



Hochschule Neubrandenburg
University of Applied Sciences

Fachbereich Agrarwirtschaft und Lebensmittelwissenschaften

Fachgebiet Precision Farming

Prof. Dr. sc. agr. B. Seggewiß

Dr.-Ing. G. Grenzdörffer

Bachelorarbeit

**„Erstellung und Analyse eines Digitalen Gelände-
modells mit Parallelem Spurführungssystem der
Precision Farming“**

von

Stefan Ullrich

Oktober 2008

urn:nbn:de:gbv:519-thesis2008-0316-5

Abstract

Diese Bachelorarbeit untersucht die Erstellung und Analyse eines Digitalen Geländemodells (DGM) mit Hilfe eines Parallelen Spurführungssystems. Das Ziel ist es, während der Feldarbeit die Höhendaten gleichzeitig mit zu dokumentieren, um später daraus ein DGM zu erstellen. Die Arbeit ist in mehrere Teile gegliedert, wobei zunächst Grundlagen und Anforderungen definiert werden. Bei den Praxisversuchen wurden gleichzeitig zwei Genauigkeitsstufen (Starfire 2- und RTK-GPS) getestet, untersucht und anschließend ausgewertet. Der darauffolgende Teil befasst sich einerseits mit den Erfassungsmethoden und andererseits mit den Methoden zur Erstellung von DGM. Der Schwerpunkt liegt auf den diversen Ableitungen (Reliefattribute) eines DGMs, die analysiert und verglichen worden sind. Diese Reliefanalyse fließt als Integration ins Management ein und trägt als Zusatzquelle zur Erstellung von Applikationskarten bei. Zum Schluss werden die Möglichkeiten der Verwendung eines DGMs erklärt. Die Erstellung und anschließende praxisbezogene Anwendungen von DGM ist ein weiterer Schritt bei der Optimierung landwirtschaftlicher Entscheidungen im Bereich der Präzisionslandwirtschaft (Teilflächenbearbeitung) mit dem Ziel der weiteren Verbesserung der Ökologie und Ökonomie im landwirtschaftlichen Betrieb.

This bachelor thesis investigates the generation and analysis of a digital terrain model (DTM) with the help of a parallel guidance system. The aim is the recording of elevation data during the fieldwork to construct a DTM later. This paper is separated into several parts where first of all basics and requirements are defined. In the practical part two levels of precision have been tested, investigated and evaluated afterwards. The following chapter deals with different acquisition methods and different methods for the generation of a DTM. The focus lies on diverse derivations of DTM's which have been analysed and compared. The terrain analysis is used in the management as an additional persistent data source for the generation of application maps. At the end application possibilities of DTM's are explained. The generation and the practical application of DTM is a next step for the optimisation of agricultural decisions in the area of precision agriculture with the aim of further improvements of the ecology and economy in an agricultural enterprise.

Danksagung

Ich danke meiner Familie, sowie meiner Freundin Dorothee für das Interesse an meiner Arbeit und für die ständige Motivation. Besonderer Dank gilt meinem Vater, der mich durch seine jahrelange Erfahrung in der Landwirtschaft unterstützen konnte.

Für die Einführung ins Thema und für die Betreuung meiner Bachelorarbeit danke ich Herrn Dr.-Ing. Grenzdörffer, der mich auf meinem Weg begleitete und mir im Rahmen dieser Arbeit viele Male mit Rat und Tat zur Seite stand.

Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr. Sc. agr. Seggewiß, der mir die Chance gegeben hat, ein solch spannendes Thema zu bearbeiten.

Einen weiteren Dank möchte ich Herrn C. Donath vom Unternehmen John Deere aussprechen, der mir das Thema vorgeschlagen hatte und mich bei den Praxisversuchen unterstützte.

In diesem Zusammenhang bedanke ich mich auch beim Unternehmen John Deere Deutschland für die Bereitstellung der erforderlichen GPS-Technik.

Für die Hilfe beim Aufbau der GPS-Technik bin ich Herrn C. Ströbele vom Landtechnikhändler Peter Clausen in Kleptow dankbar. Dem Landtechnikhändler gilt mein Dank für den bereitgestellten Traktor John Deere 7930.

Ein besonderer Dank gilt der Betriebsgemeinschaft Groß-Miltzow, die die Versuchsflächen zur Verfügung gestellt hat und Herrn Baumgarten jun., der mich mit den erforderlichen landwirtschaftlichen Informationen seines Betriebes versorgte.

Für die Datenaufbereitung danke ich Herrn R. Schaar vom Unternehmen Landdata-Eurosoft GmbH & Co KG.

Zum Schluss danke ich dem Unternehmen ESRI GmbH für die kostenlose Bereitstellung der Software ArcGIS über das Absolventenprogramm für meine Bachelorarbeit.

Vielen Dank.

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	I
TABELLENVERZEICHNIS	III
FORMELVERZEICHNIS.....	IV
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	V
1 EINFÜHRUNG	1
1.1 ZIELE UND AUFBAU DER ARBEIT	1
1.2 VERWENDUNG VORHANDENER INFORMATIONEN ZUM DIGITALEN GELÄNDEMOMDELL.....	2
2 VERSUCH ZUR ERSTELLUNG EINES DIGITALEN GELÄNDEMOMDELLS	3
2.1 STANDORT- UND BETRIEBSAUSWAHL	3
2.1.1 Auswahlkriterien.....	3
2.1.2 Betriebsspiegel	3
2.1.3 Versuchsflächen.....	4
2.2 VERSUCHSTECHNIK	4
2.3 VERSUCHSVORBEREITUNG.....	6
3 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	8
4 METHODEN ZUR ERSTELLUNG EINES DIGITALEN GELÄNDEMOMDELLS	10
4.1 METHODEN ZUR ERFASSUNG VON DGMS	10
4.1.1 Übersicht der Methoden	10
4.1.1.1 RTK-GPS.....	12
4.1.1.2 Laserscanning per Flugzeug.....	15
4.1.2 Zusammenfassung Erfassungsmethoden.....	17
4.1.3 Vorteil von GPS in der Landwirtschaft.....	17
4.1.4 DGPS-Genauigkeiten	18
4.1.5 Meilensteine der GPS-Spurführung von John Deere.....	22
4.2 METHODEN ZUR ERSTELLUNG VON DGMS.....	23
4.2.1 Interpolation	23
4.2.2 Übersicht der Interpolationsverfahren	23
4.2.2.1 Allgemein.....	23
4.2.2.2 Inverse Distance Weighted.....	25
4.2.2.3 Kriging	26
4.2.2.4 Vergleich von Inverse Distance Weighted und Kriging	29
4.2.3 Untersuchung zur DGPS-Genauigkeit.....	30
4.2.4 Vergleich von unterschiedliche Arbeitsbreiten	39

5	ANALYSE VON HOCHGENAUEN DIGITALEN GELÄNDEMDELLEN	41
5.1	GRUNDLAGEN DER RELIEFANALYSE	41
5.2	ABLEITUNGEN AUS DEM DGM	44
5.2.1	<i>Primäre Reliefattribute</i>	45
5.2.2	<i>Sekundäre Reliefattribute</i>	47
5.3	ERGEBNISSE DER GELÄNDEANALYSE AUS DEM DGM	48
6	RELIEFPARAMETER UND BODENKUNDLICHE GRÖßEN	50
6.1	BODENPHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN	50
6.2	LEITFÄHIGKEITSMESSUNG DES BODENS (ECA)	52
6.2.1	<i>Allgemein</i>	52
6.2.2	<i>Zusammenhang von Geländeparametern mit der Bodenleitfähigkeit</i>	54
6.3	TOPOGRAPHISCHE WETNESS-INDEX (TWI)	54
6.3.1	<i>Vergleich von TWI mit Luftbildern</i>	55
6.3.2	<i>Vergleich von TWI – ECa – Ertrag</i>	56
7	INTEGRATION DER RELIEFANALYSE INS LANDWIRTSCHAFTLICHE MANAGEMENT ..	58
7.1	VORAUSSETZUNG AN DIE DATENQUALITÄT	58
7.2	EINBEZIEHUNG IN POTENTIALKARTEN	58
7.3	OBERFLÄCHENBERECHNUNG	60
7.4	CROSS COMPLIANCE	61
8	DISKUSSION	64
9	ZUSAMMENFASSUNG	68

LITERATURVERZEICHNIS

ANHANG

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Lage der Versuchsflächen und der Hochschule Neubrandenburg	3
Abbildung 2-2: Versuchsschlag 1 „Helpter See“	4
Abbildung 2-3: Versuchsschlag 2 „Charlies Hütte“	4
Abbildung 2-4: Traktor John Deere 7930 + GPS-Technik	5
Abbildung 2-5: Arbeitsauftrag vom Schlag „Charlies Hütte“	6
Abbildung 2-6: Ansicht vom GreenStar 2600 Display mit Grafik (Schlag mit Hindernissen)..	7
Abbildung 4-1: AutoTrac	12
Abbildung 4-2: Multipath-Fehler	13
Abbildung 4-3: RTK-GPS System	14
Abbildung 4-4: Schematische Darstellung des Messprinzips	16
Abbildung 4-5: Entwicklung der Landwirtschaftlichen Betriebsmittelpreise	17
Abbildung 4-6: Starfire 2 - Netzwerk	19
Abbildung 4-7: RTK-Netzwerk	19
Abbildung 4-8: RTX-X bei Signalunterbrechung zur Basisstation	20
Abbildung 4-9: Genauigkeitsstufen von John Deere	21
Abbildung 4-10: Integrierter Neigungsausgleich (iTC)	22
Abbildung 4-11: Meilensteine der GPS-Spurführung	22
Abbildung 4-12: Gitternetz des DHM	23
Abbildung 4-13: Interpolation und Abstraktion	23
Abbildung 4-14: Theoretisches Variogramm DGM Schlag 1 „Helpter See“	28
Abbildung 4-15: Kenngrößen des Variogramms	28
Abbildung 4-16: IDW-Interpolation	29
Abbildung 4-17: Kriging-Interpolation	29
Abbildung 4-18: Unterschiede zw. den beiden Interpolationen	29
Abbildung 4-19: Absolute Mode (Silo)	31
Abbildung 4-20: Quick Survey Mode	31
Abbildung 4-21: DGM – RTK-GPS	32
Abbildung 4-22: DGM – L1-DGPS	32
Abbildung 4-23: Höhendifferenzen zw. L1-DGPS und RTK-GPS	32
Abbildung 4-24: TRI – RTK-GPS	33
Abbildung 4-25: TRI – L1-DGPS	33
Abbildung 4-26: TWI – RTK-GPS	33
Abbildung 4-27: TWI – L1-DGPS	33

Abbildung 4-28: Vergleich von statistischer GPS-Genauigkeit (24 h Test) mit SF2 und RTK Korrektursignal.....	35
Abbildung 4-29: Positionsunterschiede zum Beitrag des falschen Hebelarms und Spurfehler zwischen SF 2- und RTK-Empfänger	37
Abbildung 4-30: Anteil von positionellen Offsets zwischen SF 2 und RTK	38
Abbildung 4-31: Vertikale Unterschiede bei der Nullgeschwindigkeit (Schlag 1 „Helpter See“)	38
Abbildung 4-32: unterschiedliche Messpunktdichten	39
Abbildung 4-33: Schlag 1 – Helpter See (18 m Arbeitsbreite)	40
Abbildung 4-34: Schlag 2 – Charlies Hütte (36 m Arbeitsbreite).....	40
Abbildung 5-1: ausgewählte hydrologische Parameter	42
Abbildung 5-2: 8 Nachbar-Rasterzellen	44
Abbildung 5-3: Neigung.....	46
Abbildung 5-4: Fliesstrecke mit Flussakkumulation.....	46
Abbildung 5-5: Horizontal-Krümmung.....	46
Abbildung 5-6: Hangneigung beim Schlag 2 – Charlies Hütte.....	47
Abbildung 5-7: Topographischer Wetness-Index ($= \ln(A_s/\tan\beta)$)	48
Abbildung 5-8: Fließstärke Index ($= \ln(A_s*\tan\beta)$).....	48
Abbildung 5-9: Längen-Neigungs-Faktor (LS-Faktor) $= (m+1)*(A_s/22,13)^m*(\sin\beta/ 0,0896)^n$ mit $m=0,4$ und $n=1,3$	48
Abbildung 6-1: Messverfahren mit EM38.....	52
Abbildung 6-2: Leitfähigkeitsmessung mit dem EM38	53
Abbildung 6-3: Bodenscanner der Firma Agri Con	53
Abbildung 6-4: Leitfähigkeitsmessung beim Schlag 2 – Charlies Hütte	54
Abbildung 6-5: Luftbild	56
Abbildung 6-6: TWI - DGM 25	56
Abbildung 6-7: TWI - DGM RTK	56
Abbildung 6-8: normalisiertes TWI – ECa-Verhältnis	57
Abbildung 6-9: Relative Ertragskarte 2006.....	57
Abbildung 7-1: 3D-Modell (Schlag 1 – Helpter See).....	60
Abbildung 7-2: 3D-Modell (Schlag 2 – Charlies Hütte)	61
Abbildung 7-3: Karte über Erosionsgefährte Flächen in Deutschland.....	62
Abbildung 7-4: Flusssituation (Schlag 1 - Helpter See).....	63
Abbildung 7-5: Erosionsvorbeugung (Schlag 1 - Helpter See).....	63

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Vor- und Nachteile der DGM-Erfassungsmethoden.....	11
Tabelle 4-2: Lenksysteme + Informationen	20
Tabelle 4-3: Anwendungsfelder bei entsprechender Genauigkeit.....	21
Tabelle 4-4: Vergleich zwischen den John Deere Genauigkeitsstufen	30
Tabelle 4-5: Arten der RTK-Basisstation.....	31
Tabelle 4-6: Statistik des 24 h Tests vom Starfire iTC-Empfänger mit SF 2 Korrektursignal (n=86,400), 3.12.2007	36
Tabelle 4-7: Statistik des 24 h Tests vom Starfire iTC-Empfänger mit RTK Korrektursignal (n=86,400), 29.11.2007	36
Tabelle 5-1: Reliefparameter (aus: <i>Gebbers und Schmidt, 1999</i>)	43
Tabelle 5-2: Wichtigkeit von ausgewählten Geländeparametern für Ertrag und Boden, modifiziert von <i>Gebbers und Schmidt, 1999</i>	45

Formelverzeichnis

Formel 4-1: IDW-Gleichung	26
Formel 4-2: empirisches Variogramm.....	27
Formel 4-3: empirisches Variogramm.....	27
Formel 6-1: Gleichung Bodenwasserhaushalt.....	50
Formel 6-2: TWI-Gleichung.....	54

Abkürzungsverzeichnis

AMS	Agrar-Management-Systemlösungen
BLUE	Best Linear Unbiased Estimator
C/A	Coarse/Acquisition
D	Diluvial
DGK	Deutsche Grundkarte
DGM	Digitales Geländemodell
DGPS	Differential Global Position System
DHM	Digitales Höhenmodell
DoD	Department of Defense
EM38	Boden-Leitfähigkeitsmessung
EC	Entwicklungsstadium
ECa	Apparent Electrical Conductivity
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
FK	Feldkapazität
GIS	Geografisches Informationssystem
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Position System
GPS III	ohne SA + zwei zusätzliche zivile Signale + höhere Genauigkeit
GS2600	GreenStar 2600
IDW	Inverse Distance Weighted
INS	Inertial Navigation System
iTC	Integrated Terrain Compensation
LIDAR	Light Detection and Ranging
LVA	Landesvermessungsamt
MFD	Multiple Flow Direction
MSAS	Multi-functional Satellite Augmentation System
NAVSTAR	Navigation System with Time And Ranging
nFK	nutzbare Feldkapazität
P/Y	Precision/encrypted
PDOP	Positional Dilution Of Precision

PWP	permanente Welkepunkt
Radar	Radio Detection and Ranging
RTK	Real Time Kinematic
RTK-X	Real Time Kinematic - Extend
SA	Selective Availability
SAR	Synthetic Aperture Radar
SF 1	Starfire 1
SF 2	Starfire 2
STI	Slope Transport-Index
TCM	Terrain Compensation Module
TK	Topographische Karte
TWI	Topographic Wetness-Index
USLE	Universal Soil Loss Equation
UTM	Universale Transversale Mercatorprojektion
WAAS	Wide Area Augmentation System
WGS84	World Geodetic System 1984
X,Y,Z	Breite, Länge, Höhe

1 Einführung

1.1 Ziele und Aufbau der Arbeit

In dieser Bachelorarbeit soll ein Digitales Geländemodell (DGM) erstellt und analysiert werden. Als Erfassungsmethode ist die DGPS-Vermessung mittels parallelem Spurführungssystem der Firma John Deere ausgewählt worden, da es in der Landwirtschaft im praktischen Einsatz die größte Relevanz hat. Mit einem Traktor wird in der Fahrgasse gefahren und ständig werden die aktuellen Höhendaten aufgezeichnet und im Anschluss am Computer ein DGM erstellt. Dabei wurden zwei unterschiedliche Genauigkeitsstufen untersucht, einerseits das RTK-System mit lokaler Referenzstation und andererseits das Starfire 2-System (SF 2) mit Korrektursatelliten. Man spricht auch von einer absoluten und einer relativen Genauigkeit. Des Weiteren wurden zwei unterschiedliche Arbeitsbreiten (18 und 36 Meter) miteinander verglichen, um zu sehen, wie hoch die Qualität des DGMs ist. Das Ziel dieser Arbeit ist es herauszufinden, welches DGPS-System für ein DGM erforderlich ist, um mit den ermittelten Daten eine präzise Aussage tätigen zu können. Zudem werden weitere Karten (Ertrags-, Bodenleitvermögenskarten, etc.) mit dem DGM verglichen und gemeinsam analysiert.

Die computergestützte Nachbildung der Geländeoberfläche wird als Digitales Geländemodell bezeichnet. Ein DGM besteht nach *Bill* (1999) aus dreidimensionalen Koordinaten (x, y, z = Breite, Länge, Höhe). Nach *Kammerer* (1987) ist das DGM eine digitale Speicherung sämtlicher Informationen über die Geländeoberfläche, worin Elemente des Grundrisses als auch Oberflächenformen (Topografie) Berücksichtigung finden. Das DGM soll Nutzern in der Landwirtschaft als Datengrundlage für raumbezogene Managemententscheidungen dienen. In einem geografischen Informationssystem (GIS) wird das DGM dargestellt und die Daten analysiert, sodass es sinnvoll weiter genutzt werden kann. Um ein DGM zu erstellen, ist eine bestimmte Qualität von der Erfassung, Generierung und Analyse dringend erforderlich. Eine hohe Genauigkeit ist notwendig, um Verbindungen zwischen Gelände und Boden zu belegen, da eine vertikale Präzision des interpolierten DGMs von $\pm 0,15$ Metern notwendig ist. Von einem DGM können mehrere Geländeparameter abgeleitet werden, wie z.B. der topografische Nässe-Index oder der Bodensatz-Transportindex (STI). Eine gemeinsame Analyse mit Karten des Boden-Leitvermögens (EC38 – Karten), der Erträge und weiterer Daten wird zur praktischen Wichtigkeit zum Durchbruch verhelfen und dem DGM für die Präzisionslandwirtschaft in Zukunft beitragen. Die lokale Geländeneigung gilt als Maß für die Fähigkeit, eine bestimmte Menge Wasser oberflächlich oder oberflächennah zu bewegen. Aus den primären

Reliefattributen können Indizes abgeleitet werden, die das Potential für die Stärke eines Prozesses beschreiben. Durch das DGM kann ein Muster erstellt werden, wo man die Position der Bodenbereiche analysiert, die zuerst mit Wasser gesättigt sind. Somit kann man den Oberflächenabfluss voraussagen und zugleich den Umfang vom Bodenabtrag prognostizieren. In bestimmten Gebieten, wie z.B. im Naturschutz und in der Landschaftsplanung werden schutzwürdige Bereiche gesucht, die als Landschaftselemente für Ausgleichsmaßnahmen renaturiert werden können. In der Forstwirtschaft kann das DGM durch seine Reliefattribute Neigung und Exposition Anhaltspunkte für geeignete Baumarten geben. In der Landwirtschaft interessiert vor allem die differenzierte Verfügbarkeit von Wasser und Nährstoffen, sodass man den Pflanzenbestand mit räumlich angepassten Maßnahmen präziser führen kann. Seit den 1980er Jahren werden DGMs auch bei der Wertermittlung in der Flurbereinigung eingesetzt. (Stanger, 1982)

1.2 Verwendung vorhandener Informationen zum Digitalen Geländemodell

Hochgenaue Parallelführung und Automatische Lenksysteme sind zunehmend in der heutigen Landwirtschaft gefragt. In Europa sind in den letzten sieben Jahren mehr als 10.000 Zweifrequenz iTC Starfire GPS-Receiver von John Deere verkauft worden. Es gibt heute 25 verschiedene Firmen auf dem Markt die solche Systeme anbieten. Die Vorteile solcher Systeme sind:

- Reduzierung von Arbeitskräftestunden, Maschinenstunden und Kraftstoffverbrauch
- Einsparung von Betriebsmitteln, wie Saatgut, Dünger, Pflanzenschutzmittel, u.v.m.
- Datenaufzeichnung zur Nutzung von Dokumentation und Planung

Neben der Führungsfunktion liefert das GPS gleichzeitig noch die Höheninformation, die man nutzen kann, um an ein hochgenaues Digitales Geländemodell zu kommen. Dieses führt zu keinen weiteren Kosten und kann somit das Precision Farming erweitern. Die Analyse und damit die entsprechenden Vorhersagen eines DGM werden in dieser Arbeit näher erläutert.

2 Versuch zur Erstellung eines Digitalen Geländemodells

2.1 Standort- und Betriebsauswahl

2.1.1 Auswahlkriterien

Für den Versuch mussten zwei Versuchsflächen mit gewissen Kriterienpunkten ausgewählt werden. Diese Auswahlpunkte waren ein relativ stark kopiertes Gelände, unterschiedliche Arbeitsbreiten, Befahrbarkeit und ein bereitwilliger Betrieb. Der Ansprechpartner von John Deere Herr Cornelius Donath hatte solch einen Betrieb in der Nähe der Hochschule Neubrandenburg gefunden.

2.1.2 Betriebsspiegel

Die Betriebsgemeinschaft Groß-Miltzow, Dorfstraße 50 a, 17349 Pasenow war als geeigneter Betrieb ausgewählt worden. Dessen Standort befindet sich im südlichem Mecklenburg-Vorpommern, genauer gesagt im Landkreis Mecklenburg-Neustrelitz (Abbildung 2-1). Der Betrieb ist ein Gemischtbetrieb mit einer Pflanzenproduktion von 1660 ha landwirtschaftliche Nutzfläche und einer Tierproduktion mit einem Gesamtrinderbestand von 848 Tieren (Schwerpunkt Milchproduktion). Als Hauptfruchtarten werden Winterweizen (680 ha), Wintergerste (70 ha), Winterraps (336 ha), Silomais/Lieschkolbenschrot (363 ha), Zuckerrüben (60 ha) und Sonstiges (152 ha) angebaut. Die durchschnittliche Bodenpunktezahln beträgt 50 und die Niederschläge im langjährigen Mittel liegen bei 550 mm im Jahr.

Zudem besitzt der Betrieb fast ausschließlich John Deere Technik und wird auch von der Firma John Deere als Testbetrieb in Anspruch genommen. Zwei Traktoren und ein Häcksler sind mit dem automatischem Lenksystem Auto-Trac von John Deere ausgerüstet.

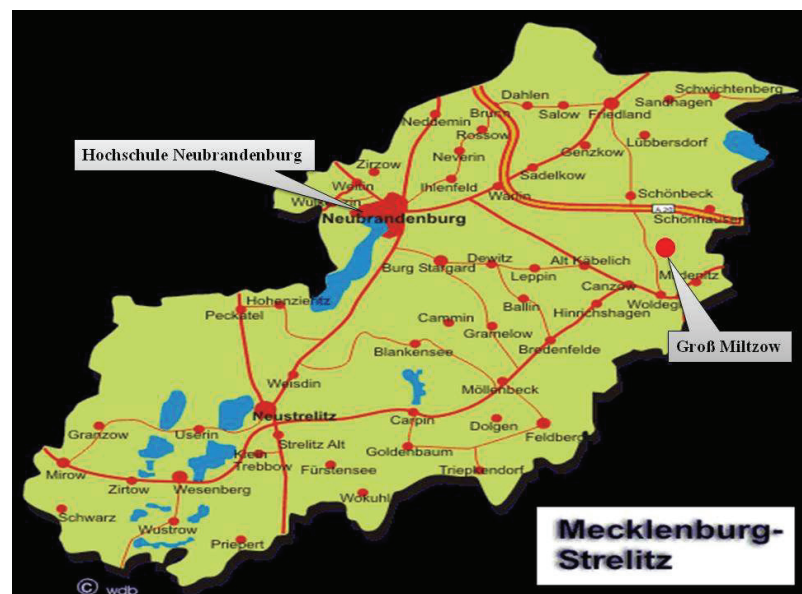


Abbildung 2-1: Lage der Versuchsflächen und der Hochschule Neubrandenburg

Quelle: Landkreis Mecklenburg-Strelitz

2.1.3 Versuchsflächen

Das Versuchsgebiet liegt in den Helpter Bergen ca. 6 km nordöstlich von Woldegk. Die Helpter Berge erreichen eine Höhe von +179 m NN und stellen damit die größte Erhebung in Mecklenburg-Vorpommern dar. Geologisch gesehen sind die Helpter Berge inmitten einer weiten Grundmoränenfläche, die nördlich der Pommerschen Hauptendmoräne der Weichsel-Eiszeit liegen. Sie ragen aus der Grundmoräne heraus und übertreffen in ihrer Höhe die Endmoräne (Stauchwälle). Die geologische Entstehung ist gekennzeichnet durch diluviale Böden (D), d.h. es sind pleistozäne und andere Lockersedimente mit Ausnahme des Lösses. Der Standorttyp ist ein D 5 b der von stau- und grundwasserbestimmten Lehmen und Tieflehmen geprägt ist. Als Bodenart ist auf beiden Schlägen ein stark sandiger Lehm (SL) mit einer Punktezahl von ca. 50 Bodenpunkten vorhanden, somit ein mittelschwerer Boden.

Die beiden Versuchsflächen (Abbildung 2-2 u. Abbildung 2-3) haben jeweils eine Größe von ca. 37 Hektar und weisen Höhenunterschiede von bis zu max. 34 Metern in einem Schlag auf.

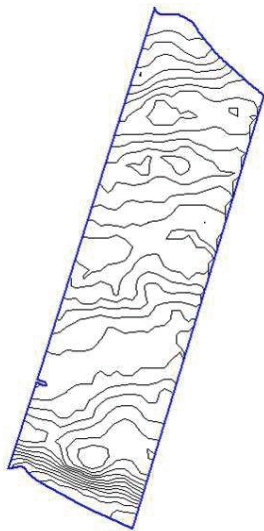


Abbildung 2-2: Versuchsschlag 1 „Helpter See“
Darstellung der 1 m-Höhenlinien.

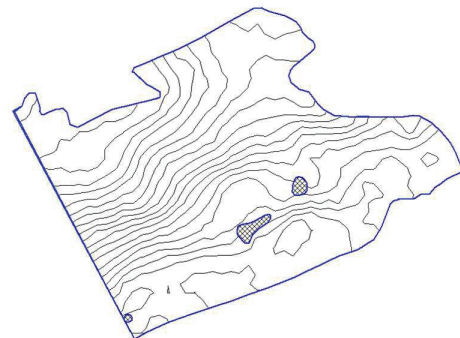


Abbildung 2-3: Versuchsschlag 2 „Charlies Hütte“
Darstellung der 1 m-Höhenlinien.

2.2 Versuchstechnik

Die Versuchstechnik stellte die Firma John Deere, weil das Projekt in Zusammenarbeit mit Herrn Dr.-Ing. Grenzdörffer (wissenschaftlicher Mitarbeiter der Uni Rostock in den Bereichen Fernerkundung und Precision Farming) erstellt wurde. Zum Einsatz kam ein John Deere Traktor 7930. Zum Vermessen wurde einiges an GPS-Technik benötigt, wie zwei iTC Starfire GPS-Receiver, einer mit RTK-Radioantenne, die auf dem Traktordach befestigt wurden. Die

beiden GPS-Receiver benötigten jeweils einen Kabelbaum und einen eigenständigen Touchscreen Display GS2600. Als Letztes ist die mobile RTK-Basisstation zu nennen, die aus einem Dreibock-Stativ, einen Kabelbaum und einen iTC Starfire GPS-Receiver + RTK-Radioantenne besteht. Zur Stromversorgung der mobilen RTK-Basisstation benötigt man noch eine 12 Volt Batterie, gegeben falls ein Autoanschluss.

