

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

Rostock, Juli 2003

ALL MODELS ARE WRONG BUT SOME ARE USEFUL

(G. E. P. Box, 1976)

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. R. Bill, Universität Rostock

Prof. Dr.-Ing. K. Kraus, Technische Universität Wien

Prof. Dr. B. Dieckrüger, Rheinische-Friedrich-Willhelms-Universität Bonn

Eingereicht am: 11.12.2002

Verteidigt am: 02.07.2003

| INHALTSVERZEICHNIS | Seite |
|--|--------------|
| 1 EINFÜHRUNG UND PROBLEMSTELLUNG | 1 |
| 1.1 Einleitung | 1 |
| 1.2 Ziele und Aufbau der Arbeit..... | 4 |
| 2 UNTERSUCHUNGSRAHMEN | 5 |
| 2.1 Das Konzept „Precision Agriculture“ (PA)..... | 5 |
| 2.2 Das Verbundprojekt <i>preagro</i> | 6 |
| 2.3 Untersuchungsgebiete..... | 7 |
| 2.3.1 Kassow (Mecklenburg-Vorpommern, 12°04' E; 53°52' N)..... | 7 |
| 2.3.2 Baasdorf/Wulfen (Sachsen-Anhalt, 11°55' E; 51°49' N)..... | 8 |
| 2.3.3 Groß-Twülpstedt (Niedersachsen, 10°57' E; 52°27' N)..... | 9 |
| 2.3.4 Thumby (Schleswig-Holstein, 9°56' E; 54°34' N)..... | 9 |
| 2.3.5 Raesfeld/Beckum (Nordrhein-Westfalen, 8°00' E; 51°45' N) | 10 |
| 2.3.6 Landshut/Essenbach (Bayern, 12°13' E; 48°38' N) | 10 |
| 3 ERSTELLUNG VON HOCHGENAUEN DIGITALEN GELÄNDEMDELLEN.. | 11 |
| 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 Interpolationsverfahren | 36 |
| 3.3.3 Untersuchungen zur Genauigkeit..... | 42 |
| 3.3.4 Bewertung und Diskussion | 45 |
| 3.4 Diskussion..... | 47 |
| 4 ANALYSE VON HOCHGENAUEN DIGITALEN GELÄNDEMDELLEN..... | 49 |
| 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 | Untersuchung zur Reliefkennzeichnung mit dem DGM | 74 |
| 4.6 | Diskussion..... | 79 |
| 5 | RELIEFPARAMETER UND BODENKUNDLICHE GRÖßEN | 81 |
| 5.1 | Bodenkundliche Grundlagen..... | 81 |
| 5.1.1 | Bodenphysikalische Grundlagen | 81 |
| 5.1.2 | Geophysikalische Verfahren..... | 84 |
| 5.1.3 | Feld- und Labormethoden..... | 87 |
| 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 (Wulfen, Schlag 641)..... | 96 |
| 5.3 | Vergleichende Analyse von DGM und Leitfähigkeitskartierungen | 97 |
| 5.4 | Entwicklung des Analysemoduls „Topocrop“ für Precision Agriculture..... | 103 |
| 5.5 | Diskussion..... | 105 |
| 6 | INTEGRATION DER RELIEFANALYSE IN LANDWIRTSCHAFTLICHE ENTSCHEIDUNGEN | 107 |
| 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 |
| 7 | ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK..... | 119 |
| 8 | LITERATURVERZEICHNIS | 122 |

Anlagen

Abkürzungsverzeichnis
Thesen
Selbstständigkeitserklärung

1 Einführung und Problemstellung

1.1 Einleitung

Die Heterogenität der Landschaft ist ein maßgeblicher Grund für die räumlich und zeitlich variierende Verfügbarkeit von Ressourcen. Landschaftsökologische Prozesse werden durch das Georelief, die Form der Geländeoberfläche, gesteuert. Das Georelief ist Hauptumsatzfläche für Strahlung und Wasserhaushalt und damit Regler für die Bodenbildung, das Verhältnis von Abfluss und Versickerung und das Mikroklima. Es bestimmt Richtung und Ausmaß der Wasserbewegung im Gelände, meist als Reaktion eines Einzugsgebietes auf ein Niederschlagsereignis. Dies beeinflusst die standörtliche Differenzierung der Landschaft, welche als raumbezogene Information auf verschiedenen Maßstabsebenen (Skalen) und in verschiedenen Fachdisziplinen eine wichtige Größe ist.

Die rechnergestützte Nachbildung der Geländeoberfläche wird als Digitales Geländemodell (DGM) bezeichnet. Ein DGM besteht nach Bill (1999b) aus dreidimensionalen Koordinaten (x,y,z), Anweisungen zur Strukturierung der Daten und den (Interpolations-) Algorithmen. Mit einem DGM können raumbezogene Prozesse modelliert werden, die auf der Oberfläche oder im oberflächennahen Boden ablaufen. Eine weitergehende Datenanalyse ist mit einem Geo-Informationssystem (GIS) möglich.

Hydrologen und Bodenkundler benötigen für Regionalisierungen des Abflussgeschehens oder Erosionsvorhersagen die Position der Bodenbereiche, die zuerst mit Wasser gesättigt sind und damit Oberflächenabfluss initialisieren. Im mittleren Maßstabbereich betrifft dies Hochwasserprognosen, im großen Maßstab Abschätzungen von Bodenabtrag. In Naturschutz und Landschaftsplanung kann das Muster der Ressourcenverteilung zur gezielten Ausweisung von schutzwürdigen Bereichen führen, z. B. für Trinkwasserschutzgebiete oder botanisch potenziell wertvolle Areale, die meist durch extreme Bodenfeuchteverhältnisse charakterisiert sind. In der Forstwirtschaft können die Reliefattribute Neigung und Exposition im kleinen Maßstabbereich Hinweise zur Auswahl von geeigneten Baumarten oder zur Erklärung von Krankheitsmustern geben. In der Landwirtschaft interessiert, im großen Maßstabbereich, die differenzierte Verfügbarkeit von Wasser und Nährstoffen, um den Pflanzenbestand mit räumlich angepassten Maßnahmen steuern zu können. Die Reliefanalyse bietet, ähnlich wie die aufwändigere Bodenkartierung, ein stabiles räumliches Muster der Standortheterogenität.

Die Identifikation von Mustern in einer Landschaft mit einfachen, prozessorientierten Indizes ist seit Mitte der 1980er Jahre das Ziel vieler Reliefanalyse-Vorhaben. Wegweisend waren hierbei die DGM-basierten Arbeiten von Moore et al. (1991, 1993a).

Der Einfluss des Georeliefs auf die Pflanzenproduktion wurde ursprünglich vor allem aus geländeklimatologischer Sicht mit Feldmessungen untersucht (Geiger, 1961; Baumann, 1961; Lohmeyer und von Zezschwitz, 1982). In Baden-Württemberg wurde in den 1970er Jahren die Geländeneigung im Rahmen der agrarstrukturellen Detailplanung erfasst und zur Auscheidung von Grenzertragsböden verwendet. Seit den 1980er Jahren werden DGMs auch bei der Wertermittlung in der Flurbereinigung eingesetzt (Stanger, 1982). Die grobe Auflösung, die noch vor wenigen Jahren die Qualität der DGMs limitierte, beschränkte die Nutzung und den Forschungsschwerpunkt auf Hochwassermodelle und Forstökosystem-Modelle in einem deutlich kleineren Maßstabbereich (O'Loughlin, 1986; Quinn et al., 1991; Moore et al., 1993b). Durch die Verfügbarkeit von DGMs höherer Auflösung und von Abflussalgorithmen stieg das Interesse an der Quantifizierung von Prozessen des Bodenwasserhaushaltes im Hinblick auf den Pflanzenbau (Bork und Rohdenburg, 1985) und die Erosionsforschung (Todorovic et al., 1987; Schmidt, 1988; Flacke et al., 1990; Helming et al., 1993; von Werner, 1995). Wessolek et al. (1994) und Kofalk (1998) untersuchten reliefbestimmte Faktoren (Nettoeinstrahlung, Oberflächenabfluss, reale Evapotranspiration an verschiedenen Hangpositionen) im Hinblick auf das Wasserregime hügeliger Agroökosysteme. Dabei standen die kleinräumige

Variabilität und der Reliefeinfluss auf den Bodenwassergehalt an mehreren zweidimensional betrachteten Hängen im Vordergrund.

Einen bedeutenden Fortschritt bei der Modellierung des Geländewasserhaushaltes brachte die Betrachtung von dreidimensionalen Prozessen in der Landschaft an Stelle der zweidimensionalen Unterteilung eines Hangprofils in „Kuppe“, „Senke“ und „Hang“. Die Ermittlung von Zuflussgebieten an Stelle einer „Hanglänge“ wurde durch die Analyse von DGMs möglich (Binley und Beven, 1992; Moore und Wilson, 1992; Western et al., 1999). Herbst (2001) verwendete Reliefparameter zur Optimierung der räumlichen Vorhersage von Bodeneigenschaften für hydrologische Modelle. Bereits Richter (1962) stellte fest, dass die Übereinstimmung zwischen Relieftteilen und Flächen gleicher Standortqualitäten „im wesentlichen auf der gesetzmäßigen Verteilung und Bewegung des Bodenwassers und der an der Oberfläche abfließenden Niederschläge“ beruht. Hiermit ergibt sich eine große Übereinstimmung von Kartierungsansätzen mit der prozessbasierten Analyse von DGMs. In beiden Fällen ist das Ziel die Erkennung des Mosaiks der Böden am Hang auf Grundlage der Wasserbewegung.

Bei der ersten europäischen Konferenz zu Precision Agriculture 1997 wurde die umfassende Bedeutung der Geländeanalyse für die Landwirtschaft beschrieben (Grenzdörffer, 1997; Suduth et al., 1997). Stand anfangs die Abgrenzung von homogenen Teilbereichen auf Basis von geomorphologischen Einheiten und die qualitative Beschreibung der Zusammenhänge von Ertrag und Geländehöhe im Vordergrund, wurden später komplexe Analyseansätze mit Reliefattributen und lokal angepassten Modelle vorgestellt (Nugteren und Robert, 1999; Gebbers und Schmidt, 1999; Basso et al., 2000; Kaspar et al., 2000; Schmidt, 2001a). In der Regel wurden Reliefeinheiten in Studien auf landwirtschaftlichen Flächen ausgegrenzt, um gezielte Bodenbeprobungen zu realisieren oder die Quellen der Heterogenität eines Feldes zu ergründen. Bishop und McBratney (1999) fassen dies wie folgt zusammen: „*the use of DEMs has been poorly documented in the PA [precision agriculture] literature with main uses...to derive landform classes to derive management zones*“.

Meist wurden mehrere Boden- und Reliefparameter als Basis einer multifaktoriellen Klassifikation zur Einteilung von Bewirtschaftungseinheiten verwendet. Besonders geeignet zeigten sich Fuzzy-Ansätze (Burrough et al., 2000; MacMillan et al., 2000), die jedoch noch ein sehr ungünstiges Aufwand-Nutzen-Verhältnis aufweisen. Weitere Studien verwenden Reliefparameter zur Erklärung von Ertragsvariabilitäten. Nolan et al. (2000) messen den Erfolg einer Reliefklassifikation am Kornertag ($r^2 = 0,51$), erkennen allerdings an, dass eine gleiche Ertragshöhe auf unterschiedlichen Faktoren basieren kann und deshalb auch ohne hohe Korrelationen zum Ertrag eine unterschiedliche Bewirtschaftung auf Basis der Relief- und Bodeneigenschaften sinnvoll ist. Bestimmtheitsmaße für den Zusammenhang von Ertrag und Reliefparametern schwanken sehr stark, z. B. 13 - 85 % nach Yang (1998) in Yao und Clark (1999). Yao und Clark (1999) nutzten ein DGM ähnlicher Genauigkeit wie die für die vorliegende Arbeit erstellten zur Interpretation von Ertragskarten. Persson und Pilesjö (2001) untersuchten ein DGM für die Auswertung der hydrologischen Struktur einer landwirtschaftlichen Fläche mit einer räumlichen Auflösung von 1 m². Die dort verwendete Methodik wurde auch für einen Projektschlag der vorliegenden Arbeit getestet (Schmidt und Persson, 2003).

Nette (2001) bestätigte eine reliefabhängige Verteilung des pH-Wertes und der Kalium-, Humus- und Gesamtstickstoffgehalte für ein Untersuchungsgebiet in der Eifel und wies einen Einfluss des Mikroreliefs auf die räumliche Variabilität von Bodenmächtigkeit und Wasserkapazität nach. Panten (2002) fand signifikante Zusammenhänge der Boden- und Geländeparameter bei einer Untersuchung von 15 Geländeklassen aus DGM, Luftbild und Ertragskarte. Pachepsky et al. (2001) verglichen die Variabilität von hydraulischen Bodeneigenschaften mit Hangpositionen und Reliefparametern mit einem 30 m Raster-DGM. Trotz der geringen Auflösung fanden sie im Saugspannungsbereich von 10 - 33 kPa Bestimmtheitsmaße von $r^2 = 0,5$ für die Korrelation von tangentialer Krümmung und Bodenfeuchte und geringere Maße für Vertikalkrümmung und Neigung bzw. andere Saugspannungsbereiche.

Pennock et al. (2001) untersuchten den Einfluss der Hangposition auf den Ertrag bei unterschiedlichen Düngergaben mit einem 10 m-Raster-DGM für drei verschiedene Wachstumsperioden. Dazu grenzten sie „*Landform Element Complexes*“ mit den Werten der Vertikalkrümmung ab (konvexe Hangschulter, konkaver Unterhang, linearer Übergangsbereich). Sie konnten nachweisen, dass in feuchten Jahren die lateralen Prozesse die Verteilung des Bodenwassers stark beeinflussen, in einem Trockenjahr jedoch geringere Bodenfeuchteunterschiede in den „*Landform Elements*“ auftauchen. Die geringsten Standardabweichungen von Bodenfeuchte und Stickstoffgehalt zeigten die konvexen Formen, die in feuchten wie trockenen Jahren auch den geringsten Ertrag erzielten. Die Ertragshöhe korrelierte mit der Bodenfeuchte vor der Frühjahrsbestellung und war in konkaven Reliefformen am höchsten, erreichte teils sogar die dreifache Höhe im Vergleich zum Mittel der konvexen Formen. Pennock et al. (2001) fanden keine signifikante Korrelation des Ertrags mit dem Stickstoffgehalt des Bodens vor Aussaat und empfehlen als Werkzeug zur Planung der N-Düngung die Bodenfeuchte zur Aussaat bei der Frühjahrsbestellung.

Leser (1991) nennt als zentrales methodisches Problem der landschaftsökologischen Feldforschung die Übertragung von Messungen an Punkten in der Fläche auf die Fläche und unterteilt die Problematik von Geodaten in die Exaktheitsproblematik, Maßstabsproblematik und Verknüpfungsproblematik. Auf Grund der Komplexität sei eine Exaktheit im strengen Sinne nicht möglich. In der vorliegenden Arbeit steht weniger die Frage nach naturwissenschaftlicher Exaktheit als die Frage nach Übertragbarkeit in die Fläche im Vordergrund. „Exaktheit“ ist bei der Erstellung der DGMs notwendig, die Verknüpfung mit realen Geodaten erfordert dagegen „Mut zur Unschärfe“, um nicht eine Exaktheit zu suggerieren, die zwar mit dem GIS dargestellt werden kann, aber nicht der realen Heterogenität und Mikrovarianz der Standorteigenschaften entspricht. Dies gilt für die erfassten Messdaten bodenkundlicher Merkmale, den Zielmaßstab der Aussage (z. B. Steuerungsgenauigkeit der Landmaschinen) und, bezogen auf den Maßstab, die DGMs. DGMs werden leider oft verwendet, weil sie vorhanden sind, auch wenn ihr (Erfassungs-) Maßstab nicht für die Fragestellung geeignet ist. In der vorliegenden Arbeit wurde die Maßstabsproblematik von der möglichen Arbeitsgenauigkeit der Landmaschinen aus betrachtet und auf die Kompatibilität der erfassten Daten innerhalb dieses Maßstabes geachtet. Blöschl (1996) präsentierte ein Konzept für Raum-Zeit-Skalen in der bodenhydrologischen Forschung. Charakteristische Zeit- und Längenskalen für Messungen, Modell und Realität sollen auch hier fragestellungsbezogen erarbeitet werden. Landwirtschaftliche Fragestellungen wurden bisher überwiegend auf lokaler Skale betrachtet, meist auf die eindimensionalen vertikalen Prozesse der Wasserbewegung beschränkt. Auf der „*Hillslope*“-Skale werden zusätzlich zweidimensionale Abflussmechanismen betrachtet, auf Einzugsgebietsebene („*Catchment Scale*“) ist mit Hilfe von DGMs auch die Divergenz und Konvergenz der Wasserbewegung von Bedeutung. Die zeitliche Skale erweitert sich bei dieser Betrachtung von der „*Event*“-Skale (z. B. ein Regenereignis) bis zur saisonalen Skale, die den Jahresverlauf der nachgebildeten Prozesse zu berücksichtigen hat. In der vorliegenden Arbeit wurden Daten für charakteristische Längen von 2 - 250 m und 1 - 30 Tage untersucht. Verschiedene Maßstäbe wurden durch verschiedene Datenquellen mit unterschiedlich hohen Auflösungen berücksichtigt (Kapitel 4.5, 5.2 und 6.1).

Viele publizierte Modelle, die z. B. Stoffflüsse in der Landschaft beschreiben, basieren auf stark vereinfachenden Annahmen, erklären oft nur die Bedingungen des jeweiligen Untersuchungsgebietes und sind auf intensive Messkampagnen zur Kalibrierung angewiesen. Zahlreiche solcher Modelle wurden in der vergangenen Dekade für einen Maßstabsbereich kleiner als 1:10.000 (z. B. Reiche, 1991) entwickelt. Ein komplexes Modell, das viele Eingangsparameter benötigt, ist speziell in der Landwirtschaft von Nachteil, da die Bereitstellung der Parameter den größten Kostenpunkt bedeutet.

1.2 Ziele und Aufbau der Arbeit

In dieser Arbeit sollen Methoden der DGM-Erfassung und Reliefanalyse untersucht und verbessert werden, um Nutzern eines landwirtschaftlichen GIS eine Datenebene für raumbezogene Managemententscheidungen zu bieten. Dazu ist eine Definition der notwendigen Qualität von Erfassung, Generierung und Analyse des DGM erforderlich. Weiterhin sollen Anwendungsfelder aufgezeigt und gezielt Methoden für diese Anwendungen entwickelt werden.

Das Verhalten von abfließendem Wasser auf einer komplexen Oberfläche bildet den theoretischen Kern der Arbeit. Die räumliche Verteilung dieses Phänomens ist aus einem DGM ableitbar, jedoch nur als idealisierter Wasserabfluss ohne Einfluss der Bodenvariabilität. Um diese Einschränkung aufzuweichen, wurden bestehende Modelle neu bewertet und Methoden entwickelt, die bei niedrigem Aufwand der Datenerfassung das räumliche Muster der vertikalen Wasserverluste berücksichtigen. Die Arbeit soll das Verständnis des Reliefeinflusses auf den Bodenwasserhaushalt landwirtschaftlicher Flächen verbessern. Die bisher publizierte Anwendung von DGMs im agrartechnischen Bereich beschränkte sich zumeist auf die visuelle Interpretation und Korrelationsanalysen von Reliefparametern und Korntrug. Die visuelle Interpretation gestattet zwar oft ein Erkennen von lehrbuchhaft ausgebildeten Phänomenen, wie z. B. Erosionsrinnen, eine signifikante Korrelation mit flächenhaften Messdaten wurde jedoch selten nachgewiesen. Die Wechselwirkungen zwischen Georelief und Pflanze sind sehr komplex und der Landwirt sorgt durch die Bewirtschaftung, speziell die teilflächenspezifische, für neue Variabilitäten, die eine Validierung der ausschließlich reliefbedingten Aussagen auf Basis von Ertragsdaten in der Praxis unmöglich werden lässt. Zudem hat das Georelief bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen und zu unterschiedlichen Wachstumsphasen der Pflanzen einen teils gegenläufigen Einfluss.

Die Arbeit gliedert sich in die Kapitel DGM-Erstellung, Reliefanalyse, Verknüpfung von DGM und Boden sowie die Anwendung in der Landwirtschaft. Einleitend steht ein Überblick zur Einbettung der Arbeit in das Konzept „Precision Agriculture“ und das Verbundprojekt *preagro* (Managementsystem für den ortsspezifischen Pflanzenbau)¹. Daraus ergaben sich Qualitätsmerkmale für DGMs und einzelne Anwendungsfelder der landwirtschaftlichen DGM-Analyse. Die Anwendungsmöglichkeiten wurden für eine große Anzahl an Projektschlägen untersucht und in dieser Arbeit für einen repräsentativen Querschnitt dargestellt. Der große Wert für die Einführung in die landwirtschaftliche Praxis besteht in der hohen Anzahl an Testflächen und der fachlichen Breite der Anwender innerhalb von *preagro*.

In der vorliegenden Arbeit wird folglich vor allem die Auswertung leicht verfügbarer Flächendaten mit Schwerpunkt auf der prozesssteuernden Funktion des Georeliefs untersucht und für Praxisversuche als Potenzialkarten bereitgestellt. Die wesentliche Neuerung dieser Arbeit besteht in der praxistauglichen Umsetzung einer Methodik zur Erfassung und Analyse von DGMs im Zielmaßstab 1:5.000 und größer bei einer Zielqualität der Höhe von $\pm 0,1$ m. Dies ist erst in den letzten Jahren durch neue Technologien in der DGM-Erfassung wie RTK-GPS und flugzeuggestütztes Laserscanning ermöglicht worden. Die speziellen landwirtschaftlichen Bedingungen erschwerten die Untersuchung in vielen Teilen (die Befahrbarkeit der Flächen zur Datenerfassung muss gegeben sein; die Bewirtschaftung verhindert ein „sauberes“ Messen von Daten zur Modellvalidierung), sorgten aber auch für die Gültigkeit vereinfachender Randbedingungen (keine Unstetigkeiten durch Geländekanten im DGM, homogene Nutzung auf einem Untersuchungsschlag).

Als experimentelle Grundlage wurden im Rahmen dieser Arbeit 1250 ha auf 54 Schlägen in 8 verschiedenen Regionen Deutschlands vermessen und untersucht, um die große Variabilität an Standort- und Betriebsbedingungen berücksichtigen zu können. Sämtliche Schritte der DGM-Analyse von der Planung der Datenerfassung bis hin zur Umsetzung der Erkenntnisse in GIS-Module für die Praxis wurden somit in dieser Arbeit durchgeführt.

¹ <http://www.preagro.de>

2 Untersuchungsrahmen

2.1 Das Konzept „Precision Agriculture“ (PA)

„Precision Agriculture“ (PA) wird seit Anfang der 1990er Jahre entwickelt und wurde bekannt als Precision Farming, site-specific management, variable rate application oder teil-schlagspezifische Bewirtschaftung. PA zielt darauf, mit pflanzenbaulichen Maßnahmen standortspezifische Unterschiede der Pflanzenentwicklung zu berücksichtigen, um den Boden optimal und nachhaltig zu nutzen. Mehrjährige Ertragskartierungen, die nach und nach verfügbar werden, galten bis vor wenigen Jahren als Schlüssel zum Verständnis des Standortes. Derzeit zeigt sich auf vielen Schlägen ein teils jährlich wechselndes Muster, das stark von der Witterung bzw. Unterschieden bei der Bewirtschaftung abhängt (Grenzdörffer und Gebbers, 2001). In trockenen Gebieten Deutschlands ist der Bodenwassergehalt ein limitierender Faktor für das Pflanzenwachstum. Die Korrelation zwischen Bodenwassergehalt und Ertrag steigt im Laufe der Vegetationsperiode, wozu der steigende Wasserbedarf der Pflanzen beiträgt (Diekkrüger et al., 1996; Kuhn, 1998).

Zu Beginn von PA stand die Variation der Düngermenge nach dem Muster der Ertragskarten, also dem Stickstoff-Entzug durch die Pflanze, im Vordergrund. Die wesentliche Voraussetzung war das Global Positioning System (GPS), mit dem Positionen auf dem Feld ermittelt werden können. PA gewann mit sinkenden Kosten der GPS-Empfänger und der Sensoren zur Datenerfassung auf dem Feld an Bedeutung. In einem Kreislaufkonzept stehen Datenerfassung, Datenverarbeitung im GIS, die Erstellung sogenannter Applikationskarten zur Steuerung der Landmaschinen, Bonituren im Feld, Fernerkundungsdaten und Ertragskarten.

Bisher galt ein „Schlag“ als die kleinste einheitlich bewirtschaftete Fläche. Die Schlaggrenze richtet sich oft nach historischen Eigentumsgrenzen. Durch den Einsatz von GPS-Empfängern ist eine variable Bewirtschaftung kleinerer Teilflächen möglich, die bei kleinen Gewinnen in Süddeutschland auch zu einem virtuellen „Zusammenlegen“ der Flächen verschiedener Landwirte führen kann (Auernhammer und Rothmund, 2002). Grubber, Drillmaschinen, Dünger- und Herbizidspritzen können auf Standortunterschiede spezifisch reagieren und die Applikationsmenge/-tiefe an die lokalen Bodenverhältnisse anpassen. Ziel von PA ist ein ressourcenschonender Einsatz an Dünger, Pflanzenschutzmitteln und Saatgut durch ein effizientes, an kleinräumige Bodenunterschiede angepasstes Wirtschaften. Dies ermöglicht dem Landwirt Einsparungen an Betriebsmitteln und verringert den Austrag an Schadstoffen in das Grundwasser. Nach Angaben des Bundesumweltministeriums¹ (Stand 1996) stammen 50 - 55 % der diffusen Nitrat-Einträge und 40 - 45 % der diffusen Phosphat-Einträge in das Grundwasser aus der Landwirtschaft. Die Bedeutung von Einsparungen an Betriebsmitteln und damit verringerten Einträgen in die Umwelt durch eine gezielte Bewirtschaftung zeigt sich durch den hohen Anteil landwirtschaftlicher Nutzfläche in der Bundesrepublik. Im Jahre 1999 nutzten 429.000 Betriebe 117.970 km² Ackerland². Dies sind 33 % der Landesfläche.

Gefordert wird eine ressourcenschonende Bewirtschaftung sowohl durch das Bundesnaturschutzgesetz (*Ausgabe 30.4. 1998, § 2 (1): „Die Naturgüter sind, soweit sie sich nicht erneuern, sparsam zu nutzen; der Verbrauch der sich erneuernden Naturgüter ist so zu steuern, daß sie nachhaltig zur Verfügung stehen. Boden ist zu erhalten; ein Verlust seiner natürlichen Fruchtbarkeit ist zu vermeiden.“*) als auch durch das Bundesbodenschutzgesetz.

Daraus ist der Auftrag an die landwirtschaftlichen Betriebe ableitbar, die Bewirtschaftung im Sinne der Vorsorgepflicht stärker an die standortspezifischen Gegebenheiten anzupassen.

Dies ist umso sinnvoller, da rückläufige Verkaufserlöse und Überproduktion zu Schlagworten in der Landwirtschaftspolitik geworden sind. Der Aspekt der Kosteneinsparung ist wichtiger als den Ertrag mit immer mehr Aufwand zu steigern.

¹ <http://www.bmu.de> (16.12.2001)

² <http://www.destatis.de/basis/d/umw/ugrtab7.htm> (16.12.2001)

2.2 Das Verbundprojekt *preagro*

Die Praxistauglichkeit von PA wurde durch das Verbundprojekt *preagro* (gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung) im Hinblick auf ökonomische und ökologische Wirkungen untersucht und durch Entwicklungsarbeiten erweitert (Werner, 2002). Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des Teilprojektes „Relief“ in interdisziplinärer Zusammenarbeit mit Landwirten und Projektpartnern, die weitere Standortfaktoren erhoben bzw. Module zur Erstellung der Applikationskarten entwickelten (z. B. Wenkel et al., 2001; Roth und Kühn, 2002; Sommer und Voßhenrich, 2002). Das größte Manko bei PA ist derzeit der geringe Kenntnisstand über die quantitative Auswirkung der einzelnen Standortfaktoren auf die Ertragsbildung. Viele PA-Eingangsdaten weisen zudem gravierende Mängel auf. Ertragskarten sind einerseits oft fehlerbehaftet, andererseits variiert das Ertragsmuster je nach Witterungsbedingungen, Feldfrucht, Ungenauigkeiten bei der Bewirtschaftung und Verunkrautung von Jahr zu Jahr. So fanden Grenzdörffer und Gebbers (2001) lediglich Bestimmtheitsmaße von $r^2 = 0,24 - 0,61$ bei einer siebenjährigen Reihe von normalisierten Relativkarten des Ertrages im Vergleich zum mehrjährigen Mittel. Bodenkarten sind in vielen Fällen zu grob erfasst (Reichsbodenschätzung) oder unter hohem Kostenaufwand neu zu erstellen. Fernerkundungsdaten sind ebenfalls kostenintensiv und zeigen nur Symptome, die im Hinblick auf zugrunde liegende Prozesse schwer zu interpretieren sind. Das Georelief als wichtiger Regler natürlicher Prozesse bietet ein statisches Datum, das bei geringem Erfassungsaufwand zur Erklärung der Standortheterogenität, unabhängig von dynamischen Einflüssen, beitragen kann. In der vorliegenden Arbeit galt es, die Relieffanalyse in das PA-Gesamtkonzept einzuordnen, um die Qualität sämtlicher Datenebenen durch die Berücksichtigung der vom Georelief gesteuerten Prozesse zu verbessern. Die Arbeitsmaßstäbe des Praktikers entscheiden dabei, wie differenziert die Ergebnisaussage zu sein hat. Die Präzision der jeweiligen Maßnahme hängt ab von der Fahrgeschwindigkeit und der Zeitspanne, die eine Landmaschine zur Regelung ihrer Arbeitsgröße benötigt (z. B. Streu- bzw. Spritzleistung). Quer zur Fahrtrichtung hängt die Präzision von der sogenannten Arbeitsbreite der Maschine ab, die je nach eingesetztem Typ zwischen 6 und 24 m schwankt. Bei einer Regelstrecke der Streu- und Spritzgeräte bis zu 10 m lohnt sich eine Änderung der Applikationsmenge erst ab Mindestflächen von 100 bis 400 m². Somit ist bei den üblichen Schlaggrößen der Detaillierungsgrad einer Karte im Maßstab 1:5.000 ausreichend. Die Relieffauswertung hat folglich auf Heterogenitäten in diesem Maßstab hinzuwirken. In dieser Arbeit wird die dafür notwendige DGM-Qualität abgeleitet. Der Arbeitsmaßstab liegt nach Leser (1991) noch im Bereich der topischen Dimension, von den zu untersuchenden Prozessen her aber bereits in der chorischen Dimension. Die Dimension ist hierbei ein Maßstabsbereich, in dem gleiche inhaltliche Aussagen möglich sind und gleiche methodische Ziele verfolgt werden können. Betrachtet wird vorwiegend das Ökotoptopgefüge. Hier stehen laterale Prozesse im Vordergrund, während in der topischen Dimension die messtechnische Erfassung vor allem der vertikalen Prozesse Niederschlag, Evapotranspiration und Versickerung möglich ist. In der chorischen Dimension ist nach Leser (1991) die Schätzung die wichtigste Methode zur Datenerfassung. Bezogen auf die Erfassung und Analyse des Georeliefs für die Anwendung im PA bedeutet dies, dass DGMs die Schnittstelle bilden zwischen gemessener Punktaussage (z. B. bodenkundliche Untersuchungen in der topischen Dimension) und einer Raumaussage unter Berücksichtigung lateraler Prozesse. Die vom Georelief gesteuerten lateralen Prozesse beziehen sich auf oberflächliche und oberflächennahe Wasser- und Stofftransporte und erlauben eine Strukturierung der Agro-Ökosysteme. Zum Verständnis des Systems sind allerdings auch die Kenntnis von Bewirtschaftungsmaßnahmen und zeitlicher Dynamik unabdingbar. Die Bewirtschaftungsmaßnahmen, besonders die bereits teilflächenspezifisch ausgeführten, sorgen für eine Heterogenität der abiotischen und biotischen Partialkomplexe, die eine Überprüfung von Auswirkungen der standortangepassten Maßnahmen zu einem komplexen methodischen Problem werden lassen,

das nicht Gegenstand dieser Arbeit ist. Die Maßnahmen wirken sich indirekt auf die DGM-Analyse in Bezug auf Kornerträge und damit die ökonomische Bewertung unter den im Projekt *preagro* gewollten Feldbedingungen aus: jegliche Validierungsansätze können nur mit „gestörten“ Daten durchgeführt werden. Einzelmessungen geoökologischer Größen, statistisch gesicherte Vergleiche mit anderen, flächendeckend erhobenen Daten, Einschätzungen der Praktiker und Ableitungen aus dem in den Geowissenschaften viel zitierten „Expertenwissen“ sollen zur Bewertung der in dieser Arbeit vorgestellten Methodik dienen.

Die Bedeutung des Georeliefs für das Pflanzenwachstum wird in vielen Untersuchungen qualitativ beschrieben, aber selten mit „harten Daten“ belegt. In der vorliegenden Arbeit wird mit dem DGM ein statischer Faktor präsentiert und versucht, eine quantitative Größe auf Basis der Muster in der Landschaft für Anwender von Modellen bereitzustellen. Die Idee „*relate pattern to process*“ wurde seit Beginn der 1990er Jahre vor allem in Australien vorangetrieben (Moore et al., 1991). Die Ausprägung von landschaftsökologischen Merkmalen, wie z. B. der Bodenfeuchte, wird durch Prozesse bestimmt, die auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen operieren (O'Neill, 1989; Moore et al., 1993b). Die sich überlagernden Prozesse führen zur Heterogenität der Landschaft und bilden charakteristische Anordnungen in der chorischen Dimension. Diese spezifische Anordnung von Größen einer Variablen wird als Muster (*engl. pattern*) bezeichnet und in dieser Arbeit auf den Praxisschlägen untersucht.

2.3 Untersuchungsgebiete

Die Erstellung und Auswertung von DGMs wurde für 54 Schläge des Verbundprojektes *preagro* durchgeführt. Diese Schläge gewähren einen guten Überblick der Variabilität der Standortverhältnisse im Getreideanbau (Abb. 2-1). Untersuchungsschwerpunkte lagen an den Standorten Kassow und Baasdorf. In Kassow wurden Erfassungsmethoden getestet und mit Bodenfeuchtemessungen verglichen, während Wulfen als Standort ausgeprägter Sommertrockenheit und großer Hanglänge gewählt wurde, um Bodenfeuchtedaten mit hoher zeitlicher Auflösung mit dem Relief in Beziehung zu setzen. Zusätzlich wurden auf weiteren Standorten Fragestellungen zur Eignung von DGMs der Landesvermessung, zum Zusammenwirken von Reliefparametern mit Kartierungen der elektrischen Leitfähigkeit untersucht. Tab. 2-1 bietet eine Übersicht der Schläge. Die folgenden Abbildungen der 1 m-Höhenlinien basieren auf den RTK-GPS-Vermessungen. Eine Beschriftung der Höhenlinien erfolgte nicht, da nur die Komplexität der Schläge im Vergleich dargestellt werden soll. Hangrichtungen und Struktur sind den Blockbild-Darstellungen (Kap. 4.5) zu entnehmen.

2.3.1 Kassow (Mecklenburg-Vorpommern, 12°04' E; 53°52' N)

Der Betrieb Kassow liegt etwa 30 km südlich der Hansestadt Rostock. Kassow zählt naturräumlich nach Hurtig (1957) zum Mittleren Warnowland mit dem Bützower Becken in der Großlandschaft „Rückland der Seenplatte“. Die Untersuchungsschläge befinden sich am Rand des Warnowtals auf der welligen, mit Geschiebelehm bedeckten Grundmoränenplatte. Charakteristisch sind leicht bis stark wellige und teils kuppige Formen bis 18° Hangneigung.



Abbildung 2-1: Lage der Untersuchungsgebiete

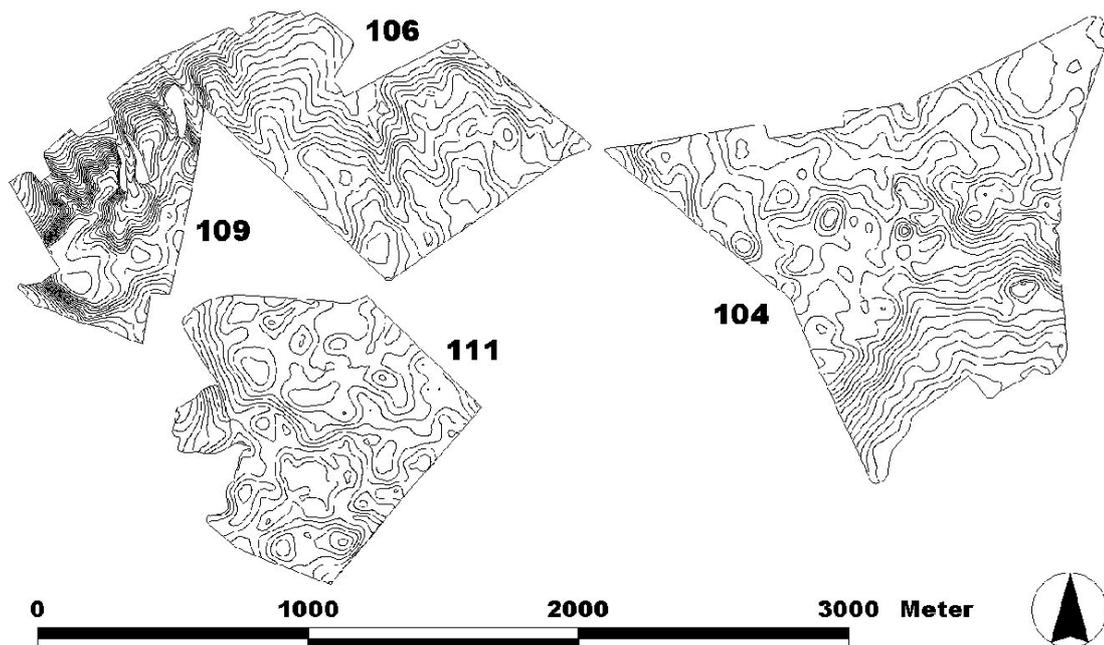


Abbildung 2-2: Projektschläge in Kassow. Darstellung der 1 m-Höhenlinien

Vom Ufer der Warnow, das bei Kassow nur einen Meter über dem Meeresspiegel liegt, steigt das Untersuchungsgebiet bis auf 48 m über HN an (Abb. 2-2).

Der mittlere, langjährige Jahresniederschlag beträgt 530 mm. Bodenkundlich zählt die Region zur Bodengroßlandschaft der Grundmoränenplatten und lehmigen Endmoränen im Jungmoränengebiet Norddeutschlands (AG Bodenkunde, 1994). Die dominierenden Oberflächenformen und Ablagerungen, die den Untergrund der Region bilden, sind von eiszeitlichen Prozessen bestimmt. Subglaziale Strömungen führten zu Feinsand-Sedimenten im ansonsten von Geschiebelehm und Vermoorungen geprägten Gebiet. In den zahlreichen abflusslosen Senken befinden sich Kolluvien, an kuppigen Oberhängen meist ausgewaschenes, grobkörniges Substrat. Als Leitböden sind Parabraunerde, Pseudogley, Braunerde und Niedermoor zu nennen. Der Untersuchungsschlag 104 umfasst auf 142 ha fast vollständig ein eigenes Einzugsgebiet. Schlag 111 besteht aus gestreckt-wellenförmigen und kuppigen Teilschlägen. Hier wurde eine Bodenfeuchte-Monitorstrecke angelegt, die einen Schnitt durch die typischen Reliefformen bildet. Schlag 106 und 109 sind Nord-West-Hanglagen mit deutlich sichtbaren Erosionsrinnen am Steilabfall zur Warnow.

2.3.2 Baasdorf/Wulfen (Sachsen-Anhalt, 11°55' E; 51°49' N)

Der Standort Baasdorf (Betrieb Wulfen) befindet sich 100 km südöstlich des Harzes im Naturraum „Köthener Ebene“, dem einheitlichsten Gebiet der Schwarzerdelandschaft (Meynen et al., 1962). Die Böden sind von Lößablagerungen über Geschiebemergel und Sanden dominiert. Der mittlere Jahresniederschlag beträgt 450 mm, die Geländehöhe 52 - 107 m über HN. Der Untersuchungsschlag 631/641 besteht aus sehr heterogenen Löß-Böden mit sandigem bis tonigem Lehm. Die Leitböden sind Tschernosem, Parabraunerde und Pararendzina. Das Gelände fällt von einem 86 m hoch gelegenen ehemaligen Weinberg auf kurzer Strecke steil

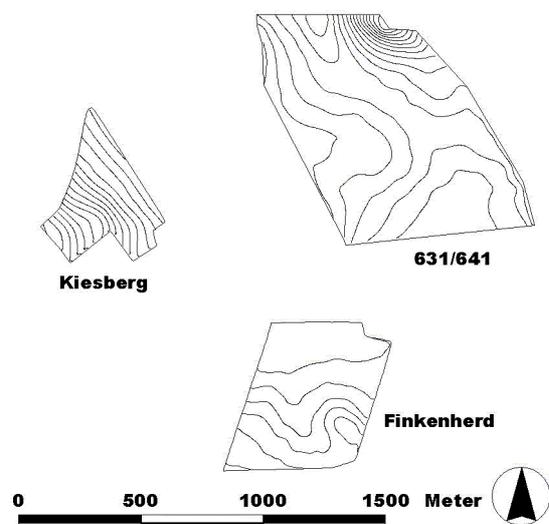


Abbildung 2-3: Projektschläge in Baasdorf (Wulfen). Darstellung der 1 m-Höhenlinien. Der Schlag Kiesberg wurde zur besseren Visualisierung um 4,3 km nach Süden verschoben.

und auf der überwiegenden Schlagfläche sanft von Nord nach Süd bis auf 70 m HN ab. Südlich daran schließt sich der Schlag "Finkenherd" an. Der Schlag "Kiesberg" befindet sich an einem gestreckten Nord-Osthang (Abb. 2-3).

2.3.3 Groß-Twülpstedt (Niedersachsen, 10°57' E; 52°27' N)

Der in etwa 100 m ü. NN gelegene Standort Groß-Twülpstedt (GTW) zählt naturräumlich zum ostbraunschweigischen Flachland. Älterer Untergrund mit Tonen, Mergeln, Kalk- und Sandsteinen bricht zur Oberfläche durch und sorgt für einen hügeligen Charakter. Der Naturraum stellt nach Meynen et al. (1962) ein Übergangsgebiet vom Aller-Urstromtal zur Lößgrenze im Süden dar. Schwere kalkige und tonige Böden sowie kleinflächige Sand- und Kiesböden auf den Hochflächen dominieren die Bodenlandschaft, die zum Altmoränengebiet zählt (AG Bodenkunde, 1994). Der mittlere Jahresniederschlag beträgt 600 mm. Die Schläge sind mit 6 - 20 ha deutlich kleinparzellierter als in Kassow und Baasdorf (Abb. 2-4)

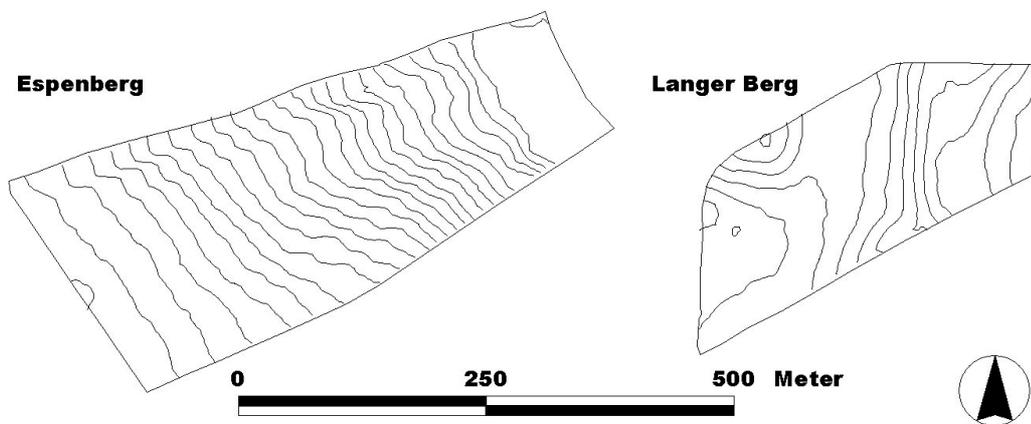


Abbildung 2-4: Projektschläge in GTW. Darstellung der 1m-Höhenlinien. Der Schlag Espenberg wurde zur besseren Darstellung um 2,3 km nach Süden verschoben.

2.3.4 Thumby (Schleswig-Holstein, 9°56' E; 54°34' N)

Der Betrieb in Thumby gehört zum Naturraum Schwansen, Dänischer Wohld und Amt Hütten. Die Schlagflächen des Gutsbesitzes liegen südlich der Schlei in Ostseennähe in 0 - 33 m NN (Abb. 2-5). Die sehr heterogene Oberfläche wurde, ebenso wie in Kassow, während der Weichseleiszeit geformt. Die Niederschlagsmenge ist mit 880 mm jedoch deutlich höher. Die Böden bestehen überwiegend aus lehmigen Ablagerungen. Vor Stillstandslagen der weichselzeitlichen Eiszungen sind durch Sandüberdeckung oft leichte Böden zu finden. Typisch für die Böden im Bereich des Betriebes ist ein sehr geringer Unterschied im Tongehalt (Herbst, pers. Mitt.).

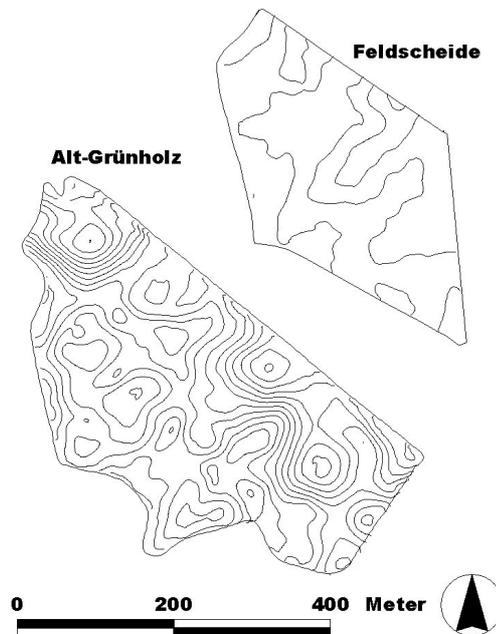


Abbildung 2-5: Projektschläge in Thumby. Darstellung der 1 m-Höhenlinien. Der Schlag Feldscheide wurde zur besseren Visualisierung um 2,3 km nach Westen und 0,9 km nach Süden verschoben.

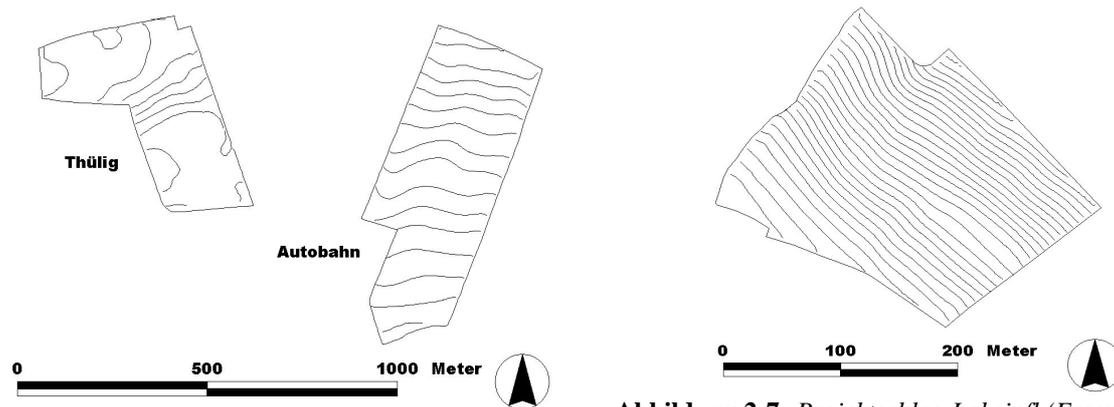


Abbildung 2-6: Projektschläge in Raesfeld (Beckum). Darstellung der 1 m-Höhenlinien.

Abbildung 2-7: Projektschlag Lohzipfl (Essenbach). Darstellung der 1 m-Höhenlinien.

2.3.5 Raesfeld/Beckum (Nordrhein-Westfalen, 8°00' E; 51°45' N)

Am Standort Raesfeld wurde der Betrieb Beckum im Ostteil des Kernmünsterlandes (Westfälische Bucht) untersucht. Der Bereich der Beckumer Berge, der in der Bodenregion der Altmoränenlandschaften liegt (AG Bodenkunde, 1994), ist eine Schichtstufenlandschaft mit mehreren steilen Stufen. Auf dem vorherrschenden Kalkmergel mit Hochflächencharakter haben sich überwiegend lehmig-tonige Pararendzinen entwickelt. Typisch für das 88 - 106 m hoch liegende Gebiet ist der atlantische Klimaeinfluss mit einem durchschnittlichen Jahresniederschlag von 750 mm.

2.3.6 Landshut/Essenbach (Bayern, 12°13' E; 48°38' N)

Der Betrieb in Essenbach bei Landshut befindet sich am Übergang des 100 m tief eingesenkten unteren Isartals zum Donau-Isar-Hügelland. Sanft geschwungene Hügelzüge mit engmaschigem Talnetz charakterisieren diesen Teil des Tertiärhügellands. An den Hängen treten oft lößbedeckte Terrassen auf. Tonig-mergelige Schichten dominieren den Untergrund. Der durchschnittliche Jahresniederschlag beträgt 800 mm. Der nur 6 ha große Untersuchungsschlag Lohzipfl liegt zwischen 435 und 465 m über NN an einem 7° geneigten Nord-Osthang.

Tabelle 2-1: Untersuchungsschläge im Überblick. s = Standardabweichung

| Schlag | Größe [ha] | Standort (Betrieb) | Niederschlag [mm] | Spannweite Geländehöhe [m] | Mittl. Neigung [°]; (s) |
|--------------------|------------|----------------------|-------------------|----------------------------|-------------------------|
| 104 | 141,7 | Kassow | 534 ¹ | 25,6 | 1,9 (1,2) |
| 106 | 78,0 | Kassow | 534 ¹ | 25,2 | 2,2 (1,2) |
| 109 | 45,5 | Kassow | 534 ¹ | 26,6 | 4,5 (2,9) |
| 111, Teilschl. 2+3 | 77,6 | Kassow | 534 ¹ | 17,6 | 1,9 (1,9) |
| Autobahn | 20,3 | Raesfeld (Beckum) | 750 ² | 15,4 | 1,1 (0,3) |
| Thülig | 15,3 | Raesfeld (Beckum) | 750 ² | 7,6 | 0,8 (0,7) |
| Kiesberg | 23,8 | Baasdorf (Wulfen) | 450 ² | 17,8 | 1,7 (0,7) |
| 631/641 | 121,4 | Baasdorf (Wulfen) | 450 ² | 15,4 | 0,7 (0,7) |
| Finkenherd | 45,1 | Baasdorf (Wulfen) | 450 ² | 6,4 | 0,6 (0,3) |
| Langer Berg | 6,7 | Groß-Twülpstedt | 600 ² | 11,5 | 2,3 (1,4) |
| Espenberg | 9,9 | Groß-Twülpstedt | 600 ² | 26,4 | 2,8 (1,5) |
| Lohzipfl | 6,4 | Landshut (Essenbach) | 800 ² | 30,3 | 6,5 (1,8) |
| Alt-Grünholz | 40,6 | Thumby | 880 ² | 11,2 | 2,7 (1,4) |
| Feldscheide | 22,8 | Thumby | 880 ² | 5,1 | 0,8 (0,5) |

¹ Station Gülzow

² Wetterstationen des Informationssystems Premis, www.preagro.de

3 Erstellung von hochgenauen Digitalen Geländemodellen

3.1 Grundlagen der Digitalen Geländemodelle (DGMs)

3.1.1 Begriffe im DGM-Umfeld

Digitale Geländemodelle (DGMs) werden seit über 40 Jahren in Forschung und Anwendung als digitales Abbild der Erdoberfläche verwendet. Seit der erstmaligen Bezeichnung als *digital terrain model* durch Miller und Laflamme (1958) bei der Trassenprojektierung finden DGMs in zahlreichen Aufgabengebieten Anwendung. Durch die Verfügbarkeit von DGMs hoher Auflösung und steigender Qualität wurden im vergangenen Jahrzehnt in verschiedenen Fachgebieten unterschiedliche Begriffe und Kategorien zum Thema DGM etabliert. Je nach Anwendungsfeld sind verschiedene Oberflächen von Bedeutung. In vielen Fällen ist zu trennen zwischen der Geländeoberfläche (dem Übergang vom Medium Boden zur Atmosphäre, also dem Georelief im eigentlichen Sinne) und der darüber liegenden Oberfläche der Vegetation bzw. der Bebauung. Daneben kann das Konzept des Digitalen Höhenmodells (DHM) auch auf andere raumbezogene Fragestellungen übertragen werden, z. B. Temperaturverteilungen, Kostenoberflächen oder Wahrscheinlichkeitsoberflächen. Für Geländemodelle, die auch die Oberfläche von Bebauung und Vegetation einschließen, ist der Begriff „Digitales Oberflächenmodell“ (DOM) gebräuchlich.

Bill (1999b) definiert ein Digitales Höhenmodell (DHM) als „...die Menge der digital gespeicherten Höhenwerte, die als Funktion der Lage der Punkte die Höhenstruktur des Objektes hinreichend repräsentieren“, wohingegen das DGM „...die digitale Speicherung sämtlicher Information über die Geländeoberfläche“ enthält, d.h. zusätzlich zum DHM die Information über Grundrisselemente mit bestimmten Grundrissinformationen, die in einem Digitalen Situationsmodell (DSM) separat gehalten werden können. Nach DIN 18709-1 ist ein DGM der „Datenbestand zur höhenmäßigen Beschreibung des Geländes. Es besteht aus Höhenpunkten des DHM und ergänzenden Angaben (Geländekanten, markante Höhenpunkte)“. In der DIN wird das DSM nicht als Bestandteil des DGM gesehen, sondern mit diesem zu einem weiteren Begriff zusammengefasst, dem Digitalen Landschaftsmodell (DLM) als „Datenbestand zur Grundriss- und höhenmäßigen Beschreibung des Geländes“.

Köthe (2000) bezeichnet das DHM simpel als „digital gespeicherte x,y,z-Werte einer Oberfläche“ und das DGM als spezielles DHM, welches die Erdoberfläche repräsentiert.

Bauer, Rohdenburg und Bork (1985) definierten ein „Digitales Reliefmodell“ (DRM) als DHM, das als zusätzliche Attribute die hydrologisch wichtigen Reliefparameter Neigung, Exposition, Vertikal- und Horizontalkrümmung (lokale Nachbarschaft) und relative Hangposition, relative Entfernung zu Tiefenlinie/Vorfluter und Wasserscheide (globale Nachbarschaft) enthält. Bei den Landesvermessungsämtern tritt ebenfalls unterschiedliche Verwendung der Begriffe auf. Im Saarland ist das DGM das DHM mit Strukturinformation, in anderen Ländern wird zwischen Gelände- (DGM) und Vegetationsoberfläche (DHM) differenziert, in Rheinland-Pfalz zusätzlich der Begriff Digitales Geländehöhenmodell verwendet.

Leser (1991) begreift ein DGM als unabdingbares Instrument, um Punktmessungen ökologischer Funktionsmerkmale in den Raum zu übertragen. Aus geoökologischer Sicht ist das DGM also eine computergestützte Reliefdarstellung, welche die Regelfunktion des Georeliefs widerspiegelt. Leser (1991) fordert die Integration dieser Regelungsfunktion, die sich auf Intensität und räumliches Verbreitungsmuster von Prozessen auswirkt, in ein dreidimensionales GIS. Ein GIS wird von Bill (1999a) definiert als „rechnergestütztes System, das aus Hardware, Software, Daten und den Anwendungen besteht. Mit ihm können raumbezogene Daten digital erfasst und redigiert, gespeichert und reorganisiert, modelliert und analysiert sowie alphanumerisch und graphisch präsentiert werden“.

Mit Hilfe eines GIS können verschiedene raumbezogene Datenebenen in einem einheitlichen Bezugssystem integriert und komplex analysiert werden, um neue Informationen aus den Da-

tenbeständen abzuleiten. Die Höheninformation wird ebenso wie andere Sachdaten (Boden- und Pflanzenparameter) als Funktion der Lage $z = f(x,y)$ betrachtet. Die Geometriedaten werden als Vektor- oder Rasterdaten verwaltet. Vektordaten bestehen aus Punkten, Linien und Flächen sowie der Beschreibung der Nachbarschaftsbeziehungen (Topologische Beziehungen) zwischen ihnen. Rasterdaten bestehen aus individuellen Pixeln (Picture Elements), die zeilen- und spaltenweise in einer Matrix angeordnet sind. An Stelle des Begriffs Pixel wird bei Rastergeometrien oft der Ausdruck „Zelle“ für den von vier Gitterpunkten eingeschlossenen Bereich verwendet. Die Zelle ist Träger des Attributes, z. B. der Geländehöhe, die als Farbwert (bzw. Graustufe) dargestellt werden kann. Eine Verknüpfung durch geometrische Algorithmen ist leicht möglich, ebenso ein direkter geometrischer Zugriff. Topologische Daten werden nicht explizit gespeichert.

Kraus (2000) teilt Geo-Informationssysteme ein in Landinformationssysteme, Topographische Informationssysteme (TIS) und Geographische IS. Nach dieser Definition stehen in der vorliegenden Arbeit Topographische Informationssysteme im Vordergrund, deren wichtigste Daten als digitale topographische Modelle konzipiert sind. Topographische Modelle sind nach Kraus: „eine Vereinfachung der realen Topographie, die durch Idealisierung und Diskretisierung entstehen und die für eine systematische, EDV-technische Verarbeitung zugänglich gemacht werden“. Derzeit sind die gängigen Systeme nicht als echte dreidimensionale Werkzeuge verfügbar. 3-D-Modelle zeichnen sich dadurch aus, dass x,y und z-Koordinaten gleichwertig sind und eine Volumenmodellierung ermöglichen. Dies lässt sich nur mit zunehmend komplexeren Datenstrukturen realisieren (siehe Kap. 7 für einen Ausblick auf 3-D-Konzepte). In der Forschung werden bereits seit einigen Jahren 3-D-Raster eingesetzt. Aus Pixeln werden hierbei Voxel (Volumenelemente). Die für diese Arbeit erstellten DGMs werden als sogenannte 2,5-D-Modelle (Geländehöhe als Attribut bzw. Funktion der Lageinformation) vorwiegend mit dem Desktop-GIS ArcView verwaltet und analysiert, während die Oberflächen-generierung überwiegend mit dem 3-D-Paket SURFER 7.0 erfolgte. Für landwirtschaftliche Flächen im Sinne der Aufgabenstellung ist dieses Konzept voll ausreichend.

Der Begriff DGM wird in dieser Arbeit somit für Gittermodelle des Georeliefs verwendet, sowohl für Raster (Grids) als auch x,y,z-Punkttriplets. Zur Familie der DGM-Produkte gehören weiterhin die sogenannten „Derivate“, mathematische Ableitungen wie z. B. das Neigungsmodell, das Expositionsmodell und Krümmungsmodelle. Näheres zur Strukturierung und Interpolation findet sich im Kapitel 3.3.2 und zu den DGM-Derivaten in Kapitel 4.2. Die Frage der Maßstabebene dieser Arbeit soll hier im Sinne von Kraus (2000) geklärt werden: TIS besitzen keinen Maßstab, charakterisieren allerdings den Detaillierungsgrad (also auch die geobezogene Genauigkeit). Den Maßstab besitzen dagegen die aus dem TIS abgeleiteten Visualisierungen; sie entsprechen dem Detaillierungsgrad einer topographischen Karte im Maßstab 1:5.000.

3.1.2 DGMs der Landesvermessung

Bei den Landesvermessungsämtern sind DGMs als nach Lage und Höhe georeferenzierte Punktmenge (x,y,z-Koordinaten) in gitterförmiger Anordnung erhältlich. Die Spanne der angebotenen Gitterweiten beginnt meist bei 10 m, für einige Regionen jedoch erst bei 50 m. Die Kosten für den Nutzer schwanken ebenso wie die regionale Qualität und die Bearbeitungsdauer bei Bestellungen. In manchen Ländern ist beispielsweise eine Bestellung per Online-Formular und Kartenblatt-Auswahl möglich, in den meisten per E-Mail unter Angabe der Eckkoordinaten des gewünschten Gebietsausschnitts.

Die Mehrzahl der DGMs der Landesvermessung entstand durch eine Digitalisierung der Orthophotosteuersprofile und/oder der Höhenlinien topographischer Karten oder durch die Stereophotogrammetrie. Das Alter der Datenquelle reicht in die 1970er und 1980er Jahre zurück. Vereinzelt sind für Teilgebiete bereits DGMs auf Basis von Laserscanner-Befliegungen verfügbar.

Im Rahmen des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems ATKIS der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen (AdV)¹ ist der Objektbereich 6000 für das Relief vorgesehen. ATKIS wurde 1985 - 89 konzipiert, um den Inhalt der topographischen Landeskartenwerke 1:25.000 bis 1:1.000.000 basierend auf einem objektbezogenen Datenbestand digital bereitzustellen (Harbeck, 2000). Das ATKIS-Basis-DLM (früher: DLM 25/1) liegt in einer ersten Stufe vor. Das DGM wird dabei allerdings separat vom DSM vorgehalten. Ansätze zu einer integrierten Datenhaltung beschreibt Lenk (2001). Als erstes Bundesland will Baden-Württemberg bis 2005 ein landesweites, homogenes DGM für den Objektbereich 6000 mit der Genauigkeit $\pm 0,5$ m als 5 m Raster in Kacheln von 1 km² auf Basis von Laserscanner-Befliegungen fertigstellen (Schleyer, 2000). 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.

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 in Kapitel 3.2.3 vorgestellt. Tab. 3-1 zeigt die Ergebnisse einer eigenen Umfrage 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 Web-Seiten aktuelle Übersichtskarten des Bearbeitungsstandes, so z. B. Niedersachsen, Saarland und Sachsen.

Tabelle 3-1: Übersicht der Verfügbarkeit des DGM 5 (10 m/12,5m Raster) in den Bundesländern (außer Stadtstaaten). Quelle: Übersicht von www.atkis.de (September 2002) und ergänzende Nachfragen (Juni - September 2002). LS = Laserscanning.

| Land | Stand (% der Landesfläche) | LS-DGM (Erfasst) | LS-DGM (Aufbereitet) | Bemerkung |
|---------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------|---|
| Baden-Württemberg | 7 % | >65 % | 7 % | LS landesweit 1 m (!) bis 2005 |
| Bayern | 10 % | Kleine Teilbereiche | | Teilweise nur 20 m |
| Brandenburg | - | - | - | Flächendeckend 25 m, auf 10 m interpoliert |
| Hessen | 52 % | 1 % | - | Digitalisierung, Photogrammetrie |
| Mecklenburg-Vorp. | - | - | - | Derzeit erst Erstellung DGM 25 |
| Niedersachsen | 87 % | 11 % | 1 % | Nur 12,5 m; Genauigkeiten teilweise ± 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 |

¹ <http://www.adv-online.de> (16.09.2002)

3.2 Erfassungsmethoden für DGMs

3.2.1 Übersicht der Verfahren

Gängige Methoden zur digitalen Erfassung von Geländehöhen werden im Folgenden kurz dargestellt. Als einziges sekundäre Verfahren soll die Digitalisierung von topographischen Karten behandelt werden. Originäre Verfahren werden unterteilt in terrestrische Vermessung und Fernerkundungsverfahren. Die Wirtschaftlichkeit dieser Verfahren ist abhängig von Zielmaßstab und erforderlicher Höhengenaugkeit sowie der Größe des Bearbeitungsgebietes. Generell nimmt die mögliche Genauigkeit von der Digitalisierung vorhandener Daten über Fernerkundungsverfahren hin zu terrestrischen Verfahren zu. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit scheiden exakte terrestrische Vermessungen für großflächige Aufgabenstellungen in der Praxis jedoch aus. In Kapitel 3.2.3 werden die Verfahren mit eigenen Untersuchungen auf den Projektflächen bewertet. Ein Großteil der Daten für diese Arbeit wurde mit RTK-GPS erfasst. Als jüngere Fernerkundungsverfahren werden die flugzeuggestützte Vermessung mit Laserscannern und die Radarverfahren auf Basis von Befliegungen und Satellitendaten (InSAR) sowie der Space Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) dargestellt. Während Laserscannerdaten von Landesvermessung und Privatwirtschaft in dieser Arbeit ausgewertet wurden, beziehen sich Aussagen zu Radarverfahren auf aktuelle Literaturangaben.

Digitalisierung

Der Begriff Digitalisierung bezeichnet die Umwandlung von Punkt- und Linieninformationen in digitale Form. Da die topographischen Daten bereits in bearbeiteter Form vorliegen (als Topographische Karte (TK)), wird die Digitalisierung als sekundäres Verfahren bezeichnet. Die Kartengenauigkeit wird in der Regel mit 0,02 mm angenommen, hinzu kommen Ungenauigkeiten bei der Aufnahme und Lageverschiebungen durch die Generalisierung. Kraus (2000) spricht in diesem Falle von digitalen kartographischen Modellen im Gegensatz zu den digitalen topographischen Modellen, die frei von den Einflüssen der Generalisierung sind.

Nach der Registrierung der zu digitalisierenden Karte im Ziel-Bezugssystem durch mindestens zwei Punkte (für eine Entzerrung der Vorlage mit Qualitätskontrolle sind mindestens vier Punkte erforderlich) werden manuell, semi-automatisch oder automatisch die Linien nachgefahren und als Punkte in bestimmten Intervallen oder als Linien gespeichert und mit den zugehörigen Geländehöhen als Attribut versehen. Als Faustwert für Digitalisierungsintervalle gibt Kraus (2000) an:

$$\Delta T \leq \sqrt{\frac{8dS_{\max}}{|S''_{\max}|}} \quad (3-1)$$

mit dS_{\max} < Koordinatenmessfehler der digitalisierten Punkte und S'' = Krümmung der Linie. Bei separaten Folien mit Höhenlinien bietet sich die semi-automatische Digitalisierung mit automatischer Linienverfolgung als zeitsparende Methode an (Bill, 1999a). Stützpunkte können nach konstanter Zeit oder konstantem Intervall automatisch gesetzt werden. Ein bekannter Mangel der Digitalisierung von Höhenlinien ist die unregelmäßige Verteilung der Höhenpunkte in der Fläche, was hohe Anforderungen an die Algorithmen zur Ableitung einer regelmäßigen Oberfläche stellt (Kap. 3.3), besonders im flachen Gelände, wo Höhenlinien weit auseinander liegen. Weitere Probleme sind das oftmals hohe Alter der kartographischen Reliefaufnahme und Ungenauigkeiten bei der Erstaufnahme. Reihls (2001) fand z. B. Höhendifferenzen zwischen TK 10 und Vermessungen von -9,5 m bis +6,5 m an stark geneigten Hügelflanken auf Rügen bei einer Standardabweichung von $\pm 1,88$ m. Nach den gültigen Zeichenvorschriften liegt diese Standardabweichung innerhalb der zulässigen Fehlertoleranz. Geringe Lagefehler bei der Höhenlinienaufnahme können in geneigtem Gelände zu großen Höhenfehlern führen.

Untersucht werden hier die Kartenwerke DGK 5 (1:5.000), TK 10 (1:10.000) und TK 25 (1:25.000). Diese Datenquellen repräsentieren die Genauigkeit, mit der topographische Information von der Landesvermessung bereitgestellt wird.

Tachymetrie

Mit einem Tachymeter werden Strecken, Horizontal- und Vertikalwinkel vom Instrumentenstandpunkt aus gemessen (Resnik und Bill, 2000). Mit einer Totalstation (Kombination von elektronischem Winkel- und Distanzmesser) ist ein zügiges Erfassen mit automatischer Auswertung von x,y,z-Koordinaten möglich. Die Distanz wird aus dem Vergleich der Phasenlage einer gesendeten und nach Reflektion an einem Prisma wieder empfangenen elektromagnetischen Messwelle sowie der Ausbreitungsgeschwindigkeit ermittelt. Somit wird die Geländeoberfläche punktweise durch polare Bestimmung von Objektpunkten erfasst. Dabei sollten charakteristische Geländelinien wie Gerippelinien (Kamm- und Tallinien), Falllinien und Geländekanten explizit aufgenommen werden. Die Erfassungsleistung hängt davon ab, wie schnell der Reflektor von Zielpunkt zu Zielpunkt bewegt wird. Im Normalfall werden sämtliche aufzunehmenden Geländepunkte angelaufen. Zwischen Station und Zielpunkt ist eine Sichtverbindung notwendig. Die Genauigkeit wird für hochwertige Geräte mit wenigen Millimetern angegeben (Resnik und Bill, 2000), die Gerätekosten schwanken zwischen 5.000 und 20.000 €

Als neue Entwicklung sei das zielverfolgende Tachymeter erwähnt (Stempfhuber, 1999). Hierbei bewirkt eine automatische Zielverfolgung ein Nachführen des Zielstrahls, wodurch eine kinematische Vermessung möglich wird. Ein DGM könnte damit während einer Überfahrt mit einer Landmaschine erfasst werden. Probleme treten bei Niederschlag und bei Sichthindernissen wie Bäumen oder Bauwerken auf. Die Unterbrechung des Zielstrahls kann dazu führen, dass der Theodolit sein Ziel während der Bewegung nicht wieder findet. Vorteile gegenüber GPS gibt es in Bereichen, wo Abschattungseffekte den Satellitenempfang behindern (z. B. direkt am Waldrand oder auf Waldwegen). Allerdings ist eine Sichtverbindung zu gewährleisten, die z. B. bei kuppertem Relief nicht gegeben ist. Jurisch (1998) gibt die Genauigkeit der Vermessung von bewegten Objekten mit elektronischen Tachymetern (Geodimeter 140T) mit $\pm 0,05 - 0,08$ m in der Höhe und mehreren Dezimetern in der Lage an, weist aber auf geschwindigkeitsabhängige starke Ausreißer hin. Die Standardabweichung betrug gegenüber einer vergleichsweise durchgeführten kinematischen DGPS-Messung etwa das vierfache in der Höhe und das 18-fache in der Lage.

GPS (Globales Positionierungssystem)

Das seit 1993 voll ausgebaute NAVSTAR GPS (Navigation System with Time And Ranging) ist ein passives, satellitengestütztes Ortungs- und Navigationssystem des amerikanischen Verteidigungsministeriums (Department of Defense, DoD). Es besteht aus dem Raumsegment (derzeit 27 Satelliten in 20.186 km Höhe auf 6 Bahnebenen), dem Nutzersegment (Empfängern) und dem Kontrollsegment (Stationen zur Überprüfung der Bahndaten). Etwa jede Sekunde wird von den Satelliten eine modulierte elektromagnetische Welle auf den beiden Trägerfrequenzen L1 und L2 im Mikrowellenbereich gesendet. Die aufmodulierten Signale sind der zivil nutzbare C/A-Code (Wellenlänge λ ca. 300 m) und der vom DoD verschlüsselte P-Code (λ ca. 30 m). Die Position der Satelliten wird zur Positionsbestimmung eines Empfängers nach dem Verfahren der Trilateration (Entfernungsmessung zu mindestens drei anderen Punkten, in diesem Falle den Satelliten) genutzt. In der Regel sind sechs bis acht Satelliten gleichzeitig zu empfangen. Die Positionsbestimmung erfolgt über eine Laufzeitmessung des Signals vom Zeitpunkt der Abstrahlung. Ein räumlicher Bogenschnitt ergibt ein nicht lineares Gleichungssystem aus drei Streckenmessungen. Die Entfernungsmessung zu einem vierten Satelliten ist notwendig, um die bei der Zeitmessung entstehende Abweichung Δt der

Empfängeruhr von den synchronisierten Satellitenuhren als vierte Unbekannte in das Gleichungssystem einzubeziehen (Resnik und Bill, 2000). Ausgehend von der allgemeinen Kugelgleichung

$$D^2 = (X - X_E)^2 + (Y - Y_E)^2 + (Z - Z_E)^2 \quad (3-2)$$

mit D = gemessene räumliche Strecke zwischen Sender und Empfänger, X, Y, Z = bekannte Position des Senders und X_E, Y_E, Z_E = die unbekanntes Koordinaten des Empfängers ergibt sich dann:

$$\begin{aligned} (D_1 + \Delta t c)^2 &= (X_1 - X_E)^2 + (Y_1 - Y_E)^2 + (Z_1 - Z_E)^2 \\ (D_2 + \Delta t c)^2 &= (X_2 - X_E)^2 + (Y_2 - Y_E)^2 + (Z_2 - Z_E)^2 \\ (D_3 + \Delta t c)^2 &= (X_3 - X_E)^2 + (Y_3 - Y_E)^2 + (Z_3 - Z_E)^2 \\ (D_4 + \Delta t c)^2 &= (X_4 - X_E)^2 + (Y_4 - Y_E)^2 + (Z_4 - Z_E)^2 \end{aligned} \quad (3-3)$$

X, Y, Z sind kartesische Koordinaten des geozentrischen Bezugssystems WGS84 (World Geodetic System 1984).

Fehlerquellen werden von Resnik und Bill (2000) unterteilt in Bahnfehler, Ausbreitungsfehler und Empfängerfehler. Zu den Bahnfehlern zählen die Sicherungsmaßnahmen des DoD. Mit Anti-Spoofing (A-S) wird die Verschlüsselung des P-Codes bezeichnet, während die am 2. Mai 2000 abgeschaltete Selective Availability (SA) die übertragenen Bahndaten künstlich verschlechterte und das Signal der Satellitenuhr destabilisierte. Ausbreitungsfehler in der Ionosphäre (Beschleunigung der Wellen durch freie Ionen und Brechung an Medienwechsel) sind von der Frequenz der Trägerwellen abhängig und sind mit Hilfe eines Zweifrequenzempfängers abschätzbar. Ausbreitungsfehler in der Troposphäre sind frequenzunabhängig und werden durch ein Modell erfasst. Signale von Satelliten, die niedrig über dem Horizont stehen, sind stärker von der Atmosphäre beeinflusst. Empfängerfehler betreffen vor allem die Uhr und das Antennenphasenzentrum. Zusätzlich können durch Reflexion der Satellitensignale an Gebäuden oder Bäumen Mehrwegeeffekte entstehen, deren Größe nur durch Wiederholungsmessungen abschätzbar ist. Als Einflussparameter auf die Signalqualität gilt weiterhin die Sonnenfleckenaktivität, die um 2000 ihr 11-jähriges Maximum erreichte. Bis 2003 sind spontane, extreme Störungen zu erwarten (Seeber und Willgalis, 2000).

Die potenzielle Güte der Positionsbestimmung wird mit *dilution of precision* (DOP) bezeichnet und beruht auf der geometrischen Satellitenkonstellation, die mit Hilfe der gespeicherten Bahndaten aller Satelliten berechnet wird.

Unkorrigierte zivile Positionsmessungen hatten bis zur Abschaltung der SA-Maßnahmen nur eine Lagegenauigkeit von 20 - 100 m. Seitdem können auch ohne Korrektursignal Genauigkeiten im Bereich 3 - 10 m erreicht werden (Resnik, 2001).

Neben der Auswertung des C/A- und P-Codes mittels Pseudorangeverfahren können die Trägerwellen L1 und L2 durch eine Phasenmessung für eine bedeutend genauere Positionsbestimmung genutzt werden. Die Wellenlängen der Trägerwellen liegen bei etwa 0,19 m bzw. 0,24 m. Da nur das Reststück innerhalb einer Wellenlänge gemessen wird, muss die Anzahl der vollen Wellenlängen N zwischen Satellit und Empfänger ermittelt werden (Mehrdeutigkeit, *engl. ambiguity*). Algorithmen zur schnellen Bestimmung der Mehrdeutigkeit schränken den Suchraum für die Mehrdeutigkeitszahlen stufenweise ein und analysieren die Beobachtungsgenauigkeiten statistisch. Gesucht wird die Lösung mit der geringsten Varianz durch mehrere iterative Berechnungen. Mit den „On-the-Fly“-Algorithmen können Mehrdeutigkeiten auch während der Bewegung des Empfängers gelöst werden. Näheres bei Hofmann-Wellenhof et al. (1997).

