DISSERTATION

Rasterbasierte Geländeoberflächeanalysen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der technischen Wissenschaften unter der Leitung von

O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Karl Kraus
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (E122)

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Mathematik und Geoinformation

von

Dipl.-Ing. Dubravko Gajski
Matr. Nr. 9826387
Viktora Šipeka 62
41244 Stubičke Toplice
KROATIEN

Wien, am 20. Oktober 2004

an meinen geliebten Eltern,

Marija-Zlata und Ivan Gajski

mit Dankbarkeit

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Karl Kraus für die angenehme und erfahrene Leitung meiner wissenschaftlichen Ausbildung, sowie für viel Geduld und Verständnis während der Entstehung dieser Arbeit. Seine Aufgeschlossenheit für neue Ideen, seine zahlreichen positiven Anregungen und der rege Gedankenaustausch sowie der Optimismus und die großherzige Hilfe waren für den erfolgreichen Abschluss der Arbeit ausschlaggebend. Herrn Prof. Dr. Teodor Fiedler danke ich für die Übernahme des Koreferates sowie für die fachliche und menschliche Unterstützung in meiner wissenschaftlichen Laufbahn.

Von Herzen danke ich Herrn Dr. Laszlo Molnar, der viel Zeit investiert hat, um mir die unabhängige Forschung in der Heimat zu ermöglichen. Von ihm habe ich viel über die gegenwärtige und künftige Technologie gelernt sowie viel über die Philosophie der wissenschaftlichen Forschung gehört. Ohne seine zahlreiche und hilfreiche Anregungen und ohne seine unermüdliche Unterstützung hätte ich es nicht geschafft.

Für die angenehme Arbeitsatmosphäre und die große Hilfsbereitschaft bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern des Institutes für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.) sowie bei meinen Kollegen/innen in der Heimat. Der Magistratabteilung 41 der Stadt Wien danke ich für die Bereitstellung der Wienerwald-Daten.

Ein spezielles Dankeschön verdienen meine Eltern, die unter schweren Umständen alles gemacht haben, um meine wissenschaftliche Ausbildung zu ermöglichen. Diese Arbeit ist daher an ihnen gewidmet.

Kurzfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der rasterbasierten Geländeoberflächenanalyse von digitalen Geländemodellen, insbesondere von Geländemodellen, die vom flugzeuggetragenen Laserscanning stammen. Das flugzeuggetragene Laserscanning ist inzwischen das herausragende Verfahren zur Datenerfassung für sehr genaue Geländemodelle, vor allem in bewaldeten und bebauten Gebieten. Es gibt aber auch einige Schwächen des flugzeuggetragenen Laserscannings, die von der Geomorphologie des Geländes abhängen. Kritische Bereiche sind vor allem Täler mit dichter (und niedriger) Strauchvegetation, weil einerseits in solchen Bereichen die Datenerfassung stark beeinträchtigt ist und andererseits für die Elimination (Filterung) der Laserpunkte auch beziehungsweise in der Vegetation keine guten Voraussetzungen gegeben sind. Das Erkennen dieser Unzulänglichkeiten und das Erarbeiten von Methoden zu ihrer Behebung war die Hauptmotivation für diese Arbeit.

Die eingeschlagene Konzeption geht davon aus, dass die Form der Geländeoberfläche durch geomorphologische Prozesse dynamisch gestaltet wird. Vor diesem Hintergrund können unerwartete geomorphologische Geländeformen definiert und mit Methoden der Geländeoberflächenanalyse in digitalen Geländemodellen detektiert werden. Anschließend können die unerwarteten geomorphologischen Geländeformen in digitalem Geländemodell überarbeitet und in realistischere Oberflächenformen überfuhrt werden.

Für die Oberflächenanalyse haben rasterbasierte Methoden große Vorteile; sie sind sehr effizient und erlauben attraktive Visualisierungen; sie können auf das große Methodenangebot der digitalen Bildverarbeitung zurückgreifen. In dieser Arbeit wird auf rasterbasierte Oberflächenanalysen eingegangen, die auf morphometrischen und hydrologischen Gesetzen beruhen.

Die hydrologisch basierte Oberflächenanalyse wird in Gebieten angewandt, die durch überwiegend fluviale Prozesse entstanden sind. Das unzulängliche Geländemodell wird (künstlich) beregnet und der Wasserabfluss wird modelliert. Das Ergebnis sind vor allem

- Flussläufe, die als Strukturlinien in einem erneuten Modellierungsprozess einbezogen werden, und
- abflusslose Räume (Mulden), die durch Absenken der sogenannten Muldenpfade beseitigt und hydrologisch plausibel gestaltet werden.

Mit terrestrisch eingemessenen Kontrollpunkten konnte auch eine beachtliche Steigerung der absoluten Höhengenauigkeit festgestellt werden.

Zusätzlich zum Testgebiet "Wienerwald", ein typisch fluvial gestaltetes Gelände, wurden die Methoden auch auf der Marsoberfläche im Gebiet des Vallis Marineris, dem größten Grabensystem am Mars, angewandt. Die Marsdaten stammen von der NASA-Mission MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter). Die hydrologischen und morphometrischen Analyseergebnisse geben detailliert Aufschluss über die Oberflächentopographie des Planeten Mars. Ihre Visualisierungen sind besonders attraktiv. Die erzielten Ergebnisse stehen nun für wissenschaftliche Untersuchungen der geologischen und klimatischen Geschichte des Planeten Mars zur Verfügung.

Die Implementierung der erarbeiteten Methoden wurde im Geländemodell-Programmpaket SCOP++ vorgenommen. Dieses Programmpaket besitzt einen universellen Applikationsrahmen, mit dem die SCOP-Basissoftware verhältnismäßig leicht um ergänzende und neue Algorithmen erweitert werden kann.

Summary

This doctoral thesis is about analyzing the surface as represented by digital terrain models, and in particular when derived from airborne laser scanning.

Recently, airborne laser scanning became a prominent technology of data acquisition for high precision terrain models, especially in wooded and in urban areas. Characteristic problems with airborne laser scanner data are dependent on local geomorphology of the terrain surface. Critical areas are valley baselines covered by dense bush-type vegetation: the problems are due to specific difficulties in such areas with eliminating (filtering) the rays reflected by the vegetation, and also to difficulties with reaching at all the surface underneath it. Detecting such cases and correcting them represented the main motivation for these studies.

The concept as applied assumes that the terrain surface is formed by dynamic geomorphologic processes. Analyzing the surface as represented by the digital terrain model, suspicious forms contradicting these dynamic processes are detected; relevant forms are then processed in special ways to enforce proper geomorphology.

Raster-based methods of surface analysis have major advantages: they are efficient; they provide for attractive visualizations; and they allow for applying in special ways the rich spectrum of algorithms available in digital image processing. This dissertation deals in detail with raster-based methods of surface analysis corresponding to morphometric and hydrologic laws.

Hydrologic surface analysis is employed in areas shaped predominantly by fluvial processes. To improve terrain models in such areas, digital rain simulation is applied, and water drainage on the surface modeled. The most important results are:

- The drainage lines thus derived, to be included into the set of data as structure lines for a subsequent re-interpolation of the model surface;
- Depressions with no drainage. They – or characteristically a series of them – will be remodeled by artificial introduction of artificial draining paths with elevations correspondingly lowered.

Terrestrial measurements in the fluvially defined test area “Wienerwald” have indicated a considerable improvement of elevation accuracy by the above described processes.

The methods have been applied also to the Mars surface in Vallis Marineris – the largest rift system of the planet. Data are from the NASA Mars mission MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter). The hydrologic and morphometric results of this analysis provide detailed and specific information on the topography of the Mars surface, in a form very well suited for interpretation, with exceptionally attractive renderings. This data is now available for studies of the geologic and climatic history of the planet.

The methods proposed here have been implemented within the frame of the SCOP++ DTM program package. SCOP++ is organized within a universal application programming frame, enabling a relatively easy extension of the SCOP kernel software by additional algorithms.

Inhaltsverzeichniss

1 MOTIVATION UND PROBLEMMSTELLUNG 1

1.1 ÜBER MOTIVATION 1

1.2 PROBLEMSTELLUNG - UNERWARTETE GEOMORPHOLOGISCHE FORMEN IM DGM, FALLS KEINE STRUKTURLINIEN GEMESSEN WURDEN 2

1.2.1 Unerwartete geomorphologische Formen als Folge von unvollständiger Klassifikation der gemessenen Punkte 2

1.2.2 Unerwartete geomorphologische Formen als Folge von ungünstiger Verteilung der klassifizierten Punkte 3

1.3 EINIGE GEOLOGISCHE BEMERKUNGEN 9

2 DIGITALES GELÄNDEMODELL UND DATENERFASSUNG 11

2.1 DIGITALES GELÄNDEMODELL (DGM) 11

2.1.1 Entstehung eines DGMs 13

2.1.2 Datenstrukturen für digitale Geländemodelle 13

2.1.2.1 Vektor-Struktur 14

2.1.2.1.1 Dreiecks-DGM 14

2.1.2.1.2 Höhenlinien-Modell 16

2.1.2.2 Raster-Struktur 16

2.1.2.2.1 Gitter-Struktur und kategorische Grid 17

2.1.2.2.2 Quadtree-Struktur 18

2.1.2.3 Hybride Struktur 19

2.2 DATENERFASSUNGSMETHODEN FÜR DGME 21

2.2.1 Digitalisierung topographischer Karten 21

2.2.2 Photogrammetrische Methoden 21

2.2.3 Tachymetrische Messung im Gelände 22

2.2.4 GPS-Messung (Bodenmessung) 22

2.2.5 Abtasten der Erdoberfläche 23

2.2.5.1 Passive Verfahren 23

2.2.5.2 Aktive Verfahren....28
2.2.5.2.1 InSAR....29
2.2.5.2.2 LIDAR....31

3 LASERSCANNING AUS DER LUFT....32
3.1 TECHNIK DES LASERSCANNINGS....33
3.1.1 Mathematisches Modell der Punktbestimmung....33
3.1.2 Konstruktion des Laserscanning-Systems....35
3.1.2.1 GPS-Komponente....35
3.1.2.2 Die IMU-Komponente....35
3.1.2.3 Die Laser-Scanner Komponente....36
3.1.2.3.1 Prinzip des Nd:YAG Lasers....36
3.1.2.3.2 Scanning-Mechanismus....38
3.1.2.3.3 Der Sensor....44
3.2 FEHLERQUELLEN DES LASERSCANNINGS....46
3.2.1 Die Genauigkeit der Distanzmessung....46
3.2.2 Die Genauigkeit der Lagebestimmung....48
3.2.3 Die Genauigkeit der Richtungsbestimmung des Laserstrahles....49
3.2.4 Der Einfluss der Zeitsynchronisierung....51
3.3 VORHANDENE GERÄTE UND IHRE MESSEIGENSCHAFTEN....52
3.3.1 Der ALTM-Sensor....53
3.3.2 Der Toposys-Sensor....54

4 FILTERUNG DER LASERSCANNER-DATEN....56
4.1 ALLGEMEINES ZUR FILTERUNG UND KLASSIFIKATION....56
4.2 GRUNDKONZEPTEN UND VERFEINERTE METHODEN DER FILTERUNG....57
4.2.1 "First Pulse - Last Pulse" Klassifikation....57
4.2.2 Lineare Prädiktion....59
4.2.2.1 Das Prinzip....59
4.2.2.2 Iterative robuste Interpolation mit linearer Prädiktion....61
4.2.2.3 Hierarchische robuste Interpolation....63

4.2.3 Morphologische Filterung 64
4.2.3.1 Das Konzept 64
4.2.3.2 Morphologische Basis-Operationen 66
4.2.3.3 Morphologisches Öffnen und Schließen 67
4.2.3.4 Grauwertmorphologie 68
4.2.3.5 Die Algorithmen zur morphologischen Filterung von Laserscanner-Daten 70
4.2.3.5.1 Dual rank Filterung 72
4.2.3.5.2 Progressive morphologische Filterung 73
4.2.4 Weiterentwicklung 74

5 RASTERBASIERTE GELÄNDEANALYSEN 76

5.1 TOPOGRAPHIE DES GELÄNDES ALS PARAMETER IN GEOMORPHOLOGISCHEN PROZESSEN 76

5.2 PARAMETRISIERUNG DES RELIEFS 77

5.2.1 Die Parameter der lokalen Reliefgeometrie 78
5.2.1.1 Höhe 78
5.2.1.2 Gradient 78
5.2.1.3 Krümmung 81
5.2.1.3.1 Vertikalkrümmung 82
5.2.1.3.2 Tangentialkrümmung (Querkrümmung) 83
5.2.1.3.3 Horizontalkrümmung 84
5.2.1.3.4 Mittlere Krümmung 85
5.2.1.3.5 Gauß'sche Krümmung 86
5.2.2 Numerische Berechnungen von Parametern der lokalen Reliefgeometrie 88
5.2.2.1 Direkte Parameterableitung 89
5.2.2.2 Lokale Interpolation 89
5.2.2.3 Methode von Evans 90
5.2.2.4 Methode von Zevenbergen und Thorne 91
5.2.3 Hydrologisch relevante Parametrisierung der Relieftopologie 93
5.2.3.1 Der Einfluss des Reliefs beim Steuern von hydrologischen Prozessen 93
5.2.3.2 Die Algorithmen zur Simulation des Oberflächenabflusses 94

5.2.3.2.1 Eindimensionale Abflußmodelle....95
5.2.3.2.1.1 Deterministic 8 Algorithm....95
5.2.3.2.1.2 Rho 8....96
5.2.3.2.1.3 Kinematic Routing Algorithm (Lea 1992)....97
5.2.3.2.2 Zweidimensionale Abflussmodelle....98
5.2.3.2.2.1 Multiple-Flow Direction Methode (MFD-Methode)....98
5.2.3.2.2.2 Deterministic Infinite Algorithm (D ∞)....99
5.2.3.3 Ermittlung der Flussläufe....100
5.2.3.4 Wassersummation....101
5.2.3.5 Bestimmung der Einzugsgebietsgrenzen....104
5.2.3.6 Behandeln von Mulden....106

6 SOFTWAREKONZEPT UND IMPLEMENTIERUNG....110
6.1 SOFTWARE-KONZEPT VON SCOP++....111
6.2 KONZEPTION VON SCOP.DTM....114
6.3 ARCHITEKTUR VON SCOP.DTM....115
6.3.1 Projektorientierte statische Agenten....115
6.3.2 Overlay-orientierte statische Agenten....116
6.3.3 Overlay-intern dynamische Member-Agenten....117
6.3.4 Member-Agenten des ImageOverlays....118
6.3.5 MATRIX-AGENT (agMTX)....119
6.3.5.1 AgMTX-Programmstruktur....120
6.4 DIE BENUTZERSCHNITTSTELLE FÜR DIE GELÄNDEANALYSEN....120
6.4.1 Derive....121
6.4.2 Depressions....123
6.4.3 Drainage....123
6.4.4 Rivers....124
6.4.5 Catchment....125
6.4.6 Combi....125
6.4.7 Curvature....126

6.4.8 Exposition 126
6.4.9 Raster-Slope 127
6.4.10 Kombinieren von Darstellungen 127
6.4.11 Structure... 128

7 PRAKTISCHE BEISPIELE 130
7.1 DAS PROJEKT WIENERWALD 130
7.1.1 Vorgeschlagene Lösung 131
7.1.2 Behandlung von Mulden 132
7.1.3 Die abgeleiteten Flussläufe als Strukturlinien 133
7.1.4 Bearbeitung des Testdatensatzes 135
7.1.5 Die quantitative Genauigkeitskontrolle 138
7.2 DAS PROJEKT MARS-EXPRESS 140
7.2.1 Das Testgebiet 141
7.2.2 Die Depressionen 142
7.2.3 Analyse des oberflächigen Abflusses 143
7.2.4 Einzugsgebiete und Flüsse 144
7.2.5 Krümmungen 145
7.2.6 Ausrichtungen (Exposition) 146
7.2.7 Neigungen 147

8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK 148

ANHANG 150

LITERATURVERZEICHNISS 151

CURRICULUM VITAE 157

1 MOTIVATION UND PROBLEMMSTELLUNG

1.1 Über Motivation

Neuzeitliche Forschungsmethoden, insbesondere in technischen Wissenschaften, suchen nach einer Verifikation ihrer Erkenntnisse durch die Analyse großer Datenmengen. Gleichzeitig mit Entwicklung der EDV-Technik, die eine effiziente Speicherung und Verarbeitung von großen Datenmengen ermöglicht, entwickeln sich auch die Methoden für Datensammlung über Objekte und Phänomene unsere Realität. Die Menge der eingesammelten Daten übertrifft manchmal die Speicher- und Verarbeitungskapazität moderner Rechner erheblich. Dieses Problem löst man durch Vereinigung einzelner Rechner in globalen Netzen. Das hervorragendste Beispiel ist das populäre globale Netz - Internet, das eine Verbindung von Großrechnern bis zu PC-Ebene ermöglicht. Zum Beispiel basiert das Forschungsprogramm SETI (www.seti.org) auf einer Solidarität der Wissenschaftsgemeinschaft; es ermöglicht, dass jeder Rechner, der am Internet angeschlossen ist, in der Datenverarbeitung teilnehmen kann, wenn er von anderen Aufgaben befreit ist.

In Folge des hohen Automationsgrades bei der Datenerfassung sind die Geowissenschaften besonders reich an großen Datenmengen. Die Photogrammetrie sowie die Fernerkundung sind beim Datenerfassen sehr effizient. Sie erfassen nämlich die Daten (geometrische sowie andere Eigenschaften der zu untersuchenden Objekte) ohne die Messsonde physisch an das Objekt anbringen zu müssen. Gegenwärtige Sensoren in Satelliten und Flugzeugen gewinnen täglich riesengroße Mengen an Informationen über die Erdoberfläche und andere Objekte. Dafür ist es unentbehrlich, statistische Methoden bei der Interpretation der Daten anzuwenden. Dabei werden die stochastischen Eigenschaften der gewonnenen Informationen vorausgesetzt, die aber oft nicht mit genügender Qualität bekannt sind. Außerdem können verschiedene Störungen im Datenerfassungsprozeß auftreten. Das führt oft zu unlogischen und unerwarteten Ergebnissen, manchmal auch zu falschen Interpretationen.

Besonders wenn man das Laserscanning für die Datenerfassung verwendet, kommt es zu sehr großen Variationen in der Punktdichte, besonders in bewaldeten Gebieten. Damit ist die Bestimmung des Verlaufes der Erdoberfläche in Gebieten mit ungenügender Dichte der gemessenen Daten, ziemlich unzuverlässig. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Anwendung von Wissen aus Geologie, Geomorphologie und Morphometrie, um die Zuverlässigkeit und Qualität der Bestimmung der Erdoberfläche aus ungünstigen Datenbeständen zu verbessern.

1.2 Problemstellung - Unerwartete geomorphologische Formen im DGM, falls keine Strukturlinien gemessen wurden

Automatische Datenerfassungsmethoden sind oftmalig auf eine Erfassungsmethode von unstrukturierten Daten (Punktwolken) begrenzt. Die diskreten Punkte werden vollautomatisch und unselektiv entlang von Abtastprofilen gemessen, sodass eine sehr große Datenmenge in relativ kurzer Zeit erfasst wird. So gewonnene Datensätze enthalten nicht nur die Bodenpunkte sondern auch die Punkte, die über der Erdoberfläche liegen (Bäume, Gebäude, ..). Es gibt eine Reihe von Methoden zur Klassifikation sowie Filterung von solchen Datensätzen, welche die Bodenpunkte von den Nichtbodenpunkten trennen (s. Kap. 4). Sie sind mehr oder weniger erfolgreich, sodass nur einige Nichtbodenpunkte verbleiben, die aber unerwartete geomorphologische Formen im digitalen Geländemodell (DGM) verursachen können.

1.2.1 Unerwartete geomorphologische Formen als Folge von unvollständiger Klassifikation der gemessenen Punkte

Eine erste Klassifikation der gemessenen Daten wird durch die Analyse der Zeitangaben des empfangenen Messsignals durchgeführt. Alle Objekte, die eine direkte Distanzmessung vom Laserscanning-Sensor zur Erdoberfläche versperren, befinden sich zwischen der Erdoberfläche und dem Sensor, also über der Erdoberfläche. Dementsprechend sind für ein DGM die längsten Strecken von besonderem Interesse. In der Zeitcharakteristik wird diese als die zuletzt empfangenen Impulse registriert. Die zuerst empfangenen Impulse, also die kürzesten Entfernungen, liefern Kandidaten für s.g. Oberflächenmodelle (Digital Surface Modell - DSM).

Mit dieser Methode ist es nicht immer möglich, die Punkte, die zur Erdoberfläche gehören, ganz sicher zu bestimmen, und zwar (s. Abb. 1.1):

a) Messsignal hat nicht die Erdoberfläche erreicht.

b) Der Energiepegel des an der Erdoberfläche reflektierten Messsignals ist für eine Detektion durch den Sensor nicht ausreichend.

c) Die Zeitdifferenz zwischen erstem und letztem Impuls ist zu kurz, sodass eine getrennte Detektion im Sensor unmöglich ist. Deshalb verursachen besonders niedrige Vegetation und Büsche grobe Fehler in der Bestimmung der Erdoberfläche.

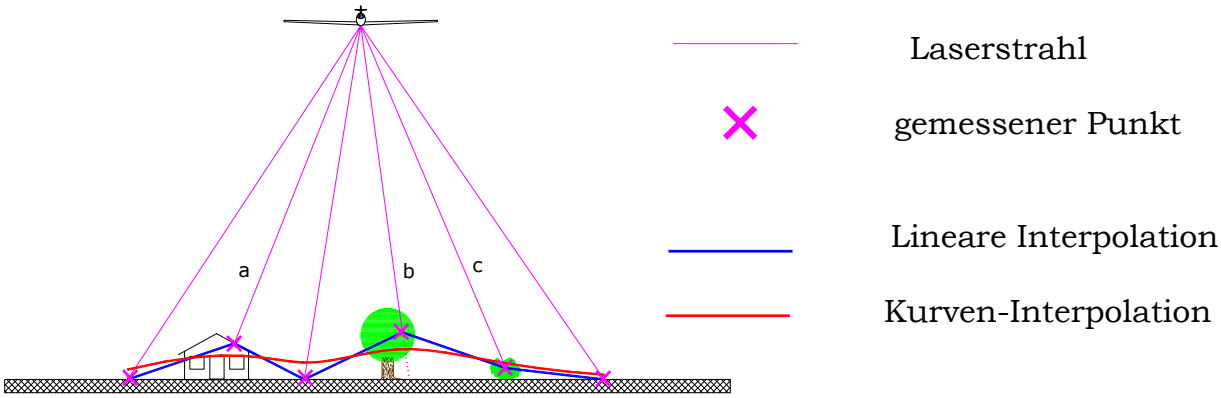


***Abb.1.1**: Einfluss der fehlerhaften Klassifikation an der DGM-Interpolation.*

Nach der Interpolation des digitalen Geländemodelles (DGMs), in dem auch Daten enthalten sind, die nicht zur Erdoberfläche gehören, bekommt man als Ergebnis ein DGM mit positiven Höhenabweichungen in Beziehung zur echten Erdoberfläche. Dies geschieht gerade dort, wo im Datenbestand die falsch klassifizierten Daten vorkommen. Wenden wir eine lineare Interpolation (TIN) an, verläuft die interpolierte Fläche durch alle gemessenen Punkte hindurch. In Gebieten, wo die gemessenen Punkte richtig klassifiziert waren, ist das Interpolationsergebnis sehr gut. Dort wo die Daten aber falsch klassifiziert waren, spiegelt sich der Höhenfehler im vollen Betrag in der interpolierten Oberfläche wider (s. Abb. 1.1).

Mit Hilfe einer Interpolation höherer Ordnung und gleichzeitiger Filterung von (zufälligen) Messfehlern (z.B. Lineare Prädiktion, Kraus, 2000) kann der Einfluss der Fehlklassifizierung zwar gemindert, aber nicht behoben werden. Die lineare Prädiktion setzt nämlich ein Gauß´sches Fehlerverteilungsmodell voraus. Die Höhenabweichungen aus falscher Klassifizierung stimmen aber mit der Gauß´schen Normalverteilung nicht überein. Die Abweichungen der gemessenen Höhen in Beziehung zu Erdoberfläche sind in der Regel positiv. Damit verbleibt ein starker systematischer Einfluss nach der Interpolation.

Neben der o.g. Klassifizierung nach der "First Pulse - Last Pulse" Methode, die nur die gemessenen Daten analysiert, wurde am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.) TU Wien eine andere Klassifikationsmethode entwickelt. Diese Methode bezieht die stochastischen Eigenschaften von gemessenen Daten ein (schiefe und exzentrische Fehlerverteilung) und analysiert die Daten in Beziehung zum interpolierten DGM. Man entfernt die Punkte, die im Bezug zum interpolierten DGM zu hoch liegen. Zu diesem Zweck wird eine Gewichtsfunktion in die lineare Prädiktion eingeführt, die die Gewichte für jede einzelne Messung festlegt. Der Prozess läuft iterativ, aber stark konvergierend ab. Diese Methode gibt sehr zuverlässige Klassifikationsergebnisse, besonders dort, wo sich neben den Vegetationspunkten auch Geländepunkte befinden. (Kraus & Pfeiffer, 1998; Briese et al., 2002)

1.2.2 Unerwartete geomorphologische Formen als Folge von ungünstiger Verteilung der klassifizierten Punkte

Wendet man die o.g. Klassifikationsmethoden auf Punktwolken an, die aus Laserscanning über dicht bewaldeten oder dicht bebauten Gebieten stammen, werden die Daten stark und sehr unregelmäßig verdünnt (s. Abb. 1.2 und 1.3). Andererseits wird das Laserscanning gerade dort bevorzugt, wo die Datenerfassung - wegen Unzugänglichkeit und dichte Vegetation - mit anderen Methoden sehr schwer oder überhaupt nicht möglich ist.

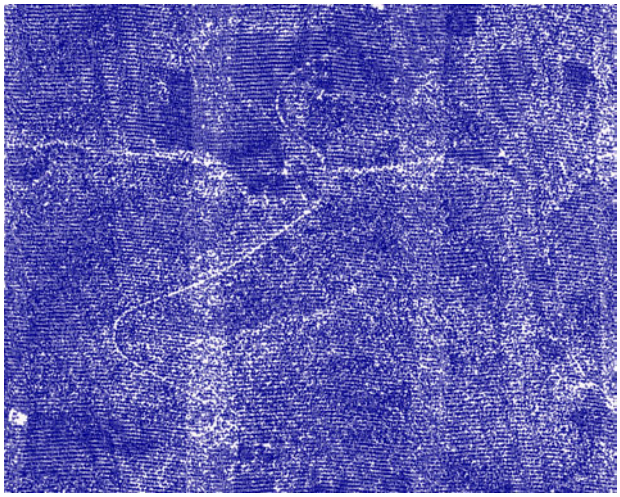


***Abb.1.2**: Datendichte vor der Klassifikation.*

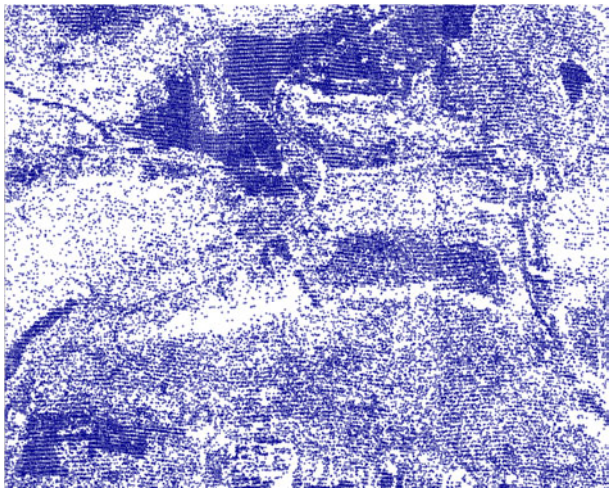


***Abb.1.3**: Datendichte nach der Klassifikation.*

Im Großem und Ganzem stellt das - aufgrund klassifizierter Daten - interpolierten DGM das Gelände richtig dar. Doch es sind Bereiche erkenntlich, wo beträchtliche Abweichungen der interpolierten Flächen gegen den erwarteten Geländeverlauf auftreten, besonders in Flusstälern (s. Abb. 1.4. - durch rote Farbe markierte Gebiete).

Insbesondere, entlang der Linien des konzentrierten Abflusses schwingt die interpolierte Fläche in der Höhenrichtung ziemlich stark, was zu beträchtlichen Abweichungen von tatsächlichem Gelände führt. Diese Schwingungen sind meistens durch ungenügende Datendichte und ungünstige Datenverteilung verursacht (s. Abb. 1.5 und 1.6).

Dieses Problem lässt sich beseitigen durch (Kraus & Pfeiffer, 1998):

- zusätzliche photogrammetrische Aufnahmen und manuelle Auswertung (aber bei sehr dichten Baumbestand nicht möglich).

- GPS-Messungen entlang der Strukturlinien (durch Abschatten der Satelliten durch Bäume begrenzt).

- terrestrische Tachymetrie (anwendbar nur für relativ wenig Punkte).
- manuelles und/oder automatisches Editieren des DGMs (nur teilweise erfolgreich).

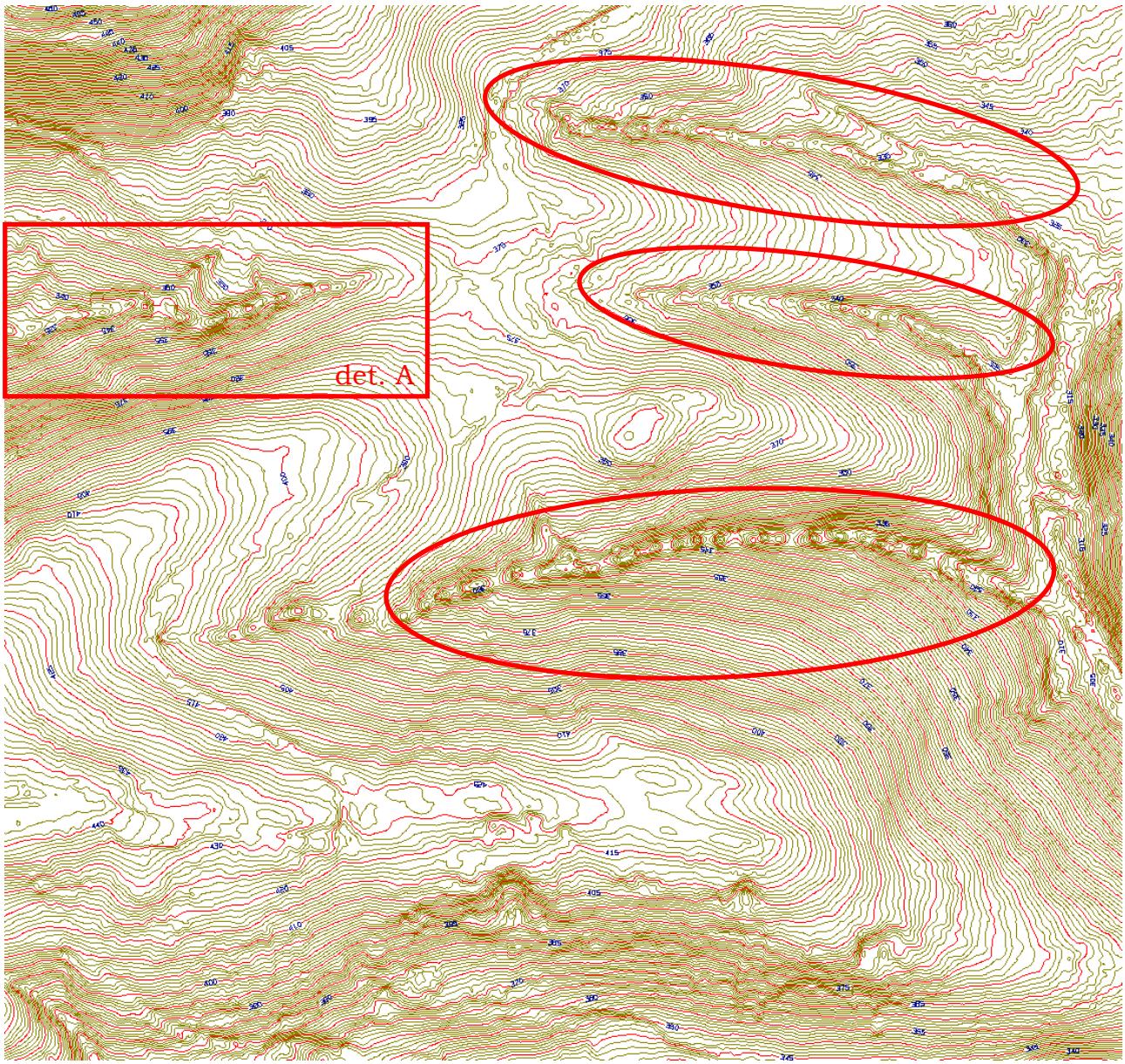


***Abb.1.4**: Schichtlinien, die aufgrund klassifizierter Daten interpoliert wurden.*

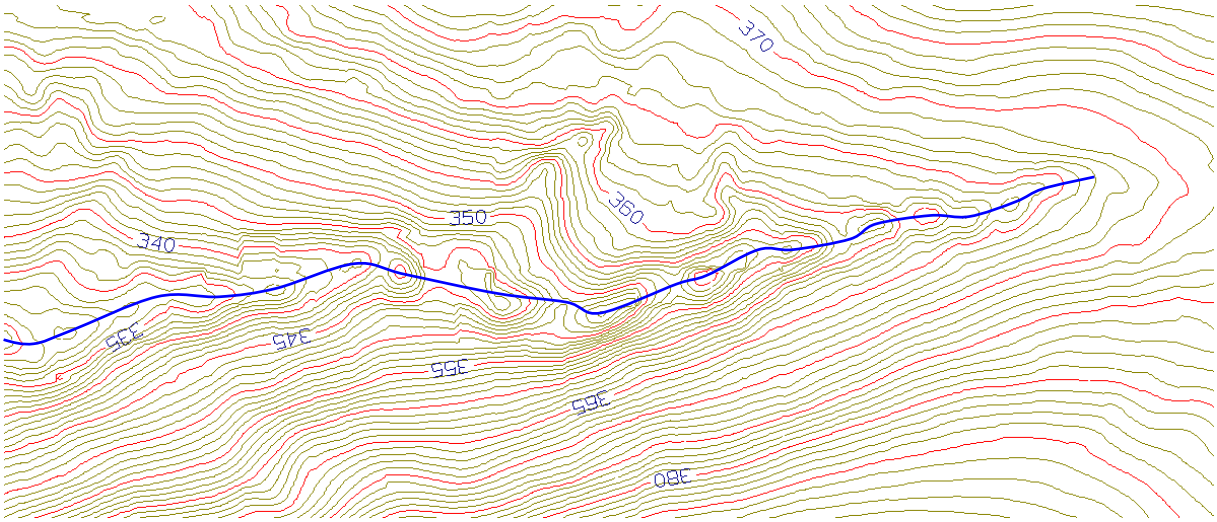


***Abb.1.5**: Schichtlinien, die aufgrund klassifizierter Daten interpoliert wurden - Detail A im Abb.1.4; die blaue Linie stellt einen Grundriss des Längsprofils der Abb.1.6 dar.*

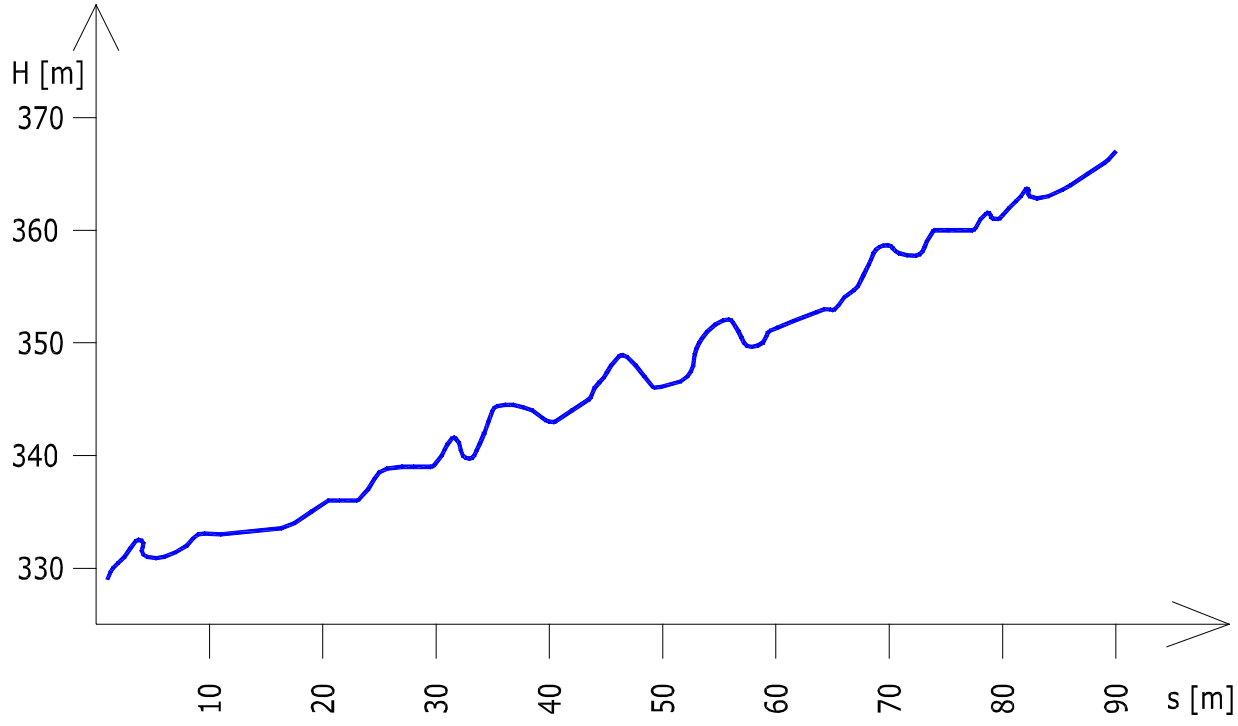
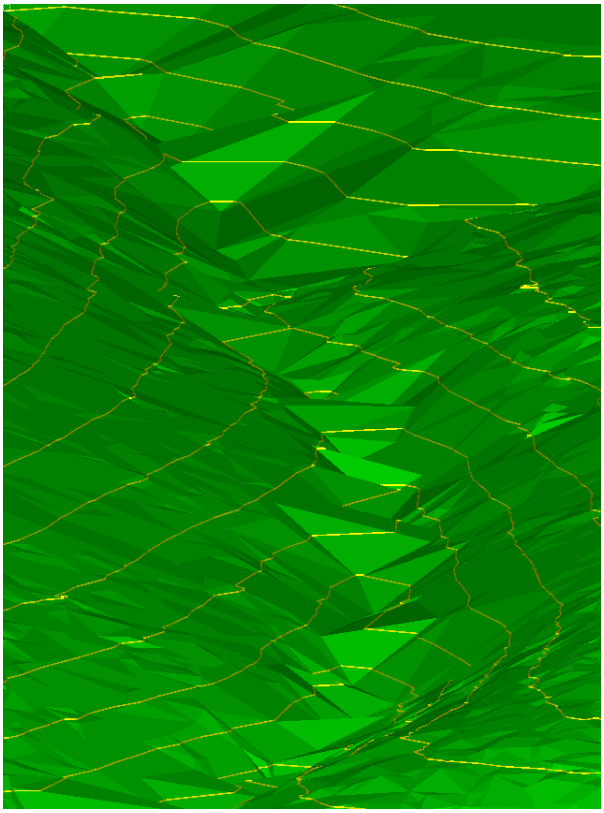


***Abb.1.6**: Linie des konzentrierten Abfluss - Längsprofils, die aus dem DGM (Abb 1.5) interpoliert wurde.*

Da die Erdoberfläche in Gebieten des konzentrierten Abflusses meistens durch Wassererosion und Sedimentierung gestaltet ist, sind die starken Höhenschwingungen entlang der Linie des konzentrierten Abflusses (s. Abb. 1.6) im geomorphologischen Sinne kaum wahrscheinlich.



Wird das DGM aufgrund klassifizierter Laserscanner-Daten durch lineare Interpolation berechnet, verstärkt sich der Effekt der Höhenschwingungen in Gebieten des konzentrierten Abflusses und die Ursache dieser Schwingungen - ungünstige räumliche Verteilung der gemessenen Daten - wird deutlich sichtbar (s. Abb. 1.7).

Es ist zu bemerken, dass der Einfluss der ungünstigen räumlichen Verteilung der klassifizierten Laserscanner-Daten auf die Qualität der interpolierten Oberfläche dominant ist. Der Einfluss liegt im Meterbereich. Besonders groß ist Einfluss für Täler, die quer zu Richtung ihres Erstreckens stark gekrümmt sind und wegen starker Vegetation relativ wenig Punkte auf der Erdoberfläche erfasst werden konnten.

***Abb.1.7**: DGM eines Tales, nach TIN Methode interpoliert, ohne Strukturlinien.*

Dieses Problem wird anhand eines simplifizierten Beispieles mathematisch formuliert (s. Abb. 1.8).

Wir nehmen an, dass die Abflusslinie eine Gerade ist, die durch Verschneidung von zwei Ebenen Π_1 und Π_2 entstanden ist. Diese Ebenen sind zum Horizont geneigt mit den Winkeln α_1 und α_2. Das so entstandene v-förmige Tal wird durch 10 Punkte (P_1 - P_{10}) abgetastet, und aufgrund dieser Punkte wird ein DGM durch lineare Interpolation (TIN) berechnet. Die Höhenabweichungen der interpolierten Oberfläche zu richtigen Oberfläche sind beträchtlich.

Der Betrag ergibt sich aus den in Abb. 1.8 ersichtlichen Annahmen wie folgt:

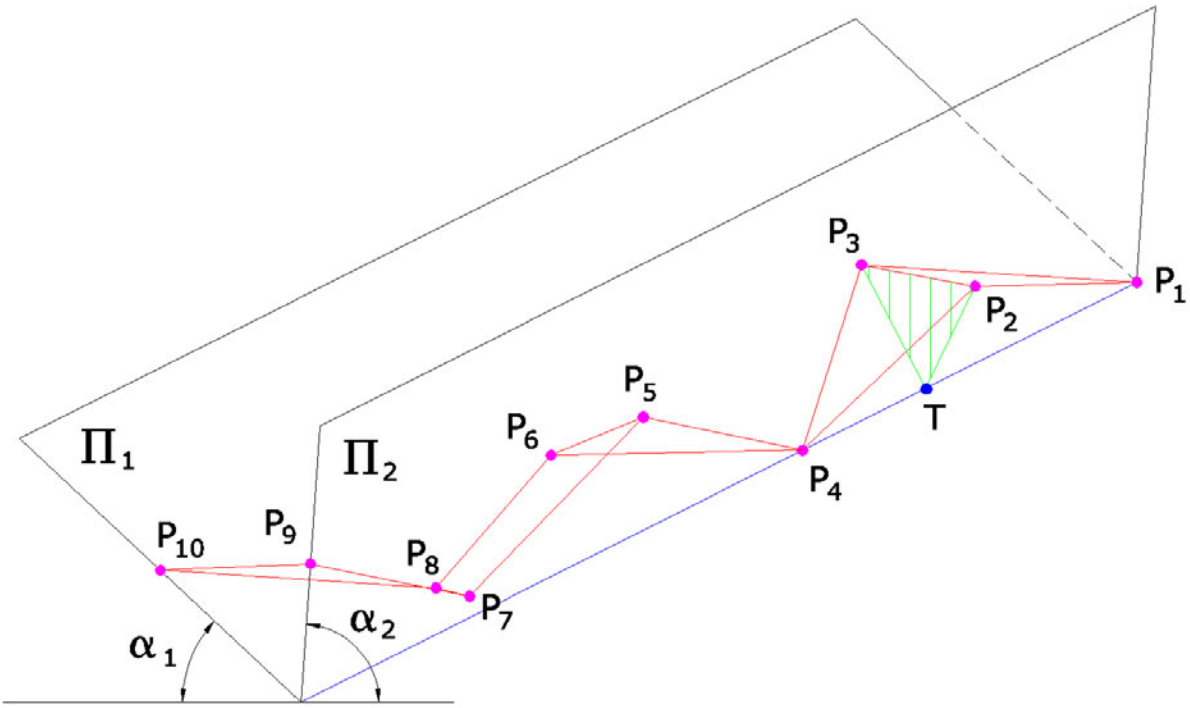


***Abb.1.8**: Abweichungen der interpolierten Fläche zur idealen Abflusslinie.*

Wir setzen eine vertikale Ebene durch die Punkte P_2 und P_3. Diese Ebene wird von der Abflusslinie im Punkt T durchdrungen. Aus dem Dreieck ΔP_3P_2T (s.Abb.1.9) folgt ein Ausdruck für die Höhenabweichung der interpolierten Fläche in v-förmigen Tälern wegen ungünstiger Punktverteilung:

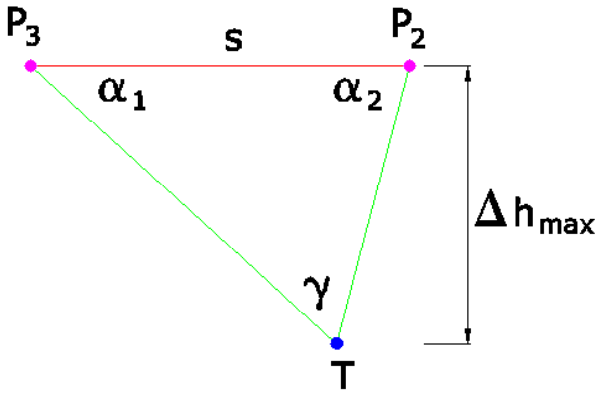


***Abb.1.9**: ein Vertikalschnitt durch P_2P_3*

$$\Delta h_{max} = s \cdot \frac{\sin\alpha_1 \cdot \sin\alpha_2}{\sin\gamma} \qquad (1.2\text{-}1)$$

s - die Entfernung zwischen zwei benachbarten Punkten an gegenüberliegenden Hängen.

α_1 - die Neigung eines Hanges

α_2 - die Neigung des anderen Hanges

Diese einfache Analyse zeigt deutlich, dass in Gebieten des konzentrierten Abflusses (Täler, Zusammenflüsse, ..), die immer eine konkave Form haben (mindestens in nur einer Richtung), treten nur positive Höhenabweichungen des DGMs zur echten Geländeoberfläche auf. Handelt es sich dagegen um konvexe topographischen Formen (Bergspitzen, Kammlinien), dann können die Abweichungen wegen ungünstiger Datenverteilung nur negativ sein. Da die Daten in Gebieten mit großer Vegetationsdichte durch Klassifizierung und Filterung stark verdünnt werden, sind die Höhenabweichungen in diesen Gebieten am deutlichsten ausgeprägt. Neben den Entfernungen zwischen benachbarten Punkten an den gegenüberliegenden Hängen wirken noch mehr die morphometrischen Eigenschaften ($1/\sin\gamma$) des Geländes auf die Höhenabweichungen.

1.3 Einige geologische Bemerkungen

Einer der Faktoren, die die Laserscanning-Messungen in unbebauten Gebieten behindern, ist die Vegetationsdichte, die von klimatologischen Verhältnissen, von der Fruchtbarkeit des Bodens und vom Bodentyp abhängt. In Gebieten mit humidem Klima ist in der Regel starke Vegetation vorhanden. Die geologischen Eigenschaften der oberen Bodenschicht, die durch den Abbau der Biomasse entsteht, beeinflussen stark die Formung der Erdoberfläche. Eine weiche und lose obere Bodenschicht wird stark durch Oberflächenabfluss modelliert. Diese Modellierung durch Wassererosion und Wassersedimentierung ist besonders stark in Gebieten des konzentrierten Wasserabflusses (Bäche, Flüsse ..). Die Höhenschwingungen werden in Richtung des Wasserflusses durch diesen Prozess stark reduziert, sodass lokale Depressionen (Mulden) sehr selten auftreten. Dieser Effekt ist in der Geomorphologie schon lange bekannt, und wird z.B. wie folgt ausgedrückt:

“The hydrological and geomorphological tradition suggests that fluvially dominated landscapes rarely contain pits (with the notable exception of Karst landscapes) since the process of water transport and erosion preclude their development.” (Wood 1996)

Dies wird für Täler besonders betont:

"Die Täler werden zusätzlich zu den geologischen Vorgängen sehr stark mit Wasser mitgeformt, dass das Bestreben zeigt, nach unten hin abzufließen. Täler weisen daher meist ein geschlossenes Liniennetz auf und enthalten in der Regel keine Mulden, die die Gegenstücke zu Gipfeln darstellen. Mulden werden nämlich meist durch Wasser aufgefüllt (Seen, im Extremfall die Weltmeere), oder müssten einen unterirdischen Abfluss besitzen." (Rieger 1992)

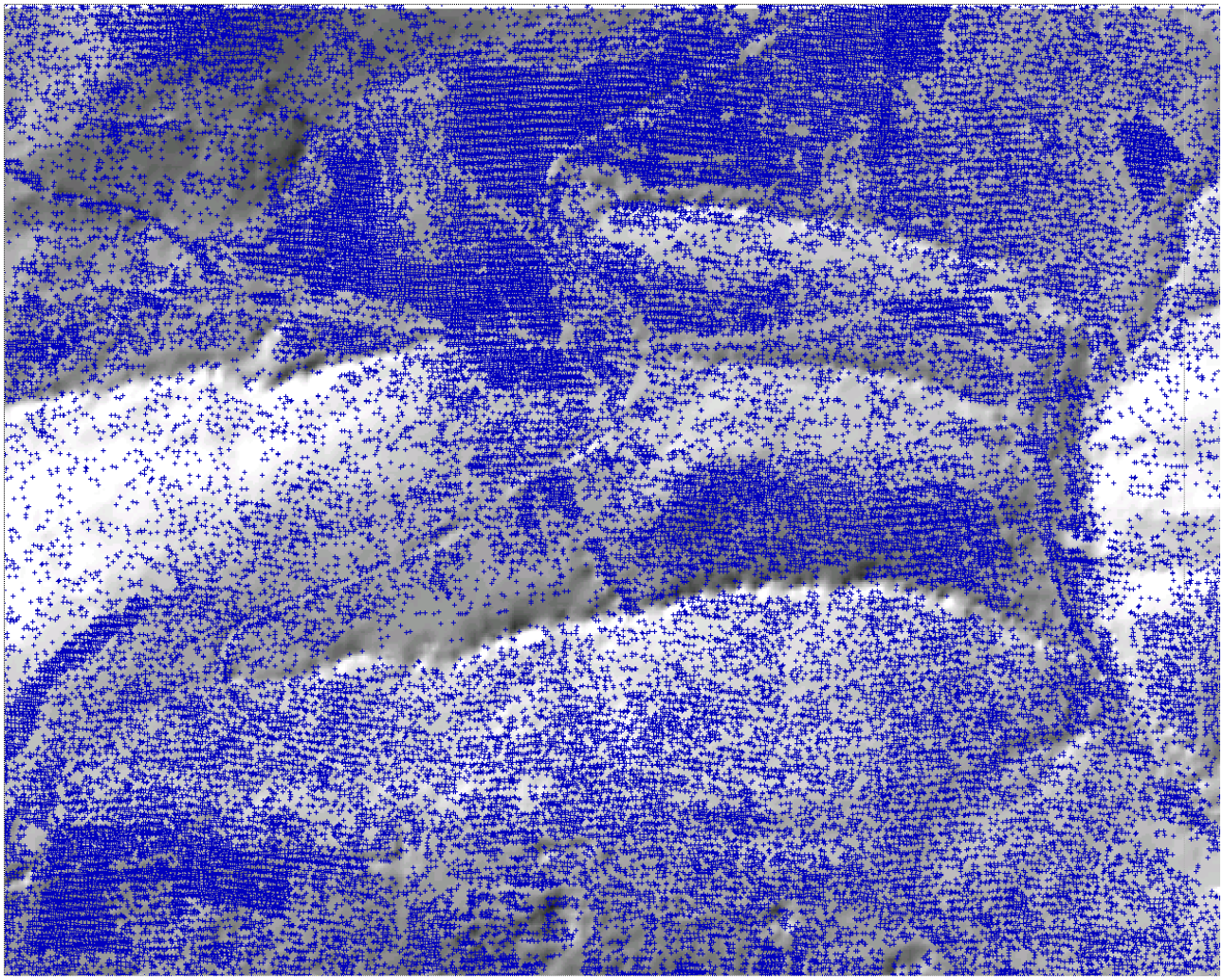


***Abb.1.10**: Räumliche Verteilung der gemessenen Daten auf einem DGM, das durch die Schummerung dargestellt ist*

Es ist wichtig zu bemerken, dass gerade in Gebieten des konzentrierten Abflusses die gemessenen Daten - wegen starker Bodenbedeckung - fehlen. Damit wird der Qualität des DGMs stark verschlechtert, und zwar entlang der Bereiche des konzentrierten Abflusses (s. Abb. 1.10). Die Interpolation produziert aufgrund von solchen Datenbeständen viele Mulden, die im Allgemeinen nicht vorhanden sind. In Gebieten, wo das Wasser überwiegend unterirdisch abläuft (z.B. Karst), findet man auch viele Mulden. Aber in solchen Gebieten ist auch die Bodenbedeckung beträchtlich geringer, sodass eine ausreichende Anzahl von gemessenen Punkten am Boden für eine hochwertige Interpolation des DGMs zur Verfügung steht.

2 DIGITALES GELÄNDEMODELL UND DATENERFASSUNG

2.1 Digitales Geländemodell (DGM)

Die Oberfläche eines Geländes ist ein kontinuierliches Phänomen, und lässt sich nicht durch die endliche Menge von Daten eindeutig beschrieben. Deswegen sind die DGMe nur eine Repräsentation der Geländeoberfläche, die der Wirklichkeit mehr oder weniger entspricht. Die sind gezielt projektiert um die Erfordernisse einiger Applikationen hinsichtlich Detaillierungsgrad, Höhengenauigkeit, Aktualität, Erstreckung, usw. zu erfüllen. Es gibt kein universelles, für alle Zwecke geeignetes, digitales Geländemodell.

Da die DGM einen hohen Automatisierungsgrad ermöglicht, und nicht nur bei der Datenbearbeitung sondern auch bei der Datenerfassung (photogrammetric matching, laser scanning), steigt das Forschungsinteresse an DGM immer mehr. Leider gibt es keine eindeutige Definition der Begriffe "Digitales Geländemodell" (DGM) - engl. "digital terrain model" (DTM). In der Fachliteratur werden die Begriffe "Digitales Geländemodell" mit "Digitales Höhenmodell" sehr oft synonym verwendet.

Digitale Modelle sind im Wesentlichen Computermodelle, die die realen Objekte und Phänomene bis zu einer gewissen Abstraktionsstufe (Detailierungsgrad, Generalisierung) zu mit bestimmten Eigenschaften (Morphometrie, Hydrologie ..) repräsentieren. Bei den Computermodellen, die eine Abstraktion des realen Geländes sind, wird der Begriff „Digitales Geländemodell" (DGM) benutzt. Höhen sind dagegen kein reales Objekt oder Phänomene; ein Computermodell als Abstraktion der Höhen hat daher keinen Sinn. In dieser Arbeit wird der Begriff DGM mit folgender Definition ausschließlich benutzt:

DGM beschreibt das Kontinuum der Geländeoberfläche als eine finite Menge von dreidimensionalen Raumpunkten (x,y,z-Werte). Die x,y,z-Werte werden dabei meist als Quadratraster (gleiche Abstände in x- und y-Richtung) aus gemessenen, meist unregelmäßig im Raum verteilten x,y,z-Tripeln berechnet. Ein x,y,z-Tripel im Raster repräsentiert somit jeweils eine Fläche von der Kantenlänge der Rasterweite des DGM und wird daher auch als 'Rasterzelle' bezeichnet (Abb. 2.1). DGMs können auch in Form von sog. Dreiecksfazetten aufgebaut werden (Köthe 2000).

Das DGM besteht grundsätzlich:

a) Höhendaten
   - umfassen die Höhen an koordinativ bekannten Punkten um (Grid- bzw. TIN- Punkte sowie Stützpunkte von Strukturlinien).

b) Topologische Beziehungen
   - verknüpfen die o.g. Höhendaten nach Nachbarschaftskriterien. Bei einer reinen Rasterstruktur sind sie implizit gegeben. Alle anderen Datenstrukturen erfordern explizite Angaben (z.B. TIN, Höhenlinien, hybride Strukturen).

c) Angaben zur Interpolation
   - mathematisches Modell zur Beschreibung des Oberflächenverlaufes zwischen gespeicherten Höhenpunkten (Interpolations-algorithmus).
   - ermöglicht die Berechnung nicht nur der Höhen an den beliebigen Stellen, sondern auch die Komponenten der Normalvektoren sowie auch anderer morphometrischer Eigenschaften (z.B. horizontale- und vertikale Krümmungen).

d) Thematische und semantische Informationen zu den Datenelementen (deskriptive Attribute);
   - sie beschreiben z.B. ob eine Linie eine Bruchkante oder eine Höhenlinie ist (Hake & Grünreich, 1994).

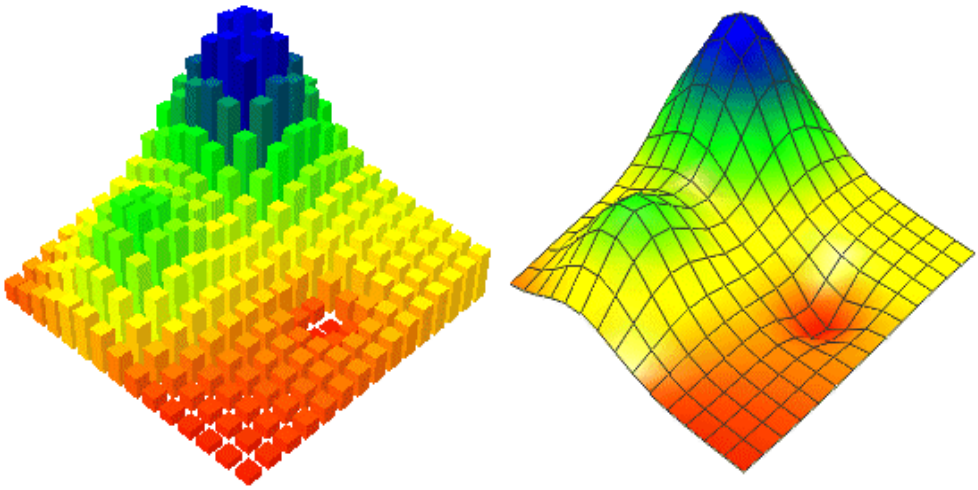


***Abb 2.1**: Die Höhenpunkte können als Werte einer Zelle (links) oder als Stützpunkte einer kontinuierlichen Oberfläche aufgefasst werden (nach Kidner, Dorey & Smith, 1999).*

2.1.1 Entstehung eines DGMs

Um ein DGM zu bilden, werden in erster Linie die Daten über die Geländeoberfläche benötigt. Es handelt sich meistens um gemessene dreidimensionale Punkte (Raumpunkte), die auf verschiedene Arten erfasst werden können. Da man keine weiteren Informationen über dem Verlauf der Geländeoberfläche zwischen dem gemessenen Punkten besitzt, soll vorausgesetzt werden, dass an jeder beliebigen Stelle des DGMs durch Interpolation Höhen gewonnen werden können. Diese Voraussetzung wird mathematisch durch eine Formfunktion bei der Interpolation definiert. Große Datenmengen, die beim realen DGM auftreten, können nur mittels zeitgenössischer EDV-Methoden effizient bearbeitet werden. Dabei werden die Daten in Datenstrukturen organisiert, und durch geeignete Algorithmen manipuliert.

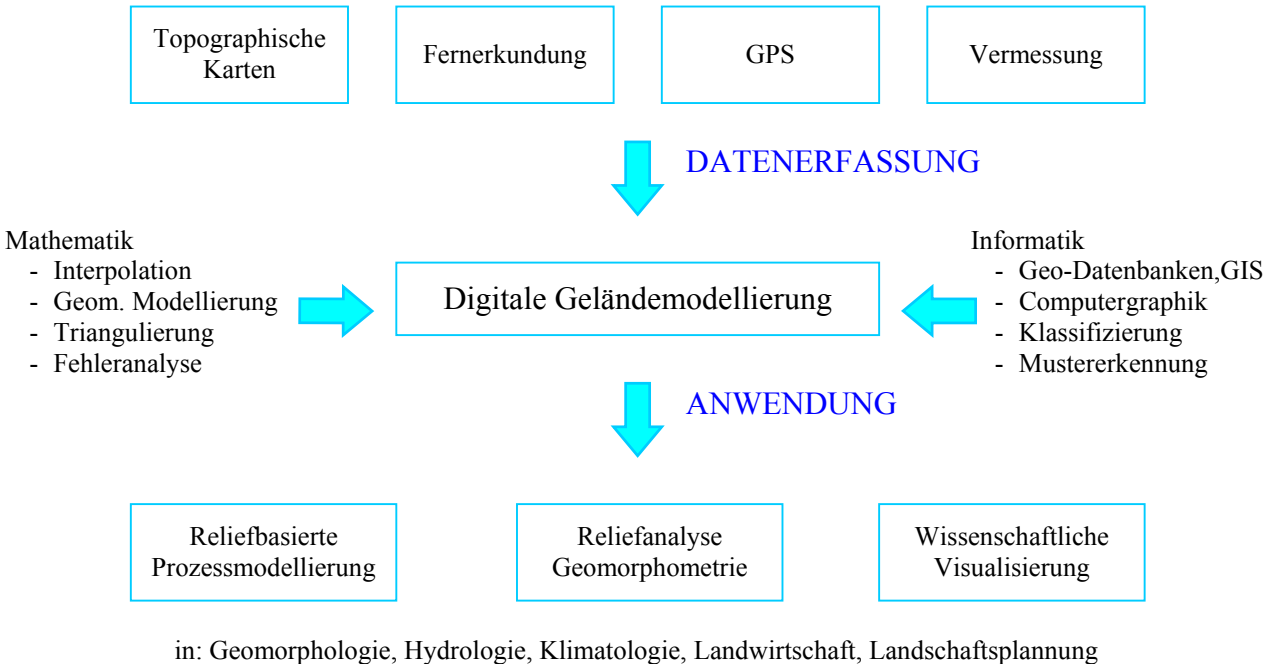


***Abb 2.2**: Der generelle Überblick über den Entstehungsprozess sowie auch Anwendungsgebiete eines DGMs.*

2.1.2 Datenstrukturen für digitale Geländemodelle

Die Daten für digitale Geländemodelle lassen sich im Rechnerspeicher grundsätzlich in Vektor- oder Raster-Struktur organisieren. Hybride Systeme können beide Datenformen kombinieren (Burrough, 1986).

2.1.2.1 Vektor-Struktur

Bei der Vektorstruktur werden alle erfassten Daten im Rechner gespeichert und noch topologisch verbunden. Vektordaten erfordern einen großen Aufwand zur expliziten Verwaltung der Topologie. Dreiecks-(TIN-) und Höhenlinien-Modelle gehören zur dieser Gruppe.

2.1.2.1.1 Dreiecks-DGM

Wird ein DGM durch unregelmäßige Dreiecksnetze gespeichert, spricht man von einem Dreiecks-DGM (s. Abb. 2.3). Im englischsprachigen Bereich hat sich dafür die Abkürzung TIN (triangulated irregular network) eingebürgert. Der Datensatz besteht meistens aus morphologisch relevanten Punkten (Gipfel-, Sattel-, Muldenpunkte) und Linien (Geländekanten, Höhenrücken und Tiefenlinien), die um Punkte entlang von Begrenzungslinien und Aussparungsflächen ergänzt werden. Die Nachbarschaftsbeziehungen werden nach der Delaunay-Triangulation (DT) definiert und durch Zeiger auf benachbarte Punkte rechentechnisch verwirklicht. Neben den Raumkoordinaten eines zu speichernden Punktes werden noch die notwendigen Zeiger gespeichert, was ein höherer Speicherbedarf pro gespeicherten Punkt im Vergleich zu anderen DGM-Datenstrukturen verursacht (Peucker et al. 1978).

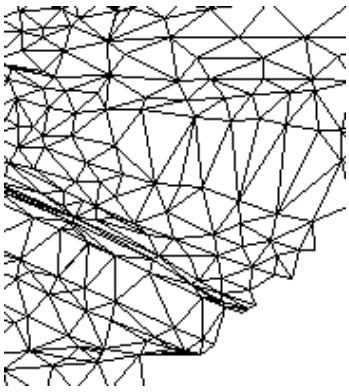


***Abb. 2.3**: Dreiecks-DGM*

Der Einfachheit des Algorithmus und die effizienten Datenstrukturen haben zu Implementierungen von TIN in viele Programmsysteme geführt. Die Vorteile und Nachteile werden im Folgenden ausführlich kommentiert.

Vorteile:

- Leicht durchschaubarer Algorithmus.

- Originaldaten bilden den zentralen Datenbestand, was insbesondere bei tachymetrischer Geländeaufnahme erwartet wird.

- Die Geländeoberfläche lässt sich mit relativ wenigen Stützpunkten darstellen. Speziell dort, wo die Geländeoberfläche relativ ruhig verläuft. Damit lässt sich die Datenredundanz ziemlich klein halten.

- Die lokal zu ergänzenden Datensätze lassen sich relativ leicht in schon vorhandene Datensätze integrieren. Wegen den bekannten lokalen Eigenschaften von DT reicht eine lokale Interpolation genau dort aus, wo die Veränderungen eingetreten sind.

- Volumenbestimmungen werden einfach.

- Geländekanten können in Form von Zwangskanten exakt berücksichtigt werden.

Nachteile:

- Großer rechentechnischer Aufwand bei der Analyse und Interpolation von Geländeoberflächen.

- Topologische Beziehungen zwischen Höhenpunkten müssen explizit durch Zeiger angegeben werden.

- Die unvermeidlichen unregelmäßigen Messfehler werden nicht herausgefiltert, weil es sich um eine Interpolation ohne Filterung handelt.

- Insbesondere in Bereichen mit schlecht geformten Dreiecken kommt es zu unbegründeten Kleinformen in den Höhenlinien.

- Eine Glättung dieser Höhenlinien, was verschiedentlich softwaremäßig realisiert ist, verbessert nur das graphische Ergebnis, aber nicht die eigentliche Oberfläche.

- Solche Glättungen der Höhenlinien erfolgen für jede Höhenlinie getrennt, sodass es bei engem Höhenlinienintervall zu Berührungen und sogar zu Kreuzungen kommen kann. Die getrennt geglätteten Höhenlinien ergeben keine gute Scharungsplastik, wie wir von anderen Methoden gewohnt sind.

- Die Approximation durch ebene Dreiecke ist häufig zu grob. Der Übergang auf gekrümmte Segmente (patches) beseitigt diese Nachteile.