Die GPS-Technik wurde am 11.04.2008 beim John Deere Händler Peter Clausen Landtechnik GmbH in Schenkenberg (Kleptow) zusammen mit Herrn Christopher Ströbele (AMS-Spezialist) und Herrn Cornelius Donath (AMS-Produktspezialist) am Traktor installiert. Dabei wurden die GPS-Empfänger auf dem Dach montiert und die aktuellste Software auf den Terminals eingerichtet. Um die jeweiligen Genauigkeitsstufen bekommen zu können, bedurfte es einer Aktivierung der Technik von der Firma John Deere. Es wurden zwei unterschiedliche Genauigkeitsstufen verwendet, zum einen RTK mit lokaler Basisstation mit einer Genauigkeit von 1 - 2 cm und Starfire 2 mit einer Genauigkeit von 5 - 10 cm. Die lokale Basisstation musste auf Schnell-Einmessung (15 Minuten) eingestellt werden, damit man sie am Rand des Feldes platzieren konnte, um somit eine mobile Referenzstation zu haben. Der Versuchsbetrieb hatte nämlich keine fest installierte RTK-Basisstation, da dieser mit SF 2 fährt, also mit Korrektursatelliten. Nach Aufbau der GPS-Technik wurden alle Einheiten auf Funktionsweise getestet. Die eingesetzte GPS-Technik hatte einen Warenwert von ca. 30.000 €, die von John Deere Deutschland zur Verfügung gestellt wurde.

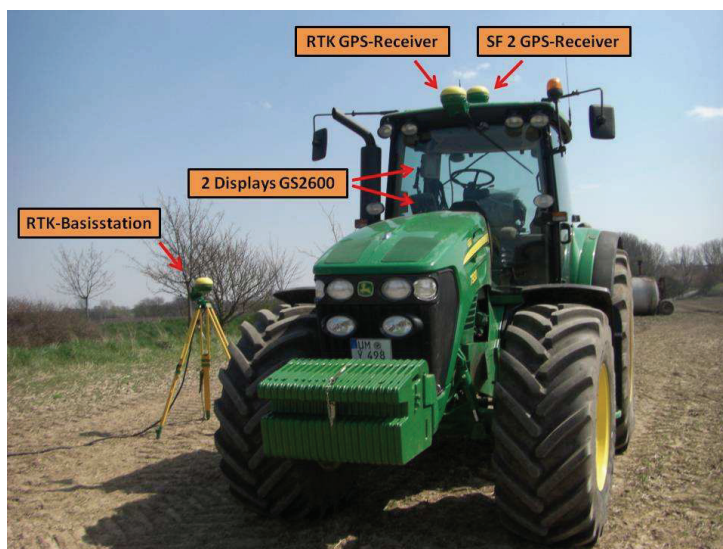


Abbildung 2-4: Traktor John Deere 7930 + GPS-Technik

2.3 Versuchsvorbereitung

Software JD-Office

Die Firma John Deere hat zusammen mit dem Unternehmen Land-Data Eurosoft das Computerprogramm JD-Office entwickelt. Das Programm dient dazu, um das GIS- und Managementsystem vom Betrieb verwalten zu können. Insbesondere die teilflächenspezifische Bearbeitung und Informationsquellen (Dokumentation von Arbeiten) stehen hier im Vordergrund. Des Weiteren kann man alle betriebsindividuellen Aufgaben verwalten, wie z.B. Auftragsverwaltung, grafische Flächenverwaltung, Rechnungswesen, Viehhaltung, etc. Das JD-Office Programm ist Grundlage für die Dokumentation der gefahrenen Spuren und somit für die erforderlichen Höhendaten. Zur Erstellung des DGMs und weitere Auswertungen der gewonnenen Daten kommt ein spezielles geostatistisches Programm zur Anwendung. Zudem betreut das Unternehmen Land-Data Eurosoft alle Kunden, die diese JD-Office Software erworben haben und damit arbeiten.

Der Versuchsbetrieb stellte seine Betriebsdaten zur Verfügung und somit waren die Vermessungsdaten der beiden Versuchsschläge vorhanden. Zunächst erstellte man einen Auftrag für die jeweilige Arbeit (Abbildung 2-5), beim Versuch war es die Höhenvermessung, sonst z.B. Pflanzenschutz, Aussaat, etc. Dieser Auftrag wird auf eine Compact-Flash Karte geschrieben, die ins GS2600 Terminal gesteckt wird, das jeweils zweimal für beide Terminals.

Auftrag Höhenvermessung

Ausdruck vom: 24.04.2008 Für den Mandant "Betriebsgemeinschaft Groß - Miltzow" Seite: 1

Datum	Arbeitsart/Verfahren	Maßnahmefläche
24.04.2008	Höhenvermessung	36,7600 ha

Bearbeitungsfläche(n) / Schläge

Schlagnummer	Schlagbezeichnung	Schlagfläche	Fruchtart	Mandant
2 - 0	BH: Charlies Hütte	36,7600 ha	Winterweizen	Betriebsgemeins

Arbeitskräfte

Name	Personalnummer	Arbeitszeit
Ullrich, Stefan	1	

Maschinen / Geräte

Bezeichnung	Arbeitsbreite	Arbeitstiefe	Gerätetyp
John Deere 7930	36,00 m	0,00 cm	

Abbildung 2-5: Arbeitsauftrag vom Schlag „Charlies Hütte“

Auf den Terminals muss man folgende Parameter auswählen: Betrieb, Mandat, Schlag, Maßnahme und Arbeitskraft, um den gewünschten Schlag aufzurufen. Erst dann sieht man den ausgewählten Schlag grafisch auf dem Display (Abbildung 2-6), sogar mit Hindernissen, wie z.B. Sölle.

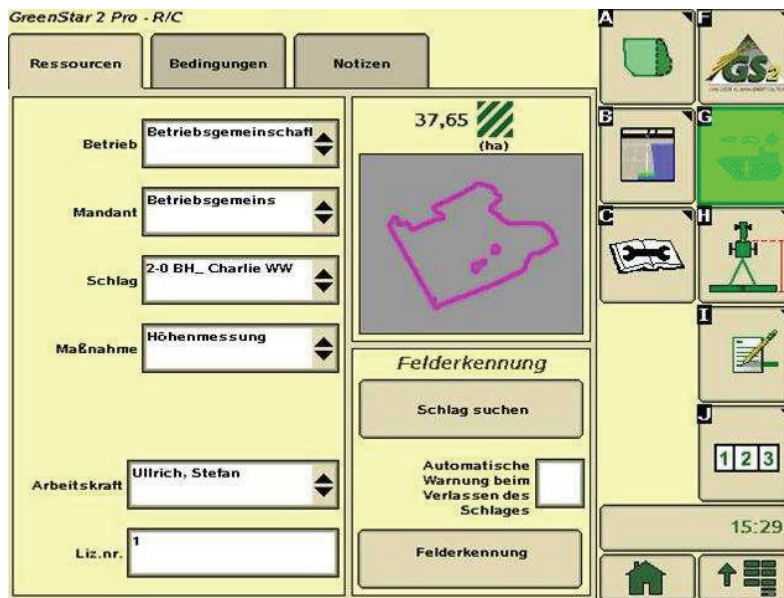


Abbildung 2-6: Ansicht vom GreenStar 2600 Display mit Grafik (Schlag mit Hindernissen)

3 Versuchsdurchführung

Verlauf

Der Versuch zur Aufzeichnung der Höhendaten für ein DGM mittels Parallelem Spurführungssystem fand am 24. April 2008 bei Groß-Miltzow statt. Durch den feuchten Winter verzögerte sich der Versuch, da die Flächen vorher nicht befahrbar waren. Es wurden zwei Flächen jeweils von einer Größe von ca. 36 Hektar befahren. Der Unterschied der beiden Flächen bestand darin, dass sie ein unterschiedliches Relief aufwiesen und das unterschiedliche Arbeitsbreiten vorhanden waren.

Zuerst musste man die RTK-Basisstation am Feldrand aufbauen. Diese mobile RTK-Basisstation steht auf einen Dreibock-Stativ und der GPS-Receiver wurde über einen Zigarettanzünderanschluss eines Autos mit Strom versorgt. Anschließend stellte sich die Basisstation nach 15 Minuten selbstständig ein, d.h. der GPS-Receiver sucht Satelliten und bestimmt seine genaue geographische Position. Währenddessen wurde auf den Terminals der jeweilige Versuchsschlag ausgesucht und kontrolliert, ob der Empfang zu den Satelliten und zur RTK-Basisstation in Ordnung war.

Auf dem ersten Schlag „Helpter See“ war das Feld noch nicht bestellt und somit konnte man eine Arbeitsbreite von 18 Meter untersuchen. Denn der Versuchsbetrieb arbeitet üblich mit 36 Metern Arbeitsbreite. Der eingesetzte Traktor John Deere 7930 war nicht für die automatische Lenkung vorbereitet gewesen, d.h. es waren keine Lenkwinkelsensoren und keine Steuerventile an den Lenkzylindern vorhanden. Somit wurde mit dem manuellen Parallelführungssystem über das GS2600 Display gelenkt und die Arbeitsbreite von 18 Metern eingehalten. Bevor losgefahren wurde, musste man auf den Displays nur noch eine Taste bestätigen, um die Aufzeichnung zu starten. Die Fahrgeschwindigkeit betrug zwischen 20 bis 26 km/h und an den Vorgewenden wegen des Lenkmanövers wurde etwas langsamer gefahren. Die RTK-Basisstation sollte immer Sichtkontakt zum GPS-Empfänger des Traktors haben. Dies war einige Male nicht der Fall, weil am Ende des Schlages ein Höhenunterschied von max. 24 Metern vorhanden war. Somit war eine Abschattung vorhanden und die Verbindung zur RTK-Basisstation brach ab. Durch gespeicherte Daten des RTK-Signals kann man max. 15 Minuten mit unwesentlich geringerer Genauigkeit weiterarbeiten. Dies wird auch als RTK-X (Extend) bezeichnet, das auch beim Versuch tadellos funktionierte. Nachdem die ca. 36 Hektar abgefahren waren, bestätigte man ein zweites Mal die Taste, um die Aufzeichnung zu

beenden. Für den Schlag „Helpter See“ mit einer Arbeitsbreite von 18 Metern wurde eine Versuchszeit von 1:45 Stunde gebraucht.

Der zweite Versuchsschlag „Charlies Hütte“ war mit Winterweizen bestellt und hatte eine Arbeitsbreite von 36 Metern. Durch die sichtbaren Fahrgassen brauchte man das parallele Spurführungssystem nicht anwenden. Die Abläufe zur Aufzeichnung der Höhendaten auf den Terminals erfolgten wie beim ersten Versuchsschlag. Die benötigte Zeit für den zweiten Versuchsschlag war geringer (1:05 Stunde), da man eine größere Arbeitsbreite hatte.

4 Methoden zur Erstellung eines Digitalen Geländemodells

4.1 Methoden zur Erfassung von DGMs

4.1.1 Übersicht der Methoden

Es gibt in der heutigen Zeit mehrere Verfahren zur digitalen Erfassung von Höhendaten. Unterschieden werden diese Verfahren einerseits in terrestrische Vermessung und andererseits in Fernerkundungsverfahren. Diese unterscheiden sich besonders in Hinblick auf die Ökonomie, genauer gesagt, der Abhängigkeit vom Zielmaßstab, der geforderten Höhengenaugigkeit und der Größe des Bearbeitungsgebietes.

Die erste Methode von sieben möglichen, ist die Digitalisierung von topographischen Karten. Sie wird als sekundäres Verfahren betrachtet, da sie auf einen bestehenden Datenbestand beruht. Dabei werden topographische Karten in verschiedenen Maßstäben DGK 5 (1:5.000), TK 10 (1:10.000) und TK 25 (1:25.000) untersucht und in ein DGM umgewandelt.

Als nächste folgt die Tachymetrie, d.h. es ist eine Schnellvermessung von Geodäten. Mit Hilfe eines Tachymeters können Strecken, Horizontal- und Vertikalwinkel vom Instrumentenstandpunkt aus gemessen werden (*Resnik und Bill, 2000*). Durch einen elektronischen Winkel- und Distanzmesser ist ein rasches Erfassen mit automatischer Auswertung von x,y,z-Koordinaten möglich. Durch gesendete elektromagnetische Messwellen, die durch Reflexion von einem Prisma zurückgestrahlt werden, sowie der dazu erfassten Ausbreitungsgeschwindigkeit kann die Distanz ermittelt werden. Es ist eine ständige Sichtverbindung zwischen Station und Zielpunkt zu gewährleisten.

Bei der Photogrammetrie werden Luftbilder von Flugaufnahmen verwendet. Man kann aus zwei Bildern, die aus unterschiedlichen Richtungen aufgenommen wurden, eine dreidimensionale Form eines Objekts durch Stereomessung ableiten. So kann man aus 1000 Metern Flughöhe Höhenunterschiede von 20 cm sicher erkennen und zusätzlich sichtbare Objekte bis auf 10 cm genau vermessen. Der Hauptlieferant von DGMs sind aber immer noch topographische Karten, die aus jahrelangen Luftbildauswertungen erstellt wurden (*Kraus, 2000*).

Der Stereo-Zeilenscanner funktioniert ähnlich wie die Photogrammetrie. Dabei wird mit einem optoelektronischen Stereo-Multispektralscanner (Kamera) gearbeitet. Die Aufnahme erfolgt kontinuierlich für vorwärtsblickende, senkrecht nach unten blickende und rückwärts blickende Zeilensensoren vom Flugzeug aus. Das Flugzeug wird mit DGPS koordinatenmäßig erfasst, um seine jeweilige Position zu bestimmen.

Die Vermessung mit Radar kann über Satelliten, aber auch mit flugzeuggetragenen Systemen erfolgen. Zum Einsatz kommt das Radar mit synthetischer Apertur (SAR), das zur Klasse der abbildenden Radare gehört. Es liefert eine 2-dimensionale Darstellung durch Abtastung der Erdoberfläche mit elektromagnetischen Wellen. Die erzeugten SAR-Abbildungen haben eine große Ähnlichkeit mit photographischen Aufnahmen und sind somit relativ leicht zu interpretieren. Es werden Strahlen aussendet und das diffuse Rückstrahlsignal wird durch Antennen am Flugzeug bzw. Satellit empfangen. Dabei ist das Entscheidende der Weg vom gesendeten Strahl zum empfangenden Strahl, weil sich der Blickwinkel verändert.

Das GPS-RTK und Laserscanning per Flugzeug werden in den zwei folgenden Gliederungspunkten näher erläutert, da sie die größte Relevanz in der heutigen Landwirtschaft haben.

Tabelle 4-1: Vor- und Nachteile der DGM-Erfassungsmethoden

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)
Photogrammetrie	Routineverfahren, je nach Flugparameter hohe Genauigkeit möglich	Hohe Kosten bei neuer Messkampagne
Stereo-Zeilenscanner	Vollautomatische Auswertung, Genauigkeit von Flughöhe abhängig	Hohe Kosten bei neuer Messkampagne
Radar (SAR)	Messkampagne kaum von Bewölkung beeinflusst, geringere Systemkosten als Laserscanning	geringere Genauigkeit im Vergleich. zu Laserscanning, Abschattung an Waldrändern
RTK-GPS	Hohe Genauigkeit, flexibler Einsatz für neue Messkampagnen, niedrige Kosten, durch Befahrung realisierbar	Störung des Satellitenempfangs und der Telemetrierbindung bei Abschattungsbedingungen
Laserscanning per Flugzeug	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)

Quelle: Frank Schmidt (Dissertation - Hochgenaue Digitale Geländemodelle)

4.1.1.1 RTK-GPS

Zur heutigen Ortsbestimmung und Navigation nutzt man das Global Positioning System (GPS) in vielen Bereichen, z.B. Bodenprobenentnahme, Bonitierungen, Routenplanung und Flottenmanagement, Vermessung, exaktes Anschlussfahren oder Fahrspuraufzeichnung zur Dokumentation.



Abbildung 4-1: AutoTrac

(Quelle: John Deere)

Das amerikanische GPS-System NAVSTAR besteht aus einer Anzahl von 27 Satelliten und steht der ganzen Welt zur Verfügung. Die Satelliten umkreisen auf sechs Bahnebenen in einer Höhe von 20.183 km einmal die Erde innerhalb von zwölf Stunden. Kontinuierlich, also jede Sekunde werden Signale von den Satelliten ausgesendet. Um die Position zu bestimmen, werden die Satellitensignale von GPS-Empfängern empfangen, diese messen die Laufzeitdifferenz und ermitteln daraus ihre eigene Position. Die eigentliche Entfernungsmessung erfolgt durch die Messung der Laufzeit eines Signals vom Satelliten zum GPS-Empfänger. Dabei wird gleichzeitig im Satellit und Empfänger ein Pseudo-Zufallscode mit einer Wiederholungsrate von 1 msec erzeugt. Der Zeitunterschied von der Erzeugung des Codes im Empfänger bis zum Eintreffen desselben Codes vom Satelliten ergibt die zeitliche Entfernung, multipliziert mit der Lichtgeschwindigkeit die räumliche Entfernung. Für die dreidimensionale Positionsbestimmung sind vier Satelliten in der Praxis erforderlich. Der vierte Satellit dient zur Synchronisierung der Bodenuhr des GPS-Empfängers. Alle Satellitenuhren dürfen nicht mehr als 30 nsec voneinander abweichen, um Genauigkeiten von ± 10 m zu erreichen. Dies ist nur möglich durch hochgenaue Atomuhren in allen Satelliten. In der Regel stehen sechs bis acht Satelliten zur Verfügung, sodass auch eine höhere Genauigkeit erzielt werden kann.

Das gesendete GPS-Signal besteht aus modulierten elektromagnetischen Wellen auf zwei Trägerfrequenzen L1 und L2, die im Mikrowellenbereich gesendet werden. Die erste Frequenz L1 (1575,42 MHz) sendet einen sogenannten C/A-Code (Coarse/Acquisition), der folgende wichtige Informationen des jeweiligen Satelliten enthält: Datum, Uhrzeit, Identifikationsnummer, Korrekturen, Bahnen und den Zustand. Auf der zweiten Frequenz L2 (1227,60 MHz) wird ein P/Y-Code (Precision/encrypted) übertragen. Somit können ionosphärische Effekte, die zur Erhöhung der Laufzeit führen, heraus gerechnet werden und somit die Genauigkeit gesteigert.

Die Genauigkeit von GPS-Messungen ist auch von Fehlerquellen abhängig, die unterteilt werden in Bahnfehler, Ausbreitungsfehler und Empfängerfehler von *Resnik und Bill* (2000). Die Bahnfehler sind heute kaum noch vorhanden. Dabei handelt es sich um Sicherungsmaß-

nahmen vom amerikanischen Verteidigungsministerium (DoD), wie z.B. die Verschlüsselung des P-Codes, die im Mai 2000 abgeschaltet wurden. Durch Selective Availability (SA) wurden die übertragenden Bahndaten künstlich verschlechtert und das Signal der Atomuhren destabilsiert. Zu den äußeren Einflüssen gehören die Ausbreitungs- und Empfängerfehler. Ausbreitungsfehler entstehen durch verschiedene Schichten der Atmosphäre. So müssen in der Ionosphäre die ausgesandten Signale vom Satelliten Schichten ionisierter Gasatome durchqueren, wodurch die Ausbreitungsgeschwindigkeit dieser Signale gehemmt wird. Ionenkonzentration ist kein konstant kalkulierbarer Faktor, sondern hängt stark von der Jahreszeit, der Tageszeit, der Sonnenaktivität, der geographischen Breite und von der Höhe und Richtung des Satelliten ab. Beim Zweifrequenz-Empfänger (Trägerwelle L1 und L2) kann der Einfluss der Ionosphäre kompensiert werden. In der Troposphäre sind die bisher genannten Fehler nicht vorhanden, da sie frequenzunabhängig ist und durch ein Modell erfasst wird. Am stärksten sind die Satelliten durch Ausbreitungsfehler betroffen, wenn sie niedrig über dem Horizont stehen, weil sie dann den weitesten Weg zum Empfänger haben. Zu den Empfängerfehlern zählen die Uhr und das Antennenphasenzentrum. Die Satellitensignale können durch Ref-

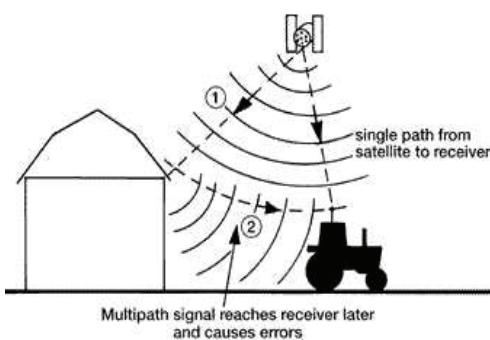


Abbildung 4-2: Multipath-Fehler

lektion von nahe gelegenen Gebäuden, Bäumen, Wasseroberflächen, Topografie usw. durch Mehrwegausbreitung die Signalqualität maßgeblich verschlechtern. Dieser Effekt wird auch als Multipath (Abbildung 4-2) bezeichnet. Durch spezielle Antennen oder durch eine geeignete Wahl des Antennenstandortes kann dieser Multipath-Effekt reduziert oder ganz vermieden werden.

Des Weiteren gibt es noch andere Fehler, wie der Ephemeridenfehler, der geringfügige Abweichungen von der vorausgerechneten zur tatsächlichen Umlaufbahn der Satelliten beschreibt. Zur Genauigkeit der Uhren in den Satelliten ist zu erwähnen, dass die hochpräzisen Atomuhren auch nicht frei von Abweichungen sind. Die Geometrie der Satellitenposition beeinflusst die Qualität des ermittelten Empfängerstandortes. Dafür gibt es einen PDOP-Wert (Positional Dilution of Precision), der die Geometrie der Empfänger-Satelliten-Konfiguration darstellt. Ein niedriger PDOP-Wert stellt eine optimale Geometrie dar. Als letzte Fehlerquelle ist die Abschattung der Signale durch Horizontüberhöhung nicht zu vernachlässigen. Eine Abschattung tritt beispielsweise unter einer überhängenden Felswand, unter dicht belaubten

Bäumen usw. auf. Dadurch wird der Empfang von mindestens vier Satellitensignalen erschwert und eine genaue Positionsbestimmung kaum möglich.

Zur Darstellung der GPS-Position auf einer Karte ist ein rechtwinkliges Koordinatensystem im metrischen System erforderlich, wie z.B. das UTM-Koordinatensystem (Universale Transversale Mercatorprojektion), Gauss-Krüger-Netz oder sonstige. Als weltweit verwendete kartesische Koordinatenausgabe werden x,y-Koordinaten (Breite, Länge) zur Ortsbestimmung genutzt und zusätzlich die z-Koordinate als Höheninformation. Eine GPS-Positionsmessung erfolgt im geozentrischen Bezugssystem WGS84 (World Geodetic System 1984).

Es gibt schon seit den 1990er Jahren das Verfahren des differentiellen GPS (DGPS), das die größten Fehlerquellen eliminiert und somit eine höhere Genauigkeit je nach Ausstattung des Empfängertyps zwischen 3 m und 0,01 m erreicht. Dieses Verfahren basiert darauf, dass die meisten Fehlereinflüsse von zwei GPS-Empfängern in geringer Entfernung die gleichen Abweichungen verursachen. Vor allem betrifft dies die Bahn- und Ausbreitungsfehler. Hierbei sollte bei einem Empfänger der Standort (z.B. durch einen Festpunkt der Landesvermessung) bekannt sein. Dadurch kann über die Differenz der Positionsmessung auf dem Feld und dem bekannten Standort der Wert des anderen korrigiert werden. Je weiter die beiden Stationen voneinander entfernt sind, umso geringer wird die Genauigkeit. Als Offline-Methode bekannte „post-processing“ erfolgt eine nachträgliche Auswertung aller aufgezeichneten Satellitenbeobachtungen, die durch weitere Positionsdaten zur Verbesserung der Genauigkeit führen können. Hierbei können aber keine Steuerungs- und Regelungsaufgaben im Gegensatz zum Online-Verfahren erfüllt werden. Zweifrequenz-Empfänger werden eingesetzt, um die Dauer für die Initialisierung zu Beginn der Vermessung bzw. bei Verlust der Mehrdeutigkeitslösungen zu verkürzen. Bei der Ortung von bewegten Objekten (z.B. Mähdrescher) fand *Jurisch* (1998) Genauigkeiten eines Zweifrequenz-Empfängers von $\pm 0,01$ m in der Lage und $\pm 0,02$ m in der Höhe heraus. Wird bei einem sich bewegendem Empfänger (z.B. Traktor) die Korrektur in Echtzeit übermittelt und somit die schlussendliche Punktkoordinate im Feld erzeugt (Abbildung 4-3), bezeichnet man das als RTK-System (Real Time Kinematic).

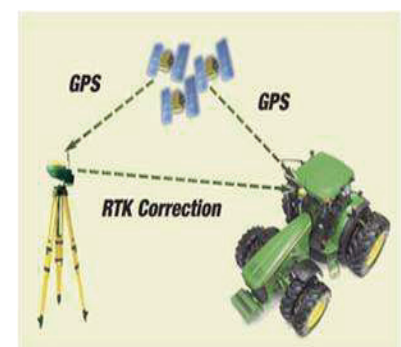


Abbildung 4-3: RTK-GPS System
(Quelle: John Deere)

Bei dem RTK-GPS ist eine ständige Funksignal-Verbindung zwischen der Referenzstation und dem mobilen GPS-Empfänger notwendig. Die Referenzstation kann mobil am Feldrand stehen oder fest an einem bestimmten Punkt (Bsp. hoch oben an einem Silo) befestigt sein.

Die Reichweite einer eigenen fest installierten RTK-Basisstation beträgt bis zu 10 km im Radius bei keinen Hindernissen, wie Topografie oder Wälder. Ebenso ist der Empfang von Korrektursignalen über kommerzielle geostationäre Satelliten möglich. Einige DGPS-Dienste sind im Zentimeterbereich verfügbar. In Deutschland ist keine flächendeckende Verfügbarkeit des Services von hochpräzisen Echtzeit-Positionierungen vorhanden. Der Satelliten-Positionierungsdienst SAPOS, eine Arbeitsgemeinschaft der deutschen Landesvermessung stellt mehrere Korrekturdienste als Service kostenpflichtig zur Verfügung. Derzeit sind über 200 SAPOS-Referenzstationen in ganz Deutschland in Betrieb (*Hankemeier et al., 1998; Bauer, 2001*).

Außer dem NAVSTAR-GPS-System gibt es das russische GLONASS (Global Navigation Satellite System), das aber nicht als zuverlässig angesehen wird, da schon einige Satelliten ausgefallen sind. Mehrere GPS-Empfänger können die vorhandenen Satelliten zusätzlich zu den NAVSTAR-Satelliten nutzen. Im Jahre 2003 entschied sich die Europäische Union für ein eigenes GPS-System namens GALILEO. Dieses GPS-System soll aus 30 Satelliten bestehen, sodass eine deutlich verbesserte GPS-Signal-Abdeckung mit einer Verfügbarkeit von jederzeit bis zu 15 Satelliten erreicht werden soll. Galileo soll ab 2010 (GPS III) mit dem modernisierten NAVSTAR-GPS-System kompatibel sein. Der Nachteil des neuen europäischen System ist, das trotz dieser Kompatibilität die heutigen normalen GPS-Empfänger nicht für das zukünftige satellitengestützte Navigationssystem Galileo genutzt werden können. Der Endausbau von Galileo ist für das Jahr 2013 geplant. Die USA will bis zum Jahr 2014 ihr bereits einsatzfähiges GPS durch eine neue Generation ersetzen, das sogenannte GPS III. Dabei werden Satelliten ohne Selective Availability verwendet, um die Verlässlichkeit des Systems zu verbessern. Aber vor allem sollen zwei zusätzliche zivile Signale dazu kommen und die Genauigkeit des Systems erhöht werden. Die Erneuerungskonzepte von GPS beinhalten die Sendung des C/A-Codes auch auf der L2-Träger-Frequenz und die Einrichtung eines weiteren zivilen Signals (L5).