Bereits in den frühen 1990er Jahren wurde ein Verfahren etabliert, das die größten Fehlerquellen eliminiert und je nach Empfängertyp und Verfahren Lagegenauigkeiten zwischen 3 m und 0,005 m ermöglichte. Diese als differenzielles GPS (DGPS) bezeichnete Methode basiert darauf, dass die meisten Fehlereinflüsse zweier GPS-Empfänger in geringer Entfernung (bei

Zweifrequenzempfängern wenige Kilometer) die gleichen Abweichungen verursachen. Dies betrifft vor allem Bahnfehler und Ausbreitungsfehler. 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. Die Genauigkeit sinkt mit steigendem Abstand (*engl. baseline*) der beiden Stationen. Bei einer nachträglichen Auswertung aller aufgezeichneten Satellitenbeobachtungen wird das Verfahren als *postprocessing* bezeichnet. Um die Dauer für die Initialisierung zu Beginn der Vermessung bzw. bei Verlust der Mehrdeutigkeitslösung zu verkürzen, können Zweifrequenzempfänger eingesetzt werden. Für die Ortung von bewegten Objekten fand Jurisch (1998) Genauigkeiten eines Zweifrequenz-Empfängers von $\pm 0,01$ m in der Lage und $\pm 0,02$ m in der Höhe. 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*).

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 SA bewirkte eine nur unwesentliche Verbesserung (Lee und Chen, 2000).

Ein konstantes Funksignal zwischen Referenzstation und dem mobilen Empfänger ist nötig. Dies kann von einer eigenen Referenzstation gesendet werden (zulässig sind in der Bundesrepublik allerdings nur max. 0,5 Watt Sendeleistung, was in der Regel 2 - 3 km Basislinie erlaubt) oder von einem DGPS-Dienst (z. B. bei Rundfunkanstalten) gegen eine Gebühr bezogen werden. Korrekturdienste im Zentimeter-Bereich wie das im 2 m-Band gesendete SAPOS-HEPS (Hochpräziser Echtzeit-Positionierungs-Service) sind nicht flächendeckend verfügbar. Zudem ist eine längere Beobachtungszeit erforderlich. Derzeit sind über 200 SAPOS-Referenzstationen in Betrieb (Hankemeier et al., 1998; Bauer, 2001).

Neben dem GPS wurde im Jahre 1995 das russische GLONASS (Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema) einsatzfähig. GLONASS ist nach dem Ausfall mehrerer Satelliten derzeit als nicht zuverlässig anzusehen, wird von manchen Empfängern allerdings zusätzlich zu den GPS-Satelliten genutzt. Von der Europäischen Union ist das Vorhaben GALILEO mit geplanten 30 Satelliten beschlossen worden und soll Europa ab 2008 von den Sicherheitsmaßnahmen der amerikanischen Regierung unabhängig werden lassen. Modernisierungskonzepte von GPS umfassen die Sendung des C/A-Codes auch auf der L2-Frequenz und die Einrichtung eines weiteren zivilen Signals (L5).

Um Signalausfälle aufzufangen, wurden mehrere Verfahren entwickelt, z. B. lineare Regressionen bei geraden Streckenabschnitten mit Kalman-Filterung (Beuche und Hellebrand, 1999). Hartinger et al. (1999) schlagen eine Gewichtung der Satellitensignale in Abhängigkeit ihrer Qualität vor, um auch tief stehende Satelliten berücksichtigen zu können.

Photogrammetrie

Die Photogrammetrie ist ein Messverfahren auf Basis von photographischen Abbildungen eines Objektes. Die Luftbildauswertung (Aerophotogrammetrie) wird seit Jahrzehnten zur Erstellung von topographischen Karten verwendet und ist noch immer Hauptdatenlieferant für DGMs (Kraus, 2000). Das Bildauswertungsprinzip beruht darauf, dass natürliche oder künstliche Strahlung von Objekten unterschiedlich reflektiert wird. Liegen mindestens zwei Aufnahmen eines Objektes von unterschiedlichen Positionen vor, ist eine räumliche Rekonstruktion des Objektes möglich. Mathematische Grundlage ist das Modell der Zentralprojektion. Für die Rekonstruktion muss für jedes Messbild die Lage des Projektionszentrums im kamerafesten Bildkoordinatensystem und die Abweichung vom mathematischen Modell der Zentralperspektive bekannt sein (Parameter der inneren Orientierung) sowie die absolute räumliche Lage und Stellung der Kamera in einem übergeordneten Koordinatensystem (Parameter

der äußeren Orientierung). Zur Bestimmung der Parameter der äußeren Orientierung werden Passpunkte eingemessen, die als Bild- und Raumkoordinaten vorliegen müssen.

Die Flughöhe bei der Aufnahme richtet sich nach dem gewünschten Bildmaßstab und der Auflösung. Durch eine starke Längsüberlappung der Aufnahmen (i. d. R. 60 %) bei parallelen Aufnahmestreifen wird die Stereoauswertung ermöglicht.

Kraus (2000) schätzt die übliche Faustformel für die Genauigkeit (Standardabweichung) „0,015 % der Flughöhe“ als „optimistisch“ für den großen Bildmaßstab ein und nennt als Beispiel vom Wind bewegte Getreidefelder, die auf zwei nachfolgenden Bildern unterschiedlich hoch sein können. Zudem gibt Kraus (2000) noch eine Korrektur für geneigtes Gelände an:

$$\sigma_H = \pm(0,015 \% \text{ von } h_g + (0,15 / c) * h_g * \tan a) \text{ [m]} \quad (3-4)$$

mit h_g = Flughöhe [m], c = Kammerkonstante [mm] und a = Winkel der Geländeneigung.

Bei der qualifizierten Stereoauswertung werden Gerippelinien, markante Höhenpunkte und in einem zweiten Schritt Massenpunkte erfasst. Die Messmarke wird meist automatisch an vorgegebenen Gitterpunkten gesetzt. Auch automatische, flächenbasierte Methoden zur Massenpunkterfassung sind auf Basis von Bildverarbeitungstechniken unter bestimmten Randbedingungen bereits als praxisreif anzusehen und erreichen noch bessere Höhengenaugkeiten als statische Gittermessungen (Kraus, 2000). Bei Standardprodukten auf Basis von Luftbildern 1:10.000 kann mit einer Genauigkeit von $\pm 0,3$ m gerechnet werden. Als Problem stellt sich die Überdeckung von Objekten, z. B. durch Vegetation, dar. Die Photogrammetrie wird von der Landesvermessung seit über 20 Jahren als Hauptverfahren zur topographischen Erfassung genutzt. Hier werden photogrammetrische Produkte der Landesvermessung (DGM 5) mit den für diese Arbeit erfassten DGMs verglichen.

Eine weitere zukunftssträchtige Möglichkeit zur Erfassung digitaler Geländemodelle nach dem Prinzip der photogrammetrischen Stereoauswertung bieten seit wenigen Jahren optoelektronische Stereo-Multispektralscanner, z. B. die High Resolution Stereo Camera HRSC-AX (Neukum, 1999), deren Weiterentwicklung HRSC-AXW oder die ADS 40. Die Bilderfassung erfolgt mit einem CCD-Zeilensensor, der mit der Vorwärtsbewegung des Flugzeugs die Erdoberfläche Zeile für Zeile abtastet. Die Aufnahme erfolgt kontinuierlich für vorwärts blickende, einen senkrecht nach unten blickenden und rückwärts blickende Zeilensensoren. Die für die Stereoverarbeitung notwendigen Daten stehen somit nach nur einem Überflug zur Verfügung. Eine Rekonstruktion der Oberfläche ist durch homologe Punkte der Zeilen möglich. Die Position des Flugzeugs wird mit DGPS koordinatenmäßig erfasst, die Orientierung mit Hilfe eines INS (*Inertial Navigation System*). Ein INS beinhaltet drei zueinander orthogonale Beschleunigungsmesser zur Bestimmung der Orientierung an Hand von Kreismessungen.

Die HRSC-AX¹ verfügt über 9 Kanäle, darunter fünf Stereokanäle ($\pm 18,9^\circ$, $\pm 12,8^\circ$ bzw. 0°). Die relative horizontale Genauigkeit wird mit $\pm 0,1 - 0,15$ m angegeben, die absolute bei einer Flughöhe von 3000 m mit $\pm 0,2 - 0,25$ m. In gleicher Größenordnung liegt die vertikale Auflösung². Spreckels (2002) weist auf die Gefahr von Fehlkorrelationen bei der Auswertung der Stereozeilen zur Höhenberechnung bei entgegen der Flugrichtung gepflügten Äckern hin. Die Daten einer HRSC-Befliegung für das Untersuchungsgebiet Kassow waren bis zum Abschluss dieser Arbeit noch nicht verfügbar, sollen aber 2003 am Institut für Geodäsie und Geoinformatik ausgewertet werden.

Laserscanning

Die Vermessung mit flugzeuggetragenen Laserscannern wird seit den 1990er Jahren erfolgreich zur Erstellung von DGMs getestet und von einigen Unternehmen kommerziell angeboten. Das Messverfahren wird als LIDAR (*light detection and ranging*) bezeichnet. Die Hö-

¹ <http://solarsystem.dlr.de/FE/hrsc.shtml> (02.11.2002)

² <http://elise.bafg.server.de/servlet/is/3759/> (02.11.2002)

henerfassung erfolgt durch eine Abtastung des Geländes bei einer Befliegung in mehreren parallel zueinander verlaufenden Streifen. Die äußere Orientierung jedes Flugstreifens wird mittels GPS/INS bestimmt. Die Laufzeitmessung von gesendetem und reflektiertem Impuls im Infrarot-Bereich ergibt Polarkoordinaten von einem sich fortbewegendem Ursprung aus. Die Höhengenaugigkeit 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; Favey, 2001). Kraus (2000) zeigt eine Abhängigkeit des Höhenfehlers σ_H von der Neigung und gibt folgende Faustformel zur Genauigkeitsabschätzung an:

$$\sigma_H = \pm(18 + 120 * \tan a) \text{ [cm]} \quad (3-5)$$

mit a = Geländeneigung [$^\circ$].

Der Grund für die Neigungsabhängigkeit liegt in der Ausdehnung des Abtastflecks (Durchmesser ca. 0,25 m) und im Lagefehler der GPS- und INS-Messung, die in steilem Gelände zu größeren Fehlern führt. Von Hansen und Vögtle (1999) geben die reine Lasermessgenauigkeit mit 0,06 m an und schätzen den Fehler durch GPS/INS auf $\pm 0,1$ m in der Höhe und 0,5 m in der Lage. Mercer (2001) zeigt eine horizontale Genauigkeit von $\pm 0,5 - 1$ m.

Ein derzeitiger Entwicklungsschwerpunkt bei Laserscannern ist die Nutzung der Intensität des rückgestrahlten Signals zur Nutzungsklassifikation der Oberfläche. So beträgt die „Reflektivität“ von Sand etwa 10 - 20 %, von Vegetation 50 % und von Schnee etwa 80 % (Wever und Lindenberger, 1999). Eine klare, Infrarot absorbierende Wasseroberfläche kann nicht erfasst werden (z. B. Wasser führende Ackerhohlformen). Die Reichweite der abtastenden Laser erlaubt eine Flughöhe bis 2000 m, die Messkampagne ist auf eine wolkenlose Sicht zum Erdboden beschränkt. Vorzüge des Laserscannings sind die hohe Punktdichte (bis 5 Punkte pro m^2), die Unabhängigkeit von Tageslicht und die Geländeerfassung unter Bewaldung. Petzold et al. (1999) wiesen schon für Befliegungen von 1994 mittlere Punktabstände von 20 m unter dichtem Nadelwald nach.

Nach Flood (in van der Vegt und Hoffmann, 2001) stieg die Zahl der weltweit kommerziell im Einsatz befindlichen Systeme von drei (1995) auf 53 (2000), für Mitte 2001 gibt Mercer (2001) die Anzahl der zivilen Systeme mit 60 - 70 an.

Auf Grund der hohen Fixkosten für die Befliegung ist das Verfahren im Vergleich zu terrestrischen Verfahren nur für Flächen im regionalen Maßstab wirtschaftlich. Die Kosten für eine Laser-Messkampagne mit Bearbeitung der Daten (Filterung, Transformation etc.) geben Sties et al. (2000) mit 400 US\$/ km^2 an. Petzold et al. (1999) betonen, dass die DGM-Erfassung mit Laserscanning nur etwa ein Drittel der Kosten der stereophotogrammetrischen Auswertung beträgt. Bei den Landesvermessungsämtern sind DGM 5 auf Laserscanning-Basis, wo vorhanden (Kap. 3.1.2), ohne Strukturinformationen für 30 €/ km^2 erhältlich.

Radar

Die Radarvermessung wird sowohl mit flugzeuggetragenen Systemen als auch von Satelliten (ERS-1/2) aus durchgeführt. Bei dem flugzeuggetragenen Verfahren mit einem Seitensicht-Radar mit synthetischer Apertur (SAR) werden der Phasenwert Φ und die Intensität (Amplitude der rückgestreuten Strahlung) registriert. Das diffuse Rückstrahlungssignal wird an zwei am Flugzeug angebrachten Antennen empfangen. Die Schrägrentfernung R vom Flugzeug zur Oberfläche ergibt sich als

$$2R = n * \lambda + (\lambda / 2\pi) * \Phi \text{ (Kraus, 2000)} \quad (3-6)$$

mit einer unbekanntem Zahl der durchlaufenen Wellen n . Der Phasenwert Φ gibt den Anteil von λ an, um den die ausgesendete Welle gegenüber der empfangenen Welle zeitlich versetzt ist. Mit zwei Bildern aus geringfügig unterschiedlicher Aufnahme-Position (z. B. durch

Überlappung der Flugstreifen) lässt sich ein Interferenzbild rechnen (InSAR). Dabei werden die Differenzen der zum jeweiligen Geländeelement gehörenden Phasenwerte

$$\Delta \Phi = (4\pi / \lambda) \Delta R \quad (3-7)$$

ausgewertet. Um die beiden Pixel des Differenzenbildes (Interferogramm), die zum gleichen Geländepunkt gehören, zu finden, werden Intensitätsbilder verwendet. Die Korrelation der beiden Intensitätsbilder ist entscheidend für die erreichbare Genauigkeit. Die Intensität hängt ab von Geländeneigung und dielektrischen Eigenschaften der Oberfläche, die mit Landbedeckung, Bodenrauigkeit und Bodenfeuchte variieren. Von glatten Wasseroberflächen wird keine diffuse Rückstrahlung registriert. An Waldrändern und Bauwerken kommt es oft zu Abschattungseffekten.

Im Hinblick auf die Bodenfeuchteabschätzung aus dem DGM genügt einerseits die Höhengenaugigkeit der SAR-Modelle derzeit nicht, andererseits dringt das Radar nur 0,02 - 0,1 m in den Boden ein (Wagner, 1998) und erfasst somit nicht die für das Pflanzenwachstum und für die laterale Wasserbewegung wichtige Tiefe. Rogowski und Engman (1996) zeigen den starken Kontrast zwischen Bodenfeuchteabschätzung mit SAR und Punktmessungen. Dabei spielt allerdings auch der Skalenübergang von der Punktmessung zu einem bestimmten Zeitpunkt zum flächig gemittelten Fernerkundungswert eine Rolle. Zudem gibt die SAR-Intensität nur unter einer moderaten Vegetationsdecke Auskunft über die Bodenfeuchte der oberen Zentimeter und sollte somit auf Anwendungen auf kleinerer Maßstabsebene wie z. B. bei Wagner (1998) beschränkt bleiben.

Die geometrische Auflösung quer zur Flugachse ergibt sich aus der Impulslänge. Analog zum Laserscanning ist im Flugzeug ein GPS/INS notwendig zur Ermittlung von Position und Orientierung des Koordinatenursprungs. Mercer (2001) gibt die Höhengenaugigkeit von SAR für eine flache Bezugsfläche ohne Bewuchs mit $\pm 2,5$ m an, Kleusberg und Klaedke (1999) erreichten in offenem Gelände aus 6800 m Flughöhe nach Korrektur von systematischen Fehlern Genauigkeiten von etwa 1 m. Sties et al. (2000) zeigen, dass mit einem STAR-3i-System für landwirtschaftliche Flächen im Vergleich zu einem Laser-DGM maximale Abweichungen von -0,8 bis +1,2 m bei einer Standardabweichung der Differenz-DGMs von $\pm 0,2 - 0,65$ m möglich sind. Sties et al. (2000) nehmen das Laserscanning-DGM als „exakt“ an und schließen so auf ein Rauschen des SAR-Signals für ein $5 * 5$ m Raster von lediglich $\pm 0,28$ m. Das SAR kann im Gegensatz zum Laserscanning bei Vegetation nicht bis zum Boden durchdringen. Werden Flächen mit Bewuchs und Bebauung hinzugenommen, steigt die Standardabweichung der Differenzen von Laser- und SAR-Höhen auf über 10 m an. Im Vergleich zu Laserscanning sieht Mercer (2001) Flugzeug getragene SAR-Systeme als effektiver für große Gebiete an und den Vorteil von Laserscannern bei hohem Detailreichtum und bei der Vermessung von Städten und bewaldeten Gebieten. Als große Fehlerquelle gilt für beide Verfahren die exakte Bestimmung von Position und Orientierung des Flugzeugs mit INS/GPS.

Ein großer Vorteil von Radarverfahren liegt in der Allwetterfähigkeit, da Mikrowellen von Bewölkung nicht entscheidend beeinflusst werden.

Vencatasawmy et al. (1998) nutzen SAR-Befliegungen zur Kartierung von glazialen Geländeformen. In Bayern werden Radardaten mit einer Bodenauflösung von 0,5 m für die DLM-Aktualisierung getestet (Kollmuß, 2000). Nach Sties et al. (2000) können SAR-DGMs für ein Fünftel der Kosten einer Laserscanning-Befliegung erstellt werden (15 - 80 US\$/km²). Mitte 2001 waren zwei zivile Anbieter für Flugzeug getragene SAR-Vermessung auf dem Markt (Mercer, 2001).

Satellitensysteme erreichen wegen der Zeitverschiebung bis zur Aufnahme des Bildes von der benachbarten Bahn nur $\pm 5 - 10$ m Höhengenaugigkeit (Kraus, 2000). Eine Besonderheit stellte die Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) vom 11. - 23.2.2000 dar, während der aus 233 km Höhe ein weltumspannendes DGM zwischen 60° Nord und 58° Süd aufgezeichnet wurde. Die zu erwartende absolute Höhengenaugigkeit wird für die 50 km-Streifen, die mit

dem genaueren X-Band ($\lambda = 0,02 - 0,05$ m) erfasst wurden, mit 6 m angegeben. Dies betrifft allerdings nur 45 % der überflogenen Landfläche. Die Prozessierung soll Mitte 2003 abgeschlossen sein. Auf einer längeren Teststrecke über Wasser zeigten X-Band-Daten eine erste Genauigkeit von ± 10 m und sollen bei einer Bodenauflösung von 30 m für 1 €/km² abgegeben werden (Werner, 2001). Der Stand der Auswertung wird auf der Web-Seite der DLR¹ dokumentiert. Da die zu erwartende Höhengenaugigkeit für schlagbezogene Auswertungen nicht ausreicht und keine Testdaten für die Untersuchungsgebiete zur Verfügung standen, soll nicht weiter auf diese Methode eingegangen werden.

Zusammenfassung

Die Eignung aller vorgestellten Verfahren in Bezug auf die Aufgabenstellung ist in Tab. 3-2 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 3-2: Vor- und Nachteile der DGM-Erfassungsmethoden für Precision Agriculture.

| Methode | Vorteile | Nachteile |
|---------------------------------|--|--|
| Digitalisierung von Höhenlinien | Gute Verfügbarkeit topographischer Daten in den Maßstäben 1:5.000 (West) bzw. 1:10.000 (Ost) und 1:25.000 | Geringe Genauigkeit und hohes Datenalter |
| Tachymetrie | Hohe Genauigkeit (Zentimeter); punktweise selektive Erfassung möglich | Geringe Flächenleistung (mehrere Hektar pro Tag) |
| RTK-GPS | Hohe Genauigkeit, flexibler Einsatz für neue Messkampagnen, niedrige Kosten, durch Befahrung realisierbar | Störung des Satellitenempfangs und der Telemetrieverbinding bei Abschattungsbedingungen |
| Photogrammetrie | Routineverfahren, je nach Flugparameter hohe Genauigkeit möglich | Hohe Kosten bei neuer Messkampagne |
| Stereo-Zeilenscanner | Vollautomatische Auswertung, Genauigkeit von Flughöhe abhängig | Siehe Photogrammetrie |
| Laserscanning | Hohe Genauigkeit und Flächendeckung bei sehr hoher Bodenauflösung (1 - 2 m), kann teilweise durch Vegetation dringen | Sehr hohe Kosten für Erstvermessung, Bestandeshöhe problematisch im Frühjahr/Sommer (Fahrgassen) |
| Radar (SAR) | Messkampagne kaum von Bewölkung beeinflusst, geringere Systemkosten als Laserscanning | Geringere Genauigkeit im Vgl. zu Laserscanning, Abschattung an Waldrändern |

¹ http://www.dfd.dlr.de/SRTM/november2000/html/index_en.htm (16.09.2002)

3.2.2 Praxiserfahrung bei der GPS-Vermessung

In diesem Kapitel sollen die in dieser Arbeit gesammelten Erfahrungen zur Datenerfassung in der Landwirtschaft auf spezielle Probleme bei der Verwendung von fahrzeuggestützten RTK-Systemen im Vergleich zur Postprocessing-Auswertung und die Problematik beim Umgang mit den geodätischen Bezugssystemen präsentiert werden. Die Vermessung der Projektschläge stand unter dem Gesichtspunkt minimaler Beeinträchtigung des Pflanzenbestandes und größtmöglicher Wirtschaftlichkeit. Somit wurde die Befahrung der Schläge in den Fahrgassen gewählt, die auch für die Bearbeitungsmaßnahmen genutzt werden. Der Abstand dieser Fahrgassen beträgt je nach Arbeitsbreite auf dem jeweiligen Betrieb 6 - 24 m. Außerhalb der Vegetationsperiode sind bei trockenem oder gefrorenem Boden auch Befahrungen in beliebigem Abstand möglich. Zur Erfassungsperiode 1999/2000 waren die Bodenbedingungen für eine Befahrung durch hohe Niederschläge bei milden Temperaturen sehr limitiert. Genutzt wurden für die Vermessung sowohl Landmaschinen als auch Geländewagen. Schläge unter 6 ha Größe wurden teilweise zu Fuß vermessen. Für die RTK-Vermessung wurde ein Zweifrequenzempfänger von Leica (SR 399) mit einem zweiten Empfänger als Referenzstation verwendet (Abb. 3-1). Während die Referenzstation auf einem Festpunkt der Landesvermessung oder einem davon stationiertem Punkt verblieb, wurde der mobile Empfänger (Rover) in fester Höhe auf dem Fahrzeugdach montiert. Mit der Höhe der GPS-Antenne über Grund y und der Geländeneigung β steigt der horizontale Versatz der Messung mit



Abbildung 3-1: Leica SR 399 Referenzstation am Schlagrand Espenberg (GTW).

$$u = \cos(90 - \beta) * y \quad (3-8)$$

In der üblichen Konfiguration von $y = 3$ m und einer maximalen reliefbedingten Fahrzeugneigung von 5° entspricht dies einem Lageversatz von 0,26 m. Dieser übt bei der Zielrasterweite von 5 m einen tolerierbaren Einfluss auf das zu berechnende DGM aus. Der Höhenfehler bei $\beta = 5^\circ$ beträgt nur 0,01 m und erreicht erst ab $\beta = 15^\circ$ mit 0,1 m eine Größe im Bereich der DGM-Zielgenauigkeit. Für die Befestigung der GPS-Antenne (Leica AT 302) wurde anfangs eine am Institut für Geodäsie und Geoinformatik gebaute Holzkiste mit passendem Einsatz für den Dreifuß und Fixierung für die Referenzantenne verwendet, die mit Packgurten auf jedes Fahrzeug geschnallt werden kann. Später wurde zusammen mit der kompakten „Airborne Antenna S67-1575-86“ ein Magnetfuß verwendet. Negative Einflüsse auf den Signalempfang wurden nicht verzeichnet. Leider sind die Fahrerkabinen von Landmaschinen oft mit Plastikdächern versehen, so dass der Magnetfuß nicht immer genutzt werden konnte.

Störungen der Telemetrieverbinding

Zu Beginn der Messkampagne traten häufig Probleme mit dem Empfang des Referenzsignals auf. Vor allem in Mulden und an von der Sendestation aus abfallenden Hängen kam es zu zahlreichen Signalausfällen. In stark reliefiertem Gelände bedingt dies ein häufiges Umsetzen der Referenzstation, was die Zeitersparnis des RTK-Modus stark minderte. Die Probleme wurden innerhalb eines Basislinienbereiches von 1,5 km weitestgehend durch eine höhere

Position der Sende- und Empfangsantenne gelöst. Es wird vermutet, dass auch das elektromagnetische Eigenfeld eines Fahrzeuges bei ungünstigen Empfangsbedingungen zu einem Verlust des Referenzsignals beitragen kann. Ausfälle wurden bei fahrzeuggestützten Vermessungen beobachtet, wenn Hochspannungstrassen unterquert wurden. Dort kam es auf mehreren Schlägen richtungsabhängig (von der Referenzstation weg) zu einem Verlust der Telemetrie-Verbindung (Abb. 3-2). Bei der Bewegung zur Referenzstation hin gab es keine Ausfälle. Eine höhere Anbringung der Referenzantenne bzw. eine Vermessung zu Fuß minderte die Probleme. Am Rover wurde die Referenzantenne dazu auf einem 3 m langen Teleskopstab angebracht. Landmaschinen bieten meist Möglichkeiten, den Stab mittels Packgurten schnell und sicher zu fixieren. Einzelne Funkverbindungen wurden bis 2,7 km erzielt, allerdings nur bei unbewegtem Rover.

Blieb das Korrektursignal für mehrere Sekunden aus, konnte der Empfänger keine Phasenlösung ermitteln. Dies bedeutete eine sprunghafte Verschlechterung der mittleren Lagegenauigkeit von $\pm 0,02$ m auf $\pm 1,5$ m. Erfahrungsgemäß ist die Höhengenaugkeit um den Faktor 2 - 3 schlechter. Zwischen erneuter Funkverbindung und Lösung der Mehrdeutigkeiten traten für 1 - 2 Minuten Höhenmessfehler bis zu 200 m auf, selbst wenn das Gerät eine Genauigkeit der Codelösung von $CQ = 1,0$ m anzeigte. Für solche Fälle kann ein Filter gesetzt werden, der die Aufzeichnung von Koordinaten unter der Güte einer Phasenlösung verhindert.

Retscher und Prader (1997) beschreiben Probleme bei Hochspannungs-Freileitungen, die mit der Störfrequenz von 10^3 Hz bis 10^{10} Hz auch den Frequenzbereich der Telemetrie-Verbindung (lokaler UHF und VHF-Bereich, 10^8 Hz) betraf, aber statistisch nicht signifikant waren. Einen stärkeren Einfluss fanden sie durch Gittermasten auf die Satellitenempfänger (Mehrwegausbreitung und Abschattung).

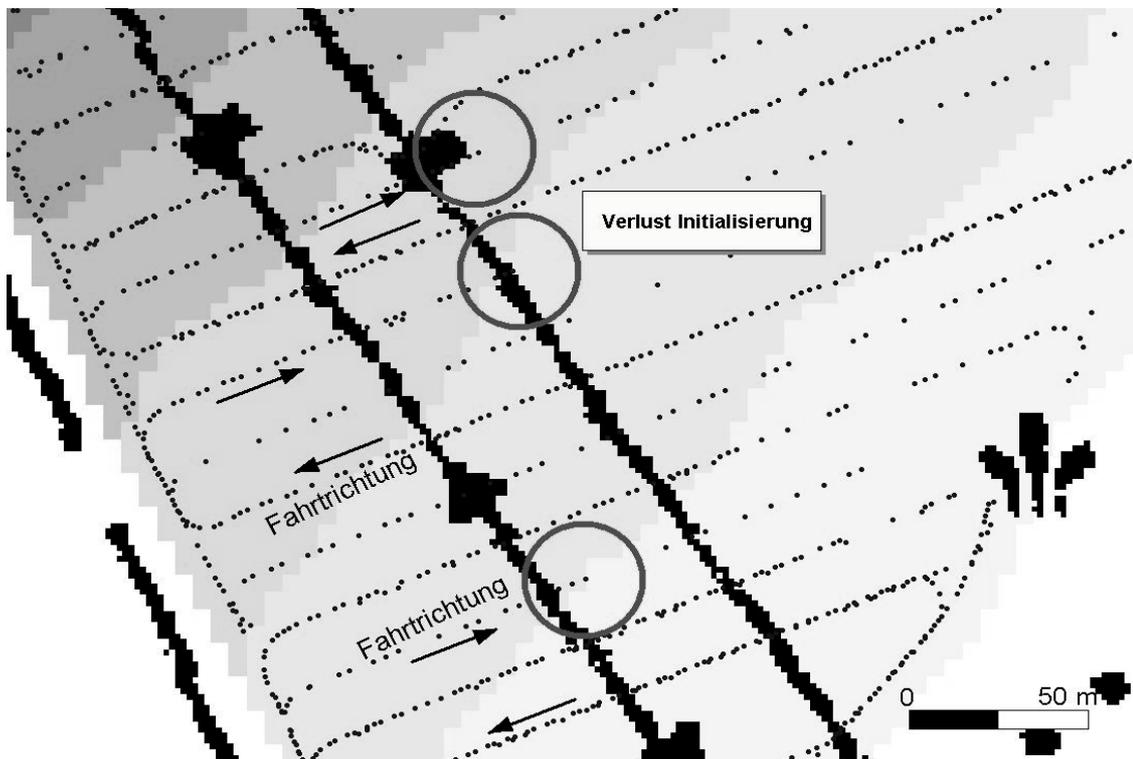


Abbildung 3-2: Ausfall der Telemetrie-Verbindung beim richtungsabhängigen Unterqueren einer 110 kV-Leitung (Kassow, 104). Nach Ausfall des Referenzempfangs wurde eine Neuinitialisierung notwendig, die bei kontinuierlicher Weiterfahrt erst im Laufe der Fahrgasse eintrat (Punkte = Lage der aufgezeichneten Koordinaten).

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. Eine Zusammenfassung von Art und Ursachen elektromagnetischer Störquellen findet sich bei Retscher und Prader (1997). In dieser Quelle wird bei Freileitungen in der Nähe von Umspannwerken von Koordinatenabweichungen mehrerer RTK-Kampagnen bis 25 m bei Standardabweichungen von $\pm 0,007$ bis $\pm 0,047$ m berichtet.

Abb. 3-2 zeigt das Muster der Koordinatenaufzeichnung, welches den Verlauf der Fahrgassen widerspiegelt. Nur selten wurde die vorgegebene Aufzeichnungsrate von 1 Hz konstant erreicht. Teile der Ausfälle sind auf den Filter zurückzuführen, der die Speicherung von Koordinaten mit $CQ > 0,05$ m verhindert. Jedoch wurden auch bei Postprocessing-Kampagnen ohne Filter bis zu 25 % der Messepochen nicht aufgezeichnet (Kap. 3.2.3). 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.

Geodätische Bezugssysteme und Transformationsproblematik

Zur Verknüpfung mit amtlichen Geodaten sollte die Koordinatenausgabe im System der Landesvermessung erfolgen. Da die GPS-Positionsmessung im World Geodetic System 1984 (WGS84) erfolgt, ist eine Transformation in das geltende Landessystem 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. Abb. 3-3 zeigt im Vergleich dazu die Lageabweichung von Gauß-Krüger-Koordinaten, die mit gängigen Transformationstools berechnet wurden. Während die Lageabweichung bei der Verwendung gebräuchlicher Transformationsparameter im Bereich von ± 2 m liegt, beträgt die Höhenabweichung bis zu 8 m (Tab. 3-3). Mit Referenzstationen und einigen Kontrollpunkten im Landeskoordinatensystem wird das Problem bei einer 7-Parametertransformation sehr genau und zuverlässig gelöst. Ein lokaler Transformationsparametersatz ist allerdings nur notwendig, wenn raumbezogene Eingangsdaten aus verschiedenen Quellen in absoluter Zentimetergenauigkeit verwendet werden sollen. Zu beachten ist bei Zukauf von Geodaten in den östlichen Bundesländern, ob das Bessel- oder Krassovsky-Ellipsoid zu Grunde liegt (z. B. Ihde et al., 1994). Lageabweichungen von mehreren hundert Metern, die in dieser Arbeit teilweise bei der Verwendung undokumentierter Datensätze gefunden wurden, ließen sich auf diese Problematik zurückführen und korrigieren.

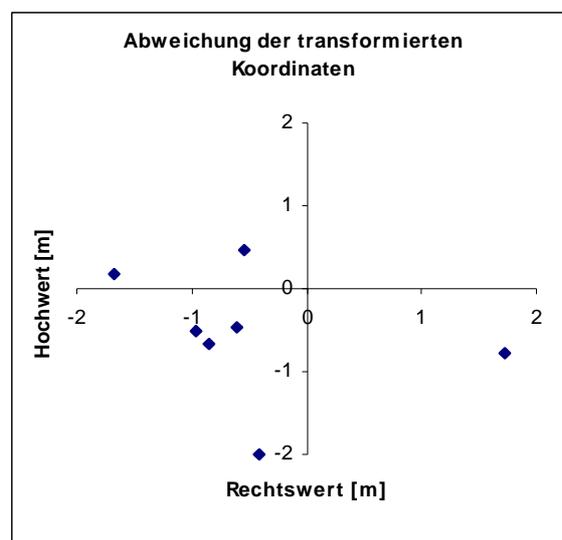


Abbildung 3-3: Abweichung von Koordinaten, die mit bundesweit gebräuchlichen Transformationsparametersätzen von WGS84 nach Datum Potsdam transformiert wurden im Vergleich zu exakten, lokalen Parametersätzen (Tab. 3-3)

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

Tabelle 3-3: Absolute Fehler in x, y und z-Richtung durch Transformationsparametersätze mit den Programmen Transdat und Geographic Calculator im Vergleich zu Transformationen mit lokalen Parametersätzen (7-Parameter-Transformation nach Bursa-Wolff).

| Standort | x-Shift (Transdat) [m] | y-Shift (Transdat) [m] | x-Shift (Geogr. Cal- culator) | y-Shift (Geogr. Cal- culator) | Höhen-Shift (Geogr. Cal- culator) |
|-----------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|
| 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 |
| Thumbby | +1,75 | -0,84 | +1,72 | -0,78 | -2,51 |

3.2.3 Untersuchungen zur Genauigkeit

Für sämtliche Verfahren, die für die Erstellung von DGMs der *preagro*-Schläge getestet wurden, erfolgen hier Aussagen zur Genauigkeit. Die Genauigkeit wird in diesem Kapitel als Abweichung der Messpunkte bzw. der Datengrundlage bei der Digitalisierung von einer Referenzoberfläche betrachtet. Als Referenzoberfläche gelten RTK-GPS-Messpunkte, die mit einer inneren Standardabweichung $<0,05$ m aufgezeichnet wurden bzw. das DGM der Laser-scanning-Kampagne (2 m Raster) für die Bereiche, in denen kein RTK-Messpunkt in unmittelbarer Nähe vorlag. Für das Laser-DGM (im Folgenden: LS) wurde die Herstellerangabe $\pm 0,15$ m angenommen. Ein Vergleich von RTK- und LS-DGM zeigt die Zulässigkeit dieser Annahme für die Genauigkeitsschätzung bei den gegebenen Qualitätsansprüchen (Kap. 6.1). Die Qualität der DGMs ist unabhängig von der Messgenauigkeit zu betrachten, da dort die Beschaffenheit der interpolierten Oberfläche und die räumliche Struktur der Fehler eine größere Rolle auf die DGM-Ableitungen ausübt als absolute punktbezogene Höhenfehler.

Digitalisierung von Höhenlinien

Die Genauigkeit von DGMs auf Basis einer Digitalisierung topographischer Karten wird an drei Praxisbeispielen dargestellt:

- Eigene, punktweise Digitalisierung von Höhenlinien der DGK 5 bzw. Höhenflurkarte (Bayern) 1:5.000 mit ArcView an den Standorten Groß-Twülpstedt und Landshut.
- Eigene, punktweise Digitalisierung von Höhenlinien der TK 25 am Standort Kassow.
- DGMs der Landesvermessung auf Basis der TK 10 (ATKIS-DLM 25, Qualitätsstufe 1) am Standort Baasdorf.

Aus den digitalisierten Punkten der Höhenlinien wurde nach einer Variogramm-Anpassung ein 5 m Raster mit dem Kriging-Verfahren (siehe 3.3.2) interpoliert. Für sämtliche RTK-Messpunkte dieser Schläge wurden die Höhen des interpolierten DGM abgegriffen. Der Fehler der RTK-Messpunkte wird als vernachlässigbar im Vergleich zu den kartenbasierten DGMs angenommen.

Für die bayerischen Schläge (Relief bis zu 20 m) schwankten die Fehler des höhenlinienbasierten DGM von -4 bis +4 m. Die einfache Standardabweichung der 1800 Messpunkte betrug $\pm 0,92$ m. Fehler von mehr als 2 Höhenmetern wiesen 3 % der Kontrollpunkte auf (Abb. 3-4). Die größten Fehler wurden wie erwartet an den stark geneigten Hangschultern sowie in den Muldenpunkten registriert.

Für den Schlag Espenberg (GTW 1) ergab der Vergleich von präziser Höhenmessung und DGM auf Basis der DGK 5 maximale Abweichungen bis 3 m. Der systematische Fehler betrug 1,4 m, die Standardabweichung zu den GPS-Messpunkten $\pm 0,27$ m. Der nur wenige Kilometer entfernte Schlag Langer Berg (GTW 2) zeigt mit einer Standardabweichung von $\pm 1,03$ m ein wesentlich schlechteres Ergebnis.

Der Grund liegt an der starken Unterschätzung einer in den Schlag hineinreichenden Hangschulter. Werden die 66 an der Hangschulter liegenden Messpunkte nicht berücksichtigt (9 % der Schlagfläche), sinkt die Standardabweichung auf $\pm 0,25$ m.

Der Vergleich des ATKIS-DGM (10 m Raster, basierend auf der TK 10) für Schläge des Standorts Baasdorf (Schlag Kiesberg) ergab eine Standardabweichung von $\pm 0,55$ m. Der systematische Fehler betrug 2,01 m bei einer Spannweite der Abweichungen zum RTK-Modell von 3,08 m. Die angegebene Höhengenaugigkeit für das DGM betrug $\pm 0,5$ m. Es wird deutlich, dass auch dann, wenn die DGMs innerhalb der Fehlerschranke von einem halben Meter bleiben, auf Grund der maximalen Fehler große Mängel bei den Ableitungen aus den

DGMs auftreten. Die Fehler treten gehäuft an extremen Reliefformen auf, wo kleine Lagefehler der Höhenlinien zu großen Höhenabweichungen führen bzw. in kuppertem Gelände, wenn Kuppen und Mulden durch das große Aufnahmeraster oder durch eine Glättung nivelliert dargestellt werden.

Die Digitalisierung der TK 25 führt erwartungsgemäß zu einem größeren Fehler auf Grund der höheren Generalisierung (Tab. 3-4). Digitalisiert wurden 385 Punkte auf den 2,5 m Isolinien eines 80 ha großen Schlages in Kassow (106). Die Interpolation erfolgte mittels Kriging mit einer Reichweite von lediglich 100 m, da bei größeren Distanzen die Semivarianz sehr stark anstieg. Die Nugget-Varianz wurde auf $0,5 \text{ m}^2$ gesetzt, um trotz des großen Abstandes der Höhenlinien eine relativ glatte Oberfläche zu erhalten (siehe Kap. 3.3). Für die sehr grobe Datenquelle ist eine Standardabweichung von $\pm 0,89$ m ein beachtliches Ergebnis, jedoch für weitergehende Modellierungen nur bedingt geeignet.

Tabelle 3-4: Genauigkeit der digitalisierten Höhenlinien

| Standort | Standardabweichung s [m] | Anzahl Kontrollpunkte | Datenquelle |
|----------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Landshut | 0,92 | 1800 | Höhenflurkarte 1:5000 |
| GTW 1 | 0,27 | 1310 | DGK 5 |
| GTW 2 | 1,03 | 739 | DGK 5 |
| Baasdorf | 0,55 | 1550 | TK 10 |
| Kassow | 0,89 | 4592 | TK 25 |

Einen entscheidenden Einfluss auf die Genauigkeit der DGMs aus digitalisierten Karten übt die Lagegenauigkeit der Höhenlinien aus. Wird diese mit $\pm 0,2$ mm angenommen, ist bei der DGK 5 eine Standardabweichung $s = \pm 1$ m und bei der TK 10 $s = \pm 2$ m zu erwarten. Je nach Höhenunterschied wirkt sich dieser Fehlereinfluss unterschiedlich stark auf die Höhengenaugigkeit aus. Schätzverfahren hierzu finden sich bei Kraus (2000). Als zusätzlicher Fehler ist die Lageverschiebung von Höhenlinien durch Generalisierung, vor allem für Maßstäbe kleiner als 1:10.000, zu berücksichtigen.

Tachymetrie

Für ein Kleineinzugsgebiet in Kassow standen 102 tachymetrisch aufgenommene Punkte auf ca. 1 ha Fläche zur Verfügung. Verwendet wurde die Totalstation Leica TC 600. Die Höhenmessungen wurden sowohl mit dem RTK-Modell als auch dem LS-Modell verglichen. Im

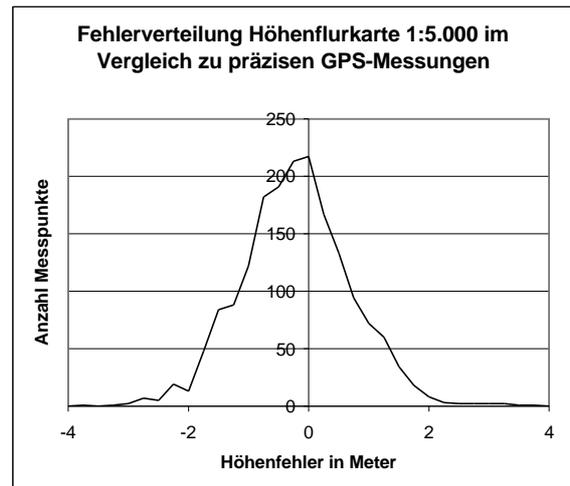


Abbildung 3-4: Darstellung der Differenzen zwischen 1800 RTK-GPS-Messpunkten und dem DGM der Höhenflurkarte 1:5.000 für den Standort Landshut (Reisach).

Vergleich zum RTK-Modell verblieb nach Elimination eines systematischen Fehlers von 0,47 m eine Spannweite der Differenzen von -0,22 bis +0,33 m. Die Standardabweichung der Differenzen betrug $\pm 0,11$ m. Im Vergleich zum Laserscanning-DGM betrug die Standardabweichung $\pm 0,10$ m, bei einer Spannweite von -0,23 bis +0,23 m. Zur Kontrolle wurden ebenso Laser-DGM und RTK-DGM verglichen (Tab. 3-5). Es zeigt sich, dass Laserscanning und RTK eine noch stärkere Übereinstimmungen als der Vergleich mit den tachymetrisch ermittelten Höhen aufweisen. Zur Ermittlung von Höhen einzelner Messpunkte für ein relatives DGM können alle Methoden eine ähnlich gute Genauigkeit liefern.

Tabelle 3-5: Vergleich der tachymetrischen Messungen mit RTK-GPS und Laserscanning (102 Punkte).

| Abweichung in [m] | LS versus Tachymeter | RTK versus Tachymeter | LS versus RTK |
|-----------------------|----------------------|-----------------------|---------------|
| Systematischer Fehler | 0,00 | 0,47 | 0,48 |
| Standardabweichung | 0,10 | 0,11 | 0,06 |
| Spannweite | 0,46 | 0,55 | 0,36 |

GPS (Globales Positionierungssystem)

Zur Genauigkeit der GPS-Vermessung wurden mehrere Versuchsanordnungen an den Standorten Kassow und Groß-Twülpstedt getestet. Die Massendatenerfassung erfolgte mit dem in 3.2.2 beschriebenen System Leica SR 399. Die bei Leica als „CQ“-Wert gespeicherte innere Standardabweichung, die tatsächliche Schwankung der Höhenaufzeichnung und die Ausfallrate bei einer Aufzeichnungsfrequenz von 1 Hz wurden für das RTK-System statisch und während der Befahrung untersucht. Mit einem Trimble ACE-2 wurden Tests durchgeführt, um die Qualitätsverbesserung durch Mittlung mehrerer Überfahrten zu bewerten.

RTK-GPS

Stabilität und Wiederholbarkeit der Höhenmesswerte wurden in Kassow durch eine 40-minütige Aufzeichnung auf festem Standpunkt und wiederholtes Anfahren von Messpunkten bei verschiedenen Abständen zur Referenzstation (Basislinie) auf Feldwegen getestet. Die Genauigkeit des Messwertes im RTK-Modus ist in Abb. 3-5 dargestellt. Während das Gerät eine Lagequalität von $\pm 0,02$ m anzeigte, lag die tatsächliche Standardabweichung der Höhenmessung bei $\pm 0,014$ m mit einer Spannweite von 0,08 m.

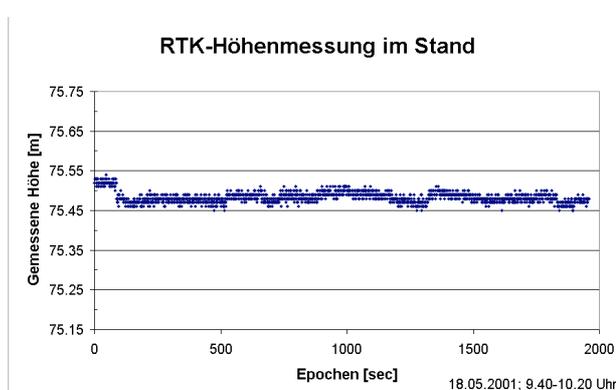


Abbildung 3-5: Schwankungen der gemessenen Höhe im RTK-Modus.

Die Genauigkeit während der Bewegung wurde mit einem Suchradius von 1,5 m untersucht, in welchem die Höhenmessungen bei wiederholter Befahrung verglichen wurden. Innerhalb von vier Stunden fanden sechs Befahrungen statt, von denen nur die ersten vier in die Auswertung eingingen, da bei den Fahrten 5 und 6 nur eine Code-Lösung mit Höhenabweichungen von $\pm 1,5$ m erreicht wurde. Zu diesem Zeitpunkt sank die Anzahl sichtbarer Satelliten für zwei Stunden von 7 - 9 auf 5 und der DOP stieg von 2,1 auf 14 an. Die hier verglichenen n Punkte stammen von den vier Befahrungen und wurden entlang einer Wegstrecke von maximal 3 m in die Auswertung einbezogen (Tab. 3-6) bzw. beim wiederholten Anfahren von zwei Fixpunkten (Tab. 3-7). Sämtliche Werte wurden bei einem CQ-Wert von $\pm 0,02$ -0,05 m für die Güte der Lagemessung aufgezeichnet. Zu größeren Abweichungen kann es kommen, wenn zu unterschiedlichen Tageszeiten gemessen wird. Auch die Höhengenaugigkeit des Festpunktes, an den die Station angebunden wird, trägt zur Wiederholbarkeit der absoluten Ge-

nauigkeit bei und betrug in Kassow bei sieben Kampagnen etwa $\pm 0,1$ m. Der Fehler, der sich auf die exakte Position der verwendeten Referenzpunkte bezieht, ließ sich durch ein einfaches Verschieben der Lage/Höhe in Überlappungsbereichen der Messkampagnen in den Bereich der Messgenauigkeit senken. Bei der DGM-Erstellung war lediglich die relative Genauigkeit der einzelnen Messkampagnen zueinander von Bedeutung und absolute Fehler im Bereich $\pm 0,1$ m ohne Belang. Ein Einfluss der Fahrgeschwindigkeit auf die Genauigkeit wurde bei Variationen von 7 - 21 km/h nicht festgestellt. Während dieser Kampagne traten vor allem gegen Mittag starke Probleme mit der Initialisierung auf. Die Anzahl sichtbarer Satelliten sank von neun auf sechs. Deshalb wurden 8 % der Punkte als Ausreißer mit einem CQ $> 0,45$ m (3-fache Standardabweichung der DGM-Zielgenauigkeit) entfernt. Für 78 % der Punkte wurde ein CQ $< 0,05$ m notiert. Für die CQ-Werte innerhalb dieser Qualitätsgrenze lag die Standardabweichung bei $\pm 0,006$ m in der Höhe, unter Beibehaltung der Ausreißer sank diese auf 0,092 m. Bei weiteren Kampagnen in Kassow und Groß-Twülpstedt wurden sowohl für Lage als auch Höhe Standardabweichungen des CQ-Wertes durchgängig unter einem Zentimeter registriert, wobei der Höhen-CQ um 20 - 50 % schlechter lag. Abb. 3-6 zeigt den Verlauf des Höhen-CQs während der fünfstündigen Kampagne.

Tabelle 3-6: 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.

| s [m] | Range [m] | n |
|-------|-----------|----|
| 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 |

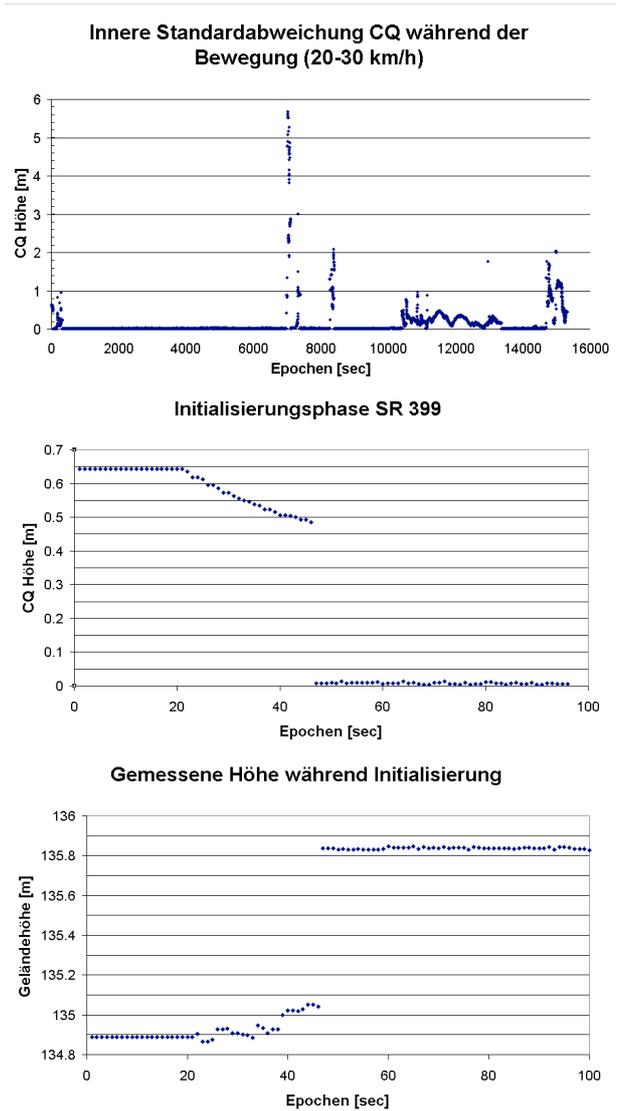


Abbildung 3-6: a) Verlauf der inneren Standardabweichung CQ der Höhenmessung während der 5-stündigen Kampagne am 15.02.2001; b) Verlauf CQ während der Initialisierungsphase; c) tatsächlich gemessene Höhe während dieser Initialisierungsphase.

Tabelle 3-7: Standardabweichung s und Spannweite (Range) der Höhenaufzeichnung an zwei Fixpunkte bei vier Wiederholungsüberfahrten am 18.05.01 (Kassow) mit n = Anzahl der ausgewerteten Punkte

| Basislinie [m] | s [m] | Range [m] | n |
|---------------------------------|-------|-----------|----|
| 3 | 0,01 | 0,05 | 11 |
| 568 (1 Messwert pro Wdh.) | 0,02 | 0,05 | 4 |
| 568 (alle Messwerte im Bereich) | 0,02 | 0,06 | 15 |

Nach einer Initialisierungsphase von etwa 50 Epochen schwankte die Genauigkeit im Bereich $\pm 0,02$ m, bis nach ca. zwei Stunden Fahrtzeit die Initialisierung trotz gleich guter Satellitengeometrie verloren ging. Im Verlauf des Nachmittages kam es zu mehreren Störungen, während denen nur eine Code-Lösung möglich war. Nach BKG¹ waren um 11.30 Uhr UT für eine halbe Stunde nur sechs Satelliten sichtbar.

Dies stimmt zeitlich in etwa mit der ersten großen Störung überein. Die Störungen traten jedoch auch weiterhin auf. Der DOP bewegte sich von dieser Störung abgesehen zwischen 1,7 und 3,3. Auswirkungen des Verlustes der Initialisierung auf die gemessene Höhe zeigt Abb. 3-6 a) mit spontanen Schwankungen im Meterbereich und Abb. 3-6 c) während der Initialisierungsphase: Relativ betrachtet ist die Höhenaufzeichnung bei einer guten Codelösung besser als durch einen CQ-Wert von 0,6 - 1,3 m angezeigt, jedoch wurde häufig ein Versatz von 1 - 2 m beobachtet. Kurz vor Lösung der Mehrdeutigkeiten schwankt die Höhenmessung stärker und tendiert bereits in Richtung der tatsächlichen Höhe. Diese Erkenntnisse helfen auch beim Verständnis der Messungen mit Empfängern, die ausschließlich mit Code-Lösungen arbeiten (s. u.). Diese Ergebnisse zeigen, dass die Höhenmessgenauigkeit von $\pm 0,05$ m unter Feldbedingungen (unebener Boden, Fahrzeugvibrationen, Geschwindigkeiten bis 30 km/h) erreicht wird, solange das RTK-System die Phasenlösung halten kann. Bricht das Referenzsignal bzw. die Initialisierung ab, kommt es zu großen Ausreißern, deren Aufzeichnung mittels eines Filters vermeidbar ist. Es ist jedoch notwendig, die Kampagne bei Verlust der Initialisierung für 1 - 2 Minuten zu unterbrechen bzw. die Referenzstation an einen topographisch günstigeren Ort zu stellen.

DGPS (Mehrfachüberfahrten)

Ergänzend zu den für die DGM-Erstellung eingesetzten RTK-Vermessungen wurde auf dem Betrieb Kassow zusätzlich die Verwendbarkeit von preisgünstigeren DGPS-Empfängern im Meterbereich auf einer 20 ha großen, welligen Teilfläche mit 8 m Höhendifferenz getestet. Das Ziel war die Verbesserung der Höhendaten über eine Mittelwertbildung von Mehrfachüberfahrten mit einem 8-Kanal-DGPS (Trimble ACE-2 mit Racal-Korrektur, Höhengenaueigkeit ± 2 m). Die aus neun Überfahrten bei einer Geschwindigkeit von 24 - 40 km/h erstellten DGMs erreichten zwar durch gezielte Filterung und Mittelwertbildung für 60 % der interpolierten Fläche eine Genauigkeit besser als $\pm 0,5$ m und damit vergleichbar den DGMs der Landesvermessung, jedoch wirkten sich die verbleibenden, fahrspurorientierten Fehler (Abb. 3-7) sehr stark auf die DGM-Ableitungen aus, mit Fehlberechnungen der Abflussrichtung.

Tabelle 3-8: Ergebnisse der Höhenmessung wiederholter Überfahrten eines Testgebietes in Kassow, Schlag 111, mit jeweils n Messpunkten. Die Standard-Abweichung der Höhe ist hier ein Indikator für die Bewegtheit des Geländes und kein Fehlermaß.

| Überfahrt | Mittelwert [m] | Min. | Max. | s | n |
|------------|----------------|-------|-------|------|------|
| RTK-Modell | 26,54 | 21,79 | 29,74 | 1,95 | 2068 |
| 1 | 21,00 | 16,00 | 27,00 | 2,00 | 3193 |
| 2 | 21,80 | 11,90 | 25,10 | 1,90 | 1677 |
| 3 | 22,60 | 18,20 | 26,30 | 1,90 | 2104 |
| 4 | 22,70 | 0,60 | 33,40 | 4,50 | 1632 |
| 5 | 26,90 | 0,10 | 53,40 | 6,20 | 1823 |
| 6 | 24,30 | 3,20 | 61,00 | 5,90 | 1806 |
| 7 | 21,10 | 16,10 | 25,20 | 2,00 | 2456 |
| 8 | 24,70 | 19,30 | 28,40 | 2,00 | 2378 |
| 9 | 22,50 | 17,00 | 31,50 | 2,70 | 1660 |

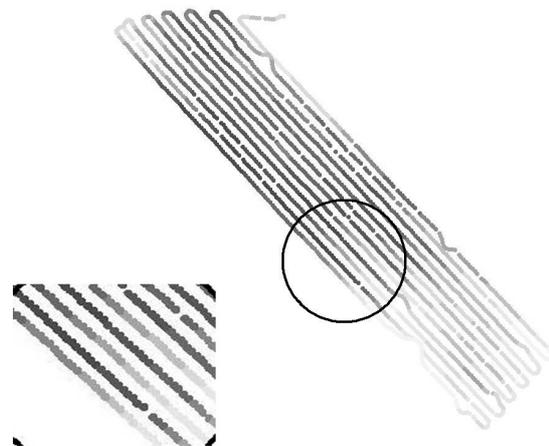


Abbildung 3-7: Fahrspurorientierte Fehler in benachbarten Spuren bei Überfahrt 1. Die Grauwerte stellen die gemessene Höhe dar.

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

Tab. 3-8 zeigt eine Übersicht der einzelnen Messfahrten. Zwischen den Überfahrten schwankten die mittleren Höhen mit einer Standardabweichung von $\pm 1,8$ m. Die Standardabweichungen der Differenzen der Einzelmessungen und des RTK-Modells reichten von $\pm 1,02$ m bis $\pm 5,81$ m und lagen bei sechs der neun Überfahrten in der angegebenen Gerätegenauigkeit. Als problematisch bei der Auswertung ergab sich, dass sprunghaft grobe Fehler in Höhe von 2 - 25 m auftraten und der Messwert sich erst nach ca. 1 - 2 Minuten wieder einpendelte. Somit lässt sich zwar der Beginn eines Abschnittes mit ungenauer Messung erkennen, nicht jedoch das Ende, was eine automatische Fehlererkennung erschwert. Grobe Fehler traten vor allem beim erneuten Beschleunigen nach dem Vorgewende auf und könnte durch eine langsamere Befahrung vermindert werden. Die Bearbeitung der Messwerte mit Filterung führte zwar zu niedrigeren Standardabweichungen der Differenzen zu dem „Soll“-Modell und einer von 0,8 auf 0,15 m² verringerten Nugget-Varianz (Kap. 3.2.3), resultierte allerdings auch in einer starken Nivellierung des DGM, ohne das Problem der Fehlergeometrie entlang den Fahrspuren bei den Ableitungen aus dem DGM zu mindern (Abb. 3-7). So traten systematische Fehler des geglätteten Modells vor allem an Kuppen und Senken auf. Die starken Unterschiede der gemessenen Höhen benachbarter Fahrgassen führen dazu, dass dieses Modell für eine Praxisanwendung derzeit untauglich ist.

Photogrammetrie

Untersucht wurde ein photogrammetrisch erstelltes DGM der Landesvermessung Mecklenburg-Vorpommern im 10 m Raster mittels Vergleich zu RTK-GPS-Messpunkten. Durch die Landesvermessung wurde das DGM mit gleitenden hyperbolischen Flächen aus einem ursprünglichen 25 m Messraster verdichtet. Die photogrammetrischen Parameter sind bei Brauer (1997) beschrieben. Für 32.757 RTK-Messpunkte (Schlag 106, 107 und Teile von 111 und 104) wurden die DGM-Höhen abgegriffen. Die Standardabweichung betrug $\pm 0,52$ m mit maximalen Fehlern von 3,48 m. Für einen wesentlich kleineren Teilbereich und weniger als 1 % der hier verwendeten Messwerteanzahl fand Brauer (1997) eine Standardabweichung von $\pm 0,59$ m mit einem maximalen Fehler von 1,67 m. Die größten Abweichungen wurden erwartungsgemäß an den Hangbereichen gefunden. Die Mehrzahl der Mulden wurde leicht nivelliert wiedergegeben. Die gefundene geringe Qualität der photogrammetrischen Produkte muss jedoch im Zusammenhang mit den Erfassungsparametern bewertet werden. Bei geringerer Bildflughöhe ist von Genauigkeiten wie in Kap. 3.2.1 beschrieben auszugehen.

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).

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 in Kap. 6.1 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 Schwing Spiegel bei Messrate von 2000 Hz, Scanfrequenz 30 - 50 Hz) durch die Firma TOPSCAN durchgeführt. Mit dem daraus gerechneten 2 m Raster wurden 20.815 RTK-Messpunkte auf Schlag 104 und 9.576 Messpunkte auf Schlag 111 verglichen. Die Standardabweichung der Differenzen beider Verfahren betrug $\pm 0,072$ m (Schlag 104) und $\pm 0,064$ 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. 3-8 zeigt das Histogramm der Differenzen beider Verfahren für den Schlag 111. In Abb. 3-9 ist ein 300 m langer Abschnitt einer Fahrspur mit den typischen Differenzen (Standardabweichung $\pm 0,06$ m) für die Höhen des LS-Modells an den RTK-Messpunkten aufgetragen. In diesem Bereich lag das LS-Modell außer in den Hanglagen wenige Zentimeter über dem RTK-Modell. Die Reliefformen werden in gleicher Tendenz wiedergegeben, was für die Ableitung des Fließverhaltens aus dem DGM entscheidend ist. Die größten Abweichungen im Untersuchungsgebiet wurden erwartungsgemäß überwiegend an den 8 - 14° geneigten Hängen gefunden. 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. 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.

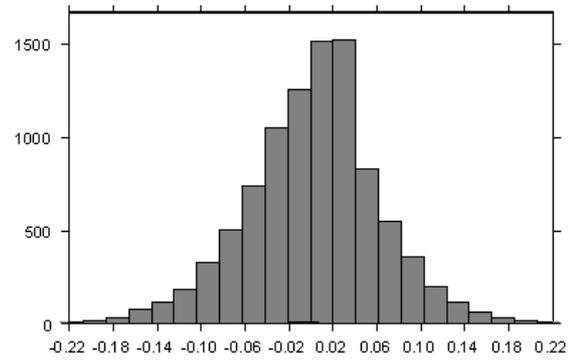


Abbildung 3-8: Differenzen zwischen Laserscanner-DGM und RTK-DGM, Kassow 111 (9576 Messpunkte)

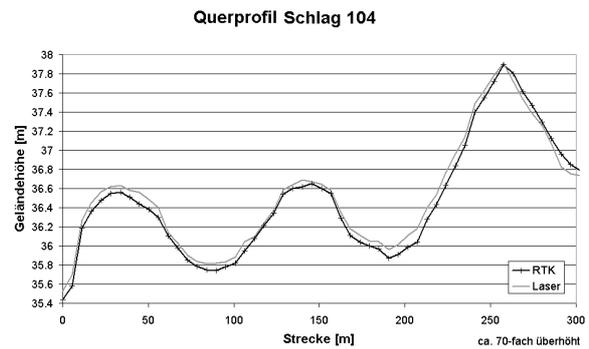


Abbildung 3-9: Schnitt durch das Laserscanner-DGM an den RTK-Messpunkten (Markierung).

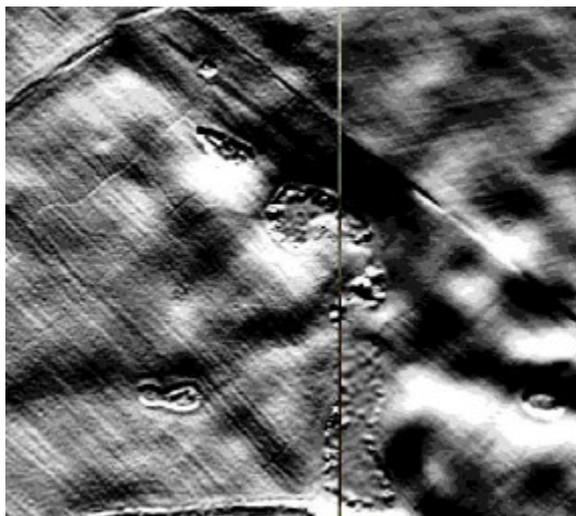


Abbildung 3-10: Hillshade-Modell der Laserscanner-Daten Kassow mit Teilen der Schläge 107 und 104 entlang einer Kachelgrenze. Details wie Fahrspuren, Wege und Ackerhohlformen sind zu erkennen. Beleuchtungsparameter Azimut = 40 und Lichtquelle von Nord.

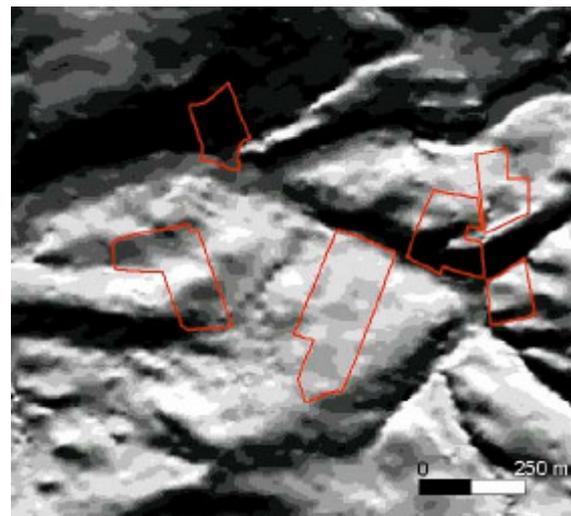


Abbildung 3-11: Hillshade-Modell Beckum mit Beleuchtungsparametern Azimut = 40 und Lichtquelle von Nord. Darstellung auf Grundlage des DGM 5 des Landes Nordrhein-Westfalen mit Genehmigung des Landesvermessungsamtes NRW vom 08.09.1999, Az.: S 1281/99. Polygone: Untersuchungsflächen.

Bei der Filterung mit SCOP (siehe 3.3.2) durch TOPSCAN wird normalerweise die Vegetation als *first pulse* über einer Trendfläche detektiert, so z. B. der Bewuchs um die wasserführenden Hohlformen in Abb. 3-10. Im Falle des niedrigen, dichten Winterweizenbestandes liegt diese Trendfläche in Höhe der Vegetationsoberfläche und die wenigen Bodenpunkte in den Fahrspuren werden nicht entfernt, da sie (als „Ausreißer“) nicht über der Trendfläche liegen. Folglich zeichnen sich auf den bewirtschafteten Flächen die Fahrgassen als „Streifen“ nach, während benachbarte Grünlandflächen streifenfrei erscheinen. Im Folgenden sollen an Abb. 3-10 die Besonderheiten des LS-DGM für Ackerflächen erläutert werden. Deutlich zu erkennen ist die Kachelgrenze als vertikale Linie und dass in beiden Kacheln unterschiedlich stark gefiltert wurde. Auf der östlichen Bildhälfte zeichnen sich die Fahrspuren in Nordwest-Südost-Richtung wesentlich schärfer durch als die West-Ost-Fahrspuren im westlichen Teil. In der südlichen Hälfte der Kachelgrenze ist deutlich eine baumbestandene Hohlform zu erkennen, von der die meisten Bäume bei der Filterung eliminiert wurden. Weiterhin sind kleine Hohlformen und Wege als lineare Strukturen zu erkennen und zeigen die gute Auflösung des DGM. Die Auswirkungen auf die Ableitungen, vor allem durch die Fahrspur-„Streifigkeit“ sollen in Kap. 6.1 diskutiert werden.

Das LS-DGM der Landesvermessung Nordrhein-Westfalen zeigt auf Grund seiner Rasterweite von 10 m einen geringeren Detailreichtum. Auf Abb. 3-11 ist deutlich die Struktur der Landschaft zu erkennen. Die Eintalungsbereiche liegen 2 - 8 m tiefer als die umrandet dargestellten Schlagflächen. Die hohe Qualität der Oberfläche zeigt sich durch die geringe Anzahl an Artefakten bei einer visuellen Kontrolle. Die Eignung der Oberfläche für bodenbezogene Ableitungen (hohe Übereinstimmung zwischen Ableitungen aus dem DGM und beobachteten Bodenunterschieden) wird ebenfalls in Kap. 6.1 diskutiert.

3.2.4 Bewertung und Diskussion

Eine Bewertung der DGM-Qualität kann nur fragestellungsbezogen erfolgen. Für die Analyse landwirtschaftlicher Flächen ist die Struktur der Modelloberfläche von großer Bedeutung. Da diese erst im nächsten Abschnitt besprochen wird, soll hier nur auf Punktgenauigkeit und Kosten der Erfassung eingegangen werden.

Die Digitalisierung von topographischen Karten 1:5.000 - 1:10.000 erreicht mittlere Genauigkeiten von $\pm 0,5$ - 1 m. Allerdings wirken sich im steilen Gelände Lageungenauigkeiten der Höhenlinien sehr stark aus. Extrempunkte, v.a. Mulden, sind oft zu nivelliert dargestellt. Lokale Abweichungen betragen teils mehrere Höhenmeter. Dies führt zu falscher Berechnung der Fließrichtung und von Folgegrößen bei der DGM-Analyse.

Die Photogrammetrie liefert im Bildflugmaßstab 1:10.000 Höhengenaugigkeiten bis zu $\pm 0,2$ m (Kraus, 2000), die hier untersuchten DGMs der Landesvermessung lagen allerdings maßstabsbedingt um den Faktor 2 - 3 schlechter. Kraus (2000) sieht im offenen Gelände weiterhin Vorteile gegenüber Verfahren wie Laserscanning, da die Photogrammetrie auch die Ausweisung von Geländekanten erlaubt. Dies ist auf Ackerflächen allerdings nicht notwendig. Die flächendeckend bestehenden DGMs der Landesvermessungsämter sind derzeit für präzise Modellierungen im landwirtschaftlichen Zielmaßstab 1:5.000 nur selten ausreichend.

Von den originären Erfassungsmethoden bietet die Tachymetrie zwar eine Genauigkeit im Zentimeterbereich und ist von den Gerätekosten her das günstigste Verfahren, für die flächenhafte Vermessung von mehreren Hektar ist die Methode allerdings zu arbeitsaufwändig und damit zu teuer. Die Tachymetrie hat Vorteile bei kleinen Flächen, die durch wenige, charakteristische Punkte repräsentiert werden können. Kinematische Verfahren sind zwar in der Untersuchung, aber noch störanfällig, sobald keine durchgängige Sichtverbindung gewährleistet ist (Stempfhuber, 1999).

Die Vermessung mit RTK-GPS bietet auf den relativ offenen 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 Telemetrie-Verbindung nicht möglich, kann auf das nachbereitungsaufwändigere Postprocessing ausgewichen werden, das sich in stark hügeligen Lagen anbietet. Hochgenaue Positionierungsdienste mit Basislinien von 20 - 30 km, mit denen die Referenzstation eingespart werden kann, werden über Sender der Landesvermessung im 2 m-Band als RTCM SC-104 Standardformat ausgestrahlt. Zum Empfang ist ein Decoder notwendig. Die Daten werden im Sekundentakt übertragen.

Weltzien et al. (2002) zeigen, dass die temporale Schwankung der Positionsgenauigkeit, der richtungsabhängige Fehler auf Grund geringerer Satellitenanzahl in Nord-Richtung und die höhere Fahrgeschwindigkeit nur Systeme ohne Korrektursignal nennenswert beeinflussen.

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). Je nach Aufnahmezeitpunkt und Nachbearbeitung sind Pflanzenbestand und Fahrgassen (als Differenz von Boden und Bewuchshöhe) im DGM zu erkennen. 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, die allerdings nur für regionale Ausschnitte vorliegen und meist nur in einem 10 m-Raster angeboten werden (Kap. 3.1.2).

Untersuchungen zu Geländemodellen aus SAR-Befliegungen konnten in dieser Arbeit nicht durchgeführt werden. Literaturangaben schwanken stark bezüglich der zu erwartenden Höhengenaugigkeit. Diese Datenquelle sollte in Zukunft stärker beachtet werden, da die Erfassungskosten unter den Kosten einer Laserscanning-Kampagne liegen (Sties et al., 2000).

In Tab. 3-9 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.

Tabelle 3-9: 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 | Laser-scanning | 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 |

Für die DGMs der Landesvermessung muss beachtet werden, dass sie nur für einen kleinen Teil einiger 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. Für eine landwirtschaftliche Bodenkartierung sollte z. B. mit 50 €/ha gerechnet werden (Lamp und Herbst, pers. Mitt.). Viele Sensordaten und Nährstoffbeprobungen müssen in regelmäßigen Zeitabständen neu erfasst werden. Bei der DGM-Nutzung für die Landwirtschaft kann eine lange Gültigkeit des Datums vorausgesetzt werden. Bei einer Kostenabschreibung z. B. auf 10 Jahre liegt die DGM-Erstellung mit RTK-GPS bei unter 1 €/(ha * Jahr). 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.

3.3 Methoden zur Erstellung von DGMs

3.3.1 Strukturierung, Interpolation und Präsentation

Grundstruktur

Bei der Erstellung von DGMs aus den ungleichmäßig verteilten Höhenmesspunkten ist die Strukturierung der Daten von entscheidender Bedeutung für die spätere Auswertung. Von den drei Grundstrukturen „Höhenlinien“, „trianguliertes irreguläres Netzwerk (TIN)“ und „Reguläres Raster (Grid)“ soll hier nur das Grid näher betrachtet werden. Im Hinblick auf die Ableitung von hydrologisch motivierten Reliefparametern erwies sich die Gridstruktur in zahlreichen Untersuchungen seit Mitte der 1980er Jahre als überlegen (Weibel und Brändli, 1995; McCullagh, 1998; Wise, 1998; Hutchinson und Gallant, 2000). Eine Beschreibung der Auswirkungen der DGM-Struktur auf den Abflussbildungsprozess findet sich bei Blöschl (1996).

Höhenlinien sind ein wesentlicher Bestandteil topographischer Karten und stellen die älteste Struktur zur Geländeanalyse dar. Speziell für die hydrologische Auswertung von höhenlinienbasierten DGMs wurden Methoden entwickelt, welche die Landschaft in kleine Einheiten („stream tubes“) einteilen, die hangaufwärts/-abwärts durch Höhenlinien begrenzt sind und in Fallrichtung durch Abflusslinien abgeschlossen werden. Ein solches Konzept ist z. B. bei TAPES-C umgesetzt (Gallant und Wilson, 2000). Vorteile liegen bei der schnellen Bestimmung von Einzugsgebietsgrößen. Die Konnektivität des Abflusses ist durch eine Netzwerkgeometrie vorgegeben, die auf Orthogonalen zu den Höhenlinien an den Orten maximaler Horizontalkrümmung basiert (Hutchinson und Gallant, 2000). Nachteile liegen in der geringen Datendichte zwischen den Höhenlinien, speziell in Gebieten flachen Reliefs.

Ein TIN wird meist mittels einer Delaunay-Triangulation in der Grundrissebene aus den Messpunkten erzeugt, wobei die Höhe für die Knoten bekannt ist. Die Oberfläche ergibt sich als Verband von schiefen Dreiecken. Der Vorteil der TIN-Struktur ist die gute Repräsentation von Diskontinuitäten im Modell und die geringe Punktzahl in gleichförmigem Gelände. Unregelmäßige Höhenmessfehler werden jedoch auf die modellierte Oberfläche übertragen, da keine Filterung erfolgt (Kraus, 2000). Dies zeigt sich in Unstetigkeiten der Höhenlinien und einer Vielzahl abflussloser Artefakte (lokale Hoch- und Tiefpunkte). Triangulationsmethoden führen bei linienförmig angeordneten Ausgangsdaten (Höhenlinien, Fahrgassen) stellenweise zu ebenen Dreiecken, denen bei der Modellierung keine Abflussrichtung zugeordnet werden kann.