2.1.2.1.2 Höhenlinien-Modell

Die Repräsentation der Erdoberfläche durch Linien konstanter Höhe ist noch immer die beliebteste und verbreiteste Weise, um die topographischen Eigenschaften deutlich und klar zu machen. Die Beschreibung des Verlaufes der Erdoberfläche hat sich in unserem Sinne als logische und intuitive Repräsentation eingebürgert. Neben den oben erwähnten Vorteilen weist das Höhenlinien-Modell aber auch manche Nachteile auf, die die Anwendbarkeit eine solchen Modelles stark einschränken können:

- Nur die Höhenwerte entlang der Höhenlinien sind direkt zugänglich. Topographische Anomalien zwischen Höhenlinien können nicht dargestellt werden. Die konstante Äquidistanz - unabhängig von der Steilheit des Geländes - bedingt in steilen Bereichen dichte und in flachen Regionen spärliche Höheninformation. Die Strukturelemente (Geländekanten, Gerippelinien, ..) können nicht eingebettet werden, sondern sie sind in einer zusätzlichen Datenbank abzuspeichern, um ein qualifiziertes DGM zu haben. Die Geländekanten werden meistens manuell digitalisiert, was sehr aufwendig ist. Die automatischen Methoden zur Extraktion der Geländekanten sind noch in der Entwicklung (Hietzinger & Kager 2000).

- Da die Höhenwerte zwischen den Höhenlinien immer neu interpoliert werden müssen, weist eine solche Struktur eine große Ineffizienz besonders beim Ableiten von rasterbasierten Produkten (digitales Orthophoto, Schummerungen, morphometrische und hydrologische Darstellungen...). Deshalb ist sie für die rechnergestützte Oberflächenmodellierung selten im Gebrauch.

2.1.2.2 Raster-Struktur

Bei der Rasterstruktur wird ein Gebiet in ein gleichmäßiges Gitter aufgegliedert und jede Gitterzelle enthält den Wert eines Attributes (Moore et al., 1992). Beim DGM ist der Attributwert der Höhenwert. Es werden nur die Höhenwerte in eine Matrix abgespeichert; die X- und Y- Werte gehen aus der Lage des jeweiligen Höhenwertes in der Matrix hervor. Die einzelnen Höhenwerte sind dabei entweder der Höhe eines diskreten Punktes oder dem Mittelwert eines Geländeausschnittes zugeordnet. Der Hauptvorteil der Rasterstruktur liegt in der impliziten Topologie der Zellen, was einen sehr effizienten und relativ einfachen Systemaufbau erlaubt.

Die Rasterstruktur weist einige Nachteile auf, und zwar:

- Die starre Struktur kann plötzliche Veränderungen der Geländeform nicht wiedergeben.

- Die Maschenweite des Rasters beeinflusst die Berechnungsergebnisse.

- Die Abflußwege weisen eine unrealistische Zickzackform auf.
- In flachem Gelände können Datenredundanzen auftreten.
- Ein hochauflösendes Raster erfordert einen hohen Speicherbedarf.
- Hangneigung und Exposition lassen sich nicht eindeutig berechnen, da man keine Ebene durch 4 Punkte im Raum wiederspruchsfrei liegen kann.

2.1.2.2.1 Gitter-Struktur und kategorische Grid

Je nach der Methode der Oberflächeninterpretation unterteilt sich die Raster-Struktur in (El-Sheimy, 1999):

- Gitter-Struktur (lattice)
- Kategorische Grid

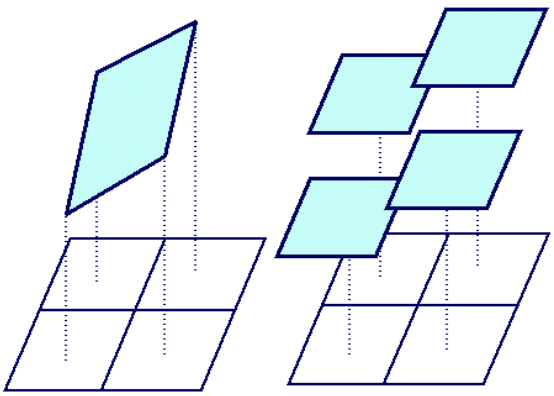


***Abb. 2.4**: Gitter- und kategorische Raster-Struktur (nach El-Sheimy, 1999)*

Bei der Gitter-Struktur (lattice) bezieht sich jeder Gitterpunkt auf einen Höhenwert im Zentrum der Rasterzelle. Die Höhenwerte zwischen Gitterpunkten werden mittels einer Interpolationsmethode bestimmt. Bei der kategorischen Rasterstruktur (categorical grid) hat dagegen jede Rasterzelle den gleichen Höhenwert. Doch, kategorische Rasterstruktur kann auch als Gitter-Struktur interpretiert sein.

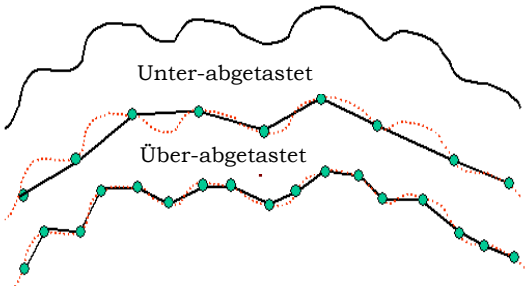


***Abb. 2.5**: Wirkung des Abtastungsintervalls bei den Oberflächenrepräsentationen*

Die Qualität der Oberflächenrepräsentation hängt in erster Linie von der Entfernung zwischen den benachbarten abgespeicherten Höhenwerten ab. Um die Oberfläche eines bewegten Geländes befriedigend zu repräsentieren, wählt man eine sehr kleine Rasterweite. Da die Rasterweite konstant im ganzen Modell sein soll, wird die Oberfläche über abgetastet (over-sampled) dort, wo das Gelände ruhig verläuft, was zu einer gewissen Redundanz führt (s. Abb. 2.5).

2.1.2.2.2 Quadtree-Struktur

Die Quadtree-Struktur stellt einen Sonderfall des Rasters dar, die eine rekursive Zerlegung des zu betrachtenden 2D-Raumes in rechteckige Zellen ermöglicht. Jede Zellenseite soll eine Potenz von 2 lang sein, damit sie sich in 4 kleineren Zellen zerlegen lässt. Die Zerlegung wird rekursiv wiederholt, bis die Rasterzellen die gleiche Information umfassen (Abb. 2.6). Die Starrheit des gleichmäßigen Rasters wird mittels Quadtree Verfahren beseitigt. Homogene Regionen können durch große Rasterzellen beschrieben werden. Inhomogene Bereiche dagegen können mit einer sehr guten Auflösung charakterisiert werden, ohne dass das ganze Raster in dieser Detailliertheit vorliegen muss.

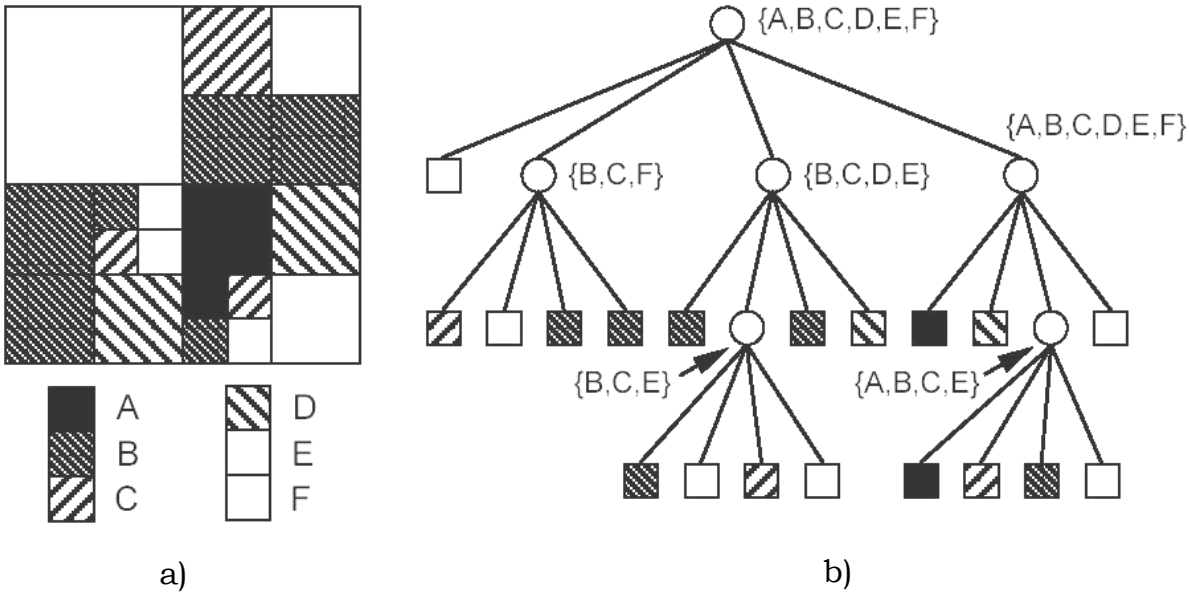


***Abb. 2.6**: a) Die Zerlegung von räumlichen Informationen in Zellen; b) Anordnen von Daten in Quad-tree Struktur.*

Quad-tree-ähnliche Datenstrukturen werden auch für die drei- oder mehrdimensionalen raumbezogenen Daten benutzt. Im 3D-Raum wird aus dem Quadtree der Octree. Der Raum wird nicht mehr in rechteckige Zellen sondern in 8 Blöcke, s.g. Oktanten, zerlegt. Das Verfahren wird wieder rekursiv wiederholt, bis der Block nur einen Attributwert umfasst (Abb. 2.7).

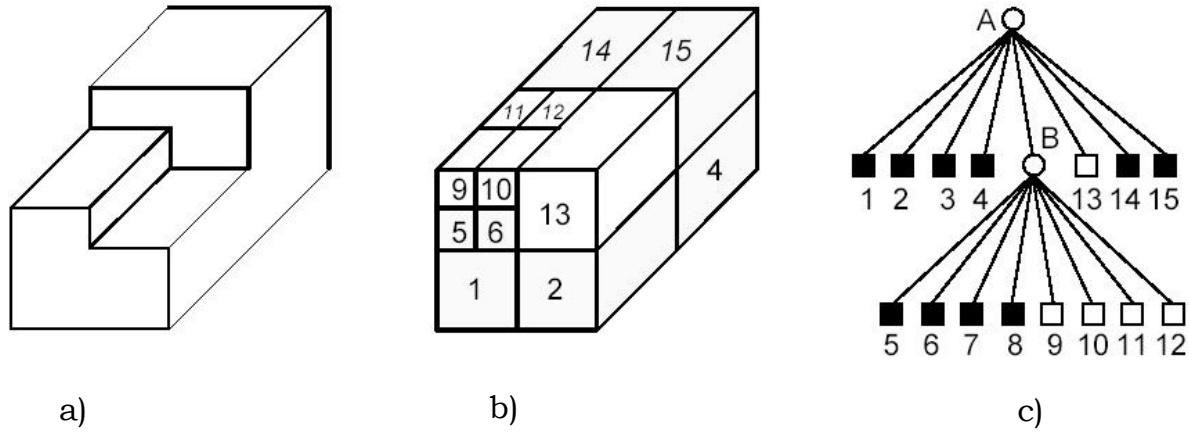


***Abb. 2.7**: a) Ein räumliches Objekt; b) Zerlegung des Objekts in Octree-Blöcke (Oktanten); c) Darstellung des räumlichen Objektes in Octree Struktur*

2.1.2.3 Hybride Struktur

Obwohl das Rastermodell die einfachste und effizienteste Struktur für ein DGM ist, ist diese Struktur für ein hochwertiges DGM nicht am besten geeignet. In einem Modell gehen nämlich die Geländekanten sowie markante Höhenpunkte verloren, denn das Rastermodell diskretisiert die Oberfläche durch Höhenwerte, die regelmäßig mit konstantem Intervall entlang des ganzen Modelles angeordnet sind. Anstelle eines reinen Rastermodelles ist für ein topographisches Informationssystem (TIS) daher ein hybrides digitales Geländemodell vorzusehen, in dem unter anderem Geländekanten und Höhenpunkte adäquat berücksichtigt werden (s. Abb. 2.8).

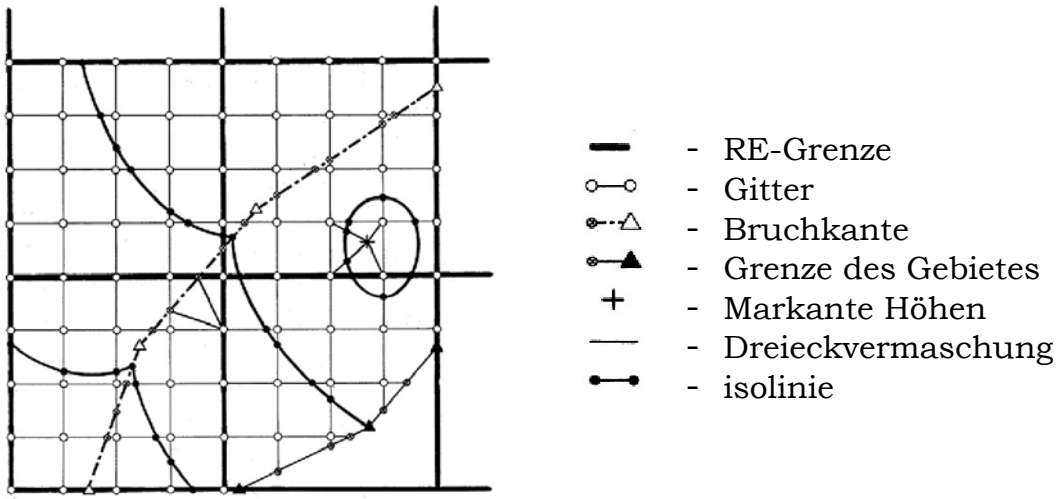


***Abb. 2.8**: Hybride Struktur - wie sie beim Programm-System SCOP++ verwirklicht ist (nach Kraus 2000).*

Da in dieser Arbeit ausschließlich Verfahren für rasterbasierte Strukturen behandelt werden, konzentriert sich die folgende Diskussion auf deren Eigenschaften.

Wegen der einfachen Implementierung sowie der effizienten Programmierung ist das quadratische Raster die am weitesten verbreitete Datenstruktur (Collins & Moon 1981). Die rasante parallele Entwicklung von Verfahren der digitalen Bildverarbeitung hat viel zum Erfolg von reiner Rasterstruktur beigetragen, denn das digitale Bild hat die gleiche Datenstruktur wie ein auf reinem Raster basiertes DGM. Damit lassen sich viele Methoden, die ursprünglich zur Verarbeitung von digitalen Bildern gedacht waren, gleichzeitig zur Analyse von Raster-DGM anwendbar und umgekehrt.

Die reine Rasterstruktur, im Gegensatz zu allen anderen Datenstrukturen, repräsentiert eine räumliche Funktion durch eine endliche Anzahl von abgetasteten Werten, die regelmäßig im Raum angeordnet sind. Die räumliche Abtastfrequenz ist vorgegeben, eine lokale Anpassung an den morphometrischen Eigenschaften ist daher nicht möglich. Da in der Rasterstruktur nur die abgetasteten Werte abgespeichert sind, wird die diskretisierte räumliche Funktion durch einen Interpolationsprozess wieder hergestellt. Dabei wird unterstellt, dass die räumliche Funktion einen kontinuierlichen Verlauf besitzt. Das Auflösungsvermögen der Rasterstruktur hängt in erste Linie vom Diskretisierungsintervall ab, und lässt sich durch das Abtasttheorem beschrieben. Mehr darüber findet man in (Tempfli, 1982).

Bereiche mit stark bewegtem Relief werden mehr oder weniger geglättet, je nachdem Diskretisierungsintervall. Dort wo die Geländeoberfläche sehr gleichmäßig geformt ist, liegt eine hohe Datenredundanz vor (Moore, Grayson & Ladson 1992).

(Moore, Grayson & Ladson 1992) haben damals geäußert, dass die hydrologischen Prozesse in adäquater Weise nur durch vektorbasierte DGMe repräsentiert werden können. Diese Argumentation liegt in der Tatsache begründet, dass die Höhenlinien den Äquipotenziallinien des Oberflächen-Abflusses entsprechen. Die Abflussrichtung verläuft immer senkrecht zu den Höhenlinien, sodass sich aus der Kombination von Höhen- und Abflusslinien logische Einheiten im Sinne der Hydrologie abgrenzen lassen.

Die Raster-Datenstruktur ist besonders für die Ableitung morphometrischer Reliefparameter, die die lokale Reliefgeometrie beschreiben, angemessen als auch in bezug auf ihre Berechnung als auch auf die räumliche Repräsentanz der Daten (Conrad, 1998). Die Rasterstruktur eignet sich besonders für die Datenhaltung, wenn sie sich kontinuierlich im Raum verändert.

2.2 Datenerfassungsmethoden für DGMe

Alle Methoden, die räumliche Daten über die Geländeoberfläche liefern, kommen zur Datenerfassung in Frage. Um ein qualifiziertes DGM zu bilden, werden die Methoden bevorzugt, die neben den regelmäßig oder unregelmäßig verteilten Höhendaten auch Strukturinformationen (Tiefenlinien, Grate,...) liefern. Auf folgende Erfassungsmethode gehen wir näher ein:

- Digitalisierung topographischer Karten
- Photogrammetrische Methoden
- Tachymetrische Messung im Gelände
- GPS-Messung (Bodenmessung)
- Abtasten der Erdoberfläche

2.2.1 Digitalisierung topographischer Karten

Karten werden eingescannt und Höhenlinien, Höhenpunkte sowie auch Strukturinformationen werden als Vektor- und Punktdaten digitalisiert. Die Höhenlinien können teilweise durch spezielle Mustererkennungsverfahren vollautomatisch erfasst werden. Die so gewonnenen Datensätze haben einige besondere Eigenschaften (s. Abb. 2.9):

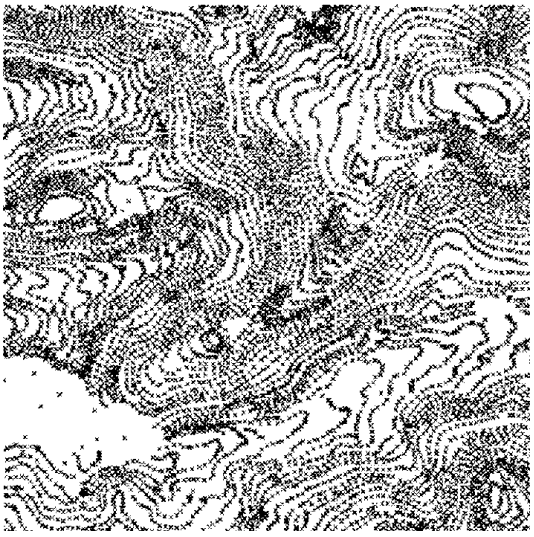


***Abb. 2.9**: Datenverteilung beim Digitalisieren topographischer Karten.*

- Die Datendichte variiert sehr stark.
- Über den Verlauf der Oberfläche zwischen benachbarten Schichtlinien gibt es überhaupt keine Informationen.
- Um ein akzeptables DGM zu interpolieren, wurden dafür Interpolationsalgorithmen entwickelt, die speziell an solche Datensätze angepasst sind (Ardiansyah & Yokoyama, 2002).
- Die Strukturlinien können die Qualität des DGMs beachtlich heben. In den topographischen Karten sind meistens die Gewässer explizit repräsentiert. Andere Strukturlinien, wie Kanten, Grate, usw. werden nach menschlicher Interpretation extrahiert. Eine Lösung, um die Strukturlinien aufgrund der Höhenlinien vollautomatisch zu extrahieren, findet man in (Heitzinger & Kager, 1998).

Die Fehler, die in so gewonnenen Daten enthalten sind, lassen sich kaum quantifizieren. Das Ziel der kartographischen Bearbeitung ist nämlich nicht nur die möglichst präzise Wiedergabe von Höhenwerten, sondern auch eine möglichst

übersichtliche Darstellung der typischen geomorphologischen Eigenschaften des Geländes.

2.2.2 Photogrammetrische Methoden

Die relevanten Daten für digitale Geländemodellierung werden durch eine manuelle oder automatische Auswertung von photogrammetrischen Messbildern erfasst. Bei manuellen Verfahren wird meistens die Profilierung angewendet. Die analytischen sowie auch die digitalen Auswertungsgeräte beschleunigen den Erfassungsprozess sehr, da sie ein automatisches Anfahren der Messmarke an exakte Grundrisspositionen der zu erfassenden Punkte ermöglichen. Der Operateur misst nur die Stereoparallaxe an dem angefahrenen Punkt. Um ein qualifiziertes DGM zu produzieren, misst man manuell noch die Strukturlinien sowie charakteristische Höhenpunkte. Bei Analogauswertegeräten werden hauptsächlich die Höhenlinien gemessen, da sie kein automatisches Anfahren der Messmarke erlauben. Digitale photogrammetrische Arbeitsstationen bieten einen sehr hohen Automatisierungsgrad bei der Datenerfassung. Mittels automatischer Stereokorrelation werden homologe Punkte in beiden Photos erkannt und über die Stereoparallaxen die Höhen errechnen (mehr darüber in: Duperet 2002). Die Geländekanten sind manuell zusätzlich zu erfassen.

2.2.3 Tachymetrische Messung im Gelände

Diese Methode beruht in der Messung der Polarkoordinaten bezüglich eines bekannten Punktes (Standpunkt). Durch die bekannten Raumkoordinaten des Standpunktes sowie die Orientierung der Geradenbündel werden die gemessenen Polarkoordinaten in das übergeordnete Koordinatensystem überführt. Die Tachymetrie liefert sehr präzise Ergebnisse (im cm-Bereich); sie weist aber einen sehr großen Arbeitsaufwand im Gelände auf. Deswegen wird diese Methode für die Datenerfassung des DGMs sehr beschränkt benutzt.

2.2.4 GPS-Messung (Bodenmessung)

Der zu vermessende Punkt wird aufgrund mindestens vier gemessener Pseudo-Raumstrecken zu verschiedenen Satelliten bestimmt. Die hochwertigen GPS-Empfänger ermöglichen die gleichzeitige Beobachtung bis zu zwölf Satelliten. Dadurch erreicht man sehr zuverlässige Lösungen. Eine beachtliche Genauigkeitssteigerung wird durch die Anwendung von der Differential-GPS-Methode erreicht, weil dadurch ein großer Teil der systematischen Fehler entfernt werden kann. Da der GPS-Empfänger an jeden aufzunehmenden Punkt gebracht werden muß, ist diese Methode nur für kleinräumige DGMe geeignet. Relativ gute Lage- und Höhengenauigkeit qualifiziert diese Methode als besonders geeignet für Kontrollmessungen zur Verifikation der Qualität eines DGMs.

2.2.5 Abtasten der Erdoberfläche

Dabei werden Daten über die Erdoberfläche durch Abtasten aus der Luft oder aus dem Weltraum ermittelt. Es handelt sich im Allgemeinen um ein Verfahren, wo der Mess-Sensor nicht mit der zu vermessenden Oberfläche im Kontakt tritt. Es werden nur einige Charakteristiken (Intensität, Phase, Zeitcharakteristik, spektrale Eigenschaften) vom reflektierenden Spektrum der elektromagnetischen Strahlung aufgezeichnet. Das Messverfahren läuft ausschließlich vollautomatisch ab; es wird sehr hohen Datenraten erzielt. Diese Verfahren werden vorherrschend als Datengewinnungsmethoden für großräumige DGMe benutzt. Sie werden daher etwas näher beschrieben.

Die Abtastensverfahren lassen sich im Allgemeinen in zwei Gruppen unterteilen:

- Passive Verfahren
- Aktive Verfahren

2.2.5.1 Passive Verfahren

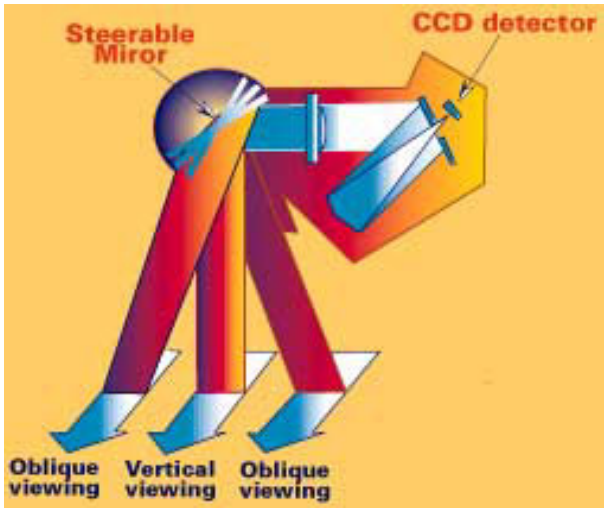


***Abb. 2.10**: Variable Ablenkung beim SPOT Sensor (nach www.spot.com)*

Beim passiven Verfahren zeichnet der Sensor die von der Erdoberfläche reflektierten Strahlungen auf. Dabei lässt sich die räumliche Strecke zwischen Sensor und bestrahlter Fläche nicht direkt - aufgrund nur einer Messung – bestimmen. Der Sensor muss vielmehr das Gebiet aus verschiedenen Beobachtungsrichtungen abtasten.

Wird der Sensor quer zu Umlaufbahn ausgelenkt, spricht man von Lateral-Stereoskopie. Die Ablenkung in Flugrichtung wird Longitudinal-Stereoskopie genannt.

Bei der Lateral-Stereoskopie ist vor dem Zeilensensor ein Spiegel angebracht, der sich von der Erde aussteuern lässt (S. Abb. 2.10).

Ein und dasselbe Gebiet wird aus verschiedenen Satelliten-Umlaufbahnen abgetastet. Es ergeben sich verschiedene Basis/Höhen -Beziehungen, die sich gut an unterschiedliche Projektanforderungen anpassen lassen (SPOT 1-4, IRS-1C & IRS-1D).

Die relativ große Zeitdifferenz (minimal ein paar Tage) zwischen zwei Stereoaufnahmen verursacht gelegentlich Änderungen in Landnutzung, Vegetation, atmosphärischen Bedingungen, so dass die manuelle Auswertung und besonders die automatische Stereokorrelation nachteilig beeinflusst werden (s. Abb. 2.11).

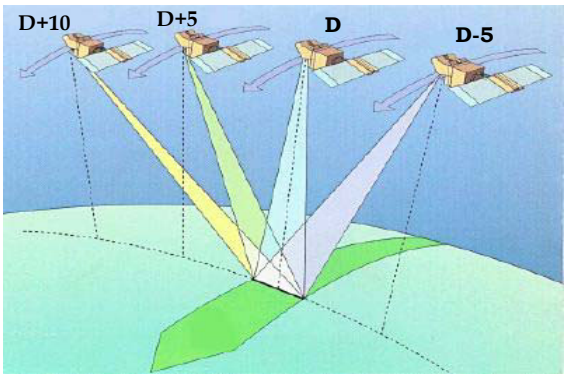


***Abb. 2.11**: Geometrie und Zeitdifferenzen bei SPOT Stereoaufnahmen - laterale Stereoskopie (nach www.spot.com).*

Um dies zu vermeiden, sind die neu entwickelten Sensoren (PRIRODA MOMS-2P, SPOT 5 HRS, LANDSAT 7 HRMSI, HRSC) mit zwei-, drei- oder Mehrzeilenkamera ausgerüstet. Die Richtung der zu empfangenen Strahlung des ersten Detektors ist nach vorne und die des zweiten Detektors nach hinten abgelenkt (Longitudinal-Stereoskopie s. Abb. 2.12).

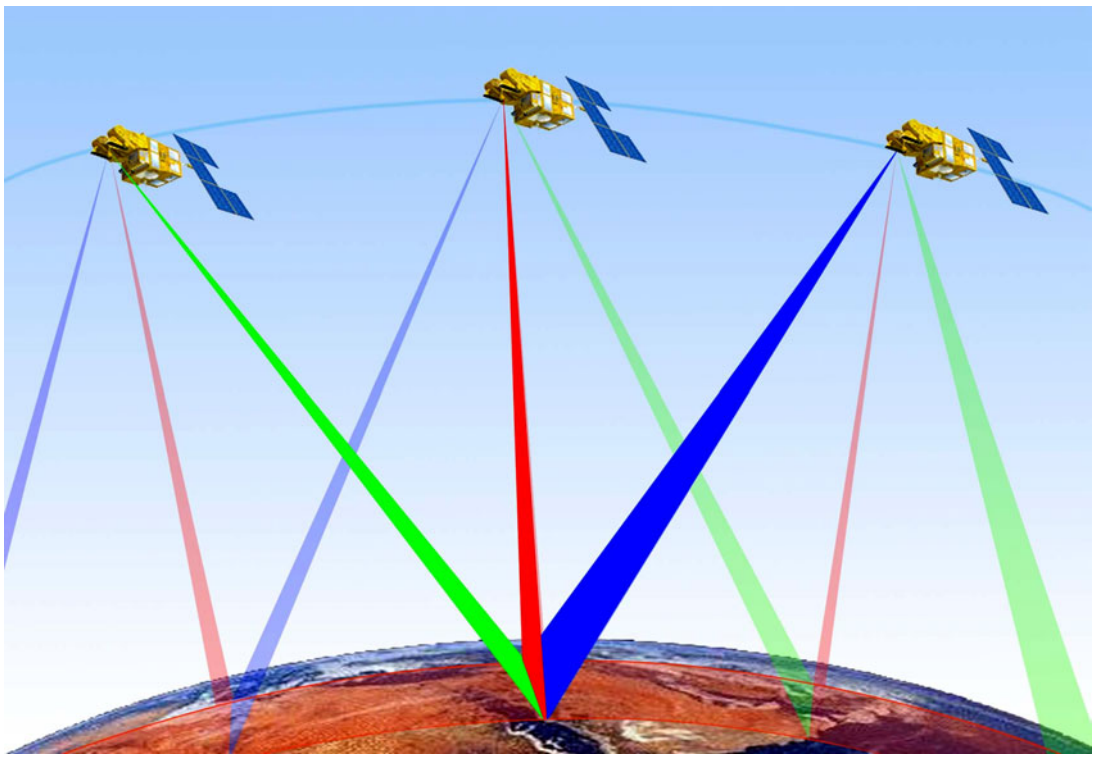


***Abb. 2.12**: Geometrie der Longitudinal – Stereoskopie.*

Der evtl. dritte Zeilendetektor ist in der Regel zum Nadir ausgerichtet und bietet so die Möglichkeit der Auswahl aus unterschiedlichen Basis/Höhen-Verhältnisse (typisch 0.4 und 0.8). Damit wird die Zeitdifferenz zwischen zwei Stereoaufnahmen auf Minuten reduziert und die radiometrischen Variationen zwischen Bildern wegen temporärer Änderungen, Sonnenbelichtung, Refraktion usw. werden sehr klein.

Eine sehr interessante Konstruktion einer Mehrzeilenkamera, der s.g. HRSC (High Resolution Stereo Camera), stammt von Deutschen Luft- und Raumfahrt (DLR) – Institut aus Berlin (Abb.2.13).

Das HRSC-Instrument wurde ursprünglich für Beobachten der Marsoberfläche entwickelt, und sollte 1996 zum Mars fliegen. Da damals die Rakete ausfiel, war der Sensor verloren. Erst im Juni 2003 wurde der Sensor erfolgreich zum Mars geschickt. In der Zwischenzeit wurde der Sensor für flugzeuggestützte Fernerkundungsanwendungen modifiziert (HRSC-A/QM); Er wird erfolgreich zum Scannen der Erdoberfläche eingesetzt. Das System ist eine Weiterentwicklung des Pushbroom-Dreizeilenprinzips (Li 1997). Der Stereomodus in Flugrichtung (Longitudinal-Stereoskopie) mit den drei panchromatischen Kanälen wurde um zwei ebenfalls panchromatische, s.g. Photometriekanäle, erweitert. Sie waren ursprünglich für photometrische Untersuchungen der Mars-Oberfläche gedacht, jetzt aber ein variables Basis/Höhen-Verhältnis ermöglichen. Alle panchromatischen Sensoren nehmen das gesamte sichtbare Licht bis in den nahen infraroten Bereich auf (Bandbreite von 585nm bis 765nm). Die vier Multispektralkanäle (R, G, B und IR) erfassen einen Spektralbereich von 395nm bis 1020nm. Neun Zeilendetektoren sind parallel auf einer Fokalplatte, hinter dem gemeinsamen Objektiv, befestigt. Im Flugzeug ist die Kamera auf einer konventionellen, kreiselstabilisierten Plattform der Fa. Zeiss T-AS aufgehängt (Abb.2.14).

***Abb. 2.13**: HRSC - Instrument*

***Abb. 2.14**: HRSC-AX Kamera*

Wegen der sehr guten Messeigenschaften des HRSC-A wurde das System intensiv weiterentwickelt. Im Herbst 2000 kam die neue Generation, der s.g. HRSC-AX Sensor, zum kommerziellen Einsatz. Die Hauptpunkte der Weiterentwicklung waren:

1. Neue CCD-Zeilensensoren mit doppel so vielen Pixeln (12000) als bei HRSC-A (5184). Die Pixelgröße von 6.5µm zusammen mit dem Objektiv mit 150mm Brennweite ergibt eine fast dreimal größere Streifenbreite von 1560m bei einem Flug mit 3000m Flughöhe, im Vergleich von 600m bei HRSC-A.

2. Verbesserte potenzielle geometrische Auflösung in Flugrichtung wegen kürzerer Expositionszeit. Beim Zeilensensor ist die geometrische Auflösung in Flugrichtung nämlich definiert als Produkt der Fluggeschwindigkeit und Expositionszeit. Bei einer Geschwindigkeit von 300km/h und Expositionszeit von 0.6msec beträgt die Auflösung in Flugrichtung zirka 5cm (in Vergleich zu 18cm bei HRSC-A).

3. Die Beobachtungswinkel der Colorkanäle sind nah wie möglich zur Nadirrichtung verschoben. Damit wird die Qualität der Colordarstellungen verbessert (Abb. 2.15).

4. Die Kamera ist nach dem modularen Prinzip aufgebaut. Damit kann sie nach den spezifischen Benutzeranforderungen bezüglich Objektiv-Brennweite sowie Spektral- und Stereokanäle angepasst werden.

5. Die radiometrische Auflösung ist beachtlich verbessert. Das System benutzt die 12Bit-Technologie zum Detektieren, Bearbeiten und Aufzeichnen im Vergleich zur ursprünglichen HRSC-A, die mit 10 Bit detektiert, aber nur mit 8 Bit aufzeichnet.

Zurzeit werden zwei Modelle der HRSC-AX zum kommerziellen Einsatz geboten, und zwar:

1. HRSC-AX150 mit 150mm Objektiv-Brennweite und 9 CCD-Zeilendetektoren (5 panchromatische Stereokanäle und 4 Farbkanäle).

2. HRSC-AX047 mit 47mm Objektiv-Brennweite und 5 CCD-Zeilendetektoren (3 panchromatische Stereokanäle und 2 Farbkanäle)

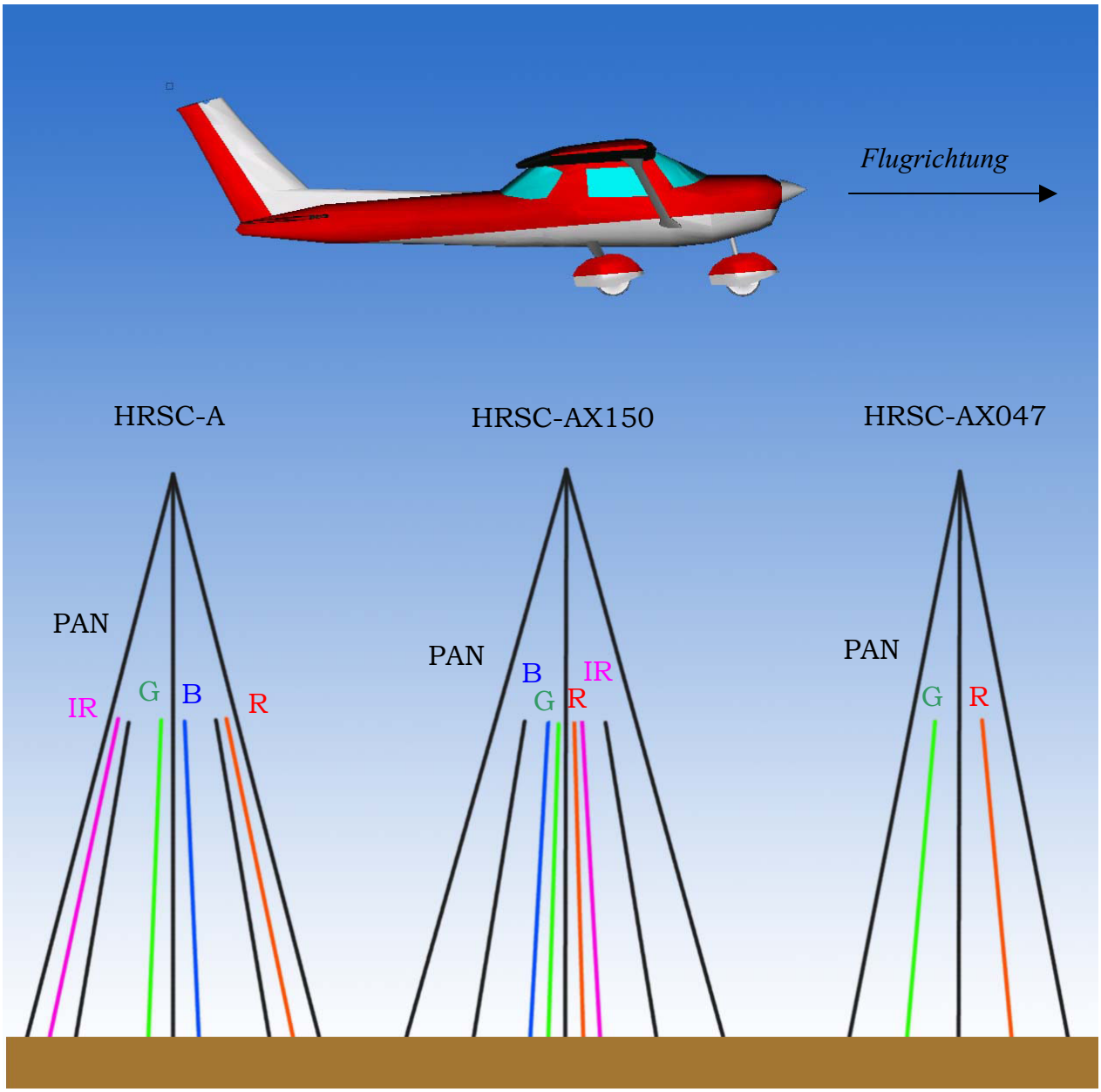


***Abb. 2.15**: Beobachtungswinkel der flugzeuggetragenen HRSC Systeme.*

Weitere technische Details sind für alle drei Systeme in Tabelle 2.1 angegeben.

Tabelle 2.1 Die technischen Daten der flugzeuggetragenen HRSC-Kamerasysteme (nach Neukum et al. 2001).

HRSC	**-A**	**-AX150**	**-AX047**
Kameradaten			
Brennweite (mm)	175	150	47
Anzahl der CCD-Zeilen	9	9	5
Anzahl der Pixel pro Zeile	5184	12000	12000
CCD-pixelgroße (µm)	7	6.5	6.5
Radiometrische Auflösung (Bit)	8	12	12
min. Zeit der Exposition (msec)	2.2	0.625	0.625
Stereowinkel (deg)	±18.9	±20.5	±14.4
Öffnungswinkel (deg)	11.8	29.1	79.4
Streifenbreite beim rel. Höhe = 3000m (km)	0.6	1.6	5
Spektrale Bereiche			
Stereo und photometrische Kanäle (nm)	585-765	520-760	515-750
Infrarot (nm)	925-1015	770-810	-
Rot (nm)	730-770	635-685	570-680
Grün (nm)	485-575	530-570	475-575
Blau (nm)	395-485	450-510	-
Räumliche Auflösung			
In der Flugrichtung - beim geschw. 70m/sec	<15.4 cm	<4.4 cm	<4.4 cm
Quer zu Flugrichtung - rel. Fliegenhohe 3km	<12.0cm	<13.0cm	<41.5cm
Systemdaten			
Geo-Referenzierung	ApplAnix POS/AV-DG mit INS und GPS		
Aufhängung	Zeiss T-AS		
Nominal Datenübertragungsgeschwindigkeit	12Mbyte/s	32Mbyte/s	20Mbyte/s
Gewicht der Kamera (kg)	32	70	70
Gewicht des Systems (kg)	300	300	300

Am Institut für Planetenerkundung am DLR ist in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Berlin eine vollautomatisierte Datenprozessierung entwickelt worden, zu der das digitalen Bildmatching, die Generierung von Orthobildern, Bildmosaiken und Digitalen Geländemodellen (DGM), sowie auch die Verschneidung der HRSC-A/AX-Daten mit multispektralen Datensätzen, gehören.

2.2.5.2 Aktive Verfahren

Beim aktiven Verfahren wird die Erdoberfläche durch ein Messsignal bestrahlt, deren Phasen-, Zeit- und Spektraleigenschaften bekannt sind. Der Sensor zeichnet die reflektierte Strahlung auf, die bei der Bearbeitung mit ursprünglichem Meßsignal verglichen wird. Aufgrund der Phasen- oder Zeitdifferenzen lässt sich die räumliche Strecke zwischen Sensor und der Fläche, welche die Strahlung reflektiert hat, ermitteln. Die am meisten verwendeten aktiven Verfahren für die DGM-Datenerfassung sind:

- InSAR
- LIDAR

Im Vergleich zu anderen Erfassungsmethoden wird beim InSAR die Mikrowellenstrahlung als Messsignal benutzt. Die längewelligen Mikrowellen weisen folgende Vorteile gegen optische Fernerkundungssysteme auf (Kraus/Schneider 1988):

- Der Transmissionsgrad der Atmosphäre für Mikrowellen ist sehr groß. Die Wolken sowie auch der Regen schwächen die Mikrowellen kaum ab. Daher können die Mikrowellensysteme bei fast jedem Wetter eingesetzt werden.

- Die aktiven Mikrowellen-Aufnahmesysteme senden die Mikrowellenstrahlung zur Geländeoberfläche aus und erfassen die reflektierte Strahlung. Damit ist der Messprozess von der Sonnenstrahlung unabhängig und die Daten können im Prinzip 24 Stunden täglich erfasst werden.

- Die Eindringtiefe von Mikrowellen in die Geländeoberfläche ist i.a. bedeutend größer als die Eindringtiefe von optischer Strahlung. Damit können die Informationen über Geländeschicht, die von einigen Millimetern bis zu einigen Metern dick ist, ermittelt werden.

- Emission und Reflexion von Mikrowellen werden vor allem von elektrischen Materialeigenschaften beeinflusst. Bei den meisten natürlichen Oberflächen vermitteln Mikrowellen daher insbesondere Information über den Wassergehalt.

2.2.5.2.1 InSAR

Seitensicht-RADAR mit synthetischer Apertur (SAR) ist ein aktives Fernerkundungssystem, das neben der Strahlungsintensität auch die Phase der empfangenen Strahlung aufzeichnet. Die beiden Daten (Amplitude und Phase) sind in Form von komplexen Zahlen gespeichert (SLC - single look complex format). Die Szene, welche die komplexen Zahlen als Pixelwert beinhaltet, wird "komplexe Szene" genannt. Es sind mindestens zwei komplexe Szenen des gleichen Gebietes notwendig, um ein DGM ableiten zu können. Beide Szenen müssen aus verschiedenen Positionen aufgenommen werden. Dafür benutzt man entweder benachbarte Satellitenlaufbahnen (z.B. ERS- Satelliten) oder zwei Antennen, die auf der gleichen Plattform (SRTM - Shuttle gestütztes SAR) montiert sind. Die zweite Anordnung ist zu bevorzugen, denn die zeitliche Dekorellation zwischen den SAR- Stereoaufnahmen ist eliminiert.

Die DGM-Generierung folgt nach folgender Prozedur (Renaudin 2000):

1. Geometrische Koregistrierung (Geometric co-registration)
Die Daten der zweiten Szene werden so resampelt, dass sie geometrisch den Daten der ersten Szene bestmöglich entsprechen. Dieses Verfahren geht nach der Methode der automatischen Korrelation, wo nur die Amplitudenwerte den beiden Szenen miteinander verglichen werden. Als Ergebnis bekommt man zwei Szenen,

in welchen die registrierten komplexen Werte, die vom selben Detail am Gelände stammen, die gleichen Adressen (Indizes) haben.

2. Interferogramm-Berechnung
Das Interferogramm ist primäres Produkt der SAR-Interferometrie und beinhaltet die Phasendifferenzen zwischen beiden koregistrierten Szenen. Jeder komplexe Wert der ersten Szene wird mit dem konjugiert komplexen Wert der zweiten Szene multipliziert. Die so gewonnene Phasendifferenz wird in dem Interferogramm-Datei gespeichert. Das Verfahren geht pixelweise und lässt sich durch folgende Formel beschrieben (Prati & Rocca, 1994):

$$s_1 \times s_2^* = A_1 e^{-i\varphi_1} \times A_2 e^{-i\varphi_2} = A_1 A_2 e^{-i(\varphi_1 - \varphi_2)} \qquad (2.1\text{-}1)$$

Diese Phasendifferenzen werden noch um das s.g. "ebene Gelände" korrigiert. Man berechnet das Interferogramm, wenn das Gelände eben wäre und subtrahiert dieses Interferogramm vom ursprünglichen Interferogramm. Dieses Verfahren wird "Geländeeinebnung" (phase flatenning) genannt.

3. Phasenabwicklung (phase unwrapping)
Die Phasendifferenzen, die im Interferogramm dargestellt sind, enthalten nur den Rest der ganzzahligen Division der vollen Phasendifferenz durch 2π. Die Höhen lassen sich aber nur innerhalb der vollen Phasendifferenzen berechnen. Die Anzahl der ganzen Phasenzyklen ist daher zu bestimmen. Dieses Verfahren nennt man Phasenabwicklung (phase unwrapping) und setzt eine kontinuierliche Geländeoberflache voraus, da dann die Phasendifferenzen zwischen benachbarten Pixeln auch kontinuierlich verlaufen. Es können auch kleine Diskontinuitäten vorhanden sein, die aber keinesfalls Phasendifferenzen größer als 2π verursachen dürfen (s. Abb. 2.16).

Schließlich werden die abgewickelten Phasendifferenzen in Höhen umgewandelt und in einem Referenz-Koordinatensystem geokodiert.

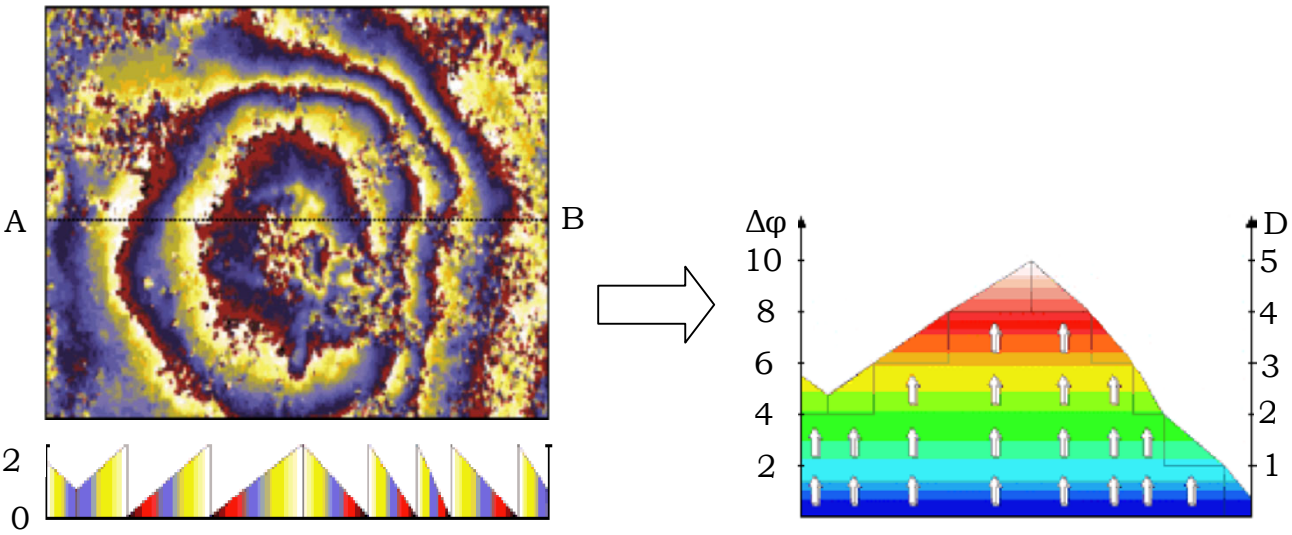


***Abb. 2.16**: Interferogramm und Phasenabwicklung (nach Renaudin, 2000).*

Diese Arbeit befasst sich besonders mit Daten, die von einem flugzeuggetragenen Laserscanner stammen. Dafür wird der Laserscanner-Technik sehr ausführlich im nächsten Kapitel (3.) beschrieben.

2.2.5.2.2 LIDAR

Von einem Flugzeug wird die Bodenoberfläche mit einem Laser abgetastet. Die Methode eignet sich für Datenerfassung bei größeren Gebieten, da der Messungsprozess vollautomatisch abläuft (mehr darüber in Kapitel 3). Die sehr hohe Erfassungsfrequenz (etwa 10-50 kHz) und ein großes Genauigkeitspotenzial (im cm Bereich) geben uns die Möglichkeit, ein sehr präzises und detailliertes DGM zu produzieren. Viele künstliche und natürliche Objekte, die sich auf der Geländeoberfläche befinden, verhindern aber die Bodenmessung. Der Laserstrahl wird über dem Gelände reflektiert, was die groben Fehler im Datensatz verursacht. Dafür wurden verschiedene Filtermethoden entwickelt, welche die Daten von groben Fehlern bereinigen (mehr darüber in Kapitel 4).

3 LASERSCANNING AUS DER LUFT

Beim Laserscanning aus der Luft handelt es sich um ein aktives, optomechanisches Verfahren der Höhendatengewinnung. Da es sich um ein optisches Äquivalent zu RADAR-Messungen handelt, stammt aus dem englischen Sprachraum ein Terminus LIDAR (Light detection and ranging. Ein anderer Terminus lautet LADAR (Laser detection and ranging) (Wehr & Lohr 1999). Er ist von der Tatsache geprägt, dass Laserstrahl als Messsignal benutzt wird. Doch der Terminus LIDAR ist weltweit eingebürgert; er wird auch in dieser Arbeit benutzt.

3.1 Technik des Laserscannings

Ein Laserstrahl wird von einem flugzeuggetragenen Laserscanner zum Boden ausgesendet und der reflektierte Anteil des Laserstrahls wird registriert. Dieses Prinzip wird, je nach dem Methode der Distanzmessung, auf zwei verschiedene Arten realisiert, und zwar: mittels des Puls-Laufzeit-Verfahrens und des Phasenvergleichsverfahrens. Das Puls-Laufzeit-Verfahren wird gegenwärtig fast ausschließlich angewandt.

***Abb. 3.1**: Prinzip des Laserscannings.*

3.1.1 Mathematisches Modell der Punktbestimmung

Das Laserscanning ermöglicht eine direkte Gewinnung der 3D-Koordinaten (Raumkoordinaten) des Punktes, der an der Geländeoberfläche oder an anderen Objekten liegt und der beim Scannen von Sensor aus optisch zugänglich ist. Die Punktbestimmung geht nach der Polarmethode. Dafür muss man die Raumposition des Poles des Scanners, sowie den räumlichen Vektor vom Sensor zum gemessenen Punkt wissen (s. Abb. 3.2).

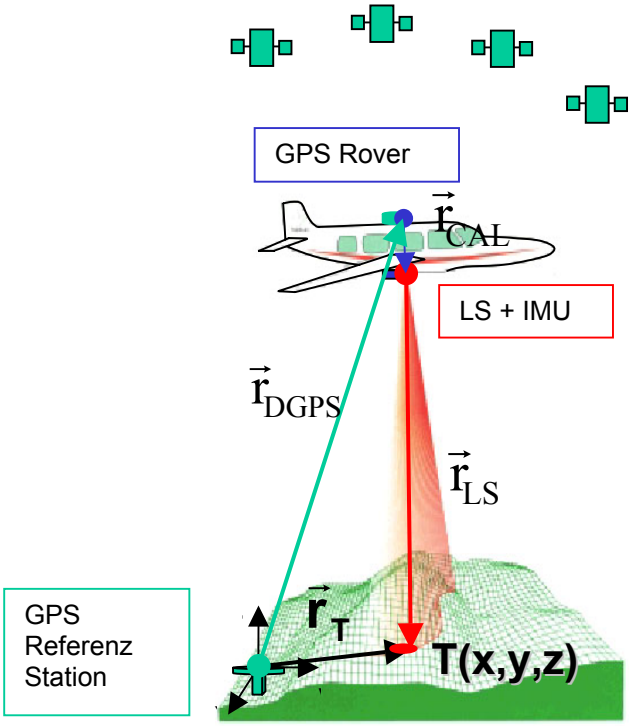


***Abb. 3.2**: Prinzip der Punktbestimmung beim Laserscanning.*

Die o.g. Beziehungen lassen sich auch exakt mathematisch formulieren:

$$\vec{r}_T = \vec{r}_{DGPS} + \vec{r}_{CAL} + \vec{r}_{LS} \qquad (3.1\text{-}1)$$

Die Raumposition des Pols im übergeordneten Koordinatensystem (X, Y, Z) wird nach der differentiellen GPS-Methode (DGPS) bestimmt (s. Abb. 3.2). Der Scanner bestimmt die Winkelkomponente (β) des o.g. Vektors in Beziehung zur Referenzachse des Scanners (x,y,z). Gleichzeitig misst das Trägheits-Navigationssystem die Winkelkomponenten (ω,φ,κ) der Referenzachse des Scanners; es werden die kleinen Änderungen der äußeren Orientierung der Referenzachse registriert. Die Entfernung D zu dem gemessenen Punkt wird durch den Laser-Distanzmesser ermittelt (s. Abb. 3.3).

Unter der Voraussetzung, dass der Scanner das Gelände nur quer zum Flug abtastet, gelten folgende Beziehungen:

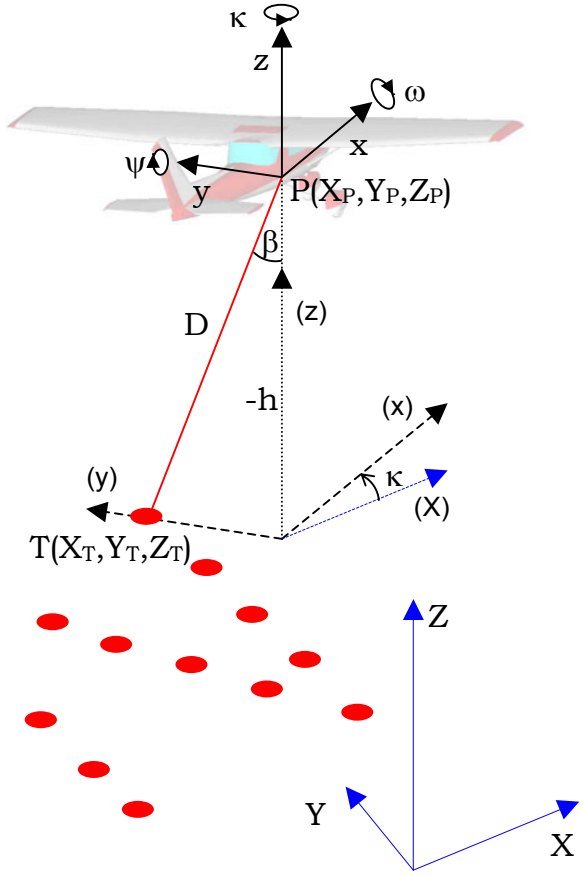


***Abb. 3.3**: Bestimmen der räumlichen Koordinaten.*

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} D\cos(\beta+\omega)\sin\psi \\ D\sin(\beta+\omega)\cos\psi \\ -D\cos(\beta+\omega)\cos\psi \end{bmatrix} \qquad (3.1\text{-}2)$$

Die Nadirachse des Laserscanners ist beim Flug durch eine Kreiselstabilisierte Plattform stabilisiert. Damit sind die Abweichungen von der Nadirachse in Flugrichtung (ψ) und quer zu Flugrichtung (ω) sehr klein, aber nicht vernachlässigbar. Obige Formeln lassen sich vereinfachen:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} D\psi\cos\beta \\ D\sin\beta + D\omega\cos\beta \\ -D\cos\beta + D\omega\sin\beta \end{bmatrix} \qquad (3.1\text{-}3)$$

Die Winkel ψ und ω sind in Bogenmaß (radians) eingeführt. Das lokale xyz-Koordinatensystem ist zum übergeordneten Referenzkoordinatensystem um die Lage des Scanningpols $\mathbf{X_P}$ versetzt und noch um die Z-Achse mit dem Winkel κ gedreht (mit Hilfe von Rotationsmatrix **R** definiert). Damit bekommt man endlich:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X_P} + \mathbf{R}\mathbf{x} \qquad (3.1\text{-}4)$$

wobei sind:

X – Vektor des abgetasteten Punktes T im Referenzkoordinatensystem
$\mathbf{X_p}$ – Vektor des Scanningpols im Moment des Abtastens des Punktes T
x – Vektor des abgetasteten Punktes T im Koordinatensystem des Scanners

R – Rotationsmatrix $\quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\kappa & \sin\kappa & 0 \\ -\sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

3.1.2 Konstruktion des Laserscanning-Systems

Die Laserscanning-Ausrüstung umfasst die folgenden drei Grundkomponenten:

- GPS
- IMU
- Laserscanner

3.1.2.1 GPS-Komponente

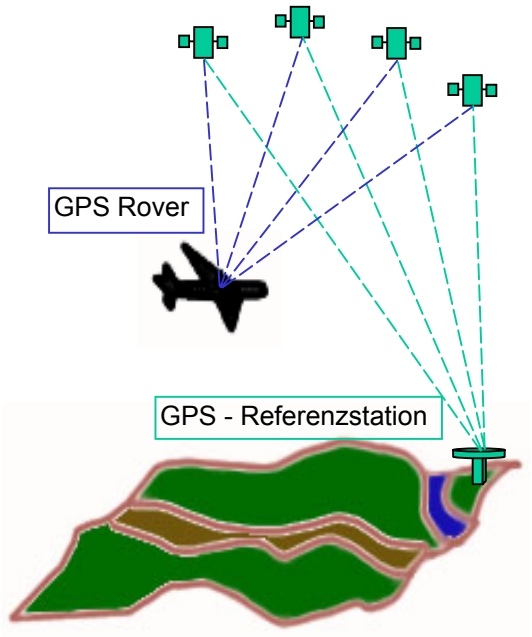


***Abb. 3.4**: DGPS beim Laser-Scannen.*

Um möglichst genaue Ergebnisse zu erzielen, benutzt man die differentielle GPS-Methode mit Nachbearbeitung (Postprocessing). Dafür werden, neben der GPS-Anlage im Flugzeug, auch die GPS-Referenzstationen benötigt, die sich im Gebiet befinden, das zu vermessen ist oder in seiner Nähe. Die Antenne des GPS-Rovers wird konstruktiv an das Dach des Flugzeugs angebracht, um möglich viele Satelliten störungsfrei beobachten zu können. Die relative Position des Phasenzentrums der Antenne des Rovers zum Pol des Scanners wird durch einen Kalibrierungsprozess bestimmt, der vor der Mission durchgeführt wird. Für die Laserscanner-Anwendungen eignen sich nur die GPS-Geräte, die sehr hohes Genauigkeitspotenzial (i.d.R. Zweifrequenz-GPS-Geräte) und eine hohe Datengewinnungsrate besitzen.

3.1.2.2 Die IMU-Komponente

Diese Komponente ermöglicht die Punkteverdichtung entlang der räumlichen Flugbahn des Flugzeugs zwischen benachbarten GPS-Messungen. Die Häufigkeit der DGPS-Koordinatenbestimmungen beträgt bei derzeitigen Geräten ungefähr 1s. Bei einer durchgeschnittliche Fluggeschwindigkeit von 170... 300 km/h wird das Flugzeug einen Weg von 47 bis 84m überfliegen. Bei so langen Intervallen lässt sich die Flugbahn nicht mit befriedigender Genauigkeit dazwischeninterpolieren. Die Trägheitsplattform des Laserscanners ist mit drei Freiheitsgraden kardanisch aufgehängt. Beim Flug werden die Beschleunigungsmomente für alle drei räumlichen Achsen mit einer Häufigkeit von 200Hz gemessen. Durch die 2-fache Integration der Beschleunigungsmomente in allen drei Koordinatenrichtungen werden die räumlichen Komponenten der Flugbahn bestimmt. Die gegenwärtigen Trägheits-Navigationssysteme (IMU) ermöglichen die Bestimmung der Flugbahn mit Genauigkeiten im cm-Bereich.

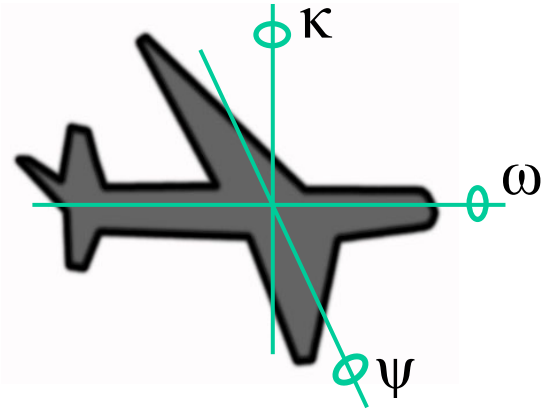


Abb. 3.5: Winkelkomponenten der IMU.

Ein Nachteil des Trägheits-Navigationssystems ist jedoch seine große Drift, d.h. auch im Ruhezustand werden Beschleunigungsmomente vom Sensor aufgezeigt. Durch die vorliegenden präzisen GPS-Positionen kann dieser Fehler jedoch nahezu eliminiert werden. Weiterhin wird die Trägheitsplattform für die Stabilisierung der Nadirrichtung benötigt. Diese Stabilisierung erfolgt mit einer Genauigkeit von ca. 0.2mrad, was bei einer Flughöhe von 1000m zu einem Lagefehler von ca. 20cm auf der Erdoberfläche führt (Knorr 2003).

3.1.2.3 Die Laser-Scanner Komponente

Die Distanz zwischen Sensor und gemessenen Punkt erfolgt über Laserimpulse, deren Laufzeit bis zum Empfang des reflektierten Signals gemessen wird. Die Laserscanner-Komponente besteht aus:

- einem gepulsten Laser, dessen Pulsrate variabel eingestellt werden kann
- einem Sendeteil mit variabel einstellbarer Strahlablenkung
- einem Empfangsteil mit Laufzeitmessung

Der gepulste Laser besitzt vorwiegend eine große Sendeleistung, eine genaue Ausrichtung und Kohärenz der ausgesendeten Strahlung. Meistens kommt der Nd:YAG Festkörperlaser zum Einsatz.

3.1.2.3.1 Prinzip des Nd:YAG Lasers

Das laseraktive Material besteht aus Neodym^{3+} -Ionen, die in einen transparenten Wirtskristall (YAG - Yttrium-Aluminium-Granat $Y_3Al_5O_{12}$) eingebetet sind, wobei etwa 1% der Y^{3+} Ionen durch Nd^{3+} ersetzt werden (URL 1). Das Neodym besitzt ein ideales Vierniveausystem (s. Abb. 3.6). Das optische Pumpen regt die Neodym-Ionen an, und überführt sie vom Grundzustand $^4I_{9/2}$ zum oberen Pumpniveau $^4F_{5/2}$. Vom dort relaxieren die Nd^{3+} -Ionen sehr schnell in das Laserausgangsniveau $^4F_{3/2}$. Dieser Energiezustand ist, wegen verbotener elektrischer Dipolwechselwirkung, metastabil und die Nd^{3+} -Ionen gehen zum niedrigeren Energieniveau $^4I_{11/2}$ über, welches im thermischen Gleichzustand fast unbesetzt ist. Damit entsteht die Strahlung mit Wellenlänge λ=1064nm. Von hier aus relaxieren die Nd^{3+} -Ionen wieder in den Grundzustand $^4I_{9/2}$, bis der Pumpprozess von neuem beginnt (URL 2).

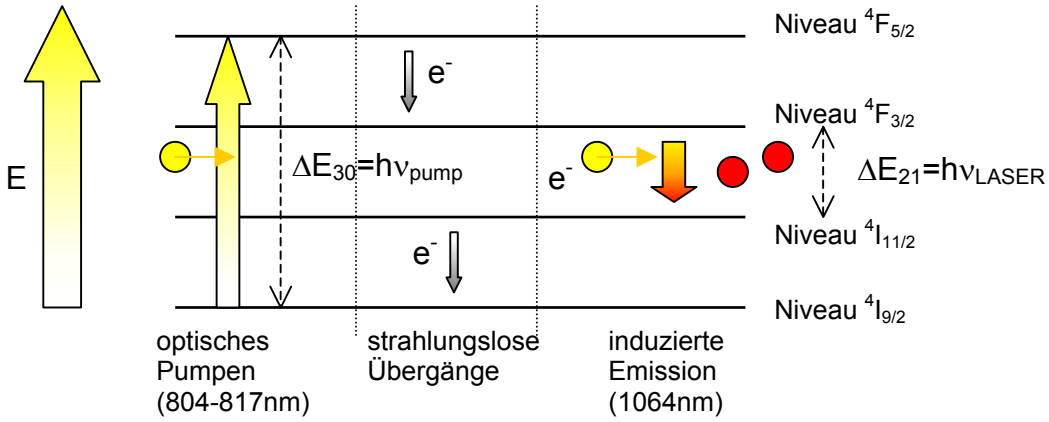


***Abb. 3.6**: Prinzip des Nd:YAG Lasers.*

Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der induzierten Emission wird durch Rückkopplung der spontanen Emission aus dem aktiven Medium beachtlich erhöht. Dafür dient ein optischer Resonator. Der optische Resonator setzt sich aus zwei Reflexionsflächen zusammen, dem End- und Auskoppelspiegel, die quer zu optischer Achse gesetzt sind (s. Abb. 3.7). Zwischen diesen Flächen wird durch äußere Anregung das laseraktive Medium zum Emmitieren von Lichtquanten gezwungen. Sie reflektieren sich parallel zur optischen Achse an den Reflexionsflächen des Resonators und regen andere Atome des Mediums zur Aussendung von weiteren Lichtquanten an. So entsteht eine lawinenartige Vervielfältigung im Resonator und bei ausreichender Intensität tritt dann der Laserstrahl am Auskoppelspiegel aus.