4.1.1.2 Laserscanning per Flugzeug

Das flugzeuggestützte Laserscanning Messverfahren (Abbildung 4-4) wird auch als LIDAR bezeichnet. Schon seit einigen Jahren wird dieses Messverfahren erfolgreich zur Erstellung von DGMs getestet. Einige Unternehmen bieten dieses Verfahren auch als Dienstleistung an. Beim Laserscanning wird die Geländeoberfläche bei einer Befliegung raster- bzw. streifenartig mit einem Laser-Impuls (Infrarot-Bereich) abgetastet, um diese zu vermessen, zu bearbeiten und ein Bild zu erzeugen. Genauer gesagt wird der Laserimpuls von der Erdoberfläche

und Objekten, wie z.B. Gebäuden, Autos, Bäumen usw. reflektiert. Durch den Empfang des reflektierten Strahles wird die Entfernung zwischen dem Laser und der Geländeoberfläche bestimmt. Über GPS/INS werden die Flugbahnen bestimmt. Die Höhengenaugigkeit beträgt $\pm 0,15$ Meter in freier Feldflur bei Bewegtheit des Geländes (Gomes Pereira und Janssen, 1999; Briese und Pfeifer, 2001; Favey, 2001). Bei den heutigen Laserscannern besteht noch ein Forschungsbedarf und zwar bei der Nutzung der Intensität des rückgestrahlten Signals der Oberfläche. So werden Signale durch verschieden Oberflächen unterschiedlich stark reflektiert, z.B. Sand etwa 10-20 %, Vegetation 50 % und Schnee 80 % (Wever und Lindenberger, 1999). Vor allem bei klaren Wasseroberflächen werden die Infrarotstrahlen absorbiert und können kein Signal zurückstrahlen. Der Laserscanner ist am Flugzeug befestigt und kann bei einer Flughöhe von bis zu 2000 m arbeiten, aber nur bei wolkenfreier Sicht. Dabei wird eine Genauigkeit in der Lage bis zu $\pm 0,5$ m und in der Höhe bis ± 15 cm erreicht. Weitere Vorteile sind die hohen Punktdichten von bis zu 5 Punkten pro m^2 , die Geländeerfassung unter lichter Vegetation (Bewaldung) und der Vorteil unabhängig vom Tageslicht zu sein. Durch die hohe Dichte von Messpunkten ist keine Interpolation über mehrere Meter mehr erforderlich.

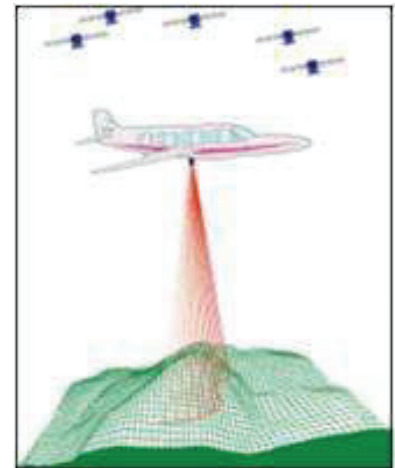


Abbildung 4-4: Schematische Darstellung des Messprinzips

(Quelle: TopScan GmbH)

Dieses Messverfahren hat relativ hohe Fixkosten durch die Befliegung der Flächen und ist daher im Vergleich zu terrestrischen Verfahren (RTK-GPS) für Flächen besonders im regionalen Maßstab wirtschaftlich. Der Preis pro km^2 liegt bei 145,00 – 185,00 € je nach Größe der Gesamtfläche (Daten mit höchster Punktdichte). Bei einem Höhengitter-Punkteabstand von 5 – 10 m würde der Preis von 35 – 65 € pro km^2 schwanken (TopScan GmbH, 2003). Das Laserscanningverfahren findet heutzutage im Auftrag der Landesvermessungsämter statt. Als entscheidender Faktor spielt die Auflösung des Rasters eine wichtige Rolle, um eine bessere Qualität von einem DGM zu bekommen. Ältere TK-Karten gingen bis zu einem Maßstab von 1:25.000, heute ist die Basis ein DGK 5 (Maßstab von 1:5.000).

In dem Verbundprojekt „preagro“ (gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung) ist ein Laserscanning-DGM von der Firma TopScan erstellt worden. Im Anschluss wurde es mit einer RTK-GPS-Vermessung verglichen. Damit waren 99% der Differenzen von rund 20.000 Messpunkten im Bereich von ± 10 cm. Somit betrug die Standardab-

weichung der Differenzen beider Verfahren 3,8 cm und somit weniger als die angegebene Differenz bei der Höhengenaugigkeit der beiden Verfahren.

4.1.2 Zusammenfassung Erfassungsmethoden

Von den insgesamt sieben vorgestellten Erfassungsmethoden zur Erstellung von DGMs sind für die landwirtschaftliche Praxis zwei Verfahren sehr gut geeignet. Zum einen das RTK-GPS, das ein Betrieb selbst mit eigener Technik durchführen kann oder auch als Dienstleistung mit anschließender Auswertung in Anspruch nehmen kann. Das zweite Verfahren zur Erstellung von nutzbaren DGM ist das Laserscanning per Flugzeug. Hierbei ist der Nachteil der hohen Fixkosten zu beachten, sodass sich dieses Verfahren eher für einen regionalen Maßstab rechnet und durch die Landesvermessungsämter (LVA) bereitgestellt werden sollte. Derzeit werden aber von den LVA die Kriterien der angebotenen Modelle nicht erfüllt, auch die auf Basis der Topographischen Karten beruhen sind bearbeitungsbedürftig. Denn dort liegt die Relieferfassung meist 30 – 60 Jahre zurück und somit ist eine erforderliche Qualität von DGK 5 nicht gegeben. Trotz des hohen Alters und schlechter Auflösungen lassen sich solche Karten aber nach Bearbeitung auch für DGM nutzen, indem Kontrollmessungen erforderliche stattfinden. Als preisgünstigste Variante ist den landwirtschaftlichen Betrieben eine DGM-Neuerfassung mit RTK-GPS zu empfehlen.

4.1.3 Vorteil von GPS in der Landwirtschaft

Das GPS hat seit einigen Jahren eine weite Verbreitung in der Landwirtschaft gefunden und wird heutzutage zunehmend nachgefragt. Bei ständig steigenden Betriebsmittelkosten überdenken viele Landwirte, wie sie diese Kosten minimieren können, um so wirtschaftlicher zu arbeiten. Dabei bietet die Technik viele Möglichkeiten und ein dementsprechendes Einsparpotenzial. Angefangen vom selbstständigem Vermessen der eigenen Betriebsflächen mit GPS, weiter zum manuellen Parallelfahren bis hin zu integrierten Lenkautomatik-Systemen, die die Arbeitsqualität und Flächenleistung deutlich steigern und somit helfen Betriebsmittel-



Abbildung 4-5: Entwicklung der Landwirtschaftlichen Betriebsmittelpreise

(Quelle: Statistisches Bundesamt)

kosten einzusparen, wie Diesel, Saatgut, Düngemittel etc. (Abbildung 4-5). Auch bei Dunkelheit kann mit diesen Möglichkeiten eine hohe Arbeitsqualität mit dargelegtem Einspareffekt erreicht werden.

Weiterhin gehört als wichtigster Zweig „Precision Farming“ dazu, indem auf Teilflächen eines Schlages abgestimmte Anwendungen (z.B. Düngung) pflanzenbaulicher Maßnahmen durchgeführt werden. Das GPS ermöglicht die Kartierung von Unterschieden und die sich daraus ergebene räumlich differenzierte Durchführung von Feldarbeiten. Der Vorteil dabei ist, die Unterschiede bei den Bewirtschaftungsmaßnahmen genau planen zu können, dann nach vorgegebenen Werten zu arbeiten, sowie automatisch alle Arbeiten elektronisch zu dokumentieren. Ein Beispiel dafür ist eine vorgefertigte Applikationskarte am Computer, die an den Düngerstreuer übertragen wird und dieser streut dann die jeweilige vorgegebene Menge an dem Ort aus, an dem er sich mittels GPS befindet. Die Dokumentation der durchgeführten präzisen Arbeit wird entsprechend der gesetzlichen Vorschriften sofort vollzogen und für Kontrollen auf Datenträgern abgelegt.

4.1.4 DGPS-Genauigkeiten

Das einfache GPS-Signal erreicht keine ausreichende Genauigkeit für landwirtschaftliche Ansprüche. Dafür wird ein differenziertes Korrektursignal benötigt, das entweder von einem geostationären Satellit oder von einer RTK-Basisstation (Referenzstation) kommt. Um somit eine höhere Genauigkeit zu erzielen, muss die Messung des GPS-Empfängers mit einem Korrektursignal abgeglichen werden (DGPS). Heutzutage gibt es viele Anbieter von Korrektursignalen, die fast ausschließlich kostenpflichtig sind. In Europa gibt es das kostenlose Korrektursignal EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), das Genauigkeiten von 0,3 – 3 m hat. In 32 Bodenstationen werden dabei Positionssignale vom GPS empfangen, sodass die bekannten Positionen der Bodenstationen in Kontrollzentren Korrektursignale berechnen. Up-Link Stationen leiten die korrigierten Signale an geostationäre Satelliten weiter, um ein flächendeckendes EGNOS-Korrektursignal in Europa zur Verfügung zu stellen. Solch ein System gibt es auch von den Amerikanern (WAAS) und den Japanern (MSAS).

Bei Feldarbeiten sind aber noch höhere Genauigkeiten ($< 0,3$ m) erforderlich. Diese erforderlichen Korrektursignale sind aber alle kostenpflichtig, außer das SF1-Signal von John Deere ist kostenfrei. Es kann aber nur von John Deere Kunden genutzt werden. Mit kostenfreien Signalen reicht die Genauigkeit aus für Bodenbearbeitung, Pflanzenschutz im Voraufbau, Düngung auf Grünland oder bei der Ernte (> 6 m Arbeitsbreite), siehe Tabelle 4-3.

Mit kostenpflichtigen Korrektursignalen kann man eine Genauigkeit von $\pm 5 - 30$ cm erzielen. Dafür ist eine jährliche Lizenzgebühr von ca. 800 – 2000 € fällig oder man mietet sich das Signal monatsweise bei Bedarf (z.B. für Arbeitsspitzen). Ein Nachteil hierbei ist, dass man dieses Korrektursignal für jede Maschine erwerben muss. Anbieter dieses Dienstes

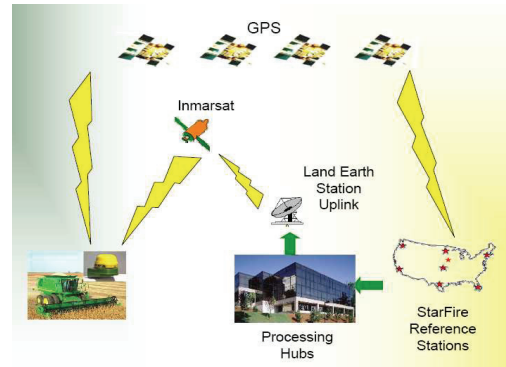


Abbildung 4-6: Starfire 2 - Netzwerk

(Quelle: John Deere)

sind z.B. John Deere (SF2) siehe Abbildung 4-6, Landstar, OmniStar HP usw. Diese Genauigkeit lässt fast alle Arbeiten präzise zu, wie z.B. Aussaat, Bodenbearbeitung, Düngung, zenschutz, Ernte usw., außer bei Sonderkulturen wird es schwierig, siehe Tabelle 4-3. Um diese Genauigkeit auch auf dem Acker zu verwirklichen, braucht man schon einen Lenkassistenten oder ein integriertes Lenksystem, siehe Tabelle 4-2.

Das genaueste Korrektursignal erhält man mit einer Referenzstation (RTK-Basisstation) in Feldnähe. Dabei ist aber eine begrenzte Reichweite von 20 km im Durchmesser zu beachten. Hier werden Genauigkeiten von $\pm 1 - 2$ cm erreicht und das auch bei Bedarf nach längerem Zeitraum (mehrere Jahre). Man spricht auch von Control Traffic, was so viel bedeutet: die exakte Wiederholung von Fahrspuren nach Jahren

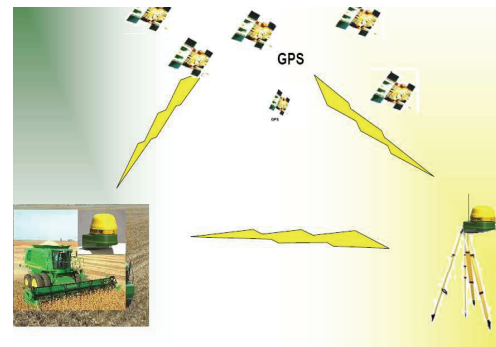


Abbildung 4-7: RTK-Netzwerk

(Quelle: John Deere)

(max. Abweichung von ± 2 cm). Bei Korrektursignalen würde eine Verschiebung schon nach wenigen Monaten stattfinden. Mit dem genannten Verfahren (Abbildung 4-7) kann man alle Arbeiten (auch in Sonderkulturen) durchführen und hat auch zukünftig keine Lizenzgebühr mehr zu tragen (mehrere Maschine gleichzeitig nutzbar). Die Genauigkeit von 1 – 2 cm ist nur mit einem integriertem Lenksystem möglich, weil bei einem Lenkassistenten zu viel Spiel in der Lenksäule wäre. Eine einmalige Investition von ca. 14.000 € für die RTK-Basisstation ist erforderlich, abgesehen von den benötigten Maschinenkomponenten. In Zukunft könnte es auch möglich sein, das RTK-Signal über das Mobilfunknetz zu beziehen (Berning, 2008).

In der Tabelle 4-2 werden die Lenksysteme kurz mit den wichtigsten Informationen dargestellt.

Tabelle 4-2: Lenksysteme + Informationen

	Manuelle Spurführung	Lenkassistenten	Automatische Lenkung
Genauigkeit (m)	0,5 - 1	0,05 - 0,3	0,01 - 0,05
GPS-Receiver	L1	L1/L2 - Starfire	L1/L2 - RTK
Arbeitserleichterung	niedrig	hoch	sehr hoch
Investition (€)	1.500 – 5.000	15.000 – 20.000	15.000 – 45.000
Verwendbar für hochgenaue DGM	nein	ja	ja

Quelle: Eigenständig

Ausschließlich die Firma John Deere bietet die exklusive Funktion RTK-X einer Unterbrechung der Signalübertragung zur RTK-Station an, siehe Abbildung 4-8. Dabei bleibt die RTK-Genauigkeit bis zu 15 Minuten lang voll erhalten. Die Voraussetzung ist aber, dass der Starfire iTC GPS-Empfänger der Basisstation vorher eine Stunde eingeschaltet war und korrigierte Daten zum mobilen iTC GPS-Empfänger des Traktors gesandt hat.

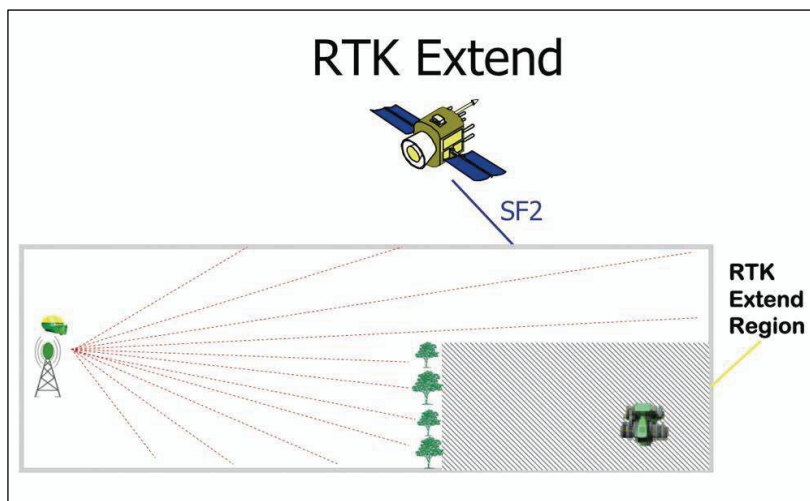





Abbildung 4-8: RTX-X bei Signalunterbrechung zur Basisstation

(Quelle: John Deere)

Tabelle 4-3: Anwendungsfelder bei entsprechender Genauigkeit

Anwendungen	Egnos	Korrektur-satellit	RTK
Dokumentation	x	x	x
Bodenbearbeitung	x	x	x
Spritzen / Düngen	x	x	x
Ernte	x (> 6m)	x	x
Saat		x	x
Pflanzen		x	x
Reihenhacken		x	x
Sonderkulturen		(x)	x
Control Traffic		(x)	x
Genauigkeit	+/- 30 – 100 cm	+/- 5 - 30 cm	+/- 2 - 5 cm
			

Quelle: Eigenständig

In der folgenden Abbildung 4-9 sind die Genauigkeitsstufen der Firma John Deere grafisch dargestellt. Bei den Untersuchungen zu diesem Thema wurden das RTK-Signal und das SF2-Signal verwendet und miteinander verglichen (siehe Kapitel 4.2.3).



Abbildung 4-9: Genauigkeitsstufen von John Deere

(Quelle: John Deere)

Die drei Buchstaben „iTC“ beim Starfire Empfänger bedeuten „Integrated Terrain Compensation“, was so viel heißt wie integrierter Neigungsausgleich. Der Starfire GPS-Empfänger korrigiert automatisch mittels einer elektronischen Wasserwaage die Position an geneigten Flächen und unebenem Boden und gleicht sie somit aus (Abbildung 4-10).

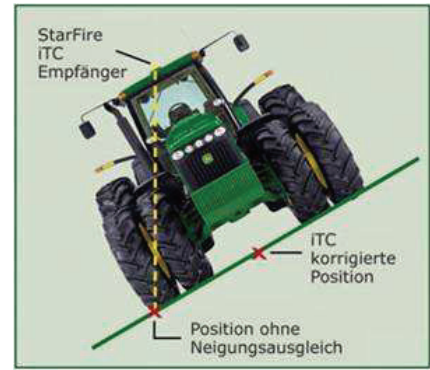


Abbildung 4-10: Integrierter Neigungsausgleich (iTC)

(Quelle: John Deere)

4.1.5 Meilensteine der GPS-Spurführung von John Deere

In der folgenden Abbildung 4-11 werden die Meilensteine in der GPS-Spurführung des Unternehmens John Deere dargestellt. Vor sieben Jahren ist John Deere im europäischen Markt der GPS-Spurführung eingestiegen und hat die Entwicklung der Systeme ständig forciert. So ist es heute schon möglich, dass ein Traktor GPS-gesteuert und automatisch am Vorgewende lenkt (ITEC Pro) und alle Funktionen selbstständig bewältigt. Das weltgrößte Landtechnikunternehmen John Deere ist führend in der GPS-Spurführung.

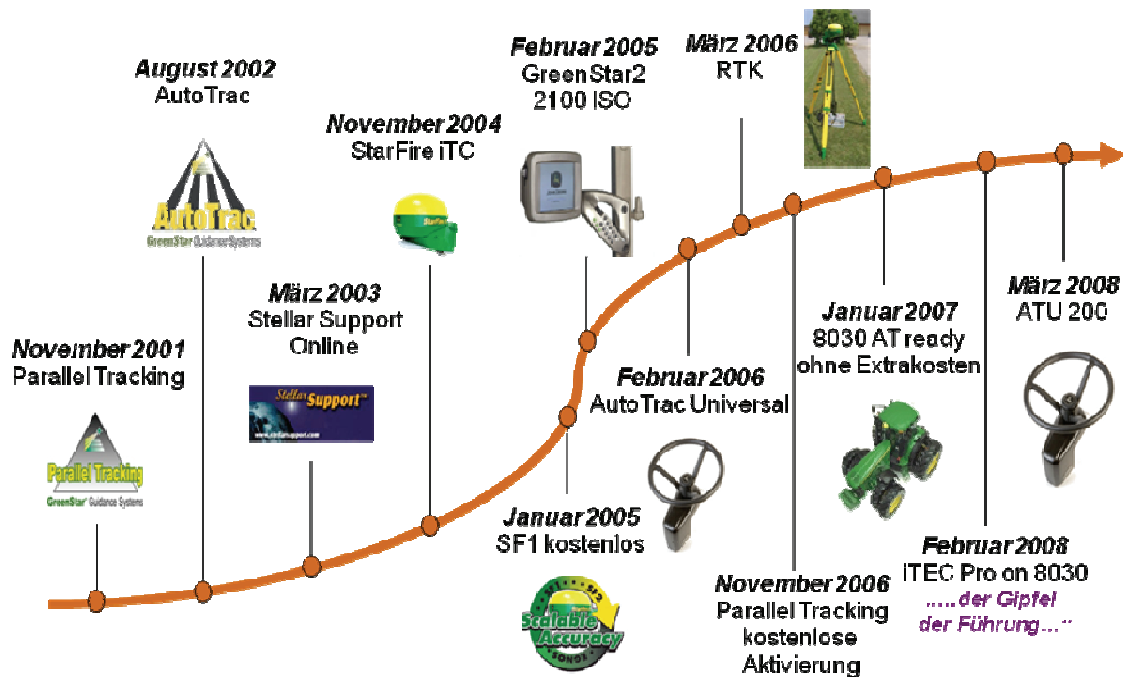


Abbildung 4-11: Meilensteine der GPS-Spurführung

Quelle: John Deere AMS

4.2 Methoden zur Erstellung von DGMs

4.2.1 Interpolation

Durch raumbezogene Daten, die einen Teil der Erdoberfläche (Digitales Höhenmodell - DHM) beschreiben, liegen die aufgezeichneten Punkte in einer unregelmäßigen Form vor. Das DHM beschränkt sich auf die Erfassung von Höhenwerten. Wenn die Formen der Erdoberfläche (Topografie) zusätzlich durch weitere Parameter wie Neigung, Krümmung oder Exposition beschrieben werden, spricht man von einem Digitalen Geländemodell. Gerade bei der GPS-RTK Messung mittels Parallelem Spurführungssystem bekommt man eine geringe Anzahl von unregelmäßig verteilten Werten (XYZ-Koordinate). Von diesen wurden nur Werte in geraden Linien mit einem Punkteabstand von 5,5 – 7,0 m bei einer Fahrgeschwindigkeit von 20 - 25 km/h aufgezeichnet. Der transversale Abstand betrug beim Schlag 1 „Helpter See“ 18 m und beim Schlag 2 „Charlies Hütte“ 36 m. Somit müssen die Zwischenwerte innerhalb der Fahrgassen berechnet werden. Für eine kontinuierliche Darstellung müssen diese Werte auf einen dichtem Gitternetz (Abbildung 4-12) berechnet werden. Meist erfolgt die Berechnung der Zwischenwerte (Abbildung 4-13) mit Werten, die in der Nachbarschaft des zu interpolierenden Wertes liegen. Für diese Berechnungen stehen verschiedene Interpolationsverfahren mittels Software zur Verfügung. Je geringer die Stützpunktdichte ist, desto stärker beeinflusst die Wahl des Interpolationsverfahrens das Erscheinungsbild der berechneten Oberfläche (Schmidt, 2003).

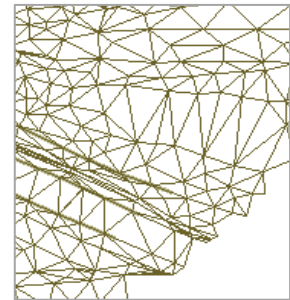


Abbildung 4-12: Gitternetz des DHM

(Quelle: Bill, 1996)

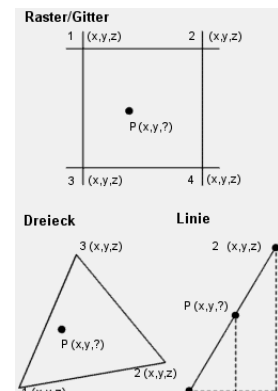


Abbildung 4-13: Interpolation und Abstraktion

Quelle: Uni Rostock

4.2.2 Übersicht der Interpolationsverfahren

4.2.2.1 Allgemein

Die Genauigkeit der Interpolationsverfahren und die Besonderheiten deren Verhaltens bei großen Schätzweiten, Ausreißern und kleinräumiger Variabilität (Oberflächenrauigkeit) entscheidet über die Wahl des zu verwendenden Interpolationsverfahrens. Dabei spielt die Berechnung der räumlichen Verteilung von Geländeattributen, wie z.B. Wetness-Index eine wesentliche Rolle.

Es gibt eine Vielzahl von Interpolationsverfahren, die unterschieden werden in deterministische Interpolation und geostatistische Interpolation. Die deterministische Interpolation ist das

bisherige Interpolationsverfahren, das eine genaue Vorhersage von Ort und Wert eines Punktes bestimmt, wenn die Messwerte regelmäßig und in einer relativ hohen Dichte vorhanden sind. Dagegen ist die geostatistische Interpolation im neueren Interpolationsverfahren, wobei die Vorhersage der Orte ungenauer ist, aber die Genauigkeit der Vorhersage vorher bestimmt werden kann. Eine unregelmäßige Verteilung und eine geringere Dichte der Punkte ist hierbei der Fall. Die beiden kurz beschriebenen Interpolationsverfahren werden noch weiter unterschieden. Das deterministische Verfahren wird unterteilt in:

- a) globale oder lokale Interpolation,
- b) Mathematisches Modell und
- c) nähere Messwerte haben höheres Gewicht.

Beim geostatistischen Verfahren unterteilt es sich in:

- d) Statistisches Modell und
- e) Interpolationspunkte haben größere Genauigkeiten.

Hier einige Ausführungen zur globalen und lokalen Interpolation. Bei den globalen Interpolationsmethoden werden alle verfügbaren Höheninformationen einbezogen (ganzer Datensatz) und bei den lokalen Methoden werden für die Berechnung eines Punktes (einer Gitterzelle) nur die Höhenwerte aus der direkten Umgebung (Nachbarschaften) des zu berechnenden Punktes herangezogen. Damit ist sichergestellt, dass der berechnete Wert aus der direkten Nachbarschaft ist und somit eine gute Anpassung vorhanden ist. Zum Schluss werden die Teilbereiche zu einem Gesamthöhenmodell zusammengefügt, um eine Kontinuität zu gewährleisten. Im Gegensatz dazu werden bei den globalen Interpolationsverfahren kleinräumige, lokale Variationen in der Geländeoberfläche nicht wahrgenommen und somit keine feineren Strukturen berücksichtigt (*Bartelme, 1995*).

Für die Untersuchung des DGMs ist daher die genauere lokale Interpolationsmethode erforderlich. Bei dieser lokalen Interpolationsmethode muss eine Region definiert werden, in der die Höheninformation ermittelt werden soll. Dann sollten die bekannten Datenpunkte, die in dieser Region liegen gefunden werden und mit einer mathematische Funktion ermittelt werden, die die Variation über eine begrenzte Zahl von Stützstellen beschreibt. Bei der Suche nach der mathematischen Funktion bestehen verschiedene methodische Ansätze.

Für den praktischen Gebrauch als Werkzeug zur Erstellung von Geländemodellen müssen die Interpolationsverfahren einige wesentliche Eigenschaften aufweisen:

- gute Genauigkeit und Zuverlässigkeit bei der Berechnung der Höhenwerte
- Robustheit und Flexibilität bei der Behandlung verschiedener praktischer Anwendungen
- (unwesentlicher Einfluss von Höhen, Temperaturen, Niederschläge, Schadstoffkonzentrationen usw.)
- Glättung von unregelmäßig verteilten Vermessungsfehlern
- direkte Abschätzung abgeleiteter Größen (Hangneigung, Exposition)
- Verwendbarkeit auch bei großen Datenmengen
- gute Performance
- einfache Bedienung

Leider gibt es kein Verfahren, das alle diese Forderungen optimal erfüllt. Deshalb ist es erforderlich, für eine spezielle Anwendung ein Verfahren auszuwählen, das die wesentlichen Anforderungen möglichst gut erfüllt.

Geostatistische Ansätze erlauben ein quantitatives Maß an räumlichen und zeitlichen Variablen. Die geostatistische Interpolation basiert auf vier Schritten:

1. Variographie, Analyse der räumlichen Variabilität
2. Erstellung eines Modells, welches die räumliche Variabilität repräsentiert (Variogramm)
3. Interpolation (Kriging)
4. Bewertung - Qualitätsanalyse

In dieser Arbeit wurden zwei Interpolationsverfahren miteinander verglichen. Dabei handelt es sich um die Inverse Distance Weighted (IDW) -Interpolation und um die Kriging-Interpolation.

