary and Outlook.....	119
8	References.....	122

Results

1. Digital Elevation Models (DEMs) contribute to the explanation of site heterogeneity on agricultural plots. The advantage of DEM analysis is that only one static parameter has to be captured to interpret landscape processes. In contrast, other data sources usually show only the results of processes (e.g. wet spots, erosion patterns) and not the causes.
2. In order to prove connections between terrain and soil, a spatial resolution of 2 – 10 m (according to terrain type) and a vertical precision of the interpolated DEM of $\pm 0,15$ m is necessary.
3. Several methods are available to generate DEMs with the requested quality. Vehicle-based surveying with Realtime-Kinematic (RTK)-GPS is the most efficient method to capture elevation under agricultural conditions. The processing of elevation data with the resulting stripe pattern of the GPS measurement points along the tram lines, however, requires special interpolation methods to avoid artefacts.
4. Kriging interpolation with interactive variogram modeling is a recommendable method for surface generation based on RTK-GPS measurement points. The results are similar to high-end software such as ARC/INFO-Topogrid-Tool und SCOP. The main criterion for the quality is a DEM surface with hydrological continuity in terms of flow algorithms applied to the DEM. The elevation accuracy reached in this study is approx. $\pm 0,06$ - $0,1$ m.
5. Air-borne laser scanner DEMs are a detailed alternative to GPS campaigns and reach the same measurement accuracy on agricultural plots. Due to the high density of measurement points, the interpolation problems are less. During the vegetation period, however, problems occur with the crop surface. Plant and soil surface can not be separated with the usual algorithms. Tram lines are integrated in the DEM surface (lower crop density) and influence the results of flow algorithms and landform delineation. Laser scanner DEMs by German Mapping Agencies have a great potential but are only available for few areas although large parts of several Federal States are already captured.
6. The Topographic Wetness Index (TWI) $\ln(A_s/\tan\alpha)$ is, after smooting with a mean filter/neighbourhood statistics, a central tool in agricultural terrain analysis. While giving a general potential pattern of soil moisture, the TWI is not suited to reach high correlations to point measurements of soil moisture. A good correlation between TWI pattern and soil moisture values ($r^2 > 0,5$) has been found in spring and after precipitation close to the surface and in early summer in the middle to lower root zone (0,6-0,9 m).
7. Linear patterns of high TWI values on agricultural plots relate to changes in soil physical properties caused by water flow. This is in contrast to the expected high soil moisture spots in this lines. These areas represent erosion channels, in which coarser substrate is more abundant due to long-term effects of water flow/high precipitation events.

8. The TWI can be used in precision agriculture as basis for site-specific extra charges concerning application maps for soil tillage depth, seeding amount and fertilizer. The spatial pattern of soil moisture is an important criterion to optimise application amounts. Extreme values of the TWI correlate to areas of high soil moisture caused by lateral surplus and areas that dry up first (no lateral in-flow of water and nutrients) respectively.
9. Organised/structured plots and small plots without strongly developed flow patterns (in terms of TWI patterns) have to be distinguished. The consideration of terrain information is useful for structured plots only. A comparative analysis of several data layers is recommended to discover and assess the emergence of the calculated and observed patterns on the plot. The direction of correlation between TWI and apparent electrical conductivity (ECa) differs between sub-areas on the „structured“ plots. This is the reason for the observed low global correlation coefficients between TWI and ECa. Raster maps of local correlation coefficients can show the borders of these sub-areas. The current understanding of the processes, however, can not be applied on whole systems of plots.
10. The combination of soil parameters and terrain analysis is possible as an overlay of ECa maps and terrain attributes. Thus, spatial patterns of soil characteristics can be considered for the assessment of lateral flow patterns. A weighting of the parameters is recommended according to the local meaning. A first standard procedure could be the multiplication of normalised maps. ECa data capture can be combined with the RTK-GPS survey.
11. The DEM analysis methods that were investigated deliver stable zones for a site-specific variation of crop management. Thus, they are a useful tool to generate maps of site quality. This complete coverage of site data is a valuable and cost-effective data source. However, quality standards as presented in this study have to be considered.

Summary (currently in German only)

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 Höhengenaugigkeit 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 durchwurzeltten 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 Standorteigenschaften 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.