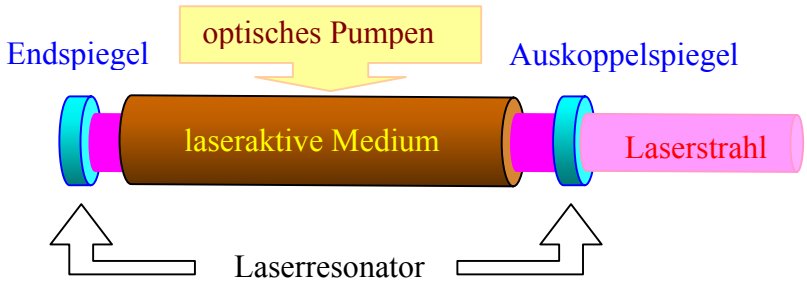


***Abb. 3.7**: Prinzip des Laserresonators.*

Die ersten topographischen LIDAR-Laser wurden meist mit Entladungslampen optisch gepumpt, da es damals der einzige Weg war, um die große Laser-Ausgangsleistung zu erzielen (Impulsspitzenleistung geht bis zu 2MW - für topographische Anwendungen) (Wehr, Lohr 1999). Der wichtigste Nachteil eines solchen Systems ist sein sehr geringer Wirkungsgrad beim Setzen des gepumpten Lichtes um die Laserstrahlung, die in der Größenordnung von 1-2% liegt. Der restliche Anteil fällt als Wärme an, die über aufwendige Kühlsysteme abgeführt

werden muss. Die wichtigste Ursache dieser großen Energieverschwendung liegt in der Tatsache, dass die Energie der Entladungslampe über ein großes Lichtspektrum verteilt ist und der Nd:YAG-Kristall kann nur in mehreren schmalen Absorptionsbändern Pumplicht aufnehmen. Die Entdeckung der Dioden-Laser haben o.g. Nachteil beseitigt, denn sie emittieren intensive Laserstrahlung in einem engen Spektralbereich (wenigen Nanometer), der sehr gut in das Absorptionsband des Nd:YAG-Kristalls passt. Damit wurde der Wirkungsgrad auf 50 bis zu 80 % erhöht (URL 2). Die gegenwärtigen LIDAR-Laser sind fast ausschließlich mit Hilfe von Diodenlaser gepumpt.

Die Laserstrahlung wird durch die Austrittoptik so geformt, dass die Divergenz des Strahles zwischen 0.3-2 mrad beträgt (Wehr & Lohr 1999). Der Strahl beleuchtet ein getroffenes Objekt flächendeckend, damit dringt sie bei kleineren Objekten (Äste, die Blätter von Bäumen) bis zum Boden durch.

3.1.2.3.2 Scanning-Mechanismus

Der Scanning-Mechanismus lenkt der Laserstrahl von der Nadirrichtung so ab, dass eine flächendeckende Abtastung des gemessenen Gebietes möglich wird. Es sind mehrere Konstruktionen von Scanning-Mechanismen vorhanden, die das Gelände in verschiedenen Mustern abtasten.

Die häufigst verwendeten Konstruktionen für flugzeuggetragene Laserscanner sind:

- Scanner mit dem schwingenden Spiegel
- Scanner mit dem rotierenden Prisma
- Fiber-Scanner
- Palmer Scanner

Beim Scanner mit dem schwingenden Spiegel befindet sich ein Spiegel im Weg des Laserstrahles. Dieser Spiegel pendelt um die Achse, die in Flugrichtung liegt und die der Laserstrahl nach unten, quer zur Flugrichtung ablenkt (s. Abb. 3.8).

Der Spiegel braucht nicht um den ganzen Winkel θ pendeln, sondern nur um die Hälfte, wegen des bekannten Reflexionsgesetzes („Eintritt- und Austrittwinkel zur Reflexionsflächennormalen sind gleich“).

Das Abtasten geht in beide Richtungen. Die Scanfrequenz kann nicht hoch sein, weil die relativ große Masse des Spiegels zur Pendelbewegung gebracht werden muss.

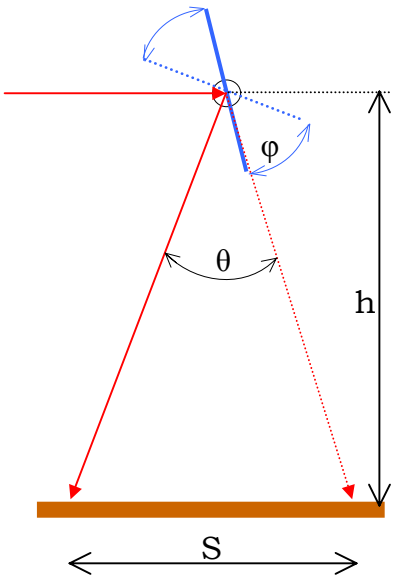


***Abb. 3.8**: Prinzip des Scanning-Mechanismus mit dem schwingenden Spiegel.*

Die Streifenbreite (s. Abb. 3.8 SW – Swathwidth) hängt von der maximalen Ablenkung des Laserstrahles (θ), sowie von der relativen Flughöhe (h) ab.

$$SW = 2h\tan(\frac{\theta}{2}) \qquad (3.1\text{-}5)$$

Die Punkteanzahl (N) in einer Scannerperiode ist gleich der Häufigkeit der Laserimpulse (F) gebrochen durch Scannerfrequenz (f_{SC}). Formal geschrieben:

$$N = F / f_{SC} \qquad (3.1\text{-}6)$$

Die Entfernung der Punkte in Flugrichtung (L_P), die eine gleiche Scannerphase besitzen, hängt nur von Fluggeschwindigkeit (v) und Scannerfrequenz (f_{SC}) ab:

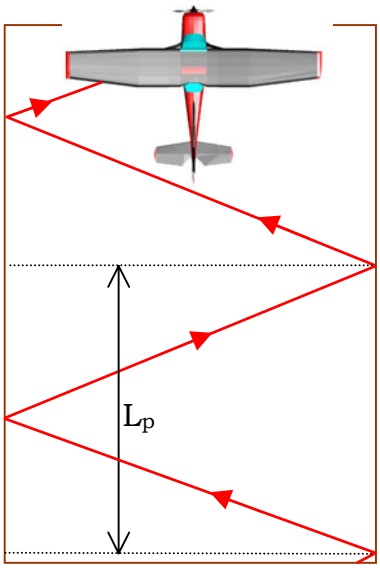


***Abb. 3.9**: Geometrie des Laserscannings mit dem schwingenden Spiegel.*

$$L_P = \frac{v}{f_{SC}} \qquad (3.1\text{-}7)$$

Die durchschnittliche Entfernung der gemessenen Punkte quer zu Flugrichtung beträgt:

$$Q_P = 2\frac{SW}{N} \qquad (3.1\text{-}8)$$

Ein weiterer Nachteil eines solchen Scanners ist die Winkelgeschwindigkeit des Spiegels, die nicht konstant während der ganzen Scannerperiode gehalten werden kann.

Die Bewegung ändert die Winkelgeschwindigkeit und ihre Richtung (Vorzeichen) zweimal in einer Pendelperiode. Vor dem maximalen Ausschlag wird der Spiegel verlangsamt und gestoppt. Dann wechselt er der Richtung seiner Bewegung und beschleunigt wieder, bis die nominale Winkelgeschwindigkeit wieder erreicht ist. Dieser Vorgang verringert die Lagegenauigkeit, besonders in der Nähe der Streifenränder.

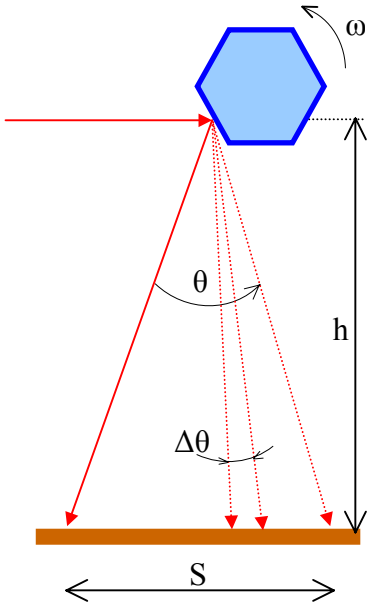


***Abb. 3.10**: Prinzip des Laserscannings mit dem rotierenden Prisma.*

Die Veränderungen der Winkelgeschwindigkeiten des Spiegels lassen sich bei der Nachbearbeitung berücksichtigen, teilweise auch durch Entfernungen von Punkte aus dem Datenbestand.

Der o.g. Nachteil kann behoben werden, wenn anstelle eines swingenden Spiegels ein rotierendes Prisma verwendet wird (s. Abb. 3.10). Die Winkelgeschwindigkeit (ω) der rotierenden Reflexionsfläche während der Abtastung ist konstant. Die Trägheit des rotierenden Prismas hat keine negative Auswirkung auf das Scannen. Das Prisma hat k reflektierende Flächen, somit können hohe Scanningfrequenzen erreicht werden:

$$f_{SC} = k\frac{\omega}{2\pi} \qquad (3.1\text{-}9)$$

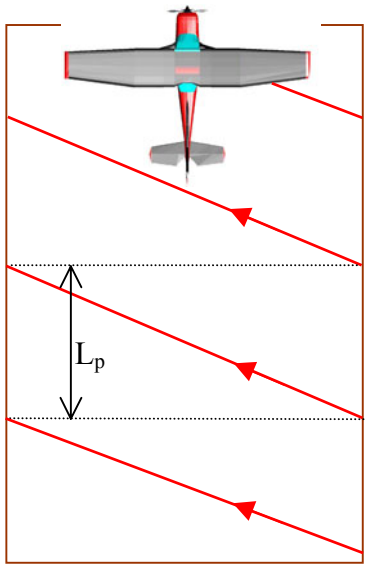


***Abb. 3.11**: Geometrie des Laserscannings mit dem rotierenden Prisma.*

Das Gelände wird nur in einer Richtung abgetastet (s. Abb. 3.11). Deswegen sind einige systematische Einflüsse schwer erkennbar; Kontrollmessungen im Gelände lassen sich kaum vermeiden. Die Streifengrenzen sind nicht exakt durch die Konstruktion des Scanning-Mechanismus definiert, sondern sie hängen von der Neigung der Reflexionsfläche zum Laserstrahl ab, und zwar im Moment der Sendung des Laserimpulses. Für die Streifenbreite (SW) hat daher der Synchronisationsmechanismus eine entscheidende Rolle.

Der Winkelschritt (Δθ) beim Scanning hängt von der Winkelgeschwindigkeit des Prismas (ω) und der Häufigkeit des gesendeten Laserimpulses (F) ab:

$$\Delta\theta = 2\frac{\omega}{F} \qquad (3.1\text{-}10)$$

Die Ausdrücke für Streifenbreite (SW), Punkteanzahl per Scanningperiode (N) sowie die Entfernung zwischen den Punkten mit gleicher Scanningphase (L_P) sind gleich den oben angeführten Formeln. Es unterscheidet sich nur die durchschnittliche Punktentfernung (Q_P) quer zu Flugrichtung, denn in einer Scanningperiode wird die Streifenbreite nur einmal abgetastet:

$$Q_P = \frac{SW}{N} \qquad (3.1\text{-}11)$$

Der Fiberscanner lässt beliebige Abtastrichtungen innerhalb des Scannerwinkels für die Datenerfassung nicht zu. Nur diskrete Werte werden für das Abtasten benutzt, die durch lineare Anordnung von Glasfasern in der Fokalebene des Objektivs festgesetzt sind (s. Abb. 3.12).

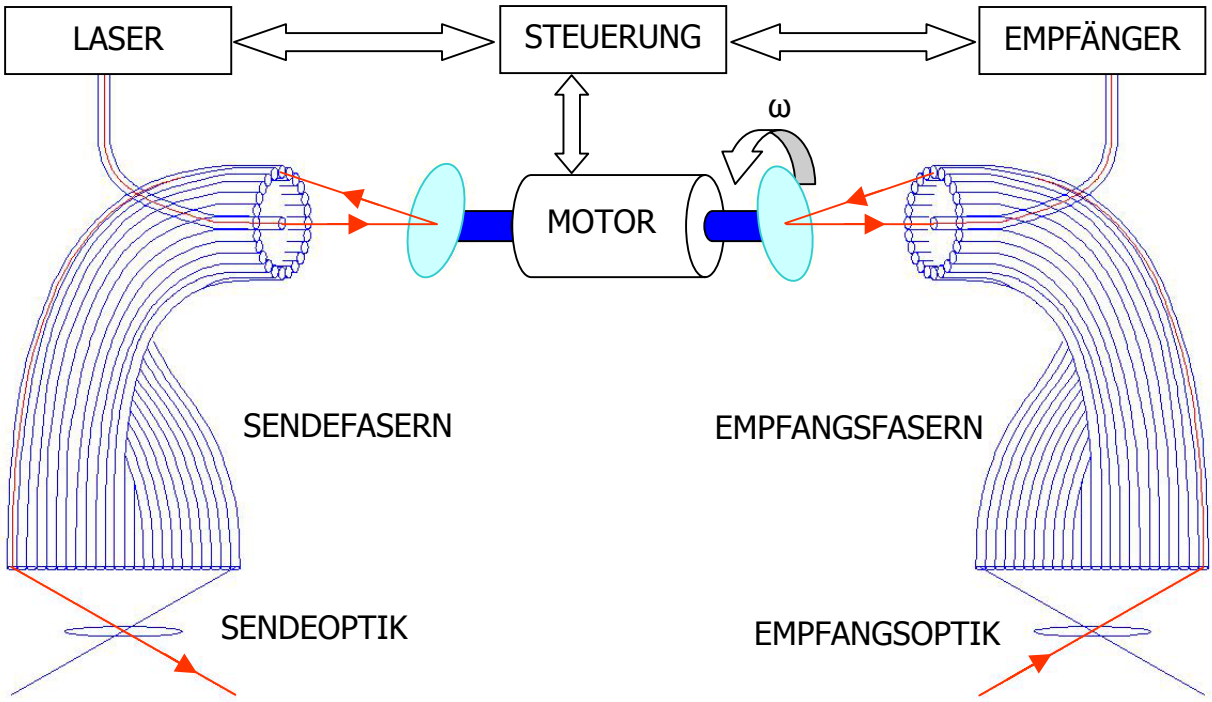


***Abb. 3.12**: Prinzip des Fiber-Scanners.*

Damit sind die Scanningrichtungen für jede Scanningperiode immer die gleichen sowie auch die Winkelschritte zwischen ihnen. Die Zeitsynchronisation zwischen Laser und Scanner hat keinen großen Einfluss auf die Lagebestimmung. Die Streifengrenzen sind durch den festen Abtastwinkel wohl bestimmt. Ein weiterer Vorteil von Fiberscannern ist die völlige Übereinstimmung von Sende- und Empfangsoptik. Die gleichen Fiberbüschel werden in der Fokalebene der Austritts- sowie Eintrittsoptik eingebaut. Zwei synchron rotierende Spiegel tasten die beiden Fiberbüschel synchron und sequentiell ab. Wegen der sehr kleinen Durchmesser der Glasfasern lässt sich auch der rotierende Spiegel ziemlich klein halten; deshalb können sehr hohe Scanningraten erzielt werden (bis zu 630Hz beim TopoSys Scanner).

Beim Toposys-Scanner beträgt der Blickwinkel (θ) 14°. Er ist durch Glasfasern auf 127 gleichmäßige Sektoren unterteilt. Somit beträgt der Winkelschritt (Δθ) 1.9 mrad. Diese Parameter sind für einen Scanner immer gleich; sie lassen sich nicht

durch variable Laserimpulsraten an die verschiedenen Projektanforderungen anpassen.

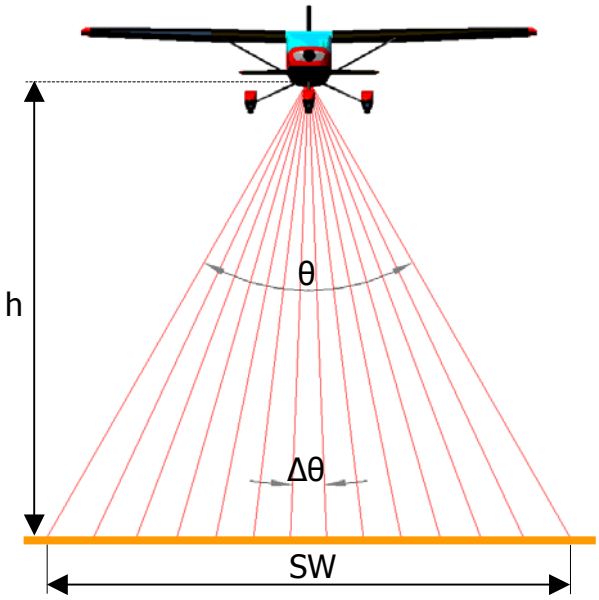


***Abb. 3.13**: Geometrie des Fiber-Scanners.*

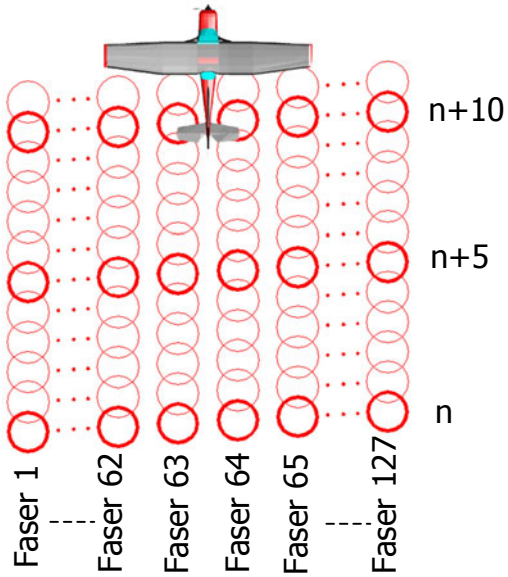


***Abb. 3.14**: Die Anordnung der gemessenen Bodenpunkte.*

Der Scanner tastet das Gelände in einer Richtung ab. Dafür gelten die gleichen mathematischen Ausdrücke für die Anordnung der gemessenen Bodenpunkte, wie für Scanner mit rotierendem Prisma. Der Unterschied liegt nur in der Punkteanzahl (N) in einer Scanperiode, die immer den gleichen Wert hat für denselben Scanner die gleiche Werte hat (N=128 für TOPOSYS Scanner der 1. Generation).

Für die Streifenbreite (SW), den Winkelschritt zwischen benachbarten Strahlen (Δθ), die Punktentfernung in Flugrichtung (L_P) sowie für durchschnittliche Punktentfernung quer zur Flugrichtung (Q_P) gelten folgende Ausdrücke:

$$SW = 2h\tan(\frac{\theta}{2}), \qquad \Delta\Theta = \frac{\Theta}{N-1}, \quad L_P = \frac{v}{f_{SC}}, \qquad Q_P = \frac{SW}{N-1} \tag{3.1-12}$$

Dabei sind:
N = Anzahl der Fiberelemente im Scanning-Mechanismus
h = relative Flughöhe über das Gelände
v - Fluggeschwindigkeit
f_{SC} - Scanningfrequenz

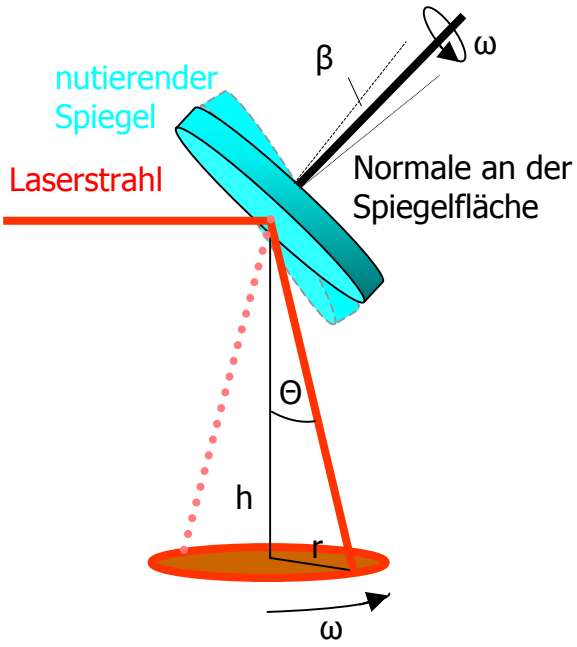


***Abb. 3.15**: Prinzip des Palmer – Scanner.*

Ein anderes, ganz besonderes, Abtastmuster bietet der Palmer'sche Scanner an. Der Scanning-Mechanismus wird vor die Laserentfernungseinheit gesetzt und lenkt den gesendeten sowie den empfangenen Laserstrahl vom Nadir so ab, dass alle Laserstrahlen einer Scanningperiode einen Kegel mit Spitze im Pol des Scanners bilden (s. Abb. 3.15).

Nimmt man ein horizontales und ebenes Gelände an und liegt die Rotationsachse des Spiegels in einer vertikalen Ebene unter dem Winkel von 45° zum Nadir, so bekommt man ein kreisförmiges Abtastmuster. Dann gelten folgende einfache Beziehungen:

$$\Theta = 2\beta \qquad r = h \cdot \tan\Theta$$

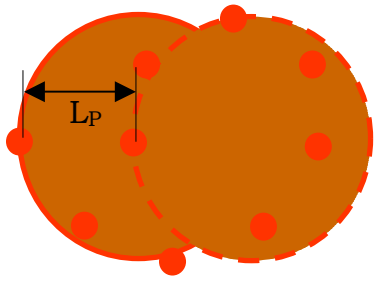
Streifenbreite: $SW = 2r$

Anzahl der Punkte pro Scanperiode: $N = \frac{2\pi}{\omega} F$, *(3.1-15)*

wobei F die Häufigkeit der gesendeten Laserimpulse ist.

Bogenentfernung zwischen benachbarten Punkten (keine Flugzeugbewegung vorausgesetzt): $L_B = \frac{2r\pi}{N} \Rightarrow L_B = \frac{r\omega}{F}$ *(3.1-16)*

Eine flächendeckende, streifenförmige Bedeckung wird durch Vorwärtsbewegung des Flugzeugs erreicht. Somit werden die Messpunkte in Form einer vorwärtsschreitenden Ellipse aufgezeichnet.



Die Entfernung der Punkte in Flugrichtung, die eine gleiche Scanningphase besitzen, ist:

$$L_P = \frac{2\pi}{\omega} v \qquad \textit{(3.1-17)}$$

***Abb. 3.16**: Verteilung der abgetasteten Punkte in einer Scanperiode.*

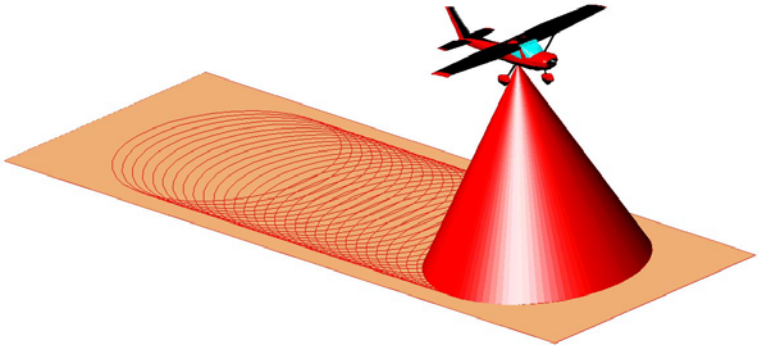


***Abb. 3.17**: Abtastmuster beim Palmer – Scanner.*

Das Abtastmuster führt zu gewissen Redundanzen in den gemessenen Daten, denn das Interessensgebiet wird mindestens zweimal in einem Durchgang abgetastet (s. Abb. 3.17). Diese Redundanz wird vorteilhaft für Kalibrierung des Systems sowie zur Genauigkeitssteigerung ausgenutzt.

3.1.2.3.3 Der Sensor

Beim Laserscanning aus der Luft wird ein gepulster Laserstrahl zum Boden gesandt und wird am Boden oder an den anderen früher getroffenen Objekten (Gebäude, Vegetation, ..) gestreut. Das Streulicht wird dabei in allen Richtungen gelenkt und nur ein kleiner Teil wird wieder in Rückwärtsrichtung reflektiert. Das Quantum der ankommenden Energie hängt, neben der Intensität der ausgestrahlten Energie, auch vom Abtastwinkel und Reflexionsvermögen der getroffenen Objekte ab (s. Tab. 3.1).

***Tabelle 3.1:** Typisches Reflexionsvermögen der verschiedenen Materialen bei diffuser Reflexion, für die Wellenlänge von 900nm (nach dem URL 3)*

Material	Reflexivität
Weißes Papier	bis zu 100%
Schnee	80-90%
weiße Wand	85%
Kalkstein, Tonerde	bis zu 75%
Laubwald	typ. 60%
Nadelwald	typ. 30%
Kohlensand (Carbonate Sand) - trocken	57%
Kohlensand (Carbonate Sand) - nass	41%
der Sand des Ufers, des Wüsten	typ. 50%
Betonfläche - geglättet	24%
Asphalt mit Kieselstein (Straßenbelag)	17%
Lava	8%
das schwarze Neopren (synthetische Kautschuk)	5%
das gekräuselte Wasser	20%

Die obige Tabelle zeigt, dass die dunklen Oberflächen, wie frischer (schwarzer) Asphalt oder dunkelgraue Schieferdächer, den Laserstrahl sehr stark absorbieren. Dann ist an den Sensor züruckgeworfene Strahlung meistens zu schwach, und die Neupunkte können nicht registriert werden. Bei Wasserflächen im ruhigen Zustand wird der Laserstrahl total reflektiert. In diesem Fall ist die Datenerfassung nur in einem Scanbereich von ±3°, im Bezug zu Nadirachse möglich. Die gekräuselte Wasseroberfläche lässt sich mit voller Laserscanner-Blicköffnung erfassen, weil der Laserstrahl diffus reflektiert wird (URL 13).

Die vom getroffenen Objekt reflektierte elektromagnetische Strahlung kommt zum Sensor und wird dort zum elektrischen Signal umgewandelt. In den gegenwärtigen Laserscanneranlagen kommen zwei verschiedene Arten von Detektoren zum Einsatz, entweder die Photomultiplikatoren (Photomultiplier Tube - PMT) oder die Avalanche-Photodioden (Photodioden mit Lawineneffekt) (s. Abb. 3.18). Die Photodioden haben, im Vergleich zu Photomultiplikatoren, folgende Merkmale, die für Einsätze im Laserscanner wichtig sind (URL 4):

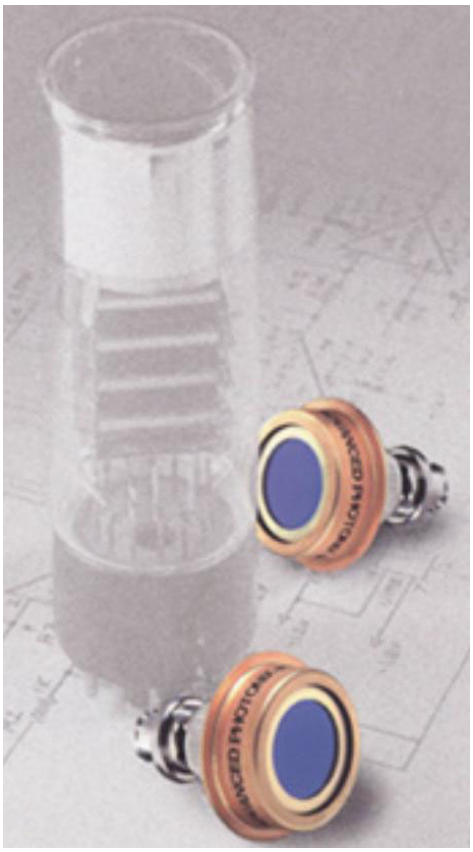


***Abb. 3.18**: Das Photomultiplikator-Rohr und zwei Avalanche-Photodioden (nach URL 4).*

Vorteile:

- hohe Effizienz
- kurze Anstiegszeit
- breite Frequenzbereiche mit linearer Übertragungscharakteristik
- klein, robust
- kleiner Energieverbrauch sowie kleine Arbeitsspannung

Nachteile:

- kleine innere Verstärkerung (typisch 300)
- begrenzte Detektionsvermögen bei Strahlung von kleinen Intensitäten (nicht anwendbar für "photon counting")

Die o.g. Vorteile prädestinieren die Avalanche-Photodioden als Detektoren in gegenwärtigen Laserscannern. Nach der Erfindung der s.g. "Photon count"-Detektionstechnik, welche die Detektion von sehr kleinen Strahlungsintensitäten ermöglicht, kommen die Photomultiplikatoren wieder zum Einsatz wegen ihrer großen inneren Verstärkerung und ihren Detektionsvermögen von sehr kleinen Strahlungsintensitäten (bis zu einzelnen Photonen). Mehr über die Photon-counting Technologie findet man in (Degnan et. al. 2001 und URL5).

3.2 Fehlerquellen des Laserscannings

Die Genauigkeit der gemessenen Koordinaten wird durch verschiedene Fehlerquellen verschlechtert. Jede Komponente, die am Messprozess teilnimmt, beeinflusst die Genauigkeit des Endergebnisses.
Folgende Fehlerquellen sind zu unterscheiden:

- der Distanzmessung
- die Lagebestimmung
- Richtungsbestimmung des Laserstrahls
- Zeitsynchronisierung

3.2.1 Die Genauigkeit der Distanzmessung

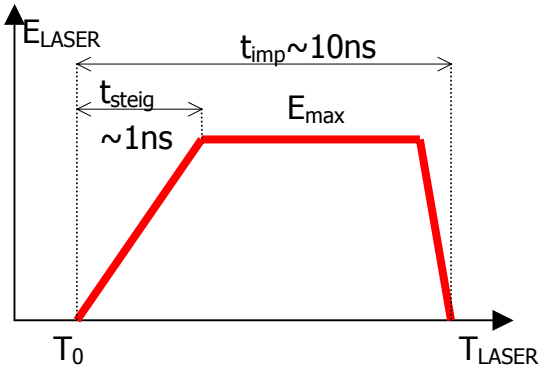


***Abb. 3.19**: Idealisierte Form des gesendeten Laserpulses.*

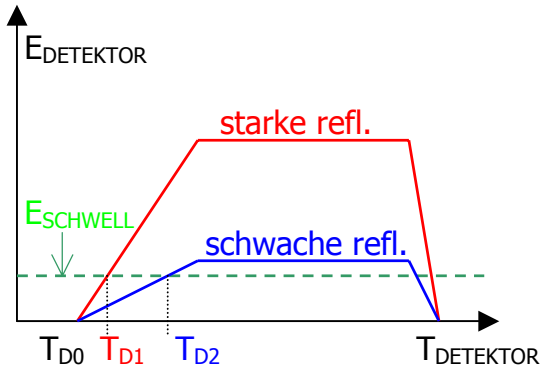


***Abb. 3.20**: Der Einfluss des Signalpegels am Zeitkomparator auf die Entfernung.*

Der systematische Einfluss des Distanzmessers auf die gemessenen Koordinaten enthält neben dem inneren instrumentalen Einfluss noch äußere Einflüsse. Zum inneren Einfluss tragen die Übertragungscharakteristik der Sender und Empfänger bei. Die äußeren Einflüsse hängen vom Reflexionsvermögen des Geländes ab.

Der Sender strahlt einen Laserimpuls aus, der üblicherweise 10ns dauert. Dabei wird die volle Leistung nicht sofort erreicht, sondern etwa nach 1ns (s. Abb. 3.19). Dieser Anstiegszeit (rise-time) entspricht einer Laufweite des Laserstrahls von ca. 30cm, also einer Entfernung von 15cm. Der Empfänger detektiert die reflektierte Laserstrahlung erst dann, wenn die empfangene Energie den Schwellwert des Detektors überschritten hat. Damit hängt die Zeitdifferenz zwischen Aussendung und Empfangung des Messsignals nicht nur von Entfernung (T_{D0}-T_0 in Abb. 3.20), sondern auch von Reflexionseigenschaften des gemessenen Objektes ab ($T_{D1} – T_0$ oder $T_{D2} – T_0$ in Abb. 3.20).

Wenn ein Objekt gut reflektiert, braucht es nicht mit voller Leistung bestrahlt zu werden. Damit ist für relativ glatte Oberflächen wie z.B. Straßen, eine Genauigkeit von ca. 10-15% der Anstiegszeit des Laserimpulses zu erwarten ($T_{D1} - T_{D0}$ in Abb. 3.20). Für eine Dauer von 1ns beträgt also die Genauigkeit zwischen 1.5cm und 2.25cm. Schwaches Reflexionsvermögen verzögert die Reaktion des Detektors, was die Genauigkeit verschlechtert ($T_{D2} - T_{D0}$ in Abb. 3.20).

Um diese Fehlerquelle zu vermeiden, wird das empfangene Signal vor dem Zeitkomparator verstärkt bis alle empfangenen Impulse den gleichen Spitzenpegel haben.

Der Einfluss der Anstiegszeit wegen Struktur des getroffenen Objektes und Neigung der Reflexionsfläche verbleibt in voller Größe (s. Abb. 3.21). Wird die vertikale Richtung des Laserstrahls vorausgesetzt, beträgt die Zeitverzögerung des Impulsanstieges wegen Geländeneigung, unter Beachtung, dass der Laserstrahl zweimal die Strecke hγ*tan(i) durchläuft:

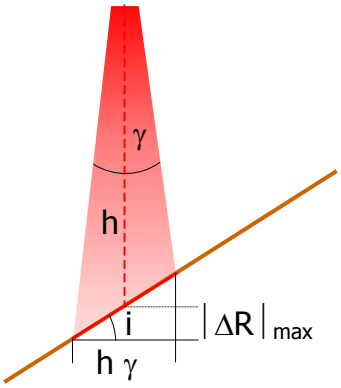


***Abb. 3.21**: Der Einfluss der Gelandeneigung an der gemessenen Distanz (Nach Baltsavias 1999).*

$$\Delta t_{steig} = 2\, h\, \gamma\, |\tan(i)| / c \qquad (3.2\text{-}1)$$

Dabei sind:
h – Entfernung zwischen Detektor und Reflexionsfläche
γ - Divergenz des Laserstrahles
i – Geländeneigung
c - Lichtgeschwindigkeit

Damit beträgt der größte Distanzfehler nur ein viertel von $\Delta t_{steig} * c$, also:

$$|\Delta R|_{max} = h\gamma\, |\tan(i)| / 2 \qquad (3.2\text{-}2)$$

Ein weiterer Faktor ist das Auflösungsvermögen des Zeitkomparators, das üblicherweise zwischen 0.05 und 2ns liegt. Für einen Wert von 0.1ns ergibt sich eine Entfernungsauflösung von 1.5cm (Schäffer 1999).

Einfluss eines Distanzfehlers auf die Raumkoordinaten des gemessenen Punktes:

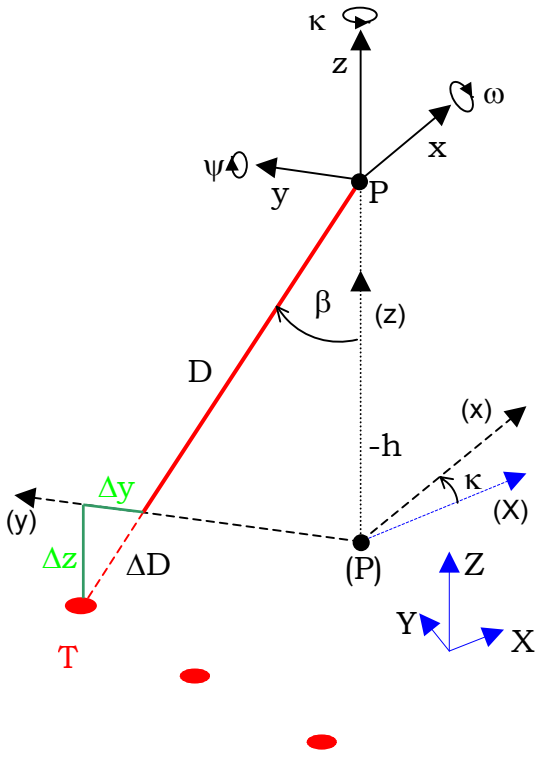


***Abb. 3.22**: Einfluss des Entfernungsfehlers ΔD*

Wir setzen voraus, dass der Scanner seinen Laserstrahl quer zu Flugrichtung ablenkt. Dann wirkt der Distanzfehler ΔD nur in der yz-Ebene (s. Abb. 3.22) entsprechend der folgenden Formeln:

$$\Delta x = 0; \quad \Delta y = \Delta D \sin\beta; \quad \Delta z = -\Delta D \cos\beta$$

Die Einflüsse in übergeordnetem Koordinatesystem sind dann:

$$\begin{aligned} \Delta X &= -\Delta D \sin(\beta)\sin(\kappa) \\ \Delta Y &= \Delta D \sin(\beta)\cos(\kappa) \\ \Delta Z &= -\Delta D \cos(\beta) \end{aligned} \qquad (3.2\text{-}3)$$

3.2.2 Die Genauigkeit der Lagebestimmung

Die Lage des Laserscanners während des Abtastens des Geländes wird durch GPS und IMU bestimmt. Die daraus gewonnenen Raumkoordinaten sollten sich auf den Pol des Laserscanners beziehen. Die relative Lage des Phasenzentrums der GPS-Antenne zum Koordinatenursprung des IMUs sowie relative Lage des IMUs zum Pol des Scanners werden durch Kalibrierungsverfahren bestimmt. Somit sind die genauigkeitshemmenden Einflusse: Konstellation der GPS-Satelliten während des Fluges; Anzahl und Anordnung der GPS-Referenzstationen und Qualität der Kalibration.

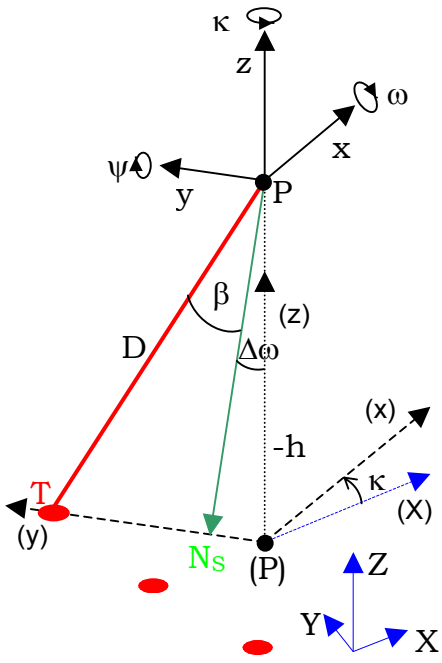
Weitere Parameter sind ionosphärische und troposphärische Einflüsse auf die Signalausbreitung. Der Einfluss der Ionosphäre lässt sich mit Verwendung von Zweifrequenz-GPS-Empfängern bestimmen und durch Bilden von Differenzen aus den Messungen eliminieren. Grobe Fehler können auch die Mehrdeutigkeit der Pseudo-Strecken verursachen, besonders wenn der Signalempfang kurzfristig unterbrochen war (cycle-slip). Die Integration von IMU und GPS reduziert diese Fehlerquelle.

Die Genauigkeit der Lagebestimmung der Laserscanner-Pole liegt zwischen 5-15cm (Baltsavias 1999).

3.2.3 Die Genauigkeit der Richtungsbestimmung des Laserstrahles

Die Fehlerquellen für die Richtungsbestimmung lassen sich in zwei Teile unterteilen. Einerseits sind es Ungenauigkeiten der IMU. Andererseits sind es Ungenauigkeiten des Scanning-Mechanismus. Der Einfluss des Richtungsfehlers auf die Genauigkeit der bestimmten 3D-Koordinaten steigert sich mit relativer Flughöhe. Die Auswirkungen der einzelnen Komponenten auf die Raumkoordinaten des gemessenen Punktes werden etwas ausführliches diskutiert. Dabei wird ein flaches Gelände vorausgesetzt, das quer zur Flugrichtung gescannt ist. Dann gelten folgende Ausdrücke:

Einfluss Δω:



Der kleine Restwinkel um die x-Achse (im Flugrichtung) Δω, der ein IMU-Messfehler sein soll, verursacht eine Neigung der Nadirachse des Scanners N_S (s. Abb. 3.23). Damit werden die Raumkoordinaten des gemessenen Punktes (T) folgendermaßen beeinflusst:

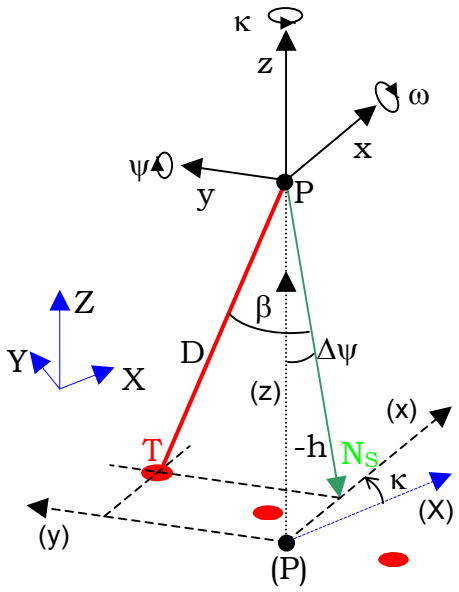
$$\Delta X = -h\frac{\sin(\beta+\Delta\omega)-\sin(\beta)}{\cos(\beta)}\sin(\kappa) \approx -h\sin(\kappa)\cdot\Delta\omega$$

$$\Delta Y = -h\frac{\sin(\beta+\Delta\omega)-\sin(\beta)}{\cos(\beta)}\cos(\kappa) \approx -h\cos(\kappa)\cdot\Delta\omega$$

$$\Delta Z = -h\left[\frac{\cos(\beta+\Delta\omega)}{\cos(\beta)}-1\right] \approx -h\tan(\beta)\cdot\Delta\omega \qquad (3.2\text{-}4)$$

***Abb. 3.23**: Einfluss Δω*

Einfluss Δψ:

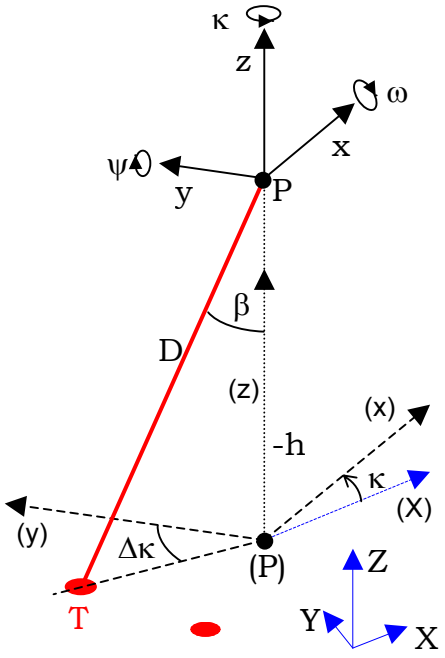


Der kleine Restwinkel um die y-Achse verstellt die Nadirachse des Scanners in Flugrichtung (s. Abb. 3.24). Die Koordinatenverfälschungen sind:

$$\begin{aligned}\Delta X &= -h\tan(\Delta\psi)\cos(\kappa) \approx -h\cos(\kappa)\cdot\Delta\psi \\ \Delta Y &= -h\tan(\Delta\psi)\sin(\kappa) \approx -h\sin(\kappa)\cdot\Delta\psi \\ \Delta Z &= -h\left[\cos(\Delta\psi)-1\right] \approx 0\end{aligned} \qquad (3.2\text{-}5)$$

***Abb. 3.24**: Einfluss Δψ*

Einfluss Δκ:

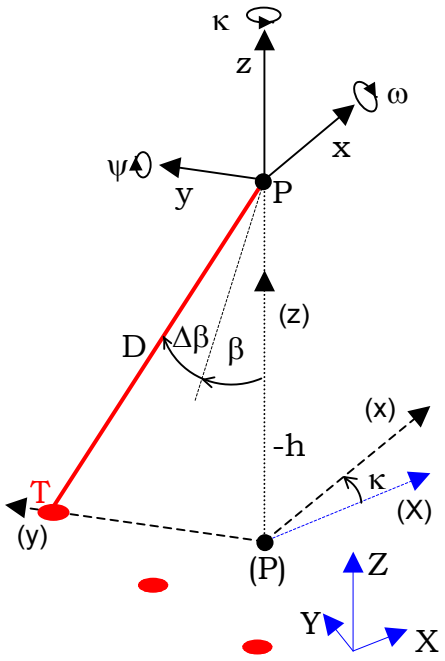


Wird ein horizontales, ebenes Gelände vorausgesetzt, dann beeinflusst der kleine Restwinkel um die Nadirachse nur die Lage des gemessenen Punktes (s. Abb. 3.25). Die Höhen bleiben unverändert:

$$\begin{aligned}\Delta X &= -h\tan(\beta)\left[\sin(\kappa+\Delta\kappa)-\sin(\kappa)\right] \\ \Delta Y &= \;\; h\tan(\beta)\left[\cos(\kappa+\Delta\kappa)-\cos(\kappa)\right] \\ \Delta Z &= 0\end{aligned} \qquad (3.2\text{-}6)$$

***Abb. 3.25**: Einfluss Δκ*

Einfluss Δβ:



Ein Fehler des Scanning-Mechanismus Δβ hat die gleiche Auswirkung auf die Raumkoordinaten wie Δω (s. Abb. 3.26). Bei den Formeln ist nur Δβ anstelle Δω zu schreiben:

$$\Delta X = -h\frac{\sin(\beta+\Delta\beta)-\sin(\beta)}{\cos(\beta)}\sin(\kappa) \approx -h\sin(\kappa)\cdot\Delta\beta$$

$$\Delta Y = -h\frac{\sin(\beta+\Delta\beta)-\sin(\beta)}{\cos(\beta)}\cos(\kappa) \approx -h\cos(\kappa)\cdot\Delta\beta$$

$$\Delta Z = -h\left[\frac{\cos(\beta+\Delta\beta)}{\cos(\beta)}-1\right] \approx -h\tan(\beta)\cdot\Delta\beta \qquad (3.2\text{-}7)$$

***Abb. 3.26**: Einfluss Δβ*

3.2.4 Der Einfluss der Zeitsynchronisierung

Beim Laserscanning handelt es sich um ein System, wo mehrere Messprozesse (GPS-, IMU-, Distanz-, Scanwinkel Messungen) parallel laufen. Bei der Nachbearbeitung, wo die Raumkoordinaten des jeweiligen Punktes berechnet werden, reduziert man die Daten von allen Messprozessen auf den Zeitpunkt, wann der jeweilige Punkt erfasst wurde. Zu diesem Zweck sind die Zeitinformationen neben den Messdaten zu registrieren. Die Fehler bei der Zeitsynchronisierung haben unterschiedliche Einflüsse auf die Positionsgenauigkeit, abhängig von der Änderungsrate der gemessenen Größe. Werden zum Beispiel die IMU-Daten durch eine kleine Zeitversetzung falsch synchronisiert, so wird der Einfluss auf die Genauigkeit auch vernachlässigbar klein bleiben, wenn es ein ruhiger Flug mit kleinen Änderungen der Orientierungselemente in Abhängigkeit von der Zeit ist.

3.3 Vorhandene Geräte und ihre Messeigenschaften

Schon seit der Entwicklungs- und Testphase der Laserscanner wurde es deutlich, dass es sich um eine revolutionäre Technologie zur vollautomatisierten Datenermittlung handelt. Sie bietet nicht nur detaillierte und genaue Oberflächemessungen, sondern bringt mit sich auch eine neue Sicht auf das photogrammetrische Messkonzept (Kraus 2002). In Deutschland wurde 1993 die TopScan GmbH gegründet, welche zusammen mit der kanadischen Firma Optech Inc. das Laserhöhenmessungsystem ALTM (Airborne Laser Terrain Mapper) mod. 1020 entwickelte. Die guten Erfolge der ersten kommerziellen Einsätze bewirken die Entstehung von neuen Firmen, welche die Laserscannersysteme intensiv weiterentwickeln, auch eigene Geräte bauen. Im Jahr 2000 war ca. 30 Laserscanner und Ende 2002 etwa 70 Laserscanner weltweit vorhanden. Eine detaillierte Beschreibung über verschiedene Firmen und Laserscanner findet man in (Baltsavias, 1999). In der Tabelle 3.2 werden nur die Systeme, die in Europa am häufigsten eingesetzt werden, aufgelistet:

Tabelle 3.2: *Einige flugzeuggetragene Laserscanner (nach dem URL 6)*

System	ALTM 1020	TopoSys	TopEye	ScaLARS
Hersteller	OPTECH	TopoSys	Saab Dynamics	IfN - Uni Stuttgart
Distanzmessungs-methode	Pulslaufzeit-Verfahren	Pulslaufzeit-Verfahren	Puls-Laufzeit-Verfahren	Phasenvergleich-Verfahren
Intensitäts-Aufzeichnung	Nein	nein	nein	ja
Wellenlänge λ	1047nm	1535nm	1064nm	810nm
Messsignal	Laserimpuls	Laserimpuls	Laserimpuls	(1+10Mhz) Sinusoidale Welle
Max. Distanz	1000m	1000m	500m	750m
Distanzauflösung	0.03m	0.1m	0.1m	0.03-0.16m
Messhäufigkeit	2 kHz	80 kHz	< 6 kHz	7.7kHz
Durchmesser der Laserflecks (bei maximaler Distanz)	0.25m	0.1-0.2m	0.6m	1.5m
Scanning-Mechanismus	schwingender Spiegel	Fiberscanner	schwingender Spiegel	nutierender Spiegel
Strahlablenkung	bis zu ±20°	±7°	bis zu ±10°	±14°/±20°
Scanningfrequenz	bis zu 50Hz	600Hz	bis zu 25Hz	bis zu 20Hz
Abtastungsrate im Gelände	≥ 1Pkt/26m²	4Pkt/m²	≥1Pkt/4 m²	≥1Pkt/4 m²

Die Eigenschaften von ALTM und TOPOSYS werden näher betrachtet, denn sie liefern die Daten für diese Arbeit.

3.3.1 Der ALTM-Sensor

Die Firma Optech Inc. stellt kommerzielle LIDAR Systeme seit 1993 her. Schon das erste Modell ALTM1020 brachte einen guten Erfolg und wurde weltweit eingesetzt. Die deutsche Firma TopScan GmbH wurde 1991 gegründet und erwarb schon in 1993 einen ALTM1020 Scanner (Wever 2002). Mit diesem Scanner wurde 1996 das Testgebiet Wienerwald gescannt. Intensive Forschung führt zu neuen kommerziellen Modellen. Sechs davon sind im gegenwärtigen Angebot (Tabelle 3.3). Alle Modelle messen die Distanz nach der Puls-Laufzeit-Methode und benutzen als Scanning-Mechanismus den schwingenden Spiegel. Unterschiedlich sind die maximale Reichweite und die Abtastfrequenz:

Tabelle 3.3: *Reichweite und Abtastfrequenz der ALTM-Scanner (nach dem URL 7)*

Modellen	max. Abtastfrequenz (Hz)	max. Reichweite (m)
ALTM 30/70	70,000	3,000
ALTM 2050	50,000	2,000
ALTM 3033	33,000	3,000
ALTM 3025	25,000	3,000
ALTM 2033	33,000	2,000
ALTM 2025	25,000	2,000

Das modernste Modell von Optech ist ALTM 30/70 (s. Abb. 3.27). Es verfügt, neben der beachtlichen Ausdehnung der Messweite (200m bis 3000m), über eine sehr hohe maximale Messfrequenz. Sie lässt sich von 0Hz bis zu 70kHz beliebig steuern. Das System zeichnet vier empfangene Impulse pro gesandtes Messsignal auf. Außerdem wird die Intensität der empfangenen Strahlung mit 12bit registriert.

Abb. 3.27*: ALTM 30/70 - "on board" - Komponenten (nach dem URL9).*

Das System kann, je nach Bedarf, mit 4kx4k Digitale Messkamera und/oder einem Wellenform-Digitalisator ausgerüstet sein. Die digitale Kamera nimmt im Farb- oder Farb-IR-Bereich auf. In der Nachbearbeitung werden die Aufnahmen vollautomatisch georeferenziert. Der Wellenform-Digitalisator tastet die Form der empfangenen Strahlung mit einer dynamischen Auflösung von 8bit und einem Abtastintervall von 1ns ab. Weitere technische Daten sind in Tabelle 3.4 angeführt.

Tabelle 3.4: *Technische Daten von ALTM 30/70 (nach URL 9)*

relative Höhe beim Messflug	200-3000m
Lagegenauigkeit	besser als 1/2000 x (relative Flughöhe)
Höhengenauigkeit	15cm auf 1200m, 35cm auf 3000m
Auflösung der Distanzmesser	1cm
Mehrreflexionenaufzeichnung	4 Reflexionen pro Messimpuls
Intensitätsregistrierung	12bit – dynamische Auflösung
Scanwinkel	variabel ab 0 bis ±25˚ (50˚ Scanöffnung)
Streifenbreite	ab 0 bis 0.93xHöhe
Abtastfrequenz	ab 0 bis 70Hz, je nachdem Scanwinkel
Laserimpulsrate	wählbar in 3 Stufen 33kHz 50kHz 70kHz
Divergenz des Laserstrahles	wählbar zwischen 0.2mrad und 0.7mrad
Trägheits-Navigationsystem	Applanix – Optech Anpassung
GPS Empfänger	Novatel

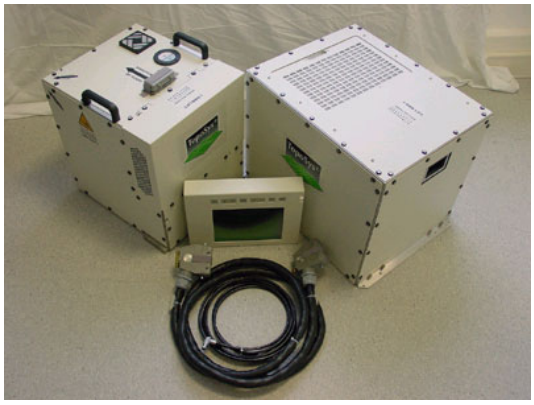
3.3.2 Der Toposys-Sensor

Die Firma TopoSys wurde 1995 gegründet und führt eine abgebrochene Dornier Entwicklung fort. Seit 1996 hat die Firma ihren ersten Laserscanner in Betrieb. 1998 wurde ein Folgemodell entwickelt, das 2000 zum Einsatz kam. Bis 2002 hat Toposys nur ihre Sensoren benutzt. Erst danach liefert die Firma ihre eigenen Sensoren an andere Kunden (nach URL 11).

Tabelle 3.5: *Systemparameter der TopoSys I und TopoSys II Laserscanner (nach URL 10)*

	TopoSys I	TopoSys II
Scannertyp	Gepulster Faserlaser	Gepulster Faserlaser
max. operationelle Flughöhe	< 1000m	< 1600m
Wellenlänge	1.54 um	1.55 um
Pulsdauer	5 ns	5 ns
Zeilenfrequenz	650Hz	630Hz
Pulsrate	83kHz	80kHz
Auflösung der Entfernungsmessung	6cm	2cm
Blickwinkel	14° (±7°)	14° (±7°)
Streifenbreite (bei max. Reichweite)	220m	390m
mittlere Messdichte (bei max Reichweite)	5 Messungen/m^2	3 Messungen/m^2
Datenaufzeichnung	First- oder Lastpulse	First- und Lastpulse
Intensitätsmessung	nicht möglich	möglich

Toposys hat ihren Laserscanner mit einer Zeilenkamera ergänzt. Der Sensor wird unter dem Namen "Falcon" ausgeliefert (s. Abb. 3.28). Eigenschaften der Zeilenkamera (nach URL 12):



Spektrale Kanäle:	Blau	450-490nm
	Grün	500-580nm
	Rot	580-660nm
	NIR	770-890nm
Pixel pro Kanal		682
Auflösung quer zu Streife		0.5mrad
Blickwinkel		21.6°
Blendenöffnung		1:1.4

***Abb. 3.28**: Sensor System FALCON (nach URL 12).*

Werden die Laserscannerdaten zusammen mit den Zeilenkameradaten bearbeitet, bekommt man ein echtes Orthophoto, in dem die Objekte über den Gelände (wie z.B. Gebäude und Bäume) ohne Versetzungen abgebildet sind. Dasselbe Gebiet kann entweder in echten Farben (RGB) oder in s.g. "Falsch-Color" (CIR) dargestellt sein (s. Abb. 3.29).

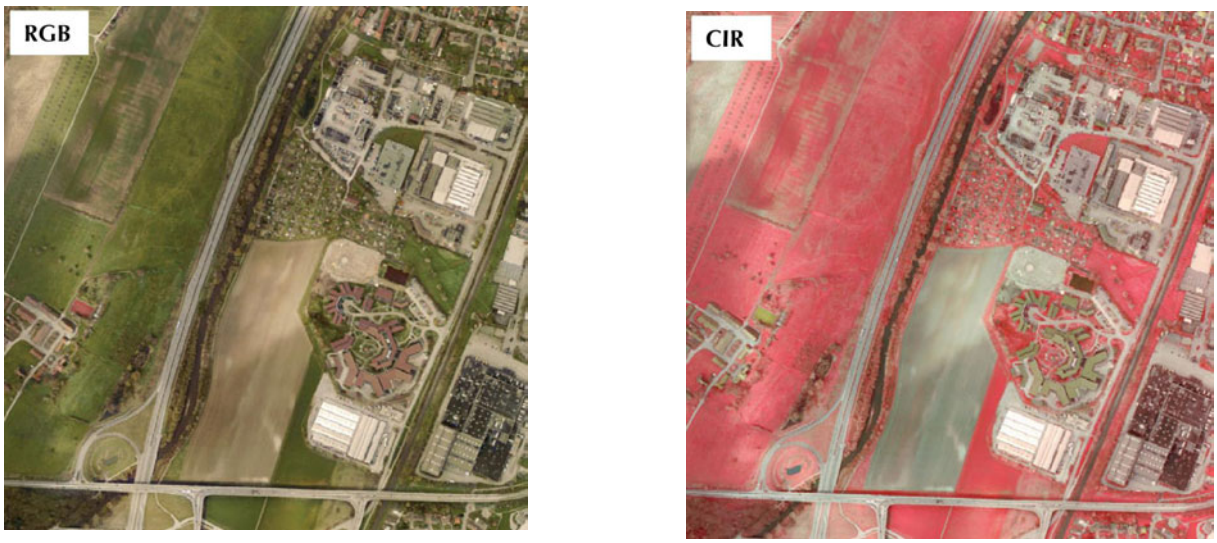


***Abb. 3.29**: RGB und CIR Orthophotos (nach URL 8).*

4 FILTERUNG DER LASERSCANNER-DATEN

4.1 Allgemeines zur Filterung und Klassifikation

Die Laser-Scanner liefern Daten, die sich als 3D-Punktewolken charakterisieren lassen. Die gemessenen Punkte sind quasi-zufällig im Raum verteilt. In Überlappungsbereichen wird ein und dasselbe Gebiet aus verschiedenen Beobachtungsrichtungen abgetastet. Deswegen können auch Punkte auf vertikalen Wänden sowie Punkte unter Brücken erfasst sein.
Diese Punktwolken beinhalten mehr Informationen als das 2.5D-Oberflächenmodell darstellen kann, denn es lässt für jede beliebige xy-Position nur einen z-Wert zu. Daher müssen die Daten auf die angewandte 2.5D-Datenstruktur angepasst werden, in der Weise, dass alle Punkte in einer "Schale" (Oberfläche) über der xy-Ebene liegen (m.a.W. für eine xy-Position ist nur ein z-Wert erlaubt). Diese "Schale" stellt ein Modell dar, das eine Abstraktion der Realität sein sollte. Andererseits ist die Realität ein 3D-Phänomen, das sich noch mit der Zeit ändert, und das sich nicht im 2.5D-Modell eindeutig darstellen lässt. Einige Oberflächen sind für uns vom größten Interesse, wie z.B. die Geländeoberfläche. Die andere interessante Oberfläche ist eine Hülle, die von oben das Gelände zusammen mit allen darüber liegenden Objekten umhüllt.

Die Abstraktion der Geländeoberfläche ist das DGM (Digitale Geländemodell) und die Abstraktion der Hülle ist das DSM (Digital surface model) (s. Abb. 4.1).

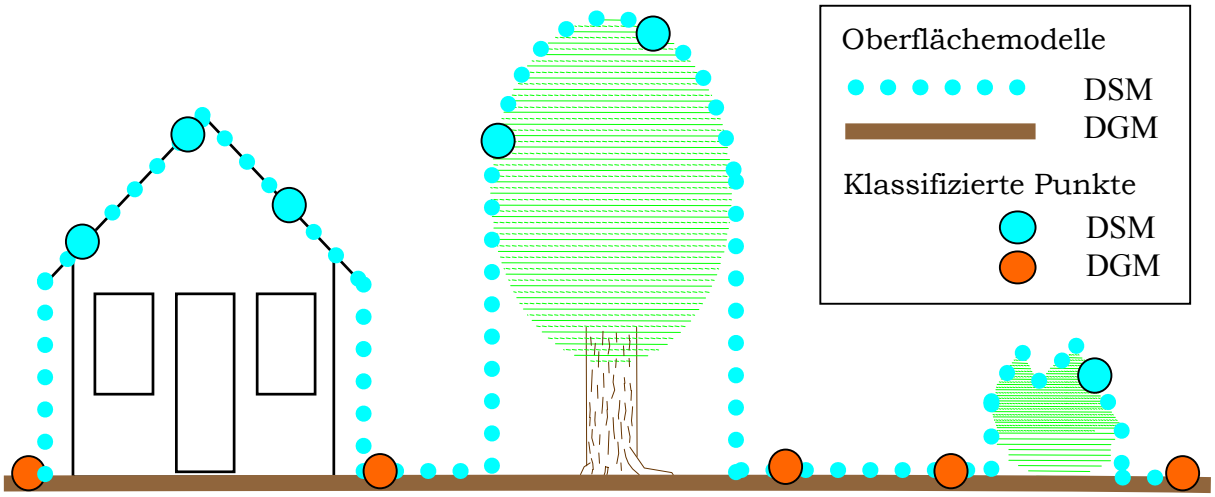


***Abb. 4.1**: Oberflächemodelle mit Punktenklassifikation.*

Es gibt viele Anwendungen, die das DSM benutzen (z.B. die Analyse von Ausbreitungen der Radiowellen, Lärm und Luftverschmutzung, Sichtbarkeitsanalysen). Für topographische Anwendungen braucht man das DGM. Da das DSM wegen des Scannings von Oben leicht erfassbar ist, sind spezielle Filterungsverfahren zum Erkennen der Punkte am Gelände erforderlich.

4.2 Grundkonzepten und verfeinerte Methoden der Filterung

Alle Filterungs-Methoden haben ein gemeinsames Ziel, nämlich die Daten, die sich nicht auf die Geländeoberfläche beziehen, aus dem Datensatz zu eliminieren (herausfiltern). Die Methoden unterscheiden sich abhängig von den Regeln und der Erkenntnissen über die Eigenschaften des vorhandenen Datensatzes:

- physische Eigenschaften des empfangenen Messsignals
- statistische Eigenschaften der Punktwolke
- morphometrische Eigenschaften des erfassten Datensatzes

Als physische Eigenschaften wird in erster Linie die Zeitcharakteristik des empfangenen Messsignals benutzt, welche die erste und grobe Unterteilung der gemessenen Daten nach potentiellen Gelände- und Vegetationspunkten ermöglicht. Das Verfahren wird "First Pulse - Last Pulse" Klassifikation genannt.

4.2.1 "First Pulse - Last Pulse" Klassifikation

Der Laserstrahl besitzt eine Divergenz von 0.2 - 1 mrad. Während des Scannens aus der Höhe von 1000m wird auf dem Gelände ein Fleck mit einem Durchmesser von 0.2 bis 1m (Divergenz 0.2-0.7mrad bei ALTM33/70, 1mrad bei TOPOSYS FALCON) beleuchtet.

Diese Divergenz ermöglicht eine Durchdringung des Laserstrahls bis zum Boden, durch die Objekte, die kleiner als der Laserfleck sind (Äste und Blätter). Fast alle Laser-Scanner zeichnen Mehrfachreflexionen beim Durchdringen auf, manche registrieren sogar die ganze Wellenform des reflektierten Laserstrahls (s. Abb 4.2).

Diese Methode klassifiziert zuverlässig erfassten Daten auf Gelände- und Vegetationspunkten nur dann, wenn der Laserstrahl überhaupt das Gelände erreicht, und wenn die empfangenen Impulse eine Zeitdifferenz haben, die größer als die Impulsdauer ist. Kleinere Zeitdifferenzen zwischen letztem und vorletztem Impuls treten sehr oft dort auf, wo das Gelände mit bodennaher Vegetation bewachsen ist. Bei solchen Geländepunkten können grobe Höhenfehler (ΔH im Bild 4.3) auftreten.

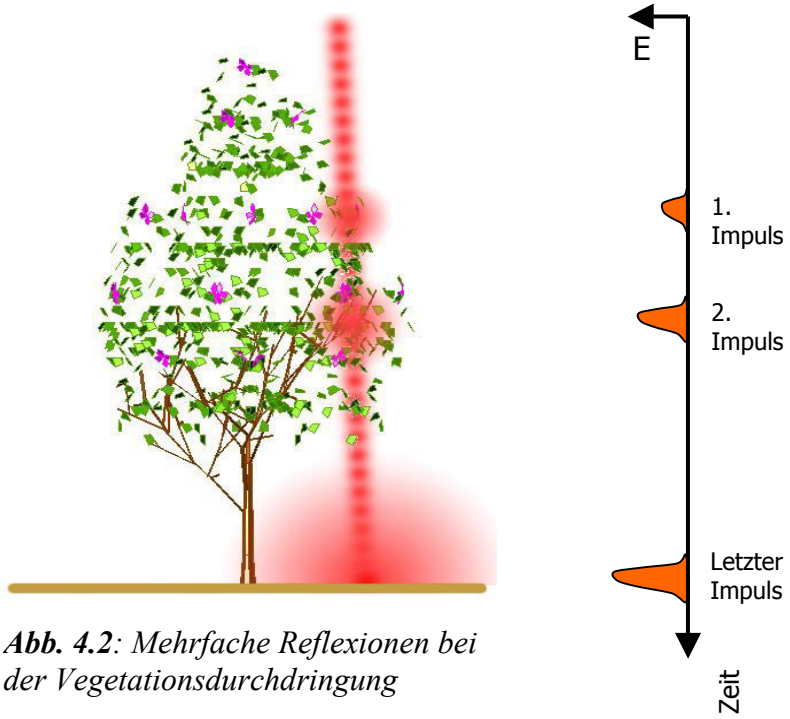


***Abb. 4.2**: Mehrfache Reflexionen bei der Vegetationsdurchdringung*

Wenn der gesendete Laserimpuls 5ns dauert, muss die Vegetationshöhe größer als 75cm sein, da sonst nur ein einziger Impuls registriert wird. Dieser Impuls wird als letzter Impuls im Detektor registriert, und damit als Bodenpunkt klassifiziert. Die erfasste Höhe bezieht sich nicht auf den Boden, denn die Empfangszeit vom Energiemaximum, das aus letzter und vorletzter Reflexion zusammengesetzt wird, wird als Zeitmarke für die Entfernungsmessung verwendet (s. Abb. 4.3).