4.2.2.2 Inverse Distance Weighted

Die IDW-Interpolation gehört zu dem deterministischen Verfahren, genauer gesagt zu der lokalen Interpolation (über Nachbarschaften). Hierbei haben nahe Punkte ein höheres Gewicht als weiter entfernte Punkte des zu interpolierten Punktes (Gitterpunkt). Somit sind nahe Punkte näher am Wert des interpolierten Punktes als weiter entfernte. Zuerst wird die Distanz zwischen dem gesuchten Punkt und den umliegenden Stützpunkten berechnet. Im Anschluss erfolgt die Berechnung der gesuchten Punkte als Mittelwert der Umgebungsstützpunkte. Dieser wird gewichtet mit dem Kehrwert der Distanzen ($1/d$). Meistens wird die Distanz jedoch abhängig von den jeweiligen Eigenschaften der zugrundeliegenden wahren Oberfläche potenziert ($1/d^2$ oder $1/d^3$). Die Berechnung der Gitterpunkte erfolgt nach der Gleichung:

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

Formel 4-1:
IDW-Gleichung

mit

Z = Gitterpunkt,

Z_i = Nachbarpunkt,

d_i = Entfernung zum Gitterpunkt,

R = Gewichtungsfaktor.

Die für die Interpolation verwendeten Punkte sind entweder über eine Reichweite (Suchradius) oder über eine vorgegebene Anzahl begrenzt.

Der Vorteil dieser Interpolationsmethode liegt in der relativ einfachen Generierung einer glatten, d.h. stetig differenzierbaren Oberfläche. IDW gehört zu den exakten Methoden, d.h. die interpolierte Oberfläche verläuft durch alle Datenpunkte.

Natürlich gibt es auch einige Nachteile, beispielsweise dass die benötigte Zeit für die Interpolation einer Höhe von der im Datensatz verfügbaren Anzahl der Punkte abhängig ist. Für Datenansätze mit vielen Datenpunkten wird die Berechnung mit der Zeit ineffizient. (Brändli, 1991) Des Weiteren geht in die Interpolation nur die Distanz ein, nicht aber die Richtung der umliegenden Punkte. Die Information der relativen Richtung des Datenpunktes zum Interpolationspunkt geht verloren.

4.2.2.3 Kriging

Die Kriging-Interpolation gehört zu den geostatistischen Interpolationsverfahren. Kriging ist ein Oberbegriff für eine Reihe von Schätzverfahren und verkörpert eine Interpolationsmethode, basierend auf numerischen Messungen der räumlichen Variation von bekannten Punkten, die in unterschiedlichen Entfernungen liegen. Diese Methode wird meistens verwendet zur Schätzung der Höhe von Oberflächen aus einem Satz bekannter Punkte. Die Interpolationsmethode beruht auf der Theorie regionalisierter Variabler, die neben der zu schätzenden Wertoberfläche auch Angaben zu deren lokaler Qualität enthält. Es gilt die Annahme, dass sich räumliche Verteilungen mit dem selben Muster fortsetzen. Kriging ist ein lineares Schätzverfahren mit gewichteter räumlicher Mittelbildung, das erwartungstreu und mit Effizienz die Werte an den unbeprobten Orten schätzt. Der Kriging-Schätzer ist ein sogenannter BLUE-

Schätzer, d.h. ein best linear unbiased estimator = erwartungstreuer linearer unverzerrter Schätzer.

Im Interpolationsverfahren Kriging wird ein unbekannter Wert durch ein gewichtetes Mittel der bekannten Nachbarwerte geschätzt. Diese gewichteten Werte werden im geostatistischen Modell aber so optimiert, dass der Schätzer im Mittel den wahren Wert schätzt und keinen systematischen Fehler macht. Die Grundlage für den Schätzer ist dabei das geostatistische Modell und das Variogramm, das den räumlichen Zusammenhang des Prozesses beschreibt.

Dabei wird jeder Interpolationspunkt (z.B. Gitterpunkt) mit Hilfe der Variogramm-Funktion lokal optimiert. Dabei lassen sich sogar lokale Schätzfehler-Varianzen ermitteln, die man zur Berechnung von Konfidenzintervallen für die interpolierten Werte nutzen kann.

Die räumliche Abhängigkeit wird bei der Gewichtung der Messwerte berücksichtigt. Die Reichweite der räumlichen Abhängigkeit und die Varianz werden auf Grundlage eines Variogramms ermittelt. Mit dem Variogramm wird die Semivarianz (Hälfte der Varianz der Inkremente zweier Messwerte) in Abhängigkeit eines Entfernungsvektors aufgetragen. Dabei müssen Paare aller Messpunkte gebildet werden und die Semivarianz in Beziehung zur Entfernung zwischen den Punkten gesetzt werden. Somit wird die Variabilität der Messgröße bei wachsender Entfernung auf diese Weise charakterisiert. Mit der Semivarianzanalyse werden die Reichweite und die Richtung von räumlichen Prozessen beschrieben. Mit folgender Formel wird das empirische Variogramm berechnet:

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

Formel 4-2: empirisches Variogramm

mit h = Abstandsvektor,

z = Messwert,

VAR = Varianz,

bzw.

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

Formel 4-3: empirisches Variogramm

mit E = Erwartungswert von z .

Die Voraussetzung für eine Kriging-Interpolation ist die intrinsische Hypothese und das Semivariogramm. Die intrinsische Hypothese besagt, dass ein Prozess intrinsisch (stationär) ist, falls der Erwartungswert aller Zufallsvariablen im Untersuchungsgebiet konstant ist oder der räumliche Zusammenhang zweier Variablen nicht von der absoluten Lage abhängt, sondern von

deren Abstandsvektoren. Für das Semivariogramm wird die Funktion Formel 4-2 benötigt. Ein Graph mit den Werten von $\gamma(h)$ ist das empirische Variogramm (Abbildung 4-14).

Bei der folgenden Abbildung 4-14 ist die Punktlinie aus einem empirischen Variogramm mit einem Modell des theoretischen Variogramms verglichen worden. Das empirische Variogramm stellt mit der Punktlinie einen groben Verlauf über den räumlichen Zusammenhang dar. Der Verlauf des empirischen Variogramms wird einer Funktion angepasst in der Abbildung 4-14, die blau dargestellt ist. Das theoretische Variogramm zeigt einen Zusammenhang der Stichproben mit bekannten Werten. Aus der Ordnung wird das theoretische Variogramm ausgewählt, welches das empirische Variogramm am besten charakterisiert.

Es gibt drei Kenngrößen beim Variogramm die in der

Abbildung 4-15 ersichtlich sind. Zum einen das Range, das den Abstand auf der x-Achse bei dem der Graph den Schwellenwert erreicht. Als Zweites das Sill, das gleich der Schwellenwert ist (Maximum der Funktion) und als Drittes das Nugget. Es bedeutet das Rauschen, entsteht wenn das Variogramm nicht durch den Nullpunkt geht.

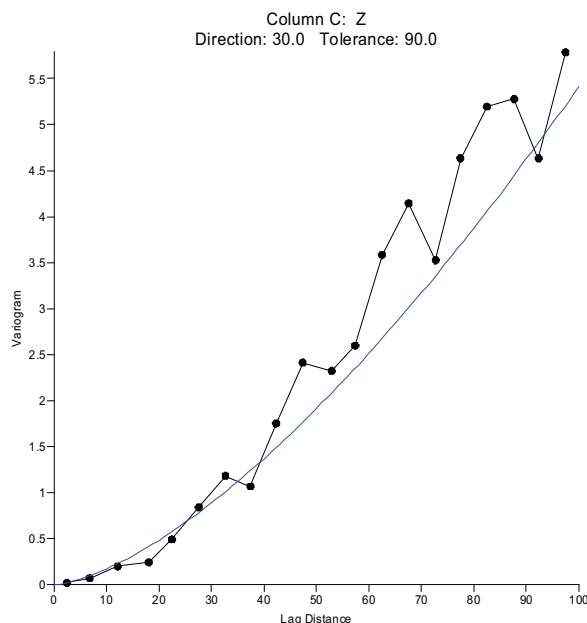


Abbildung 4-14: Theoretisches Variogramm DGM Schlag 1 „Helpter See“

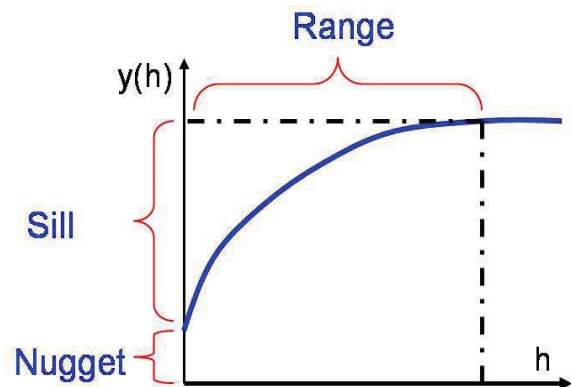


Abbildung 4-15: Kenngrößen des Variogramms

Die Kriging-Interpolation wird in zwei statistische Methoden unterteilt, zum einen der Kri-ging selber, der sich in einem Datensatz immer nur auf ein Attribut bezieht und dabei die Autokorrelation angewendet wird. Zum anderen der Co-Kriging, der sich in einem Datensatz auf zwei bis vier Attributwerte bezieht. Dieser verwendet neben der Autokorrelation auch die Kreuzkorrelation. Zudem gibt es verschiedene Arten von Kriging und Co-Kriging, wie Ordi-

nary, Simple, Universal, Indicator, Probability und Disjunctive auf die in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen wird.

4.2.2.4 Vergleich von Inverse Distance Weighted und Kriging

In dieser Bachelorarbeit wurden die beiden genannten Interpolationsverfahren miteinander verglichen. Zur Erstellung der grafischen Interpolationskarten wurde das Programm ArcGis in Anspruch genommen. Dabei ist ein Werkzeug vorhanden, das sich „Geostatistical Analyst“ nennt und mit dem man verschiedene Interpolationsverfahren berechnen lassen kann. Das spezielle Problem einer DGM-Interpolation von traktorbasierten GPS-Daten ist die bahnliniensorientierte Aufteilung (Abbildung 4-32 – Kapitel 4.2.4) der gemessenen Geländedaten. Bei der Abbildung 4-16 (IDW) sieht man die Erhöhungen (rot) etwas verschwommener, als in der Abbildung 4-17 (Kriging). Die Kriging Interpolation ist dementsprechend genauer, da die gewichtete Werte im geostatistischen Modell so optimiert werden, dass der Kriging-Schätzer im Mittel den wahren Wert schätzt und keinen systematischen Fehler macht. In der Abbildung 4-18 werden die Unterschiede der beiden Interpolationsverfahren farblich deutlich. Besonders bei Erhebungen oder auch am Vorgewende ist ein sichtbarer Unterschied festzustellen.

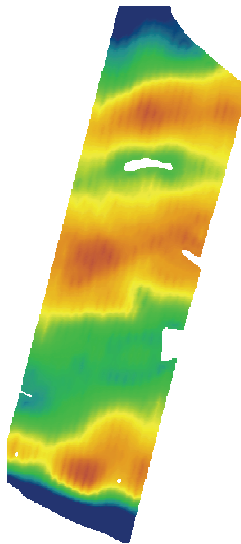


Abbildung 4-16: IDW-Interpolation

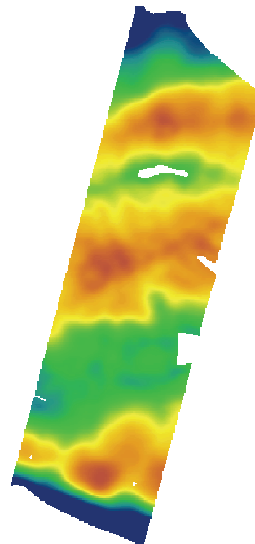


Abbildung 4-17: Kriging-Interpolation

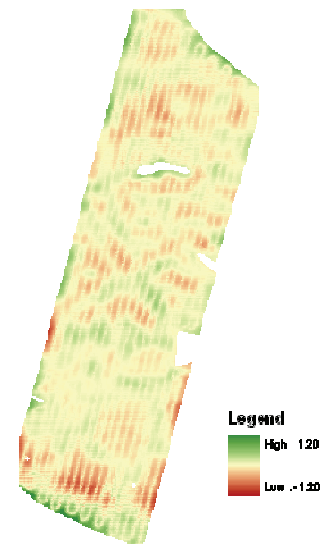


Abbildung 4-18: Unterschiede zw. den beiden Interpolationen

4.2.3 Untersuchung zur DGPS-Genauigkeit

Im durchgeführten Versuch wurden zwei Genauigkeitsstufen von John Deere getestet. Als erstes das System Starfire 2 mit satellitengestützten Korrektursignal mit einer angegebenen Genauigkeit von 5 – 10 cm. Den gegenüber steht das RTK-System, das eine eigene mobile Referenzstation besitzt und von dieser auch das Korrektursignal bezieht. Hierbei werden laut Herstellerangaben Genauigkeiten von 1 – 2 cm erreicht. In der folgenden Tabelle 4-4 werden die Unterschiede kurz dargestellt. Zusätzlich ist noch die Genauigkeitsstufe Starfire 1 aufgeführt, da diese bei den Auswertungen der grafischen Karten in den folgenden Abbildungen als L1 – DGPS verwendet wurde. Diese GPS-Daten standen durch die ECa-Vermessung zur Verfügung.

Tabelle 4-4: Vergleich zwischen den John Deere Genauigkeitsstufen

Starfire 1	Starfire 2	RTK
Spur zu Spur-Genauigkeit von $< \pm 30$ cm (95 % der Zeit)	Spur zu Spur-Genauigkeit von $< \pm 10$ cm (95 % der Zeit)	Spur zu Spur-Genauigkeit von 1 – 3 cm
begrenzte Wiederholgenauigkeit	begrenzte Wiederholgenauigkeit	hohe Wiederholgenauigkeit
größere GPS Abweichung	GPS Abweichung	keine Abweichungen
vorhandene Spurverschiebungen	vorhandene Spurverschiebungen	keine Spurverschiebungen
geringe Anfangsinvestitionen	geringe Anfangsinvestitionen	hohe Anfangsinvestitionen
geographische Flexibilität	geographische Flexibilität	Radioleitung braucht Sichtkontakt 10 – 20 km RTK-Reichweite
kostenlos	wiederkehrende Lizenzgebühren	keine Lizenzgebühren Basisstation kaufen od. mieten
keine Lizenz erforderlich	eine Lizenz pro Traktor	mehrere Traktoren pro Station

Bei der RTK-Basisstation gibt es zwei verschiedene Arten. Erstens eine festinstallierte RTK-Basisstation, z.B. weit oben auf einem hohem Silo (Abbildung 4-19). Zweitens eine mobile RTK-Basisstation, die mittels Dreibock-Stativ (Abbildung 4-20) am Feldrand aufgestellt wird. In diesem Versuch wurde die mobile RTK-Basisstation angewandt, da der Testbetrieb keine eigene festinstallierte RTK-Basisstation hatte. In der Tabelle 4-5 werden weitere Unterschiede der beiden Basisstationen dargestellt.



Abbildung 4-19: Absolute Mode (Silo)
Quelle: John Deere



Abbildung 4-20: Quick Survey Mode
Quelle: John Deere

Tabelle 4-5: Arten der RTK-Basisstation

Absolute Mode	Quick Survey Mode
Feste Montage (20 km Reichweite im Durchmesser)	Mobil (Dreibock-Stativ) – unbegrenzte Reichweite durch Platzierung am Feldrand
Einmalige Einlesung (Prüfung) von 24 Stunden pro Ort erforderlich	15 Minuten Einlesung (Prüfung) pro Ort erforderlich
Wiederholbare Höhe für jede Prüfung	Verschiebung der Höhe bei jeder Feldprüfung
Gut geeignet für DGM-Erstellung	Nicht geeignet für DGM-Erstellung

Es stellte sich die Frage, ob man das DGPS eine ausreichende Qualität zur Erstellung eines DGMs hat. Die Abbildung 4-21 stellt ein DGM mit RTK-GPS dar. Hierbei kann man erkennen, dass im Gegensatz zur Abbildung 4-22 (L1 – DGPS = SF 1) Unterschiede ersichtlich sind. Gerade der gelbe Bereich zieht sich bei L1-DGPS (Abbildung 4-22) weiter in nördlicher Richtung. Besser zu erkennen sind die Unterschiede aber in der Abbildung 4-23. Dort werden die Höhendifferenzen der beiden Systeme verglichen und es ist ersichtlich, dass größere Unterschiede am südlichen Vorgewende zu erkennen sind. Aber auch in der Mitte des Schlanges gibt es Differenzen.

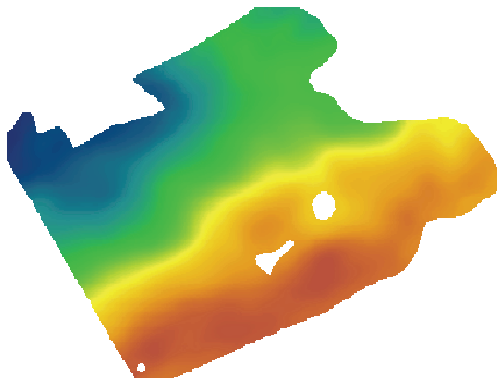


Abbildung 4-21: DGM – RTK-GPS

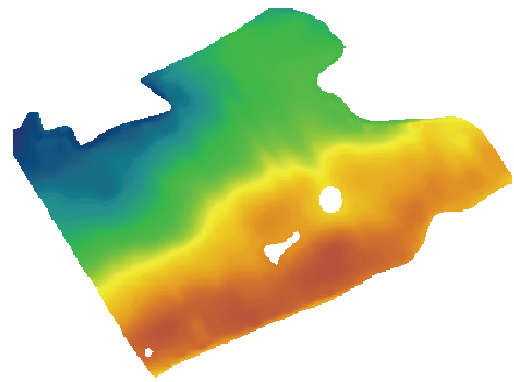


Abbildung 4-22: DGM – L1-DGPS



Abbildung 4-23: Höhendifferenzen zw. L1-DGPS und RTK-GPS

Die Analyse der Gelände-Rauheit gibt einen sehr guten Hinweis der Glätte und so der Verhältnissenauigkeit des DGM. Die Terrain-Rauheit ist ein komplizierter Geländeparameter, der allgemein für Ökosystem-Prozesse verwendet wird (Moreno, et al., 2003). Der Gelände-Rauheit-Index zeigt die geringe L1-DGPS – DHM Qualität am Vorgewende (Abbildung 4-25) an. Der Anteil von Verdopplungen der Wege vom DGPS-Empfänger und hohe Schwankungen zwischen angrenzen Fahrgassen werden sichtbar. Bei der Abbildung 4-24 ist ein einheitlicheres Bild der Geländerauheit ohne große Ausreißer zu erkennen.

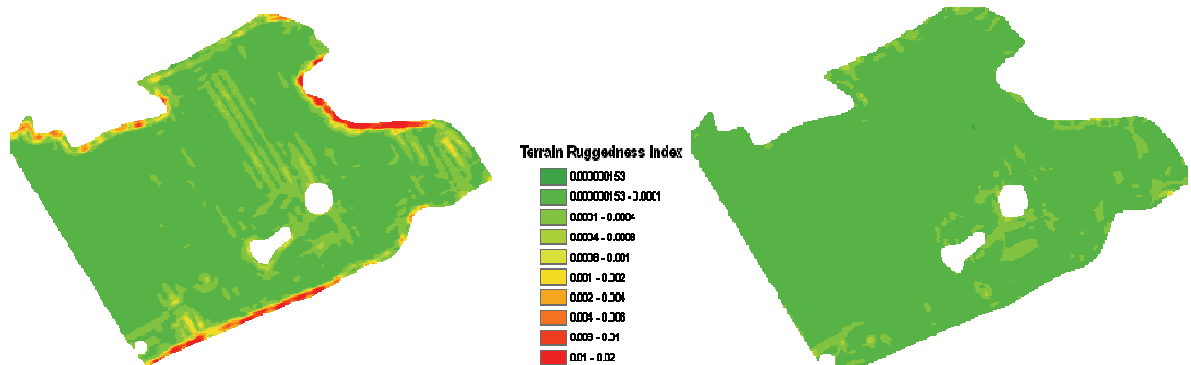


Abbildung 4-25: TRI – L1-DGPS

Abbildung 4-24: TRI – RTK-GPS

Der Topographische Wetness-Index (TWI) reagiert kritisch auf die geringe DGPS-DHM Qualität am Vorgewende (Abbildung 4-27). In der Abbildung 4-26 sind deutliche Unterschiede zum L1-DGPS ersichtlich und somit ist die Wahl des GPS-Korrektursignals von entscheidender Bedeutung. Der TWI ist ein entwickelter Index, um das Muster von zuerst gesättigten Bodenbereichen (Entstehung von Oberflächenabfluss) für Abflussmodelle vorherzusagen (siehe Kapitel 5.2.1).

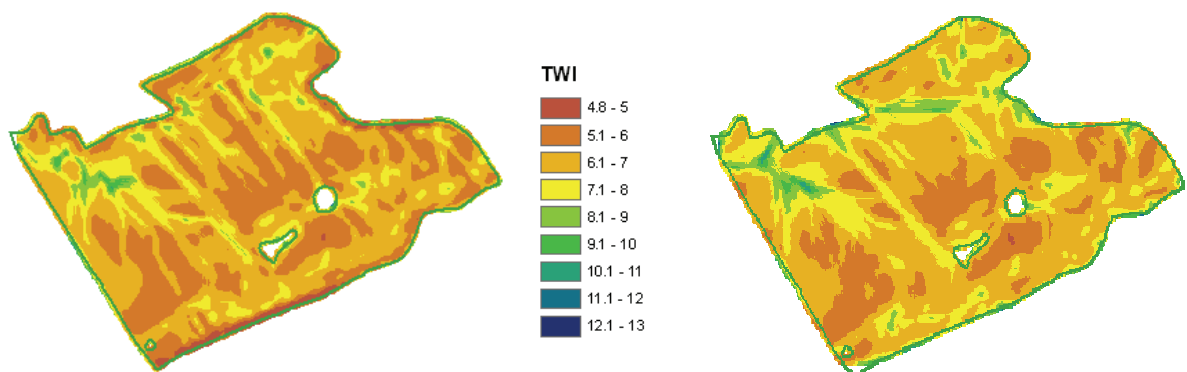


Abbildung 4-27: TWI – L1-DGPS

Abbildung 4-26: TWI – RTK-GPS

In der folgenden Abbildung 4-28 wurden die beiden Korrektursignale SF 2 und RTK über die statistische GPS-Genauigkeit in einem 24 Stunden-Test zusammen verglichen. Dabei wurden alle drei Koordinaten (X,Y,Z) untersucht. Die X- und Y-Koordinate ist für die Lagegenauigkeit und die Z-Koordinate ist für die Höhengenaugkeit maßgebend, die in dieser Arbeit im Vordergrund steht. In den linken Diagrammen, die zu SF 2 gehören, sind jeweils größere Sprünge ersichtlich. Dagegen sind in den rechten Diagrammen, die zu RTK gehören, fast gleichbleibende Werte mit deutlich geringeren Sprüngen vorhanden.

Die Sprünge sind abhängig, z.B. von der Uhrzeit, von Lage der Satelliten, von Stellung zu den Satelliten usw. (siehe Kapitel 4.1.1.1).

Im Anhang dieser Arbeit sind die Display-Ausschnitte der beiden GPS-Terminals (GS 2600) von John Deere zum Vergleich der Genauigkeiten RTK gegen SF 2 dargestellt.

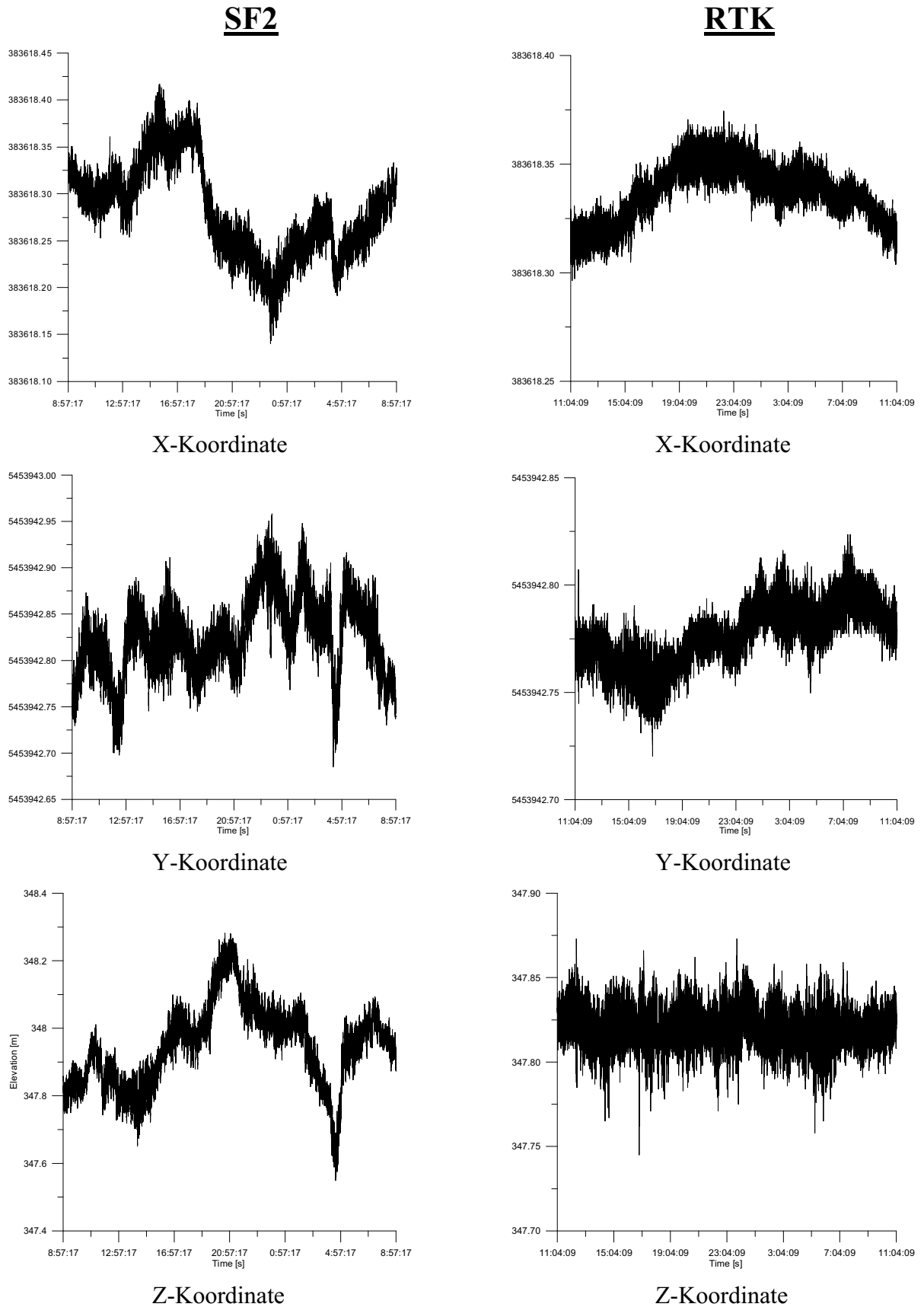


Abbildung 4-28: Vergleich von statistischer GPS-Genauigkeit (24 h Test) mit SF2 und RTK Korrektursignal
 Quelle: John Deere

Die Auswertungen der dargestellten Diagramme über die einzelnen Koordinaten folgt in den beiden folgenden Tabellen (Tabelle 4-6 und Tabelle 4-7). Dort sind Werte ersichtlich, wie Minimum, Maximum, Entfernung (Verschiebung), Mittelwert, Standardfehler und Standardabweichung. Der Einfluss des Referenzsignals bei Koordinatengenauigkeit ist ziemlich signifikant. Dabei liefert das satellitengestützte Korrektursignal Daten mit einer Genauigkeit von ± 5 cm in der Position und ± 12 cm in der Höhe. Es ist zu erwähnen, dass die Unterschiede im 24 h Test bei der Höhe größer sind als bei den Positionen. Dies ist bedingt durch eine unterschiedliche Anzahl von Satelliten, durch die Satellitengeometrie und durch den starken Einfluss der Ionosphäre und der Troposphäre zur Höhengenaugkeit zwischen dem mobilen GPS-Empfänger und dem berechneten Wert der virtuellen Referenzstation.

Bei der Betrachtung der Spanne kann man analysieren, dass das RTK eine wesentlich geringere Verschiebung im Gegensatz zum SF 2 hat. Aber auch die Standardabweichung ist deutlich höher bei SF 2 als bei RTK.

Mit der RTK-Referenzstation ist die Position- und Höhengenaugkeit sehr hoch und gleichbleibend, weil die ionosphärischen und troposphärischen Bedingungen, sowie die Satellitengeometrie bei der Referenzstation und dem mobilen GPS-Empfänger nahezu identisch sind. Die Standardabweichung von ungefähr ± 1 cm entspricht dem Genauigkeitspotential vom GPS-Empfänger.