Die Vorteile der Rasterstruktur, die einfache rechnergestützte Implementierung und Entwicklung von Auswertalgorithmen und einfache Glättungsmöglichkeiten, führte zu seiner starken

Verbreitung seit Beginn der 1990er Jahre. Der Hauptkritikpunkt an der simplen Grid-Struktur, die fehlende Möglichkeit zum Einbeziehen abrupter Änderungen, sogenannter Geländekanten, greift im Falle der Anwendung auf Ackerschlägen nicht, da dort keine Kanten vorkommen. Ein weiterer Nachteil, der große Speicherbedarf, ist bei derzeitigen Rechnerkapazitäten, den geringen Größen der Untersuchungsgebieten und der Zielgenauigkeit, nicht entscheidend. So umfasst z. B. ein Datensatz für 100 ha bei einer 5 m Rasterweite lediglich 40.000 Koordinaten-Tripel. Bei der Rasterform ist die Geometrie eindeutig durch die Lage der Bildelemente definiert. Die Verknüpfung von Datenebenen durch logische, algebraische oder geometrische Auswertungen ist wesentlich unkomplizierter. Bei Raster-Programmen gibt es zwei unterschiedliche Grundformen der Definition des Raumbezuges. Die Koordinaten beziehen sich entweder auf den Mittelpunkt einer „Rasterzelle“ (flächenhafter Ansatz) oder auf die Schnittpunkte der Gitterlinien („Gittermodell“). Bei einem Datentransfer zwischen verschiedener Software kann dies bei Nichtbeachtung zu Verschiebungen von $\sqrt{2}$ der Rasterweite führen. Bei ArcView-Grids wird zudem bei der Konvertierung in Punkt-Vektoren eine Koordinate im „linken, oberen“ Drittel der Zelle anstelle einer Zentrumsordinate gewählt.

Interpolation

Um das Rastermodell aus den Höhenmesspunkten zu erhalten, ist eine Interpolation der Messpunkte notwendig, das heißt aus den diskreten Punkten wird durch Idealisierung und Abstraktion eine abgeleitete mathematische Fläche gebildet. Je geringer die Stützpunktdichte ist, desto stärker beeinflusst die Wahl des Interpolationsverfahrens das Erscheinungsbild der berechneten Oberfläche. Der Begriff der Filterung beschreibt nach Wild (1983) den Unterschied zwischen den gemessenen Stützwerten und den Werten einer Prädiktionsfunktion in den Stützpunkten. Dadurch ist eine Glättung der berechneten Geländeoberfläche möglich, um auf Ungenauigkeiten des Messverfahrens zu reagieren. Die ausgefeilteste Interpolationsmethode führt zu schlechten Ergebnissen, wenn die Qualität der Ausgangsdaten gering ist. Aussagen für die erforderliche Datenqualität werden in Kap. 6.1 getroffen. Untersucht wurde hier die Eignung der Verfahren, die von gängigen GIS und Oberflächen-Modellierungsprogrammen angeboten werden. Diese Untersuchung bezieht sich zuerst auf eine Kreuzvalidierung der Verfahren, um die Güte vorhergesagter Messpunkte zu bewerten und in einem zweiten Schritt auf eine qualitative Bewertung der Oberflächengüte für die abflussorientierte DGM-Analyse. Eine Qualitätssicherung ist weiterhin durch visuelle Kontrolle möglich. Ableitungen aus dem DGM wie z. B. die Neigung reagieren sensibel auf kleine Anomalien und weisen somit auf Fehler der Ausgangsdaten hin. Für eine grobe Inspektion können auch Schummerungsfunktionen verwendet werden (Kap. 3.3.4, Abb. 3-17). Weiterhin bieten einige GIS für Interpolationen das Erstellen einer Standardabweichungs-Karte an. Diese spiegelt die Aufnahmegeometrie wider und weist auf Bereiche hin, in denen die angegebene Höhe mit geringerer Sicherheit gültig ist.

Präsentation

Digitale Geländemodelle werden in der Regel als Höhenlinien, Höhengleichkarten oder perspektivische Ansichten (Blockbild) dargestellt.

Höhenlinien ermöglichen eine gute Interpretation der vom Relief gesteuerten Prozesse, da sie über eine andere Datenebene gelegt werden können.

Höhenschichtkarten können durch mehrere Effekte wie individuelle Beleuchtung und Steuerung der Farbtiefe durch andere Datenebenen (z. B. Bodendaten) modifiziert werden, um ein intuitives Lesen und Interpretieren der Geländesituation und der Wechselwirkungen zwischen Boden und Relief zu ermöglichen. Die Farbtiefe einer Expositionskarte kann über die Geländeneigung gesteuert werden, um die Wirksamkeit der Exposition zu verdeutlichen. Ein Beleuchtungsmodell (Hillshade) eignet sich, um eine plastische Darstellung und somit ein einfa-

ches Erkennen von Reliefformen zu ermöglichen. Hierbei wird die Lichteinfallrichtung und die Höhe des Sonnenstandes angegeben. Die Helligkeitswerte werden aus den Winkelbeziehungen zwischen Gelände und einfallendem Lichtstrahl berechnet. Eine manuelle Schummierung mit einem Pendeln der Lichtquelle um die Hauptbeleuchtungsrichtung kann Kleinformen besser herausarbeiten, ist allerdings subjektiv durch den Kartographen geprägt und nicht immer reproduzierbar.

Bei einem Drahtmodell/Blockbild (Wireframe) verleihen wechselnde Liniendichten der Darstellung einen schattenplastischen Effekt. Eine solche Darstellung dient ausschließlich der Visualisierung der Geländekomplexität und erlaubt keine metrischen Operationen.

3.3.2 Übersicht der Interpolationsverfahren

In dieser Arbeit wurden verschiedene praxisübliche Interpolationsverfahren an Hand der Datensätze aus der RTK-Vermessung verglichen, um eine Aussage zur Eignung der Verfahren für die spezielle Datenerfassung von den Fahrgassen aus zu treffen. Die Problematik hierbei liegt in der Ausgangsgeometrie begründet (hohe Informationsdichte in eine Richtung, geringe Dichte transversal dazu), ähnlich der Digitalisierungsproblematik bei Höhenlinien. Allerdings handelt es sich hierbei nicht um Linien gleicher Geländehöhe sondern eine feste Geometrie, die aus Gründen der einfacheren Befahrbarkeit meist der Haupthangneigung folgt.

Von der Genauigkeit der Interpolationsverfahren und den Besonderheiten deren Verhaltens bei großen Schätzweiten, Ausreißern und starker kleinräumiger Variabilität (Oberflächenrauigkeit) hängt die Berechnung der räumlichen Verteilung von Geländeattributen wie z. B. dem Wetness-Index (Kap. 4.4.2) ab. Die Auswirkungen verminderter Höhengenaugigkeit bzw. ungenauer Schätzung werden bei den Ableitungen deutlich und dienen so einer visuellen Einschätzung der DGM-Qualität.

Rüdenauer (1980) stellte bereits vor 20 Jahren fest, dass viele ausgefeilte Programme zur DGM-Berechnung existieren, aber wenig über die Zusammenhänge von Genauigkeit der Interpolationsergebnisse, Datenerfassung und Interpolationsmethode bekannt ist. Seitdem wurden viele Untersuchungen zur DGM-Qualität durchgeführt (Tang, 1991; Aumann, 1994; Garbrecht und Martz, 1994; Florinsky, 1998; Wise, 1998), Höhendaten aber oft unkritisch für vielfältige Produkte, vor allem bei Planungsfragestellungen, eingesetzt.

Im Folgenden werden die Verfahren, die in dieser Arbeit zur Interpolation der RTK-Daten verwendet (Tab. 3-10) und mit einer Kreuzvalidierung verglichen wurden, kurz vorgestellt. Detaillierte Beschreibungen zu den klassischen Verfahren finden sich bei Rüdenauer (1980), Wild (1983), Bill (1999b) und Kraus (2000); zur Geostatistik (Kriging) bei Akin und Siemes (1988) sowie Cressie (1993).

Tabelle 3-10: *Verwendete Interpolationsverfahren*

| Verfahren | Software |
|---|---|
| Inverse Distance Weighting (IDW) | ArcView SpatialAnalyst |
| <i>Kriging</i> | <i>SURFER 7, ArcView SpatialAnalyst</i> |
| Spline (Tension) | ArcView SpatialAnalyst |
| Minimum Curvature | SURFER 7 |
| Locally Adaptive Gridding | Topogridtool ARC/INFO |
| <i>Lineare Prädiktion mit Kovarianzfunktion</i> | <i>SCOP</i> |

Inverse Distance Weighting (IDW)

Die Messpunkte werden in Abhängigkeit der Entfernung zu dem jeweils zu bearbeitenden Gitterpunkt gewichtet. Ein Exponent bestimmt, wie stark der Gewichtungsfaktor mit der Entfernung abnimmt. Größere Exponenten führen zu einer höheren Gewichtung der näher liegenden Nachbarpunkte. Die Summe aller Gewichtungsfaktoren beträgt eins. Die Berechnung der Gitterpunkte erfolgt nach der Gleichung

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n z_i / (d_i)^R}{\sum_{i=1}^n 1 / (d_i)^R} \quad (3-9)$$

mit

Z = Gitterpunkt,
 z_i = Nachbarpunkt,
 d_i = Entfernung zum Gitterpunkt,
R = Gewichtungsfaktor.

Nachbarpunkte können über das Kriterium Anzahl oder Radius einbezogen werden. Als Standard wurden 12 Nachbarn verwendet, vergleichsweise Radien bis 50 m getestet, um in jedem Fall Messpunkte von mindestens zwei Fahrgassen einzubeziehen. Dies ist bei 12 Nachbarn in der Regel nicht gegeben und führt zu Diskontinuitäten der Höhenlinien auf halber Distanz zwischen zwei Fahrgassen.

Kriging

Kriging-Verfahren basieren auf der Theorie der regionalisierten Variablen, die in den 1960er Jahren von MATHERON nach Vorarbeiten des südafrikanischen Bergbau-Ingenieurs KRIGE entwickelt wurde. Die zentrale Annahme der Geostatistik ist, dass sich ein im Raum verteiltes Merkmal aus einer deterministischen, einer autokorrelativen und einer zufälligen Komponente zusammensetzt. Die räumliche Abhängigkeit (Autokorrelation), die räumliche „Struktur“ des Merkmals, wird bei der Gewichtung der Messwerte berücksichtigt. Die Reichweite der räumlichen Abhängigkeit und die Varianz wird auf Grundlage eines sogenannten Variogramms ermittelt, mit welchem die Semivarianz (die Hälfte der Varianz der Inkremente zweier Messwerte) in Abhängigkeit eines Entfernungsvektors aufgetragen wird. Dazu werden Paare aller Messpunkte gebildet und deren Semivarianz in Beziehung zur Entfernung zwischen ihnen gesetzt. Die Variabilität der Messgröße bei wachsender Entfernung wird auf diese Weise charakterisiert. Die Semivarianzanalyse liefert ein deskriptives Maß für die räumliche Kontinuität von Messwerten und damit die Reichweite und Richtung von räumlichen Prozessen. Das empirische Variogramm berechnet sich als

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var}[z(x+h) - z(x)] \quad (3-10)$$

mit h = Abstandsvektor,
 z = Messwert,
Var = Varianz,

bzw.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[(z(x+h) - z(x))^2] \quad (3-11)$$

mit E = Erwartungswert von z .

Die Gültigkeit der Variographie beruht im strengen Sinne auf der Annahme der Stationarität. Das bedeutet, dass eine wiederholte Beobachtung in verschiedenen Bereichen des Untersuchungsraumes eine gleiche Zufallsverteilung ergeben soll. Dies erlaubt eine Beschreibung der Verteilung durch Momente. Der Erwartungswert ist ein Moment 1. Ordnung, Varianz, Kovarianz und Variogramm sind Momente 2. Ordnung. Da Stationarität in den Geowissenschaften nur selten gegeben ist, führte Matheron weniger strenge Kriterien ein, wie die Intrinsische Hypothese. Diese besagt, dass die Differenz zwischen zwei Messwerten $z(x)$ und $z(x+h)$ nur von der Länge und Richtung ihres Abstandsvektors h , nicht aber vom Ort abhängig ist. Die Stationarität wird auf die Inkremente $z(x+h) - z(x)$ beschränkt und nur für einen begrenzten Vektor h angenommen.

Als Ergebnis der Variogramm-Analyse werden 3 Parameter angegeben:

- Nuggetvarianz c_0 : Die Varianz unterhalb des Beprobungsintervalls, zurückzuführen auf Fehler beim Messverfahren oder die kleinräumige Variabilität des Merkmals. Die Nugget-Einheit entspricht dem Quadrat der Beobachtungseinheit (Golden Software, 1999).
- Schwellenwert c (*engl. sill*): Gesamtvarianz aus dem Modell-Schwellenwert und der Nugget-Varianz. Wird kein Schwellenwert erreicht, spricht man von intransitiven Modellen. Teilweise tritt ein Schwellenwert erst bei sehr großen Abstandsvektoren h auf und liegt außerhalb des eigentlichen Messbereiches.
- Reichweite a (*engl. range*): Größe des Richtungsvektors, ab dem der Schwellenwert bei transitiven Modellen (Modellen mit Schwellenwert) zu 95 % erreicht wird. Die Reichweite beschreibt den Bereich um einen Punkt, in dem für ein Merkmal räumliche Korrelation vorliegt. Eine hohe Reichweite steht für eine hohe räumliche Kontinuität und geringe Kriging-Gewichtungsfaktoren.

Eine Drift liegt vor, wenn die Varianz mit dem Abstandsvektor ansteigt, ohne dass ein Schwellenwert erreicht wird. In diesem Fall ist die intrinsische Hypothese nicht gültig. Es wird zwischen externer und interner Drift unterschieden. Bei externer Drift geht man von einem Trend-Anteil einer zusätzlichen Variable aus und nutzt nur die Residuen zur Variographie (Universal Kriging). Treten unterschiedliche Variogrammparameter für verschiedene Richtungen auf, liegt Anisotropie vor. Ein solcher Fall zeigt, dass die Struktur der räumlichen Variabilität richtungsabhängig unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Landschaftliche Prozesse haben oft eine spezifische Richtung, z. B. entlang der Hauptabflussrichtung. Entlang dieser Richtung kann durch Berücksichtigung der Anisotropie eine stärkere Gewichtung erfolgen. Für die Interpolation der Höhen wurden Toleranzbereiche des Öffnungswinkels von 30° - 60° verwendet, um der häufig komplexen Reliefstruktur, die keine eindeutig orientierte Anisotropie aufweist, ein einheitliches, geglättetes Modell zuzuweisen (Abb. 3-12). Bei SURFER entspricht eine Toleranz von 90° dem omnidirektionalen Variogramm. Bei planarer Hanglage wurde ein Toleranzbereich $<45^\circ$ gewählt und dieser entlang gleicher Geländehöhe ausgerichtet.

An das empirische Variogramm wird eine Funktion angepasst und deren Parameter bei der Gewichtung der zu interpolierenden Messwerte verwendet. Übliche Funktionen sind das Gauß-Modell, das sphärische Modell und das exponentielle Modell (Cressie, 1993) sowie das Power-Modell (Pannatier, 1996). Simple lineare Modelle ergeben sich als Spezialfall des Power-Modells. Nur für zwei Variogramme der über 50 RTK-GPS-Datensätze dieser Arbeit bot sich das Gauß-Modell an, für die Mehrzahl ergab das Power-Modell die beste Anpassung (Abb. 3-13):

$$\gamma(h) = C[h^n] \quad (3-12)$$

mit $1 < h < 2$ und $0 < n < 2$.

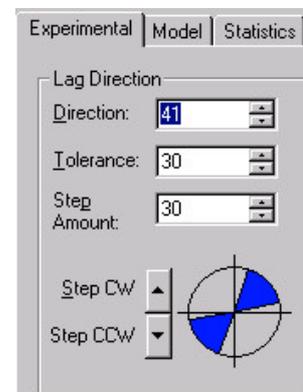


Abbildung 3-12: Öffnungswinkel-Toleranz von 30° eines gerichteten Variogramms bei SURFER 7.0.

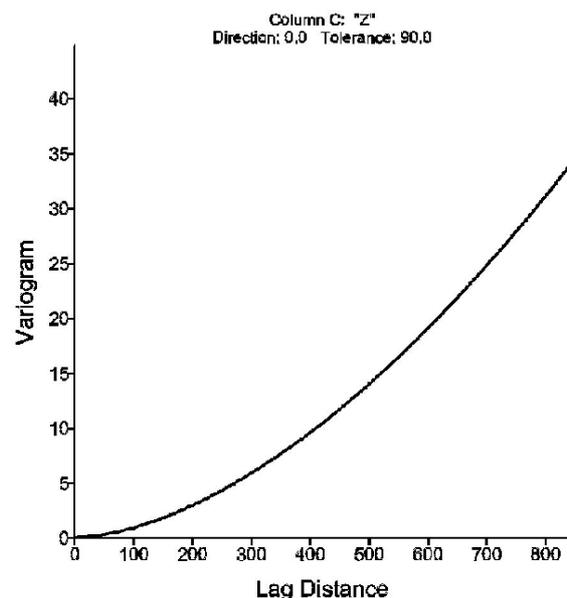


Abbildung 3-13: Beispiel für ein typisches Power-Modell mit den Parametern Power = 1.7, Scale = 14 und Length=500

Der Parameter $n = 1$ ergibt den Spezialfall „lineares Modell“. Bei der Verwendung des Power-Modells wird in dieser Arbeit angenommen, dass ein Schwellenwert außerhalb des Messbereiches erreicht wird und das Variogramm nur für eine lokal begrenzte Interpolation mit kurzer Reichweite (hier: 50 - 300 m) angepasst wird. Eine gute Anpassung im Bereich nahe des Ursprungs, wie sie mit dem variablen Power-Modell gut gelingt, bestimmt erfahrungsgemäß das Interpolationsergebnis am stärksten (Wackernagel, 1998). Nach Blöschl (1996) zeigt der Trend, dass die räumliche Ausdehnung für die Variogrammerstellung zu gering gewählt wurde und weist darauf hin, dass eine Trendelimination auch zu einer Änderung der Skale, die aus Daten geschätzt werden kann, führt (siehe Kap. 4.5).

Für die RTK-Messdaten dieser Arbeit ergab die direkte Verwendung des Power-Modells beim Ordinary Kriging einen geringeren RMSE (root mean square error) als bei der Option Linear bzw. Quadratic Detrending mit SURFER 7.0 (Universal Kriging). Bei großen Schrittweiten (Lag-Distanzen) beeinflussen Drifts die Krige-Schätzung wenig, da weit entfernte Punkte nur mit geringem Gewicht in die Krige-Gleichung eingehen.

Mit den oben genannten Parametern kann die Krige-Interpolation durchgeführt werden. Der zu schätzende Wert ist

$$z(x_0) = \sum_{i=1}^n l_i z(x_i) \quad (3-13)$$

mit $\sum(\lambda_i) = 1$.

Die Gewichte der Nachbarpunkte werden durch Umformung folgender Gleichung erhalten:

$$g_{i,o} = \sum_{i=1}^n l_i * g_{i,j} + \mu \quad (3-14)$$

mit $\gamma_{i,0}$ = Semivarianz zwischen Nachbarpunkt x_i und dem zu schätzenden Punkt x_0 ,

$\gamma_{i,j}$ = Semivarianz zwischen den Nachbarpunkten i und j ,

μ = Lagrange'scher Multiplikator.

Bei der Interpolation von Höhendaten fanden geostatistische Verfahren erst in den letzten Jahren verstärkte Anwendung (Minasny et al., 1999; Bishop et al., 1999), Schwerpunkte liegen bei diesem für geologische Fragen entwickelten Verfahren bei der Interpolation und Charakterisierung von Bodeneigenschaften (Western et al, 1998a; Oliver, 1999). Herbst (2001) fand bei der Untersuchung verschiedener Kriging-Varianten für die Interpolation von Bodenparametern, dass Ordinary Kriging im Vergleich zu Regression Kriging und External Drift Kriging stärker glättet und die natürliche Variabilität vermindert. Dieser Effekt ist bei Höhendaten hoher Auflösung für die Oberflächenmodellierung als günstig zu bewerten, um Messungenauigkeiten und Bodenrauigkeit durch Pflanzen (z. B. bei Laserscanning) zu unterdrücken.

Splines und Minimum Curvature

In dieser Arbeit wurden folgende Methoden, die Oberflächen minimaler Krümmung erzeugen, verwendet:

- Tension Spline (ArcView),
- Minimum Curvature (SURFER),
- Locally adaptive Gridding (Topogridtool ARC/INFO).

Splines bestehen aus zusammengesetzten Polynomen niedriger Ordnung. Zusammengesetzte kubische Polynome zählen zu den verbreitetsten Interpolatoren, da sie eine glatte Oberfläche mit minimaler Krümmung erzeugen, die sowohl optisch attraktiv wirkt als auch für die Ableitung von theoretischen Abflussbahnen in der Landschaft von Vorteil ist. Je niedriger der Polynomgrad, desto geringer sind die zu erwartenden Fehler durch das typische

Ausschwingverhalten, das vor allem bei unregelmäßiger Stützpunktverteilung auftritt (Wild, 1983). Das Spline-Verfahren ist kein exakter Interpolator, d. h. einzelne Messpunkte werden teilweise stark geglättet, um die Krümmung der Oberfläche niedrig zu halten. Mit der Angabe eines Spannungsparameters (Tension) kann die Bedeutung einzelner Messpunkte reguliert werden. Die Anzahl der Eingangspunkte, die einen Einfluss auf den zu interpolierenden Punkt ausüben, kann in der Regel angegeben werden. Problematisch ist die häufig vorkommende Ausschwingung von extrapolierten Werten, vor allem in den Randbereichen des Gitters. Bei ArcView kann die Anzahl der zu berücksichtigenden Punkte angegeben werden und statt Tension auch ein reguläres Spline-Verfahren gewählt werden. Dies erwies sich jedoch bereits in Vorversuchen als zu stark glättend für die RTK-GPS-Daten.

Minimum Curvature bei SURFER 7 erzeugt zuerst ein einfaches planares Modell und interpoliert die Residuen an den Gitterpunkten mit einer biharmonischen Differenzialgleichung unter Spannung (Kriterium: Minimales Quadrat des Laplace-Operators), bevor die Werte des planaren Regressionsmodells an den Gitterpunkten wieder addiert werden.

Eine ausgefeilte Variante speziell für hydrologische Auswertungen bietet das Topogridtool von ARC/INFO, das auf dem Programm ANUDEM (Hutchinson und Gessler, 1994; Hutchinson, 1996) basiert. Dieses sogenannte „locally adaptive gridding“ ist eine iterative Methode, die diskretisierte Thin Plate Splines nutzt. Der Vorteil gegenüber Minimum Curvature ist dabei eine Reduzierung der Ausschwingungen (Hutchinson und Gallant, 2000). Das Topogridtool berechnet in einem ersten Schritt Geländerrücken und Rinnen an den Punkten maximaler Horizontalkrümmung als curvilineare Elemente zur lokalen Anpassung der Geländeoberfläche. Somit wird gleichzeitig das Netzwerk an Abflussrinnen und Gelände-rippen erstellt und als Randbedingung berücksichtigt. Bei der eigentlichen Interpolation wird schrittweise das Ergebnis verfeinert. Ein lokal angepasstes Kriterium minimiert die Vertikalkrümmung. Geländedepressionen können optional entfernt werden, um die Abflussbedingung aufrecht zu erhalten. Für die Schläge in der Jungmoränenlandschaft darf dies nicht verwendet werden, da die sogenannten „spurious pits“, die bei den DGMs geringerer Qualität oft als Interpolationsartefakte gelten, ein typisches Phänomen der Landschaft sind.

Lineare Prädiktion mit der Kovarianzfunktion

Die lineare Prädiktion ist ein stochastisches Verfahren auf Basis der Methode der kleinsten Quadrate (Wild, 1983). Es wird unterschieden zwischen einem deterministischen Anteil und einem korrelierten Anteil des Messwertes. Die Korrelation der beteiligten Messpunkte untereinander wird durch eine Kovarianzfunktion festgelegt, die aus den Daten geschätzt wird (Kraus, 2000). Um auch zufällige Messfehler zu berücksichtigen, wird bei SCOP die Kovarianzfunktion bei einem Messpunktabstand $d = 0$ kleiner als die Varianz gewählt.

Die verwendete Kovarianzfunktion lautet

$$C(P_i P_k) = C(0) e^{-\left(\frac{P_i P_k}{c}\right)^2} \quad (3-15)$$

mit

$C(0)$ = Scheitelwert (= Kovarianz für $P_i P_k = 0$),

c = Konstante für die Neigung der Kovarianzfunktion im mittleren Bereich.

Die Voraussetzungen zur Anwendung der Kovarianzfunktion bei Geländehöhen ist nach Kraus (2000) erst nach Abspaltung eines deterministischen Anteils (Trend) gegeben. Die ursprünglichen z-Koordinaten können nach Abspaltung des Trends noch in den unregelmäßigen Anteil r_i und den systematischen Anteil s_i zerlegt werden. Nach Abspaltung des Trends werden die Stützpunkthöhen als zentrierte Stützpunkthöhen bezeichnet und zur Berechnung der Varianz V_{zz} verwendet.

Bei SCOP wird der Scheitelwert $C(0)$ aus dem bekannten unregelmäßigen Höhenfehler σ_z und der Varianz der zentrierten Stützwerte V_{zz} ermittelt als

$$C(0) = V_{zz} - \sigma_z^2 \quad (3-16)$$

Aus den empirischen Kovarianzen C_j lässt sich für jedes Entfernungsintervall der c -Wert bestimmen als

$$c_j = \frac{d_j}{\sqrt{\ln\left(\frac{C(0)}{C_j}\right)}} \quad (3-17)$$

mit

$$\begin{aligned} d_j &= \text{mittlere Distanz zwischen den Messpunkten,} \\ C_j &= \text{empirische Kovarianz der Entfernungsintervalle } d_j - \Delta d \leq P_i P_k \leq d_j + \Delta d. \end{aligned}$$

Der endgültige c -Wert ergibt sich aus einer gewichteten Mittelwertbildung.

Auf Basis der so ermittelten Kovarianzfunktion wird eine Interpolation nach kleinsten Quadraten durchgeführt, um den Schätzwert z^* zu erhalten:

$$z^* = c^T C^{-1} z \quad (3-18)$$

In der Matrix C treten dabei die Kovarianzen $C(\overline{P_i P_k})$ zwischen den Stützstellen auf, die der Kovarianzfunktion entnommen werden. Wird an der Entfernung $d = 0$ statt des Scheitelwertes $C(0)$ die Varianz V_{zz} verwendet, wird die Interpolation mit einer Filterung ähnlich des Nugget-Effektes beim Kriging durchgeführt. Die Residuen an den Stützpunkten liegen dabei in der Größenordnung des angenommenen Höhenfehlers σ_z (Kraus, 2000).

Da dieses Verfahren einen linearen Zusammenhang zwischen dem Schätzwert z^* und den Stützwerten z impliziert, zählt es zu den Methoden der linearen Prädiktion. Die Bezeichnung „Interpolation nach kleinsten Quadraten“ bezieht sich auf die Minimierung der Varianz der Schätzungen.

Stärken von SCOP liegen in der robusten Filterung (Kraus und Pfeifer, 2001), speziell bei der Entfernung von Vegetations- und Gebäudepunkten bei Laserscannerdaten. Dabei wird zuerst eine Trendfläche generiert und darüber liegende Punkte als „off-terrain“ klassifiziert. Punkte mit einer großen (gerichteten) Höhendifferenz zu der approximierten ersten Oberfläche bekommen ein geringeres Gewicht bei der Interpolation. Die Interpolation wird iterativ durchgeführt, bis eine stabile Situation erreicht ist. Die Gewichtsfunktion weist somit Bodenpunkten (unter oder auf der approximierten Oberfläche) einen hohen Wert zu. Im Unterschied zu den oben beschriebenen Kriging-Verfahren wird bei SCOP ein fester Filterwert und die Glockenkurve als Funktion vorgegeben. Die Kovarianzfunktion wird patchweise angewendet.

Eine Gegenüberstellung mit dem Krige-Schätzer findet sich bei Kraus (1998). Bei weit entfernten Schätzpunkten tendiert die Methode der kleinsten Quadrate mit der Kovarianzfunktion gegen Null, während der Krige-Schätzer den Mittelwert der Stützwerte anstrebt. Die Variogrammfunktion und die Kovarianzfunktion sind einander komplementär:

$$\gamma(\overline{P_i P_k}) = V_{zz} - C(\overline{P_i P_k}) \quad (3-19)$$

Wackernagel (1998) betont, dass dies nur für transitive Modelle gegeben ist. Die in dieser Arbeit überwiegend verwendeten Power-Modelle haben nicht den notwendigen Schwellenwert. Beim Ordinary Kriging wird zusätzlich die Bedingung berücksichtigt, dass die Summe der Gewichtungsfaktoren eins ist, um eine „Erwartungstreue“ der Schätzung zu berücksichtigen. Kraus (1998) weist nach, dass bei einer horizontalen Ebene als Trendfläche beide Verfahren identisch sind. Bei der Variogrammfunktion können statt der zentrierten Stützwerte auch ursprüngliche verwendet werden, da der Trend ohne Einfluss auf die Differenz $z_i - z_k$ bleibt (Kraus, 1998).

3.3.3 Untersuchungen zur Genauigkeit

Als Maß zum Vergleich der Interpolationsverfahren wurde der RMSE (root mean square error) berechnet. Dieses Fehlermaß (in der Einheit Meter) beschreibt die mittlere Abweichung eines Punktes von einer Referenzfläche und berechnet sich als

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum (x_i - z_i)^2} \quad (3-20)$$

mit

- x_i = Schätzwert,
- z_i = Höhe der Referenzfläche,
- n = Stützpunktzahl.

Der RMSE entspricht der in der Geodäsie üblichen Standardabweichung. Die Referenzfläche stellen die bei der jeweiligen Interpolation nicht berücksichtigten RTK-Messpunkte dar. Nicht berücksichtigt wurden jeweils vollständige Fahrgassen, sodass die Interpolation über eine, zwei oder drei Fahrgassen hinweg durchgeführt wurde. Für die Berechnung des RMS-Fehlers mit ArcView wurde ein AVENUE-Script geschrieben. Eingangsdaten sind das interpolierte DGM-Grid und die bei dessen Interpolation nicht berücksichtigten RTK-Messwerte. Tab. 3-11 zeigt einen Vergleich verschiedener Interpolationsverfahren bei unterschiedlichen Schätzdistanzen. Im Gegensatz dazu zeigt Tab. 3-12 die Auswirkungen variabler Fahrgassenabstände bei konstanter Methode (Kriging). Tab. 3-12 gibt somit 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. Beide Tabellen zeigen RMSE und maximale Fehler von n Kontrollpunkten einer linienhaften Aufnahmegeometrie (Abb. 3-2). Die Ergebnisse verschiedener Schläge können als vergleichbar angenommen werden, da sie im gleichen Landschaftstyp „Jungmoränenlandschaft“ liegen und ähnliche Höhendifferenzen und Strukturen aufweisen (zu Lage und Charakteristik siehe Anlage).

Tabelle 3-11: Schätzgenauigkeiten von Interpolationsverfahren für n Kontrollpunkte eines RTK-GPS-Modells der preagro-Schläge.

| 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. Model) | 0,17 | 0,97 | 36 | 104 | 4830 |
| Ordinary Kriging (Power Model) | 0,18 | 0,96 | 36 | 104 | 4830 |
| Topogridtool (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 |
| Topogridtool (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. 3-11 zeigt die erwartete Überlegenheit von Kriging-Verfahren, SCOP und Topogridtool, vor allem bei zunehmenden Schätzentfernungen sowie die Probleme der Spline und Minimum Curvature-Interpolationen mit Ausschwingungen (hohen max. Fehlern). Bei niedrigen Fahrgassenabständen liegt der RMSE bei allen Verfahren ähnlich, Probleme gibt es jedoch bei Artefakten in halber Schätzdistanz bei IDW (s.u.). Wurden Splines unter Spannung (Tension) gelegt, sank der RMSE 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. Nicht lösen konnte Kriging die Interpolationsaufgabe lediglich mit dem Gauß-Modell ohne Nugget-Varianz. Eine optimale Anpassung des Variogrammmodells für Teilschlag c (Abb. 3-14) wäre bei einem Nugget von Null gegeben.

Tabelle 3-12: Vergleich der Schätzgenauigkeit mit Kriging bei wachsendem Messpunktabstand (RTK-Daten) für Teilgebiete von Schlag 111 (Kassow) bei originalem Messpunktabstand (Fahrgassen) von 9 m bzw. 6 m.

| Teilschlag [Größe, max. Höhenunterschied]. | RMSE [m] | Max. Fehler [m] | Messpunkt-abstand [m] | n |
|--|----------|-----------------|-----------------------|------|
| Teilschlag a [18 ha; 7,7 m] | 0.09 | 0.34 | 9 | 1188 |
| | 0.09 | 0.31 | 18 | 552 |
| | 0.11 | 0.43 | 27 | 775 |
| Teilschlag b [11 ha; 11, 3 m] | 0.12 | 0.53 | 9 | 1969 |
| | 0.13 | 0.60 | 18 | 912 |
| | 0.11 | 0.50 | 27 | 1236 |
| Teilschlag c [12 ha; 11,0 m] | 0.12 | 1.45 | 6 | 3878 |
| | 0.12 | 1.37 | 12 | 2035 |
| | 0.13 | 1.38 | 18 | 2540 |

Tabelle 3-13: Änderung der Schätzgenauigkeit im Vergleich zum Laserscanning-DGM für Teilschlag c (Fahrgassenabstand 6 m) in Abhängigkeit der Nugget-Varianz (Gauß-Modell).

| Nugget [m*m] | RMSE [m] | Spannweite [m] |
|--------------|----------|----------------|
| 0,0001 | 0,043 | 1,32 |
| 0,001 | 0,051 | 1,35 |
| 0,01 | 0,064 | 1,37 |
| 0,05 | 0,089 | 1,42 |

Tab. 3-12 zeigt für den Messpunktabstand 9 m die Auswirkung der Filterung beim Kriging. Hierbei wurden sämtliche Punkte sowohl zur Interpolation als auch zur Kontrolle abgegriffen. Die Abweichungen entstanden durch die Filterung bei einem Nugget von 0,05 m². Die Auswirkungen des glättenden Nugget-Effekts auf die Fehler (Abweichungen zum Laserscanner-Modell) sind in Tab. 3-13 dargestellt. Generell lagen die Schwankungen der Genauigkeit von Schlag zu Schlag größer als durch die Verdopplung der Schätzdistanz. Da das Untersuchungsgebiet einen sehr kleinräumigen, unsystematischen Wechsel von Reliefformen aufweist, sollte davon ausgegangen werden, dass in jedem Fall die Formen in vollständiger Ausdehnung erfasst wurden und eine weitere Verringerung des Fahrgassenabstandes nicht notwendig ist. Die hohen maximalen Fehler bei Teilschlag c lassen auf eine lokale Störung bei der GPS-Vermessung schließen, die jedoch im RTK-Modus nicht aufgezeichnet wurde. Diese These wird unterstützt durch die Tatsache, dass bei größeren Schätzdistanzen der maximale Fehler sinkt und damit offenbar auf einer bei der Interpolation nicht berücksichtigten Fahrgasse sein Maximum hat. Ähnliches ist

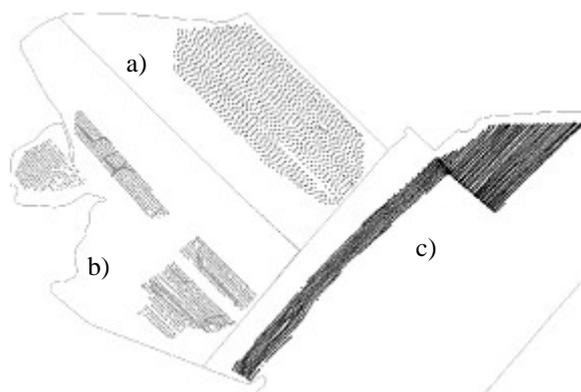


Abbildung 3-14: Teilschläge von Kassow 111, Vgl. Abb. 3-14 und Tab. 3-13. Teilgebiet b) umfasst 4 Bereiche.

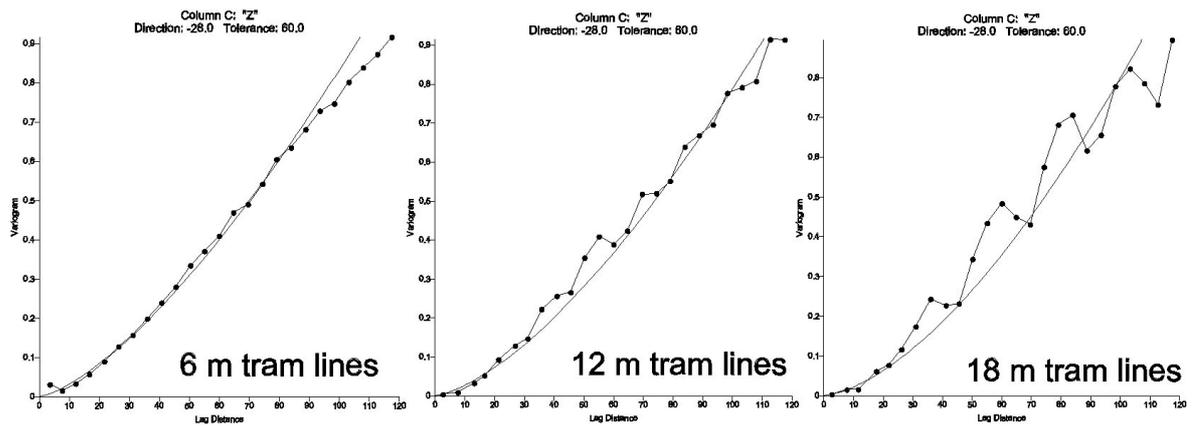


Abbildung 3-15: Empirische Variogramme für Kassow 111 Teilschlag c (Abb. 3-16) und angepasstes Power-Modell. Eine Erhöhung der Messpunktzahl glättet das empirische Variogramm. Ausreißer der Messwerte sind beim 6 m Messpunktabstand durch hohe kleinräumige Varianz zu erkennen.

für den geringeren RMSE auf Teilschlag b für den Messpunktabstand 27 m zu erwarten. Die Abweichungen der optimalen Interpolation zum Laserscanner-DGM lagen für alle Gebiete zwischen 0,04 und 0,09 m (siehe z. B. Tab. 3-14). Abb. 3-15 zeigt die empirischen Variogramme für Teilschlag c. Die Verringerung der Messpunktzahl ändert trotz eines „unruhigen“ Variogrammverlaufes nicht die Parameter, solange der Schwerpunkt auf die Anpassung des Nahbereiches gelegt wird. Die deutlichen Sprünge im Variogramm bei 18 m Abstand entsprechen der Messwertgeometrie. Die Ausrichtung des (gerichteten) Variogramms schnitt in diesem Fall die Fahrgassenrichtung. Jeweils für Lag-Distanzen im Bereich der Schnittpunkte mit den Fahrgassen treten hier höhere Varianzen auf, da dort die Punktzahl lokal höher ist (in Fahrgassenrichtung). Da dieses Phänomen nur auf diesem Teilschlag beobachtet wurde und mit dem insgesamt höheren RMSE im Vergleich zu den Nachbar-Teilschlägen einher geht, ist anzunehmen, dass die Koordinatenqualität bei der Kampagne geringer war. Die Vermessung fand bei Nebel über gefrorenem Boden im Februar 1999 statt, während a) und b) unter günstigen Witterungsbedingungen vermessen wurden. Somit kann das Variogramm auch zu Beurteilung der Messpunktqualität empfohlen werden, speziell bei linearen Aufnahmegeometrien und kleinen Gebietsausschnitten.

Abb. 3-16 zeigt am Beispiel des kleinen Teilschlages c) deutlich, wie sich die Gestalt eines Variogramms mit der Lag-Distanz ändern kann. Bei einer maximalen Lag-Distanz von 160 m bietet sich die Anpassung eines transitiven Modells an. Erhöht man die Lag-Distanz auf die

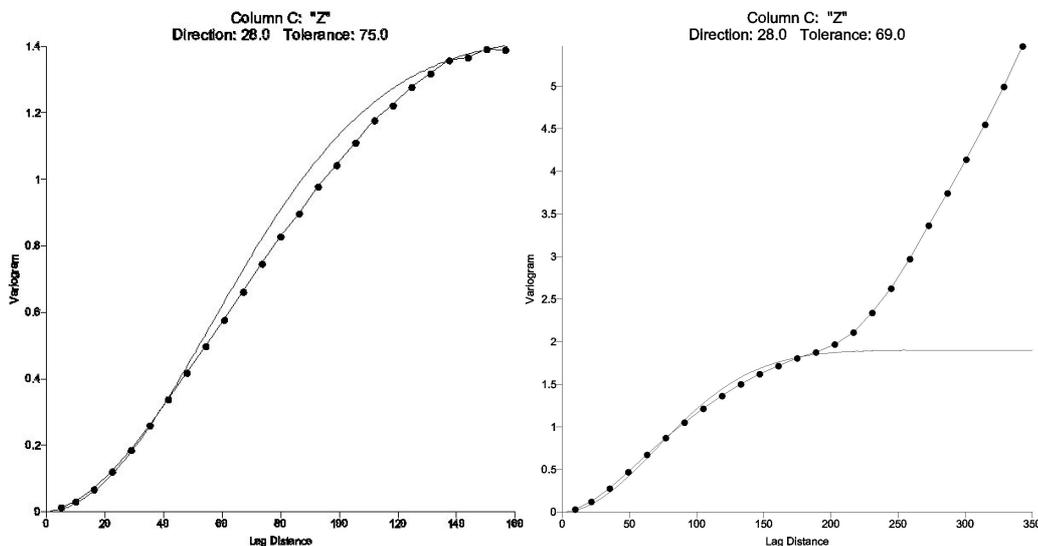


Abbildung 3-16: Variogramme für Teilgebiet c) mit größeren Lag-Distanzen und größerer Toleranz des Öffnungswinkels (Glättung) im Vergleich zu Abb. 3-15. Basis: 3878 Punkte.

Hälfte der Untersuchungsgebiets-Ausdehnung, ist ab ca. 200 m Lag-Distanz ein Skalenübergang zu beobachten, der in der Struktur des Teilgebietes c) begründet liegt. Der Drift-Anteil erklärt sich dadurch, dass der schmale südwestliche Teil von c) an einem gestreckten Hang liegt, während die kompakte Fläche im Nordosten gering reliefiert ist. In solchen Fällen sollten kleinere Teilgebiete getrennt modelliert werden, z. B. über lokale Variogrammanpassung wie die Software VESPER sie anbietet (Minasny et al., 1999).

3.3.4 Bewertung und Diskussion

Die in dieser Arbeit erstellten DGMs weisen bei einer Interpolation von RTK-GPS-Messpunkten aus den meist 18 m entfernt liegenden Fahrgassen landwirtschaftlicher Flächen Genauigkeiten von $\pm 0,15$ m auf. Die Genauigkeit nimmt mit wachsendem Fahrgassenabstand ab. Unterschiede zwischen den Interpolationen mit SCOP, ARC/INFO Topogrid und Kriging (SURFER) sind gering. Von automatischen Modellanpassungen bei Kriging-Interpolationen, wie in ArcView-Erweiterungen möglich, ist abzuraten. Die hier vorgestellten Ergebnisse auf Grundlage eines RMSE erlaubten nur eine Vergleichbarkeit von einzelnen Genauigkeiten. Mit dem RMSE wird eine nicht-räumliche Statistik für raumbezogene Phänomene verwendet. Deshalb ist zusätzlich die Bewertung der Oberflächenbeschaffenheit notwendig. Dazu geben Ableitungen aus dem DGM eine gute Einschätzung. Neigung und Beleuchtungsmodelle reagieren sensibel auf kleine Anomalien und weisen somit auf Fehler der Ausgangsdaten oder Schwächen der Interpolation hin. Für die Bewertung wurde hier auch die Ableitung der potenziellen Abflussbahnen aus dem DGM herangezogen (Abb. 3-7, Abb. 3-17).

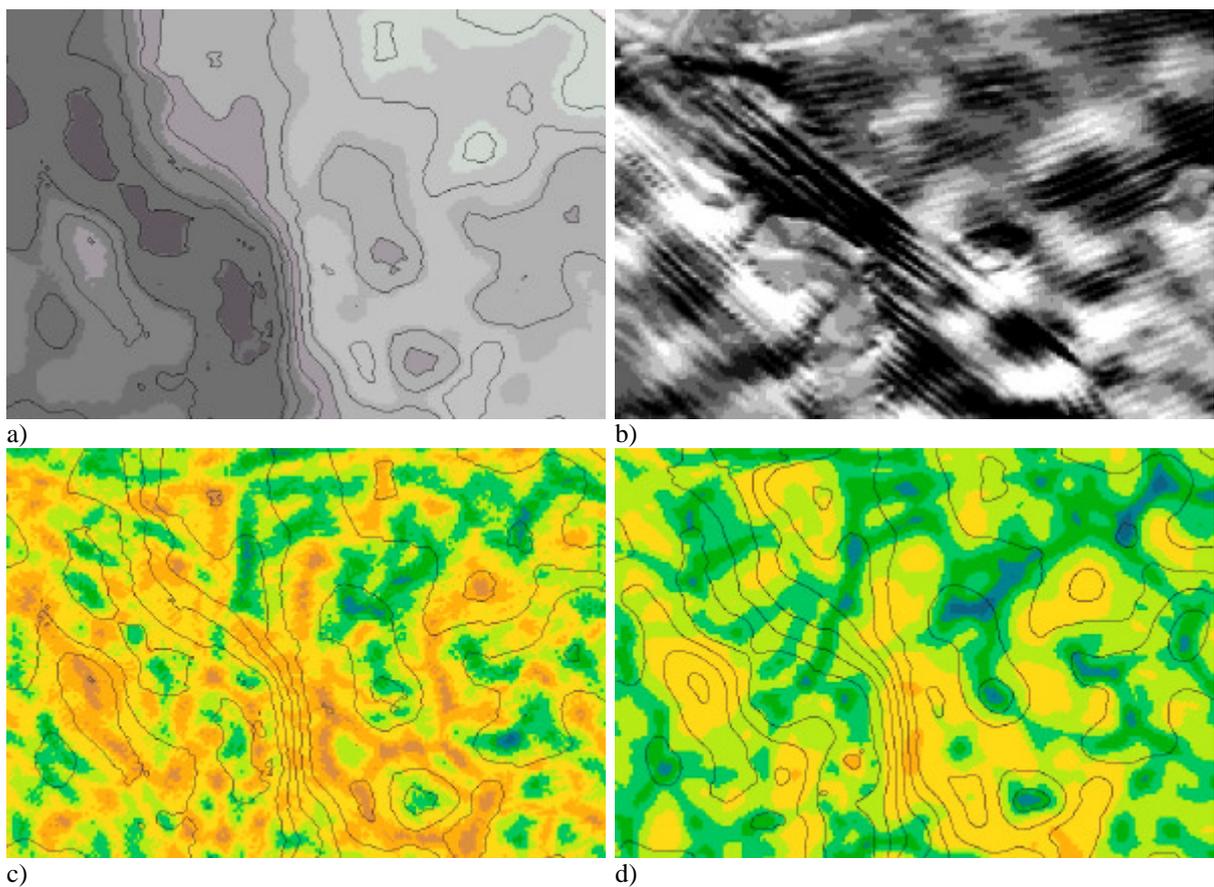


Abbildung 3-17: DGM auf RTK-Basis im Übergang von Schlag 107 zu 104. Abb. 3-17 a): 1 m-Isolinien des IDW-DGMs, b): Hillshade des IDW-DGMs mit Bulleye-Effekten an einzelnen Messpunkten und Neigungsunstetigkeiten zwischen den Fahrgassen; c): Auswirkung auf die Ableitung von Abflussbahnen (dunkelgrün bis blau); d): Abflussbahnen auf Basis eines Kriging-DGMs (1m-Isolinien des Kriging-DGMs). Kantenlänge 1 km.

Die Vorteile des IDW-Verfahrens liegen bei der hohen Geschwindigkeit, auch bei großen Punktmengen. Typischerweise führt eine IDW-Interpolation zu kegelartigen Formen um einzelne Messpunkte („Bulleye-Effekt“) und bei linienhafter Aufnahmegeometrie zu Neigungsunstetigkeiten auf halber Schätzdistanz (parallel zu den Fahrgassen). Diese entstehen auf Grund der Unterbewertung der vergleichsweise weit entfernten Nachbarn der nächsten Fahrgasse (Abb. 3-17). Ein Glättungsfaktor, der Nachbarwerte stärker wichtet, kann diese Effekte mildern, nivelliert allerdings auch das DGM. Das Verfahren eignet sich für die DGM-Interpolation nur bei hoher Dichte geometrisch gleichverteilter Messpunkte oder für einen ersten Eindruck des Geländes. Günstig ist das Verfahren wegen seiner schnellen Prozessierung allerdings für ein Resampling, wenn die Daten schon annähernd rasterförmig und in gewünschtem Umfang gefiltert vorliegen. Für hydrologische Modellierungen, vor allem die Ableitung von Fließpfaden, sind die in dieser Arbeit erzeugten IDW-Modelle inakzeptabel (Abb. 3-17c).

Die Kriging-Interpolation mit Power-Modellen aus SURFER 7 führte sowohl zu den niedrigsten RMS-Fehlern als auch zu hydrologisch günstig auswertbaren DGMs. Als günstig gilt ein DGM hierbei, wenn sich auf der modellierten Oberfläche klare Strukturen der Abflussbildung ergeben. Siehe dazu Kapitel 4.2.1.

Falls keine interaktive Anpassung eines Modells an das empirische Variogramm möglich ist, muss das Kriging-Verfahren als kritisch betrachtet werden. Durch die Variogramm-Modellierung ergeben sich zusätzliche Aussagen über die Struktur der Messdaten, wie die kleinräumige Varianz (als Maß für die Güte der Einzelmessungen) oder Trends in der Landschaft. In Kapitel 4.5 soll versucht werden, daraus ein Maß zur Geländebeschreibung abzuleiten. Stärken der Kriging-Verfahren zeigten sich im Vergleich zu Splines bei den geringen Ausschwingungen, wenn stellenweise über weitere Distanzen interpoliert werden musste (z. B. bei GPS-Signalausfall). Auf Reliefformen bezogen wurden bei großen Interpolationsweiten die Randbereiche von Senken und Hangschultern tendenziell leicht unterschätzt und rinnenartige Formen überschätzt (d. h. geglättet). Die Besonderheiten bei der DGM-Interpolation auf RTK-GPS-Datengrundlagen mit Kriging liegen im Vergleich zu den klassischen Anwendungen in einer sehr hohen Punktzahl (Support), was zu glatten Variogrammverläufen führt. Die untersuchten Höhendaten zeigten überwiegend intransitive Modelle. Dies kann auf die geringe Ausdehnung der Schlagflächen und die häufig vorkommenden leichten Hanglagen zurückgeführt werden. Eine Sensitivitätsanalyse zeigte, dass die Interpolationsergebnisse bei Variation der Parameter nur zu Unterschieden unterhalb der Messgenauigkeit der Eingangsdaten führte, solange eine optisch gute Anpassung des Variogramm-Ursprungs (ca. 30 - 120 m) gelang. Variogramm-Modelle wurden in vielen Studien als robust bestätigt (Wackernagel, 1998). Die beobachteten Probleme mit dem Gauß-Modell werden ebenfalls bei Wackernagel (1998) diskutiert. Von den untersuchten Spline-Verfahren kann auf Grund der großen Ausschwingungen für die gegebenen Aufnahmegeometrien nur das Topogrid-Tool von ARC/INFO empfohlen werden, das eine zeiteffiziente und hydrologisch günstige Interpolation mit geringen Unterschieden zum Kriging-DGM gewährleistet. Für die Anwendung des Topogrid-Tools in Jungmoränenlandschaften ist es notwendig, auf das Entfernen von Mulden („spurious pits“) zu verzichten, da diese real vorkommen. Die ArcView Splines konnten für große Punktmengen die Interpolationsaufgabe nicht lösen. Bishop und McBratney (1999) fanden bei einer Untersuchung von verschiedenen Schlägen in den USA für ein 5 m Grid bei einer Kreuzvalidierung, bei der nur 20 % der Messpunkte ausgelassen wurden, ähnliche RMS-Fehler für Topogrid (0,09 - 0,23 m) und auch Kriging-Verfahren (0,09 - 0,25 m).

Die lineare Prädiktion mit SCOP wurde am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (TU Wien) für die RTK-Daten aus Kassow gerechnet. Die Differenzen zur Kriging-Interpolation lagen lediglich im Bereich einer Standardabweichung von $\pm 0,01$ - 0,02 m. Die Oberflächengüte weist für hydrologische Auswertungen ebenfalls eine vergleichbare Qualität auf. Ähnlich wie bei den gekrigten DGMs wirken sich linienförmige Stützpunktanordnungen

durch die Anpassung der Gewichtsfunktion (Wild, 1983) kaum negativ auf die Prädiktionsfläche aus. Die bekannten Vorteile von SCOP, die Berücksichtigung von Geländekanten, die Datenfilterung bei Daten mit schiefer Fehlerverteilung (z. B. Laserscanner) und die unterschiedliche Gewichtung von Punkteklassen wirken sich auf Ackerflächen, wo sämtliche Daten als Massendaten ohne Vegetation und Kanten eingehen, nicht aus.

3.4 Diskussion

Angaben zur Qualität Digitaler Geländemodelle lassen sich einteilen in Messgenauigkeit und Interpolationsgenauigkeit, letztere weiter in Punktdichte und -anordnung, Interpolationsmethode und ergänzende Angaben zur Komplexität des Geländes. Daraus sollte zur Beurteilung die horizontale Auflösung und die vertikale Präzision abgeleitet werden.

Als kostengünstigste Aufnahmemethode unter landwirtschaftlichen Bedingungen und Anforderungen zeigte sich das fahrzeuggestützte, hochpräzise DGPS. Die Datenerfassung kann mit der normalen Feldbearbeitung oder anderen Sensorüberfahrten gekoppelt werden, um Arbeitszeit und Treibstoff zu sparen. Die Erfassung im Real-Time Kinematic Mode (RTK) ermöglicht eine Kontrolle der Koordinatenqualität noch während der Befahrung und ein gezieltes Anfahren von Messpunkten, während eine Postprozessierung der Satellitenbeobachtungen die Probleme des konstant zu empfangenden Referenzsignals vermeidet. Tests mit preisgünstigen Einfrequenzempfängern und einer Mittelung mehrfacher Überfahrten zur Signalfilterung erwiesen sich als nicht ausreichend zur Ableitung der notwendigen DGM-Qualität. Eine bessere Datenqualität der Mehrfachüberfahrten wird für niedrigere Fahrgeschwindigkeiten erwartet. Trotzdem bleibt eine hohe Anzahl an Überfahrten zu realisieren, was zusammen mit dem höheren Nachbearbeitungsaufwand (Datenfilterung) die hohen Kosten eines Zweifrequenzempfängers bei hoher Flächenleistung durch Dienstleister relativiert.

Die Interpolation ist mit vielen Standardmethoden möglich. Jedoch ergaben nur wenige Verfahren die notwendigen Oberflächeneigenschaften für weitere DGM-Ableitungen, vor allem bei weiteren Fahrgassenabständen, wie sie auf größeren Schlägen üblich sind. 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). Als preisgünstige und schnell erlernbare Software bietet SURFER 7 eine interaktive Variogrammerstellung und Kriging-Interpolation, die lediglich mit dem Gauß-Modell zu Problemen führte. 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. Solche Parameter sollten als Metainformationen dem DGM beigelegt werden, um eine Abschätzung der Güte von Ableitungen zu ermöglichen. Als weiterer Qualitätsanzeiger sollte ein Beleuchtungsmodell („Hillshade“) des DGM und die Aufnahmegeometrie mitgeliefert werden, sodass die Bereiche größerer Unsicherheit erkannt werden können.

Zur Ableitung einer optimalen horizontalen Auflösung schlagen Wilson und Gallant (2000) vor, den Neigungs-RMSE bezogen auf das beste, verfügbare DGM gegen die Rasterweite aufzutragen. Als Optimum wird der Bereich der Abflachung des Graphen betrachtet, ab welchem bei stark ansteigender Datenmenge nur ein marginaler Qualitätszugewinn erzielt wird. Auf Grund der geringen flächenhaften Ausdehnung der meisten Schläge kann im landwirtschaftlichen Bereich mit den optimalen Rasterweiten von 2 - 10 m gerechnet werden.

Wise (1998) zeigt, dass bei gleichen (geringen) RMSE erhebliche Unterschiede bei den Ableitungen aus dem DGM berechnet werden, was in der vorliegenden Arbeit bestätigt wurde. Vor allem die Verwendung unterschiedlicher Aufnahmeverfahren zeigte die Aus-

wirkung einer Höherfassung auf verschiedenen Skalen. Der hohe Detailreichtum der 2 m Grids aus der Laserscannervermessung führt zu erschwerter Interpretation von DGM-Ableitungen. Hohe Punktdichten führen in einen Maßstabbereich, in dem Oberflächenprozesse und oberflächennaher Fluss des Wassers nicht durch einfache Indizes aus einem DGM repräsentiert werden können. Einen Problemfall für die Modellierung stellen die Laserscannerdaten gerade wegen ihrer hohen vertikalen Auflösung dar, wenn die Vermessung während der Wachstumsperiode erfolgt. Es sind sämtliche Fahrgassen erkennbar, da der dichte, nur ca. 0,1 m hohe Pflanzenbestand zum Aufnahmezeitpunkt zu einem Mischsignal aus Geländeoberfläche und Vegetation führte, das bei der Vorfilterung durch TOPSCAN nicht getrennt wurde (Abb. 3-10). Wird dieses DGM ungefiltert für die Ableitung von Parametern verwendet, pausen sich die Fahrgassen vor allem in den Ableitungen wie den Geländeformen und bei Abflussmodellen durch. Dies kann durchaus von Vorteil sein (z. B. bei der Identifikation von Erosionsrinnen, die durch Fahrgassen gefördert werden), verfälscht jedoch Interpretationen, die sich auf die Oberflächenform oder oberflächennahe Parameter, wie die Bodenfeuchte, beziehen. Auch ein Heraufsetzen des Nuggets beim Kriging bzw. starke Filterung mit SCOP konnte die Effekte des dichten Weizenbestandes auf das DGM nicht mindern, ohne das DGM zu stark zu nivellieren. Solche Kleinstformen, wie hier die sich herauszeichnenden Fahrgassen, führen zu falsch abgeleitetem Abflussverhalten, da der Großteil des Abflusses parallel zur Erdoberfläche erfolgt. Die Lösung dieses Problems stellt eine Befliegung außerhalb der Vegetationsperiode dar.

4 Analyse von hochgenauen Digitalen Geländemodellen

In diesem Kapitel werden Methodik und Bedeutung von Ableitungen aus einem DGM im Hinblick auf die derzeit erreichbare Qualität bei vertretbaren Kosten für Landwirte betrachtet, um die Grundlagen für die Verbindung mit weiteren Datenebenen der Landschaftsanalyse und landwirtschaftlichen Anwendungen in den folgenden beiden Kapiteln darzustellen.

4.1 Grundlagen der Reliefanalyse

4.1.1 Bedeutung und Historie der Reliefanalyse

Mit dem Begriff „Georelief“ wird die Grenzfläche der festen Erdkruste gegen die Hydro- und Atmosphäre bezeichnet (Dikau et al., 1999), während vom angelsächsischen Sprachraum ausgehend mit „Relief“ lediglich die Spannweite der Geländehöhe eines Untersuchungsgebietes bezeichnet wird (z. B. Evans, 1998). Das Georelief wird seit vielen Jahrzehnten nach verschiedenen Ansätzen untergliedert. Mit „Reliefanalyse“ wird die physiognomisch gut fassbare räumliche Gliederung von Untersuchungsgebieten bezeichnet (Mannsfeld in Bastian und Schreiber, 1999). Das Georelief ist eine wichtige geoökologische Steuergröße für Klima, Abfluss, Bodenentwicklung, Vegetation, Wasser- und Stoffdynamik, Morphogenese sowie natur- und kulturgeschichtliche Erscheinungen (Bork und Dalchow, 2000). Leser (1991) weist auf die prozessregelnde Wirkung der geomorphographischen Merkmale Wölbung, Hangneigungsstärke und Exposition hin. Lane et al. (1998) betonen die Dynamik des Reliefs *als „not only the consequence of past processes but ... also a factor that affects the course of present erosion and hence the future morphology“*. Die Wechselwirkung zwischen Form und Prozess steht auch für Evans (1998) im Mittelpunkt der geomorphologischen Betrachtungen. Evans (1998) gibt einen Überblick, wie in den letzten 50 Jahren die Reliefattribute Höhe, Neigung, Exposition und Wölbung in geomorphometrische Systeme integriert wurden.

Die gängige hierarchische Gliederung des Georeliefs basiert auf der Ausweisung kleinster homogener Reliefeinheiten, so genannter Relieffacetten. Diese kleinsten Reliefeinheiten beschreiben Bereiche einheitlicher Geländeneigung und Exposition und können zu Formelementen zusammengesetzt werden. Die Geländeneigung beschreibt dabei die Änderungsrate der Höhe zwischen zwei Punkten im Gelände und wird in Grad [°] oder Prozent [%] 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 im Uhrzeigersinn mit 0° als Nordrichtung verwendet. Die ökologische Wirksamkeit der Exposition steigt mit der Hangneigung.

Formelemente (synonym: Reliefelemente) repräsentieren Bereiche einheitlichen Wölbungstyps und homogener Morphodynamik und können in einem folgenden Schritt zu Reliefformen aggregiert werden. Unter Wölbung wird hier 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).

Die Vertikalwölbung beschreibt die Änderung des Hangneigungswinkels entlang der Falllinie, also die Wölbung der Hangstreichrichtung. Unterschieden werden die Krümmungstendenzen „konkav“ und „konvex“ sowie der Grenzfall „gestreckt“ (Abb. 4-1). „Konvex“ steht für nach außen gewölbte Bereiche, d.h. die Hangneigung nimmt von oben nach unten zu, „konkav“ steht für nach innen gewölbte Bereiche.

Die Horizontalwölbung beschreibt die Änderung des Expositionswinkels entlang der horizontalen Streichlinie (auch: Krümmung der Höhenlinien). Die Horizontalwölbung, die eng mit der lateralen Wasserdynamik zusammenhängt, wird in die Bewegungsrichtungen „konvergierend“ und „divergierend“ sowie den parallelen Übergangsbereich eingeteilt. Konvergierende

rende Abschnitte (“Einwölbungen”) zeigen ein potenzielles “Zusammenfließen” von Oberflächen- u. oberflächennahem Wasser an, während divergierende Bereiche (“Auswölbungen”) oft im Sommer zuerst Wasserdefizite aufweisen.

Als Formelemente werden im Folgenden die neun Grundtypen bezeichnet, die sich als Kombination aus den drei Bewegungsrichtungen und den drei Krümmungstendenzen für alle nicht ebenen Bereiche ergeben. Diese Einteilung basiert auf den Arbeiten von Richter (1962) zur morphographischen Kartierung von Oberflächenformen für den Darstellungsmaßstab 1:10.000 und größer. Richter (1962) gibt einen Grenzwert von 2° für die Neigung an, um ebene Bereiche auszuspüren. Aus den Formelementen setzen sich alle nicht ebenen Formen aus Lockermaterial zusammen, z. B. Kuppen aus konvex- und konkav-divergierenden Formelementen. Der Vorteil des Konzeptes liegt in der einfachen Kartierbarkeit begründet.

Tabelle 4-1: 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 |

**Horizontalwölbung (Höhenliniendarstellung)
Formelemente und Abflussrichtung**

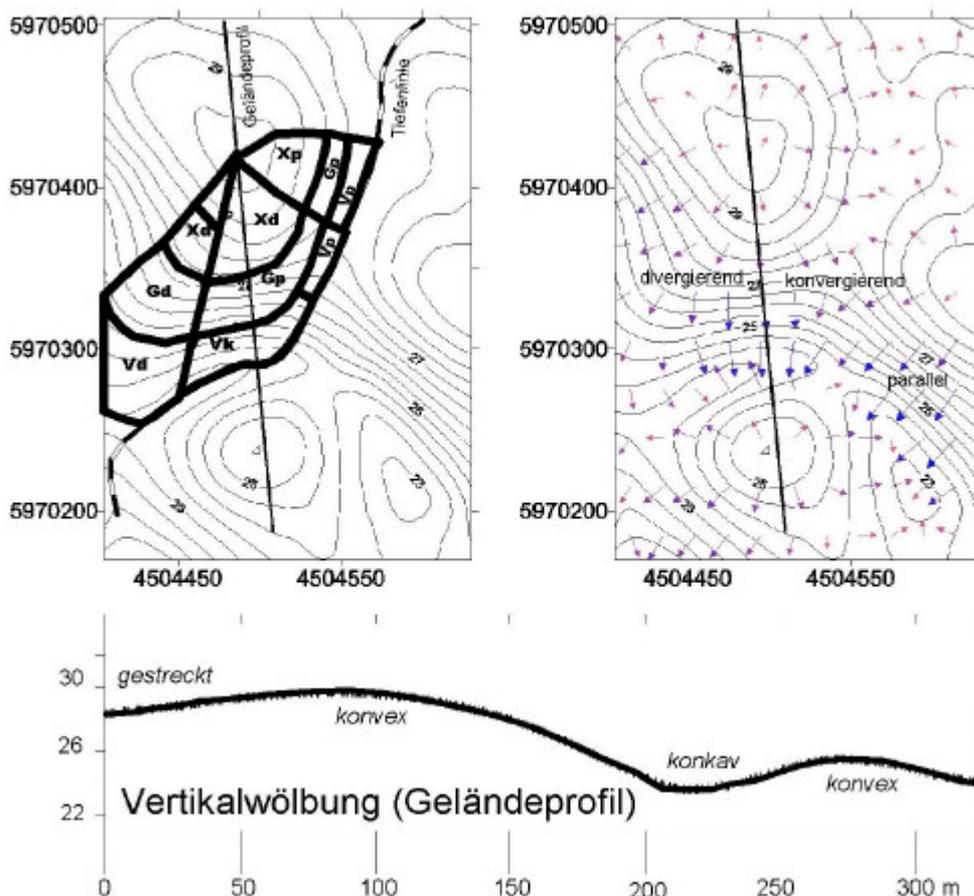


Abbildung 4-1: Wölbungstypen in der Draufsicht (Horizontalwölbung) und im Profil (Vertikalwölbung). Gauß-Krüger-Koordinaten (Bessel). Ausschnitt von Kassow, Schlag 111 (siehe Abb. 4-6 und Abb. 4-7).

Für die vorliegende Arbeit wurde eine Geländekartierung für einen komplexen, reich gegliederten Ausschnitt des Schlags 111 (Kassow) mit einer Kartierung auf Basis der Höhenli-

nienkarte des RTK-GPS-DGM verglichen und damit die Krümmungsradien für die Ableitung der Formelemente mit ArcView kalibriert.

Auch die DIN befasst sich mit der Definition von Geländeformen (Tab. 4.2), welche mangels quantitativer Angaben jedoch für eine GIS-gestützte Auswertung wenig geeignet sind.

Tabelle 4-2: Geländeformen nach DIN 18709-1 (Begriffe, Kurzzeichen u. Formelzeichen im Vermessungswesen)

| Geländeform nach DIN 18709-1 | Bedeutung |
|------------------------------|---|
| Kuppe | Rundliche Einzelerhebung des Geländes |
| Kessel | Rundliche abflusslose Vertiefung |
| Sattel | Geländeform zwischen zwei benachbarten Erhebungen |
| Rücken | Langgestreckte, konvexe Geländeform |
| Mulde | Konkave Geländeform |
| Falllinie | Linie des größten Gefälles, schneidet Höhenlinien senkrecht |
| Gerippelinie | Spezielle Falllinie zur Erfassung von Rücken und Mulden |

Das Ziel der Ableitung von Formelementen liegt bei landschaftsökologischen Fragestellungen meist in der Ausweisung von hydrologisch ähnlich wirkenden Teilbereichen auf Basis geomorphographischer Kenngrößen. Die Geomorphographie beschreibt nach Billwitz (2000) die quantitativ-exakte Kennzeichnung von Formen und Formbestandteilen des Reliefs mit den Reliefattributen Neigung, Exposition, Wölbung, Position/Lage, Grundriss und Größe.

Während die Wölbung bei der Ausweisung von Formen im Gelände oder auf Basis von Karten die größte Rolle spielt, wurde den Reliefattributen Neigung und Exposition mit dem Übergang zur rechnergestützten, quantitativen Reliefanalyse seit Beginn der 1980er Jahre stärkere Aufmerksamkeit zuteil. Dies liegt vor allem in der standardmäßigen Ableitbarkeit aus dem DGM in vielen GIS und der Anwendung durch einen breiten, weniger spezialisierteren und unkritischeren Nutzerkreis der Reliefdaten begründet. Gängige Algorithmen sollen in Kap. 4.2 vorgestellt werden.

4.1.2 Ansätze zur DGM-Analyse

Als die rechnergestützte DGM-Analyse Anfang der 1980er Jahre weitere Verbreitung fand, standen Strategien zur Erstellung des DGM aus Topographischen Karten und Interpolationsalgorithmen im Vordergrund. Stanger (1982) beschreibt vergleichend zahlreiche Verfahren. Die damaligen Ableitungen aus dem DGM beschränkten sich überwiegend auf Gefällestufen- und Expositionskarten, Falllinien und Isoliniendarstellungen sowie Schummerungsvorlagen für kartographische Zwecke. Moore et al. (1991; 1993a) definierten „*digital terrain analysis*“ (digitale Reliefanalyse) als rechnergestützte Ermittlung von topographischen Parametern für diskrete Bereiche eines digitalen Höhenmodells und untersuchten eine Vielzahl an landschaftsanalytischen Anwendungsmöglichkeiten. Moore et al. (1991) kündigten eine Ära der raumbezogenen Modellierung („*spatial modelling*“) an, deren Inhalte und Methoden heute vor allem in Raster-GIS implementiert sind, aber oft zu unkritisch im Hinblick auf Gültigkeit der Algorithmen für die entsprechenden Fragestellungen und bezogen auf die Qualität der Eingangsdaten verwendet werden.

Einen Überblick der geschichtlichen Entwicklung der Geomorphometrie mit der Entwicklung von Reliefmaßen von lokaler Reliefenergie bis hin zu heute üblichen Verfahren bietet Wood (1996). Dazu gehören vor allem Geländeneigung und Exposition als mathematisch erste Ableitung aus dem Höhenmodell, Vertikal- und Horizontalkrümmung als zweite Ableitung sowie daraus zusammengesetzte Parameter. (z. B. Evans, 1998; Wilson und Gallant, 2000).

Dikau et al. (1999) bezeichnen die digitale Reliefmodellierung als „*junges, sich schnell entwickelndes verfahrenstechnisches und methodisches Forschungsgebiet*“ und schlussfolgern: „*es stehen zur Zeit keine allgemeinen Standards für die Bewertung der Werkzeuge sowie der eingesetzten Algorithmen zur Verfügung*“. Dies ergibt sich als Problem, da häufig fachliche Anforderungen an die einfache Verfügbarkeit von Verfahren angepasst werden.

Primäre und Sekundäre Ableitungen aus dem Raster-DGM

Der im Zeitalter des Raster-GIS verbreitetste Ansatz der DGM-Analyse ist die Ableitung von lokalen morphometrischen Reliefattributen. Dies sind nach Köthe (2000) Größen, die sich aus einer Rasterzelle und ihren 8 Nachbar-Rasterzellen berechnen lassen. Der englische Begriff „terrain attributes“ wird hierbei meist mit „Reliefparameter“ übersetzt. Von der Datenhaltung im GIS her betrachtet sind die Ableitungen lediglich Attribute der Lage.

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.

Näheres zur Berechnung dieser Attribute wird in Kap. 4.2 beschrieben. Tab. 4.2 gibt eine Übersicht der gängigen primären Reliefparameter.

Tabelle 4-3: Reliefparameter (aus: Gebbers und Schmidt, 1999)

| Attribut/Parameter | Definition | Bedeutung |
|---------------------------------------|--|--|
| Höhe | Höhe über NN | Klima, Vegetation, potentielle Energie |
| Neigung | Neigungswinkel in Hangfallrichtung (Gradient der Höhe) | ober- und unterirdische Fließgeschwindigkeit und Abflussrate, Verdunstung, Vegetation, Geomorphologie, Bodenwassergehalt, Landnutzungsseignung |
| | | |
| Exposition | Aspekt, Neigungsrichtung (Hangfallrichtung) | Solarstrahlung, Evapotranspiration, Verteilung und Abundanz der Flora und Fauna |
| Vertikalkrümmung | Neigungsänderung, erste Ableitung der Neigung | Abflussbeschleunigung, Erosion/Akkumulation, Geomorphologie |
| Horizontalkrümmung | Änderung des Konturverlaufs (Isohypsenverlaufs) | Konvergenz/Divergenz des Abflusses, Bodenwassergehalt |
| Zuflussgebiet | Zuflussgebiet zum Beobachtungspunkt hin | Abflussvolumen, Gleichgewichts-Abflussrate |
| Abflussgebiet/ Entwässerungsgebiet | Abflussgebiet vom Beobachtungspunkt ausgehend | Bodenentwässerung, Bodenwasserversickerung |
| Einzugsgebiet | Fläche des Gebietes, das zur Vorflut entwässert | Abflussvolumen |
| Zuflusslänge | maximale Entfernung, die Wasser aus dem Zuflussgebiet zum Beobachtungspunkt zurücklegen kann | Erosionsstärke, Erosionsfracht (Sediment), Zeit der Abflusskonzentration |
| Abflusslänge | Abstand des Beobachtungspunktes zur Abflussbasis | Verzögerung der Bodenwasserversickerung |
| Einzugsgebietsneigung | mittlere Neigung im Einzugsgebiet | Zeit der Abflusskonzentration |
| Einzugsgebietslänge | Abstand vom höchsten Punkt des Einzugsgebietes zur Abflussbasis | Abschwächung des Oberflächenabflusses |
| Zuflussgebietshöhe | mittlere Höhe des Zuflussgebietes des Beobachtungspunktes | Potenzielle Energie |
| Zuflussgebietsneigung | mittlere Neigung des Zuflussgebietes des Beobachtungspunktes | Abflussgeschwindigkeit |
| Zuflussgebietslänge | mittlere Länge der Zuflüsse zum Beobachtungspunkt | Fließbeschleunigung, Erosionsrate |
| Abflussgebietsneigung | mittlere Neigung des Abflussgebietes | Bodenwasserversickerung |

Formenbildung

Der Ansatz, Reliefformen aus Wölbungstypen zusammensetzen begründet sich aus der kartenbasierten Herangehensweise bzw. der Geländekartierung wie oben beschrieben. Bei Arbeiten mit dem DGM wird teilweise auch der Begriff „tertiäre Reliefparameter“ (z. B. Herbst, 2001) verwendet. In dieser Arbeit soll die Bezeichnung „Formelement“ aus der geomorphologischen Literatur (z. B. Leser, 1977) für die neun in Tab. 4-1 genannten Typen als Attribut des DGM verwendet werden.

Als Einheit für die Wölbungsstärke wird meist der reziproke Wert des Krümmungsradius in 1/m verwendet. ArcView und TAPES bezeichnen konvexe Vertikalwölbungen mit einem positiven Vorzeichen und konkave mit einem negativen Vorzeichen, SURFER gegensinnig. Durch die Invertierung des Wertes wird ein Problem für die digitale Datenverarbeitung umgangen: Bei der Verwendung von Radien liegt der Vorzeichenwechsel bei unendlich großen Wölbungsstärken.