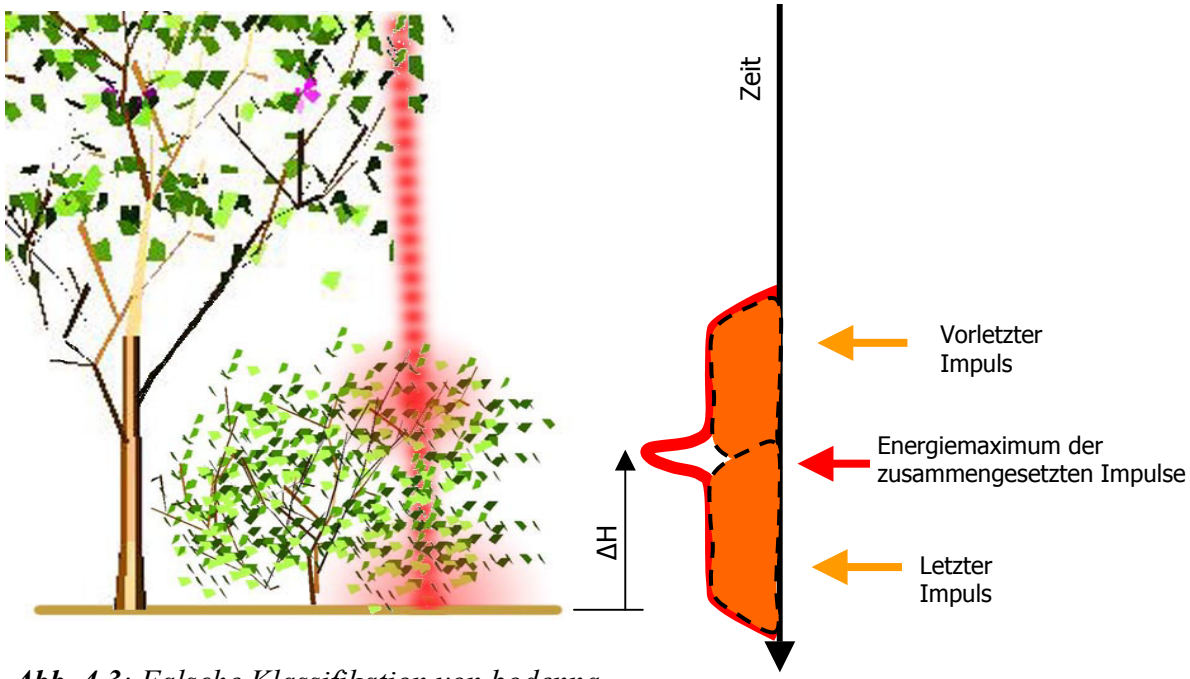


***Abb. 4.3**: Falsche Klassifikation von bodennahem Bewuchs*

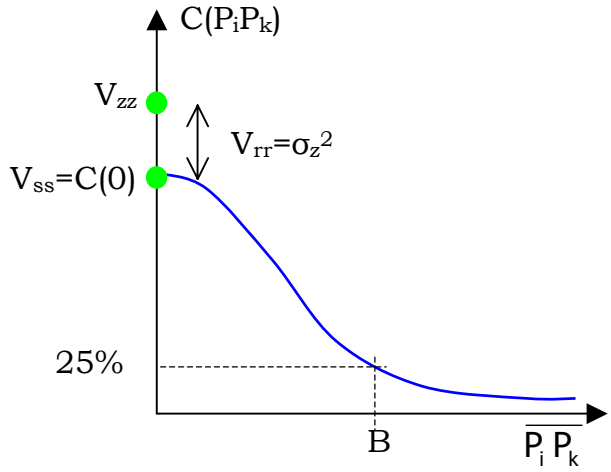
4.2.2 Lineare Prädiktion

4.2.2.1 Das Prinzip

Die lineare Prädiktion ist eine statistische Interpolationsmethode. Sie ist besonders für kontinuierliche Oberflächen geeignet, die sich in analytischer Form kaum darstellen lassen. Die Lösung geht nach der Methode der kleinsten Quadrate und die zufälligen Fehler werden weitgehend eliminiert. Dabei wird eine normale Fehlerverteilung vorausgesetzt. Diese Methode wird für die Interpolation des DGMs vorteilhaft angewendet. Eine detaillierte Beschreibung findet man in (Kraus 2000). Hier werden nur Prinzipien angeführt.

Die lineare Prädiktion fußt auf der Korrelation benachbarter Punkte, die durch die Kovarianzfunktion ausgedrückt wird. Sie hat die allgemeine Form:

$$C(P_iP_k) = C(0) \cdot e^{-\left(\frac{\overline{P_iP_k}}{B}\right)^2} \qquad (4.2\text{-}1)$$



C(0) ist die Kovarianz zwischen zwei Punkten, P_i und P_k , die unendlich nahe liegen. Diese Kovarianz entspricht dem Scheitelwert der Kovarianzkurve. B ist eine Konstante, mit der die Neigung der Kovarianzfunktion im mittleren Bereich festgelegt wird. Beide Parameter der Kovarianzfunktion sind entweder bekannt, oder sie werden aus den Daten empirisch bestimmt. Wenn die beiden Punkte nahe beieinander liegen, ist die Kovarianz groß.

Abb. 4.4: *Kovarianzfunktion.*

Sie tendiert gegen Null mit wachsender Entfernung (s. Abb. 4.4).

Die o.g. Kovarianzfunktion lässt sich sinnvoll nur dann verwenden, wenn ein Oberflächentrend aus den erfassten Datenhöhen abgespalten wurde. Diese Abspaltung kann entweder durch eine gleitende Horizontalebene, einer Schrägebene oder ein Polynom sehr niedrigen Grades erfolgen. Die Trendoberfläche stellt die Geländeoberfläche nur relativ grob dar. Die ursprünglichen Stützpunkthöhen reduzieren sich durch die Abspaltung des Trends auf die z_i-Koordinaten, die als zentrierte Stützwerte bezeichnet werden (s. Abb. 4.5).

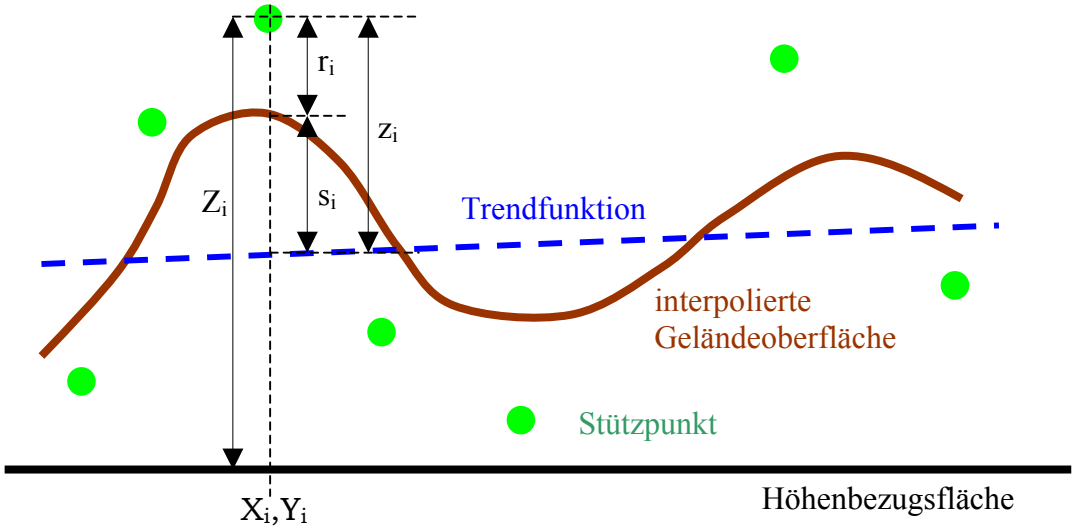


Abb. 4.5: *Interpolation durch lineare Prädiktion.*

Die zentrierten Stützwerte z_i teilen sich auf in den unregelmäßigen Anteil r_i („Rauschen“), und den systematischen Anteil s_i („Signal“). Die systematischen Anteile bestimmen die geglättete Geländeoberfläche, die von zufälligem Höhenfehler (r_i) befreit ist.

$$z_i = s_i + r_i \qquad (4.2\text{-}2)$$

Die interpolierte Oberfläche ist mit den zentrierten Stützwerten und der bekannten Kovarianzfunktion folgendermaßen definiert:

$$u_i = \begin{bmatrix} C(P_iP_1) & C(P_iP_2) & \dots & C(P_iP_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{zz} & C(P_1P_2) & \dots & C(P_1P_n) \\ C(P_2P_1) & V_{zz} & \dots & C(P_2P_n) \\ \vdots & & & \\ C(P_nP_1) & C(P_nP_2) & \dots & V_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \\ z_n \end{bmatrix} \qquad (4.2\text{-}3)$$

$$u_i = c^T C^{-1} z$$

u_i ist der prädizierte Wert, der eine Höhendifferenz des interpolierten Punktes P_i über dem Trend darstellt. Der Kovarianz-Vektor c umfasst die Kovarianzen zwischen der Interpolationsstelle P_i und den n Stützpunkten P_j . Diese Kovarianzen erhält man, wenn in die vorgegebene Kovarianzfunktion mit den Entfernungen zwischen P_i und allen Stützpunkten P_j eingegangen wird. Matrix C enthält die Kovarianzen zwischen den Stützpunkten. Die Hauptdiagonale ist mit den Varianzen V_{zz} besetzt, die größer sind als der Scheitelwert der Kovarianzfunktion. Dadurch entsteht die Filterung. Gleichung 4.2-4 stellt den Zusammenhang zwischen der Varianz V_{ZZ}, der Varianz V_{SS} des korrelierten Anteils, sowie der Varianz V_{rr} des unregelmäßigen (zufälligen) Anteils formelmäßig dar:

$$V_{zz}=V_{ss}+V_{rr}=C(0)+\sigma_Z^2 \qquad (4.2\text{-}4)$$

Die Filterung ermöglicht eine qualifizierte Entfernung der zufälligen (nach Gauss'che Glockenkurve verteilten) Höhenfehler. Durch Variation der Varianzen V_{ZZ} in der Matrix C lässt sich die Filterungsstärke, und damit die Oberflächerauhigkeit, leicht steuern. Im Sonderfall, wenn für V_{ZZ} der Scheitelwert C(0) benutzt wird, ist keine Filterung möglich und die interpolierte Oberfläche läuft genau durch alle Stützpunkte.

Die Methode ist als qualifizierte Interpolationsmethode, besonders für digitale Geländemodelle etabliert. Dabei wird ein symmetrisches und normal verteiltes Rauschen vorausgesetzt, das zum relevanten nützlichen Signal addiert ist und dessen Frequenzspektrum sehr hoch ist.

Da beim Laserscanning die Nichtbodenpunkte gewisse positive Höhenabweichungen zur Geländeoberfläche aufweisen, lässt sich die o.g. lineare Prädiktion mit normaler Fehlerverteilung nicht anwenden. Die Höhenabweichungen stammen von Messfehlern und von Klassifikationsfehlern. Die Messfehler sind in ihren absoluten Beträgen klein und normalverteilt. Ihr Einfluss auf die interpolierte Oberfläche wird durch die lineare Prädiktion minimiert. Die Klassifikationsfehler stammen von falscher Klassifikation von Punkten, die als Bodenpunkte falsch interpretiert sind. Diese Fehler sind relativ groß und wirken immer mit demselben, positiven Vorzeichen. Um diese groben Fehler zu entdecken und aus dem Datensatz wirksam herauszufiltern, schlägt Kraus eine neue Methode zur Entdeckung von groben Fehlern vor, die eine schiefe und exzentrische Fehlerverteilung besitzen (Kraus 1997), und zwar:

4.2.2.2 Iterative robuste Interpolation mit linearer Prädiktion

Das Erkennen von Nichtbodenpunkten wird iterativ, gleichzeitig mit Interpolation des DGMs, durchgeführt. Dafür wird die lineare Prädiktion mit individuellen Gewichten für jede Messung benutzt (Kraus & Mikhail, 1972). Als erster Schritt wird eine Oberfläche aufgrund aller Laserscanner-Punkte bestimmt, wobei alle Punkte bei der Interpolation das gleiche Gewicht bekommen. Damit entsteht eine glatte Oberfläche, die ausgleichend zwischen Boden- sowie Nichtbodenpunkten verläuft. Es ist zu erwarten, dass die Bodenpunkte negative Höhenabweichungen zu die Oberfläche aufweisen, während die Nichtbodenpunkte zu den positiven Abweichungen neigen.

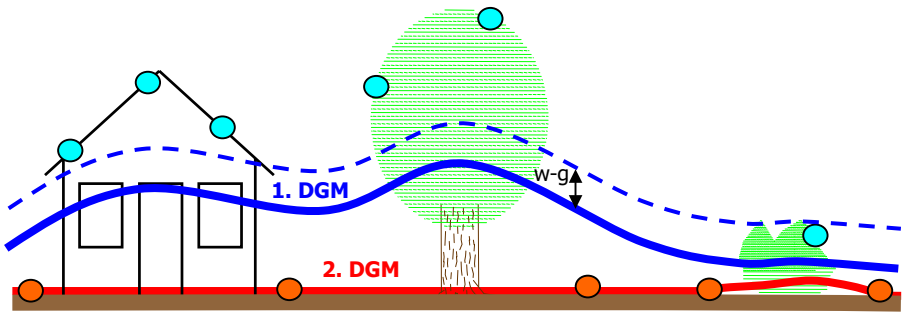


***Abb. 4.6**: Klassifikation und Interpolation im iterativen Verfahren.*

Diese Höhenabweichungen werden folgendermaßen für die Berechnung von individuellen Gewichten benutzt (Kraus & Pfeiffer, 1998):

$$p_i = \begin{cases} 1 & v_i \le g \\ \dfrac{1}{1+(a(v_i-g)^b)} & g < v_i \le g+w \\ 0 & g+w < v_i \end{cases} \qquad (4.2\text{-}5)$$

Die Parameter a und b bestimmen die Steilheit der Gewichtfunktion. Der g-Parameter bewirkt eine Verschiebung der Gewichtfunktion gegen Null in Abszissen-Richtung. Der w-Wert ist ein Schwellwert, der den Wirkungsbereich der Gewichtfunktion begrenzt und auf diese Weise werden die wahrscheinlichen Bodenpunkte von Nichtbodenpunkten getrennt (s. Abb. 4.6).

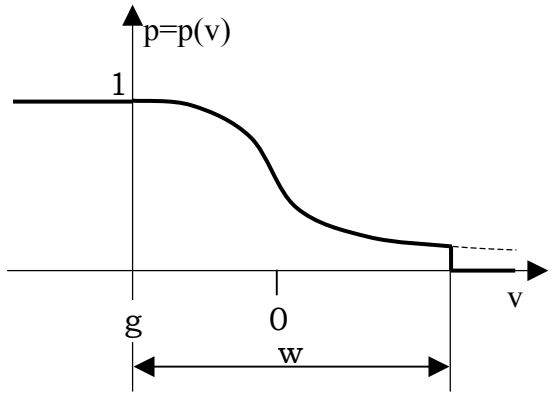


***Abb. 4.7**: Die Gewichtsfunktion p, die durch den Schwellwert w abgeschnitten ist.*

Abbildung 4.7 zeigt deutlich, dass die Messungen mit negativen Höhendifferenzen den Messungen mit positiven Höhendifferenzen bevorzugt werden. Die nächste Interpolation des DGMs benutzt die individuellen Gewichte, die aufgrund der Formel 4.2-5 bestimmt wurden. Ein solches DGM nähert sich den Bodenpunkten viel besser an (2. DGM in Abb. 4.6) und wird für die nächste Iteration als Basis-DGM zur Berechnung von individuellen Gewichten benutzt.

Für gute Interpolations- und Klassifikationsergebnisse sind passend ausgewählte Parameter sehr wichtig. Entscheidend wirken dabei die g- und w-Parameter, die für jedes Projekt besonders sorgfältig bestimmt werden. Am I.P.F. der TU WIEN wurden dafür einige Algorithmen entwickelt, die in (Kraus & Pfeiffer, 1998) ausführlich beschrieben sind.

Das Verfahren zeigt sehr gute Klassifikations- sowie Interpolationseigenschaften, besonders in bewaldeten Gebieten. Gute Ergebnisse erzielt man schon nach drei bis vier Iterationen, auch dort wo sehr kleine Durchdringungsraten vorhanden sind. Voraussetzung ist aber, dass die Nichtbodenpunkte nicht lokal gruppiert sind, sondern möglichst gleichmäßig gestreut sind. Deswegen lassen sich die großen Gebäude aus dem Datensatz kaum eliminieren. Um diesen Nachteil zu

umgehen, schlagen Briese/Pfeifer eine hierarchische Erweiterung des vorgestellten Verfahrens vor (Briese et al. 2000).

4.2.2.3 Hierarchische robuste Interpolation

Dieses Verfahren benutzt ebenfalls die robuste Interpolation mit schiefer und exzentrischer Fehlerverteilung, diesmal aber auf hierarchische Weise. Dafür wird aus dem originellen Datensatz eine s.g. Datenpyramide konstruiert. Die Datenpyramide enthält mehrere Abstraktionsniveaus, die sich untereinander in der Menge von Daten sowie im Detaillierungsgrad unterscheiden.

Am Anfang werden die Daten so verdünnt, dass die Laserpunkte innerhalb des ganzen Gebietes relativ gleichmäßig verteilt sind. Dafür wird über das ganze Gebiet ein Raster gelegt, und in jede Rastermasche wird der niedrigste Punkt ausgewählt. Die so gewonnenen Punkte werden gefiltert und ein DGM wird interpoliert, mittels der robusten Interpolation. Dieses DGM wird mit dem Datensatz aus dem nächsten Abstraktionsniveau (höhere Auflösung) verglichen und die Punkte innerhalb vorgegebener Höhenschranken werden in die nächste Iteration eingefügt. Der Algorithmus wird wiederholt, bis alle Punkte klassifiziert sind. Das Wirken dieser Filterung ist in Abbildung 4.8 dargestellt. Mehr Einzelheiten über das Verfahren, seine Implementierung im Programm SCOP, sowie weitere Beispiele findet man in (Briese et al. 2000) und (Kraus & Pfeifer 2001).

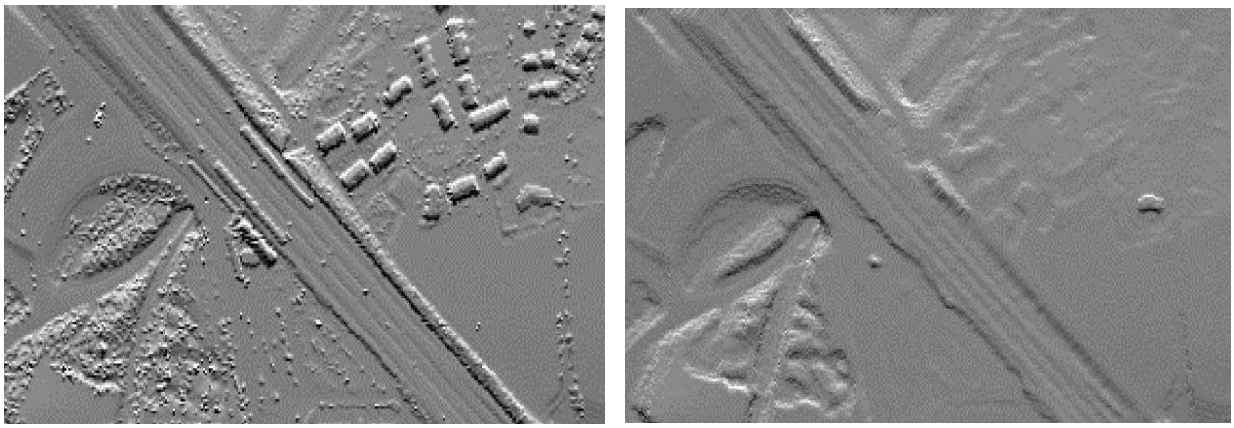
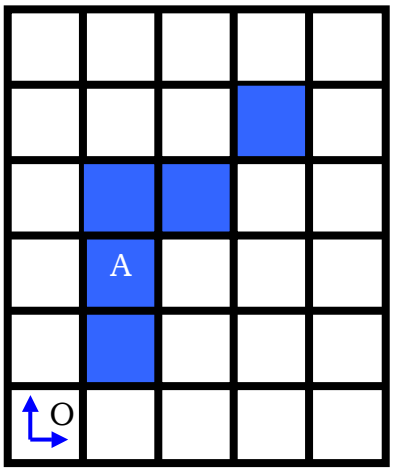


***Abb. 4.8**: Hierarchische robuste Interpolation. Links - originale Daten, Rechts -gefilterte Daten (Vaihingen, OEEPE - Test, nach Kraus & Pfeiffer, 2001).*

4.2.3 Morphologische Filterung

4.2.3.1 Das Konzept



Das Konzept der morphologischen Filterung beruht auf den Ansätzen der mathematischen Morphologie. Sie wendet die Methoden und Algorithmen der nichtlinearen Algebra zum Erkennen und Extrahieren von morphologischen Eigenschaften (Verbindungen und Formen) einer Punktmenge an. Diese Methoden wurden ursprünglich im Bereich der digitalen Bildverarbeitung verwendet als eine Reihe von Algorithmen zur Analyse und Bearbeitung von Formen (Morphologie) in Bilder. Im Folgenden werden auch digitale Bilder verwendet, um die Wirkung von fundamentalen morphologischen Operanden klar zu machen.

***Abb. 4.9**: 2D-Datenmenge in form eines binären Bildes.*

Eine ausführliche Beschreibung der mathematischen Morphologie findet man in (Serra & Soille 1994). Hier werden nur die Grundkonzepte vorgestellt, die zum Verständnis der morphologischen Filterung von Laserscanner-Daten unentbehrlich sind.

Die binären Bilder im Sinne der mathematischen Morphologie sind Punktmengen (**A** in Abb. 4.9), die innerhalb eines zweidimensionalen diskreten Raumes ε^2 vorhanden sind (URL 14).

$$\mathbf{A}=\{ a \ 0 \ \varepsilon^2 \mid a \ 0 \ \mathbf{A} \} \qquad (4.2\text{-}6)$$

Das Bild 4.9 lässt sich mathematisch auf folgende Weise aufschreiben:

A={(1,1),(1,2),(1,3),(2,3),(3,4)}

Aus der Mengentheorie sind folgende Mengenoperationen bekannt:

- Komplement
- Translation
- Reflektivität

Das Komplement einer Menge (A^C) resultiert mit allen Elementen, die innerhalb der Domäne ε^2 definiert sind, aber in der ursprünglichen Menge (A) nicht vorhanden sind (s. Abb. 4.10).

$$\mathbf{A}^c=\{ a \ 0 \ \varepsilon^2 \mid a \ ó \ \mathbf{A} \} \qquad (4.2\text{-}7)$$

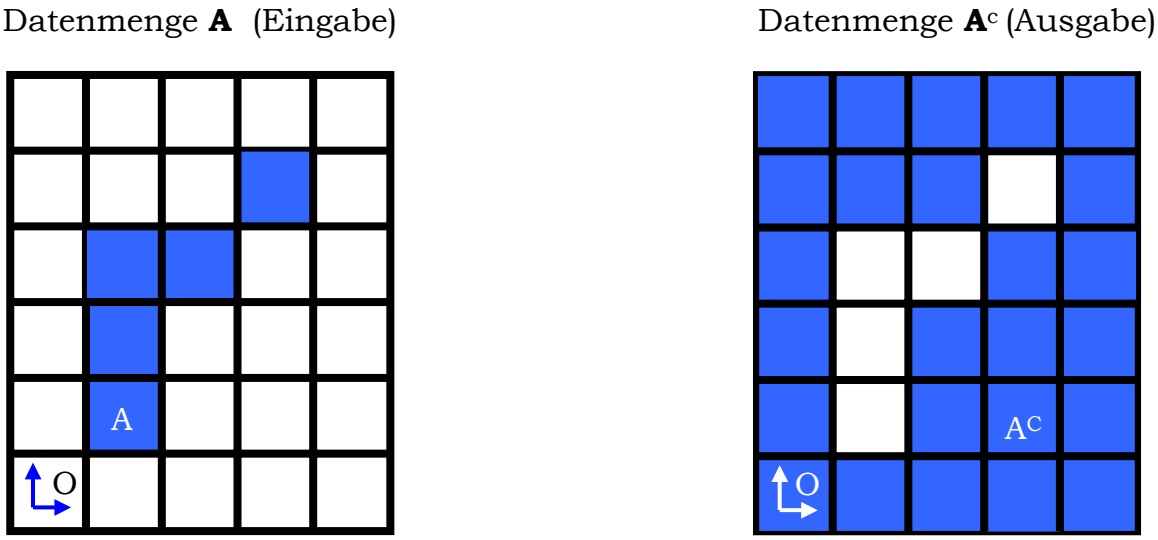


***Abb. 4.10**: Das binäre Komplement. Links ist orginales Bild, rechts ist komplementäres Bild.*

Bei der Translation werden alle Elemente einer Menge (**A**) an eine andere Stelle innerhalb der gegebenen Domäne versetzt (s. Abb. 4.11). Die Richtung und die Größe der Versetzung bestimmt ein Vektor (**c**), der innerhalb derselben Domäne definiert sein soll.

$$(\mathbf{A})_x = \{ x\ 0\ \varepsilon^2 \mid x = a + c, \text{ für } a\ 0\ \mathbf{A}\}\quad \mathbf{c} = (c_1,c_2) \qquad (4.2\text{-}8)$$

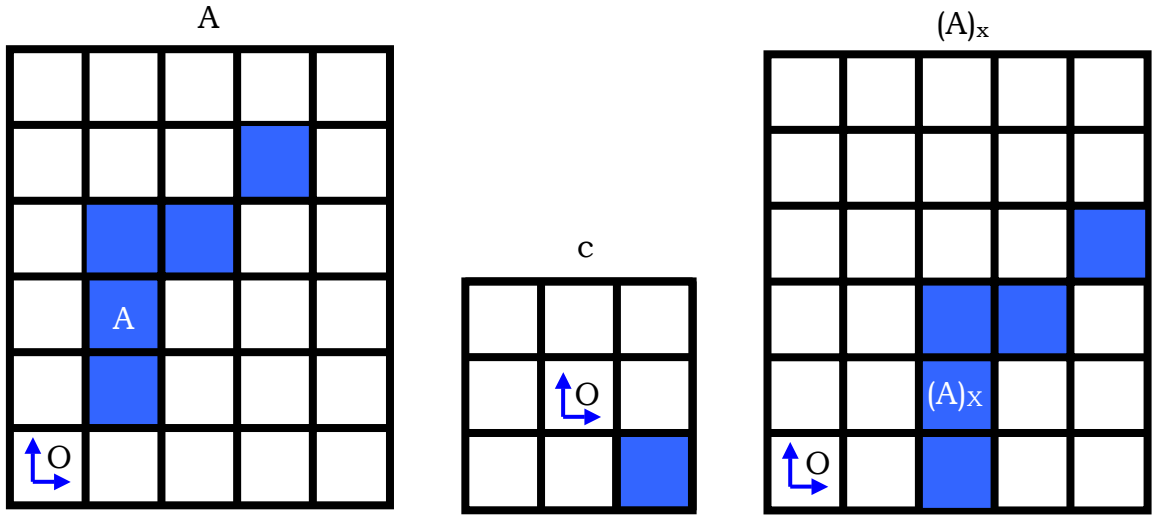


***Abb. 4.11**: Binäre Translation: Links - originales Bild, Mitte - Translationsvektor, Rechts - verschobenes Bild.*

Die Reflektion überführt alle Elemente der Menge A zu ihren Gegenpositionen, bezüglich des Ursprunges des Koordinatensystems (O) (s. Abb. 4.12).

$$B^r = \{ x\ \ 0\ \varepsilon^2 \mid x = -\ b, \text{ für } b\ 0\ B\} \qquad (4.2\text{-}9)$$

***Abb. 4.12**: Die Reflektion: Links - ursprüngliches Bild, Rechts - nach der Reflektion.*

4.2.3.2 Morphologische Basis-Operationen

Die lokalen Operatoren Erosion und Dilatation stellen die Basis-Operatoren der morphologischen Transformationen dar. Komplexere Operatoren, Öffnen und Schließen, werden davon abgeleitet. Alle morphologischen Operatoren haben lokale Wirkung, die durch das s.g. Strukturelement realisiert werden müssen. Das Strukturelement ist eine beliebig geformte Operatormaske, die pixelweise über das Bild geschoben wird und damit den Einflussbereich des Operators bestimmt.

Die morphologische Dilatation ist eine elementare morphologische Operation, die zwei Mengen (Datenmenge und Strukturelement) durch Vektoraddition verbindet. Dabei ist **A r B** die Punktmenge aller möglichen Vektoradditionen von Elementpaaren zwischen **A** und **B** (URL 15). Ein solches Verfahren ist in der mathematischen Morphologie als Minkowski Addition bekannt. Formal geschrieben (nach URL14)

$$A \oplus B = \{ x \in \varepsilon^2 \mid x = a + b, \; a \in \mathbf{A}, b \in \mathbf{B} \} \qquad (4.2\text{-}10)$$

Die Dilatation fügt Pixel an den Bereichsrändern hinzu. Dadurch kommt es zu einer Vergrößerung des Objektes (s. Abb. 4.13).

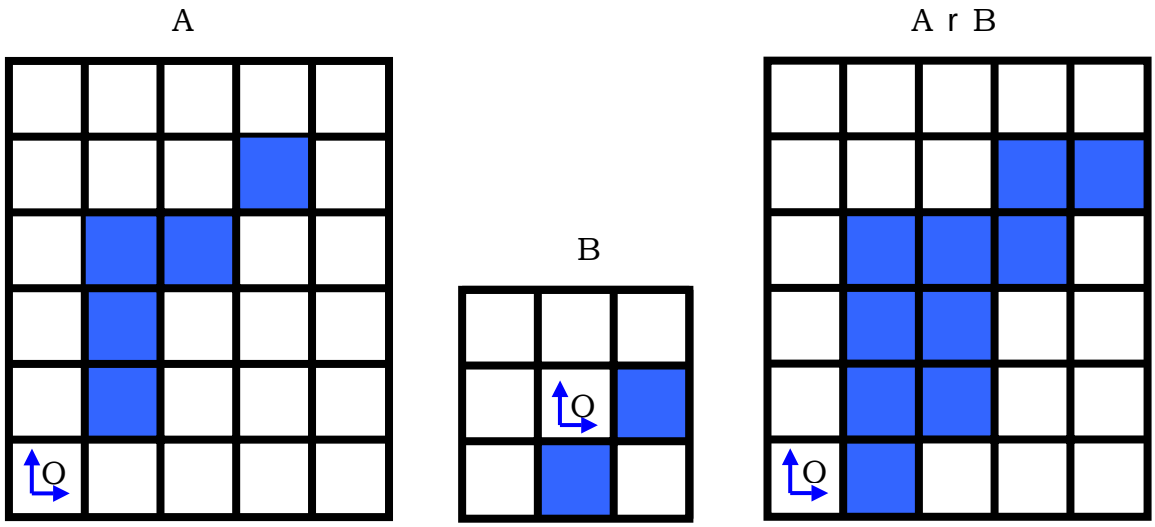


***Abb. 4.13**: Morphologische Dilatation, das Prinzip und die Wirkung*

Die morphologische Erosion der Datenmenge A durch das Strukturelement B ist wieder eine elementare morphologische Operation, die aus einer Punktmenge von allen möglichen x-Verschiebungen resultiert, wo die Translation von -B durch den Vektor x in der Menge A enthalten ist. Diese Operation lässt sich als Minkowski-Subtraktion aufschreiben (URL 14):

$$A \ominus B^r = \{x \in \varepsilon^2 \mid x - b \in A \text{ für jede } b \in B\} \qquad (4.2\text{-}11)$$

Wenn B eine symmetrische Form bezüglich seines Ursprungs hat ($B = B^r$, dann ist die Erosion identisch mit der Minkowski-Subtraktion ($A \ominus B$).

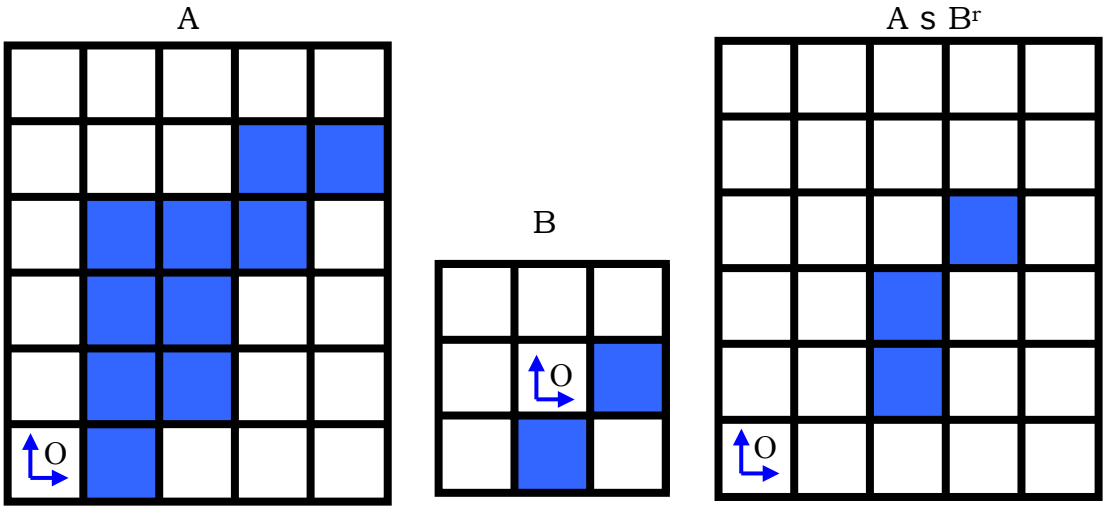


***Abb. 4.14**: Morphologische Erosion, das Prinzip und die Wirkung.*

Bei der Erosion wird das aktuelle Pixel genau dann auf 1 gesetzt, wenn die Maske ("Einser-Bereich" im reflektierten Struktur-Element B^r) vollständig mit dem "Einser-Bereich" des Ursprungsbildes überlappt. Andernfalls wird das aktuelle Pixel auf 0 gesetzt (s. Abb. 4.14).

4.2.3.3 Morphologisches Öffnen und Schließen

Wenn wir noch einmal die obigen Beispiele über der Wirkung von Dilatation und Erosion anschauen, finden wir leicht, dass diese Operationen nicht invers sind. Wird eine Datenmenge zuerst erodiert und dann dilatiert, ist das Ergebnis eine Vereinfachung mit weniger Details. Diese Operation wird als morphologisches Öffnen bezeichnet.

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \qquad (4.2\text{-}12)$$

Das Öffnen wird benutzt um (Lin 2003):

- kleine außenliegende Bereiche (z.B. Störbereiche) zu eliminieren
- äußere Ecken zu glätten
- dünne Brücken zu eliminieren

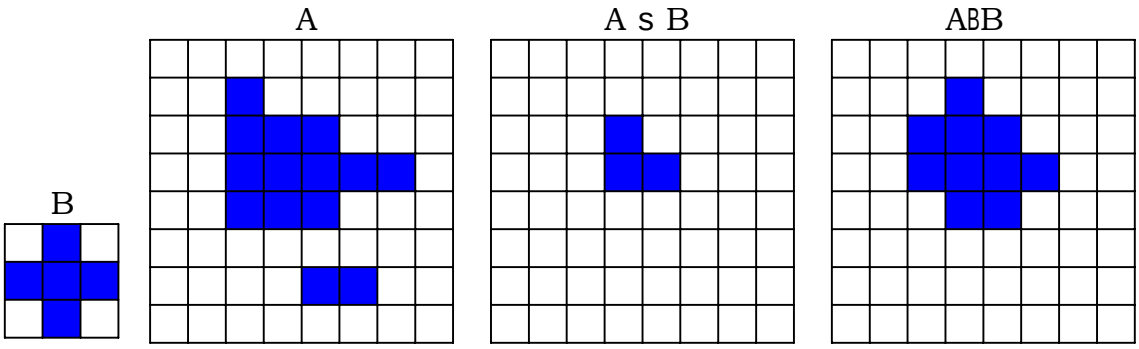


***Abb. 4.15**: Morphologisches Öffnen.*

Kehrt man die Reihenfolge der Basisoperatoren um, bekommt man einen weiteren morphologischen Operator, das sog. morphologische Schließen. Formal geschrieben:

$$A \subset B = (A \; r \; B) \; s \; B \qquad (4.2\text{-}13)$$

Schließen verwendet man um
- kleine innenliegende Lücken zu entfernen
- kleine Distanzen zu überbrücken
- innere Ecken zu glätten

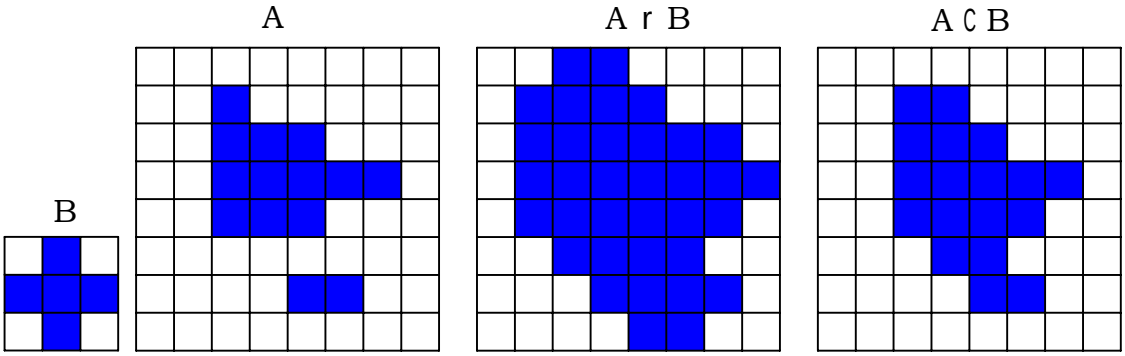


***Abb. 4.16**: Morphologisches Schließen.*

4.2.3.4 Grauwertmorphologie

Die eben aufgestellten morphologischen Ansätze, die für Datenmengen im 2D-Raum gelten, werden nun um eine Dimension erweitert. Damit lassen sich die angeführten morphologischen Operatoren für 3D-Funktionen und Grauwertbilder anwenden. Die 3D-Datenmenge A wird in eine 3D-Funktion transformiert durch den Oberflächen-Operator T(A) (s.g. "Top surface"-Operator), der für beliebige Lagepositionen (x,y) 0 A den höchsten z-Wert liefert. Die Umbra U(f) von einer Funktion f enthält die Oberfläche f und alle Punkte darunter.

Die Dilatation von der Funktion f und den 3D-Strukturelement b definiert man, ganz allgemein, als Dilatation von ihren Umbras (mehr darüber findet man in Anderson et al. 2003):

$$f \; r \; b = T [U(f)] \; r \; U(b) \qquad (4.2\text{-}14)$$

Erosion wird ähnlich definiert:

$$f \; s \; b = T [U(f)] \; s \; U(b) \qquad (4.2\text{-}15)$$

Das Strukturelement b ist oft (besonders bei der Filterung von Laserscanner-Daten) eine 2D-Funktion (wie bei den Binärbildern), und wird nur als Operatormaske für morphologische Operationen angewendet. Dann gelten folgende Ausdrücke:

Dilatation:

$$f \; r \; b = \max \{ f(s-x,t-y) \; | \; (s-x,t-y) \; 0 \; \mathbf{D}_f \; ; \; (x,y) \; 0 \; \mathbf{D}_b \} \qquad (4.2\text{-}16)$$

Die Dilatation findet ein lokales Maximum zwischen den Daten, die durch Strukturelement b aus einer Funktion f ausgewählt wurden. Dieses Maximum bezieht sich auf eine bestimmte Position (s,t) der zu untersuchenden Funktion f.

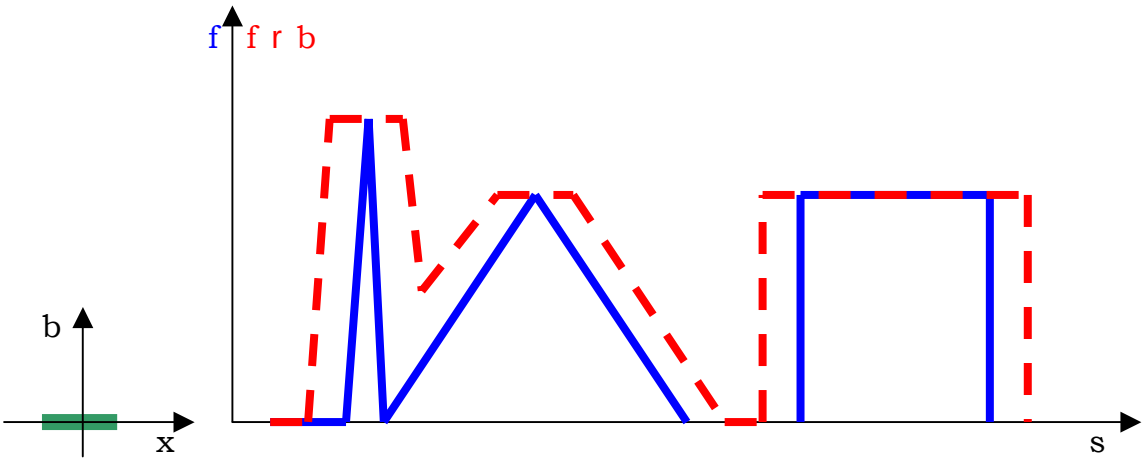


***Abb. 4.17**: Wirkung von Grauwert-Dilatation (ein Profil im s-Richtung).*

Erosion:

$$f \; s \; b = \min \{ f(s-x,t-y) \; | \; (s-x,t-y) \; 0 \; \mathbf{D}_f \; ; \; (x,y) \; 0 \; \mathbf{D}_b \} \qquad (4.2\text{-}17)$$

Bei der Erosion geht das Verfahren in der gleichen Weise wie bei der Dilatation, jedoch wird ein lokales Minimum gesucht.

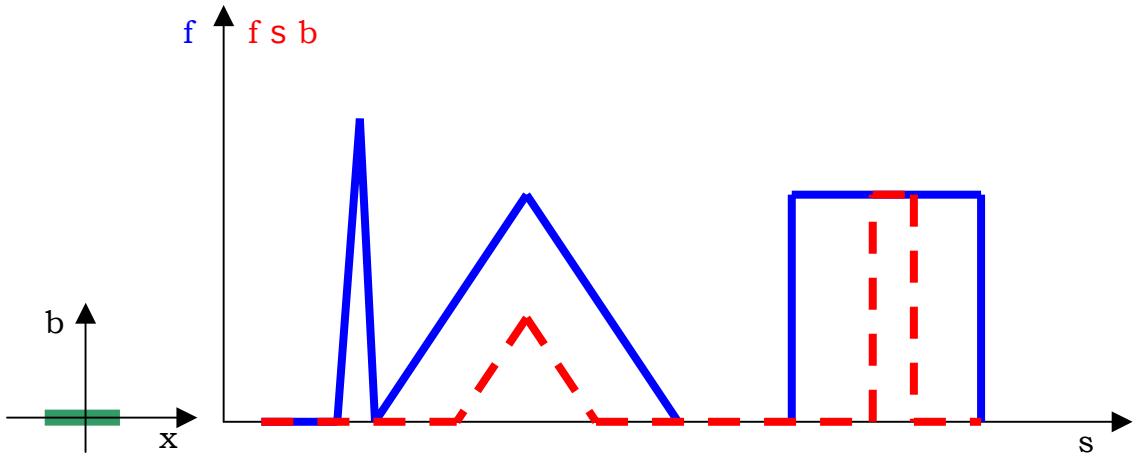


***Abb. 4.18**: Wirkung von Grauwert - Erosion (ein Profil im s-Richtung).*

4.2.3.5 Die Algorithmen zur morphologischen Filterung von Laserscanner-Daten

Das Konzept von Grauwertmorphologie lässt sich ohne weiteres auf die Analyse von digitalen Oberflächemodellen anwenden. Es eignet sich zur Filterung von Laserscannerdaten besonders gut.

Für diesen Zweck passt man die morphologischen Basis-Operatoren den LIDAR-Messungen P(x,y,z) an (Zhang et al. 2002):

Dilatation: $d_p = \max_{(x_p,y_p)\in w}(z_p)$ Erosion: $e_p = \min_{(x_p,y_p)\in w}(z_p)$ *(4.2-18)*

(x_p,y_p,z_p) bezeichnet die Position eines beliebigen Nachbarpunktes zum Punkt P, welcher innerhalb des Strukturelementes w vorhanden ist.

Morphologisches Öffnen und Schließen haben die gleiche Form wie bei binären Bildern (4.2-12 und 4.2-13).

Ein realistisches Beispiel (Abb. 4.19) zeigt die Wirkung vom morphologischen Öffnen eines Datensatzes (ein Profil), der durch Laserscanning eines Stadtgebietes entstanden ist. Die Punkte an den Objekten, die kleiner als Strukturelement sind (z.B. Vegetation, Fahrzeuge, ..) sind durch Erosion entfernt. Punkte, die zu größeren Objekten gehören, werden durch Dilatation beibehalten.

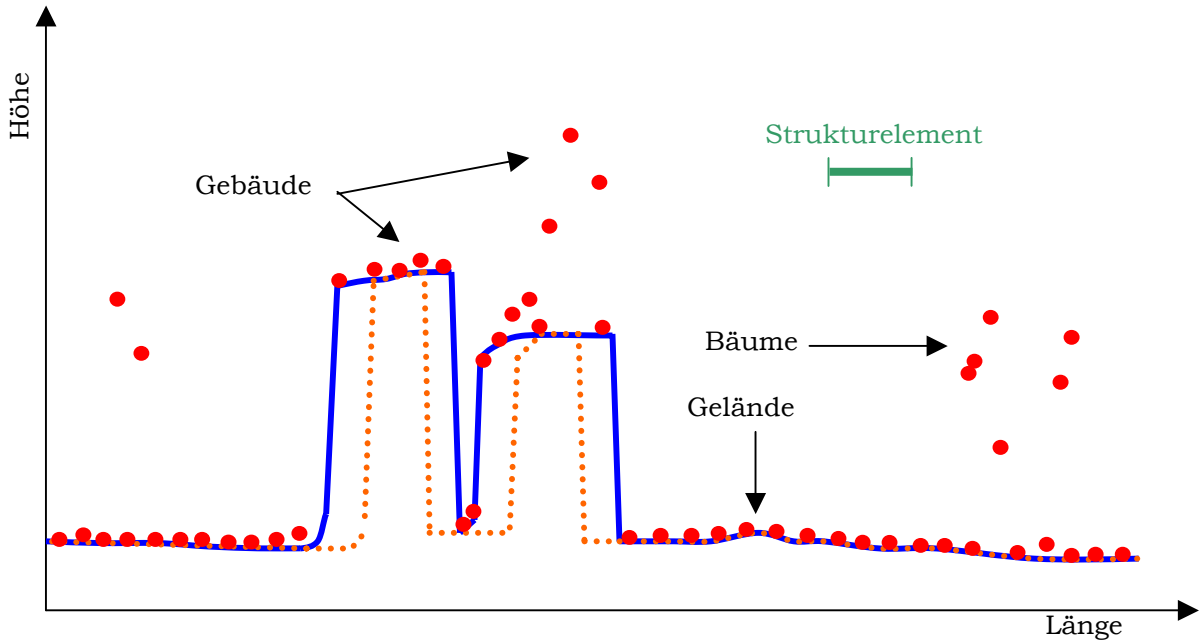


***Abb. 4.19**: Wirkung von morphologischem Öffnen an einem Laserscanner-Datensatz (nach Zhang et al. 2002).*

Kilian benutzt auch das morphologische Öffnen, um Punkte, die nicht zum Gelände gehören, zu entfernen (Kilian et al. 1996). Zuerst wird über das ganze Gebiet ein Raster gelegt mit einer Rastermaschengröße, die vom Benutzer frei gewählt wird. Innerhalb jeder Rastermasche wird der niedrigste gemessene Punkt ausgewählt und mit diesem Punkt werden alle anderen Punkte innerhalb der gleichen Rastermasche verglichen. Alle Punkte, welche die vorgegebene Toleranz überschreiten, werden als Nicht-Bodenpunkten klassifiziert und aus dem Datensatz entfernt. Die Toleranz hängt von der Laserscanning-Genauigkeit ab. Es wird üblicherweise der mittlere Höhenfehler unter Berücksichtigung des Klassifikationsfehlers als Toleranz übernommen. Die übriggebliebenen Punkte werden endlich durch morphologisches Öffnen bearbeitet.

Der Erfolg dieser Methode hängt in erster Linie von der Rastermaschengröße sowie von der Dispersion der Nichtbodenpunkte innerhalb des gemessenen Datensatzes ab. Wenn die Nichtboden-Punkten lokal gruppiert sind, und die so entstandene "Nichtboden-Enklave" größer als das Strukturelement der morphologischen Filterung ist, dann können sie nicht herausgefiltert werden. Viele falsch klassifizierte Punkte verbleiben dann als grobe Fehler im Datensatz.
Wenn man andererseits eine zu große Rastermasche wählt, schneidet der Filter auch viele Geländeformen, die ein lokales Maximum aufweisen, ab. Andere Formen, die kleiner als das Strukturelement sind, werden stark geglättet. Es gibt keine ideale Rastermaschegröße, die für alle Gebiete anwendbar ist.

Diese Filtermethode ist relativ einfach und schnell. Sie wird von vielen Laserscanning-Anbietern benutzt. Extreme Höhenwerte sowie grobe Fehler werden auch im gefilterten Datensatz enthalten sein, was oft zu unannehmbaren Ergebnissen bei der Interpolation des DGMs führt.

4.2.3.5.1 Dual rank Filterung

Bei der Dual-Rank Filterung nimmt der Filter nicht die extremen Werte, sondern die s.g. Rank-Werte. Diese Werte werden durch einen Rank-Operator **R(p,r)** indiziert. Der Rank-Operator sortiert aufsteigend alle Werte **p**, die durch das Strukturelement aus dem ganzen Datensatz selektiert wurden, und wählt denjenigen mit dem vorgegebenen Rank-Wert **r** aus. Der Rank-Wert kann eine beliebige ganze Zahl sein, zwischen 1 und n. Mit n ist die Anzahl von Daten bezeichnet, die durch das Strukturelement selektiert sind. Wird der Rank-Wert auf 1 gesetzt, hat der Rank-Operator dieselbe Wirkung wie bei der morphologischen Erosion. Die Dilatation-Wirkung lässt sich erreichen, wenn man für den Rank-Wert den n-Wert wählt. Rank-Wert gleich n/2 verursacht die Median-Filterung. Beim Filtern von Laserscanner-Daten werden diese Sonderwerte nicht benutzt, sondern die Werte die mehr oder weniger nahe bei 1 oder n liegen. Somit werden die Extremwerte bei der Analyse eliminiert, was eine Chance ist, um die groben Fehler aus dem Datensatz herauszufiltern.

Dieser Operator wird mathematisch wie folgt geschrieben:

$$DR(p,r) \mapsto R(p,r) \circ R(p,n-r) \qquad (4.2\text{-}19)$$

Der Dual Rank Operator besteht aus zwei aufeinanderfolgenden Rank-Operatoren. Der Erste hat einen vorgegebenen Rank-Wert r während der Zweite der n-r Wert benutzt. Diese Konfiguration ermöglicht eine glatte ununterbrochene Veränderung von Filtereigenschaften durch einfache Modifikation des Rank-Wertes r. Es sind zwei Parameter vorhanden, die eine Anpassung der Filtereigenschaften ermöglichen, und zwar:

- Rank-Wert
- Größe des Strukturelements

Wie schon bei der iterativen robusten Interpolation mit linearer Prädiktion erklärt wurde, gelten diese Parameter nur für Gebiete mit ähnlichen morphometrischen Eigenschaften und ähnlicher Distribution von Nichtbodenpunkten. Es wird daher die Methode durch ein progressives Konzept erweitert.

4.2.3.5.2 Progressive morphologische Filterung

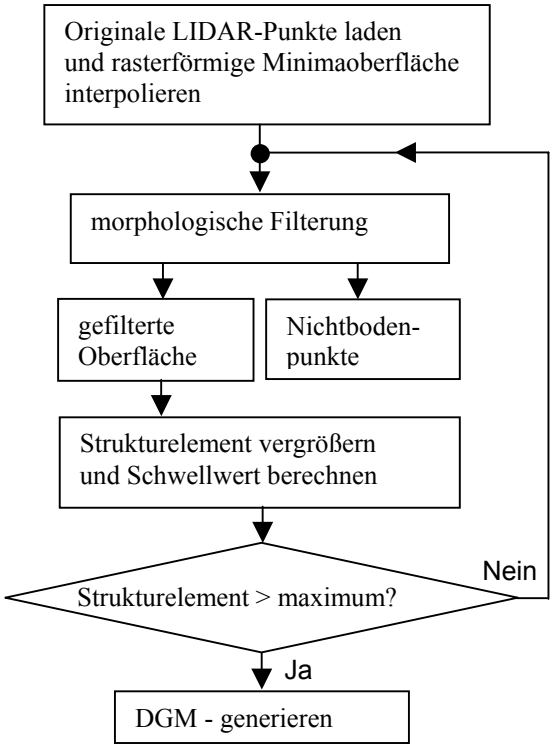


***Abb. 4.20**: Progressive morphologische Filterung.*

Das Prinzip der progressiven morphologischen Filterung ist im Grunde ein iteratives Filterungsverfahren, wo die Größe des Strukturelements für jede Iteration allmählich verändert wird. Damit passt sich der Filter den komplexen bebauten Gebieten sehr gut an. Der Prozeß läuft iterativ in folgenden Schritten, nach dem Vorschlag von (Zhang et al. 2002) ab (s. Abb. 4.20).

Zuerst wird aufgrund der erfassten Laserscanner-Daten eine Oberfläche interpoliert, die eine regelmäßige Matrixstruktur besitzt. In den Zellen, wo mehrere Laserscanner-Punkte existieren, werden nur die niedrigsten übernommen. In leeren Zellen werden die Höhen aufgrund der Nachbar-Zellen interpoliert.

Die erste Iteration beginnt mit morphologischem Öffnen der ursprünglich interpolierten Oberfläche. Dabei wählt man das Strukturelement so, dass es etwas kleiner als das kleinste Gebäude im Gebiet ist. Deswegen bleiben alle Gebäude in der gefilterten Oberfläche erhalten, während die einzelnen Bäume entfernt werden. Das Ergebnis ist eine gefilterte Oberfläche, wo die Geländeformen kleiner als das Strukturelement nachteilig abgeschnitten sind (die blaue Linie in Abb. 4.21). Deswegen benutzt man diese Oberfläche zur Interpolation nicht, sondern nur zur Klassifikation der originalen Laserscanner-Daten. Das Kriterium für die Klassifikation ist die Höhendifferenz (dh_P) zwischen dem gemessenen Punkt P und der gefilterten Oberfläche. Dieses Verfahren setzt allmähliche Höhenänderungen bei Geländepunkten voraus, die viel kleiner sind als die Höhendifferenzen bei Gebäudekanten. Die Schwellhöhendifferenz $dh_{(T)}$ wird vom Benutzer bestimmt und trennt die Geländepunkte von den Gebäudepunkten. Wenn $dh_{p,1} \leq dh_{T,1}$ (1 ist für 1-te Iteration), dann wird der Punkt als Geländepunkt interpretiert. Sonst handelt es sich um den Gebäudepunkt. Wählt man die Schwellhöhendifferenz zwischen der maximalen Höhendifferenz im Gelände ($dh_{max(T),1}$) und der minimalen Gebäudehöhe ($dh_{min(B),2}$), innerhalb des Strukturelementes, werden alle Punkte richtig klassifiziert.

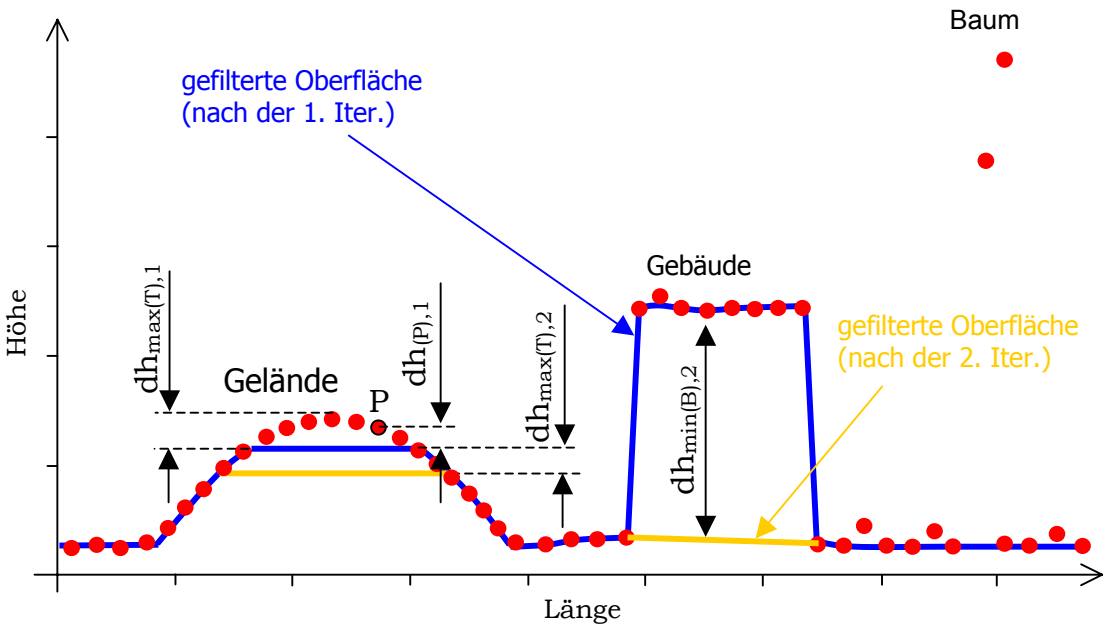


***Abb. 4.21**: Das Prinzip der progressiven morphologischen Filterung (nach dem Zhang et al. 2002).*

Vor der nächsten Iteration wird das Strukturelement vergrößert und die Schwellhöhedifferenz neu berechnet. Die Iterationen holen sich wieder, bis das Strukturelement größer als das größte Gebäude im Gebiet wird. Es ist wichtig zu merken, dass die gefilterten Oberflächen werden nicht zur DGM Interpolation benutzt, sondern nur zur Filterung. Die DGM-Interpolation wird aufgrund ursprünglicher Daten durchgeführt.

Dieses Filter zeigt gute Eigenschaften, besonders bei den stark bebauten Siedlungen, die auf einem horizontalen Gelände liegen. Gute Ergebnisse erzielt man auch dort, wo die Höhendifferenzen im Gelände beträchtlich kleiner sind als die Gebäudehöhen.

Das Nichtvorhandensein von negativem Fehler ist wieder vorausgesetzt, denn die werden durch morphologische Schließen stark betont. Dieser Nachteil lässt sich vermindert, wenn man anstelle reine morphologische Schließen, die Dual-Rank Filter anwendet.

4.2.4 Weiterentwicklung

Die bisher angeführten Filterungstechniken benutzen die räumlichen geometrischen Eigenschaften der gemessenen Daten, um die Daten richtig zu interpretieren. Die Klassifikation geht nur aufgrund statistische oder morphometrische Beziehungen der erfassten Daten innerhalb des Datensatzes. Meiner Meinung nach,

sind die Filterungstechniken, die nur reine geometrische Punktwolken betrachten, hinsichtlich Weiterentwicklung erschöpft. Zeitgenössische Laser-Scanner bieten, neben den Messungen von einzelnen Punkten, auch die Mehrreflexionen- sowie Intensitätsaufzeichnung. Diese zusätzlichen Informationen könnten die Filterung viel zuverlässiger machen (z.B. die Vegetation lässt sich sehr gut im NIR-Bereich erkennen). Neben dem, auch die Daten von anderen Datenquellen (Sensoren, Datenbanken..) können die effiziente Filterung stark unterstützen. Mehr darüber findet man in (Schiewe, 2000), (Hyungtae et al. 2003), (Guo & Yoshifumi 2002).

5 Rasterbasierte Geländeanalysen

5.1 Topographie des Geländes als Parameter in geomorphologischen Prozessen

Das Relief stellt die Grenzfläche zwischen der Atmosphäre/Hydrosphäre und der Pedosphäre/Lithosphäre dar. Es tritt als räumliches Kontinuum auf, dessen Habitus das Ergebnis der Wirkung von Prozessen ist, die auf unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Skalen an der Grenzfläche operieren. Das Relief besitzt damit einen dualen Charakter. Es ist einerseits das Produkt der Prozessgeschichte (Reliefgenese) und andererseits ein Regler in der Auslösung und Steuerung der Ausdehnung und Dynamik rezenter Prozesse. Prozesse in Grenzflächensystemen sind in starkem Maße von der räumlichen Charakteristik der Komponenten des Systems abhängig. Die Empirie zeigt, dass diese Komponenten auf allen räumlichen Skalen des Reliefs in strukturierten Anordnungen vorherrschen. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass formbildende und -verändernde Prozesse varianter Zeitskalen eher zu strukturierten Gefügen der Grenzfläche führen als zu zufallsbedingten Mustern. Weiter kann empirisch beobachtet werden, dass das strukturelle Gefüge des Reliefs in entscheidendem Maße ein Parameter für an der Grenzfläche wirkende Prozesse und damit für die räumliche Differenzierung von Geofaktoren darstellt (Friedrich-Wilhelms-Universität 2000).

Die Form des Geländes spielt eine fundamentale Rolle beim Modulieren der geomorphologischen Prozesse, was besonders für hydrologische sowie atmosphärische Prozesse gilt (Wilson & Galant 2000). Die geomorphologischen Prozesse sind weitgehend beeinflusst durch die Gravitationsverteilung und damit auch die Topographie des Geländes. Daher sind topographische Eigenschaften, die Wirkung von geomorphologischen Prozessen und die Sediment-Typen in ihrer Raumdistribution stark miteinander korreliert (Dikau 1994, Pike 2000).

Die Sonnenstrahlung ist die wichtigste Energiequelle, sowohl für die atmosphärischen Prozesse, als auch für die Prozesse an der Erdoberfläche. Direkte Sonnenstrahlung ist eine Funktion - im globalen Sinne - der geographischen Breite und der Jahreszeiten. Lokal sind die topographische Neigung, Exposition und die geworfenen Schatten von großer Bedeutung. Oberflächenabfluss zeigt das direkte Einwirken der Topographie besonders klar, denn er wird entscheidend durch Geländeneigung sowie Geländekrümmung beeinflusst. Ferner sind auch klimatische und landschaftsökologische Prozesse mit dem reliefbezogenen Klima- und Bodenwasserhaushalt eng verbunden.

Die Untersuchungen der Merkmale der Geländetopographie können das Verständnis vieler geomorphologischer Prozesse erleichtern, in unterschiedlichen räumlichen sowie temporären Maßstäben (Hutchinson & Gallant 2000).

Die Geländeanalyse umfasst die Methoden zur Quantifizierung der Geländeoberfläche, und enthält die Erkenntnisse aus verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen, wie Erdwissenschaften, Mathematik, Technik und Computer-Wissenschaften. Für die Geländeanalyse findet man in der Literatur noch weitere Namen, wie Geomorphometrie (oder einfach Morphometrie), Geländemodellierung und quantitative Geomorphologie (Pike 2002). Die Ergebnisse der Geländeanalysen werden in vielen wissenschaftlichen Disziplinen verwendet, besonders in Hydrologie, Geohasardanalysen, Tektonik, Ökologie usw. Obwohl die ersten Erkenntnisse über Geländeanalysen schon im 19. Jahrhundert bekannt wurden (Alexander von Humboldt (1808, 1817) und Carl Ritter (1826, 1828) als akademische Geographen), lässt sich die Geländeanalyse aber effizient erst nach dem Erscheinen der leistungsfähigen Computer in den letzten Dekaden des vorigen Jahrhunderts verwenden.

5.2 Parametrisierung des Reliefs

Das Ziel der Parametrisierung ist eine objektive Methodik zur Landschafts-Klassifikation im geomorphologischen Sinn. Die Reliefparameter sollen so ausgewählt werden, dass sie die Geländeoberfläche genügend präzis, detailreich, allgemein und orthogonal beschreiben. Präzision stellt die Stufe dar, für welche die Deskription sehr sensibel auf den Detailreichtum des Geländes reagiert. Die Beschreibung des Reliefs ist detailreich, wenn sie alle Aspekte der Reliefgestalt berücksichtigt. Die Allgemeinheit sagt über die (möglichst große) Anwendbarkeit der Reliefparameter etwas aus. Die angewandten Reliefparameter sollen orthogonal sein, um die Redundanz zwischen den Informationen zu vermeiden (Wood 1996).

Speight (1974) unterscheidet zunächst primäre Reliefparameter, die sich direkt aus den Höhenwerten des Reliefs ableiten lassen, und sekundäre Reliefparameter, die aus der Kombination von primären Reliefparametern hervorgehen und i.d.R. auch reliefunabhängige Daten mit einbeziehen (Moore, Grayson & Ladson 1992). Primäre Reliefparameter werden weiter differenziert, ob sie die lokale Reliefgeometrie (Gestalt des Reliefs in unmittelbarer Umgebung des jeweiligen Punktes) beschreiben, oder ob sie einer hydrologisch relevanten Parametrisierung der Relieftopologie dienen.

5.2.1 Die Parameter der lokalen Reliefgeometrie

Die lokale Reliefgeometrie ist durch die Oberflächenform eines kleinen Geländeausschnittes gegeben, der die unmittelbare (differenzialnahe) Umgebung des jeweiligen Punktes umfasst. Evans (1972) schlägt fünf Parameter der Reliefgeometrie vor, die für eine beliebige, ununterbrochene, mindestens zweimal differenzierbare, kontinuierliche Oberfläche definierbar sind: Höhe, Hangneigung, Exposition, Vertikalwölbung und Horizontalwölbung.

5.2.1.1 Höhe

Die Höhe bezeichnet die Entfernung eines Punktes zu der vordefinierten Referenzfläche/Bezugsebene (Höhendatum). Sie ist ein Maß für potenzielle Energie und auch ein Indikator fürs Klima. Generell nehmen die Temperatur sowie der Luftdruck mit der Höhe ab, die Niederschläge dagegen nehmen zu. Die Form des Geländes ist durch das DGM (in einer gewissen Abstraktionsstufe (Detaillierungsgrad) gegeben) repräsentiert. Damit lassen sich die Geländehöhen an den Stützpunkten direkt aus dem DGM abfragen. Dazwischen sind die durch eine Interpolationsfunktion z=f(x,y) zu interpolieren.