Tabelle 4-6: Statistik des 24 h Tests vom Starfire iTC-Empfänger mit SF 2 Korrektursignal (n=86,400), 3.12.2007

SF 2	X	Y	Z
Minimum	383618.1400	5453942.6852	347.549
Maximum	383618.4174	5453942.9582	348.282
Spanne	0.2774	0.2730	0.733
Mittelwert	383618.2821	5453942.8255	347.9481
Standardfehler	0.00017	0.00014	0.0004
Standardabweichung	0.0491	0.0408	0.121

Quelle: John Deere

Tabelle 4-7: Statistik des 24 h Tests vom Starfire iTC-Empfänger mit RTK Korrektursignal (n=86,400), 29.11.2007

RTK	X	Y	Z
Minimum	383618.2964	5453942.7202	347.745
Maximum	383618.3745	5453942.8236	347.873
Spanne	0.078	0.1033	0.1280
Mittelwert	383618.33706	5453942.77668	347.8202
Standardfehler	0.000043	0.000045	0.000032
Standardabweichung	0.0126	0.0133	0.009

Quelle: John Deere

Unter landwirtschaftlichen Verhältnissen passen mehrere zusätzliche Quellen von Fehlern, wie die Geländerauheit, die Eignung des Fahrzeugs usw. Deswegen ist eine praktische Positionsgenauigkeit von 2 - 10 cm realistisch. Die statistischen Tests offenbaren, dass die absolute Genauigkeit des SF 2 Korrektursignals durch einen Faktor 5 (Position) - 10 (Höhe) geringer für die Position und Höhe ist, als mit einer lokalen Referenzstation. Jedoch ist für die DGM Erstellung und DGM Analyse die relative Genauigkeit zwischen angrenzenden Punkten und den Punkten innerhalb eines landwirtschaftlichen Feldes von größter Relevanz.

Bei den Feldversuchen wurden GPS-Daten von zwei Schlägen mit jeweils einer Größe von 36 ha gesammelt. Diese Flächen waren in einem wellenförmigen und hügeligen Gelände mit $\Delta h_{\max} = 34$ m. Ein durchschnittlicher Offset (Achsversatz) zwischen SF 2 und RTK betrug 1,04 m. Der Beitrag zum falschen Hebelarm und der Spurfehler bei der Initialisierung in horizontaler Position weichen von -3,7 – 5,6 m ab. Die Ausgangsdaten vom TCM (integrierten Neigungssensor) sind korrigierte Werte. Demzufolge war während des Fahrens kein direkter Vergleich der vertikalen Position möglich.

In der Abbildung 4-29 ist der Beitrag zum falschen Hebelarm und der Spurfehler zwischen SF 2- und RTK-Empfänger grafisch am Vorgewende des Schlag 2 „Charlies Hütte“ sichtbar.

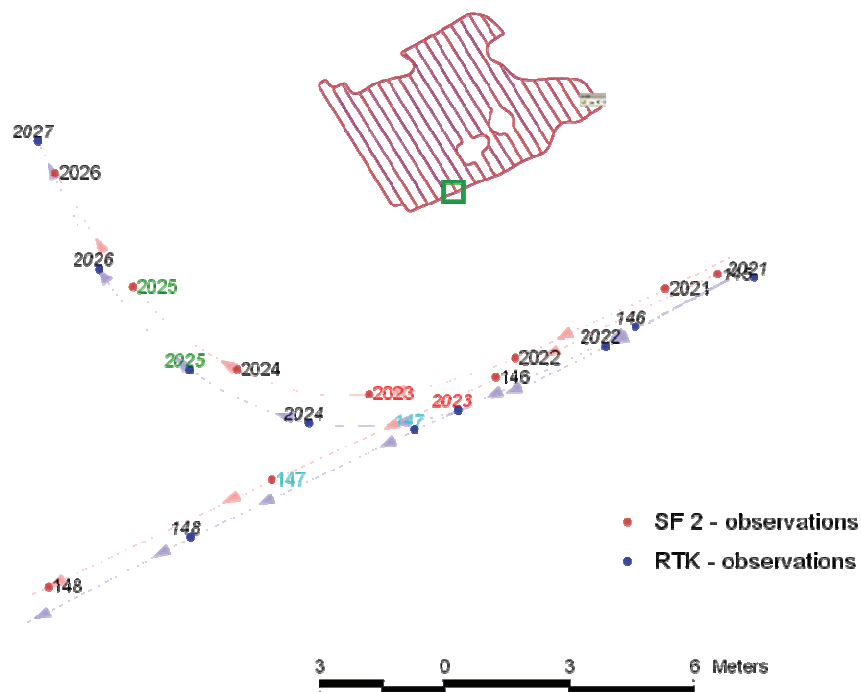


Abbildung 4-29: Positionsunterschiede zum Beitrag des falschen Hebelarms und Spurfehler zwischen SF 2- und RTK-Empfänger

Zum weiteren Vergleich der DHM Qualität von SF 2 und RTK ist mit der Kriging-Interpolation gearbeitet worden. Die Kriging-Interpolation von SF 2-Daten und RTK- Daten wurde mit den gleichen Variogrammparametern versehen. Der Anteil des positionellen Offsets (Achsversätze) ist der Interpolationsfehler an der Feldgrenze. Die Abbildung 4-30 stellt den Anteil von positionellen Offsets im Vergleich der beiden Korrektursignale dar. Für präzise landwirtschaftliche Applikationen sind SF 2- und RTK-DHMs gleichwertig.

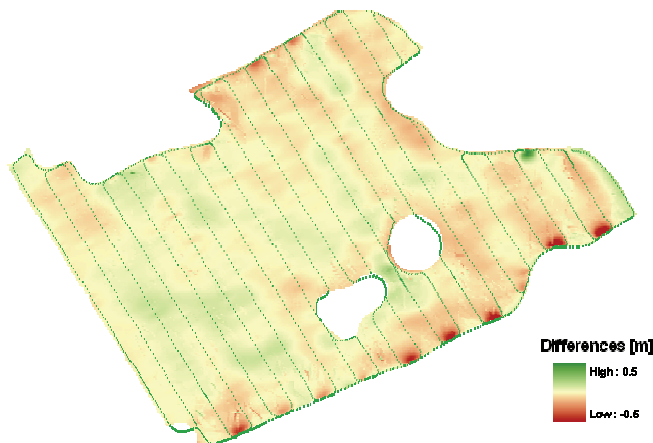


Abbildung 4-30: Anteil von positionellen Offsets zwischen SF 2 und RTK

Bei der Untersuchung der vertikalen Unterschiede von SF 2 und RTK sind bei der Nullgeschwindigkeit während der Schlagüberprüfung Messpunkte verglichen worden. Die Abbildung 4-31 stellt die Differenzen der vertikalen Unterschiede in Metern, im Zusammenhang mit der Zeit, dar. Unter realen (gleichen) Bedingungen ist die vertikale Genauigkeit von SF 2 und RTK im statistischen Labortest ähnlich.

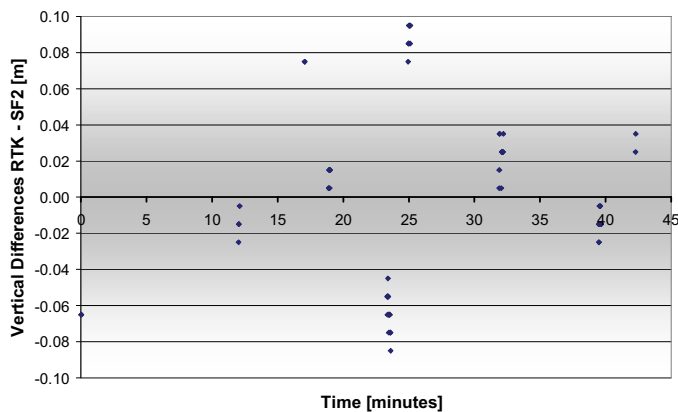


Abbildung 4-31: Vertikale Unterschiede bei der Nullgeschwindigkeit (Schlag 1 „Helfter See“)

Quelle: Dr.-Ing. Grenzdörffer

4.2.4 Vergleich von unterschiedliche Arbeitsbreiten

In dieser Arbeit sollte auch untersucht werden, wie sich unterschiedliche Arbeitsbreiten auf die Qualität des DGMS auswirken. Man weiß aus Erfahrung, dass bei Punkten, die weiter voneinander entfernt sind, es schwieriger wird, den Wert zwischen den Punkten durch Interpolationsverfahren zu bestimmen. In diesem Versuch wurde der Schlag 1 - Helpter See (Abbildung 4-33) mit 18 Metern Arbeitsbreite und der Schlag 2 - Charlies Hütte (Abbildung 4-34) mit 36 Metern Arbeitsbreite aufgezeichnet. Die Höhengenaugigkeit bei 36 Metern Arbeitsbreite transversal gesehen nimmt stark ab, sodass es bei noch größere Arbeitsbreiten zu schlechteren Ergebnissen durch die RTK-Vermessung kommen kann, weil die Ungenauigkeiten im DGM zu groß wären. Je geringer die Messpunktdichte ist (Abbildung 4-32), desto stärker beeinflusst die Wahl des verwendeten Interpolationsverfahrens das Erscheinungsbild der berechneten Oberfläche. Des Weiteren gibt es verschiedene Interpolationsverfahren, die zur Anwendung kommen können. Diese werden im Gliederungspunkt 4.2.2 näher erläutert. Durch den Vergleich zwischen 18 und 36 Meter Arbeitsbreite kommt es zu Differenzen bei der Messpunktdichte. Bei 18 m Arbeitsbreite hat man die doppelte Anzahl an Messpunkten und somit eine größere Genauigkeitsermittlung der Werte zwischen den Fahrgassen im Gegensatz zu 36 m Arbeitsbreite. Die Abbildung 4-32 stellt die Punktedichte der verschiedenen Arbeitsbreiten anschaulich da.

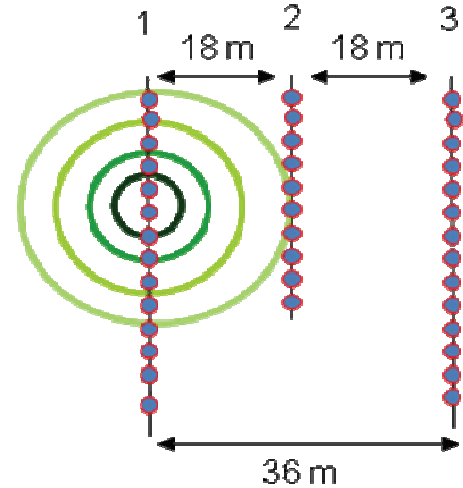


Abbildung 4-32: unterschiedliche Messpunktdichten

Beim Vergleich der beiden Schläge mit den unterschiedlichen Arbeitsbreiten im GIS-Programm ArcView wurde ein prognostizierter Standardfehler der Interpolation ausgerechnet und grafisch erzeugt (Abbildung 4-33/Abbildung 4-34). Dabei erkennt man, dass bei der Arbeitsbreite von 18 m zwischen den Fahrgassen nur eine geringe Abweichung von bis zu max. 0,3 m erreicht wird. Am Vorgewende sind die Abweichungen etwas höher. Im Gegensatz dazu weist der Schlag mit 36 m Arbeitsbreite eine wesentlich höhere Abweichung zwischen den Fahrgassen auf. Die Abweichung geht bis zu 0,5 m zwischen den Fahrgassen und am Vorgewende sogar bis auf 1,0 m. Somit gibt es wesentliche Unterschiede in den Arbeitsbreiten, die aber mit Hilfe von Interpolationsverfahren schon relativ gut berechnet werden können. Als Fazit ist zu sagen, je geringer die Arbeitsbreite, umso höher ist die Messpunktdichte und schließlich die Qualität des zu erzeugenden DGMS.

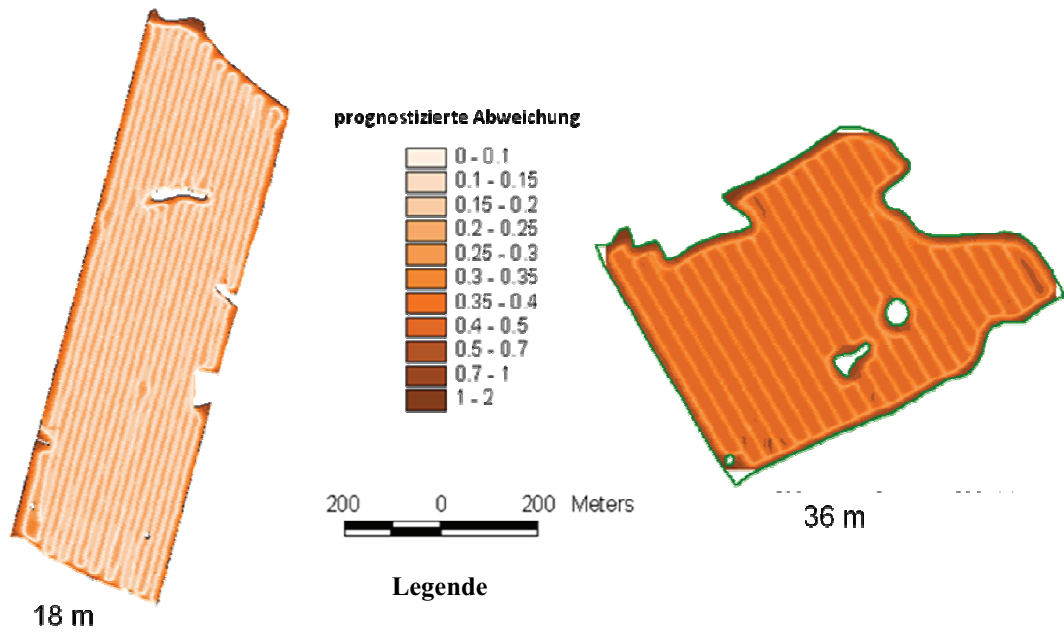


Abbildung 4-33: Schlag 1 – Helpter See (18 m Arbeitsbreite)

Abbildung 4-34: Schlag 2 – Charlies Hütte (36 m Arbeitsbreite)

5 Analyse von hochgenauen Digitalen Geländemodellen

5.1 Grundlagen der Reliefanalyse

Das Relief bzw. Georelief beschreibt die Höhengestaltung der Erdoberfläche. Das Georelief beeinflusst das Klima, den Abfluss, die Bodenentwicklung, die Vegetation, Wasser- und Nährstoffdynamik, Morphogenese und naturgeschichtliche Erscheinung und ist somit eine wichtige geoökologische Steuergröße der genannten Parameter (*Bork und Dalchow, 2000*). Der Autor *Leser (1991)* weist auf die prozessregelnde Wirkung der geomorphologischen Merkmale wie Wölbung, Hangneigung und Exposition hin.

Die Gliederung des Georeliefs, basiert auf der Ausweisung kleinster homogener Reliefeinheiten, so genannter Relieffacetten. Die kleinsten Reliefeinheiten beschreiben Gebiete einheitlicher Geländeneigung und Exposition und können zu Reliefelementen (Formelemente) zusammengesetzt werden. Die Änderungsrate der Höhe zwischen zwei Punkten im Gelände wird als Geländeneigung beschrieben. Diese wird in Grad (°) oder (%) angegeben. Die Exposition (Hangneigungsrichtung) ergibt sich aus der Winkeldifferenz zwischen der abwärtsweisenden Richtung der Falllinie eines Hanges und der geografischen Nordrichtung in einer gedachten horizontalen Ebene. Sie ist somit die Lage eines Hanges in Bezug auf die Einfallsrichtung der Sonnenstrahlen, der vorherrschenden Windrichtung und den Niederschlägen. Bei der Exposition steigt mit der Hangneigung die ökologische Wirksamkeit an.

Die Reliefelemente werden in der Abbildung 5-1 grafisch dargestellt und sind bedeutsam für den Erosionsschutz. Sie repräsentieren Bereiche des einheitlichen Wölbungstyps und homogener Morphodynamik. Die Wölbung ist die richtungsbezogene Krümmung eines Reliefbereichs und wird somit als Abweichung von der Ebene verstanden. Unterschieden wird die Wölbung in Horizontalwölbung und Vertikalwölbung. Mit der Horizontalwölbung wird die Änderung des Expositionswinkels entlang der Krümmung der Höhenlinie beschrieben. Die Horizontalwölbung hängt eng mit der lateralen Wasserdynamik zusammen. Diese wird in die Bewegungsrichtungen „konvergierend“ und „divergierend“ sowie den parallelen Übergangsbereich eingeteilt. Dabei zeigen konvergierende Abschnitte („Einwölbungen“) ein potenzielles „Zusammenfließen“ von oberflächennahem Wasser an. Dagegen weisen die divergierenden Bereiche („Auswölbungen“) zuerst Wasserdefizite auf und das oft im Sommer. Unter der Vertikalwölbung versteht man die Änderung des Hangneigungswinkels entlang der Falllinie. Des Weiteren werden die Krümmungstendenzen in „konkav“ und „konvex“ unterschieden. Dabei steht „konvex“ für nach außen gewölbte Bereiche, d.h. die Hangneigung nimmt von

oben nach unten zu. „Konkav“ dagegen steht also für das genau Entgegengesetzte, also nach innen gewölbte Bereiche.

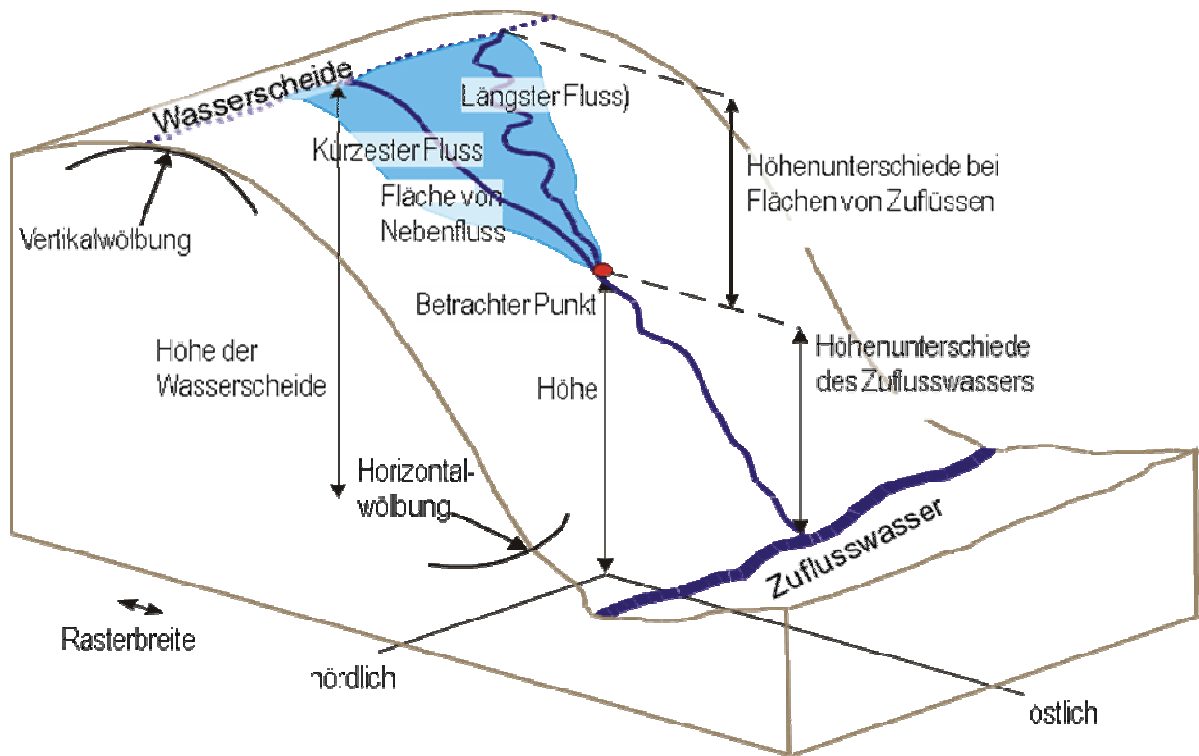


Abbildung 5-1: ausgewählte hydrologische Parameter

Quelle: Dr.-Ing. Grenzdörffer

Das Ziel der Ableitungen von Reliefelementen behandelt vorwiegend landschaftsökologische Fragestellungen, vor allem in Hinblick von ähnlich wirkenden Teilbereichen auf Basis geomorphographischer Kenngrößen. Die Geomorphographie beschreibt nach *Billwitz* (2000) die Kennzeichnung von Formen und Formbestandteilen des Reliefs mit folgenden Reliefattributen, wie Neigung, Wölbung, Exposition, Position/Lage, Grundriss und Größe.

In der anschließenden Tabelle 5-1 werden alle Reliefparameter kurz definiert und dessen Bedeutung erwähnt.

Tabelle 5-1: 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, Landnutzungseignung
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 Konturverlaufes (Isohypsenverlaufes)	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

5.2 Ableitungen aus dem DGM

Im Raster-GIS ist der verbreitetste Ansatz der DGM-Analyse die Ableitung von lokalen morphometrischen Reliefattributen. Diese lassen sich aus einer Rasterzelle und ihren 8 Nachbar-Rasterzellen (Abbildung 5-2) berechnen (Köthe, 2000). Von der Datenhaltung im GIS her betrachtet, sind die Ableitungen lediglich Attribute der Lage.

1	2	3
4	X	5
6	7	8

Abbildung 5-2: 8 Nachbar-Rasterzellen

Es ist nach Moore *et al.*, 1991 und Wilson und Gallant, 2000 eine Einteilung von Reliefparametern erstellt worden. Diese ist wie folgt gegliedert:

- primäre Reliefparameter:
 - Lokale Nachbarschaft (8 Zellen): 1. Ableitung (Neigung und Exposition) und 2. Ableitung (Vertikal- und Horizontalkrümmung) der topographischen Oberfläche, Laplace-Operator
- sekundäre Reliefparameter:
 - Kombination aus primären Reliefparametern mit weiteren, z.T. empirisch ermittelten Größen

Die prozessorientierten Reliefattribute sind für die Boden-Landschaftsanalyse notwendig und werden aus quantitativen Merkmalen (primäre und sekundäre Attribute) des DGM abgeleitet. Das Ziel ist eine vereinfachte Repräsentation der zugrunde liegenden physikalischen Prozesse. Die wesentlichen Prozesse im Übergang von der topischen zur chronischen Dimension werden durch die Wasserbewegung gesteuert. Das Georelief, also die Topographie des Geländes, ist dabei eine wesentliche Steuerungsgröße. Dabei gilt die lokale Geländeneigung als Maß für die Fähigkeit, eine bestimmte Menge Wasser oberflächlich und oberflächennah zu bewegen (Quinn und Beven, 1993). So können aus den primären Reliefattributen 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. Von Beven und Kirkby (1979) entwickelt, ist der verbreitetste Index der sogenannte Topographische Wetness Index (TWI) $\ln(A_s/\tan\beta)$, der im Kapitel 6.3 näher erläutert wird. Der TWI ist Bestandteil mehrerer hydrologischer Modelle, z.B. Topmodell oder Tapes.

Die Grundlage der genannten Indizes beschreibt die Berechnung der Lage von Abflussfaden aus den lokalen Höhengradienten. Dafür wird angenommen, dass die Geländeform die Bewegung des Wassers auch im oberen Bodenbereich bestimmt, sodass diese über die räumliche Verteilung des Bodenfeuchtemusters entscheidet. Der Hauptgebrauch der prozessorientierten DGM-Analyse ist die flächenbezogene Vorhersage von Boden- und Abflussparametern. Diese können ein Muster von natürlichen Prozessen wie Bodenbildung und Erosion abbilden.

Die abgeleiteten Geländeparameter von einem DGM können in zwei verschiedene Klassen unterteilt werden: in die primären topografischen Parameter und in die sekundären Parameter, welche die empirischen Parameter mit einschließen. Ein weiterer Parameter ist der, der direkt von einem Geländemodell abhängt und in dieser Arbeit nicht näher untersucht wurde. In der folgenden Tabelle 5-2 wird die Bedeutung von ausgewählten Geländeparametern für Boden und Ertrag erläutert.

Tabelle 5-2: Wichtigkeit von ausgewählten Geländeparametern für Ertrag und Boden, modifiziert von *Gebbers und Schmidt, 1999*.

Bedeutung für	Gelände bedingte Unterschiede bei	Primäre Geländeparameter	Sekundäre Geländeparameter
Ertrag	<ul style="list-style-type: none"> - Wasserverfügbarkeit - Abflussflächen und Menge des Abflusses - Bodenklima - Sonnenbestrahlung / Evapotranspiration - kalte Luftstellen - Nährstoffablagerung 	<ul style="list-style-type: none"> - Wassereinzugsgebiet - Durchschnittsneigung im Einzugsgebiet - Neigung und Standort 	<ul style="list-style-type: none"> - Art der Krümmung - Geländeeinheit - Nässe Index
Boden	<ul style="list-style-type: none"> - Bodenentstehung - Bodenwasser - Oberflächenabfluss - Bodenwassergehalt - Bodenerosion und Akkumulation 	<ul style="list-style-type: none"> - horizontale und vertikale Krümmung - Höhenunterschiede zum Empfangswasser - Fließstrecke - Neigung im Wassereinzugsgebiet 	<ul style="list-style-type: none"> - Neigungsmodell - Art der Krümmung - Geländeeinheit - Nässe- und Fließstärke Indexe

5.2.1 Primäre Reliefattribute

Die primären Parameter sind solche, die ohne Berücksichtigung weiterer Parameter mit Hilfe des DGM berechnet werden können.

Darunter zählt die relative Höhe (NN) im Bezug zum niedrigsten Punkt eines Untersuchungsgebietes, die als ein Indikator für die potentielle Energie betrachtet werden kann. Die Hangneigung beeinflusst als Gradient die Geschwindigkeit des hangabwärtsgerichteten Transports von Bodenmaterial. Die Exposition dient als ein Maß für das Potential der Fläche Strahlung

aufzunehmen bzw. zu nutzen. Die Horizontalkrümmung beschreibt die Konvergenz (konkav) bzw. die Divergenz (konvex) von Fließprozessen. Bei der Vertikalkrümmung im Bereich vertikal konkaver Krümmung akkumuliert sich Bodenmaterial, stattdessen bei vertikal konvexer Krümmung Bodenmaterial eher abgetragen wird. Das spezifische Einzugsgebiet wird ermittelt mit der Einzugsgebietsgröße einer Rasterzelle über die Fließrichtung. Dafür muss ein Algorithmus zur Anwendung kommen, der sogenannte Multiple Flow Direction Algorithmus (MFD) von Freeman (1991). Durch die Verfolgung des Fließweges hangaufwärts wird die Größe des Einzugsgebietes ermittelt. Im Anschluss wird dann die Länge der Isohypse, über die der Abfluss stattfindet, dividiert. Das spezifische Einzugsgebiet gibt durch die Größe des hangaufwärts gelegenen Gebietes einen Hinweis auf die zu erwartende Zuflussmenge. Die Fließlänge beschreibt die Wahrscheinlichkeit von Erosion bzw. Akkumulation von Material.

In den folgenden drei Abbildungen sind drei primäre Reliefattribute mit Hilfe der Software ArcView erstellt worden. Diese drei Attribute: Neigung, Flussstrecke mit Flussakkumulation und die Krümmung können miteinander verglichen werden. Wenn man sie grafisch betrachtet sind einige Gemeinsamkeiten zu erkennen, die aber nicht den vorwiegenden Teil ausmachen. Insgesamt ist festzustellen, dass keine starken linearen Zusammenhänge erkennbar sind und somit die weitere Verwendung aller primären Parameter gerechtfertigt erscheint.



Abbildung 5-3: Neigung



Abbildung 5-4: Fließstrecke mit Flussakkumulation

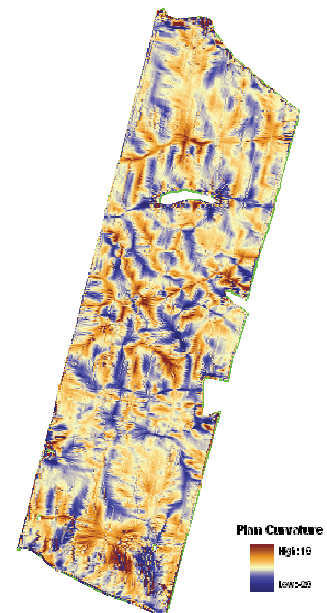


Abbildung 5-5: Horizontal-Krümmung

100 80 0 100
1:10 000

In der Abbildung 5-6 ist der Versuchsschlag „Charlies Hütte“ mit der verwendeten Einsatz-technik dargestellt, gleichzeitig ist eine Hangneigung ersichtlich.



Abbildung 5-6: Hangneigung beim Schlag 2 – Charlies Hütte

Quelle: Stefan Ullrich

5.2.2 Sekundäre Reliefattribute

Bei sekundären oder auch zusammengesetzten Reliefparametern werden primäre Parameter miteinander verknüpft.