Leser (1977) definiert die Reliefelemente als kantenartig, wenn der Krümmungsradius < 5 m beträgt, als flächenartig, wenn er > 600 m beträgt und als stark gewölbt für den Zwischenbereich. Leser (1977) gibt für Formelemente eine Größe bis 100 m^2 an, um sie von den größeren Mikroformen, die bereits der chorischen Dimension zugeordnet werden, abzugrenzen. Formelemente werden dem Übergang der topischen zur chorischen Dimension zugeordnet.

Dikau (1993) gibt an Hand von Untersuchungen mit einem 20 m Grid einen Radius von 600 m zur Abgrenzung von konvexen/konkaven zu gestreckten Formen an. Grundlage dabei war, dass das kleinste noch zu generierende Objekt mindestens die zweifache Größe der Rasterweite umfasst. Digital generierte Reliefeinheiten sollten sowohl reproduzierbar als auch geometrisch klar und geomorphologisch sinnvoll sein. Friedrich (1996) stellt einen Ansatz zur Streckung durch eine reliefabhängige Transferkonstante vor. Dabei werden Bereiche großer Wölbungsunterschiede so stark gestaucht, dass nur noch die wesentlichsten Formunterschiede abgegrenzt werden, während Gebiete mit geringen Reliefunterschieden intensiv gegliedert werden.

Herbst (2001) erklärt die Klassierung der Körnung an einem Hang mit formbasierten Parametern mit höheren Bestimmtheitsmaßen als mit sekundären Parametern. Herbst (2001) begründet dies damit, dass tertiäre Parameter gebündelte Prozesse anzeigen, sekundäre dagegen nur einzelne Prozesse widerspiegeln.

Als Probleme des Ansatzes im GIS-Zeitalter sei die nominale Natur dieser Klassifikation erwähnt. Mit Hilfe der Formen ist keine eindeutige Rangreihung von Attributen im Sinne einer ordinalen Skala möglich. Die Formen weisen lediglich auf darin potenziell stattfindende Prozesse der Wasserbewegung hin. Ohne eine Verknüpfung dieser Formen mit Prozessparametern ist keine Einteilung im Hinblick auf kontinuierliche Übergänge bei der Feldebewirtschaftung möglich. So kann „vertikal gestreckt“ sowohl eine horizontale Ebene als auch einen Steilhang repräsentieren. Auch ist eine Wertung der Formen „konvex konvergierend“ und „konkav divergierend“ im Hinblick auf die Prozesse des Wassertransportes schwerlich herzustellen. Ergebnisse diesbezüglicher Untersuchungen mit Felddaten werden in Kapitel 4.4.1 präsentiert. Dikau (1993) belegt die ausgegrenzten Formelemente mit sekundären Attributen, wie dem Abstand zu Vorfluter/Wasserscheide, Untergrundmaterial und Nachbarschaftsbeziehungen. Für die verbesserte Erkennung von Geländeformen, v.a. von Tal- und Kammlinien, kann auch die prozessorientierte Abflussmodellierung gute Ergebnisse beitragen (Rieger, 1992).

Prozessorientierte Reliefattribute

Für die hier angestrebte Boden-Landschaftsanalyse werden aus dem DGM quantitative Parameter abgeleitet (primäre und sekundäre Attribute). Das Ziel ist eine vereinfachte Repräsentation der zugrunde liegenden physikalischen Prozesse. Die Schlüsselfaktoren, die das Sys-

temverhalten bestimmen, müssen darin enthalten sein. Von nicht berücksichtigten Faktoren wird angenommen, dass sie innerhalb der Landschaft eine geringe Varianz haben.

Die wesentlichen Prozesse im Übergang von der topischen zur chorischen Dimension werden durch die Wasserbewegung gesteuert. Die Topographie des Geländes, also das Georelief, ist dabei eine wesentliche Steuergröße. Die lokale Geländeneigung gilt als Maß für die Fähigkeit, eine bestimmte Menge Wasser oberflächlich oder oberflächennah zu bewegen (Quinn und Beven, 1993). Aus den primären Reliefattributen können Indizes abgeleitet werden, die das Potenzial für die Stärke eines Prozesses beschreiben. Dieser Index-Ansatz steht für eine vereinfachte Repräsentation der zugrunde liegenden physikalischen Prozesse. Der verbreitetste Index ist der Topographische Wetness Index (TWI) $\ln(A_s/\tan\beta)$ nach Beven und Kirkby (1979), der Bestandteil mehrerer hydrologischer Modelle ist (z. B. TOPMODEL, TAPES) und im Rahmen der vorliegenden Arbeit in ArcView implementiert wurde.

Die Grundlage dieser Indizes bildet die Berechnung der Lage von Abflusspfaden (engl. flow routing) aus den lokalen Höhengradienten. Dazu wird angenommen, dass die Geländeform die Bewegung des Wassers auch im oberen Bodenbereich bestimmt und somit über die räumliche Verteilung des Bodenfeuchtemusters entscheidet. Flow-routing-Verfahren und TWI werden in Kap. 4.2 vorgestellt.

Die Hauptanwendung der prozessorientierten DGM-Analyse ist die flächenbezogene Vorhersage von Boden- und Abflussparametern, die ein „Muster“ von landschaftlichen Prozessen wie Bodenbildung oder Erosion abbilden können.

Statistische Verfahren

Mit der gestiegenen DGM-Qualität wurden in der vergangenen Dekade und auch gegenwärtig in mehreren Studien statistische Konzepte und Modelle entwickelt, um vor allem auf Grundlage der prozessorientierten Reliefparameter die Korrelationen zu gemessenen Felddaten des Bodenwasser- und Stoffhaushaltes zu verbessern. Dies führte in vielen Fällen zu intensiv kalibrierten Modellen, die oft nur für ihr Entstehungsgebiet verwendet werden können.

Neben den speziell für Geländemodelle entwickelten Methoden werden auch Klassifikationsverfahren aus der Fernerkundung eingesetzt, z.T. in Zusammenhang mit Luftbildern. So vergleichen Ventura und Irvin (2000) eine unüberwachte Klassifikation mit einer Fuzzy-Klassifikation von Höhe, Neigung, Vertikal- und Tangentialkrümmung, TWI und berechneter Einstrahlung und teilten Hänge in fünf Segmente (flacher Gipfelbereich, konvexe Hangschulter, gestreckter Oberhang, konkaver Unterhang und flacher Hangfuß) ein. Das Ergebnis der Fuzzy-Klassifikation eignete sich stärker für Bodenbeprobungsplanung, während die unüberwachte Klassifikation besser zur Erkennung der Hangformen geeignet war. Für die komplexe Struktur vieler in der vorliegenden Arbeit untersuchten Ackerschläge sind diese Verfahren weder geeignet, noch können die unscharfen Klassen ohne Informationen über Zufluss-Abflusspotenziale sinnvoll in Applikationskarten umgesetzt werden.

Friedrich (1996) gliederte für den Zielmaßstab 1:25.000 für eine bodenkundliche und geologische Landesaufnahme in Hessen homogene Reliefeinheiten mit Hilfe eines raumbezogenen iterativen multivariaten Distanzverfahrens (IVHG)¹. Grundlage war die Annahme, dass sich Grenzen von Bodentypen entsprechend der Krümmung der Oberfläche ausbilden. IVHG fasst Standorte zusammen, die im multivariaten Raum eine geringe Distanz aufweisen und in der Datenmatrix räumliche Nachbarn sind (Metzler, pers. Mitteilung). Dieses Verfahren konnte auch für den *preagro*-Projektschlag 111 (Kassow) getestet werden. Als problematisch ergab sich jedoch die inhaltliche Interpretation der entstandenen Klassen, die lediglich auf der Statistik der einzelnen Variablen der jeweiligen Klasse beruhen kann. Es ergaben sich Ähnlich-

¹ <http://www.math.uni-frankfurt.de/~stoch/software/ivhg/index.html> (16.09.2002)

keiten der Klassengrenzen zu den Werteklassen des TWI, der ebenfalls sehr stark von der Gelände­krümmung abhängig ist.

Burrough et al. (2000) verwenden einen fuzzy-k-means-Ansatz (siehe auch Shatar und McBratney, 2001), um die festen Grenzen einer Klassifikation aufzusprengen. Burrough et al. weisen auf hohe Abhängigkeit der manuellen Kompartimentierung des Geländes komplexer Landschaften auf Basis von topographischen und thematischen Karten durch Experten hin und sehen die Vorteile automatisierter, statistischer Verfahren in der Nachvollziehbarkeit aus Funktion der lokalen Nachbarschaft im DGM. Burrough et al. (2000) versuchen, ein multivariates Kontinuum aus Reliefattributen in Teilbereiche mit spezieller Bedeutung aufzuteilen und schlagen den Begriff „continuous classification“ vor, um auf die Kontinuität der Klassen im Attributraum und im geographischen Raum hinzuweisen. Die multiple Attributbeschreibung eines Objektes wird dabei in k Zugehörigkeitswerte in Bezug auf k Klassen eingeteilt und die multivariate Varianz innerhalb der Cluster möglichst klein gehalten.

MacMillan et al. (2000) weisen 15 *landforms* aus, die in einem späteren Schritt zu vier Klassen aggregiert werden, um bewirtschaftbare Klassengrößen zu bilden. Elemente werden aus unscharfen Klassen wie „fast flach“, „kuppennah“, „hoher Wetness Index“, „niedriger Wetness Index“, „relativ steil“ etc. zusammengesetzt. Daraus entstehen Klassen mit zunehmendem Wasserüberschuss: „Oberhang mit überwiegendem Abfluss“, „neutraler Mittelhang“, „Unterhang mit Zuschusswasser“ und „Mulde“. Somit konnten die räumliche Fragmentierung der einzelnen Geländeklassen zu bewirtschaftbaren Flächengrößen reduziert werden.

Wilson et al. (2002) erstellten ein lineares Modell aus den Reliefparametern TWI, Neigung und Einstrahlung, um die Bodenfeuchteverteilung in der Wurzelzone zu bestimmen. Dabei wurde der Einfluss der einzelnen Parameter auf die Schätzung über den mittleren Wassergehalt von Untersuchungspunkten im Gebiet gesteuert. Hintergrund war die auch in der vorliegenden Arbeit gefundene Beobachtung, dass bei wechselndem Feuchteregime verschiedene Reliefparameter unterschiedlich stark mit den Feldmessungen korrelieren.

4.2 Ableitungen aus dem DGM

Die in dieser Arbeit erstellten DGMs wurden vergleichsweise mit prozessbasierten und formbasierten Ansätzen in Klassen zur spezifischen Bewirtschaftung eingeteilt. Verwendet wurde dazu das Programmpaket TAPES-G sowie einige selbst entwickelte AVENUE-Scripte für den ArcView SpatialAnalyst. Hier sollen die verwendeten Methoden und Algorithmen präsentiert werden. Die Ergebnisse folgen in Kapitel 4.4, ein Vergleich mit Felddaten in 5.2.

4.2.1 Primäre Reliefattribute

Die Algorithmen zur Ableitung der primären Reliefattribute beruhen in der Regel auf einem zentralen Finite-Differenzen-Ansatz, der vom inneren Rasterelement einer sich über das DHM bewegenden 3 * 3-Matrix ausgeht und die Beziehungen zu den Nachbargitterpunkten auswertet. Derivate berechnen dabei Änderungsraten. Details zu den Methoden finden sich bei Wilson und Gallant (2000) und Burrough (1990).

Neigung und Exposition

Die Neigung ist eine gerichtete erste Ableitung der Oberfläche und gibt die Änderungsrate der Geländehöhe in Abhängigkeit vom Ort an. Bei der Berechnung in Grad entspricht 0° einer Ebene und 90° der Vertikalen. Bei einer Berechnung in Prozent (z. B. TAPES) entspricht 100 % dem Winkel von 45°. Bei dem von ArcView verwendeten Algorithmus wird eine ausgleichende Ebene in eine 3 * 3-Nachbarschaft gelegt. Diese wird mit der „average maximum technique“ nach Burrough (1990) berechnet:

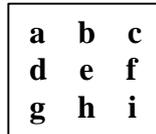
$$\beta = \arctan(\sqrt{f_x^2 + f_y^2}) \tag{4-1}$$

mit

$$f_x = d_z/d_x = ((a + 2d + g) - (c + 2f + i)) / (8 * \text{Rasterweite}),$$

$$f_y = d_z/d_y = ((a + 2b + c) - (g + 2h + i)) / (8 * \text{Rasterweite}).$$

für die 3 * 3- Nachbarschaft



Die Exposition ergibt sich (z. B. nach Moore et al., 1991) als

$$\psi = 180 - \arctan(f_y / f_x) + 90(f_x / |f_x|) \tag{4-2}$$

Zellen ohne Werte („no data“) bekommen dabei die Höhe des zentralen Punktes zugewiesen, was tendenziell zu einer flacheren Schätzung führt, jedoch am Rande eines Grids von Bedeutung ist.

Bei TAPES-G steht eine Finite-Differenzen-Variante und die D8-Variante zur Wahl. Letztere berechnet den Gradienten vom zentralen Punkt zum tiefstgelegenen Nachbarn. Dies führt tendenziell zu niedrigeren Werten, da der oberhalb gelegene Höhenwert nicht in die Berechnung eingeht. Diese Variante wurde in der vorliegenden Arbeit nicht verwendet.

Der Richtungswinkel der Falllinie ausgehend von Nord mit 0° wird bei der DGM-Analyse als Exposition (engl. aspect) bezeichnet (Abb. 4-2). Die Exposition wird im Uhrzeigersinn als Vollkreis beschrieben, 180° entspricht dabei einer Südausrichtung der Falllinie. Für Zellen mit der Neigung 0 kann folglich keine Exposition berechnet werden. Bei ArcView werden für die Berechnung von Randzellen virtuelle Zellen mit dem Wert der Randzelle angefügt.

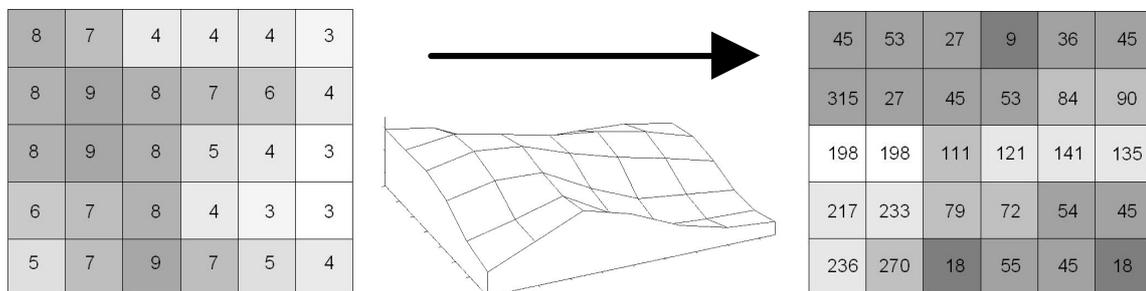


Abbildung 4-2: Aus einem fiktiven DGM (Grid und Wireframe-Modell; linke Bildhälfte) abgeleitetes Expositionsgitter in [°], beginnend bei 0° in Nordrichtung und im Uhrzeigersinn bis 360° (ebenfalls Nord) fortlaufend. Helle Zellen weisen nach Süden, dunkle zeigen Nordexposition an.

Wise (1998) betont, dass Exposition und Neigung nicht unabhängig vom erhobenen Maßstab definiert werden können, da die Geländeoberfläche nie glatt genug für eine exakte mathematische Ableitung ist. Wise (1998) empfiehlt deshalb Höhenlinien als DGM-Struktur, da sie indirekt auch Neigung, Exposition und Krümmung repräsentieren. Dies kann nach den eigenen Untersuchungen zur Genauigkeit von DGMs aus Höhenlinien nicht unterstützt werden. Die hier angesprochenen Probleme sind jedoch vor allem bei der Bearbeitung und Interpretation von Laserscanner-DGMs und deren Folgeprodukten zu beachten (siehe Kapitel 4.4.1).

Horizontal-, Vertikal- und Tangentialkrümmung

Die Krümmungen werden als 2. Ableitung der DGM-Oberfläche berechnet. Dabei ergibt sich die Vertikalkrümmung als Änderungsrate der Neigung, die Horizontalkrümmung als Ableitung der Exposition. In hydrologischen Untersuchungen ist die Tangentialkrümmung gebräuchlich (Horizontalkrümmung multipliziert mit dem Sinus des Neigungswinkels), die hohe Konvergenz-Werte in flachem Terrain nivelliert. Bei ArcView werden die Krümmungen Zelle

für Zelle berechnet. Für jede Zelle wird ein Polynom 4. Grades an eine 3 * 3 Nachbarschaft entsprechend der Neigungsableitung angepasst (ESRI, 1996)

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I \quad (4-3)$$

wobei die Koordinaten A bis H aus den Höhenwerten des 3*3-Fensters berechnet werden .

4.2.2 Abflussalgorithmen

Abfluss-Algorithmen beruhen darauf, dass alle Zellen eines DGM die gleiche Startabflussmenge generieren, die sich auf tiefer gelegene Zellen verteilt und deren Abflussmenge erhöht. Deterministic 8-node (D8) ist der einfachste Algorithmus, um Fließrichtungen innerhalb eines DGM für jede Zelle festzulegen. D8 (O'Callaghan und Mark, 1984) wählt nur eine Abflussrichtung für die gesamte einer Zelle zufließende Wassermenge. Diese Richtung ergibt sich aus der Lagebeziehung zu derjenigen der 8 Nachbarzellen, welche die größte negative Höhendifferenz und damit das größte Gefälle aufweist. Deshalb ist die Modellierung von divergierendem Abfluss nicht möglich. Die Abflussmenge kann nicht auf mehrere Nachbarn aufgespalten werden. Dies führt zu unnatürlich vielen Zellen ohne Verbindung zu hangaufwärts gelegenen Nachbarn und in Talbereichen zu großen Unterschieden benachbarter Zellen bezüglich der Zuflussfläche. An planaren Hängen gleicher Exposition bildet D8 wirklichkeitsfremde, parallele Strömungslinien in eine der je vier kardinalen oder diagonalen Richtungen (z. B. Schmidt und Persson, 2003). Da nur die quadratischen Zellenflächen addiert werden, kann die Zuflussfläche bei diagonalen Fließrichtung um bis zu 100 % unterschätzt werden. D8 ist allerdings von Vorteil, wenn die Neigung von Abflussrinnen gesucht ist.

Random 8-node (Rho8), eine stochastische Variante von D8 nach Fairfield und Leymarie (1991), überwindet das Problem der parallelen Strömungslinien durch die Einführung einer Zufallskomponente zu den Neigungswerten. Burrough (1998) begründet diese stochastische Komponente damit, dass in der Natur ebenfalls Nachbarareale gleicher Höhe anstatt hangabwärts gelegene Punkte angeströmt werden, wenn die kinetische Energie des Wassers nicht mehr ausreicht, mitgeführte Sedimente zu transportieren und dieses Material den Strömungsweg versperrt. Allerdings entstehen durch Rho8 mehr Zellen ohne Verbindung zu hangaufwärts liegenden Nachbarn. Andere Zellen dagegen bekommen überschätzte Zuflussflächen zugewiesen. Das Problem bei divergierendem Gelände bleibt erhalten.

FD/FRho8 (nach Freeman 1991) ermöglicht die Modellierung divergierenden Abflusses durch eine prozentuale Aufspaltung auf alle unterhalb liegenden Nachbarzellen im Verhältnis zum Gefälle zu diesen Nachbarzellen. Dies ergibt "realistischer" wirkende Strömungslinien und führt vor allem in divergierendem Gelände zu besseren Ergebnissen. Allerdings berechnet dieser Algorithmus in Tälern, in denen es naturgemäß zu einer Abflusskonzentration in Rinne kommt, eine zu große Flussdivergenz.

Der DEMON-Algorithmus (**D**igital **E**levation **M**odel **N**etworks; Costa-Cabral und Burges, 1994) konstruiert Strömungslinien durch Zellen hindurch und bildet "Stromröhren" (*engl. stream tubes*). Diese ändern ihre Breite je nach Geländeoberfläche und modellieren auf diese Weise Divergenz und Konvergenz. Abflussbildung erfolgt von jeder Zelle aus entlang dieser Stromröhren. Um das spezifische Einzugsgebiet zu ermitteln, berechnet DEMON eine Flussbreite, die von der D8 und Rho8-Version abweicht:

$$w = |\sin(\psi)| + |\cos(\psi)| \quad (4-4)$$

mit ψ = Exposition.

Dabei kann sich der Abfluss in eine oder zwei kardinale Richtungen fortpflanzen. Diagonal gelegene Zellen werden nicht berücksichtigt, da sie nur einen gemeinsamen Punkt und keine gemeinsame Strecke mit der Quellzelle haben, über die entwässert werden kann. Der Anteil dieser Aufspaltung hängt von der expositionsgesteuerten Fließrichtung ab:

$$f_i = \frac{A_\Delta}{A} = -\frac{1}{2} \frac{\Delta x}{\Delta y} \frac{1}{\tan \alpha} \quad (4-5)$$

$$f_S = 1 - f_E \quad (4-6)$$

mit A_Δ = Dreieck, das in Richtung i entwässert,
 i = Nord, Ost, Süd oder West,
 $\Delta x * \Delta y$ = Zellenfläche.

Danach wird eine der Nachbarzellen als neue Quellzelle betrachtet und die bereits berechnete auf eine interne Warteliste gesetzt. Jede Stromröhre wird als gerichteter Graph von Zellen (1;1) (1;2) geschrieben. Mehrere Stromröhren addieren sich letztlich zum Zuflusswert. Die Bedeutung einer exakt abgeleiteten Exposition für die zu untersuchende Skala wird dabei deutlich. Der Vorteil von DEMON liegt darin, dass die Bindung an die Grenzen der Grid-Zellen aufgehoben wird, aber die rechentechnischen Vorteile eines Rasters nutzbar bleiben. Die Rechenzeit beträgt im Vergleich zu D8 etwa das Zehnfache.

Ein Abflussalgorithmus auf Basis von Formelementen wurde von Pilesjö et al. (1998) entwickelt. In komplexem Gelände werden konkave und konvexe Fälle getrennt behandelt, um Abflusskonzentration und divergierende Fälle (Aufspaltung des Flusses auf alle tiefer liegenden Nachbarn) zu berücksichtigen. Mit diesem Verfahren wurden Kassower Schläge ebenfalls vergleichsweise getestet (Schmidt und Persson, 2003).

4.2.3 Sekundäre Reliefattribute

Sekundäre Attribute werden aus mehreren primären zusammengesetzt oder mit weiteren Ableitungen/empirischen Gleichungen kombiniert. Hier werden Topographische Indizes näher betrachtet. Dies sind Quotienten aus berechneter potenzieller Zuflussmenge und der Geländeneigung sowie ggf. weiteren bodenkundlichen oder klimatologischen Parametern. Die verbreitetste Form nach Beven und Kirkby (1979) ist der *topographic wetness index*

$$TWI = \ln (A_s/\tan\beta) \quad (4-7)$$

mit

A_s = spezifisches Einzugsgebiet eines Punktes/einer Zelle,
 $\tan\beta$ = lokale Geländeneigung.

Ursprünglich wurde dieser Index entwickelt, um das Muster von zuerst gesättigten Bodenbereichen (Entstehung von Oberflächenabfluss) für Abflussmodelle vorherzusagen. Das Konzept des TWI basiert auf der Hypothese, dass die Topographie das Muster der Bodenfeuchteverteilung bestimmt. Konvergenz und Divergenz des oberflächennahen Bodenwasserflusses und das lokale Gefälle entscheiden über die räumliche Verteilung des Bodenwassergehaltes nach einem Niederschlagsereignis. Ein hoher Wetness-Index wird demnach in konvergierendem Gelände mit geringer Neigung erreicht. Dieses Konzept gilt nur, wenn der laterale Fluss einen essentiellen Anteil am Gesamt-Bodenwasserfluss eines Einzugsgebietes umfasst. Hierzu argumentieren Barling et al. (1994), dass die Durchlässigkeit der meisten natürlichen Böden mit der Tiefe exponential abnimmt und sich eine laterale Komponente des Abflusses ausbildet, sobald das Gelände eine Neigung und damit einen geländebedingten hydraulischen Gradienten aufweist. Auf Ackerflächen ist dieser Effekt überlagert durch die Pflugsohlenverdichtung, die auf den Projektflächen in Kassow auch nach mehrjähriger pflugloser Bearbeitung noch mit Penetrometern in 0,3 - 0,4 m Tiefe detektierbar war (R. Gebbers, pers. Mitteilung) und eine laterale Abflusskomponente in dieser Tiefe erwarten lässt.

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. Das Konzept gilt nicht für Landschaften, in denen der bo-

dennahe Fluss von geologischen Besonderheiten und nicht vom Relief maßgeblich beeinflusst wird (z. B. artesische Becken, Karstgebiete).

Eine hohe Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Sättigung wurde von O'Loughlin (1986) für Areale angenommen, in denen der akkumulierte Zufluss das Produkt aus der Bodendurchlässigkeit T (*engl. transmissivity*)¹ und dem lokalen Gefälle übersteigt, also dort wo der Boden weder Wasser aufnehmen noch weitergeben kann.

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

- gleiche Infiltrationsrate innerhalb des Einzugsgebietes,
- gleiche 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 (steady state).

Zu einer bodenkundlichen Diskussion dieser Randbedingungen siehe Kap. 5.1.

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 Bodendurchlässigkeit. Letztere wird als Funktion der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und des Abstandes von der Geländeoberfläche zu einem Stauwasserspiegel angenommen. Bei homogener Grundwasserneubildung gilt der Flux auch als Produkt des spezifischen Einzugsgebietes und der Grundwasserneubildung. Die Kombination beider Gleichungen ergibt eine explizite Darstellung der Tiefe z des Stauwasserspiegels in Abhängigkeit von zwei topographischen Variablen (a , s), zwei Bodenvariablen (f , T) und einer vorwiegend klimatischen Variable, der Grundwasserneubildung (Wilson und Gallant, 2000):

$$\text{mit } z_i = -\frac{1}{n} \ln\left(\frac{A_s R}{T_0 \tan \beta}\right) \quad (4-8)$$

- n = Abnahmerate der hydraulischen Leitfähigkeit mit der Tiefe nach $K_s(z) = K_0 e^{-nz}$
- A_s = spezifisches Einzugsgebiet des Punktes i ,
- R = Grundwasserneubildung,
- T_0 = Profil-Durchlässigkeit (*engl. profile transmissivity*) = K_0/n ,
- β = Winkel der Geländeneigung.

Mittels einer über das Gebiet integrierten durchschnittlichen Wasserspiegeltiefe

$$\bar{z} = \frac{1}{nA} \int_A \left\{ -\ln\left(\frac{A_s R}{T_0 \tan \beta}\right) \right\} dA \quad (4-9)$$

wurde durch Ersatz von R und T_0 mit Hilfe von (4-8) und durch Einführung eines durchschnittlichen Gebiets-Wetness-Index $\ln(A_s/\tan\beta)$ ein relativer Wetness-Index für jeden Punkt des Einzugsgebietes geschaffen, der nur von A_s und $\tan\beta$, den beiden topographischen Variablen, abhängig ist.

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

¹ Während die Transmissivität [$m^2 \cdot s^{-1}$] im deutschen Sprachgebrauch für den Grundwasserleiter verwendet wird ($T=k_f \cdot M$ mit M = Mächtigkeit des Aquifers), bezieht sich O'Loughlins und Barlings *transmissivity* auch auf den Bereich eines gesättigten Bodenkörpers bis zur Geländeoberfläche. Deshalb wird hier der Begriff *Bodendurchlässigkeit* T [$m^2 \cdot s^{-1}$] eingeführt.

Index bedeutet jeweils nur die Abweichung vom Gebietsmittelwert. Ein höherer Index steht streng betrachtet für einen geringeren Grundwasserflurabstand. Das Langzeit-Mittel des volumetrischen Bodenwassergehaltes an einem Ort i lässt sich aus dem topographischen Index nach Gallant¹ wie folgt abschätzen:

$$q_i = \frac{TWI - TWI_{\min}}{TWI_{\max} - TWI_{\min}} \quad (4-10)$$

für $TWI_{\min} < TWI < TWI_{\max}$

mit $\theta = 0$: trocken (gebietsspezifischer Welkepunkt),
 $\theta = 1$: gesättigt (gebietsspezifisch zu schätzen).

Der *quasi-dynamic wetness index* (Barling et al., 1994; Gallant und Wilson, 1996) mindert die Annahme, dass sich ein Gleichgewicht zwischen Zu- und Abfluss eingestellt hat durch die Einführung einer Abflusszeit-Begrenzung (*drainage time*) auf Basis der Darcy-Gleichung für den eindimensionalen Fluss mit der Filtrationsrate q :

$$q = -K(\theta) * dH/dx \quad (4-11)$$

mit

$K(\theta)$ = hydraulische Leitfähigkeit [m/s],
 H = hydraulische Druckhöhe in Fließrichtung [m],
 x = Strecke, über der sich H ändert [m].

Barling et al. (1994) leiten daraus die Geschwindigkeit des bodennahen Flusses ab, unter der Annahme eines Stauwasserspiegels, der parallel zur gering durchlässigen Schicht verläuft und eines kleinen Geländeneigungswinkels β :

$$q = -K_s * \tan\beta \quad (4-12)$$

Die Porenwassergeschwindigkeit ist damit gegeben durch:

$$v = q / f = (K_s / f) \tan\beta \quad (4-13)$$

mit

f = Porosität [-],
 q = Filtrationsrate nach Darcy [$m^3/(m^2*s)$]

Das spezifische Einzugsgebiet entspricht nur bei maximaler *drainage time* t_s dem potenziellen Einzugsgebiet der betrachteten Zelle. Zur Berechnung der Abflusszeit sind die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit K_s und die Porosität f erforderlich. Die Mächtigkeit des durchströmten Bodens wird zwar bei der Eingabe abgefragt, jedoch in der Berechnung nicht verwendet (Gallant, pers. Mitteilung, Canberra, 28.10.1998).

Verwendete Programme: TAPES-G, DYNWET-G, WET und SRAD

Der Name TAPES steht für *Terrain Analysis Programs for the Environmental Sciences* und bezeichnet eine Reihe von aufeinander aufbauenden Reliefanalyse-Modulen, die von MOORE (Canberra) Anfang der 1990er Jahre in FORTRAN 77 und C entwickelt wurden¹. Die Programmmodule können raumbezogene Daten mit GIS-Anwendungen austauschen und verfügen über eine Schnittstelle zu dem von ARC/INFO verwendeten Floating Point-Format. Die Reliefanalyse mit TAPES wurde für die „toposcale“ (Hang bis Einzugsgebiet) ausgerichtet, welcher eine Zeitskala von Monaten bis zu einem Jahr zuzuordnen ist. Dieser Skale entspricht etwa der Maßstab 1:10.000 bis 1:25.000. TAPES-G ist ein interaktives, textbasiertes Pro-

¹ <http://cres.anu.edu.au/hydweb/johng/Terrlect.html> (16.09.2001)

¹ <http://cres.anu.edu.au/outputs/tapes.html> (02.11.2002)

gramm, das die Spezifizierung von einigen Eingangsparametern vor der Berechnung sowie ein Raster-DGM (z. B. im ASCII-Format mit x,y,z-Koordinaten) benötigt. Die Berechnung der Zuflussfläche ist nach drei der obig beschriebenen Algorithmen möglich: D8, FD8/FRho8 und DEMON. Die berechneten Reliefattribute für jeden Eingangspunkt sind:

- Fließrichtung nach dem D8 oder Rho8-Algorithmus [8 mögliche Richtungen],
- Spezifisches Einzugsgebiet [m²],
- Breite der Abflussbahn zur Ermittlung des spezifischen Einzugsgebietes (bei D8 und FD8/FRho8 entweder die kardinale oder diagonale Breite der Zelle, also 1 oder $\sqrt{2}$),
- Neigung [%],
- Exposition [°],
- Vertikal-, Tangential-, und Horizontalkrümmung [1/100 m],
- Höhenresiduen, falls ein muldenfreies DGM generiert wurde,
- Länge des Abflusspfades von der Wasserscheide bis zum Untersuchungspunkt,
- Änderungsrate des spezifischen Einzugsgebietes entlang des Abflusspfades.

Das Modul DYNWET berechnet aus der TAPES-G-Ergebnisdatei den TWI und den quasi-dynamischen Index. Die *drainage time* für den quasi-dynamischen Index wurde für Kassow als mittlere Zeitspanne zwischen zwei Niederschlagsereignissen angenommen, die zu einer Nivellierung der Bodenfeuchteverhältnisse führt. Als Kriterium dafür wurde ein Tagesniederschlag >6 mm (Überschreitung des Richtwertes für maximale Evapotranspiration auf einer Ackerfläche von 5 mm/d) oder drei aufeinanderfolgende Tage mit der Regensumme >12 mm gewählt. Auf der Grundlage von Niederschlags-Tagesdaten der Klimastationen Gülzow und Groß Lüsewitz für Mai - September 1981 - 98 ergab dies folgende Szenarien:

- 1) Trockener Frühsommer: 30 Tage (= 720 Stunden),
- 2) Durchschnittliches Jahr: 15 Tage (= 360 Stunden),
- 3) Feuchter Mai: 6 Tage (= 144 Stunden).

Für Kassow wurde die Sensitivität der *drainage time* zusätzlich für 2, 24, 1500 und 5000 Stunden getestet. Weiterhin wurden die TAPES-Module WET und SRAD verwendet. WET berücksichtigt Niederschlags- und Strahlungsparameter bei der TWI-Berechnung. SRAD stellt diese Parameter bereit und berechnet auch die räumliche Verteilung von Boden- und Lufttemperaturen sowie die globale kurzwellige Einstrahlung, die Netto-Longwellenstrahlung, die Strahlungsbilanz und berücksichtigt die topographische Verdeckung. Details zu den Verfahren sind bei Moore et al. (1993b) und Wilson und Gallant (2000) zu finden. Die hier verwendeten Eingangsparameter sind bei Schmidt (1999) dokumentiert.

4.3 Datenbearbeitung und Metadaten

4.3.1 Datenbearbeitung im GIS

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Methoden dargestellt, mit denen die DGM-Grids und deren Derivate vor der Interpretation bearbeitet wurden. Die Verarbeitung von Rasterdaten basiert nach Göpfert (1991) vom mathematischen Standpunkt aus auf dem zweidimensionalen Signal $d(x,y)$. Zur Berechnung des Wertes einer Rasterzelle $g(x,y)$ kann eine variable Anzahl von Nachbarzellen mit einer ortsabhängigen Funktion verarbeitet werden. Göpfert (1991) unterscheidet bildpunkt-autonome, lokale und globale Operationen. Für die vorliegende Arbeit wurden Mittelungs- und Gradientenbildung berücksichtigt, die zu den lokalen Operationen gehören und der Unterdrückung bzw. Verstärkung von Information dienen. Ein weiterer Typ, die geometrischen Operationen (z. B. Entzerrungen, Projektionen), wurden in dieser Arbeit als Methode von Bildverarbeitungs- und Fernerkundungssoftware eingesetzt, aber

nicht zur Veredelung der DGMs verwendet (z. B. Schmidt und Irrgang, 2000). Die Arbeit mit Flächenkorrelationen wurde wegen geringer Aussage abgebrochen (siehe unten).

Die in dieser Arbeit zur Datenveredelung eingesetzten lokalen Operationen beruhen auf der Berechnung eines Ausgangsbildelementes aus mehreren Eingangsbildelementen. Hierzu wurden die ArcView-Funktionen der Nachbarschaftsstatistik (engl. *neighborhood statistics*) eingesetzt.

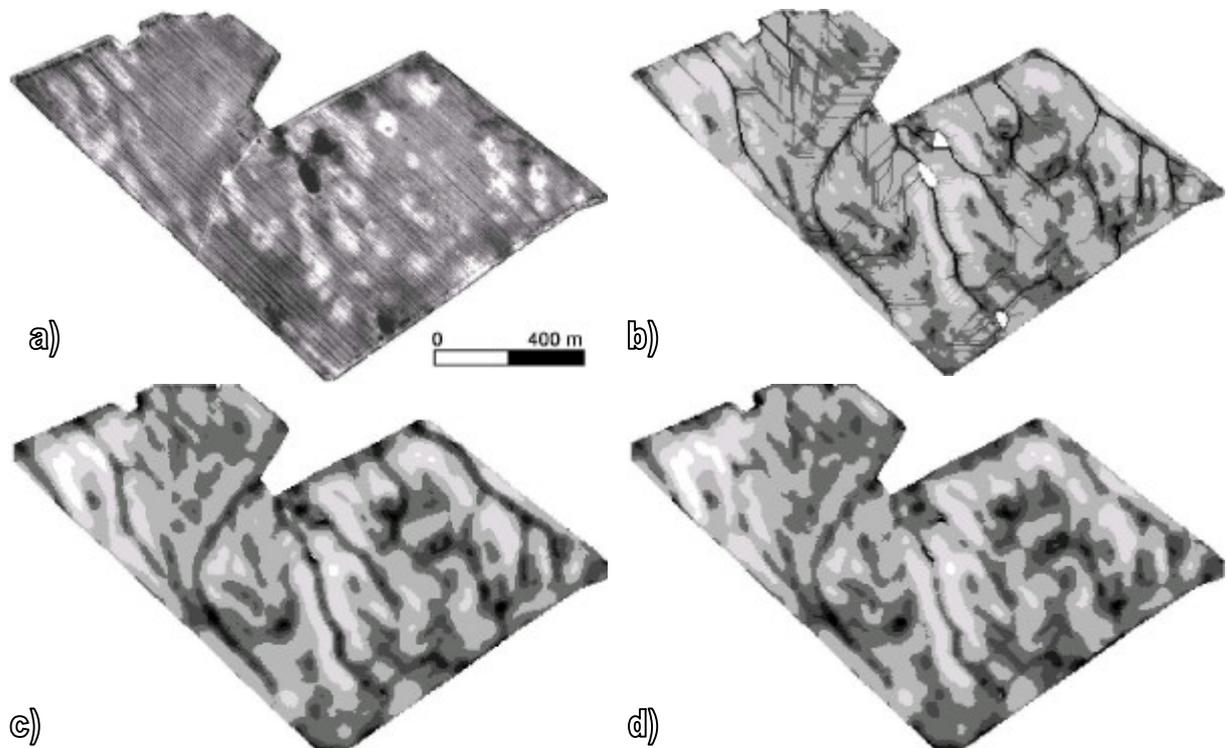


Abbildung 4-3: Vergleich von Mustern eines boden- und pflanzenaufwuchszeichnenden Luftbildes (Schlag 106, Kassow, 2.4.2002) mit berechnetem TWI (b), Mean-Filterung (c) und Median-Filterung (d). Helle Bereiche zeigen hohe Reflexion durch geringen Pflanzenaufwuchs/erhöhte Erosion/Trockenheit bzw. niedrige TWI-Werte (= abflussdominierte Bereiche) an, hohe Grauwerte weisen auf höheren Humusgehalt/Bodenfeuchte bzw. hohe TWI-Werte (= zuflussdominierte Bereiche) hin. Übereinstimmungen zwischen Luftbild und TWI sind an erodierten Kuppen (hell) und den Abflussrinnen/Senken (dunkel) zu erkennen. Grundlage: RTK-GPS-DGM.

Abb. 4-3 zeigt die Auswirkungen des in dieser Arbeit als Standardmethode für die TWI-Berechnung mit ArcView verwendete Filterung mit dem Mean-Filter, der als „moving window“ über das Grid gleitet. Hierbei zeigte sich für Ableitungen aus dem RTK-GPS-DGM als Variante mit dem ähnlichsten Muster zu bodenzeichnenden Luftbildern die Berechnung eines Mittelwertes einer Zelle aus den Nachbarzellen innerhalb eines Radius von drei Zellen. Für Laserscanner-DGM mit 2 m Auflösung erwies sich ein Radius von fünf Zellen und eine zweifache Filterung als notwendig (siehe Kap. 6.1). Der Mean-Filter zeigt eine bessere Kontinuität der berechneten Abflussbahnen im Vergleich zum von Göpfert (1991) empfohlenen Median-Filter (Abb. 4-3). Dies ist deutlich an der Rinne im nordwestlichen Bereich im Vergleich zum Luftbild zu erkennen. Die primäre Berechnung des TWI mit ArcView, die auf dem D8-Abflussalgorithmus basiert, weist die bekannten Schwächen wie parallele Abflussbahnen und lokale Bereiche mit Zellen zu geringen Zuflussgebietes auf. Durch die Einführung der Unschärfe mit dem Mean-Filter wird ein Abbild erzeugt, das sowohl der realen Situation (siehe Luftbild) als auch der Umsetzung in Zonen bewirtschaftbarer Größenordnung (siehe Kap. 6.1) besser entspricht. Auch die Modellierung mit dem DEMON-Algorithmus führt zu Ergebnissen, die dem gefilterten Bild stärker ähneln (Schmidt und Persson, 2003).

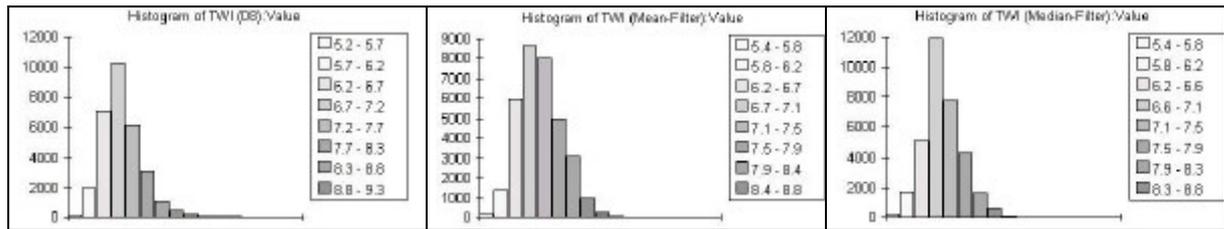


Abbildung 4-4: Histogramme von ungefiltertem (D8) und den gefilterten TWI-Grids.

Abb. 4-4 zeigt die typische Schiefe der TWI-Histogramme. Die Auswirkung der Mean-Filterung ist deutlich als Reduzierung des Wertebereiches und ausgewogenere Glättung im Vergleich zur höheren Anzahl des mittleren Wertebereiches durch die Mean-Filterung zu erkennen.

In Abb. 4-5 sind die Rasterkorrelationen von Luftbild (Abb. 4.3a) mit ungefiltertem und den gefilterten TWI-Grids dargestellt. Einerseits ist die bereits erwähnte generell schlechte globale Flächenkorrelation von rasterhaften Geodaten zu erkennen, andererseits die Auswirkung der Filterung: „Ausreißer“, hier vor allem lokal auftretende hohe TWI-Werte, die sich von ihren Nachbarzellen auf Grund der Nachteile des D8-Algorithmus absetzen, werden geglättet.

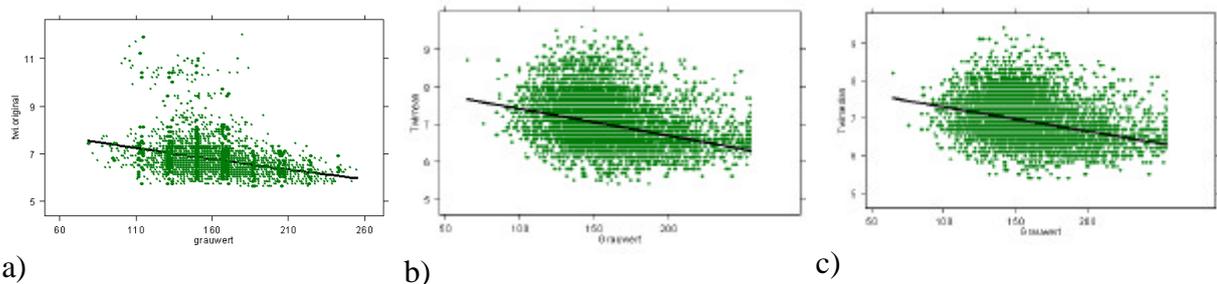


Abbildung 4-5: Rasterkorrelationen zwischen Luftbild-Grauwerten und TWI (D8) bzw. TWI mean und TWI median-Filterung mit robuster least-trimmed square- Schätzung der Regressionsgeraden (S-Plus) zeigen die geringen Zusammenhänge flächenhafter Geodaten.

Mit Glättungsverfahren wie dem Mean-Filter lassen sich Muster der oft verrauschten Geodaten besser erkennen. Die Stärke der Glättung muss der Datenquelle angepasst verwendet werden. Während bei den RTK-GPS-Modellen lediglich das Endprodukt, der TWI, einer Filterung unterzogen wurde, ist dies bei den untersuchten 2 m Laserscanner-DGMs bereits vor der Modellierung notwendig (Kap. 4.4.1). Kriterien für die Intensität der Glättung sind die räumliche Auflösung der Datenquelle, Präzision und Genauigkeit der Erfassung und die Skale der zu modellierenden Prozesse. Speziell bei den Laserscannerdaten führt eine TWI-Ableitung ohne vorherige Glättung auf Grund der großen Oberflächenrauigkeit zu starken lokalen Krümmungen und damit einem sehr lokalen Muster des oberflächennahen Abflusses, der eher mikroskalige Prozesse widerspiegelt (Abb. 4-8). Die Glättung eines DGMs kann sogar bei entsprechendem Verhältnis von Erfassungs- und Untersuchungsskale die Genauigkeit erhöhen. Wise (1998) wies dieses Phänomen für Höhendaten mit einem RMSE von 1,2 - 1,8 m nach. Im Zentimeterbereich gelang dies Pfeifer et al. (2001) mit Laserscanner-Daten.

4.3.2 DGM-Metadaten

Metainformationen sollen nach Kraus (2000) Datenbestände beschreiben, so dass der Nutzer die Daten objektiv beurteilen und vergleichen kann. Dies ist gerade bei Datenbeständen mit solch heterogener Qualität wie DGMs eine wichtige Aufgabe, um eine Vergleichbarkeit von Modellierungsergebnissen zu gewähren. Eine Diskussion verschiedener Definitionen des Begriffs „Metadaten“ findet sich bei Korduan (2003). Hier werden unter Metadaten Angaben zum Inhalt, zur Qualität und zur Entstehung der Daten verstanden.

Kraus (2000) teilt Metainformation für TIS unter anderem ein in:

- a) Semantische Metainformation (Bezugssystem, Objektarten, Datenerfassungsart, Modellierungsannahmen (Dimensionalität der Objekte, Generalisierungsgrad), Genauigkeit und Zuverlässigkeit, Aktualität)
- b) Syntaktische Metainformation (Formatbeschreibung)
- c) Navigatorische Metainformation (Menüstrukturen, Hyperlinks, WWW-Aufbereitung)
- d) Administrative Metainformation (Adresse des Erstellers und Vertreibers, Zugriffsrechte und -bedingungen, Kosten).

Ein Metainformationssystem für den Bearbeitungsstand, Qualitätsangaben und den Vertrieb von DGMs in den einzelnen Bundesländern bietet die Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen im Rahmen von ATKIS¹. Die dortigen Informationen bieten einen landesweiten Überblick ohne konkrete Bindung an einen Datensatz bzw. Informationen zur lokalen Verfügbarkeit der einzelnen Qualitätsstufen.

Für die Dokumentation der vorliegenden Arbeit sind vor allem semantische und syntaktische Metainformationen von Bedeutung, da die Daten in mehreren Bezugssystemen vorgehalten (Angabe der genutzten Transformationsmethode und -parameter) und in verschiedenen Formaten (Grid, Image, ESRI-Shape, x,y,z-Tripel (ASCII)) aus unterschiedlichen Quellen bereitgestellt wurden. Erforderliche Metadaten wurden identifiziert (Tab. 4-4) und von Korduan (2003) in ein Metainformationssystem für PA-Daten implementiert². Als Beschreibungssprache für Metadaten außerhalb des Metainformationssystems nutzen Korduan und Bill (2002) dazu automatisch generierte XML-Dokumente (eXtensible Markup Language³). Aktuelle GIS-Produkte, wie ArcGIS 8, nutzen ebenfalls XML zur Beschreibung der erstellten Datensätze. Für die Datenhaltung im Projekt-Informationssystem wurden feste Dateinamen beschlossen; für DGM-Typen als Kombination aus Schlagnamen, Datenart und Bezugssystem (z. B. 104_dgmn_gk4 für ein ArcView-Grid der Geländeneigung (dgmn) vom Schlag „104“ in Gauß-Krüger-Koordinaten (Bessel), 4. Streifen). Eine besondere Schwierigkeit stellen dabei die ArcView-Grids dar, deren Dateiname als Ordner mit mehreren Dateien verwaltet wird. Zudem sind für die Benennung nur 12 Zeichen möglich, die eine eindeutige Benennung mit integrierten Metainformationen erschweren. Zusätzlich müssen für jedes Grid auch Informationen in einem „Info“-Ordner verwaltet werden, wobei sämtliche Grids in einem Ordner den gleichen „Info“-Ordner nutzen. Über die Dateinamen lassen sich allgemeine Metadaten in Massенbearbeitung generieren. Alle aus dem Dateisystem entnehmbaren Informationen werden dabei automatisch in die Metadatenbank übernommen. Spezielle und datenartabhängige Metainformationen können bei der Registrierung des Datensatzes ergänzt werden (Abb. 4-6), darunter neben Lagebezug und Informationen zu den Rechten an den Daten auch das Erfassungsdatum, das gerade in

Abbildung 4-6: Auszug aus dem von Korduan (2003) entwickelten Metadateneditor zur Eingabe der Metainformation für die DGMs dieser Arbeit.

¹ www.atkis.de

² www.preagro.de/Ergebnisse/Zwischenbericht2002/CD%20Tagungsband/7_5_Projektinformationssystem.pdf

³ www.w3.org/XML/

der Landwirtschaft wegen der unterschiedlichen Bestandeshöhe für Laserscanner-DGM von Bedeutung sein kann. Weiterhin wird bei Höhenmodellen die Interpolationsmethode angegeben, bei Ableitungen der Bezug zu den Originaldaten und eventuell durchgeführte Datenmanipulationen wie z. B. Änderung der Rasterweite oder Filterungen.

Tabelle 4-4: Vorschlag für einen Metadatensatz für DGM für landwirtschaftliche Anwendungen.

| Parameter | Wertebereich | Bemerkung |
|-------------------------|--|---|
| Satzname | 12 Zeichen | Schlag, Datentyp und Bezugssystem |
| Datum Archivierung | Datum | Veröffentlichung im Informationssystem |
| Bearbeiter | Auswahl aus Liste | Authentifizierte Nutzer |
| Format | Shape; Grid; ASCII-Text; ArcView-Legende | Format der beschriebenen Datei |
| Lagebezug | GK (Streifen-Nr.); UTM (Zone); WGS84 mit ellipsoidischen Koordinaten | Lagebezugssystem der Landesvermessungsämter (LVAs). bzw. ellipsoidische WGS84-Koordinaten, Grids projiziert (UTM) |
| Status | Intern; mit Einschränkung | Einschränkung z. B. bei Lizenzen der LVAs |
| Raumbezug | Auswahl aus Liste | Projektbetrieb und Schlag (sekundäre Metrik) |
| Sachbezug | DGM | Zuordnung des Datensatzes im Gesamtsystem |
| Erfassungsdatum | Datum | Durchführung der Vermessung |
| Bearbeitungsdatum | Datum | Zeitpunkt der Datenveredelung |
| Aufnahmeverfahren | RTK-GPS, Laserscanning | |
| Bearbeitung | Auswahl aus Liste | Rasteroperationen wie Resampling, Filterung, etc. |
| Derivate | Neigung, Exposition, TWI | Angabe, ob DGM oder abgeleitete Daten; Einheiten |
| Gridweite | 2; 5; 10; 25; 50 | Nur bei Griddaten |
| Interpolationsverfahren | Kriging, IDW, Spline | Nur bei DGM, nicht bei Derivaten |
| Ansicht (als thumbnail) | Isolinien, Hillshade-Bild | Optional zur visuellen Qualitätskontrolle |
| Bemerkung | 255 Zeichen | Zusätzl. Angaben zu Qualität und Bearbeitung |

4.4 Untersuchung von komplexen Größen

4.4.1 Formbasierter Ansatz: Morphometrische Größen

Zur Ableitung von morphometrischen Formelementen aus den RTK-GPS- und Laserscanner-DGMs wurde in dieser Arbeit ein Avenue-Script erstellt („landformelements.ave“). Dies nutzt die *curvature*-Funktionen von ArcView und setzt nach Angabe von Krümmungsschwellenwerten aus den primären Reliefattributen Horizontal- und Vertikalkrümmung die in Kap. 4.2 beschriebenen neun Formelemente zusammen. Es entsteht eine formbasierte Einteilung der Landschaft, in der z. B. „Xd“ (konvex-divergierend) und „Vd“ (konkav-divergierend) kuppelte Bereiche bzw. Hangschultern anzeigt und „Vk“ (konkav-konvergierend) einem zuflussdominierten Bereich, z. B. Hangfuß oder Senke, entspricht. Probleme ergeben sich vor allem aus der Anpassung der Erfassungs- und Modellskaale. Die Schwellenwerte für die Definition, ob eine Flächeneinheit als „gekrümmt“ oder „nicht gekrümmt“ gilt, wurde an die typische Oberflächenbeschaffenheit der RTK-GPS-Modelle angepasst. Als Ansatzpunkt für die Festlegung der Schwellenwerte galt die Vorgabe der AG Bodenkunde (1994) zur Reliefbeschreibung. Danach wird z. B. ein „sehr schwach gewölbter“ Bereich mit Krümmungsradien zwischen 1000 m und 3000 m beschrieben. Das entspricht Werten der Vertikalwölbung zwischen $0,0003 \text{ m}^{-1}$ und $0,001 \text{ m}^{-1}$ und wird in den meisten Geländeanalyse-Programmen mit dem Faktor 100 multipliziert dargestellt (in diesem Fall: 0,03-0,1). Zur Kalibrierung der Werte für das Script wurde eine Geländekartierung durchgeführt. Im Gegensatz zu den klassischen Ansätzen soll hier die Tangentialwölbung an Stelle der Horizontalwölbung verwendet werden. Die Tangentialwölbung gilt in der geländehydrologischen Literatur als aussagekräftigeres Maß für Divergenz und Konvergenz (z. B. Wilson und Gallant, 2000), da sie die hydrologische Wirksamkeit durch Berücksichtigung der Geländeneigung besser beschreibt.

Das Script „landformelements“ ermittelt aus dem DGM zuerst die Werte der beiden Wölbungsrichtungen „vertikal“ und „horizontal“ für jede Rasterzelle. Die Tangentialwölbung ergibt sich im nächsten Schritt aus der Multiplikation von Horizontalwölbung und dem Sinus des Geländeneigungswinkels für den zu untersuchenden Punkt. Die Wölbungstypen werden nun durch eine Reklassifizierung in drei Klassen eingeteilt: konkav, gestreckt und konvex (Vertikalwölbung) bzw. konvergierend, parallel und divergierend (Tangentialwölbung). Als Grenzwert zwischen „gekrümmt“ und „gestreckt/parallel“ wurden aufgrund von Versuchen mit repräsentativen DGMs aus dem *preagro*-Projekt die in Tab. 4-5 dargestellten Krümmungsradien gewählt. Die Gültigkeitsgrenzen für dieses Modell sind sehr begrenzt, da die Krümmung ein sehr sensibler Parameter ist, der stark von den Oberflächeneigenschaften des jeweiligen DGMs abhängt. Dikau (1993) schlägt für Rasterweiten von 20 bzw. 40 m Krümmungsradien von 600 bzw. 1200 m vor. Diese konnten für die vorliegende Arbeit nicht genutzt werden, da hier unterschiedliche Erfassungsmethoden berücksichtigt wurden. So sind für Laserscanner-DGMs in der Regel auf Grund der höheren Oberflächenrauigkeit andere Radien trotz gleicher Rasterweite zu wählen, um die Formerkennung zu ermöglichen. Selbst dann ist eine mehrfache Glättung des DGMs vor der Analyse notwendig.

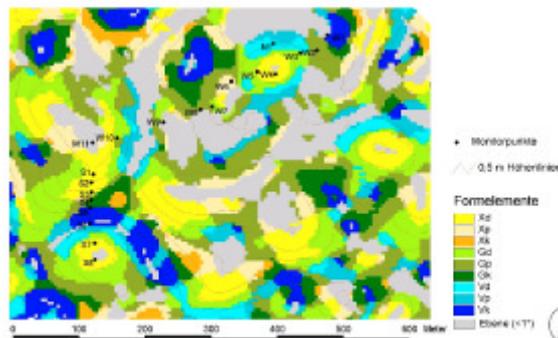
Tabelle 4-5: Wölbungsstärken, die zur Abgrenzung von Einheiten mit ArcView verwendet wurden.

| Wölbung | Kurzzeichen | Vorzeichen ArcView | Grenzwert [m ⁻¹] (1/r * 100) | Code |
|--------------------------|-------------|--------------------|--|------|
| Vertikal konvex | X | - | -0,05 | 1 |
| Vertikal gestreckt | G | -, + | -0,05; 0,05 | 2 |
| Vertikal konkav | V | + | +0,05 | 3 |
| Horizontal konvergierend | k | - | -0,002 | 1 |
| Horizontal parallel | p | -, + | -0,002; 0,001 | 4 |
| Horizontal divergierend | d | + | +0,001 | 5 |

Eine Kombination aus den beiden in je drei Klassen eingeteilten Wölbungs-Grids ergibt nun neun verschiedene Formelemente. Diese Kombination wird durch eine Rastermultiplikation durchgeführt, nachdem die Reklassifikation den einzelnen Zellen den in Tab. 4-5 dargestellten Code zugewiesen hat. Diese Codes garantieren, dass nach der Multiplikation eindeutige Grid-Werte die Zuordnung nach Tab. 4-6 ermöglichen.

Das Ergebnis einer solchen Reliefgliederung ist in Abb. 4-7 der Modellierung der Bodenfeuchte mit dem TWI gegenübergestellt. Abb. 4-8 bietet einen perspektivischen Eindruck des Untersuchungsgebietes und eine Vergleichsmöglichkeit an Hand der eingezeichneten 20 Monitorpunkte.

9 Formelemente aus Vertikal- und Tangentialwölbung



TWI als Graustufen-Raster, Ausschnitt von Kassow, Schlag 111

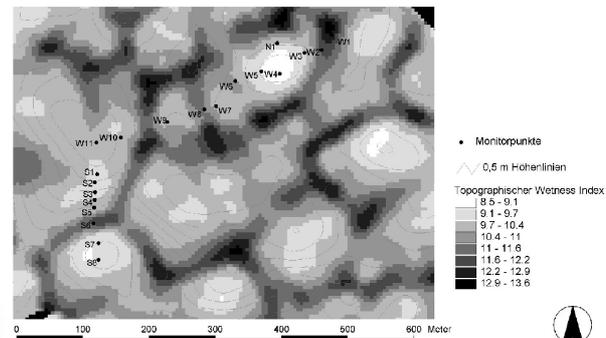


Abbildung 4-7: Ableitung von Formelementen und dem Wetness-Index (TWI) aus dem DGM. X=konvex, G=gestreckt, V=konkav; k=konvergierend, p=parallel, d=divergierend.

Tabelle 4-6: Kombination der Wölbungstypen mittels Multiplikation des Codes aus Tab. 4-5.

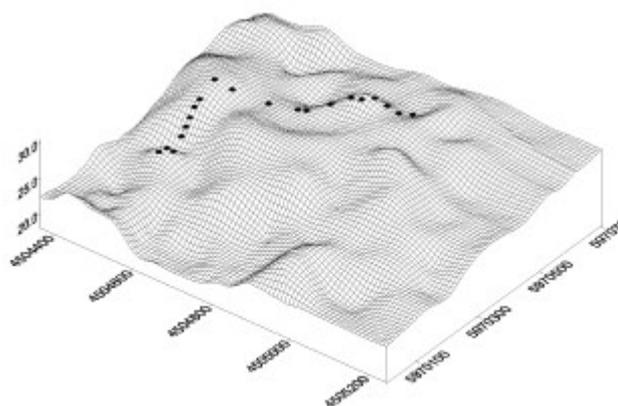
| | Horizontal divergierend | | Horizontal parallel | | Horizontal konvergierend | |
|--------------------|-------------------------|-----------|---------------------|-----------|--------------------------|----------|
| Vertikal konvex | Xd | 5 | Xp | 4 | Xk | 1 |
| Vertikal gestreckt | Gd | 10 | Gp | 8 | Gk | 2 |
| Vertikal konkav | Vd | 15 | Vp | 12 | Vk | 3 |

Das Muster der Formelemente ähnelt stark dem TWI. Der Grund dafür ist, dass beide Grids entscheidend auf der Berechnung der Krümmung aus dem gleichen DGM beruhen. In Bezug auf das Bodenfeuchteregime lassen sich jedoch die Formelemente selbst bei Berücksichtigung von Hangneigung und Rauheit der Formelemente (nach Richter (1962) als „innere Merkmale“ bezeichnet) sowie Position und Exposition („äußere Merkmale“) nicht sinnvoll ordinal skalieren und in Management-Empfehlungen integrieren. Aufgrund der schlechten numerischen Darstellbarkeit der Übergangsformen wurde das Konzept für die Auswertung nicht weiter verfolgt. Ansätze zur Nutzung werden hier nichtsdestotrotz aufgezeigt und diskutiert.

So könnten die Formelemente, die durch den Landwirt mit einiger Übung im Feld nachvollziehbar sind, nach ihrem mittleren TWI bewirtschaftet werden. Für Schläge in Kassow wurden die Zusammenhänge zwischen abgeleiteten Formelementen und TWI-Werten statistisch untersucht. An dieser Stelle soll auf die von Richter (1962) als „Kleinstformen“ bezeichneten Strukturen eingegangen werden, deren Auflösung in Formelemente unberechtigt erscheint. Aus heutiger Sicht ist dies ein typisches Problem der Skalenwahl. Bei den DGMs aus RTK-GPS konnten diese Kleinstformen über eine Selektion nach Flächengröße (z. B. <4 Pixel = 100 m²) nach einer vorherigen Glättung mit dem Majority-Filter entfernt werden und den Nachbarformen (Polygonen) zugeschlagen werden. Der Majority-Filter weist einer Zelle den in der Nachbarschaft am häufigsten vorkommenden Wert zu.

Bei dem Laserscanner-DGM waren die Kleinstformen dominierend und zeigten, dass die Methode der Formelemente nicht mit der Erfassungsskala des Laserscannings harmonisiert. Selbst nach starker Glättung des DGM bzw. Variation der Krümmungsgrenzwerte war das Ergebnis stark verrauscht und erschwerte das Erkennen von Strukturen auf dem Schlag. Der Wertebereich für das Testfeld Kassow (Abb. 4-7) erweiterte sich bei der Vertikalwölbung von 50 m Krümmungsradien (5 m DGM auf RTK-GPS-Basis) bis zu 3 m Krümmungsradien bei dem Laserscanner-DGM (2 m DGM).

Das hier beschriebene Verfahren wurde für die Rasterweite 5 - 10 m und die Eigenschaften der RTK-GPS-DGMs optimiert. Mit einer geringeren DGM-Auflösung ist in der Regel eine Nivellierung der Reliefattribute verbunden. Somit ist eine Anpassung der Grenzwerte für die Ausweisung der gestreckten/parallelen Bereiche notwendig, um eine Überschätzung der Ausdehnung dieser Bereiche zu vermeiden.

**Abbildung 4-8:** Wireframe-Modell des Untersuchungsgebietes mit den Boden-Monitorpunkten (schwarz).

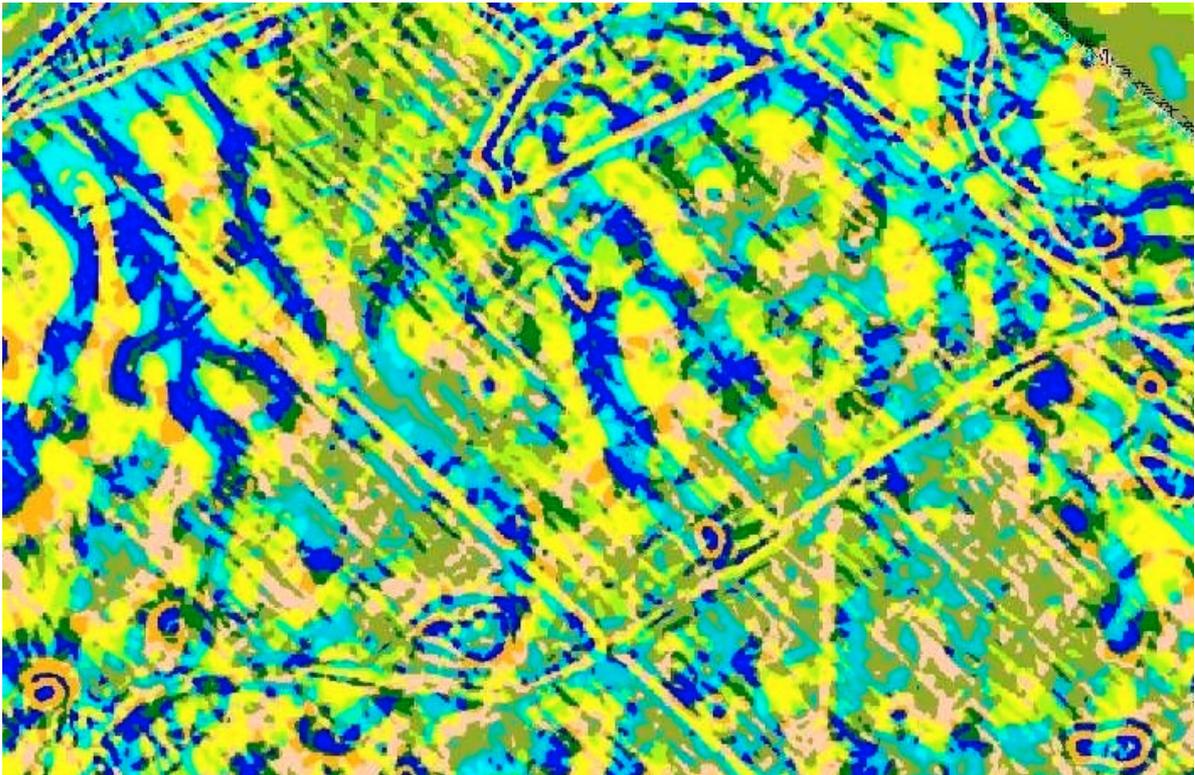


Abbildung 4-9: Formelemente nach der Legende von Abb. 4-6, abgeleitet aus einem Laserscanner-DGM (2 m Raster) und mit einem Majority-Filter (Radius= 3 Zellen) bearbeitet. Kantenlänge des Bildausschnitts ca. 2 km. Strukturen wie Straßen und Bahnlinie (Bildbereich links oben) sowie Schlagränder/Wege sind als konvex-divergierende Formen (gelb) zu erkennen, wasserführende Ackerhohlformen als orange (konvex-konvergierend) umgrenzte blaue Flächen (konkav-konvergierend). Kassow, Schlag 106.

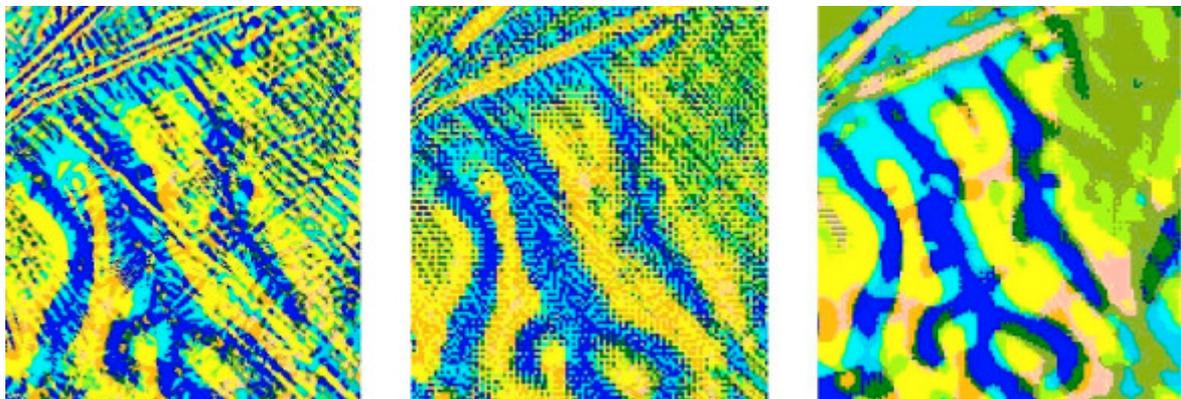


Abbildung 4-10: Vergleich von abgeleiteten Formelementen auf Basis verschiedener Veredelungsstufen, vgl. Abb. 4-8. Kantenlänge der Detailausschnitte ca. 500 m. Von links nach rechts: 2 m Grid des mean-gefilterten Laserscanner-DGMs, gleiches Grid nach Resampling auf 5 m, 5 m Grid nach zweifacher Anwendung des Majority-Filters. Kassow, Schlag 106.

Wird bei dem Laserscanning-DGM kein Resampling (Erhöhung der Rasterweite von 2 auf 5 m) durchgeführt, sind trotz zweifacher Glättung mit dem Mean-Filter Wege und Schlagränder als eigene Reliefelemente zu erkennen (Abb. 4-9). Als lineare Strukturen treten Wegeböschungen (zumeist gelb, d.h. konvex-divergierend) in den Vordergrund. Parallele Streifen (konvex-divergierend bis gestreckt-divergierend, hellgrün) zeigen die Bearbeitungsrichtung auf dem Schlag an. Der Fahrgassenabstand von 18 m wurde damit im DGM exakt widergespiegelt. Zur Zeit der Messkampagne (19.3.2000) betrug die Wuchshöhe des Getreides etwa 0,2 - 0,3 m. Blaue Bereiche zeigen das Muster des oberflächennahen Wasserabflusses, i.d.R. Vernässungsstellen oder Abflussrinnen bei Starkregen. Auswirkungen von Bildbearbeitungsalgorithmen auf die Darstellung der Abflussmuster sind in Abbildung 4-10 zu sehen.

Zur Anwendung dieser Formelemente bei der Bewirtschaftung wurde der Zusammenhang zu den TWI-Werten (Kap. 4.4.2) untersucht. Eine Ausweisung von Formelementen für den 80 ha großen Schlag 106 ergab 638 Formelemente, die in Polygone konvertiert wurden. Jedem dieser Polygone wurde der jeweilige mittlere TWI zugewiesen (Abb. 4-11). Die Umsetzung dieser Prozedur in ArcView erfolgte mit dem Befehl "summarize by zones". Der Vorteil dieses Verfahrens gegenüber der direkten Verwendung des TWI-Grids ist die Vermeidung der linearen Muster hoher TWI-Werte, die auf der ArcView-Flowroutingmethode „D8“ beruhen. Es entstehen größere Flächen einheitlicher Reliefform mit einem prozessbasierten potenziellen Mittelwert der Bodenfeuchte.

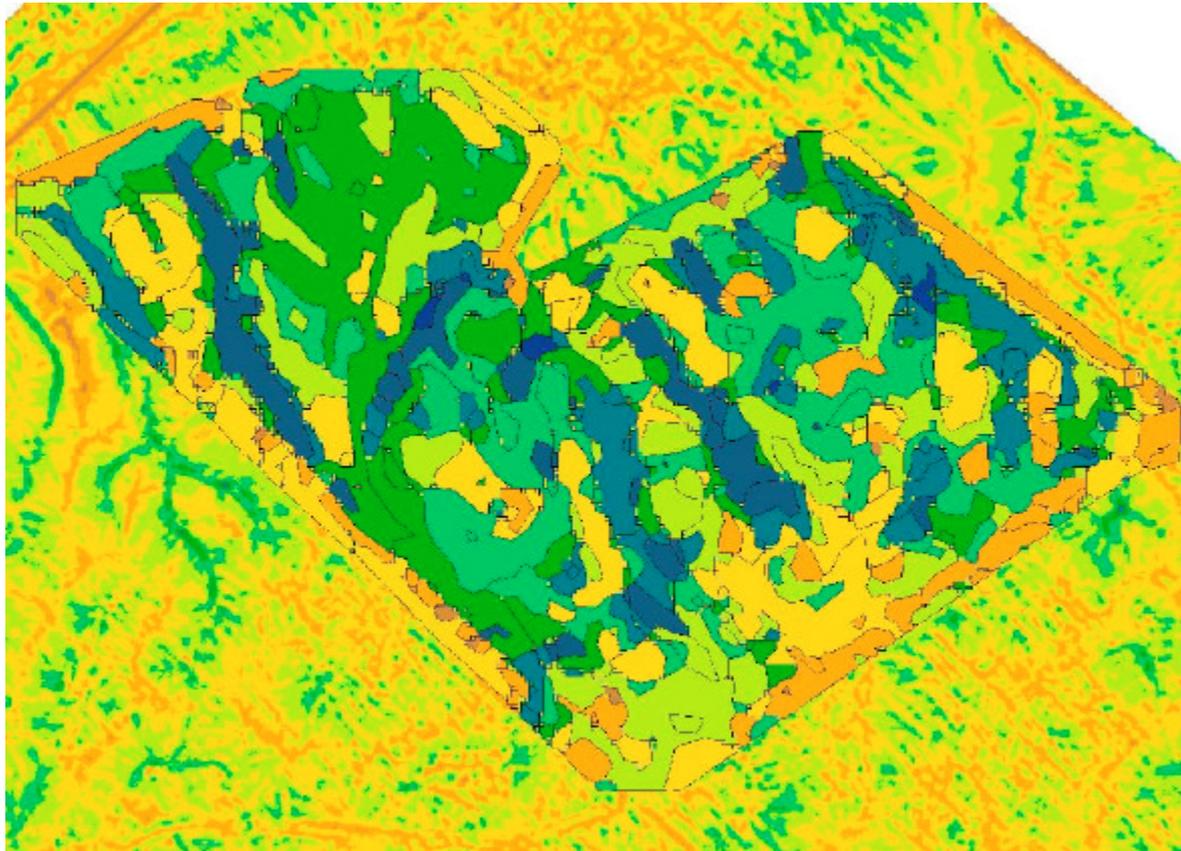


Abbildung 4-11: Formelement-Polygone mit mittlerem TWI ihrer Fläche. Die potenzielle Bodenfeuchte steigt von braun über grün nach blau an. Zugrunde liegendes Rasterbild: TWI-Grid, 2 m Raster auf Basis des Laserscanning-Modells. Die Streifigkeit spiegelt die Fahrgassen wider.

Tabelle 4-7: Zusammenhänge zwischen Formelementen und TWI-Werten auf Schlag 106 (Kassow).

| | konvergierend | konkav | divergierend | konvex |
|-------------------------|---------------|--------|--------------|--------|
| TWI-Mittelwert | 11,21 | 11,16 | 9,98 | 9,93 |
| TWI-Minimum | 8,01 | 8,01 | 8,25 | 8,08 |
| TWI-Maximum | 13,89 | 14,15 | 12,74 | 13,97 |
| Standardabweichung | 0,91 | 0,98 | 0,62 | 0,69 |
| Anzahl Zellen (5 * 5 m) | 5885 | 9450 | 11056 | 8353 |

Tab. 4-7 zeigt statistische Kennzahlen der verschiedenen Formen in Bezug auf TWI-Werte. Die Signifikanzen der Mittelwertunterschiede wurden, da keine Normalverteilung vorlag, mit dem Wilcoxon-Rank-Test (S-Plus) getestet. Folgende Hypothesen konnten mit hoher Signifikanz bestätigt werden:

- TWI-Mittelwert (konvergierend) > TWI-Mittelwert divergierend,
- TWI-Mittelwert (konkav) > TWI-Mittelwert (konvex).

Die niedrigeren Standardabweichungen der divergierenden/konvergierenden Maße im Vergleich zu den auf der vertikalen Krümmungstendenz beruhenden Werte zeigen, dass die auf der Tangentialwölbung beruhende Klassifizierung die bessere Übereinstimmung mit dem Wetness-Index ergibt. Insgesamt sind jedoch die divergierend-konvexen Formen, also die potenziellen „Trockenformen“ in sich homogener. Dies beruht auf der ausgeprägten Abflusskonzentration des TWI in den Tallinien mit dem D8-Algorithmus, auch nach der Mean-Filterung.

Die TWI-Mittelung für Formelemente wurde auf mehreren Schlägen des Betriebes Kassow getestet. Die höchsten TWI-Mittelwerte traten stets in konvergierenden Formelementen auf, die geringsten in divergierenden. Die Tangentialkrümmung beeinflusst folglich stärker die TWI-Werte als die Krümmungstendenz des Geländes.