5.2.1.2 Gradient

Der Gradient $\vec{g}$ an der Stelle P(xp, yp) ist ein Vektor, der die Richtung und den Betrag des stärksten Anstieges von z an der Stelle P angibt (Bolch & Brenning 2001):

$$\vec{g} = \Delta z = \left(\frac{\partial z}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial z}{\partial y}\vec{j} \right)_P \qquad (5.2\text{-}1)$$

Der Gradient ist bivariate Entsprechung der ersten Ableitung und setzt sich aus den beiden Richtungsableitungen in x- und y-Richtung zusammen. Somit liegt er immer in der Horizontalebene durch den Punkt P und steht senkrecht auf den Höhenlinien. Die Hangneigung an der Stelle P entspricht dem absoluten Betrag des Gradienten:

$$\|\Delta z\| = \sqrt{p^2 + q^2} \qquad p = \frac{\partial z}{\partial x} \qquad q = \frac{\partial z}{\partial y} \qquad (5.2\text{-}2)$$

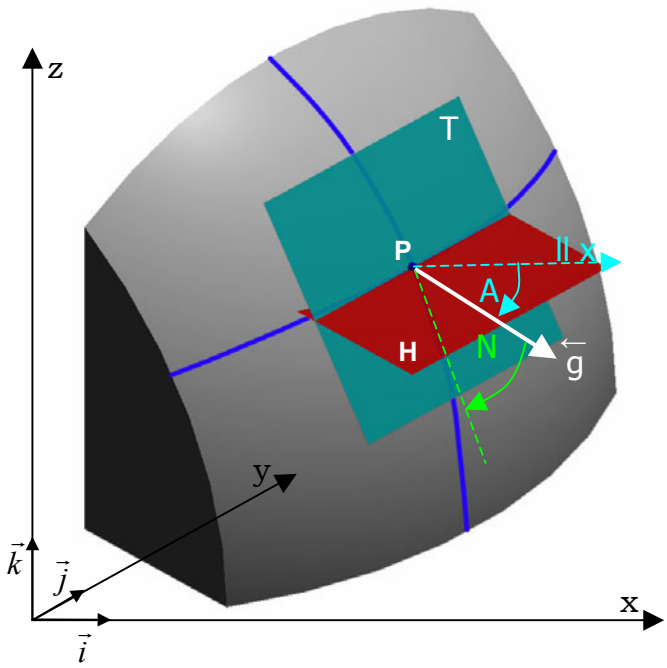


***Abb.5.1**: Definition des Gradienten* $\vec{g}$, *Hangneigung* **N** *und Exposition* **A**.

Die Hangneigung *N* in einem Punkt *P* wird üblicherweise als Schnittwinkel zwischen der Tangentialebene T und der horizontalen Bezugsebene *H* angegeben. (S. Abb. 5.1).

Hangneigung in Grad:

$$N[°] = arctg\sqrt{p^2 + q^2} \qquad (5.2\text{-}3)$$

Die Hangneigung wird manchmal auch in Prozent der relativen Höhenänderung in Beziehung zur horizontalen Distanz angegeben.

Hangneigung in Prozent: $$N[\%] = 100\sqrt{p^2 + q^2} \qquad (5.2\text{-}4)$$

Die Hangneigung provoziert eine Umwandlung von potenzieller Energie in kinetische Energie der in Bewegung gebrachteten Masse (s. Abb. 5.2). Dafür ist der Gradient ein Maß für die Fließgeschwindigkeit. Er steuert Abfluss und Erosion, die Tiefen des Bodenhorizonts sowie der Vegetation. Der Einfluss der Hangneigung auf die Bodenfeuchtigkeit lässt sich folgendermaßen überlegen: Wenn sich die Hangneigung vergrößert, vergrößert sich auch die Geschwindigkeit des Wasserabflusses sowie die tatsächliche Fläche des Geländes. Damit vermindert sich die Beregnung pro Einheitsfläche und somit auch die Wasserinfiltration, während die Abfluss- sowie die Evaporationsfläche sich vergrößern. Das Ergebnis ist die Verringerung der Bodenfeuchtigkeit (URL 16).

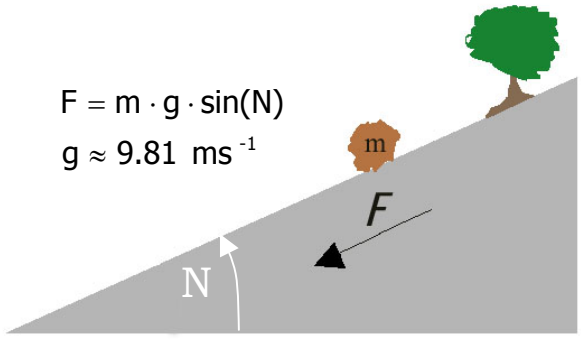


***Abb.5.2**: Einfluss der Neigung auf die gravitationsinitiierende Bewegung auf einem Hang.*

Die Exposition *A* an der Stelle *P* ist durch die Richtung des Gradienten definiert (s. Abb. 5.1). Die Richtung eines Vektors wird durch Normierung mit seinem Betrag ermittelt:

$$\vec{g}_e = -\frac{\Delta z}{\|\Delta z\|} \qquad (5.2\text{-}5)$$

Da die Exposition, im Gegensatz zum Gradienten, hangabwärts gemessen wird, entsteht das Minuszeichen.

Die Exposition wird gewöhnlich in Grad ausgedrückt. Man misst sie von der x-Achse (Nordrichtung) ausgehend im Uhrzeigersinn, bis zum normierten Gradientenvektor $\vec{g}_e$:

$$A = arctg\left(\frac{q}{p}\right) \qquad (5.2\text{-}6)$$

q und *p* entsprechen der Formel 5.2-2. *p* darf nicht Null sein.

Die Exposition ist die horizontale Richtung der Hangneigung und bestimmt die Richtung des Oberflächenabflusses. Zusammen mit den Neigungsgradienten bestimmt sie die potenzielle Insolation der Geländeoberfläche und somit auch die Verdunstung (die Evapotranspiration). Auf der nördlichen Hemisphäre ist mehr Bodenfeuchtigkeit an nördlichen Berghängen zu erwarten.

5.2.1.3 Krümmung

Unter der Krümmung einer zweidimensionalen Oberflächenfunktion z=f(x,y) versteht man allgemein die Matrix der zweiten partiellen Ableitungen (Bolch & Brenning 2001):

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \end{pmatrix} \qquad (5.2\text{-}7)$$

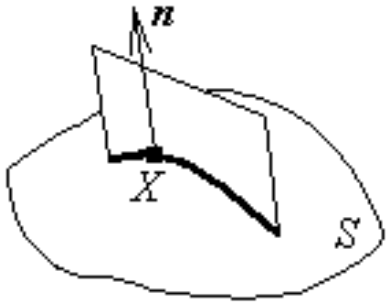


Abb.5.3 *: Verschneidung einer Oberfläche S durch normale Schnittebene.*

Diese ist jedoch schwer zu interpretieren. Daher beschränkt man sich in der Geomorphometrie auf Krümmungskomponenten, die durch bestimmte Ebenen herausgeschnitten werden und eine besondere hydro/geomorphologische Bedeutung haben. In allen Fällen, außer der Horizontalkrümmung, handelt es sich um normale Schnittebenen, die in eine besondere Lage um den Normalvektor *n* rotiert sind (s. Abb. 5.3).

Die Vertikalkrümmung stellt die größte Änderung des Gravitationspotenziales dar (natürlich unter der Voraussetzung, dass das DGM die echten orthometrischen Höhen beinhaltet). Sie beeinflusst direkt die Beschleunigung des Oberflächenabflusses. Die Horizontalkrümmung gibt die Wölbung von Linien des gleichen Gravitationspotenzials an. Sie entspricht direkt der Aspektänderung im jeweiligen Punkt. Tangentialkrümmung wird sehr oft mit Horizontalkrümmung vertauscht, weil sie eine ähnliche geomorphologische Bedeutung hat. Sie beeinflusst die Konvergenz/Divergenz des Abflusses.

Außerdem lassen sich zwei Hauptkrümmungen berechnen, die die geringste sowie größte Krümmung aufweisen.

Für eine beliebige Oberfläche *S* gibt es vier kardinale Richtungen der normalen Schnittebene und somit entstehen folgende vier normale Schnitte (s. Abb. 5.4):

- AA' - Vertikalschnitt (Linie des Gradienten)
- EE' - Tangentialschnitt
- CC' und DD' –Hauptschnitte

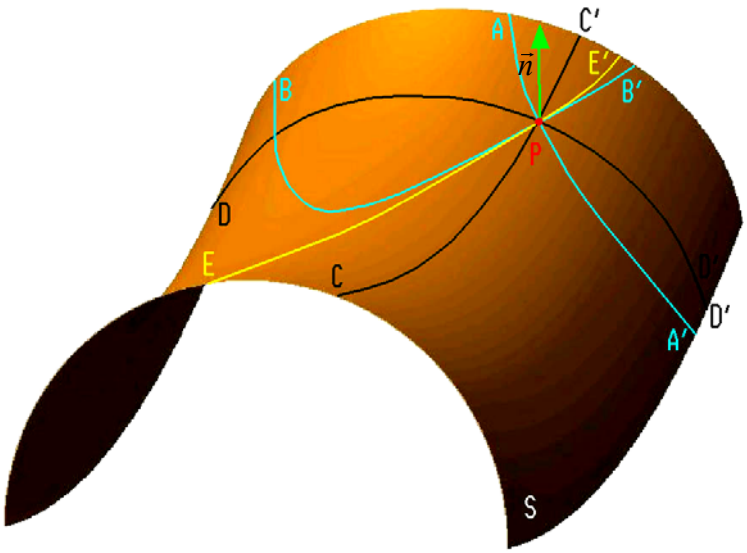


Abb.5.4 *: Vier kardinale Normalschnitte (AA'-Vertikalschnitt, EE'-Tangentialschnitt, CC' und DD' - Hauptschnitte) sowie Horizontalschnitt BB' einer beliebigen Fläche S.*

Vertikal- und Tangentialschnitt sind neben der Oberflächenform auch durch das Gravitationsfeld definiert. Für die Hauptschnitte sowie für den Horizontalschnitt ist nur die Oberflächenform relevant.

Da für den Oberflächenabfluss die Vertikal-, Tangential- sowie mittlere Krümmung von größter Bedeutung sind, werden sie in dieser Arbeit etwas näher diskutiert. Eine ausführliche Beschreibung von Reliefparametern, mit besonderem Schwerpunkt auf Krümmungen, findet man in (Shary 2002).

5.2.1.3.1 Vertikalkrümmung

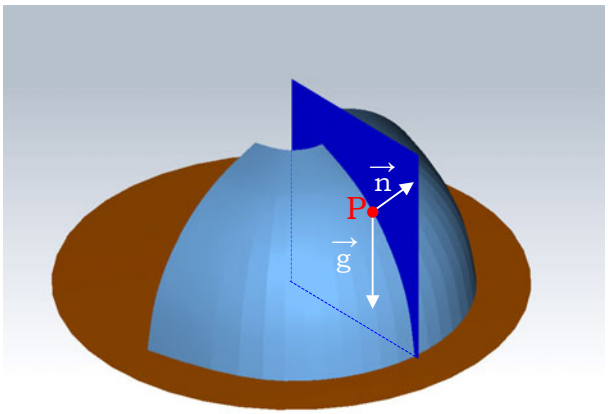


Abb.5.5 *: Geometrische Interpretation der vertikalen Krümmung.*

Die Geländeoberfläche wird durch eine Vertikalebene geschnitten, die den Gravitationsvektor $\vec{g}$ sowie die Oberflächennormale $\vec{n}$ in Punkt *P* enthalten (s. Abb. 5.3). Die Vertikalkrümmung ist definiert als Krümmung der gewonnenen Schnittkurve in differenzieller Umgebung des Punktes *P*. Die Vertikalkrümmung k_v ist die Funktion der partiellen Ableitungen von z=f(x,y) und wird in m^{-1} Einheiten ausgedrückt (URL 16) (s. Formel 5.2-8):

$$k_v = -\frac{p^2 r + 2pqs + q^2 t}{(p^2 + q^2)\sqrt{(p^2 + q^2)^3}}$$

$$p = \frac{\partial z}{\partial x}, \quad q = \frac{\partial z}{\partial y}, \quad r = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}, \quad s = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}, \quad t = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \qquad (5.2\text{-}8)$$

Auf die partiellen Ableitungen (p, q, r, s, t) wird am Ende dieses Kapitels ausführlich eingegangen.

k_v ist ein Maß für die Beschleunigung sowie Verzögerung von Oberflächenabfluss. Bei $k_v>0$ wird der Oberflächenabfluss beschleunigt; bei $k_v<0$ wird er verzögert.

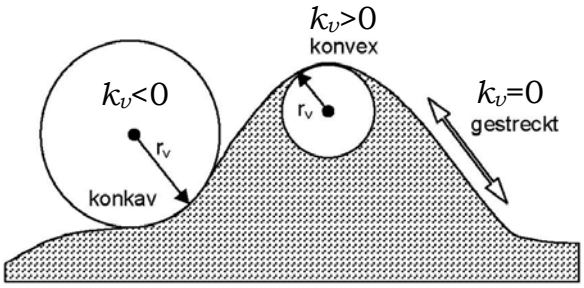


***Abb.5.6** : Einfluss der Vertikalkrümmung auf den Oberflächenabfluss (nach Kleefisch & Köthe 1993).*

5.2.1.3.2 Tangentialkrümmung (Querkrümmung)

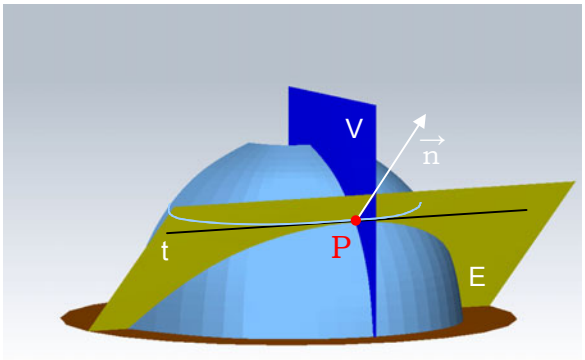


***Abb.5.7** : Geometrische Interpretation der tangentialen Krümmung.*

Die Geländeoberfläche wird nun durch eine Ebene *E* geschnitten, die den Normalvektor $\vec{n}$ auf der Geländeoberfläche sowie die Tangente an die Isolinie *t* beinhaltet (s. Abb. 5.7). Unter der Annahme, dass die Oberflächenfunktion wieder der Form z=f(x,y) hat, dann gilt (URL 16):

$$k_T = -\frac{q^2 r - 2pqs + p^2 t}{(p^2 + q^2)\sqrt{1 + p^2 + q^2}} \qquad (5.2\text{-}9)$$

Die Koeffizienten p, q, r, s, t sind die gleichen wie bei der Vertikalkrümmung (S. Formel 5.2-8).

Die Tangentialkrümmung ist ein Maß für die Konvergenz/Divergenz des Oberflächenabflusses. Bei $k_T<0$, konvergiert der Abfluss, sonst divergiert er. Bei $k_T=0$ gibt es weder eine Konvergenz noch eine Divergenz (Abb. 5.8).

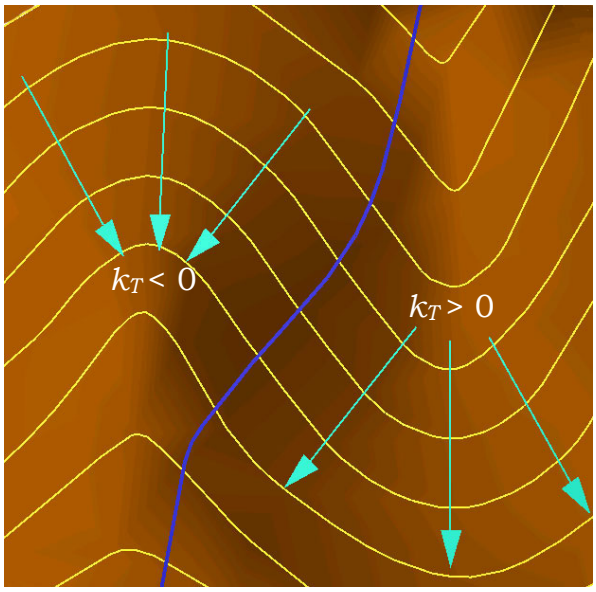


***Abb 5.8**: Einfluss der tangentialen Krümmung auf den Oberflächenabfluss.*

5.2.1.3.3 Horizontalkrümmung

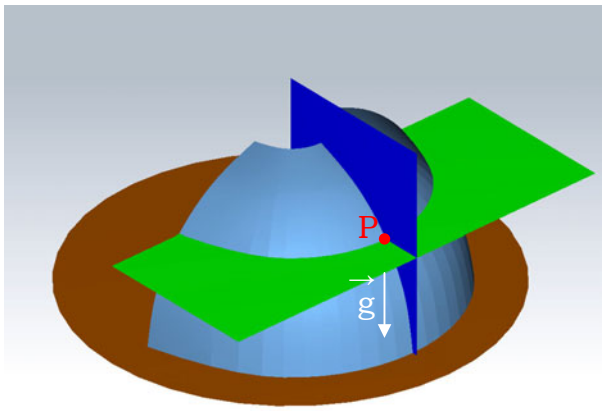


***Abb.5.9** : Geometrische Interpretation der horizontalen Krümmung.*

Die Geländeoberfläche wird durch eine Horizontalebene geschnitten. Die Horizontalkrümmung entspricht der Krümmung im Punkt *P* der so entstandenen Schnittkurve, der Höhenlinie (s. Abb. 5.9).
Unter der Annahme, dass die Oberflächenfunktion wieder die Form z=f(x,y) hat, gilt:

$$k_H = -\frac{q^2 r - 2pqs + p^2 t}{\sqrt{\left(p^2 + q^2\right)^3}} \qquad (5.2\text{-}10)$$

Die Horizontalkrümmung gibt die Änderung der Exposition an. Sie spiegelt sich in den Schichtlinien/Höhenlinien wider (s. Abb. 5.10) und lässt sich aus den topographischen Karten unmittelbar herausnehmen. Sie ist als ein Maß für Oberflächenkonvergenz/Divergenz seit Jahren etabliert, obwohl sie theoretisch nicht fundiert ist. Es kommt zu Missverständnissen zwischen Tangential- und Horizontalkrümmung, auch die Formeln werden hin und wieder vertauscht.

Sie unterscheiden sich um den Sinus der Hangneigung (nach Bolch & Brenning 2001):

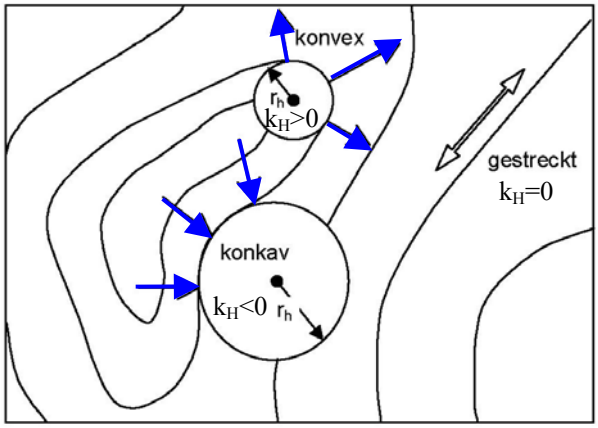


***Abb.5.10** : Horizontalkrümmung als Krümmung der Schichtlinien/Höhenlinien.*

$$k_T=k_H \sin(N) \qquad (5.2\text{-}11)$$

Das kann zu unendlich großen horizontalen Krümmungen bei Punkten, die eine horizontale Tangentialebene besitzen, führen.

5.2.1.3.4 Mittlere Krümmung

Die mittlere Krümmung k_M, im Oberflächenpunkt P ist ein arithmetisches ungewichtetes Mittel der Krümmungen von allen Normalschnitten, um den Normalvektor *n* herum. Die mittlere Krümmung ist negativ, wenn die Normalschnitte überwiegend konkav sind, andernfalls ist sie positiv. Sie ist null für so genannten "minimale Oberflächen", die eine möglichst kleine Fläche bei gegebenen Oberflächengrenzen besitzen. In diesem Fall neigt die Energie der Oberfläche zu einem Minimum, was nur in einem Gleichgewichtszustand erreichbar ist.
In physischem Sinn beschreibt die mittlere Krümmung, wie weit die Form der Oberfläche vom Gleichgewichtszustand, wo die Oberfläche eine minimale Größe besitzt, entfernt ist. Die mittlere Krümmung wird als ungewichtetes arithmetisches Mittel aus den Hauptkrümmungen k_1 und k_2 berechnet (Shary 2002):

$$k_M = \frac{k_1 + k_2}{2} = -\frac{(1+q^2)r - 2pqs + (1+p^2)t}{2\sqrt{(1+p^2+q^2)^3}} \qquad (5.2\text{-}12)$$

Die Koeffizienten p, q, r, s, t sind die gleichen wie bei Vertikalkrümmung (s. Formel 5.2-8).

Die mittlere Krümmung ist ein sehr repräsentatives topographisches Attribut, hinsichtlich der Beschreibung der geomorphologischen Prozesse, mehr als die horizontale oder vertikale Krümmung (URL 16).

5.2.1.3.5 Gauß'sche Krümmung

Ein weiterer Parameter zur Beschreibung der lokalen Reliefgeometrie ist die Gauß´sche Krümmung. Sie wird als Produkt von beiden Hauptkrümmungen definiert (nach Shary 2002):

$$k_G = k_1 \cdot k_2 = \frac{r \cdot t - s^2}{\left(1 + p^2 + q^2\right)^2} \qquad \textit{(5.2-13)}$$

Dieser Parameter ist für geomorphologische Untersuchungen der Geländeoberfläche besonders wichtig, denn er ermöglicht die automatische Erkennung von morphometrischen Grundformen.

Nämlich, die Gauß´sche Krümmung hat folgende wichtige Eigenschaften:

$k_G > 0$: Die Tangentialebene schneidet die Fläche nicht und die Fläche ist konkav oder konvex
$k_G < 0$: Die Tangentialebene schneidet die Fläche. Es handelt sich um eine Sattelfläche.
$k_G = 0$: Eine oder beide der Hauptkrümmungen sind gleich zu null. Die Fläche lässt sich in eine Ebene abwickeln (wie z.B. Zylinder, Kegel..).

Berechnet man die gauß´sche und die mittlere Krümmung für jede Rasterzelle in einem rasterbasierten DGM, dann ist es möglich, die ganze Oberfläche in fundamentale morphometrische Formen zu zerlegen:

a) $k_G>0$ & $k_M>0$ - Beide Hauptkrümmungen sind positiv. Die Oberfläche ist lokal konvex und der maximale Höhenwert liegt in der zentralen Rasterzelle. Zu dieser Klasse gehören Bergspitzen, Gipfelpunkte, Höhenpunkte, Hügeln und andere geomorphologische Formen, die ein lokales Maximum aufweisen (s. Abb.5.11 - a).

b) $k_G>0$ & $k_M<0$ - Beide Hauptkrümmungen haben ein negatives Vorzeichen. Die Oberfläche im jeweiligen Punkt hat eine konkave Form. Solche Formen weisen im Gelände lokale Depressionen (Mulden) auf, wo in der zentralen Rasterzelle der niedrigste Punkt ist (s. Abb.5.11 - b).

c) $k_G<0$ & $k_M>0$ - Die Hauptkrümmungen besitzen verschiedene Vorzeichen, wobei die konvexe Krümmung den größeren absoluten Wert als die konkave Krümmung hat. In diesem Fall handelt es sich um die Sattelfläche, die überwiegend nach unten (konvex) gekrümmt ist. Im Gelände wird eine solche Form als Wasserscheide bzw. als Bergkamm erkannt (s. Abb.5.11 - c).

d) $k_G<0$ & $k_M<0$ - Die Hauptkrümmungen haben wieder verschiedene Vorzeichen, diesmal herrscht aber die negative (konkave) Krümmung vor. Die Fläche ist wieder die Sattelfläche, die überwiegend nach oben (kon-

kav) gekrümmt ist (s. Abb.5.11 - d). Solche Formen findet man bei Tälern und anderen Gebieten des konzentrierten, aber kontinuierlichen Oberflächenabflusses.

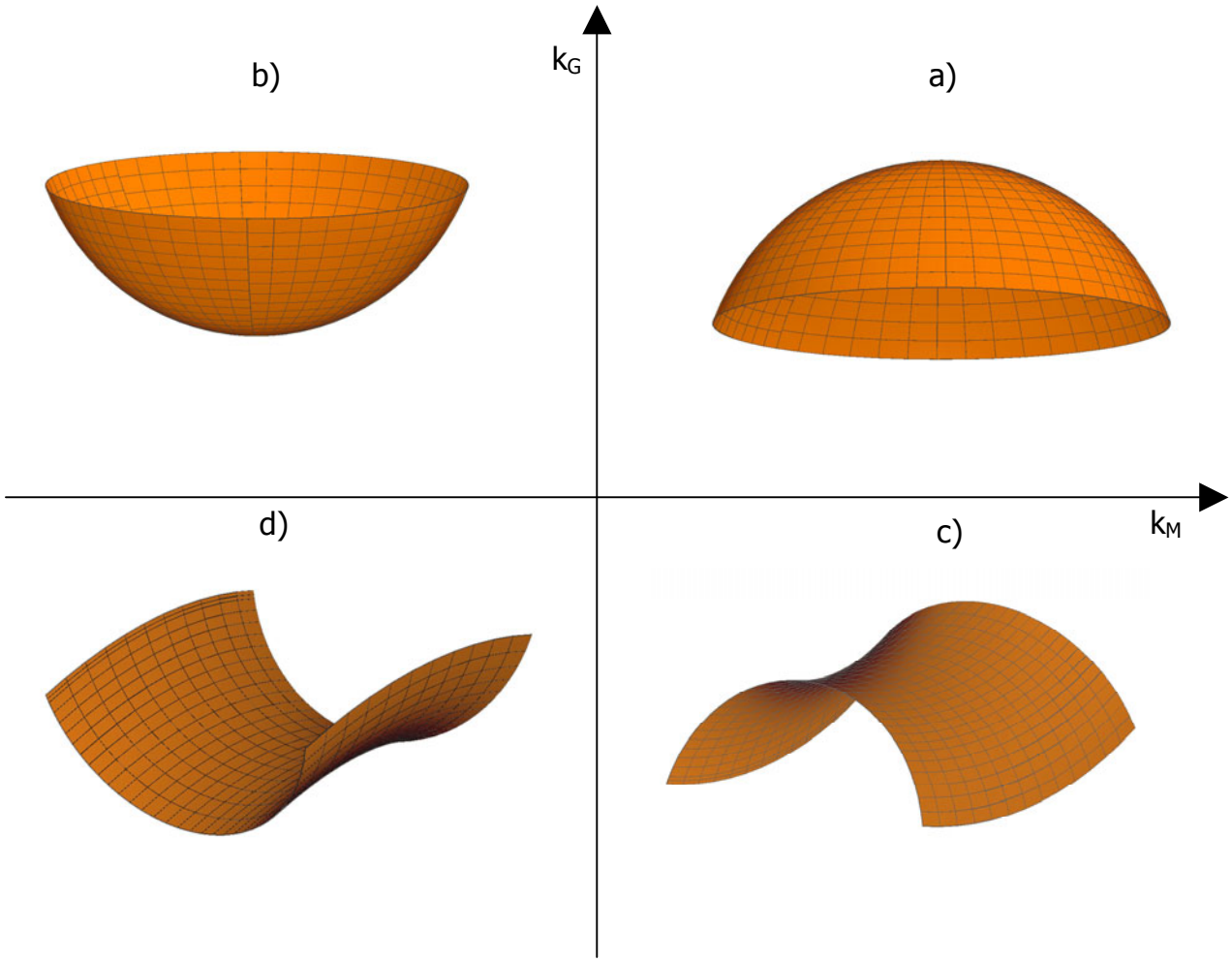


Abb.5.11 *: Gauß´sche Klassifikation der Landformen nach dem Vorzeichen von Gauß´scher und mittlerer Krümmung*

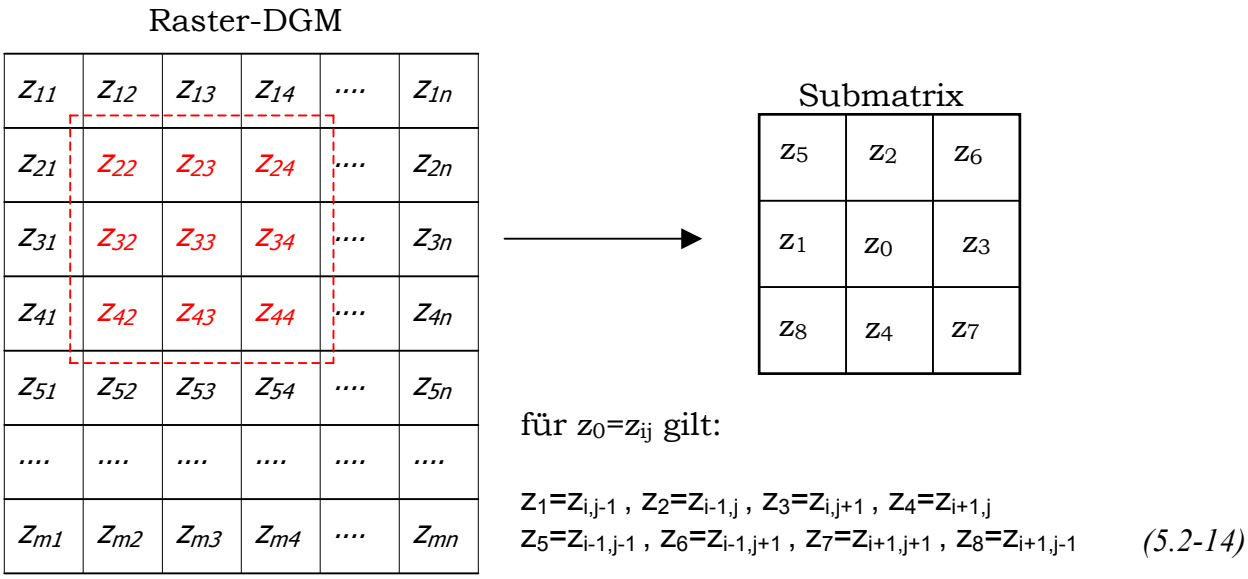
Die Ebene im Gelände lässt sich aufgrund der Gauß´schen und mittleren Krümmung leicht erkennen, denn in diesem Fall sind die beiden Krümmungen gleich null. Nach der eben geäußerten Diskussion ist es klar geworden, dass die Gauß´sche Krümmung zusammen mit mittlere Krümmung gut geeignet sind für morphometrische Untersuchungen von Geländeoberflächen, denn sie ermöglichen eine vollautomatische und zweifelsfreie Klassifikation nach grundsätzlichen morphometrischen Formen.
Durch Schwerkraft bedingte geomorphologische Prozesse, wie z.B. Oberflächenabfluss und damit verbundene Deposition sowie Erosion, werden besser durch die Kombination von Vertikal- und Tangentialkrümmung beurteilt. Sie sind nämlich aufgrund des Gravitationsvektors im jeweiligen Punkt definiert.

Die Krümmungen sind außerdem gut zur Erkundung von kleinen Geländeformen in einem großen Gebiet geeignet. Der Grund liegt in der Tatsache, dass sie

aus zweiten Ableitungen aufgebaut sind. Die Gauß´sche Krümmung ist besonders empfindlich, denn sie besteht aus der Multiplikation von beiden Hauptkrümmungen. Neben den aufzusuchenden Formen werden auch unerwünschte Artefakte im DGM angesprochen, die von Mess- und Interpolationsfehlern stammen. Dadurch kann die Kleinform-Analyse unbrauchbar werden.

5.2.2 Numerische Berechnungen von Parametern der lokalen Reliefgeometrie

Die Parameter der lokalen Reliefgeometrie lassen sich aus der Beziehung eines Rasterpunktes in seiner unmittelbaren Nachbarschaft ermitteln. In einem Raster-DGM ist diese Nachbarschaft besonders einfach durch eine Maske (oder „Fenster") definiert. Die Maske ist gewöhnlich als 3x3 Submatrix realisiert, in deren Zentrum sich die Rasterzelle befindet, für die die Parameter berechnet werden sollen (s. Abb. 5.12). Die einzelnen Elemente dieser Submatrix enthalten die Höhenwerte (Z_0-Z_8), deren Position bezüglich der zentralen Rasterzelle implizit durch ihre Lage innerhalb der Rasterstruktur der Submatrix gegeben ist (s. Formel 5.2-14).



für $z_0=z_{ij}$ gilt:

$z_1=z_{i,j-1}$, $z_2=z_{i-1,j}$, $z_3=z_{i,j+1}$, $z_4=z_{i+1,j}$
$z_5=z_{i-1,j-1}$, $z_6=z_{i-1,j+1}$, $z_7=z_{i+1,j+1}$, $z_8=z_{i+1,j-1}$ *(5.2-14)*

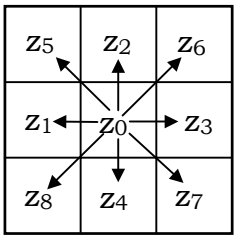
***Abb.5.12** : Die Höhenauswahl aus einem Raster-DGM durch die 3x3 Maske und daraus entstandene Submatrix zur Parameterableitung.*

Für jede Zelle im Raster-DGM, außer den Randzellen, wird die entsprechende Submatrix erzeugt und die Parameter werden grundsätzlich auf zwei verschiedene Arten berechnet, und zwar:

- durch direkte Parameterableitung
- durch die lokale Interpolation

5.2.2.1 Direkte Parameterableitung

Das einfachste Verfahren, die Hangneigung zu bestimmen, besteht darin, die Hangneigung gleichzusetzen mit dem stärksten Gefälle, das zwischen der zentralen Rasterzelle und ihren tiefer gelegenen Nachbarn entsteht (Peucker & Douglas 1975). Hierzu wird ein Neigungswerte-Feld benutzt, das alle 8 Neigungswerte enthält, die aufgrund der 8 Nachbarzellen nach der folgenden Formel berechnet werden:



$$tg\alpha_{MAX} = \max\left[\frac{|z_0 - z_i|}{d}\right]_{i=1}^{i=8} \quad \begin{cases} i \in [1,2,3,4], & d = s \\ i \in [5,6,7,8], & d = s\sqrt{2} \end{cases} \qquad (5.2\text{-}15)$$

wobei s bezeichnet die Rasterweite

Abb.5.13 *: 8 mögliche Richtungen der maximalen Hangneigung (Expositionen) innerhalb einer Submatrix.*

Es ist leicht zu merken, dass auf diese Weise auch Gipfelpunkte eine Neigung und Exposition erhalten könnten.

Diese Methode wird nur sehr selten benutzt, denn sie ignoriert den kontinuierlichen Verlauf der Geländeoberfläche zwischen Rasterpunkten. Die Exposition kann nur in die Richtung zur Nachbarzelle mit stärkster Neigung zugewiesen werden und demzufolge gibt es in einem quadratischen Raster nur 8 diskrete Richtungen, die immer ein Vielfaches von 45° sind (s. Abb. 5.13). Die Krümmungen können mit den in der Submatrix vorhandenen Neigungswerten nur grob geschätzt werden. Mehr über die direkte Parameterableitung und die daraus abgeleiteten morphometrischen Parameter findet man in (Peucker & Douglas 1975).

Die angeschnittenen Probleme lassen sich durch eine lokale Oberflächeninterpolation umgehen, womit eine quadratische oder biquadratische Oberfläche durch die Knotenpunkte gelegt wird.

5.2.2.2 Lokale Interpolation

Für die lokale Oberflächeninterpolation wendet man eine zweidimensionale, kontinuierliche Funktion an. Sie dient als lokaler Oberflächeninterpolator, in der Umgebung des zu untersuchenden Punktes. Diese Umgebung wird wieder durch die Submatrix bestimmt, wie sie schon im Abb. 5.12 erklärt wurde. Als Oberflächeninterpolator benutzt man gewöhnlich ein Polynom zweiten Grades, das innerhalb seines Anwendungsbereiches, stetig, glatt und mindestens zweimal differenzierbar ist. Polynome sehr niedrigen Grades erlauben die Be-

rechnung von Krümmungen nicht, denn ihre zweiten Ableitungen sind gleich null. Polynome der dritten und höheren Ordnung lassen sich nicht aufgrund der 3x3 Submatrix berechnen. Es gibt verschiedene Polynome, die als lokaler Oberflächeninterpolator dienen können. Am häufigsten sind die folgenden zwei:

- Methode von Evans
- Methode von Zevenbergen und Thorne

5.2.2.3 Methode von Evans

Evans (1979) schlägt eine zweidimensionale quadratische Funktion in folgender Form vor:

$$z = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f \qquad (5.2\text{-}16)$$

Sie lässt sich in Form eines beliebigen Kegels anschreiben:

$$ax^2 + 2hxy + by^2 + 2jx + 2ky + m = 0 \qquad (5.2\text{-}17)$$

wobei h=c/2, j=d/2, k=e/2, und m=f-z .

Schneidet man den Kegel durch horizontale Ebenen, können folgende geometrische Formen, abhängig von den Parametern a, b und h entstehen:

- Ellipse für $ab - h^2 > 0$
- Parabel für $ab - h^2 = 0$
- Hyperbel für $ab - h^2 < 0$

Weil die Schichtlinien/Höhelinien auch die horizontalen Schnitte des Geländes sind, spiegeln sich die o.g. Kegelschnitte in ihnen wider. Für Hügel und Mulden sind die Schichtlinien ellipsenförmig. Bergkammlinien und Täler (Wasserscheiden und Gebiete des konzentrierten Abflusses) verursachen parabelförmige Schichtlinien. Sattelgebiete weißen eine hyperbolische Form auf (s. Abb. 5.14).

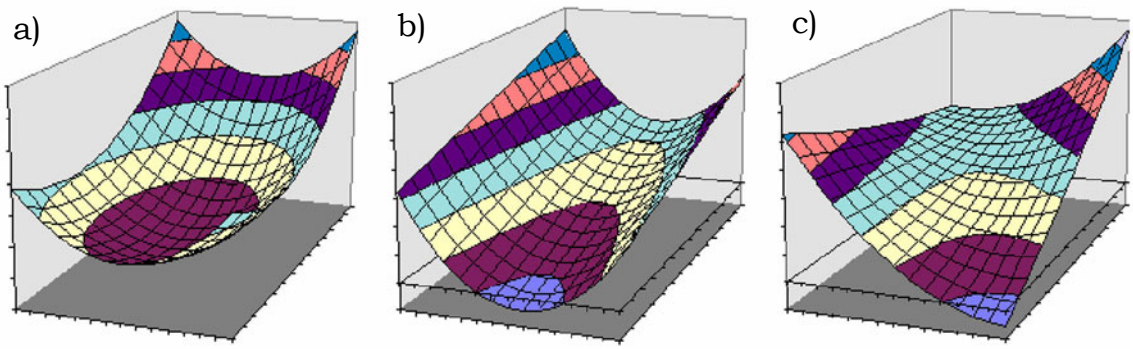


***Abb.5.14** : Drei quadratische Oberflächentypen: a) elliptische b) parabolische c) hyperbolische (nach Wood 1996)*

Evans berechnet die 6 Koeffizienten der Flächenfunktion (Formel Nr. 5.2-16) durch Ausgleichung nach den kleinsten Quadraten, weil sich ihre Flächenfunktion nicht exakt an die 9 Höhen der 3x3 Submatrix anpassen lässt. Sind die Rasterzellen innerhalb der Submatrix wie in der Abb. 5.15 angeordnet, dann lassen sich die 5 partiellen Ableitungen (s. Formel 5.8) in dem Zentralpunkt $P_5(0,0,z_5)$ aufgrund der Höhenwerte und der Größe der Rasterzelle w leicht berechnen (nach URL 17):

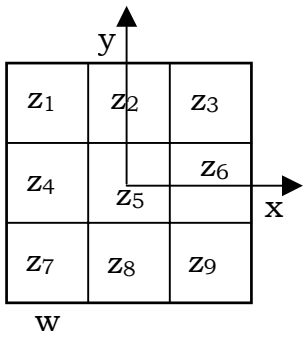


***Abb.5.15** : Zellenindexierung bei der Methode von Evans*

$$r = \frac{z_1 + z_4 + z_7 + z_3 + z_6 + z_9 - 2(z_2 + z_5 + z_8)}{3w^2}$$

$$s = \frac{z_1 + z_2 + z_3 + z_7 + z_8 + z_9 - 2(z_4 + z_5 + z_6)}{3w^2}$$

$$t = \frac{z_3 + z_7 - z_1 - z_9}{4w^2}$$

$$p = \frac{z_3 + z_6 + z_9 - z_1 - z_4 - z_7}{6w} \qquad (5.2\text{-}18)$$

$$q = \frac{z_1 + z_2 + z_3 - z_7 - z_8 - z_9}{6w}$$

Ein Nachteil der Methode von Evans ist das Vorhandensein von Unterschieden zwischen der vorhandenen und der interpolierten Höhe im Zentralpunkt z_5, was eine Folge der Ausgleichung ist. Zevenbergen & Thorne 1987 wiesen auf dieses Problem hin, und wählen eine allgemeinere Flächenfunktion, die durch genau 9 Stützpunkte festgelegt ist.

5.2.2.4 Methode von Zevenbergen und Thorne

Die quadratische Flächenfunktion von Evans wird in drei zusätzliche Koeffizienten folgendermaßen erweitert:

$$z = ax^2y^2 + bx^2y + cxy^2 + dx^2 + ey^2 + fxy + gx + hy + i \qquad (5.2\text{-}19)$$

Da die Höhendaten beim GRID-DGM eine regelmäßige und gitterähnliche Struktur besitzen, lassen sich die unbekannten neun Koeffizienten, nach der Finiten-Differenzen-Methode leicht berechnen (s. Formel 5.2-20 - nach Conrad 1998). Dabei sind die Höhen innerhalb der Submatrix auf die gleiche Weise, wie bei der Methode von Evans, angeordnet.

$$
\begin{aligned}
a &= [(z_1 + z_3 + z_7 + z_9)/4 - (z_2 + z_4 + z_6 + z_8)/2 + z_5]/w^4 \\
b &= [(z_1 + z_3 - z_7 - z_9)/4 - (z_2 - z_8)/2]/w^3 \\
c &= [(-z_1 + z_3 - z_7 + z_9)/4 - (z_4 - z_6)/2]/w^3 \\
d &= [(z_4 - z_6)/2 - z_5]/w^2 \\
e &= [(z_2 - z_8)/2 - z_5]/w^2 \\
f &= (-z_1 + z_3 + z_7 - z_9)/4w^2 \\
g &= -(z_4 + z_6)/2w \\
h &= (z_2 - z_8)/2w \\
i &= z_5
\end{aligned}
\qquad \textit{(5.2-20)}
$$

Der Ursprung des lokalen Koordinatensystems fällt mit der zentralen Rasterzelle innerhalb der Submatrix zusammen, sodass die Berechnung der partiellen Ableitungen für den Zentralpunkt $(0,0,z_5)$ ziemlich einfach wird:

$$r = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = 2d, \quad s = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = f, \quad t = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = 2e, \quad p = \frac{\partial z}{\partial x} = g, \quad q = \frac{\partial z}{\partial y} = h \qquad \textit{(5.2-21)}$$

So einfache Ausdrücke ermöglichen eine direkte Berechnung von Parametern der lokalen Geometrie, ohne zuerst die lokale Interpolation durchführen zu müssen. Die Reliefparameter können aufgrund der Höhen und der Größe der Rasterzelle berechnet werden. Damit kann man der Hangneigung auf folgende Weise berechnen:

Nach der Formel 5.2-2 gilt: $\|\Delta z\| = \sqrt{p^2 + q^2}$ $\quad p = \frac{\partial z}{\partial x}$ $\quad q = \frac{\partial z}{\partial y}$

Aufgrund 5.2-20 und 5.2-21 folgt:

$$\|\Delta z\| = \frac{\sqrt{(z_4 - z_6)^2 + (z_2 - z_8)^2}}{2w} \qquad \textit{(5.2-22)}$$

Bei der Berechnung der Hangneigung wird die Höhe der Zentralzelle (z_5) nicht genommen, obwohl die berechnete Hangneigung sich gerade auf diese Zelle bezieht. Somit können Generalisierungsfehler auftreten, besonders beim bewegten Gelände und größeren Rasterzellen. In solchen Fällen kann die Verwendung einer gleitenden Ebene bei der lokalen Interpolation vorteilhaftes sein, denn dabei hat die Submatrix nur 2x2 Zellen. Eine ausführliche Beschreibung dieser Problematik findet man in (Dunn & Hickey, 1988 und Hickey, 2000).

5.2.3 Hydrologisch relevante Parametrisierung der Relieftopologie

Hydrologisch relevante Topologie des Reliefs organisiert alle Daten auf der Geländeoberfläche nach Einzugsgebieten, die miteinander unabhängig betrachtet werden. Innerhalb eines jeden Einzugsgebietes sind die Geländepunkte hierarchisch verbunden durch Fließlinien des Oberflächenabflusses. Die hierarchische Bildung der topologischen Beziehungen geht nach dem Prinzip "wer entwässert wo", somit werden alle Punkte, deren Abfluss den betrachteten Punkt erreicht, als topologisch höher bezeichnet.

Da die Analysen des Oberflächenabflusses im Fokus dieser Arbeit liegen, wird die regelnde Wirkung des Reliefs an hydrologischen Prozessen etwas näher beschrieben. Damit kann man besser die Bedeutung des Oberflächenabflusses im Zusammenhang mit anderen hydrologischen Prozessen verstehen. Im Folgenden werden vorhandene Methoden zur Simulation des Oberflächenabflusses diskutiert, mit Schwerpunkt auf die Methode von Rieger (Rieger 1992).

5.2.3.1 Der Einfluss des Reliefs beim Steuern von hydrologischen Prozessen

Das Wasser, das über einer Geländeoberfläche fließt, verursacht und unterstützt geomorphologische Prozesse, wie Erosion und Deposition (Aufschüttung) und formt das vorhandene Gelände mehr oder weniger um, je nach der Intensität und Dauer des Oberflächenabflusses sowie pädologischen Eigenschaften des Geländes. Andererseits regelt das Relief die räumliche Verteilung des Wassers, das in Form von Niederschlägen auf die Geländeoberfläche gelangt. Nach der Wasserbilanzgleichung, die alle Prozesse des globalen Wasserkreislaufes umfasst, verteilt sich das an die Erdoberfläche gelangende Wasser N (Niederschlag) auf den Oberflächenabfluss (Q_o), den unterirdischen Abfluss (Q_u) und die Verdunstung (V):

$$N = Q_o + Q_u + V \qquad (5.2\text{-}23)$$

Beim Modulieren der hydrologischen Prozesse spielt das Relief eine entscheidende Rolle, und zwar bei allen drei Komponenten der Wasserbilanzgleichung. Die Verdunstung ist unmittelbar abhängig von den empfangenen Strahlungssummen der Sonne und somit von Exposition sowie Hangneigung beeinflusst. Auch die Verteilung des grundwasserunabhängigen unterirdischen Abflusses, des s.g. Zwischenabflusses oder Interflow, erfolgt in Abhängigkeit von der Gestalt des Reliefs. Ein Teil der Niederschlagsmenge wird in dem Boden versickern, läuft aber überwiegend oberflächenparallel durch die Poren und Höhlen in den Boden. Vor dem Einfluss in einen Vorfluter kann der Zwischenabfluss in Form einer Wasserquelle wieder zur Geländeoberfläche kommen und auf diese Weise in den Oberflächenabfluss übergehen.

Oberflächenabfluss tritt ein, wenn mindestens eine der folgenden drei Bedingungen erfüllt ist:

- Die Niederschlagrate übertrifft die Infiltrationsrate. Meistens beim Gussregen kann der Boden den ganzen Niederschlag nicht in relativ kurze Zeit versickern lassen. Der Überschuss fließt oberflächlich ab.

- Die s.g. Bodenmatrix ist wassergesättigt. Es reichen dann Niederschläge geringer Intensität, um den Oberflächenabfluss zu aktivieren.

- Unterirdischer Abfluss wird an die Oberfläche gezwungen (Zwischenabfluss), meistens wegen der Hangkonfiguration, oder der Stauschichten im Untergrund.

5.2.3.2 Die Algorithmen zur Simulation des Oberflächenabflusses

Die hydrologisch relevanten Parameter sowie Strukturelemente (Kammlinien, Tallinien, sowie Einzugsgebietsgrenzen) wurden traditionell aufgrund topographischer Karten durch intensive manuelle Arbeit erfasst. Die Entwicklung von computergestützten Methoden zur Erfassung des Gewässernetzes aus den DGM geht in die 60er Jahre zurück. Frühe Methoden waren noch immer ziemlich arbeitsintensiv (Speight 1968). Mit der schnellen Entwicklung von Computer-Technologie wurden sie aber in den Folgejahren voll automatisiert. Seit dem hat man eine ganze Reihe von Algorithmen entwickelt, die verschiedene Datenstrukturen sowie Abflussmodelle anwenden. Obwohl die ersten Algorithmen mit der Schichtlinien-Datenstruktur begründet wurden (Galant & Wilson 2000), geht man sehr schnell auf die rasterbasierte Datenstruktur über, meistens wegen einfacherer Programmierbarkeit sowie größerer Datenverarbeitungseffizienz. Wegen der größeren Komplexität bei der TIN-Datenstruktur erschienen diesbezügliche Algorithmen relativ spät (Tucker et al. 1999, Slingsby 2003, McAlister 2004).

Da sich diese Arbeit ausschließlich mit rasterbasierten Methoden befasst, die am weitesten verbreitet sind, wird nur auf diese Methode näher eingegangen.
Für die Ableitung von Reliefparametern, die auf dem Abfluss basieren, sind die Modelle zur Simulation des Abflussgeschehens von entscheidender Bedeutung. Je nachdem, wird die Rasterzelle linienförmig oder flächenförmig zu seiner Nachbarzelle entwässert, man unterscheidet:

- Eindimensionale Abflußmodelle

- Zweidimensionale Abflußmodelle

5.2.3.2.1 Eindimensionale Abflußmodelle

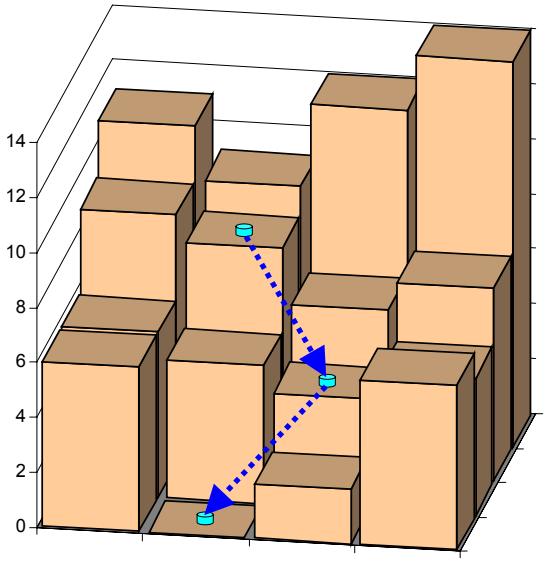


***Abb.5.16** : Prinzip der eindimensionalen Abflußmodelle.*

Eindimensionale Abflußmodelle konzentrieren die Wassermenge auf das Zentrum der Rasterzelle und entwässern hangabwärts in der Richtung des Höhengradienten, bis zur nächsten Nachbarzelle (s. Abb. 5.16). Dies entspricht dem Abflussgeschehen, das durch eine nulldimensionale Wasserquelle im Zentrum der Rasterzelle verursacht ist. Die Trägheit des Wassers wird vernachlässigt. Dem zu Folge wird die ganze Wassermenge einer beliebigen Zelle durch einen diskreten, eindimensionalen Abflusspfad bis zu seinem Vorfluter abgeleitet, woraus sich folgende Einschränkungen eindimensionaler Modelle ergeben:

- Es gibt keine Möglichkeit, den in der Fläche einer Rasterzelle erzeugten Abfluss divergieren zu lassen.
- Die möglichen Abflussrichtungen sind auf die acht Richtungen der Nachbarzellen im Raster-DGM beschränkt.

Vorteilhaft ist, dass der Abfluss einer Rasterzelle immer genau einer ihrer Nachbarzellen zugewiesen wird. Somit lässt sich die Rasterzelle immer eindeutig einem Einzugsgebiet zuordnen.

Die eindimensionalen Abflußmodelle wurden erstmals in einem "Deterministic 8" Algorithmus (O'Callaghan & Mark 1984) beschrieben. Um den Fehler, der durch die Beschränkung auf acht Abflussrichtungen entsteht, so klein wie möglich zu halten, wurden Modifikationen entwickelt: "Rho8" (Fairfield & Leymarie 1991) und "Kinematic Routing Algorithm" (Lea 1992).

5.2.3.2.1.1 Deterministic 8 Algorithm

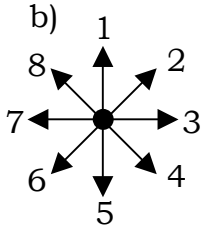
Die Methode wurde von 0'Callaghan und Mark (1984) eingeführt und ist als einfachstes Verfahren zur Simulation von Abflussgeschehen sehr verbreitet (Tarboton 1997). Der Abfluß einer Rasterzelle wird an diejenige seiner acht Nachbarzellen weitergeleitet, zu der das stärkste Gefälle besteht. Dabei wird das Gefälle unmittelbar - aufgrund der Höhen innerhalb der dazugehörigen Submatrix - berechnet (s. Formel 5.2-15). Alle Neigungswerte werden dann

nach ihrer Größe sortiert, und die Nachbarzelle mit dem größten positiven Neigungswert wird ausgewählt. Diese Nachbarzelle nimmt die ganze Wassermenge von der oberhalb liegenden Rasterzelle auf. Damit nimmt die Abflussrichtung eine von 8 möglichen diskreten Werten an. Sie werden in eine Ausgangmatrix meistens folgendermaßen kodiert (s. Abb. 5.17 - nach Qiming 2003):

a)

11	9	12	14
9	8	6	7
6	5	4	5
6	0	2	6

b)



c)

4	4	5	6
4	4	5	6
4	5	6	5
3	0	7	7

***Abb.5.17** : a) Höhenmatrix b) Vorschrift zur Kodierung der 8 möglichen Abflussrichtungen c) die Ausgangsmatrix mit kodierten Abflussrichtungen für jede Rasterzelle. Blaue Pfeile zeigen die kodierten Richtungen graphisch an.*

Der Null-Wert in der Ausgangmatrix bedeutet, dass die Rasterzelle keinen niedrigen Nachbar hat. Ein solcher Fall tritt bei den tiefsten Zellen innerhalb lokaler Depressionen (Mulden) ein.

Wegen der Diskretisierung der Abflussrichtungen in nur acht Werten, gibt es parallele Flusslinien innerhalb großer Gebiete, was unrealistisch ist. Diese Artefakte vermeidet man durch das Rho 8 Verfahren.

5.2.3.2.1.2 Rho 8

Die Methode wurde von Fairfield & Leymarie (1991) eingeführt. Die Abflussrichtung wird zufällig zu einer von tieferen Nachbarzellen gerichtet, mit der Wahrscheinlichkeit proportional zur Neigung (Tarboton 1997). Damit wird der Abfluss, im Gegensatz zu D8-Algorithmus, nicht mehr auf die acht vom Raster vorgegebenen Hauptrichtungen konzentriert. Das Wasser fließt über eine und dasselbe Gelände an die Oberfläche immer auf die gleiche Weise ab. Dafür ist ein stochastisches Modell, wie Rho8, für die Abflussmodellierung kaum geeignet. Die folgenden Nachteile beschränken die Anwendung sehr stark:

- Das Ergebnis ist nicht eindeutig reproduzierbar. Bei wiederholten Berechnungen bekommt man unterschiedliche Ergebnisse.

- Der Abfluss lässt sich nicht divergieren (denn es handelt sich um ein eindimensionales Abflussmodell).

- In Bereichen, wo ein paralleler gleichmäßiger Abfluss zu erwarten ist, treffen die Fließlinien zufällig zusammen und bilden unerwarteten Linien des konzentrierten Abflusses (Costa-Cabral & Burges 1994).

5.2.3.2.1.3 Kinematic Routing Algorithm (Lea 1992)

Wegen dieser ungünstigen Nachteile der stochastischen Abflußmodelle, schlägt Lea (1992) wieder ein deterministisches Verfahren vor. Die Grundidee ist ein eindimensionales Abflussmodell, das den Abfluß einer beliebigen Rasterzelle über die Geländeoberfläche auf eine realistische Weise leitet (Ryan & Boyd 2002).

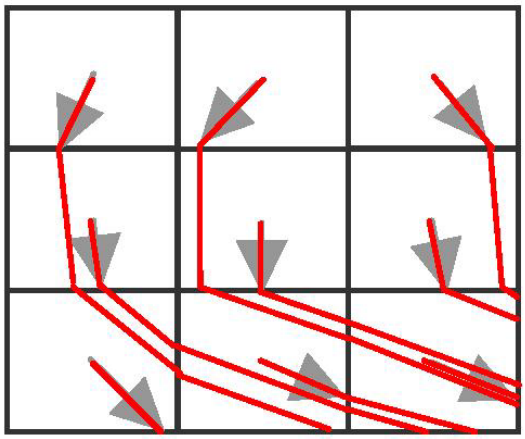


***Abb. 5.18**: Ermitlung einzelner Abflußpfade, graue Pfeile - die Expositionswerte, rote Linien - die Abflußpfade.*

Das Verfahren geht von der Vorstellung aus, dass in den Zentren der Rasterzellen Kugeln gesetzt werden, die hangabwärts trudeln, solange sie den Abflusspunkt des Einzugsgebietes oder den Modellrand erreichen (Tarboton 1997). Die so gewonnenen Kugelbahnen sind die gesuchten Abflusspfade. Man bekommt theoretisch so viele Abflusspfade, wie Rasterzellen im Modell vorhanden sind. Der einzelne Abflusspfad wird stückweise ermittelt, aufgrund der Expositionswerte der weiter untenliegenden Rasterzellen (s. Abb. 5.18).

Der Expositionswert für jede Rasterzelle wird aufgrund der Neigungskomponenten von zwei tiefer liegenden nichtdiagonalen Nachbarzellen ermittelt (s. Abb. 5.19). Sie ist nicht mehr auf 8 Richtungen beschränkt, sondern kann einen beliebigen Wert zwischen 0-2Π annehmen.

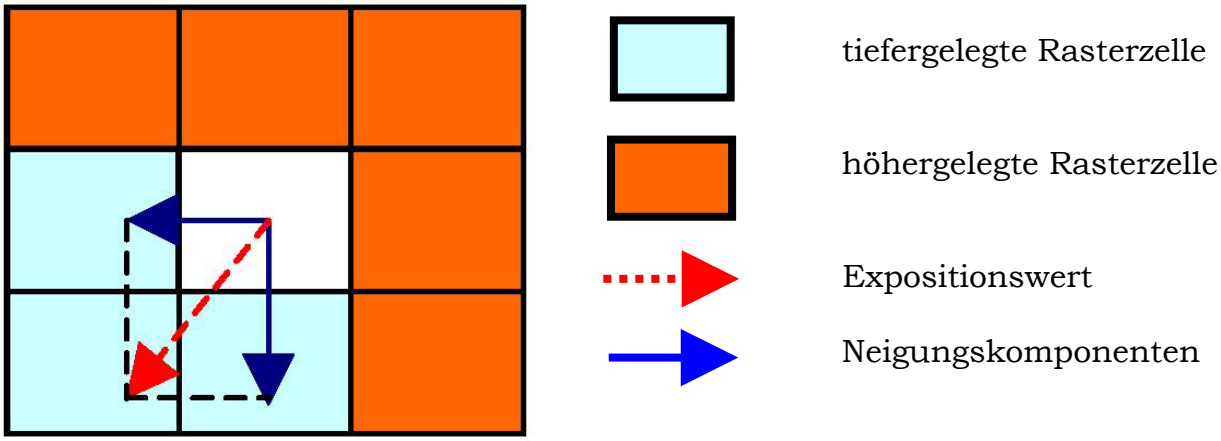


***Abb. 5.19**: Berechnung der Expositionswerte.*

Das Konzept, jeden Abflusspfad einzeln zu verfolgen, lässt sich rechentechnisch nur über eine abwärts suchende, rekursive Funktion verwirklichen. Ein effizientes paralleles Verfahren, mit Hilfe von höhensortiertem Index, kann man nicht anwenden.

5.2.3.2.2 Zweidimensionale Abflussmodelle

Eine elegantere und einfachere Lösung lässt sich durch Anwenden von zweidimensionalen Abflussmodellen verwirklichen. Auf diese Weise werden auch die anderen Einschränkungen von eindimensionalen Abflussmodellen vermieden. Im Gegensatz zu eindimensionalen Modellen ist die ganze Wassermenge nicht mehr punktartig innerhalb einer Rasterzelle konzentriert, sondern sie deckt die ganze Rasterzelle gleichmäßig ab. Damit lässt sich der Abfluss auf mehrere tiefer liegende Zellen verteilen. Je nach der Regel, wie der Abfluss an tiefer liegende Zellen weitergeleiten werden soll, unterscheidet man folgende Verfahren:

5.2.3.2.2.1 Multiple-Flow Direction Methode (MFD-Methode)

Die Methode wurde erstmals in (Quinn et al. 1991; Freeman 1991) veröffentlicht und modelliert das Abflussgeschehen durch Aufteilen des Abflusses auf alle tieferliegenden Nachbarzellen. Der Abflussanteilwert, der zu jeder Nachbarzelle fließt, wird proportional zum Neigungswert zwischen der Ausgangs-Rasterzelle und den Nachbarzellen angenommen. Dafür wird für jede Rasterzelle zunächst eine 3x3 Submatrix mit Neigungswerten N_i ermittelt. Danach berechnet man die Abflussanteilswerte q_i, nach folgender Formel:

$$q_i = \frac{N_i^k}{\sum_{j=1}^{8} N_j^k} \qquad (5.2\text{-}24)$$

Daher wird der Neigungswert N_i gleich Null genommen, wenn die Nachbarzelle i höher als die Ausgangszelle liegt.

a)

11	9	12
9	8	6
6	5	4

b)

2.1	1.0	2.9
1.0		-2.0
1.4	-3.0	-2.9

c)

0	0	0
0		0.25
0	0.38	0.37

***Abb. 5.20**: Prinzip der Ermittlung von Abflussanteilswerten; a) Ausschnitt aus der Höhenmatrix (die Ausgangsrasterzelle ist mit rotem Rechteck hervorgehoben) b) Submatrix mit Neigungswerten (die quadratischen Rasterzellen haben eine Seitenlänge von eins); c) die Abflussanteilswerte der Nachbarzellen.*

Freeman (1991) fügte den Faktor *k* ein, der die Neigungswerten N_i potenziert, um den Abflussdivergenz/-konvergenz zu steuern. Mit wachsendem k-Wert konzentriert sich der Abfluss stärker in Richtung des größten Gefälles. Dies wurde als ein Mechanismus gedacht, der unrealistisch große Abflussstreuungen verhindern soll, was der größte Nachteil dieser Methode ist (Costa-Cabral & Burges 1994). Mit wachsendem k-Wert richten sich aber die Abflussrichtungen auf die 8 kardinalen Richtungen verstärkt aus.

5.2.3.2.2.2 Deterministic Infinite Algorithm (D ∞)

Um die unrealistisch große Abflussstreuung bei der MFD-Methode möglichst gering zu halten, führte Tarboton (1997) eine neue Methode ein, die den Abfluss nicht an allen tieferliegenden Nachbarzellen verteilt. Die Methode basiert sich auf einer Idee von Lea (1992), der jeder Rasterzelle eine Abflussrichtung zuweist, wie sie schon im Kinematic Routing Algorithm verwirklicht wurde. Die Abflussrichtungen werden diesmal aber nicht für die Ermittlung der einzelnen Abflussbahnen verwendet, sondern zur Berechnung von Abflussanteilswerten an die Nachbarzellen. Dafür wird um die jeweilige Rasterzelle eine 3x3 Submatrix gelegt, die noch in 8 Dreiecke unterteilt wird. Der Expositionswert des steilsten Dreiecks bestimmt die gesuchte Abflussrichtung (Abb. 5.21).

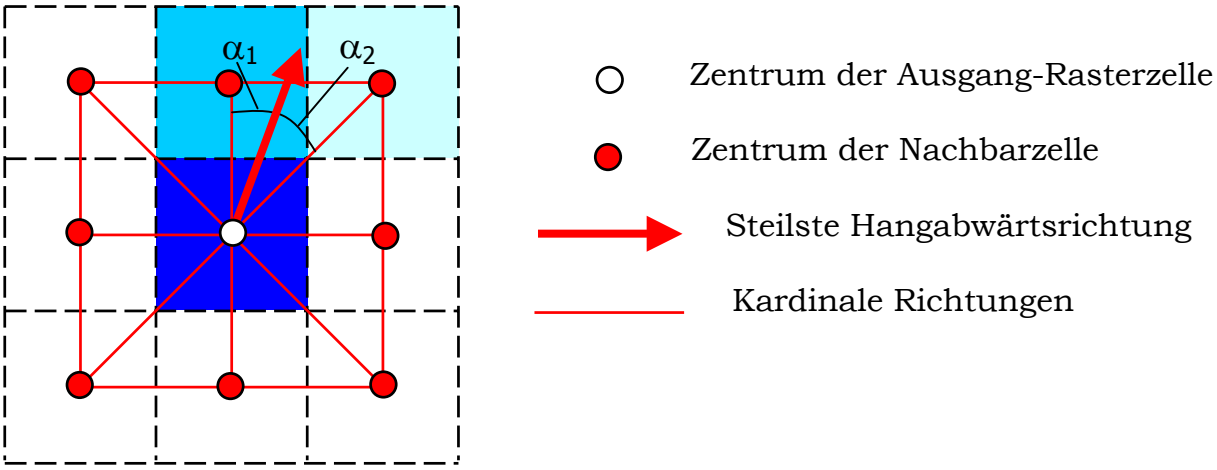


***Abb. 5.21**: Modellieren des Abflussgeschehens nach der D∞ Methode. Die steilste Hangneigung berechnet man durch 8 Dreiecksfacetten. Abflussanteilswerte werden proportional zur Winkeldifferenz zwischen der steilsten Hangabwärtsrichtung und den nächsten kardinalen Richtungen berechnet.*

Stimmt die Abflussrichtung mit einer kardinalen Richtung überein, wird der ganze Abfluss an die entsprechende (nur eine) Nachbarzelle übergeben. Sonst, teilt sich der Abfluss an zwei Nachbarzellen, nach dem folgenden Ausdruck (Tarboton 1997):

$$q_1 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad , \quad q_2 = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} \qquad (5.2\text{-}25)$$

5.2.3.3 Ermittlung der Flussläufe

Die Grundidee dieser Arbeit liegt darin, die abgeleiteten Flüsse als Strukturlinien in ein DGM einzuführen. Deshalb wird das Verfahren zur Ermittlung der Flussläufe etwas näher betrachtet.

Rieger (1992) gibt eine einfache Definition von Flüssen an, die die Grundbedingung für die computergestützte Ermittlung der Flussläufe sehr klar widerspiegelt: "Die Flüsse treten auf, wenn sich genügend Wasser in einem Talverlauf sammelt".