Das Einzugsgebietsgefälle ist die mittlere Neigung des spezifischen Einzugsgebiets einer betrachteten Rasterzelle (Conrad, 2001). Dabei wird es ermittelt über die Gradienten für laterale Transportvorgänge im Einzugsgebiet. Die Reliefenergie ist die mittlere Höhendifferenz zwischen der Rasterzelle und den Zellen des spezifischen Einzugsgebiets. Sie beschreibt die für Verlagerungsprozesse vorhandene potentielle Energie des Einzugsgebietes. Der Topografische Wetness-Index $\ln(a/\tan\beta)$ stammt aus der hydrologischen Modellierung. Hierbei lässt sich der Bereich des Einzugsgebiets ermitteln, in dem der Boden über das gesamte Profil gesättigt ist. Dieser Index gibt Auskunft über das Verhältnis von der Zuflussmenge zum für den Weitertransport zur Verfügung stehenden Gradienten β (=Hangneigung). Es handelt sich wohl um den am meisten verwendeten zusammengesetzten Reliefparameter. Nähere Erläuterungen zum TWI sind im Kapitel 6.3 enthalten. Die Abflussintensität wird häufig in Beziehung mit der linearen Erosion verwendet. Denn eine Kombination aus großem Einzugsgebiet und starker Hangneigung weisen nach Moore *et al.* (1988) ein hohes Erosionspotential auf. Als letzter sekundäre Reliefparameter wird der Einstrahlungswinkel nach Lehmann (1995) als Maß für

einen potentiellen Strahlungsinput berücksichtigt, abgesehen von der Exposition und der Neigung der Rasterzelle.

Die folgenden drei Abbildungen des Schlages 1 – Helpter See zeigen sekundäre Reliefparameter auf. Diese Parameter wurde mit dem GIS-Programm ArcView zuerst errechnet und dann grafisch erzeugt. Grafisch gesehen gibt es Zusammenhänge, wie z.B. dass im Süden Schlages eine hohe Bergkuppe vorhanden ist. Alle sekundären Reliefparameter werden berechnet und es gehen unterschiedliche Parameter in die Berechnung ein. Der Fließstärke-Index (Abbildung 5-8) stellt die Abtragsgefahr aufgrund der Wasserschleppkraft dar, welche ein ähnliches Bild wie der TWI ergibt. Der Längen-Neigungs-Faktor (Abbildung 5-9) kann als Hanglängenfaktor für die Allgemeine Bodenabtragungsgleichung dienen. Die beiden genannten Indexe zeigen das räumliche Muster des Bodenabtrags durch abfließendes Niederschlags- und Schmelzwasser.

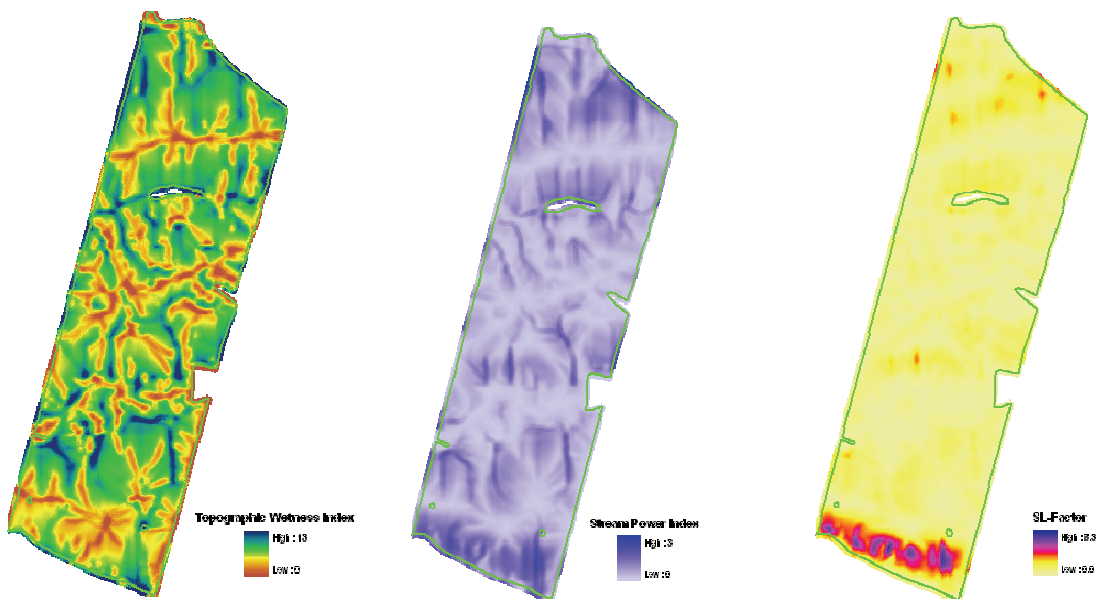


Abbildung 5-7: Topographischer Wetness-Index ($= \ln(A_s/\tan\beta)$)

Abbildung 5-8: Fließstärke Index ($= \ln(A_s \cdot \tan\beta)$)

Abbildung 5-9: Längen-Neigungs-Faktor (LS-Faktor) $= (m+1) \cdot (A_s/22,13)^m \cdot (\sin\beta/0,0896)^n$ mit $m=0,4$ und $n=1,3$

5.3 Ergebnisse der Geländeanalyse aus dem DGM

Die DGM-Analyse-Methoden, die untersucht wurden, liefern stabile Zonen für standortspezifische Schwankungen und deren Nutzung beim Pflanzenbaumanagement. So sind sie ein nützliches Werkzeug, um Karten zur Standortqualität zu erzeugen.

Die erstellten Karten geben potentielle Standorteigenschaften wieder, aus dem man Ableitungen treffen kann. Die Bodenwasserausbreitung im Frühling wird durch den TWI charakterisiert. Ein hoher TWI-Wert beschreibt eine Fläche mit starkem Wasserzustrom (Staunässe, Entwässerung). Dabei ist auf Erosionsgullies zu achten. Als Weiteres ist das Raummodell vom Wassererosionspotential eine wesentliche Standorteigenschaft. Hierbei fließen der Längen-Neigungs-Faktor und der Fließstärke-Index in die Betrachtung mit ein. Durch öfteren Wechsel der Richtung des Wasserflusses ist eine erhöhte Ablagerung zu erwarten. Das Auswinterungspotential kann den Boden stark beeinflussen. Bei beschatteten Flächen und gewölbten Hügeln besteht vor allem Froststress. Dagegen ist bei Sonne ausgesetzten Flächen mit einer Neigung von $> 3^\circ$ ein stärkerer Frostwechsel feststellbar.

Die Kombination von Boden-Parametern und von der Gelände-Analyse ist als eine Überdeckung von ECa-Karten und Gelände-Attributen möglich. So können Raummodelle von Bodeneigenschaften für die Bewertung von seitlichen Fluss-Mustern betrachtet werden.

Eine Gewichtung der Parameter wird gemäß der lokalen Bedeutung empfohlen. Ein erstes Standardverfahren konnte die Multiplikation von normalisierten Karten sein.

Neben dem Boden ist das Gelände der wichtigste natürliche Faktor als Ursache für die Heterogenität auf landwirtschaftlichen Flächen (*Wilson und Ritterlich, 2000*). Die Wichtigkeit vom Gelände auf den Getreideanbau möglich ist, beruht auf dem Einfluss der Bodenentstehung und des Wasser- und Bodentransports auf der Oberfläche und im Boden, der Nährstoffverteilung, dem Mikroklima und schließlich dem Wurzelwachstum. Die spezielle Bedeutung vom Gelände für die Präzisionslandwirtschaft ist mit der Anwendbarkeit der Gelände-Information für die moderne Landtechnik und den Sensoren im schwierigen Gelände verbunden, z.B. beim Pflügen die Umrisse zu zeichnen. Zusätzlich hilft die Gelände-Information, Bodeninformationen zu nutzen und zu interpretieren. Im Vergleich zu anderen Bereichen ist das DGM eine dauerhafte Information und kann leicht und kostengünstig erlangt werden (*Nugteren und Robert, 1999*).

6 Reliefparameter und bodenkundliche Größen

6.1 Bodenphysikalische Grundlagen

Der Boden ist der oberste Teil der Erdkruste. Dieser ist belebt und erreicht eine Tiefe von bis zu zwei Meter bis anschließend festes Gestein vorzufinden ist. Eine Unterteilung der mineralischen Teilchen wird anhand der Korngröße vorgenommen, anfangen vom Kleinsten bis zum Größten: Ton, Schluff, Sand und das Bodenskelett (>2 mm). Dabei weisen diese Teilchen unterschiedliche physikalische und chemische Eigenschaften auf. Die Bodenart wird durch den jeweiligen Anteil der Korngrößenfraktionen bestimmt. Zudem sind im Boden auch organische Teilchen enthalten, die das Wasser- und Nährstoffspeichervermögen positiv beeinflussen. Das Porensystem des Bodens ist in seinem Umfang abhängig von Körnung, Humusgehalt und der Lagerungsdichte. Es ist mit Bodenlösung (Wasser mit gelösten Salzen und Gasen) und Bodenluft gefüllt. Die Ausbildung bestimmter Kombinationen von Bodenhorizonten vollzieht sich durch bodenbildende Prozesse, d.h. es wird vor allem durch vertikale Verlagerung von Bodenbestandteilen mit infiltrierendem Wasser gesteuert. Solche Kombinationen werden in Bodentypen eingeteilt die den Wasserhaushalt beeinflussen und spezielle chemische und physikalische Eigenschaften aufweisen.

Der Bodenwassergehalt ist räumlich und zeitlich variabel und wird in der Natur bestimmt von Niederschlag, Evapotranspiration, lateralem und vertikalem Zu- und Abfluss. Durch das Relief wird die Abflussrichtung des Bodenwassers gesteuert, sobald die Bodenmatrix wassergesättigt ist. Dagegen treten im ungesättigten Zustand durch Kapillarkräfte hydraulische Gradienten auf. Unter diesen Umständen finden meistens vertikale Bodenwasserbewegungen statt. Im gesättigten Bereich bildet sich bei einem leicht geneigten Stauhorizont ein lateraler Abfluss aus. Der Zwischenabfluss bei gesättigten Böden bzw. auf Stauhorizonten hängt stark mit dem Zuflussgebiet und der Geländeneigung zusammen und wird gut durch den TWI beschrieben. Die reliefbedingte unterschiedliche Zusammensetzung der Korngrößenanteile unterstützt in vielen Fällen die Tendenz zu erhöhter Bodenfeuchte in den niedriger gelegenen Akkumulationsbereichen.

Nach *Dyck und Peschke* (1995) und *Ehlers* (1996) wird der Bodenwasserhaushalt mit bestimmten Varianten beschrieben:

$$P = ET + I + R + G \pm \Delta S$$

Formel 6-1: Gleichung
Bodenwasserhaushalt

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.

Der Oberflächenabfluss und der Zwischenabfluss (schneller oberflächennaher Abfluss) zählen zu den schnellen Abflusskomponenten nach einem Niederschlagsereignis. Sie werden vom TWI als räumliches Muster angezeigt. Der Oberflächenabfluss entsteht, wenn die Niederschlagsintensität größer ist als die Infiltrationsrate des Bodens. Eine weitere Ursache kann in einer geringen Infiltrationsrate bei wassergesättigtem Boden liegen.

Durch Oberflächenabfluss werden zuerst sandige Kornfraktionen ausgewaschen und verlagert. Diese Kornfraktionen werden allerdings nicht so weit transportiert wie Schluffteilchen. In Abhängigkeit von 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. Der Sand dagegen sedimentiert bereits am Mittelhang bzw. in Abflussbahnen.

Die Kennwerte des Wassergehaltes sind die Feldkapazität (FK) und der permanente Welkepunkt (PWP). Der Wasserspannungsbereich (pF 1,8 - pF 4,2) gilt als pflanzenverfügbares Wasser. Der PWP definiert die Saugspannung, bei der eine Pflanze das Wasser auf Grund starker Kapillarkräfte und Adhäsion aus den Feinporen nicht mehr entziehen kann (pF 4,2). Zieht man den Anteil der Feinporen von der FK ab, erhält man die nutzbare Feldkapazität nFK. Die FK-Grenze von pF 1,8-2,5 schwankt je nach Substrat und liegt bei Sand etwas niedriger (Ehlers, 1996). So hat tonreiches Substrat bei FK einen höheren Wassergehalt, der aber nicht vollständig von der Pflanze nutzbar ist.

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 außerdem typische zeitliche Bodenfeuchteunterschiede auf.

6.2 Leitfähigkeitsmessung des Bodens (ECa)

6.2.1 Allgemein

Im Englischen wird die Leitfähigkeitsmessung des Bodens auch als ECa (engl. apparent electrical conductivity = scheinbare elektrische Leitfähigkeit) bezeichnet. Die Messung der elektronischen Leitfähigkeit des Bodens wird zur Bestimmung der Salzgehalte in der Landwirtschaft benutzt. Es ist das Gerät - EM38 entwickelt worden, das eine kontaktlose Messung ermöglicht, um somit aufwändige Bodenbeprobungen und Labormessungen zu vermeiden. Das Verfahren mit dem EM38 (Abbildung 6-2) ist ein relativ robustes und leistungsstarkes Verfahren. Das Gerät wird bei der Messung auf einen Schlitten (Abbildung 6-9) mit GPS-Empfänger befestigt und mit einem Fahrzeug über die Fläche gezogen. Dies ist ein einfaches und schnelles Verfahren, um unterschiedliche Zonen eines Schlags zu identifizieren. Ein Mindestabstand zum Fahrzeug von ca. 10 m ist zu gewährleisten, um Fehlmessungen auszuschließen. Weitere Störquellen sind Weidezäune, Hochspannungsleitungen (unter der Erde liegend) sowie künstliche Einflüsse (z.B. Vorgewende, Misthaufen). Die elektrische Leitfähigkeit des Bodens hängt stark vom Tongehalt von landwirtschaftlich genutzten Flächen ab. Des Weiteren hängt sie noch von der Feuchte und der Salzkonzentration der Bodenlösung ab. Die Erkundungstiefe des EM38 liegt bei ca. 1,5 – 2.0 m Tiefe, um den mittleren Tongehalt abzuschätzen. Parallel zu der Messung ist eine zeitgleiche Bohrstockkartierung notwendig, wobei die Feuchte und die Bodenart des Profils erfasst werden. Die gemessenen Bodenproben dienen als Vergleich und werden zur Eichung der EM38-Messung genutzt. Das Messgerät EM38 kann in zwei verschiedenen Messarten benutzt werden, zum einen im Vertikalmodus (Sende- und Empfangsspule sind senkrecht zur Erdoberfläche ausgerichtet) und zum anderen im Horizontalmodus (Sende- und Empfangsspule sind horizontal zur Erdoberfläche ausgerichtet). Dabei werden elektromagnetische Wellen ausgestrahlt und nach der Reflektion im Boden zurückempfungen. Die Messstabilität ist im vertikalen

Modus am höchsten in 30 – 40 cm Tiefe, dagegen im horizontalen Messmodus nimmt diese von oben nach unten ab (Abbildung 6-1). Die elektrische Leitfähigkeit wird in mS/m (Millisiemens pro Meter) angegeben. Typische Messwerte der EM38-Messung liegen bei Sanden

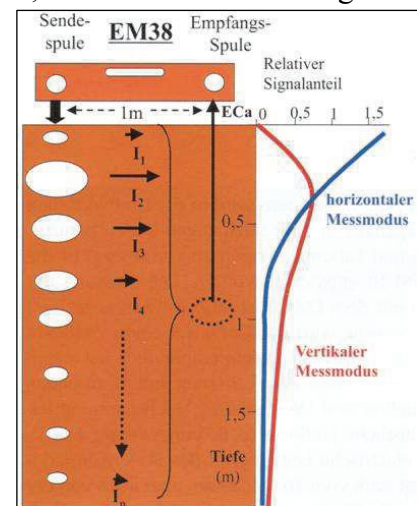


Abbildung 6-1: Messverfahren mit EM38

Quelle: KTBL – Herbst

Modus am höchsten in 30 – 40 cm Tiefe, dagegen im horizontalen Messmodus nimmt diese von oben nach unten ab (Abbildung 6-1). Die elektrische Leitfähigkeit wird in mS/m (Millisiemens pro Meter) angegeben. Typische Messwerte der EM38-Messung liegen bei Sanden

unter 15 mS/m, bei sandigen Lehmen bis Lehmen zwischen 15 und 40 mS/m und bei Böden mit 35 % Ton über 40 mS/m.

Bei diesem Verfahren wird der Ton- und Sandgehalt gemessen, somit ergibt sich ein Abbild der Bodenunterschiede des Ackers, das hier insbesondere durch die Bodenartenverteilung, Schichtungen und Bodenfeuchteunterschiede beeinflusst wird. Die Unterschiede der Leitfähigkeit lassen sich im Zusammenhang mit den Reliefinformationen (DGM) für eine intelligente Bodenbeprobung nutzen. So kann eine zielgerichtete Selektivbeprobung vorgenommen werden. Zudem ist die Leitfähigkeitsmessung auch eine Informationsgrundlage für folgende pflanzenbauliche Arbeiten: Bodenbearbeitung, Aussaat, Grunddüngung und Einsatz von Bodenherbiziden. Die hauptsächlichen Zielgrößen bei der Messung sind die Ermittlung der mittleren Tongehalte über die Erfassungstiefe und das Feststellen von Grundwasserstandorten und vernässten Stauwasserstandorten. Die Messung der Leitfähigkeit ist ohne zusätzliche Informationen nur in sehr wenigen Landschaften zur Abschätzung des Tongehaltes nutzbar. Dafür ist sie aber eine wertvolle Information in integrativen Modellen. Dort dient sie als Ergänzung bei verschiedenen Methoden, wie Hof-Bodenkarte, Bodenschätzung, Digitales Höhenmodell (TWI) und Luftbildern.

Die Kosten für eine solche Messung liegen bei 6 – 8 €/ha, dass bei einer 10jährigen Nutzung 0,80 €/ha und Jahr ausmachen würde. Auf dem Markt sind einige Dienstleister vorhanden. Die Erhebung der Messung kann bei unbewachsenen Böden und auf Grünland bei Befahrbarkeit ganzjährig erfolgen, bei Getreide bis EC 29 – 32 und bei Raps und Rüben bis der Reihenschluss beendet ist.



Abbildung 6-2: Leitfähigkeitsmessung mit dem EM38

Quelle: Werksbild Agri Con



Abbildung 6-3: Bodenscanner der Firma Agri Con

Quelle: Werksbild Agri Con

6.2.2 Zusammenhang von Geländeparametern mit der Bodenleitfähigkeit

Die Signalstärke des EM38 ist bedingt durch die Teilchengröße, dem Grad vom organischen Material, der Salzkonzentration und der Höhe des Wassergehaltes. Beim Versuchsschlag 2 - Charles Hütte ist vor drei Jahren eine Leitfähigkeitsmessung von der Firma Agri Con durchgeführt worden. Diese Messung zeigt in der Abbildung 6-4 einige Unterschiede des mS/m-Wertes an, sodass unterschiedliche Bodenarten zu erkennen sind. Die ECa-Werte müssen in Relation zu ihrer geomorphologischen Position gedeutet werden.

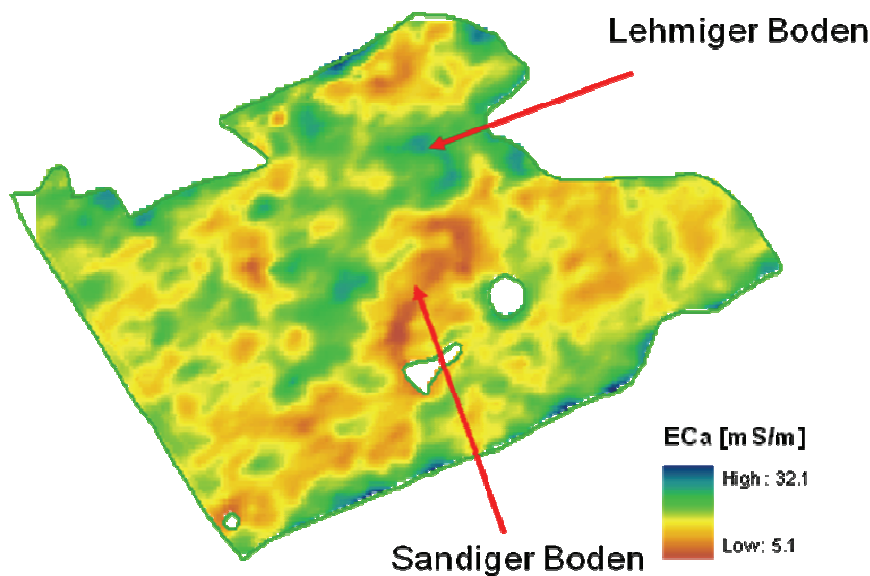


Abbildung 6-4: Leitfähigkeitsmessung beim Schlag 2 – Charles Hütte

6.3 Topographische Wetness-Index (TWI)

Der Topographische Wetness-Index ist ein sekundäres Reliefattribut, das eine flächenbezogene Vorhersage von Bodenparametern liefert. Dabei beschreibt der TWI, wie stark eine Teilfläche durch Zu- oder Abflusswasser geprägt ist und erlaubt die Abgrenzung von Feuchte- und Trockenzone (*Beven und Kirkby 1979, Moore et al. 1991*). Der Wetness-Index ist eine nichtlineare Verknüpfung aus dem spezifischen Einzugsgebiet (A_s) eines Punktes und seiner lokalen Neigung ($\tan\beta$) und wird mit folgender Gleichung berechnet:

$$\text{TWI} = \ln(A_s / \tan\beta)$$

mit

A_s = spezifisches Einzugsgebiet eines Punktes/einer Zelle,

$\tan\beta$ = lokale Geländeneigung.

Formel 6-2:
TWI-Gleichung

Das Konzept basiert auf der Annahme, dass die Geländeform die Bewegung des Wassers auch im oberen Bodenbereich bestimmt. Somit wird über die räumliche Verteilung des Bodenfeuchtemusters entschieden. Ein hoher Wetness-Index-Wert ist charakteristisch für ein konvergierendes, flaches Gelände. Bei niedrigen Werten treten im steilem Gelände Flächen mit kleinem Zuflussgebiet auf. Diese Gebiete können nun optimal bei der Aussaat und Düngung an die Pflanzenbedürfnisse angepasst bewirtschaftet werden. Diese Vorstellung gilt aber nur, wenn der laterale Fluss einen essentiellen Anteil am Gesamtbodenwasserabfluss eines Einzugsgebietes umfasst. Da der Wetness-Index sensibel auf die Konvergenz und Divergenz des Geländes reagiert, ist für die rechnergestützte Ermittlung des Indexes ein DGM mit einer entsprechend hohen Auflösung erforderlich.

Einer der dabei am meisten angewandten Parameter ist der topografische Wetness-Index (TWI). Mehrere Methoden sind verfügbar, um DGMs mit der geforderten Qualität zu erzeugen. Der TWI kann in der Präzisionslandwirtschaft als Basis bezüglich Zusatzkosten für standortspezifische Applikationskarten bei Bodenbearbeitungstiefe, Aussaatmenge und Düngeraufwand verwendet werden. Das Raummodell der Bodenfeuchtigkeit ist ein wichtiges Kriterium, um Applikationsmengen zu optimieren. Höchstwerte des TWI korrelieren in Gebieten mit hoher Bodenfeuchtigkeit, verursacht durch den seitlichen Überschuss, mit Gebieten, die oftmals zuerst austrocknen (kein seitlicher Zufluss von Wasser und Nährstoffen). Beruhend auf ein nichtlineares Abflussmodell zeigen dies, die Bodenfeuchtigkeit, die Fließstärke und den Bodensatztransport an. Neben dem TWI gibt es mehrere andere Indizes wie den Massengleichgewicht-Index oder den Bodensatztransport-Index (*Böhner und Selige, 2006*).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde der TWI mit Hilfe der Software ArcView implementiert.

6.3.1 Vergleich von TWI mit Luftbildern

Es sind visuelle Übereinstimmungen zwischen dem Luftbild (Abbildung 6-5), dem TWI-Muster-DGM 25 (Abbildung 6-6) und dem TWI-Muster-DGM RTK (Abbildung 6-7) vorhanden. Die mit dem TWI aus dem DGM (RTK) geschätzten Abfluss- und Akkumulationsmuster zeichnen sich auf dem Luftbild deutlich ab und weisen auf erhöhte Feuchte und höheren Humusgehalt hin. Das DGM stimmt teilweise mit der Geomorphologie und dem Bodenschäftsmodell überein.



Abbildung 6-5: Luftbild

Quelle: LAIV, 2007

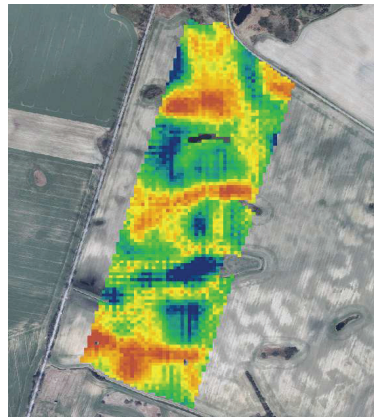


Abbildung 6-6: TWI - DGM 25

Quelle: LAIV, 2005

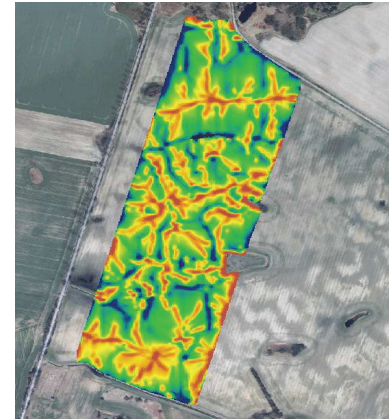
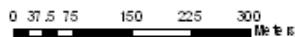


Abbildung 6-7: TWI - DGM RTK

Quelle: Stefan Ullrich, 2008



6.3.2 Vergleich von TWI – ECa – Ertrag

Es besteht eine Höhenkorrelation zwischen den normalisierten TWI – ECa-Verhältnis und dem Ertrag und das hauptsächlich in trockenen Jahren. Vor allem wird das in den eingekreisten Bereichen sichtbar. Die Abbildung 6-8 stellt das normalisierte TWI – ECa-Verhältnis da und in der Abbildung 6-9 ist die relative Ertragskarte von Winterweizen des Jahres 2006 ersichtlich. Die Ertragskarte war nur in einer vorgegebenen Rastergröße von 15 x 15 m vorhanden, sodass sie relativ schlecht zu deuten ist. Trotzdem kann man Übereinstimmungen erkennen.