Ein Vergleich mit Bodenfeuchte-Messungen an den 20 Monitorpunkten (Abb. 4-7) ergab die höchsten Feuchtwerte wie erwartet in den konkav-konvergierenden Polygonen. Eine sehr hohe Feuchte trat auch in einem konvex-divergierenden Polygon an einer Hangschulter auf. Dies lässt sich allerdings mit der dort vorherrschenden Bodenartengruppe „Tonschluffe“ erklären. Die geringste Bodenfeuchte wurde auf zwei gestreckt-divergierenden Standorten gemessen, welche die einzigen reinen Sande enthielten. Die Monitorpunkte werden im Kap. 5.2 näher beschrieben.

4.4.2 Prozessbasierter Ansatz: Topographische Indizes

Ziel der Ermittlung prozessbasierter topographischer Indizes aus dem DGM sind Aussagen über die flächenhafte Verteilung von landschaftsökologischen Größen. Dies betrifft vor allem hydrologische, pedologische und klimatologische Parameter. Für die Landwirtschaft wurde maßgeblich die Bodenfeuchte als wichtiger Parameter mit Reliefbezug gewählt. Den Ergebnissen zur Bodenfeuchteuntersuchung ist Kapitel 5.2 gewidmet. Die Einstrahlungsverhältnisse haben einen Einfluss auf höherer Skale und können für einen Schlag als gering variant angenommen werden. Mit SRAD wurden Untersuchungen zwischen Einstrahlungsparametern und Ertrag durchgeführt und verschiedene Witterungsszenarios (reale Verläufe 1997 und 1998 bzw. je ein extrem trockener und feuchter Sommer) getestet (Schmidt, 1999). Die einzige signifikante Korrelation ergab sich für die Minimumtemperatur, was jedoch an der besseren Wasserversorgung in den Talbereichen lag. Der Algorithmus beruhte auf einer höhenabhängigen Temperaturabnahme (siehe auch Kap. 5.2). Die Größenunterschiede der mit SRAD berechneten Werte waren für den Untersuchungsraum Kassow sehr gering. Die Ergebnisse legen nahe, dass SRAD nicht für die vorliegende Skale geeignet ist.

Die SRAD-Datei war Grundlage für die Ableitung des komplexen Wetness-Index mit TAPES-WET. Zum Vergleich des komplexen Index mit dem quasi-dynamischen WI nach Barling et al. (1994) und der Ermittlung der Parameter für die Porosität und die hydraulische Leitfähigkeit (k_f) aus den Daten der Reichsbodenschätzung für das TAPES-Modul DYNWET siehe Schmidt (1999). Dieser Vergleich wurde für das komplette Gebiet Kassow durchgeführt und zeigte, dass der simple TWI $\ln(A_s/\tan\beta)$ die plausibelsten Ergebnisse in Form von Mustern des Wasserflusses lieferte. Die Berücksichtigung der auf Grundlage von Stechzylinderproben und der Reichsbodenschätzung gewonnenen k_f -Karte spiegelte den starken Einfluss der Bodenparameter auf die Modellierung wider, die eindeutig die Polygone einheitlicher Bodenparameter der Eingangskarte abbildete. Auch eine Fuzzyfizierung der Grenzen und eine stärkere Gewichtung der Geländehöhe durch manuelle Überhöhung des DGMs führte zu keinem Bodenfeuchtemuster, das mit Felddaten/Luftbildern bestätigt werden konnte.

Verschiedene TWI-Berechnungsverfahren und DGM-Auflösungen wurden von Schmidt und Persson (2003) untersucht. Die bekannten Nachteile des D8-Algorithmus (parallele Abflusslinien am Hang mit dem Ergebnis großer Unterschiede benachbarter Areale und damit breiter Streuung der Punktwolken bei Scatterplots) wurden bestätigt und durch eine Mean-Filterung geglättet. Burrough et al. (2000) versuchten dieses Phänomen über ein iteratives Modellieren

mit einem jeweils wechselnden, zufälligen Höhenfehler von 0,1 m im DGM zu minimieren. Hier wurde D8 nach der Glättung weiter untersucht, obwohl DEMON bessere Ergebnisse beim Vergleich zu Bodenfeuchtemessungen zeigte (Kap. 5.2). Der schlechteren Qualität steht gegenüber, dass D8 der Standard in vielen GIS-Produkten wie ArcView und ArcInfo ist und marktübliche Anwendungen somit darauf beschränkt sind.

Die TWI-Karten zeigen Zonen hohen Bodenfeuchtepotezials (hohe Werte) und zuerst abtrocknende Zonen (niedrige Werte). In Abb. 4-12 ist das TWI-Muster für das RTK-GPS-DGM mit D8 gefiltert und ungefiltert bzw. mit DEMON sowie für das Laserscanner-DGM zu sehen. Das ungefilterte D8-Grid zeigt linienartig angeordnete Null-Werte (weiß). Diese weisen auf lokale Wasserscheiden hin und werden durch den Mean-Filter geglättet. Im Hinblick auf die Bodenfeuchte ist die Aussage gering, bei der visuellen Interpretation eignet sich dieses Phänomen aber für eine Kompartimentierung der Landschaft. Weiße Zonen auf dem DEMON-Grid stellen Geländekuppen und erodierte Hangschultern dar. Dies wurde mit den berechneten Höhenlinien erfolgreich überprüft. Für das 2 m Laserscanner-DGM zeigten beide Algorithmen ein starkes Rauschen und damit starke kleinräumige Variationen, die auch durch die im DGM widergespiegelte Fahrgassenstruktur beeinflusst wird. Hohe Aussagekraft erwies sich für die mit DEMON ermittelten Trockenzonen, aber auch die Feuchtbereiche des gefilterten D8-TWI.

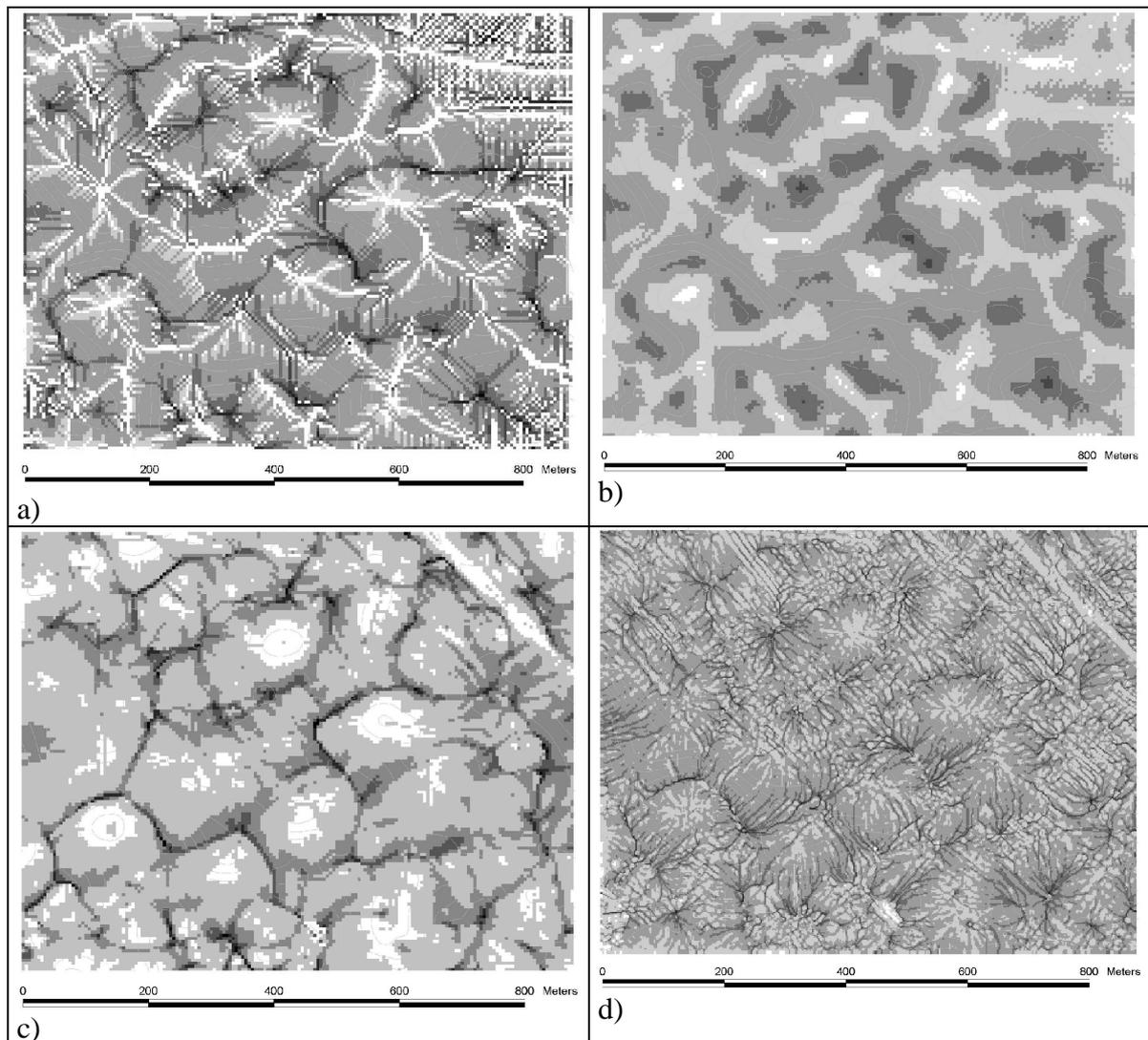


Abbildung 4-12: TWI für einen Ausschnitt von Kassow, Schlag 111, berechnet aus dem RTK-GPS-DGM (a) mit Hilfe des ArcView-flowaccumulation-Befehls (D8), (b) nach Glättung mit dem Mean-Filter, (c) berechnet mit TAPES (DEMON) und (d) auf Grundlage des 2 m-Laserscanner-DGM (DEMON).

Die Unterschiede zwischen D8 und DEMON im Bereich von Mulden zeigt Abb. 4-13. Bei der D8-Variante laufen einzelne Flusslinien entlang berechneter Falllinien in die Mulde hinein, während die unmittelbare Nachbarschaft auf Grund des mangelnden Anschlusses an die hydrologisch oberhalb liegenden Zellen Trockenheit suggerieren. In diesem Fall hilft die Mean-Filterung gut, um das D8-Muster dem DEMON-Ergebnis anzugleichen.

Weitere untersuchte Reliefparameter waren der Stream Power Index und der Slope-Length-Faktor für die Vorhersage von Erosionspotenzialen. Die Ergebnisse folgen im Kapitel 6.2.2.

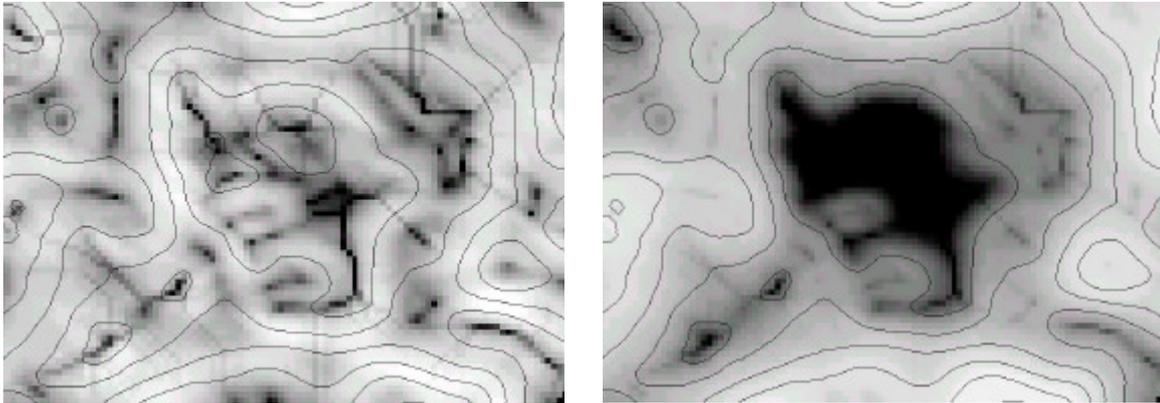


Abbildung 4-13: TWI nach D8 (links) und DEMON (rechts) für eine Geländemulde in Kassow, Schlag 111. Dunkle Graustufen bedeuten hohe potenzielle Bodenfeuchte. RTK-GPS-DGM (5 m Raster). Kantenlänge 500 m.

4.4.3 Genauigkeit von Ableitungen in Abhängigkeit der DGM-Qualität

Bei der Betrachtung der Ableitungen wurde das zugrunde liegende DGM jeweils als exakt angenommen. Jedoch wirken sich, gerade bei den 2. Ableitungen, die über die Abflussrichtung bestimmen, Fehler im DGM stark auf die Werte der abgeleiteten Größen aus. Den entscheidenden Einfluss auf die berechneten Abflussmuster im hier untersuchten Maßstab hat jedoch, wie bereits dargelegt, die Beschaffenheit der Oberfläche, die über ihre Rauigkeit die abgeleitete Fließrichtung auch kleinräumig steuert.

Florinsky (1998) stellte sich widersprechende Literaturstellen bezüglich der Reliefposition mit den größten Ungenauigkeiten abgeleiteter primärer Parameter zusammen. Als Hauptquelle für Ungenauigkeiten wird die Auflösung des DHM gesehen, denn eine größere Rasterweite bewirkt eine Generalisierung von lokalen Gradienten. Florinsky (1998) schlägt zur Qualitätsabschätzung der Parameter ein Verfahren ohne Referenzmessung vor, das die Genauigkeit der DHM-Erfassung und das Berechnungsverfahren mit einer Karte des RMSE bewertet. Guth (1995) verglich sechs Methoden zur Berechnung der Geländeneigung und fand Abweichungen bis $3,5^\circ$ (bei mittleren Neigungen von $17 - 22^\circ$) zwischen dem „steepest downhill“ und ungewichtetem Mittel von acht Nachbarn. Für hydrologische Auswertungen empfiehlt er die Neigungsberechnung nach „steepest downhill“, also die stärkste Neigung innerhalb einer Nachbarschaft, jedoch nicht die darauf basierende Expositionsberechnung, die der hier verwendeten D8-Variante nahekommt. Wise (1998) vergleicht die Unterschiede der Histogramme von Ableitungen qualitativ differierender DGMs. Seine Untersuchungen ergaben, dass die Neigung nur 2 % der Variation der Expositionsfehler erklären. Rieger (1992) zeigt, dass die Exposition im Raster-DGM schon bei 5° Neigung (bei einer Genauigkeit von $\pm 1,5^\circ$) nur noch auf 20 gon genau bestimmbar ist. Expositionsfehler sind von Bedeutung, da die Exposition über die Hauptabflussrichtung bestimmt. Brooks und Anderson (1998) fanden für den *topographic index* bei Untersuchungen mit TOPMODEL eine Abhängigkeit von der Gitterweite. Der TWI wuchs mit steigender Gitterweite im Schnitt an, da größere Gitterweiten zur Berechnung von geringeren Neigungen führen. Durch die Variation der Gitterweite ergaben sich auch unterschiedliche Zonen der Sättigung und Abweichungen bei den Fließwegen. Nach Wilson und Gallant (2000) erhöhen kleinere Rasterweiten das Niveau der hydrologischen

Informationen nur, wenn das Verhalten des Systems nicht von der räumlichen Verteilung von Unterschieden der Bodenparameter bestimmt ist. Ein zu fein aufgelöstes DGM führt bei den vereinfachenden Annahmen über das System Boden-Relief, das dem TWI zugrunde liegt, zu starkem Rauschen der Information (siehe Abb. 4-12d). Thompson et al. (2001) untersuchten die Genauigkeit für DGM-Rasterweiten von 10 und 30 m mit einer Höhenauflösung von 0,1 bzw. 1 m. Thompson et al. (2001) verglichen die DGMs über die Häufigkeitsverteilung der Attribute sowie absolute Werte an ausgewählten Geländepunkten und weisen auf die Bedeutung der vertikalen Auflösung hin. Aus einer geringeren Diskretisierung resultieren häufiger gleiche Nachbarwerte und damit Gebiete mit der Neigung und Krümmung „Null“. Folglich ist speziell in flachen Gebieten eine bessere Höhenauflösung erforderlich. Für die vorliegende Arbeit ist dies jedoch nicht zwangsläufig zu sehen, da auf den ebenen Schlägen wie in den Außenbereichen bei Landshut oder im Süden Sachsen-Anhalts kaum Heterogenität der Standortfaktoren vorliegt. Hier zeigt der TWI eine generelle Schwäche, da auch für fast ebene Bereiche zumindest eine Abflussbahn berechnet wird, die unnatürlich hohe Bodenfeuchtepotenziale suggeriert. Die Wirksamkeit kann durch die Überlagerung mit einem Grid der Geländeneigung leicht eingeschätzt werden. Rasch (2003) untersuchte für Kassow, Schlag 106, die Auswirkungen von zufälligen Fehlern im DGM auf die Ableitungen und fand vor allem für Neigung und TWI Auswirkungen auf die Werteverteilungen. Der Fehler von Neigung und Vertikalkrümmung nimmt konstant mit dem zufälligen Höhenfehler zu, während Exposition und Horizontalkrümmung ein ausgeprägtes Fehlermuster zeigen. Rasch (2003) bestätigt, dass Gebiete geringer Neigung stärker beeinflusst werden, v.a. bei der Horizontalkrümmung. Bei einem zufälligen Fehler von $\pm 0,2$ m in Bezug auf die Genauigkeit des RTK-GPS-DGMs beträgt nach Rasch (2003) die mittlere absolute Verschlechterung bei der Neigung $0,5^\circ$, bei der Exposition 27° , bei der Horizontalkrümmung $1,5 \text{ m}^{-1}$, bei der Vertikalkrümmung $0,007 \text{ m}^{-1}$ und beim TWI (TAPES) 1,2.

Um die Auswirkungen unterschiedlicher DGM-Qualitäten abzuschätzen, wurden für den relativ ebenen Schlag Feldscheide (Thumbby) und den 6 ha kleinen, stark geneigten Schlag Lohzipfl (Landshut) sowie den 180 ha großen, komplexen Schlag 111 (Kassow) die Parameter Neigung und Exposition bei verschiedenen DGM-Auflösungen untersucht. Die geometrische Verschiebung der 1° Klassengrenzen bei den abgeleiteten Neigungs-Grids betrug bei Feldscheide und Lohzipfl für das 10 m Grid im Vergleich zum 5 m Grid bis zu 1,5 Pixel (= 15 m). In den Steilbereichen lag die geometrische Verschiebung der Klassengrenzen im Subpixelbereich. Die Folge dieser ungleichmäßigen Verschiebungen ist, dass einzelne kleine Reliefformen nicht mehr erkannt und folglich andere Fließwege berechnet werden. Vor allem bei flachem Relief ist deshalb eine hohe Genauigkeit des DGM und Präzision der Angaben wichtig. Der mittlere Fehler der Exposition war am einheitlich geneigten Lohzipfl mit $2,8^\circ$ kleiner als bei der flachen Feldscheide, bei der die Variabilität der Exposition insgesamt wesentlich größer war. Bei flachen Schlägen wirkt sich der Expositionsfehler zwar nicht stark auf Einstrahlungsparameter aus, aber auf die Richtung der Abflussberechnungen. In Tab. 4-8 ist am Beispiel Kassow 111 deutlich zu erkennen, wie die Neigungsparameter mit steigender Rasterweite zurückgehen und der TWI, der die Neigung im Nenner berücksichtigt, gleichzeitig ansteigt. Daraus wird die mangelnde Vergleichbarkeit absoluter TWI-Werte bei der Beurteilung eines Schlages ersichtlich, falls nicht die gleiche Rasterweite des Ausgangs-DGM vorliegt. Die Zusammenstellung zeigt weiterhin, dass die Mean-Filterung des TWI zu leicht höheren Mittelwerten und geringeren Wertebereichen und Standardabweichungen führt. Die Winkelabweichung der Exposition der einzelnen Rasterweiten/Datenquellen im Vergleich zum 5 m RTK-Grid wurde an 740 Kontrollpunkten ermittelt. Die mittlere Abweichung von $18,8^\circ$ im Vergleich zum 2 m DGM beruht auf der großen Oberflächenrauigkeit des Laserscanner-DGM (LS). Die Abweichungen nehmen bei einer Mean-Filterung und bei einem Resampling auf 5 m ab und nähern sich dem RTK-Grid langsam an. Bei mehrfachem Filtern jedoch steigt die Abweichung wieder auf Grund der starken Generalisierung. Der Vergleich mit den LVA-

Daten zeigt einen erwarteten großen Anstieg mit der Rasterweite und unterstreicht die geringe Aussagekraft der Ableitungen eines 50 m Grids für die betrachtete Skala.

Tabelle 4-8: Auswirkung der Rasterweite auf statistische Kennzahlen von Neigung, TWI (D8) und geglätteten TWI (mf = mean filter). Für die Exposition wurde die mittlere Abweichung in Grad vom 5 m Grid berechnet. (LS); rsp = von 2 m auf 5 m resampled.

| | Neigung Ø [°] | Neigung s | Neigung Max [°] | Expos. [°] | TWI Ø | TWI s | TWI range | TWI mf Ø | TWI mf, s | TWI mf, range |
|-------------------|------------------|--------------|--------------------|---------------|----------|----------|--------------|-------------|-----------------|---------------------|
| Feldscheide 5 m | 0,82 | 0,45 | 2,50 | x | 9,12 | 0,69 | 5,71 | 9,13 | 0,53 | 4,54 |
| Feldscheide 10 m | 0,77 | 0,43 | 2,29 | 6,1 | 9,16 | 0,68 | 5,41 | 9,20 | 0,46 | 4,26 |
| Lohzipfl 5 m | 6,45 | 1,75 | 9,62 | x | 7,00 | 0,42 | 3,86 | 7,11 | 0,48 | 3,35 |
| Lohzipfl 10 m | 6,27 | 1,80 | 8,79 | 2,8 | 6,97 | 0,43 | 3,51 | 7,10 | 0,43 | 2,68 |
| 111 2 m (LS) | 1,98 | 1,13 | 13,8 | 18,8 | 8,28 | 0,74 | 14,20 | 8,29 | 0,56 | 6,83 |
| 111 5 m (LS) rsp. | 1,87 | 1,04 | 9,9 | 16,4 | 8,30 | 0,70 | 7,39 | 8,31 | 0,54 | 5,09 |
| 111 2 m (LS) mf | 1,78 | 1,00 | 11,4 | 16,0 | 8,45 | 0,75 | 11,20 | 8,45 | 0,66 | 7,29 |
| 111 5 m (GPS) | 1,80 | 1,00 | 9,3 | x | 8,34 | 0,71 | 9,71 | 8,36 | 0,57 | 5,53 |
| 111 10 m (LVA) | 1,38 | 0,80 | 6,1 | 22,0 | 8,59 | 0,73 | 6,82 | 8,62 | 0,54 | 4,08 |
| 111 25 m (LVA) | 1,22 | 0,71 | 4,9 | 24,4 | 8,69 | 0,69 | 5,14 | 8,74 | 0,44 | 3,30 |
| 111 50 m (LVA) | 0,98 | 0,90 | 4,4 | 59,9 | 9,21 | 1,16 | 6,90 | 9,31 | 0,86 | 6,06 |

Der Vergleich der Algorithmen zur Neigungsberechnung zeigte, dass ArcView mit der „Average Maximum“-Variante (Kap. 4.2.1) einer 3 * 3 Nachbarschaft nach Burrough (1990) bis zu 2° größere Neigungen berechnet als TAPES über die maximale Neigung einer gekrümmten Oberfläche auf Basis des Punktes und seiner 8 Nachbarpunkte (finite Differenzen). Die Abflussrichtung dagegen ermittelt TAPES optional mit D8, was zu höheren Neigungswerten führt. Auf dem topographisch komplexen Schlag Alt-Grünholz (mittlere Neigung = 2,7°) betrug die mittlere Abweichung zwischen den ArcView- und TAPES-Berechnungen 0,6°. Auffällig waren Fehler am Schlagrand (einzelne Randpixel mit 3 - 4° Unterschied). Die größten Abweichungen (1 - 2°) waren in den bis 8° geneigten Steillagen zu finden, was zu einer Verschiebung der 1°-Isolinien um 2 - 3 Pixel führte. In den Flachbereichen berechnete ArcView dagegen niedrigere Werte. Die Korrelation zwischen beiden Neigungsgrids betrug $r = 0,92$. Für den Schlag Feldscheide (mittlere Neigung = 0,8°) betrug der mittlere Fehler 0,17°, ebenfalls vor allem in den stärker geneigten Bereichen. Größere Auswirkung traten bei der Exposition auf.

4.5 Untersuchung zur Reliefkennzeichnung mit dem DGM

Zur schnellen Einschätzung der pedologisch wirksamen Heterogenität des Reliefs wurde ein Summenparameter aus dem DGM gesucht. Dazu erfolgte die Ableitung statistischer Kennzahlen von 54 Projektschlägen und eine ordinale Skalierung der Schläge in Abhängigkeit der einzelnen bzw. kombinierten Kennzahlen. Einige Schläge wurden vergleichsweise mit 5 und 10 m Rasterweite ausgewertet, um den Einfluss der Auflösung darzustellen. Die erzielten Rangfolgen wurden mit der Ertragsvariabilität und der elektrischen Leitfähigkeit sowie mit „Expertenwissen“, der subjektiven Einschätzung der Schlagheterogenität vor Ort, verglichen. Die verwendeten Kennzahlen waren Spannweite, Mittelwert und Standardabweichung von Geländehöhe, Neigung und TWI (Tab. 4-9) sowie die Variogramme von DGM und TWI (Tab. 4-10). Eine zufriedenstellende Kombination der Parameter konnte nicht gefunden werden. Gute Ansätze zeigte die Standardabweichung der Neigung, die von $\pm 0,05^\circ$ bis $\pm 3,0^\circ$ schwankte. Schläge, die eine Standardabweichung der Neigung von < 1 aufwiesen, waren nur schwach durch reliefgesteuerte Prozesse beeinflusst. Schwächen dieser Kennzahl sind vor allem auf großen Schlägen deutlich geworden. So lag der in Teilen stark reliefgeprägte Schlag

Wulfen 641 mit mittlerer Neigung und Standardabweichung von jeweils $\pm 0,7^\circ$ nur im unteren Mittelfeld der Auflistung, da die überwiegende Schlagfläche, von einer Erhebung abgesehen, aus einem flachen, gestreckten Hang aufgebaut ist, dessen Böden in den Niederungsbereichen Grundwasserkontakt haben. Die mittlere Neigung erwies sich als ungeeigneter Parameter, da parallel-gestreckte Hänge, auf denen kaum landschaftliche Heterogenität zu beobachten ist (z. B. Schlag Lohzipfl), hoch bewertet wurden.

Tabelle 4-9: Kennzahlen für ausgewählte Schläge (Relief, Ertrag und elektrische Leitfähigkeit). Die Ertragsdaten (Winterweizen) sind aus Datenschutzgründen als relative Erträge ohne Einheit dargestellt. Die Schläge sind nach absteigender Standardabweichung (*s*) der Neigung sortiert. Spw.: Spannweite der Daten; \bar{X} : Mittelwert; V.kr.: Vertikalkrümmung; v: überwiegend konkav; x: überwiegend konvex; Yld = Ertrag; *:10 m LS-Raster.

| Schlag | Spw. DHM | s DHM | S (Ø) Neigung | s (Ø) TWI | s (V.kr.) Form | s (Ø) Yld 00 | s (Ø) Yld 01 | s (Ø) Yld 02 | s (Ø) ECa |
|--------------|----------|-------|---------------|------------|----------------|--------------|--------------|--------------|-----------|
| Lohzipfl | 30,3 | 7,6 | 1,75 (6,5) | 0,7 (10,2) | 0,48 x | 1,9 (99) | - | - | 6,4 (59) |
| Espenberg | 26,4 | 7,7 | 1,50 (2,8) | 0,9 (8,1) | 0,49 v | 1,0 (61) | - | - | 18,1 (46) |
| Langer Berg | 11,5 | 3,0 | 1,40 (2,8) | 1,0 (10,5) | 0,34 x | - | 3,1 (94) | - | 10,7 (41) |
| Alt-Grünholz | 11,24 | 2,5 | 1,39 (2,7) | 1,1 (10,2) | 0,30 x | - | - | 2,2 (87) | 4,7 (35) |
| 106 | 25,2 | 5,3 | 1,22 (2,2) | 1,3 (10,7) | 0,19 x | - | 2,2 (72) | 1,6 (59) | 5,1 (28) |
| 104 | 25,6 | 6,3 | 1,15 (1,9) | 1,3 (11,0) | 0,16 v | 0,8 (50) | - | - | 3,9 (25) |
| 111 | 17,6 | 3,5 | 1,02 (1,9) | 1,1 (10,7) | 0,17 v | 2,5 (70) | 2,6 (70) | 1,7 (57) | 4,0 (26) |
| Thülig* | 7,6 | 2,8 | 0,70 (0,8) | 1,3 (13,9) | 0,05 x | - | 3,0 (95) | 4,2 (71) | 8,4 (68) |
| Wulfen 641 | 15,4 | 2,3 | 0,70 (0,7) | 1,4 (12,7) | 0,15 v | 0,9 (50) | - | - | 7,2 (30) |
| Kiesberg | 17,8 | 5,0 | 0,66 (0,7) | 1,4 (11,9) | 0,13 v | - | 1,7 (70) | - | 26,0 (36) |
| Feldscheide | 5,1 | 0,9 | 0,45 (0,8) | 1,5 (11,6) | 0,11 v | 3,2 (82) | 3,5 (87) | 1,9 (45)r | 2,2 (29) |
| Finkenherd | 6,4 | 1,7 | 0,31 (0,6) | 1,5 (12,9) | 0,05 v | 1,9 (58) | 1,5 (43)r | - | 17,0 (44) |
| Autobahn* | 15,4 | 4,0 | 0,30 (1,1) | 1,1 (14,2) | 0,03 v | 2,4 (72) | 2,8 (72) | 2,7 (66) | 12,2 (53) |

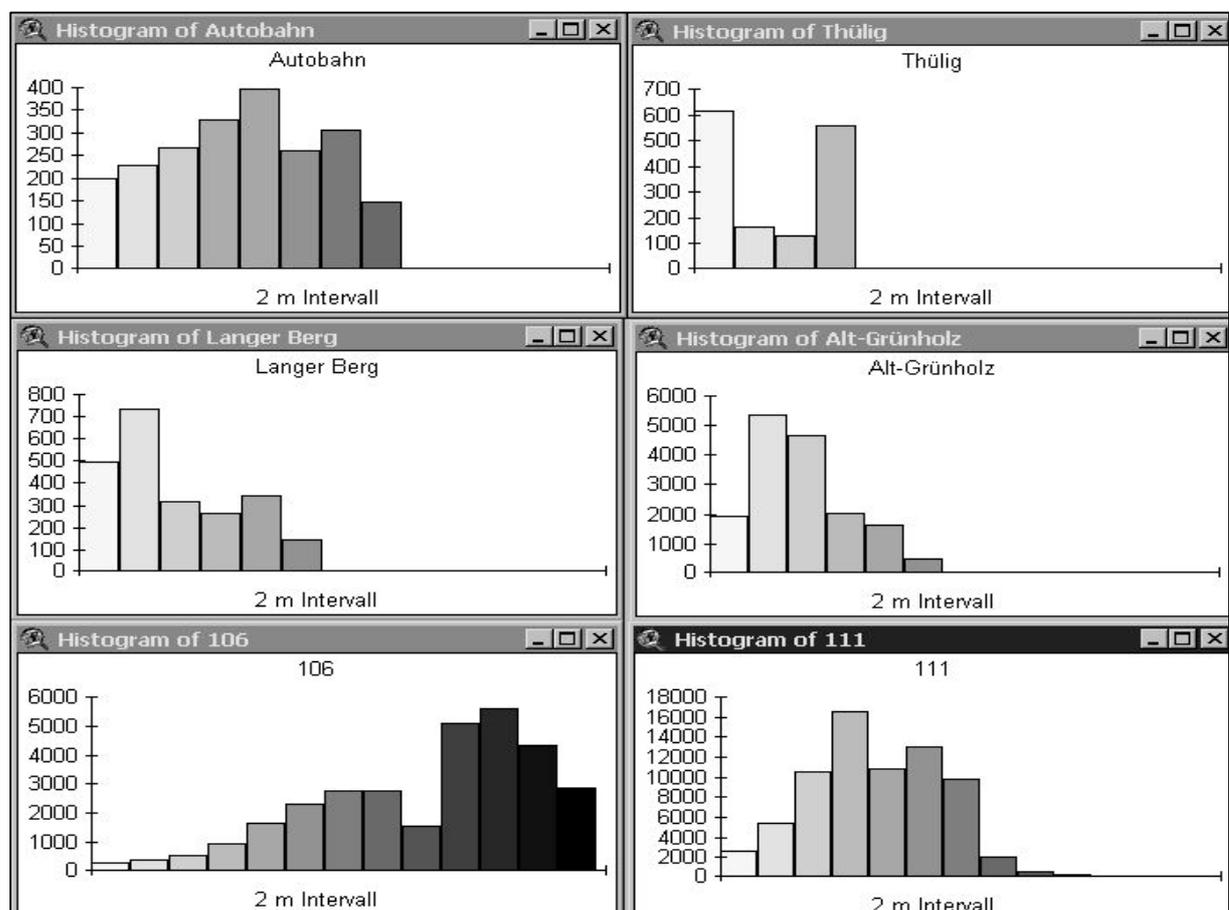


Abbildung 4-14: Histogramme der DGM Autobahn und Thülig (beide Beckum), Langer Berg (GTW), Alt-Grünholz (Thumby), 106 und 111 (beide Kassow) mit einer Balkenbreite von 2 Höhenmetern.

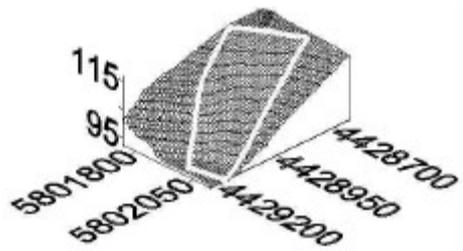
Der Höhenunterschied innerhalb eines Schläges bietet zwar ein Maß für die Energie, mit der Abflussprozesse stattfinden können, gewährt jedoch keine Einschätzung der räumlichen Variabilität. So weisen auch flachwellige, grundwassernahe Schläge einen vom Relief beeinflussten Wasserhaushalt auf. Die Standardabweichung der Geländehöhe spricht sehr stark auf die Verteilung der Geländehöhe an, allerdings nicht im gesuchten Sinne. Hier werden Schläge zu niedrig bewertet, deren Höhenverteilung (Abb. 4-14) näher an einer Normalverteilung liegt (z. B. Alt-Grünholz) im Vergleich zu gestreckten, homogenen Hängen (z. B. Autobahn, Abb. 4-15). Hohe Neigungsmittelwerte weisen auf eine Erosionsgefahr hin, sind aber für die Heterogenität auf dem Schlag ohne Aussage.

Kennzahlen des TWI sind schlecht vergleichbar, da die Werte sehr sensibel auf Unterschiede bei der DGM-Erfassung, und -bearbeitung sowie den Abflussalgorithmus reagieren und durch die Logarithmierung jeweils ein ähnlicher Wertebereich mit geringen Unterschieden in der Histogrammverteilung erzeugt wird. Für die Vertikalkrümmung gilt ähnliches. Es scheint jedoch, dass mit abnehmender Standardabweichung die Tendenz zu homogeneren Schlägen zunimmt.

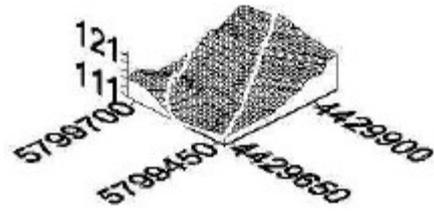
Die Ertragsdaten, die noch vor wenigen Jahren als Schlüsselparameter galten, zeigen in Tab. 4-9 erneut ihren geringen Aussagewert beim Vergleich verschiedener Schläge und Erntejahre. Je nach Witterungsverlauf, Vorfrucht, Bewirtschaftungsmängeln, Erntezeitpunkt und Nachbereitung der Daten treten große Schwankungen auf. Unterschiede bei der Standardabweichung der Ertragsdaten sind eher ein Anzeiger für Probleme mit dem Kartiersystem als für die Schlagheterogenität. Räumlich vergleichbar sind im Grunde nur zentrale Bereiche von großen Schlägen, auf denen zur gleichen Zeit mit der gleichen Technik geerntet wurde. Daten mehrerer Jahre sind selbst bei ähnlicher Witterung wegen des Fruchtwechsels und unterschiedlicher Reaktionen der Feldfrüchte auf die gleichen Reliefeigenschaften schlecht vergleichbar.

Die Kennzahlen der elektrischen Leitfähigkeit (ECa) erlauben Aussagen über die Bodenvariabilität und ermöglichen bei gemeinsamer Betrachtung mit den Reliefkennzahlen grobe Aussagen über die Schlagbeschaffenheit. Die hohe Standardabweichung, z. B. beim Schlag Kiesberg, begründet sich auf großen Unterschieden des Substrates zwischen Oberhang und Hangfuß. Wesentlich heterogenere Schläge aus Sicht des Reliefs (z. B. Alt-Grünholz und 106) weisen deutlich geringere Standardabweichungen auf, da die Regionen generell tonärmer sind und damit auch bei gleichem Relief geringere Unterschiede des ECa-Signals (Kap. 5.1.2) gemessen werden.

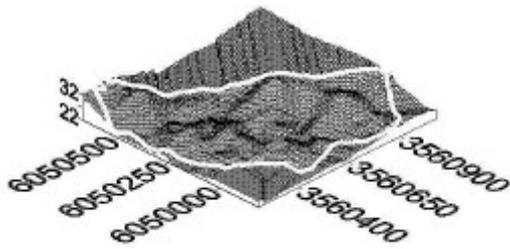
Auch wenn diese Kennzahlen für ausgewählte Reliefformen sinnvolle Rückschlüsse erlauben, ist über komplette Schlagflächen hinweg nur eine grobe Tendenz der Heterogenität ermittelbar. Deutlich wurde, dass der räumliche Aspekt bei der deskriptiven Statistik stark unterbewertet ist. Dies legt die Verwendung von geostatistischen Methoden nahe. Variogrammparameter, die aus den DGM-Grids der Schläge berechnet wurden, sind in Tab. 4-10 aufgeführt. Rohdaten der Vermessung zeigen eine geringfügig höhere Varianz bei gleichen Variogrammverläufen. Bei der Rangfolge der Schläge gibt es keine Unterschiede zwischen der Sortierung nach der Semivarianz bei Lagdistanz (Ld) 20 und 50 m sowie dem Anstieg zwischen diesen beiden Distanzen. Die Unsicherheit der Aussage ist bei Ld 10 allerdings größer, da die Distanz nur die zweifache Rasterweite beträgt. Das Variogramm zeigt vor allem bei der Ld 50, die grob der mittleren Reichweite der TWI-Variogramme entspricht, eine Rangfolge der Schläge, die der Einschätzung der Heterogenität des komplexen Faktors „Relief“ im Feld entspricht. Lediglich der kleine Schlag Lohzipfl wird in seiner Heterogenität auch hierbei stark überschätzt. Als Maß für die Reliefheterogenität wird deshalb die Semivarianz der Geländehöhen für die Lagdistanz 50 vorgeschlagen. Im Vergleich zum Anstieg des Variogramms, nach Blöschl (1996) ein gutes Maß für die Kontinuität eines Parameters, fällt hier die räumliche Mindestauflösung der Daten weniger ins Gewicht, zumal die Nuggetvarianz bei Variogrammen der Geländehöhe nahe Null liegt (Kap. 3.3.3).



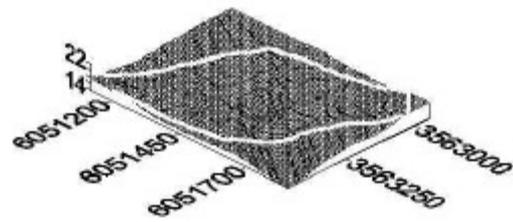
Espenberg (GTW), 10-fach überhöht



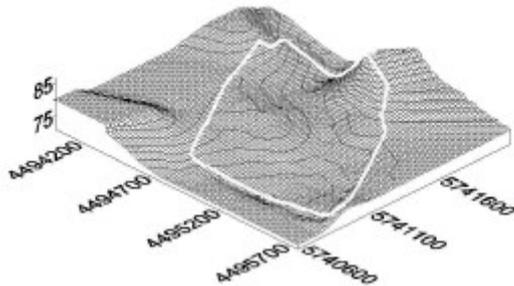
Langer Berg (GTW), 10-fach überhöht



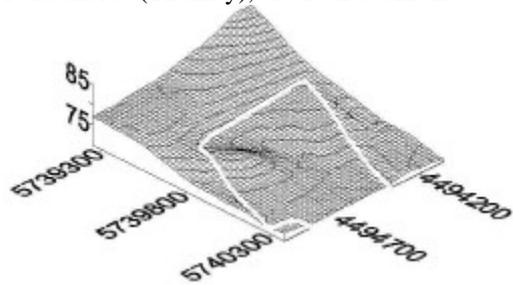
Alt-Grünholz (Thumby), 10-fach überhöht



Feldscheide (Thumby), 10-fach überhöht



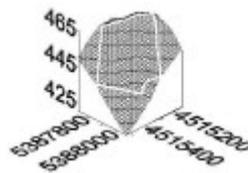
641 (Wulfen), 20-fach überhöht



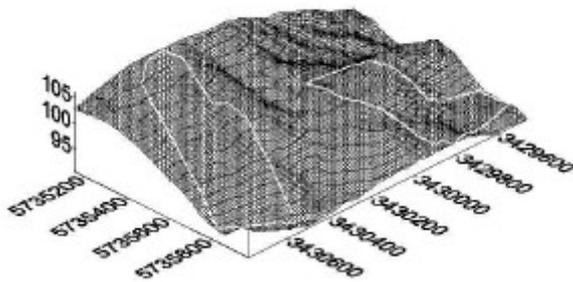
Finkenherd (Wulfen), 20-fach überhöht



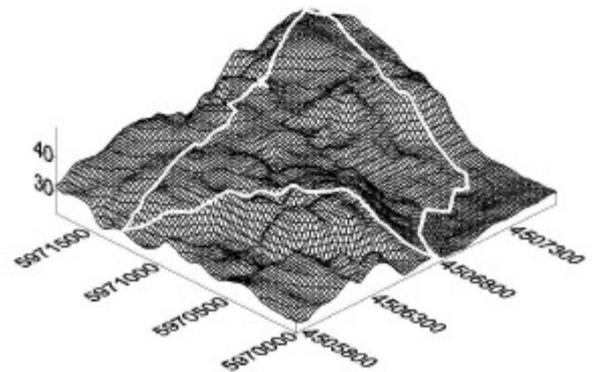
Kiesberg (Wulfen), 20-fach überhöht



Lohzipfl (Landshut), 10-fach überhöht



Autobahn/Thülig (Beckum), 20-fach überhöht



104 (Kassow), 20-fach überhöht

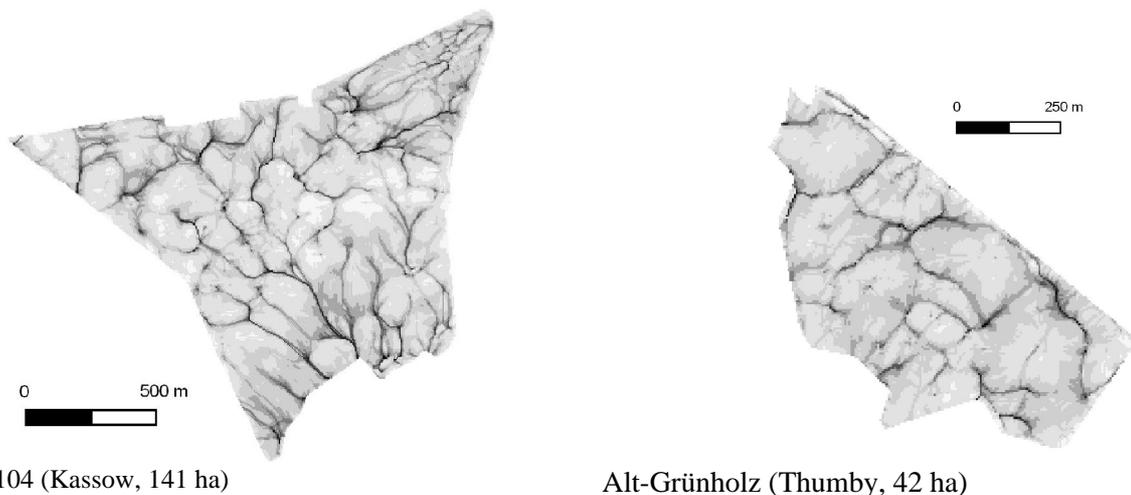
Abbildung 4-15: Blockbilder (Wireframe) der untersuchten Schläge mit 10- bis 20-facher Überhöhung. Durch die überhöhte Geländedarstellung werden die Komplexität des jeweiligen Schlages und die potenziellen Abflussrichtungen deutlich. Die Isolinienabstände der Geländehöhe ist der Darstellbarkeit angepasst, die Koordinaten beziehen sich auf das System der Landesvermessung (Gauß-Krüger[Bessel]).

Tabelle 4-10: Auswertung der Variogramme der interpolierten DGMS. Die untersuchte Punktemenge lag je Schlaggröße zwischen 2000 und 65500 für das Variogramm. *:10 m LS-Raster; **g** Ld x: Semivarianz bei Lag Distance x m; **a**: Anstieg des Variogramms (linear) zwischen den Lagdistanzen 10 und 20 m bzw. 20 und 50 m. Die Reichweite (Range) bezieht sich auf das TWI-Variogramm.

| Schlag | Varianz | γ Ld 10 | γ Ld 20 | γ Ld 50 | γ Ld 100 | α [°] Ld10-Ld20 | α [°] Ld20-Ld50 | Range TWI |
|--------------|---------|----------------|----------------|----------------|-----------------|---------------------------|---------------------------|--------------|
| Lohzipfl | 122,7 | 0,38 | 1,4 | 8,5 | - | 5,9 | 13,3 | - |
| Espenberg | 49,6 | 0,10 | 0,28 | 1,55 | 6,52 | 1,0 | 2,4 | |
| Alt-Grünholz | 6,0 | 0,08 | 0,27 | 1,35 | 3,32 | 1,1 | 2,0 | 75 |
| 106 | 28,3 | 0,10 | 0,20 | 1,10 | 2,90 | 0,6 | 1,7 | 75 |
| Langer Berg | 9,4 | 0,05 | 0,19 | 1,04 | - | 0,8 | 1,6 | 52 |
| 104 | 39,4 | 0,08 | 0,18 | 0,80 | 2,40 | 0,6 | 1,2 | 52 |
| 111 | 12,4 | 0,08 | 0,15 | 0,61 | 1,50 | 0,4 | 0,9 | 53 |
| Kiesberg | 17,7 | 0,02 | 0,08 | 0,47 | 1,92 | 0,3 | 0,7 | - |
| Autobahn* | 16,2 | 0,02 | 0,04 | 0,27 | 1,10 | 0,1 | 0,4 | 72 |
| Thülig* | 7,7 | 0,01 | 0,04 | 0,23 | 0,93 | 0,2 | 0,4 | 62 |
| Wulfen 641 | 4,4 | 0,01 | 0,04 | 0,22 | 0,70 | 0,2 | 0,3 | 35 |
| Feldscheide | 0,79 | 0,01 | 0,03 | 0,13 | 0,33 | 0,1 | 0,2 | 55 |
| Finkenherd | 3,0 | 0,01 | 0,02 | 0,08 | 0,27 | 0,1 | 0,1 | 150 |

Die Erfahrungen mit den deutschlandweit repräsentativen Projektschlägen lässt eine Skala von 0,1 - 10,0 für angebracht erscheinen, wobei hohe Werte bei kleinen Schlägen kritisch betrachtet werden müssen. Die Semivarianz steigt stark mit dem Gesamthöhenunterschied an und weist, ähnlich der Standardabweichung der Neigung, auf Unregelmäßigkeiten der Oberfläche, also die gesuchte Schlagheterogenität hin.

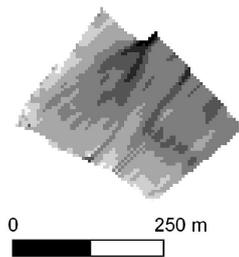
Ein weiterer Anzeiger für die Heterogenität ist ein ausgeprägtes Muster an Abflussbahnen innerhalb des Schlages. Problematisch beim TWI ist hierbei, dass auch für flache Schläge Abflussbahnen berechnet werden. Ist ein vielverzweigtes Abflussnetz zu erkennen, kann von einem hohem Einfluss des Reliefs auf die Bodenbildung ausgegangen werden (Abb. 4-16). Sind nur wenige, nicht konvergierende Abflussbahnen im Grid zu erkennen, erscheint nach Durchsicht der 54 Untersuchungsschläge ein geringer Einfluss vorzuliegen (Abb. 4-17). Die Darstellung des ausgeprägten Abflussmusters ist jedoch skalenabhängig und bei den untersuchten DGMS nur für Schläge ab ca. 30 ha Größe beobachtet worden. Maße zur Berechnung von Kennzahlen solcher Nachbarschafts- und Netzwerkphänomene werden von mehreren Autoren vorgeschlagen (z. B. Mosley und McKerchar, 1993; Western et al., 2001). Hier wird jedoch ein Ansatz über die Kombination mit Daten der Bodenvariabilität verfolgt (Kap. 5.3).



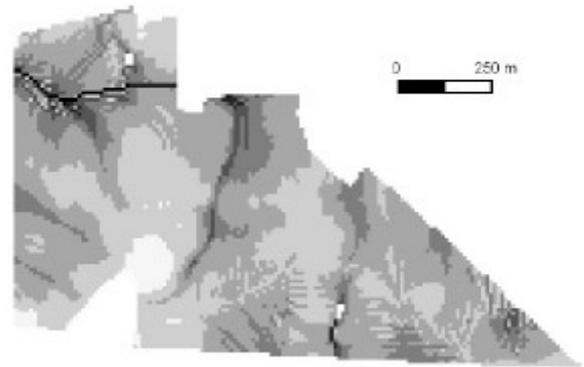
104 (Kassow, 141 ha)

Alt-Grünholz (Thumby, 42 ha)

Abbildung 4-16: Muster des TWI. Stark verzweigte, netzwerkartige Strukturen wie auf den Schlägen 106 und Alt-Grünholz geben Hinweise auf eine starke Beeinflussung der reliefgesteuerten Abflussprozesse auf die Bodenheterogenität



Lohzipfl (Landshut, 6 ha)



Bullenstall (Raguhn, 84 ha)

Abbildung 4-17: Muster des TWI, die auf geringe reliefbedingte Heterogenität hinweisen. Sowohl steile Hanglagen (Lohzipfl) als auch überwiegend ebene Schläge (Bullenstall) weisen nur wenige, mit Felddaten selten zu validierende Abflusspfade auf.

4.6 Diskussion

In Kapitel 4 wurden verschiedene Ansätze zur Ableitung von Parametern aus dem DGM vorgestellt, verglichen und in ihrer Genauigkeit betrachtet. Weiterhin konnten Empfehlungen für einen Metadatensatz für landwirtschaftliche Anwendung von DGMs aufgestellt werden.

Die Ableitung von landschaftsökologisch relevanten „Mustern“ bereitet insofern Probleme, da „Geo-Objekte“ (Bork und Dalchow, 2000) selten klar begrenzt sind und breite Übergangszonen sowie bei der Bodenfeuchte zusätzlich eine zeitliche Änderung der Grenzen zu erwarten sind. Als Geo-Objekte sollen hier Zonen ähnlicher Standorteigenschaften bzw. Prozesswirksamkeiten verstanden werden, wie z. B. Abflussrinnen, Geländerippen und Hangschultern. Eine Charakterisierung dieser Objekte ist, wie gezeigt, mit Hilfe von Vertikal- und Horizontalkrümmung aus dem DGM möglich („Formelemente“) oder mit Abflussparametern wie dem TWI. Für die Modellierung besteht das Problem des Zeitbezuges der Parameter. Das Wetness-Index-Konzept umgeht dies vor allem dadurch, dass ein Langzeit-Durchschnitts-Index verwendet wird, der Zonen höherer Sättigungswahrscheinlichkeit anzeigt und nicht die Bodenfeuchte eines diskreten Zeitpunktes. Blöschl (2001) betont, dass eine zunehmend komplexere Modellbildung der physikalisch basierten Modelle auf Einzugsgebiete-Ebene nicht mehr verifizierbar ist und stellt provokant fest: „*if they do work we know they most likely do so for the wrong reasons*“. Die Aussage von Blöschl (1996), dass die Modell-Skala den TWI entscheidend beeinflusst, konnte durch den Test verschiedener DGM-Aufnahmeverfahren und Rasterweiten bestätigt werden, was zur Definition von DGM-Qualitätskriterien für PA in Kap. 6.1 führt. In diesem Zusammenhang stellen Wilson und Gallant (2000) fest, dass bisher die Fehlerbetrachtung weitgehend ignoriert wurde, ebenso der Effekt der Variabilität innerhalb der Grid-Zellen. Zur Einschätzung der Größenordnung und Unsicherheit der Aussagen konnte die vorliegende Arbeit einen Beitrag leisten, da DGMs verschiedener Skalen zur Verfügung standen bzw. gezielt erfasst wurden. Für die bestaufgelösten DGMs (2 m Raster mit Höhen-genauigkeit $\pm 0,1$ m) wurde ein zu großes Rauschen für die vorliegenden Algorithmen zur Ableitung hydrologischer Parameter festgestellt. Während Burrough et al. (2000) in einem solchen Fall iterativ die DGM-Qualität veränderten, um die Ableitungen zu mitteln und die natürliche Variation von Abflussbahnen zu berücksichtigen, wird hier das simple Glätten der Modellierungsergebnisse mit dem Mean-Filter empfohlen, um die Statik des D8-Algorithmus aufzubrechen und die natürliche Unschärfe in die Ergebniskarten zu integrieren.

Die Mehrzahl der publizierten Studien zur pedohydrologischen DGM-Analyse orientiert sich an einer DGM-Auflösung von 10 - 200 m. In der hier untersuchten Auflösung von 2 - 10 m, in der hydrologisch wirksame Formelemente liegen, wurden erst wenige Arbeiten publiziert. Die

in dieser Skale gefundenen Variogrammparameter (Tab. 4-10) zeigen, dass DGMs der landwirtschaftlichen Schläge keinen Sill erreichen, d.h. die landschaftlichen Prozesse auf einer höheren Skale operieren. Der abgeleitete TWI jedoch hat überwiegend eine charakteristische räumliche Reichweite von 50 - 100 m, die in etwa der Reichweite der Kornverteilungen der untersuchten Schläge liegt (Herbst et al., 2001). Auch Kuhn (1998) fand für Ackerflächen Reichweiten der Körnung von 60 - 130 m, beim Ertrag um 100 m. Western et al. (1998b) nennen für Indikator-Variogramme sowohl von Bodenfeuchtemessungen als auch vom TWI eines 5 m DGM Reichweiten von 60 - 100 m. Dies legt einen Zusammenhang mit Bodeneigenschaften nahe und soll ebenfalls im folgenden Kapitel näher beschrieben werden. In der gleichen Größenordnung ordnet Blöschl (1996) die Hanglänge als Längenskale für die pedo-hydrologischen Prozesse ein und gibt sie je nach Landform mit 50 - 500 m an, was vor allem für kleinere Schläge eine Modellierung über den Schlagrand hinaus erforderlich werden lässt. Weniger erfolgreich verlief die Suche nach einer Parameterkombination, aus der die Bedeutung des Reliefs auf die Standortheterogenität abgeleitet werden sollte. Kombinationen von primären und sekundären Reliefparametern führten nicht zu einer Anordnung der Schläge, wie sie nach Ortskenntnis angebracht erschien. Lediglich die Standardabweichung der Neigung bietet eine erste Einschätzung, die allerdings bei kleinen Schlägen in gestreckter Hanglage zu Überschätzungen der Heterogenität führt. In solchen Fällen sollte das Verhältnis von Standardabweichung zu mittlerer Neigung berücksichtigt werden. Gleiches gilt für Variogrammparameter. Eine Reichweite war nur bei zwei von 54 untersuchten Schlägen auf der Schlagausdehnung ermittelbar. Ein starker Anstieg weist tendenziell auf eine größere Heterogenität hin, allerdings werden an gestreckten Hängen zu große Anstiege im Vergleich zur gesuchten Heterogenität der Oberfläche angezeigt. Vorgeschlagen wird hier die Semivarianz bei der Lagdistanz 50 als Vergleichsmaß. Notwendig ist dabei eine fest definierte DGM-Qualität. Kriterien und Werte werden in Kap. 6.1 vorgestellt. Bei Schlägen ähnlicher Größe lassen sich damit Rangfolgen der Oberflächenheterogenität und damit in vielen Fällen der Bodenvariabilität aufstellen.

5 Reliefparameter und bodenkundliche Größen

5.1 Bodenkundliche Grundlagen

5.1.1 Bodenphysikalische Grundlagen

Der Boden ist die oberste belebte Lockerschicht der Erdkruste und wird in der Bodenkunde meist auf eine Tiefe bis 2 m bezogen. Die Bodenphysik betrachtet den Boden als System aus einer festen, flüssigen und gasförmigen Phase. Mineralische Teilchen, die mit zunehmender Korngröße in Ton, Schluff, Sand und das Bodenskelett (>2 mm) eingeteilt werden, weisen unterschiedliche physikalische und chemische Eigenschaften auf. Das Substrat wird nach dem Anteil der Korngrößenfraktionen in verschiedene Bodenarten eingeteilt. Im Boden enthalten sind weiterhin organische Teilchen, welche die Wasser- und Nährstoffspeicherung positiv beeinflussen. Das Porensystem, in seinem Umfang abhängig von Körnung, Humusgehalt und der Lagerungsdichte, ist mit Bodenlösung (Wasser mit gelösten Salzen und Gasen) und Bodenluft gefüllt. Bodenbildende Prozesse, überwiegend durch vertikale Verlagerung von Bodenbestandteilen mit infiltrierendem Wasser gesteuert, führen zur Ausbildung bestimmter Kombinationen von Bodenhorizonten. Diese Kombinationen werden in Bodentypen eingeteilt, die spezielle physikalische und chemische Eigenschaften aufweisen und den Wasserhaushalt beeinflussen. Der Bodenwasserhaushalt ist die zeitliche Veränderung des Wassergehaltes im Boden, bedingt durch Aufnahme, Speicherung und Abgabe von Wasser (AG Bodenkunde, 1994). Das Bodenwasser wird gemessen als die Menge, die bei einer Trocknung bei 105 °C entweicht. Angegeben wird entweder der Wassermassegehalt w , der das Verhältnis der Wassermasse zur Masse der festen Bodenanteile beschreibt oder die volumetrische Bodenfeuchte θ_v als Quotient des wassergefüllten Volumenanteils zum Gesamtvolumen eines Bodenkörpers. Eine Beziehung zwischen beiden Größen lässt sich über die Lagerungsdichte des Bodens herstellen:

$$\theta_v = \rho_d / \rho_w * w \quad (5-1)$$

mit

ρ_d : Lagerungsdichte des Bodens [g/cm³],
 ρ_w : Dichte des Wassers [g/cm³].

Faustzahlen der Lagerungsdichte in Abhängigkeit der Korngrößenverteilung gibt die Bodenkundliche Kartieranleitung KA4 (AG Bodenkunde, 1994).

Der Bodenwassergehalt ist räumlich und zeitlich variabel und wird in der Natur bestimmt von Niederschlag, Evapotranspiration, lateralem und vertikalem Zu- und Abfluss. Die Abflussrichtung des Bodenwassers wird vom Relief gesteuert, sobald die Bodenmatrix wassergesättigt ist. Im ungesättigten Zustand dagegen treten durch Kapillarkräfte hydraulische Gradienten auf, die im Vergleich zu den durch Gravitation hervorgerufenen groß sind. Unter diesen Umständen treten vor allem vertikale Bodenwasserbewegungen auf, weshalb bodenphysikalische Modelle bisher überwiegend nur den eindimensionalen Fall erfassten.

Im Boden bildet sich eine horizontale Wasserscheide aus, die im Laufe der Vegetationsperiode durch die Wasserentnahme der Pflanzen abwärts wandert. Unterhalb dieser Wasserscheide ist stets Sickerwasser zu finden. Im gesättigten Bereich bildet sich bei einem leicht geneigten Stauhorizont ein lateraler Fluss aus. Stauwasser ist nicht durch Bindung an der Bodenmatrix festgehalten und kann frei abfließen, so dass es auch bei kleinen Gradienten zu beträchtlichen Fließraten kommen kann. Vom Grundwasser unterscheidet es sich dadurch, dass es nur periodisch auftritt. Der Bodenwasserhaushalt wird mit Varianten der folgenden Gleichung beschrieben (z. B. Dyck und Peschke, 1995; Ehlers, 1996):

$$P = ET + I + R + G \pm \Delta S \quad (5-2)$$

mit

- P = Niederschlag,
- ET = Evapotranspiration (Verdunstung von Boden und Pflanze),
- I = Interzeption (Zwischenspeicherung an Pflanzendecke),
- R = Oberflächenabfluss und Zwischenabfluss,
- G = Grundwasserneubildung/Sickerwasserspende,
- S = Speicheränderung/Änderung des Bodenwasservorrates.

Abflussprozesse (z. B. Rawls et al., 1993; Dyck und Peschke, 1995) werden unterteilt in Basisabfluss (Rückfluss vom Grundwasser zum Vorfluter), Zwischenabfluss/Interflow (schneller oberflächennaher Abfluss) und Oberflächenabfluss. Die beiden letztgenannten zählen zu den „schnellen“ Abflusskomponenten während und nach einem Niederschlagsereignis und werden vom TWI als räumliches Muster angezeigt. Oberflächenabfluss entsteht, wenn die Niederschlagsintensität größer als die Infiltrationsrate des Bodens ist. Eine andere Ursache kann in der kleinen Infiltrationsrate bei wassergesättigtem Boden liegen. Anfangs wird durch das Mikrorelief Wasser zurückgehalten, ist dieser Speicher jedoch aufgefüllt, fließt das Wasser der Gravitationskraft folgend auf der Oberfläche ab. Parallel dazu bildet sich im oberflächennahen, gesättigten Boden eine laterale Abflusskomponente aus, vor allem bei geschichteten Böden (Mull, 1997). Salvucci und Entekhabi (1995) teilen einen Hang deshalb ein in eine Perkulations/ET-dominierte Region am Oberhang, den Mittelhang mit ausgeglichener Bilanz und den Abfluss produzierenden Hangfuß.

Durch Oberflächenabfluss werden zuerst sandige Kornfraktionen ausgewaschen und verlagert, allerdings nicht so weit transportiert wie Schluffteilchen. In Abhängigkeit der Wasserbewegung und damit auch des Reliefs sammeln sich in speziellen Bereichen der Landschaft unterschiedliche Korngrößen an. Feines Substrat akkumuliert meist in Senken und bildet lehmig-schluffige Böden mit kleinen Porengrößen und hoher Wasserhaltekapazität. Sand sedimentiert bereits am Mittelhang bzw. in Abflussbahnen.

In flachem Gelände bildet sich eine laterale Komponente des Bodenwasserflusses aus, wenn Differenzen im Bodenwasserpotenzial vorliegen. Das Potenzial ist definiert als Energiezustand des Bodenwassersystems und zwar als Differenz der potentiellen Energie je kg Wasser im Boden und reinen Wassers in einem Bezugssystem (Bohne, 1998). Wasser fließt immer in Richtung abnehmender hydraulischer Druckhöhe, also zum niedrigeren Potenzial hin. Die Unterschiede des Gesamtpotenzials in horizontaler Richtung bewirken laterale Fließkomponenten und beeinflussen das räumliche Muster der Bodenfeuchteverteilung. Potenzialunterschiede können auch bei gleichem Wassergehalt auftreten, wenn zwei Substrate eine unterschiedliche, Korngrößenabhängige Wasserspannung besitzen.

Der mittlere Bodenwasserfluss q (Filtrationsrate, [$\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]) durch einen Bodenquerschnitt wird durch das Produkt der boden- und wassergehaltsabhängigen hydraulischen Leitfähigkeit $K(\theta)$ und der Potenzialänderung pro Längeneinheit beschrieben (Beziehung nach Darcy, Gleichung 4-11). Die Porenwassergeschwindigkeit ist die Filtrationsrate q geteilt durch den wassergefüllten Porenanteil. Diese Beziehung wird für die Fließzeitberechnung nach dem in Kap. 4.2.3 vorgestellten quasi-dynamischen Wetness-Index verwendet. Die Darcy-Gleichung ist in der angegebenen Form nur gültig bei Stationarität und Abwesenheit von Makroporen (>1-3 mm). Es darf kein preferenzieller Fluss in bevorzugten Wasserbahnen vorliegen, wie er auf bewirtschafteten Ackerflächen zufällig verteilt anzutreffen ist. Dies schränkt die Aussagekraft von vielen Modellen ein. Jedoch kann sich auf der Pflugsohle eine laterale Abflusskomponente ausbilden, da diese ein Hindernis für den Makroporenfluss darstellt (z. B. Dathe et al., 1996). Ein Boden mit vielen Grobporen entwässert schnell, Feinporen (in ton- und schluffreichem Material) lassen das Wasser langsamer abfließen. Kennwerte des Wassergehaltes sind die Feldkapazität (FK) und der permanente Welkepunkt (PWP). Der Wasserspannungsbereich von $10^{1,8}$ - $10^{4,2}$ cm Wassersäule (pF 1,8 - pF 4,2) gilt als pflanzenverfügbares Wasser. Der PWP definiert sich als Saugspannung, ab welcher eine Pflanze das Wasser auf Grund starker Kapillarkräfte und Adhäsion aus den Feinporen nicht mehr entziehen kann

($pF = 4,2$), die FK als Wassermenge, die ein Boden drei Tage nach vollständiger Sättigung unter freier Drainage enthält. Wird von der FK der Anteil der Feinporen abgezogen, erhält man die nutzbare Feldkapazität nFK . Nach Ehlers (1996) schwankt die FK-Grenze von pF 1,8-2,5 je nach Substrat und liegt bei Sand etwas niedriger. So hat tonreiches Substrat bei FK einen höheren Wassergehalt, der aber nicht vollständig von der Pflanze nutzbar ist. Die räumliche Differenzierung der nFK wird nach Sinowski (1995) verstärkt durch am Hangfuß abgelagertes erodiertes schluffiges und feinsandiges Material und weist ähnliche Strukturen auf, wie das Einzugsgebiet einer Rasterzelle in einem DGM (am Beispiel eines $25 * 25$ m Rasters). Auch Herbst (2001) weist auf die Klassierung der Korngrößen am Hang hin, mit der typischen Abfolge sandiger Oberhang, schluffreicher Hang und tonige Senke, welche sich mit formbasierten Reliefparametern gut erklären lässt. Am Hang treten zudem typische zeitliche Bodenfeuchteunterschiede auf. Gegen Ende der Vegetationszeit sind Wassergehaltsdifferenzen durch Evapotranspiration und Ausschöpfung durch die Pflanzen geringer und nur noch teilweise durch das Relief bestimmt. Auf Ackerböden besteht zudem ein großer Unterschied der Eigenschaften von Ober- und Unterboden auf Grund der Bearbeitung, die zu starker Durchmischung bis zur Pflugsohle führt. Sinowski (1995) fand für den A-Horizont wesentlich höhere Variogrammreichweiten und Schwellenwerte für Nährstoffe. Die physikalischen Eigenschaften dagegen gelten als wesentlich homogener im Vergleich zum Unterboden. Kuhn (1998) wies einen geringeren Schluffanteil im Unterboden bei einer wesentlich stärkeren Streuung nach. Dass sich selbst die Anisotropie der hydraulischen Leitfähigkeit, die z. B. bei dem hier verwendeten TAPES-Modul DYNWETG ein optionaler Eingabeparameter ist, mit dem Sättigungsgrad ändert, beschreibt Tigges (2000). Wessolek et al. (1999) bemängeln, dass nur wenige Erkenntnisse über den Einfluss der Bodenvariabilität auf den Wasserhaushalt vorliegen sowie die geringe zeitliche und räumliche Auflösung von Messkampagnen. Folglich gibt es einen Mangel an hochaufgelösten Eingangsdaten für die zahlreich entwickelten Modelle. Bei Prozessmodellen fehlen Eingangsdaten über preferenzielle Fließpfade, ungesättigte Wasserleitfähigkeit und ähnliche Parameter. Richter und Dieckkrüger (1996) verbinden Prozessmodelle des Wasser- und Stofftransportes mit stochastischen Komponenten, um die zufällige Inhomogenität von landwirtschaftlich genutzten Böden zu berücksichtigen.

Wessolek et al. (1999) weisen mit Hilfe von Variogrammen nach, dass im Winterhalbjahr im Gegensatz zum Sommerhalbjahr eine räumliche Struktur der Wassergehaltsänderung zu finden ist. Zudem wurden für eine Austrocknungsphase Mitte Mai deutlich höhere Verdunstung auf dem Südmittelhang im Vergleich zum Nord-Mittelhang festgestellt, also eine weitere Reliefabhängigkeit der Bodenfeuchte. Der Reliefeinfluss stieg mit verfügbarer Wassermenge an. Die gängigen Pedotransferfunktionen sollten nach Ansicht von Wessolek et al. (1999) verbessert werden, um die nFK abzuleiten, welche sie als einen möglichen effektiven Modellparameter für Regionalisierungen des Wasserhaushaltes vorschlagen.

Für die Verwendung der in Kap. 4 vorgestellten Reliefparameter ergibt sich hauptsächlich das Problem der zeitlichen Variation des Bodenfeuchtemusters. Der TWI zeigt nur einen speziellen Zeitpunkt an, den es zu finden und in seiner Wirksamkeit zu bewerten gilt. Nach Wilson und Gallant (2000) gelten als Bedingungen, wie bereits aufgeführt, vor allem homogene Bodeneigenschaften und ein hydraulisches Gleichgewicht der Bodenwasserbewegung, um den lateralen Abfluss parallel zur Bodenoberfläche zu gewährleisten. Wie durch mehrere Literaturstellen gezeigt, kann von einer Abnahme der Durchlässigkeit mit der Tiefe ausgegangen werden. Vor allem in geschichteten Böden ist von der Ausbildung der lateralen Abflusskomponente bei Sättigung auszugehen. Reliefparameter wie z. B. der TWI wurden z. B. von Herbst (2001) als Covariable bei der Regionalisierung von Bodeneigenschaften mit Pedotransferfunktionen angewendet. Dort erfolgte allerdings keine intensive Betrachtung von DGM-Qualität und Auswirkung verschiedener Abflussalgorithmen auf die Ergebnisse.

Bodenwasser und Relief

Der Bodenwassergehalt ist räumlich und zeitlich stark variabel und in seiner räumlichen Verteilung unter anderem vom Relief beeinflusst. Auf Basis der bisher dargelegten Grundlagen und Literaturrecherchen ergeben sich für diese Arbeit mehrere Aspekte als wesentlich für die Abgrenzung von Bodenbereichen für eine spezifische Bewirtschaftung auf Grund des Reliefeinflusses. Der Zwischenabfluss bei gesättigten Böden bzw. auf Stauhohizonten hängt stark mit dem Zuflussgebiet und der Geländeneigung zusammen und wird gut durch den TWI repräsentiert. Die reliefbedingte unterschiedliche Zusammensetzung der Korngrößenanteile unterstützt in vielen Fällen die Tendenz zu erhöhter Bodenfeuchte in den niedriger gelegenen Akkumulationsbereichen. Der wichtige Abstand zur Grundwasseroberfläche, die über kapillaren Anstieg den darüber liegenden Boden beeinflusst, kann nur tendenziell über die Geländehöhe geschätzt werden, wenn Informationen über den Grundwasserspiegel vorliegen.

Maßstab und Beschaffenheit der untersuchten Schlagflächen lassen weitere Reliefeinflüsse auf die Bodenfeuchteverteilung als gering erscheinen. Dazu gehören die Exposition (Evapotranspirationsunterschiede) und eine reliefbedingte Niederschlagsdifferenzierung.

5.1.2 Geophysikalische Verfahren

Geoelektrische Kartierung mit dem EM38

Die scheinbare elektrische Leitfähigkeit (*engl. apparent electrical conductivity, ECa*) des Bodens ist der reziproke Wert des spezifischen elektrischen Widerstandes. Die elektrische Leitfähigkeit wird in Millisiemens pro Meter (mS/m) angegeben. Der elektrische Widerstand eines Quaders der Länge l und des Querschnitts A ist

$$R = \rho * l / A \quad (5-3)$$

wobei ρ , der spezifische Widerstand, eine volumenunabhängige Materialkenngröße ist. Mit geophysikalischen Methoden wird diese Größe als scheinbarer spezifischer Widerstand gemessen. Durch Inversionsrechnungen wird aus den Messwerten der wahre spezifische Widerstand, der Boden- und Feuchteverhältnisse charakterisiert, ermittelt (Lück et al., 2000). Die Leitfähigkeit steigt mit dem Anteil feiner Kornbestandteile (v.a. Tongehalt), dem Wasser-, Elektrolyt- und Humusgehalt, der Temperatur und hängt von Porenvolumen und pH-Wert ab (Durlless, 1999). Das hier verwendete Gerät EM38 von Geonics misst die elektrische Leitfähigkeit ohne Bodenkontakt („zerstörungsfrei“) nach dem Prinzip der elektromagnetischen Induktion. Als Ergebnis einer GPS-gestützten Befahrung des Untersuchungsgebietes wird aus den alle 1 - 2 Sekunden erfassten Messwerten

eine ECa-Karte interpoliert. Das Messsystem besteht aus zwei Spulenanordnungen, die sich in einem Abstand von 1 m zueinander befinden. Die erste Spule erzeugt ein elektromagnetisches Feld, das sich im Untergrund ausbreitet und einen schwachen Wechselstrom induziert. Die zweite Spule misst das resultierende Feld aus dem abgestrahlten Primärfeld und dem durch den Untergrund beeinflussten Sekundärfeld. Die Ausprägung des Sekundärfeldes hängt von der elektrischen Leitfähigkeit des Bodens ab. Der Vergleich der Felder erlaubt Rückschlüsse auf die elektrische Leitfähigkeit des Untergrundes. Die Eindringtiefe der Messung hängt neben der Leitfähigkeit des Bodens wesentlich von der gerätespezifischen Frequenz ab. Das EM38 arbeitet mit einem Wechselfeld der Frequenz 14,6 kHz. Bei einer vertikalen Spulenanordnung in Bezug auf die Lage der Spulenchsen zueinander wird ein Bereich von 1,5 m

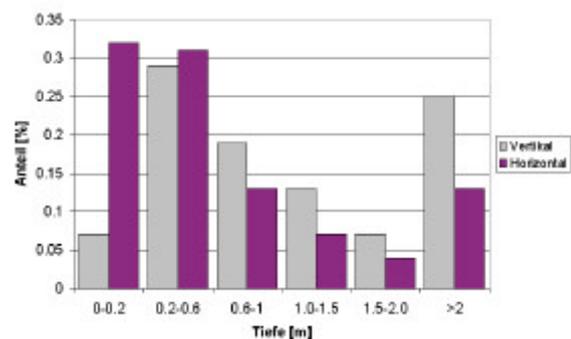


Abbildung 5-1: Geschätzte Anteile der Tiefenbereiche am Messsignal des EM38. Nach Daten aus Durlless (1999).