Dafür ist zunächst für jede Rasterzelle das zu ihr gehörende Einzugsgebiet zu bestimmen, das ganz durch die jeweilige Rasterzelle entwässert. Die Fläche dieses Einzugsgebietes ist ein Maß für den Durchfluss des Wassers durch die jeweilige Rasterzelle. Nimmt man die Fläche einer Rasterzelle als Maßeinheit, so reicht es aus, nur alle oberhalbliegenden Rasterzellen innerhalb des Einzugsgebietes zusammenzuzählen und die Anzahl mit der Fläche der Rasterzelle zu multiplizieren. Ist die so gewonnene Einzugsgebietsgröße größer als ein vorgegebener Schwellwert, wird die jeweilige Rasterzelle als potenzieller Flusslauf markiert (s. Abb. 5.22).

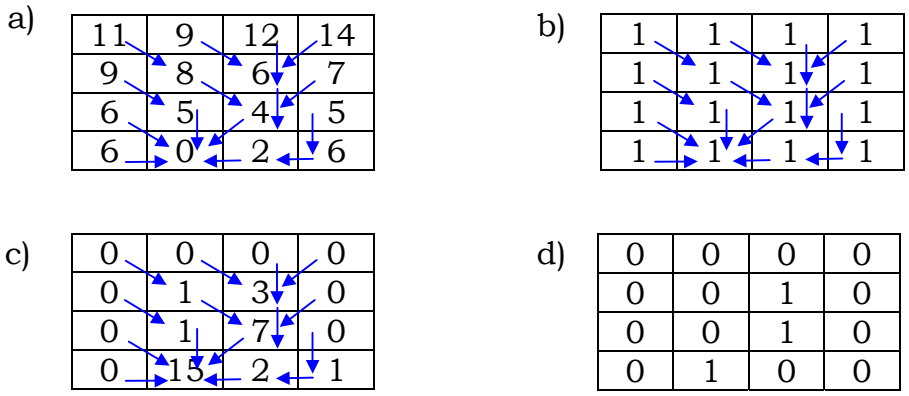


***Abb. 5.22**: Prinzip des computergestützten Bestimmen von Fußläufen. a) Höhenmatrix mit kategorisierten Abflussrichtungen, die durch blaue Pfeile angezeigt sind. b) Jede Rasterzelle wird durch eine und dieselbe Wassermenge regelmäßig beregnet. c) Alle Zellen, die durch die jeweilige Rasterzelle entwässern, werden aufgezählt. d) Der markierte potentielle Flusslauf (als Schwellwert ist gleich drei genommen).*

Die hierarchische Baumstruktur eines Flussnetzes wird durch ein aufsteigendes Suchen nach Nachbarzellen mit größtem Abflusswert erzeugt, beginnend von Rasterzellen am Rand des Modells, die ein lokales Minimum sowie genügend Abflussmenge aufweisen (Rieger 1992).

5.2.3.4 Wassersummation

Ein computergestütztes Verfahren, das für die jeweilige Rasterzelle alle oberhalbliegenden Rasterzellen aufsucht und ihre Abflussanteilwerte aufsummiert, wird als Wassersummation bezeichnet. Das Ergebnis dieses Verfahrens lässt sich auch geometrisch interpretieren, nämlich als die Fläche eines Gebietes, die voll durch die jeweilige Rasterzelle entwassert (s. Abb. 5.23).

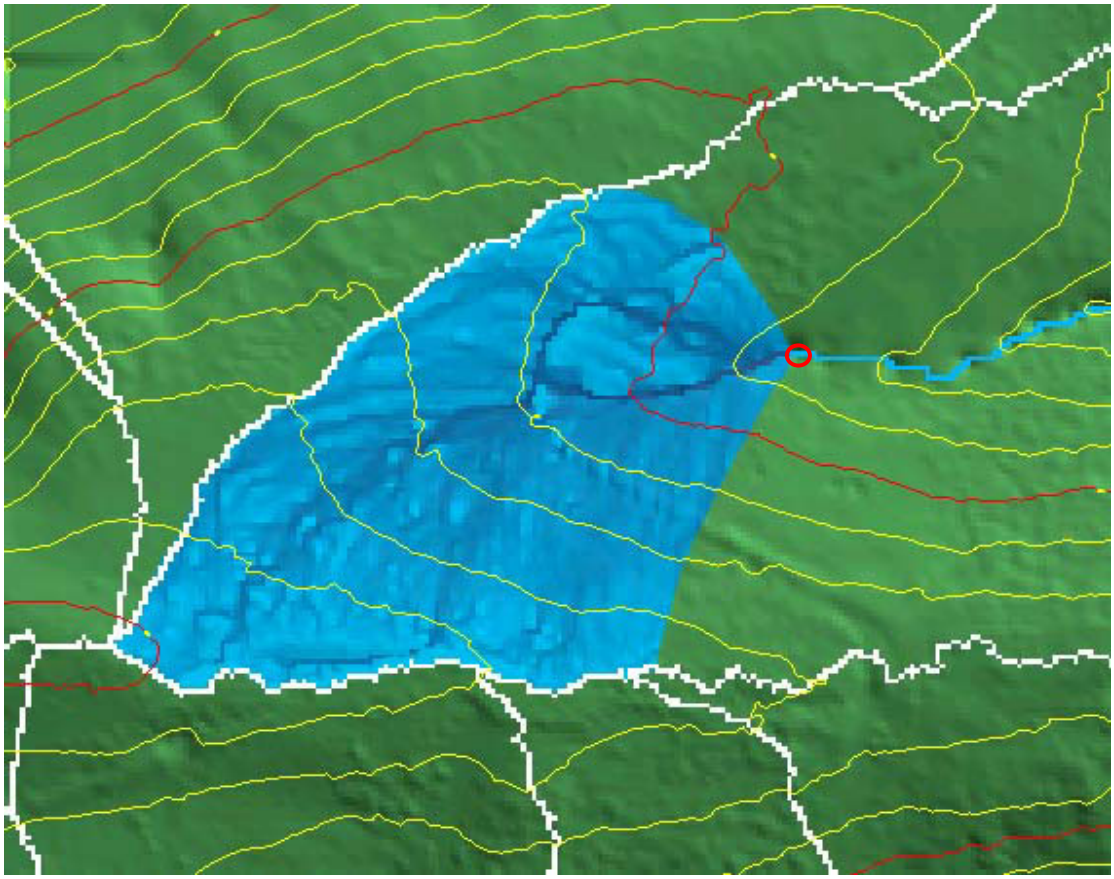


***Abb. 5.23**: Das Ergebnis der Wassersummation für eine Rasterzelle (durch roten Ring markiert) ist über eine geschummerte Darstellung eines realen Geländes gelegt. Die Wasserscheiden sind weiß hervorgehoben.*

Das Verfahren basiert sich auf einem iterativen Wechselspiel zwischen Beregnung und Abfluß, bis ein stationärer Abflusszustand über dem gesamten Modell erreicht wird. Man beginnt mit der Beregnungsphase, die alle Rasterzellen mit der Wassereinheit beregnet. Man schafft dies durch Addieren des Wertes 1 zum vorhandenen Abflussanteilwert. Während der Abflussphase entwässern alle Rasterzellen zu ihren nächsten Nachbarzellen. Je nach dem angewandten Abflussmodell werden die Abflussanteilswerte berechnet und mit den in der Nachbarzellen vorhandenen Abflussanteilswerten aufsummiert. Diese zwei Phasen werden als eine "Iteration" bezeichnet. Die Iterationen werden entweder solange fortgesetzt, bis auf dem längsten im Gebiet vorhandenen Pfad das Wasser vom 1. Iterationsschritt abgeflossen ist, oder es wird nach einer gewissen Anzahl von Iterationen abgebrochen, wenn keine nennenswerten Änderungen in der Erkennbarkeit größerer Formen mehr zu erwarten sind (Rieger 1992). Dementsprechend kann man die Iterationsanzahl durch die Anzahl der Rasterzellen entlang des längsten Abflusspfades bestimmen. Es kommt oft vor, dass die Iterationsanzahl sehr groß sein kann, was sehr stark die Effizienz des Verfahrens vermindert.

Will man den Gesamtenabfluss einer Rasterzelle auf einmal bestimmen, ohne iterieren zu müssen, muss der Abfluss sämtlicher topologisch höher liegenden Rasterzellen erkannt werden (Bauer, Rohdenburg & Bork 1985). Dafür wird der Wassersummation strikt von oben nach unten durchgeführt. Zu diesem Zweck muss die Sortierreihenfolge der Rasterzellen bezüglich ihrer Höhen in absteigender Form bekannt sein. Dafür wird zusätzlich zur Höhenmatrix auch ein Indexfeld angelegt, dessen Elemente die Rasterzellen der Höhenmatrix absteigend indizieren.

Das Sortieren des Indexfeldes nimmt beträchtliche Rechenzeit in Anspruch, was auch der Schwachpunkt dieser Methode sein kann. Ein einmal sortiertes und angelegtes Indexfeld wird aber mehrfach benutzt, bei der Berechnung von Einzugsgebieten, sowie bei der Elimination der Mulden. Dieses Verfahren ist unter dem Namen "Das modifizierte Summationsverfahren" sehr ausführlich im (Rieger 1992) beschrieben.

Die räumliche Abflussverteilung im Modell hängt in erster Linie vom verwendeten Abflussmodell ab. Somit ist eine Auswahl geeigneter Abflussmodelle wichtig, um qualitative und realistische Flussläufe abzuleiten. Die Eigenschaften einzelner Abflussmodelle lassen sich deutlich durch ihr Einwirken auf das Wassersummationsverfahren darstellen (s. Abb. 5.24).

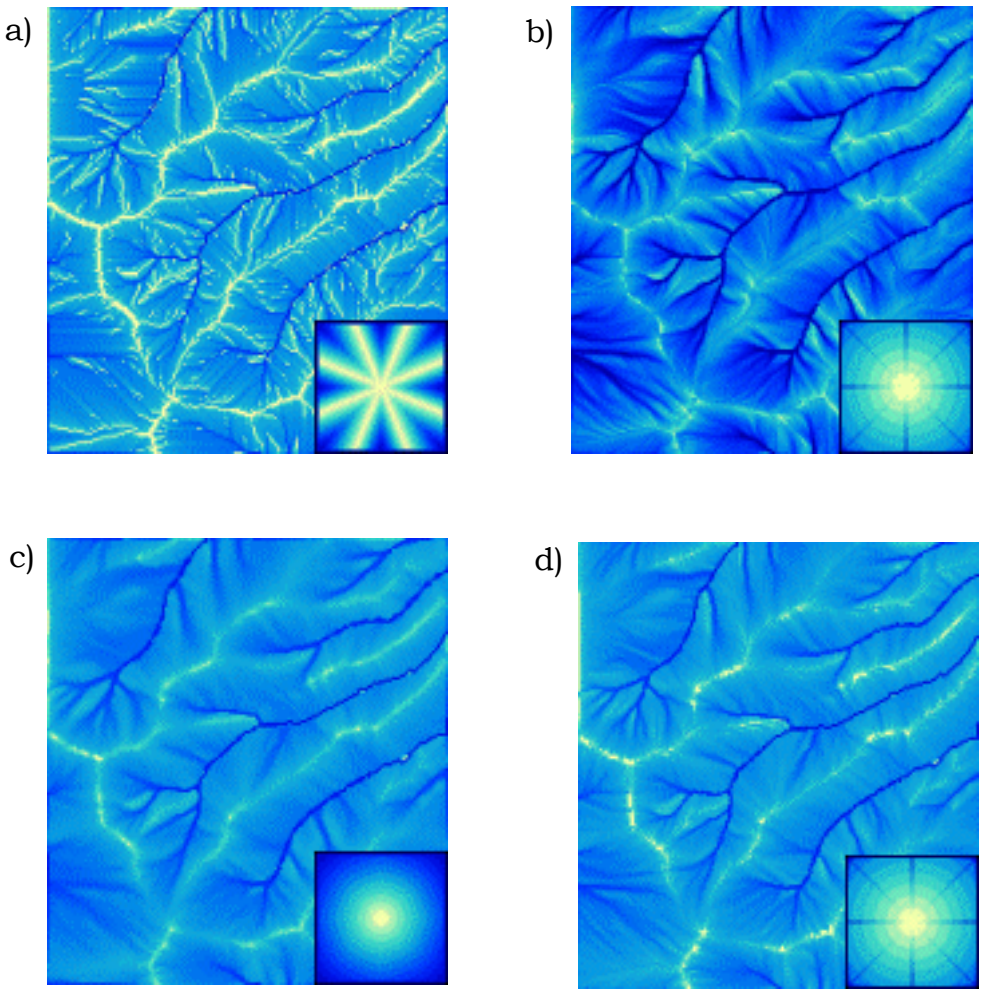


***Abb. 5.24**: Das Ergebnis der Wassersummation für verschiedene Abflussmodelle. a) Deterministic 8; b) Kinematic Routing Algorithm; c) Multiple-Flow Direction d) Deterministic Infinite Algorithm (nach Conrad 2002)*

Die Abbildungen stellen das Ergebnis der Wassersummation für einige Abflussmodelle in einem gebirgigen Gelände dar. Wasserdurchfluss bzw. die Einzugsgebietsgröße nimmt mit der Pixeldunkelheit zu. Im kleinen Fenster innerhalb jedes Bildes ist das Ergebnis für einen aufrechten Kegel (Spitze nach oben) gezeigt.

Beim "Deterministic 8" Algorithmus treten alle Einschränkungen der eindimensionalen Abflußmodelle auf. Die Beschränkung auf acht Abflussrichtungen ist besonders deutlich beim Abfluss über dem Rotationskegel ausgeprägt. Demzufolge konzentriert sich der Abfluss auf die vom DGM-Raster vorgegebenen kardinalen Richtungen, statt einer gleichmäßigen Zunahme der Einzugsgebietsgröße in allen Richtungen. Dies führt beim realen Gelände zu unrealistischen parallelen Abflusslinien, die immer entlang der kardinalen Richtungen laufen. Dieses Modell ist nur in gebirgigem Gelände anwendbar, da beim leicht

geneigten, vorwiegend ebenen Gelände die groben Fehler bei der Abflussmodellierung auftreten können (Rieger 1992).

Der "Kinematic Routing" Algorithmus umgeht alle Nachteile von eindimensionalen Abflussmodellen, obwohl es auch ein eindimensionales Modell ist. Die Ursache liegt darin, dass die ganze Abflussbahn von der jeweiligen Rasterzelle bis zur Modellgrenze in einem Guss auf reiner Vektorbasis numerisch durchgeführt wird. Dafür lässt sich die Wassersummation nicht mehr in einem Schritt durch Höhensortieren durchführen, sondern man verwendet einen rekursiven Algorithmus, der viel mehr Rechenzeit als die oben angesprochene Methode braucht. Das Wassersummationsverfahren ergibt eine detaillierte Abflußanalyse, bis zu feinsten Einzelheiten.
"Multiple-Flow Direction" Algorithmus ist ebenfalls ein einfaches und effizientes Verfahren, bei dem das Wasser auf alle tieferliegende Nachbarzellen abfließt, proportional ihren Höhenunterschieden. Das Wassersummationsverfahren über der Kegeloberfläche gibt die theoretisch erwartete Abflussverteilung. Bei näherer Betrachtung der Abflussverteilung auf dem realen Gelände stellt sich jedoch der Verlust von feinsten Abflusseinzelheiten heraus. Die Ursache liegt in einer unrealistisch großen Abflussdivergenz (Tarboton 1997), die eine klare Trennung zwischen einzelnen Abflusslinien verhindert.

Beim "Deterministic Infinite" Algorithmus ist die unrealistische Abflussdivergenz von der "Multiple-Flow Direction" Methode verkleinert, was zu mehr Abflusseinzelheiten bei der Wassersummation führt. Die gute Effizienz sowie die einfache Programmierbarkeit ist wie bei der "Multiple-Flow Direction" Methode. Die kardinalen Richtungen sind leicht bevorzugt. Eine ausführliche Analyse der Eigenschaften des "Deterministic Infinite" Algorithmus findet man in (Tarboton 1997).

5.2.3.5 Bestimmung der Einzugsgebietsgrenzen

Alle Methoden zur Bestimmung der Einzugsgebietsgrenzen leiten sich aus der Definition des Einzugsgebietes her, die sagt: „Von jedem Punkt eines Einzugsgebietes gibt es einen Abflusspfad zum Abflusspunkt, der zugleich der Basispunkt sowie unterste Punkt des jeweiligen Flussstückes ist“. Verfolgt man vom Abflusspunkt weg alle Falllinien nach oben hin, so erhält man alle Punkte des Einzugsgebietes (Rieger 1992).

Alle Algorithmen zur Belegung der Einzugsgebiete setzen das vorher abgeleitete Flussnetz voraus. Die einzelnen Flussstücke werden dem entsprechenden Einzugsgebiet zugewiesen, das durch sie entwässert. Man beginnt die Markierung immer am Abflusspunkt des jeweiligen Einzugsgebietes, der der unterste Punkt des entsprechenden Flussstückes ist. Ab hier unterscheidet man verschiedene Methoden zur Verfolgung von Falllinien, je nachdem, welches Abflussmodell angewendet wird. Außerdem unterscheidet man, ob eine Falllinie

nach der anderen bearbeitet wird oder ob alle Rasterzellen der gleichen Höhen nacheinander bearbeitet werden (Liang & Mackay 2000).

Das erste und einfachste Verfahren zur Markierung der Einzugsgebiete wurde von Marks et al. (1984) eingeführt. Die Falllinieverfolgung geht kategorisch nach einer sukzessiven Reihenfolge, wobei das eindimensionale "Deterministic 8" Abflussmodell angewendet wird (s. Abb. 5.25 a).

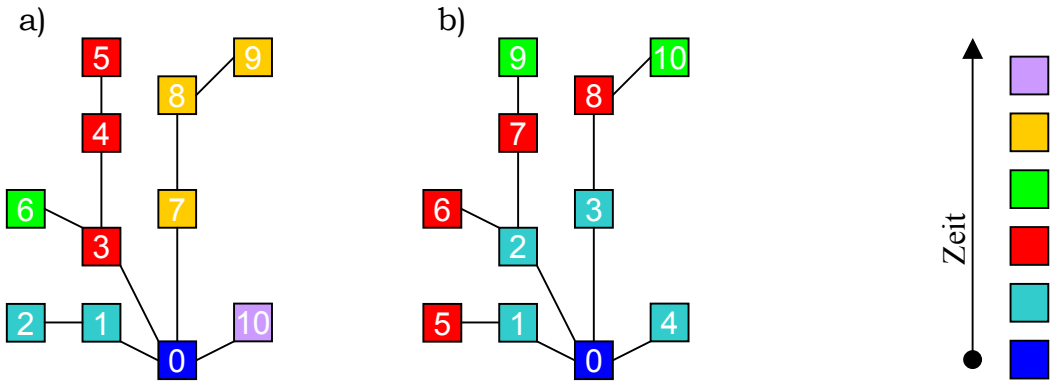


***Abb. 5.25**: Schema für die Bestimmung von Einzugsgebieten. a) nach der kategorischen Falllinienverfolgung, b) nach der Bearbeitung in Horizonten (eintauchen ins Wasser). Die Rasterzellen sind mit Falllinien verbunden. Weiße Nummern entsprechen der Bearbeitungsreihenfolge. Die Bearbeitungsschritte sind zeitlich durch Farbkodierung getrennt.*

Ein modifiziertes Verfahren setzt das Vorhandensein eines Indexfeldes voraus, das aus der Sortierung der Höhenmatrix stammt. Damit lässt sich die Bearbeitung von allen Falllinien in Fronten durchführen (s. Abb. 5.25 b). Dies kann man sich leicht vorstellen, und zwar durch das allmähliche Eintauchen des Modells ins Wasser, wobei es ganz porös sein muss. Man verfolgt das Auffüllen von Einzugsgebieten und dort wo sich das Wasser aus verschiedenen Einzugsgebieten trifft ist eine Einzugsgebietsgrenze. Da wieder das D8-Abflussmodell verwendet wird, kommen auch seine Nachteile zur Ausprägung. Bei den schwach ausgeprägten Kammlinien zeigen die abgeleiteten Einzugsgebietsgrenzen oft eine starke Abhängigkeit von der Rasterrichtung (Rieger 1992).

Rieger schlägt in seiner Dissertation (Rieger 1992) ein verbessertes Verfahren vor. Anstelle des D8-Abflussmodelles benutzt er das Multiple-Flow-Direction-Abflussmodell. Das Verfahren geht nach dem schon erläuterten Prinzip der Wassersummation vor, aber nicht von oben nach unten sondern umgekehrt. Auf diese Weise berechnet man nicht die Abflussanteilswerte einer Rasterzelle an seine tieferliegenden Nachbarn, sondern es werden die Abflussanteilswerte der höher liegenden Rasterzellen zum Abflusspunkt des jeweiligen Einzugsgebietes bestimmt. Der Abflussanteilswert wird für den Abflusspunkt mit 1 fest-

gesetzt und die Abflussanteilswerte für jene Rasterzellen innerhalb des jeweiligen Einzugsgebietes auch mit 1, wenn sie voll zum jeweiligen Abflusspunkt entwässern. Die Rasterzellen, die nur teilweise zum jeweiligen Einzugspunkt entwässern, erhalten somit einen Wert kleiner als 1. Sie werden danach dem Einzugsgebiet zugeteilt, zu welchem sie am stärksten entwässern. Die Abb. 5.26 zeigt die Einzugsgebiete gemäß dem eben vorgestellten Verfahren. Mehr Einzelheiten findet man in (Rieger 1992).

***Abb. 5.26**: Die abgeleiteten Flussläufe und Einzugsgebiete über einem geschummerten Geländemodell mit Schichtlinien (Gebiet Wienerwald, abgeleitet mit SCOP++).*

5.2.3.6 Behandeln von Mulden

DGMe enthalten oft Gebiete, die einen kontinuierlichen Oberflächenwasserabfluss verhindern. Diese abflusslosen Räume werden Mulden genannt und lassen sich geometrisch als Gebiete mit lokalen Minima darstellen.

Während die lokale Minima bei der Berechnung von Parametern der Reliefgeometrie keine Schwierigkeiten machen, können sie die Abflusssimulation unmöglich machen. Im Muldenpunkt, das ist der unterste Punkt einer Mulde, lässt sich die Abflussrichtung nicht mehr bestimmen, weil keine tieferliegenden Nachbarzellen vorhanden sind. Damit enden die Abflusspfade im Muldenpunkt für alle Rasterzellen, die durch diesen Muldenpunkt entwässern. Die Gemeinsamkeit dieser Rasterzellen wird Muldeneinzugsgebiet (MEZG) genannt. Um zu verhindern, dass die Abflusspfade in Muldenpunkten enden, soll man die Mulden vor der Abflussanalyse aus dem DGM eliminieren. Mehrere Verfahren wurden dafür entwickelt, denen gemeinsam ist, dass sie zunächst die Muldenbereiche abgrenzen. Dafür soll man zuerst den Überlaufpunkt der jeweiligen Mulde finden, der mit der niedrigsten Rasterzelle am Rand des Muldeneinzugs-

gebietes übereinstimmt. Alle Rasterzellen innerhalb eines lokalen Minimums, die tiefer als der Überlaufpunkt liegen, gehören zum Muldenbereich.

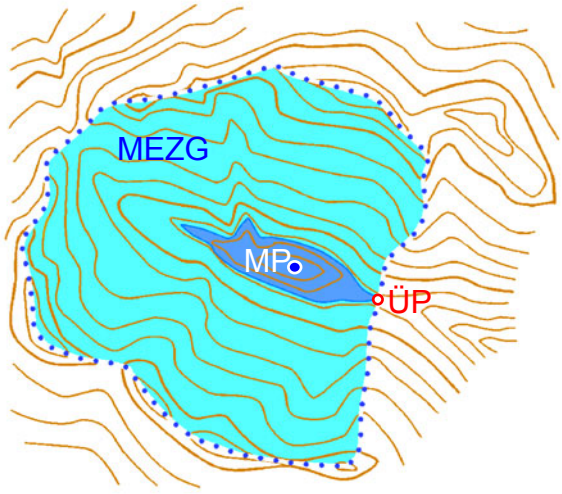


***Abb. 5.27**: Die Mulde und ihre Beziehung zum Muldeneinzugsgebiet (MEZG), Muldenpunkt (MP) sowie Überlaufspunkt (nach Rieger 1992).*

Die Unterschiede der einzelnen Verfahren liegen nun darin, wie der Abfluß durch den Muldenbereich abgeleitet wird (nach Rieger 1998):

1. Die Höhenwerte im Muldenbereich werden so weit angehoben, dass ein minimales Gefälle innerhalb des Muldenbereiches in Richtung Überlauf vorliegt (O'Callaghan und Mark, 1984; Jenson und Domingue, 1988; McCormack et al., 1993). Das Verfahren ist sehr weit verbreitet, obwohl es einen großen Nachteil hat; alle Gestaltinformationen von der Mulde gehen nämlich verloren.

2. Das Umlegen der Abflussrichtungen, sodass die Abflusspfade ununterbrochen bis zum Modellende verlaufen (Chorowicz et. al., 1992).

3. Das Anheben im Muldenbereich, wobei die Form der Mulde beibehalten wird. Der innere Muldenbereich wird angehoben und die Höhenwerte werden so skaliert, dass sich die Mulde zwischen dem Überlaufpunkt und seinem niedrigsten Nachbarpunkt ausdehnt. Der Abflusspfad wird dann vom Muldenpunkt bis zur Überlaufpunkt abgesenkt und auf diese Weise mit dem äußeren Einzugsgebiet verbunden. Der Vorteil des Verfahrens liegt darin, dass die Muldenform nach der Behandlung bewahrt bleibt. Damit kann der Abfluß innerhalb der Mulde getreu dargestellt werden (Rieger 1992).

4. Die Glättung des DGMs wird manchmal benutzt, um viele kleine Scheinmulden zu entfernen (O Callaghan und Mark 1984). Da das Verfahren das ganze Modell verflacht, aber die großen Mulden beibehalten werden, ist es nicht für die Muldenbehandlung geeignet.

5. Das Absenken der Muldenpfade ist ein Verfahren, das auch von Rieger (1992) eingeführt wurde. Der Muldenpfad ist jener Pfad, der vom Muldenpunkt über den Abflusspunkt bergauf und außerhalb der Mulde bis unterhalb des Muldenpunktes bergab verläuft. Durch das Verfahren wird der Muldenpfad derart abgesenkt, dass er vom Muldenpunkt bis zu seinem Ende gleichmäßig bergab verläuft.

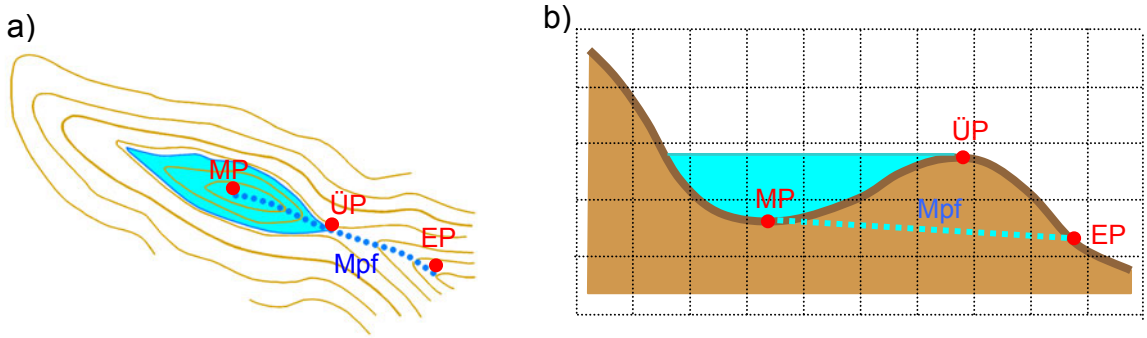


***Abb. 5.28**: Das Prinzip der Muldenentwässerung durch den Muldenpfad. Die kardinalen Punkte des Muldenpfades (Mpf) sind: Muldenpunkt (MP), Überlaufpunkt (ÜP) und Entwässerungspunkt (EP). a) Grundriss mit Schichtlinien b) Längenschnitt durch die Mulde und Muldenpfad.*

Das Absenken der Muldenpfade ist am besten zum Entfernen von einer großen Anzahl von relativ kleinen Mulden geeignet, die im Gelände nicht vorhanden sind, sondern entweder aus Datenfehlern oder aus einer (fehlerhaften) Oberflächenmodellierung stammen. Die Datenfehler beim Laserscannen haben eine unsymmetrische schiefe Fehlerverteilung (Kraus, 1998), sodass zu erwarten ist, dass die Muldenpunkte eine korrekte Höhe besitzen, während die Überlaufpunkte zu hoch liegen. In dieser Situation ist das Absenken der Muldenpfade voll berechtigt.

Wenn man eine Geländeoberfläche nur durch Daten darstellt, die in einem regelmäßigen Raster erfasst sind, treten sehr viele Mulden entlang von engen Tälern auf, weil nur wenige Punkte auf der Talsohle liegen. Diese Rasterpunkte bilden sehr oft Mulden, denn die nächsten Nachbarpunkte liegen höher als der jeweilige Punkt (s. Abb. 5.29). Dasselbe passiert auch bei TIN-Strukturen. Weil die Muldenpunkte auf der Talsohle liegen und eine richtige Höhe haben, sollen sie nicht durch Muldenauffüllen angehoben werden, sondern es sollen die Überlaufpunkte gesenkt werden. Dafür kommt auch das Absenken der Muldenpfade berechtigt zum Einsatz.

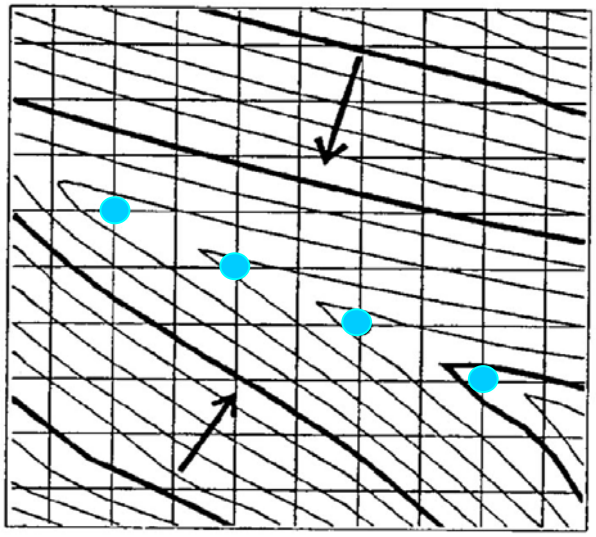


***Abb. 5.29**: Muldenkette entlang eines engen Tales, verursacht durch die in Raster angeordneten Daten (nach dem Rieger 1998).*

Das Verfahren wurde in dieser Arbeit verwendet, um die Tallinien entlang der Talsohlen auf eine korrekte Weise vollautomatisch zu extrahieren. Wenn die Talsohlen als Strukturlinien in eine erneute DGM-Interpolation eingeführt werden, bekommt man ein DGM, das einerseits von o.g. Fehlern wegen Diskretisierung in Tälern befreit und andererseits muldenfrei ist. Damit wird das DGM für eine ganze Reihe von hydrologischen Analysen brauchbar.

Die Einzelheiten über die Implementierung des eben aufgestellten Konzeptes findet man in folgendem Kapitel.

6 SOFTWAREKONZEPT UND IMPLEMENTIERUNG

Für eine effiziente Implementierung der vorgeschlagenen Algorithmen ist eine geeignete Software-Umgebung notwendig. Als am besten geeignete Software-Umgebung um morphometrische sowie hydrologische rasterbasierte Geländeanalysen durchzuführen, wurde die Software MATRIX ausgewählt. Sie wurde im Rahmen der Dissertation von Wolfgang Rieger (1992) entwickelt. Die folgenden Eigenschaften von MATRIX waren die Wichtigsten für diese Wahl:

- Sehr effiziente Matrix-Algebra mit einer großen Anzahl von Funktionen, die an den morphometrischen sowie hydrologischen Analysen angepasst sind.

- Steuerung durch Kommandosprache, die eine leichte Implementierung von eigenen Algorithmen ermöglicht.

- Gutes und klares Softwarekonzept mit ausführlicher Dokumentation, das Weiterentwicklungen sehr erleichtert.

Schon nach den ersten Erfahrungen mit MATRIX ist es klar geworden, dass es ein großes Berechnungspotenzial aufweist, besonders hinsichtlich rasterbasierter Oberflächenanalysen von digitalen Geländemodellen. MATRIX ist allerdings eine eigenständige Software, die – verglichen mit SCOP++ – eigene Besonderheiten hinsichtlich der Art der Benutzung sowie hinsichtlich Befehlssyntax aufweist. Weiter setzt die Software umfangreiche Kenntnisse über die Theorie und Algorithmen von rasterbasierten Geländeanalysen voraus, die die meisten DGM-Benutzer überfordert. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit die Integration von MATRIX innerhalb der SCOP++ Software programmiert; diese Entwicklung ist inzwischen Teil von SCOP++ geworden. Auf diese Weise wird dem SCOP++ Benutzer eine ganze Reihe von neuen "standardisierten" Methoden der Geländeanalyse angeboten, diesmal aber in der benutzerfreundlichen SCOP++ Umgebung. Diese Integration ist durch die Programmierung eines Softwaremoduls – des MATRIX-Agenten – verwirklicht. Der Begriff Agent gehört zum Applikationsrahmen XX, der in SCOP++ angewendet ist.

6.1 Software-Konzept von SCOP++

SCOP++ ist ein Programmsystem zur Berechnung, Verwaltung, Verwendung und Visualisierung digitaler Geländemodelle. Es ist konzeptuell als sog. Component Software gedacht. Damit kann die monolithische Struktur einer Software in ihre Bestandteile (Komponenten) zerlegt werden. Die Komponenten in diesem Sinne sind große Module, die mit Standardschnittstellen ausgerüstet sind, sodass sie zu einem System zusammengesetzt werden können (Molnar 1992).

Eine Komponente ist (nach Gräbe & Schumacher 2004):
- eine funktional und technisch abgeschlossene Einheit
- unabhängig als Einheit entwickel- und verteilbar
- wieder verwendbar
- nur durch genau spezifizierte Schnittstellen ansprechbar

Diese Eigenschaften weisen folgende Vorteile auf, die besonders für Forschung und Softwareentwicklung innerhalb akademischer Gemeinschaften wichtig sind:

1. Eine strenge hierarchische Bauweise der Programme wird durch autonome Entwicklungen von Komponenten ersetzt. Der Forscher, der damit auch der Entwickler ist, hat weitgehende Freiheit bei der Wahl von Programmiersprache, Entwicklungsumgebung, Betriebsystem sowie Programmierungskonzeption.

2. Der Entwicklungszustand einer Komponente ist nicht von den anderen Komponenten abhängig. Auch die Erweiterung mit Funktionalitäten einer Komponente ist vollständig unabhängig von den anderen Komponenten - solange keine Dienste von denen benötigt werden.

3. Die bisher vorhandenen Programme, die schon getestet und seit längerem etabliert sind, können in eine neue Umgebung, meistens ohne Änderung, integriert werden.

Die Konzeption von Komponenten-Software ist am I.P.F. als Applikationsrahmen "XX" verwirklicht.

Der Applikationsrahmen XX ist aus drei applikationsunabhängigen Komponenten zusammengesetzt:

- UX - graphische Benutzerschnittstelle
- GX - Grafikkomponente
- SX - Kommunikation und Systemkontrollkomponente

Die **UX**-Komponente gestaltet das Erscheinungsbild der graphischen Benutzerschnittstelle aufgrund von uxDL-Befehlen (s. Abb. 6.1). UX übernimmt auch die gesamte Kommunikation mit dem Benutzer. Einerseits sendet UX die Reaktionen vom Benutzer via den SX-Server zu den betroffenen Agenten, andererseits übernimmt UX die Nachrichten von Agenten entweder um die Berechnungsergebnisse anzuzeigen oder um die Benutzerschnittstelle zu manipulieren. Neben der Kommunikation durch die graphische Benutzeroberfläche steht dem Benutzer auch eine Kommandosprache zur Verfügung. Damit kann der erfahrene Benutzer interaktiv Befehle über eine Kommandozeile eingeben, oder alle für eine beliebig komplexe Aufgabe benötigten Befehle in einer Kommandodatei zusammenstellen und diese in einem unüberwachten Betriebsmodus (batch mode) ausführen lassen.

Die **GX-**Grafikkomponente rüstet das System mit einigen CAD-Funktionalitäten aus, die die interaktive Editierung sowie integrierte Darstellung von Vektordaten und georeferenzierten Rasterdaten ermöglichen. Damit sind andere Komponentenentwickler von systemspezifischen Grafikaufgaben befreit. Der Benutzer kann verschiedene Daten, die von einem oder mehreren Komponenten stammen, kombinieren (überlappen oder mischen), und auf diese Weise eine optimale Darstellung gestalten (s. Abb. 6.1).

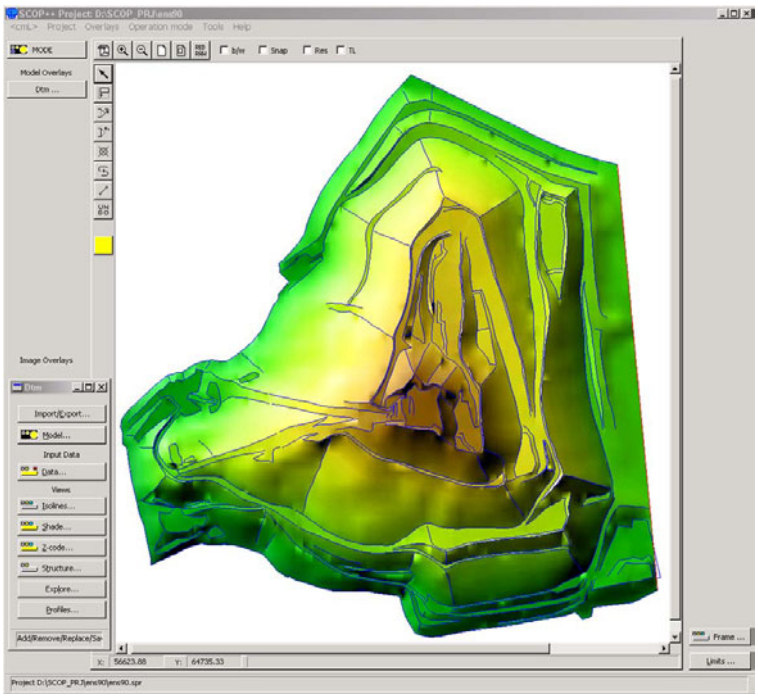


***Abb. 6.1**: SCOP++ Benutzeroberfläche mit integrierter Darstellung von Vektordaten (Eingabedaten), die über miteinander gemischten georeferenzierten Rasterdaten (Schummerung und Höhenkodierung) überlagert sind.*

Die **SX**-Komponente dient zum Starten, Überwachen und Beenden von Prozessen sowie zum Überwachen vom Nachrichtenverkehr zwischen einzelnen Komponenten. Es wird im interaktiven Modus ein asynchroner Nachrichtenverkehr angewendet, damit die intensiven Berechnungen die Benutzerschnittstelle nicht blockieren (Molnar, Wintner, Wöhrer 1996).

Alle drei oben genannten Komponenten sind anwendungsunabhängig und bilden eine gute Softwareinfrastruktur zur Integration von anwendungsspezifischen Komponenten. Eine anwendungsspezifische Komponente kann entweder als ein monolithisches Programm aufgebaut werden, oder sie wird in zwei prinzipiell verschiedene Teile unterteilt – den/die Berechnungsserver einerseits, und die Agenten andererseits.

Der **Agent** stellt eine Schnittstelle zwischen dem Berechnungsserver und dem XX-Applikationsrahmen dar. Er übernimmt die Benutzereingabe und Reaktionen, nach dem Bedarf konsultiert der Agent auch andere Komponenten (beispielsweise AgLIM für ViewLimits), konstruiert die applikationsspezifischen Befehle und übergibt sie an den Berechnungsserver. Während der Berechnung überwacht er den Berechnungstatus und reagiert auf Fehler. Nach der Berechnung leitet er das Ergebnis an entsprechende Komponenten (meistens UX und GX) weiter.

Die **Berechnungsserver** führen verschiedene anwendungsspezifische Berechnungen aus. Sie sind ausschließlich durch die entsprechenden Agenten gesteuert. Verschiedene Berechnungsserver können auf mehreren Rechnern innerhalb eines Netzes betrieben werden und auf diese Weise die intensiven Berechnungen parallel durchführen. Damit können die Hardwareressourcen in einem Netz optimal genutzt werden.

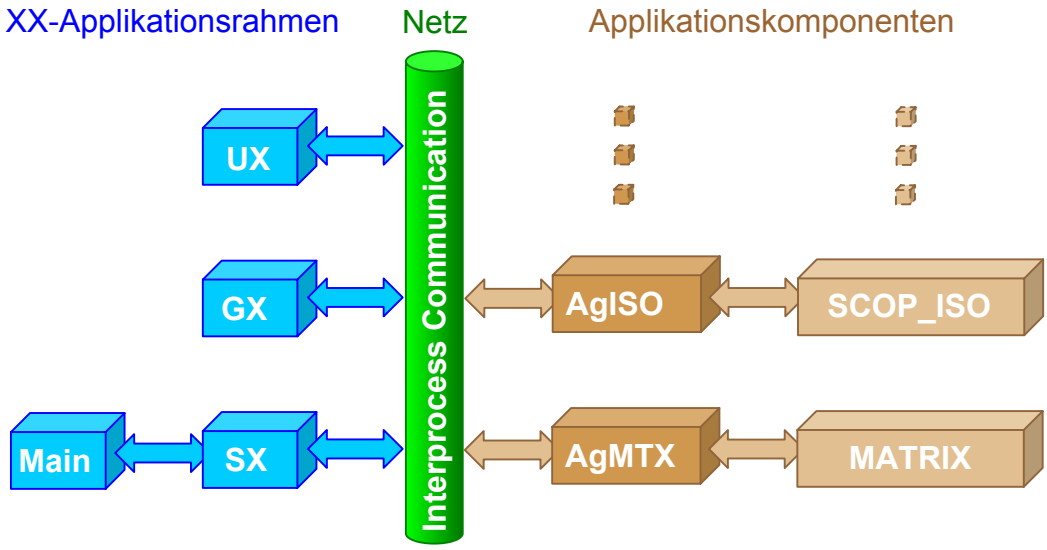


***Abb. 6.2**: Die allgemeine Struktur einer Applikation, die innerhalb des XX-Applikationsrahmens aufgebaut ist.*

Das Programm MATRIX wurde innerhalb dieser Arbeit als Berechnungsserver in der XX-Applikationsrahmen integriert.

Das SCOP++-System wurde so konzipiert, dass es folgende Module/Funktionalitäten in sich vereinigt (Molnar 1998):

SCOP.TDM zur Verwaltung von topographischen Daten.
- Ein Archivierungs- und Informationssystem für topographische Daten sowie Produkten, die von diesen Daten stammen.
- Es ist nach einem relationalen topologischen Datenbankkonzept (TOPDB) aufgebaut.

SCOP.DTM – nach DGMen orientierendes System
- zur Erzeugung und/oder optionalen Eintragen von 2.5D Oberflächemodellen sowie anderen Produkten, die sich aufgrund dieser Modelle ableiten lassen.

SCOP.DOP – nach digitalen Orthophotoproduktion orientierendes System
- zur Herstellung und Visualisierung von digitalen Orthophotos.
- Setzt sich aus folgenden Hauptkomponenten zusammen: digitaler Monokomparator, das ist die Software für Orientierung sowie geometrische und radiometrische Rektifizierung von Bildern, und Software für die räumliche Visualisierung der Orthophotos (ATM).

SCOP.TEM - zur thematischen Analyse von DGMen (noch nicht implementiert). Soll alle Werkzeuge enthalten, die zur thematischen Analyse von DGMen benötigt werden.

SCOP.3D – ermöglicht eine volle 3D-Modellierung im ganzen Interessensgebieten (noch nicht implementiert).

Nach der oben vorgestellten Konzeption gehören die rasterbasierten Oberflächenanalysen zum SCOP.TEM-Bereich, ist aber (temporär) innerhalb SCOP.DTM implementiert, denn der SCOP.TEM-Bereich ist noch nicht vorhanden. Deshalb wird in kurzen Auszügen die Architektur von SCOP.DTM vorgestellt.

6.2 Konzeption von SCOP.DTM

SCOP.DTM wird auf DGM-relevante Daten sowie Produkte angewendet, die einem Projekt gehören. Innerhalb dieses Projektes sind die Daten in verschiedenen Overlays organisiert; es können Model- oder ImageOverlays sein.

ModelOverlays sind meistens räumliche Datenhaufen, die durch SCOP.DTM bearbeitet und/oder dargestellt werden. Je nachdem, wie SCOP.DTM diese Da-

tensätze behandelt, werden sie als: *primary*, *model-only* oder *data-only* ModelOverlays bezeichnet.

- *primary* – umfasst die Ausgangsdaten und das DGM, das aufgrund dieser Daten abgeleitet ist. Ein solcher *Overlay*-Typ wird für das Ableiten von verschiedenen DGM-Produkten benutzt.

- *Model-only* – enthält nur das digitale Oberflächenmodell. Stammt das Oberflächenmodell aus dem laufenden Projekt nicht, wird es als *external* bezeichnet. Sonst wird es *secondary* genannt.

- *Data-only* – enthält nur Vektordaten, die nicht zur Ableitung eines Oberflächenmodelles geeignet und/oder gedacht sind. Sie können nur dargestellt sein.

ImageOverlays enthalten geokodierte digitale Bilder, die nur dargestellt sein können und zu anderen Visualisierungszwecken dienen. Diese Bilder können durch verschiedene SCOP-Module hergestellt werden (SCOP.DOP, MATRIX, ...) oder aus äußeren Quellen herangezogen werden.

6.3 Architektur von SCOP.DTM

SCOP.DTM sowie alle anderen Module innerhalb des XX-Applikationsrahmens werden, hinsichtlich ihrer Architektur, als typische „ComponentWare" bezeichnet. Das bedeutet, dass die vererbten Berechnungsserver zusammen mit später entwickelten objektorientierten Modulen in eine neue objektorientierte Client-Server-Applikation vereinigt werden, die mit dem Benutzer durch eine benutzerfreundliche graphische Oberfläche kommuniziert. Mehrere parallelbetriebene Prozesse werden durch spezielle Objekte, s.g. Agenten, gesteuert und harmonisiert. Somit ist die Hauptlogik des ganzen Systems innerhalb der Agenten verwirklicht (Molnar 1998).
Je nachdem, ob die Agenten nur eine oder mehrere Instanzen während des Betriebes von agServer_DTM haben können, werden sie als statisch oder dynamisch bezeichnet.

6.3.1 Projektorientierte statische Agenten

agPRJ – Hauptagent von SCOP.DTM

- stellt ein neues Projekt her oder öffnet ein schon Vorhandenes.
- fügt Modelle und ImageOverlays hinzu oder entfernt sie.
- sendet die allgemeinen Nachrichten zu allen gängigen Overlays:
  - wenn Modell- oder Ansichtsgrenzen geändert sind.
  - wenn der Benutzer den vorhandenen Zustand speichert oder das Programm beenden will.
- notiert alle gängigen Overlays in eine Liste, die den overlay-orientierten Agenten zugänglich sind.

agLIM
- verwaltet gängige Limits-Spezifikationen für Bildschirmrepräsentationen, Berechnung von Ansichten, Oberflächeninterpolation und die Gestaltung von Karten.
- stellt die graphische Schnittstelle für benutzerfreundliche Limits-Eingabe her und steuert sie.
- Verwaltet die Liste mit vorher gegebenen Limits-Spezifikationen, um sie leicht wieder herstellen.
- sendet die entsprechenden Nachrichten nach agPRJ für jede relevante Änderung von Limits-Spezifikationen.

agMAP (noch nicht verwirklicht)
- zur Gestaltung von Karten, die dargestellt, gedruckt, gespeichert, nach anderen graphischen Formaten konvertiert und nach anderen CAD-Systemen überführt werden.
- zur graphischen Editierung von Karten.

6.3.2 Overlay-orientierte statische Agenten

Overlay-orientierte statische Agenten nehmen eine oder mehrere Overlays als Operanden, je nach Benutzerauswahl. Viele davon sind noch nicht implementiert, werden aber kurz vorgestellt, um einen Überblick über die Konzeption des ganzen Systemes zu bekommen.

agALGEBRA (noch nicht verwirklicht)
- berechnet den analytischen Durchschnitt von zwei ModelOverlays, die zum Datentyp Vektor oder Raster gehören.

agANALYSIS (noch nicht verwirklicht)
- fasst alle Methoden zur Oberflächenanalyse zusammen um. Als Berechnungsserver ist das Programm MATRIX gedacht.
- leitet die Strukturlinien einer Oberfläche (Bruch- und Formkanten, Flussläufe, Einzugsgebietsgrenzen) ab.
- In gleicher Weise können die Einzugsgebietsgrenzen behandelt werden.

agMARK (noch nicht verwirklicht)
- ermöglicht dem Benutzer das Setzen von bestimmten Marken an ausgewählten Positionen, da sie leichter wiedergefunden werden können.

agPER
- berechnet eine oder mehrere perspektivische Ansichten (Views), in Form von Raster- oder Vektorgraphik.
- projiziert Raster- oder Vektordaten auf die perspektivischen Ansichten (Monoplotting).

- berechnet die Sichtbarkeitsanalysen und stellt die Sichtbarkeitskarten her.

agPRO
- berechnet die Profile (Längs und Querschnitte), je nach Benutzerspezifikationen.
- die Ergebnisse werden in einem oder mehreren graphischen Fenstern der Benutzeroberfläche dargestellt.

agQuality (noch nicht verwirklicht)
- unterstützt verschiedene Methoden, die zur Qualitätsanalyse von ModelOverlays und von abgeleiteten Ansichten und Produkten dienen.

agSLOPE (noch nicht verwirklicht)
- leitet das Neigungsmodell für ein bestimmte ModelOverlay ab.
- das gewonnene Neigungsmodell wird als Model-only Overlay gespeichert.

agWHATIF (noch nicht verwirklicht)
- erleichtert dem Benutzer das Experimentieren mit Overlays sowie abgeleiteten Ansichten und Produkten.

6.3.3 Overlay-intern dynamische Member-Agenten

Je nach den Benutzerspezifikationen werden die Overlays dynamisch, während der Betriebszeit, erzeugt. Damit werden auch die entsprechenden Agenten, s.g. *Overlay-member-agents,* hergestellt, was immer die Aufgabe vom Projekt-Agent AgPRJ ist. Die Namen von *Overlay-member-agents* werden als OverlayName_agXXX (z.B. elev_agISO) konstruiert. Die Wirkung von einzelnen Member-Agenten innerhalb des Overlays wird durch den agOVL Agent harmonisiert.

Name_agOVL
- übernimmt die Nachrichten, die durch agPRJ nach verschiedenen Modellen und ImageOverlays gesendet sind, und übergibt sie den entsprechenden Member-Agenten.
- importiert/exportiert die Daten von Modell sowie Produkten in der Zusammenarbeit mit entsprechenden Member-Agenten.

Name_agDAT
- verwaltet die Vektordaten eines Overlays durch die LocalTDM-Datenbank.
- importiert bzw. exportiert die Daten in Zusammenarbeit mit Name_agOVL.
- stellt die Daten in einer geeigneten Weise auf der Benutzeroberfläche dar.
- Ermöglicht das Editieren von vorhandenen Daten sowie Digitalisieren von zusätzlichen Daten.

- bietet die Optionen zur Datenvorverarbeitung (Punkteverdichtung entlang räumlichen Kurven).
- bewilligt einen read-only Datenzugriff auch für andere Agenten.

Name_agDTM
- spiegelt in sich die objektenorientierte Konzeption von SCOP.DTM im vollen Maß wider. Das DTM wird als Objekt wahrgenommen, das mit Methoden hinsichtlich der Oberfläche versehen ist.
- ermöglicht die Zerlegung einer Oberfläche in Regionen.

Name_agREG
- führt die Interpolation der Oberfläche innerhalb einzelner Regionen durch.

Name_agISO - leitet die vektoriellen Schichtlinien ab.

Name_agZCO - stellt die Schichtlinien durch farbkodierte Höhenzonen dar.

Name_agSHD - berechnet die Schummerung.

Name_agGRD
- stellt die DTM-Struktur, das Raster und die Grenzen der Recheneinheiten, auf der Benutzeroberfläche dar.

Name_agMTX
- berechnet und visualisiert die morphometrischen sowie hydrologischen Oberflächenanalysen.
- ermöglicht eine vollautomatische Extraktion von Tallinien (Flussläufe) sowie ihr Hinzufügen als Strukturlinien ins ModelOverlay.
- wurde im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und wird etwas näher im folgenden Kapitel beschrieben.

6.3.4 Member-Agenten des ImageOverlays

Die ImageOverlays sind rastergraphische digitale Bilder, die meistens auf der Benutzeroberfläche dargestellt werden. Ihre Member-Agenten ermöglichen:

- die interaktive Editierung sowie digitale Bildverarbeitung

- Mosaicking oder das gegenseitige Pixel-by-Pixel kombinieren

- Zugriff der anderen Agenten, wie z.B. agPER und agMAP auf digitale Bilder

Das nachfolgende Schema verdeutlicht den Aufbau des SCOP.DTM-Systems, sowie die Mitwirkung der oben zusammengestellten Agenten innerhalb des SCOP.DTM-Systems.

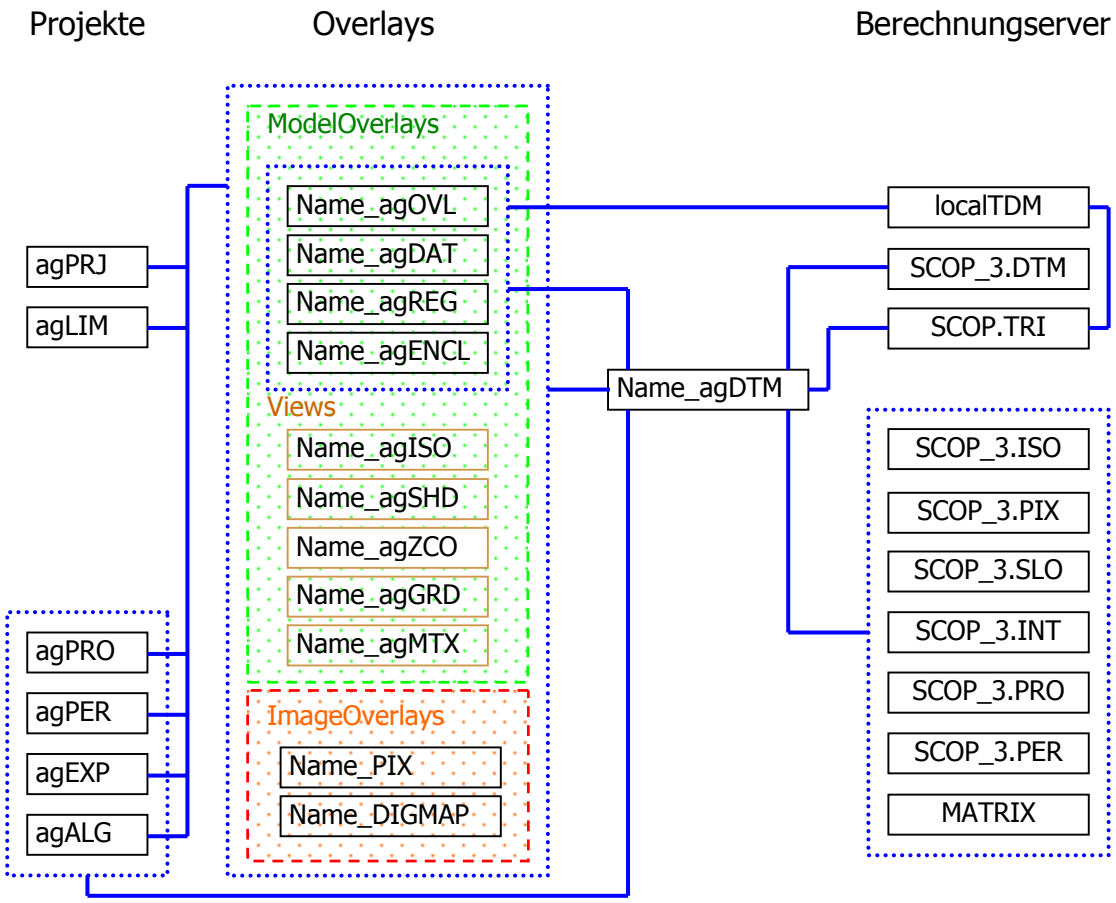


***Abb. 6.3**: Generalisertes Schema von SCOP.DTM Agenten und Servern. Blaue Linien stellen die Nachrichten-Routen dar (nach Molnar 1998).*

6.3.5 MATRIX-AGENT (agMTX)

Der MATRIX-Agent ist eine Komponente eines größeren SCOP.DTM-Systems, die eine nahtlose Integration des Programms MATRIX ins SCOP.DTM-System ermöglicht. Folgend der oben vorgestellten Konzeption von SCOP.DTM, ist der MATRIX-Agent der Member-Agent des agDTM-Agenten, der seine Funktionalität um die Methoden der rasterbasierten Geländeanalysen erweitert. Die Integration von MATRIX ins SCOP.DTM geht ausschließlich über die standardisierten Nachrichten, die zwischen dem jeweiligen Agenten und anderen Komponenten des Systemes ausgetauscht werden. Dafür ist die Hauptaufgabe der Agenten die Übernahme, die richtige Interpretation, eine interne Bearbeitung und das Zusammenstellen sowie das rechtzeitige Aussenden von Nachrichten. Alle diese Phasen sollen gut mit anderen Prozessen innerhalb des Systems

synchronisiert sein und einer gut überlegten Bearbeitungslogik folgen. Dabei werden zwei Grundprinzipien eingehalten (Molnar 1998):

- Das System soll konsistent auf jede Benutzeraktion antworten, aber auch auf anderen Ereignissen, die durch das Netz, XX-Applikationsrahmen (besonders SX) oder den Berechnungservern verursacht sind.
- Die Prozesse werden nur dann im unvermeidlichen Umfang ausgeführt, wenn sie unmittelbar benötigt werden. Dieses Prinzip wird als „Lazy Processing“ benannt.

Hinsichtlich der Nachrichtenverwaltung, die im Fokus des Matrix-Agenten liegt, zerlegt sich sein Quellcode in folgenden Quell- (*.cpp) sowie Header-Dateien (*.hpp):

- MTX_msges (.cpp & .hpp) – eine kompakte und lesbare Tabelle von allen Nachrichten, die AgMTX versteht.
- MTX_agent (.cpp & .hpp) – die Eingangstür für ankommende Nachrichten.
- MTX_comp (.cpp & .hpp) – Komponenten zur Bearbeitung und Aussendung von Nachrichten.

6.3.5.1 AgMTX-Programmstruktur

Dank der Komponenten-Bibliothek kann die Struktur vom Agenten-Quellcode in einem großen Maß standardisiert werden. Das gleiche nachrichtenorientierte Konzept bei allen Overlay-Member-Agenten ermöglicht, dass AgMTX die gleiche Programm-Hauptstruktur wie die anderen Overlay-Member-Agenten aufweist. Auf dieser Weise ist der Code in einem hohen Maß unifiziert, womit das Verständnis des Algorithmus sowie die Weiterentwicklung erleichtert wird. Die Hauptstruktur spiegelt sich im Nachrichtendurchlauf durch den Agenten wider, wie es im Schema des Anhanges 1 dargestellt ist.

6.4 Die Benutzerschnittstelle für die Geländeanalysen

Die ganze Kommunikation zwischen dem Benutzer und der SCOP++-Programm geht über eine ergonomische und intuitive Benutzerschnittstelle. Die Parametereingabe zur Steuerung von verschiedenen Prozessen sowie zur Visualisierung der Ergebnisse dient eine graphische Benutzeroberfläche, die aus verschiedenen UX-Komponenten (Knöpfe, Graphikfenstern, Eingabe-Felder ...) aufgebaut ist. Die Erzeugung und das Gestalten der jeweiligen UX-Komponente sind durch die uxDL-Definitionssprache erleichtert und stark standardisiert. So kann der Agent eine eigene Benutzerschnittstelle erzeugen, die dem Benutzer für spezifische Aufgaben am geeignetsten ist.

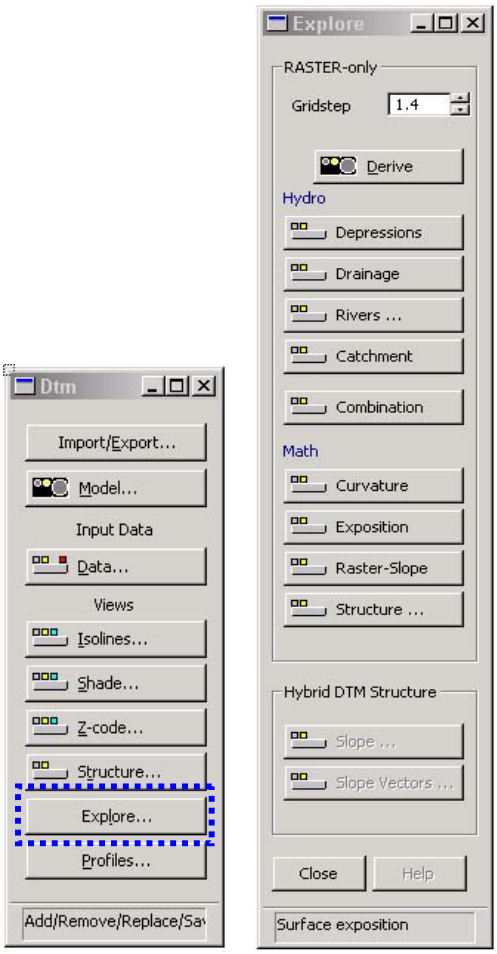


Abb. 6.4: *ModelOverlay-Dialogfeld (links) und Explore-Dialogfeld (rechts).*

Die Benutzerschnittstelle zwischen dem Benutzer und dem MATRIX-Agenten findet man unter dem Dialog-Fenster "Explore", das per Schaltfläche "Explore" innerhalb der Ansichten-Gruppe (Views) vom jeweiligen ModelOverlay erreichbar ist. Der MATRIX-Agent steuert alle Objekte innerhalb des "RASTER-Only"-Gruppenfeldes. Das Gruppenfeld "Hybrid DTM Structure" ist für die Integration vom SCOP.SLO-Berechnungserver ins SCOP.DTM geplant (s. Abb. 6.4).

Die ´Surface exploration´ unter SCOP++ ist in erste Linie als ein Visualisierungs-Werkzeug gedacht, das verbreitete Oberflächenuntersuchungen ermöglicht. Da die Berechnungen auf reine Rasterbasis durchgeführt werden, und die Ergebnisse als Rastergraphik dargestellt werden, wird das DGM mit einem Diskkretisierungsintervall abgetastet. Alle gebotenen Analysen teilen sich in zwei verschiedene Gruppen, und zwar "Hydro" und "Math". Die Hydro-Gruppe orientiert sich an den hydrologischen Anwendungen, die aufgrund der Regensimulation und Abflussanalyse basiert sind (s. Kap. 5). Andererseits, die "Math"-Gruppe, ermöglicht einige Visualisierungen der einfachen mathematischen Beziehungen zwischen benachbarten Pixeln. Am Ende wird dem Benutzer eine Möglichkeit geboten, die Flussläufe und/oder Muldenpfade als Strukturlinien zur Interpolation vom DGM zu übernehmen (Schaltfläche "Structure..." innerhalb der "Math" Gruppe). Diese Funktion ist besonders für solche Datensätze gedacht, die keine Strukturlinien umfassen (z.B. die Datensätze vom Laser-Scanning).

6.4.1 Derive

Die Schaltfläche "Derive" dient zur Ableitung eines Raster-DGMs durch Abtasten eines SCOP++-DGMs. Das Diskretisierungsintervall wird im GRIDSTEP-Feld gesetzt.

Da es sich beim SCOP++Programm um einen hybriden DGM handelt, werden neben den Gitterpunkten auch die Strukturlinien sowie die markanten Höhen ins Modell eingebettet. Nach der Ableitung des Raster-DGMs gehen alle explizi-

ten Informationen über Strukturlinien sowie markante Höhenpunkte verloren, denn die reine Rasterstruktur kann diese Informationen nicht berücksichtigen. Doch ihr Einfluss auf die Oberflächengestaltung des Raster-DGMs kann in gewissem Maß erhalten bleiben, wenn man das Abtastungsintervall sehr klein wählt. Dafür nimmt man in der Regel ein wesentlich kleineres Abtastintervall als die Gitterweite des SCOP++-DGMs (s. Abb. 6.5). Dabei soll man vorsichtig sein, weil sehr kleine Abtastungsintervalle die Rechnerkapazitäten überfordern können.

Beim Starten von SCOP++ wird dieses Feld optimal an die Darstellung des gesamten Bereiches innerhalb VIEWLIMITS angepasst. Obwohl diese Funktion keine Darstellung produziert, spielt der GRIDSTEP-Parameter die entscheidende Rolle hinsichtlich der Hervorhebung oder Unterdrückung der Eigenschaften bei allen folgenden Darstellungen. Ein kleiner GRIDSTEP-Parameter ermöglicht eine feine und genaue Analyse und hebt die kleinförmigen Eigenschaften hervor, unterdrückt aber die großförmigen Eigenschaften. Dieser Parameter beeinflusst den Speicherbedarf und die Rechenzeiten sehr stark. Beim Halbieren vom GRIDSTEP-Wert verursacht man mindestens einen viermal größeren Speicherbedarf sowie viermal längere Rechenzeiten. Da es sich um einen fundamentalen Parameter für alle Darstellungen handelt, werden bei jeder Änderung des GRIDSTEP alle bisherige Darstellungen gelöscht. Um das zufällige Löschen zu vermeiden, wird der neu eingegebene GRIDSTEP-Wert erst dann übernommen, wenn man explizit den DERIVE-Knopf betätigt.