Dargestellte Stellen, wo höhere elektrische Leitfähigkeit (Senken und Abflussbahnen) vorhanden ist, stimmen 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- (Abbildung 6-4) als auch TWI-Karten mit niedrigen Werten. Vereinzelt Niedrigertragszonen lassen sich auf eine schlechte Wasserversorgung zurückführen, die durch den TWI angezeigt wird. Die ECa-Kartierung ist im Zusammenhang mit dem DGM sehr wichtig. Folgende Übereinstimmungen der Muster sind nach (Schmidt, 2003) vorhanden:

- hoher TWI und hoher ECa-Wert = hohe Bodenfeuchte
- hoher TWI und niedriger ECa-Wert = Erosionsrinne
- niedriger TWI und niedriger ECa-Wert = erodierte Hangschulter
- bei keiner systematischen Übereinstimmung der Muster: vernachlässigbarer Reliefeinfluss

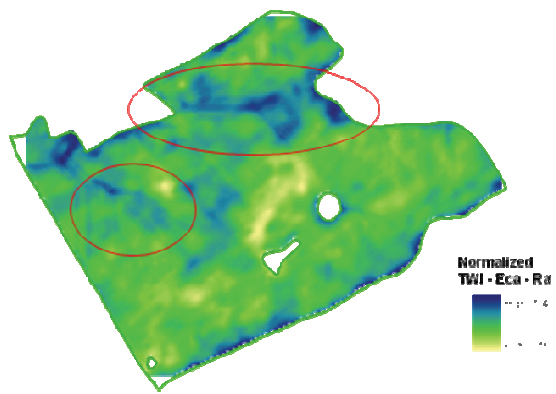


Abbildung 6-8: normalisiertes TWI – ECa-Verhältnis

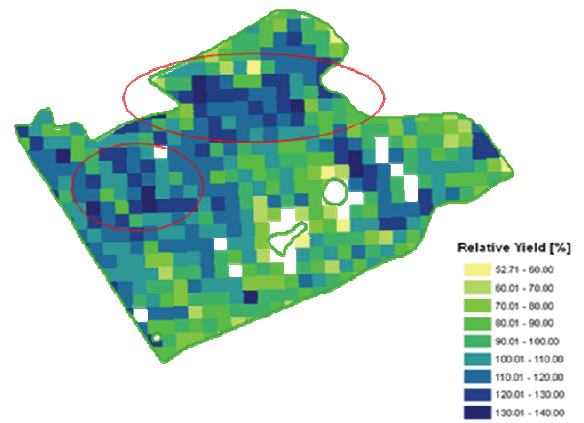


Abbildung 6-9: Relative Ertragskarte 2006

7 Integration der Reliefanalyse ins landwirtschaftliche Management

7.1 Voraussetzung an die Datenqualität

Einige Kriterien sind zu erfüllen, um eine erforderliche Datenqualität zu erzeugen, sodass das Digitale Geländemodell auch verwendet werden kann. Zum einen sollte die Höhengenaugigkeit von $\pm 0,1$ m erreicht werden und eine Rasterweite von 2 – 10 m je Landschaftstyp gewählt werden. Diese Rasterweite ist beim Laserscanningverfahren möglich, aber nicht beim RTK-GPS-Verfahren, da größere Fahrgassenabstände (bis zu 36 m) vorhanden sind. Eine Rasterweite von 10 – 30 m sieht *Grenzdörffer* (2002) für langfristige Standortinformationen als ausreichend an. Diese darf allerdings erst nach Berechnung der Ableitungen realisiert werden. Somit würde eine geringe räumliche Auflösung zu geringeren Neigungswerten und damit schließlich zu höheren TWI-Werten führen. Als weitere Anforderung steht die Auswahl des Interpolationsverfahrens. Gerade bei der Datenerfassung mit GPS ist durch die Fahrgassenabstände eine ungünstige Fahrgassengeometrie vorhanden. Daher ist es entscheidend, das richtige Interpolationsverfahren (z.B. Kriging) auszuwählen. Viele Messwerte (z.B. beim Laserscanning-Verfahren) führen zu einer hohen Genauigkeit der Geländeoberfläche. Für die Qualität der DGM ist nicht nur die Genauigkeit der gemessenen Punkte wichtig, sondern auch geomorphologische Informationen über die Erdoberfläche wie Geländekanten, Höhenlinien, Formlinien, Aussparungsflächen, und ebene Flächen, aber auch Extrema usw. sind bei der Ableitung von DGM sehr wichtig.

Das Ziel dieser hohen Anforderungen ist es, eine hydrologisch kontinuierliche Oberfläche zu erhalten. Die Qualität spiegelt sich in der Ableitung des DGM wieder.

7.2 Einbeziehung in Potentialkarten

Aus einem dem DGM können Standortpotenzialkarten abgeleitet werden und zur Entscheidungsfindung bei den Maßnahmeplanungen dienen. Das Ziel ist eine optimale Ausnutzung des Ertragspotenzials eines Schlages. Nach *Pennock et. al* (2001) sind ertragsbestimmende Faktoren: die Standorteigenschaften, stochastische Faktoren (Witterung), die Bewirtschaftung, sowie dynamische Faktoren (z. B. Bodenfeuchte), die statisch zum Zeitpunkt der Aussaat eingeschätzt werden können. Eine Ertragsmaximierung lässt sich in der Regel über die Erhöhung der Stickstoffdüngung erzielen, wenn der Maximalertrag (das Ertragsziel) im Vordergrund steht. Der Einsatz von Stickstoff kann auf der Basis der berechneten Zufluss- / Ab-

flusspotenziale minimiert werden. Die TWI-Karten sind gleich Potenzialkarten, nach denen direkt gedüngt oder ausgesät werden kann. Sie können bei der Entscheidungsfindung helfen, an welchem Ort Zu- bzw. Abschläge zu den Applikationskarten berücksichtigt werden sollten.

Die Applikationskarten werden als Raster- oder Polygondaten mit standortbedingten Werten zur Aussaat, Düngung usw. genutzt. Diese Daten sind für die Maschinensteuerung der eingesetzten Landtechnik (Landwirtschaftgeräte) erforderlich. Bei den Landmaschinen sollte aber eine Mindestflächengröße (z.B. 400 m²) gewählt werden, um auf bestimmte Areale reagieren zu können.

Bei der Verwendung einer Potentialkarte kann auch die Bodentiefe eine Rolle spielen. Durch TWI-Extreme werden Bereiche sichtbar, die durch eine tiefere Bearbeitung strukturell gefördert werden können. Nach *Sommer und Voßhenrich* (2002) können durch eine tiefe Bearbeitung (0,20 – 0,25 cm) die Sauerstoffarmut der Vernässungszonen und die schlechte Struktur der humusarmen und trockenen Hangbereiche vermindert werden, um somit den Pflanzen ein besseres Wachstum zu ermöglichen. Auf der vorwiegenden Schlagfläche reicht dagegen eine flache Bearbeitung, die Arbeitszeit spart und nur eine geringere Kraftstoffmenge benötigt. Die Durchsetzung verschiedener Bearbeitungstiefen innerhalb eines Schlages, lassen sich einerseits durch manuelle Steuerung der Hydraulik erreichen, wobei der Fahrer die Information über eine Karte bzw. über das Display beziehen muss. Aber es gibt Prototypen (Amazone), die ihre Bearbeitungstiefe mittels GPS-Empfänger selbstständig regulieren.

Die Aussaatkarten stellen eine strategische Planung des Pflanzenbestandes dar, wobei vordergründig eine optimale Pflanzenanzahl in Bezug auf Ertragsziel, Anbausystem, Standortwasserangebot u.a. steht. Der Beitrag des TWI bezieht sich auf die Einschätzung des Bodenwasseranteils zum Zeitpunkt der Keimung. Negativ wirken die Austrocknung des Bodens sowie Verschlammung und Staunässe in den abflusslosen Senken. Bei erwartetem Wassermangel im Sommer sollten die Bestände nicht zu dicht gesät werden. Beim Pflanzenaufgang steht die maximale Pflanzenanzahl fest, deren Wachstum im Folgenden über eine Bestandesführung (z.B. Düngung) gesteuert werden kann.

Für die Bestandesführung wird die N-Düngung durch operative Entscheidungen in Abhängigkeit vom Verlauf der Witterung während der Vegetationsperiode festgelegt (*Wenkel et al.*, 2002). Der 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. Insbesondere bei sauerstoffarmen, vernässten Böden besteht die Gefahr der Denitrifizierung. Eine Umweltrelevanz besitzt die Düngermenge wegen der Auswaschungsgefahr in Vorfluter, wo hohe Stickstoffmengen zu Eutrophierung führen können. Bei geringer Wasserverfügbarkeit sind hohe Nährstoffmengen durch Pflanzen nicht aufnehmbar.

7.3 Oberflächenberechnung

Das DGM kann zur Vermessung eines Schlags verwendet werden und würde sogar die wahre Größe ergeben. Bei der Flächenermittlung mit einer GPS-Schlagumfahrung (z. B. bei Cross Compliance Kontrollen) bzw. aus Katasterkarten erhält der Eigentümer die planimetrische Fläche. Diese weicht von der tatsächlich zu bearbeitenden Fläche ab. Als Ursache dafür ist die unterschiedliche Geländeneigung eines Schlags anzusehen. Die Flächengröße wird umso größer, je stärker die Neigungen und der Höhenunterschiede eines Schlags sind. Zudem spielt die Auflösung des DGM eine entscheidende Rolle, um eine bestmögliche Anpassung an das Gelände zu erhalten. Wenn ein DGM der Landwirtschaft zur Verfügung steht, kann neben der DGM-Analyse ohne weiteren größeren Aufwand die tatsächliche Oberfläche berechnet werden. Es stellt sich die Frage, welche Relevanz die tatsächliche Größe in der landwirtschaftlichen Praxis hat. Rechtlich gesehen ist der Grundbucheintrag bindend, aber bei der Beantragung von Subventionen zur exakten Berechnung von Saatgut-, Dünger und Pflanzenschutzmitteln u.a. zählt die tatsächlich bewirtschaftete Fläche. In der Abbildung 7-1 wird ein 3D-Modell vom Schlag 2 – Helpter See dargestellt und man die visuellen Höhenunterschiede erkennen. Rein grafisch betrachtet kann man sich denken, dass ein horizontaler Schlag eine geringere Flächengröße aufweisen würde. Der Schlag 2 – Charlies Hütte ist bei der Abbildung 7-2 ersichtlich.

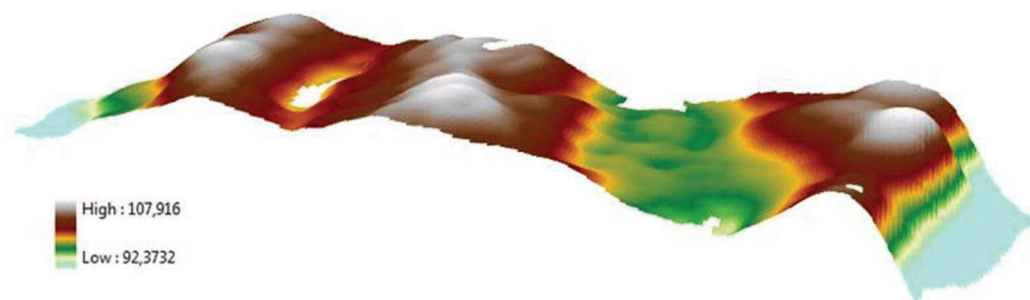


Abbildung 7-1: 3D-Modell (Schlag 1 – Helpter See)

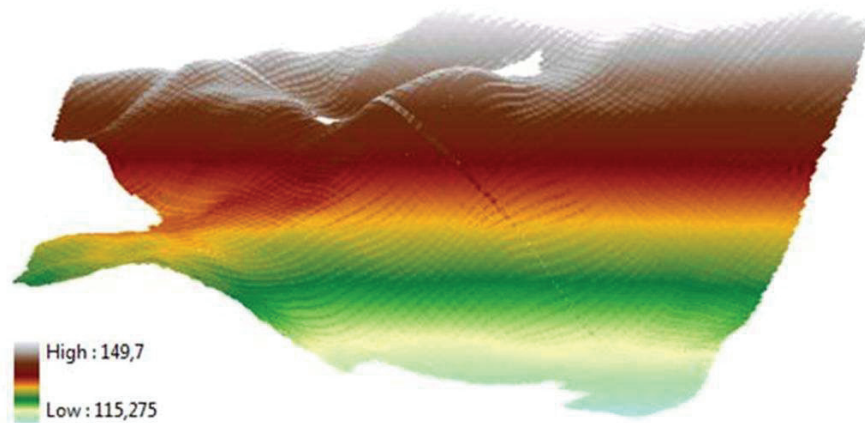


Abbildung 7-2: 3D-Modell (Schlag 2 – Charlies Hütte)

7.4 Cross Compliance

Wassererosion

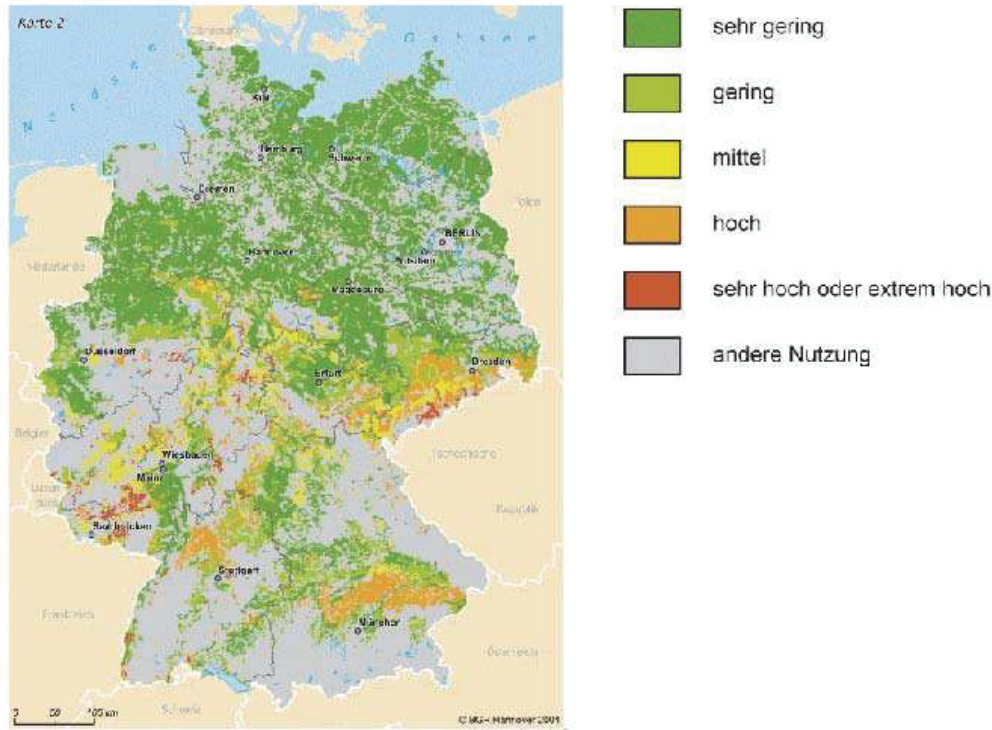
Die Cross Compliance Regelungen, die am 1. Januar 2009 in Deutschland in Kraft treten, müssen neuerdings auch Wassererosionen mit in Betracht ziehen. Das Wassererosionspotential ist auf dem Feldblockniveau festgelegt, es basiert auf der DIN-Norm 19708. Die DIN-Norm 19708 basiert auf dem USLE (universal soil loss equation = universeller Bodenschadensausgleich) und beinhaltet als Faktoren Bodentyp, Niederschlag, Steigungswinkel und Steigungslänge. Das Wassererosionspotenzial wird in drei verschiedene Klassen getrennt. Für Feldblöcke des mittleren und starken Erosionspotenzials werden bestimmte Beschränkungen gelten (Eisele, 2008). Dabei könnte die Einstufung auf ein Feldblockniveau ziemlich ungenau sein und dem Landwirt kaum praktischen Rat für eine Erosionsminderung geben. Mit Hilfe von DGMs mit einer hohen Qualität und genauer Bodendaten kann das Erosionspotenzial aus einer Feldskala entnommen werden, um den wichtigen Mikroabbau fachlich zu beurteilen. Des Weiteren kann ein Konturpflügen-Algorithmus für einen Traktor den Landwirt helfen, die potenzielle Gefahr der Wassererosion (Abbildung 7-3) zu minimieren. Je nach Gefährdungsklasse sollen die Landwirte spezielle Auflagen bis hin zum generellen Pflugverbot einhalten.

Mit parallelem Spurführungssystem können gewisse Dinge vollzogen werden:

- Dokumentation von Erosionsvorbeugungsmaßnahmen, z.B. Konturpflügen
- genaue Bestimmung des Erosionspotentials

- mit geplanter automatischer Lenkung sind festgelegte Maßnahmen gegen Wassererosion realisierbar

Erosionsgefährdete Flächen in Deutschland



Quelle: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2004 (BGR) – Hannover, 2004

Abbildung 7-3: Karte über Erosionsgefährdete Flächen in Deutschland

Die Gewährung von Direktzahlungen wird an die nachweisliche Einhaltung von Vorschriften in bestimmten Bereichen, wie z.B. der Umwelt gekoppelt. Dafür wurden 19 EU-Vorschriften festgelegt, die bei Nichteinhaltung zur Kürzung der Direktzahlungen führen können. Die Erhaltung der Flächen in gutem landwirtschaftlichem und ökologischem Zustand regelt die Direktzahlungsverpflichtungsverordnung. In dieser Verordnung ist der Erhalt von Landschaftselementen, sowie der Schutz vor Bodenerosion enthalten, u.v.m. Beim Schutz des Bodens vor Erosion ist die derzeit gültige Regelung in § 2 DirektZahlVerpflV festgelegt: Nach der Ernte der Vorfrucht und vor dem 15. Februar des Folgejahres dürfen 40 % der Ackerfläche nicht gepflügt werden; es sei denn, die gepflügten Flächen werden vor dem 1. Dezember eingesät. Diese Vorschrift ist unzureichend, da sie zu unspezifisch ist und von der EU deshalb nur als vorübergehend genehmigt wurde. Diese Regelung kann hinsichtlich eines wirksamen Erosionsschutzes auf gefährdeten Flächen oftmals nicht angewendet werden. Daher ist die neue Vorgabe im DirektZahlVerpflV seit 2004: Der Schutz des Bodens vor Erosion ist ab 1. Januar 2009 durch wirksame Maßnahmen zu gewährleisten, die sich an den aus der Einteilung

lung landwirtschaftlicher Flächen nach dem Grad der Wasser-oder Winderosionsgefährdung auszurichten haben. Die folgende Konsequenz ist die Ausweisung der landwirtschaftlichen Nutzfläche in Deutschland nach ihrer Gefährdungsstufe für: Wassererosion und Winderosion. Für die einzelnen Gefährdungsstufen sind Regelungen für den Ackerbau festzulegen. Folgende Standortfaktoren gehen in die Berechnung mit: Bodenart, Niederschlag, Hangneigung und Hanglänge (optional). Dieses ist die Methode nach der DIN-Norm 19708. Es wird eine Einteilung in drei Gefährdungsklassen geben:

- CC Wasser 0 → nicht erosionsgefährdet (keine Auflagen)
- CC Wasser 1 → erosionsgefährdet (Auflagen)
- CC Wasser 2 → stark erosionsgefährdet (Auflagen)

Auflagen können z.B. Pflugverbot, reduzierte Bodenbearbeitung, Anbau von Winterungen oder Bewirtschaftung quer zum Hang sein. Auf den Gefährdungsfaktor Winderosion wird hier nicht näher eingegangen.

Beispiel für die Vorbeugung von Wassererosion

Die allgemeine Vorstellung lautet verbreitet: Um eine Reduzierung des Wassererosionspotenzials zu erreichen, ist keine Umstellung (geringere Rentabilität) des gesamten Ackerbaus auf vielen Flächen erforderlich, aber gute rechtzeitige Daten und passende Maßnahmen zum richtigen Zeitpunkt.

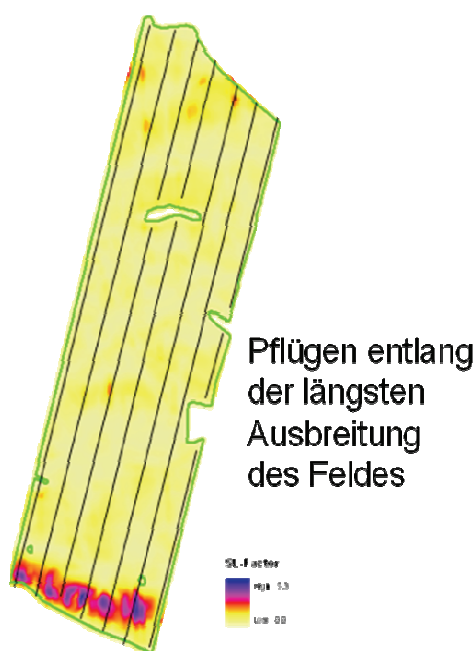


Abbildung 7-4: Flussituation (Schlag 1 - Helpter See)

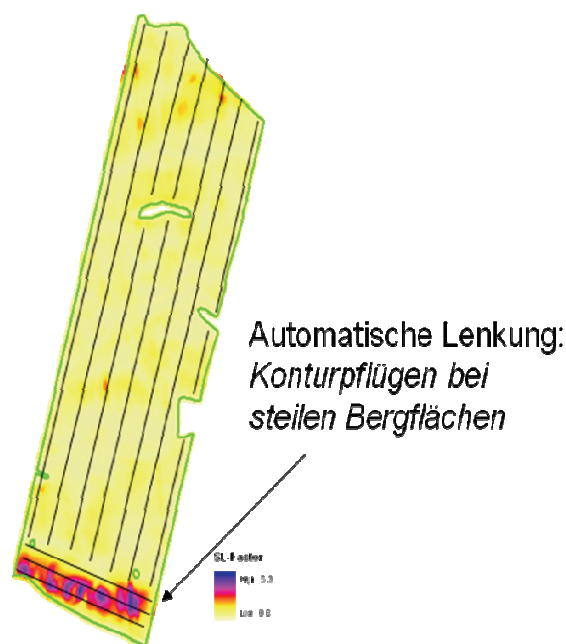


Abbildung 7-5: Erosionsvorbeugung (Schlag 1 - Helpter See)

8 Diskussion

Die Aufgabe dieser Bachelorarbeit war es ein Digitales Geländemodell mit einem Parallelem Spurführungssystem zu erstellen und anschließend zu analysieren. Dabei galt es, während der Feldarbeiten die Höhendaten gleichzeitig mit zu dokumentieren, um später daraus ein DGM zu erstellen. Dies soll vielleicht ein zukünftiges Verfahren für die praktische Landwirtschaft werden. Vom DGM lassen sich Reliefattribute ableiten, die weiter genutzt werden können in Verbindung mit anderen Datenebenen (z.B. Ertrag, Bodenleitfähigkeit) auf landwirtschaftlichen Flächen. Die vorhandenen Prozesse, die auf einer Fläche stattfinden, sollen sich mit den genannten Informationen erklären lassen und schließlich für bestimmte Anwendungen in der Landwirtschaft genutzt werden.

Bei den Praxisversuchen wurde die Erfassungsmethode der fahrzeuggestützten Vermessung mit DGPS angewandt und gleichzeitig wurden zwei Genauigkeitsstufen (Starfire 2- und RTK-GPS) getestet, untersucht und anschließend ausgewertet. Dabei war die Messgenauigkeit von entscheidender Bedeutung, die zur Qualität eines DGMs beiträgt. Der Vorteil der fahrzeuggestützten Vermessung ist, dass die Erstellung des DGMs am kostengünstigsten ist im Gegensatz zu anderen Verfahren (z.B. Laserscanning). Aber auch die hohe Genauigkeit des RTK-GPS ist ein entscheidender Vorteil für die Wahl, dass die Datenerfassung mit der normalen Feldbearbeitung gekoppelt werden kann. Ein Nachteil dieser Methode ist, dass bei Fahrgassenbefahrung (z.B. bei Düngung, Pflanzenschutz) eine ungünstige streifenförmige Verteilung der Messpunkte festgestellt wurde. Bei den Versuchen wurde auf einen Schlag mit 18 m Arbeitsbreite und auf einem anderen Schlag mit 36 m Arbeitsbreite gemessen, sodass zwischen den Fahrgassen keine Messpunkte vorhanden waren. Diese mussten mit Hilfe eines Interpolationsverfahrens möglichst genau ermittelt werden. Dafür erwies sich das geostatistische Interpolationsverfahren „Kriging“ als effektivste Variante, weil bei einfachen Interpolationsverfahren keine Oberfläche mit genügender Abflusskontinuität für hydrologische Algorithmen erzeugt werden kann. Dagegen hat das Laserscanningverfahren einen Vorteil, da die Messdichte (bis zu vier Punkte pro m²) wesentlich höher ist, aber die Fixkosten dieses Verfahrens sind wesentlich größer. Die Interpolationsberechnung wurde mit der GIS-Software ArcView durchgeführt.

Zur Erfassung der DGM sind bestimmte Qualitätsanforderungen erforderlich, die sich einteilen lassen in Messgenauigkeit und Interpolationsgenauigkeit. Bei der Interpolation ist die Punktdichte und -anordnung und die Interpolationsmethode entscheidend. Daraus sollte zur

Beurteilung die horizontale Auflösung und die vertikale Präzision abgeleitet werden, um aus dem erstellten DGM auf bodenbedingte Standortunterschiede zu schließen. Je nach Landschaftstyp sollte eine räumliche Auflösung (Rasterweite) von 2 - 10 m gewählt werden, wobei eine Höhengenaugigkeit des interpolierten DGM von $\pm 0,15$ m notwendig ist, um Zusammenhänge zwischen Relief und Boden auf Schlagebene nachweisen zu können. Diese Rasterweite ist beim Laserscanningverfahren möglich, aber nicht beim RTK-GPS-Verfahren, da größere Fahrgassenabstände (bis zu 36 m) vorhanden sind. Eine Rasterweite von 10 – 30 m sieht *Grenzdörffer* (2002) für langfristige Standortinformationen für den Landwirt als ausreichend an. Diese darf allerdings erst nach Berechnung der Ableitungen realisiert werden. Somit würde eine geringe räumliche Auflösung zu geringeren Neigungswerten und damit schließlich zu höheren TWI-Werten führen.

Bei der Untersuchung der beiden verschiedenen Genauigkeitsstufen (RTK und Starfire 2) wurde auch noch eine dritte Genauigkeitsstufe (Starfire 1) von der ECa-Messung mit betrachtet. Hierbei waren keine wesentlichen Unterschiede zwischen RTK und SF 2 zu erkennen, dafür aber von RTK zu SF 1. Die Ursache liegt darin begründet, das RTK einen Zweifrequenzempfänger benutzt und somit beide Frequenzen (L1 und L2) empfangen kann. Dagegen hat SF 1 nur einen Einfrequenzempfänger mit nur einer Frequenz (L1), was eine hohe Ungenauigkeit verursacht und sich als nicht ausreichend zur Ableitung der notwendigen DGM-Qualität erwies. Bei einer öfteren Messung des DGMs mit RTK-GPS ist es angebracht, eine festinstallierte RTK-Basisstation zu benutzen, weil bei einer mobilen RTK-Basisstation sich durch unterschiedliche Positionen (Feldrand) die Höhenwerte bei jeder erneuten Messung ändern. Somit ist eine mobile RTK-Basisstation eher nicht geeignet um wiederkehrende DGM-Messungen eines Schlages durchzuführen. Hier empfiehlt sich eher die festinstallierte RTK-Basisstation. DGMs sind eine sehr effiziente Datengrundlage, da sie eine lange Gültigkeitsdauer haben. Mit einer einmaligen Vermessung zu akzeptablen Kosten entsteht ein langfristig nutzbarer Erkenntnisgewinn über Flächen, die bei vielen praktischen landwirtschaftlichen Arbeiten genutzt werden kann.

Ein weiteres Untersuchungsmerkmal war die Arbeitsbreite, die bei den beiden Versuchsschlägen (18 m und 36 m) unterschiedlich war. Damit konnte gezeigt werden, was eine doppelt so große Arbeitsbreite für die DGM-Erstellung bewirkt. Als Fazit ist festzustellen, je geringer die Arbeitsbreite, umso höher ist die Messpunktdichte und schließlich die Qualität des ermittelten DGMs.

Weiterhin lassen sich mit der DGM-Analyse Reliefattribute ableiten. Diese Reliefattribute werden in zwei wesentliche Klassen einteilen: 1. Primäre Geländeparameter, die ohne Berücksichtigung weiterer Parameter mit Hilfe des DGM berechnet werden können und 2. Sekundäre Geländeparameter, die mit primären Parametern miteinander verknüpft werden. Der Vorteil der DGM-Analyse liegt darin, dass sie auf die Geländehöhe, einem statischen Wert, als einzige zu erfassende 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. Als zentraler Baustein einer landwirtschaftlich orientierten DGM-Auswertung erwies sich der Topographische Wetness-Index $TWI = \ln(A_S/\tan\beta)$. Der TWI beschreibt, wie stark eine Teilfläche durch Zu- oder Abflusswasser geprägt ist und erlaubt die Abgrenzung von Feuchte- und Trockenzone. Zudem kann der TWI in der Präzisionslandwirtschaft als Basis bezüglich der Beurteilung von Zusatzkosten für standortspezifische Applikationskarten bei der Bodenbearbeitungstiefe, der Aussaatmenge und dem Düngeraufwand verwendet werden. Das Raummodell der Bodenfeuchtigkeit ist ein wichtiges Kriterium, um Applikationsmengen zu optimieren. Als Weiteres wurde die Verknüpfung mit Karten der elektrischen Bodenleitfähigkeit vorgenommen, um Bodeneigenschaften noch besser zu berücksichtigen. Aber auch der erreichte Ertrag wurde mit der ECa und dem TWI verglichen und es zeigten sich Korrelationen. Die DGM-Analysemethoden, die untersucht wurden, liefern stabile Zonen für standortspezifische Schwankungen und deren Nutzung beim Pflanzenbaumanagement. So sind sie ein nützliches Werkzeug, um Karten zur Standortqualität zu erarbeiten.