Die Eindringtiefe der Messung hängt neben der Leitfähigkeit des Bodens wesentlich von der gerätespezifischen Frequenz ab. Das EM38 arbeitet mit einem Wechselfeld der Frequenz 14,6 kHz. Bei einer vertikalen Spulenanordnung in Bezug auf die Lage der Spulenchsen zueinander wird ein Bereich von 1,5 m

und mit einer horizontalen Anordnung ein Bereich von 0,75 m erfasst und ein Summensignal mit unterschiedlicher Gewichtung der Tiefenbereiche aufgezeichnet (Abb. 5-1). Im vertikalen Modus stammen bei homogenem Material ca. 60 % des Messsignals aus 1,3 m Tiefe. Nach Lück et al. (2000) lassen sich 70 - 80 % des ECa-Signals aus der Textur erklären. Durlusser (1999) erklärt bei FK 90 % der Variation des ECa-Signals durch den Tongehalt an einem Messprofil, erreicht allerdings schlechtere Werte ($r^2 = 0,44$) für flächige Messungen und vermutet die laterale Wasserverteilung sowie die Temperaturverteilung am Hang als Grund. Lück et al. (2000) zeigen, dass unabhängig vom Sättigungsgrad gleiche ECa-Muster auftreten, während der Absolutwert variiert. Die scheinbare elektrische Leitfähigkeit für den Nahbereich ergibt sich als (Lück et al., 2000):

$$ECa = [4 / (\mu_0 \omega s^2)] [H_s / H_p] \quad (5-4)$$

mit

μ_0 = Induktionskonstante $4\pi 10^{-7}$ V s / (A m)

$\omega = 2 \pi f$

f = Frequenz [Hz]

s = Abstand Sende-Empfangsspule [m]

H_p = primäres Magnetfeld [nT]

H_s = sekundäres Magnetfeld [nT]

Zur Interpretation der elektrischen Leitfähigkeit empfiehlt Durlusser (1999) das von Günzel modifizierte Modell von Sen:

$$EC_a = q_v^{m_{Sen}} \left[EC_w + EC_w \frac{1.93 \cdot m_{Sen} \cdot TRD \cdot KAK}{\left(EC_w + 0.7 \left[\frac{S}{m} \right] \right) \cdot q_v} \right] \quad (5-5)$$

mit

KAK = Kationenaustauschkapazität [mol_c/kg]

TRD = Lagerungsdichte [kg/dm³]

q_v = volumetrischer Wassergehalt [-]

EC_w = Elektrolytleitfähigkeit [S/m]

$m_{Sen} = 1,67 + 1,953 v(KAK / 100)$

m = Zementationsfaktor (1,3 - 2)

S = wassergefüllter Porenanteil [-]

Die KAK stellt die Menge der austauschbar gebundenen Kationen (v.a. Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, NH₄⁺) dar und hängt maßgeblich ab von Art und Mengenanteil der Tonminerale und Huminstoffe im Substrat. Eine durchschnittliche KAK, die wichtig für die Nährelementespeicherung im Boden ist, gibt die AG Bodenkunde (1994) für verschiedene Bodenarten an. Für Untersuchungspunkte auf Schlag 106 (Kassow) wurde die potenzielle KAK bestimmt (Kap. 5.3). Die geoelektrische Kartierung mit dem EM38 wurde seit Ende der 90er Jahre verstärkt auf Ackerflächen untersucht, sowohl im Hinblick auf Texturunterschiede, als auch auf Bodenfeuchtemuster und Auswirkungen von Stickstoffdüngung (Lück et al., 2000; Johnson et al., 2001; Eigenberg et al., 2002; Schmidhalter et al., 2002; Dobers, 2002). Nach Doerge (2001) ist ein Zusammenhang mit dem Ertrag zu finden, wenn der Ertrag eng mit der Wasserhaltekapazität des Bodens korreliert.

Nobes (1996) diskutiert die Signalabschwächung durch Einflussfaktoren wie Umwandlung in Wärme, Ionentransport an Tonmineraloberflächen u. a. für mehrere geoelektrische Verfahren. Weiterhin beschreibt Nobes (1996) einen bisher kaum beachteten Hysterese-Effekt bei teilweiser Sättigung des Bodens aufgrund des Verhaltens von Luftblasen, die im Grenzbereich zu

Wasser erhöhte Leitfähigkeit zeigen. Als topographische Effekte sieht Nobes (1996) vor allem den veränderten Abstand zu sedimentierten Schichten mit stark abweichender Leitfähigkeit. Lück et al. (2000) weisen auf die Gleichstromgeoelektrik als weiteres geophysikalisches Messverfahren hin, das einige Nachteile der Elektromagnetik überwindet. Hierbei ist der Spannungsverlust die Messgröße. Ein Gleichstrom wird über eine galvanische Kopplung mit Elektroden in den Boden eingespeist. Bei dem Messgerät VERIS wird dies über drei Paare tellerförmige Elektroden realisiert, die hinter einer Landmaschine mit 6 cm Eindringtiefe hergezogen werden. In Abhängigkeit der Leitfähigkeitsverteilung baut sich ein Potenzialfeld auf, welches über zwei weitere Elektroden gemessen wird. Über den Elektrodenabstand ist schrittweise eine größere Tiefe erkundbar, wodurch das Schichtungsproblem angegangen werden kann. Die hier untersuchten ECa-Karten wurden im Rahmen des *preagro*-Projektes durch die TU München¹ kartiert. Weiterhin standen Messungen aus gemeinsamen Kampagnen mit der Universität Potsdam² auf dem Projektbetrieb Kassow zur Verfügung.

Time Domain Reflectometry (TDR)

TDR-Sonden sind weit verbreitete Feldmessgeräte zur Ermittlung der Bodenfeuchte. Eine planare Welle läuft entlang von PVC-beschichteten Metallstäben durch den Boden und wird am Ende reflektiert. Das Verfahren beruht auf der Abhängigkeit der Laufzeit eines hochfrequenten elektrischen Signals (> 50 MHz) auf einem Stab in dem zu messenden Medium mit der Beziehung:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (5-6)$$

mit

v = Geschwindigkeit des Signals entlang der Sonde [m/s],
 c = $3 \cdot 10^8$ [m/s],
 ϵ = Dielektrizitätskonstante [-].

Mit Hilfe der Laufzeitbeziehung

$$v = 2 \cdot L / t \quad (5-7)$$

ergibt sich

$$\epsilon = (c \cdot t / (2 \cdot L))^2 \quad (5-8)$$

mit

t = Laufzeit des Signals,
 L = Länge der Sonde, an der das Signal hin und zurück läuft.

Die volumetrische Feuchte wird über den Zusammenhang zwischen der Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen und der materialspezifischen Dielektrizitätskonstante ϵ bestimmt. Da Wasser mit $\epsilon = 80$ einen wesentlich höheren Wert hat als Luft mit $\epsilon = 1$ und Minerale mit $\epsilon = 1-3$, kann mit Hilfe empirischer Beziehungen der volumetrische Wassergehalt θ aus der gemessenen Dielektrizitätskonstante ϵ berechnet werden. Eine bekannte Beziehung ist zum Beispiel die von Topp et al. (1980):

$$\theta(\epsilon) = -5,3 \cdot 10^{-2} + 2,92 \cdot 10^{-2} \cdot \epsilon - 5,3 \cdot 10^{-4} \cdot \epsilon^2 + 4,3 \cdot 10^{-6} \cdot \epsilon^3 \quad (5-9)$$

Der untersuchte Tiefenbereich beschränkt sich auf die unmittelbare Sondenumgebung. Persson und Berndtsson (1998) geben das Probenvolumen mit dem Faktor 1,4 des Abstandes der Sondenstäbe bei 2-Stab-Geräten an. Dies entspräche für die vorliegende Arbeit einem Zylinder von 3 - 4 cm Durchmesser. Während die ursprünglichen Geräte die Laufzeit des Signals

¹ H.-P. Durlleser, C. Sperl, 1999/2000

² E. Lück, M. Eisenreich, 1999-2001

als Messergebnis anzeigen, geben die in Deutschland erhältlichen Geräte direkt den Wasservolumenanteil in Vol.-% nach einer internen Kalibrierungsgleichung an. Dies beeinträchtigt eine Abgleichung der Kalibrierung mit örtlichen Verhältnissen. Die sondeninterne Kalibrierfunktion müsste für jeden Boden andere Parameter enthalten, ist aber nur universal programmiert. In der Universalgleichung wird der Einfluss der Lagerungsdichte nicht berücksichtigt. Die Genauigkeit ist zwar etwas geringer als bei der gravimetrischen Analyse im Labor, jedoch ist eine wesentlich höhere Messpunktzahl realisierbar. Bei Verwendung von fest installierten Sonden mit Datenaufzeichnungsgeräten sind auch hochaufgelöste Zeitreihen erfassbar.

Wegehenkel (1998) berichtet von durchschnittlichen Fehlerwerten aus der Literatur von 3 Vol.-%, beobachtete bei einem 3-Jahres-Monitoring allerdings eine Fehlerspanne von -8 bis +18 Vol.-% im Vergleich zu gravimetrischen Messungen. Er gibt eine Überschätzung von +7,9 Vol.-% als mittleren Fehler (bei grundwasserfernen Sanden) an und empfiehlt bei TDR-Messungen den Vergleich mit gravimetrischen Proben. Der Vergleich beider Werte ist erschwert, da zur Umrechnung die Trockenrohichte bekannt sein muss. Zudem beziehen sich die Messungen auf unterschiedliche Volumina.

Blöschl (1996) gibt als Messskale jedoch für TDR und die Gravimetrie 0,1 m bzw. 1 min bei einer typischen Messpunktkampagne der Auflösung 100 m bzw. 1 Woche an. Versuche zur Genauigkeit der TDR-Messwerte an einer Bodensäule des Projektbetriebes Kassow mit der Sondenstablänge 11,4 cm dokumentiert Schmidt (1999). Die gemessenen Schwankungen sowohl auf Ackerböden als auch im Labor mit leichtem Trend (Abb. 5-2) bei wiederholten Einstichen mit einem TRIME-Gerät (**TDR** mit intelligenten **Micromodul-Elementen**) ließen die Messmethoden für die vorliegende Arbeit in den Hintergrund treten, bis ein Gerät mit größeren und stabileren Sondenstäben zur Verfügung stand. Bei den verwendeten Feldgeräten war das Hauptproblem, auch bei trockenem Boden einen guten Kontakt zwischen den leicht biegsamen Elektroden und dem Bodenkörper herzustellen. Zudem können Wurmlöcher, Wurzeln, Risse, Aggregationen und kleine Steine zu Ausreißern führen, die nur über eine hohe Probenwiederholung erkennbar werden. Das Hauptproblem bei der Verwendung des Verfahrens beim Vergleich mit Bodenfeuchtepotezialen von Reliefparametern ist jedoch das geringe Messvolumen von einigen Kubikzentimetern, welches landschaftsökologisch betrachtet auf einer anderen Skale liegt und nur über hohe, genestete Messpunktwiederholungen richtig vergleichbar wird. Mangels verfügbarer flächiger Verfahren zur Ermittlung der Bodenfeuchte ist TDR jedoch ein unverzichtbarer Bestandteil, der allerdings mit der nötigen kritischen Betrachtung in Bezug auf die Messskale interpretiert werden muss.

5.1.3 Feld- und Labormethoden

Zur Bewertung der aus der Reliefanalyse ermittelten Muster wurden die folgenden bodenkundlichen Untersuchungen in Kassow durchgeführt. Zusätzlich standen bodenkundliche Daten weiterer Projektschläge¹ zur Verfügung.

Feldmessungen

Für sieben Zeitpunkte in den Jahren 2000/01 wurden auf Schlag 111 (Kassow) an 20 Punkten in drei Tiefen Mischproben aus je drei Pürckhauer-Sondierungen für eine gravimetrische Wassergehaltsbestimmung entnommen bzw. 0 - 0,15 m Tiefe mit TDR-Sonden bei fünf Wie-

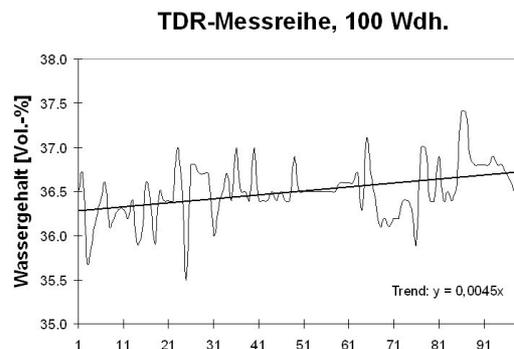


Abbildung 5-2: Schwankungen von Wiederholungsmessungen mit einem TRIME-TDR. Bodensäule aus Kassow, Schlag 107.

¹ erhoben durch R. Herbst, G. Reimers und J.Lamp (Universität Kiel) bzw. K. Lorenz und R. Gebbers (ZALF).

derholungen im Umkreis von 1 m beprobt (Tab. 5-1). Die Messstrecke wird in Kap. 5.2 beschrieben. Für die Messpunkte erfolgte im Feld eine Ansprache der Bodenart nach KA4. Die Auswahl der Punkte erfolgte auf Grundlage der ECa- und TWI-Karten, um repräsentative Punkte entlang einer welligen Transekte und einer Hang-Catena auszuwählen.

Auf Schlag 106 wurde am 8.3.2002 ein wenige Meter breiter Eintalungsbereich der welligen Grundmoräne an zwei Querschnitten mit je einem Punkt am Ost- und Westhang bzw. in der Tallinie beprobt, um Gründe für die Unterschiede der ECa-Messungen in und neben dieser typischen, auch durch den TWI ermittelten Rinne zu suchen (Abb. 5-3). Dabei wurden aus den Tiefen 0,1 - 0,3 m und 0,4 - 0,6 m jeweils fünf Stechzylinder (100 cm³) aus zwei Profilen pro Messpunkt entnommen (3 Punkte à 2 Tiefen à 2 Profile mit 5 Wiederholungen). Beutelp Proben aus diesen Horizonten sowie drei weiteren Punkten des zweiten Querprofils wurden im Labor des Instituts für Bodenkunde an der Universität Rostock untersucht

Tabelle 5-1: Bodenfeuchtemessungen auf Schlag 111, 20 Monitoringpunkte.

| | Methode | Aussage | Tiefe der Proben |
|------------|---------------|--------------------|---------------------------------------|
| 17.03.2000 | Gravimetrisch | Frühjahrssättigung | 0,1 - 0,3 m; 0,3 - 0,6 m; 0,6 - 0,9 m |
| 22.06.2000 | Gravimetrisch | Frühsommer/Pflanze | 0,1 - 0,3 m; 0,3 - 0,6 m; 0,6 - 0,9 m |
| 31.08.2000 | Gravimetrisch | Sommer/Boden | 0,1 - 0,3 m; 0,3 - 0,6 m; 0,6 - 0,9 m |
| 12.01.2001 | Gravimetrisch | Wintersättigung | 0,1 - 0,3 m; 0,3 - 0,6 m; 0,6 - 0,9 m |
| 14.08.2001 | TDR | Sommer/Boden | 0 - 0,15 m |
| 15.08.2001 | TDR | Sommer/Boden | 0 - 0,15 m |
| 16.08.2001 | TDR | Abtrocknung | 0 - 0,15 m |

Zusätzlich wurde auf dem Schlag 107 die Bodenfeuchte mit der TRIME-TDR-Sonde am 6.8.1998, 12.8.1998, 28.9.1998 und 2.10.1998 an 18 Messpunkten eines Kleineinzugsgebietes erhoben und mit dem TWI verglichen (Schmidt, 1999). Für 20 Punkte wurden für Laboruntersuchungen (K_f -Wert und Lagerungsdichte) am 4.3.1999 Stechzylinderproben mit sechs Wiederholungen entnommen.

Labormessungen

Im Labor des Instituts für Bodenkunde an der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät wurden folgende Bodenkennwerte für die Schläge in Kassow ermittelt:

- gravimetrischer Wassergehalt w : Trocknung der Proben bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz (4 Kampagnen mit 20 Messpunkten à 3 Tiefen) von Schlag 111,
- Bodenart und Humusgehalt für 7 Punkte, Schlag 107,
- gesättigte hydraulische Leitfähigkeit K_f , Feuchtrohdichte ρ_m Trockenrohdichte ρ_d und Humusgehalt für 20 Punkte, Schlag 107,
- KAK_{pot} nach Methylenblauverfahren (Peter und Markert, 1961), Humusgehalt, Karbonatgehalt, pH-Wert, Korngrößenanalyse, gesättigte hydraulische Leitfähigkeit K_f , Feuchtrohdichte ρ_m , Trockenrohdichte ρ_d und Porenvolumen p_v für sechs Punkte, Schlag 106.

Weiterhin wurde im Labor an fünf 350 cm³-Proben von einem im Gebiet entnommenen Bodenmonolithen die Mikrovarianz der TDR-Messungen ermittelt (Schmidt, 1999).

5.2 Validierung des Topographischen Wetness-Index (TWI)

Die Werte von TWI und weiteren Reliefparametern wurden mit Sensordaten, Feld- und Labormessungen verglichen, um die Aussagekraft der aus dem DGM geschätzten potenziellen Bodenfeuchte bezogen auf das räumliche Muster und die Bodenfeuchtedynamik zu bewerten.

5.2.1 Flächenkorrelationen von Sensor- und Geländeparametern

Für verschiedene Ausschnitte der Schläge in Kassow wurden Geländeparameter (berechnet mit TAPES-G, DYNWET-G, SRAD und ArcView) mit der Ertragskarte von 2002¹, der ECa-Kartierung² und einem Thermalluftbild vom 10.06.1997 (AGEMA Thermovision 470; Gebbers und Schmidt, 1999; Grenzdörffer, 2002) flächenhaft im 5 m Raster ausgewertet. Die Ertragskarte wurde aus den aufbereiteten Daten des *preagro*-Informationssystems erstellt. Als problematisch zeigte sich, dass zwei verschiedene Mähdrescher mit unterschiedlichen Kartiersystemen zur Datenerfassung eingesetzt wurden. Für diese Untersuchung wurden nur die Daten des Claas-Ertragserfassungssystems verwendet und eine neue Interpolation mittels Kriging (Sphärisches Modell) durchgeführt. Die Bestimmung von Pearssons Korrelationskoeffizient r erfolgte mit S-Plus 4.5. Die folgenden Scatterplots zeigen für verschiedene Gebietsausschnitte des Schlages 106 (Abb. 5-3) die Geländehöhe (z), mit SRAD berechnete minimale Lufttemperatur, Thermalbild, Winterweizen-Ertrag (Yld02), TWI (nach ArcView, Kap. 5.4) und elektrische Leitfähigkeit (EM38). Für verschiedene topographische Gegebenheiten sind die Korrelationen unterschiedlich stark ausgeprägt, teilweise auch gegenläufig. Bei einer Betrachtung von Gesamtschlägen mit komplexem Relief wie in Kassow nivellieren sich diese Effekte, so dass keinerlei Korrelation erkennbar ist bzw. in einer Aufspaltung der Punktwolke zwei unterschiedliche Prozesse deutlich werden, z. B. bei TWI und ECa (Kap. 5.3).

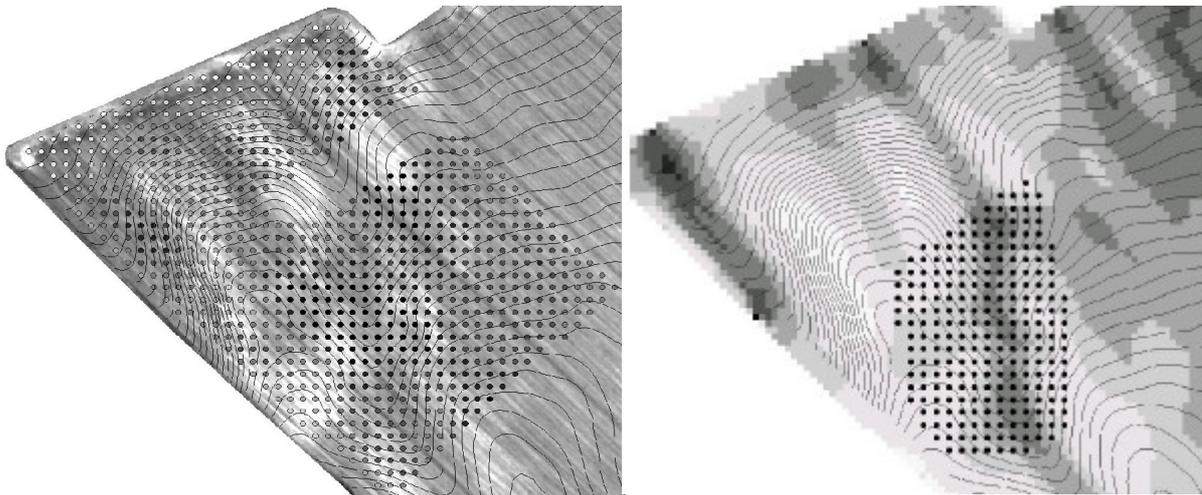


Abbildung 5-3: Untersuchungsausschnitte für die Scatterplots 5-4 bis 5-6. Links: 5 m Ertragsraster (Ertrag mit Graustufe steigend) 480 * 380 m über Luftbild vom 02.04.2002, 887 Untersuchungspunkte. Geländehöhe von 7 m im Nordosten auf 24 m ansteigend (1 m Isolinien). Rechts: Teilgebiet mit 235 Punkten entlang einer Rinne.

Abb. 5-4 zeigt die Beziehungen der Gelände- und Sensordaten für die 887 Punkte in Abb. 5-3. Über die Punktwolken wurde ein glättendes *local regression model* (LOESS) gelegt, das auf lokal gewichteten kubischen Polynomen basiert (MathSoft, 1997). Dieses Modell weist gut auf Unstetigkeiten im Verlauf der durch die Punktwolken dargestellten Beziehungen hin. Die klare negative Korrelation zwischen Geländehöhe und berechneter Minimumtemperatur zeigt deutlich den Berechnungsweg: SRAD berechnet keine Kaltluftflüsse sondern nur die höhenabhängige Temperaturabnahme, die lediglich auf einer höheren Raum-Zeit-Skala zu sinnvollen Aussagen führt. Somit beruht auch die Beziehung zwischen Ertrag und Minimumtemperatur auf einer „Scheinkorrelation“, ebenso wie die klare Zunahme des Ertrages mit der Geländehöhe. Dies beruht auf den Problemen der Ertragserfassung im Vorgewende, das hier im Talbereich zu finden ist. Um diese Fehler zu eliminieren, wurde der Datenbestand auf die 678 Punkte ohne Vorgewende reduziert (Abb. 5-5). Dadurch wird die Schiefe des Ertragshistogrammes entscheidend reduziert, während die weiteren Histogramme ihre Gestalt behalten.

¹ Quelle: Interner Bereich des Projektinformationssystems von www.preagro.de (02.11.2002).

² Quelle: Kartierung durch H.-P. Durlesser 1999, www.preagro.de (02.11.2002).

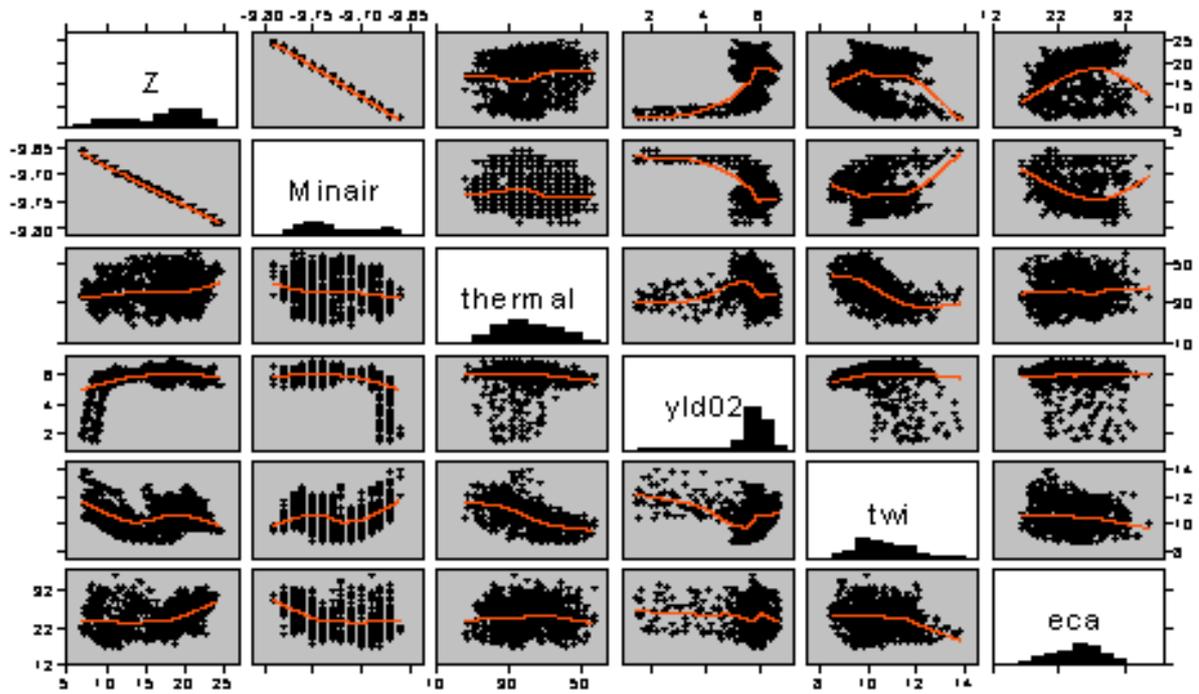


Abbildung 5-4: Scatterplot-Matrix zwischen Reliefparametern und Sensordaten für den 480 m * 380 m-Ausschnitt von Schlag 106 (n = 887 Punkte) mit glättendem local regression model (LOESS). Z = Geländehöhe, Minair = min. Lufttemperatur, thermal = Thermalbild, yld02 = Ertrag 2002.

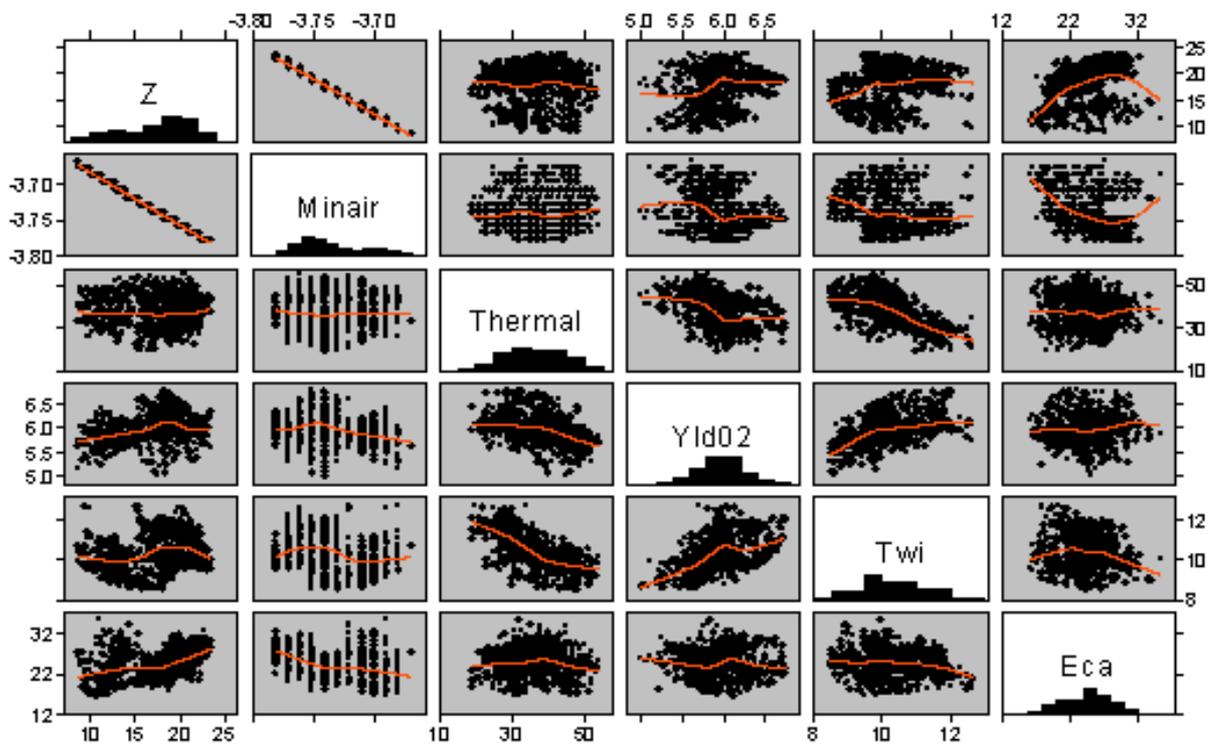


Abbildung 5-5: Scatterplot-Matrix zwischen Reliefparametern und Sensordaten für den 480 m * 380 m-Ausschnitt von Schlag 106 ohne Vorgewende (n = 678 Punkte) mit glättendem local regression model (LOESS).

Eine eindeutige Beziehungen ergibt sich für den Untersuchungsausschnitt nur bei TWI und Thermalbild ($r = -0,63$), offensichtlich als Folge der Kaltluftabflüsse, die sich nach den topographischen Gegebenheiten (Strömung entlang Rinne) richten. Die schwach positive Beziehung zwischen TWI und Ertrag ($r = 0,30$) wurde anfangs deutlicher erwartet, da der Bodenwassergehalt ein entscheidender Faktor für das Pflanzenwachstum und die Ertragsbildung ist.

Der Zusammenhang zwischen Ertrag und ECa-Signal, der in mehreren Publikationen als klar positiv beschrieben wurde (z. B. Schmidhalter et al., 2002), betrug für die gleichen 235 Untersuchungspunkte nur $r = -0,19$ und für den Gesamtschlag $-0,07$. Die Beziehungen zwischen Wetness-Index, Bodenfeuchte und ECa werden in den nächsten Kapiteln intensiver diskutiert. In Kassow wurde im Gegensatz zu Schlägen anderer Regionen auch auf Teilschlagebene die erwartete positive Beziehung zwischen TWI und ECa nicht gefunden ($r = -0,2$). Die Gründe dafür deuten sich an, wenn die Punktmenge auf einen räumlich kleineren Ausschnitt mit einem einheitlichen Prozessregime entlang der Rinne reduziert wird (130 Punkte, Abb. 5-6 und Tab. 5-2). Dort steigt die Korrelation zwischen ECa und TWI auf $r = -0,82$. Dies legt nahe, dass in den Bereichen hohen Wasserabflusses das Substrat deutlich ton- und schluffärmer ist (siehe Kap. 5.3 für Bodenuntersuchungsergebnisse).

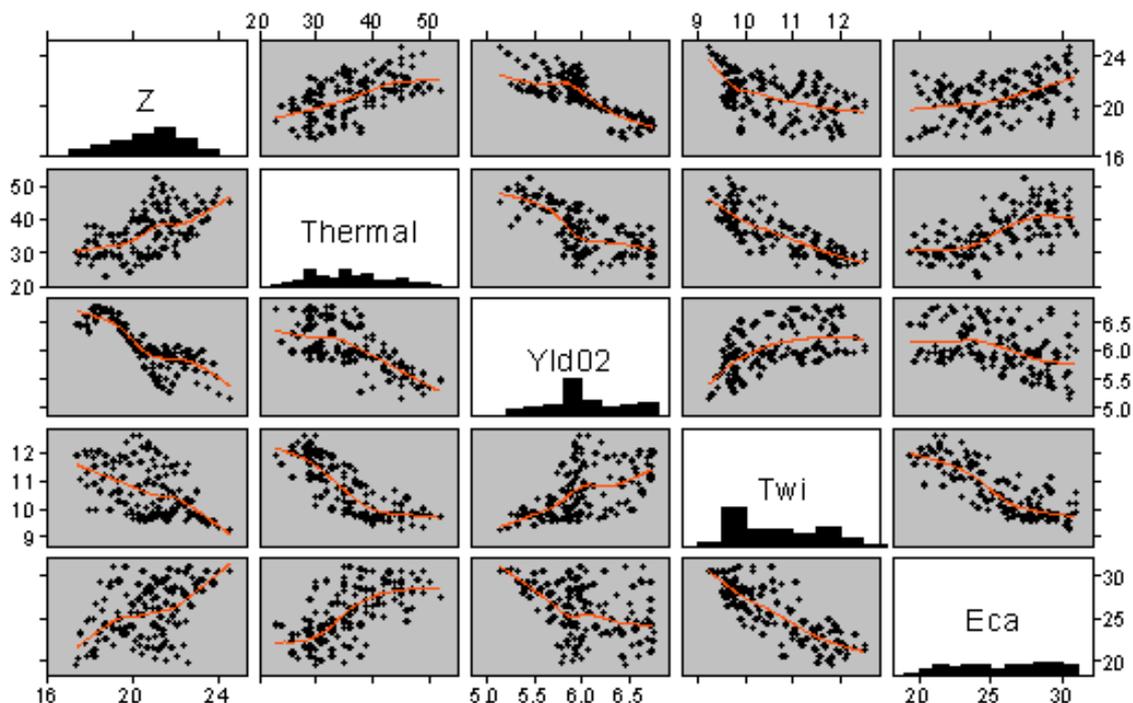


Abbildung 5-6: Scatterplot-Matrix zwischen Reliefparametern und Sensordaten für den Rinnenbereich von Schlag 106 ($n = 130$ Punkte) mit glättendem local regression model (LOESS).

Für einen Teilschlag im Südosten kehrt sich das Verhältnis von ECa und TWI um (Tab. 5-2). Statt einer Rinne wurde in diesem Fall eine Mulde am Schlagrand betrachtet. Dort ist auf Grund des konvergierenden Geländes ein hoher TWI bei gleichfalls hohem ECa-Signal zu finden. Anscheinend überwiegen kolluviale Prozesse, die einen höheren Anteil an Feinpartikeln bewirken. Der Vergleich von Mulde und Rinne zeigt auch eine unterschiedliche Reaktion des Ertrages auf die Reliefform: In der Rinne ergibt sich ein Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0,26$ (mit steigendem TWI steigender Ertrag), in der Mulde sinkt wohl auf Grund der Vernässung der Ertrag mit steigendem TWI ($r^2 = 0,11$). Beide Beziehungen sind statistisch signifikant bei $p = 0,001$. Der formbasierte Ansatz wies für die Rinne eine konkav-konvergierende Form aus und für die Mulde eine konkav-parallele Form (Abb. 4-10). Mit dieser Information können keine sinnvollen Rückschlüsse oder Verallgemeinerungen abgeleitet werden.

Tabelle 5-2: Korrelationskoeffizienten r für 130 Punkte entlang der Rinne bzw. 160 Punkte entlang der Mulde

| | Ertrag Rinne | Geländehöhe Rinne | TWI Rinne | ECa Rinne | Ertrag Mulde | Geländehöhe Mulde | TWI Mulde | ECa Mulde |
|-------------|--------------|-------------------|-----------|-----------|--------------|-------------------|-----------|-----------|
| Ertrag | 1 | x | x | x | 1 | x | x | x |
| Geländehöhe | -0.82 | 1 | x | x | 0.54 | 1 | x | x |
| TWI | 0.51 | -0.50 | 1 | x | -0.34 | -0.65 | 1 | x |
| ECa | -0.38 | 0.45 | -0.82 | 1 | -0.36 | -0.82 | 0.64 | 1 |

Die gemeinsame Analyse von ECa und TWI dagegen erlaubt Aussagen über die Wirkung des Reliefs auf die Bodenbildung. Siehe dazu Untersuchungen in Kap. 5.3. Die dargelegten Betrachtungen zeigen deutlich, wie die Auswahl des Probengebietes über die Ergebnisse von Korrelationsanalysen entscheidet. Hinzu kommen Mängel bei Sensordaten unter bestimmten Bedingungen, wie z. B. die schlechte Ertragsdatenqualität (und bewirtschaftungsbedingte Mindererträge) an den Schlagrändern, was besonders bei kleinen Schlägen die Aussagekraft entscheidend mindert. Zudem zeigt der Ertrag vor allem kurzzeitige Einflüsse, während Boden- und Reliefparameter (z. B. repräsentiert durch den TWI) langjährige Durchschnittswerte für Muster der Standortpotenziale widerspiegeln.

Das derzeitige Prozessverständnis kann noch nicht auf ganze Schlagsysteme angewendet werden. 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. Für topographisch homogene Schläge sind Korrelationsanalysen aussagekräftig, nicht jedoch für komplexe Schläge, auf denen sich Ergebnisse gegenläufiger Prozesse nivellieren. Werden gefundene Korrelationen für Modellentwicklungen verwendet, ist zur Qualitätssicherung eine exakte Beschreibung der Untersuchungspunkte und eine kritische Betrachtung der Übertragbarkeit notwendig.

5.2.2 Vergleich von Extremwerten des TWI mit Luftbildern

Für Rasterbeprobungen finden sich, wie gezeigt, nur schwache Korrelationen zu Reliefparametern. Visuelle Übereinstimmungen zwischen dem TWI-Muster und Mustern auf bodenzeichnenden Luftbildern ergeben sich für fast alle Schläge (Abb. 5-7). Die mit dem TWI aus dem DGM geschätzten Abfluss- und Akkumulationsmuster zeichnen sich auf dem Luftbild deutlich ab und weisen auf erhöhte Feuchte und höheren Humusgehalt hin.

Die Übereinstimmungen von ausgegrenzten TWI-Extrema und der spektralen Information aus Rot-, Grün- und NIR-Kanälen von bodenzeichnenden Luftbildern zehn verschiedener Schläge wurden mit dem t-Test bzw. Wilcoxon-Rank-Test auf Signifikanz geprüft. Die Hypothese, dass signifikante Mittelwertunterschiede der Spektralinformation zwischen TWI-Extrema-Polygonen (Abb. 5-8) 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. Getestet wurde weiterhin, ob TWI-Extrema oder ausgegrenzte Reliefformen (Senken mit Auffüllung $>0,3$ m bzw. Kuppen nach Auffüllung des inversen DGM mit ebenfalls $0,3$ m) eine schärfere Trennung erlauben. Bei den Schlägen, die Kuppen und Senken nach dieser Definition aufwiesen, zeichnen sich die Formen deutlicher durch Bodenunterschiede ab. Deutlich wird dies beim Vergleich der Senkenbereiche in der Jungmoränenlandschaft mit den hohen, linienförmigen angeordneten TWI-Werten (Schmidt, 2001b). Jedoch sind außerhalb der Jungmoränengebiete nur selten solche vollkommenen Kuppen und abflusslosen Senken zu finden, während TWI-Berechnungen auch in Gelände mit leichten Wölbungsvariationen erfolgreich auf Bodenunterschiede hinweisen. Luftbilder vom Auflaufen des Getreides (z. B. Schlag 104, 24.2.2000, Abb. 5-15) zeigen deutlich, wie der Pflanzenbewuchs Reliefformen, insbesondere trockene Hangschultern (TWI-Minimalwerte) und Rinnen nachzeichnet. Vor allem entlang den im Frühjahr gut mit Wasser versorgten Rinnen ist stärkerer Bewuchs zu verzeichnen. Die Unterschiede nivellieren sich im Laufe der Wachstumsperiode, speziell in teilflächenspezifisch bewirtschafteten Beständen. Lediglich die trockenen Extrembereiche sind auch im Sommer noch durch niedrigere Wuchshöhen festzustellen, was auch durch die geringere Stickstoffverwertbarkeit der Pflanzen bei geringem Wasserangebot (Ehlers, 1996) begründet sein kann.

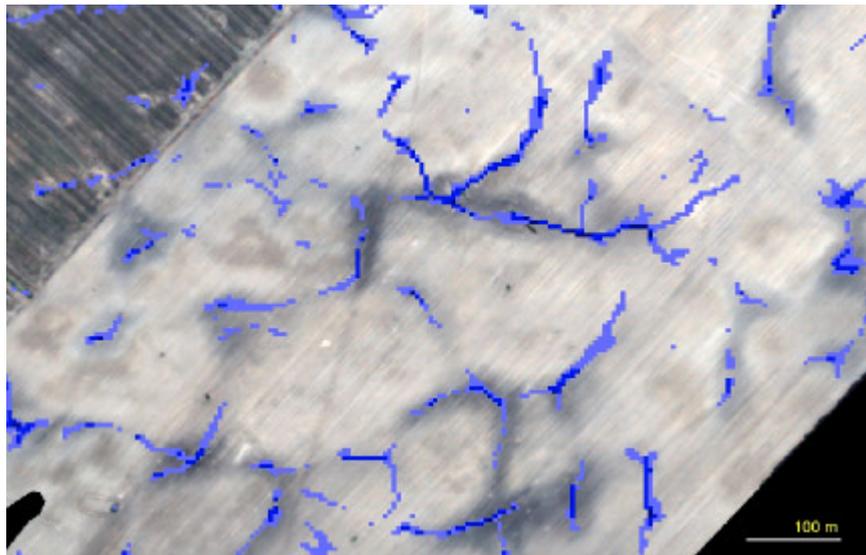


Abbildung 5-7: Berechnete Abflusslinien aus dem TWI (blau) und Luftbild Kassow, Schlag 111 (Teilschlag) vom 24.9.2000. Dunkle Bereiche weisen auf höhere Feuchte/Humusgehalte des Oberbodens hin.

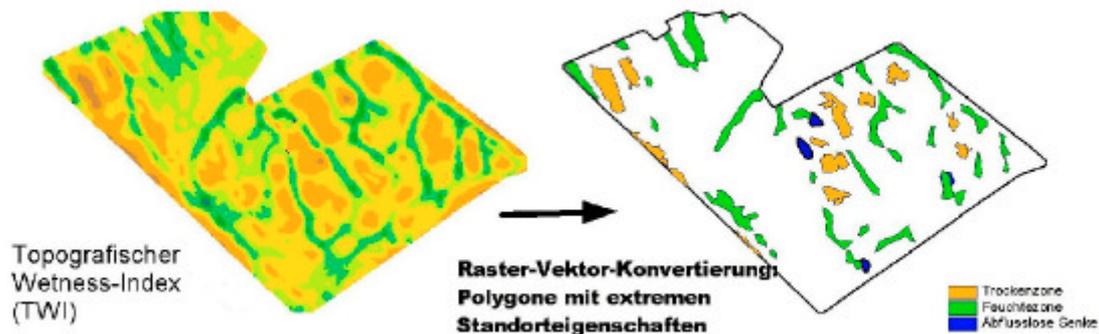


Abbildung 5-8: Ableitung von TWI-Extrempolygonen für teilschlagspezifische Maßnahmen aus dem TWI-Grid. Als Polygone für die Bewirtschaftung wurden im Mittel 40 % des Legendenumfanges für Maximum- u. 20 % für Minimum-Extrema ausgegeben. Zusätzlich wurden, sofern vorhanden, abflusslose Senken (tiefer 0,3 m) ermittelt.

5.2.3 Vergleich von TWI und Bodenfeuchtemessungen einer Transekte

Auf dem heterogenen Schlag 111 wurde der Bodenwassergehalt entlang einer Transekte mit 20 Punkten an sieben Zeitpunkten gravimetrisch in drei Tiefen bzw. mit TDR-Sonden ermittelt (Tab. 5-1). Die Lage der Messpunkte wurde bereits in Abb. 4-7 gezeigt. Die Bodenarten-
gruppen der Ost-West-Transekte (W) und Nord-Süd-Catena beschreibt Tab. 5-3. Der maximale Höhenunterschied beträgt 7,44 m, die mittlere Neigung der 20 Standorte 2,3° (s = 1,3).

Tabelle 5-3: Bodenartengruppen (KA4) der Untersuchungspunkte für 0 - 0,5 m und 0,5 - 0,9 m (Fingerprobe).

| N1 | W1 | W2 | W3 | W4 | W5 | W6 | W7 | W8 | W9 | W10 | W11 | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| us | Us | ss | ss | ll | lu | ut | lu | lu | ut | tu | lu | lt | lt | ut | ut | lt | ut | lt | ut |
| us | Us | ss | ss | ll | ut | ut | lu | lu | ut | ut | lt | tl | lt | ut | ut | lt | ut | lt | tu |

Reliefeffekte sind überwiegend an der Nord-Süd-Catena zu erkennen, jedoch auch die geringen Höhenunterschiede der Transekte durch die wellige Grundmoräne zeigen im Frühjahr gute Übereinstimmungen mit dem TWI (Abb. 5-9). Auf der Abzisse sind die Messpunkte der 430 m langen West-Ost-Transekte (W) durch den welligen Bereich des Schlates und einer 190 m langen Nord-Süd-Transekte (S1-5 Südhang, S7/8 Nordhang) aufgetragen. 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 Wert = feuchter als die Nachbarstandorte) zutreffen. Hohe TWI-Werte

stehen für lokale topographische Tiefpunkte (hier: 1 - 3 m Höhenunterschied). In diesen Bereichen ist ein stärkerer Zusammenfluss von Oberflächenwasser und Zwischenabfluss zu erwarten. Lokale Minima des TWI zeigen in der Regel Oberhangbereiche an (Tab. 5-4). Dies wurde durch die Bodenfeuchtemessungen nicht so deutlich bestätigt wie der ausgeprägte Senkenbereich S6. Siehe dazu auch Abb. 4-6. Die deutlich geringere Bodenfeuchte im Juni an den Punkten W2 und W3 erklärt sich durch eine lokale Sandlinse, die durch Bohrstockbeprobungen bestätigt wurde (Tab. 5-3). Hier überprägt der Einfluss der Textur deutlich den Relief-einfluss. Dieses Problem wird in Kap. 5.3 durch Verschneidung mit anderen Datenebenen behandelt.

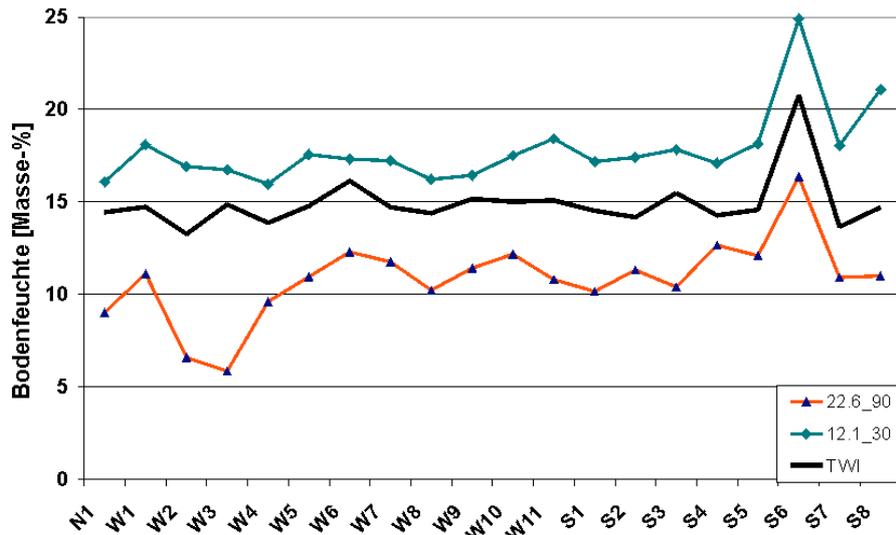


Abbildung 5-9: Bodenfeuchte- und TWI-Verlauf entlang des Messtransekts. Der TWI wurde zur Darstellung auf ein willkürliches Bodenfeuchteniveau angepasst. N1 bis W11: Ost-West-Transekts durch welliges Gelände mit geringer Reliefenergie (2,7 m). S1 bis S6: Südhang-Catena (Höhendifferenz 6,3 m), ergänzt durch zwei Punkte am gegenüberliegenden Nordhang (S7 und S8).

Tabelle 5-4: Reliefpositionen der 20 Untersuchungspunkte auf Schlag 111 (Kassow) mit Mittelwerten und Standardabweichung (s) der Bodenfeuchtemessungen sowie des TWI (5 m Raster, Mean-Filter) mit Wertespektrum.

| Reliefposition | Untersuchungspunkte | 12.1.2001 0 - 0,3 m | 12.1.2001 0,3 - 0,6 m | 22.6.2000 0,3 - 0,6 m | 22.6.2000 0,6 - 0,9 m | TWI (Spw. 9,0 - 12,9) | Mittl. Ab-trocknung 15./16.8.01 |
|----------------|--------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| Oberhang/Kuppe | W3, W4, W5, W11, S1 | 17,0 (0,6) | 14,9 (1,0) | 9,1 (3,0) | 9,8 (2,4) | 9,4 (0,4) | 2,65 (0,6) |
| Mittelhang | W2, N1, S2, S3, S4, S5, S7, S8 | 17,7 (1,4) | 14,9 (2,1) | 7,9 (2,0) | 10,0 (2,4) | 9,8 (0,8) | 2,41 (1,6) |
| Hangfuß/Senke | W1, W6, W7, W8, W9, S6 | 18,4 (3,2) | 15,2 (2,4) | 9,2 (2,4) | 12,2 (2,2) | 11,2 (1,2) | 2,17 (0,6) |

In Tab. 5-4 sind die Messpunkte entsprechend ihrer Reliefposition gruppiert. Für jede Gruppe wurde die mittlere Bodenfeuchte der Messpunkte sowie der mittlere TWI berechnet. In sämtlichen Fällen sind die Punkte am konvergierenden Hangfuß feuchter, was auch mit dem TWI-Konzept übereinstimmt. Die Standardabweichungen bei den feuchten Standorten sind größer, was durch die sehr hohen Messwerte in der Senkenposition S6 bewirkt wird. Die Unterschiede in Bodenfeuchte und TWI sind zwischen Oberhang und Mittelhang geringer. Weiterhin zeigt Tab. 5-4, ebenso wie Abb. 5-10, dass die Bodenfeuchteverteilung dem TWI bzw. der Reliefposition im Frühjahr nahe der Oberfläche und im Frühsommer in größerer Tiefe besser entspricht. Gründe dafür sind der mit der Tiefe zunehmend trägere Bodenwasserhaushalt und die Ausschöpfung des Bodenwassers durch den Pflanzenbestand im Frühsommer.

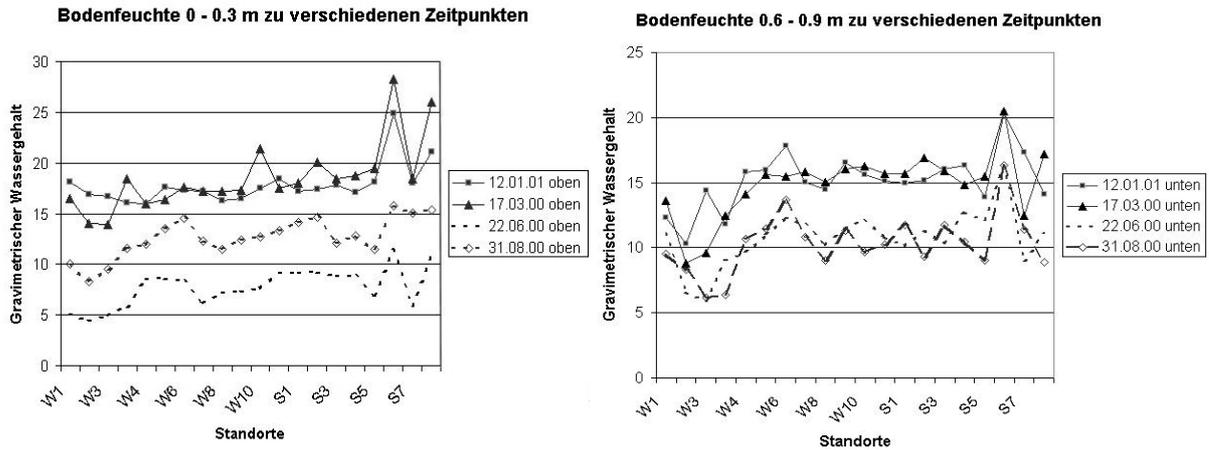


Abbildung 5-10: Bodenfeuchteverlauf an vier Zeitpunkten (Januar, März, Juni, August) in 0,3 - 0,6 m bzw. 0,6 - 0,9 m Tiefe auf Schlag 111 (Kassow). Im Frühsommer/Sommer wird das frühe Austrocknen an W2/W3 (sandiger Boden) deutlich sowie die weiterhin bessere Wasserversorgung an S6 (Mulde). Die Niederschlagsmengen in den drei Tagen vor dem Messzeitpunkt waren vergleichbar niedrig (< 1mm).

TDR-Kampagne 14.-16.8. 2001

Die Beprobung auf dem Schlag 111 fand in Ergänzung zu den gravimetrischen Proben entlang der Catena statt. Bei der Umrechnung von Vol.-% (Anzeige der TDR-Geräte) in Masse-% (gravimetrische Messungen) wurde eine mittlere Trockenrohddichte von 1,6 angenommen, die auf einem vergleichbaren Nachbarschlag ermittelt wurde (Tab. 5-7). Die Beprobung zeigt eine sommerliche Austrocknungsphase, beginnend am dritten Tag nach einem Niederschlagsereignis von 26 mm. Die TDR-Messwerte waren wesentlich stabiler als bei der 1998er Kampagne (Kap. 5.1), was auf den robusteren Sondenstäben beruht. Die hohe Variabilität der Bodenfeuchtemessungen erklärt sich dadurch, dass je nach Bestandesdichte die oberflächige Abtrocknung unterschiedlich schnell verlief. Die Standardabweichung der fünf Einstiche pro Punkt schwankte von ±0,5 - 2,3. Vom 15.08.2001 auf den 16.08.2001 sank der Korrelationskoeffizient zwischen TWI und TDR-Messung mit zunehmender Abtrocknung entlang der Hangcatena (S1 - S8) von $r = 0,57$ auf $r = 0,37$ (Tab. 5-5). Um den Effekt der Bodenart einzubeziehen, wurde nach KA4 die FK abgeleitet, was für die Gesamttransekte eine bessere Vorhersage der Bodenfeuchte erlaubte, nicht jedoch am Hang, wo der TWI die Verhältnisse besser wiedergab. Die Größe der Abtrocknung betrug im Schnitt 2,5 Vol.-%-Punkte ($s = 1,2$). Aus der räumlichen Verteilung der Größe der Abtrocknung konnten keine Aussagen zu Einflüssen von Relief und Bodenart abgeleitet werden. Zu weiteren Reliefparametern bestanden keine signifikanten Korrelationen. Die in diesem Abschnitt präsentierten Daten zeigen, dass je nach Landschaftsausschnitt Bodenart oder Relief einen größeren Einfluss auf die Bodenfeuchte ausüben, was mit dem Zeitpunkt der Messung und der Reliefposition variiert.

Tabelle 5-5: Korrelationskoeffizienten r vom August 2001 für 20 Monitorpunkte und 8 Hangpunkte (S1-S8)

| | TDR 15.8. | TDR 16.8. | FK (KA4) | TWI 2 m | ECa |
|-----------|-------------|-------------|--------------|-------------|-----|
| TDR 15.8. | 1 | x | x | x | x |
| TDR 16.8. | 0,93 (0,70) | 1 | x | x | x |
| FK (KA4) | 0,62 (0,14) | 0,63 (0,30) | 1 | x | x |
| TWI 2 m | 0,42 (0,57) | 0,38 (0,37) | 0,14 (-0,31) | 1 | x |
| ECa | 0,93 (0,89) | 0,91 (0,77) | 0,70 (0,16) | 0,45 (0,66) | 1 |

Die Korrelationskoeffizienten liegen niedrig, wenn auch auf Grund der höheren DGM-Qualität etwas besser als in den meisten zitierten Literaturstellen. Es bleibt bei dieser Art der Validierung das Skalenproblem zwischen den Punktmessungen, die nur für ein kleines Messvolumen stehen (bei TDR <200 cm³), während die TWI-Modelle die potenzielle Feuchte mehrerer Quadratmeter darstellen.

Tabelle 5-6: Punktkorrelationen zwischen TWI und Bodenfeuchte (r) für Kassow, Schlag 111, 20 Monitoringpunkte. Signifikanzniveaus: hoch signifikant***: $p < 0,001$; mittel signifikant**: $p = 0,001 - 0,01$; schwach signifikant*: $p = 0,01 - 0,05$; nicht signifikant ns: $p > 0,05$.

| Algorithmus, Filter (Rasterweite) | 12/01/2001 (0,3 m) | 17/03/2000 (0,3 m) | 22/06/2000 (0,9 m) | 15/08/2001 (0-0,2 m) | 16/08/2001 (0-0,2 m) | 31/08/2000 (0,9 m) | Ertrag 2000 |
|-----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|----------------------|--------------------|-------------|
| DEMON (2) | 0,80 *** | 0,66 ** | 0,68 ** | 0,41 ns | 0,37 ns | 0,11 ns | 0,45 ns |
| DEMON, mean (2) | 0,62 ** | 0,35 * | 0,66 ** | 0,50 ns | 0,50 ns | 0,01 ns | 0,29 ns |
| DEMON (5) | 0,60 ** | 0,48 ns | 0,39 ns | -0,01 ns | 0,02 ns | 0,01 ns | -0,04 ns |
| D8 (2) | 0,45 ns | 0,53 * | 0,46 ns | 0,12 ns | 0,15 ns | -0,12 ns | 0,28 ns |
| DEMON, mean (5) | 0,45 ns | 0,10 ns | 0,24 ns | 0,35 ns | 0,35 ns | 0,07 ns | -0,17 ns |
| D8, mean (2) | 0,36 ns | 0,42 ns | 0,64 * | 0,07 ns | 0,04 ns | -0,43 ns | 0,36 ns |
| D8 (5) | 0,22 ns | 0,01 ns | 0,22 ns | -0,14 ns | -0,16 ns | -0,22 ns | -0,20 ns |
| D8, mean (5) | 0,20 ns | -0,15 ns | 0,11 ns | -0,62 ns | -0,62 ns | -0,63 ns | -0,24 ns |

Mittel- bis hochsignifikante Korrelationen ergeben sich hierbei nur für das 2 m DGM in den oberen Bodenschichten im Frühjahr bzw. im Juni in 0,6 - 0,9 m Tiefe. Ein Vergleich der TWI-Muster mit Luftbildern und ECa-Karten jedoch zeigt, dass die gefilterten 5 m Modelle die größeren Übereinstimmungen mit der Bodenheterogenität ergeben. Gerade bei dem 2 m TWI (Abb. 4-11d), das hier die besten Korrelationen ergab, ist von einem starken Zufallsmoment auf Grund des kleinräumigen Bildrauschens auszugehen.

5.2.4 Vergleich von TWI, ECa und Bodenfeuchtedynamik (Wulfen, Schlag 641)

Für den Schlag 641 in Wulfen wurden zeitlich hochaufgelöste Bodenfeuchtemessungen¹ mit dem TWI und ECa-Karten verglichen (Abb. 5-12), um in einem Gebiet anderer geologischer Genese die für Kassow getroffenen Aussagen zu überprüfen. Standorte höherer elektrischer Leitfähigkeit (Senken und Abflussbahnen) stimmen hier grundsätzlich mit hohen TWI-Werten überein. Zusätzlich sind dies auch die Bereiche, in denen in durchschnittlichen Jahren ein höherer Ertrag erzielt wird. Der kiesige Kuppenbereich erscheint sowohl auf den ECa- als auch TWI-Karten mit niedrigen Werten. Vereinzelt Niedrigertragszonen lassen sich auf eine schlechte Wasserversorgung zurückführen, die durch den TWI angezeigt wird. Korrelationen von TWI-Werten und Bodenfeuchtemessungen variierten stark mit Jahreszeit, Dauer seit dem letzten Niederschlagsereignis und der Auswahl der Messpunkte. Abb. 5-11 zeigt den zeitlichen Verlauf der Korrelation von TWI und Bodenfeuchte in verschiedenen Bodentiefen. Die besten Zusammenhänge finden sich wenige Tage nach Niederschlagsereignissen. Abfließendes Niederschlagswassers verteilt sich dem Relief entsprechend. Nach der Infiltration schwächen sich diese Zusammenhänge ab und der Textureinfluss 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. Wie in Kassow bewegt sich das Bodenwasser in 0,6 m Tiefe stärker dem Relief folgend, also im pflanzenverfügbaren Bereich. Insgesamt sind die Korrelationen höher als in Kassow. Für den Oberboden ergab das ArcView (D8)-Modell ungefiltert die besten Korrelationen, für die mittlere Tiefe der Mean-gefilterte TWI. Der DEMON-Algorithmus war auf diesem Schlag, dessen Relief weniger heterogen ist, unterlegen. Die Bodenfeuchte korrelierte mit den TWI ähnlich gut wie mit den ECa-Karten, was im Gegensatz zu Kassow auf eine gleichsinnige Wirkung von Relief und Bodeneigenschaften in Bezug auf das Feuchtemuster hinweist. Deshalb konnte der TWI auch als Korrekturfaktor erfolgreich zur Tongehaltsschätzung aus der ECa-Karte eingesetzt werden. Die Ergebnisse wurden in Bobert et al. (2001) sowie Bill und Schmidt (2002) vorgestellt.

¹ Daten (kapazitative Messungen) wurden bereitgestellt durch J. Bobert, *preagro*-TP "Bodenwasserspeicher".

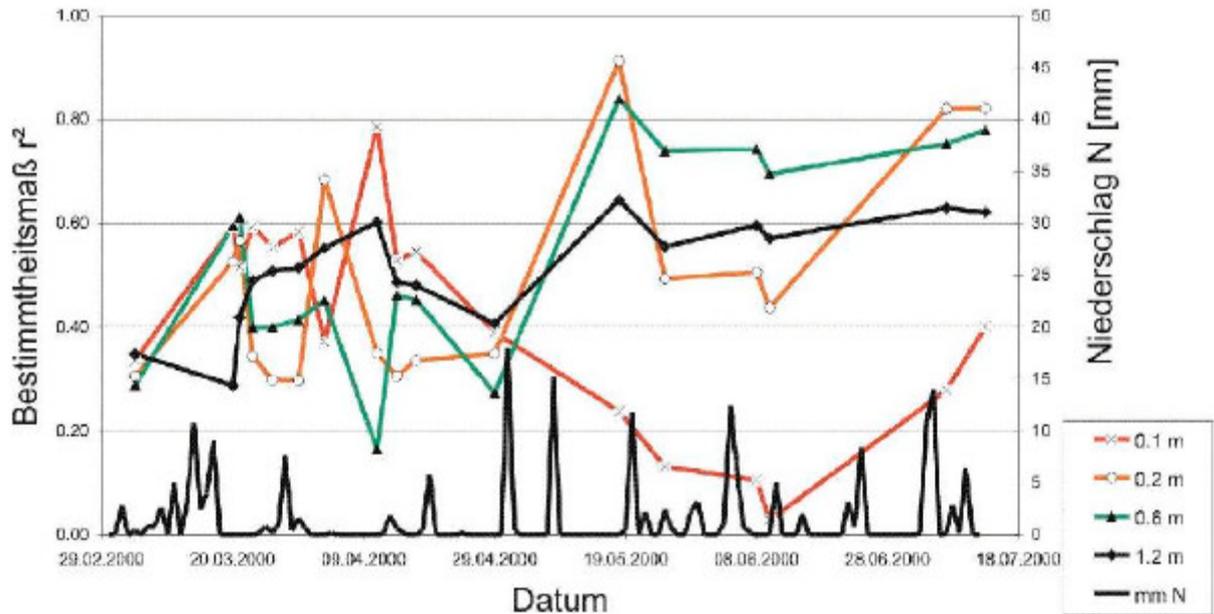


Abbildung 5-11: Verlauf der Korrelation von Bodenfeuchte und TWI für acht Monitorpunkte auf Schlag 641, Wulfen für März - Juli 2000. Zusätzlich sind die Niederschlagsmengen aufgetragen.

Für Projektschläge in den Regionen Groß-Twülpstedt (GTW), Beckum und Thumby wurden mit Bodenfeuchtedaten des Projektinformationssystems ebenfalls Untersuchungen durchgeführt, die in ihrer Güte in ähnlichem Umfang wie in Kassow und Wulfen variierten. Für den Schlag Langer Berg (GTW) zeigten Korrelationen mit 25 Messpunkten ebenfalls eine bessere Vorhersage durch den selbst programmierten ArcView-TWI (im Oberboden $r = 0,68$ statt $r = 0,58$ mit TAPES). Im B-Horizont konnten keine signifikanten Korrelationen gefunden werden, in 0,9 m Tiefe allerdings wieder ein $r = 0,59$ für den ArcView-TWI und $r = 0,60$ für die ECa-Karte. Auf diesem Schlag bestand ein guter Zusammenhang zwischen ECa und TWI ($r = 0,84$). Die von *preagro* zur Verfügung gestellten bodenzeichnenden Nahinfrarotaufnahmen zeigten wider Erwarten keine besseren Korrelationen, weder mit Bodenfeuchtemessungen, noch mit TWI und ECa. Gründe dafür können die vorklassifizierte Auswertung der bereitgestellten Daten (15 Klassen) und die teilweise schlechte Georeferenzierung (Verzerrungen bis sechs Pixel bei Schlag Alt-Grünholz) sein. Mit den RGB-Luftbildern (blauer Kanal) konnten Korrelationen mit den Bodenfeuchtemesspunkten bis $r = 0,3 - 0,5$ gefunden werden.

5.3 Vergleichende Analyse von DGM und Leitfähigkeitskartierungen

Die Reliefanalyse und die Kartierung der elektrischen Leitfähigkeit (ECa) zeigen statische räumliche Muster mit je nach Landschaftsentwicklung unterschiedlich starken Übereinstimmungen. Die Schwierigkeit bei der Interpretation der ECa-Karten liegt in der komplexen Natur des Signals, das einen integralen Wert über etwa 1,5 m Tiefe anzeigt. Das DGM, bzw. daraus abgeleitete topographische 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 Ausprägung von Bodenparametern als Ergebnis der u.a. vom Relief gesteuerten Prozesse anzeigt.

Als Hauptproblem bei der Überprüfung des TWI-Konzeptes mit Bodenfeuchtedaten ergab sich die variable hydraulische Leitfähigkeit des Bodenmosaiks, die stellenweise die reliefgesteuerte laterale Bewegung durch unterschiedlich starke Versickerung bzw. Wasserbindung im Verlauf der Abtrocknung überprägte. Um Informationen über die vertikale Wasserbewegung in das TWI-Muster zu integrieren, wurde die Verwendbarkeit der ECa-Karten überprüft.

Die Arbeitshypothesen hierfür waren:

- Hohe Werte der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit (ECa) repräsentieren Böden mit höherem Tongehalt und organischem Anteil. Mit steigendem Tongehalt ist ein Anstieg der Feldkapazität und ein Absinken der hydraulischen Leitfähigkeit (vertikale Wasserbewegung) zu erwarten. Beides führt zu einer höheren Bodenfeuchte.
- Es wird eine Beziehung zwischen hydraulischer und elektrischer Leitfähigkeit der Art $ECa \sim 1/k_f$ angenommen, da beide Eigenschaften vom Tongehalt abhängig sind. Somit wird in Bereichen hoher potenzieller vertikaler Transporte, z. B. Sandlinsen oder -bänder, der TWI mit einem geringeren Faktor belegt. Den Zusammenhang zwischen hydraulischen und elektrischen Eigenschaften beschreibt Nobes (1996) und weist darauf hin, dass starke Tongehalte hohe elektrische Leitfähigkeit aber geringe Wasserleitfähigkeit (bei hoher Wasserhaltefähigkeit) bewirken.
- 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.

Es wurden mehrere Fälle der Korrelation beobachtet. Der einfachste Fall, eine stark positive Korrelation von TWI und ECa trat auf überwiegend homogenen Schlägen auf. Ein Beispiel dazu ist der Schlag 641 (Wulfen), wie bereits in Kap. 5.2.4 beschrieben. Abb. 5-12 zeigt die ECa-Karte mit den aus dem TWI abgeleiteten Tal- und Gerippelinien. Die Farbtiefe des Rasters ist durch die TWI-Werte gesteuert ist. Niedrige ECa-Werte charakterisieren den Trockenbereich am Hang, während in den Talbereichen hohe ECa- und TWI-Werte auftreten. Eine solche Form der Verschneidung kann Hinweise auf gleichsinnig das Bodenfeuchtepotenzial hebende Reliefprozesse und Bodeneigenschaften geben. Weiterhin ist eine Verschneidungskarte (Multiplikation) erstellt worden. Hierbei werden Bereiche hoher ECa- und TWI-Werte in den Vordergrund gestellt. Standorte mit hohem reliefbedingten Zufluss, aber geringem Ton- und Schluffgehalt (also niedriger Wasserhaltekapazität) werden folglich mit niedrigeren Faktoren belegt. Dies ist ebenfalls für den wenig reliefierten, stark von einem sandigen Band beeinflussten Nachbarschlag Finkenherd zu sehen (Abb. 5-13). Die mit Sandlöß zugewehrte eiszeitliche Abflussrinne ist im DGM nicht zu erkennen, beeinflusst das Ertragsmuster auf dem Schlag jedoch enorm (trockenstressinduzierte Aufwuchsunterschiede). In der Verschneidungskarte ist lediglich noch die Hauptabflussrinne und damit der Ort höchster Wahrscheinlichkeit von lateralem Zuschusswasser an diesem Trockenstandort zu erkennen. Das Ausmaß kann über eine Gewichtung bei der Verschneidung gesteuert werden.

Der TWI hilft auf diesem Schlag bei der Erklärung der hohen ECa-Werte im Zentrum der südlichen Hälfte (konvergierende laterale Wasserflüsse). Da die weiteren Bereiche kaum Übereinstimmungen zwischen Relief und ECa zeigen, weist die Ergebniskarte großteils das Muster der ECa-Karte, also der Bodenunterschiede, aus. Bei der Untersuchung des Betriebes Kassow wurde deutlich, dass die Werte von TWI und ECa sowohl gleich- als auch gegenseitig wirken können. Dieses Phänomen wurde auch für andere Betriebe, z. B. Beckum nachgewiesen. In Abb. 5-14 sind die lokalen Korrelationskoeffizienten für die Schläge 104 und 106 (Kassow) dargestellt. Nur wenige Standorte (rot) korrelieren eindeutig positiv, vorwiegend Akkumulationsbereiche. In den überwiegenden Schlagbereichen (blau dargestellt) ist der Korrelationskoeffizient $r < -0,25$, d.h. mit wachsendem Zuflusspotenzial bei gleichzeitig abnehmender Neigung fällt der ECa-Wert ab. Dies legt nahe, dass in diesen Bereichen, in denen nach der formbasierten Auswertung konvergierende Formen liegen, durch den episodischen Oberflächenabfluss oder/und den Zwischenabfluss die Bodeneigenschaften geändert wurden. Um dies zu untersuchen, wurde eine rinnenartige Form auf Schlag 106 beprobt (Tab. 5-7). Abb. 5-15 zeigt für einen Ausschnitt von Schlag 104 das Phänomen der negativen Korrelation entlang einer Rinne im Vergleich zu einem Luftbild.

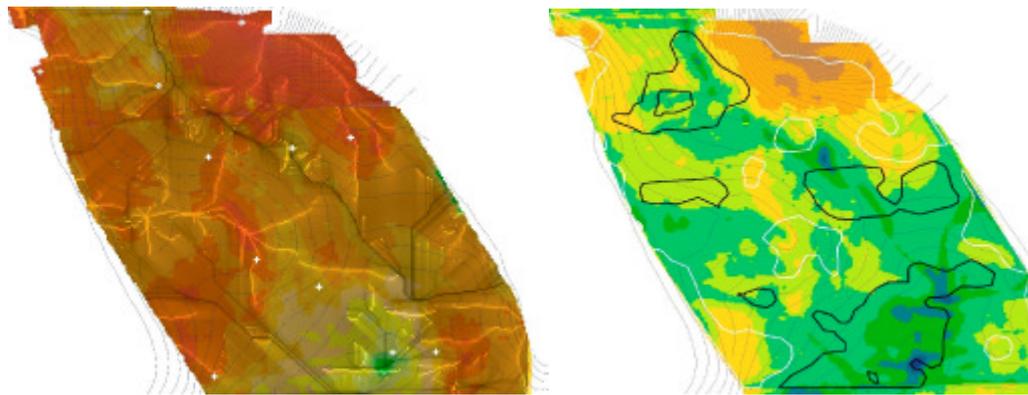


Abbildung 5-12: Überlagerung von TWI und ECa für Schlag 641. Links: Struktur des Reliefs mit Abfluslinien [dunkel] und Gerippelinien [hell]). TWI steuert Farbtiefe der ECa-Karte. Weiß: Probenpunkte der Bodenfeuchtemessung. Rechts: Verschneidung von ECa und gefiltertem TWI dar durch Multiplikation im Vergleich zu den 1m-Höhenlinien und den Zonen hohen Ertrages (schwarz) und niedrigen Ertrages (weiß).

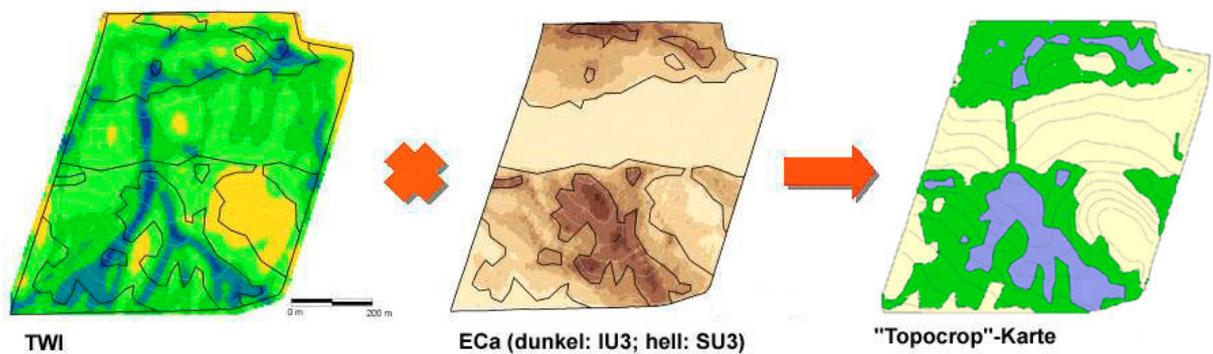


Abbildung 5-13: Verschneidung von TWI-Raster und ECa-Raster zu einer kombinierten Relief-Bodenheterogenitätskarte (Benennung nach Hofbodenkarte *preagro*, KA3). Betrieb Wulfen, Schlag Finkenherd.

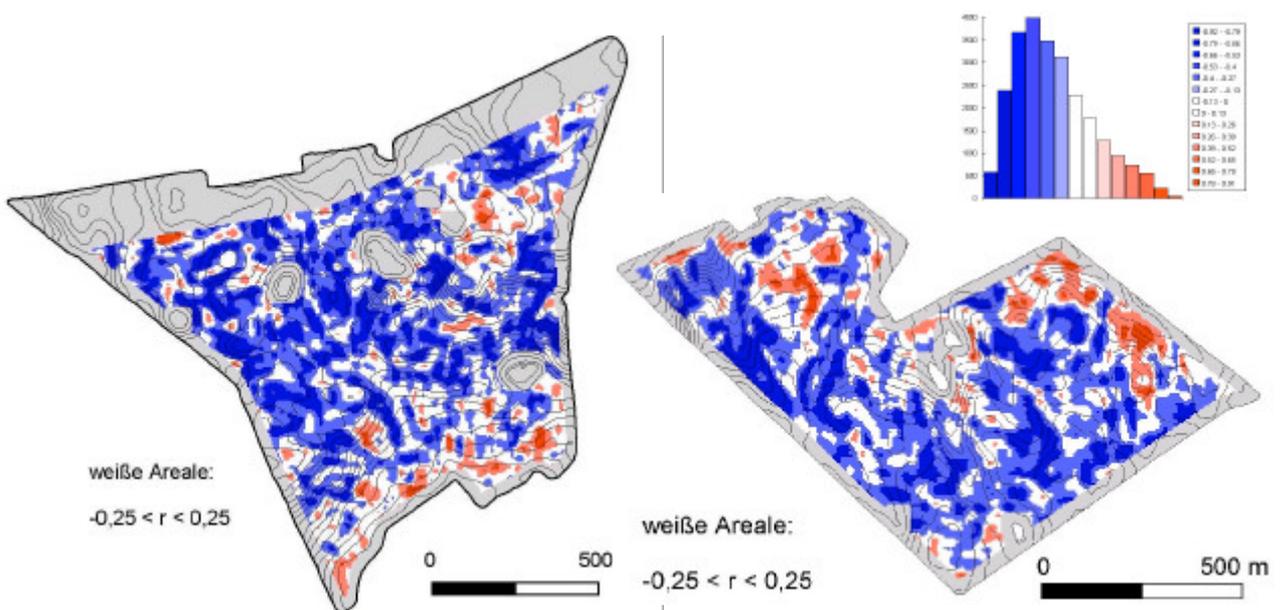


Abbildung 5-14: Lokale Korrelationskoeffizienten einer 10 * 10 m Korrelationsmatrix zwischen TWI und ECa für die Schläge 104 (links) und 106 (rechts) in Kassow. Blau: negative Korrelation ($E_{Ca} \sim 1/TWI$), rot: positive Korrelation ($E_{Ca} \sim TWI$) mit Histogramm der Korrelationsmatrix für Schlag 106. Höhenlinien: 2 m Intervall.