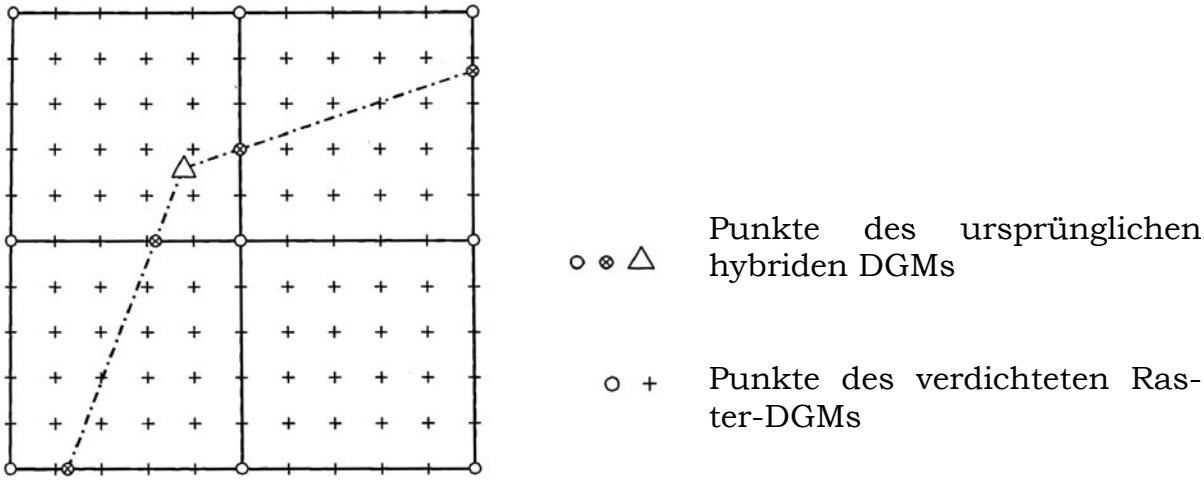


Abb. 6.5: *Hybrides Gitter-DGM und reines Raster-DGM (nach Kraus 2000).*

6.4.2 Depressions

Diese Funktion ermöglicht die Darstellung von abflusslosen Räumen. Da nur der Oberflächenabfluss in Betracht genommen wird, entsprechen diese Gebiete auch den lokalen Minima im Gelände. Sie sind als hellblaue Flächen auf grauem Hintergrund dargestellt (s. Abb. 6.6). Bei vielen hydrologischen Anwendungen, sowie bei weiteren Hydro-Berechnungen mit SCOP++ führen solche abflusslosen Räume zu numerischen Problemen, weil sie den kontinuierlichen Oberflächenabfluss unterbrechen. Es gibt mehrere Verfahren zur Muldenelimination, die ausführlich im Kapitel 5 dieser Arbeit beschrieben sind. Implementiert ist das Verfahren, das die Muldenpfade so absenkt, dass die Mulde voll entwässert werden kann. Die Muldenpfade sind nur ein Pixel breit und verursachen minimale Topographieveränderungen beim Eliminieren von kleinen "Scheinmulden", wo die Muldenpfade relativ kurz sind. Große natürliche Depressionen in Tälern haben dagegen auch lange Muldenpfade, die beim Absenken stark ins Gelände eingeschnitten werden.

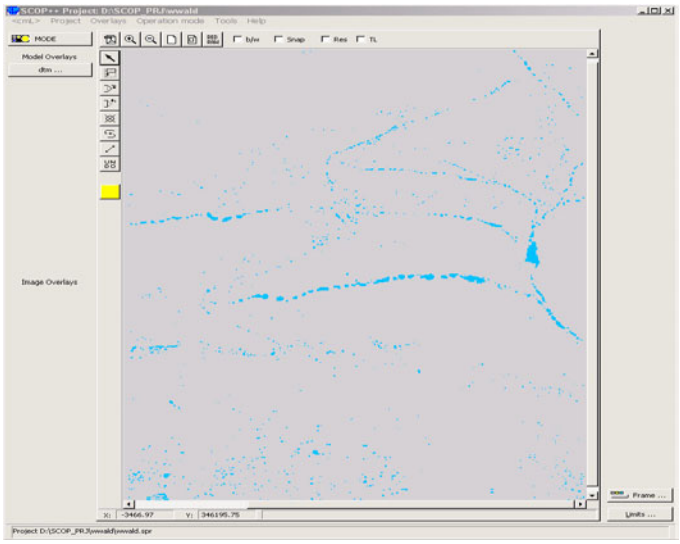


***Abb. 6.6**: Die abflußlosen Räume einer Oberfläche (Wienerwald - Ausschnitt) - hell blau dargestellt.*

6.4.3 Drainage

Die Drainage-Funktion berechnet die Durchflusswerte des Oberflächenabflusses per Pixel unter der Voraussetzung, dass das ganze Gebiet regelmäßig und monoton beregnet wird (Abb. 6.7). Als Abflussmodel ist "Multiple flow direction"-Model (s. Kap.5) verwendet; das Verfahren ist unter dem Namen "Wassersummation" in Kapitel 5 dieser Arbeit beschrieben. Das Ergebnis wird vor der Darstellung logarithmiert, sodass auch die kleineren Durchflusswerte besser zur Ausprägung kommen. Der Logarithmus des Durchflusswertes

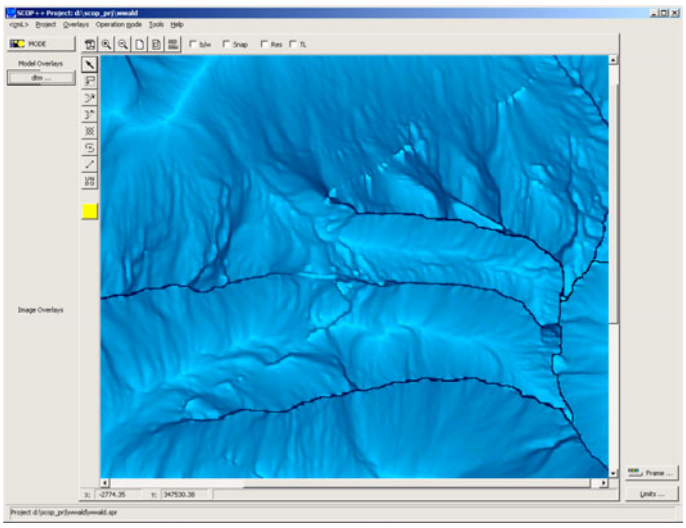


***Abb. 6.7**: Die logarithmierten Durchfluss-werte des Oberflächenabflusses (Wienerwald - Ausschnitt).*

moduliert die Intensität der blauen Farbe in der Darstellung so, dass die dunklere Farbe dem größeren Wert entspricht.

6.4.4 Rivers

Durch diese Funktion werden wahrscheinliche Flussläufe berechnet, wobei wieder nur ein Oberflächenabfluss in Betracht genommen wird (Abb. 6.8). Das Verfahren ist im Kapitel 5 beschrieben und ergibt Flussläufe, die gut mit den morphologischen Eigenschaften der Gebiete übereinstimmen. Alle abgeleiteten Flussläufe bilden ein Flussnetz, dessen Dichte (Verzweigungsgrad) lässt sich durch zwei zusätzliche Parameter steuert werden kann: "min. Catchment", und "min. Length" (Abb. 6.9).

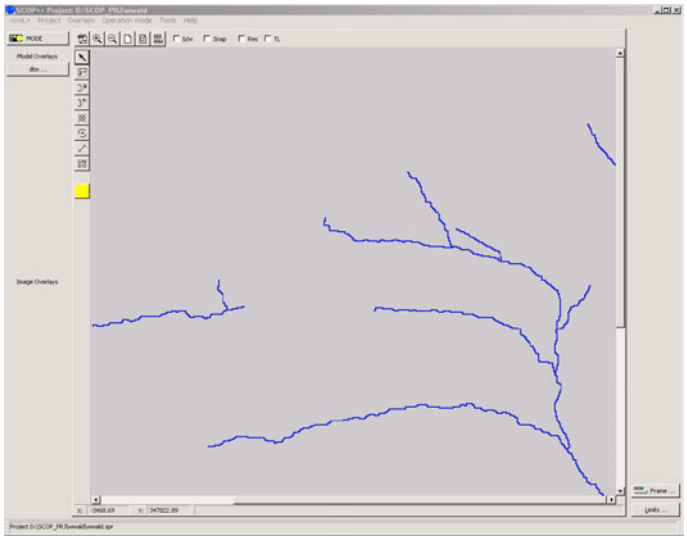


***Abb. 6.8**: Die abgeleiteten Flussläufe (Wienerwald - Ausschnitt).*

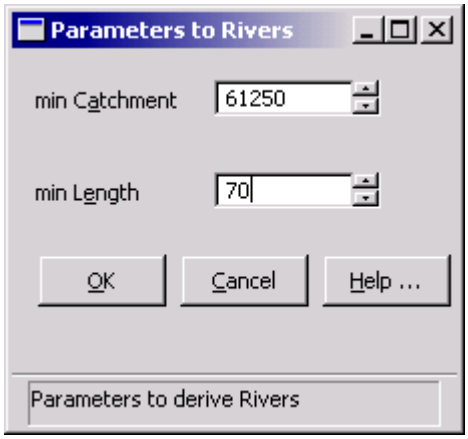


***Abb. 6.9**: Dialogfeld mit zusätzlichen Parametern zum Flussableiten.*

Parameter "min. Catchment" bezeichnet die kleinste Einzugsgebietsfläche, die für die Entstehung eines Flusslaufes nötig ist. Beim regelmäßigen und monotonen Beregnen ist der Durchflusswert eines Pixels direkt proportional zur Größe des Einzugsgebietes, das durch das jeweilige Pixel entwässert. Dabei wird nur ein reiner Gravitations-Oberflächenabfluss vorausgesetzt. Dieser Parameter steuert also die Position des Startpunktes des Flusses; umso kleiner der eingegebene Wert ist, desto höher beginnt der neue Fluss. Damit verlängert sich auch der abgeleitete Fluss, denn der Endpunkt (Einmündung) des Flusses hängt von diesen Parametern nicht ab. Bei einem kleinem Parameter "Min. Catchment" wird auch das Flussnetz dichter und verzweigter, weil auch kleine Einzugsgebiete genug Wasser zur Flussbildung sammeln können. Dieser Parameter ist als Fläche (m^2) einzugeben.

Der zweite Parameter "min. Length" definiert die kürzesten Wasserläufe, die noch als Fluss akzeptiert werden. Damit wird die Darstellung von kleinen sinn-

losen Flussstücken bereinigt. Die abgeleiteten Flussläufe sind in Rasterform sowie auch in Vektorform verfügbar.

6.4.5 Catchment

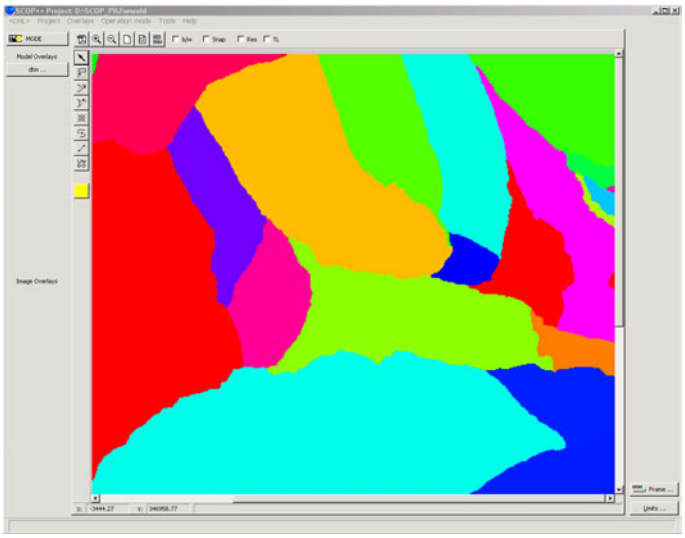


***Abb. 6.10**: Farbkodierte Einzugsgebiete (Wienerwald - Ausschnitt).*

Diese Funktion stellt die Einzugsgebiete für abgeleitete Flussläufe dar. Da die Einzugsgebiete aufgrund vorher berechneter Flussläufe abgeleitet werden, wird der Detaillierungsgrad und die Komplexität der CATCHMENT-Darstellung durch die RIVERS-Parameter gesteuert. Dabei gilt: umso kleiner der "min. Catchment"-Parameter gewählt wird, desto mehr Einzugsgebiete werden abgeleitet. Die Farben sind so ausgewählt, dass der dargestellte Inhalt gut differenziert ist.

6.4.6 Combi

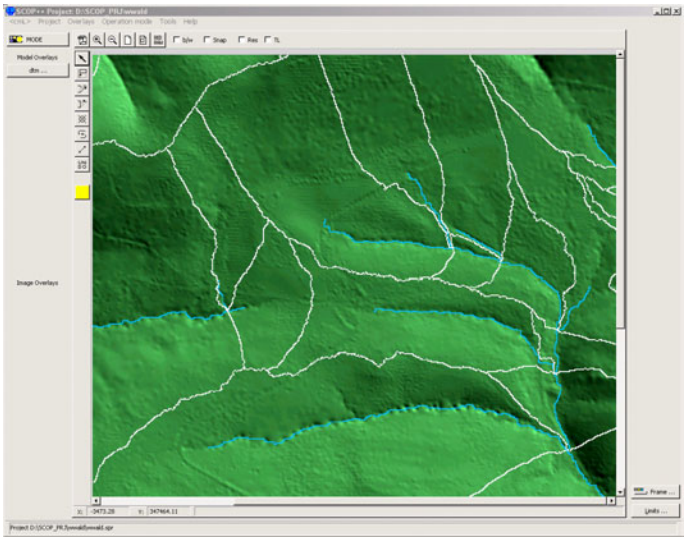


***Abb. 6.11**: Kombinierte Darstellung (Wienerwald - Ausschnitt).*

Die Funktion "COMBI" setzt einige schon abgeleitete Darstellungen in eine neue kombinierte Darstellung zusammen (Abb. 6.11). Sie ist in erster Linie als ein Visualisierungswerkzeug gedacht, das beim Interpretieren von abgeleiteten Flussläufen und Einzugsgebieten hilft. Die Flussläufe und Einzugsgebiete sind über geschummertem Gelände gelagert, so kann man gut visuell verifizieren, ob das Ergebnis akzeptabel ist. Andernfalls kann man die RIVERS-Parameter anpassen. Außerdem bietet diese Funktion den schnellsten Weg, um die Flüsse mit Einzugsgebieten über dem Gelände darzustellen.

6.4.7 Curvature

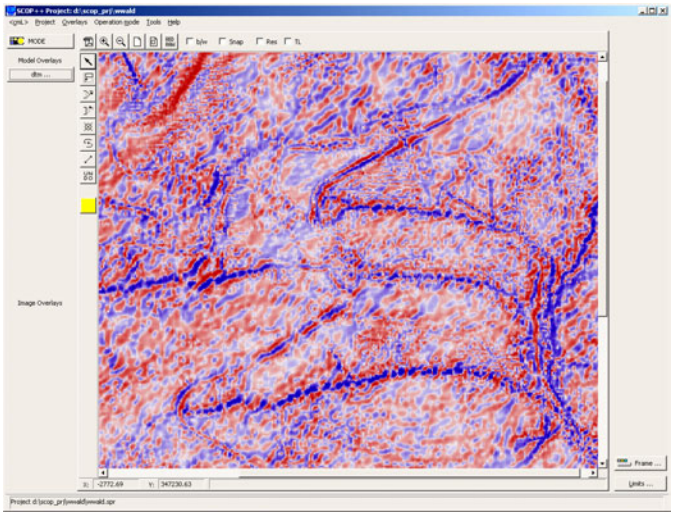


***Abb. 6.12**: Farbkodierte Krümmungen.*

Durch diese Funktion werden die Krümmungen der zuuntersuchenden Oberfläche berechnet und dargestellt. Nach dem Abtasttheorem hängt der größte berechnete Krümmungswert (im absoluten Betrag), neben der Geländeform, von dem GRIDSTEP-Parameter ab. Für die gezielte Untersuchung von Geländeformen, die große Krümmungen haben, ist mit kleinen GRIDSTEP- Parametern zu arbeiten. Will man einen generellen Überblick über Verlauf der Geländeoberfläche haben, wendet man etwas größere Werte für GRIDSTEP an. Die Krümmungen werden in zwei Klassen unterteilt, und zwar: die positiven (konvexen) und die negativen (konkaven) Krümmungen. Die positiven Krümmungen sind durch die rote, und die negativen Krümmungen durch die blaue Farbe dargestellt. Die Farbsättigung wird durch die Größe der Krümmungen moduliert; dem Null-Wert entspricht die neutrale graue Farbe (Abb. 6.12).

6.4.8 Exposition

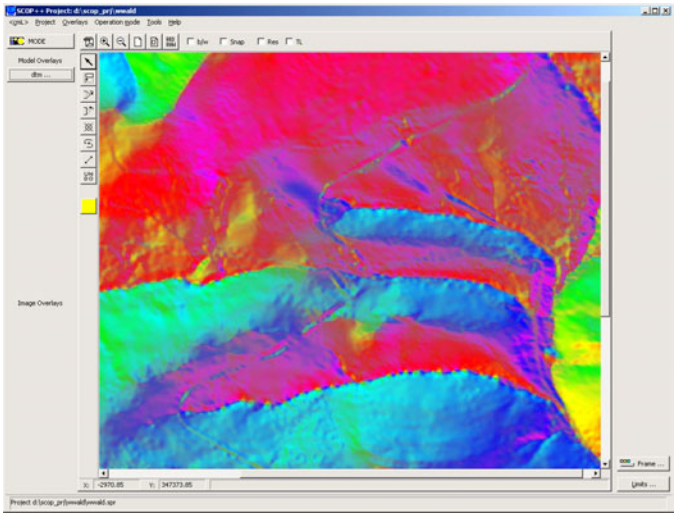


***Abb. 6.13**: Farbkodierte Exposition.*

Es werden die Expositionswerte zu einem Höhenmodell berechnet. Die ganze Farbskala wird kontinuierlich linear moduliert (Abb. 6.13). Die Gebiete, die nach Richtung Nord gestellt sind, werden durch türkis (cyan) Farbe dargestellt. Richtung Süd ist durch die rote, Ost durch die violett und West durch die gelbgrüne Farbe kodiert. Die Farbsättigung ist durch die Neigungswerte moduliert, sodass die horizontalen Gebiete neutral grau dargestellt sind. Der Intensitätskanal wurde frei gelassen für weitere Mischungen mit anderen SCOP++ Bildern, um noch komplexere Darstellungen machen zu können.

6.4.9 Raster-Slope

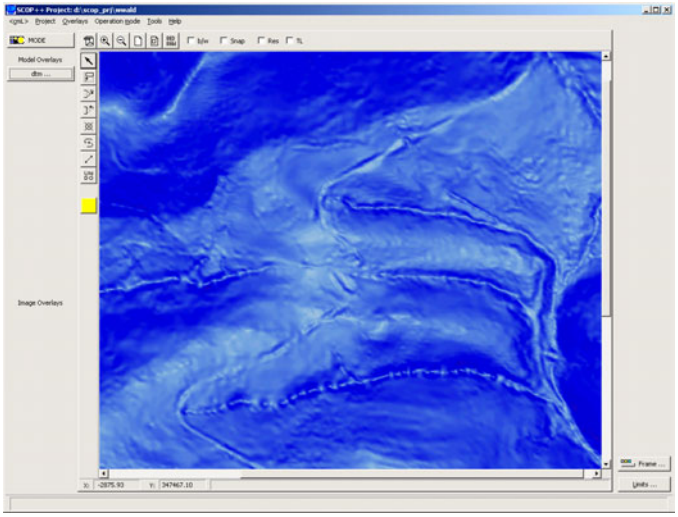


***Abb. 6.14**: Die Neigungswerte (Wienerwald - Ausschnitt).*

Diese Funktion dient zur Berechnung der Neigungswerte eines Höhenmodells (Abb. 6.15). Sie werden durch die Intensitäten der blauen Farbe dargestellt. Der größte Neigungswert im Modell wird beim Darstellen in die größte Farbintensität umgewandelt, sodass die Darstellungsmöglichkeiten optimal ausgenutzt werden. Um die Neigungsdifferenzen bei kleinen Neigungen deutlicher zu machen, werden die Neigungswerte durch die Quadratwurzelfunktion transformiert.

6.4.10 Kombinieren von Darstellungen

Die eben besprochenen Ansichten (VIEWS) von ModelOverlay können miteinander und/oder mit anderen ModelOverlay-Ansichten des SCOP.DTM kombiniert werden. Je nach dem, ob es sich um binäre einfärbige oder "True Color"-Bildern handelt, wählt sich auch die Methode zur Fusion der Bilder. Beim Einfügen von binären Bildern, maskieren die Pixel mit dem Wert 1 die vorhandenen Pixelwerte. Die Pixel mit dem 0-Wert werden als transparent interpretiert; sie lassen die vorhandenen Pixelwerte unverändert. Das Bild mit voller Farbskala (True-Color) nimmt von dem schon dargestellten Bild nur den Intensitätskanal und moduliert mit diesem seinen eigenen Intensitätskanal. Der Benutzer braucht sich nicht um den Bild-Typ kümmern. Er soll nur die Komponenten auswählen, die zusammen dargestellt sein sollen, der Rest macht das System. Auf diese Weise lassen sich sehr attraktive Darstellungen "per Knopfdruck" erzeugen, die sehr gut interpretierbar sind. Abb. 6.15 zeigt ein Beispiel.

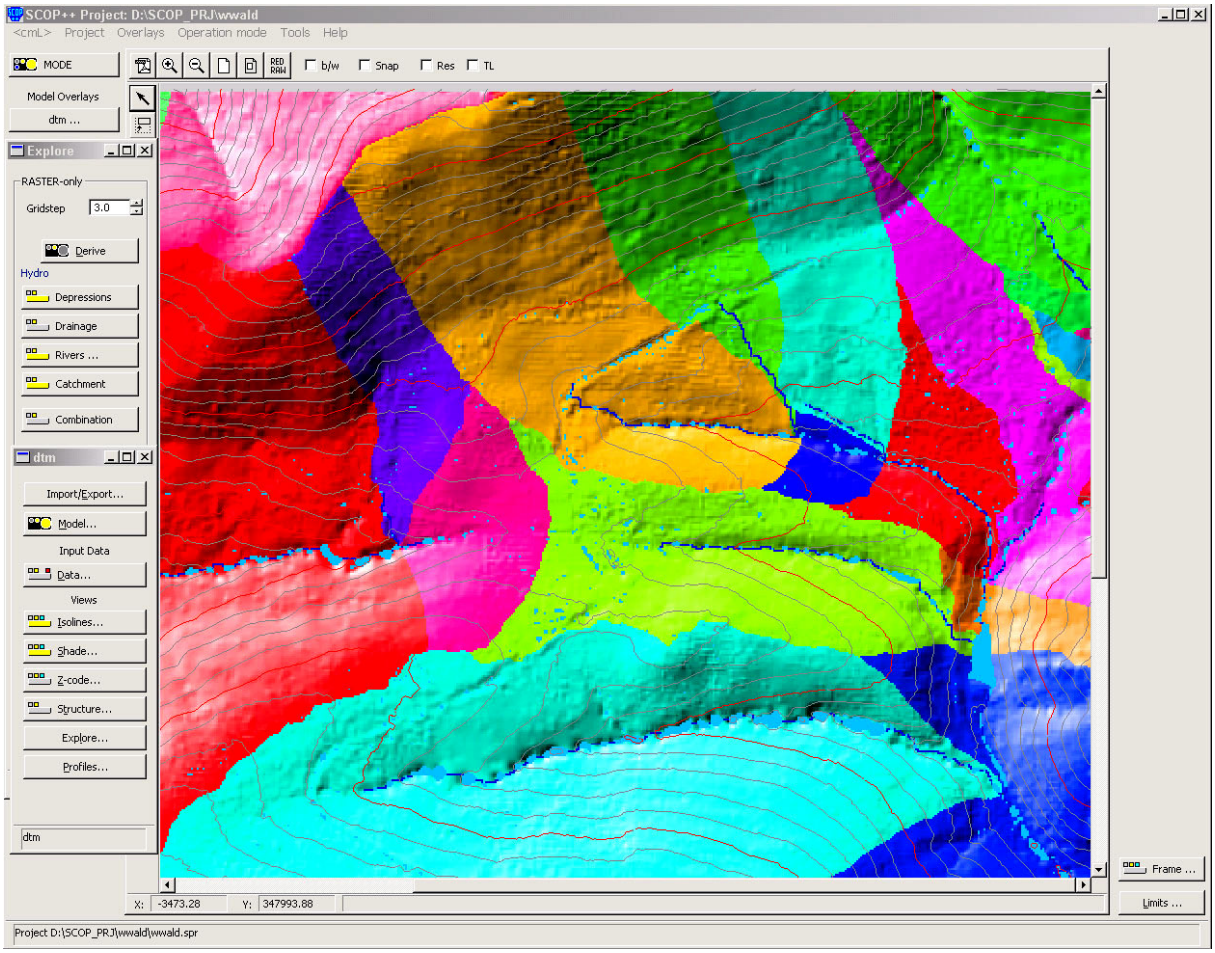


***Abb. 6.15**: Die kombinierte Darstellung. Die Einzugsgebieten-Darstellung moduliert ihren Intensitätskanal mit den Intensitäten, die von der Schummerung stammen. Die Isolinien, Flüsse und Mulden sind dieser Darstellung überlagert.*

6.4.11 Structure...

Diese Funktion ermöglicht das Einfügen von abgeleiteten Muldenpfaden und Flussläufen ins DGM aus prinzipiell zwei Gründen. Einerseits, um das muldenfreie Modell zu produzieren und andererseits um das Modell mit Strukturlinien zu ergänzen. Wird das DGM für weitere hydrologische Analysen benutzt, ist sehr oft Bedingung, dass es muldenfrei ist (weil sonst manche numerische Probleme beim Analysieren auftreten). Ein DGM lässt sich durch Einfügen nur der Muldenpfade in den Datensatz interpolieren. Dieses Verfahren empfiehlt sich für Gebiete, wo der Oberflächenabfluss die signifikante Rolle beim Gestalten der Geländeoberfläche spielt. Dort treten die Mulden selten in der Natur auf; sie sind im DGM wegen fehlerhafter oder ungünstig verteilter Daten verursacht. Deswegen sind die abgeleiteten Muldenpfade relativ klein und verursachten nur die kleinen "Korrektionen" des ursprünglichen DGMs.

Abgeleitete Flussläufe als Strukturlinien sind für solche DGMs gedacht, wo ungünstig verteilte Daten die Interpolationsergebnisse stark verschlechtern. Dieser Fall tritt oft bei gefilterten Laserscanner-Daten auf, wo in bewaldeten Gebieten, wegen sehr hohe Vegetationsdichte, die gemessenen Daten herausgefiltert wurden. Da in Tälern die Vegetation ziemlich dicht ist, können dort abgeleitete Flussläufe die Interpolationsergebnisse positiv beeinflussen (s. Kap. 7).

Wenn man "Properties" des STRUCTURE-Knopfes anklickt, öffnet sich ein Fenster, dass die Einfügung der abgeleiteten Strukturlinien steuert. Die ersten zwei Parameter "Min. Catch Area" und "Min. Rivers Length" haben dieselbe Bedeutung, wie sie schon bei RIVERS erklärt wurde. Beide sind hier wegen Experimentierungszwecke vor dem Einfügen in dem DGM-Datensatz zugänglich gemacht. Man ändert die Werte und klickt auf Apply. Dann werden die neuen Parameter übernommen und die Flussläufe wieder berechnet und dargestellt. Das wiederholt man bis die abgeleiteten Flüsse den Realitäten nahe kommen. Danach wählt man, ob die Flüsse und/oder Muldenpfade als Formlinien oder Bruchkanten in den Datensatz übergenommen werden. Nach dem Klicken auf "Make to Data" werden die Daten als neue "Data overlay" nach SCOP++ übertragen. Dabei sollte man etwas vorsichtig sein, denn nach der Datenübertragung fängt die neue Interpolation und Aktualisierung aller aktiven "Model views" an. Dies kann man leicht durch Aktivieren von "Freeze processing" mit dem MODE-Knopf umgangen werden.

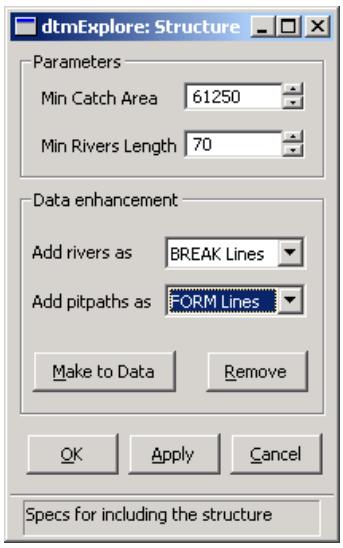


***Abb. 6.16**: Dialogfeld mit zusätzlichen Parametern zum Ableiten von Struktur-Linien.*

7 PRAKTISCHE BEISPIELE

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt einerseits in der Erhöhung von geomorphologischer Qualität eines DGMs und andererseits in hydrologischen sowie morphometrischen Visualisierungen. Die theoretischen Ansätze sowie die angebene Algorithmen, die im Kapitel 5 eingebracht wurden, werden dafür auf zwei Datensätze angewendet.

Der erste Datensatz stammt aus der Laser-Abtastung des Wienerwald-Gebietes und wird überwiegend zum Darstellen von Methoden der geomorphologischen Qualitätserhöhung angewendet.

Der zweite Datensatz stellt einen Teil der Marsoberfläche dar, deren hydrologische und morphometrische Oberflächenanalyse für wissenschaftliche Interpretationen eines so immensen Datensatzes einen unschätzbaren Wert haben können.

Beide Beispiele sind mit der Software "Surface exploration", ein Modul von SCOP++, bearbeitet und visualisiert worden.

7.1 Das Projekt Wienerwald

Es war das erste Laser-Pilotprojekt, das am I.P.F. bearbeitet wurde. Das Ziel des Projektes war, die Eigenschaften sowie die Anwendbarkeit der Technologie des flugzeuggetragenen Laserscannings besser kennenzulernen, besonders in bewaldeten Gebieten. Im Rahmen dieses Projektes wurden etwa 91km^2 des Wienerwald-Gebietes mit dem Laser-Scanner Mod. ALTM1020 von Optech Inc. beflogen. Es wurden ungefähr 9257000 Laserpunkte, innerhalb des Interessengebietes erfasst, die durchschnittlich 3.1m entfernt sind (Kraus et al. 1997).

Die Einzelheiten über diese und der nachfolgenden Laserscanner-Systeme mit ihren Messeigenschaften findet man in 3. Kapitel.
1999 wurde ein weiteres Laserscanning durchgeführt, diesmal aber mit dem TOPSCAN-Scanner, der eine Punktdichte in Flugrichtung von 0.20m und quer zur Flugrichtung von 1.7m lieferte. Es wurde nur ein Teil vom ursprünglichen Testgebiet abgetastet, sodass man die Auflösungssteigerung offensichtlich darstellen kann (Briese et al. 2001).

Nach der Filterung kommen die unerwarteten geomorphologischen Formen besonders gut zur Ausprägung. Schon nach den ersten Erfahrungen mit Laserscanner-Daten wurden die unerwarteten künstlichen Muldenketten entlang

Täler bemerkt, die die sonst ausgezeichnete geomorphologische Qualität des interpolierten DGMs stark beeinflussen. Schon damals ist klar geworden, dass der Laserscanner-Datensatz mit Strukturlinien versehen werden sollte. (Kraus & Pfeifer 1998, Kraus 2000). Die Ursachen solcher geomorphologischer Unstetigkeiten im DGM wurden im 1. Kapitel im Detail beschrieben. Im Folgenden wird die vorgeschlagene Lösung dargestellt.

7.1.1 Vorgeschlagene Lösung

Durch Regensimulation und Analyse vom Oberflächenabfluss über dem DGM können die unerwarteten geomorphologischen Formen aus der interpolierten Oberfläche entfernt und die Qualität des DGMs erhöht werden. Das Grundprinzip liegt darin, dass die Linien des konzentrierten Abflusses als Strukturlinien (Formlinien und Bruchkanten) einbezogen werden. Im ersten Schritt werden nur solche Strukturlinien eingeführt, die den kontinuierlichen Abfluss über die ganze interpolierte Oberfläche ermöglichen. Da für jeden abflusslosen Raum (Mulde) existiert eine Linie des konzentrierten Abflusses, die eine kontinuierliche Entwässerung dieser Mulde ermöglicht, diese Linie wird Muldenpfad genannt (mehr darüber im Kap. 6).

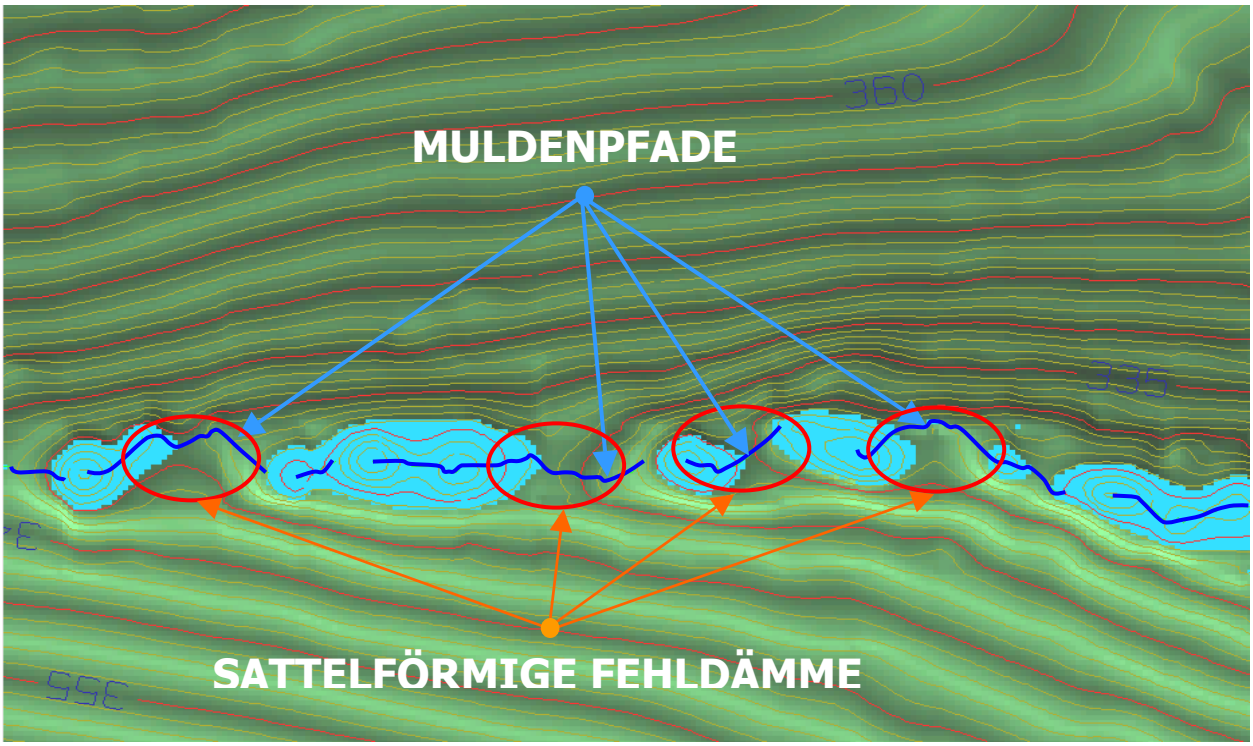


***Abb.7.1**: Unerwartete (Schein-) Mulden mit Muldenpfaden im Gebiet des konzentrierten Abflusses.*

7.1.2 Behandlung von Mulden

Man fügt die Muldenpfade als Formlinien in die erneute Interpolation ein, um die sattelförmigen künstlichen Fehldämme lokal zu beseitigen. Dadurch werden die Höhenabweichungen, die durch fehlerhafte Klassifikation und/oder ungünstige Verteilung der gemessenen Daten verursacht sind, beseitigt (s. Abb.7. 2). Damit wird ein sogenanntes muldenfreies Modell erzeugt. Dieses Modell ist eine Voraussetzung für die automatisierte Extraktion der Linien des konzentrierten Abflusses (abgeleitete Flüsse).

Die Muldenpfade sind im bewegten Gelände relativ kurz und dienen nur für das gezielte Modellieren von unstetigen Oberflächenstrukturen (Mulden). Das Einfügen von abgeleiteten Flüssen als Strukturlinien in ein DGM ist in Talbereichen voll berechtigt.

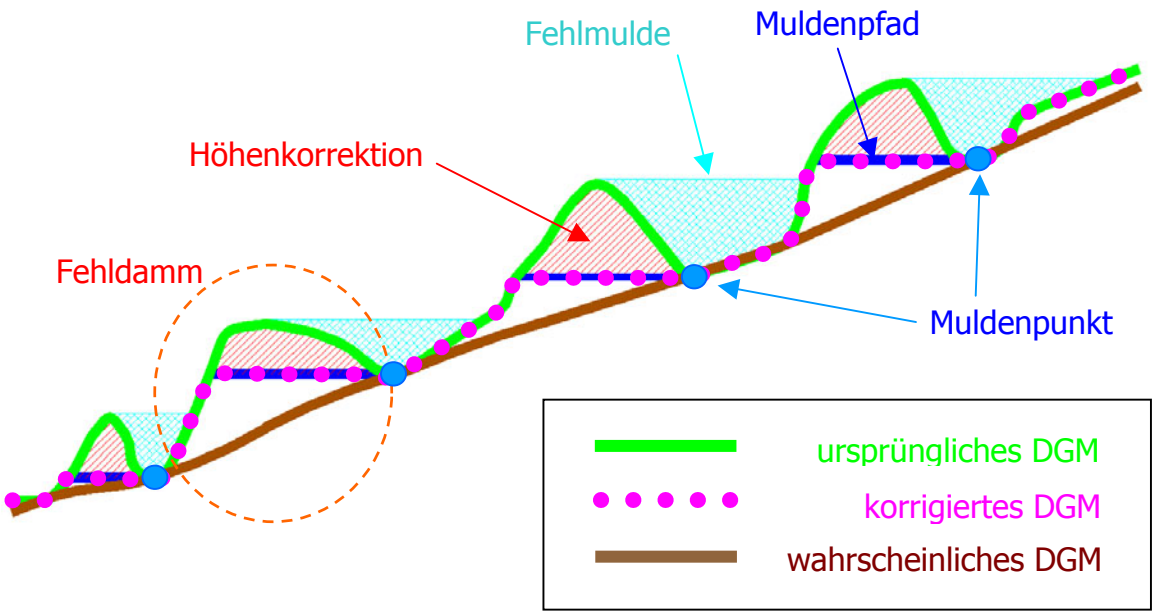


***Abb.7.2**: Der Einfluss der Muldenpfade, die als Formlinien in eine erneute Interpolation eingeführt werden.*

Abbildung 7.2 stellt einen Teil des Längsprofiles einer Linie des konzentrierten Abflusses dar. Ein DGM (grünes Profil) wird aufgrund gemessener Punkte, die als die Bodenpunkte klassifiziert wurden, interpoliert. Nach der Identifikation der Mulden (türkise Flächen) und der Bestimmung der Muldenpfade (blaue Linien), werden die Muldenpfade als die Strukturlinien in der neuen Interpolation eingeführt und das ursprüngliche DGM wird lokal um eine Höhenkorrektion

(rote Fläche) korrigiert. Damit werden die unerwarteten Höhenschwingungen längs der Linien des konzentrierten Abflusses im gewissen Maß entfernt und die interpolierte Fläche nähert sich der erwarteten Geländeoberfläche (braunes Profil). Doch das Längsprofil im Gebiet des konzentrierten Abflusses wird jetzt eine Stufenform annehmen, deren Sinnhaftigkeit zu weiteren Diskussionen Anlass gibt. Dies kann aber leicht umgegangen werden, wenn man als Strukturlinie eine räumliche Kurve übernimmt, derer Knoten die Muldenpunkte entlang der jeweiligen Muldenkette sind (s. Abb. 7.2).

7.1.3 Die abgeleiteten Flussläufe als Strukturlinien

Die rechnerische Regensimulation und die Analyse des Oberflächenabflusses vom muldenfreien DGM, das so genannte Wassersummationsverfahren, ermöglichen eine Extraktion der Linien des konzentrierten Abflusses in Tälern. Es wird vorgeschlagen, diese Linien als Strukturlinien in die Interpolation des DGMs einzufügen. Beim DGM, das durch lineare Interpolation bzw. Delaunay-Triangulation interpoliert wird, werden die Dreieckskanten an die Kanten der Strukturlinien gezwungen. Damit läuft die interpolierte Fläche exakt durch die Strukturlinien. Abb. 7.3 stellt einen Teil des Tales mit rechnerisch ermittelter Linie des konzentrierten Abflusses dar (blaue Linie). Diese Linie ist als Strukturlinie ins DGM eingebettet, das nach der TIN-Methode interpoliert wurde und mit Schummerung dargestellt ist.

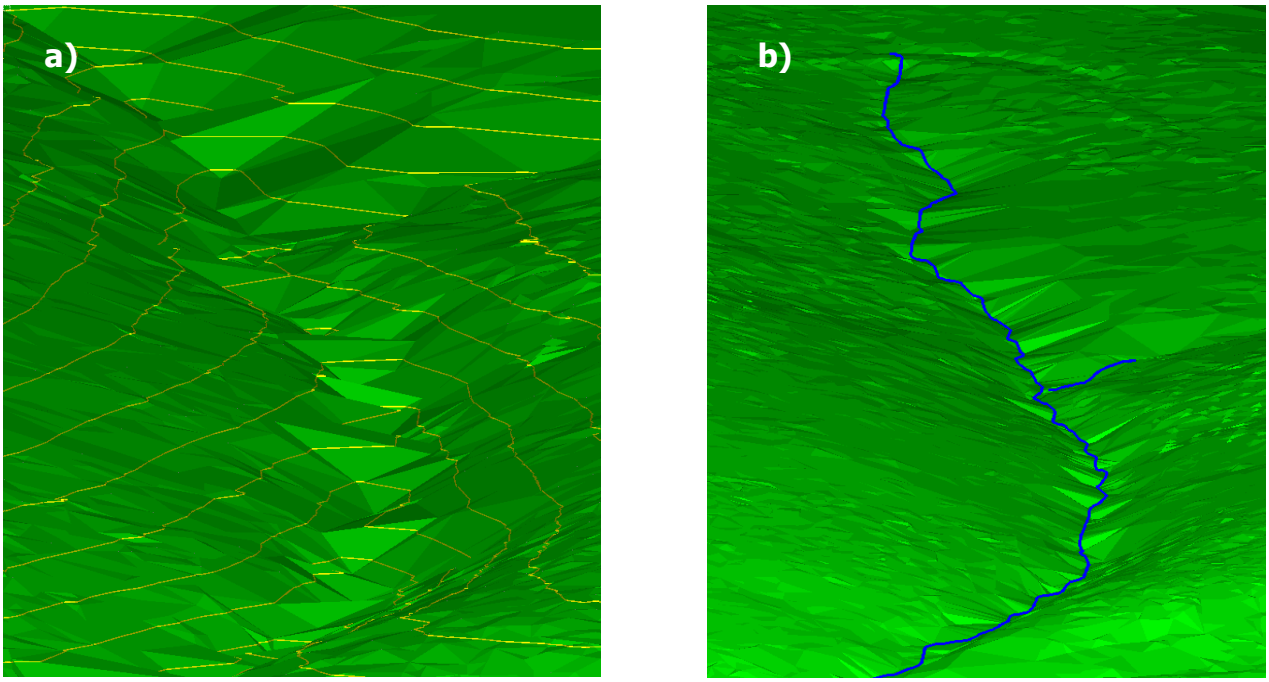


***Abb.7.3**: DGM eines Tales (TIN): a) aus dem originalen Datensatz; b) mit Linie des konzentrierten Abflusses als Strukturlinie.*

Wird dieses DGM mit dem DGM, das ohne Strukturlinien berechnet wurde, verglichen, merkt man eine deutliche Steigerung der geomorphologischen Qualität. Durch diese Methode wird in die Interpolation ein neuer Datensatz eingeführt, der nicht direkt von Laserscanner-Messungen stammt. Die so gewonnenen Daten ergänzen den Originaldatensatz eben dort, wo die Verteilung der Originaldaten für eine zuverlässige Interpolation nicht günstig ist. Auf diese Weise wird das Interpolationsergebnis der charakteristischen topographischen Formen im geomorphologischen Sinne akzeptierbar. Diese Methode ist anwendbar nur in fluvialen Gebieten, wo die Geländeoberfläche meistens durch Oberflächenabfluss gestaltet ist.

Noch bessere Ergebnisse werden durch Lineare Prädiktion als Interpolationsmethode erlangt, mit Muldenpfaden als Strukturlinien und eingeführten Linien des konzentrierten Abflusses (s. Abb. 7. 4 und 7. 5).

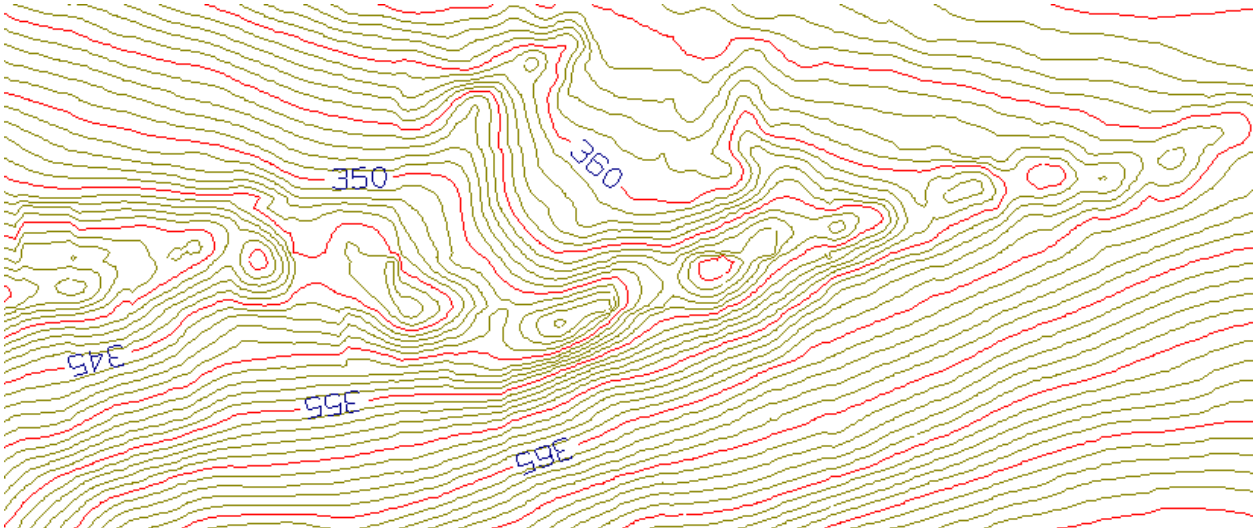


***Abb.7.4**: Schichtlinien, die aufgrund DGM ohne Strukturlinien abgeleitet wurden.*

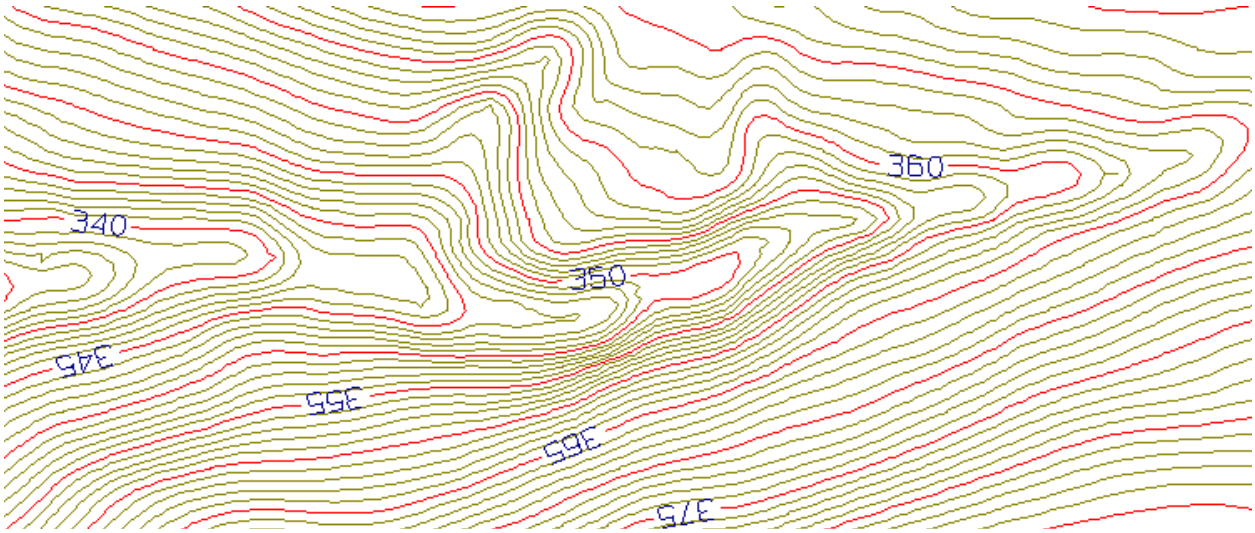


***Abb.7.5**: Schichtlinien, die aufgrund des DGMs mit eingebetteten Muldenpfaden und Flussläufen als Strukturlinien abgeleitet wurden.*

Ein DGM, das durch dieses Verfahren entstanden ist, ist neben den üblichen topographischen Anwendungen, auch für viele hydrologische Analysen geeignet. Solche Analysen brauchen fast immer ein muldenfreies Modell, um die numerischen Probleme in Algorithmen für die Simulation des Oberflächenabflusses zu umgehen (Cacceta 1999).

7.1.4 Bearbeitung des Testdatensatzes

Die vorgestellten Methoden sowie rechentechnische Lösungen wurden aufgrund eines umfangreichen Datensatzes verifiziert. Der ausgewählte Testdatensatz ist ein Teil vom Wienerwald-Datensatz und befindet sich in der Nähe vom Hinterheinbach-Dorf, etwa nordwestlich vom Stadtzentrum. Das Testfeld hat eine rechteckige Form und erstreckt sich 2200m nach Osten sowie 1700m nach Norden, wie es im Abbildung 7.6 dargestellt ist.

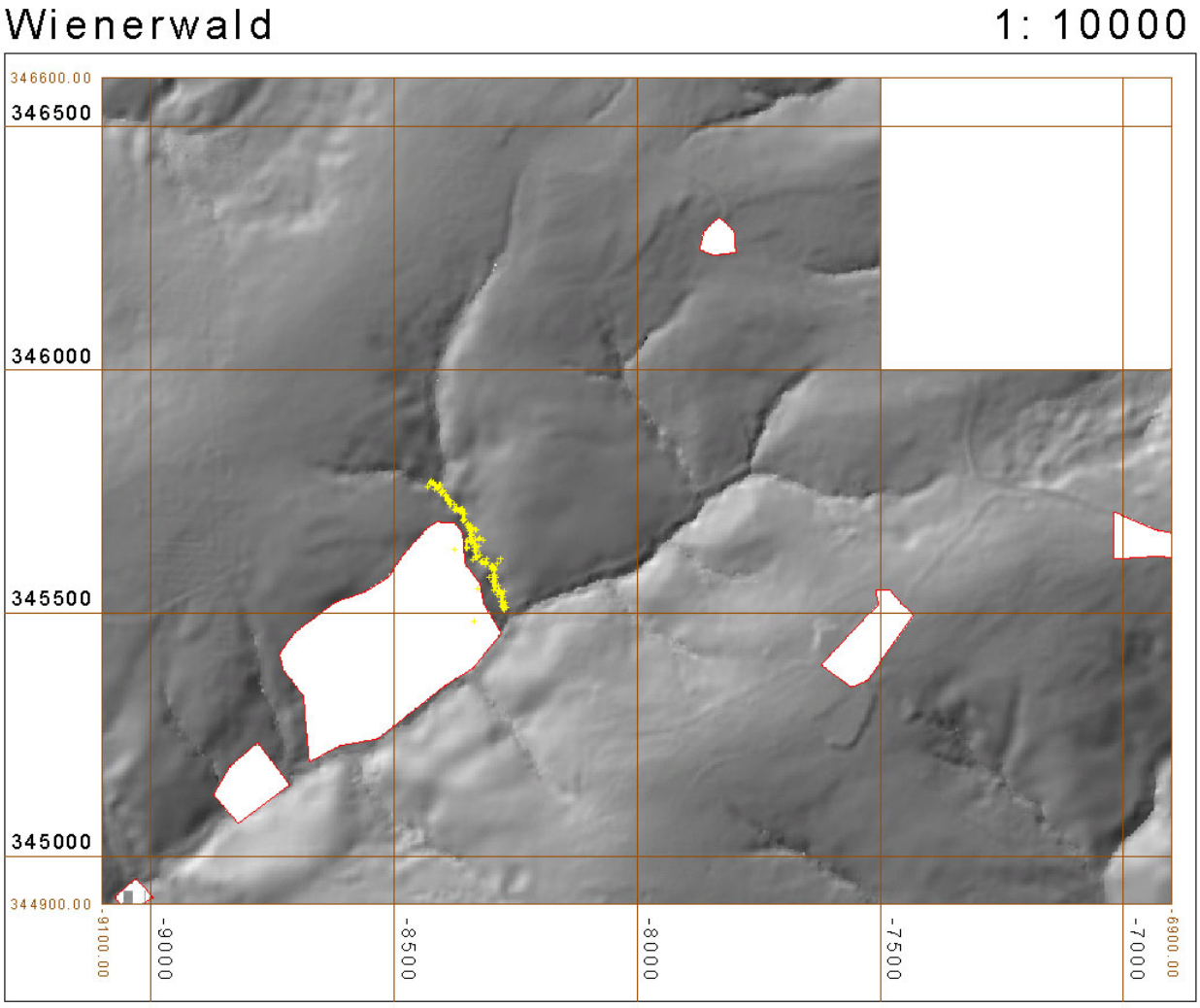


***Abb.7.6**: Das Testgebiet in geschummerter Darstellung. Die gelben Punkte sind die terrestrischen Kontrollmessungen, die nachfolgend zur quantitativen Genauigkeitskontrolle verwendet wurden. Die ausgesperrten (weißen) Flächen sind Gebiete, die zu wenig Bodenpunkte für die zuverlässige Oberflächeninterpolation enthalten (meistens sind es Siedlungsgebiete).*

Zunächst interpoliert man das DGM und überprüft es auf geomorphologische Unstetigkeiten. Die abgeleiteten Mulden bezeichnen die wahrscheinlich problematischen Gebiete, besonders in Tälern (s. Abb. 7.7).

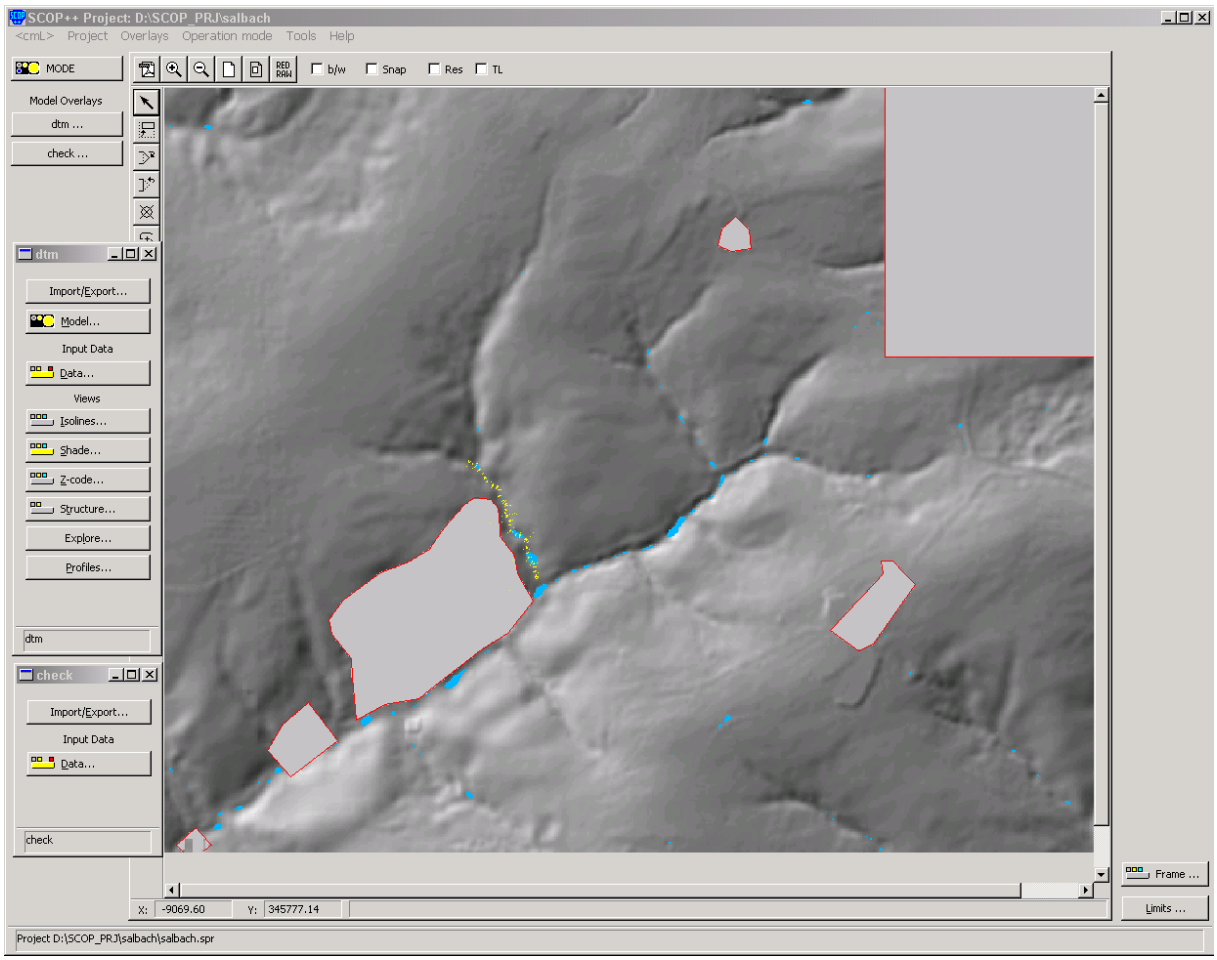


***Abb.7.7**: Das Testgebiet mit abgeleiteten Mulden (hellblaue Fläche) - im SCOP++ Benutzerumgebung.*

Es ist bereits ein Modell hoher Qualität, denn außer den Talgebieten sind kaum Mulden vorhanden und auch dort findet man nur wenige. Die Ursache dafür könnte darin liegen, dass die Daten schon vorher qualitativ klassifiziert und gefiltert wurden.

Auf der Benutzeroberfläche sieht man, dass zwei Model-Overlays benutzt wurden. Der zweite (Name: Check) umfasst nur die Kontrollpunkte. Damit können die Kontrollpunkte zusammen mit anderen Darstellungen am integrierten Graphikpanel gleichzeitig dargestellt werden, ohne die Interpolationsergebnisse des primären Model-Overlays (Name: DTM) zu beeinflussen.

Danach wurden die Flussläufe abgeleitet und als Strukturlinien für eine erneute Interpolation herangezogen. Dafür müssen die Parameter zur Ableitung von Flussläufen eingegeben werden. Die beiden Parameter und ihre Wirkung aufs Ableiten von Flussläufen wurden im Kap.5. bereits detailliert erläutert. In den

meisten Fällen werden sie empirisch durch ein wenig Experimentieren bestimmt. Dabei gelten die vorgeschlagenen Default-Werte als vernünftige Ausgangswerte. Wenn einmal die geeigneten Parameter-Werte gefunden sind, kann man die abgeleiteten Flussläufe und/oder Muldenpfade als Strukturlinien in den bestehenden Datensatz importieren. Der Benutzer steuert diesen Prozess durch das intuitive Bedienen des Dialogfeldes "Structure" (s. Abb. 7.8).

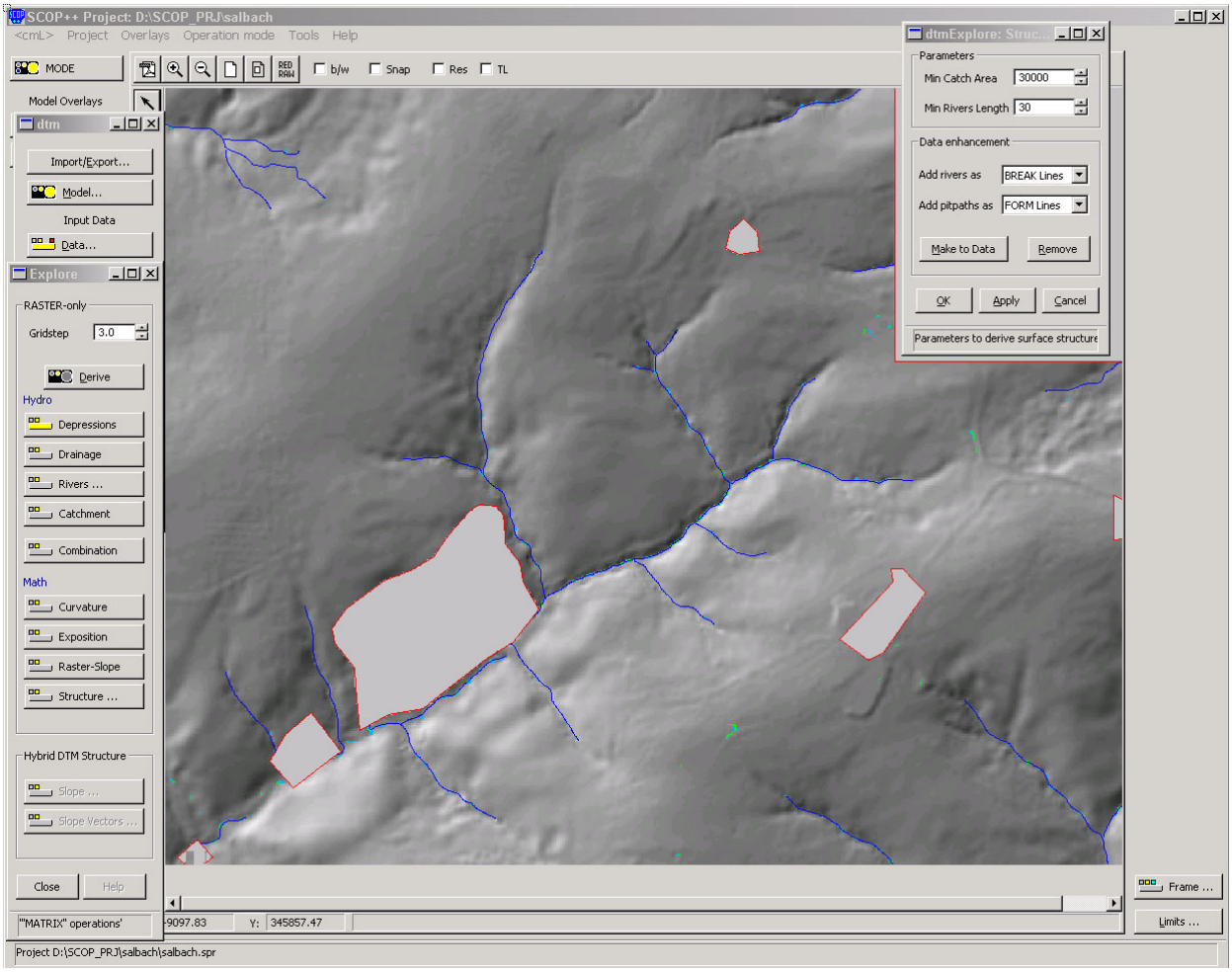


***Abb.7.8**: Die SCOP++ Umgebung beim Ableiten sowie Importieren von Strukturlinien. In der rechten oberen Ecke befindet sich das Structure-Dialogfeld. Das integrierte Graphikpanel stellt das korrigierte Modell mit Strukturlinien dar (die Flussläufe - blaue Linien, die Muldenpfade - grüne Linien). Die übergebliebenen Mulden sind wieder hell blau bezeichnet.*

Nach der Bearbeitung blieben nur noch sporadische Mulden übrig. Ihre Ursache liegt wahrscheinlich in der Diskretisierung während der Konvertierung des hybriden SCOP-DGMs in das reine MATRIX-Rastermodell. Die Muldenpfade als Strukturlinien haben keinen weiteren Sinn, als nur ein hydrologisch korrigiertes (muldenfreies) Modell herzustellen. Die abgeleiteten Flüsse spiegeln die vorhandene Geländestruktur, besonders in Tälern, sehr gut wider. Ihre Anwendung als Strukturlinien ist voll berechtigt. Diese Feststellung gilt natürlich nur für Oberflächen, die überwiegend durch fluviale Prozesse gestaltet sind.

Dagegen ist diese Methode für städtische Gebiete, Karstgebiete, usw. kaum geeignet.

7.1.5 Die quantitative Genauigkeitskontrolle

Die erzielte Genauigkeit des DGMs wurde aufgrund terrestrischer Kontrollmessungen untersucht. Alle Kontrollmessungen sind durch gelbe Kreuzchen in Abb. 7.6 und 7.7 dargestellt. Obwohl 257 Punkte gemessen wurden, wurden nur diese ausgewählt, die sich in der Nähe von Muldenpfaden befinden, denn nur in diesen Bereichen wird das ursprüngliche DGM hydrologisch korrigiert (s. Abb. 7.2). Die Höhen von ausgewählten Kontrollpunkten (H_{SOLL}) wurden mit den Höhen (H_{IST}), die aus dem DGM interpoliert wurden, verglichen. Aufgrund von 20 Kontrollpunkten wurden die Höhendifferenzen berechnet, sowohl für das ursprüngliche als auch für das korrigierte DGM. Dabei wurden die Höhen der Kontrollpunkte als absolut fehlerfrei angenommen (s. Tab. 7.1).

***Tab.7.1**: Die Höhendifferenzen zwischen Kontrollpunkten und DGM*

Ursprüngliches DGM				Korrigiertes DGM			$\lvert v_{UR} - v_{KORR} \rvert$
Punkt Nr.r.	$v=H_{SOLL}-H_{IST}$	$\varepsilon = v - \eta$	ε^2	$v=H_{SOLL}-H_{IST}$	$\varepsilon = v - \eta$	ε^2	Verbesserung / Verschlechterung
1	-0,72	0,85	0,72	-0,83	0,38	0,14	0,11
2	-1,54	0,03	0,00	-1,74	-0,53	0,29	0,20
36	-0,60	0,97	0,94	-0,63	0,58	0,33	0,03
72	-1,66	-0,09	0,01	-1,69	-0,48	0,23	0,03
85	-0,07	1,50	2,24	-0,10	1,11	1,22	0,03
86	-0,95	0,62	0,38	-0,99	0,22	0,05	0,04
120	-0,89	0,68	0,46	-0,79	0,42	0,17	0,10
122	-2,04	-0,47	0,22	-1,93	-0,72	0,52	0,11
126	-2,71	-1,14	1,30	-1,46	-0,25	0,06	1,25
151	-0,26	1,31	1,71	-0,13	1,08	1,16	0,13
162	-3,43	-1,86	3,47	-2,05	-0,84	0,71	1,38
163	-3,41	-1,84	3,39	-2,03	-0,82	0,68	1,38
165	-2,38	-0,81	0,66	-1,80	-0,59	0,35	0,58
166	-3,35	-1,78	3,18	-2,78	-1,57	2,48	0,57
532	-0,11	1,46	2,13	-0,18	1,03	1,05	0,07
565	0,05	1,62	2,62	0,03	1,24	1,53	0,02
566	-1,54	0,03	0,00	-1,82	-0,61	0,38	0,28
573	-1,94	-0,37	0,14	-1,91	-0,70	0,50	0,03
584	-0,48	1,09	1,18	0,51	1,72	2,94	0,03
597	-3,32	-1,75	3,07	-1,81	-0,60	0,36	2,51
Σ	-31,35	0,00	27,82	-24,13	0,00	15,17	

Aufgrund der berechneten Höhendifferenzen lässt sich der gesamte Fehler v auf eine systematische (h) sowie auf eine zufällige Komponente (e) aufteilen. Die beiden Komponenten lassen sich aufgrund der bekannten Formel wie folgt ausdrücken:

$$v = H_{SOLL} - H_{IST} = \eta + \varepsilon \qquad (7.1\text{-}1)$$

systematische Komponente:

$$\eta = \frac{\sum v}{n} \qquad (7.1\text{-}2)$$

zufällige Komponente:

$$\varepsilon = v - \eta \qquad (7.1\text{-}3)$$

wobei ist: n - Anzahl der gemessenen Punkte im Tal (im diesem Fall: n=20)

Standardabweichung:

$$\sigma = \pm\sqrt{\frac{\sum \varepsilon^2}{n}} \qquad (7.1\text{-}4)$$

Damit bekommt man folgende Schätzungen der erzielten Genauigkeit:

Für das ursprüngliche DGM:

η = -31.35 / 20 = -1.57 m
σ = (27.82 / 20)$^{1/2}$= 1.18 m

Für das korrigierte DGM:

η = -24.13 / 20 =-1.21 m
σ = (15.17 / 20)$^{1/2}$= 0.87 m

Die obigen Ergebnisse zeigen eine Verringerung vom systematischen sowie zufälligen Fehler um etwa 25%. Noch wichtiger ist eine Analyse der Verbesserungen/Verschlechterungen auf die einzelnen Kontrollpunkte, die durch diese Methode erreicht wurden. In obiger Tabelle sind die Verschlechterungen rot hervorgehoben. Damit ist es offensichtlich, dass die Methode keine groben Fehler provoziert. Der größte Anteil der Verschlechterungen ist vernachlässigbar (ein paar Zentimeter). Einige sind jedoch etwa größer und gehen bis zu 30cm. Die Verbesserungen sind in der Regel größer und erreichen Werte im Meterbereich. Die größte Verbesserung beträgt 2.5m.