Vor allem die Einbeziehung des DGMs in Potentialkarten ist als einer der wichtigsten Punkte der DGM-Erstellung zu betrachten. Als weitere Anwendungsgebiete sind die Oberflächenberechnung zu erwähnen, die bis heute aber noch keine große Relevanz hat. Eine weitere Bedeutung besteht für die Mobilfunkplanung, um die Abdeckung der Mobilfunknetze zu prüfen und weiter zu entwickeln. Aber auch das wichtige Thema der Wassererosion, das ab 1. Januar 2009 neu in den Cross Compliance Vorschriften geregelt wird, um das Wassererosionspotential zu senken, zeigt die zunehmende Bedeutung der DGM auf.

Die Erstellung und anschließende praxisbezogene Anwendungen von DGM ist ein weiterer Schritt bei der Optimierung landwirtschaftlicher Entscheidungen im Bereich der Präzisionslandwirtschaft (Teilflächenbearbeitung) mit dem Ziel der weiteren Verbesserung der Ökologie und Ökonomie im landwirtschaftlichen Betrieb. Es konnte aufgezeigt werden, dass hochge-

naue DGM als zusätzliche Informationen bei der Nutzung von parallelen Spurführungssystemen erzeugt werden können. Die Qualität des Korrektursignals verursacht bedeutende Unterschiede in der Genauigkeit der gemessenen Höhe. Eine weiterführende Forschung ist für einen automatisierten Arbeitsablauf der hochgenauen DGM-Erstellung und Qualitätsanalyse erforderlich. Die DGM-Analyse zur umfangreicheren landwirtschaftlichen Nutzung muss weiter automatisiert und für den Praktiker einfacher nutzbar gemacht werden.

9 Zusammenfassung

Die Erstellungsmethoden und Nutzungsvarianten (Anwendungen) für Analysen eines Digitalen Geländemodells wurden vorgestellt und näher untersucht. Der Schwerpunkt der Arbeit lag darin, eine Erfassungsmethode mit Parallelem Spurführungssystem zu testen, die in der Praxis auf landwirtschaftlichen Flächen angewendet werden kann. Aber auch die Analyse der Geländeoberfläche war ein weiterer Schwerpunkt. Das DGM ist geeignet, um im Geoinformationssystem mit sämtlichen anderen Datenebenen (Ertrag, Bodenleitfähigkeit, usw.) eines Schlages in Beziehung gesetzt zu werden. Damit sind die Prozesse, die auf einer Fläche stattfinden, besser erklärbar und können für weitere Anwendungen nutzbar gemacht werden.

Ein Ziel war es, während der Feldarbeiten die Höhendaten gleichzeitig mit zu dokumentieren, um später daraus ein DGM zu erstellen. Als weiteres Ziel wurde definiert, Aussagen über die Schlagheterogenität zu finden, um Teilschläge für eine standortbezogene Bewirtschaftung zu analysieren und darzustellen.

Beim praktischen Versuch wurde die fahrzeuggestützte Vermessung mit dem GPS (RTK und Starfire 2) als Erfassungsmethode angewandt, die als günstigste Variante zur DGM-Erstellung mit erforderlichen Qualitätsansprüchen gilt. Da bei dieser Erfassungsmethode durch die Fahrgassenbreite (18 m und 36 m Arbeitsbreite) eine ungünstige streifenförmige Verteilung der Messpunkte gegeben war, musste man die Punkte zwischen den Fahrgassen interpolieren. Ein einfaches Interpolationsverfahren kann keine Oberfläche mit genügender Abflusskontinuität für hydrologische Algorithmen erzeugen. Dafür erwies sich das geostatistische Interpolationsverfahren „Kriging“ für RTK- bzw. SF 2-DGM als effektivste Variante. Die Berechnung der Interpolation erfolgte mit dem GIS-Programm ArcView. Eine weitere Erfassungsmethode, das Laserscanningverfahren (per Flugzeug) wurde näher erläutert, da diese auch die geforderten Qualitätsanforderungen erfüllt.

Für die Erfassungsmethoden und die erstellten DGMs waren bestimmte Qualitätskriterien gefordert worden, um aus DGM-Ableitungen auf bodenbedingte Standortunterschiede zu schließen. Je nach Landschaftstyp zeigte sich, dass eine räumliche Auflösung von 2 - 10 m bei einer Höhengenaugkeit des interpolierten DGM von $\pm 0,15$ m notwendig ist, um Zusammenhänge zwischen Relief und Boden auf Schlagebene nachweisen zu können. Diese geforderte Höhengenaugkeit ist erst in den letzten Jahren durch neue Technologien in der DGM-Erfassung wie z.B. RTK-GPS und flugzeuggetragene Laserscanner ermöglicht worden. Es wurden beim Versuch Untersuchungen zur Genauigkeit getestet, da zwei verschiedene Ge-

naugkeitsstufen des GPS-Systems vom Unternehmen John Deere verwendet wurden. Auf den zwei Versuchsflächen wurden des Weiteren noch unterschiedliche Arbeitsbreiten (18 m und 36 m) verglichen und hinsichtlich der ermittelten Genauigkeit des DGMs untersucht.

Bei der DGM-Analyse wurden Reliefattribute, die sich in zwei wesentliche Klassen einteilen lassen: 1. Primäre Geländeparameter; 2. Sekundäre Geländeparameter, berechnet. Diese abgeleiteten Reliefattribute geben Auskunft über das entsprechende DGM des Untersuchungsgebietes. Als zentraler Baustein einer landwirtschaftlich orientierten DGM-Auswertung erwies sich der Topographische Wetness-Index $TWI = \ln(A_s/\tan\beta)$. Der TWI beschreibt, wie stark eine Teilfläche durch Zu- oder Abflusswasser geprägt ist und erlaubt die Abgrenzung von Feuchte- und Trockenzone. Bei dem Vergleich zwischen TWI und Luftbildern wurde festgestellt, dass teilweise Übereinstimmungen zu erkennen waren. Des Weiteren wurde der TWI auch noch mit der Bodenleitfähigkeit und dem Ertrag verglichen.

Zum Schluss wurde dann die Integration der Relieffanalyse in landwirtschaftliche Entscheidungsprozesse erläutert. Vor allem die Einbeziehung des DGMs in Potentialkarten ist als einer der wichtigsten Punkte für eine DGM-Erstellung zu stehen. Aber auch das wichtige Thema der Wassererosion, die ab 1. Januar 2009 neu in den Cross Compliance Vorschriften geregelt wird, kann durch DGMs qualifizierter beurteilt werden.

Literaturverzeichnis

- BARTELME, N. (1995):** Geoinformatik, 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.
- BERNING, F. (2008):** Top Agar – Das Magazin für moderne Landwirtschaft. GPS: Denken statt lenken S.94-98
- 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. (1996):** Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 2: Analysen, Anwendungen und neue Entwicklungen. - Wichmann Verlag 1996
- BILL, R. (1999):** Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 2: Analysen, Anwendungen und neue Entwicklungen. Wichmann. Heidelberg. 475 S
- BILLWITZ, K. (2000):** Geomorphologische Untersuchungen. In: Barsch, H., Billwitz, K., Bork, H.-R. [Hrsg.]: Arbeitsmethoden in Physiogeographie und Geoökologie. Klett-Perthes. Gotha, Stuttgart.
- BÖHNER, J. AND SELIGE, T. (2006):** Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation.- Göttinger Geographische Abhandlungen (SAGA – Analysis and Modelling Applications), Heft 115.- pp. 13-28.
- 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.
- 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.
- CONRAD, O. (2001):** Digitales Geländemodell - DiGeM,
www.geogr.uni-goettingen.de/pg/saga/digem/.
- 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.
- EISELE, J. (2008):** Aktueller Stand des Wissens zur Wassererosion.- In: FNL [Hrsg.] (2008): Strategien zum Bodenschutz – Sachstand und Handlungsbedarf.- pp. 143 – 146
- FAVEY, E. (2001):** Investigation and Improvement of Airborne Laser Scanning Technique for Monitoring Surface Elevation Changes of Glaciers. Dissertation. ETH Zürich No.14045.
- FREEMAN, T.G. (1991):** Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid, Computers and Geoscience, 17(5), S. 709-717.
- 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.
- 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.

- HANKEMEIER, P., ENGEL, I., KOCH, S. (1998):** SAPOS[®]-ein aktives Bezugssystem für multifunktionale Anwendungen. In: Zeitschrift für Vermessungswesen 5/98. S.149-156
- HERBST, M. (2001):** Dissertation: Regionalisierung von Bodeneigenschaften unter Berücksichtigung geomorphometrischer Strukturen für die Modellierung der Wasserflüsse eines mikroskaligen Einzugsgebiets. Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
- HERBST, R., HUFNAGEL, J., JARFE, A., WERNER, A. (2004):** Precision Farming: Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL-Schrift 419. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) - Darmstadt
- KAMMERER, P. (1987):** Computergestützte Relieffanalyse unter Verwendung des Digitalen Geländemodells, Münchner Geographische Abhandlungen, Reihe A, Band A 36, München.
- KAPPAS, M. (2001):** Geografische Informationssysteme: Das Geographische Seminar. Braunschweig: Westermann Schulbuch Verlag.
- KLOEPFER, F. HÜTER, J., KLÖBLE, U. (2005):** Elektronik, Satelliten und Co: Precision Farming in der Praxis. KTBL-Heft. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) – Darmstadt
- KNAUER (2003):** Höhendaten aus Laserscan-Messungen.
http://www.braunschweig.de/rat_verwaltung/verwaltung/fb61_2/laserscan.html
- KÖTHE, R. (2000):**
http://www.scilands.de/service/faq/definitionen_dgm/definitionen_dgm.htm
- KRAUS, K. (2000):** Photogrammetrie. Band 3: Topographische Informationssysteme. Dümmler. Bonn. 419 S.
- LANDESAMT FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND GEOLOGIE MECKLENBURG-VORPOMMERN (2003):** Beiträge zum Bodenschutz in Mecklenburg-Vorpommern. Böden in Mecklenburg-Vorpommern – Abriss ihrer Entstehung, Verbreitung und Nutzung.
- LEHMANN, W. (1995):** Anwendung geostatistischer Verfahren auf die Bodenfeuchte in ländlichen Einzugsgebieten, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft Universität Karlsruhe (TH), 52, Karlsruhe, 174 Seiten.
- LESER, H. (1991):** Landschaftsökologie. Ulmer UTB. Stuttgart. 647 S.
- MOORE, D., O'LOUGHLIN, E.M. & BURCH, G.J. (1988):** A contour-based topographic model for hydrological and ecological applications, Earth Surface Processes and Landforms, 13, S. 305-320.
- 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.
- MORENO, M, LEVACHKINE, S. TORRES,M. and QUINTERO, R. (2003):** Geomorphometric Analysis of Raster Image Data to Detect Terrain Ruggedness and Drainage Density.- Progress in Pattern Recognition, Speech and Image Analysis.- Springer Berlin / Heidelberg: pp 643 – 650
<http://www.springerlink.com/content/yy96xmfdd4c9t3j0/fulltext.pdf>
- NUGTEREN, A. AND 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.
- 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.
- 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.

- RESNIK, B., BILL, R. (2000):** Vermessungskunde für den Planungs-, Bau- und Umweltbereich. Wichmann. Heidelberg. 266 S.
- SCHILLING et al. (1965):** Natürliche Standorteinheiten der landwirtschaftlichen Produktion in der DDR. 125 S., Markkleeberg
- SCHMIDT, F. (2003):** Dissertation: Hochgenaue Digitale Geländemodelle – Untersuchungen zur Erstellung, Analyse und Anwendung in der Landwirtschaft. Universität Rostock.
- SOMMER, C., VOßHENRICH, 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>.
- 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.
- THIERE, J., KIESEL, J. et al. (2001):** Abiotische Standortbedingungen in Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern. Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsfor- schung (ZALF e.V.), Institut für Bodenlandschaftsforschung, Müncheberg
- WENKEL, K.-O., BROZIO, S., GEBBERS, R. (2002):** Düngung. Abschlussbericht Projekt „preagro“. <http://www.preagro.de>.
- 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.

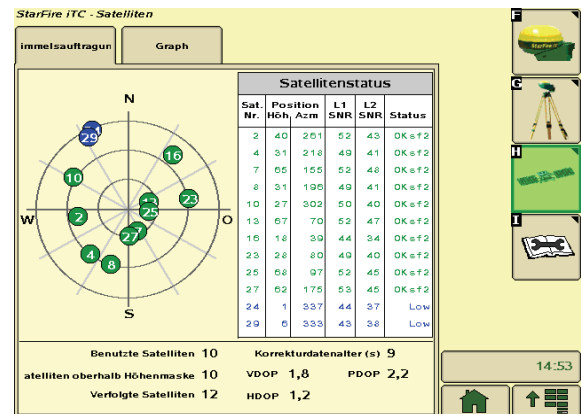
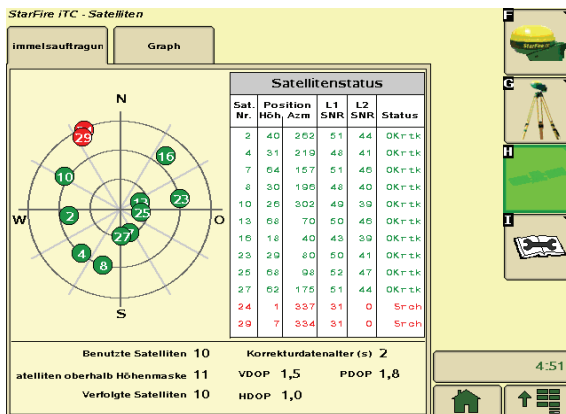
Anhang

Hier sind die Display-Ausschnitte der beiden GPS-Terminals (GS 2600) von John Deere zum Vergleich der Genauigkeiten RTK gegen SF 2 dargestellt.

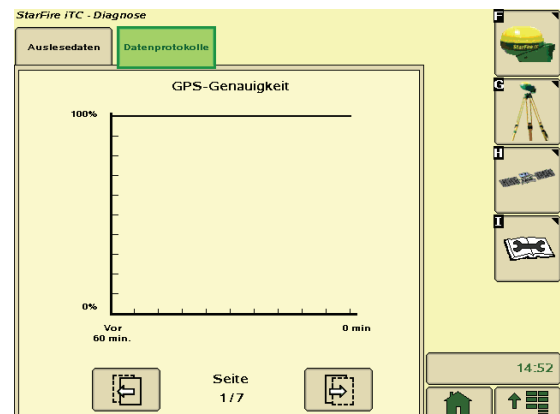
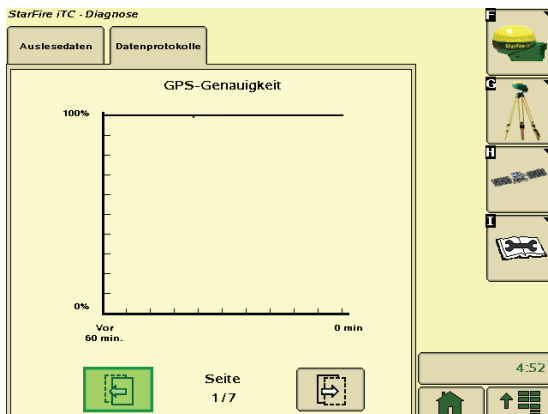
RTK

Starfire 2

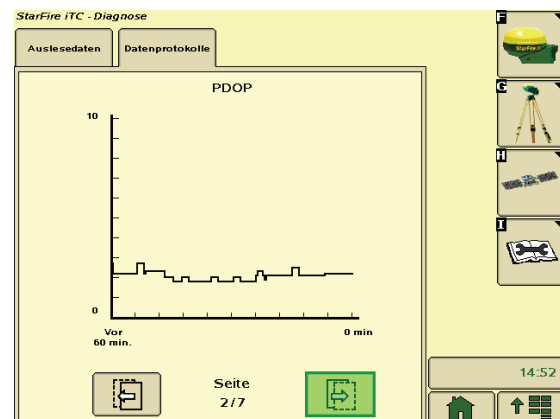
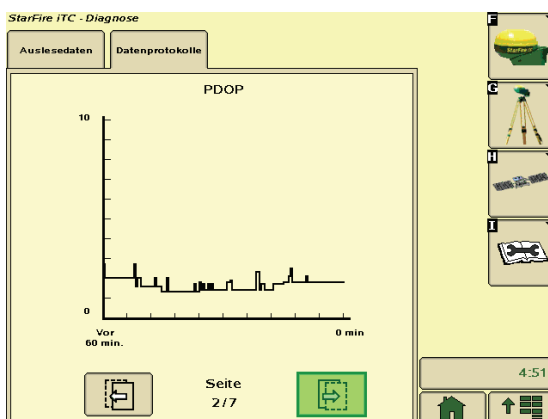
Satellitenstatus



GPS-Genauigkeit



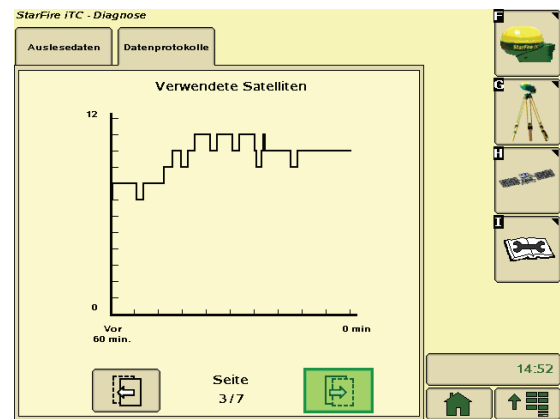
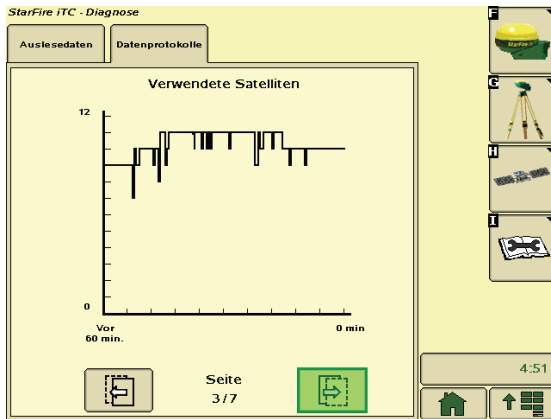
PDOP-Werte



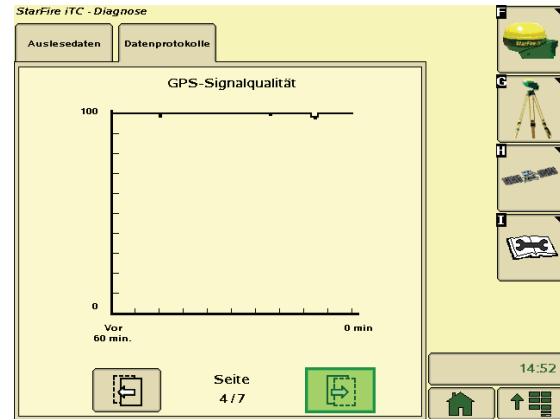
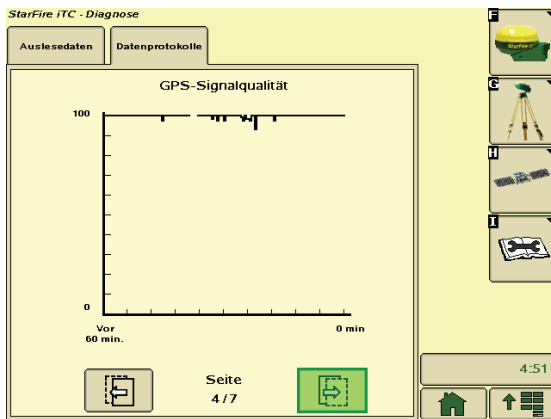
RTK

Starfire 2

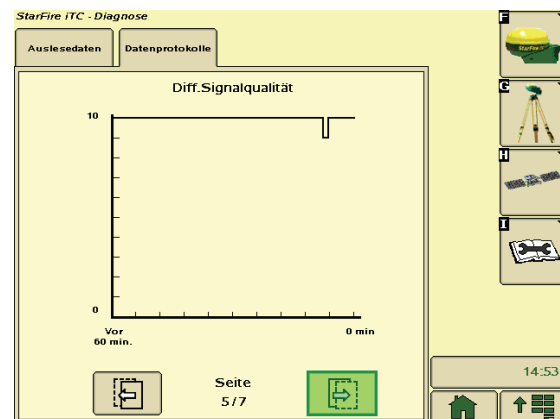
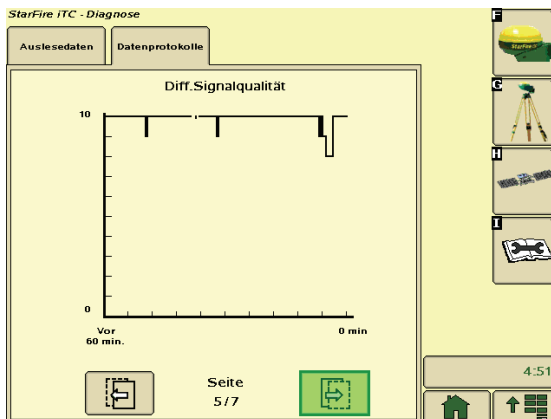
Verwendete Satelliten



GPS-Signalqualität



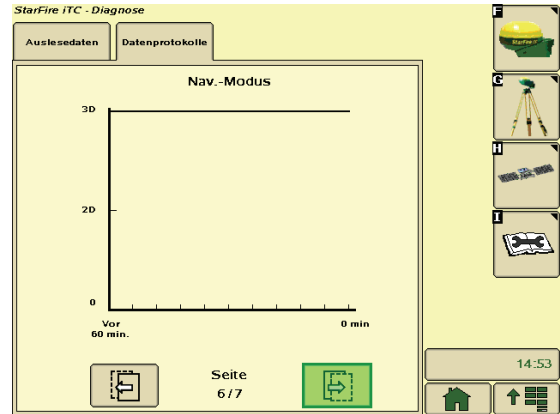
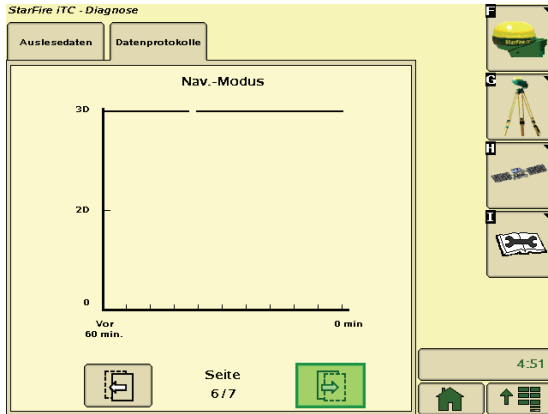
Differenz - Signalqualität



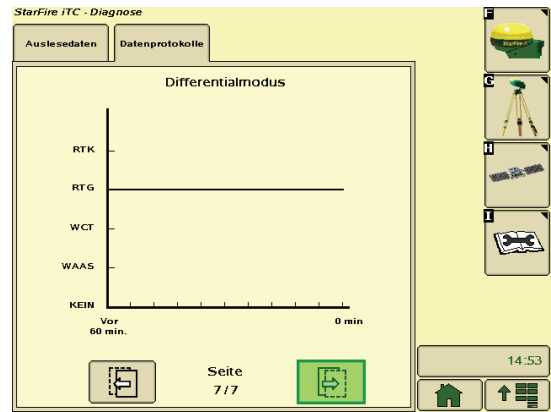
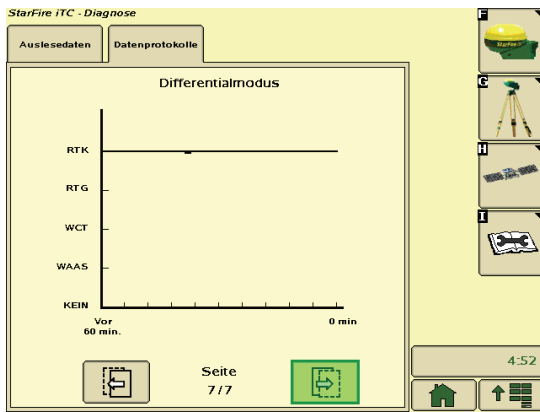
RTK

Starfire 2

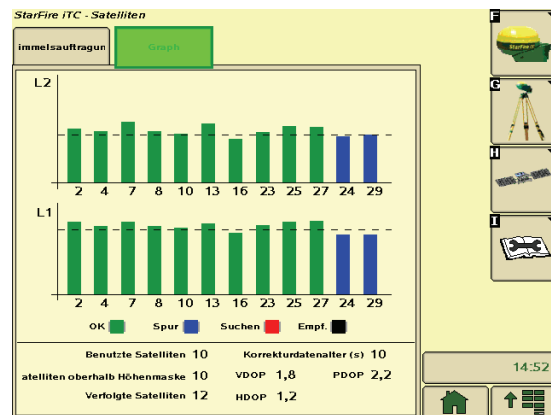
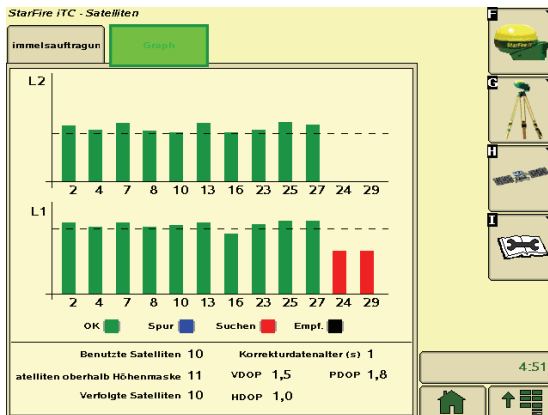
Navigations-Modus



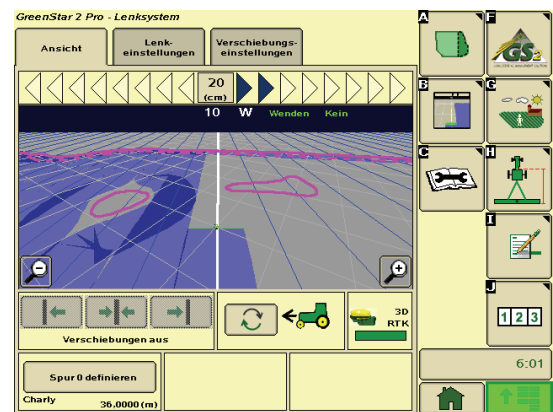
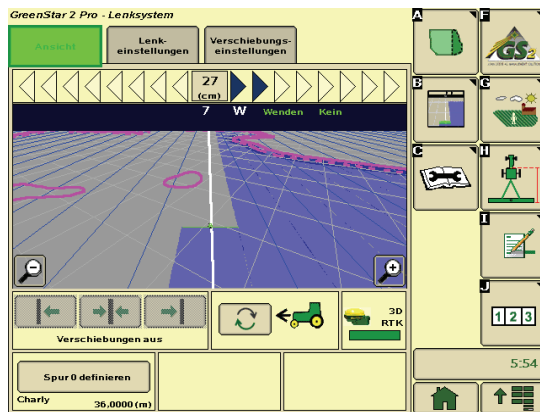
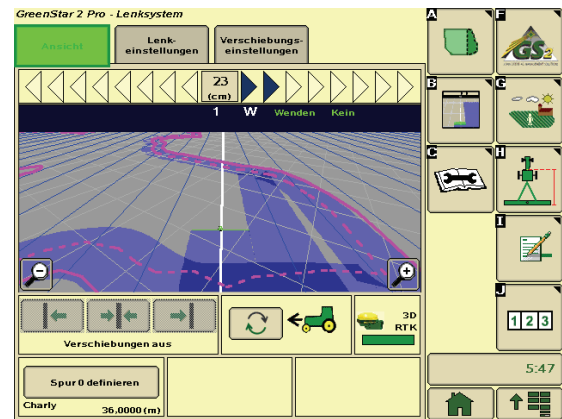
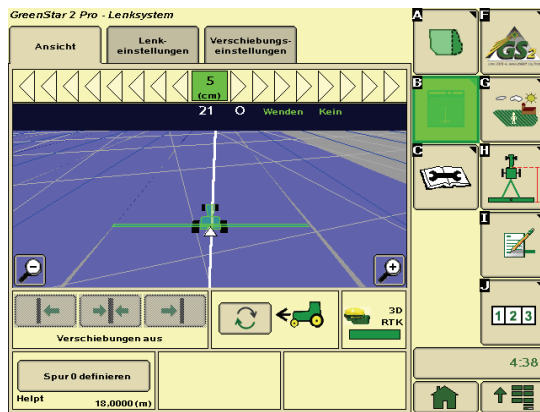
Differentialmodus



Frequenzen L1 und L2



Grafische Darstellungen des GPS-Parallelfahrersystems



Ausgerüstete Versuchstechnik



Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne Benutzung anderer als die der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht weiter veröffentlicht.

Radewege, den 10. Oktober 2008

Stefan Ullrich