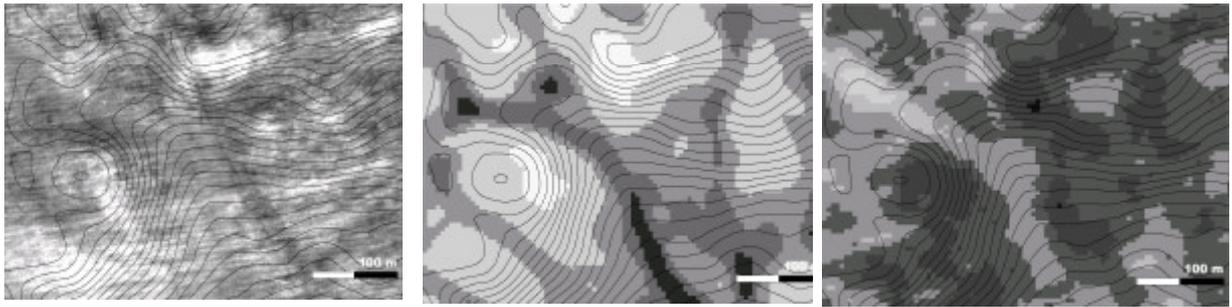


Abbildung 5-15: Muster des auflaufenden Raps (Luftbild vom 24.2.2002), des TWI und der elektrischen Leitfähigkeit (Kassow, Schlag 104) im Vergleich zu den 1 m-Höhenlinien. Dunkle Grauwerte zeigen geringe Reflexion bzw. hohe TWI-Werte und hohe ECa-Werte.

Für die von Nordwest nach Süden verlaufende konvergierende Form zeichnet sich ein hoher TWI und ein 8 - 12 mS/m niedrigeres ECa-Signal durch. Im Vergleich zum Luftbild ist die Wirkung der abflussbedingten Bodenvariabilität auf den Pflanzenaufgang zu erkennen. Vor allem die hellen TWI-Trockenstellen (konvex-divergierende Formen) sind von einem niedrigen Feldaufgang geprägt. Auf dem Luftbild dominiert Boden (hell) gegenüber dem Pflanzenbestand. In den vom TWI als potenziell feuchter berechneten Bereichen ist eine höhere Biomassebildung zu einem frühen Zeitpunkt der Vegetationsperiode zu sehen, welche sich bis zum Sommer, auch auf Grund der Bewirtschaftung, nivelliert und in den Ertragskarten nicht mehr deutlich zu erkennen ist. Innerhalb der „Rinnen“ auf den Schlägen in Kassow und Beckum liegt die elektrische Leitfähigkeit um 8 - 18 mS/m niedriger als in unmittelbarer Nachbarschaft. Das Substrat ist dort tonärmer und sandreicher (Tab. 5-7). Die KAK ist signifikant niedriger als an den 20 - 30 m entfernten Randbereichen der Rinne. Auf dem Schlag Thülig in Beckum spiegelte sich die breite, sandige Abflussbahn auch im Ertrag wider. Abb. 5-16 zeigt die Auswirkung der konvergierenden Formen für den vergleichsweise kleinen Schlag Espenberg (GTW). Selbst Reliefformen, die nur nach wenigen Starkregen Wasser führen, üben im Lauf der Zeit über die allmähliche Veränderung der Substratzusammensetzung einen Einfluss auf das Standortpotenzial aus und sind ein Regler der Standortheterogenität. Der Reliefeinfluss zeigt sich im Substratmuster. Sinnvoll ist die Verknüpfung von EM38-Daten mit einem DGM in der Jungmoränenlandschaft, wo auf einem Schlag sowohl lehmige Kuppen (mit schütterem Bestand) als auch sandige Kuppen (mit gutem Feldaufgang auf dem sich schnell erwärmendem Boden, aber Gefahr der Vertrocknung im Sommer) vorkommen.

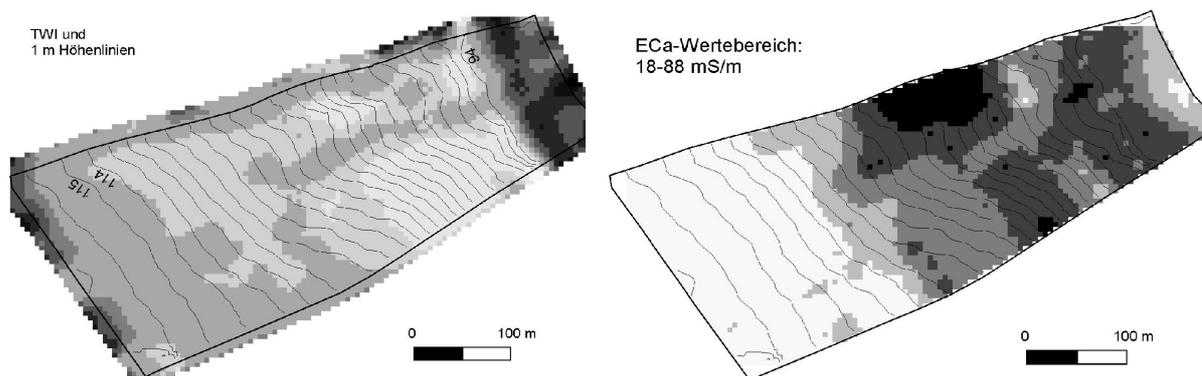


Abbildung 5-16: TWI und ECa-Karten für den Schlag Espenberg, Groß-Twülpstedt. Der Hang ist von Ost nach West abfallend (1 m Höhenlinien). Entlang der im Feld kaum erkennbaren Abflussbahn wurde ein hoher TWI berechnet, aber eine 8 - 12 mS/m niedrigere Leitfähigkeit orthogonal durch ein tonhaltigeres Band kartiert.

Eine Reliefanalyse alleine würde diese Effekte nicht differenzieren können. Aus den Ergebnissen muss gefolgert werden, dass ein hoher TWI nicht zwangsläufig für hohe Bodenfeuchte steht. Das Muster ist im Vergleich mit anderen flächenhaften Daten zu interpretieren, um die speziellen Prozesse auf dem individuellen Schlag zu verstehen. Für viele Fragestellungen

bleibt es unumgänglich, die Ergebnisse mit einer Bohrstockprobe zu überprüfen. Die Kombination mit dem EM38 zeigt an, wie stark lateraler und vertikaler Abfluss übereinstimmen und welche Abflussart den Wasserhaushalt eines Schlags dominiert.

Bodenkundliche Untersuchung der Rinne auf Schlag 106

Die Leitfähigkeitsunterschiede von 8 - 18 mS/m zwischen Rinnen und der Umgebung, die in Kassow, Beckum und GTW auftraten, wurden am Beispiel der Rinne von Abb. 5-17 bodenphysikalisch untersucht. Die niedrigsten ECa-Werte liegen in den Flachbereichen der Rinne, wo Deposition überwiegt. Trotzdem sind die Auswaschungseffekte durch die episodischen Wasserflüsse als geringere Tongehalte im Vergleich zur Umgebung sichtbar (Tab. 5-7). Dies ist im Unterlauf der Rinne stärker ausgeprägt und auch in 0,5 m Tiefe zu finden. Der Unterschied im Gesamtanteil an bindigem Material ist nicht mehr so deutlich, folglich auch nicht die Benennung der Bodenarten nach KA4. Die ECa-Differenzen sind also vor allem auf die Auswaschung kleinster Bestandteile zurückzuführen. Diese beeinflussen ebenfalls die KAK, die in den Rinnen deutlich niedriger ist als die Umgebung. Weiterhin ist der Humusgehalt in der Rinne geringfügig niedriger, ebenso die Trockenrohdichte. Beide Parameter wirken gleichsinnig wie der Tongehalt auf das ECa-Signal. Der pH-Wert in der Rinne ist geringfügig niedriger, der Karbonatgehalt schwankt eher zufällig und ist auf Grund des geringen Probenumfanges nicht weiter auswertbar. Die gemessene Bodenfeuchte entsprach zum Beprobungszeitpunkt vorwiegend dem aus der Textur zu erwartenden Niveau. Die hydraulische Leitfähigkeit in der Rinne (k_f) ist deutlich höher, was auf die geringere Trockenrohdichte und den geringeren Tonanteil zurückgeführt werden kann. In diesem lockerer gelagerten Rinnenbereich ist eine stärkere Infiltration zu erwarten und somit in Trockenperioden trotz erhöhtem Zuflusspotenzial eine geringere Bodenfeuchte. Zudem wurde bei Bohrstock-Sondierungen ab 0,80 m Tiefe ein eingeschwemmter Feinsandhorizont kartiert. Dieser deutet auf eine stärkere Erosion während der Landschaftsentwicklung hin, die Feinsand bis in die Rinne transportiert hat. Dieser wurde durch aktuelle und rezente Erosion mit lehmigen Sand flächig überdeckt, während im Oberboden kaum Körnungsunterschiede zu finden sind. Gleiches gilt für den welligen Bereich von Schlag 111, wo die tiefer gelegenen Bereiche Bänder niedrigeren ECa-Wertes anzeigen, in deren Zentrum eine TWI-Abflussbahn liegt. Das Ertragsmuster (Abb. 5-17) ist stark auf die fahrspurabhängigen Probleme der Messmethode zurückzuführen, weshalb die Aussage kritisch zu bewerten ist. Trotzdem fällt der niedrige Ertrag im Unterlauf der Rinne auf. Dort zeigte das Thermalbild Minimumtemperaturen auf Grund morgendlicher Kaltluftabflüssen, die ebenfalls nachteilig auf die Ertragsbildung wirken.

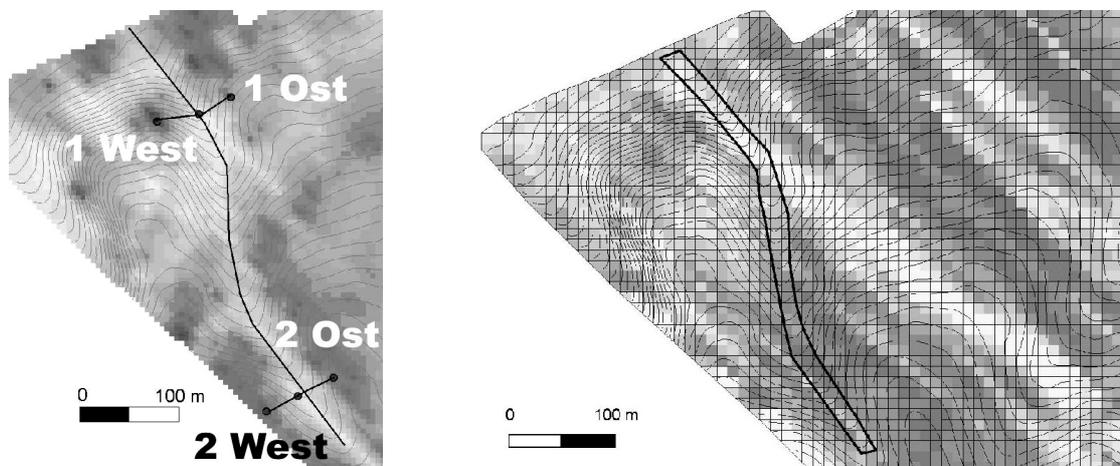


Abbildung 5-17: Rinne am Nordrand von Schlag 106 (Kassow). Links: ECa-Karte und Lage der Untersuchungspunkte. Der ECa-Wert steigt mit dem Grauwert. Die durchgezogene Linie zeigt den Rinneverlauf von Südost aus abfallend. Dünne Linien: 1 m Isolinien der Geländehöhe. Rechtes Bild: Verlauf der Rinne mit Ertragskarte (Winterweizen).

Tabelle 5-7: Bodenphysikalische Untersuchungen entlang der Rinne (Kassow, 106) in 0,1 bzw. 0,5 m Tiefe für das Zentrum der Rinne und die Randbereiche am Hang (Höhenunterschied ca. 2 m). Punkt 1: Unterlauf. Punkt 2: Oberlauf. Hangpunkte in jeweils ca. 30 m Entfernung vom Zentrum der Rinne. **S T+S:** Summe des Ton- und Schluffgehaltes. **ECa:** Integraler Werte über 1,5 m Tiefe. **K_f** als geometrisches Mittel von 2 mal 5 Stechzylindern. Wassermassegehalt *w* vom 19.3.2002.

| Standort | Ton- gehalt % | Σ T+S % | Bodenart (KA4) | Humus- gehalt % | Karbonat- gehalt % | pH- Wert | k _f -Wert cm/d | ρ _a g/cm ³ | KAK cmol/ kg | ECa mS/m | w Masse- % |
|-------------------|---------------------|---------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|-------------|------------------------------|-------------------------------------|--------------------|-------------|------------------|
| 1 Rinne 10 | 4,9 | 30,5 | Su3 | 2,2 | 0,28 | 6,82 | 1,71 | 1,58 | 8,6 | - | 17,7 |
| 1 Hang West 10 | 13,9 | 58,0 | Slu | 3,0 | 0,46 | 6,91 | 0,07 | 1,67 | 16,6 | - | 19,8 |
| 1 Hang Ost 10 | 11,2 | 38,9 | Sl3 | 2,3 | 0,92 | 7,05 | 0,10 | 1,73 | 14,6 | - | 17,2 |
| 1 Rinne 50 | 4,3 | 26,8 | Su2 | 0,9 | 0,18 | 6,58 | 3,07 | 1,47 | 4,0 | 17,5 | 20,2 |
| 1 Hang West 50 | 13,9 | 97,9 | Ut3 | 1,6 | 15,21 | 7,16 | 0,20 | 1,41 | 11,9 | 36,3 | 27,0 |
| 1 Hang Ost 50 | 12 | 25,6 | Sl3 | 1,1 | 0,09 | 7,13 | 0,05 | 1,61 | 12,2 | 28,7 | 19,7 |
| 2 Rinne 10 | 9,4 | 36,9 | Sl3 | 0,9 | 0,23 | 6,20 | - | - | 9,6 | - | - |
| 2 Hang West 10 | 13,8 | 41,5 | Sl4 | 2,7 | 0,12 | 6,50 | - | - | 15,9 | - | - |
| 2 Hang Ost 10 | 13 | 39,6 | Sl4 | 2,3 | 0,46 | 7,18 | - | - | 15,2 | - | - |
| 2 Rinne 50 | 9,8 | 38,6 | Sl3 | 1,1 | 0,05 | 6,57 | - | - | 6,4 | 17,8 | - |
| 2 Hang West 50 | 17,7 | 44,2 | Ls4 | 1,6 | 0,12 | 6,60 | - | - | 15,6 | 32,6 | - |
| 2 Hang Ost 50 | 11,7 | 40,5 | Sl3 | 1,4 | 12,63 | 7,27 | - | - | 11,8 | 30,1 | - |

Für den Schlag Thülig (Beckum) war ein solcher auffächernder Rinnenbereich deutlich mit niedrigerem Ertrag korreliert. Auf dem stark kuppigten Schlag Alt-Grünholz (Thumby) waren durch den Vergleich ECa/TWI deutlich die tonreicheren Kuppen erkennbar. Die *preagro*-Hofbodenkarte zeigte mit Sl4 eine tonreichere Bodenart (KA4: 8 - 12 % Ton) als die abwärts weisenden, konvergierenden Formen am Hang (Su3; 0 - 8 % Ton). Am Hangfuß, wo der Materialtransport mit Wasser gebremst wird, herrschte Ls4 vor (17 - 25 % Ton).

Die Klassierung der Körnungsarten nach ihren Durchmessern entlang eines Sedimentfächers der welligen Grundmoräne zeigte auch Stüdemann (1998). Demnach steigt vor allem der Schluffgehalt, aber auch der Tongehalt, sehr stark entlang der Depositionsstrecke. Die Grobsandanteile gehen zuerst zurück, Feinsandanteil erreichen im Rücken des Sedimentfächers ihr Maximum.

Die teilschlagspezifische Bewirtschaftung dieser rinnenartigen Formen ist aus Sicht der Ressourcennutzung sinnvoll, lässt sich je nach dominierender Bearbeitungsrichtung allerdings wegen der teilweise zu langen Regelungszeiten der Bearbeitungsgeräte für solche kurzen Distanzen derzeit nicht immer vernünftig durchführen.

Innerhalb der Rinnen, die als Linien hoher TWI-Werte erkannt werden, zeigt der Boden der Theorie zufolge eine frühere Sättigung bei hoher Niederschlagsintensität und eine schnellere Generierung von Oberflächenabfluss. Der TWI gilt folglich für Schläge mit einem ausgeprägten Abflussmuster bei der Vorhersage des Bodenfeuchtemusters nur kurz nach einem Niederschlagsereignis. Bei Trockenheit kann sich die Wirkung auf den Pflanzenbestand umdrehen, da die Bodeneigenschaften in diesen Rinnen für den Pflanzenbestand im Laufe der Vegetationsperiode bei Wassermangel ungünstig werden. Aus diesem Grund wird vorgeschlagen, den Topographischen Wetness-Index in Topographischen Wasserabfluss-Index umbenennen, da die Rinnen auf Grund der Bodenveränderung häufig ein schlechteres Wasserhaltevermögen aufweisen.

Eine visuelle Interpretation von Höhenlinien und der ECa-Karte gibt auf diese Phänomene bereits Hinweise. Die lokale Statistik (Abb. 5-14) zeigt deutlich die Bereiche an, in denen ECa und TWI für eine größere Wahrscheinlichkeit höherer Bodenfeuchte im Vergleich zu

Nachbararealen stehen (positive Korrelation). Über die Klassenbildung lässt sich der Bereich zu einer standortangepassten Größe regeln.

Als dritte Variante der Kombination soll hier die gewichtete Multiplikation beider Datenebenen vorgestellt werden (Abb. 5-13; Abb. 5-18). Es wurden verschiedene Rasteroperationen getestet, um beide Datenebenen zu verschneiden. Da der ECa-Wertebereich wesentlich größer ist als die TWI-Spanne, variiert eine ungewichtete Multiplikation die ECa-Karte nur unwesentlich. Ist der Wasserhaushalt erfahrungsgemäß stärker vom Relief beeinflusst, sollte der TWI-Wertebereich gestreckt werden. Abb. 5-18 zeigt den Vergleich von ungewichteter Verschneidung und Verschneidung bei gleichem Wertebereich. Dazu wurde der Umfang des TWI-Histogramms von 7 - 18 auf 1 - 100 gestreckt. Typische Standorte in bewirtschaftbarer Größe lassen sich leichter abgrenzen.

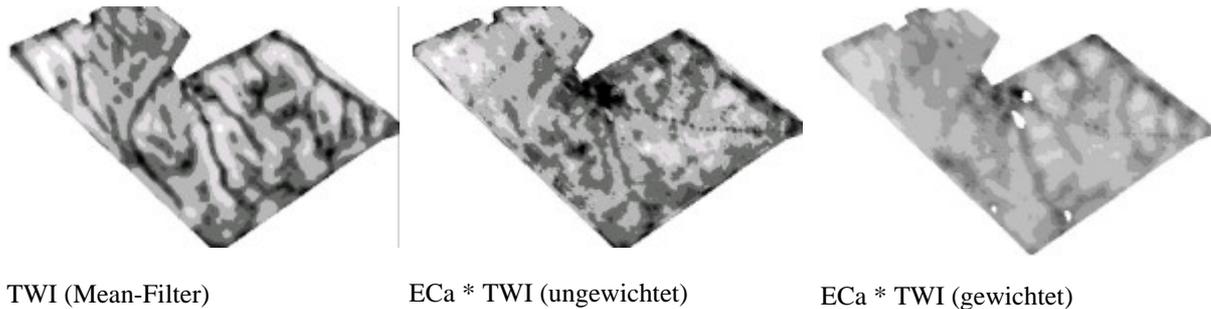


Abbildung 5-18: Verschneidung der ECa-Karte mit dem geglätteten TWI ohne bzw. mit Gewichtung.

Beide Datenebenen können gemeinsam während einer Überfahrt mit einem hochgenauen GPS erfasst werden und bieten eine komplexe Datengrundlage zur Beschreibung und zum Verständnis des Bodenwasserhaushaltes und oberflächennaher Transportprozesse.

5.4 Entwicklung des Analysemoduls „Topocrop“ für Precision Agriculture

Die Werkzeuge für die hier dargestellten Rasteroperationen wurden im Rahmen dieser Arbeit als selbst erstellte bzw. modifizierte AVENUE-Scripte in einer ArcView-Erweiterung (*topocrop.avx*) zusammengefasst. Ziel dieser Erweiterung ist, Standortpotenzialkarten aus den in *preagro* standardisierten Eingangsdaten einfach erzeugen und mit den Erkenntnissen dieser Arbeit bewerten zu können. Der Name „topocrop“ soll auf den topographischen Bezug des Pflanzenwachstums (Pflanze = engl. crop) hinweisen. Die Algorithmen des TWI, Stream-Power-Index und des Slope-Length-Factors (Moore und Wilson, 1992) wurden auf Grundlage der hydrologischen ArcView-Requests implementiert. Die Extension wurde den ArcView-Anwenderseiten¹ und der Web-Präsentation des Projektes frei zur Verfügung gestellt und kann dort mit unverschlüsseltem Code heruntergeladen werden. Zuvor war die Ableitung des TWI in keiner ArcView-Erweiterung verfügbar. Dies stellt die zentrale Funktion des neuen Tools dar (Abb. 5-19). Der TWI berechnet sich hierbei aus dem Logarithmus des Quotienten aus potenzieller Zuflussmenge (AVENUE request *flowaccumulation*) und der Geländeneigung (request *slope*). Eine Neuentwicklung stellt ein Glättungsparameter dar, der als Summand zur Zuflussmenge addiert werden kann. Somit kann gesteuert werden, ob Kammlinien im TWI-Modell (Zuflussmenge = Null) sichtbar sind. Ein hoher Summand sorgt für eine Mindestwassermenge in jeder Zelle und somit einer Nivellierung der Werte, z. B. für niederschlagsreiche Regionen. Für die untersuchten *preagro*-Schläge wurde ein Standardwert von 100 vorgeschlagen, den der Nutzer in einem Dialogfeld ändern kann. Visuell entspricht ein Glättungswert um 100 dem DEMON-Algorithmus, während bei einem Wert um 1 eine visuelle Ausgrenzung von Kammlinien/Wassereinzugsgebieten möglich wird.

¹ <http://arcscripts.esri.com>, search word “topocrop” bzw. <http://www.preagro.de>, Rubrik “Ergebnisse”.



Abbildung 5-19: Das Topocrop-Reliefmodul (für *preagro* entwickelte ArcView-Erweiterung).

Dies zeigt besser die Kompartimentierung der Landschaft, bleibt jedoch ohne Bedeutung für die Bodenfeuchtezonen. Um das starre Muster des zugrunde liegenden D8-Algorithmus zu verwischen, wurde für jedes TWI-Grid zusätzlich ein mittelwertgefiltertes Grid erstellt (Abb. 4-3). Die Funktion „Landform Elements“ startet eine dialoggeführte Ableitung der gefilterten Vertikal- und Tangentialkrümmung mit einer Einteilung in 9 Formelement-Klassen (Kap. 4.4.1). Die Funktion „RMSE for points“ erlaubt eine Berechnung des Root Mean Square Errors für ein DGM-Grid, für dessen Interpolation nur eine Teilmenge der Höhenmesspunkte verwendet wurde. Die nicht berücksichtigten Punkte müssen hierbei als Kontrollpunkte (Format: Shapefile) vorliegen.

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. Beide Indizes werden im Kap. 6.2 näher vorgestellt. Weiterhin umfasst das Modul ein Script zur Ableitung der lokalen Korrelationskoeffizienten (Local Correlation)¹, um die Untersuchung des Zusammenhanges von ECa und TWI zu vereinfachen (Abb. 5-14). Die gewichtete Verschneidung von ECa und TWI ist mit der Funktion „TWI Overlay“ möglich. Eine weitere Neuentwicklung stellt der Depositionsindex dar, welcher aus dem TWI mit der Funktion „Derive Slope“ berechnet wird. Dieser Index zeigt Bereiche an, wo sich das Abflussgeschehen ändert, so zum Beispiel Depositionsbereiche wie Hangfüße. Die physikalische Begründung folgt in Kap. 6.2.

Die Erweiterung wurde für den (kostenpflichtigen) ArcView-SpatialAnalyst entwickelt, da zahlreiche vordefinierte „Requests“ eine schnelle und effiziente Berechnung der Indizes auf Basis der Gridstruktur erlauben. Vor allem bei den Formelementen werden viele Rasterberechnungen lediglich als Zwischenergebnis durchgeführt und nach Erstellung des Ergebnis-Grids wieder gelöscht. Für ArcView-Nutzer, die nicht über den SpatialAnalyst verfügen, sind die Ergebnisse trotzdem als Bilddaten auf dem Schirm visualisierbar.

Nicht implementiert, aber im Bedarfsfalle mit den Standardoperationen leicht berechenbar, ist ein höhennormierter TWI. Es zeigte sich für die *preagro*-Schläge mit geringem Höhenunterschied (maximal 5 - 6 m, z. B. Feldscheide), dass eine höhere Übereinstimmung von TWI und anderen Beobachtungsdaten nach einer Division durch die vorher auf den Minimalwert 1 bezogene relative Geländehöhe zu erzielen ist. Dadurch werden die stark ausgeprägten Abflussbahnen in den „höheren“ Lagen, die im relativ flachen Gelände nur geringe Auswirkungen auf die Bodenfeuchteverteilung zeigen, nivelliert. Die typischen TWI-Muster bleiben somit nur in den Senkenbereichen erhalten, die höher gelegenen Flächen werden virtuell „ausgetrocknet“. Dies ist anzuraten, wenn gleich hohe Indexwerte z. B. auf Grund von Grundwassereinfluss in Teilen des Schlages den Wasserhaushalt dominiert. In Gelände mit abflusslosen Mulden werden diejenigen höher bewertet, die tiefer, d.h. grundwassernäher, liegen. Da dies nur eine sehr kleine Anzahl der Schläge betrifft, wurde die Idee nicht weiter ausgeführt.

¹ entwickelt und zur Verfügung gestellt von R. Gebbers, August 2002

5.5 Diskussion

Die in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse weisen auf die Bedeutung des Oberflächenabflusses bzw. des oberflächennahen Abflusses, dargestellt durch den aus dem DGM abgeleiteten TWI, für die räumliche Differenzierung der Bodenarten und Standortpotenziale hin. Die Höhe der Korrelationskoeffizienten für Reliefparameter, speziell den TWI, und Bodenfeuchtemessungen liegen teilweise im Bereich der Literaturangaben (z. B. Barling et al., 1994; Western et al., 1999; Herbst, 2001), für die intensiv untersuchten Schläge im Frühjahr darüber. Muster der Bodenheterogenität wurden am Beispiel der ECa-Karten durch reliefgesteuerte Wasserflüsse und dadurch verminderte Ton- und Organikgehalte erklärt. Diese Erkenntnis erweitert die bisherige Interpretation und Nutzung des TWI, die von einer Zunahme der potenziellen Bodenfeuchte mit dem Index-Wert ausging. Die gefundenen Heterogenitäten des Bodens beruhen offensichtlich auf einer Kombination der geringen, aber langfristig wirkenden lateralen Flüsse und den kurzzeitig wirkenden Oberflächen- und Zwischenabflüssen bei Starkniederschlägen. Die TWI-Abflussbahnen korrelieren sehr stark mit linearen Mustern niedriger elektrischer Leitfähigkeit und damit geringer Bodenfeuchte in Trockenperioden. Im Sommerhalbjahr ist wegen den hohen Gradienten des hydraulischen Potentials mit nur geringem lateralen Fluss zu rechnen. Während eines annähernd wassergesättigten Zustandes im Winterhalbjahr sind hohe oberflächennahe laterale Flussdichten zu erwarten, besonders bei hangparalleler Ausrichtung der Bodenhorizonte (z. B. Tigges, 2000), was für das TWI-Konzept eine Voraussetzung ist.

Flächenhafte Daten wie die ECa-Kartierung stellen dem Landwirt ein komplexes Muster zur Verfügung, der TWI hilft bei der Erklärung der zu Grunde liegenden Prozesse. Dazu ist es notwendig, die in Kap. 4.2 aufgeführten Randbedingungen und in Kap. 5.2 gefundenen Grenzen des TWI-Konzeptes und der ECa-Messung zu kennen, um Fehlinterpretationen zu vermeiden. Vor allem die Annahme einer homogenen Durchlässigkeit des Bodens ist eine in der Realität nicht vorkommende Vereinfachung. Herbst (2001) sieht bei den Durchlässigkeitsbeiwerten die Hauptvariabilität aller Abflussparameter für hydrologische Prozesse, was durch die Messungen in dieser Arbeit bestätigt wurde. Gerold und Cyffka (1998) zeigten, dass die Hälfte des Gebietsabflusses infiltriert, bevor der Vorfluter erreicht wird. Trotzdem zeigten sich auf den Untersuchungsschlägen erstaunliche Zusammenhänge zwischen dem TWI-Muster und anderen Datenebenen wie ECa und Luftbildern. Die zeitlich auf stärkere Niederschlagsereignisse und die nachfolgende Bodenwasserbewegung bei Sättigungsbedingungen begrenzte Wirksamkeit des Reliefs für das Abflussmuster reicht offensichtlich für die langfristige Veränderung bodenphysikalischer und -chemischer Parameter. Blöschl (1996) vermutete auf Basis von Bodenfeuchtemessungen, dass Gebiete zum einen eine organisierte Struktur zeigen, in Teilbereichen aber auch ein räumlich chaotisches Verhalten. Dies konnte für die Untersuchungsschläge bestätigt werden. Als strukturierte Schläge (siehe auch Woods und Sivapalan (1997) für eine Diskussion) werden diejenigen mit einem ausgeprägten episodischen Abflusssnetzwerk bezeichnet. Deren Abflussbahnen zeigten geringere Tongehalte und ein niedrigeres ECa-Signal. Bei diesen Schlägen ergibt sich eine „Verbundenheit“ (*engl. connectivity*), die sich nach Western et al. (2001) im Falle der Bodenfeuchte mit der Zeit ändert. Im Winterhalbjahr und nach stärkeren Niederschlägen ist eine hohe Verbundenheit der Abfluss generierenden, zuerst gesättigten Arealen mit einem Gebietsauslass zu erwarten. Dies führt zu einer schnelleren Abflussbildung, welche die Strukturierung der Schlagflächen weiter fördert und ausgeprägtere Bodenfeuchteunterschiede schafft. Grayson et al. (1997) teilten das Bodenfeuchtemuster in zwei feuchteabhängige Stadien ein, zwischen denen es im Sommer-/Winterhalbjahr wechselt („temporal switching“). Bei feuchten Bedingungen überwiegt der laterale Fluss, in Trockenperioden die lokale Kontrolle des Wasserhaushaltes durch Versickerung. Auch Wessolek et al. (1999) fanden nur im Winterhalbjahr räumliche Strukturen der Wassergehaltsänderung und schließen auf eine nichtlineare Zunahme des Reliefeinflusses mit

Hangneigung und verfügbarer Wassermenge. Während der Durchfeuchtung des Bodens fanden Wilson et al. (2002) eine starke Korrelation mit der Neigung, bei der Abtrocknung mit dem TWI. Die Bodenfeuchteuntersuchungen der vorliegenden Arbeit zeigen, dass im Frühling oberflächennah und im Frühsommer im unteren Bereich der durchwurzelten Tiefe des Bestandes ein guter Zusammenhang zwischen dem TWI-Muster und der tatsächlichen Bodenfeuchte besteht. Allerdings bestehen Unterschiede zwischen den als organisiert/strukturiert dargestellten Schlägen und kleinen Schlägen ohne ausgeprägtes Abflussmuster. Bei Sättigung des Bodens und 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, wie in Kap. 5.3 gezeigt, auch 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. Einen Problemfall bei der kombinierten Betrachtung mit dem EM38 stellen geschichtete Böden wie z. B. sandiger Lehm über Mittelsand dar, wo Bodenbeprobungen unbedingt berücksichtigt werden müssen. Grundsätzlich problematisch ist, dass zwei in sich komplexe Parameter miteinander verglichen werden, die auf den Schlägen unterschiedliche Beziehungen aufweisen. Das Bindeglied ist hierbei der Tongehalt, der das ECa-Signal stark beeinflusst, dessen räumliche Verteilung aber auch durch das Relief gesteuert wird. Siehe dazu z. B. Herbst (2001) mit einer Untersuchung zum Zusammenhang zwischen Fließlängen und Korngrößen. Der Grundsatz von Moore et al. (1991) „*relate pattern to process*“ zeigt sich hier in voller Bedeutung. Die nach dem TWI-Konzept als „feuchte Rinnen“ kartierten Bereiche bedürfen auf Grund der Ergebnisse 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 zeigt an, wie das potenzielle Verhältnis von lateralem und vertikalem Abfluss einzuschätzen ist und welches Abflussverhalten den Wasserhaushalt eines Schlages überwiegend beeinflusst. Als Hinweis dazu dient die bereits genannte Strukturiertheit der TWI-Karte, die möglichst über den Schlagrand hinaus das Einzugsgebiet betreffend bewertet werden sollte. Gibt es keine ausgeprägte Abflussstruktur auf dem Schlag, ist von einem geringeren Reliefeinfluss auszugehen. Voraussetzung für diese Annahmen ist jeweils ein DGM nach vergleichbaren Qualitätskriterien (Kap. 6.1). Bei dem Versuch der Validierung der Vorhersagen trat das Problem in den Vordergrund, dass die Punktmessungen wegen ihres kleinen Messvolumens bei großer Mikrovarianz nur bedingt mit flächigen Prognosen vergleichbar sind (Blöschl, 1996; Herbst, 2001), folglich die Prozesse einer anderen Skale beschreiben. Auf gleicher Skale lassen sich zum Vergleich jedoch bodenzeichnende Luftbilder und die ECa-Karte einsetzen, sowohl um gleichsinnig wirkende Prozesse (positive Korrelation) als auch gegensinnig wirkende Prozesse (z. B. Auswaschung von Feinbestandteilen durch Abflusskonzentration) in ihrer räumlichen Ausdehnung zu identifizieren. An dieser Stelle tritt auch die Frage nach dem zu verwendenden Abflussalgorithmus auf. Auf Grund der leichten Implementierung wurde im hier erstellten „Topocrop“-Modul für ArcView D8 verwendet. Dieser zeigt gegenüber dem aufwändigeren DEMON von TAPES Nachteile in Trockenbereichen (lineare Strukturen), ist aber nach einer Mittelwertfilterung als gleichwertig bei der Erkennung von Erosionsrinnen und Akkumulationsbereichen anzusehen. Auf Schlägen mit geringer Varianz der Vergleichsparameter sind in der Regel keine Zusammenhänge zu finden. Dort ist allerdings auch selten eine Teilflächenbewirtschaftung sinnvoll. Die hier untersuchte Skale mit einer Auflösung der Reliefdaten von 2 - 10 m ist noch nicht lange verfügbar. Gerade in dieser Skale liegen jedoch viele hydrologisch wirksame Formelemente.

6 Integration der Reliefanalyse in landwirtschaftliche Entscheidungen

6.1 Anforderungen an die Datenqualität

Das Anforderungsprofil für Digitale Geländemodelle im Bereich Precision Agriculture umfasst auf Grundlage der in Kapitel 4 diskutierten Aspekte der Abflussmodellierung und der landtechnischen Randbedingungen folgende Kriterien zur Qualitätskontrolle:

- Oberflächengenauigkeit $\pm 0,1$ m,
- Rasterweite 2 - 10 m je Landschaftstyp,
- möglichst geringe Krümmungen/Unstetigkeiten (für eine durchgängige Abflussmodellierung),
- Metainformationen (Erfassungsdatum und -verfahren, Datenbearbeitung/Filterung, Interpolationsverfahren und -parameter, Rasterweite, Hillshade-Abbildung).

Die Flächengrößen von 6 - 180 ha sind bei der geforderten Auflösung aus wirtschaftlicher Sicht zu groß für eine klassische terrestrische Vermessung, aber zu klein bei der üblichen Auflösung und Abgabegröße der Landesvermessungs-DGM. Zudem kann in bewegtem Gelände eine Vermessung über den Schlagrand hinaus bis zur Einzugsgebietsgrenze erforderlich werden. Die Besonderheit bei der Datenerfassung mit GPS ist die Beschränkung der Befahrung auf die für eine Interpolation ungünstige Fahrgassengeometrie mit Fahrspurabständen bis 24 m. Die Befahrung ist bei hohem Bestand oder bei gesättigtem Boden nicht möglich.

Die Rasterweite ergibt sich aus den in Kap. 4 und 5 präsentierten Untersuchungen. Eine Abschätzung zur Wahl der Gitterweite nach Kraus (2000) führte bei bewegtem Relief mit einem Krümmungsradius von $r = 200$ m zu einer größeren Auflösung, die hier nur in Ausnahmefällen für die Modellierung geeignet ist:

$$\Delta T < \sqrt{(8 dS_{\max} / |S''_{\max}|)} = 12,5 \text{ m} \quad (6-1)$$

mit

$$dS_{\max} = \text{tolerierbarer Höhenfehler} (< \text{Höhenmessgenauigkeit der Ausgangsdaten}),$$

$$s''_{\max} = \text{repräsentativer Krümmungswert der Untersuchungsfläche.}$$

Ziel dieser hohen Anforderung ist es, eine hydrologisch kontinuierliche Oberfläche zu erhalten. Die Messung muss genauer sein als die Höhenvariation benachbarter Rasterzellen. 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 die hohe Präzision von wenigen Zentimetern, vor allem in flachen Bereichen. In Steillagen ist eine geringere Genauigkeit tolerierbar. Ein Problem bei der Erstellung der Höhenmodelle bereiten ebene Bereiche, z. B. Wasserflächen/Ackersölle. Diese sollten als Aussperrungsfläche behandelt werden, um ihnen nach der Interpolation einen einheitlichen Höhenwert zuzuweisen. Grenzdörffer (2002) sieht für langfristige Standortinformation eine Rasterweite von 10 - 30 m als ausreichend an. Diese darf allerdings erst nach der Modellierung/Berechnung der Ableitungen realisiert werden. Eine geringere räumliche Auflösung führt zu geringeren Neigungswerten und folglich zu höheren TWI-Werten.

Eine Hillshade-Abbildung (z. B. Abb. 3-11) erlaubt eine schnelle visuelle Kontrolle der Oberflächengüte. Sind Artefakte, wie die Fahrgassengeometrie, darin zu erkennen, ist das DGM für Bodenfeuchteschätzungen abzulehnen bzw. weiter zu glätten. Die Glättung ist zulässig, da bei der Modellierung nicht die exakte Oberfläche mit oder ohne Rauigkeit, sondern der durchflossene Bodenbereich bis in 0,3 - 0,6 m Tiefe entscheidend für das Bodenfeuchtemuster ist. Dieses wird bei einer „glatten“ Oberfläche besser durch die Abflussalgorithmen repräsentiert. Der Zeitpunkt der Erfassung ist anzugeben, um Unstimmigkeiten auf eventuell durchgeführte

Erdbewegungen zurückführen zu können oder Artefakte zu erklären (z. B. durch die Vegetationshöhe beim Laserscanning).

Zur Vergleichbarkeit von DGM-Ableitungen aus unterschiedlichen Quellen können absolute Werte nicht verwendet werden. Auch Muster von Laserscanning-DGMs können wegen der unterschiedlichen Erfassungsskale nicht direkt mit fahrgassenbasierten RTK-GPS-Modellen verglichen werden. Bei einer Aggregation der detailreichen Laserdaten findet ein räumlicher Skalenwechsel statt, wie Blöschl (1996) ihn für Messdaten beschreibt. Dies führt zu einer stetigen Zunahme der Unsicherheiten, wie Krause (2002) an DGMs gleicher Rasterweiten wie in dieser Arbeit zeigt, vor allem bei entscheidenden niedrigen Aggregationsschritten. Je nach Vorfilterung der Daten ist dies notwendig, um die hydrologisch wichtigen Formen mit einer kontinuierlichen Oberfläche zu erhalten und auch bei den Ableitungen wie dem TWI korrekt zu behandeln. Für 2 m Raster-DGM aus Laserscanner-Vermessungen zeigte sich eine Glättung im Gegensatz zur Aggregation als unbedingt erforderlich, da bewirtschaftungsbedingte Details wie Fahrspuren im Pflanzenbestand sonst die Berechnung der Abflusspfade dominieren (Abb. 3-10; Abb. 3-17).

Die Landtechnik/Maschinensoftware erfordert nach Stand der Technik Applikationskarten entweder in Form von Polygonen mit den Applikationsmengen bzw. Zu- und Abschlägen durch Standortfaktoren wie das Relief oder Rasterkarten mit scharfen Übergängen der Wertebereiche zur Veränderung der Regler für Applikationsmengen. Die dazu notwendige Diskretisierung der TWI-Karten bzw. weiterer Standortpotenzialkarten sollte als letzter Schritt in der Datenverarbeitungskette durchgeführt werden.

6.2 Erkenntnisse bei der Anwendung des Reliefanalysemoduls „Topocrop“

6.2.1 Potenzialkarten für *preagro*-Module

Durch die Reliefanalyse der zahlreichen *preagro*-Untersuchungsschläge mit dem hier entwickelten Werkzeug „Topocrop“ wurden eine Reihe an Erkenntnissen für Entscheidungen in PA gewonnen. Die aus dem DGM abgeleiteten Standortpotenzialkarten dienen der Entscheidungsfindung bei der Maßnahmenplanung. Das Ziel ist die optimale Ausnutzung des Ertragspotenzials eines Schläges. Ertragsbestimmende Faktoren sind nach Pennock et. al (2001) die Standorteigenschaften, stochastische Faktoren (Witterung), die Bewirtschaftung sowie dynamische Faktoren (z. B. Bodenfeuchte), die statisch zum Zeitpunkt der Aussaat eingeschätzt werden können. Während eine Ertragsmaximierung sich in der Regel über eine Erhöhung der Stickstoffdüngung (N-Düngung) erzielen lässt, steht hierbei ein Ertragsziel im Vordergrund, das den Einsatz an Stickstoff auf Basis der berechneten Zufluss-/Abflusspotenziale minimiert. Die TWI-Karten und Verschneidungskarten sind hierbei keinesfalls Potenzialkarten, nach denen direkt gedüngt oder gesät werden kann, helfen aber bei der Entscheidungsfindung, an welchem Ort Zu- bzw. Abschläge zu den Applikationskarten gesetzt werden sollten. Die Ausgabe erfolgt als „floating grid“, also in Form eines Rasters mit quasikontinuierlichen Übergängen der Wertebereiche im Gegensatz zum im PA verbreiteten Konzept mit diskreten Flächen unterschiedlicher Werte. Eine Raster-Vektor-Konvertierung erfolgte zur Integration der Reliefinformation in die *preagro*-Module. Zukünftig bietet sich jedoch ein Verbleib in der Rasterwelt auch für die Maschinensteuerung an. Den jeweiligen Modulerstellern wurden Polygone der TWI-Extrembereiche zur Verfügung gestellt (Abb. 5-8). Auf Grund der Histogramm-Verteilung und den Vergleichen mit Luftbild-Mustern wurden Faustzahlen für die Abgrenzung der Polygone aus 23 untersuchten Schlägen für den Mean-gefilterten TWI ermittelt. Als Trocken-Extrem werden die unteren 20 % (± 5), zur Erkennung der „Rinnen“ die oberen 30 % (± 5) der Werteskala vorgeschlagen. Bei der Interpretation der Rinnen sind die Aussagen von Kap. 4.5 und Kap. 5.3 zu berücksichtigen. Vorteilhaft ist die Prüfung durch eine lokale Korrelation mit einer ECa-Karte. Ein deutlich positiver Korrelationskoeffizient

steht dabei für Feuchtbereiche, ein negativer für tonarme Erosionsrinnen. Abflusslose Senken, die allerdings fast nur im Jungmoränengebiet zu finden waren, können mit dem Fill-Algorithmus identifiziert werden. Dazu muss das Original-DGM vom aufgefüllten DGM subtrahiert werden. Eine Abfrage identifiziert die Senkenbereiche einer bestimmten Auffüllungstiefe. Aus den Untersuchungen mit den *preagro*-Schlägen wird die dreifache Standardabweichung der Höhenmessgenauigkeit vorgeschlagen (= 0,3 m). Das entstehende binäre Raster kann in Polygone der Information „Senke“ bzw. „keine Senke“ konvertiert werden. Um sowohl bei den TWI-Polygonen als auch den Senken mit den Landmaschinen auf die Areale reagieren zu können, sollte eine Mindestflächengröße gewählt werden. Für *preagro* wurden 400 m² als Grenze gewählt, unter der Annahme, dass eine Landmaschine mit der Arbeitsbreite 18 - 24 m einen Regelungsweg bis zu 10 m braucht.

Bei der Planung der Bodenbearbeitungstiefe in *preagro* zeigen die TWI-Extrempolygone Bereiche an, die durch eine tiefere Bearbeitung strukturell gefördert werden können. Sommer und Voßhenrich (2002) gehen bei der Anwendung davon aus, dass die Sauerstoffarmut der Vernässungszonen und die schlechte Struktur der humusarmen, trockenen Hangbereiche durch eine tiefe Bearbeitung (0,2 - 0,25 m) vermindert wird und den Pflanzen ein besseres Wachstum ermöglicht. Auf der überwiegenden Schlagfläche reicht dagegen eine flache Bearbeitung, die Arbeitszeit spart und nur die halbe Treibstoffmenge benötigt (Sommer und Voßhenrich, 2002). Der im *preagro*-Modul verwendete Algorithmus erkennt die TWI-Extrempolygone „Trocken“, „Rinne“ und „Senke“ als Fläche mit der Information „tief vorlockern“. Die Aussaatkarten stellen die strategische Planung des Bestandes dar. Im Vordergrund steht eine optimale Pflanzenanzahl in Bezug auf Ertragsziel, Anbausystem, Standortwasserdargebot u.a. Wegen technischer Restriktionen berücksichtigten Roth und Kühn (2002) Saatmengenunterschiede für *preagro* erst ab 10 Dezitonnen erwarteten Ertragsunterschiedes. Der Beitrag des TWI bezieht sich auf die Einschätzung des Bodenwassergehaltes zum Zeitpunkt der Keimung. Negativ wirken die Austrocknung des Bodens (TWI-Trocken-Polygone) sowie Verschlammung und Staunässe in den abflusslosen Senken. Bei erwartetem Wassermangel im Sommer sollten die Bestände nicht zu dicht geplant werden. Beim Pflanzenaufgang steht die maximale Pflanzenanzahl fest, deren Wachstum im Folgenden über die Düngergaben gesteuert werden kann. Die Berücksichtigung der Reliefinformation im *preagro*-Modul erfolgte durch Roth und Kühn (2002) in Form von TWI-Polygonen als Shape-Datei oder als Digitalisierung durch den Bearbeiter am Bildschirm. Die erwarteten Auswirkungen auf das Ertragsziel sind nach „Expertenschätzung“ (Kühn, pers. Mitt.) bei den Trocken-Polygonen -20 % bis -50 % (relative Humusarmut, Wassermangel), bei den Rinnen +10 % (Zuschusswasser mit Nährstoffzufuhr, kein Wasserstau) und -20 % in den abflusslosen Senken (schädlicher Stauwassereinfluss überwiegt positive Effekte der Nährstoffzufuhr). Insbesondere die Behandlung der Rinnen sollte wieder in Bezug auf die Richtung der Korrelation mit den ECa-Karten überprüft werden. Bei negativem Korrelationskoeffizienten ist die Gefahr lokalen Wassermangels auf Grund des geringeren Ton- und Schluffgehaltes mit einzubeziehen („erodierte Rinnen“). Die N-Düngung dient der operativen Entscheidung im Rahmen der Bestandesführung je nach Verlauf der Witterung während der Vegetationsperiode (Wenkel et al., 2002). Stickstoff ist ein Makronährstoff mit großer Wirkung auf Quantität und Qualität des Ertrages. Die räumliche Verteilung ist auf Grund von Verlagerungsprozessen neben dem Schlagmanagement auch vom Relief beeinflusst. Die Stickstoffdynamik hängt mit dem Bodenwasserhaushalt zusammen. In sauerstoffarmen, vernässten Böden besteht die Gefahr der Denitrifizierung. Umweltrelevanz besitzt die Düngermenge wegen der Auswaschungsgefahr in Vorfluter, wo hohe Stickstoffmengen zu Eutrophierung führen. Wenkel et al. (2002) geben Beschränkungen für die TWI-Extrempolygone bei der ersten Gabe (Angleichung der Bestände) und Abschläge bei der zweiten und eventuellen dritten Gabe an. Dies begründet sich auf der Trockenheit der Areale mit niedrigem TWI und der lateralen Zufuhr in den konvergierenden Bereichen.

Eine topographisch bedingte Ausweisung von sogenannten „Management Units“ beschreiben bereits Beckie et al. (1997). Dort lag in feuchten Jahren der Ertrag an den gleichen Reliefpositionen bei stärkerer Düngung höher, während in trockenen Jahren höhere Düngermengen keine Ertragssteigerung bewirkten. Da höhere Düngergaben an konvexen Positionen Mindererträge auf Grund des Wassermangels nicht ausgleichen, kann dort die Düngermenge reduziert werden. Bei geringer Wasserverfügbarkeit sind hohe Nährstoffmengen durch Pflanzen nicht aufnehmbar und werden ausgewaschen.

Bei der Grunddüngung bietet sich, insbesondere beim Phosphor, ein Abschlag bei Auswaschungsgefahr an (Wenkel et al., 2002). Dies betrifft z. B. die Rinnen, die durch den Stream-Power-Index (Kap. 6.2.2) deutlich werden.

6.2.2 Erosionsmuster

Mit zwei der in das Topocrop-Modul implementierten Funktionen sind aus dem DGM räumliche Muster der Erosionsgefährdung erkennbar. Nach § 17 Bundesbodenschutzgesetz sollen Bodenabträge durch Berücksichtigung der Hangneigung, Wasser- und Windverhältnisse vermieden werden. Der Stream-Power-Index stellt die Abtragsgefahr auf Grund der Wassererschleppkraft dar, welche ein ähnliches Bild wie der TWI ergibt. Hierbei wird die Beschleunigung des abfließenden Wassers nach Gallant und Wilson (2000) dadurch berücksichtigt, dass im Gegensatz zum TWI die Neigung im Zähler steht. Der Length-Slope-Faktor (Moore und Wilson, 1992) dagegen wurde auf empirischer Grundlage entwickelt und kann als Hanglängenfaktor für die Allgemeine Bodenabtragsgleichung (ABAG) dienen. An dieser Stelle soll kein weiteres Werkzeug zur Erosionsmodellierung erstellt werden, sondern der Reliefbeitrag zum Erosionspotenzial als aus dem DGM ableitbarer Index dem Landwirt/Dienstleister zur Verfügung gestellt werden, um die räumlichen Schwerpunkte der Erosionsgefahr auf einem Schlag zu identifizieren. Maßnahmen zur Erosionsminderung können damit räumlich gezielt durchgeführt werden. Für Hintergründe zur Erosion, auch im Zusammenhang mit Reliefeinflüssen, sei auf die zahlreiche Fachliteratur verwiesen (z. B. Auerswald, 1993; von Werner, 1995; Kastell und Stüdemann, 1995; Penning de Vries et al., 1998; Morgan, 1999; Römken et al., 2002).

Die beiden hier vorgestellten Indizes zeigen das räumliche Muster des Bodenabtrags durch abfließendes Niederschlags- und Schmelzwasser. Erosion durch Wind wird nicht betrachtet. Als Standardmethode bei der Erosionsprognose gilt seit zwei Jahrzehnten die Universal Soil Loss Equation (USLE) von Wischmeier und Smith (1978) bzw. die Revised USLE (RUSLE) und die von Schwertmann et al. (1987) an bayerische Verhältnisse angepasste ABAG, welche den langjährigen mittleren Bodenabtrag (ohne Depositionseffekte/Massenbilanz) beschreibt als

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (6-2)$$

mit

R = Regenerositätsfaktor (Aggregatzerstörung durch Energie der Tropfen; für Kassow (240 mm Sommerniederschläge) = $32,5 \text{ kJm}^{-2} \text{ mm h}^{-1}$),

K = Bodenerodibilitätsfaktor bezogen auf einen 22,13 m langen Standardhang mit 5° Gefälle; Summenparameter für Infiltration, Wasserkapazität, Dispergierung, Aggregatstabilität, Verspritzneigung, Abrasionsneigung, Transportfähigkeit, Körnung und Humusgehalt,

L*S = 1 für Standardbedingungen (22,13 m Hanglänge, 5° Neigung); „LS-Faktor“,

C = Bewirtschaftungs- und Fruchtfolgefaktor,

P = Schutzfaktor (P=1 bei Fehlen von erosionshemmenden Maßnahmen).

Der im Topocrop-Modul implementierte Length-Slope-Faktor entspricht dem LS-Faktor der RUSLE für die Abweichung des Abtrages vom Standardhang, beruht allerdings auf dem spe-

zifischen Einzugsgebiet A_s an Stelle der Hanglänge, um auch Konvergenz und Divergenz der Oberfläche zu berücksichtigen. Nach Moore und Wilson (1992) gilt die Form:

$$LS = (m+1) (A_s/22,13)^m (\sin \beta/0,0896)^n \quad (6-3)$$

mit

$m = 0,4$ und $n = 1,3$ als Faustwert für einen Hang <100 m und Neigung $<14^\circ$.

Die ABAG ist nur für Flächenerosion geeignet und berücksichtigt Starkregenereignisse unzureichend (Auerswald, 1993). Der Reliefeinfluss bei der flächenhaften Erosion sollte also durch den LS-Faktor widerspiegelt werden. Dessen Berücksichtigung lässt sich nach Moore und Wilson über einen größeren Exponenten m (bis $m = 0,9$) weiter stärken. Ein kleinerer Faktor stärkt den Neigungseinfluss und damit die Einschätzung der Rillenerosion.

Thiessenhusen (1999), der die ABAG in Kassow anwendete, betont, dass diese nur für Teilhänge mit positivem Abtrag sinnvoll ist und schätzte für den Schlag 104 einen mittleren Abtrag kleiner 1 t/ha, in Teilbereichen allerdings bis 7,2 t/ha. Mit dem in dieser Arbeit implementierten LS-Faktor wurde für den stärker geneigten Schlag 109 ein mittlerer Abtrag von 1,4 t/ha berechnet. In Abb. 6-1 und Abb. 6-2 sind für den Schlag Kassow 109 die Ergebnisse des Topocrop-Moduls dargestellt.

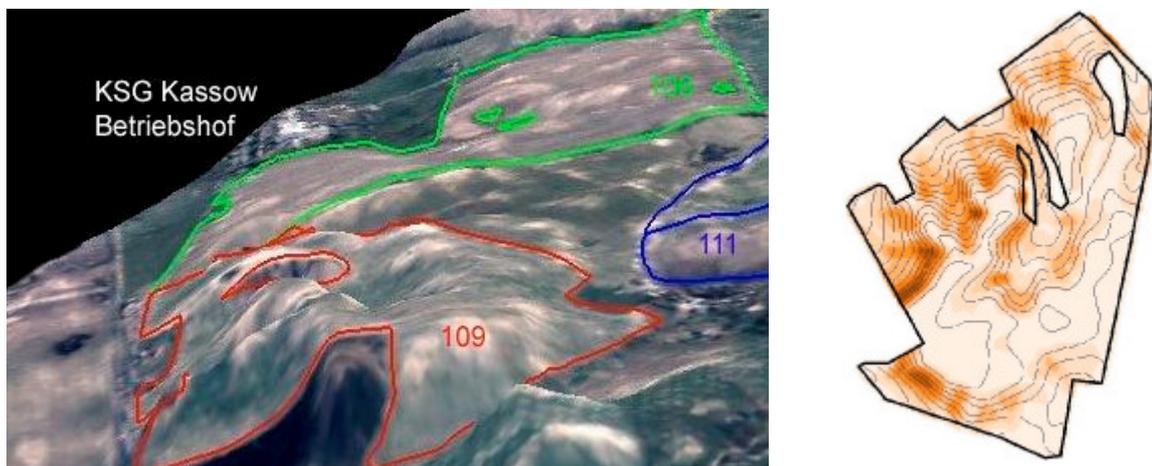


Abbildung 6-1: Luftbild mit erodierten Kuppen (hell) von Kassow 109, 8-fach überhöht, Blickrichtung Nordost. Rechts: Length-Slope-Faktor berechnet für Kassow 109. Ost-West-Ausdehnung (Bildbreite): 700 m. Das Erosionspotenzial steigt mit der Farbintensität.

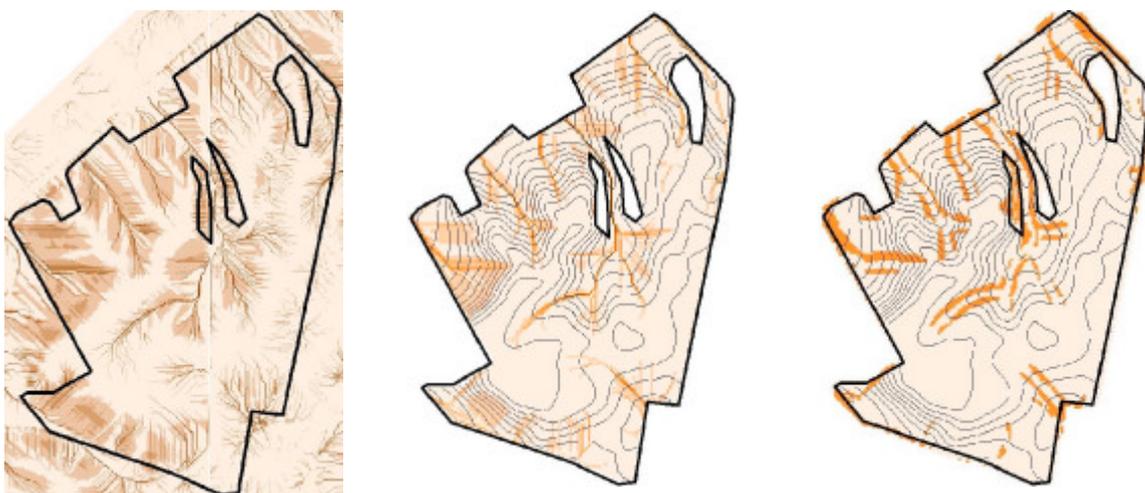


Abbildung 6-2: Vergleich der Muster des Topocrop-Moduls für Kassow 109, einem nach Nordwest abfallenden Hang (siehe Abb. 6-1), v.l.n.r., Stream-Power-Index SPI aus dem Laserscanning-DGM (2 m), SPI aus dem GPS-DGM (5 m) und „slope of SPI“ (GPS-DGM). Ost-West-Ausdehnung des Schlages (Bildbreite): 700 m. Isolinien: 2 m Höhenintervall, von 7 - 31 m HN. Der Wertebereich von LS- und GPS-DGM ist nicht vergleichbar.

Der LS-Faktor identifiziert Bereiche mit dem reliefbedingt höchsten Abtragspotenzial, welche auch auf den Luftbildern zu Beginn der Wachstumsphase deutlich an den Oberhängen als ungünstige Standorte für das Pflanzenwachstum zu erkennen sind. An den Hangfüßen wird ein geringes Erosionspotenzial angezeigt, Akkumulationseffekte können jedoch nicht modelliert werden. Hinweise auf den räumlichen Verlauf der Linien-/Rillenerosion gibt der Stream-Power-Index (Abb. 6-2). Dieser Index sollte für Starkregen mit kurzzeitiger Erosion beachtet werden. Ähnlich wie beim TWI (Abb. 4-9) kommt hier der Skaleneffekt der DGM-Erfassungsmethode zum Tragen. Beim SPI aus dem Laserscanning-DGM sind die Fahrspuren erkennbar. Die feinen Adern des kleinstrukturierten Abflussnetzwerkes richten sich bevorzugt nach den hangabwärts in Nordwestrichtung verlaufenden Fahrspuren und nur an stärker geneigten Südwesthängen orthogonal dazu (Abb. 6-2, linkes Bild). Die vorhergesagten Haupterosionsrinnen konnten in Kassow nachgewiesen werden, teilweise waren diese im Unterlauf von Kolluvien überdeckt. Zum Identifizieren der Akkumulationsbereiche wurde die „Slope“-Funktion erfolgreich auf den SPI angewendet (Abb. 6-2). Die Übergangsbereiche zwischen Abtrag und Auftrag ergeben sich dort durch die Änderung der Schleppkraft. Zu einem ähnlichen Bild führte die Ableitung der konkaven Formen der Vertikalwölbung nach starker Glättung. Die gleichen Bereiche wurden auch mit dem vergleichsweise genutzten TAPES-Modul EROS (Wilson und Gallant, 1996) ermittelt. Bei EROS werden Akkumulationsbereiche prozessbasiert über die Änderung des Abtragsrisikos (= SPI) entlang der Abflusslinie berechnet. Die gefundenen Muster stimmten weitgehend mit einer am Schlag 106 zusätzlich durchgeführten Erosionsmodellierung mit dem Programm EROSION 3D (von Werner, 1995) überein. Eine weitere Untersuchung betrachtete die Fahrgassenanordnung. Für die Fahrgassenrichtung 2000/2001 sowie eine willkürlich orthogonal dazu gewählte Variante wurde der Flächenanteil der Hangneigung $>3^\circ$ abgegriffen. Dies erfolgte in ArcView über eine MapQuery (Rasterabfrage) der Exposition bei einer Richtungstoleranz von $\pm 10^\circ$ (Abb. 6-3). Bei der derzeitigen Fahrgassenanordnung sind 2,3 % der Schlagfläche in Fahrtrichtung stärker als 3° geneigt und liegen damit über einem üblichen Faustwert für Erosionsgefahr. Bei einer Fahrgassenanordnung 90° dazu trifft das Kriterium auf 4,9 % der Schlagfläche zu. Somit ist die derzeitige Richtung zu favorisieren. Diese Untersuchung kann ein Dienstleister auf Grundlage des Geländemodells für verschiedene betrieblich mögliche Fahrgassenrichtungen testen, um diejenige Variante mit der potenziell geringsten Erosionsgefahr zu empfehlen.

Der Einfluss der Erosionsfaktoren ändert sich mit dem Betrachtungsmaßstab. Für den Landschaftsmaßstab nennt Auerswald (1993) die Bodennutzung als entscheidend für die räumlichen Unterschiede der Erosion, für den Feldmaßstab die nFK und den Anteil der organischen Substanz des Bodens. Für die hier modellierte Schlagebene (5 m Grid) kann das Relief einen erheblichen Einfluss ausüben. Die Bodenfeuchte ist von Bedeutung, da auf gesättigten Böden zuerst Abfluss generiert wird. Auerswald (1993) zeigte, dass mit zunehmender Ausgangsbodenfeuchte die Abflüsse zunahm, nicht jedoch der Bodenabtrag. Böden mit hoher Anfangsfeuchte weisen eine größere Scherfestigkeit bei einsetzendem Regen als nicht vorbefeuchtete Böden auf. Zusätzlich mindert eine Wasserschicht Tropfenaufprall und Aggregatlösung. Huang et al. (2002) zeigen die enge Verbindung zwischen Bodenfeuchte und Erosionsprozessen an der Variabilität der Sedimentfracht bei topographisch unterschiedlichen Oberflächenmerkmalen, betrachten aber nur Reliefpositionen eines Hangprofils. Bei einem länger anhaltendem Regen entscheidet jedoch die Zuflussmenge über die Abtragskraft der sich ausbildenden Oberflächenabflüsse. Nur in diesem Fall ist das Abflussbild des Stream-Power-Index von Bedeutung. Das Mikrorelief erfährt in der aktuellen Erosionsforschung besondere Beachtung und wird als Schlüssel zur Erklärung von Prozessen wie Infiltration, Abflussbildung und Krustenbildung angesehen (Kirkby, 2001). Siehe dazu auch Helming et al. (1993), die das Mikrorelief auf wenigen Quadratmetern bei einer DHM-Höhenauflösung von 0,2 mm und einer Rasterweite von 2 mm untersuchten.

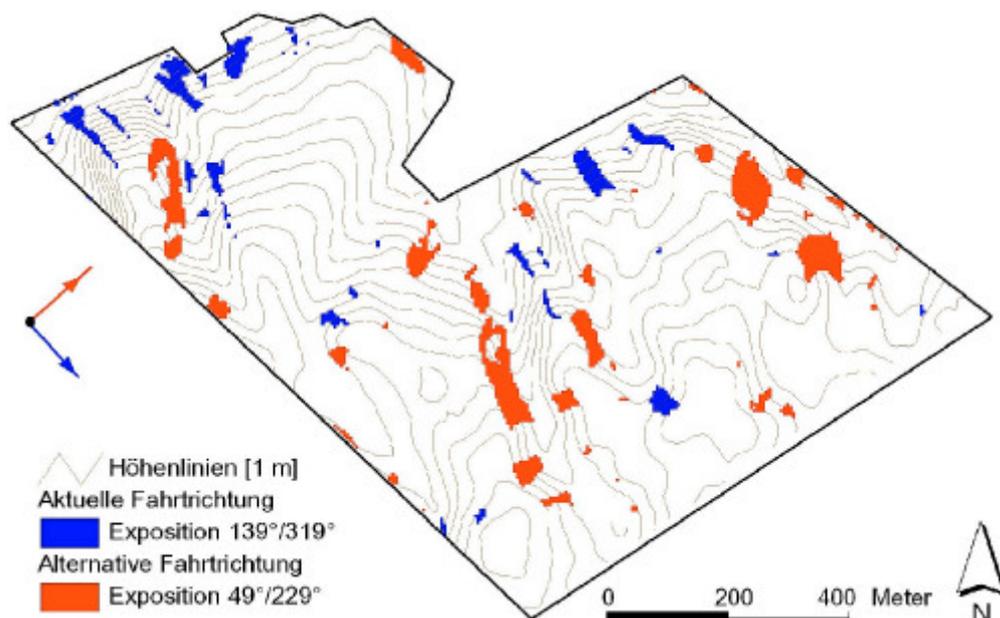


Abbildung 6-3: Berechnung der Schlagfläche $>3^\circ$ Neigung für vorgegebene Fahrgassenrichtung (Expositionstoleranz $\pm 10^\circ$). Schlag 106, Kassow.

Das Mikrorelief ist jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit und Untersuchungsskala, die nicht die Partikelablösung sondern nur den reliefbedingten Transport betrachtet.

Mit den hier vorgestellten Indizes soll die Variation der Erosionsgefährdung auf dem Schlag dargestellt werden, um anzuzeigen, wo Maßnahmen gezielt und somit kostengünstig ergriffen werden können. Auch findet dabei nur eine „on-site“-Betrachtung (Schäden auf dem Schlag) statt. Als Anregung für die Vermeidung von „off-site“-Schäden (durch Sedimentation bzw. Schadstoffeinträge) sei die gezielte Einrichtung von Pufferstreifen genannt, die nach Starkregen die Sedimentfracht mit Herbizid- und Düngerückständen vor Erreichen eines Vorfluters auffangen. Der TWI zeigt die Haupttransportwege und damit, wo ein kleinräumiger Pufferraum in Form einer Brache oder einer Buschgruppe sinnvoll ist. Von Bedeutung ist dieser Ansatz allerdings nur, wenn die Schlagfläche unmittelbar an einen Wasserlauf grenzt.

Erosionsschutzmaßnahmen können auch mit den *preagro*-Modulen umgesetzt werden, wenn der LS-Faktor bei den Applikationskarten berücksichtigt wird. Eine dichtere Aussaat und angepasste Bodenbearbeitung wirken erosionsmindernd. Bei der räumlichen Abgrenzung der Maßnahmen sind die Potenzialkarten in jedem Fall mit dem Erfahrungswissen des Landwirtes abzugleichen, da das Modell keine regionalen Besonderheiten berücksichtigen kann. Positive Rückmeldungen zu den räumlichen Abgrenzungen gab es im Rahmen dieser Arbeit von den Betriebsleitern aus Beckum und Kassow.

6.3 Ansätze für weitere Analysen

Mögliche Anwendungen der DGM-Analyse, die nicht in *preagro*-Module bzw. die Topocrop-Erweiterung integriert sind, werden im Folgenden diskutiert. Die Ansätze sollen Denkanstöße für weitere Einsatzfelder geben, aber auch vor einem unkritischen Umgang mit qualitativ nicht geeigneten Geodaten warnen, denn nicht alles, was im GIS berechenbar ist, hat Praxisrelevanz.

6.3.1 Mikroklimatische Anwendungen

Das Relief beeinflusst verschiedene mikroklimatische Prozesse, die teilweise bereits in Kap. 4.2.3 in Zusammenhang mit dem TAPES-Modul SRAD für reliefbedingte Einstrahlungsun-

terschiede vorgestellt wurden. Anhand von Luftbildern und dem DGM konnte Grendzörffer (2002) z. B. für südwestexponierte Lagen in Kassow einen früheren Blühbeginn beobachten. Einfache Multikriterienabfragen aus Exposition, Neigung und Vertikalkrümmung können Hinweise auf die räumlichen Schwerpunkte der Auswinterungsgefahr geben, was allerdings in der Landschaftsskala sinnvoller als auf der Schlagebene ist. Mangels Daten zur Validierung ist das folgende Verfahren nur als Denkansatz zu verstehen. Aus dem DGM werden dazu Oberhang- und Kuppenlagen in Hauptstreichrichtung kontinentaler Winde, die zu Wurzelabriss beim Auffrieren des Bodens bzw. Erfrierungen der Pflanzen führen können und südexponierte Hanglagen, an denen Vertrocknung bei Spätfrost auftritt, identifiziert. Letztere Gefahr besteht im Vorfrühling, wenn die Pflanzen bei hohem Sonnenstand an warmen Tagen bereits durch Transpiration Wasser abgeben, die Nachlieferung aus dem gefrorenen Boden jedoch noch nicht möglich ist. Die nötige Einstrahlung, die auf die Pflanze dazu einwirken muss, tritt bevorzugt an südexponierten Hängen auf. Sind in der Vergangenheit Schäden auf einer Fläche aufgetreten, kann das hier entwickelte Verfahren die Potenzialflächen im Vorfeld eingrenzen. Eine dichtere Aussaat an potenziell bedrohten Flächen kann die Schäden mindern (Baumann, 1961). Als Ergebnis wurden für die Projektschläge zwei Polygontypen abgeleitet („Frostwechsel“ und „Kältetod“).

Nach KA4 wurde als Kriterium für die kontinentalen Winde („Kältetod“) die „Schattseite“ gewählt, beginnend bei Nord = $0^\circ - 112,5^\circ$. Um diese Auswahl auf Oberhanglagen und Kuppen zu begrenzen, wurde nach Analyse mehrerer Schlagflächen die Vertikalwölbung mit dem Krümmungsradius 1000 m (Vertikalwölbung $< -0,1$) gewählt. Für den Frostwechselfall an südexponierten Hängen wurden folgende Grenzen gewählt: Exposition $157,5 < x < 247,5$ (stärkste Einstrahlung nach KA4) und Hangneigung $> 3^\circ$. Die Ausgabe als Polygone für Zuschläge bei der Berechnung der Aussaatkarten erfolgte nach einer Vektorisierung und anschließenden Elimination von Teilflächen unter der maschinell spezifisch bewirtschaftbaren Mindestgröße von 400 m². 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. Tab. 6-1 zeigt die Flächenanteile an sechs unterschiedlich reliefierten *preagro*-Schlägen für die beiden beschriebenen Verfahren im Vergleich zu Reliefkennwerten.

Tabelle 6-1: Potenzielle Auswinterungsschäden in Zusammenhang mit Reliefcharakteristika. Kältetod: Nordost-Exposition, konvexer Oberhang; Frostw.: Frostwechsel an Südhängen.

| Schlag, Betrieb | Fläche [ha] | Fläche Kältetod [%] | Fläche Frostw. [%] | Mittlere Neigung [°] | s (Neigung) | Spannweite Höhe [m] |
|-----------------------|-------------|---------------------|--------------------|----------------------|-------------|---------------------|
| Alt-Grünholz, Thumbby | 43 | 4,6 | 16,3 | 2,7 | 1,4 | 11,1 |
| 111, Kassow | 180 | 1,8 | 3,8 | 1,8 | 1,0 | 17,6 |
| Kiesberg, Wulfen | 24 | 2,0 | 0,0 | 1,5 | 0,6 | 16,4 |
| Bullenstall, Queis | 83 | 0,0 | 0,0 | 0,4 | 0,3 | 6,7 |
| Autobahn, Beckum | 21 | 0,8 | 0,0 | 1,0 | 0,3 | 15,8 |
| Oberlengharter Feld | 13 | 13,0 | 20,0 | 5,7 | 2,9 | 42,4 |

Regionen mit relativ flachen, langen Hängen weisen Risiken auf bis zu 100 % der Fläche auf. Für solche Strukturen ist das Verfahren nicht geeignet, da es dort nicht um eine räumliche Differenzierung geht, sondern eine einheitliche Bewirtschaftung das flächige Risiko mindern muss.

Eine weitere Anwendung stellt die Identifikation von Kaltluftflüssen dar. In Strahlungs Nächten kühlt über Ackerflächen und Wiesen die Luft stark ab und fließt bis in den Morgen hinein zäh bis tropfenförmig der Schwerkraft folgend bis in Senkenlagen. Dieses Phänomen sollte allerdings in Zusammenhang mit der Landnutzung eines Landschaftsausschnittes und auf einer höheren Raumscale betrachtet werden, z. B. mit einem regionalen DGM. Für die Schlagebene sind trotzdem bereits Abflussbahnen durch den TWI erkennbar, wie Vergleiche mit dem Thermalbild (Kap. 5.2.1) zeigten. Gebbers und Schmidt (1999) erklärten Kaltluftflüsse

aus zwei Geländeparametern (Höhe und Laplace-Operator) mit einem Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 51 \%$ für den Schlag 106 (Kassow). In den abflusslosen Senken sind Ertragseinbußen auf Grund der Ausbildung von Kaltluftseen im Frühjahr zu erwarten, konnten in dieser Arbeit aber wegen der geringen Größe der nach Kap. 5.2.2 ausgegrenzten Senken und der hohen Variabilität der Ertragskarten nicht nachgewiesen werden.

6.3.2 Naturschutz

Mit Hilfe des TWI oder Multikriterienabfragen aus Neigung und Exposition können Extremstandorte (z. B. südexponierte, trockene Oberhänge) aus dem DGM identifiziert werden. Diese wenig produktiven Standorte wären geeignet für eine Minimalbewirtschaftung zur Förderung kleiner Ackerwildkräuterpopulationen auf großen Schlägen. Dadurch können bei geringem Verlust an Fläche Betriebsmittel eingespart werden. Dies ist allerdings nur bei entsprechender Honorierung der Umweltleistung durch eine Neuorientierung der Subventionspolitik für Landwirte akzeptabel.

Plachter und Janssen (2002) fanden gute Übereinstimmungen zwischen den linienhaften Strukturen hoher TWI-Werte und den Wanderwegen von Amphibien auf den untersuchten Schlägen in Kassow. Amphibien hielten sich bei trockener Witterung bevorzugt an Stellen mit hohem TWI-Wert auf. Bei feuchter Witterung verschwammen die Unterschiede der Individuenzahlen bei hohen und niedrigen TWI-Werten. Bei hohem Amphibienaufkommen könnte eine Schutzmaßnahme eine kurzzeitige Anhebung des Schneidwerks entlang den TWI-Maxima sein, ebenso eine reduzierte Düngung in diesen Wanderkorridoren.