Damit ist die Methode nicht nur für die geomorphologische Qualitätssteigerung und Ableitung von Strukturlinien gerechtfertig, sondern auch für die Genauigkeitssteigerung.

7.2 Das Projekt MARS-EXPRESS

Obwohl man nicht mit Sicherheit davon ausgehen kann, dass die Marsoberfläche durch fluviale Prozesse gestaltet wurde, können die hydrologischen sowie morphometrischen Oberflächenanalysen viel bei Überlegungen über die geologische und klimatologische Geschichte des Planeten Mars sowie über geomorphologische Prozesse, die auf dem Mars wirken, helfen. Die Erklärungen und möglicherweise Antworten auf diese Fragen sind das Hauptziel der ersten europäischen Mission zum Planeten Mars - Mars-Express (MEX), wobei die Rolle des Wassers in der Planetengeschichte im Zentrum des Interesses liegt (Neukum 2003). Da das I.P.F. sehr aktiv in diesem Projekt involviert ist und die MEX-Daten noch nicht zugänglich sind, wurden als Vorbereitung die Daten, die von der früheren Mars-Mission der NASA stammen, bearbeitet.

Im Rahmen der Mission Mars Global Surveyor (MGS) wurden Daten über die Marsoberfläche durch den an Bord befindlichen Laser Profiler MOLA (Mars Orbital Laser Altimeter) erfasst und zur Erde gesendet. Von März 1999 bis Juni 2001 lieferte MOLA mehr als 640 Millionen Einzelpunkte der Marsoberfläche, die aber sehr ungleichmäßig verteilt sind. Die so gewonnenen Daten haben folgende geometrische Merkmale:

***Tab.7.2**: Lage- und Höhenauflösung sowie die Höhengenauigkeit des MOLA-Datensatzes (nach Smith et al. 2000)*

Vertikale Auflösung	37.5cm
Vertikale Genauigkeit (absolut)	<1m (wegen Flugbahngenauigkeit)
Laserfleck auf der Oberfläche	168m (bei 400km Flugbahn)
Punktabstand in Flugrichtung	300m
Punktabstand quer zu Flugrichtung	4km (Mittelwert am Äquator)

Die Daten wurden nicht aufgrund einer hierarchischen robusten Interpolation von groben Fehlern bereinigt, sondern das I.P.F. entwickelte eine andere Methode, die anstelle von Einzelpunkten ganze Liniensegmente analysiert (Die Methode ist ausführlich in Dorninger et al. 2003 beschrieben).

7.2.1 Das Testgebiet

Als Testdatensatz für einfache hydrologische und morphometrische Analysen sowie für ihre Visualisierungen wurde das DGM benutzt, das aufgrund gefilterter MOLA-Daten am IPF berechnet wurde. Das Testgebiet befindet sich in der Region des Valles Marineris und dehnt sich 10°29´ (620km) nach Osten und 9°18´ (550km) nach Norden aus (als mittlerer Marsradius wurde der Wert 3389508m genommen - nach Smith et al. 1999). Die Lage des Testgebietes auf einem globalen DGM ist durch ein weißes Rechteck in Abb. 7.9 bezeichnet.

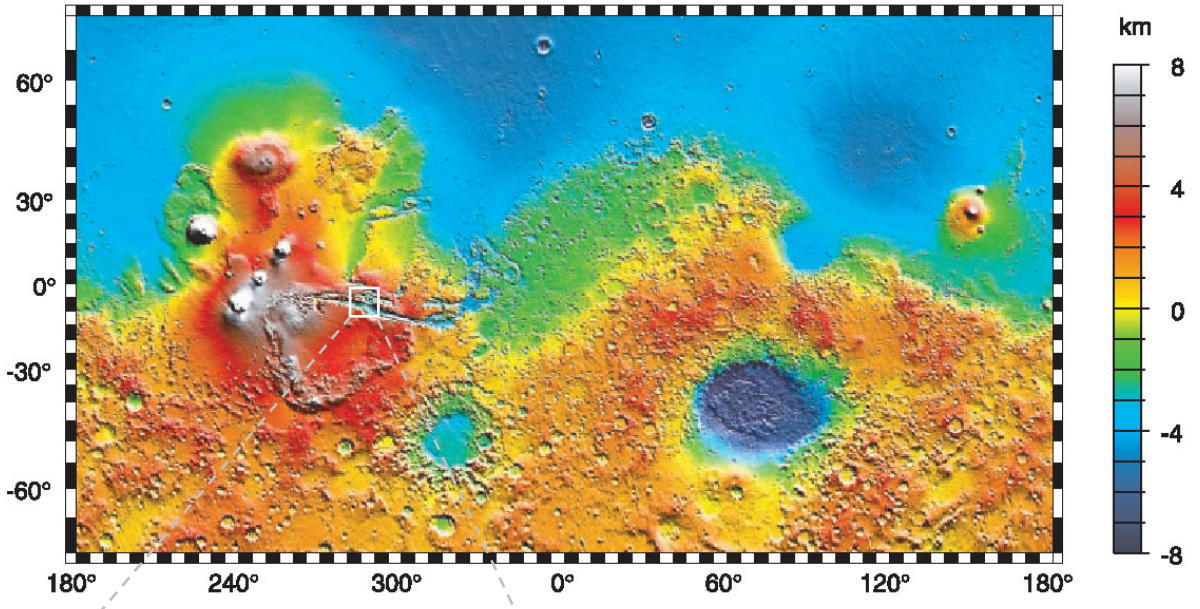


***Abb.7.9**: Das globale DGM vom Mars, wobei die Höhen durch Z-Kodierung dargestellt sind. Das weiße Rechteck bezeichnet etwa die Lage sowie die Ausdehnung des Testbereiches (Nach Smith et al. 1999).*

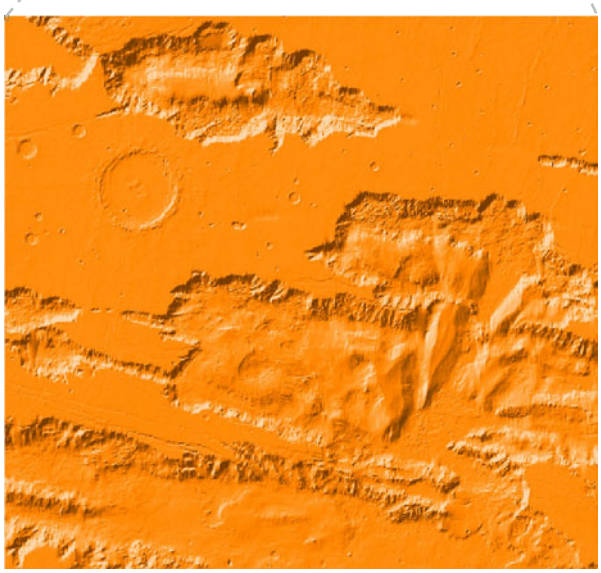


***Abb.7.10**: Valles Marineris – Testgebiet.*

Das Valles Marineris gilt als größtes Grabensystem am Mars (s. Abb. 7.10). Die Höhenunterschiede betragen rund 10000m, wobei der relative Höhenunterschied vom oberen Rand des Grabensystems bis zur Sohle im Mittel etwa 6000m beträgt (Dorninger 2003). Die großräumigen abflusslosen Räume sowie die extremen Höhenverhältnisse überschreiten weit diejenigen auf der Erde. Damit setzen diese Daten sehr große Anforderungen an die Software- und Hardware-Ressourcen, sodass ein solcher Datensatz auch für Software-Testen sehr gut geeignet ist.

Die theoretischen Überlegungen über einzelne hydrologische sowie morphometrische Analysen wurden schon im Kap.5. ausführlich erklärt. In diesem Abschnitt werden sie auf dem Valles Marineris-Testgebiet durchgeführt. Die Ergebnisse werden so visualisiert, dass die Zusammenhänge zwischen den berechneten topographischen Attributen und der Oberflächentopographie sehr gut ausgeprägt sind, sodass die Interpretation der Ergebnisse erleichtert wird. Das DGM des Testgebietes wurde mit einer Rasterweite von 330m interpoliert. Die nachfolgende rasterbasierte Oberflächenanalyse wurde mit der Rasterweite von 1km berechnet. Alle Analysen und Darstellungen wurden mit SCOP++ hergestellt.

7.2.2 Die Depressionen

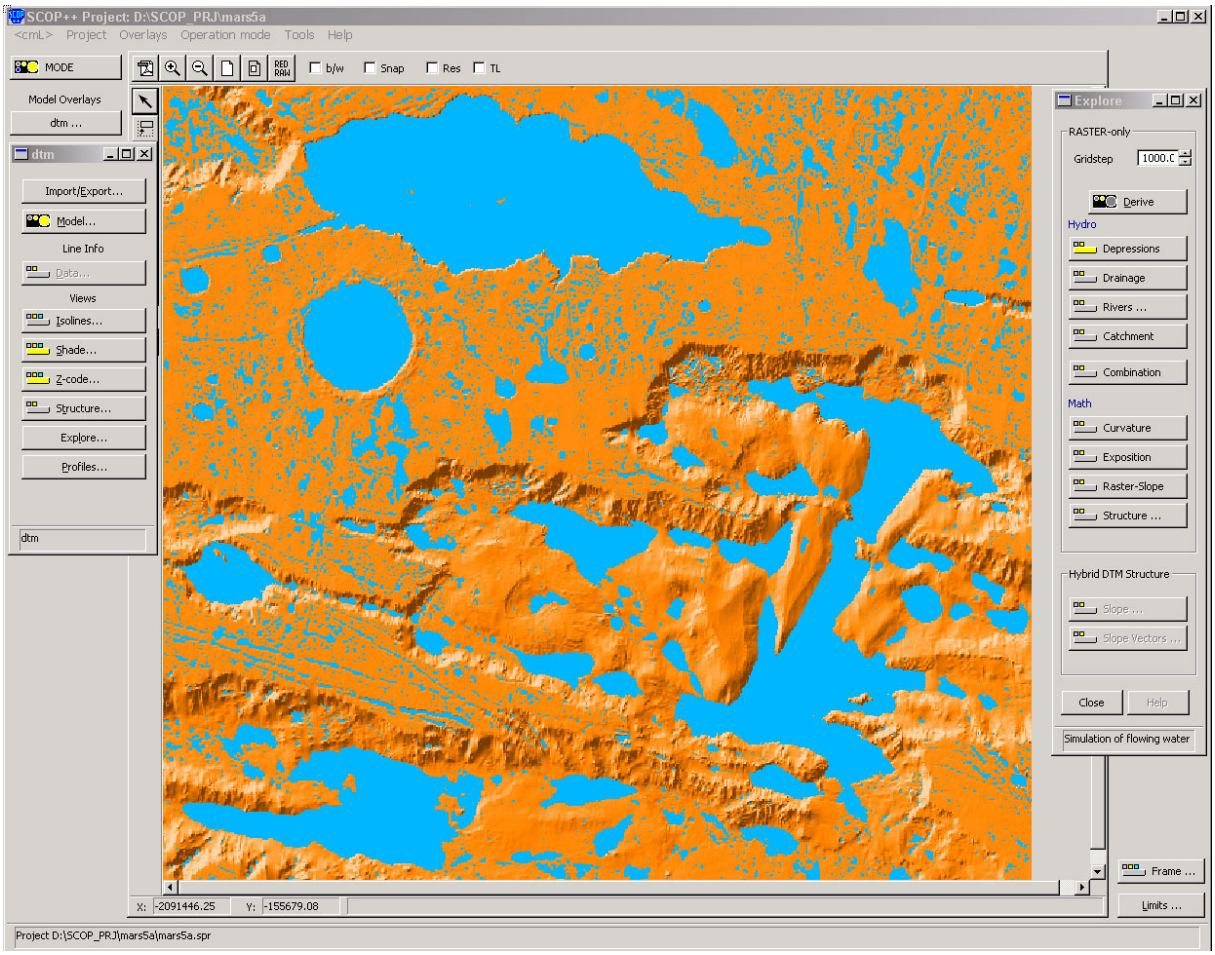


***Abb.7.11**: Die Depressionen (hellblaue Bereiche) auf geschummerten Testgebiet "Valles Marineris".*

Die Analyse (Abb. 7.11) markiert die Gebiete der lokalen Minima im Gelände. Sie können auch als echte Wasserreservoire in der jungen Geschichte des Mars interpretiert werden. Viele Wissenschaftler glauben, dass im Jugendalter des Mars das Wasser nicht unter dem Gelände gefroren wurde, sondern dass es

oberflächlich abfloss, was besonders nach der MOLA-Mission klar geworden ist (Smith et al. 1999; Smith et al. 2000; Aharonson et al. 2002; Stepinski 2003).

7.2.3 Analyse des oberflächigen Abflusses

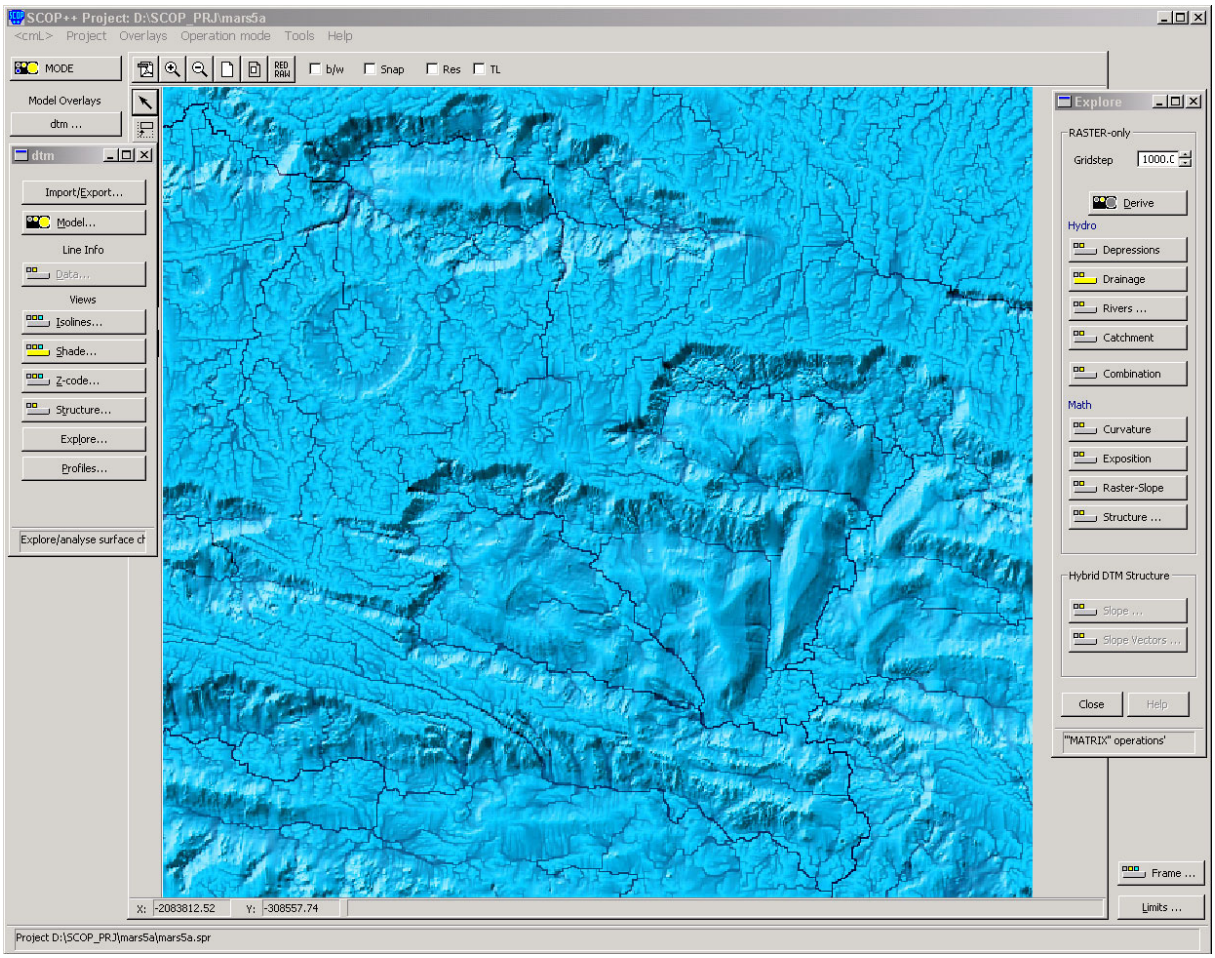


***Abb.7.12**: Der Logarithmus des oberflächigen Durchflusses auf der geschummerten Testgebiet "Valles Marineris". Die dunkleren Bereiche entsprechen dem grösseren Durchfluss.*

Abb. 7.12 stellt die Geländetopologie dar, die durch Schwerkraft sowie vorhandene Geländeform bedingt ist. Alle vorhandenen Muldenpfade sind abgesenkt, damit prägt sich die Geländetopographie auch in abflusslosen Räumen sehr gut aus. Solche Analysen sind besonders hilfsreich, wenn man die Wirkung der geomorphologischen Kräfte - die Erosion und die Deposition - auf die Gestaltung des Geländes untersucht. Der Logarithmus wird als Übertragungsfunktion beim Darstellen von Durchflussmengen benutzt, um sowohl die kleinräumigen als auch die großräumigen Abflussverhältnisse sichtbar zu machen. Damit prägt sich die Geländetopographie auch in relativ flachen Gebieten sehr gut aus, die durch die Höhenverhältnisse allein schwer wahrgenommen werden können (vergl. Abb. 7.10 und 7.12).

7.2.4 Einzugsgebiete und Flüsse

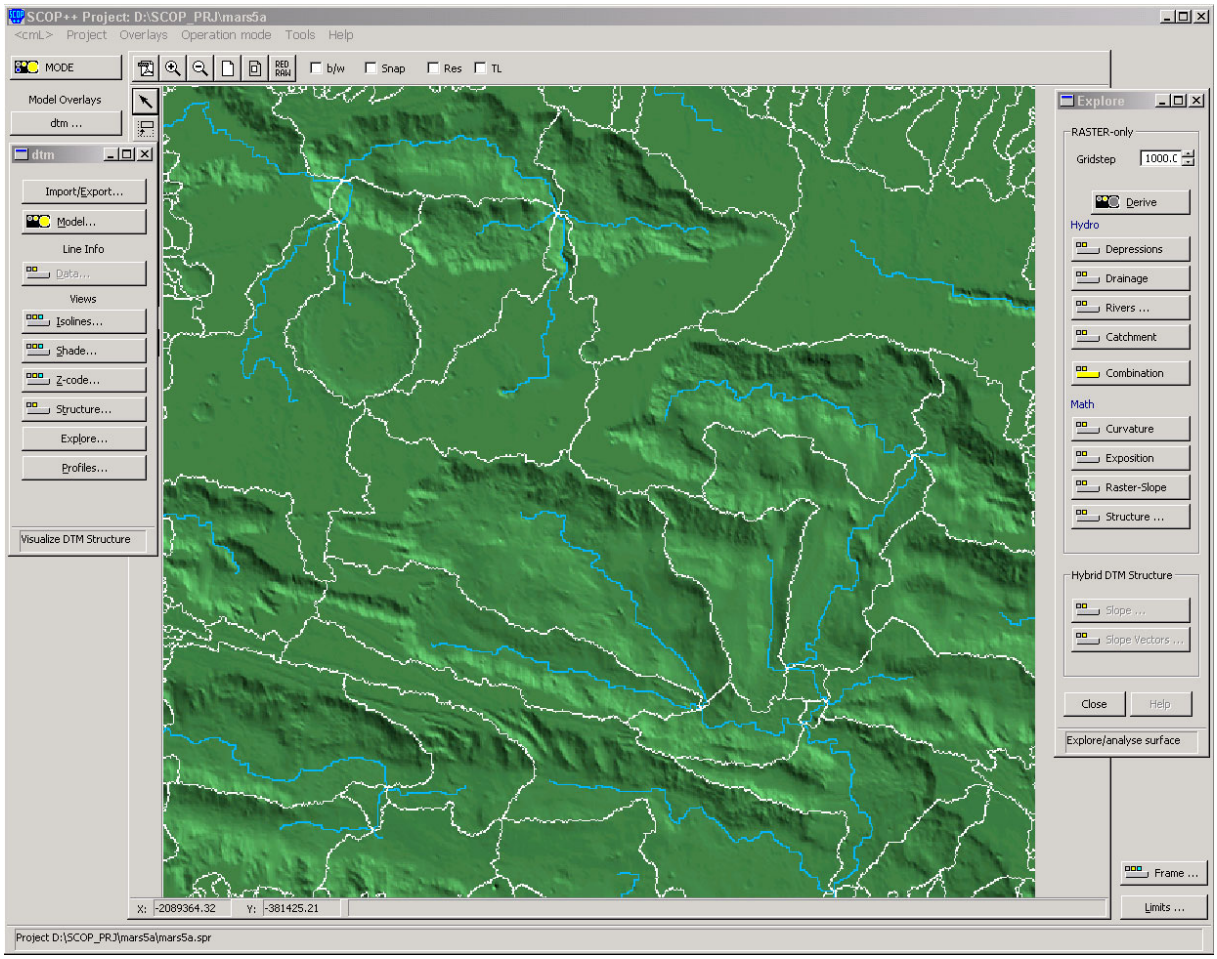


***Abb.7.13**: Die abgeleiteten Einzugsgebietgrenzen (weiss) und Flusse (hell blau) auf geschummerten Testgebiet "Valles Marineris".*

Aufgrund der vorherigen Analyse des oberflächigen Abflusses wurden die Einzugsgebiete sowie potenzielle Flüsse abgeleitet (Abb. 7.13). Das muldenfreie Oberflächenmodell, das diesen Analysen zugrunde liegt, wurde durch Absenken der Muldenpfade erreicht.

Dabei wurden folgende Parameter benutzt:

- die kleinsten Einzugsgebietsgroße: 5000 km^2
- die kleinste Flusslänge: 20 km

Die Einzugsgebiete sind Grundeinheiten für alle hydrologischen Untersuchungen. Die Form und Dichte des abgeleiteten Flussnetzes untersucht man intensiv, um die Hypothese über den fluvialen Einfluss bei der Gestaltung der Marsoberfläche zu bestätigen oder zu verwerfen (Stepinski 2003; Aharonson et al. 2002).

7.2.5 Krümmungen

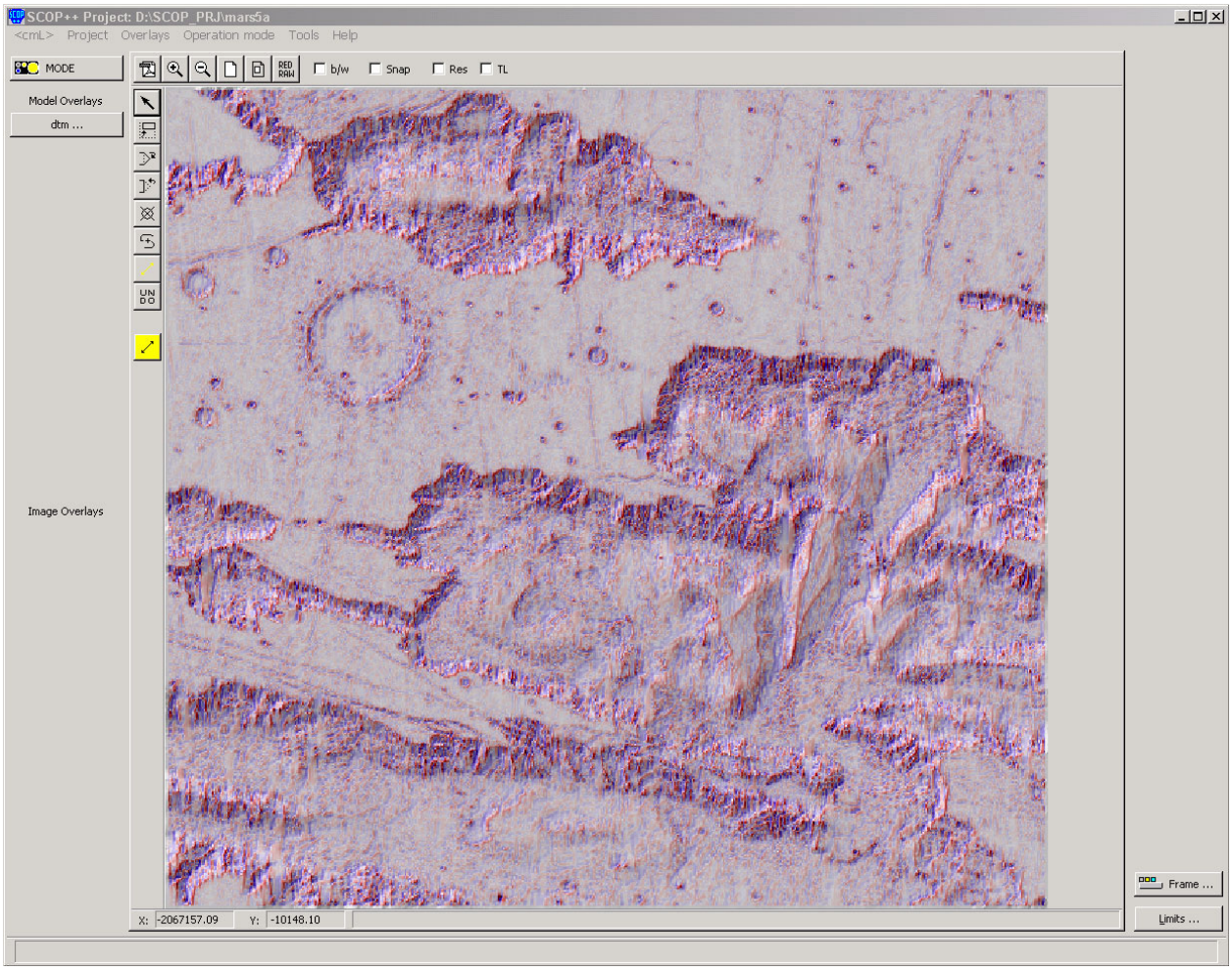


***Abb.7.14**: Die Krümmungen (blau = konkav, rot = konvex) auf geschummertem Testgebiet "Valles Marineris".*

Die Krümmungsanalyse hebt in erster Linie die Geländekanten hervor, soweit sie hinsichtlich der gewählten Rasterweite überhaupt erfassbar sind. Die Analyse ist sehr empfindlich auf kleine lokale Höhenänderungen, sodass man die Rauigkeit des Geländes sehr gut wahrnimmt. Auch die Unzulänglichkeiten bei der Datenbereinigung und Interpolation prägen sich sehr gut aus, besonders in ebenem Gelände (s. Abb. 7.14).

Auf der obigen Darstellung sind die positiven Krümmungswerte durch den blauen und die negativen durch den roten Farbton gekennzeichnet, wobei die Farbsättigung durch den absoluten Krümmungswert moduliert wurde. Der dritte Kanal (Farbintensität) ist unbenutzt geblieben, sodass er mit anderen Ansichten (ModelOverlay-Views) moduliert werden kann (die Schummerung in obiger Darstellung), um die Interpretierbarkeit der Krümmungsanalyse noch zu verbessern.

7.2.6 Ausrichtungen (Exposition)

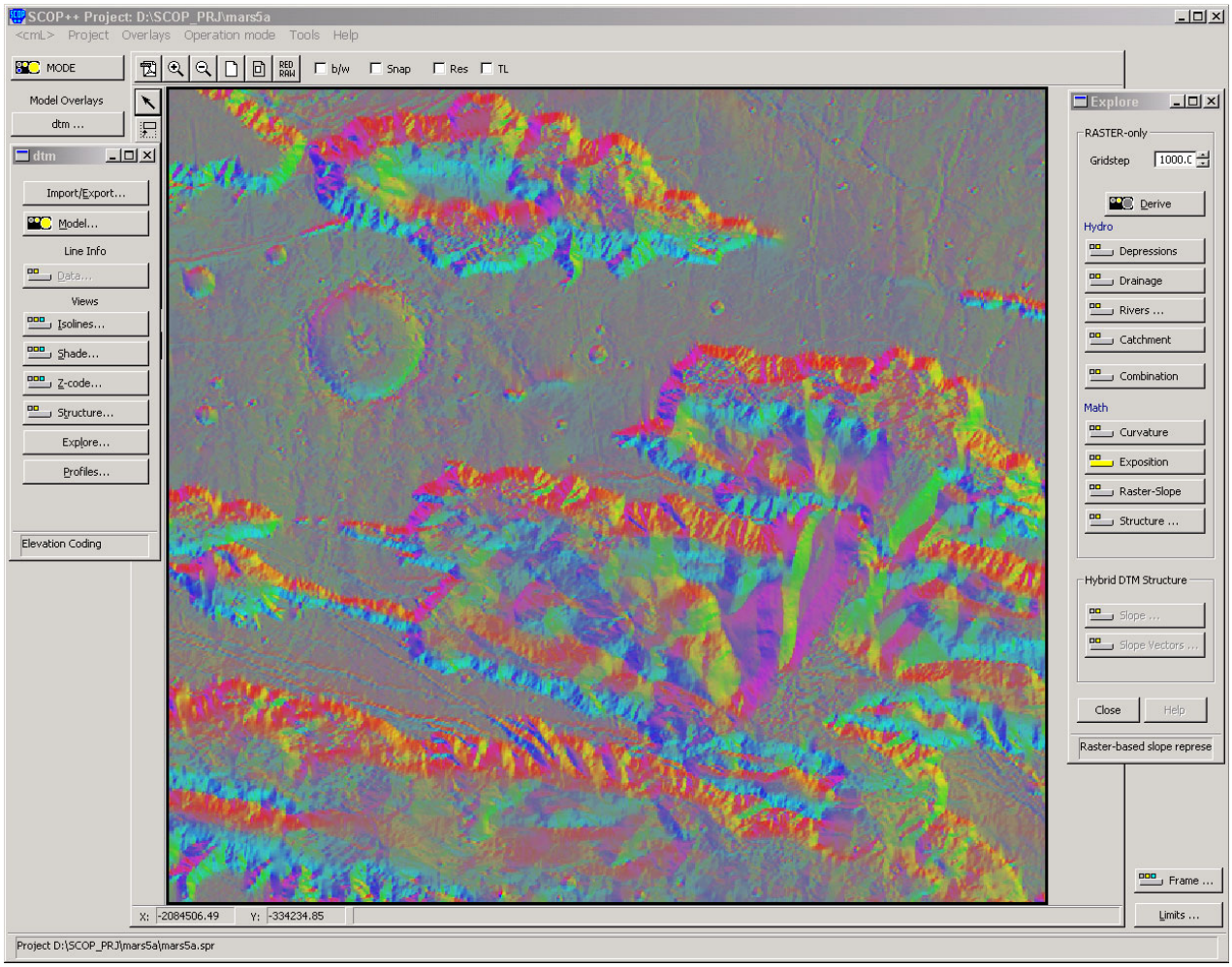


***Abb.7.15**: Die Ausrichtungen (türkis = nach Norden, rot = nach Süden, gelbgrün = nach Westen. violett = nach Osten).*

Die Ausrichtung (Exposition) des Geländes nach den verschiedenen Himmelsrichtungen ist bei der Untersuchung der Einwirkung von äolischen Prozessen sowie Sonnenstrahlung von größter Bedeutung. Die Ausrichtungsänderungen entdecken auch die kleinen Formen, die im Gelände vorhanden sind.

Die Ausrichtungen modulieren die Farbtonskala im vollen Umfang. Damit wird eine sehr gute Auflösung beim Darstellen von Richtungen erreicht. Die Farbsättigung wird durch die Neigungswerte moduliert, sodass die horizontalen Flächen als mittelgrau dargestellt sind, weil ihre Ausrichtung keinen Sinn hat (Abb. 7.15).

7.2.7 Neigungen

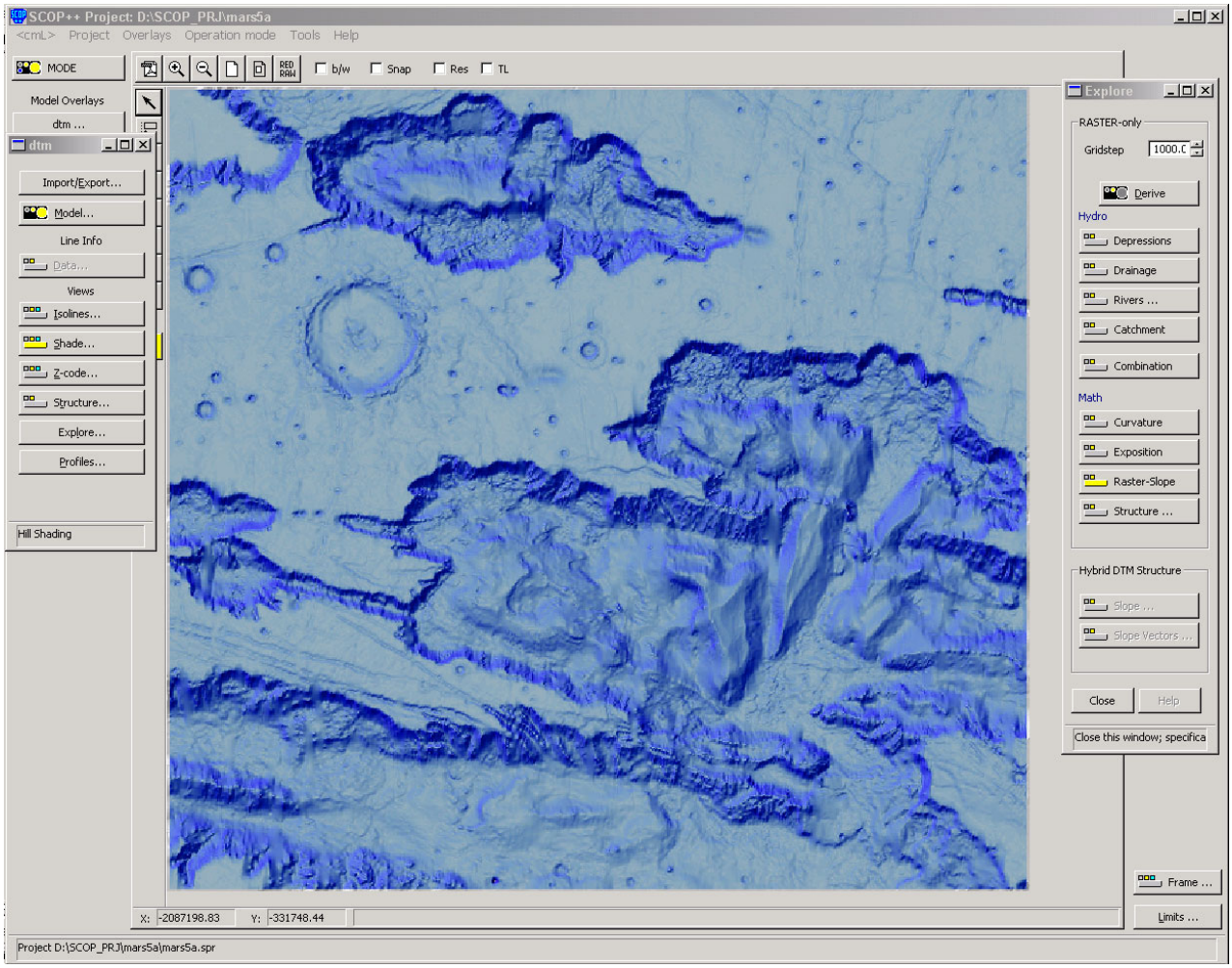


***Abb.7.16**: Die Neigungen (die steilere Bereiche werden durch dunkel blaue Farbe dargestellt).*

Die Neigungswerte sowie ihre räumliche Verteilung stellen das Einwirken von Mechanismen sehr gut dar, die die physiographischen Eigenschaften des Geländes gestalten (Aharonson 2004). Die durch diese Analyse hervorgehobenen Höhenänderungen weisen besonders gut auf alle Oberflächendiskontinuitäten, die im Gelände vorhanden sind.

Auf der obigen Darstellung (Abb. 7.16) wurden die Neigungswerte mit der Intensität der blauen Farbe moduliert, sodass mit dunkler Farbe die steilen Bereiche hervorgehoben sind.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit befasst sich mit der rasterbasierten Geländeoberflächenanalyse von digitalen Geländemodellen, insbesondere von Geländemodellen, die vom flugzeuggetragenen Laserscanning stammen. Das flugzeuggetragene Laserscanning ist inzwischen das herausragende Verfahren zur Datenerfassung für sehr genaue Geländemodelle, vor allem in bewaldeten und bebauten Gebieten. Es gibt aber auch einige Schwächen des flugzeuggetragenen Laserscannings, die von der Geomorphologie des Geländes abhängen. Kritische Bereiche sind vor allem Täler mit dichter (und niedriger) Strauchvegetation, weil einerseits in solchen Bereichen die Datenerfassung stark beeinträchtigt ist und andererseits für die Elimination (Filterung) der Laserpunkte auch beziehungsweise in der Vegetation keine guten Voraussetzungen gegeben sind. Das Erkennen dieser Unzulänglichkeiten und das Erarbeiten von Methoden zu ihrer Behebung war die Hauptmotivation für diese Arbeit.

Die eingeschlagene Konzeption geht davon aus, dass die Form der Geländeoberfläche durch geomorphologische Prozesse dynamisch gestaltet wird. Vor diesem Hintergrund können unerwartete geomorphologische Geländeformen definiert und mit Methoden der Geländeoberflächenanalyse in digitalen Geländemodellen detektiert werden. Anschließend können die unerwarteten geomorphologischen Geländeformen in digitale Geländemodell überarbeitet und in realistischere Oberflächenformen überfuhrt werden.

Für die Oberflächenanalyse haben rasterbasierte Methoden große Vorteile; sie sind sehr effizient und erlauben attraktive Visualisierungen; sie können auf das große Methodenangebot der digitalen Bildverarbeitung zurückgreifen. In dieser Arbeit wird auf rasterbasierte Oberflächenanalysen eingegangen, die auf morphometrischen und hydrologischen Gesetzen beruhen.

Die hydrologisch basierte Oberflächenanalyse wird in Gebieten angewandt, die durch überwiegend fluviale Prozesse entstanden sind. Das unzulängliche Geländemodell wird (künstlich) beregnet und der Wasserabfluss wird modelliert. Das Ergebnis sind vor allem

- Flussläufe, die als Strukturlinien in einem erneuten Modellierungsprozess einbezogen werden, und
- abflusslose Räume (Mulden), die durch Absenken der sogenannten Muldenpfade beseitigt und hydrologisch plausibel gestaltet werden.

Mit terrestrisch eingemessenen Kontrollpunkten konnte auch eine beachtliche Steigerung der absoluten Höhengenauigkeit festgestellt werden.

Zusätzlich zum Testgebiet "Wienerwald", ein typisch fluvial gestaltetes Gelände, wurden die Methoden auch auf der Marsoberfläche im Gebiet des Vallis Marineris, dem größten Grabensystem am Mars, angewandt. Die Marsdaten stammen von der NASA-Mission MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter). Die hydrologischen und morphometrischen Analyseergebnisse geben detailliert Aufschluss über die Oberflächentopographie des Planeten Mars. Ihre Visualisierungen sind besonders attraktiv. Die erzielten Ergebnisse stehen nun für wissenschaftliche Untersuchungen der geologischen und klimatischen Geschichte des Planeten Mars zur Verfügung.

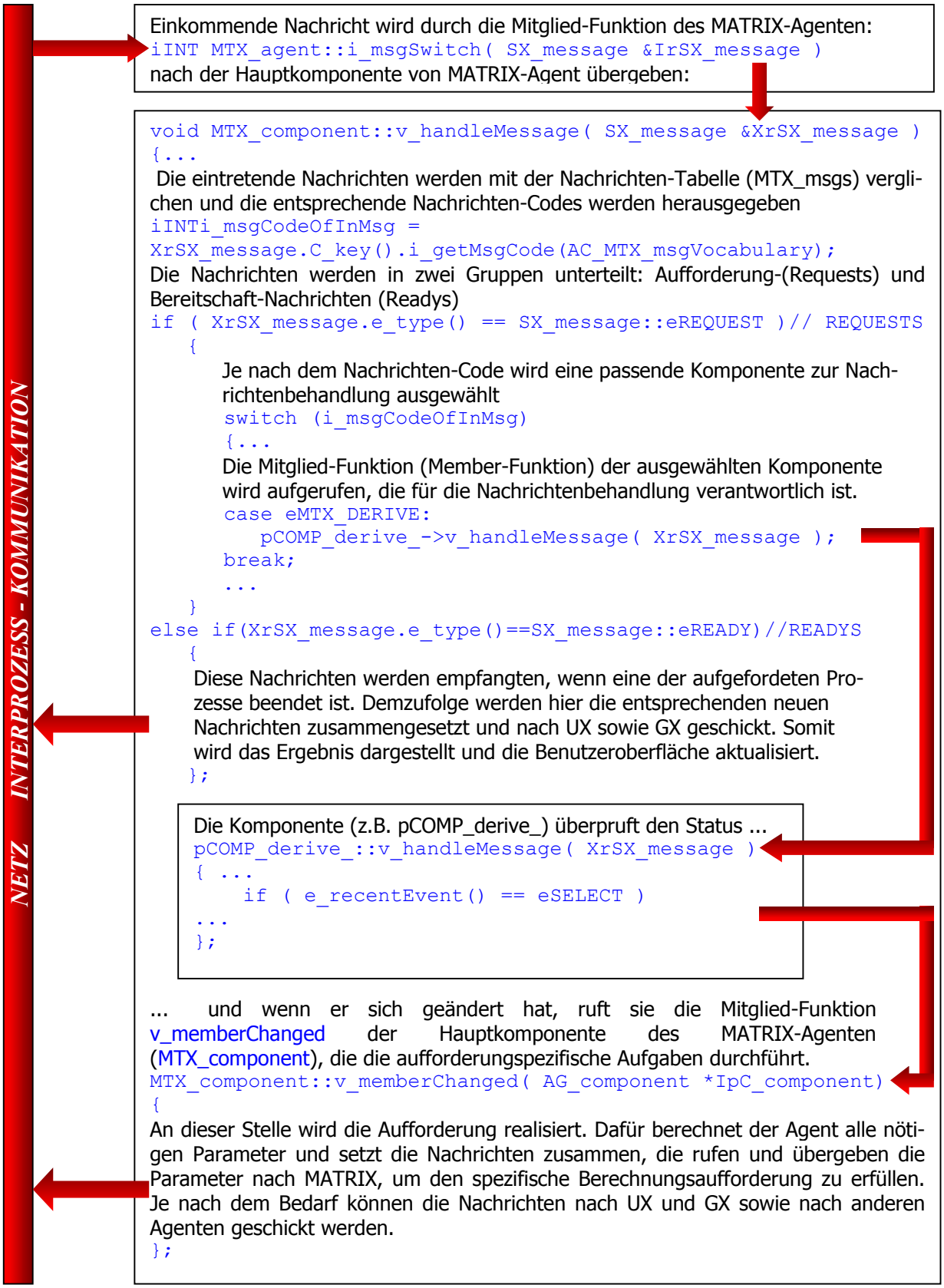
Die Implementierung der erarbeiteten Methoden wurde im Geländemodell-Programmpaket SCOP++ vorgenommen. Dieses Programmpaket besitzt einen universellen Applikationsrahmen, mit dem die SCOP-Basissoftware verhältnismäßig leicht um ergänzende und neue Algorithmen erweitert werden kann.

Das SCOP-Geländemodell hat eine hybride Datenstruktur, das heisst, in Rasterdaten sind Vektordaten integriert. Mit einer solchen Datenstruktur können sehr hochwertige Oberflächen modelliert werden. In Zukunft sollen die in dieser Arbeit enthaltenen Oberflächenanalysen noch mehr als bisher auf die hybride Datenstruktur Rücksicht nehmen. Auch die Gestaltung der abzusenkenden Muldenpfade (Abb. 7.2) ist noch genauer zu untersuchen.

Die Filtermethoden zur Elimination von Laserpunkten auf Gebäuden und auf bzw. in Bäumen können in Zukunft ebenfalls von der Oberflächenanalyse profitieren. Mit der Oberflächenanalyse können nämlich Gebiete (Regionen) mit ähnlichen geomorphologischen Eigenschaften abgegrenzt werden und anschließend können für die einzelnen Regionen individuelle Parameter für die Interpolation und Filterung ausgewählt werden.

Schließlich soll noch erwähnt werden, dass eine Verzahnung der erarbeiteten Methoden mit den Problemstellungen der Nachbardisziplinen, für die die Geomorphologie eine zentrale Bedeutung hat, wahrscheinlich große Synergieeffekte ergeben wird.

Anhang 1: Das generalisierte Schema des Nachrichtendurchgangs durch den MATRIX-Agenten



Die rote Pfeilen stellen die Nachrichten-Routen dar

LITERATURVERZEICHNISS:

Aharonson, O., Zuber, M., Rothman, D., Schorghofer, N., Whipple, K., 2002. **Drainage Basins and channel incision on Mars**. http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/tharsis/aharonson2002_pnas.pdf

Aharonson, O., Zuber, M., Rothman, D., 2004. **Statistics of Mars' Topography from the Mars Orbiter Laser Altimeter: Slopes, Correlations, and physical Models**. http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/tharsis/aharonson_ip.pdf

Andersen, H.-E., Reutebuch, S., Schreuder, G., 2003. **Automated individual tree mesaurement through morphological analysis of a LIDAR-based canopy surface model**, http://www.cfr.washington.edu/Outreach/ Postprefor/Anderson%20final.PDF

Ardiansyah, P.O.D., and Yokoyama, R., 2002. **DEM Generation method from contour lines based on the steepest slope segment chain and monotone interpolation function**. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 57, 1-2(2002), 86-101.

Baltsavias, E., P., 1999. **Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources**, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 (1999), Pg. 164-198

Baltsavias, E., P., 1999. **Airborne laser scanning: basic relations and formulas**, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 (1999), Pg. 199-214

Bauer, J., Rohdenburg, H., Bork, H.-R. 1985. **Ein Digitales Reliefmodell als Voraussetzung für ein deterministisches Modell der Wasser- und Stoff-Flüsse**, in: Bork, H.-R. & Rohdenburg, H., Parameteraufbereitung für deterministische Gebiets-Wassermodelle, Grundlagenarbeiten zur Analyse von Agrar-Ökosystem, Landschaftsgenese und Landschaftsökologie, Braunschweig, H.10, S1-15.

Bolch, T., Brenning, A., 2001. **Einführung in die Digitale Reliefanalyse und Geomorphometrie**. *http://www.geographie.uni-erlangen.de/tbolch/lehre/dgm/ dgmsl191201.pdf*

Briese, C., Pfeifer, N., Reiter, T., Rieger, W., 2000. **Interpolation of high quality ground models from laser scanner data in forested areas**. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS Workshop, Vol. 32, Part 3-W14, La Jolla, California, 9.-11. November 1999, S. 31-36

Briese, C., Kraus, K., Mandlburger, G., Pfeifer, N., 2001. **Einsatzmöglichkeiten der flugzeuggetragenen Laser-Scanner**. Tagungsband der 11. Internationalen Geodätischen Woche in Obergurgl, 2001, Hrsg.: Institut für Geodäsie der Universität Innsbruck, Institutsmitteilungen, Heft 19, 2001, S. 17 - 26.

Briese, C., Pfeifer, N., Dorninger, P., 2002. **Applications of robust interpolation for DTM determination**. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV, 3A, Graz, Austria, pp. 55-61.

Burrough, P.A. 1986. **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assesment**. Oxford: Clarendon Press.

Chorowicz, J., Ichoku, C., Riazanoff, S., Kim, Y.J., Cervell, B., 1992. **A combined algorithm for automated drainage network extraction**, Water Resources Research, Bd.7, Nr.2, S.419-429.

Conrad, O. 1998. **Derivation of Hydrologically Significant Parameters from Digital Terrain Models'**, Diplomarbeit an der Institut für physische Geographie, Universität zu Göttingen, http://www.geogr.uni-goettingen.de/pg/saga/digem/download/ diplom1.pdf

Conrad, O. 2002. **DiGeM - A Program For Digital Terrain Analysis**, http://www.geogr.uni-goettingen.de/pg/saga/digem/home.html

Degnan, J., McGarry, J., Zagwodzki, T., Dabney, P., Geiger, J. 2001. **Design and performance of an airborne multikilohertz photon-counting microlaser altimeter**, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXXIV-3/W4. 9-16, 2001.

Dunn, M. and R. Hickey, 1998, **The Effect of Slope Algorithms on Slope Estimates within a GIS**. Cartography, v. 27, no. 1, pp. 9 – 15.

Dupéret A. (2002): **Automatic derivation of a DTM to produce contour lines**, http://phot.epfl.ch/workshop/wks96/art_3_2.html

Dorffner, L., Mandlburger, G., Molnar, L., Wintner, J., Wöhrer, B., 2004. **Geländemodelltechnologien – Forschung und Weiterentwicklung am IPF**. http://www.ipf.tuwien.ac.at/publications/ipf_p_igwo99/ipf_p_igwo99.html

Dorninger, P., Briese, Ch., Jansa, J., Mandlburger, G., 2003. **Modellierung der Marsoberfläche aus Laserscanner Daten**. http://www.ipf.tuwien.ac.at/MarsExpress/docs/obergurgl03/article0302.pdf

Dorninger, P., 2003. **Analyse und geomorphologische Verbesserung von Geländemodellen mittels Regensimulation**. http://www.ipf.tuwien.ac.at/MarsExpress/docs/hlls03/article0309.pdf

El-Sheimy N. (1999): **Digital Terrain Modelling**, http://www.geomatics.ucalgary.ca/~nel-shei/lecture.htm

Etzelmüller, B., Sulebak, J. R. 2000. **Developments in the use of digital elevation models in periglacial geomorphology and glaciology**. http://www.geo.uio.no/geogr/geomatikk/ ressurser/etzelmuller_et_sulebak.pdf

Evans, I.S., 1972. **General Geomorphometry, derivations of altitude and descriptive statistics**, in: Chorley, R.J., ed., Spatial analysis in geomorphology, London S.17-91

Fairfield, J., Leymarie, P., 1991. **Drainage networks from grid digital elevation models**, Water resources research, Bd. 27, Nr. 5., S. 709-717

Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn 2000. **Das Relief - eine strukturierte und veränderliche Grenzfläche**, Antrag des Graduiertenkollegs der deutschen Forschungsgemeinschaft

Freeman, T.G., 1991. **Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid**, Computers and Geoscience, Bd.17, Nr.3, S.413-422.

Gallant, J.C. & Wilson, J.P., 2000. **Primary topographic attributes**. In: J.P. Wilson and J.C. Gallant (Editors), Terrain Analysis: Principles and Application. John Wiley and Sons

Gräbe, H.G., Schumacher, F., 2003. **Component Ware und Web-Services**. Vorlesungsfolien. http://ais.informatik.uni-leipzig.de/studium/vorlesungen/2003_ws/cw/2003w_cw_v_01.pdf

Guo, T., Yoshifumi, Y., 2002. **Combining high resolution satellite imagery and airborne Laser Scanning data for generating bareland DEM in urban areas**, In Proceedings of the 29th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Buenos Aires

Hake, G., Grünreich, D., 1994. **Kartographie**, Verlag: Walter de Gruyter & Co., Berlin, 1994

Hickey, R., 2000, **Slope Angle and Slope Length Solutions for GIS**. Cartography, v. 29, no. 1, pp. 1 - 8. http://www.cwu.edu/~rhickey/slope/hickey_slope_length.pdf

Heitzinger, D., Kager, H., 2001. **High Quality DTMs from Contourlines by knowledge-based classification of problem regions**. In: *ISPRS Proceedings of the International Symposium on "GIS – Between Visions and Applications"*, Commision IV, Stuttgart.

Hijazi, J., 2000. **Elevation extraction from satellite data using PCI software** http://www.pcigeomatics.com/support_center/ tech_papers/symposium_paper2.pdf

HOFMANN, W. 1986. **Wieder einmal: Das Digitale Gelände-/Höhenmodell**. In: Bildmessung u. Luftbildwesen, 54 (1): 31-31; Karlsruhe.

Hyungtae, K., Yongil, K., Woosung, C., Jeonghun, S., 2003. **The fusion of photogrammetric image and laser scanning data**, http://spins.snu.ac.kr/research_frame/pdf/

Jenson, S.K., Domingue, J.O., 1988. **Extracting topographic structure form digital elevation data for geographic informations system analysis**, Computer Graphics and Image Processing, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Bd.54, Nr.11, S. 1593-1600

Kidner, D, Dorey, M., Smith, D. 1999. **What's the point? Interpolation and extrapolation with a regular grid DEM**, Geocomputation, 1999, http://www.geovista.psu.edu/sites/ geocomp99/Gc99/082/pres_082.ppt

Kilian, J., Haala, N., Englich, M., 1996. **Capture and evaluation of airborne laser scanner data**. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXI, Part B3, S. 383-388, Wien, Österreich

Kleefisch, B., Köthe, R., 1993. **Wege zur rechnergestützten bodenkundlichen Interpretation digitaler Reliefdaten**, Geologisches Jahrbuch Bd. 27, S. 59-122

Knorr, F. 2003. **Airborn-Laser-Scanning,** http://www.vermessung.uni-essen.de/Airborne-Laser-Scanning.PDF

Köthe, R., 2000. **Definitionen DGM, DHM, etc**.
http://www.scilands.de/service/faq/definitionen_dgm/definitionen_dgm.htm

Kraus, K. 1997. **Eine neue Methode zur Interpolation und Filterung von Daten mit schiefer Fehlerverteilung**. Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation 85 (1), S. 25-30

Kraus, K., Hynst, E., Belada, P., Reiter, T. 1997. **Topographische Daten in bewaldeten Gebieten– Ein Pilotprojekt mit Laser-Scanner-Daten**. Österreichische Zeitschrift für Vermessung undGeoinformation, Heft 3, 1997, S. 165-181.

Kraus, K. 1988. **Fernerkundung**, Band 1, Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken, Ferdinand Dümmlers Verlag, Bonn 1988.

Kraus, K. 2000. **Photogrammetrie**, Band 3 (Topographische Informationsysteme) 1. Aufl., 419 S., Dümmler Verlag, Köln.

Kraus, K., Pfeifer, N., 2001. **Advanced DTM Generation from Lidar Data**. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume XXXIV-3/W4, Annapolis, Maryland, 22. - 24. October, 2001, pp 23-30.

Kraus, K., 2002. **Laser-Scanning – Ein Paradigma-Wechsel in der Photogrammetrie**
http://www.ipf.tuwien.ac.at/publications/ kk_konstanz01/Laser-Scanning.htm

Kraus, K., Pfeiffer, N., 1998. **Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing vol. 53, Pg. 193-203

Li, R., 1997. **Potential of high-resolution satellite imagery for national mapping products**
http://shoreline.eng.ohio-state.edu/ron/teaching/787/paper3.htm

Liang, C., Mackay, D.S. 2000. **A general model of watershed extraction and representation using globally optimal flow paths and up-slope contributing areas**. IJGIS, vol.14, No. 4, 337-358

Lin, Y., 2003. **Morphologische Bildverarbeitung**, Proseminar Computer-Vision-SS2003, Uni Ulm,
http://www.informatik.uni-ulm.de/ ni/Lehre/SS03/ProSemCV/pdfs/ylin.pdf

Lea, N.L. 1992. **An aspect driven kinematic routing algorithm**. In: Parsons, A.J. & Abrahams, A.D.: Overland flow: hydraulics and erosion mechanics, London, S. 147-175.

Marks, D., Dozier, J., Frew, J., 1984. **Automated basin delineation from digital elevation data**. Geo-Processing, 2, 299-311
Martz, L.W., De Jong, E., 1988. **Catch: a FORTRAN program for measuring catchment area from digital elevation models**, Computers and Geoscience, Bd.14, Nr.5, S.627-640

McAllister, M., 2004. **A Watersched Algorithm for Triangulated Terrains**, http://citeseer.nj.nec.com/cache/papers/cs/11530/a-watershed-algorithm-for.pdf

Mitasova H. and Hofierka J. 1993. **Interpolation by Regularized Spline with Tension**: II. Aplication to terrain modeling and surface geometry analyisis. Mathematical Geology 25, 657-669.

Molnar, L., 1992. **Principles For a New Edition of the Digital Elevation Modelling System SCOP**. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Commision IV, Washington D.C., 1992.

Molnar, L., Wintner, J., Wöhrer,B. 1996. **DTM System SCOP in a Technological Generation.** International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume XXXI,Part B4, Vienna, 1996, S. 569 - 574.

Molnar, L., 1998. **SCOP.DTM V5.0/XX Programmers Guide**, Internal Draft, IPF TU Wien, 1998.

Moore, I.D., Grayson, R.B., Ladson, A.R. 1992.: **Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological and biological applications**, Hydrological Processes, Band 5, S.7-35

Neukum, G., HRSC-Team Berlin, 2001. **The airborne HRSC-AX cameras: evaluation of the technical concept and presentation of application results after one year of operations,** Photogrammetric Week 01, Eds. D.Fritch & R. Spiller, Wichmann Verlag, Heidelberg 2001.

Neukum, G., 2003. **The high resolution stereo camera (HRSC) experiment onboard the european Mars Express (MEX) Mission**, Geophysical Research Abstracts, Vol. 5., 07371, 2003, http://www.cosis.net/abstracts/EAE03/07371/EAE03-J-07371.pdf

O'Callaghan, J.F., Mark, D.M., 1984. **The extraction of drainage networks from digital elevation data**, Computer Vision, Graphics and Image Processing, Bd.28, Nr.3/4. S.323-344

Peucker, T.K., Fowler, R.J., Little, J.J., 1978. **The triangulated irregular network**, Proceedings - Auto Carto III, S.516-540

Peucker, T., Fowler, R., Little, J., and Mark, D. 1978. **The Triangulated Irregular Network**, proceedings of the Digital Terrain Models Symposium, St. Louis, Missouri.

Peucker, T.K., Douglas, D.H., 1975. **Detection of surface-specific points by parallel processing of discrete terrain elevation data**, Computer graphics and image processing, Bd.4, S.375-387.

Petrie, G., 1999. **High resolution space imagery**, Survey Ireland, No. 16, 1999 http://web.geog.gla.ac.uk/~gpetrie/si16_6.pdf

Pike, R., 2002. **A Bibliography of Terrain Modelling (Geomorphometry), the quantitative representation of Topography** - Supplement 4.0, http://geopubs.wr.usgs.gov/open-file/of02-465/of02-465.pdf

Prati, C., Rocca, F., 1994. **An overview of SAR interferometry**, http://earth.esa.int/symposia/ program-details/speeches/rocca-et-al/

Qiming, Z., 2003. **Digital Terrain Modelling**, http://geog.hkbu.edu.hk/geog3600/Lect-09.pdf

Renaudin, E., 2000. **Evaluation of DEMs from SAR Interferometry and SPOT stereoscopy for Remote Sensing Applications**, Diplomarbeit, Institute for Geodesy and Photogrammetry, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich 2000.

Rieger, W., 1992. **Hydrologische Anwendungen des digitalen Geländemodelles**. Dissertation, Geowissenschäftliche Mitteilungen Heft 39, TU Wien

Rieger, W., 1998. **A phenomenon-based approach to upslope contributing area and depressions in DEMs**. Hydrological Processes, 12, 857-872

Ryan, C., Boyd, M. J. 2002. **Automated catchment parameterisation for runoff routing models utilising 3D GIS contour information,**
http://www.uow.edu.au/~cjr03/Publications/PDFFiles/2002HydroInformaticsConfPaper.pdf

Schaffer, M., 1999. **Filterung von Laser-Scanner-Aufnahmen** – Diplomarbeit, Institut fur Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen, Universitat Hannover.

Schiewe, J., 2000. **Improving the integration of digital surface models**
http://www.iuw.uni-vechta.de/personal/ geoinf/jochen/docus/schiewe-isprs00.pdf

Shary, P., 2002. **Quantitative methods of land surface analysis and their applications**,
http://members.fortunecity.com/eco4/research_shary/

Slingsby, A., 2003. An object-oriented approach to hydrological modelling using triangular irregular networks. Proceedings of GISRUK03, City University, London, UK.
http://www.casa.ucl.ac.uk/aidan/tinmod/slingsby_gisruk.pdf

Smith, D., Zuber, M., Solomon, S., Phillips, R., Head, J., Garwin, J., Banerdt, B., Muhleman, D., Pettengill, G., Neumann, G., Lemoine, F., Abshire, J., Aharonson, O., Brown, D., Hauck, S., Ivanov, A., McGovern, P., Zwally, J., Duxbury T., 1999. **The Global Topography of Mars and Implications for Surface Evolution**.
http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/tharsis/mola.global.pdf

Smith, D., Zuber, M., Frey, H., Garwin, J., Head, J., Muhleman, D., Pettengill, G., Phillips, R., Solomon, S., Zwally, J., Banerdt, B., Duxbury, T., Golombek, M., Lemoine, F., Neumann, G., Rowlands, D., Ahoronson, O., Ford, P., Ivanov, A., Johnson, C., McGovern, P., Abshier, J., Afzal, R., Sun, X., 2000. **Mars Orbiter Laser Altimeter: Experiment summary after the first year of global mapping of Mars**.
http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/tharsis/mola.summary.pdf

Stepinski, T.F., 2003. **Drainage densities of computationally extracted martian drainage basins**.
http://www.lpi.usra.edu/meetings/sixthmars2003/pdf/3100.pdf

Tarboton, D., 1997. **A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models**, Water Resources Research, 33(2), 309-319, American Geophysical Union,
http://www.engineering.usu.edu/cee/faculty/dtarb/dinf.pdf

Tempfli, K. 1982. **Genauigkeitsschätzung digitaler Höhenmodelle mittels Spektralanalyse**, Disertation, IPF TU Wien, in Geowissenschaftliche Mitteilungen, Heft 22, Mai 1982

Tucker, G.E., Lancaster S.T., Gasparini N.M., Bras, R.L., Rybarczyk, S.M. 1999. **An Object-Oriented Framework for Distributed Hydrologic and Geomorphic Modeling Using Triangular Irregular Networks**, Submitted to Computers and Geosciences, Special Issue on Geocomputation, Revised manuscript, September 1999.
http://citeseer.nj.nec.com/cache/papers/cs/1666/an-object-oriented-framework.pdf

Wilson, J.P., Gallant, J.C. 2000. **Terrain Analysis – Principles and Applications**, John Wiley & Sons, Ltd., New York, 303 pp.

Wehr, A., Lohr, U. 1999. **Airborne Laser Scanning – an introduction and overview**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54. 68-82.

Wever, C., 2002. **Airborne Laser Scanning - Verfahren und Genauigkeiten**, Vortrag, "Laserscanning - ein Verfahren zur Erfassung von hochgenauen Oberflächenmodellen, Fachforum VoGIS, Feldkirch, September 2002

Wood, J., 1996: **The geomorphological characterization of digital elevation models**. PhD Thesis, http://www.soi.city.ac.uk/~jwo/phd/

Zevenbergen, L.W. and Thorne C.R., 1987. **Quantitative analysis of land surface topography**. Earth Surface Process and Landforms, Vol. 12, pp 47-56

Zhang, K., Chen, S., Whitman, D., Shyu, M., Yan, J., Zhang, C., 2002. **A Progressive morphological filter for removing non-ground measurements from airborne lidar data**, Journal of LaTEX class files, vol. 1, no. 8

Web Links:

URL1: http://www.uni-muenster.de/Physik/PI/Hanne/LASER/Laser3.pdf

URL2: http://www.2piweb.physik.rwth-aachen.de/prak/anleit/vers211a.pdf

URL3: http://www.riegl.com/principles/

URL 4: http://www.ce.ufl.edu/nsf/Presentations/ Bill Carter/Carter.ppt

URL 5: http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/ltp/2001_annual_report/4_laserinst.pdf

URL 6: http://www.ipi.uni-hannover.de/html/lehre/ lehrveranstaltungen/scripte/laserbasics.pdf

URL 7: http://www.altm.com/altmprods.htm

URL 8: http://www.vorarlberg.at/pdf/toposyslaserscanningtechn.pdf

URL 9: http://www.altm.com/pdf/ALTM3070_Specs.pdf

URL 10: http://www.toposys.at/system/system_haupt.htm

URL 11 http://www.vorarlberg.at/pdf/toposyslaserscanningtechn.pdf

URL 12 http://www.toposys.de/toposys-de/ lidar-systems/toposys-falcon.php

URL 13 http://terra.geomatics.kth.se/ ~fotogram/OEEPE/laser_technology.PDF

URL 14: http://ipga.phys.ucl.ac.uk/papers/morph.pdf

URL 15: http://www.icg.tu-graz.ac.at/~Education/Vorlesung/BVMU_VO/WS2003/vo10_03.pdf

URL 16 http://members.fortunecity.com/flor/kv.htm

URL 17 http://members.fortunecity.com/flor/evans.htm

URL 18 http://www.omega-art.com/math/Omega Art

Curriculum Vitae

Name: Dipl.-Ing. Dubravko Gajski

Geboren am 15. Januar 1968 in Zagreb, Kroatien

1974 - 1982	Grundschule
1982 -1987	Mittlere Schule
Juni 1987	Abitur
Okt. 1987 - Okt. 1988	Ableistung des Wehrdienstes
1988-1994	Studium des Vermessungswesens an der geodätischen Fakultät der Zagreber Universität
Mai 1994	Diplomprüfung
1994 - 1996	Forschungsassistent am Institut für Photogrammetrie - Universität Zagreb
Seit 1996	Universitätsassistent am Institut für Photogrammetrie - Universität Zagreb
Seit Oktober 1998	Doktorstudium an der TU Wien