6.3.3 Oberflächenberechnung

Bei Flächenermittlungen mit GPS-Schlagumfahrungen (z. B. bei Subventionskontrollen) bzw. aus Katasterkarten erhält der Eigentümer die planimetrische Fläche. Diese unterschätzt die tatsächlich zu bestellende Fläche um den Faktor $1/\cos\beta$ (mit β = Geländeneigung). Mit Hilfe eines DGM kann die tatsächliche Oberfläche berechnet werden (Schmidt, 2001c). Diese wird in vielen Fällen um so größer, je höher die Auflösung des DGM und damit die Anpassung an das tatsächliche Gelände ist. Wie aus Tab. 6-2 ersichtlich, genügt die mittlere Neigung nicht für eine Abschätzung. Mit der Verfügbarkeit von DGMs in der Landwirtschaft ist die Berechnung der tatsächlichen Oberfläche als Nebenprodukt einer Geländemodellanalyse ohne großen Aufwand möglich, eine praktische Relevanz für die Landwirtschaft allerdings kaum zu sehen. Für rechtliche Zwecke (z. B. Beantragung von Subventionen) ist der Grundbucheintrag bindend. Sinnvolle Anwendungsmöglichkeiten ergäben sich aber z. B. in der Landschaftspflege, um den Aufwand bei der Handmäh von Steillagen bei der Beantragung von Fördermitteln zu verdeutlichen. Dieser Zweck alleine rechtfertigt aus ökonomischer Sicht jedoch nicht die Neuerfassung eines DGM und sollte nur berücksichtigt werden, wenn ein Laser-scanning-DGM der Landesvermessung verfügbar ist.

Tabelle 6-2: Unterschätzung von tatsächlich zu bewirtschafteten Flächengrößen durch planimetrische Flächenberechnung in Abhängigkeit der DGM-Auflösung.

| Schlag, Betrieb | Schlaggröße [ha] | Rasterweite[m] | Unterschätzung (%) | Min / Max. Neigung (°) | Mittl. Neigung (°) |
|----------------------------|------------------|----------------|--------------------|------------------------|--------------------|
| 111, Teilschl. 2+3, Kassow | 77,6 | 5 | 0,5 | 0..9.0 | 1,9 |
| 111, Teilschl. 2+3, Kassow | 77,6 | 10 | 0,3 | 0..5.4 | 1,6 |
| Espenberg, GTW | 9,9 | 5 | 0,4 | 0..9.0 | 2,8 |
| Espenberg, GTW | 9,9 | 50 | 0,5 | 0..3.7 | 2,1 |
| Alt-Grünholz, Thumby | 40,6 | 5 | 0,7 | 0..9.5 | 2,7 |
| Alt-Grünholz, Thumby | 40,6 | 50 | 0,2 | 0..3.6 | 2,4 |
| Lohzipfl, Essenbach | 6,4 | 5 | 0,9 | 0.5..12.3 | 6,2 |
| Lohzipfl, Essenbach | 6,4 | 50 | 0,7 | 4.1..7.9 | 6,8 |

6.3.4 Bildflugoptimierung

Bei zentralperspektivischen Luftbildern kommt es zu einer Lageverzeichnung auf Grund der variierenden Geländehöhe. Nur für den Nadirpunkt, der direkt unter dem Projektionszentrum liegt, ist keine Verzerrung zu erwarten. Schmidt und Irrgang (2000) entwickelten dazu ein Avenue-Script zur Abschätzung des reliefbedingten Versatzes auf Basis der *preagro*-DGMs nach den Schätzverfahren der Standardliteratur (z. B. Kraus, 1994; Lillesand und Kiefer, 2000). Dabei wird eine Bezugsebene durch den Nadirpunkt gelegt. Alle Bildpunkte darüber sind auf dem unbearbeiteten Luftbild mit Abstand und Höhe steigend radial nach außen verzerrt. Bei Bildpunkten unterhalb der Bezugsebene kommt es zu einer Verzerrung zum Bildmittelpunkt hin.

Aus der anzugebenden Flughöhe, Kantenlänge des Bildes auf dem Boden, Brennweite und Größe der Projektionsfläche wird nach Erzeugung einer Matrix auf Basis der DGM-Rasterzellen für jede Rasterzelle (hier auf Basis eines 50 m-DGM) der reliefbedingte Versatz berechnet (Abb. 6-4).

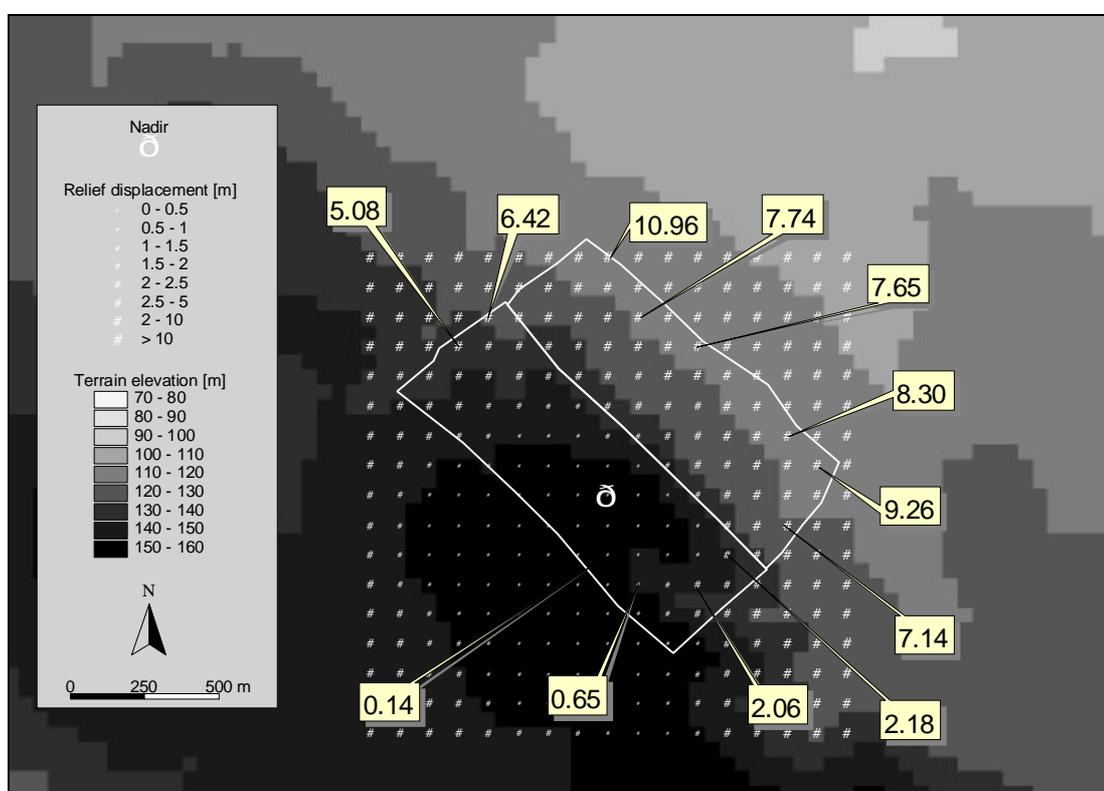


Abbildung 6-4: Simulierte Bildflugkampagne und geschätzte Verzerrung durch den Reliefeinfluss [m] für einen Ausschnitt des Projektbetriebes Groß-Twülpstedt (aus: Schmidt und Irrgang, 2000).

Für eine simulierte Bildflugkampagne mit der Bodenauflösung von 0,3 m ist in Abb. 6-4 der errechnete Lageversatz durch den Reliefeinfluss bei einem willkürlichen Nadirpunkt im westlichen Schlag dargestellt. Für den östlichen Schlag wurden dabei Verzerrungen bis zu 11 m berechnet. Eine Verschiebung des Nadirs kann mit dem von Schmidt und Irrgang (2000) entwickelten Avenue-Script simuliert werden, um die günstigste Flugroute und den optimalen Nadirpunkt zu finden. In diesem Fall reduzierte sich für den größten Teil der Schlagfläche der Lagefehler auf unter 1-2 Bildpunkte (= 0,3 - 0,6 m). Da trotzdem maximale Abweichungen von bis zu 7 m Lageversatz am Bildrand mit dem DGM berechnet wurden, wird für dieses Beispiel empfohlen, zwei überlappende Aufnahmen anzufertigen und im Anschluss zu mosaikieren bzw. Orthofotos herzustellen. Siehe dazu auch Grenzdörffer (2002).

6.4 Diskussion

Ansätze für vielfältige Anwendungen der DGM-Analyse, sowohl im Rahmen der Applikationskartenerstellung als auch bei der Planung von Erosionsschutz- und Naturschutzmaßnahmen sowie der Vorbereitung von Bildflugkampagnen wurden vorgestellt. Der Vorteil der Datenquelle „DGM“ liegt darin, dass ein kostengünstig erfassbarer, zeitlich stabiler Parameter für vielfältige Aufgaben genutzt werden kann. Es bestehen allerdings hohe Qualitätsanforderungen an die Geländemodelle, damit abflussbasierte Algorithmen für die Teilschlagbewirtschaftung verwertbare Ergebniskarten liefern. Die Qualität wird beeinflusst durch die Ausgangsdaten, die Rasterweite sowie das Interpolationsverfahren. Die räumliche Auflösung muss bei 2 - 5 m liegen, um eine hydrologisch kontinuierliche Oberfläche mit allen abflussrelevanten Reliefformen zu gewährleisten. Die Anwendungen sind im Hinblick auf ihren Nutzen mangels mehrjähriger, gezielt erfasster Bestandesdaten unter verschiedenen Witterungsbedingungen noch nicht validierbar. Ein Rückschluss auf einzelne Faktoren ist kaum möglich, da auf den Schlägen durch den Praxisansatz des Gesamtprojekts verschiedene Maßnahmen gleichzeitig und kombiniert liefen. Zudem sind Pflanzen exzellente Puffersysteme, die reliefbedingte Effekte je nach Witterungsverlauf ausgleichen können. Insgesamt zeigte der Witterungseinfluss auf die Ertragsbildung einen größeren Einfluss als die teilschlagspezifischen Arbeiten, die unter Berücksichtigung der hier erstellten Potenzialkarten durchgeführt wurden. Eine Aufschlüsselung auf einzelne Faktoren der Maßnahmen ist nicht möglich. Ein mehrjähriger Praxiseinsatz muss zeigen, inwieweit sich die in dieser Arbeit begründeten Ansätze in der Landwirtschaft durchsetzen. Zur Berücksichtigung der Reliefeffekte mit den hier entwickelten Methoden wird angeraten, ein Monitoring zur Erfolgskontrolle und Weiterentwicklung durchzuführen.

Mehrere Schlageigenschaften, die sich auf die Bestandesbildung auswirken, können durch das DGM nicht erklärt werden, wie z. B. ehemalige Wege, Mietenplätze und Fehler/Ungenauigkeiten bei der maschinellen Bearbeitung. In solchen Fällen sind die Potenzialkarten bei einer gemeinsamen Betrachtung mit Datenebenen wie ECa-Karten und Luftbildern sowie des Standort- und Bearbeitungswissen des Betriebsleiters zu bewerten und ggf. anzupassen.

Der TWI sowie weitere DGM-Ableitungen leisten bei fachkundiger Beratung einen Beitrag dazu, Phänomene, die der Landwirt oft aus Erfahrung kennt, mit konkretem Raumbezug zu bewirtschaften und im Laufe der Jahre iterativ zu einer besseren Nutzung der Ressource Boden zu kommen. Die Bedeutung der Bewirtschaftung in Abhängigkeit der (hier durch den TWI ermittelten) Bodenfeuchte zeigen Pennock et al. (2001), die eine hohe Bedeutung der Anfangsfeuchte für die Ertragsbildung feststellen. Bei höherer Feuchte kann mehr Stickstoff zum Wachstum dem Boden entzogen werden.

Die ökonomische Bedeutung der PA-Maßnahmen, bei denen die Reliefinformationen als einer von mehreren Faktoren eingingen, wurden durch Dabbert und Kilian (2002) untersucht. So wurden durch die Teilschlagmaßnahmen im Schnitt 20 kg Stickstoffdünger pro Hektar eingespart. Auf einzelne Schläge bezogen gab es Düng-Variationen von leicht gesteigerten Mengen bis zu 28 % Einsparung. Bereits bei den derzeitigen agrarpolitischen Rahmenbedingungen besteht bei den *preagro*-Schlägen somit ein Steigerungspotenzial des Deckungsbeitrages von durchschnittlich 25 €/ha durch die Einsparung von Stickstoffdünger. Bei einzelnen Schlägen mit geringem Variationskoeffizienten des Ertrages sinkt der Deckungsbeitrag jedoch. Wenn zukünftig Vorgaben von der Politik Subventionszahlungen stärker auf Umweltbelange ausrichten, dürfte die ökonomische Seite eindeutig für PA sprechen. Die Erstellung eines DGM erscheint zwar auf den ersten Blick teuer, die Höhendaten können im Rahmen einer Sensorüberfahrt oder Schlagvermessung jedoch als Nebenprodukt mit einem geringen Aufpreis erfasst werden. Für Schlagvermessungen sind durch die EU schlaggrößenabhängige Toleranzen von lediglich bis 2 % bei größeren Schlägen zugelassen, sodass der Einsatz hochgenauer DGPS-Empfänger anzuraten ist. Ein Dienstleister, der die DGM-Erfassung und A-

nalyse anbieten will, sollte über einen geodätischen Hintergrund verfügen und das RTK-GPS auch bei Vermessungsaufgaben in anderen Anwendungsfeldern einsetzen können, um die Gerätekosten zu amortisieren. Weiterhin sind die in dieser Arbeit präsentierten Grundlagen zur DGM-Qualität und den Zusammenhängen mit anderen PA-Daten unerlässliches Wissen. Möglichkeiten bei der Beratung den Reliefeinfluss dem Landwirt zu verdeutlichen, bieten visuelle Techniken im Rahmen einer 3-D-Szene, z. B. eine auf das Wireframe-DGM angepasste ECa-Karte oder Ertragskarte, die am Bildschirm von verschiedenen Blickpunkten aus betrachtet werden kann. Zusammenhänge werden intuitiv sichtbar, auch wenn keine hohen mathematischen Korrelationen bestehen und fördern die Akzeptanz der Methode. Stimmen „Muster“ und „Prozess“, also Felddaten wie ECa oder Ertragskarte und die Formen, die ein 3-D-Modell bzw. für geübte Betrachter auch das Höhenlinienbild gibt, nicht überein, ist nach möglichen bewirtschaftungsbedingten Ursachen zu suchen. An solchen Stellen ist eine gezielte Bodenbeprobung anzuraten, um die Ursachen zu ermitteln.

Die Reliefanalyse bietet gute Erkenntnisse über einen Schlag in Gebieten mit negativer klimatischer Wasserbilanz, da Wasser dort der limitierende Faktor ist. Weiterhin empfiehlt sich die DGM-Analyse auf Schlägen mit hohem Variationskoeffizienten des Ertragspotenzials.

Die aus dem DGM abgeleiteten Indizes wie der TWI geben dem Applikationsplaner eine im Gegensatz zu den Ertragskarten stabile Größe an flächendeckender Standortinformation. Modelle, die landschaftsökologische Prozesse beschreiben, haben im Vergleich zu dem DGM-Index-Ansatz den Nachteil eines umfangreichen Parameterbedarfes, der von einem Landwirt nicht aufzubringen ist.

7 Zusammenfassung und Ausblick

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 und dann meist nur im 10 m Raster als bester räumlicher Auflösung.

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 durchwurzelten 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 folglich 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 Abschlägen 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.

Auch zukünftig werden einfache Verfahren wie das TWI-Konzept trotz ihrer Mängel eine wichtige Eingangsgröße im Precision Agriculture bleiben, um die Reliefeinflüsse, vor allem den lateralen Wasser- und Stofftransport, zu berücksichtigen. Wendroth et al. (2000) beschreiben räumliche Ertragsverläufe auf Grund der schlechten Ergebnisse mit der klassischen Korrelationsanalyse mit dem „State-space“-Modell, das aus einem autoregressiven Modell mit Kalman-Filterung besteht. Hier besteht Forschungsbedarf, um auch dynamische Wirkungen des Reliefs statistisch zu ergründen. Intensive Untersuchungen im Vergleich mit Feldmessungen sind im Zusammenhang mit lateraler Herbizidausbreitung und Nährstofftransport anzustreben, um die Umweltwirkung von Precision Agriculture zu erhöhen. Derzeit sind zahlreiche Modelle auf den vertikalen Transport ins Grundwasser gerichtet. Die notwendige dreidimensionale Modellierung von Wasserflüssen unter Berücksichtigung der Bodenschichtung wird auch in Zukunft eine Domäne der Forschung bleiben, da vor allem der Eingangsdatenbedarf von Modellen bei gleichzeitig geringer Übertragbarkeit auf andere Randbedingungen enorm ist. Konzepte für ein 3-D-GIS präsentierte schon Raper (1993), Eingang fanden diese bisher jedoch noch nicht in die Standard-GIS. Ameskamp (1997) konzipierte ein Modell für dreidimensionale Bodenmodellierung. Landwirtschaftliche Anwendungen werden jedoch ohne einschneidende Änderungen bei der Agrar-Subventionspolitik im „low-cost“-Bereich bleiben. Das Problem bei der Computerisierung der Landwirtschaft ist mittlerweile nicht mehr die Rechenleistung, die auch an Bord der Landmaschinen bereits enorm gestiegen ist, sondern das fehlende Prozessverständnis bei den Wechselwirkungen zwischen Boden, Pflanze und Bewirtschaftung sowie die Kosten für die Erhebung von bodenphysikalischen Daten. Derzeit liefern pflanzenbauliche Modelle, wie z. B. CERES (für Anwendungen im Precision Agriculture siehe z. B. Bobert, 2003) eine gute zeitliche Auflösung, allerdings nur für konkret beprobte Punkte.

Eine weiterhin starke Entwicklung wird es bei der Sensortechnik geben, meist als Nebenprodukt von Entwicklungen in anderen Forschungsbereichen. Sensorüberfahrten mit selbstfahrenden, rund um die Uhr einsetzbaren, energiesparenden Minitraktoren werden eine kostengünstige Erfassung ermöglichen (Blackmore und Griepentrog, 2002) und die DGM-Erstellung in naher Zukunft zu einer Standardaufgabe werden lassen. Problematisch bleibt die Interpretation der zahlreichen Daten und die Entscheidungsfindung unter Berücksichtigung der aktuellen Witterung, die letztendlich der Landwirt zu verantworten hat, der deshalb immer einbezogen werden sollte.

Eine weitere Möglichkeit zum Einsatz der Reliefinformation besteht über die Echtzeitverknüpfung mit aktuellen Zustandsdaten des Pflanzenbestandes, wie sie z. B. der Hydro-N-Sensor (Wollring und Reusch, 1999) liefert. TWI-Karten als Grundlage könnten im Online-Verfahren mit aktueller Sensorik/Biomassedaten modifiziert werden. Doch auch für diese Verknüpfung aktueller Daten mit langfristigen Standortinformationen reicht die derzeitige Wissensbasis bei den ertragsbildenden Faktoren nicht aus. Ein methodisches Programm zur Validierung der Analyseansätze sollte auf einer Wirkungsanalyse einzelner Faktoren basieren und die Biomasseverteilung zu verschiedenen Zeitpunkten in Bezug zu Wasser- und Stickstoffverfügbarkeit setzen. Gerade beim Reliefeinfluss ist es wichtig zu wissen, wie die Position in unterschiedlichen Jahren, also bei unterschiedlichen Witterungsverhältnissen und räumlich nachvollziehbaren, unterschiedlichen und dokumentierten Düngergaben wirkt. Diese Wechselwirkungen gilt es zukünftig durch Felduntersuchungen zu quantifizieren und damit die Grundlagen für eine temporale Betrachtung der Reliefwirkungen zu schaffen.

8 Literaturverzeichnis

- AG BODENKUNDE (1994) [Hrsg.]**: Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Aufl. (KA4). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover.
- AKIN, H., SIEMES, H. (1988)**: Praktische Geostatistik. Eine Einführung für den Bergbau und die Geowissenschaften. Springer. Berlin, Heidelberg.
- AMESKAMP, M. (1997)**: Three-dimensional rule-based continuous soil modelling. Dissertation. Institut für Informatik und praktische Mathematik. Christian-Albrecht-Universität Kiel.
- AUERNHAMMER, H., ROTHMUND, M. (2002)**: Micro-precision-farming. In: Werner, A., Jarfe, A. [Hrsg.]: Precision Agriculture. Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis. KTBL-Sonderveröffentlichung 038. Darmstadt. S. 447-462.
- AUERSWALD, K. (1993)**: Bodeneigenschaften und Bodenerosion. Relief Boden Paläoklima, Band 8. Herausgegeben für die Kommission für Geomorphologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in München. Gebrüder Borntraeger. Berlin. 208 S.
- AUMANN, G. (1994)**: Aufbau qualitativ hochwertiger digitaler Geländemodelle aus Höhenlinien. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe C. Dissertationen. Heft 411. München.
- BARLING, R.D., MOORE, I.D., GRAYSON, R.B. (1994)**: A quasi-dynamic wetness index for characterizing the spatial distribution of zones of surface saturation and soil water content. In: Water Resources Research 30 (4). S. 1029-1044.
- BASSO, B., GALLANT, J.C., RITCHIE, J.T. (2000)**: Modeling surface and subsurface water flow in a spatially variable terrain. In: Precision Agriculture: Proc. 5th International Conf. Minneapolis, MN. 16-19 July 2000 ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI, USA.
- BASTIAN, O., SCHREIBER, K.-F. (1999) [Hrsg.]**: Analyse und ökologische Bewertung der Landschaft. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg, Berlin. 564 S.
- BAUER, J., ROHDENBURG, H., BORK, H.R. (1985)**: Ein digitales Reliefmodell als Voraussetzung für ein deterministisches Modell der Wasser- und Stoffflüsse. In: Landschaftsgenese und Landschaftsökologie. Heft 10. S. 1-15.
- BAUER, M. (1997)**: Vermessung und Ortung mit Satelliten. Wichmann. Heidelberg.
- BAUER, M. (2001)**: Aktueller Stand und Modernisierungskonzepte der Satellitennavigation. In: Resnik, B. [Hrsg.]: GPS - Grundlagen, Anwendungen und Produkte. Tagungsband zum 4. Rostocker GPS-Tag. Interner Bericht Nr. 14. Institut für Geodäsie und Geoinformatik. Universität Rostock. S. 5-16.
- BAUMANN, H. (1961)**: Witterungslehre für die Landwirtschaft. Parey. Berlin, Hamburg.
- BECKIE, H.J., MOULIN, A.P., PENNOCK, D.J. (1997)**: Strategies for variable rate nitrogen fertilization in hummocky terrain. In: Can. J. Soil Science 77. S. 589-595.
- BEUCHE, H., HELLEBRAND, H.J. (1999)**: DGPS-Stützung mit ortungsrelevanten Informationen aus der Feldbewirtschaftung. In: Zeitschrift für Agrarinformatik. S. 3-9.
- 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. (1999a)**: Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 1: Hardware, Software und Daten. Wichmann. Heidelberg. 454 S.
- BILL, R. (1999b)**: Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 2: Analysen, Anwendungen und neue Entwicklungen. Wichmann. Heidelberg. 475 S.
- BILL, R., TEICHERT, B., ZIMMERMANN, A. (2000)**: ATKIS – Eine Bestandsaufnahme. In: ATKIS - Stand und Fortführung. Schriftenreihe des DVW. Band 39. Wittwer. Stuttgart. S. 1-8.
- BILL, R., SCHMIDT, F. (2002)**: Relief. In: Werner, A., Jarfe, A. [Hrsg.]: Precision Agriculture. Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis. KTBL-Sonderveröffentlichung 038. Darmstadt. S. 65-76. <http://www.preagro.de>.

- BILLWITZ, K. (2000):** Geomorphologische Untersuchungen. In: Barsch, H., Billwitz, K., Bork, H.-R. [Hrsg.]: Arbeitsmethoden in Physiogeographie und Geoökologie. Klett-Perthes. Gotha, Stuttgart.
- BINLEY, A., BEVEN, K. (1992):** Three-dimensional modelling of hillslope hydrology. In: Hydrological Processes 6. S. 347-359.
- BISHOP, T., MCBRATNEY, A.B. (1999):** Interpolation Techniques for creating digital elevation models, Stafford, J (Ed.): Precision Agriculture'99. Proceedings of the 2nd European Conference on Precision Agriculture. Odense, Denmark. Sheffield Academic Press. Sheffield. S. 635-646.
- BLACKMORE, S., GRIEPENTROG, H.W. (2002):** A future view of Precision Farming. In: Werner, A., Jarfe, A. [Hrsg.]: Precision Agriculture. Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis. KTBL-Sonderveröffentlichung 038. Darmstadt. S. 131-145. <http://www.preagro.de>
- BLÖSCHL, G. (1996):** Scale and Scaling in Hydrology. Habilitationsschrift. In: Wiener Mitteilungen Wasser, Abwasser, Gewässer. Band 132. TU Wien, Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft. 346 S.
- BLÖSCHL, G. (2001):** Scaling in hydrology. In: Hydrological Processes 15. S. 709-711.
- 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, 18-21 June. Montpellier, France. S. 349-354.
- BOBERT, J. (2003):** Einfluss des Bodenwasserhaushaltes heterogener Standorte auf die zeitliche und räumliche Entwicklung von Wintergetreide. Dissertation. TU München. In Vorbereitung.
- BOHNE, K. (1998):** Wasserbewegung und Wasserleitfähigkeit des Bodens. In: Blume, H.-P., Felix-Henningsen, P., Fischer, W.R., Frede, H.-G., Horn, R., Stahr, K. [Hrsg.]: Handbuch der Bodenkunde. 4. Ergänzungslieferung 5/98. Ecomed. Landsberg/Lech.
- BORK, H.-R., ROHDENBURG, H. (1985):** Parameteraufbereitung für deterministische Gebiets-Wassermodelle. Grundlagenarbeiten zur Analyse von Agrar-Ökosystemen. In: Landschaftsgenese und Landschaftsökologie. Heft 10. S. 10-69.
- BORK, H.-R., DALCHOW, C. (2000):** Reliefaufnahme. In: Barsch, H., Billwitz, K., Bork, H.-R. [Hrsg.]: Arbeitsmethoden in Physiogeographie und Geoökologie. Klett-Perthes. Gotha, Stuttgart. S. 143-159.
- BRAUER, C. (1997):** Vergleich von drei verschiedenen Erfassungsmethoden digitaler Geländemodelle. Diplomarbeit. Fachbereich Landeskultur und Umweltschutz, Universität Rostock, unveröffentlicht.
- BRIESE, C., PFEIFER, N. (2001):** Airborne Laser Scanning and Derivation of Digital Terrain Models. In: Proceedings of 5th Conference on Optical 3-D measurement techniques, Wien, Austria. http://www.ipf.tuwien.ac.at/np/articles+abstracts/vienna_airbornels_pfeifer.pdf.
- BROOKS, S. M., ANDERSON, M. (1998):** On the Status and Opportunities for Physical Process Modelling in Geomorphology. In: Longley, P., Brooks, S., McDonnell, R., MacMillan, B. [Hrsg.]: Geocomputation. A Primer. Wiley. Cichester. S. 193-230.
- BURROUGH, P.A. (1990):** Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. Monographs on soil and resources survey No 12. Oxford University Press.
- BURROUGH, P.A. (1998):** Dynamic Modelling and Geocomputation. In: Longley, P.A., Brooks, S., McDonnell, R., MacMillan, B. [Hrsg.]: Geocomputation. A Primer. Wiley. Cichester. S. 165-192.
- BURROUGH, P.A., VAN GAANS, P.F.M., MACMILLAN, R.A. (2000):** High-resolution landform classification using fuzzy k-means. In: J. Fuzzy Sets and Systems 113 (1). S. 37-52.
- COSTA-CABRAL, M.C., BURGESS, S.J (1994):** Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. In: Water Resources Research 30 (6). S. 1681-1692.
- CRESSIE, N.A. (1993):** Statistics for Spatial Data. Revised Edition. Wiley. New York. 900 S.

- DABBERT, S., KILIAN, B. (2002):** Ökonomie. In: Werner, A., Jarfe, A. [Hrsg.]: Precision Agriculture. Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis. KTBL-Sonderveröffentlichung 038. Darmstadt. S. 423-446. <http://www.pregro.de>.
- DATHE, A., DIEKKRÜGER, B., STANGE, F. (1996):** Untersuchung der räumlichen Variabilität von Bodeneigenschaften unter besonderer Berücksichtigung der Makroporenstruktur. In: Richter, O., Söndgerath, D., Diekkrüger, B. [Hrsg.]: Sonderforschungsbereich 179 „Wasser- und Stoffdynamik in Agrarökosystemen“. Abschlussbericht. Landschaftsökologie und Umweltforschung. Heft 24 (2). Institut für Geographie und Geoökologie der TU Braunschweig. S. 733-782.
- DIEKKRÜGER, B., FLAKE, M., KUHN, M., NORDMEYER, H., RÜHLING, I., SÖNDGERATH, D. (1996):** Arbeitsgruppe „Räumliche Variabilität“. In: Richter, O., Söndgerath, D., Diekkrüger, B. [Hrsg.]: Sonderforschungsbereich 179 „Wasser- und Stoffdynamik in Agrarökosystemen“. Abschlussbericht. Landschaftsökologie und Umweltforschung. Heft 24 (3). Institut für Geographie und Geoökologie der TU Braunschweig. S. 1232-1360.
- DIKAU, R. (1993):** The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. In: Raper, J. [Hrsg.]: Three-Dimensional Applications in GIS. Taylor & Francis. London. S. 51-77.
- DIKAU, R., FRIEDRICH, K., LESER, H. (1999):** Georelief. In: Zepp, H., Müller, M. J. [Hrsg.]: Landschaftsökologische Erfassungsstandards. Ein Methodenbuch. Forschungen zur Deutschen Landeskunde. Band 244. Dt. Akademie für Landeskunde, Selbstverlag. Flensburg. S. 29-74.
- DIN 18709-1:** Begriffe, Kurzzeichen und Formelzeichen im Vermessungswesen. Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN). Berlin.
- DOBERS, E.S. (2002):** Methoden der Standorterkundung als Grundlage des DGPS-gestützten Ackerbaus. Eine Fallstudie aus dem Lössgebiet des Mittleren Fläming. Dissertation. Göttinger Bodenkundliche Berichte 115. Institut für Bodenwissenschaften, Universität Göttingen. 226 S.
- DOERGE, T. (2001):** Fitting soil electrical conductivity measurements into the Precision Farming toolbox. Wisconsin Fertilizer, Aglime and Pest Management Conference, Madison, WI, USA, 16-18 January.
<http://www.soils.wisc.edu/extension/FAPM/proceedings01/Doerge-withPIX.PDF>.
- DURLESSER, H. (1999):** Bestimmung der Variation bodenphysikalischer Parameter in Raum und Zeit mit elektromagnetischen Induktionsverfahren. FAM-Bericht 35. Dissertation. TU München. Shaker. Aachen. 120 S.
- DYCK, S., PESCHKE, D. (1995):** Grundlagen der Hydrologie. 3. Auflage. Verlag für Bauwesen. Berlin. 536 S.
- EHLERS, W. (1996):** Wasser in Boden und Pflanze. Ulmer. Stuttgart. 272 S.
- EIGENBERG, R.A., DORAN, J.W., NIENABER, J.A., FERGUSON, R.B., WOODBURY, B.L. (2002):** Electrical conductivity monitoring of soil condition and available N with animal manure and a cover crop. In: Agriculture, Ecosystems and Environment 88. S. 183-193.
- ESRI (1996):** ArcView SpatialAnalyst. Advanced Spatial Analysis Using Raster and Vector Data. Environmental Systems Research Institut Inc. Redlands, Ca, USA. 148 S.
- EVANS, I.S. (1998):** What do terrain statistics really mean? In: Lane, S. N., Richards, K.S., Chandler, J.H. [Hrsg.]: Landform Monitoring, Modelling and Analysis. Wiley. Cichester. S. 119-138.
- FAIRFIELD, J., LAYMARIE, P. (1991):** Drainage networks from grid digital elevation models. In: Water Resources Research 27 (5). S. 709-717.
- FAVEY, E. (2001):** Investigation and Improvement of Airborne Laser Scanning Technique for Monitoring Surface Elevation Changes of Glaciers. Dissertation. ETH Zürich No. 14045.
- FLACKE, W., AUERSWALD, K., NEUFANG, L. (1990):** Combining a modified universal soil loss equation with a digital terrain model for computing high resolution maps of soil loss resulting from rain wash. In: Catena 17. S. 383-397.
- FLORINSKY, I.V. (1998):** Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models. In: International Journal for Geographical Information Science 12/1. S. 47-61.
- FREEMAN, G.T. (1991):** Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. In: Computers and Geosciences 17 (3). S. 413-422.

- FRIEDRICH, K. (1996):** Digitale Reliefgliederungsverfahren zur Ableitung bodenkundlich relevanter Flächeneinheiten. Dissertation. Fachbereich Geowissenschaften, Johann-Wolfgang-Goethe-Universität Frankfurt. Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten: Serie D, Physische Geographie. Band 21. <http://www.rz.uni-frankfurt.de/~relief/fga21/start.html>
- GALLANT, J.C., WILSON, J.P. (1996):** TAPES-G: A grid-based terrain analysis program for the environmental sciences. In: Computers and Geosciences 22 (7). S. 713-722.
- GALLANT, J.C., WILSON, J.P. (2000):** Primary Topographic Attributes. In: Wilson, J.P., Gallant, J.C. [Hrsg.]: Terrain Analysis. Principles and Applications. Wiley. New York. S. 51-86.
- GARBRECHT, J., MARTZ, I. (1994):** Grid size dependency of parameters extracted from digital elevation models. In: Computers and Geosciences 20 (1). S. 85-87.
- GEBBERS, R., SCHMIDT, F. (1999):** DGM-Erfassung mittels RTK-DGPS und Nutzung in der Landwirtschaft. In: Bill, R., Grenzdörffer, G., Schmidt, F. [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. Rostock. S. 167-183.
- GEIGER, R. (1961):** Das Klima der bodennahen Luftschicht. Vieweg. Braunschweig.
- GEROLD, G., CYFFKA, B. (1998):** Regionalisierung in der Hydrologie. Forschungsbericht. DFG-Schwerpunktprogramm. Göttingen. 63 S.
- 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.
- GÖPFERT, W. (1991):** Raumbezogene Informationssysteme. Wichmann. Karlsruhe. 318 S.
- GRAYSON, R.B., WESTERN, A.W., CHIEW, F.H.S., BLÖSCHL, G. (1997):** Preferred states in spatial soil moisture patterns: Local and nonlocal controls. In: Water Resources Research 33 (12). S. 2897-2908.
- GRENZDÖRFFER, G. (1997):** Remote Sensing and GIS for a site-specific farm management system. In: Stafford, J. [Hrsg.]: Precision Agriculture`97. Bios Scientific Publishers Ltd. Oxford. S. 687-695.
- GRENZDÖRFFER, G., GEBBERS, R. (2001):** Seven years of yield mapping - Analysis and possibilities of multi year yield mapping data. In: Grenier, G., Blackmore, S. [Hrsg.]: 3rd European Conference on Precision Agriculture, 18-21 June, Montpellier, France. S. 31-36.
- GRENZDÖRFFER, G. (2002):** Konzeption, Entwicklung und Erprobung eines digitalen integrierten flugzeuggetragenen Fernerkundungssystems für Precision Farming (PFIF). Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe C. Dissertationen. Heft 552. München. 140 S.
- GUTH, P.L. (1995):** Slope and aspect calculations on gridded digital elevation models: Examples from a geomorphic toolbox for personal computers. In: Pike, R und Dikau, R. [Hrsg.]: Zeitschrift für Geomorphologie. Supplementband 101. Advances in Geomorphometry. Proceedings of the Walter F. Wood Memorial Symposium. Gebrüder Bornträger. Berlin. S. 31-52.
- HANKEMEIER, P., ENGEL, I., KOCH, S. (1998):** SAPOS[®]-ein aktives Bezugssystem für multifunktionale Anwendungen. In: Zeitschrift für Vermessungswesen 5/98. S.149-156
- HARBECK, R. (2000):** Das topographische Geoinformationssystem ATKIS[®] - Stand und Entwicklung aus Sicht der AdV. In: ATKIS - Stand und Fortführung. Schriftenreihe des DVW. Band 39. Wittwer. Stuttgart. S. 9-22.
- HARTINGER, H., GRILLMAYER, E., BRUNNER, F.K. (1999):** Über die Schranken von hochgenauen GPS-Vermessungen. In: Vermessungswesen und Raumordnung 1. S. 50-62.
- HELMING, K., ROTH, CH., WOLF, R., DISTEL, H. (1993):** Characterization of Rainfall-Microrelief interactions with Runoff Using Parameters Derived from Digital Elevation Models. In: Soil Technology 6. S. 273-286.

- HERBST, R., LAMP, J., REIMER, G. (2001):** Inventory and spatial modelling of soils on PA pilot fields in various landscapes of Germany. In: Grenier, G., Blackmore, S. [Hrsg.]: 3rd European Conference on Precision Agriculture, 18-21 June, Montpellier, France. S. 395-400.
- HERBST, M. (2001):** Regionalisierung von Bodeneigenschaften unter Berücksichtigung geomorphometrischer Strukturen für die Modellierung der Wasserflüsse eines mikroskaligen Einzugsgebiets. Dissertation. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Universität Bonn. http://hss.ulb.uni-bonn.de:90/ulb_bonn/diss_online/math_nat_fak/2001/herbst_michael/diss.pdf
- HOFMANN-WELLENHOF, B., LICHTENEGGER, H., COLLINS, J. (1997):** GPS. Theory and Practice. Fourth, revised edition. Springer. Wien, New York.
- HUANG, C., GASCUEL-ODOUX, C., CROS-CAYOT, S. (2002):** Hillslope topographic and hydrologic effects on overland flow and erosion. In: Catena 46 (2-3). S. 177-188.
- HURTIG, T. (1957):** Physische Geographie von Mecklenburg. Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin.
- HUTCHINSON, M.F., GESSLER, P.E. (1994):** Splines – more than just a smooth interpolator. In: Geoderma 62. S. 45-67.
- HUTCHINSON, M.F. (1996):** A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models. In: Proceedings, 3rd International Conf./Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling, Santa Fe, NM, 21-26 January 1996. Santa Barbara, CA: National Center for Geographic Information and Analysis. <http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/papers/local.html>
- HUTCHINSON, M.F., GALLANT, J.C. (2000):** Digital Elevation Models and Representation of Terrain Slope. In: Wilson, J.P., Gallant, J.C. [Hrsg.]: Terrain Analysis. Principles and Applications. Wiley. New York. S. 29-50.
- IHDE, J., SCHOCH, H., STEINICH, L. (1994):** Beziehungen zwischen den geodätischen Bezugssystemen Datum Rauenberg, ED 50 und System 42. Deutsche Geodätische Kommission. Frankfurt am Main.
- JOHNSON, C.K., DORAN, J.W., DUKE, H.A., WIENHOLD, B.J., ESKRIDGE, K.M., SHANAHAN, J.F. (2001):** Field-Scale Electrical Conductivity Mapping for delineating soil condition. In: Soil Science Society of America Journal 65. S. 1829-1837.
- JURISCH, R. (1998):** Untersuchung der Genauigkeiten von Tachymeter- und DGPS-Ortungen zur Ermittlung hydraulischer und hydrologischer Daten in Flüssen. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 77. S. 43-53.
- KASPAR, T.C., COLVIN, T.S., JAYNES, D.B., KARLEN, D.L., JAMES, D.E., MEEK, D.W., PULIDO, D., BUTLER, H. (2000):** Estimating corn yield using temporal yield data and terrain attributes. In: Precision Agriculture: Proc. 5th International Conference. Minneapolis, MN. 16-19 July 2000 ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI, USA.
- KASTELL, S., STÜDEMANN, O. (1995):** Zur Kartierung von on-site- und off-site-Erscheinungen der Bodenerosion durch Wasser. In: Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung 36. S. 250-254.
- KIRKBY, M. (2001):** Modelling the interactions between soil surface properties and water erosion. In: Catena 46 (2-3). S. 89-102.
- KLEUSBERG, A., KLAEDTKE, H.-G. (1999):** Accuracy assessment of digital height model derived from airborne synthetic aperture radar measurements. In: Fritsch/Spiller [Hrsg.]: Photogrammetric Week '99. Wichmann. S. 139-143.
- KOFALK, S. (1998):** Einfluss von Bodenvariabilität und Relief auf Wasserhaushalt und Stickstoffgehalte eines Grundmoränenstandortes. Dissertation. In: Renger, M., Wessolek, G., Alaily, F. [Hrsg.]: Bodenökologie und Bodengenese. Heft 29. Inst. für Ökologie und Biologie. TU Berlin.
- KOLLMUB, H. (2000):** Aktualisierung des ATKIS-Basis-DLM in Bayern. In: ATKIS - Stand und Fortführung. Schriftenreihe des DVW. Band 39. Wittwer. Stuttgart. S. 107-114.
- KORDUAN, P., BILL, R. (2002):** Adaption und Nutzung des Metadatenstandards CSDGM für Precision Agriculture GIS. In: Strobl, J., Blaschke, T., Griesebner, G. [Hrsg.]: Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XIV. Wichmann. Heidelberg. S. 276-285.

- KORDUAN, P. (2003):** Metainformationssystem für Precision Agriculture. Dissertation. Ingenieurwissenschaftliche Fakultät, Universität Rostock. In Vorbereitung.
- KÖTHE, R. (2000):** http://www.scilands.de/service/faq/definitionen_dgm/definitionen_dgm.htm.
- KRAUS, K. (1994):** Photogrammetrie. Band 1: Grundlagen und Standardverfahren. Dümmler. Bonn. 394 S.
- KRAUS, K. (1998):** Interpolation nach kleinsten Quadraten versus Krige-Schätzer. Österreichische Zeitschrift für Vermessung, Geoinformation. Heft 1/1998. S. 45-47.
- KRAUS, K. (2000):** Photogrammetrie. Band 3: Topographische Informationssysteme. Dümmler. Bonn. 419 S.
- KRAUS, K., PFEIFER, N. (2001):** Advanced DTM Generation from LIDAR Data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing ISPRS, Vol. XXXIV-3/W4. 22-24 October 2001. Annapolis, MD, USA.. S. 23-30.
- KRAUSE, J. (2002):** Analyse der Unsicherheiten bei der Hochwassersimulation in urbanen Räumen. Diplomarbeit. Geographisches Institut der Rheinischen Friedrich-Willhelms-Universität Bonn, unveröffentlicht.
- KUHN, M. (1998):** Untersuchungen zur Auswirkung der Variabilität von Bodeneigenschaften auf die Wasserflüsse – Feldversuch und Simulation. Dissertation. Landschaftsökologie und Umweltforschung. Heft 31. Institut für Geographie und Geoökologie der TU Braunschweig.
- LANE, S. N., CHANDLER, J.H., RICHARDS, K.S. (1998):** Landform Monitoring, Modelling and Analysis: Land Form in Geomorphological Research. In: Lane, S. N., Richards, K.S., Chandler, J.H. [Hrsg.]: Landform Monitoring, Modelling and Analysis. Wiley. Cichester. S. 1-17.
- 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>.
- LENK, U. (2001):** 2.5D-GIS und Geobasisdaten - Integration von Höheninformationen und Digitalen Situationsmodellen. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe C. Dissertationen. Heft Nr. 546. München. 190 S.
- LESER, H. (1977):** Feld- und Labormethoden der Geomorphologie. De Gruyter Lehrbuch. Berlin, New York. 446 S.
- LESER, H. (1991):** Landschaftsökologie. Ulmer UTB. Stuttgart. 647 S.
- LILLESAND, T.M., KIEFER, R.W. (2000):** Remote sensing and image interpretation. Wiley. New York.
- LOHMEYER, W., VON ZEJSCHWITZ, E. (1982):** Einfluss von Reliefform und Exposition auf Vegetation, Humusform und Humusqualität. In: Geologisches Jahrbuch 11. S. 33-70.
- LÜCK, E., EISENREICH, M., DOMSCH, H., BLUMENSTEIN, O. (2000):** Stoffdynamik in Geosystemen. Band 4. Im Selbstverlag der Arbeitsgruppe Stoffdynamik in Geosystemen. Potsdam. 167 S.
- MACMILLAN, R.A., PETTAPEACE, W.W., NOLAN, S.C AND GODDARD, T.W. (2000):** A generic procedure for automatically segmenting landforms. In: J. Fuzzy Sets and Systems 113 (1). S. 81-109.
- MATHSOFT (1997):** S-Plus 4 Guide to Statistics. MathSoft Inc. Seattle, WA, USA. 875 S.
- MCCULLAGH, M. J. (1998):** Quality, Use and Visualisation in Terrain Modelling. In: Lane, S. N., Richards, K.S., Chandler, J.H. [Hrsg.]: Landform Monitoring, Modelling and Analysis. Wiley. Cichester. S. 95-118.
- MERCER, B. (2001):** Combining LIDAR and IfSAR: What can you expect? In: GIS 12/01. S.12-19.
- MEYEN, E., SCHMITHÜSEN, J., GELLERT, J., NEEF, E., MÜLLER-MINY, H., SCHULTZE, H.J. [Hrsg.] (1962):** Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands. Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung. Bad Godesberg.
- MILLER, C.L., LAFLAMME, R.A. (1958):** The Digital Terrain Model - Theory and Application. Photogrammetric Engineering 24 (3). S. 433.

- MINASNY, B., MCBRATNEY, A.B., WHELAN, B.M. (1999):** VESPER Version 1.0. Australian Centre for Precision Agriculture, McMillan Building A05, The University of Sydney, NSW 2006. <http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa>.
- MOORE, I.D., GRAYSON, R., LADSON, A. (1991):** Digital Terrain Modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. In: Hydrological Processes 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 47 (5). S. 423-428.
- MOORE, I.D., GESSLER, P., NIELSEN, G., PETERSON, G. (1993a):** Soil Attribute Prediction using Terrain Analysis. In: Soil Science Society America Journal 57. S. 443-452.
- MOORE, I.D., NORTON, T., WILLIAMS, J. (1993b):** Modelling environmental heterogeneity in forested landscapes. In: Journal of Hydrology 150. S. 717-747.
- MORGAN, R.P.C. (1999):** Bodenerosion und Bodenerhaltung. Enke. Stuttgart. 236 S.
- MOSLEY, M.P., MCKERCHAR, A.I. (1993):** Streamflow. In: Maidment, D.R. [Hrsg.]: Handbook of Hydrology. McGraw-Hill. New York. S. 8.1-8.39.
- MULL, R. (1987) [Hrsg.]:** Anthropogene Einflüsse auf den Bodenwasserhaushalt. DFG-Forschungsbericht. VCH. Weinheim. 110 S.
- NETTE, T. (2001):** Geo-Informationssysteme als Instrument des Ressourcenmanagements für Belange des Boden- und Gewässerschutzes. Dissertation. Fachbereich VI (Geographie/Geowissenschaften) der Universität Trier.
- NEUKUM, G. (1999):** The Airborne HRSC-A: Performance Results and Application Potential. In: Photogrammetric Week '99. Wichmann. S. 83-88.
- NOBES, D.C. (1996):** Troubled waters: environmental applications of electrical and electromagnetic methods. In: Surveys in Geophysics 17. S. 393-454.
- NOLAN, S.C., GODDARD, T.W., LOHSTRAETER, G., COEN, G.M. (2000):** Assessing management units on rolling topography. In: Precision Agriculture: Proc. 5th International Conf. Minneapolis, MN. 16-19 July 2000 ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI, USA.
- NUGTEREN, A., ROBERT, P. (1999):** Usefulness and feasibility of high accuracy digital elevation models for Precision Management. In: Stafford, J. (Ed.): Precision Agriculture'99. Proceedings of the 2nd European Conference on Precision Agriculture. Odense, Denmark. Sheffield Academic Press. Sheffield. S. 561-569.
- O'CALLAGHAN, J.F., MARK, D. (1984):** The extraction of drainage networks from digital elevation data. In: Computer Vision, Graphics and Image Processing 28. S. 323-344.
- OLIVER, M.A. (1999):** Exploring soil spatial variation geostatistically. In: Stafford, J. (Ed.): Precision Agriculture'99. Proceedings of the 2nd European Conference on Precision Agriculture. Odense, Denmark. Sheffield Academic Press. Sheffield. S. 3-17.
- O'LOUGHLIN, E.M. (1986):** Prediction of Surface Saturation Zones in Natural Catchments by Topographic Analysis. In: Water Resources Research 22 (5). S. 794-804.
- O'NEILL, R.V. (1989):** Perspectives in Hierarchy and Scale. In: Roughgarden, J. et. al. [Hrsg.]: Perspectives in ecological theory. Princeton University Press. Princeton. S. 140-156.
- PACHEPSKY, Y.A., TIMLIN, D.J., RAWLS, W.J. (2001):** Soil water retention as related to topographic variables. In: Soil Science Society of America Journal 65. S. 1787-1795.
- PANNATIER, Y. (1996):** VARIOWIN. Software for Spatial Data Analysis in 2D. Springer. New York, Berlin, Heidelberg.
- PANTEN, K. (2002):** Ein Beitrag zur Fernerkundung der räumlichen Variabilität von Boden- und Bestandesmerkmalen. Dissertation. Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät der Universität Rostock.
- PENNING DE VRIES, F.W.T., AGUS, F., KERR, J. [Hrsg.] (1998):** Soil erosion at multiple scales. Principles and methods for assessing causes and impacts. CABI Publishing. Wallingford.

- PENNOCK, D., WALLEY, F., SOLOHUB, M., SI, B., HNATOWICH, G. (2001):** Topographically controlled yield response of canola to nitrogen fertilizer. In: Soil Science Society of America Journal 65. S. 1838-1845.
- PERSSON, M., BERNDTSSON, R. (1998):** Noninvasive Water Content and Electrical Conductivity Laboratory Measurements using Time Domain Reflectometry. In: Soil Science Society of America Journal 62 (6). S. 1471-1475.
- PERSSON, A., PILESJÖ, P. (2000):** Digital elevation models in precision farming. Sensitivity tests of different sampling schemes and interpolation algorithms for the surface generation. In: Proceedings of the Second International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry, Lake Buena Vista, FL, USA. S. 214-221.
- PETER, H., MARKERT, S. (1961):** Die Bestimmung der MB-Sorption mit gepuffertem Methylblaulösung zur Ausschaltung des pH-Einflusses auf die Höhe der Sorptionswerte. In: Zeitschrift für landwirtschaftliches Versuchs- und Untersuchungswesen, 7. Bd. S. 426-441.
- 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 and Remote Sensing 54. S. 95-104.
- PFEIFER, N., STADLER, P., BRIESE, C. (2001):** Derivation of digital terrain models in the SCOP++ environment. OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Digital Elevation Models. Stockholm. www.ipf.tuwien.ac.at/veroeffentlichungen/np_stockholm.pdf
- PILESJÖ, P., ZHOU, Q., HARRIE, L. (1998):** Estimating flow distribution over digital elevation models using a form-based algorithm. In: Geographic Information Sciences 4. S. 44-51.
- PLACHTER, H., JANSSEN, B. (2002):** Naturschutzziele. In: Werner, A., Jarfe, A. [Hrsg.]: Precision Agriculture. Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis. KTBL-Sonderveröffentlichung 038. Darmstadt. S. 399-410. <http://www.pregagro.de>.
- QUINN, P., BEVEN, K., CHEVALLIER, P., PLANCHON, O. (1991):** The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. In: hydrological Processes 5. S. 59-79.
- QUINN, P.F., BEVEN, K.J. (1993):** Spatial and temporal predictions of soil moisture dynamics, runoff, variable source areas and evapotranspiration for Plynlimon, Mid-Wales. In: Hydrological Processes 7. S. 425-448.
- RAPER, J. (1993):** The three dimensional geoscientific mapping and modelling system: a conceptual design. In: Raper, J. [Hrsg.]: Three-Dimensional Applications in GIS. Taylor & Francis. London. S. 11-19.
- RASCH, D. (2003):** Untersuchungen zur Genauigkeit von Digitalen Geländemodellen und Reliefparametern. Diplomarbeit. Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen, Fachhochschule Neubrandenburg.
- RAWLS, W.J., AHUJA, L.A., BRAKENSIEK, D.L., SHIRMOHAMMADI, A. (1993):** Infiltration and soil water movement. In: Maidment, D.R. (Hrsg.): Handbook of Hydrology. McGraw-Hill. New York. S. 7.1-7.58.
- REICHE, E.-W. (1991):** Entwicklung, Validierung und Anwendung eines Modellsystems zur Beschreibung und flächenhaften Bilanzierung der Wasser- und Stickstoffdynamik in Böden. Kieler Geographische Schriften 79. S. 1-150.
- REIHS, F. (2001):** Erstellung, Anwendung und Qualitätsuntersuchung von Digitalen Geländemodellen zur Überflutungssimulation. Diplomarbeit. Fachbereich Landeskultur und Umweltschutz, Universität Rostock, unveröffentlicht.
- RESNIK, B. (2001):** Praktische Untersuchungen zur Genauigkeit und Zuverlässigkeit der mobilen Geodatenerfassung mit Freihandmesssystemen. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN) 7/2001. S. 246-253.
- RESNIK, B., BILL, R. (2000):** Vermessungskunde für den Planungs-, Bau- und Umweltbereich. Wichmann. Heidelberg. 266 S.
- RICHTER, H. (1962):** Eine neue Methode der großmaßstäbigen Kartierung des Reliefs. In: Petermanns Geographische Mitteilungen 106. S. 309-312.

- RICHTER, O., DIEKKRÜGER, B. (1996):** Wasser- und Stoffdynamik über räumlichen Punktprozessen. In: Richter, O., Söndgerath, D., Diekkrüger, B. [Hrsg.]: Sonderforschungsbereich 179 „Wasser- und Stoffdynamik in Agrarökosystemen“. Abschlussbericht. Landschaftsökologie und Umweltforschung. Heft 24 (1). Institut für Geographie und Geoökologie der TU Braunschweig. S. 164-185.
- RIEGER, W. (1992):** Hydrologische Anwendungen des digitalen Geländemodelles. Geowissenschaftliche Mitteilungen, Heft 39. TU Wien, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung. 97 S.
- RETSCHER, G., PRADER, A. (1997):** Einfluss von elektromagnetischen Störquellen auf GPS-Meßergebnisse. In: Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation 4/97. S. 290-297.
- ROGOWSKI, S., ENGMAN, E.T. (1996):** Using a SAR image and a decision support system to model spatial distribution of soil water in a GIS framework. In: Proceedings, 3rd International Conf./Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling, Santa Fe, NM, 21-26 January 1996. Santa Barbara, CA: National Center for Geographic Information and Analysis. http://www.sbg.ac.at/geo/idrisi/gis_environmental_modeling/sf_papers/rogowski_andrew/sar.html.
- RÖMKENS, M.J.M, HELMING, K., PRASAD, S.N. (2002):** Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes. In: Catena 46 (2-3). S.103-123.
- ROTH, R., KÜHN, J. (2002):** Bestandesführung und differenzierte Aussaat. In: Werner, A., Jarfe, A. [Hrsg.]: Precision Agriculture. Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis. KTBL-Sonderveröffentlichung 038. Darmstadt. S. 225-236. <http://www.preagro.de>.
- RÜDENAUER, H. (1980):** Zur photogrammetrischen Erfassung von Geländedaten und deren digitaler Verarbeitung unter Berücksichtigung straßenbaulicher Forderungen. Dissertation. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover Nr. 101.
- SALVUCCI, G.D, ENTEKHABI, D. (1995):** Hillslope and climatic controls on hydrologic fluxes. In: Water Resources Research 31 (7). S. 1725-1739.
- SCHLEYER, A. (2000):** Flächendeckendes, hochgenaues DGM für Baden-Württemberg. In: ATKIS - Stand und Fortführung. Schriftenreihe des DVW, Band 39. Wittwer. Stuttgart. S. 125-138.
- SCHMIDHALTER, U., RAUPENSTRAUCH, J., SELIGE, T., BOBERT, J. (2002):** Geophysikalische Erfassung von Standorteigenschaften. In: Werner, A., Jarfe, A. [Hrsg.]: Precision Agriculture. Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis. KTBL-Sonderveröffentlichung 038. S. 53-64. <http://www.preagro.de>.
- SCHMIDT, F. (1999):** Bodenfeuchtemodellierung mit Hilfe digitaler Geländemodellanalyse und Geo-Informationssystemen. Diplomarbeit. Fachbereich Landeskultur und Umweltschutz, Universität Rostock, unveröffentlicht.
- SCHMIDT, F. (2001a):** Generation and analysis of digital terrain models for agricultural applications. In: Grenier, G., Blackmore, S. [Hrsg.]: 3rd European Conference on Precision Agriculture, 18-21 June, Montpellier, France. S. 109-114.
- SCHMIDT, F. (2001b):** Abgrenzung von Reliefeinheiten mit Geo-Informationssystemen für teilflächenspezifische Bewirtschaftung. In: Kögl, H., Spilke, J., Birkner, U. (Hrsg.): Referate der 22. GIL-Jahrestagung in Rostock 2001. Berichte der Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft. Band 14. S. 195-198.
- SCHMIDT, F. (2001c):** Erfassung, Interpolation und Auswertung von digitalen Geländemodellen für die Landwirtschaft. In: Zeitschrift für Vermessungswesen. Heft 3/2001. S. 128-134.
- 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 29. S. 111-120. http://www.auf.uni-rostock.de/gg/publikationen/2000/schmidt_irrgang_tekirdag_DTM.pdf.
- SCHMIDT, F., PERSSON, A. (2003):** Comparison of DEM data capture and topographic wetness indices. In: Precision Agriculture 4(2). Kluwer Academic Publishers. S. 179-192.

- SCHMIDT, J. (1988):** Wasserhaushalt und Feststofftransport an geneigten, landwirtschaftlich bearbeiteten Nutzflächen. Dissertation. FU Berlin.
- SCHWERTMANN, U. VOGEL, W., KAINZ, M. (1987):** Bodenerosion durch Wasser: Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. Ulmer. Stuttgart.
- SEEBER, G., WILLGALIS, S. (2000):** Das Potential von GPS - Chancen und aktuelle Probleme. In: Resnik, B. [Hrsg.]: GPS - Grundlagen, Anwendungen und Produkte. Tagungsband zum 3. Rostocker GPS-Tag. Interner Bericht Nr. 13, Institut für Geodäsie und Geoinformatik. Universität Rostock. S. 5-24.
- SHATAR, T.M., MCBRATNEY, A.B. (2001):** Subdividing a field into contiguous management zones using a k-zone algorithm. In: Grenier, G., Blackmore, S. [Hrsg.]: 3rd European Conference on Precision Agriculture, 18-21 June, Montpellier, France. S. 115-120
- SINOWSKI, W. (1995):** Die dreidimensionale Variabilität von Bodeneigenschaften - Ausmaß, Ursachen und Interpolation. FAM-Bericht 7. Dissertation. TU München. Shaker. Aachen.
- SOMMER, C., VOBHENRICH, H. (2002):** Bodenbearbeitung. In: Werner, A., Jarfe, A. [Hrsg.]: Precision Agriculture. Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis. KTBL-Sonderveröffentlichung 038. Darmstadt. S. 237-250.
<http://www.preagro.de>.
- SPRECKELS, V. (2002):** Untersuchung operationeller Aufnahmesysteme zur großflächigen Erfassung von Digitalen Geländemodellen und topographischen Veränderungen über Abbaubereichen der Deutschen Steinkohle AG (DSK AG).
http://www.ipi.uni-hannover.de/html/publikationen/2002/spreckels/spreckels_pfg.pdf.
- STANGER, W. (1982):** Ein digitales Geländemodell und einige Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der Flurbereinigung. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe C. Dissertationen. Heft 273. München.
- STEMPFHUBER, W. (1999):** Kinematische Vermessung mit dem zielverfolgenden Tachymeter. In: Bill, R., Grenzdörffer, G., Schmidt, F. [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, Rostock. S. 121-132.
- STIES, M., KRÜGER, S., MERCER, J.B., SCHNICK, S. (2000):** Comparison of digital elevation data from airborne laser and interferometric SAR systems. In: ISPR, Vol. XXXIII, Amsterdam.
http://www.intermaptechnologies.com/PDF_files/Manfred_Final_Version.pdf.
- STÜDEMANN, O. (1998):** Bodenerosion durch Wasser und Maßnahmen zur Erosionsvermeidung an Fallbeispielen aus dem Kreis Plön. In: Seen-Beobachtung. S. 96-99.
- SUDDUTH, K.A., DRUMMOND, S.T., BIRRELL, S.J., KITCHEN, N.R. (1997):** Spatial modeling of crop yield using soil and topographic data. In: Stafford, J. [Hrsg.]: Precision Agriculture '97. Bios Scientific Publishers Ltd. Oxford. S. 439-447.
- TANG, L. (1991):** Einsatz der Rasterdatenverarbeitung zum Aufbau digitaler Geländemodelle. Dissertation. Mitteilungen der geodätischen Institute der TU Graz. Folge 73. 97 S.
- THIESSENHUSEN, T. (1999):** Implementierung einer Komponente zur Berechnung und Auswertung von Geländemodellen in einem GIS für die teilflächenspezifische Landwirtschaft. Diplomarbeit. Fachbereich Informatik, Universität Rostock, unveröffentlicht.
- THOMPSON, J.A., BELL, J.C., BUTLER, C.A. (2001):** Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling. Geoderma 100. S. 67-89.
- TIGGES, U. (2000):** Untersuchungen zum mehrdimensionalen Wassertransport unter besonderer Berücksichtigung der Anisotropie der hydraulischen Leitfähigkeit. Dissertation. Agrar- und Ernährungswissenschaftliche Fakultät der Christian-Albrecht-Universität Kiel. 140 S.
- TODOROVIC, P., WOOLHISER, G. RENARD, K.G. (1987):** Mathematical model for evaluation of the effect of soil erosion on soil productivity. In: Hydrological Processes 1. S. 181-198.
- TOPP, G.C., DAVIS, J.L., ANNAN, A.P. (1980):** Electromagnetic determination of soil water content measurements in coaxial transmission lines. In: Water Resources Research 16 (3). S. 574-582.

- VAN DER VEGT, J.W., HOFFMANN, A. (2001): Airborne Laser Scanning Reaches Maturity. *Geoinformatics* 9/2001. S. 32-39.
- VENCATASAWMY, C.P., CLARK, C.D., MARTIN, R.J. (1998): Landform and Lineament Mapping using Radar Remote Sensing. In: Lane, S. N., Richards, K.S., Chandler, J.H. [Hrsg.]: *Landform Monitoring, Modelling and Analysis*. Wiley. Cichester. S. 165-194.
- VENTURA, S.J., IRVIN, B.J. (2000): Automated Landform Classification Methods for Soil-Landscape Studies. In: Wilson, J.P., Gallant, J.C. [Hrsg.]: *Terrain Analysis. Principles and Applications*. Wiley. New York. S. 267-290.
- VON HANSEN, W., VÖGTLE, T. (1999): Extraktion der Geländeoberfläche aus flugzeuggetragenen Laserscanner-Aufnahmen. In: *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*. Heft 4. S. 229-236.
- VON WERNER, M. (1995): GIS-orientierte Methoden der digitalen Reliefanalyse zur Modellierung von Bodenerosion in kleinen Einzugsgebieten. Dissertation. Fachbereich Geowissenschaften der Freien Universität Berlin.
- WACKERNAGEL, H. (1998): *Multivariate Geostatistics*. 2. Auflage. Springer. Berlin. 283 S.
- WAGNER, W. (1998): Soil moisture retrieval from ERS Scatterometer Data. Dissertation. Geowissenschaftliche Mitteilungen. Heft 49. Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung an der TU Wien. 101 S.
- WEGEHENKEL, M. (1998): Zum Einsatz von TRIME-TDR zur Messung der Bodenfeuchte auf leichten Sandböden. In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 161. S. 577-582.
- WEIBEL, R., BRÄNDLI, M. (1995): Adaptive methods for the refinement of digital terrain models for geomorphometric applications. In: Pike, R., Dikau, R. [Hrsg.]: *Zeitschrift für Geomorphologie*. Supplementband 101. *Advances in Geomorphometry. Proceedings of the Walter F. Wood Memorial Symposium*. Gebrüder Bornträger. Berlin. S.13-30.
- WELTZIEN, C., VON CHAPPUIS, A., KROMER, K.-H., PERSSON, K., RESNIK, B., SCHMITTMANN, O. (2002): Technikbetreuung und -vergleich. In: Werner, A., Jarfe, A. [Hrsg.]: *Precision Agriculture. Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis*. KTBL-Sonderveröffentlichung 038. Darmstadt. S. 153-165. <http://www.preagro.de>.
- WENDROTH, O., JÜRSCHIK, P., KERSEBAUM, K.C., REUTER, H., VAN KESSEL, C., NIELSEN, D.R. (2000): Identifying, Understanding, and Describing Processes in Agricultural Landscapes - Four Case Studies. In: Wendroth, O.: *Soil Processes and Functions in Landscape Ecology*. Habilitationsschrift. FB Umwelt und Gesellschaft. TU Berlin. S. 137-155.
- WENKEL, K.-O., GEBBERS, R., BROZIO, S., SCHAACK, G., SIMCHEN, H. (2001): German decision support system for site-specific P, K, Mg-fertilization - state of the art and further developments. In: Grenier, G., Blackmore, S. [Hrsg.]: *3rd European Conference on Precision Agriculture*, 18-21 June, Montpellier, France. S. 749-754.
- WENKEL, K.-O., BROZIO, S., GEBBERS, R. (2002): Düngung. Abschlussbericht Projekt „*preagro*“. <http://www.preagro.de>.
- WERNER, A. (2002): *preagro* - ein integrativer Forschungsbeitrag zur Entwicklung und Anwendung von Precision Agriculture in der Praxis. In: Werner, A., Jarfe, A. [Hrsg.]: *Precision Agriculture. Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis*. KTBL-Sonderveröffentlichung 038. Darmstadt. S. 11-17. <http://www.preagro.de>.
- WERNER, M. (2001): Status of the SRTM data processing: when will the world-wide 30m DTM data be available? In: *GIS* 12/2001. S. 6-10.
- WESSOLEK, G., ROTH, C., KÖNIG, R., RENGER, M. (1994): Influence of slope and exposition on water balance for loess soils. In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 157. S. 165-173.
- WESSOLEK, G., GROSS, J., RENGER, M. (1999): Vergleichende Untersuchungen zur Regionalisierung bei unterschiedlichen Nutzungen, Reliefbedingungen und Maßstäben. <http://www.tu-berlin.de/fb7/ioeb/bodenkunde/Gerdlit.html>.
- WESTERN, A.W., BLÖSCHL, G., GRAYSON, R.B. (1998a): Geostatistical characterisation of soil moisture patterns in the Tarrawarra catchment. In: *Journal of Hydrology* 205. S. 20-37.

- WESTERN, A.W. , BLÖSCHL, G., GRAYSON, R.B. (1998b):** How well do indicator variograms capture the spatial connectivity of soil moisture? In: *Hydrological Processes* 12. S. 1851-1868.
- WESTERN, A.W., GRAYSON, R.B., BLÖSCHL, G., WILLGOOSE, G.R., MCMAHON, T.A. (1999):** Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices. In: *Water Resources Research*, Vol. 35 (3). S. 797-810.
- WESTERN, A.W., BLÖSCHL, G., GRAYSON, R.B. (2001):** Toward capturing hydrologically significant connectivity in spatial patterns. In: *Water Resources Research* 37 (1). S. 83-97.
- WEVER, C., LINDENBERGER, J. (1999):** Experiences of 10 years laser scanning. In: *Photogrammetric Week '99*. Wichmann. S. 125-132.
- WILD, E. (1983):** Die Prädiktion mit Gewichtsfunktionen und deren Anwendung zur Beschreibung von Geländeflächen bei topographischen Geländeaufnahmen. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C. Heft 277. München.
- WILSON, J.P., GALLANT, J.C. (1996):** EROS: A grid-based program for estimating spatially-distributed erosion indices. In: *Computers and Geosciences* 22 (7). S. 707-712.
- WILSON, J.P., GALLANT, J.C. (2000):** Digital Terrain Analysis. In: Wilson, J.P., Gallant, J.C. [Hrsg.]: *Terrain Analysis. Principles and Applications*. Wiley. New York. S. 1-28.
- WILSON, D.J., WESTERN, A.W., GRAYSON, R.B., WOODS, R.A., MCMAHON, T.A. (2002):** Predicting the spatial distribution of soil moisture from measurements made at a limited number of point locations. In: Schmitz, G.H. [Hrsg.]: *Proceedings of the 3rd International Conference on Water Resources and Environmental Research*, Vol. 1. 22-25 July, Dresden. S. 214-218.
- WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.D. (1978):** Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. USDA Agriculture Handbook No. 537. Washington. S. 1-58.
- WISE, S. M. (1998):** The effects of GIS interpolation errors on the use of Digital Elevation Models in Geomorphology. In: Lane, S. N., Richards, K.S., Chandler, J.H. [Hrsg.]: *Landform Monitoring, Modelling and Analysis*. Wiley. Cichester. S. 139-164.
- WOLLRING, J., REUSCH, S. (1999):** Variable N-Düngung mit Hilfe eines On-line Sensors. In: Bill, R., Grenzdörffer, G., Schmidt, F. [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, Rostock. S. 93-103.
- WOOD, J. (1996):** The Geomorphological Characterisation of Digital Elevation Models. PhD Thesis. Department of Geography. University of Leicester. <http://www.geog.le.ac.uk/jwo/>.
- WOODS, R.A., SIVAPALAN, M. (1997):** A connection between topographically driven runoff generation and channel network structure. In: *Water Resources Research* 33 (12). S. 2939-2950.
- YAO, H., 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.

9 Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---------|--|
| ABAG | Allgemeine Bodenabtragungsgleichung |
| AdV | Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen |
| AS | Anti-Spoofing |
| ASCII | American Standard Code for Information Interchange |
| ATKIS | Amtliches topographisch-kartographisches Informationssystem |
| BKG | Bundesamt für Kartographie und Geodäsie |
| BMBF | Bundeministerium für Bildung und Forschung |
| BMU | Bundesministerium für Umwelt |
| CQ | Co-ordinate Quality |
| DEM | digital elevation model (engl. für DHM) |
| DEMON | Digital Elevation Model Networks |
| DGK | Deutsche Grundkarte, Maßstab 1:5.000 |
| DGM | Digitales Geländemodell |
| DGPS | Differentielles GPS |
| DHM | Digitales Höhenmodell |
| DIN | Deutsches Institut für Normung e. V. |
| DLM | Digitales Landschaftsmodell |
| DLR | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt |
| DoD | Department of Defense (US-Verteidigungsministerium) |
| DOM | Digitales Oberflächenmodell |
| DOP | Dilution of Precision (GPS-Empfangsgütemaß) |
| DSM | Digitales Situationsmodell |
| ECa | apparent electrical conductivity |
| EDV | Elektronische Datenverarbeitung |
| FK | Feldkapazität |
| GIS | Geo-Informationssystem |
| GK | Gauß-Krüger (Koordinatensystem) |
| GLONASS | Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema |
| GPS | Global Positioning System |
| GTW | Groß-Twülpstedt (Untersuchungsgebiet) |
| HN | Höhennull – Normalhöhen bezogen auf Kronstädter Pegel |
| HRSC | High Resolution Stereo Camera |
| IDW | Inverse Distance Weighting |
| INS | Inertial Navigation System |
| IS | Informationssystem |
| KA4 | Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Ausgabe 1994 |
| KAK | Kationenaustauschkapazität |
| LIDAR | Light Detection and Ranging (siehe LS) |
| LS | Laserscanning |
| LVA | Landesvermessungsamt |
| nFK | nutzbare Feldkapazität |
| NN | Normalnull – normal-orthometrische Höhen bezogen auf Amsterdamer Pegel |
| NIR | Near Infrared |
| NRW | Nordrhein-Westfalen |
| PA | Precision Agriculture |
| PWP | Permanenter Welkepunkt |
| RGB | Rot Grün Blau |
| RMSE | Root Mean Square Error |
| RTK-GPS | Realtime Kinematic GPS |

| | |
|-------|--|
| RTCM | Radio Technical Commission for Maritime Services (Datenübertragungsformat) |
| RUSLE | Revised Soil Loss Equation |
| SA | Selective Availability |
| SAPOS | Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung |
| SAR | Synthetic Aperture Radar |
| SPI | Stream Power Index |
| SRTM | Shuttle Radar Topography Mission |
| TAPES | Terrain Analysis Programs for the Environmental Sciences |
| TDR | Time Domain Reflectometry |
| TIN | Triangulated Irregular Network |
| TIS | Topographisches Informationssystem |
| TK | Topographische Karte |
| TWI | Topographic Wetness Index/Topographischer Wetness Index |
| UHF | Ultra high frequency |
| VHF | Very high frequency |
| USLE | Universal Soil Loss Equation |
| UT | Universal Time |
| UTM | Universal Transverse Mercator |
| WGS84 | World Geodetic System 1984 |
| XML | eXtensible Markup Language |

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 besteht die Möglichkeit der weitgehenden Elimination (Filterung) der zufälligen Messfehler. 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 durchwurzelter 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 Schlagssysteme 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.

Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich die eingereichte Dissertation selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Frank Schmidt

Dresden, im Juli 2003

Danksagung

Besonderer Dank gilt meinem Betreuer, Herrn Prof. R. Bill, für die jahrelange Unterstützung und die Möglichkeit, an seinem Institut zu arbeiten. Herrn Prof. K. Kraus, Technische Universität Wien, danke ich für die Einladung zum Vortrag an sein Institut und die kritischen Anmerkungen zum Manuskript dieser Arbeit - gleiches gilt für Herrn Prof. B. Diekkrüger, Universität Bonn. Nicht vergessen möchte ich Herrn Prof. em. K. Bohne, der bereits während meiner Diplomphase sehr skeptische und gleichwohl aufmunternde Kommentare aus Sicht der Bodenphysik mit dem ihm eigenen Humor beitrug. Mit der Diplomarbeit begann mein Einstieg in die Thematik „Precision Agriculture“. Für die gute Betreuung und die fortlaufende praktische Hilfe „auf dem Acker“ in den letzten vier Jahren danke ich Herrn Dr. G. Grenzdörffer und Herrn Dipl.-Ing. agr. R. Gebbers.

Allen Kollegen aus dem preagro-Projekt, die mit Daten, Anregungen oder Diskussionen die vorliegende Arbeit befruchteten, möchte ich hier „Danke!“ sagen. Für die besonders intensive Zusammenarbeit im Umfeld von preagro und am Institut danke ich weiterhin Jans Bobert, Dr. Lisa Dittmann, Torsten Foy, Bernd Große, Andreas Irrgang, Peter Korduan, Andreas Persson und Dr. Boris Resnik. Und natürlich dem BMBF als Geldgeber für 44 Monate Förderung (Förderkennzeichen 0339740).

Hard- und Software-Probleme lösten jederzeit mit großem Engagement Andrea Schwarz, Martin Kohfahl und Marco Zehner. Christian Briese (Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien) danke ich für seine Hilfe bei der Interpolation mit SCOP.

Die Technik für die Versuche mit dem 8-Kanalempfänger stellte M. Toft (Dronningborg) bereit, weitere GPS-Empfänger organisierte C. Weltzien (DLG). Für die Labornutzung bzw. die Durchführung zahlreicher Analysen danke ich Frau Kietzmann vom Labor des Institutes für Bodenkunde. Weiterhin halfen mehrere studentische Hilfskräfte am Institut bei Feldkampagnen und bei der Massendatenbearbeitung, v.a. Stefan Cantré, Eike Kulesa, Wieland Niecke und Ulrich Bormann.

Für die Bereitstellung der ECa-Daten von den preagro-Untersuchungsflächen danke ich Dr. E. Lück, Dr. C. Sperl und Dr. H. Durlusser. Weitere bodenkundliche Daten wurden erfasst von der Gruppe um Prof. J. Lamp (Kiel) sowie K. Lorenz und R. Gebbers (Müncheberg). R. Gebbers und A. Irrgang sei zudem für die Bereitstellung ihrer Avenue-Scripte gedankt.

Vollgetankte Fahrzeuge für die Vermessungen stellten folgende Betriebsleiter bereit: Herr Schaak (Kassow), Herr Hess (Thumby), Fam. Lüdeke (Beckum), Herr Kelm (Baasdorf), Herr Scheuerle (Queis), Herr Träger-Farny (Groß-Twülpstedt) sowie Frau Plötz von der Fahrbereitschaft der Universität Rostock. Unvergessen bleibt auch der leckere Braten mit Semmelknödeln auf dem Hof von Herrn Spanner (Essenbach).

Zum Abschluss danke ich für den notwendigen Ausgleich Axel, Friedrich, Silvio, Jens und Andreas von der HSG Rostock und meiner Freundin und zukünftigen Frau Barbara.